

# A polimertechnika alapjai

Czvikovszky Tibor

Egyetemi tanár, Polimertechnika Tanszék (BME)

Egyetemi tanár

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Polimertechnika Tanszék

Nagy Péter

Egyetemi adjunktus, Polimertechnika Tanszék (BME)

Egyetemi adjunktus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Polimertechnika Tanszék

Gaál János

Egyetemi adjunktus, Polimertechnika Tanszék (BME)

Egyetemi adjunktus

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Polimertechnika Tanszék

Copyright © 2007 Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János

2007

---

## Tartalom

### [Előszó](#)

### [A POLIMERTECHNIKA MINT MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNY](#)

#### [1.1 Mi a polimer?](#)

#### [1.2 A polimertechnika alapfogalmai](#)

#### [1.3 A polimertechnika korai fejlődése](#)

#### [1.4 A szerkezeti anyagok együttes fejlődése](#)

#### [1.5 Szakirodalom](#)

### [A POLIMEREK GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPJAI](#)

#### [2.1 A polimerlánc kötési energiája a fémekkel összehasonlításban](#)

#### [2.2 A polimerlánc kialakítása polimerizációs láncreakcióban](#)

##### [2.2.1 A polimerizációs láncreakció főbb jellemzői](#)

##### [2.2.2 A polimerizációs láncreakció exoterm jellege](#)

##### [2.2.3 A polimerizáció kinetikája, folyamatszabályozása](#)

##### [2.2.4 A polimerizáció műveleti megvalósítási módjai](#)

##### [2.2.5 A polimerizáció technológiájának gépészeti berendezései](#)

#### [2.3 A polikondenzáció technikája](#)

##### [2.3.1 A polikondenzáció folyamatszabályozása](#)

##### [2.3.2 A polikondenzáció gépészeti berendezései](#)

#### [2.4 A poliaddíció, mint polimerlánc gyártási technológia](#)

#### [2.5 Szakirodalom](#)

### [A MŰSZAKI CÉLÚ POLIMEREK TECHNOLÓGIAI CSOPORTOSÍTÁSA](#)

#### [3.1 Hőre lágyuló és térhálós polimerek](#)

#### [3.2 Kristályos és amorf hőre lágyuló polimerek, elasztomer és duromer polimerek dinamikus mechanikai analízise és feldolgozástechnikája közti kapcsolat](#)

### 3.3 Szakirodalom

## A POLIMERTECHNIKA LEGFONTOSABB ALAPANYAGAI

### 4.1 A tömeggyártás polimerjei

#### 4.1.1 Kristályos, hőre lágyuló polimerek

#### 4.1.2 Amorf, hőre lágyuló polimerek

#### 4.1.3 Ritka térhálós polimerek (elasztomerek)

#### 4.1.4 Sűrű térhálós polimerek (duromerek)

### 4.2 Különleges műszaki polimerek

#### 4.2.1 A fluorpolimerek családja

#### 4.2.2 Polisziloxánok

#### 4.2.3 A polikarbonátok

#### 4.2.4 Aromás poliamidok (aramidok)

#### 4.2.5 A poliimidek

#### 4.2.6 Poliszulfonok

#### 4.2.7 Poliéterek, éterketonok (PEEK)

#### 4.2.8 A folyadékkristályos polimerek (LCP)

### 4.3 Szakirodalom

## A POLIMEREK FELDOLGOZÁSTECHNIKÁJÁNAK REOLÓGIAI ALAPJAI

### 5.1 Képlékeny alakítás és reaktív feldolgozástechnika

### 5.2 Az ömledékreológia alapjai

#### 5.2.1 Az ömledékreológia alapmodelljei

#### 5.2.2 A viszkozitást befolyásoló tényezők

### 5.3 Polimer ömledékek áramlása

#### 5.3.1 Newton féle ömledék áramlása

#### 5.3.2 Hatványtörvényt követő közeg áramlása

#### 5.3.3 Bingham féle közeg áramlása kapillárisban

### 5.4 Reális polimer ömledékek viselkedése

#### 5.4.1. A folyásgörbe felvétele

#### 5.4.2 A rugalmas tulajdonságok hatása

### 5.5 Szakirodalom

## A POLIMER FELDOLGOZÁSTECHNIKA ELŐKÉSZÍTŐ LÉPÉSEI ÉS GÉPEI

### 6.1 A száraz keverékek keverőgépei

### 6.2 Keverés ömledék állapotban

### 6.3 Granulálás, szárítás

### 6.4 Szakirodalom

## KALANDEREZÉS

### 7.1 A kalanderek szerkezete

### 7.2 A kalander működése

### 7.3 A kalanderek működésének reológiai alapjai

### 7.4 A kalander alkalmazása összetett gyártósorokban

### 7.5 Szakirodalom

## EXTRUZIÓ

### 8.1 Az extrudálás technikájának alapfogalmai

### 8.2 Az ömledékáramlás főbb összetevői az egycsigás extruderben

### 8.3 Az extrudercsiga karakterisztikája, az extruder munkadiagramja

### 8.4 Az extruder termikus viszonyai

## 8.5 Különleges extrudercsigák, különleges extruderek

### 8.5.1 Gáztalanító extrudercsiga

### 8.5.2 Különleges kiszállító szakaszú csigák

### 8.5.3 Ömledék szétválasztó csiga

### 8.5.4 Moduláris csiga

### 8.5.5 Többcsigás extruderek

## 8.6 Extruderszerszámok

### 8.6.1 A csőgyártás szerszáma

### 8.6.2 A lemezgyártás szerszáma

### 8.6.3 A kábelgyártás extruderszerszáma

### 8.6.4 Fóliatömlő extrúzió és szerszáma

### 8.6.5 Többüreges profilok extrúziója

## 8.7 Az extruder követőberendezései

### 8.7.1 Kalibrálás vákuummal, túlnyomással

### 8.7.2 Különleges lehúzó: gégecső-gyártás

### 8.7.3 Extrúziós gyártósor

## 8.8 Összetett extrúziós technikák

### 8.8.1 Extrúziós szinterezés

### 8.8.2 Koextrúzió

## 8.9 Szakirodalom

## FRÖCCSÖNTÉS

### 9.1 A fröccsöntés alapelve

### 9.2 A fröccsöntő gép részei

### 9.3. A fröccsöntési ciklus a mechanikai mozgáselemek tükrében

### 9.4. A fröccsöntés folyamata az állapotváltozók függvényében

### 9.5 A fröccsöntő gépek főbb műszaki jellemzői

#### 9.5.1. Záróerő

#### 9.5.2. Fröccsöntési kapacitás, fröccsmunka

#### 9.5.3. Ömlesztő teljesítmény, egyéb kapacitás adatok

### 9.6 A fröccsöntő szerszámok alaptípusai

### 9.7 Különleges fröccsöntési technikák

#### 9.7.1 Kétkomponensű fröccsöntés

#### 9.7.2 Gázzal hajtott fröccsöntés

#### 9.7.3 Fröccsöntés olvadóbetétes szerszámba

### 9.8 A fröccs-sajtolás

### 9.9 A fröccsöntés modellezése számítástechnikai úton

#### 9.9.1 A számítógépes fröccsöntési programok jellemzői

#### 9.9.2 A fröccsöntés-szimulációs programok felépítése

#### 9.9.3 Anyagi tulajdonságok szerepe a szimulációban

## 9.10 Szakirodalom

## ÜREGES ALKATRÉSZGYÁRTÁSI TECHNIKÁK POLIMEREKBŐL

### 10.1 Extrúziós fúvás

#### 10.1.1 Terméktervezés

#### 10.1.2 Az extrúziós fúvás berendezései

#### 10.1.3 Különleges extrúziós fúvási technológiák

### 10.2 Fröccsfúvás

[10.2.1 A fröccsfúvás berendezései](#)

[10.2.2 Terméktervezés](#)

[10.3 Előnyújtásos fröccsfúvás](#)

[10.4 Fúvásos technológiák polimerjeinek reológiai tulajdonságai](#)

[10.4.1 Viszkózitás](#)

[10.4.2 Duzzadás, viszkoelasztikus tulajdonságok](#)

[10.5 Rotációs öntés](#)

[10.5.1 A rotációs öntés alapvonásai](#)

[10.5.2 Rotációs öntőberendezések](#)

[10.6 Szakirodalom](#)

## [MELEGALAKÍTÁS](#)

[11.1 A vákuumformázás kapcsolata a termomechanikai tulajdonságokkal](#)

[11.2 A vákuumformázás technológiája](#)

[11.3 Egyéb melegalakítási eljárások](#)

[Túlnyomásos hőformázás](#)

[Mélyhúzás](#)

[11.4 Szakirodalom](#)

## [POLIMER ILLESZTÉS-, HEGESZTÉS- ÉS RAGASZTÁSTECHNIKÁK](#)

[12.1 Polimerkötések mechanikai kötőelemekkel](#)

[12.1.1 Menetmetsző csavaros kötések](#)

[12.1.2 Bepattanó kötések](#)

[12.2 Polimer alkatrészek hegesztése](#)

[12.2.1 A hegedés folyamata](#)

[12.2.2 A hegeszthetőség feltételei](#)

[12.2.3 Hegesztő eljárások](#)

[12.3 A ragasztástechnika alapjai](#)

[12.3.1 A ragasztás elméleti alapjai](#)

[12.3.2 Nedvesítés és adhézió](#)

[12.3.3 Ragasztók csoportosítása](#)

[12.3.3 A ragasztás technológiája](#)

[12.4 Szakirodalom](#)

## [TÉRHÁLÓS POLIMERTERMÉKEK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA](#)

[13.1 Bevezetés](#)

[13.2 A gumitechnológiák alapjai](#)

[13.2.1 Keverékgyártás](#)

[13.2.2 Kalanderezés](#)

[13.2.3 Gumitermékek extrudálása](#)

[13.2.4 Oldás, itatás, kenés](#)

[13.2.5 Vulkanizálás](#)

[13.3 Gépjárműabroncs gyártás](#)

[13.3.1 A gumiabroncsok osztályozása](#)

[13.3.2 A gumiabroncs szerkezete](#)

[13.3.3 Gumiabroncsok gyártása](#)

[13.4 Polimer habok és habosítási technológiák](#)

[13.4.1 A habosítási technológiák alapjai](#)

[13.4.2 Poliuretán habok előállítása](#)

[13.4.3 RIM \(Reaction Injection Molding, reaktív fröccsöntés\) habgyártás](#)

[13.4.4 Habosítható polisztirol \(EPS, Expandable Polystyrene\)](#)

[13.4.5 Hőre lágyuló struktúrhabok fröccsöntése](#)

[13.5 Szakirodalom](#)

## [POLIMER KOMPOZITOK](#)

[14.1 A polimer kompozitok alapfogalmai](#)

[14.2 A polimer kompozitok erősítő szálai](#)

[14.2.1 Az üvegszál](#)

[14.2.2 A karbonszál](#)

[14.2.3 Az aramid szál](#)

[14.2.4 A polietilén szál](#)

[14.2.5 Egyéb erősítőszálak](#)

[14.3 A kompozitmechanika alapjai](#)

[14.3.1 A terhelés irányában, hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága](#)

[14.3.2. A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen](#)

[14.3.3 A kompozit szilárdsága az erősítés irányától eltérő szög alatt](#)

[14.3.4 Vágott, rövid szállal erősített polimer kompozitok](#)

[14.4 Polimer kompozit termékek gyártástechnológiái](#)

[14.4.1 Laminálás, szórás](#)

[14.4.2 Sajtolás \(BMC, SMC, GMT\)](#)

[14.4.3 Tekercselés](#)

[14.4.4 Pultruzió](#)

[14.4.5 Összetett kompozit technológiák](#)

[14.5 Szakirodalom](#)

## [POLIMER ALKATRÉSZ PROTOTIPUS GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁK](#)

[15.1 Bevezetés](#)

[15.2 Prototípus gyártási technológiák](#)

[15.2.1 Számítógéppel vezérelt forgácsolás](#)

[15.2.2 Lézer sztereolitográfia \(SLA\)](#)

[15.2.3 Szelektív lézer-szinterezés \(SLS\)](#)

[15.2.4 Térbeli nyomtatás \(3D printing\)](#)

[15.2.5 Ömledékrétegezés \(Fused Deposition Modelling, FDM\)](#)

[15.2.6 Réteges fotopolimerizáció \(Instant Slice Curing, ISC\)](#)

[15.2.7 Réteges kivágás és felépítés \(Laminated Object Manufacturing, LOM\)](#)

[15.2 Prototípusból kiinduló szerszámgyártás és kissorozatú gyártás](#)

[15.3.1 Vákuum alatti öntés](#)

[15.3.2 Plazma-szórás](#)

[15.3.3 Szerszám-célú öntőgyanták](#)

[15.4 Szakirodalom](#)

## [POLIMER ÚJRAHASZNOSÍTÁSI TECHNIKÁK \(RECYCLING\)](#)

[16.1 Bevezetés](#)

[16.2 Műanyag a hulladékban](#)

[16.3 A polimerek újrahasznosításának szintjei](#)

[16.3.1 Hőre lágyuló polimerek újrahasznosítása másodnyersanyagként](#)

[16.3.2 A polimerek kémiai újrahasznosítása](#)

[16.3.3 A polimerhulladék energetikai hasznosítása](#)

[16.4 A vegyes polimerhulladékok újrahasznosításának termodinamikai korlátai.](#)

[Kompatibilizáció](#)

[16.5 Reaktív kompatibilizáció az újrahasznosításban](#)

[16.6 A polimer újrafeldolgozás társadalmi-gazdaságossági összefüggései](#)

[16.7 Szakirodalom](#)

## [FÜGGELÉK](#)

### [UTÓSZÓ](#)

#### **A táblázatok listája**

- [1. Kötési energiák a fémekben \[2.5\]](#)
- [2. Kötési energiák a polimerekben \[2.5\]](#)
- [3. Polimerlánc - építési módok](#)
- [4. Folyadékállapotú monomerek polimerizációs hője és a polimerizáció adiabatikus hőemelkedése](#)
- [5. A polimerizáció műveleti megvalósítási módjai](#)
- [6. Polimerizációs fok \(DP\) a Carothers egyenletből különböző  \$\xi\$  értékeknél](#)
  - [1. A leggyakoribb kristályos hőre lágyulók  \$T\_g\$  és  \$T\_m\$  határhőmérsékletei](#)
  - [2. A leggyakoribb amorf hőre lágyulók  \$T\_g\$  és  \$T\_m\$  határhőmérsékletei](#)
- [1. A PVC gyártási hőmérsékletének és móltömegének összefüggése](#)
- [2. A PTFE súrlódási együtthatója](#)
  - [1. Különböző feldolgozási eljárásokra ajánlott MFI értékek \(v.ö.: 9.1 tábl.\)](#)
- [1. A \(7.9\) és \(7.10\) egyenletben szereplő paraméterek értéke a hatványkitevő függvényében \[7.9\]](#)
  - [1. Extrudercsigák zónái és funkciói](#)
  - [1. A főbb polimerfeldolgozási technológiák összehasonlító adatai](#)
  - [2. Hőre lágyuló polimerek feldolgozásának főbb \(T,p\) paraméterei](#)
  - [3. CD lemez fröccsöntésének időszükséglete](#)
  - [4. Néhány fontos hőre lágyuló polimer fröccsöntési és szerszámtemperálási hőmérséklete](#)
  - [5. A főbb polimerfeldolgozási technológiák összehasonlító adatai](#)
    - [1. Amorf polimerek melegalakítási hőmérséklettartományai](#)
    - [2. Kristályos polimerek melegalakítási hőmérséklettartományai](#)
  - [1. Folyamatos vulkanizálási eljárások \[13.1\]](#)
  - [2. Habosított polimerek felhasználási területei](#)
    - [1. Kompozit erősítőszálak szilárdsága](#)
    - [2. A kritikus szálhosszúság változása a határfelületi nyírófeszültség függvényében \(\\*D= 7  \$\mu\$ m tipikus szálátmérő esetén\)](#)
    - [3. Kompozit szendvics maganyagok tulajdonságai \[14.27\]](#)
      - [1. Szilikonkaucsukból készült negatív öntőminta költsége a fém öntőmintákhoz képest](#)
  - [1. A kommunális hulladék kb. 5 %-ában megjelenő műanyag hulladékok összetétele \[16.1\]](#)
  - [2. A szemétegető füstgáz-emissziójának maximuma \[16.4\]](#)
  - [3. Hőre lágyuló polimerek kétalkotós rendszereinek összeférhetősége \[16.4\]](#)
  - [4. Farost PP társított anyagok tulajdonságai \[16.13\]](#)
    - [1. A legfontosabb polimerek jelölése](#)
    - [2. Egyéb szakkifejezések](#)

## Előszó

A **polimertechnika** a huszadik század műszaki haladásának meghatározó elemévé vált, ugyanúgy, ahogy az elektrotechnika, a közlekedés- és távközléstechnika, vagy a napjainkat gyökeresen átalakító számítástechnika. A szintetikus polimerek, a szénlánc-vázú óriásmolekulák - a műanyagok - nélkül mindezek a fenti kulcs-ágazatok nem is juthattak volna el a fejlődés mai szintjére. Elég, ha csak néhány példára gondolunk. A számítástechnikában például polimer reziszt-lakkok viszik fel annak a kb. 5 millió (!) tranzisztornak a rajzolatát az integrált áramkörü elemek mikro-miniatűr rétegeire, amelyek ma egyetlen PENTIUM II IC mindössze néhány  $\text{cm}^3$ -nyi elemében számítógépünk „agyát” képezik. Polimer kompozit szárnyakon repülünk, ha egy korszerű AIRBUS 302 vagy egy BOEING 767 segítségével átszeljük az óceánt. Polimer szigetelők nélkül nincs távközlés, polimer alapú csillapító, tömítő és bevonóanyagok nélkül nincs személygépkocsi – sőt alig képzelhető el közlekedési eszköz, és így tovább.

A polimerek műszaki alkalmazását mégsem a 20. században kezdtük. Szerencsére a természet évszázadok óta ellát bennünket polimer szálakkal, rostokkal, mint a pamut, a kender, a len, a gyapjú, a selyem. Polimert dolgoz fel a bőr- és cipőipar, a fa- és papíripar is. Természetes polimer lakkokkal vonták be bútoraikat már 2000 évvel ezelőtt is Egyiptom és Kína mesterei. A polimer alapú ragasztók tartósságáról múzeumi kincsek tanúskodnak.

A polimerek műszaki anyagtudományát és technológiáját, amelyet az angol szakirodalom „*polymer engineering*”-nek nevez, magyarra legegyszerűbben **polimertechnika** kifejezéssel ültethetjük át. Műanyagtechnikának nevezve leszűkítenénk azt a mesterséges polimerekre, és kihagynánk a jövőben újra és egyre jobban megbecsült, évenként megújítható, *természetes polimer* nyersanyagainkat, magát a *biomasszát*, amely szerencsére a műanyagok minden elterjedése ellenére is ezerszer több polimert ad évenként a világ erdőiben, mezőin és szántóföldjein, mint amennyit a világ műanyaggyárai termelnek. A biomassza átalakítása egyébként új típusú szintetikus polimer alapanyagokkal is el fog látni bennünket a kőolaj fogytán is. A mesterséges polimerek sem érdemlik meg a kissé elitélő *műanyag* megnevezést, hiszen a mérnöki szerkezeti anyagok másik két nagy csoportja: a fémek és a kerámiák (szilikátok) sem található meg *műszaki* célra alkalmas formában a természetben. Az acél, a nagyszilárdságú üveg, vagy a vasbeton is műszaki tudás és *művi, műveleti* átalakítás eredménye, s így akár azokat is *műanyag*nak nevezhetnénk.

E könyv a polimertechnikát a modern műszaki anyagtudomány (*materials engineering*) egységes szemléletébe illesztve ismerteti. Azon az előadássorozaton alapszik, amelyet a Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karán hetedik éve adunk elő *Polimertechnológia* címmel a 4. szemeszterben minden jövőendő gépészmérnök számára. E tárgynak alapja a *Polimer Anyagszerkezettan* c. tárgy a 3. szemeszterben, az oktatja a polimerfizikát, a polimerek mechanikai viselkedését leíró összefüggéseket. A polimerek kémiájáról és fizikájáról az utóbbi években több összefoglaló tankönyv jelent meg magyar nyelven, így ezeket nem tárgyaljuk [1. 2.24, 3.3, 3.28 sz. szakirodalmi utalások].

Mint a tartalomjegyzékből látható, tankönyvünk gerincét a szintetikus polimerek túlnyomó többségét jelentő *hőre lágyuló polimerek képlékeny alakítási technológiáinak* ismertetése képezi (6.–12. fejezet). Ezek bevezetéséhez ismerni kell a polimer ömledékek viszkózus folyásának alap-összefüggéseit (5. fejezet), illetve a legfontosabb technikai polimer anyagokat (3. és 4. fejezet). A hőre nem lágyuló polimerek térhálósítással kapcsolt technológiái – felhasználási arányuknak megfelelően – a könyv kisebb részét teszik ki (13. fejezet).

Fontosságuk és műszaki előnyeik alapján különös hangsúly illeti a *polimer kompozitok* technológiáját (14. fejezet). A kompozitok, a legtöbbször különleges szálakkal erősített, és így a fémeket is meghaladó szilárdságú polimer szerkezeti anyagok a huszonegyedik században különleges szerepet tölthetnek be a mérnöki gyakorlatban és a mindennapi életben egyaránt. A szűk keret itt is csak a technológiák alaptípusait mutathatja be.

Könyvünk tartalma néhány fejezetében valamivel több, mint amit egyetlen félév alatt át lehet adni egy (heti 3 órás) tipikus mérnökkari tantárgyban. Két helyen bővítettünk elsősorban, a 2000 utáni szemeszterekre gondolva.

A 9.9 fejezet egy tipikus polimer-feldolgozástechnikai eljárás, a fröccsöntés számítógépes modellezését vezeti be. (Ezt a tantárgy-részt 1998-ban adtuk elő első alkalommal). Ez a modern, *virtuális* tervezési módszereket (PRO. ENGINEER, I-DEAS stb.) viszi át, kapcsolja össze a fröccsöntésre tervezett alkatrész gyártásának szimulációja útján a fröccsöntő szerszám részletes megtervezésével és megvalósításával. A 15. fejezet hasonlóan jövőbemutató: azokat a technikákat írja le, amellyel a számítógépen megtervezett *virtuális* polimer alkatrész szinte emberi beavatkozás nélkül „legyártható”, kézzel fogható, valóságos- vagy kicsinyített méretű *ősminta* (prototípus) formájában. Ezek az ősminták ma még többnyire a formatervezés, a piacra-hozás (*marketing*) céljait szolgálják, de nincs messze az idő, amikor funkcionális darabok gyártása, vagy kissorozatú gyártás is ilyen módszerekkel történhet.

Végül elengedhetetlennek ítéltük a fenntartható fejlődés, a felelősségteljes környezetvédelem szempontjából nélkülözhetetlen polimer - *újrahasznosítási technikák (recycling)* tárgyalását is (16. fejezet). Ezeket ma még számos – elsősorban gazdaságossági – tényező gátolja: a polimertermékek sokkal olcsóbb alapanyagból készülnek, mint a hagyományos fém alkatrészek. A polimerek újrahasznosítását a degradáció is korlátozhatja: az újrahasznosítás általában alacsonyabb szintű alkalmazáshoz vezet. Fontos tudnunk azt is, hogy a polimerek keverésének termodinamikai korlátai is vannak. A 16. fejezet ezeknek a korlátoknak a kinyitására, kiterjesztésére is javaslatot tesz, és technikát ajánl, amely szolgálhatja a polimerek ötvözését, ill. a természetes polimerek (biomassza) és mesterséges polimerek (műanyagok) társított (kompozit) hasznosítását is.

Ez a könyv a *Polimer anyagszerkezettan*-nal (Műegyetemi Kiadó, Bp., 1995) együtt csak alapozóként szolgálhat a polimerek mérnöki tudományához. Az elmélyítéshez sok jó külföldi szakkönyv áll ma már a mérnök rendelkezésére. A javasolt szakirodalom jegyzék minden fejezet végén megjelenik. A külföldi tanulmányútra vagy praxisra készülő hallgatók figyelmébe különösképpen ajánljuk:



- az Akron-i Egyetem gépészeti fakultásának polimertechnológia tankönyvét [1.8],
- az Aachen-i Műszaki Egyetem hasonló tankönyvét [1.9],
- a Karlsruhe-i Műegyetem műanyag-konstruktőr tankönyvét [1.10], és a
- Leoben-i Műszaki Egyetem műanyagtechnológia és szerszámgyártás tankönyvét [1.11],

amelyeket kifejezetten gépészmérnökhallgatók számára írtak.

Könyvünket – amely lényegében kötelező tananyag a BME Gépészmérnöki Karán – őszintén ajánljuk a további mérnökkari hallgatóknak, főiskolai hallgatóknak és az induló felsőfokú akkreditált (iskolarendszerű) szakképzés hallgatóinak is, ugyanúgy, ahogy az egész életen át tanulni vágyó gyakorló műszakiaknak.

Budapest, 1999. november 1.

Dr. Czvikovszky Tibor

tanszékvezető egyetemi tanár

## **A POLIMERTECHNIKA MINT MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNY**

### **Tartalom**

#### [1.1 Mi a polimer?](#)

#### [1.2 A polimertechnika alapfogalmai](#)

#### [1.3 A polimertechnika korai fejlődése](#)

#### [1.4 A szerkezeti anyagok együttes fejlődése](#)

#### [1.5 Szakirodalom](#)

Az induló 21. század hullámzó világgazdasága, ijesztő makroökonómiai és vészjósló ökológiai jelenségei arra kényszerítenek, hogy megtanuljunk megbecsülni és tudatosan megkeresni a *fenntartható* fejlődés (*sustainable development*) egyensúlyát. A technika az utóbbi időben egyre kevesebb ágon mutat látványos *mennyiségi* fejlődést. A közeljövőben az is jó eredménynek számít, ha a termelés mennyiségi szinten tartásával párhuzamosan érhetünk el javulást az élet *minőségében*.

A polimertechnika, vagyis a polimerek műszaki anyagtudománya és technológiája a műszaki fejlődés azon kivételes ágazatai közé tartozik, ahol a lélegzetállító új minőségek még mindig együtt járnak az erőteljes mennyiségi növekedéssel. Ez a fejlődés most már több, mint félévszázados visszatekintésben értékelhetővé teszi a *műszaki anyag-tudományok* (*materials engineering*) legfiatalabb ágának, a *szintetikus szerkezeti anyagok* tudományának és technológiájának (*polymer engineering*) jelenlegi helyzetét és várható fejlődési tendenciáit.

### **1.1 Mi a polimer?**

A polimerek a legszűkebb értelmezés szerint a szerves kémia olyan hosszúláncú vegyületei, amelyben tipikusan sok ezer elemi építőegység: *monomer* kötődik egymáshoz elsődleges kémiai kötéssel. A *természet élővilága* így építi fel anyagait, pl. a látszólag lassú fotoszintézis útján az  $\alpha$ -d-

glükóz monomerből a milliós molekulatömegű poliszacharidokat, az évenként  $10^{11}$  t nagyságrendben újratermelődő biomassza fő összetevőjét, a cellulózt. A *szintetikus* szerves vegyipar sokkal nagyobb sebességgel gyártja polimerjeit, így pl. pillanatszerű polimerizációs láncreakcióban állítja elő az elképzelhető legegyszerűbb monomerből, az etilénből évi  $10^7$  t nagyságrendben a polietilént.

A polimer fogalom újabban egyre tágul. A kémia legújabbkori fejlődése egyre több, elsődleges kémiai kötéssel kapcsolódó óriásmolekulás szerkezetet ír le. Ma már tudjuk, hogy lényegében az egész élővilág, minden fehérje, a legtöbb szénhidrát és lipidvegyület, az izmok, a csont, gyakorlatilag mind polimer szerkezetűek. Bonyolult, polimer szerkezetű fehérjékhez kötődik a szaporodás, az öröklődés minden jelensége, az egészséget fenntartó immunrendszer, mint ahogyan polimer az azt támadó vírus is. Polimer a hemoglobin, és az élővilág folyamatait szabályozó hormonok, enzimek is jórészt polimerhez kötődnek. Polimer lebontási és felépítési folyamat az anyagszere, a táplálkozás minden főbb lépése.

Egyre több érv szól amellett, hogy az élettelen világot, a szilikátok világát is polimernek tekintjük. Vitathatatlan ugyanis, hogy a kőzetek, az üvegek, a kerámiák szilikát építőelemei sem másodlagos kötésekkel aggregáltak, hanem rendkívül erős elsődleges (ionos vagy kovalens) kötésekkel kapcsolt, óriásmolekulás, térhálós rendszerek.

Ez a *pan-polimer* szemléletmód talán túlzásnak tűnik, valójában azonban a természet sokdimenziós összefüggésrendszerének egyre mélyebb megismerését, feltárásának folyamatát tükrözi. A tudomány általában, s ezen belül a kémia, eddigi történetének túlnyomó részében ugyanis a bennünket körülvevő világnak, a nemcsak többszörösen összetett, de valóságos kémiai kötésekkel is összekötött (*polimer*, soktagú, sok egységből álló) makrovilágnak mindeztideig csak kisebb-nagyobb *fragmentumait* (törmelékeit) volt képes analízálni, transzformálni, esetleg szintetizálni. Gondoljunk például legősibb építőanyagunkra, a fára, mint szerkezeti anyagra. Cellulóztartalmát, annak szénhidrát építőköveit már régóta ismerjük, de csak a legutóbbi időben tudjuk leírni pontosan, hogy a fa tipikus „szálerősített” polimer kompozit. A cellulóz rostos, részben kristályos (szemikristallin) polimer rendszerét jó ideje leírták már, de a lignin, amely a fa több mint 30%-át teszi ki, e kompozit beágyazó anyagát képezve, sokáig amorf kötőanyagként, egy fajta gyantának tűnt. Csak a legutóbbi időben derült ki teljes bizonyossággal, hogy a lignin nemcsak bonyolult, elágazó szerkezetű, hanem kifejezetten térhálós jellegű makromolekula. Sőt, ma már azt is tudjuk, hogy a lignin–cellulóz komplexum egyetlen, összefüggő, térhálós makromolekuláris rendszer, a térhálós cellulóz és a térhálós lignin egymásba-hatoló (*inter-penetrating network*) IPN polimer rendszere. Építőipari szerkezeti anyagként e kompozit polimer évezredek óta bizonyítja alkalmasságát.

## 1.2 A polimertechnika alapfogalmai

A polimerek mérnök-tudománya a „*polymer engineering*” tehát a természetes polimerek kitűnő példáira támaszkodhat. Mint műszaki anyagtudomány, magában foglalja

- a szálal, rostos és amorf, természetes és mesterséges eredetű polimereket,
- a műanyagok, elasztomerek, ragasztó- bevonó- és kötőanyagok változatos formáit,
- s ezek társított (kompozit) rendszereit.

A fémek jól kidolgozott anyagtudományához hasonlóan a polimerek anyagtudománya is *anyagszerkezettanra* és *anyagtechnológiára* tagolódik. Ez utóbbi, megint csak a fémek analógiája alapján felosztható polimer *gyártási* technológiákra, polimer *feldolgozási-* (alakítási) technológiákra, és *alkalmazási* technológiákra.

A polimer anyagszerkezettan a fémek anyagszerkezettanához hasonlóan a szilárd polimereket összetartó erők, (kristályos) szerkezetek, kapcsolatok felderítésén, leírásán keresztül szolgálja újabb és egyre jobb polimer szerkezeti anyagok előállítását.

A polimer anyagszerkezettan feladatának bonyolultságát abból is megítélhetjük, hogy amíg egy fémes szerkezet, pl. egy ötvözet kristály-rácspontjain jól meghatározott méretű, de egyszerűsítve mégis pontszerűnek felfogható fématomok ülnek, addig a polimermolekula, mint elemi anyagszerkezettani egység korántsem pontszerű, hanem hosszú lánc, tipikusan  $>10^4$  atomból áll, s e lánc a legritkább esetben sem kinyújtott egyenes, hanem leginkább statisztikus gombolyag, szerkezete nem lineáris, hanem a legtöbbször elágazó ágas-bogas, s a lánc építőkövében a monomerben a térviszonyok különbsége, a sztereoizoméria drámai különbségeket okoz. (Az *ataktikus* polipropilén haszontalan gyurma, kátrány jellegű, míg az *izotaktikus* sztereoizomerje igen nagy szilárdságú technikai anyag.)

A *szintetikus* polimerek gyártási technológiáinak alapja szó szerinti „*molecular engineering*”, vagyis célszerűen tervezett molekula-konstrukciók szintézise. Erre az utóbbi évtizedben tömegesen bevezetett nagyszilárdságú, rendkívül szívós és ugyanakkor több száz °C-ig hőálló műszaki műanyagok (*advanced engineering polymers*) adják a legjobb bizonyítékot.

A polimerek feldolgozása elsősorban a fémfeldolgozásban is jelentős szerepű képlékeny alakítást jelent. A forgácsolásnak a polimeralakításban sokkal kisebb szerepe van, mint a fémeknél – és éppen ebben rejlik legnagyobb előnyük. Végül oldalágon a polimerek műszaki anyagtudományához tartozónak, akár a polimertechnológia alfejezetének is tekinthetjük a polimer terméktervezést, a polimerek alkalmazástechnikáját. A természetes és a mesterséges polimerek (a műanyagok) teljes elválasztása sem anyagszerkezettani, sem technológiai szempontból nem indokolt. A tiszta fém is alig fordul elő a természetben, a szilikátok, kerámiák túlnyomó többsége is „mesterséges”, ilyen alapon azokat is nevezhetnénk szintetikus („mű”-) anyagoknak.

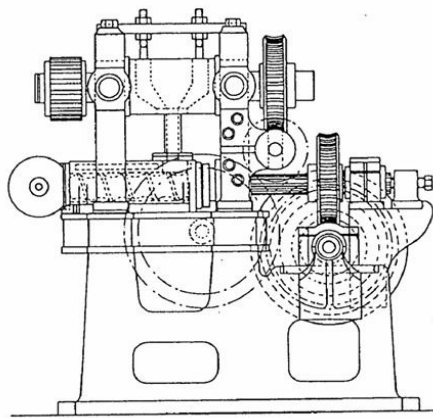
### 1.3 A polimertechnika korai fejlődése

A polimertechnikában a termelés, a technológia gyakorlati tapasztalatai jóval megelőzték az elméletet. Ez tükröződik abban is, hogy a *polimertechnika gépészeti* oldala korábban kezdte el rohamos fejlődését, mint a szintetikus polimerek kémiája. A polimerfeldolgozás gépeinek, technikájának fejlődését jól megfigyelhetjük a korai gumiipar fejlődésén.

A természetes kaucsukfa („könnyező fa”, később: *Hevea Brasiliensis*) nedvéből készíthető gumit Közép-Amerika őslakossága már több mint ötszáz évvel ezelőtt is nagyon jól fel tudta használni pl. vízhatlan ponyvák (műbőrök) készítésére. A felfedező európaiaknak is feltűnt a gumilabda, a vízhatlan bocskor, a körteformájú üreges gumilabdacs-pumpa stb. Mégis csak 1740 körül hozták át magát a gumi alapanyagot Európába, amiből viszont már 1768-ban tekerceselt gumitömlőt tudtak gyártani. A gumitechnológiák gépi hátterének megszületése ezután a 19. századtól igen gyors:

- 1818-ban Mc Phearson szabadalmaztatta a csavarprést,
- 1820-tól fogazott hengerek között „masztikálták”, gyúrták a gumikeveréket,
- 1833-ban Charles Goodyear kidolgozta a vulkanizációt, a gumi térhálósításának technológiáját, felhasználva
- 1836-tól Edwin Chaffee gőzzel fűtött hengerszékét,
- 1845-ben elindult a nagyipari sajtolási technológia és ugyanebben az évben,
- 1845-ben kifejlesztették az első dugattyús (még nem a csigás) extrudert is.

Bár a csavarszivattyú ötletét (annak idején még híg folyadék szállítására) maga Archimedes vázolta fel, a csigás extrudert Matthew Gray „csak” 1879-ben szabadalmaztatta. Ez a gép aztán szinte forradalmasította a polimerfeldolgozást, a kábelgyártást, a profilok, csövek és a fóliák gyártása, később a fűvott alkatrészek gyártását is.



**1.1 ábra:** M. Gray extrudere, ahogyan azt 1879-ben szabadalmaztatta [1.6]

1870-ben megjelentek az ömledékek keverésére a belső keverők korai fajtái, amelyből 1916-ra kifejlődött az u.n. (Z-karú) Banbury keverő, a gumiabroncs gyártás alapvető keverőgépe.

A fröccsöntőgép őseit, a Hyatt fivérek (Isaiah és John) szabadalmaztatták 1872-ben, de ez még egyszerű, dugattyús „töltőgép” volt, amivel a hőre lágyuló polimertípusok legkorábbi változatát, a kámforral lágyított cellulóznitrátot dolgozták fel. Több, mint 80 év múlva szabadalmaztatták (1956-ban) a csigadugattyús fröccsöntőgép mai típusát, amely már összetett mozgásokra is képes (*reciprocating screw injection molding machine*).

Ezzel a technológiai fejlődéssel szemben a polimerek, mint a tényleges kovalens kötéssel kötött óriásmolekulák *elmélete* és az ezzel is összefüggő *szintézisben* szerzett gyakorlat jóval elmaradt. Herman Staudinger első elméleti munkáit az óriásmolekulákról 1924-ben még kis híján neveltségessé tették a Német Tudományos Akadémia kolloidikus professzorai.

Láthatjuk tehát, hogy a termelés, a technológia gyakorlati tapasztalatai itt is jóval megelőzték az elméletet. A gumiabroncsgyártás technológiája, a természetes kaucsuk polimerek térhálósítása részleteiben is kidolgozott, jól irányított nagyipari technológia volt már a 19. század végén. Az 1890-es években kitűnő műselymet gyártottak regenerált cellulózból. A polikondenzációs gyantákból készült szigetelők tették lehetővé az elektrotechnika rohamos terjedését az 1900-as századfordulón. Szinte hihetetlen, hogy a polimer tudomány megalapozásáért, a primer kötésekkel kötött láncpolimer elméletért H. Staudinger csak a 20. század közepén kaphatott Nobel díjat.



**1.2 ábra:** Hermann Staudinger Németországban, Wormsban született 1881-ben. 1912-től a Zürich-i Műszaki Egyetem (ETH) professzora, 1926-tól a Freiburg-i Egyetem (Svájc) tanára. A makromolekulák elméletéért 1953-ban kapott Nobel-díjat. [1.6]

A makromolekuláris kémia és fizika alapösszefüggéseinek tisztázása, a polimer anyagszerkezettan kibontakozása 1930 után egyre gyorsuló ütemben vezetett újabb és újabb szintetikus polimerek születéséhez. Alig egy évtized leforgása alatt megszületett a PVC, a polisztirol, a polietilén, a műkaucsuk nagyüzemi technológiája. Stratégiai anyagok lévén, ezeket a fejlesztéseket sokan néhány nagyhatalom erőszakolt, indokolatlan erőfeszítésének tekintették,

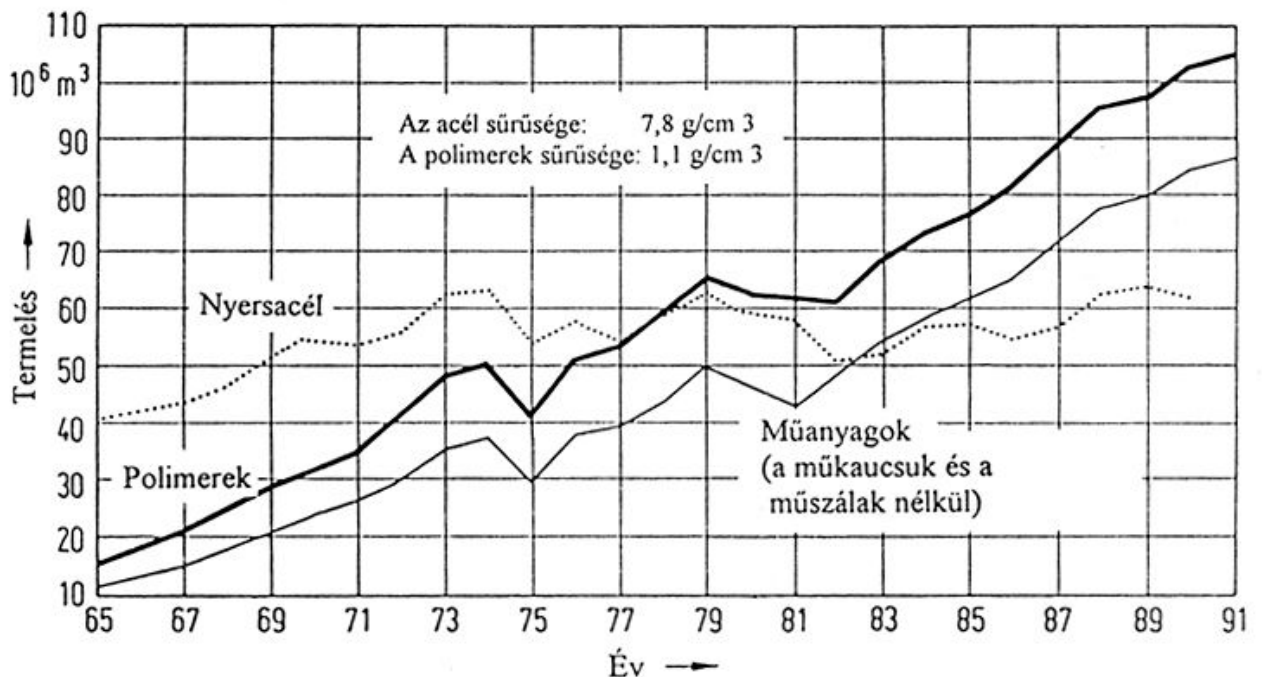
amelyek eredménye valami pótanyag, utánszolgálat. A történelem, az elmúlt évtizedek történelme azonban mást bizonyít.

Az utóbbi néhány évtizedben aztán valóban megtermékenyítő kölcsönhatás alakult ki a polimer anyagszerkezettan és anyagtechnológia között. Elég, ha csak az egyik egyszerű poliolefinre, a polipropilénre gondolunk, amely a hatvanas évek elején indult, s ma évi 10 millió tonna feletti a világtermelés belőle.

### 1.4 A szerkezeti anyagok együttes fejlődése

A technika szerkezeti anyagai (*engineering materials*) között a fémek vezető szerepe az ipari forradalom kezdete óta vitathatatlan.

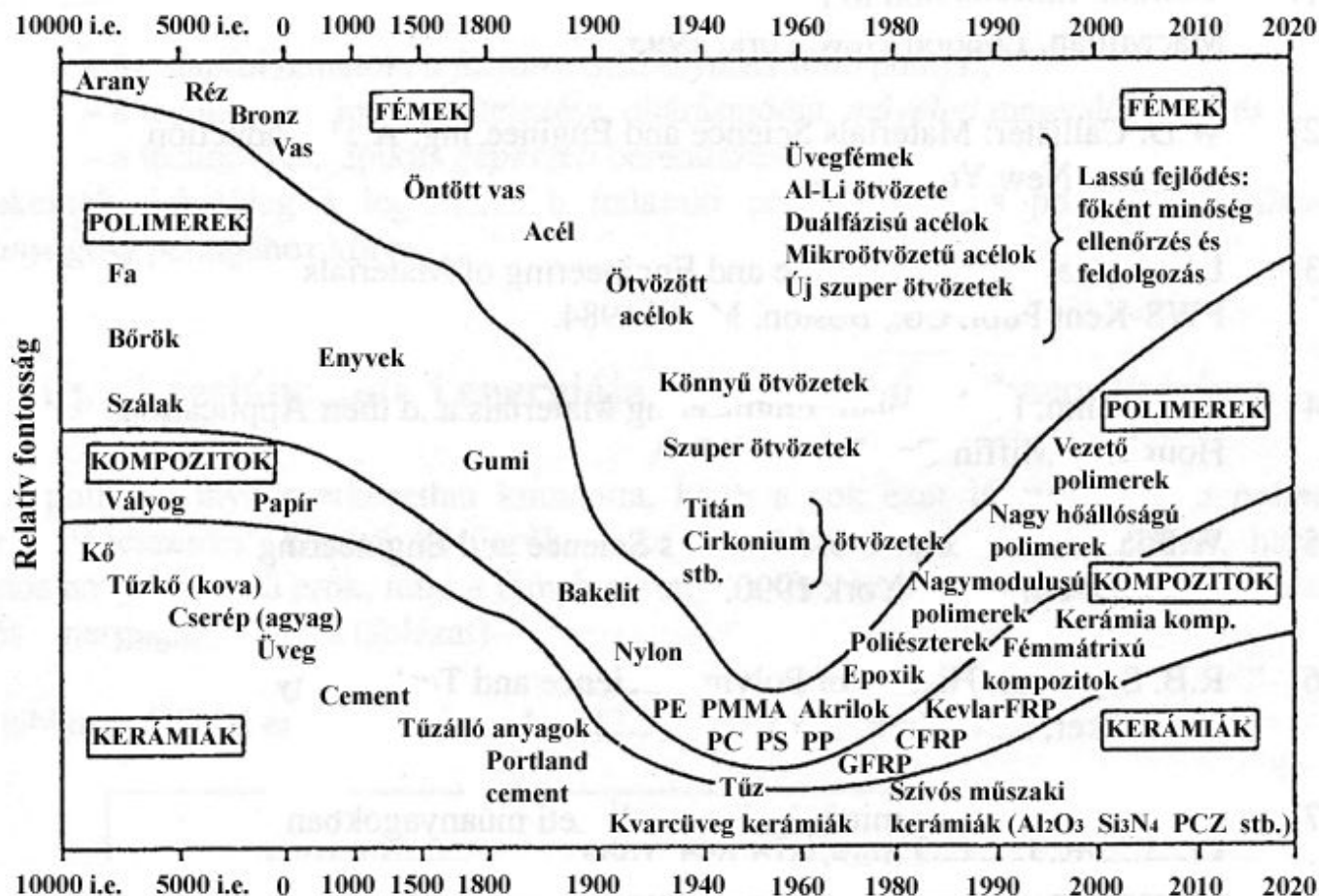
A második világháború utáni első két évtizedben egyre gyorsult mindhárom nagy szerkezeti anyagcsalád, a fémek, a polimerek és a kerámiák (szilikátok) termelése és felhasználása. A tömegtermeléssel gyártott, egyre hozzáférhetőbb közszükségleti cikkekhez, magához a háború utáni újjáépítéshez és az egyre korszerűbb termelő berendezésekhez egyaránt egyre több szerkezeti anyagra volt szükség. A hidegháború évtizedeiben az acéltermelés még külön gyorsítást is kapott. A leggyorsabb relatív fejlődést azonban – 1945 és 1965 között tízszeresre növekedve – elérve a millió tonna/év nagyságrendet a legújabb szerkezeti anyagcsalád: a szintetikus polimerek mutatták. (A világ nyersacél termelése 1965 táján évi 300 millió tonna körüli volt, 2000-ben valamivel több, mint évi 600 millió tonnára becsülhető.)



**1.3 ábra:** Európa, Észak-Amerika és a Távol-Kelet fejlett ipari országainak együttes termelése nyersacélból (...), polimerekből (—) és műanyagból (---) (a műkaucsuk és műszálak nélkül), 1965 és 1991 között [1.7]

A polimer anyagtudomány új anyagait számos esetben a születő új technika: pl. a hangsebességhez közeli légi közlekedés, a mikrohullámú hírközlés, az elektrotechnika, az elektronika és a számítástechnika hívta elő, teremtette meg, olyan új követelmények megfogalmazásával, amelyet a hagyományos szerkezeti anyagok soha sem elégíthetnének ki. A szintetikus polimerek valóban a 20. század technológiájának „mértre szabott” szerkezeti anyagai. Ebből következőleg a szerkezeti anyagok egymáshoz mért fejlődését nem is érdemes versengésnek tekinteni, eltérő funkcióik révén gyakrabban egészítik ki, „segítik” egymást egy-egy termékben, mintsem hogy „kiváltaná” egyik a másikat.

A fejlődés mindenesetre a 20. század utolsó három évtizedében sem állt meg.



**1.4 ábra:** A fémek, polimerek, kerámiák és kompozitok viszonylagos szerepének, fontosságának változása a történelem során (szabálytalan időskála) [1.10]

Rendkívül tanulságos a nyersacél és a szintetikus polimerek (műanyagok, műszálak és szintetikus kaucsuk) egyidejű fejlődését nyomon követni a „nyugati világ” (Észak-Amerika, Nyugat-Európa és a Távol-Kelet) összesített termelési adatainak tükrében az elmúlt negyedszázadban.

Az 1.3 ábra jól mutatja, hogy amíg az acélgyártás az elmúlt 20 évben gyakorlatilag stagnál (és a katonai szembenállás feszültségének csökkenésével pedig még tovább csökkenhet), addig a szintetikus polimer termelése az olajár-robbanás megrázkódtatásait (1974, 1979) is hamar kiheverve az elmúlt három évtizedben egy további nagyságrendet növekedett. Az abszolút számok összehasonlításából pedig kiderül, hogy volumenben (millió m<sup>3</sup>/év) számolva a fejlett országok már több, mint két évtizede több szintetikus polimert használnak, mint acélt, s a különbség azóta is fokozódik a polimerek javára.

Az 1.4 ábra a főbb szerkezeti anyagcsoportok viszonylagos súlyát, relatív fontosságát mutatja be a technikatörténet során. Az előrejelzés az 1980-as évek közepéről való. Ez a fejlődés a műszaki anyagtudomány eredményeiben, az anyagszerkezettan és a technológia új típusú kölcsönhatásában gyökerezik.

## 1.5 Szakirodalom

- John V.. *Introduction to Engineering Materials*. MacMillan. London-New York . 1993.  
Callsiter W. D.. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. J. Wiley. New York . 1991.  
Askeland D. R.. *The Science and Engineering of Materials*. PWS-Kent Publ. Co.. Boston . 1984.  
Flinn R. A. és Trojan P. K.. *Engineering Materials and their Applications*. Houghton Mifflin Co.. Boston . 1990.  
Smith W. F.. *Principles of Materials Science and Engineering*. McGraw-Hill. New York . 1990.  
Seymour R. B.. *History of Polymer Science and Technology*. M. Dekker. New York . 1982.  
Czvikovszky T.. *Új minőségek a szerkezeti műanyagokban*. Magyar Tudomány. 39. 8. 912-927. 1994.  
Belofsky H.. *Plastics - Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Münich-Cincinnati . 1995.  
Michaeli W.. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1992.  
Erhard G.. *Konstruieren mit Kunststoffen*. Hanser. München . 1993.  
Knappe W., Lampl A., és Heuel O.. *Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau*. Hanser. München . 1992.  
Gibson R. F.. *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill. New York . 1994.

## A POLIMEREK GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁJÁNAK ALAPJAI

### Tartalom

[2.1 A polimerlánc kötési energiája a fémekkel összehasonlításban](#)

[2.2 A polimerlánc kialakítása polimerizációs láncreakcióban](#)

[2.2.1 A polimerizációs láncreakció főbb jellemzői](#)

[2.2.2 A polimerizációs láncreakció exoterm jellege](#)

[2.2.3 A polimerizáció kinetikája, folyamatszabályozása](#)

[2.2.4 A polimerizáció műveleti megvalósítási módjai](#)

[2.2.5 A polimerizáció technológiájának gépészeti berendezései](#)



## 2.3 A polikondenzáció technikája

### 2.3.1 A polikondenzáció folyamatszabályozása

### 2.3.2 A polikondenzáció gépészeti berendezései

## 2.4 A poliaddíció, mint polimerlánc gyártási technológia

## 2.5 Szakirodalom

A polimer gyártási technológiák (*manufacturing technologies*) alapjainak ismerete a gépészmérnök számára ugyanúgy elengedhetetlen, mint ahogy a fémeket megmunkáló, forgácsoló v. képlékeny alakító mérnöknek is ismernie kell a kohászat alapjait. Itt azonban kevésbé vagyunk érdekeltek a kémiai képletekben, a lefolyó reakciók molekuláris mechanizmusában. Bennünket elsősorban

- az alapfolyamatok, a *folyamatszabályozás* főbb pontjai,
- a technológia ipari kivitelezése, eljárás módja, *műveleti* megvalósítása, és
- a technológia tipikus *gépészeti* berendezései

érdekelnek, lehetőleg a legfontosabb műszaki célú szintetikus polimerek (*műszaki műanyagok*) példájához kötve.

## **2.1 A polimerlánc kötési energiája a fémekkel összehasonlításban**

A polimer anyagszerkezettan kimutatta, hogy a sok ezer lánctagból álló polimer egyes „lánczemei” közötti **kötőerők**, – kovalens kötések – **nem kisebbek**, hanem azonos nagyságrendű erők, mint a fémek atomjait a fémrácsban összekötő fémes kötések kötési energiája. (2.1, 2.2 táblázat)

<b>Kötési típus</b>	<b>kJ/mol</b>
– Ti – Ti –	973
– V – V –	515
– Cr – Cr –	398
– Mn – Mn –	279
– Fe – Fe –	418
– Ni – Ni –	423
– Cu – Cu –	339
– Al – Al –	316
– Zn – Zn –	131

### **1. táblázat - Kötési energiák a fémekben [2.5]**

A tapasztalat, hogy a polimerek szilárdsága a gyakorlatban az esetek többségében a fémeknél jóval kisebb, csak arra mutat, hogy a polimerkötésekből adódó elméleti szilárdsági határnak ma még csak közelében sem járunk.

A „tökéletes” polietilén (PE) lánc elméleti szilárdsága 27,0 GPa, amelyből a kereskedelmi HDPE  $\sigma = 30$  MPa szakítási szilárdsága mindössze 0,1 %-ot valósít meg, miközben a HDPE kitűnő műszaki feladatokat lát el mint pl. nyomás alatti gáz-csővezeték.

Kötési típus	kJ/mol	Tipikus polimer
– C – C –	348	PE, PP, PVC, PS
– C – O –	360	UP, PET, PC, EP
– C – N –	306	PA, PUR, MF
– Si – O –	368	szilikon polimer
– C = C –	611	etilén (monomer), vinilmonomerek

## 2. táblázat - Kötési energiák a polimerekben [2.5]

A kötése erősség nagyságrendje, a kovalens kötések felismerése a polimer láncokban: technológiai alkalmazásuk kulcsa. A polimerek nem a fémeknél *gyengébb*, hanem más típusú, az idő és a hőmérséklet függvényében eltérő mechanikai válaszfüggvényeket produkáló, de ugyanolyan hasznos anyagok, sőt: ugyanazon nagyságrendű szilárdságig eljuttatható szerkezeti anyagok.

A nagy szilárdságú kovalens kötés fel nem ismerése, el nem fogadása a 20. század 30-as éveiiig hátráltatta a polimertudomány fejlődését. S miközben az ellentábor azt hajtogatta, hogy a polimerek építőköveit csak másodlagos erők kötik, addig a *polimertechnológia* töretlenül fejlődött tovább, és ez hozta meg az áttörést századunk közepén.

A kérdés tehát: hogyan hozzuk létre korszerű, ipari körülmények között megfelelő hatékonysággal ezeket a *nagyszilárdságú* kötések a polimer láncszemek között? A hangsúly a hatékonyságon van, – hiszen *egyenkénti* reakciólépésekben már a múlt századi és korábbi vegyipar is reagáltatni tudta pl. az alkoholt szerves savval, hogy észtert képezzen, melléktermék képződéssel járó, ún. *kondenzációs* reakcióban.

A polimertechnológia hőskora a századforduló is ilyen, fáradságos, lépésenkénti reakciók sorozatában hozta létre az első szintetikus polimereket a *polikondenzációs* gyantákat (fenol-formaldehid gyanta, bakelit stb.).

Manapság lényegében három fő csoportba sorolhatjuk a polimergyártás eljárásait:

- **polimerizáció,**
- **polikondenzáció,**
- **poliaddíció.**

E polimerlánc építési módok lehetnek tehát egyenkénti, *lépcsős (step-wise)* reakciók, vagy sorozatreakciók: *láncreakció* jellegűek, – másrésztől járhatnak eltávolítandó melléktermék képződésével, és más esetben anélkül is kivitelezhetők. A *folyamatszabályozás* szempontjából

nyilvánvalóan kiemelt jelentősége van a kinetikailag és energetikailag is erőteljesen kiemelkedő fontosságú *láncreakcióknak*.

<b>Polimerizáció</b>	<b>Polikondenzáció</b>	<b>Poliaddíció</b>
melléktermék nélkül, láncreakcióban	melléktermék kilépésével, lépcsős reakcióban	melléktermék nélkül, lépcsős reakcióban
PE, PP, PVC, PS...	PA, PET, PF, UF...	EP, PUR...

### 3. táblázat - Polimerlánc - építési módok

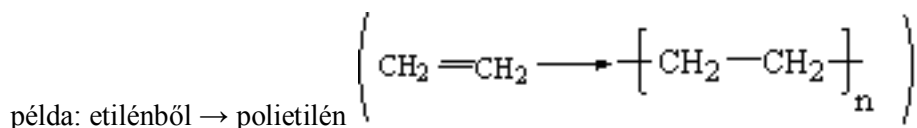
## 2.2 A polimerlánc kialakítása polimerizációs láncreakcióban

### 2.2.1 A polimerizációs láncreakció főbb jellemzői

A szintetikus polimergyártás leghatékonyabb, és ennél fogva legnagyobb ipari jelentőségű technológiája a polimerizációs láncreakció. E technológiával gyártják ma a világon a szintetikus polimerek közel 90 %-át. Hazánk évi 900 000 tonna körüli polimer gyártása is lényegében e technológiához kötött.

Polimerizációs láncreakcióban állítják elő a legfontosabb szintetikus polimereket:

- a poliolefineket, pl. LDPE, HDPE, LLDPE, PP



- a vinilpolimereket pl. PVC, PVA, EVA

példa: vinilkloridból → polivinilklorid

- a sztírol polimereket és kopolimereket pl.: PS, ABS, ASA, SAN

példa: sztírolból → polisztirol

- az akrilátokat pl. PMMA, PAN, cianoakrilátok

példa: akrilnitrilből → poliakrilnitril

- a szintetikus kaucsukok nagy részét pl. SBR, NR, PIB, EPDM

példa: izobutilénből → poliizobutilén

- (A polimer rövidítések jegyzékét ld. Függelék)

és még sok más technikailag is fontos, de főleg ún. közszükségleti műanyagot (*commodity plastics*).

Ide tartoznak például a *közszükségleti elektronika* műanyag hordozó, borító és funkcionális elemei is, mint pl. a személyi számítógép doboza, a monitor, a billentyűzet, képrögzítés és a hangvisszaadás eszközei, – de ezekből az anyagokból használ a legtöbbet a mai gépkocsiipar is pl. az autók belső borítóelemei (műszerfal, ajtó, csomagtér stb.) kialakításához. A közszükségleti műanyagok rendkívül alacsony ára (~1 USD/kg) a *polimerizációs láncreakció* technológiájának rendkívüli hatékonyságán alapszik.

A *polimerizáció* tehát olyan polimerlánc-felépítési eljárás, amelyben a tipikusan telítetlen, azaz C = C kettős kötést tartalmazó *monomer* molekulákat

- melléktermék képződése (kilépése) nélkül, és lényegében
- segédanyag hozzáadás nélkül, → tehát önmagukkal kapcsolva,
- hosszú ( $> 10^3$  tagú) láncba építjük,
- kovalens (C - C) kötések kialakításával
- gyors egymásutánban ismétlődő sorozatreakcióban, → *láncreakcióban*.

### 2.2.2 A polimerizációs láncreakció exoterm jellege

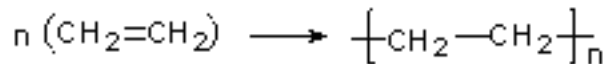
A *polimerizációs láncreakció* sok tekintetben hasonló az energetikai láncreakcióhoz:

- a kezdő lépés - (*iniciálás*) - megtétele után,
- nagyszámú ( $> 10^3$ ) egymás utáni - "növekedési" - lépés következik be (propagáció),
- (újabb) külső energia befektetése nélkül,
- önfenntartó sorozatban („önműködően”),
- hőenergia felszabadulással járó (*exoterm*) folyamatban, egészen
- az alapanyag *közelítőleg* teljes felhasználódásáig (konverzióig),
- vagy a lánc kívülről bevitt adalékkal történő lezárásáig v. átviteléig (lánczárás vagy láncátvitel).

A polimerizációs láncreakció lényegét legerőteljesebb, „legenergikusabb” vonásán, exoterm karakterén keresztül érzékeltethetjük.

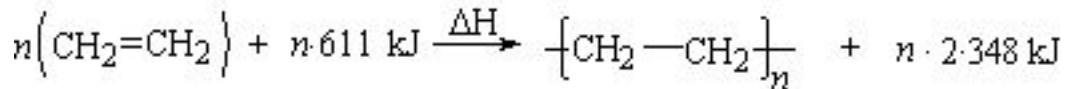
A legegyszerűbb monomer, az etilén polimerizációja jól szemlélteti azokat a hatalmas energiákat, amelyet a folyamatszabályozó mérnököknek e (csaknem) robbanásszerű láncreakcióban kézben kell tartania. Ahogyan a 2.2 táblázatban látható, a szén = szén közötti kettős kötés kohéziós energiája 611 kJ/mol (148 kcal/mol). Ez a kettős kötés nyílik fel és képez 2 db egyes kötetést a polimerizáció során, egyenként 348 kJ/mol kötőerőt képviselve.

Az etilén polimerizációja során tehát a következő energetikai folyamattal állunk szemben:



$$611 \text{ kJ/mol} \longrightarrow 348 + 348 \text{ kJ/mol} - \Delta H$$

Az 1 mól-ra vonatkoztatott energiamérleg azt jelenti, hogy etilénből 28 gramm (1 mól,  $6 \cdot 10^{23}$  molekula) átalakulása során a következő energiataralom változással kell számolnunk:



$$\Delta H = 611 - 2 \cdot 348 = 611 - 696 = -85 \text{ kJ/mol}$$

A létrejövő új energiaállapot több kötőerőt képvisel, mint a kiindulási állapot, a polimer állapot tehát energetikailag sokkal stabilisabb, mint a monomerállapot.

Az energiamérleg eredménye negatív, vagyis a láncreakció minden egyes lépése  $\Delta H = 85 \text{ kJ/mol}$  hőenergia felszabadulással jár. Ennek mértékét akkor ismerhetjük fel, ha tudjuk, hogy az etilén fajhője  $c_p = 2,1 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ , amiből következőleg adiabatikus esetben a hőmérsékletemelkedés:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p} = \frac{85 \text{ kJ/mol}}{0,028 \text{ kg/mol} \cdot 2,1 \text{ kJ/kg K}}$$

vagyis

$$\Delta T = 1450 \text{ K}$$

Tehát ha akár  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra hűtött cseppfolyós etilént próbálnánk *adiabatikus* körülmények között, hőelvezetés nélkül polimerizálni, a robbanásszerűen  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  fölé növekedett hőmérséklettel reagálna. Néhány monomerre ezt a maximális adiabatikus polimerizációs hőemelkedést a 2.4 táblázat mutatja. (26. oldal)

A folyamat irányításához egyrészt érdemes megismerkednünk a láncreakció rész-reakcióival (iniciálás, növekedés, láncczárás), és ezek energetikai karakterével, másrészt technológiai, gépészeti megoldást kell adnunk az exoterm hő szabályozott elvezetésére.

Ahogy a 2.4 táblázat bemutatja, a polimerizációs hő  $\Delta H_p$  a monomerek többségénél  $50 - 90 \text{ kJ/mol}$  közötti érték, s mivel az előbbi példában vett legkisebb molekulájú etilénnél az összes monomer móltömeg nagyobb, így az *adiabatikus* esetben fellépő polimerizációs *hőmérsékletemelkedés* az előbbi extrém példánál csak valamivel kisebb lehet.

A polimerizációs hő felszabadulása a reaktív technológiákban, – mint pl. egy üvegszállal erősített poliészter kompozit munkadarab legyártásánál, – külön figyelmet érdemel. E példánál, mivel a telítetlen poliészter gyanta 35–40 % sztirolt tartalmazhat, az exoterm hőeffektus akár  $(321 \times 0,40 =)$

~ 128 °C hőmérséklet-emelkedést is okozhat, ami elégtelen hőkontroll, rossz hőelvezetés esetén feszültségeket okozhat a munkadarabban (ld. később, 4. 13 ábra, 89. oldal és 14.14 ábra, 389 old.). Másfelől ezt a hőfelszabadulást megfelelő kalibráció esetén akár a polimerizáció konverziójának (teljes lefutásának, az átalakulásnak) ellenőrzésére, nyomonkövetésére is felhasználhatjuk.

Monomer	Képlet	Móltömeg	$\Delta H_p$ kJ/mol	$\Delta T_{\max}^*$ °K
etilén	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	28	85	1450
propilén	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$	42	84	980
akrilonitril	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CN}$	53	76	695
vinilklorid	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{Cl}$	62	94	738
sztirol	$\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{C}_6\text{H}_5$	104	69	321
metil-metakrilát	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 = \text{C} - \text{C} = \text{O} \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{O} - \text{CH}_3 \end{array}$	100	55	270

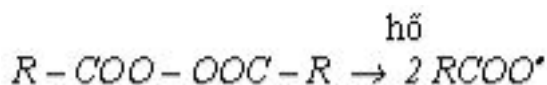
#### 4. táblázat - Folyadékállapotú monomerek polimerizációs hője és a polimerizáció adiabatikus hőemelkedése

$\Delta T_{\max}^*$ : a polimerizáció okozta hőmérséklet emelkedés adiabatikus esetben  $c_p = 2,1$  kJ/kg °K közelítő fajhővel számolva.

### 2.2.3 A polimerizáció kinetikája, folyamatszabályozása

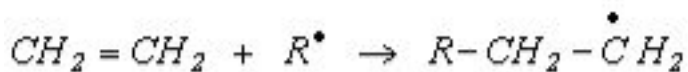
A viharos gyorsaságú polimerizációs láncreakció szabályozása az elemi kinetikai lépések, az iniciálás, láncnövekedés és lánczárás (láncátadás) szabályozásán alapul.

*Iniciálásra* az első monomer láncszem kettős kötésének felnyitására alkalmas, *szabad gyök* létrehozására képes *iniciátorokat* használunk. Ilyenek tipikusan a peroxi-vegyületek, pl. a benzoilperoxid

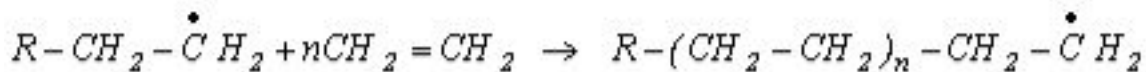


A termikus úton felhasított iniciátormolekula-maradék *párosítatlan elektronnal* rendelkező szabad gyök:  $\text{R}^{\bullet}$ .

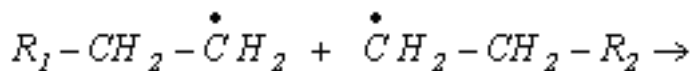
A *láncnövekedés* első lépését ez az  $\text{R}^{\bullet}$  szabad gyök indítja pl. az etilén monomerrel



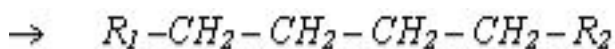
amely után  $n$  (tipikusan  $>10^3$ ) lépés már „magától” lejátszódik



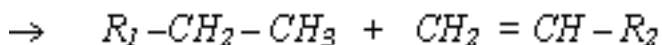
A láncczárásra tipikusan kétféle megoldás nyílik: rekombináció vagy diszproporcionálódás.



a) (re)kombináció



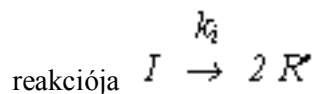
b) diszproporcionálódás



A lánccátadás történhet *monomerre*: a lánccvégi szabad gyökről a párosítatlan elektron „átadódhat” a monomernek, és ott új láncot indíthat. Hasonló lánccátadás megtörténhet a már „elkészült” polimer láncc „közepére” is, ott lánccelágazást indítva, vagy „inert” lánccátadószere, amely inaktív marad és nem vesz részt további polimerizációban. Az inaktív gyökfogók szélső esetben egészen lelassíthatják a polimerizáció sebességét, ezeket *retardereknek* nevezzük, vagy közbeléphetnek akár az indulni készülő polimerizációs láncc legelső lépésében is, teljesen meggátolva a polimerizáció létrejöttét: ezek az *inhibitorok*.

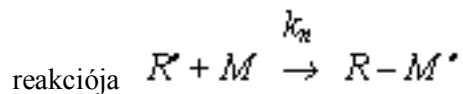
A polimerizáció lánccreakciójának kinetikáját, sebességi viszonyait a következő alapegyenletekkel írhatjuk le:

a) iniciálás



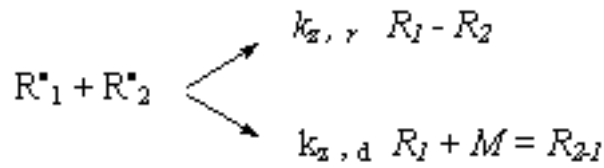
$$\text{sebessége } \frac{d[I]}{dt} = 2k_i[I]$$

b) lánccnövekedés



$$\text{sebessége } \frac{d[M]}{dt} = k_n \cdot [R^*][M]$$

c) láncczáródás



reakciója

$$\frac{d[R^*]}{dt} = k_{zb}[R^*]^2$$

sebessége

A folyamat kézben tartásához a polimerizáció bruttó folyamatát, a monomerkonverzió sebességét,

a (2.14) számú,  $\frac{d[M]}{dt} = k_n \cdot [R^*][M]$  egyenlettel leírt folyamatot kell pontosan ismernünk, amely a következő konverzióhoz vezet:

$$\Delta M = k_n \int_0^t [R^*][M] dt$$

Az  $R^*$  növekvő gyökök élettartama azonban rendkívül rövid, (nagyságrendileg 1 másodperc) és nincs mód a növekvő  $[R^*]$  gyökkoncentráció közvetlen (műszeres) mérésére. Ismerjük viszont a  $k_i$ ,  $k_n$ ,  $k_z$  sebességi együtthatókat, a monomerkoncentrációt  $[M]$ , és szabályozhatjuk az iniciálás sebességét a bevitt iniciátor koncentrációjával  $[I]$ .

A sikeres folyamatszabályozáshoz szükséges alapegyenlet-rendszer megoldásához három *peremfeltétel* megadása vezet el. A technológiai gyakorlat bebizonyította, hogy indokolt a következők feltételezése:

a) Az  $R^*$  növekvő gyök reaktivitása nem változik a lánc növekedése során. Az iniciátormolekula után kapcsolódó *első* monomeren található szabad gyök ugyanolyan aktív, mint akár  $10^3$  hosszúságú lánc végén. Ez abból adódik, hogy a következő láncszem megalkotására hivatott, mozgékony *monomermolekula* közelíti meg a hosszú lánchoz kötött szabad gyököt, és nem fordítva.

b) Bármilyen nagysebességű is a láncreakció, a fő szakaszban stacionárius állapot alakul ki: az iniciálás és a láncczárás sebessége megegyezik

$$\frac{d[R^*]}{dt} = 0$$

, vagyis



$$2 k_i [I] = k_z [R^*]^2$$

c) A monomer-átalakulás fő tömegét a *láncnövekedési* lépés adja, ez határozza meg a polimerizáció *sebességét*.

A b) feltételből ( $2 k_i [I] = k_z [R^*]^2$ ) következik, hogy ebből kifejezhetjük azt, ami egyébként nehezen lenne mérhető, az  $[R^*]$ -t:

$$[R^*] = \sqrt{\frac{2k_i}{k_z} \cdot [I]}$$

A sebességi állandókkal ki tudjuk fejezni a lánchosszúságot is.

A kinetikai lánchossz

$$v_n = \frac{\text{a monomer fogyás sebessége}}{\text{a gyökképződés sebessége}} = \frac{v_{pol}}{2k_i [I]}$$

$$v_{pol} = k_n \cdot k_i^{+0,5} \cdot k_z^{-0,5} [2I]^{0,5} [M]$$

Mézőki gyakorlat szempontjából a legfontosabb következménye a kinetikának: az *aktiválási energiák* kezelése. Mi az *aktiválási energia*?

**S. Arrhenius** (Nobel-díjas svéd kémikus, 1859–1927) használta először a legkülönbözőbb reakciók *sebességi állandójának* kifejezésére a következő egyenletet:

$$k = A \cdot e^{-E_a/RT}$$

ahol k: a sebességi állandó

A: „frekvenciafaktor” = az ütközési gyakoriságból eredő hatékonysági tényező

$e^{-E_a/RT}$ : Maxwell-Boltzmann állandó, amelyben

E: az aktiválási energia (ld. később a viszkozitás hőmérsékletfüggését)

A monomerfogyás sebessége a polimerizációs sebesség alapján számítható ki:

$$\frac{dM}{M} = k_n \left( \frac{k_i}{k_z} \right)^{0,5} \cdot [2I]^{0,5} [M]$$

A polimerizációsebesség bruttó aktiválási energiája

$$E_{br} = E_n + \frac{1}{2} E_i - \frac{1}{2} E_z$$

$$E_{br} = 0,5 E_i + E_n - 0,5 E_z$$

Ei: az iniciálás aktiválási energiája, pl. peroxid bomlásra kb. 30 kcal/mol

$E_n$ : a növekedés aktiválási energiája, pl. sztírolra vonatkozóan 7,5 kcal/mol

$E_z$ : a lánczárás aktiválási energiája, pl. sztírolra 2 kcal/mol

Ezek után a sztírol polimerizációjának bruttó aktiválási energiája:

$$E_{br} = E_n + 0,5 E_i - 0,5 E_z = 7,5 + 0,5 \cdot 30 - 1 = 21,5 \text{ kcal/mol.}$$

Ez azt jelenti, hogy kb. 10 °C-onként megkettőződik a sebesség. De: ha „hidegen” (pl. elektronokkal) iniciáljuk a sztírol polimerizációját, akkor a bruttó aktiválási energia:

$$E_{br} = 7,5 + 0 - 1 = 6,5 \text{ kcal/mol, így a bruttó sebesség már jóval kevésbé függ a hőmérséklettől.}$$

#### 2.2.4 A polimerizáció műveleti megvalósítási módjai

A polimerizáció folyamatirányítása tehát elsősorban a kinetika paramétereinek ismeretén, kölcsönhatásaik felderítésén – technológiai kontrollján, kézbentartásán alapszik. Mivel a láncindítás, láncnövekedés és lánczárás hőmérsékletfüggése – aktiválási energiája – eltérő, így a polimerizációs *hőmérséklet* megválasztása és megfelelő határok között *tartása* az egyik legfontosabb technológiai paraméter. Másfelől az iniciátor koncentrációja és a lánczáró, illetve a láncátvivő adalékok koncentrációja szabályozható. A folyamatirányító mérnöknek természetesen nemcsak a polimerizációs folyamat *sebességét*, hanem a termék *minőségét* is szabályoznia kell. A polimerizáció hőmérséklete befolyásolja a polimer móltömegét, annak eloszlási függvényét, az elágazottságot, az esetleges ko-monomer beépülését és még sok más fontos tényezőt.

Az előzőekben megismertük a polimerizációs láncreakció erőteljesen exoterm jellegét, a részfolyamatok hőmérsékletfüggését. A polimerizáció nagyipari megvalósítása, a polimerek gazdaságos, nagytömegű gyártása tehát ennek az *exoterm* láncreakciónak a biztonságos és mégis hatékony levezetésén múlik. A kivitelezés közegét tekintve a megvalósítás történhet magában a monomerben, oldószer, hígítószer nélkül, ezt *tömbpolimerizációnak* hívjuk, de sok technológiai érv szól amellet, hogy ezt az erősen reaktív alapanyagot, a *monomert* „felhígított”, valamilyen közegben *elosztatott* állapotban polimerizáljuk. Így alakult ki az *oldószeres*, *emulziós* és *szuszpenziós* polimerizációs eljárás. A kiindulási anyag és a végtermék egyaránt lehet *homogén* fázisú (pl. oldat), vagy heterogén fázisú (emulzió, szuszpenzió, zagy) és ez is döntő technológiai következményekkel jár.

Az eljárásokra tipikus polimer példákat a következő, 2.5 táblázat mutat be.

Az *oldószeres* polimerizáció technológia indoka, hogy az exoterm reakciót a felhígított rendszerben a hígításnak megfelelően (pl. 5 rész oldószer: 1 rész monomer) csökkentett hőeffektussal vezethetjük le. Másrészt a késztermék is könnyebben kezelhető: az átalakult rendszer a polimerizációs konverzió végén kisebb viszkozitású oldat, ha *homogén* volt reakciójában, vagy jól kezelhető zagy, ha a reakcióközeg *heterogén* fázisúvá vált a konverzió végére.

	<b>homogén</b>	<b>heterogén</b>
tömbpolimerizáció	PS, PMMA, PVAC	PAN, PP
oldószeres-polimerizáció	PS-benzolban	PP hexánban
emulziós-polimerizáció	-	PVC, natur kaucsuk
szuszpenziós polimerizáció	-	PS (gyöngy), PVC (szuszpenziós)

### 5. táblázat - A polimerizáció műveleti megvalósítási módjai

Megválaszthatjuk ugyanis az oldószert úgy, hogy abban csak a monomer oldódjon, annak polimerje nem. A tömbpolimerizáció is lehet *homogén* vagy *heterogén*: a sztírol monomerben a polisztirol (PS) jól oldódik, ez homogén tömbpolimerizációra ad módot, míg az akrilnitril monomerből a PAN kicsapódik, ez heterogén tömbpolimerizáció.

Végül mindezeket az eljárásokat kivitelezhetjük szakaszos vagy folytonos üzemmódban, ami nyilvánvalóan eltérő gépészeti megoldásokat vonz.

A *tömbpolimerizáció*, a tiszta monomer konverziója polimerré, homogén fázisú eljárásban, szakaszos üzemmódban volna a legegyszerűbb eljárás, ami azonban a legnehezebb feladat elé állítaná a gépészeti megoldásért felelős technológust, elsősorban a felszabaduló óriási hőmennyiség *izoterm* elvezetése miatt. Érdekességként megjegyezzük, hogy ez az eljárás, amellyel a technológia korai (20. sz. eleji) története indult – helyenként ma is használatos eljárás: így polimerizálják jól temperált üvegtáblák között a metilmetakrilátot PMMA („plexiüveg”) lemezekké.

Jó néhány polimer esetén a különféle eljárás módok ma is reális alternatívaként rendelkezésünkre állnak: a polisztirolt (PS) előállíthatjuk tömbpolimerizációval, oldószeres, emulziós és szuszpenziós eljárással egyaránt, többet ezek közül folytonos üzemmódban is.

### 2.2.5 A polimerizáció technológiájának gépészeti berendezései

A polimerizációs láncreakció kivitelezésére szolgáló gépészeti berendezések rendszerezéséhez a legjobb vezérfonalat a technológia *szakaszos* kivitelezésétől, a *folytonos* üzemmód felé vezető áttekintés adja. Ez egyben a technológiák megvalósulásának történeti sorrendje is.

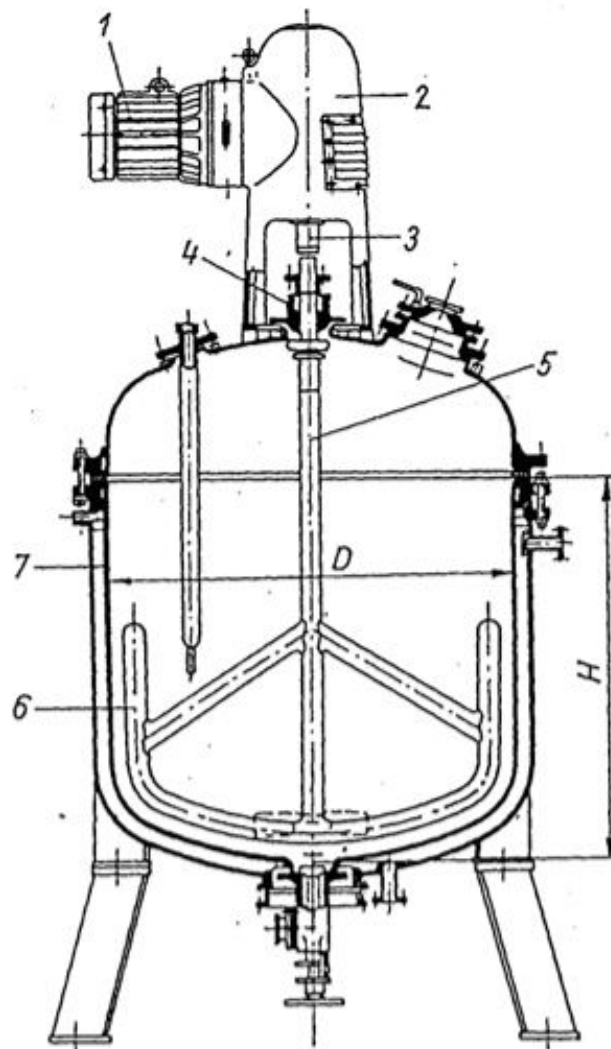
Ebben a rendszerben érdemes áttekintenünk a

- keverős, egyedi tartály - reaktorokat, a
- sorbakapcsolt tartály-reaktorokat (kaszád-reaktorokat)
- a csiga-reaktorokat,
- a csőreaktorokat, s végül különlegességként:
- a formaadó, szerszám-reaktorokat.

A polimerlánc kialakításának legegyszerűbb technológiája: *szakaszos* üzemmódban végrehajtott polimerizáció egyedi, keverős tartály-reaktorban.

A tartály-reaktor gépészeti alpmegoldását a 2.1 ábra mutatja.

A korszerű vegyipar sokféle célra használ ilyen hengeres, keverős, nyomásálló reaktorokat. Hasznos térfogatuk tipikusan 1–10 m<sup>3</sup>, az ennél kisebb kísérleti berendezésnek számít, nem ritka azonban a nagyobb térfogat sem. Tipikusan állóhelyzetűek, ritka a fekvő hengeres elrendezés. Kettősfalúak („duplikátorok”) a fűtés ill. a hő-kontroll megvalósításának céljából. A keverők meghajtása robbanásbiztos motorral történik, és jelentős nyomatékot képvisel: a monomer viszkozitása ugyanis a tömbpolimerizáció elején 8 nagyságrenddel kisebb lehet, mint saját polimerjének ömledékvizkozitása a folyamat végén. Ez a gépészeti szempont állt – egyebek között – amögött, hogy a tömbpolimerizáció helyett megtalálják az oldószeres-, emulziós- és szuszpenziós polimerizáció műveleti megvalósítási módját. Ilyen hengeres keverős reaktorokban készül a szuszpenziós PVC, az emulziós PVC, a PAN, a PP és sok más polimer.



**2.1 ábra:** Kettősfalú, keverős tartály-reaktor 1) villamos motor, 2) hajtómű, 3) tengelykapcsoló, 4) tömszelence, 5) tengely, 6) keverő, 7) zománcozott autokláv [2.22]

A sorbakapcsolt tartály-reaktorokban végrehajtott polimerizáció egy lépés a szakaszos üzemmódtól a folyamatos üzemmód felé. Három- vagy négy ilyen tartály-reaktor lépcsőzetes egymás-mögé kapcsolásával kialakított (kaskád) soron készül homogén tömbpolimerizációval a polisztirol. A lépcsőkre bontott eljárásban az első lépcsőben csak bizonyos fokú konverzióig jut el a rendszer. E polimerizációs konverzió elérésekor átvezetik az anyagot a következő tartályba, ahol már valamivel magasabb hőmérsékleten, de már hő-hozzávezetés nélkül folyik tovább a reakció. A következő reaktorokban még magasabb hőmérsékleten éri el a konverzió a kívánt fokot. Egy tipikus polisztirol-gyártó soron ezek a lépcsők a következő paraméterekkel valósulnak meg:

1. lépcső: 100–125 °C, konverzió: 25 %

2. lépcső: 125–150 °C, konverzió: 50 %

3. lépcső: 150–175 °C, konverzió: 75 %

Az átalakulatlan monomert természetesen visszavezetik. A reaktorok között az egyre viszkózusabb polimer oldatot fogaskerék-szivattyúk szállítják.

A *csiga-reaktor* éppen az ilyen egyre nagyobb viszkozitású polimerömladék szállítására tervezték. Az elvet talán itt elég csak megemlítenünk, berendezését az egy- vagy többcsigás extrudert a 6.2 fejezetben (176. old.) és a 8. fejezetben (193. old.) részletesen ismertetjük. Szó esik majd a reaktív extruzióról, ami az extruderben lefolyó polimerizációt, kopolimerizációt vagy térhálósítást jelent.

A *csőreaktor* a polimerizációs reakciók folytonos üzemű megvalósításának legmodernebb gépészeti megoldása. A többszáz méter hosszúságú, 40–50 mm átmérőjű acélsőben nemcsak a programozott hőmérsékleti kontroll, hanem a cső a csőben hőcserélő elvével a leggazdaságosabb hő-visszanyerés is megvalósítható. Így készül hazánkban is többféle PE típus, amelyek technológiai ismertetésére a későbbiekben (4.1.1 fejezet, 53. oldal) kerül sor.

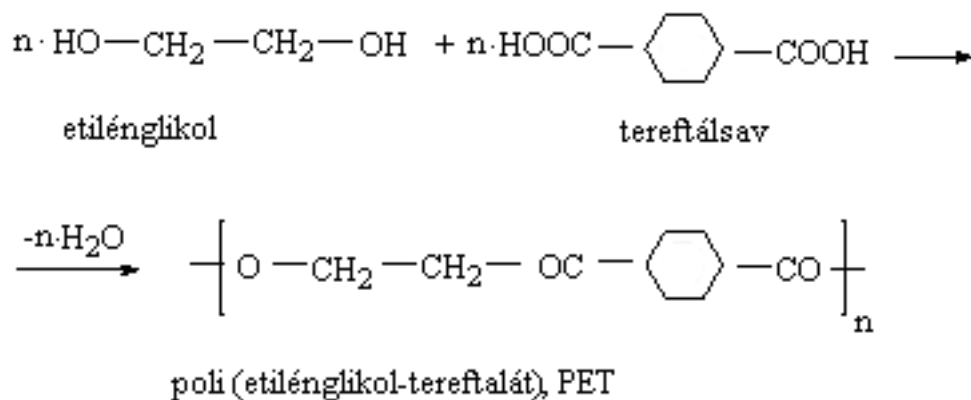
Végül nem felejtkezhetünk el arról, hogy a *térhálós* polimer termékhez vezető reakciókat magában a formaadó *szerszámban* kell elvégeznünk, így maga a szerszám válik a polimerizáció gépészeti berendezésévé. A gumiabroncs gyártó szerszámban alakul ki a térhálós gumiszerkezet, – ez így szakaszos üzemmódú (kémiai) reaktor. A térhálós – és így hőálló – polietilén kábelbevonat térhálósítása történhet magában a kábelbevonó szerszámban – ott is a szerszám a kémiai reaktor, méghozzá folyamatos üzemmódot biztosítva (ld. pl. 13. fejezet, 325. oldal).

### **2.3 A polikondenzáció technikája**

A polikondenzáció tehát melléktermék kilépésével járó *kondenzációs* reakciók *lépésenként*, egyesével megvalósított ismétlésével építi fel a makromolekulát. A melléktermék tipikusan vízmolekula, de lehet más is. A *polikondenzációra* olyan monomerek alkalmasak, amelyeken a

kondenzációra képes csoportból legalább kettő van: *bifunkciósak*. Ha elágazást (térhálót) akarunk létrehozni, akkor legalábbis *trifunkciós* monomer láncszemekre van szükség.

Polikondenzációval épül fel pl. az a lineáris (hőre lágyuló) típusú poliészter, a poli(etilén-tereftalát) (PET), amelyből kitűnő műszál, vagy nyomásálló üdítőitalos palack készül:



Hasonló elven épül fel a poliamid (PA) is, amelyet a 4.1.1.3 fejezet mutat be. (63. old.)

### 2.3.1 A polikondenzáció folyamatszabályozása

A polikondenzáció tehát nem viharos gyorsaságú láncreakció, hanem viszonylag békés, lassú reakciólépések egymás utáni sora. A reakció lefolytatásához tipikusan energia befektetésre van szükség, amely a melléktermékként keletkező kismolekulás anyag – tipikusan vízmolekula – eltávolításához további hőmennyiség ráfordítását igényli. A folyamatszabályozásnak itt más típusú nehézséget kell leküzdenie, mint a polimerizációs láncreakcióban. Ennek megértéséhez nézzük át a polikondenzáció időbeni lefutásának, *kinetikájának* alapegyenleteit.

A polikondenzáció kinetikáját a poliamid (NYLON) feltalálója W. H. Carothers- (1896–1937, USA) írta le a kitűnő műszál technológiai kidolgozásával egyidejűleg az 1930-as években.

Ha  $N_0$  számú kiindulási molekulából  $N$  a keletkező makromolekulák száma, akkor a  $DP$  polimerizációs fokra egyszerű összefüggés érvényes:

$$DP = \frac{N_0}{N} = \frac{C_0}{C}$$

ahol:  $C_0$ : a funkciós csoportok kezdeti koncentrációja,

$C$ : a funkciós csoportok végső koncentrációja (a polikondenzációs folyamat végén)

Ha  $\zeta$ -vel („kszi”) jelöljük az átalakulást, a 0 1 felé tartó konverziót, akkor a

$$\xi = \frac{C_o - C}{C_o} = 1 - \frac{C}{C_o}$$

összefüggésből adódik, hogy

$$\frac{C}{C_o} = 1 - \xi$$

és

$$\frac{C_o}{C} = \frac{1}{1 - \xi}$$

A 2.28 és a 2.31 egyenlet összevetéséből adódik, hogy

$$DP = \frac{1}{1 - \xi}$$

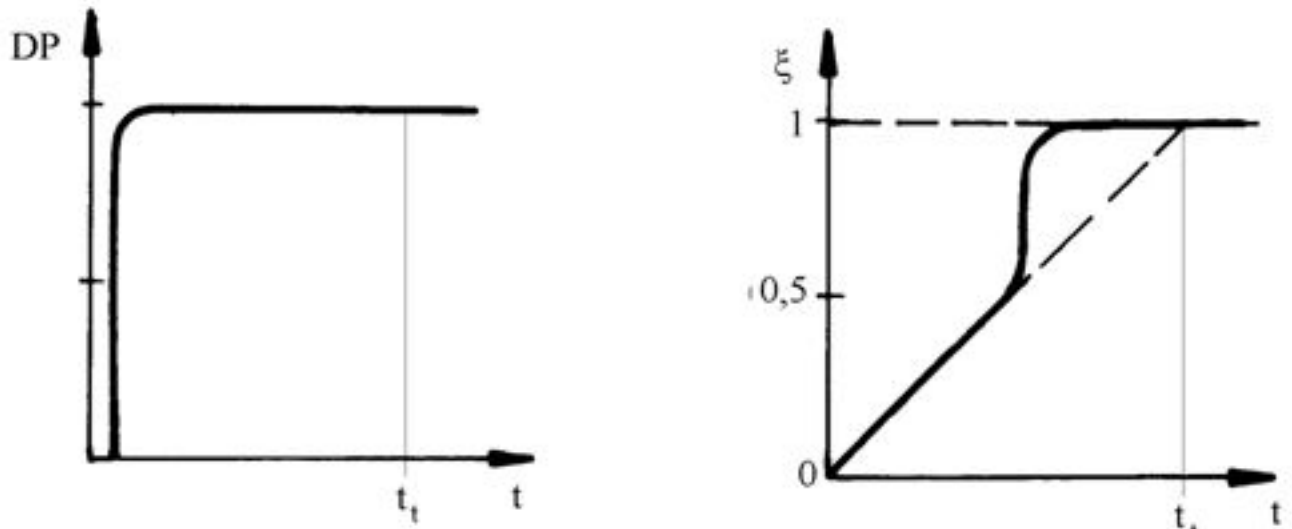
Ezt a 2.32 egyenletet hívjuk Carothers egyenletnek, amiből  $\xi$  és DP összefüggésére a következő számsor adódik (2.6 táblázat):

$\xi$	0,50	0,80	0,90	0,95	0,99	0,998	0,999
DP	2	5	10	20	100	500	1000

**6. táblázat - Polimerizációs fok (DP) a Carothers egyenletből különböző  $\xi$  értékeknél**

A Carothers egyenlet tehát azt fejezi ki, hogy igen magas konverziót, a 100 %-os átalakulást 0,1 %-nál is pontosabban megközelítő „beépítést” kell elérnünk ahhoz, hogy valóban polimer jellegű,  $10^3$ - lánctagból álló szerkezeti anyagot hozzunk létre.

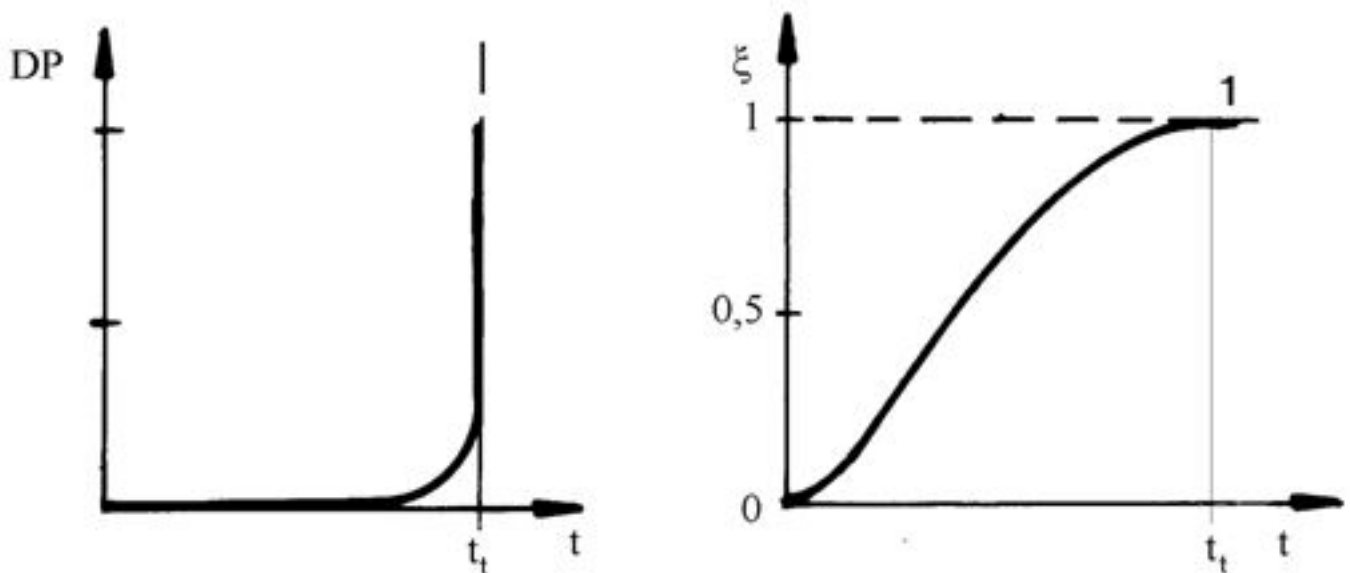
Ebben áll a polikondenzáció folyamatszabályozásának nehézsége: csak a gyakorlatilag teljes átalakulás ad műszakilag hasznosítható polimer anyagot, és ennek a teljes átalakulásnak eléréséhez igen pontos molarányok kialakítására, kézbentartására van szükség. Ebben a technológiában is – mint annyi minden másban – csak a *teljes minőségbiztosítás (total quality management, TQM)* ad elfogadható eredményt.



**2.2 ábra:** A polimerizációs fok és a konverzió összefüggése a **polimerizáció** során;  $t_t$ : a „teljes” konverzióhoz szükséges idő

A 2.2 és a 2.3 ábrák összehasonlítják a polimerizáció és a polikondenzáció konverziójához ( $\xi$ ) kapcsolódó polimerlánc-hosszúságot ( $DP$ ).

Amint az a 2.2 ábrán látható, a polimerizációs láncreakcióban már a legkisebb, konverzió során is a kívánt végleges lánc-hosszúság és  $DP$  alakul ki, – amelyet a láncczárás mechanizmusával ill. a lánccátadó szerekekkel szabályozhatunk. Ezzel szemben a polikondenzációban (2.2 ábra) a kívánt  $DP$  csak a konverzió legvégén jelenik meg.



**2.3 ábra:** A polimerizációs fok és a konverzió összefüggése a **polikondenzáció** során;  $t_t$ : a „teljes” konverzióhoz szükséges idő



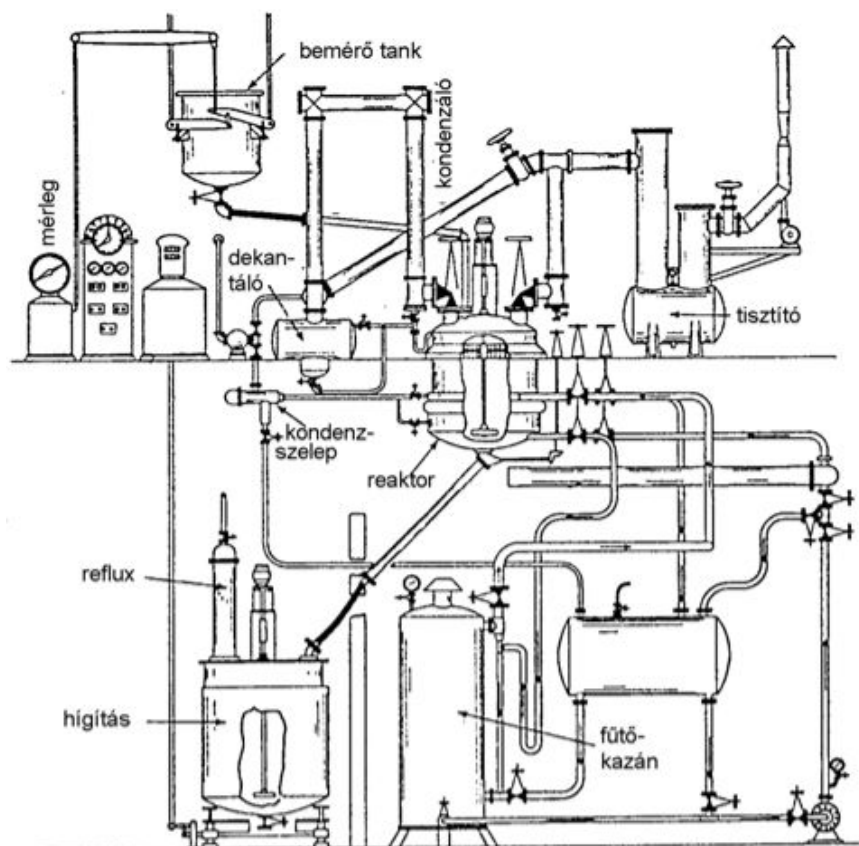
### 2.3.2 A polikondenzáció gépészeti berendezései

A polikondenzáció folyamatirányítása tehát abból a szempontból egyszerűbb, hogy ez lassúbb, gyakorlatilag mindvégig fűtést igénylő vegyipari folyamat. A gépészeti megvalósítás alapegysége itt is a kettősfalú nyomásálló, kevert állóhenger: a *duplikátor*. Ez látható a példaként bemutatott 2.4 ábra közepén is.

A tipikusan 1–3 m<sup>3</sup>-es duplikátor kétszintes elrendezés felső szintjén foglal helyet. Efőltt van a bemérő tank, alatta pedig a készterméket befogadó, azt szükség esetén hígító tank. A fűtést erre a célra gyártott, magas hőmérsékletet (pl. 250 °C) tűrő fűtőolaj-keringtető rendszer biztosítja (Dowtherm).

A melléktermék folytonos eltávolítása – és mérése – mellett nyomon kell követni a készülő gyanta bizonyos kémiai jellemzőit is (pl. a poliésztergyanta „savszámát”) amiből a kialakuló móltömegre lehet következtetni.

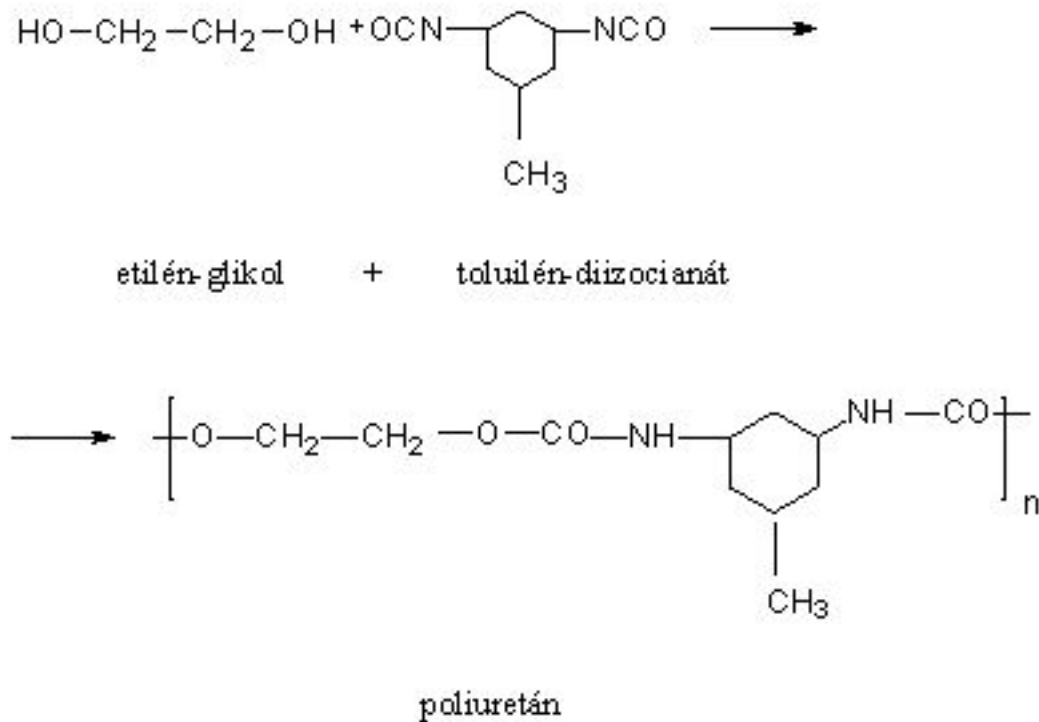
Ilyen típusú gépészeti berendezésben készülnek például az alkid gyanták, a telítetlen poliészter gyanták, nemcsak a festékipar számára, hanem a nagyszilárdságú üvegszállal erősített polimer kompozitok matrixanyagának céljára is.



2.4 ábra: Polikondenzációs reakció gépészeti megvalósítása poliészter típusú festékalapanyag gyártására [2.5]

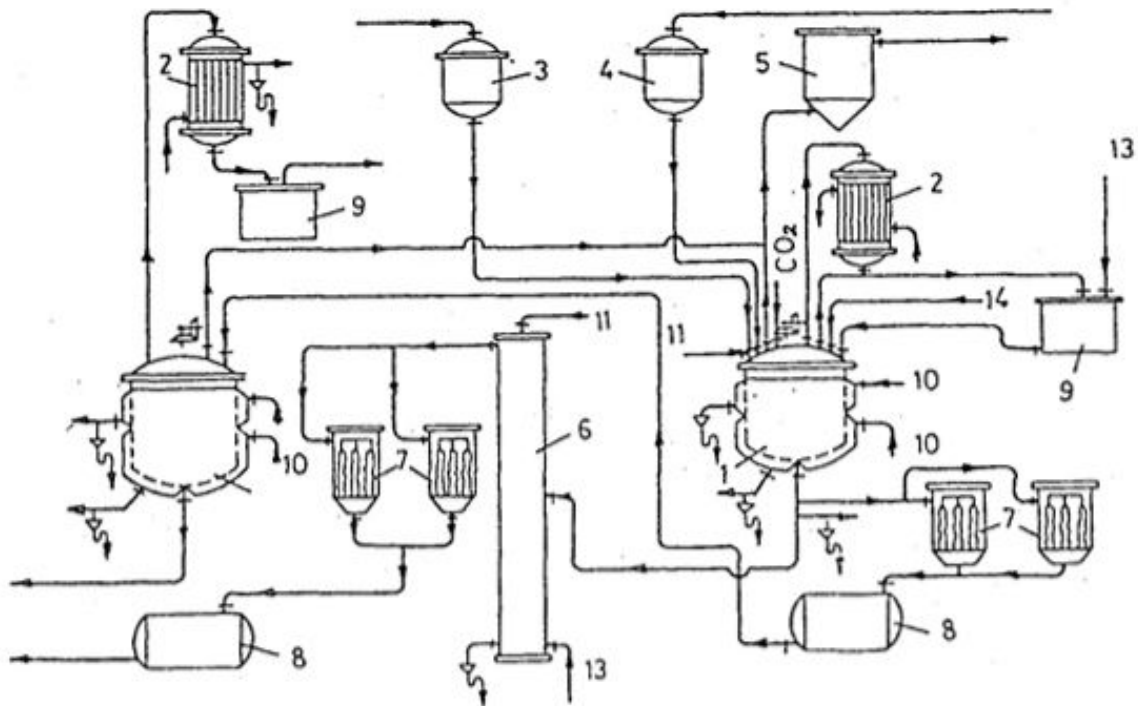
## 2.4 A poliaddíció, mint polimerlánc gyártási technológia

A poliaddíció is viszonylag békés, lassú, lépcsős reakció, amely nem jár melléktermék képződéssel. Tipikus példa erre a poliuretán képződés di-*o*/ból (kétfunkciós alkoholból) és di-izocianátból:



Az uretán kötés  $-\text{R}_1-\text{O}-\text{CO}-\text{NH}-\text{R}_2-$  tehát egyfelől a poliészter észterkötésének, másfelől a poliamidok amid-kötésének jellegét és tulajdonságait hordozza. A poliaddíció kinetikáját is nagymértékben befolyásolja a reakcióba léptetendő anyagok molarányának, a *sztoichiometriának* pontos beállítása. Másfelől itt is, mint a polikondenzációban, kétfunkciós monomerekből csak lineáris (hőre lágyuló) termék keletkezik, a térhálós termék előállításához háromfunkciós partnerekre (pl. tri-izocianátra) van szükség.

A poliaddíciós polimerek tipikus képviselői, a poliuretánok és epoxivegyületek a legtöbbször térhálósak, így gépészeti berendezésük a végső kialakítás során – maga a szerszám. A közbülső termék, a még nem térhálósított epoxigyanta – mint előtermék, a végső makromolekula méreténél jóval kisebb *oligomer* előállításához a már bemutatott elemekből összeállított vegyipari gépészeti gyártóegységeket alkalmazzák. (2.5 ábra)



**2.5 ábra:** Epoxigyanta gyártásának folyamatábrája; 1) reaktor, 2) hűtő, 3) epiklórhidrin bemérő, 4) nátrium-hidroxid bemérő, 5) visszanyert epiklórhidrin, 6) mosó oszlop, 7) szűrő, 8) toluolos gyantaoldat, 9) toluol tartály, 10) gőz bevezetés, 11) víz bevezetés, 12) desztilláló, 13) toluol bevezetés, 14) dián adagolás

## 2.5 Szakirodalom

- Kumar A., Gupta R. K., *Fundamentals of Polymers*. McGraw-Hill. New York . 1998.
- Odian G., *Principles of Polymerization*. J. Wiley. New York . 1981.
- Billmeyer F. W., *Textbook of Polymer Science*. J. Wiley. New York . 1984.
- Rudin A., *The Elements of Polymer Science and Engineering*. Academic Press. New York . 1982.
- Rodriguez F., *Principles of Polymer Systems*. Hemisphere Publ., New York . 1989.
- Fried J. R., *Polymer Science and Technology*. Prentice-Hall Int. London . 1995.
- Saechtling H., *Kunststoff-Taschenbuch*. Hanser. München . 1992.
- Rubin (ed.) I., *Handbook of Plastic Materials and Technology*. J. Wiley. New York . 1990.
- Kleintjens L. A., Lemstra (eds.) P. J., *Integration of Fundamental Polymer Science and Technology*. Elsevier. New York, Amsterdam . 1986.
- Kroschwitz (ed.) J. I., *Polymers, an Encyclopedic Sourcebook of Engineering Properties*. J. Wiley. New York . 1987.
- Crawford R. J., *Plastics Engineering*. Pergamon. Oxford . 1987.
- Chabot J. F., *The Development of Plastics Processing Machinery and Methods (Society of Plastics Engineers Monographs)*. J. Wiley. New York . 1992.
- Hornbogen E., *Werkstoffe (Metallen, Keramik-, Polymer- und Verbundwerkstoffen)*. Springer. Berlin . 1991.
- Hellerich W., Harsch G., Haenle S., *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. Hanser. München . 1992.
- Domke W., *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Cornelsen Verl., Düsseldorf . 1986.
- Bargel H. J., Schulze G., *Werkstoffkunde*. VDI Verlag. Düsseldorf . 1988.
- Seymour R. B., *High Performance Polymers. Their Origin and Development*. Elsevier. Amsterdam . 1986.
- Schwarz O., *Kunststoffkunde*. Vogel Fachbuch. Würzburg . 1992.
- Frank A., Biederbick K., *Kunststoff – Compendium*. Fachbuch Verlag. Würzburg . 1990.
- Progelhof R. C., Throne J. L., *Polymer Engineering Principles*. Hanser. München . 1993.
- Saechtling H., *International Plastics Handbook*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.
- Fejes G., *Ipari keverőberendezések*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1970.
- Kovács L., *Műanyag zsebkönyv*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1979.
- Pukánszky B., *Műanyagok*. Műgyetemi Kiadó. Budapest . 1995.

# A MŰSZAKI CÉLÚ POLIMEREK TECHNOLÓGIAI CSOPORTOSÍTÁSA

## Tartalom

### [3.1 Hőre lágyuló és térhálós polimerek](#)

### [3.2 Kristályos és amorf hőre lágyuló polimerek, elasztomer és duromer polimerek dinamikus mechanikai analízise és feldolgozástechnikája közti kapcsolat](#)

### [3.3 Szakirodalom](#)

A polimer alkatrészt megtervezni és alkalmazni hivatott mérnök számára az alkalmas alapanyag kiválasztásának súlya, fontossága nyilvánvaló. A terméktervező mérnök döntése az alapanyagról nyilvánvalóan összefügg

- a termék fő céljával, az alapkoncepcióval,
- a termék funkcionális követelményeivel (mechanikai, fizikai, kémiai, termikus, stb. igénybevételével),
- árával, élettartamával, újrahasznosíthatóságával stb.

Sajnos, a piacgazdaságban sokszor megfordított a terméktervezés logikája: a legfontosabbá a legolcsóbb ár válik, akkor is, ha kevéssel költségesebb alapanyagból sokkal tartósabb terméket kaphatnánk. Az alapanyagár, mint rendező elv érvényesül – főleg a tengeren túl – a műanyagok hierarchiáját bemutató 3.1 ábrán.

Ez a táblázat azt is bemutatja, hogy a növekvő árral általában magasabb minőséget is kapunk, főleg a hőállóság tekintetében. A szilárdság, amely elsősorban a hajlító-szilárd-ságban és még inkább a moduluszban testesül meg a vevő számára, ellentmondásos követelmény. A magas hajlítómódulusz (amely szilárd, tartós anyag érzetét kelti a vevőben) a legtöbbször fordítva arányos az ütő-hajlító szilárdsággal, a szívóssággal.

Nyilvánvalóan sok más csoportosításban is áttekinthetjük a legfontosabb műszaki célú polimereket. Csoportosíthatjuk ezeket a szerkezet, vagy akár a felhasználási területek alapján is. Csoportosíthatjuk kémiai láncszerkezetük alapján:

- szénvázaz, a polimer láncban csak szenet tartalmazó és
- heteroláncú, a láncban egyéb atomot is (oxigént, nitrogént, ként stb.) tartalmazó polimerekre.

Könyvünkben a technológia, a feldolgozástechnika szempontjait helyezzük előtérbe. Osztályozásunk alapja tehát a képlékeny (plasztikus) alakíthatóság, így csoportjaink:

- hőre lágyuló *polimerek*, ezen belül
  - kristályos hőre lágyulók: LDPE, HDPE, LLDPE, PP, PA, POM, PET

- amorf hőre lágyulók /PVC, kPVC, PS, SAN, ABS, PMMA, PC és
- hőre nem lágyuló (térhálós) polimerek:
  - ritka térhálós elasztomerek: NR, SR, PUR,
  - sűrű térhálós duromerek
  - PF, UF, MF, UP, EP

*(A jórészt közismert rövidítések értelmezését a Függelékben találhatjuk meg.)*

Típus	Ár USD/kg	Sűrűség g/cm <sup>3</sup>	Hajlító modulus GPa	Szakítási szilárdság MPa	Ütésállóság* kJ/m <sup>2</sup>	Hőalaktart** °C	Tartós hőterhelés °C
<b>(Tömeg) Használati műanyagok (Commodity thermoplastics)</b>							
LDPE	0,95	0,92	0,20	16	nem törik	40	60
HDPE	0,95	0,95	0,70	27	n.t.	60	70
PP	1,05	0,91	1,10	29	4	55	100
kPVC	0,90	1,40	1,00	62	5	65	65
PS	1,30	1,05	3,20	55	2	80	50
<b>Köztes (műszaki) műanyagok (Intermediate thermoplastics)</b>							
PMMA	2,05	1,18	2,70	64	2	60	65
TPO	2,65	0,93	0,07	34	n.t.	..	..
CAB	2,85	1,18	1,10	26	30	62	60
ABS	3,00	1,07	3,20	38	20	80	75
<b>Műszaki műanyagok (Engineering thermoplastics)</b>							
PA-66	3,30	1,14	2,00	80	17	105	80
POM	3,40	1,42	2,80	66	8	110	90
PET	4,00	1,37	3,10	47	4		100
PC	4,80	1,20	2,10	62	25	138	150
PPS	5,60	1,30	3,40	75	2	137	200
<b>Hőálló műszaki műanyagok (Advanced thermoplastics)</b>							
PES	11,00	1,42	2,45	85	8	200	200
PTFE	12,50	2,17	0,41	30	14	40	250
LCP	20,00	1,35	15,00	200	15	346	300
PEEK	60,00	1,31	3,85	106	8	160	250
<b>Hőre nem lágyuló (térhálós) műanyagok (Thermosets)</b>							
PF	1,10	1,50	8,25	25	1,5	150	110
UF	1,38	1,50	9,65	30	2	130	70
UP	1,88	1,20	3,70	30	3		150
EP	10,00	1,25	2,40	40	4	200	130

**3.1 ábra:** A műanyagok hierarchiája; \* hornyolt Charpy (DIN 53453); \*\* HDT (Heat Distortion Temperature, terhelés alatti lehajlás hőmérséklete); 1,85 MPa terhelésnél (ASTM D 256); n.t.: nem törik

### 3.1 Hőre lágyuló és térhálós polimerek

A két fő csoport élesen elválik a feldolgozási technológiák tekintetében. Míg a hőre lágyulók feldolgozása egyszerű *képlékeny alakítás* (fröccsöntés, extrúzió, kalanderezés, melegen /vákuummal/- formázás stb.) – addig a hőre nem lágyulók feldolgozása *reaktív technológia*, ahol rendszerint magában a szerszámban, a feldolgozás során alakítjuk ki, visszafordíthatatlan kémiai reakcióban a kívánt sűrűségű térhálót.

A hőre lágyulók kiemelését az is indokolja, hogy ez a csoport adja a szintetikus polimerek legsikeresebb, legnagyobb volumenben gyártott hányadát, a 20. század második felének forradalmian új anyagait. A manapság gyártott polimerek 85–90 %-a hőre lágyuló.

A hőre nem lágyuló, térhálós polimerek között viszont ott vannak a legsikeresebbek, a fejlett technikát szolgáló ún. „high-tech” alkalmazásokban

- kiváló szilárdságuk
- kiemelt hőállóságuk, ill.
- a kúszás- és feszültségrelaxáció lecsökkentésében mutatott

műszaki előnyeik miatt. Nem véletlenül, itt találjuk a legjobb mátrix anyagokat a nagyszilárdságú kompozitokhoz is.

Hogyan tájékozódhat a tervezőmérnök a polimer anyagok kiválasztása során? A *kereskedelmi* márkanevекből, mint pl. ARALDIT, KEVLAR, NYLON manapság 4–5000-et találhatunk a megfelelő adatbázisokban, s ezek ráadásul nem is mindig árulják el a pontos anyagszerkezetet. S ha tudjuk is pl. hogy *epoxigyantáról* van szó ( pl. az ARALDIT esetében), az megint csak a legalapvetőbb kémiai szerkezet tekintetében is több tucat változatot jelenthet. S ha már az adott márkanév mögött a szerkezet is tisztázott, az adott terméktípusból is tucatnyi változatot ajánl az adott cég aszerint, hogy az anyagot milyen feldolgozási technológiára szánjuk. Más és más móltömegű, sőt móltömeg-eloszlású polimert kell választanunk a sajtoláshoz, az extrúzióhoz, a fröccsöntéshez, a szálképzéshez stb. És akkor még nem is említettük a különféleképp adalékolt, stabilizált, töltött és szálerősített változatokat. A 21. század elejének globális, nyitott gazdaságában – amelyben a műanyag alapanyag vámmentes szabad termék hazánkban is – több mint tízezer polimer anyagtípusból kell a tervezőmérnöknek az optimumot kiválasztania.

Mindehhez természetesen ma már jól hozzáférhető számítógépes adatbázisok állnak rendelkezésre. A leghasználatosabbak:

- *CAMPUS (Computer Assisted Materials Pre-selection by Universal Standards)*,
- *RAPRA (Rubber and Plastics Research Association)*,
- *CHEMPLAS (Materials Database for Chemicals and Plastics) stb.*

Ezek ma már több ezer polimeranyagra kínálnak nemcsak

- adatokat a legfontosabb mechanikai, fizikai, kémiai, termikus, villamos stb. tulajdonságokról, hanem
- függvényeket, görbéket, sőt többdimenziós felületeket, mátrixokat is.

Az utóbbi megközelítés igen fontos: „*nicht Kennwerte, sondern Kennfunktionen!*” = ne pontszerű adatokat, hanem ezek *függését* keressük a legfontosabb paraméterek: pl. a hőmérséklet és idő függvényében, – s ezekkel gazdálkodjunk, ezekkel tervezzünk. A baj csak az, hogy a funkcionális követelmények pl.: merevség és egyidejűleg szívósság (rugalmassági modulusz ↔ ütésállóság) gyakran egymásnak ellentmondóak. A kompromisszumot, az optimumot nem a számítógép keresi meg, – azt a tervezőmérnöknek kell megtalálnia.

### **3.2 Kristályos és amorf hőre lágyuló polimerek, elasztomer és duromer polimerek dinamikus mechanikai analízise és feldolgozástechnikája közti kapcsolat**

A feldolgozástechnika logikáján alapuló csoportosítás legjellemzőbb tulajdonság-függvényét a dinamikus mechanikai analízis (DMA) adja. Ahogy azt a Polimer anyagszerkezettan [3.1] bemutatta, a DMA görbéket azért tekinthetjük a legkorszerűbb mechanikai igénybevétel – válaszfüggvénynek, mert

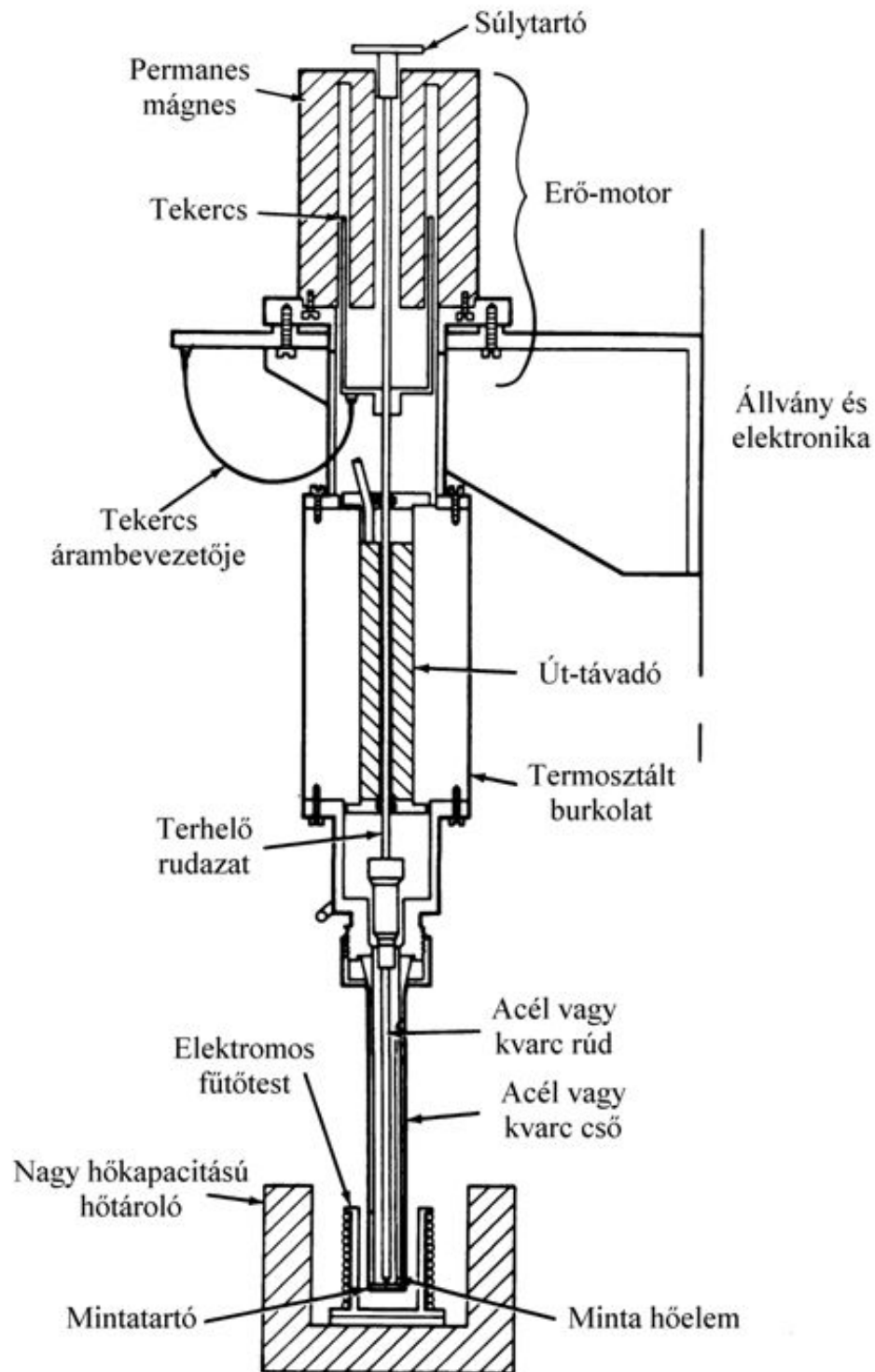
- a polimerek szokásos, kismértékű deformáció tartományában megjelenő válaszokat tükrözi,
- ismételt igénybevétellel kapcsolt, dinamikus terheléssel vizsgál,
- a hőmérséklet széles tartományában adott válaszokat jeleníti meg, s
- az igénybevétel sebességétől, frekvenciájától való függést is bemutatja.

A DMA függvény tehát a polimer anyagvizsgálat legkorszerűbb eszköze, mert bemutatja a polimerek kettős, viszko-elasztikus arculatának legfontosabb vonásait, és ezzel jellemezhetjük a legfontosabb funkcionális tulajdonságokat is, mint a rugalmassági moduluszt és a csillapítás képességéhez kapcsolódó veszteségi tényezőt ( $\tan \delta$ ).

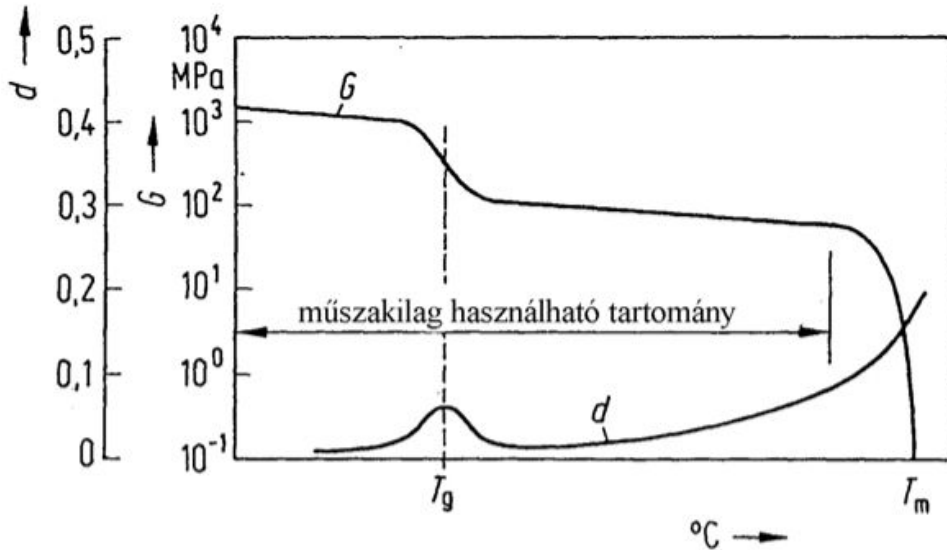
A 3.2 ábra bemutatja egy korszerű, nagy értékű DMA berendezés (*Perkin-Elmer* DMA 7, értéke több mint 100 000 DM) keresztmetszetét. A berendezés lényege tehát az érzékelő legszűkebb pontján csatlakoztatott húzó-, hajlító- vagy nyomó igénybevételt biztosító próbatest mérőfej, amely egy programozott hőmérséklet-emelkedést nyújtó termosztátba merül. A hőmérsékleti program a szokásos esetben a cseppfolyós nitrogén ( $-177\text{ °C}$ ) hőmérsékletétől max.  $+500\text{ °C}$ -ig terjed. A mérés legfontosabb információit: a komplex rugalmassági modulusz összetevőit (pl. a  $G$  nyírási moduluszt és a  $d$  mechanikai veszteségi tényezőt) számítógép dolgozza fel. A következőkben



technológiai szempontú csoportosításunk négy polimer alaptípusának DMA típusgörbéit a 3.3 – 3.6 ábrákon mutatjuk be.



3.2 ábra: A Perkin-Elmer DMA 7-es készülék metszete [3.18]



**3.3 ábra:** Kristályos hőre lágyuló polimerek DMA görbéje (G: dinamikus (tárolási) nyírási modulusz, d: mechanikai veszteségi tényező) [3.7]

A kristályos hőre lágyulók tipikus feldolgozási tartománya természetesen a  $T_m$  olvadási hőmérséklet feletti, ömledékhőmérséklet. A felhasználás tipikus tartománya az a széles plató, amely közelítőleg változatlan értékű  $G$  moduluszt tükröz a  $T_m$  olvadási hőmérséklet alatt, a  $T_g$  üvegesedési hőmérséklet felett. A kristályos hőre lágyulók fő képviselőinél, a polietilénél és a polipropilénél a  $T_g$  alatt – az üveges, rideg törés veszélye miatt – nem javasolható a felhasználás. Más esetekben a felhasználás átnyúlhat a  $T_g$  alá is.

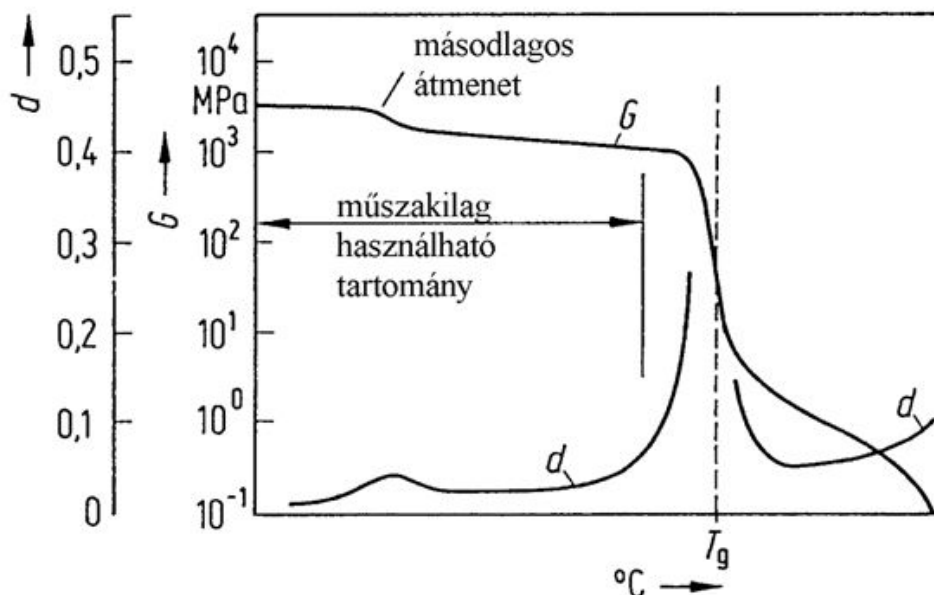
A leggyakoribb kristályos hőre lágyulók  $T_g$  és  $T_m$  határhőmérsékleteit a következő adatok mutatják:

Polimer	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
HDPE	-110	+130
LDPE	-110	+110
PP	-10	+168
PAN	+104	+317
PA-6	+50	+228
PEEK	+113	+340
POM	-60	+168
PET	+73	+255

**1. táblázat - A leggyakoribb kristályos hőre lágyulók  $T_g$  és  $T_m$  határhőmérsékletei**

Az amorf, hőre lágyuló polimerek  $T_g$  átmeneti hőmérséklet tartománya szélesebb, mint a kristályos hőre lágyulóké, és sokkal jelentősebb, nagyságrendi moduluszváltozással jár. Ennek is következménye, hogy a tipikus felhasználási tartomány az amorf hőre lágyulók esetében  $T_g$  alatti. A

3.4 ábrán is látható, hogy a  $T_g$  alatt található az a széles modulusz plató, ami a műszaki alkalmazáshoz szükséges GPa nagyságrendű rugalmassági moduluszt biztosítja.



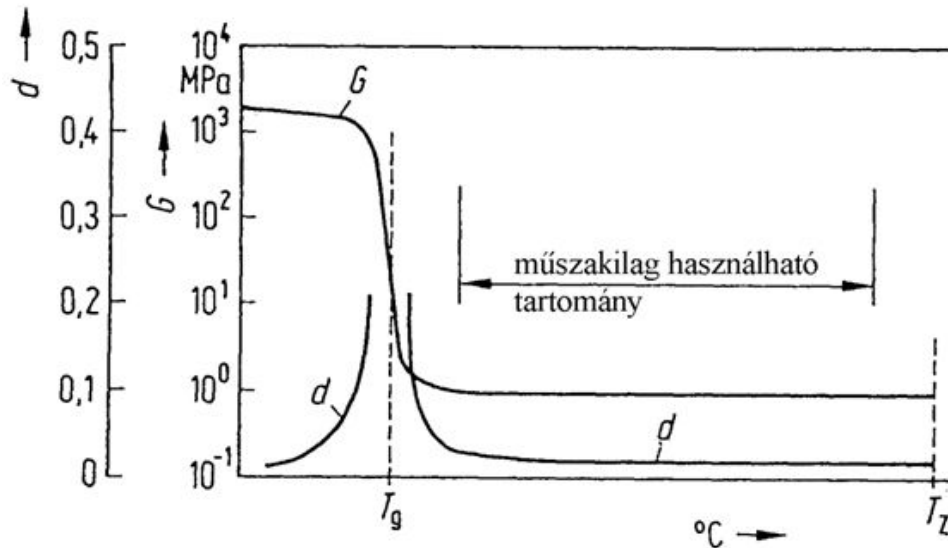
**3.4 ábra:** Amorf, hőre lágyuló polimerek DMA görbéje (  $G$ : dinamikus (tárolási) nyírási modulusz,  $d$ : mechanikai veszteségi tényező) [3.7]

A leggyakoribb amorf hőre lágyulók  $T_g$  és  $T_m$  határhőmérsékleteit a következő adatok mutatják:

Polimer	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
kPVC	+80	+165
PMMA	+110	+210
PC	+140	+270
PS	+90	+240
ABS	+110	+250

**2. táblázat - A leggyakoribb amorf hőre lágyulók  $T_g$  és  $T_m$  határhőmérsékletei**

A 3.5 ábra, az elasztomerek tipikus DMA görbéje bemutatja, hogy a ritka térhálós elasztomer mint például egy személygépkocsi gumibroncsa, nagyságrendileg a MPa tartományban igen széles hőmérséklettartományban gyakorlatilag állandó rugalmassági moduluszt mutat, és itt ugyanúgy állandó mechanikai veszteségi tényező jellemző rá.



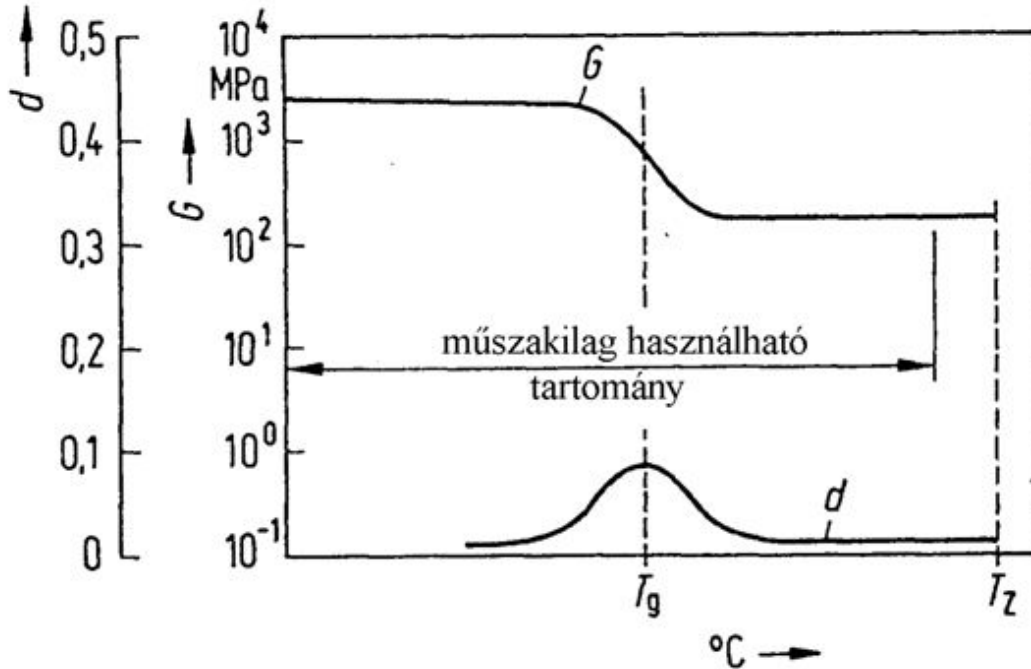
**3.5 ábra:** Ritka térhálós elasztomerek DMA görbéje ( $G$ : dinamikus (tárolási) nyírási modulusz,  $d$ : mechanikai veszteségi tényező) [3.7]

Az elasztomerek DMA görbájéből kiderül, hogy ezek az anyagok magasabb hőmérsékleten sem olvadnak meg. A legmagasabb eltűrt hőmérséklet-határ  $T_z$  (ld. ábra) után nem olvadás, hanem termikus bomlás (megpörkölődés, elszénesedés) következik be. A konstruktőr által felhasználható széles hőmérséklettartományt felülről ennek a bomlási hőmérsékletnek a biztonságos elkerülése határolja be. Az alsó határ ugyanígy nem kerülhet a  $T_g$  alá – sőt közelébe se, - mivel az üvegesedés hőmérsékletén az elasztomerek rugalmassági modulusza akár három nagyságrenddel is megváltozik. Ez azt jelenti, hogy ez alatt a hőmérséklet alatt az elasztomer hirtelen rendkívül rideggé, törékennyé válik, és így alkalmatlan a rendszerint csillapító karakterével összefüggő funkcióinak betöltésére. Szerencsére a tipikus elasztomerek esetében ezek a  $T_g$  értékek messze a  $0$  °C alatti tartományba esnek.

Tipikus elasztomerek:

- természetes gumi (NR)
- szintetikus gumi (SR)
- és a széles tartományban térhálósítható poliuretánok (PUR)

A termoplasztikus elasztomer (TPE) család nem tipikus elasztomer (ld. 83. oldal, 4.1.3.2 fejezet). Ez az anyag ugyanis a felhasználás hőmérsékletén gumyszerűen viselkedik, mintha térhálós lenne, de magasabb hőmérsékleten megolvasztható, és így fröccsönthető is. Technikai előnyei miatt egyre nagyobb teret nyer az elasztomerek között.



**3.6 ábra:** Sűrű térhálós duromerek DMA görbéje (G: dinamikus (tárolási) nyírési modulusz, d: mechanikai veszteségi tényező) [3.7]

A duromerek DMA görbéjéből látszik, hogy ezek az anyagok sem olvadnak meg magasabb hőmérsékleten. A legmagasabb eltűrt hőmérséklet-határ után itt sem olvadás, hanem termikus bomlás következik be. A különbség az elasztomerekkel szemben az, hogy a  $T_g$  itt nem okoz nagy változást a moduluszban és emiatt a felhasználás hőmérséklettartománya igen széles,  $T_g$  alatti és feletti területeket egyaránt felölel.

A 3.5 és a 3.6 ábrák összevetéséből az is kikövetkeztethető, hogy a térhálós polimerek  $T_g$  feletti modulusz-platója a térhálósság fokával – a térháló-sűrűség növelésével emelhető. Ez jól tükröződik azoknak a technikai polimereknek a DMA görbéin, amelyek térhálósságát gyakorlatilag „fokozatmentes” finomsággal, tetszőleges térháló-sűrűsége állíthatjuk be, mint pl. a poliuretánok, vagy az utólagosan térhálósított polietilén esetén.

Tipikus duromerek a PF, UF, MF, kondenzációs gyanták, a telítetlen poliészterek (UP), az epoxigyanták (EP).

A DMA-hoz hasonló görbét kreálhatunk a szakítószilárdság, a szakadási nyúlás, az ütésállóság, sőt: akár a termikus dilatáció hőmérsékletfüggéséből is. Hasonló görbét találunk a 11. Melegalakítás fejezetben (11.1 és 11.2 ábra, 292–293. oldal) Technikai csoportosításunk alapelve tehát sokoldalúan indokolt.

### 3.3 Szakirodalom

Bodor G., Vas L. M., *Polimer anyagszerkezettan*. Műegyetemi Kiadó. Budapest. 1995.

- Oudet C.. *Polymères, Structure et Propriétés*. Masson. Paris . 1994.
- Halász L.. Zrínyi M.. *Bevezetés a polimerfizikába*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1989.
- Kumar A.. Gupta R. K.. *Fundamentals of Polymers*. McGraw-Hill. New York . 1998.
- Menges G.. *Werkstoffkunde Kunststoffe*. Hanser. München . 1990.
- Ehrenstein G. W.. *Kunststoff Schadenanalyse*. Hanser. München . 1992.
- Erhard G.. *Konstruieren mit Kunststoffen*. Hanser. München . 1993.
- Schmiedel H.. *Handbuch der Kunststoffprüfung*. Hanser. München . 1992.
- Hertzberg R. W.. *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*. J. Wiley. New York . 1989.
- Gruenwald G.. *Plastics. How Structure Determines Properties*. Hanser. München . 1992.
- Sperling L. H.. *Introduction to Physical Polymer Science*. Wiley. New York . 1986.
- Becker W.. Braun D.. Carlowitz B.. *Die Kunststoffe*. Hanser. München . 1990.
- Schmiedel H.. *Handbuch der Kunststoffprüfung*. Hanser. München . 1992.
- Menges G.. Recker H.. *Automatisierung in der Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1986.
- Retting W.. Laun H. M.. *Kunststoff-Physik*. Hanser. München . 1991.
- Retting W.. *Mechanik der Kunststoffe*. Hanser. München . 1991.
- Michler G. H.. *Kunststoff-Mikromechanik*. Hanser. München . 1992.
- Rodriguez F.. *Principles of Polymer Systems*. Hemisphere Publ. Co. (McGraw Hill). New York . 1989.
- Elias H. G.. *Macromolecules*. Plenum Press. New York . 1984.
- Elias H. G.. *Mega Molecules*. Springer. Berlin-New York . 1985.
- Brydson J. A.. *Plastics Materials*. Butterworth, Woburn, Mass.. . 1989.
- Mark J. E.. Eisenberg A.. Graessley W. W.. Mandelkern L.. Koenig J. L.. *Physical Properties of Polymers*. Am. Chem. Soc.. Washington D.C. . 1984.
- Turner S.. *Mechanical Testing of Plastics*. J. Wiley. New York . 1986.
- Sperling L. H.. *Introduction to Physical Polymer Science*. J. Wiley. New York . 1992.
- Ward I. M.. Hadley D. W.. *Mechanical Properties of Solid Polymers*. J. Wiley. New York . 1993.
- Friedrich K.. *Application of Fracture Mechanics to Composite Materials*. Elsevier. Amsterdam . 1989.
- Osswald T.. Menges G.. *Materials Science of Polymers*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.
- Bodor G.. *A polimerék szerkezete*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1982.

## **A POLIMERTECHNIKA LEGFONTOSABB ALAPANYAGAI**

### **Tartalom**

#### **4.1 A tömeggyártás polimerjei**

**4.1.1 Kristályos, hőre lágyuló polimerek**

**4.1.2 Amorf, hőre lágyuló polimerek**

**4.1.3 Ritka térhálós polimerek (elasztomerek)**

**4.1.4 Sűrű térhálós polimerek (duromerek)**

#### **4.2 Különleges műszaki polimerek**

**4.2.1 A fluorpolimerek családja**

**4.2.2 Polisziloxánok**

**4.2.3 A polikarbonátok**

**4.2.4 Aromás poliamidok (aramidok)**

**4.2.5 A poliimidek**

**4.2.6 Poliszulfonok**

**4.2.7 Poliéterek, éterketonok (PEEK)**

**4.2.8 A folyadékkristályos polimerek (LCP)**

#### **4.3 Szakirodalom**

Miután a tervezőmérnök eldöntötte, hogy melyik szerkezeti anyagcsaládból választ alapanyagot, és ezzel együtt rendszerint kijelölte a technológiát is a gyártandó termék számára, – ezután a konkrét anyagkiválasztás következik. Ehhez pedig elengedhetetlen, hogy főbb tulajdonságaikban megismerkedjen azzal a néhány legfontosabb szintetikus polimerrel, amelyek egyrészt

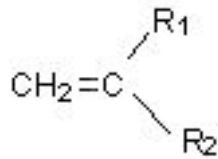
- a gazdaságos tömegcikk gyártást, másrészt
- az igényes *műszaki* alkalmazásokat szolgálják.

## 4.1 A tömeggyártás polimerjei

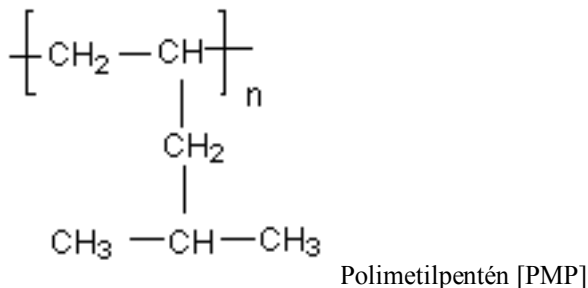
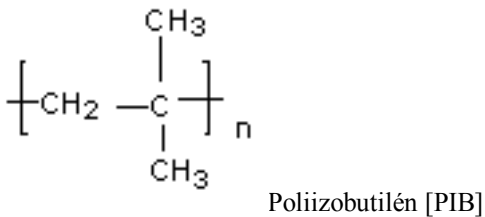
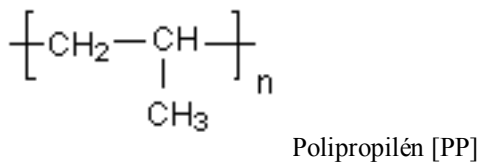
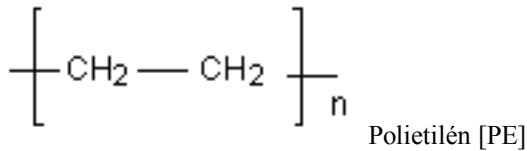
### 4.1.1 Kristályos, hőre lágyuló polimerek

#### 4.1.1.1 A polietilén (PE)

A polietilén különféle típusai a legegyszerűbb, legnagyobb tömegben gyártott szintetikus polimercsalád: a poliolefinek közé tartoznak. Az olefinek: kettős kötést tartalmazó szénhidrogének



általános képlettel, ahol  $R_1$  és  $R_2$  is lehet H vagy szénhidrogén gyök. A műszaki anyagként használt leggyakoribb poliolefin típusok a



A polietilénből, a legegyszerűbb szintetikus polimerből legalább három alapvető típust kell ismernie a tervezőmérnöknek:

- kissűrűségű, ( $\rho$ : 0,92 g/cm<sup>3</sup>) LDPE (*low density polyethylene*)

- nagysűrűségű ( $\rho$ : 0,96 g/cm<sup>3</sup>), nagyobb szilárdságú HDPE (*high density PE*) és a
- „*lineáris*” kis sűrűségű (LLDPE) közbülső, szintén nagy szilárdságú típust.

Ezek a polietilén alaptípusok azonos monomerből, de eltérő gyártási technológiával készülnek, és jellegzetesen eltérő szerkezeti anyagcsaládot jelentenek, amelyek mérnöki alkalmazása eléggé élesen szétválik.

Az **LDPE** kissűrűségű polietilén volt az első poliolefin, amelyet sikerült az etilénből, nagy nyomáson (1000 bar) előállítani.

Az LDPE polietilén története tipikus 20. századi technika-történet. Az *Imperial Chemical Industry* (UK) cég 1933-ban fedezte fel, hogy a nehezen komprimálható és robbanásveszélyes, gázalakú etilén – amely  $-71$  °C kritikus hőmérséklet alatt semmiképp sem cseppfolyósítható, 1000 bar-nál nagyobb ( $>100$  MPa) nyomáson, kb. 100 ppm (*pars pro million*) O<sub>2</sub> koncentráció mellett láncreakcióban polimert képez. A kitűnő villamos szigetelő tulajdonságokkal rendelkező anyag stratégiai jelentősége azonnal akkorára nőtt, hogy az eljárást a legnagyobb titokban fejlesztették ipari technológiává. Kiderült ugyanis, hogy ez a PE a hadászati jelentőségű radartechnika legjobb szigetelőanyaga. Az apoláros, abszolút vízálló LDPE azóta is a telefon és egyéb távközlési és villamos átviteli kábelek legjobb szigetelő rétege. A titoktartás sikerére jellemző, hogy a BME Mérnöktovábbképző Intézetében 1941-ben megjelent első jegyzet a *Műanyagok*-ról még azt írta az etilénről, hogy az polimerizációra nem alkalmas.

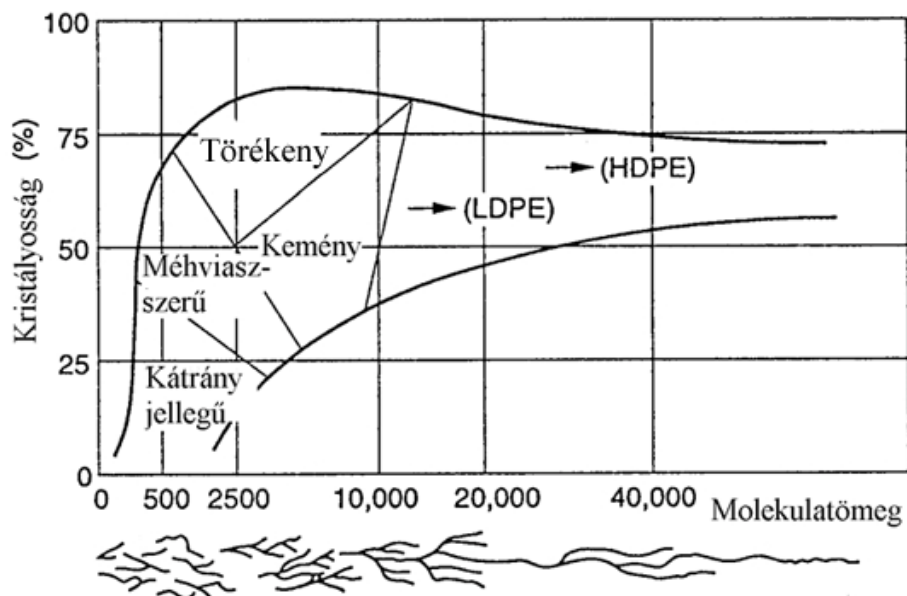
Az LDPE, amely a II. világháború végéig gyakorlatilag hadititokként védett, igen drága stratégiai anyag volt, azóta fólia formában a világ legolcsóbb, legközönségesebb – és sajnos „eldobható” (*throw-away*) - csomagolóanyagává vált.

Az LDPE viszonylag *kis sűrűségét* (0,92 g/cm<sup>3</sup>) a viszonylag *kismértékű kristályosság* (40–65 %) okozza. Ez pedig abból következik, hogy az LDPE lánc elég sok elágazást tartalmaz: 1000 C – atomra 15–30 darab rövid (2–5 C atomos) elágazás jut, ami nyilván gátja a kristályosodásnak. Ebből következik a gépész tervezőmérnök számára fontos szilárdsági mutatók viszonylag alacsony szintje (4.1 táblázat). Ahol nagyobb szilárdságra, merevségre van szükség, ott a HDPE választása az előnyösebb.

A 4.1 ábra széles sávként jeleníti meg az összefüggést az etilén polimerek móltömege és kristályossága között.

A 4.1 ábra vízszintes tengelye a növekvő móltömeg némileg torzított logaritmikus tengelye, amely mentén a molekulák elágazottságát is bejelöltük. A 10 000-es móltömeg alatt csak oligomerviaszokról beszélhetünk, technikailag használható polimerekről nem, még akkor is, ha ezek kristályossága magas. Az ábrán az is megjelenik, hogy az LDPE kisebb móltömegű és kristályosságú, mint a HDPE.





**4.1 ábra:** Az etilén polimerek családja a kristályosság és a móltömeg függvényében (az elágazottság jelölésével) [4.1]

Magyarország 1971 óta gyárt jó minőségű LDPE típusokat. Az eljárás lényege a következőkben foglalható össze:

A vegyipari benzín (7–9 C atomos, a normál benzínhez hasonló kőolajpárlat) pirolízisével (hőbontásával) előállított, gázalakú monomert két lépésben sűrítik:

- először 20–30 MPa (200–300 bar) szintre (ötfokozatú kompresszorral, közben újra visszahűtve), majd
- másodsor 150–250 MPa (1500–2500 bar) szintre.

A folyadékalakú monomert 150–250 °C-on, kevés O<sub>2</sub> jelenlétében, keverős reaktorban, folytonos üzemben polimerizálják. Az átalakulás (a *konverzió*) egy áthaladásban kb. 15 %-os, a maradék 85 % monomert természetesen újra komprimálva visszavezetik a reaktorba.

A **HDPE** nagy sűrűségű polietilén gyártási technológiája éppen a fenti, a fáradtságos, energiaigényes és robbanásveszélyes kompressziót kívánta kiküszöbölni ill. csökkenteni. A német Karl Ziegler és az olasz Giulio Natta 1955-ben – egymástól függetlenül kidolgozott katalizátor rendszere (aluminium-trietil /Al-(CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> / és titán-tetraklorid /TiCl<sub>4</sub>/ komplexe), amelyért 1963-ban Nobel-díjat kaptak – teszi ezt lehetővé. A nagyobb sűrűség (0,96 g/cm<sup>3</sup>) nagyobb kristályosságból (65–80 %) ered, és ezt a nagyobb fokú rendezettséget az teszi lehetővé, hogy 1000 szénatomra a láncban itt csak 1–5 elágazás jut. Mindez sokkal nagyobb szilárdságot, magasabb olvadási hőmérsékletet is eredményez, mint az LDPE esetében.

Az **LDPE** legkorszerűbb eljárásában a TVK a kissűrűségű polietilént 1991 óta heterofázisú tömbpolimerizációban nagynyomású csőreaktorban gyártja. Ez két zónából áll:

- az első zóna 600 m hosszú, 35 mm belső átmérőjű csőkígyó,
- a második szakasz 540 m hosszú, 40 mm belső átmérőjű csőkígyó, amelyben a nyomás 250–320 MPa (2500–3200 bar), a hőmérséklet 280–320 °C.

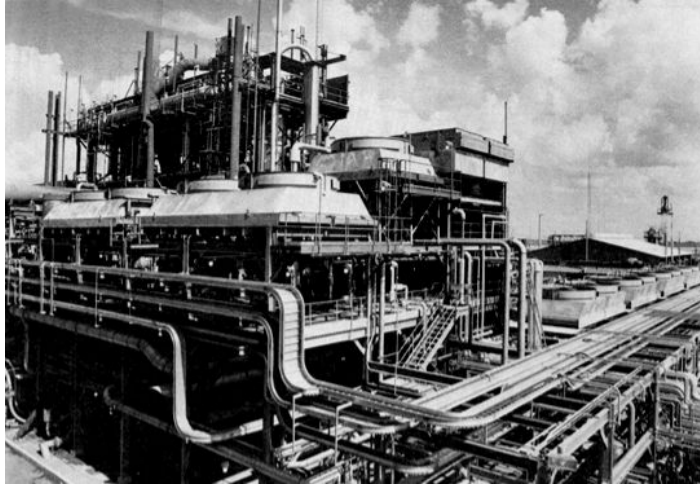
A csőreaktorból a polimerizációs láncreakció exoterm hőjét „cső-a-csőben” típusú hőcserélőben a belépő etilén monomer veszi át. Egy átfutásban kb. 30 %-os a konverzió (a monomer polimerré alakulása), – de az átalakulatlan monomert teljes egészében visszavezetik. A megfelelő kiléptető helyen a kész polimer ömledék formában kiválik a rendszerből.

Az eljárás technikai csúcsteljesítményét, a rendkívül magas nyomással kivitelezett, robbanásveszéllyel terhelt kémiai láncreakció biztonságos kézben tartását jól jelzi az évi közel 350 napon át folytatható folytonos üzem. A reaktor acél csöveinek falvastagsága közel 60 mm. A „keverést” ráadásul a nyomás 300 bar-os pulzálása biztosítja percenként 15-szörös frekvenciával. A kenőanyag bevitele a kompresszorok éjjel-nappal, télen-nyáron működő hengereinek kenésére 5400 bar (!) nyomáson történik.

Egy ilyen gyár joggal tekinthető a gépészmérnöki és a vegyészmérnöki folyamatirányítás csúcsteljesítményének.

A **HDPE** viszonylag kis nyomáson (~10 bar) készül, a Ziegler-Natta katalizátor azonban eléggé veszélyes anyag: oxigén nyomok jelenlétében meggyullad, nedvességnomok jelenlétében robbanhat is. Ráadásul a nitrogénpárnával „fedett” keverős reaktorban a reakciót *benzinben* („extrakciós benzin,” forrpon 80–90 °C) mint oldószerben kell lefolytatni (20 % etilén oldva 80 % benzinben). A HDPE gyártási technológiája tehát oldószeres, heterofázisú polimerizációs láncreakció, amelynek során a polietilén *kicsapódik* (heterofázis, zagy képződik). A keletkező HDPE nemcsak nagyobb sűrűségű, hanem nagyobb móltömegű is, mint az LDPE, ( $10^4$  /LDPE/ helyett  $10^5$  sőt,  $10^6$  Dalton is lehet /HDPE/). Ebből következik a HDPE kitűnő szerkezeti anyag jellege pl. a csőgyártásban, autóiparban. HDPE-ből készül sokféle gázcső és vízcső az infrastruktúrális beruházásokhoz, számos hordó és palacktípus, és az utóbbi időben gyakorlatilag minden korszerű személygépkocsi üzemanyag tartálya (benzintankja).

Ezeket a polietilén típusokat – egyéb poliolefinekkel együtt – a 4.3 ábra mutatja be főbb műszaki adataik irányértékének összehasonlításával. Az adatok ebben és a következő táblázatokban valóban csak irány-értékek, hiszen – mint rámutattunk – rengeteg változatról lehet szó, az átlagos móltömeg, az MFI (5.3.1 fejezet), adalékok változtatásával, a kopolimerizációs származékok, töltött, erősített rendszerek tekintetében.



**4.2 ábra:** Nagynyomású, folytonos üzemű csőreaktor LDPE gyártására [4.1]

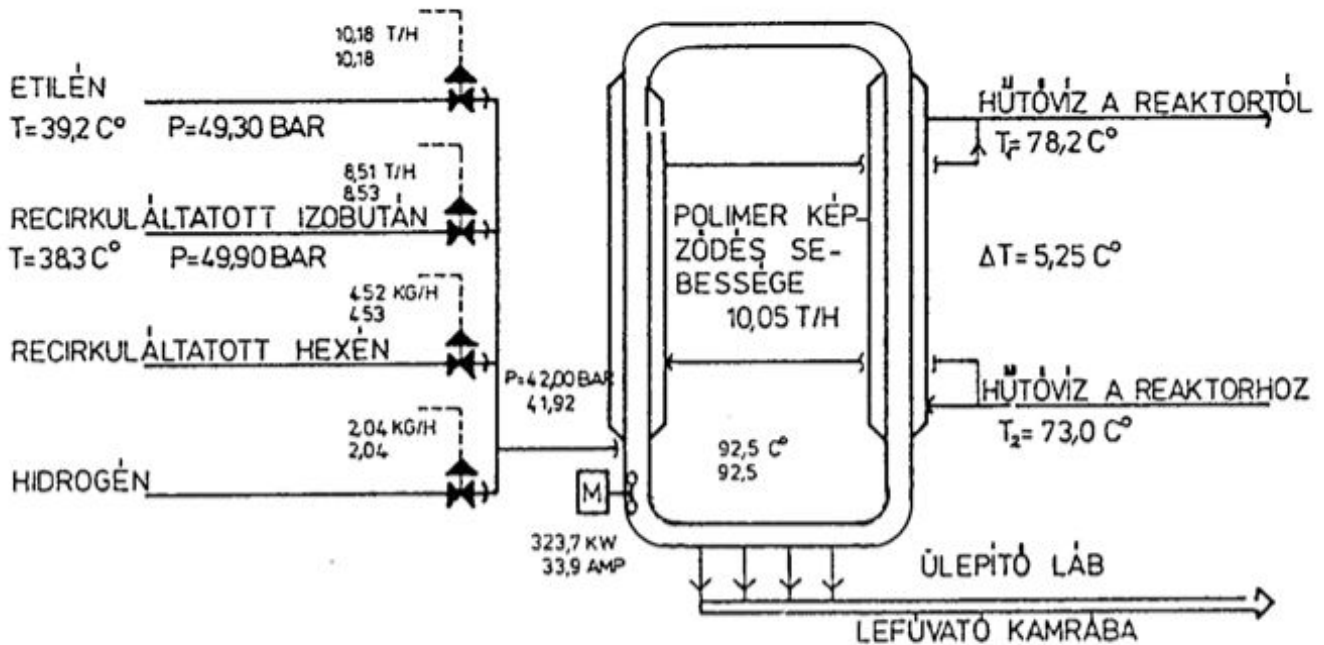
Az **LLDPE**, a „lineáris”, kissűrűségű polietilén a további katalizátor kutatások eredménye. A cél az (is) volt, hogy kevesebb elágazást tartalmazó („lineáris”) polietilén típus jöjjön létre. A Phillips Petroleum Co. eljárásában Cr,-Ti és Mg-vegyületekből összeállított katalizátorral szintén heterofázisú oldatpolimerizációt folytatnak le, amelyben nemcsak etilén monomert, hanem 3–5 % hexén-1 (olefín) monomert is használnak. Az LLDPE tehát tulajdonképpen kopolimer, amelyben a hexén monomer mindenképpen (rövid) oldalláncokat eredményez, mégis ez a PE fajta az LDPE-nél magasabb szintű szabályosságot és jobb mechanikai tulajdonságokat eredményez.

Az LLDPE gyártástechnológiájának gépészeti megoldása igen érdekes. (4.4 ábra). A TVK-ban megvalósított hurokreaktor egy 600 mm átmérőjű és 260 m hosszú csőből képzett nyereg, amelyben a 40 bar alatt tartott zagyot keringetik 80–110 °C hőmérsékleten. Az LLDPE kinyerése végül is a megfelelő helyen kiülepítő, szemcsés (por alakú) polimer lefűvátásával történik.

LLDPE hurokreaktor közepes sűrűségű (0,925 g/cm<sup>3</sup>) és igen előnyös mechanikai tulajdonságokkal rendelkező polimer alapanyagot gyárt.

Tulajdonságok	Egység	LDPE	HDPE	LLDPE
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	0,92	0,95	0,925
Kristályosság	%	65	75	65
Telítettségi vízfelvétel	%	<0,5	0,01	0,01
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	10	30	25
Szakadási nyúlás	%	400	500	600
Húzó rug. modul.	GPa	0,2	0,9	0,5
Hajlító szilárdság	MPa	10	23	..
Hajlító modulusz	GPa	0,4	1,2	..
Ütőmunka 23°C, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	N.T.	N.T.
Ütőmunka 23°C hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	N.T.	N.T.
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	110	130	122
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	-110	-110	..
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	40	50	..
Tartós hő-terhelhetőség	°C	60	80	70
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	2,5	1,5	2,0
Szerszámzsugor	%	1,5-3,5	1,3-3	..
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>17</sup>	>10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	2,3	2,4	2,4
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	3·10 <sup>-4</sup>	4·10 <sup>-4</sup>	0,05
Előnyök:		könnyen feldolgozható kitűnő szigetelőanyag, ütésálló, vegyszerálló élelmiszeriparban kifogástalan.		
Hátrányok:		UV fényre (oxigénben) érzékeny, feszültségi repedésre hajlamos, nehezen ragaszt- ható, zsugorodik a szer- számokban.		
Alkalmazások		csomagoló fólia lágú tömlők,	üreges testek, tömítések üzemanyagtartály	

### 4.3 ábra: Különféle polietilén típusok tulajdonságai



4.4 ábra: LLDPE hurokreaktor [4.16]

A polietilén fenti három fő típusa (LDPE, HDPE, LLDPE) mellett további típusok is ismeretesek. A különlegesen nagy móltömegű PE (*Ultra-high molecular weight PE, UHMW-PE*) – amelynek móltömege  $10^6$  gram/mól is lehet (polimerizáció foka  $P_f > 36\,000$ ) különlegesen stabil, nagy tisztaságú és nagy szilárdságú orvostechikai polimer, ebből készítik pl. a csípőprotézisek gömbfejét. Az UHMW-PE olyan nagy molekulatömegű, hogy feldolgozására a hagyományos képlékeny alakítási technológiák, mint pl. a fröccsöntés, extrúzió, általában már nem is alkalmasak. Tömbösítésére nyomás (és magasabb hőmérséklet) alatti *porzsugorítást* (a porkohászathoz hasonló *szinterezést*) alkalmaznak.

Hasonlóan extrém nagy móltömegű és maximális kristályosságot lehetővé tevő szabályosságú polietilénből készül az acél szilárdságát is megközelítő (~3000 MPa szakítási szilárdságú) polietilén szál, a **HOPE** (*Highly Oriented PE*), mint például a gélállapotú polimerből húzott *Dynema* és hasonló kereskedelmi típusok. Ezek szilárdságára jellemző, hogy a mintegy 340 km magasra emelt ilyen HOPE szál szakadna el saját súlya alatt, szemben a 4000 MPa szakítási szilárdságú legjobb acélhuzallal, amely kb. 50 km-nél szakad. (Lásd: 14. fejezet, 14.1 táblázat)

A technikatörténet furcsa ciklikus jellege: a II. világháború titkos radartechnikai anyagából „eldobható” csomagolóanyag lett, majd újra stratégiai termék: golyóálló mellény készül (napjainkban) – hogy majd az elkövetkező évtizedek legolcsóbb nagyszilárdságú erősítő szála legyen.

#### 4.1.1.2 A polipropilén (PP)

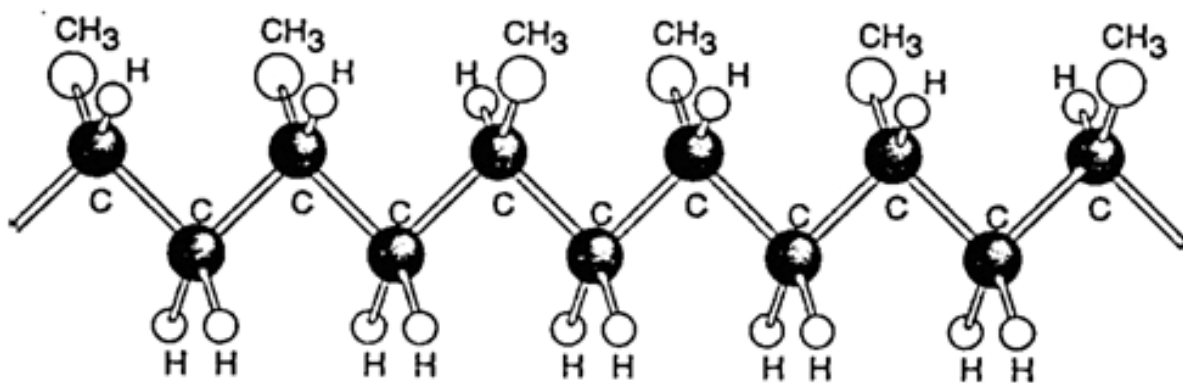
Az első három, legnagyobb mennyiségben gyártott szintetikus polimer (LDPE, PVC, PP) között a polipropilén fejlődött a leggyorsabban a 20. század utolsó harmadában. A tömegműanyagtól a műszaki műanyagokig sokféle változatban használjuk ezt a kristályos hőre lágyuló polimert, egyre növekvő mennyiségben, egyre több helyen, az elektronikától a gépkocsigyártásig. Évenként a világ az ezredfordulón több mint 10 millió tonna PP-t gyárt és használ fel.

A PP különleges helyet foglal el a szintetikus polimerek között *sztereoreguláris* (térbelileg szabályozott) szerkezetével (4.5 ábra), amelynek kitűnő szilárdságát, magas hőállóságát is köszönheti. Technikatörténetileg is érdekes, hogy amíg ezt a szabályos láncszerkezetet – amely bizonyos értelemben hasonlít a természetes fehérjék, pl. a DNS szigorúan szabályos térszerkezetéhez – nem tudtuk előállítani, addig a polipropilén műszaki célra alkalmatlan, használhatatlan maradt.

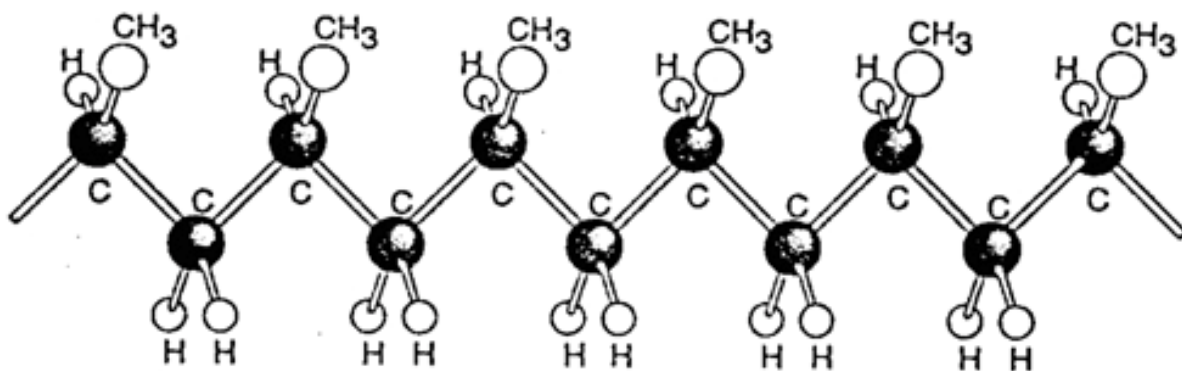
A polipropilén *amorf*, térbelileg szabálytalan, *ataktikus* változatát ugyanis már több mint száz éve leírták a kémiában. Ez olajszerű vagy viasz-szerű, a legjobb esetben a szurok vagy a bitumen konzisztenciájával rendelkező, technikailag értéktelen anyag volt. G. Natta figyelte fel arra, hogy a K. Ziegler által a HDPE kikísérletezésére felhasznált katalizátorral (Al-Ti komplex) térbelileg szabályos, *sztereospecifikus* PP állítható elő. Megosztott Nobel-díjuk 1963-ban a HDPE és az izotaktikus PP kettős sikerének szolt.

A polipropilén kitűnő műszaki tulajdonságait a 4.7 ábra mutatja. Ebben a táblázatban egy PP homopolimert, egy etilén-propilén kopolimert (E-PP) és két erősített változatot mutatunk be: az egyik 35 % *farostot* (WF) tartalmaz, a másik (30 %) *vágott üvegszálat* (GF). A PP homopolimer magas szakító szilárdsága (30 MPa) és jelentős hajlítómodulusza (1,4 GPa) jó ütő-hajlító szívóssággal párosul. A polietiléneknél magasabb olvadáspontja (165 °C) azt is jelenti, hogy a forró vizet is jól tűrő háztartási cikkek (pl. mikrohullámú sütőben is formatartó edényeket, vagy akár mosógépalkatrészeket) is készíthetünk. Az első PP homopolimereknek csak a hidegtűrése, – pontosabban 0 °C alatti ütő-tűrő szívóssága – volt korlátozott, mivel a  $T_g$  0 °C körüli. Ez a  $T_g$  azonban kopolimerizációval – pl. 5 % etilén kopolimerizációjával – jelentősen leszállítható, és így a PP kitűnően alkalmassá vált gépkocsi alkatrészek (ütőkőző, műszerfal, ventilátorlapát stb.) gyártására.

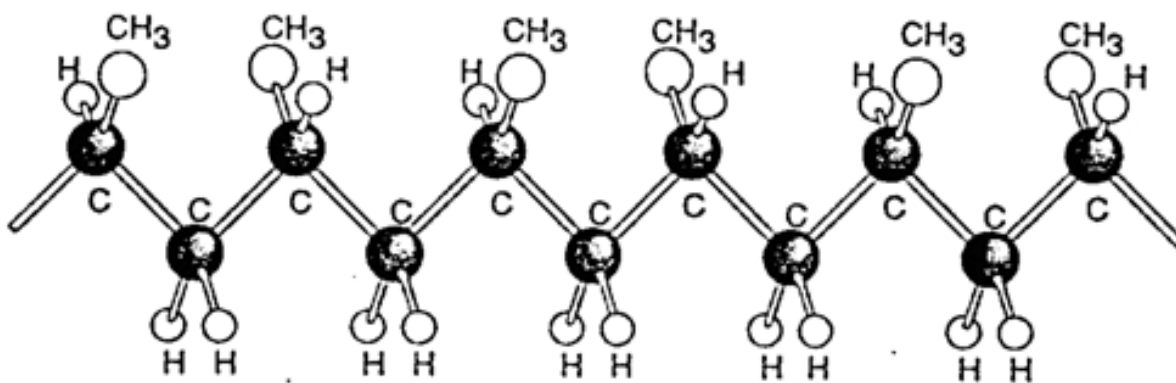
Az izotaktikus PP gyártástechnológiája a 60-as, 70-es években ún. *első generációs* (Ziegler-Natta) katalizátorokkal indult, (Al-Ti komplexekkel), amelyekkel a legnagyobb technológiai probléma az volt, hogy az iPP mellől az 5–7 %-ban keletkező ataktikus polipropilént szerves oldószerrel ki kellett vonni (extrahálni). Jelenleg, az ezredforduló környékén már a katalizátorok 5. *generációját*, ún. metallocén katalizátorokat használnak, amelyekkel gyakorlatilag ataktikus-mentes, szigorúan sztereoreguláris PP állítható elő.



Ataktikus

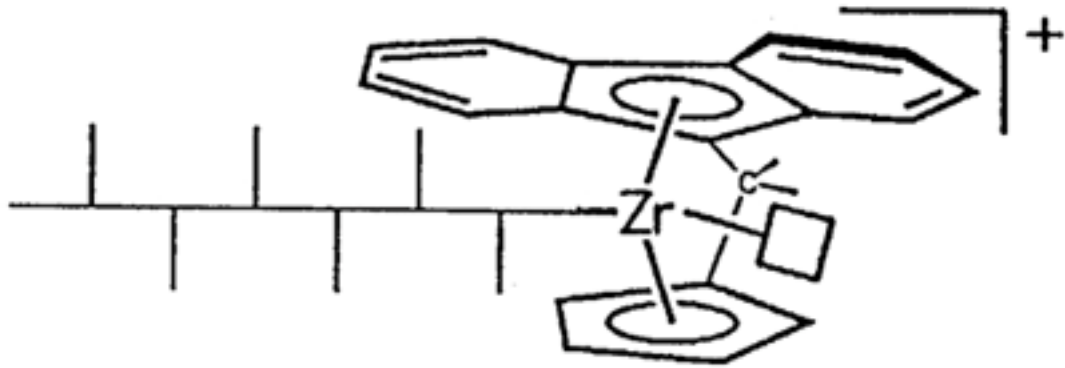


Izotaktikus



Szűndiotaktikus

4.5 ábra: A polipropilén ataktikus, izotaktikus és szűndiotaktikus térszerkezete [4.3]



4.6 ábra: A PP gyártás sztereoszelektív metallocén katalizátorai [4.16]



Tulajdonságok	Egység	PP <sub>homo</sub>	E-PP <sub>kopol.</sub>	PP-WF (35%)	PP-GF (30 %)
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	0,90	0,91	1,05	1,15
Kristályosság	%	70	60	..	..
Telítettségi vízfelvétel	%	..	..	..	0,05
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	30	25	48	90
Szakadási nyúlás	%	150	500	..	3
Húzó rug. modul.	GPa	1,6	0,6	3,4	7
Hajlító szilárdság	MPa	37	..	62	..
Hajlító modulusz	GPa	1,4	..	3,4	4
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	>40	N.T.	..	35
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	10	15	10	11
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	165	162	165	165
Üveges átalak. Hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	0	<-10	..	+10
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	55	45	116	148
Tartós hő-terhelhetőség	°C	90	70	110	105
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	1,4	1,6	..	0,2
T <sub>g</sub> felett	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	1,8	2,2	0,9	0,3
Szerszámzsugor	%	0,7-2,5	..	1	1
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	..	10 <sup>15</sup>
Diel. Állandó (50-10 MHz)	-	2,2	2,2	..	2,6
Diel. Veszt. Tény. (50-10 MHz)	-	3·10 <sup>-4</sup>	..	..	1·10 <sup>-3</sup>
Előnyök	PE-nél jobb mechanikai tulajdonság	PP-nél jobb ütésállóság	jó merevség, jó hőállóság, gazdaságos	..	kitűnő mech. tul., magas hőállóság
Hátrányok	Korlátozott hidegállóság, korl. ragaszt-hatóság	PP-nél kisebb modulusz	korlátozott ütésállóság	..	korlátozott hegeszthetőség, gép és szerszám-kopás
Alkalmazások	orientált PP: textil szál, kötöző-pánt, zsákanyag	rekesz, akku-edény, gépk. műszerfal, lökhárító stb.	gépkocsi belsőburk. csomagolás-technika stb.	..	mosógép alkatrész, gépipari alkatrész

N.T.: nem török

#### 4.7 ábra: Különféle polipropilén típusok tulajdonságai

A 4.6 ábrán látszik, hogy ezekben az új típusú katalizátorokban a többszörös gyűrűs szénvegyületeket komplex fémmag (Zr) fog össze úgy, hogy a központi aktív hely, ami a monomerek térbeli irányultságát biztosítja, szinte „kagylóhéjak” közé illesztett tér.

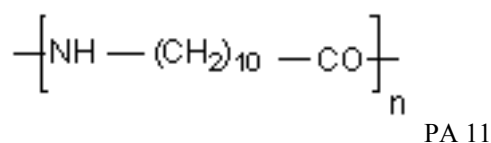
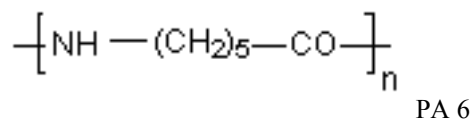
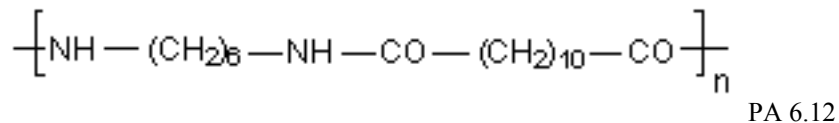
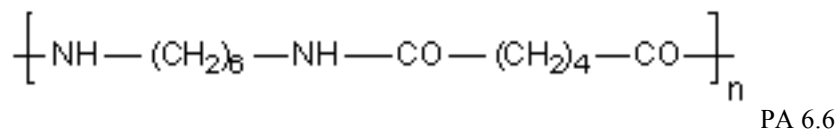
A polipropilén újabb változatait részben ezeknek az új katalizátoroknak köszönhetjük. Szó esett már az etilén-propilén kopolimerről (E-PP), kitűnő ütésállóságáról. Jelentős szerepe van az EPDM (etilén-propilén-difunkciós monomer) *terpolimereknek* (háromösszetevős kopolimereknek) a modern gumiiparban. A kétfunkciós, két kettős kötést tartalmazó monomer partner ugyanis térhálósíthatóvá teszi ezt a rugalmas kopolimert, ami így a *vulkanizálható* elasztomerek kitűnő módosító anyagává vált.

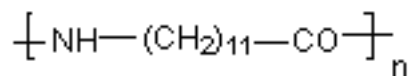
A legújabb metallocén katalizátorokkal további elasztikus PP típusok (ELPP) állíthatók elő. Végül, de nem utolsó sorban meg kell említeni a szálerősített PP kompozitokat, mint nagyszilárdságú műszaki anyagokat. Ezek kifejlesztésében a BME Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék fiatal munkatársai – a Bay Zoltán Anyagtudományi és Technológiai Intézettel együtt – nemzetközileg is elismert eredményeket értek el. Különösen figyelemre méltó szilárdságú és hőtűrűs szerkezeti anyagok fejleszthetők ki *természetes polimer rostokat* is tartalmazó, részben vagy egészen reciklált *PP mátrixú* kompozitokból.

#### 4.1.1.3 A poliamid (PA)

A poliamidok a kristályos polimerek között nem mennyiségük, hanem kitűnő műszaki tulajdonságaik miatt kiemelkedő fontosságúak.

A poliamidok legfontosabb típusai a következők:





PA 12

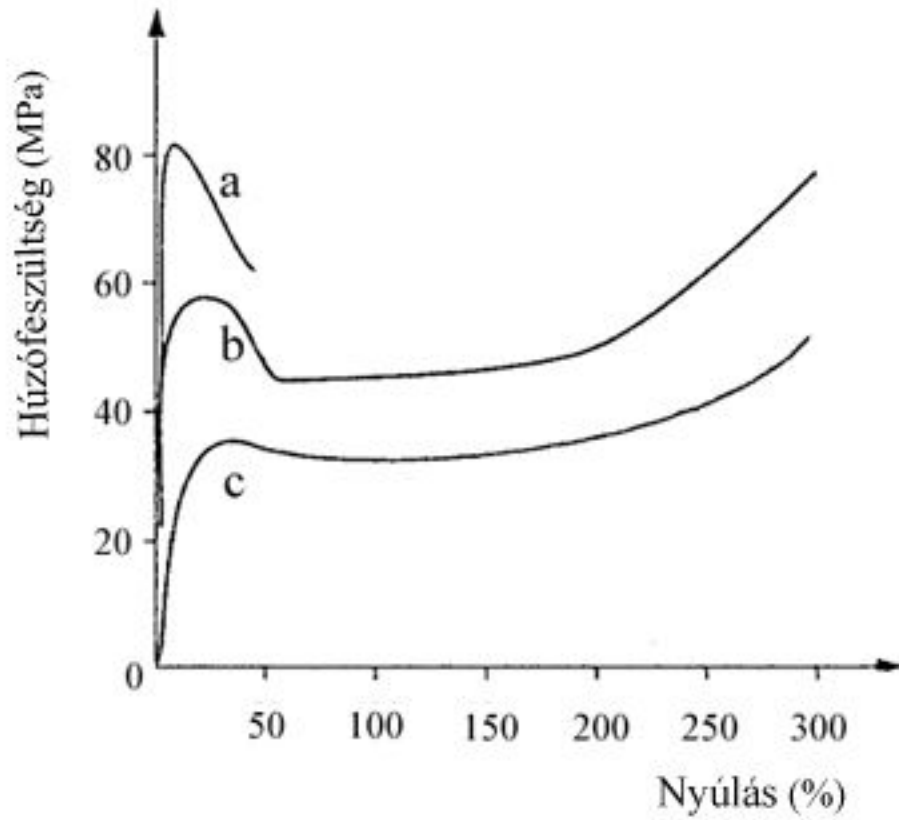
A poliamid tehát nem szénhidrogén polimer, mint a poliolefinék (PE, PP, PIB, PMP), hanem a láncban heteroatomot (O, N) tartalmazó polimer, amely nem polimerizációval, hanem tipikusan *polikondenzációval* készül. Az amid kötés a – CO – NH – kötés egyáltalán nem gyengíti a láncot, sőt: a természetben az élővilágban is nagyszerű példákat látunk a poliamid láncok szilárdságára. Poliamid ugyanis a fehérje, a gyapjú, a selyem, a bőr legfontosabb alkotóeleme, minden izomszövetünk, kötőszövet, az ínszalagok stb. Éppen a természetes poliamidok legbonyolultabb típusa, a DNS (dezoxiribonukleinsav) hordozza az élővilág legértékesebb örökítő anyagát is.

A polimerlánc információtartalmára jellemző szám, hogy már kétféle monomerből felépített 1000 lánctagú sor is  $10^{301}$  féle módon képezhető. Mennyivel több változat képzelhető el a 20 féle aminosavból – ugyanilyen amid kötéssel kapcsolódó, hasonlóan hosszú, vagy még sokkal hosszabb polimerláncokból! S bár genetikai adottságaink, szomatikus felépítésünkől immunrendszerünk főbb vonásain át, egészen szellemi, lelki képességeinkig – örökölhettek, és tovább is örökítjük azokat, mégisincs és nem is lesz két azonos élő egyed a Földön. Mindez a természetes poliamid kopolimerek végtelen változatosságát mutatja.

A szintetikus poliamidok gyártási technológiája a PA 6.6, a NYLON 6.6 történetével, W. Carothers (USA) 1937-es szabadalmával indult (l. Carothers egyenlet, 2.3.1 fejezet).

A nylonszál sikerére jellemző, hogy sokak számára ma minden szintetikus polimer „nylonból” van.

A PA féleségek természetéhez közeli *hidrofil* jellegére, vízfelvevő képességére jellemző a mechanikai tulajdonságok, pl. a szakító szilárdság függése a víztartalomtól (4.8 ábra).



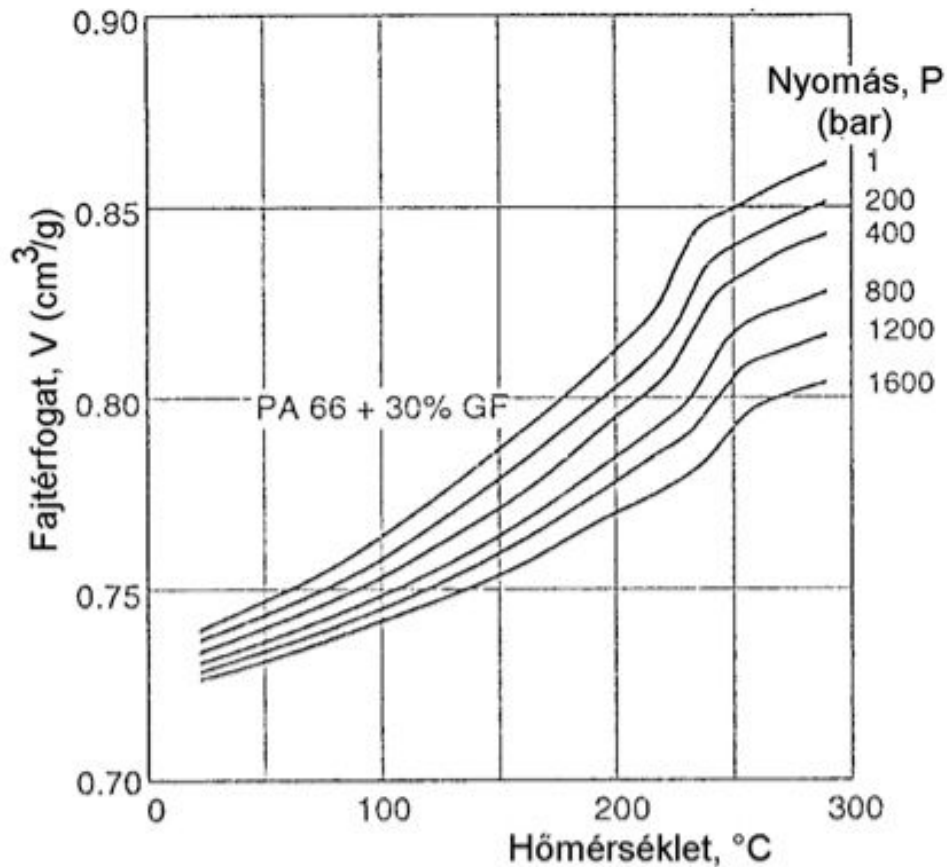
**4.8 ábra:** A PA 66 húzófeszültsége különböző nedvességtartalom esetén a) szárazon (0,2 % nedv.), b) légszárazon (2,5 % nedv.) c) telített levegőben (8,5 % nedvesség) [4.2]

Tulajdonságok	Egység	PA 6	PA 12	PA 66	PA 66+30GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,13	1,01	1,13	1,37
Kristályosság	%	..	..	..	..
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	1,6	0,7	2,8	1,9
Telítettségi vízfelvétel	%	9,5	1,5	8,5	6,0
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	80	50	100	135
Szakadási nyúlás	%	50	10	50	5
Húzó rug. modul.	GPa	3,2	1,5	2,6	8,5
Hajlító szilárdság	MPa	100	..	120	145
Hajlító modulusz	GPa	2,2	1,2	2,8	5,9
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.*	N.T.	N.T.	N.T.
Ütőmunka 23° hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	25	20	12	24
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	220	178	255	255
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	60	55	..	..
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	80	50	77	215
Tartós hő-terhelhetőség	°C	95	80	120	..
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	1,0	1,5	0,8	0,4
Szerszámzsugor	%	1,2	1,3	1,2	0,8
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	>10 <sup>13</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	3,8	3,2	3,2	3,6
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,03		0,03	0,04
Előnyök:	kitűnő mechanikai tulajdonságok, ütésállóság, jó kompasállóság, előnyös sűrűlási tulajdonságok, magas hőállóság, önkiloito képeesség (lángállóság), PA 66+30GF: jó vegyszerállóság (kőolaj, benzin)				
Hátrányok:	nedvességre érzékeny, levegőnedvességre is, feldolgozás előtt gondosan kiszáritandó, szűk olvadási hőmérséklet- tartomány, nem saválló				
Alkalmazások:	csapágyak, és siklóelemek, orsók, fogaskerekek villamos kapcsolóelemek gépkocsi alkatrészek: benzinálló csövek, stb				

\* N.T.: nem török

#### 4.9 ábra: A poliamidok tulajdonságai

A poliamid-66 pVT diagramját – amely diagram típusnak szerepe lesz a fröccsöntésben (9.4 fejezet) – a 4.10 ábra mutatja be.



4.10 ábra: A PA 66 fajtérfogatának hőmérsékletfüggése (pVT diagramja) [4.2]

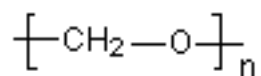
A poliamidok nedvességtől való függése nyilvánvalóan a poláros amid csoport vízérzékenységének tudható be. Ha meghosszabbítjuk a vízre nem érzékeny  $-(CH_2)_z-$  láncot két amid kötés között, várhatóan kisebb vízérzékenységet kapunk. Ezen az úton fejlesztették ki a hosszabb parafinlancú poliamidokat, a RILSAN típusokat: PA 11, PA 12. A vízfelvétel csökkenése mellett az egyéb kitűnő műszaki tulajdonságokat is bemutatja a 4.9 ábra.

A gépész konstruktor számára a poliamid kitűnik kiváló frikciós tulajdonságaival. A PA súrlódási együtthatója acélon vagy sárgarézén

- statikus körülmények között  $\mu = 0,35-0,70$  között van
- dinamikusan, kenés nélkül  $\mu = 0,20-0,30$  közötti
- dinamikusan, kenéssel  $\mu = 0,02-0,08$ -nek adódik.

#### 4.1.1.4 A polioximetilén (POM)

A polioximetilén szerkezete a polietilénhez hasonlóan egyszerű:



Ez az egyszerű szerkezet teszi lehetővé a nagyfokú kristályosságot, amely a kitűnő műszaki tulajdonságok alapja. A polioximetilén vagy más néven poliacetál polimerek tulajdonképpen egy rendkívül egyszerű alapanyag, a természetes anyagok bomlásakor is előforduló formaldehid („formalin”) – polimerizációs termékei. A formaldehid, mint monomer, mesterséges polimerizációját, átalakítását technikailag hasznosítható anyaggá azonban csak az 1960-as évek óta tudja nagyüzemben is megvalósítani a modern vegyipar. Kisebb móltömegű, viasz-jellegű oligomerekig a formaldehid ugyanis szinte önmagától is polimeresedik – ugyanakkor a nagy móltömegű POM stabilizálása a lebomlás, a degradáció meggátlására sokáig okozott gondot.

A kristályos hőre lágyuló szintetikus polimerek között kiemelkedőek a POM műszaki tulajdonságai, – ahogy azt a 4.11 ábrán láthatjuk.

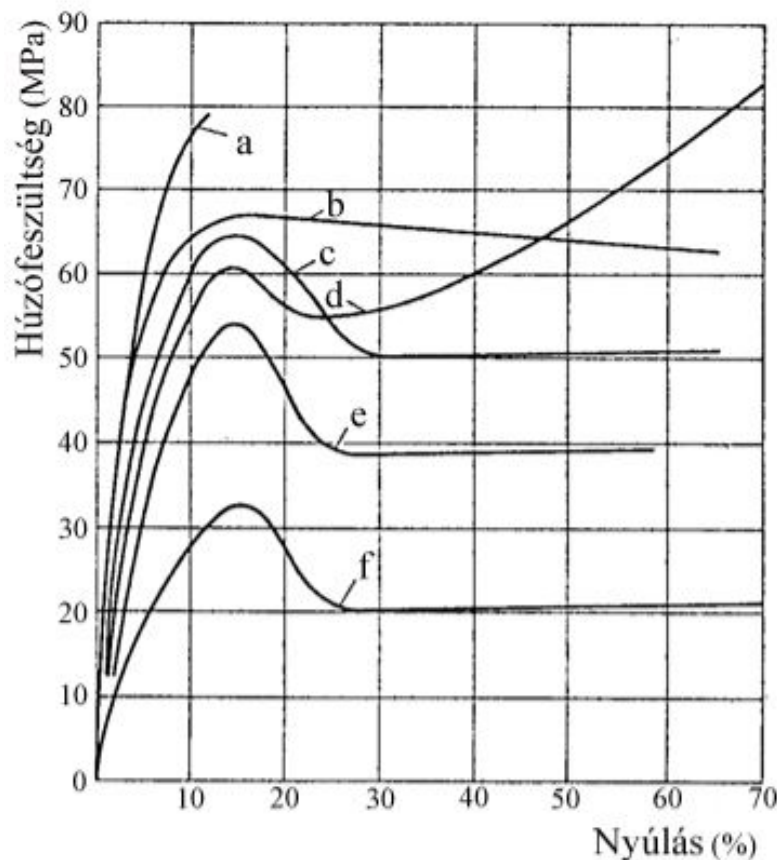
Tulajdonságok	Egység	POM	POM-GF (25 %)	POM-MoS <sub>2</sub>
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,41	1,58	1,42
Kristályosság	%	85	..	..
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,32	0,2	..
Telítettségi vízfelvétel	%	1,4	0,9	0,8
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	60	125	62
Szakadási nyúlás	%	25	3	15
Húzó rug. modul.	GPa	3,2	9	2,8
Hajlító szilárdság	MPa	100	..	..
Hajlító modulusz	GPa	2,8	..	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	90	30	90
Ütőmunka 23° hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	10	5,5	5,5
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	° C	168	168	168
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	° C	-60	-60	-60
HDT hőállóság (1,8 MPa)	° C	110	160	105
Tartós hő-terhelhetőség	° C	85	110	100
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	1,1	0,3	1,1
Szerszámzsugor	%	2,3	1,2	1,9
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm-cm	10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	3,7	4,0	4,0
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,005	0,004	0,005
Előnyök	kitűnő műszaki műanyag: magas rug. modulusz, csekély kúszás, kis súrlódási együttható (kenés nélkül is), olajállóság, mérettartás			
Hátrányok	érzékeny az UV sugárzásra, szerszám-zsugorodása jelentős, erős oxidálószerekre, lúgokra érzékeny, élelmiszeriparban nem ajánlott			
Alkalmazások	sokféle gépészeti alkalmazás: fogaskerék, hajtómű, csavar stb. villamos- háztartási cikk alkatrészek, csapok, szelepek, pneumatika-csatlakozások stb.			

4.11 ábra: A polioximetilének (poliacetálok) tulajdonságai

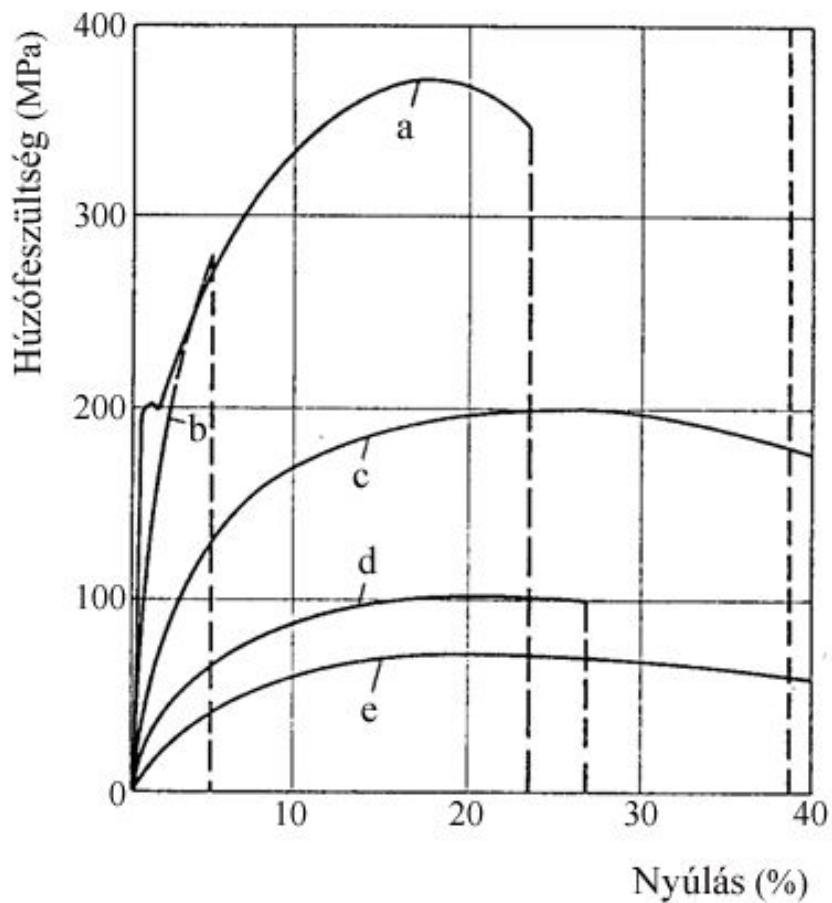


Technikai alkalmazásokban különleges előnyt jelent a nagy rugalmassági moduluszal (3,2 GPa) együtt megjelenő szívósság: a nagy ütőmunka. Ez a magas hőtűrés keménységgel és hőmérséklettűréssel együtt sokféle gépészeti alkalmazást tesz lehetővé: fogaskerék, fogasléc, fogasív, hajtómű alkatrész, csapok, szelepek alkatrészeként és sok-sok más helyen. A mérettartás, a csökkentett mértékű kúszás a vízzel szembeni érzéketlenség, az oldószer- és olajállóság a továbbiakban előnyös súrlódási és kopási tulajdonságokkal párosul. A 4.4 táblázat ezért is mutatja be a (néhány %) molibdén-diszulfiddal (MoS<sub>2</sub>) társított POM tulajdonságait is.

Mindezeket az előnyöket a hagyományos képlékeny alakíthatóság a fröccsöntés egyszerű feldolgozástechnikája mellett biztosítja a POM. Sokan ezért is tekintik a fémekkel összemérhető szerkezeti anyagnak. (4.12, 4.13 ábrák)



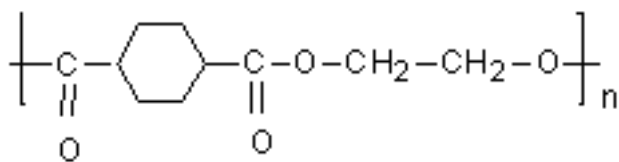
**4.12 ábra:** Különbő hőre lágyuló polimerek feszültség-nyúlás összefüggése [4.2] (szobahőfok, 60 mm/perc) a) PMMA, b) POM, c) PC, d) PA-6, e) IPVC, f) PP



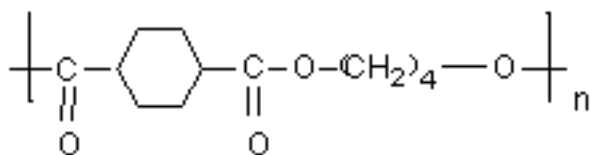
**4.13 ábra:** Az acél és néhány színesfém feszültség-nyúlás diagramja a POM-el összehasonlítva a) betonacél St 37, b) öntvényanyag ZnAl, c) réz, izzítással kilagyított, d) alumínium, izzítással kilagyított, e) POM kopolimer [4.2]

#### 4.1.1.5 A telített (hőre lágyuló) poliészterek

Az ezredfordulón egyre nagyobb mennyiségben felhasznált polietilén-tereftalát (PET) és rokona a polibutilén-tereftalát (PBT) a kristályos, hőre lágyuló polimerek közé tartozik.



PET



PBT

A PET és PBT kristályossága azonban már nem olyan egyértelműen meghatározott mint az izotaktikus PP-é vagy a POM-é. Hasonlóképpen mint fémeknél, a PET ömledék gyors lehűtéssel akár egészen amorf szerkezetben is rögzíthető, míg lassú hűtéssel egészen magas fokú rendezettséget, nagyfokú kristályosságot kaphatunk. Ahogyan az a 4.14 ábrán látható, az amorf PET és az orientáció útján rendezett szerkezetű PET szakító szilárdsága és modulusza között is jelentős a különbség: a mindkét főirányban mintegy 300 %-al orientált PET lemezanyag szilárdságáról a közismert szénsavas ásványvizes és üdítőitalos (vékonyfalú) palackok szilárdsága kézzelfogható példát ad. Ezek a vékonyfalú, pillékönnyű palackok közel 8 bar nyomást elviselő nyomástartó edények.

A polikondenzációval előállított hőre lágyuló (telített, lineáris) poliészterek karrierje a DACRON és a TERYLEN márkanevekkel indult a műszáliparban, az 1950-es években. A fröccsönthető – és így a fröccs-fúvással gyártott palacktípusok megjelenését a 60-as években az tette lehetővé, hogy megtalálták azokat a *gócképző* adalékokat, amelyek gyors mikrokristály-képződést tesznek lehetővé a részben kristályos, de ily módon mégis átlátszó, üvegszerűen tiszta alkatrészek gyártása során.

A PET és PBT egyaránt kitűnő technikai célú anyag. A PBT valamivel hosszabb, (2 helyett 4 tagú)  $-CH_2-$  láncával valamivel alacsonyabb olvadási hőmérsékletet és üvegesedési hőmérsékletet okoz, de a tartós hőterhelhetőséget nem csökkenti a PET-tel összehasonlításban. Az üvegszállal erősített PBT kompozitok a korszerű elektrotechnika kitűnő szigetelőanyagai. Mivel az észtercsoport valamelyest nedvességre érzékeny, a lineáris poliészter fröccsanyag granulátumát fröccsöntés előtt gondosan meg kell szárítani. A poliészter szálak DACRON, TERYLEN mellett közismert a poliészter filmek (MYLAR) és a poliészter fröccsanyagok (POCAN, VALOX, IMPET, VESTODUR stb.) számtalan, jól bevált kereskedelmi típusa.

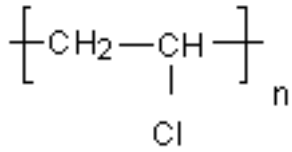
A PET technikai fejlődését az ásványvizes és üdítőitalos palackok elterjedése rendkívüli mértékben meggyorsította. Ez gyors kapacitásnövekedéshez vezetett, ami látványos módon csökkentette az alapanyag árát. A 3.1 táblázatban – az 1990-es évek közepéről – a PET még 4,00 USD/kg áron szerepel. 2000-ben akár már 1,5 USD/kg alá is szorulhat a PET palackanyag ára.

## 4.1.2 Amorf, hőre lágyuló polimerek

### 4.1.2.1 A polivinilklorid (PVC)

A PVC az ezredfordulón a polietilén család és a polipropilén típusok után a mennyiségben harmadik legfontosabb, legnagyobb volumenben gyártott szintetikus polimer fajta. Legnagyobb előnye a kitűnő mechanikai tulajdonságok mellett: olcsó ára. A monomer vinilklorid ugyanis 56,8 (tömeg)%-ban klórból áll, a teljes mértékben kőolaj alapú PE, PP, PS stb. alap-polimerekkel szemben. A világ konyhasó (NaCl) ill. egyéb klorid forrásai pedig (pl. a tengervízből) gyakorlatilag kimeríthetetlenek, és olcsón hozzáférhetők.

A vinilklorid monomer viszonylag könnyen cseppfolyósítható gáz:  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on 4 bar nyomás alatt folyadékállapotú. Etilén monomerből és klórból állítják elő. A PVC amorf, hőre lágyuló mesterséges polimer, amelyet polimerizációs láncreakcióval állítunk elő.



PVC

Tulajdonságok	Egység	PET <sub>amorf</sub>	PET <sub>orient.</sub>	PET+30% GF	PBT+30% GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,30	1,34	1,56	1,53
Kristályosság	%	..	..	..	..
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	..	..	0,2	0,12
Telítettségi vízfelvétel	%	..	..	0,78	0,35
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	80	220	158	135
Szakadási nyúlás	%	4	8	2,5	2,5
Húzó rug. modul.	GPa	2,5	7,5	11	10,5
Hajlító szilárdság	MPa	..	..	..	220
Hajlító modulusz	GPa	..	..	9	9
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	N.T.	52	50
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	3	..	10	10
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	255	255	254	235
Üveges átalak. Hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	73	73	73	60
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	65	..	224	205
Tartós hő-terhelhetőség	°C	70	100	140	210
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,7	..	0,3	0,6
Szerszámzsugor	%	0,1	..	0,5	0,3
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	3,2	3,2	4,2	4,2
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,02	0,02	0,13	0,02
Előnyök	átlátszó nagy szil. modulusz	kitűnő mech. tul., CO <sub>2</sub> visszatartás	kitűnő mech. tul., hőálló, jó folyóképes ömledék	kitűnő mech. tul., kis szer- számzsugor (0,3%) hőálló	
Hátrányok	vízfelvétel	nagy frekv. nem hegesz- hető, korl. nyomtathatás	vízfelvétel	anizotróp zsugorodás	
Alkalmazások	textil előgyárt- mány	nyújtott szál (DACRON, TERGAL) üdítőital- palack	gépipar	villamos kapcsolók, mechanikai alkatrészek	
N.T.: nem törik					

4.14 ábra: A telített (hőre lágyuló) poliészterek tulajdonságai

A 3.2.4 fejezetben áttekintett *műveleti megvalósítási* módok közül manapság háromféle módon gyártanak PVC-t

- szuszpenziós polimerizáció (82 %)
- emulziós polimerizáció (11 %) és
- tömbpolimerizáció (7 %) útján.

A PVC gyártás mindhárom művelt technológiája *heterofázisú* eljárás: az oldószermentes tömbpolimerizáció során is kicsapódik a polimer saját monomerjéből.

Magyarország jelentős – évi 200 000 to – PVC gyártó kapacitással rendelkezik Európában. A szuszpenziós PVC hatalmas, 130 m<sup>3</sup> térfogatú, függőleges (álló) keverős reaktorokban készül, szakaszos üzemmódban. A vízben, (amely kevés emulgeátort és móltömeg-szabályozó adalékot is tartalmaz) a monomert apró cseppekké osztatják (Ø~100 µm) kb. 120 ford./perc sebességű keveréssel. A reakciót kb. 60 °C-on 6–12 óra alatt közel 90 % átalakulásig folytatják, a teljes konverzió közelítését a nyomáscsökkenés jelzi. A keletkező *zagyot* (szuszpenzió: vízben diszpergált szilárd szemcsék) homogenizálják, szűrik, centrifugálják, szárítják. A termék: jól ömleszthető, a lisztnél durvább finomságú por.

A PVC szuszpenziós polimerizációja is láncreakció, amelynek *folyamatirányítása* ebben az esetben is az *exoterm* reakcióban felszabaduló hő „kézbentartásán”, szabályozott elvezetésén múlik. Ez természetesen a jól keverhető, *vizes* közegben kényelmesebben megvalósítható, mint tömbben. A láncreakció kézbentartásának másik kulcsa, az alacsony reaktivitású („lusta”) iniciátorok alkalmazása.

A szuszpenziós polimerizációban készült PVC *molekulatömegét* a polimerizáció hőmérsékletével szabályozzák, és az ún. Fikentscher féle K-értékkel jellemzik (4.1 táblázat).

Gyártási hőmérséklet (°C)	Viszkozitási arányszám	„Fikentscher” K-érték	Számátlag móltömeg	Tömeg-átlag móltömeg
70	80	57	35 000	100 000
57	110	66,5	55 000	150 000
50	130	71,5	70 000	200 000

1. táblázat - A PVC gyártási hőmérsékletének és móltömegének összefüggése

Tulajdonságok	Egység	IPVc	kPVc	PMMA
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,20	1,40	1,18
Kristályosság	%	0	0	0
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,15	0,04	...
Telítettségi vízfelvétel	%	..	0,25	0,3
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	15	60	60
Szakadási nyúlás	%	400	30	3
Húzó rug. modul.	GPa	..	2,5	3,2
Hajlító szilárdság	MPa	..	..	..
Hajlító modulusz	GPa	..	2,0	3,2
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	..	240→N.T.	15
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	..	5	2
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	140	165	210
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	-30	80	110
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	..	70	85
Tartós hő-terhelhetőség	°C	..	60	85
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	1,8	0,7	0,8
Szerszámzsugor	%	0,8-3	0,3	0,4
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>11</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	4	3	3,3
Diel. vesz. tény. (50-10 MHz)	-	0,12	0,015	0,05
Előnyök	mély hőmérsékleten is alkalmazható, tetszés szerint lágyítható	merev, mégis ütésálló, mérettartó, „önkioltó” lángállóság	kitűnő átlátszóság, jó UV állóság, csillogó felület, meleg-formázható, jól ragasztható	
Hátrányok	korlátozott vegyszerállóság, élelmi-szeriparban nem használható	mély hőmérsékleten rideg, UV-fényre érzékeny	törékeny: karcolható, nem vegyszerálló, mérsékelten hőálló	
Alkalmazások	víz-és gázcsőtömítőprofil, cipőipar, vízhatlan csizma, kábelgyártás	víz-és csatornacső, ásványvíz-palack, ablakprofil, homlokzatburkolóelem (építőipar)	optikai átlátszó alkatrészek (pl. gépkocsikon, optikai cikkekben) telefonkészülék...	
N.T.: nem törik				

#### 4.15 ábra: A PVC és a PMMA tulajdonságai

Ha összevetjük a PVC-t a PP-vel, joggal tehetjük fel a kérdést: van-e szerepe a sztereoregularitásnak a PVC-nél is? Valóban: ahogy PP-nél, a PVC esetében is minden második szénatom a polimerláncban „aszimmetriás” – (mind a négy kapcsolódása eltérő) – és így *d*, *l* izomériára ad lehetőséget. A *d*, *l* (sztereo) izoméria (más néven optikai izoméria) jelenségét kis molekulájú szerves vegyületeknél már a 19. században felismerték. A "d" jelű konfigurációk a poláros fény síkját jobbra (latinul *dextra*), míg az "l" jelű konfigurációk balra (latinul *laeva*) forgatják el. Az aszimmetriás szénatomot tartalmazó vegyületek ezen két konfigurációja egymásba *forogás* útján nem tud átalakulni (olyan a helyzet, mint a jobb kéz és a bal kéz esetén: ezek egymásnak tükörképei, és semmiféle forgatás útján sem hozhatók egymással fedésbe.) A sztereoizomerek tehát csak a kémiai kötések felbomlása útján tudnak egymásba átalakulni. Ennek ellenére, a PVC a gyakorlatban előforduló *ataktikus* formájában is nagyszilárdságú, kitűnő technikai polimer. A PVC lánc rövid szegmensei ritka esetben lehetnek *szündiotaktikusak*, de az ebből eredő részleges kristályosság a PVC-ben sosem múlja felül a 10–15 %-ot.

A PVC műszaki alkalmazásának nem a kristályosság hiánya, hanem – sokáig – az szabott gátat, hogy a lineáris (tehát nem térhálós), vagyis hőre lágyuló polimer nem dolgozható fel képlékeny alakítással *önmagában*, adalék nélkül, úgy ahogy a többi hőre lágyuló. Az erős intermolekuláris kölcsönhatásokat, – amelyek a lánc poláros karakteréből fakadnak, és amelyek a PVC kitűnő technikai adottságait is eredményezik – fel kell *lágýítanunk*.

A lágýítás két alapvető módon történhet:

- *külső* lágýítással, olajszerű (kismolekulás) észterek (pl. a di-oktil-ftalát) hozzáadásával. A *lágý-PVC* (IPVC) jelentős mennyiségben tartalmaz lágýítót: pl. a villamos kábelszigetelő PVC-ben, vagy a kerti locsolótömlőben, 25–30 % lágýító van, de a játékgyártáshoz használt *plastisolok*ban akár 50 % lágýító is lehet.
- *belső* lágýítással is fellázíthatjuk a merev PVC láncokat. Az ún. *kemény PVC* is tartalmaz lágýító adalékot, rendszerint beépített kopolimer szegmensek (pl. vinilklorid-vinilacetát) formájában, vagy hasonló arányban utólag hozzáadott kopolimerek (pl.: metilmetakrilát-butadién-sztírol /MBS/ kopolimer) formájában.

A lágýítóval együtt sok más adalékot is be kell vinnünk a PVC alapanyagba, mielőtt azt képlékeny alakítási technológiákkal (fröccsöntés, extrúzió, melegformázás, kalanderezés, sajtolás) feldolgoznánk.

Egy műszaki célú *kemény PVC* (kPVC) – pl. csőgyártáshoz – tartalmazhat:

- stabilizátort (HCl lehasadás meggátlására)



- csúsztatóanyagot (a belső: láncközi tapadás vagy a külső: gépalkatrészhez tapadás gátlására)
- ütésállóságot javító adalékot (kopolimert)
- ütésállóságot javító adalékot (kopolimert)
- lágyítót,
- töltőanyagot, színezőanyagot, égésgátlót, antisztatikumot stb.

Az amorf hőre lágyuló polimerek közül a lágy PVC-t és a kemény PVC-t a polimetilmetakriláttal (PMMA, „PLEXI”) hasonlítja össze a 4.15 ábra. Látható itt a műszaki célokra szinte utolérhetetlen kPVC előnye: nagy szilárdság, nagy modulusz és ezzel párosuló nagy ütésállóság – s mindez rendkívül olcsó áron. A mély hőmérsékletű alkalmazást befolyásoló  $T_g$  pedig a lágyító adagolással szinte tetszőlegesen beállítható  $-30\text{ °C}$  és  $+80\text{ °C}$  között.

A PVC az utóbbi időben erős kritikát kap a környezetvédőktől, mivel tökéletlen elégetés esetén HCl keletkezhet, amiből savas eső eredhet. Valóban, a szemétegetés korábbi technikája erős kontrollra szorul. Ez a hulladékkezelési mód azonban a 21. századi Európában a villamosáram több, mint 5 %-át adhatja. Az energiatermelő szemétegetőben az energia 30 %-a a városi szemét 7 %-át kitevő műanyagból ered. Ebben 0,5 % lehet a PVC.

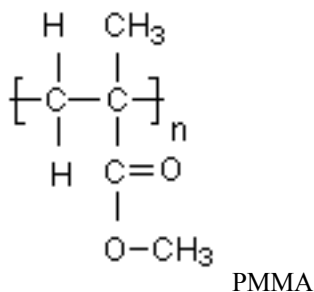
Valóban, a szemétegetésben keletkezhet:

- HCl, sósavgáz és (újabbán ezt tartják veszélyesebbnek:)
- dioxin típusú (poliklórozott dibenzol) származék is.

Ezek azonban keletkeznek NaCl-ból is, ha egyidejűleg szerves anyag ég a rendszerben. A megoldás: a füstgázok gondos elnyelése (pl. aktív szén is tartalmazó mészkő-szűrőrétegen). A manapság a földre fektetett vagy házba beépített kPVC csövek legalább 50 évre tervezhetők. 2050 után pedig a szemétegetést nagyon jól szabályozott, nagyon hatékony technológiával fogják végezni.

#### **4.1.2.2 A poliakrilátok**

Az akrilát polimerek tipikus képviselője a polimetilmetakrilát (PMMA) plexiüveggént az 1930-as évek óta jól ismert. Helyzeti előnyét a polimer gyártástechnológiája és különleges mechanikai és optikai tulajdonságai biztosítják ma is.



A MMA monomer közönséges hőmérsékleten könnyen kezelhető folyadék, amelyet pl. üveglapok között tömbpolimerizáció útján, viszonylag enyhe körülmények között kivitelezhető láncreakcióban polimeresíthetünk. A „plexi” táblák kitűnő optikai tulajdonságaikkal, törésállóságukkal, könnyű melegformázhatósággal, ragaszthatósággal tűnnek ki.

Az amorf PMMA kitűnő technikai fröccsanyag. Az autóipar nem nélkülözheti az akrilát polimert és kopolimerjeit pl. a hátsó (stop-) lámpák gyártásában.

A PMMA tipikus tulajdonságát a 4.15 ábra mutatja.

#### 4.1.2.3 A polisztirol (PS) és kopolimerjei

A sztírol polimerjei és kopolimerjei amorf hőre lágyuló polimerek.

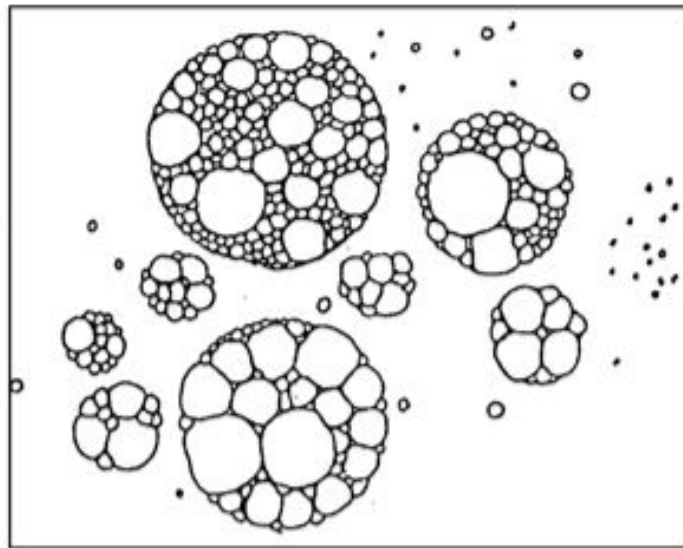
A polisztirol a hőre lágyuló mesterséges polimerek egyik korai hírnöke volt: már az 1930-as években elterjedt fröccsanyagnak számított. Manapság a homopolimer jelentősége csökkent, mivel törékenysége, alacsony ütő-törő szilárdsága korlátozza a technikai alkalmazásokat. Annál nagyobb szerephez jutnak viszont a polisztirol ütésálló változatai, (*High Impact PS*, HIPS) az ABS és a SAN kopolimerek.

Az ütésálló polisztirol amorf, hőre lágyuló *kopolimer*, amelyet folytonos üzemű, homogén tömbpolimerizációval állítanak elő. A komonomer, amely a rugalmasságot adja: kb. 10 % butadién. Érdekesség, hogy ezt előrepolimerizált (gumi-jellegű) anyag formájában, amelyet monomer sztírolban oldanak, adják hozzá a kiindulási monomerhez.

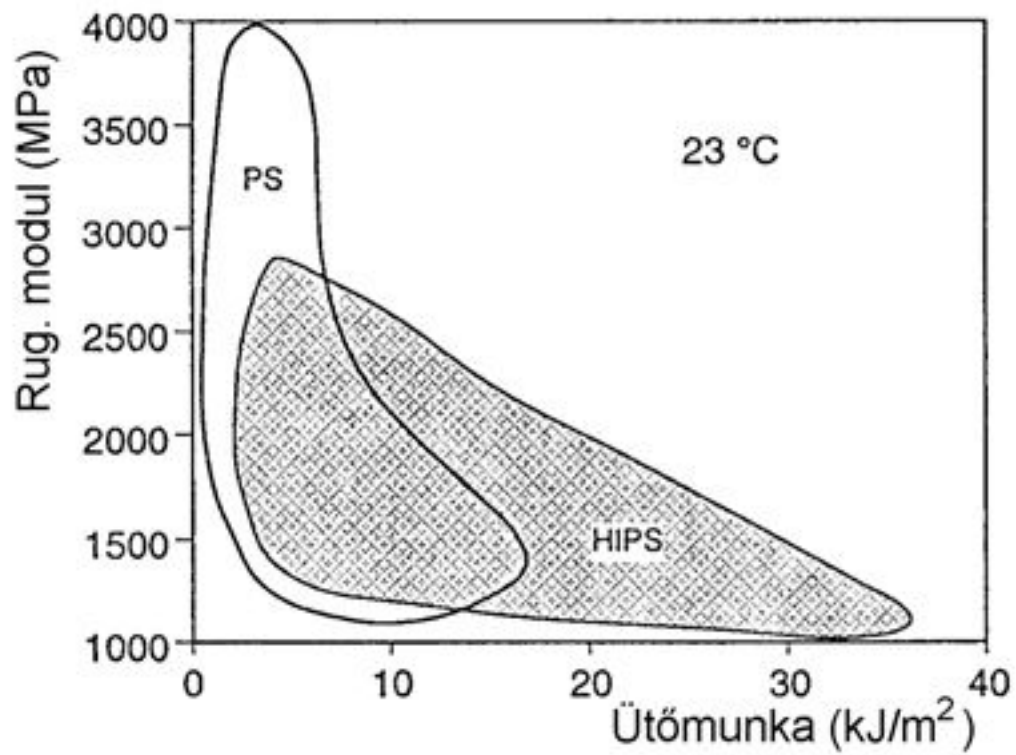
A polimerizáció gépészeti megoldását tekintve – ahogyan az a polisztirol gyártásban Magyarországon is működik – sorba kapcsolt álló hengeres keverőtartályokban: kaszkád-reaktor rendszerben történik. A három, sorba kapcsolt 20 m<sup>3</sup>-es reaktor közül az elsőt kell csak felfűteni 120 °C-ra (1,5 – 3 bar nyomáson) – a másik kettőből már jelentős exoterm polimerizációs hőt kell elvezetni ahhoz, hogy ott a hőmérsékletet 125 – 150 °C-on tartani lehessen. A konverzió, az átalakulás a három reaktorban rendre 25 %, 50 %, 75 %. Az átalakulatlan monomert természetesen visszanyerik.

A HIPS és ABS kopolimerek jellegzetessége, hogy jó ütésállóságukat inhomogén szerkezet biztosítja: a vizsgált töretmintákon elektronmikroszkóppal jól megfigyelhető a „szigetes” szerkezete. Az ABS-ben az elektronmikroszkóp alatt mintegy „gumiszigetek” láthatók,  $\mu\text{m}$  méretű, polibutadiénben gazdag inhomogenitás-csomópontok figyelhetők meg. A törésmechanika magyarázata szerint ezek a lágyabb, nagy rugalmasságú szigetek megállítják a törés során terjedő mikro-repedezéseket, így biztosítva a kopolimer szívós viselkedését. E megoldás ára a másik oldalon, hogy ezzel a módosítással a termék opakká változik, a PS elveszti átlátszó, fényes, víziszta karakterét. (4.16 ábra)

A 4.17 ábra azt mutatja, amit már korábban is érintettünk, hogy a rugalmassági modulusz (merevség) és az ütésállóság (szívósság) egymásnak ellentmondó ( $\gamma=1/x$  típusú) követelmények. A szívósság javítható a modulusz kárára – kopolimerizációval, módosítással (ld. még 16.13 ábra).



**4.16 ábra:** Az ütésálló polisztirol inhomogén szerkezete elektronmikroszkóp alatt és sematikusán egyszerűsítve [4.3]



4.17 ábra: A polisztirol homopolimerek és az ütészálló polisztirol típusok rugalmassági modulusza a hornyolt ütészállóság függvényében [4.17]

Tulajdonságok	Egység	PS	HIPS	ABS	SAN
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,04	1,03	1,06	1,08
Kristályosság	%	0	0	0	0
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	..	..	0,15	..
Telítettségi vízfelvétel	%	<0,1	..	0,45	..
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	50	30	50	70
Szakadási nyúlás	%	3	40	40	5
Húzó rug. modul.	GPa	3,3	2,2	2,4	3,5
Hajlító szilárdság	MPa	95	55	75	100
Hajlító modulusz	GPa	3,5	2,0	2,5	4
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	10	80	60	..
Ütőmunka 23° hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	2	8	22	..
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	240	240	250	..
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	90	90	110	115
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	80	78	95	100
Tartós hő-terhelhetőség	°C	70	70	75	90
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,7	0,8	0,9	..
Szerszámzsugor	%	0,5	0,6	0,5	0,5
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm-cm	5·10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>
Diel. állandó (50–10 MHz)	–	2,66	3,0	2,9	3,0
Diel. veszt. tény. (50–10 MHz)	–	2·10 <sup>-4</sup>	3·10 <sup>-4</sup>	8·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>
Előnyök	átlátszó mérettartó, merev szigetelő	PS-nél jobb ütésállóság könnyen formázható, <i>/krómozható/</i>	igen jó ütésálló merev	ütésálló merev	ütésálló, karcálló, mérettartó
Hátrányok	törékeny, nem ütésálló sztatikusan feltöltődik korlátozott vegyszerállóság	nem átlátszó, PS-nél kevésbé merev,	nem átlátszó, PS-nél sztatikusan feltöltődik	nem átlátszó, sztatikusan feltöltődik	nehezen hegeszthető
Alkalmazások	audiokazetták,	hűtő- szekrény- alkatrészek,	autó- alkatrészek, számítógép- alkatrészek,	elektromos alkatrészek	

#### 4.18 táblázat: A polisztirol és kopolimerjeinek tulajdonságai

Ahogy az a 4.18 ábrán láthatjuk, a HIPS és az ABS kitűnő, szívós műszaki anyag. Amorf jellegük miatt széles hőmérséklettartományban hőformázhatók. Extrudált lemezből, jelentős mélyhúzási arányokkal és magas termelékenységgel ilyen anyagokból készül például a hűtőgépek, hűtőládák belseje, és sok-sok fröccsöntött gépkocsi alkatrész, számtalan háztartási gép (pl. porszívó, fűnyíró stb.). A korszerű számítástechnika, audió- és videotechnika ABS-ből készíti monitorházait, billentyűs egységeit, s ebből készülnek a videokamerák, fényképezőgépek is, sok más műszaki cikkel együtt.

#### 4.1.3 Ritka térhálós polimerek (elasztomerek)

Ahogy az a 3. fejezetben kifejtettük, polimertechnikai osztályozásunk meg kell, hogy különböztesse a *hőre lágyuló* polimereket és a hőre nem lágyuló, *térhálós* polimereket. Az elasztomerek a polimerek műszaki alkalmazásában nélkülözhetetlen, pótolhatatlan fontosságúak. Ezek a gumik a teljes szintetikus polimer-felhasználás mintegy tizedét teszik ki, 2000 táján a világ mintegy évi 15 Mto gumit használ. Ennek több, mint a fele a gumiabroncs gyártásra fordítódik, de műszaki gumitömlők, olajátfejtő tömlők, gumirugók stb. nélkül sem működhetne a mai technika. Szaktárgyunk elnevezését (*polimertechnika*) egyebek között az is indokolja a korábban használt műanyagtechnikával szemben, hogy a gumi is: tipikus polimer, s több mint harmadában a 21. század elején is *természetes eredetű* marad. A polimertechnika a *gépészeti* megoldások tekintetében is sokat hasznosított a 150 évvel ezelőtt kialakult gumitechnológiából. Végül, de nem utolsó sorban a polimer mátrixú *kompozit*-technika alapjait is a gumitechnológia, a gumiabroncsgyártás vetette meg.

A ritka térhálós, nagy rugalmasságú elasztomerek tehát jelentős részben természetes gumiból (*Natural Rubber*, NR) másrészt pedig szintetikus gumiból (SR) készülnek.

##### 4.1.3.1 A természetes gumi

A természetes gumit a „*Hevea Brasiliensis*” nevű fafajta nedvéből nyerik. A háncsréteg behasításával megcsapolható gumifa szinte cseppenként összegyűjtött nedve tulajdonképpen polimer emulzió: vízben diszpergált „cisz” poliizoprén cseppecskék adják ezt a tejszerű nedvet. Ez a *latex* azután kicsapható: a víz eltávolítható a polimer szemcsék közül, s az így kapott lemezeket enyhe füstöléssel tartósítják („*smoked sheets*”).

A gumifa termékét már régen nem Braziliából kapja a világ. A jól telepíthető fa elsősorban Malajzia és Indonézia trópusi ültetvényein virul. A harmincévenként újratelepített ültetvények már a harmadik generáció óta jó megélhetést és előnyös stratégiai pozíciót biztosítanak e Távolkeleti országoknak. Fél-Magyarországnyi táj évi 2 Mto gumit termel jól szervezett kisgazdaságokban. S a növénynevelés újabb eredményeivel – klónozással – a hozam egyre jobb. Az évenkénti

hektáronkénti 2000 kg gumitermés akár évi 3 to-ra is felfuthat így, ami összemérhető egy közepes gabonatermés-hozammal.

A természetes gumi sok előnnyel rendelkezik a mesterséges gumival szemben. A legfontosabb elasztomer alkalmazásban: a gumiabroncsgyártásban az egyre nagyobb igénybevétellel arányosan növekszik a felhasznált keverékben a természetes gumi aránya. A közönséges gépkocsi abroncsban ez az arány 30 % lehet, – de a repülőgépek, a versenyautók gumiabroncsa több mint kétszerannyi NR-t tartalmaz. A visszatérő űrrakéta (*space-shuttle*) gumiabroncsa pedig, amely a  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  alatti hőmérsékletű világűrben érkező kell, hogy „talajt fogjon” a forró betonon, csaknem tiszta NR felhasználását követeli meg. Az ok: a természetes gumi mechanikai tulajdonságai a legjobbak abban a tekintetben, hogy a rugalmas alakváltozás *hiszterézise* itt kisebb, és az abban keletkező hő *disszipációja* (eltávozása) itt az előnyösebb, szemben az SR mesterséges gumival. Az NR mint amorf polimer egyébként a technikailag optimálisnál *nagyobb* molekulatömegű, eredeti (még nem térhálósított) állapotában is. Ez a természetes móltömeg tipikusan 200 000 és 400 000 (g/mól, Dalton) közötti, de ennél magasabb is lehet. Ez azt jelenti, hogy az izoprén monomer egységekből több tízezer kapcsolódhat össze. Az adalékok bekeveréséhez és az alakadáshoz a térhálósítás előtt ez a móltömeg nagyobb a megkívántnál, ezért a gumitechnológiák molekulatördeléssel ún. *masztikálással* kezdődnek. Ezekről a technológiákról a 13.1 fejezetben lesz szó.

A természetes gumi ( $0,934\text{ g/cm}^3$  sűrűségű) éghető, amorf és természetes állapotában még nem térhálós polimer. Mechanikai tulajdonságairól a térhálósítás előtt nincs mit megjegyeznünk. A –S–S– típusú kénhidakkal történő térhálósítás ugyanis tetszőleges sűrűségű lehet. Így tehát széles határok között, akár több nagyságrenddel eltérő moduluszú, szilárdságú, kopásállóságú, keménységű anyagot kaphatunk.

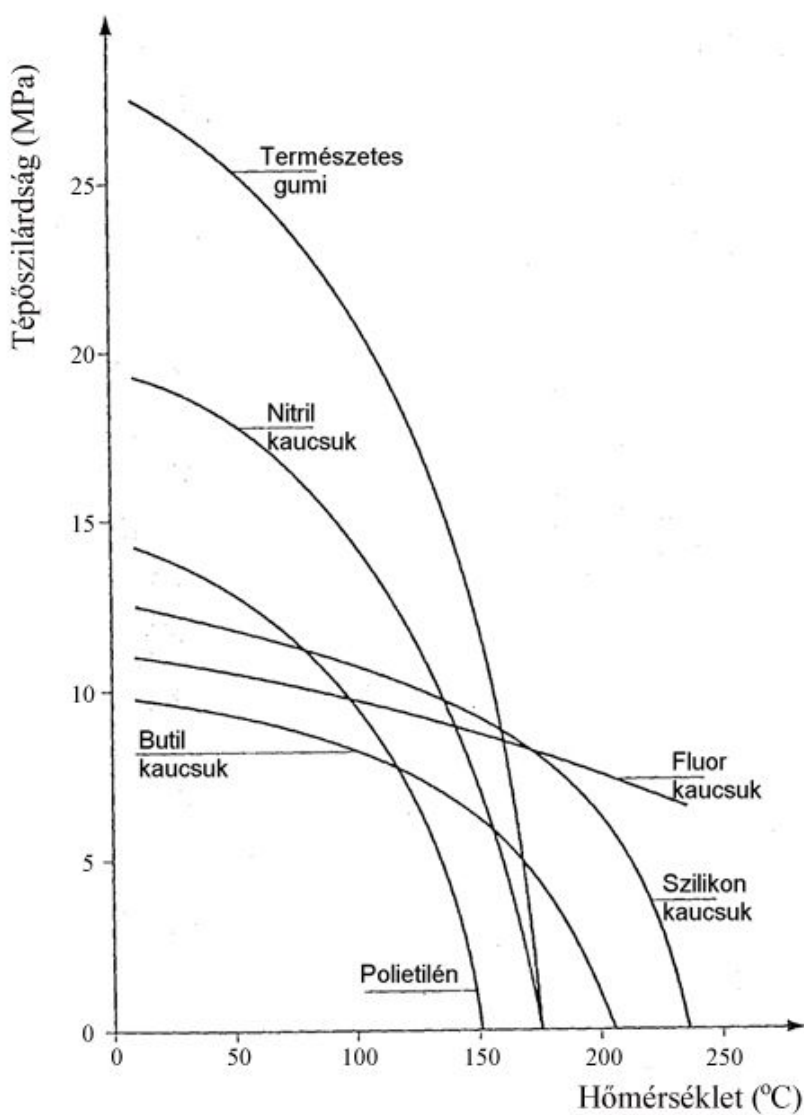
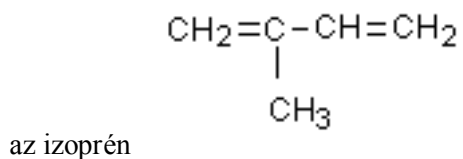
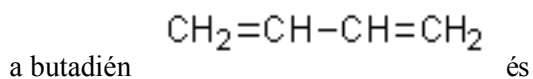
Rendezettségre utaló röntgendiffrakciós jelet csak a nagymértékben nyújtott térhálós gumin kaphatunk.

A térhálósított természetes gumi tulajdonságai között a mechanikai tulajdonságok a legkiválóbbak. Ezek között is a szabályozható, nagyfokú rugalmasság, a kismértékű hiszterézis csökkentett felmelegedéshez vezetnek dinamikus igénybevétel esetén. Amiben elmarad a szintetikus elasztomerek mögött, az a hőállóság, olajállóság és öregedés-állóság, különösképpen agresszív technoklimában, pl. ózon jelenlétében. A természetes és mesterséges gumik hőtűrését a 4.19 ábrán hasonlítjuk össze.

#### **4.1.3.2 Szintetikus elasztomerek**

A 20. század felgyorsult szintetikus vegyipara – különösképpen a két világháború között – nemcsak arra volt képes, hogy lemásolja és művi úton is előállítsa a természetes gumi polimerjét a cisz-poliizoprént, hanem egy egész sor új típusú szintetikus gumit (SR) is létrehozott.

Mivel a gumiipar térhálósítási „vulkanizációs” technikája a polimerláncban feltételezi a kettős kötések jelenlétét, a leghasználatosabb monomerek:



**4.19 ábra:** A természetes gumi és a különféle szintetikus elastomerek tépőszilárdságának függése a hőmérséklettől [4.2]



Kopolimerizációs partnerként sikerrel vált be ezenkívül a szintetikus gumik gyártásában a sztírol, az akrilnitril, a vinilacetát, az etilén és a propilén is.

A szintetikus gumik előállítására a polimerizációs láncreakciót alkalmazzák gyökös vagy ionos iniciálási mechanizmussal. Gyakori az *emulziós polimerizáció* eljárási módja, mivel ez a természetes gumi latexéhez hasonló végterméket ad, s így megkönnyíti a további hagyományos feldolgozást. A leggyakoribb típusok:

**BR:** (*butadiene-rubber*), „Buna”, polibutadién. A két világháború között kifejlesztett műgumi. Később, 1950 után a *Ziegler-Natta* katalizátorokkal, oldószeres polimerizációban sikerült jobban megközelíteni a természetes poli-izoprén szigorú „*cisz*” izomériáját.

**SBR:** (*styrene-butadiene-rubber*): kopolimer, pl. 75 % butadién és 25 % sztírol összetétellel. Manapság ebből gyártják a műgumik több mint felét, emulziós polimerizációval. E kopolimer sztíroltartalmával és a NR-SR aránnyal lehet beállítani pl. a gépkocsi gumibroncsának kopásállóságát egyfelől és nedves tapadását másfelől. (Ezek ugyanis szembenálló követelmények)

**NBR:** *Akril-Nitril-Butadién* gumi. Ebben a kopolimerben is a butadién adja a térhálósítható *gumi* vázát a polimerláncnak, az akrilnitril (18–50 %) viszont olajálló, benzinálló jelleget ad az ebből készült műszaki gumicikkeknek. Ez is emulziós polimerizáció útján készül. A növekvő AN tartalommal a  $T_g$  –40 °C-ról –2 °C-ra nő. Az NBR sokkal polárosabb karakterű, mint a lényegében apoláros NR vagy BR. Technikai célokra mint olaj- és benzin közelében működő tömítések (O-gyűrűk) alátétek, rugók, tömlők stb. – nélkülözhetetlen gumifajta.

**CR:** *kloroprén* gumi: A kloroprén monomer polimerje is olajállóságával mutatkozott be NEOPREN márkanévvel az USA-ban, 1936-ban. Ezt is emulziós polimerizációban gyártják. Elég olajálló és vegyszerálló, előnyösen alkalmazzák lángálló gumikeverékekben, tömlőkben, profilokban, hevederekben, ékszíjakban stb.

**IR:** *izoprén* gumi: Csak 1954-ben sikerült Ziegler-Natta katalizátorok segítségével teljes mértékben „lemásolni” a természetes gumi (*cisz*-poli-izoprén) szerkezetét. Ma ez a mesterséges gumifajta adja az összes műgumi 10 %-át.

**EPM**, vagy EPDM: Etilénből, Propilénből és Dién Monomerből (kettős kötést tartalmazó monomerből) sokcélú kopolimer családot (EPDM) fejlesztettek ki. A legfőbb alkatrész (40–80 %) az etilén, amelynek homopolimerje szilárd állapotban kristályos, de a felmelegítés során gumyszerű állapotban megy keresztül. Az etilén-propilén kopolimert (E-PP) már megismertük, mint a PP-*rugalmasított* változatát. Az EPDM *terpolimer* (háromkomponensű kopolimer) harmadik monomerje tehát két kettős kötést tartalmaz, gyakran többgyűrűs vegyület (pl. di-ciklopentadién, vagy etilidén-norbornén). Az EPDM amorf, nagyrugalmasságú, hőre lágyuló, de térhálósítható, tehát reaktív kopolimer, tipikusan 200 000 és 300 000 közötti átlagos móltömeeggel. Hőre lágyuló –

tipikusan poliolefin – kompaundokban (keverékekben) is használják, nemcsak gumiipari komponensként.

**EVM:** az etilén-vinilacetát kopolimer már szobahőfokon is nagyfokú elaszticitást mutató amorf, hőre lágyuló polimer. 30 % vinilacetát (VAc) tartalom alatt inkább módosított polietilén tulajdonságokat kapunk, de 30 % és 75 % közötti VAc tartalom valóban gumirugalmas, hőre lágyuló polimer anyagot ad.

**TPE:** termoplasztikus elasztomerek. Az utóbbi mesterséges elasztomer típusok már bizonyos mértékig átvezettek bennünket azokhoz az anyagokhoz, amelyeket a modern gumiipar hőre lágyuló (termoplasztikus) gumiknak (elasztomereknek) nevez. Ez az anyag ideális esetben a felhasználás hőmérsékletén gumiszerűen viselkedik, – mintha térhálós lenne– de magasabb hőmérsékleten mégis maradéktalanul megolvasható, ömleszthető, – tehát fröccsönthető, extrudálható, sőt újrafeldolgozható (recikálható). Nyilvánvalóan a térháló ez esetben csak a hőhatásra könnyen felbontható fizikai térháló lehet. Ezt a csaknem „fából-vaskarika” feladatot a modern *molecular engineering* úgy oldja meg, hogy a TPE anyagok egyik komponense lágy, elasztikus szegmenseket képez, amely szegmensek nagymértékben deformálhatók, és amelyeknek alacsony az üveges átalakulási hőmérséklete ( $T_g$ ). A TPE másik komponense kemény, kristályosodásra is képes, kevésbé deformálható szegmenseket képez, amelyeknek  $T_g$ -je magas, és mintegy csomópontokat képezve a *fizikai térhálót* létrehozza. E kristályos tartományok jól meghatározott hőmérsékleten ( $T_m$ ) megolvadnak, – de lehűtve újra létrehozzák a fizikai térhálót.

A TPE különböző karakterű szegmensei lehetnek ugyanakkor a makromolekulának (kopolimernek) részei – de lehetnek mikro-heterogén, elosztott fázisban is. Az feltétel, hogy a kemény és a lágy szegmens termodinamikailag összeférhetetlen (inkompatibilis) legyen egymással, ne oldódjanak fel egymásban, – mert akkor ez a csomópontok közé fogott rugó–model nem működik.

A TPE lényege mindenképpen a korszerű, *képlékeny* alakítású polimerfeldolgozási technológiák hulladékmentes, termelékeny eljárásainak kapcsolása a *térhálós* alkatrészek funkcionális tulajdonságaival.

Manapság TPE anyagnak tekintik a következő főbb anyag típusokat

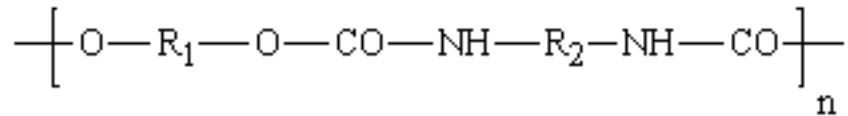
SBS (Sztírol-butadién-sztírol szegmens elvű) kopolimerek

TPU (hőre lágyuló poliuretánok)

TPE-A (poliéter- amidok)

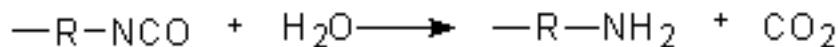
TPE-E (poliéter-észterek)

És még több más, egyre újabb és újabb típust.



**PUR:** poliuretánok

Manapság kifejezetten elasztomer funkcióban, műszaki és köznapi célokra rendkívül sok poliuretánt alkalmazunk. Szerkezetüket a 2.4 fejezetben a *poliaddíció* leírása során már megismertük. Lineáris változatuk, amely kétfunkciós *diol*-ból és *di-izocianát*-ból indul ki, fröccönthető, hőre lágyuló elasztomer. Nincs akadálya azonban a kívánság szerinti, „testre szabott” (*tailor-made*) térhálósításnak sem, amely során bármilyen rugalmassági moduluszú, hőre nem lágyuló, *kémiai* térhálóval rendelkező elasztomerek sora állítható elő, megfelelő mennyiségű *trifunkciós* monomer adagolásával. Az autópártól a cipőtalp-gyártásig sokféle poliuretánt használunk, a leggyakrabban *habosítással* egybekötve. A habosításhoz elég, hogy – számított mennyiségű – víz legyen a rendszerben, amely az izocianát csoporttal reakcióba lép:



Vagyis a vízmolekula az –NCO csoportot elbontja, amint és *gázalakú* széndioxidot képez. Az *integrálhab* – akár cipőtalp, akár az autókormány borítója formájában a felületen folytonos, a munkadarab mélységében pedig habosított alkatrész, rendszerint reaktív fröccsöntési technológiával készül PUR-ból, amelyet a későbbiekben ismertetünk (a 13.2.3 fejezetben).

A szintetikus elasztomerek tulajdonságai olyan tág határok közé állítható be a téhálósság szabályozásával, hogy mechanikai tulajdonságaikról még áttekintő táblázat összeállítása sem indokolt.

#### 4.1.4 Sűrű térhálós polimerek (duromerek)

A sűrű térhálós polimerek – a duromerek – (kikeményített polimerek) a polimertechnika hőskorának, a 20. század elejének jellegzetes műanyagjai:

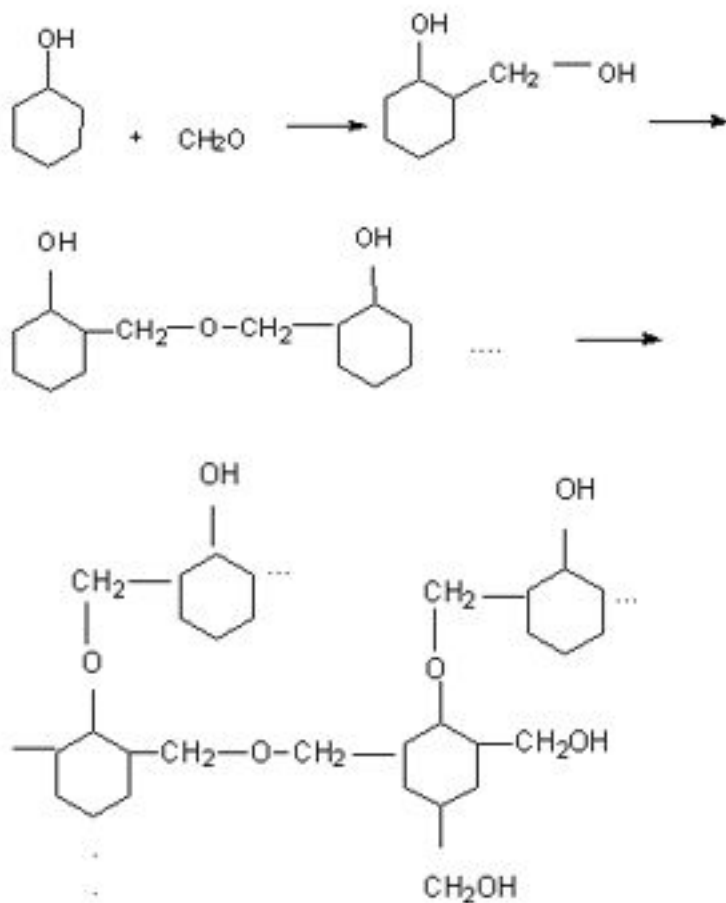
- a fenol-formaldehid gyanták (PF) (bakelit-félék, fenoplasztok)
- a karbamid-formaldehid gyanták (UF) (füturit stb. aminoplasztok)
- a melamin-formaldehid gyanták (MF) (dekorit burkolólapok, forgácslap bevonatok és kötőanyagok).

Ezek nemcsak a korai elektrotechnika úttörői voltak, pl. villamos kapcsolók, konnektorok, csatlakozó elemek formájában, hanem változatos, nagyszilárdságú kezdeti kompozitokat is kínáltak, pl. korai gépészeti alkalmazásokhoz, pl. textilbakelit tömbök, forgácsolt siklóelemek, fogaskerekek formájában.

Másrésről e csoportban, a sűrű térhálós polimerek között találjuk a nagyszilárdságú, üveg- és karbonszállal (szénszállal) erősített polimerkompozit legjobb befoglaló (*mátrix*) anyagait

- a telítetlen poliésztereket és
- az epoxigyantákat.

**PF:** (*phenol-formaldehid*) fenoplasztok: A fenol és a formaldehid tipikus lassú polikondenzációs folyamatban több fokozaton átvezethető és közbülső fokokon megállítható reakcióba lép:



Ez a reakció adta az első, nagy tömegben gyártott szintetikus polimert (műanyagot) L. H: Baekeland 1907-es szabadalma nyomán BAKELIT márkánévvvel. A polimer anyagtudomány sokoldalúságát és folytonos megújulását jellemzi, hogy a korszerű mikroelektronikai ipar az integrált áramkört elemek (IC) gyártásában ma is hasonló összetételű polimer reziszt-lakkot használ. A fenoplaszt és aminoplaszt gyanták tipikus tulajdonságait különféle szálas kompozitokban a 4.20 ábra mutatja.

Az *aminoplasztok* megjelölés két anyagcsalád közös neve:

- a karbamid (*urea*)-formaldehid (UF) és a

- melamin-formaldehid (**MF**) gyantáké.

Ezek abban hasonlítanak a PF gyantákhoz, hogy a kialakításunkhoz vezető lépcsős, polikondenzációs reakció közbülső fázisokban is megállítható. Az így kapott, még nem makromolekulás gyanta előtermék (oligomer) kitűnően alkalmas papíros vagy szövetjellegű vázanyag impregnálására. Ezt az impregnált vázanyagot egy következő technológiai lépésben sajtolással igen jó minőségű táblákká alakíthatjuk. Az aminoplaszt gyanta nemcsak átlátszó, tetszetős bevonatként jelenik meg a felületen, hanem igen szívós, hőálló, karcálló bevonatot biztosít.

Tulajdonságok	Egység	PF-WF	PF-Cel	UF-Cel	MF-GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,35	1,40	1,50	1,75
Kristályosság	%	-	-	-	-
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,3	0,4	..	..
Telítettségi vízfelvétel	%	..	..	..	..
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	40	40	60	70
Szakadási nyúlás	%	..	..	1	0,6
Húzó rug. modul.	GPa	..	..	0,4	0,8
Hajlító szilárdság	MPa	80	70	80	60
Hajlító modulusz	GPa	8,0	7,5	8,0	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	6	12	..	..
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	..	..	..	..
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	-	-	-	-
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	..	..	..	..
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	140	125	125	190
Tartós hő-terhelhetőség	°C	170	170	80	120
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,5	0,5	0,4	0,3
Szerszámzsugor	%	0,9	0,4	1,0	0,6
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>14</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>
diel. állandó (50-10 MHz)	-	7	5	6	8
diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,3	0,2	0,1	0,1
Előnyök		hőállóság, vegyszerállóság, nincs kúszás		felületi keménység	szilárdság
Hátrányok		csak mély színek- ben, kellemetlen szag, nagy diel- vesztesség		vízérzékeny	ár
Alkalmazások		szigetelőelemek a villamostechikában kompozittechnikák		konyhai bevonat fogantyú	elektromos háztartási cikkék

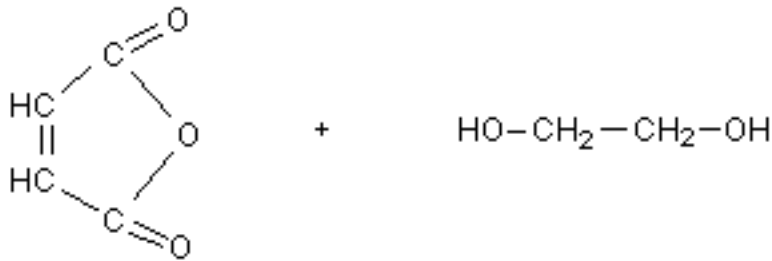
**4.20 ábra:** Fenoplaszt (PF) és aminoplaszt (UF, MF) sajtolóanyagok faliszt (WF) cellulóz (cel.) és üvegszál (GF) erősítéssel

Az aminoplaszt gyanta a sokszínű bútortárgy-gyártás nélkülözhetetlen anyaga. A DEKORIT, FORMICA stb. lemezek ma a legkorszerűbb borítóanyagát adják a forgácslapokkal és az egyéb regenerált farostból készült agglomerált lapokkal dolgozó bútortárgygyártóknak. Korszerű konyhabútoraink, portáljaink, üzleti és irodai berendezéseink változatos környezete a műmárványtól a leghűségesebb exotikus fa-utánozatig: aminoplaszt kompozitok.

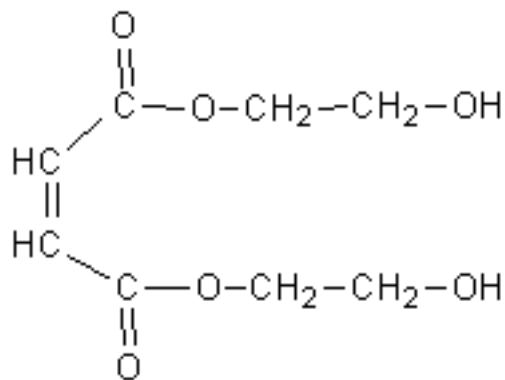
Az UP *telítetlen poliészterek (unsaturated polyesters)* UP gyanták a polimer kompozitok korai térhálós mátrixanyagai. A polimer termékek tervezésében és gyártásában érdekelt mérnökök alapvetően kétféle formában találkozhatnak a telítetlen poliészterrel

- alapanyagként: mézsűrűségű folyékony gyanta: *oligomer* formában, és
- végtermékként: térhálós, hőre nem lágyuló nagyszilárdságú műszaki, szerkezeti anyag formájában.

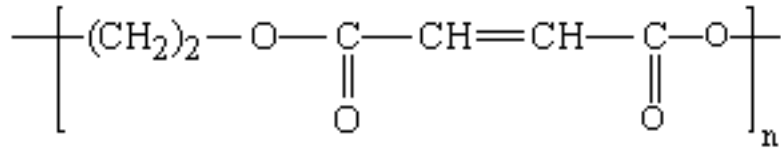
Az UP *oligomer* alapanyaga olyan észter, amely polikondenzációval készül, de PET és PBT (hőre lágyuló) poliészterekkel szemben egyik alkotóelemében *kettős kötést (telítetlenséget)* tartalmaz. Ez a telítetlen komponens rendszerint a szerves, kétfunkciós sav: a legtöbbször a maleinsav (anhidrid formában), amely kétfunkciós alkohollal reagál,



maleinsav anhidrid + etilén-glikol →



majd tovább kondenzálva



telítetlen (poli)észter /oligomer/ keletkezik.

Az alapanyagként felhasznált folyékony kereskedelmi (UP) gyanta tipikusan 65 % ilyen oligomerból és 35 % vinilmonomerból (tipikusan sztirolból) álló keverék-oldat. Ebből a végtermék – amely a legtöbbször üvegszállal, - szövettel, - paplannal erősített *kompozit* (l. 14. fejezet) az oligomer gyanta és a monomer kettős kötésein elinduló és térhálózhoz vezető polimerizációs *láncreakcióban* keletkezik.

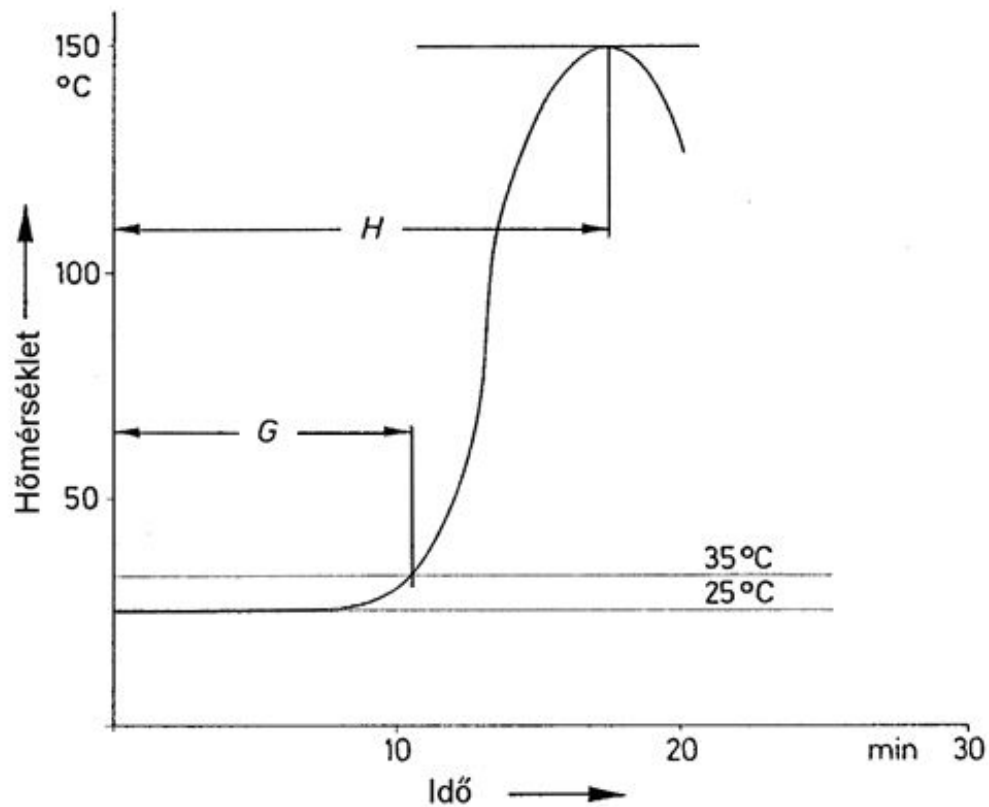
A 4.21 ábra a telítetlen poliésztergyanták és az epoxigyanták erősítetlen – és szálerősített végtermékeiről, tehát a térhálós rendszerekről ad információkat.



Tulajdonságok	Egység	UP	UP + GF	EP	EP + GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,25	1,6	1,2	1,8
Kristályosság	%	-	-	-	-
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%				
Telítettségi vízfelvétel	%				
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	50	80	50	200
Szakadási nyúlás	%	2	..	3	4
Húzó rug. modul.	GPa	3	..	3	2,2
Hajlító szilárdság	MPa	100	150	..	..
Hajlító modulusz	GPa	3,5	10	..	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	..	..	2	55
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	-	-	-	-
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	..	..	..	..
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	80	190	230	260
Tartós hő-terhelhetőség	°C	..	..	100	200
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	..	..	..	..
T <sub>g</sub> felett	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	..	..	5	2
Szerszámzsugor	%	2,1	0,4	0,3	0,3
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>14</sup>
diel. állandó (50-10 MHz)	-	6	5	4	4
diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	3·10 <sup>-3</sup>	7·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-2</sup>
Előnyök		kitűnő mechanikai tulajdonságok hőállóság, jó tapadás			
Hátrányok		zsugorodás (1,5-0,5 %)		higiénikus feldolgozást igényel	
Alkalmazások		szálerősített kompozit: autó- ipar, vízijármű- gyártás		szálerősített kompozit: repülőgépgyártás, elektrotechnika	

**4.21 ábra:** Telítetlen poliészterek (UP) és epoxigyanták (EP) tulajdonságai erősítetlen állapotban és üvegszállal (40 %) erősített (GF) változatban

A telítetlen poliésztergyanta alapanyagának láncreakciója is mutatja a 2.2.2 fejezetben leírt *exoterm* reakció-jelleget. Ez látható a 4.22 ábrán.

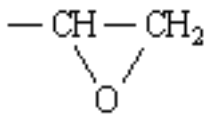
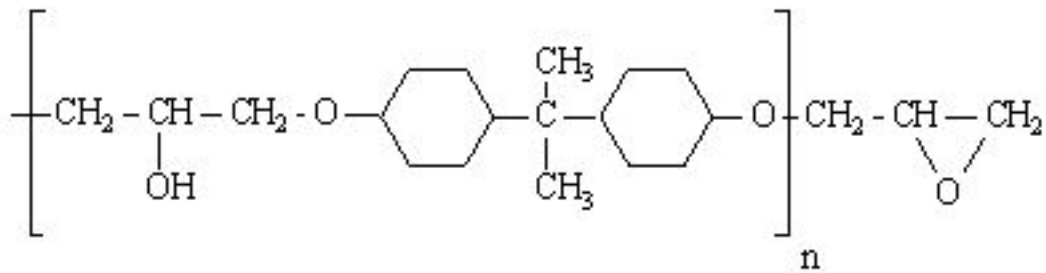


**4.22 ábra:** A telítetlen poliészter térhálósodásának exoterm hőeffektusa

A 4.22 ábrából láthatjuk, hogy megfelelő iniciátor bekeverésével a poliésztergyanta oligomer-monomer oldatában (üvegszál jelenlétében vagy anélkül) a térhálósodáshoz vezető polimerizációs láncreakció rövid várakozás után (*G* gélesedési idő, itt kb. 10 perc) olyan hevesen elindul, és néhány percen teljes mértékben végbe is megy (*H*: kikeményedési idő, itt: további 8 perc), hogy ezalatt a rendszer akár  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\Delta T$  hőmérséklet-emelkedést is mutat, ami gyakorlatilag az *adiabatikus* hőeffektus (l. 2.4 táblázat).

Az EP *epoxigyanták* is oligomer formában kerülnek forgalomba. Karbonszállal vagy üvegszállal erősített kompozitá történő átalakításuk, térhálósításuk technológiáit a 14. fejezetben fogjuk tárgyalni.

Az oligomer epoxigyanta tipikus molekulája:



jellegzetes

epoxigyűrűt

tartalmazó közepes méretű molekula, amelyben  $n$  csak néhány (max. 10) lánctagot jelent. Ez az epoxigyűrű nyílik fel megfelelő (többnyire amin típusú) térhálósítószer (*Härter*) hatására és *addíciós* mechanizmussal építi ki a láncot. Ennek az addíciós polimerizációba lépő feszített gyűrűnek köszönhető az epoxigyanták egyik legnagyobb műszaki előnye: miközben a kitűnő tapadást biztosító, ragasztóként is használható vagy kompozit mátrix (beágyazó) anyag térhálósodik, gyakorlatilag nem változik a fajtérfogata, tehát alig zsugorodik. Az ARALDIT, EPIKOTE stb. márkanevű epoxigyanták mérnöki alkalmazása a számítástechnikától a legváltozatosabb gépészeti alkalmazásokon át az űrtechnikáig terjed.

A telítetlen poliészterek (UP) és epoxigyanták (EP) kapcsán érdemes megemlítenünk, hogy a legújabb fejlesztések igen sokféle, térhálós kötés kialakítására alkalmas csoportokat építenek be ezekbe az alapanyagokba. Így készülnek az

- *epoxi akrilát* („vinilészter”) gyanták (pl. különlegesen vegyszerálló üvegszálak kompozitához),
- az *uretán-epoxi* (különleges bevonatokhoz, pl. acéllemezen),
- az *epoxi-novolak* (mikroelektronikai alkalmazásra).

A változtatható térhálóságú polikondenzációs termékek piacán különösen nagy fejlődés várható a testreszabott (*tailor-made*) funkcionális polimerek területén. Ezek az új típusú gyanták nagymértékben kiterjesztik a feldolgozástechnika eszköztárát. Nemcsak tág határok között beállítható molekulatömegű, viszkozitású, reaktivitású gyantákat kínálnak ezek a módosított epoxi származékok, hanem új típusú kikeményítési, térhálósítási eljárásokat is lehetővé tesznek. Az epoxi-akrilát gyanta, pl. hőállóságát az epoxi gyantától örökölte, de láncreakcióban polimerizálható, térhálósítható, mint az akrilátok. Ez lehetővé teszi, hogy az epoxi-akrilátot pl. UV-sugárral, vagy elektronnyalábbal (*electron beam, EB*) térhálósítsuk.

## 4.2 Különleges műszaki polimerek

Nehéz határvonalat vonni a szintetikus polimerek hierarchiájában a tömegcikk-gyártás (*commodity plastics*) polimerjei és a műszaki alkalmazású („*high-tech*”) polimerek között. Egyfelől a rohamos fejlődés igazi versenyt teremt a gyors ütemben felfutó anyagváltozatok között, és meglepő új eredményeket hozhat a 21. században. Másfelől nincs elvi különbség az évenként millió tonnákban gyártott tömeg-műanyagok és a műszaki műanyagok között: a legegyszerűbb polietilén legújabb változata – a HOPE – szálformában az 1990-es évek elején már az acélt megközelítő szilárdsággal ( $\sigma = 3000$  MPa) volt gyártható. Még az ár sem igazán választja el a tömeggyártás polimerjeit a különleges műszaki polimerektől. Az ár ugyanis erősen függ a gyártókapacitástól, a gyártott mennyiségtől (4.23 ábra).

A 4.14 ábrán a legkülönfélébb szintetikus polimerek ára és éves (USA) felhasználása közötti összefüggés látható (1987-ből). A log-log trendfüggvény meredeksége  $-0,4$ , vagyis a gyártásban és felhasználásban mutatkozó 10-szeres növekedés az árat az eredetinek 40 %-ára csökkenti. Másfelől: az évi 1 millió tonna feletti felhasználású polimer anyagok ára 1 USD/kg árat közelít, vagy az alá kerül.

*Műszaki polimeren (engineering polymer)* olyan szerkezeti anyagot értünk, amely elsősorban műszaki cikkekben kerül felhasználásra, ahol

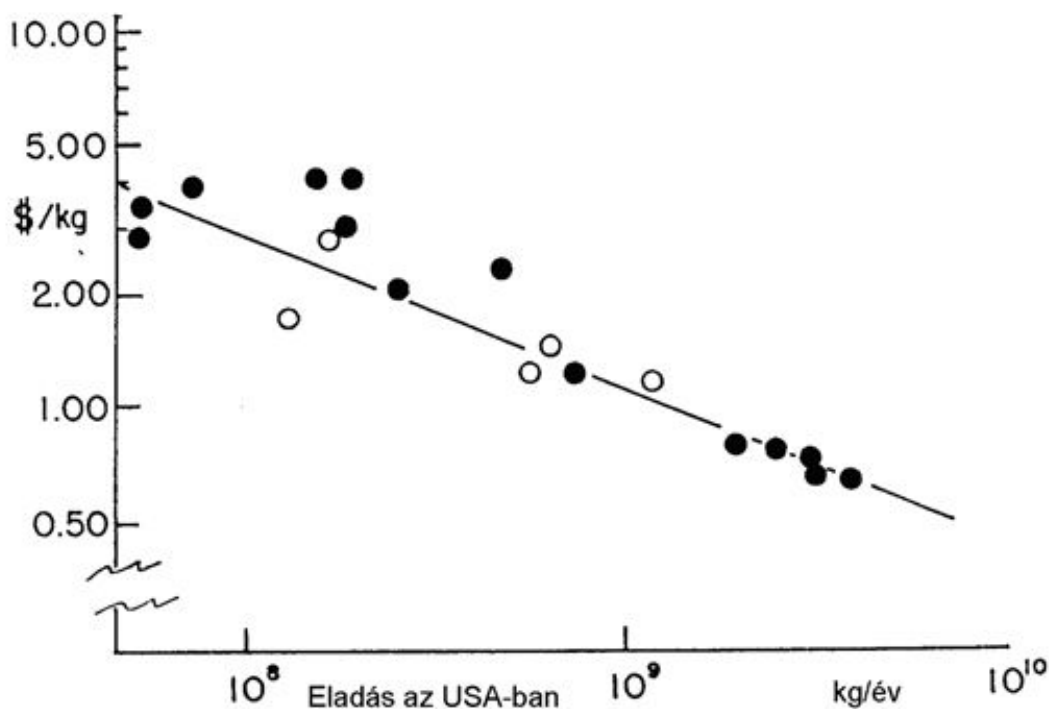
- a méretpontosság,
- a mechanikai szilárdság,
- a hőállóság,
- az elektrotechnikai jellemzők, és
- még sok más funkcionális tulajdonság,

mint pl. a kopásállóság, karbantartást, kenést nem igénylő súrlódási karakter, vegyszerállóság, feszültségkorrózióval szembeni stabilitás, üzembiztonság, szívósság, a katasztrófális tönkremenetellel szembeni védelem stb. – egyedülállóan magas szintű tulajdonság-együttesét valósíthatjuk meg, viszonylag kis sűrűségű, könnyűsúlyú anyaggal.

Ha ezek a magasszintű mutatók, funkcionális tulajdonságok közül ki kell emelnünk valamit, akkor az az egyre növekvő *hőtűrés*, hőállóság.

A polimerek korlátozott hőállóságát ma is sokan e szerkezeti anyagcsalád leggyengébb pontjának tekintik. Pedig a polimerek hőtechnikai adataiban éppen legelőnyösebb vonásuk: *emberközeli* alkatuk jelenik meg. Amikor kézbe vesszünk egy (ABS) mobil telefont vagy egy videokamerát, amikor beülünk egy gépkocsi (PUR) ülésébe a (PP) műszerfal mögé – nemcsak a testünk sűrűségéhez, keménységéhez stb. leginkább hasonló szerkezeti anyaggal lépünk kapcsolatba, hanem a hozzánk legközelebb álló hővezető-képességű anyagcsalád okoz kellemes hőérzetet már az első

fogáskor, érintéskor. S az emberközeli anyagok, eszközök emberhez közeli hőtűrése sem zavaró. A műszaki polimerek fejlődése mégis elsősorban a *hőállóság* növekedésében tükröződik. S bár a magasabb hőtűrést elsősorban a *térhálósítással* lehet általában megoldani, a 20. század végének fejlődési iránya mégis a *hőre lágyuló* polimerek hőtűrésének kiterjesztését tűzte ki célul, s abban ért el komoly eredményeket. E jelenség mögött a hőre lágyuló polimerek nagysebességű, gazdaságos feldolgozási technikái állnak hajtóerőként.



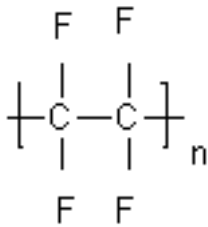
**4.23 ábra:** Különbféle hőre lágyuló (•) és hőre nem lágyuló (o) polimerek ára és felhasználása közti kapcsolat (USA, 1987) [4.1]

Áttekintésünkben a műszaki polimerek között kiemeltük a fluortartalmú polimereket és a szilikonokat, majd különös figyelmet szentelünk az aromás (benzol-) gyűrűt tartalmazó legmodernebb hőálló polimereknek.

#### 4.2.1 A fluorpolimerek családja

Ha a legegyszerűbb monomer, az etilén hidrogénjeit fluorral helyettesítjük, a fluor-polimerek sajátos családjához juthatunk el.

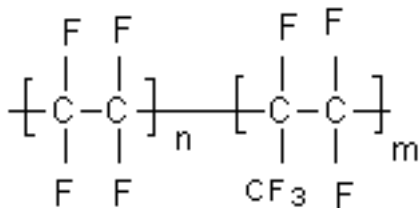
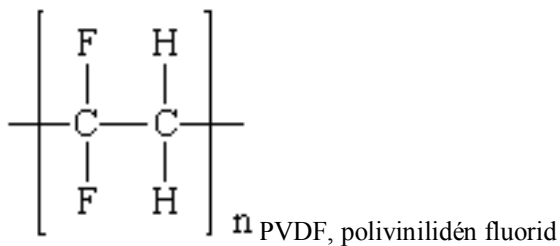
A politetrafluoretilén



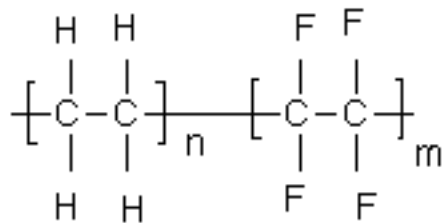
PTFE, politetrafluoretilén

TEFLON márkanévvel rendkívüli karriert futott be a 20. században. Különleges hőállósága – amelyet a 4.24 ábra mutat be – azonban igen nehéz feldolgozhatósággal párosul, annak ellenére, hogy a PTFE magasabb hőmérsékleten elvileg hőre lágyuló polimer.

Ez a nehéz feldolgozhatóság indította el az utóbbi két évtized fejlesztési munkáit más, könnyebben feldolgozható fluoropolimerek irányában.



PEPF, fluorozott etilén-propilén kopolimerek



ETFE etilén-tetrafluoretilén kopolimer

A PTFE átlátszatlan, csontfehér, kristályos, hőre lágyuló polimer. Kitűnő hőállóságát kémiai karaktere, igen magas (95 %-os) kristályossága és igen magas molekulatömege ( $10^6$  Dalton) eredményezi. A PTFE és társai adják a szokatlanul magas, a legnagyobb sűrűségű polimereket.

A fluoropolimerek műszaki tulajdonságai nagymértékben függenek feldolgozásuktól, –márpedig ez a feldolgozás igen nehéz. A hőre lágyuló polimerek szokványos feldolgozási technikái – a

kalanderezés, extrúzió, fröccsöntés – a fluorpolimerekre nem alkalmazhatók. Tipikus feldolgozási módjuk a magas hőmérsékleten és nagy nyomáson elvégzett por-zsugorítás (*szinterezés*), – ami a fémek porkohászatához hasonlóan porózus termékhez, mikro-porozitáshoz vezethet. A szinterezést lehet társítani egyéb (ram-extrúzió, l. 8. fejezet, 8.38 ábra) módszerekkel, majd forgácsolással.

A PTFE hőállósága valóban kitűnő, – de nem összemérhető a térhálós termékekével. Hasonló korlátot jelent a nem elhanyagolható mértékű kúszás (4.25 ábra).

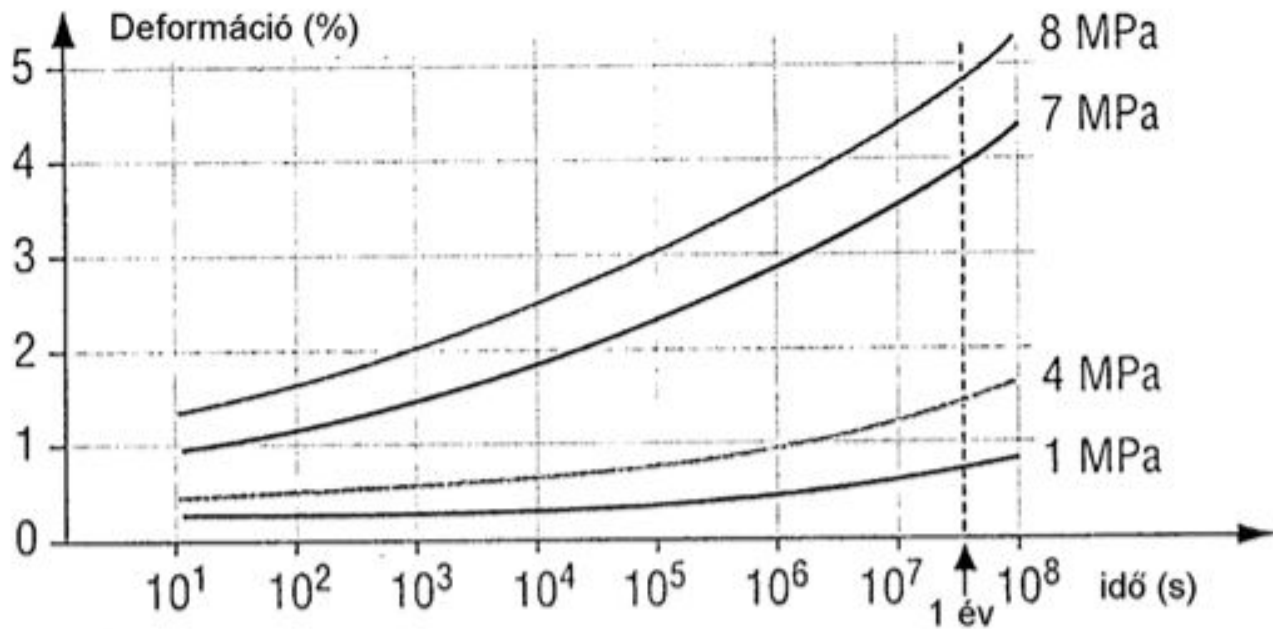
Csaknem utolérhetetlenek a PTFE és társai a siklási (antifrikciós) és tapadásgátló tulajdonságaikban.

Tulajdonságok	Egység	PTFE	PVDF	PEPF	ETFE
<b>Fizikai tulajdonságok</b>					
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	2,16	1,76	2,15	1,7
Kristályosság	%	85	>50	..	..
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	..	0,04	..	..
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>					
Szakító szilárdság	MPa	30	50	20	45
Szakadási nyúlás	%	300	10	300	200
Húzó rug. modul.	GPa	0,4	2,6	0,4	0,8
Hajlító szilárdság	MPa	18	77	..	..
Hajlító modulusz	GPa	..	2,2	..	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	..	N.T.	N.T.
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	..	..	..	..
<b>Termikus tulajdonságok</b>					
Olvadási hőmérséklet	°C	330	172	..	270
Üveges átalak. hőm. (Tg)	°C	123	-32	..	..
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	50	110	70	90
Tartós hő-terhelhetőség	°C	260	150	205	155
Lineáris hőtágulás Tg alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	..	1,2	..	..
Szerszámzsugor	%	..	2-3	..	..
<b>Elektromos tulajdonságok</b>					
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>18</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>16</sup>
diel. állandó (50-10 MHz)	-	2	8	2	2,5
diel. veszt. Tény. (50-10 MHz)	-	4·10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-1</sup>	2·10 <sup>4</sup>	10 <sup>-3</sup>
Előnyök	vegyszerálló vill. szigetelő, hőálló, anti- frikciós, nem tapadó	közeli a PTFE-hez, könnyebben feldolgoz- ható	közeli a PTFE-hez, fluidizált bevonatolás	flexibilis vegyszerálló, könnyen feldolgoz- ható	
Hátrányok	kúszás, nehe- zen feldolgoz- ható, nem ragasztható, sűrűség, ár	magas ár	magas ár	magas ár	

N.T.: nem törik

4.24 ábra: Fluorpolimerek tulajdonságai





4.25 ábra: A PTFE kúszási görbéi szobahőfokon [4.15]

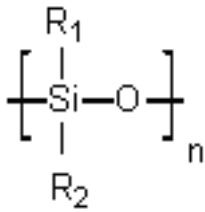
Anyagpár	$\mu$ statikus	$\mu$ dinamikus
PTFE / acél (száraz)	0,06-0,10	0,06-0,10
PTFE / acél (kent)	0,04-0,06	0,04-0,06
PTFE / PTFE (száraz)	0,09	0,09
PTFE / PTFE (kent)	0,04-0,07	0,04-0,07

## 2. táblázat - A PTFE súrlódási együtthatója

Mint az a 4.2 táblázatból látható, nincs különbség a statikus és dinamikus súrlódási együtthatók között és a kenőanyagoknak sincs jelentős szerepe. A fluorpolimerek tehát kitűnő csapágy (-betét-) anyagok. Emellett kitűnő, vegyszerálló és tapadásgátló bevonatok, tömítések, szelepek stb. készülnek fluorpolimerekből a vegyipar, élelmiszeripar számára, és sok más műszaki alkalmazásra.

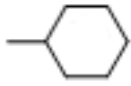
### 4.2.2 Polisziloxánok

A szilícium (Si) mint elem – a periódus táblán a szén (C) alatt elfoglalt helyével összefüggésben – a szénhez hasonlóan polimerváz képzésre alkalmas. A négy vegyértékű szilícium a leggyakrabban a következő polimerláncot képezi:



Ez a *polisziloxán* lánc „monomer” egysége, ahol

$R_1$  és  $R_2$  a leggyakrabban  $-CH_3$  metilcsoport, de lehet H, vinilcsoport ( $CH_2 = CH -$ ) vagy aromás

fenilcsoport (  ) is.

A polimerlánc képződéshez a hidroxilcsoportot tartalmazó szilícium vegyületek polikondenzációjával jutnak el.

A sziloxán polimerek széles alkalmazási lehetőségei abból erednek, hogy a polisziloxánok változatos lánchosszúsággal és szerkezettel állíthatók elő

- szilikon- olajok,
- szilikon zsírok,
- szilikon elasztomerek és
- szilikon gyanták (lakkok, térhálós bevonatok stb.) formájában.

A *szilikon olajok* ma a technika nélkülözhetetlen hőálló hőközvetítő folyadécai – pl. magas hőmérsékletű (+ 250 °C) szerszámtemperálásra. Ezek kismolekulás, csak néhány láncszemből álló „előpolimerek” igen jó hőstabilitással. Különös előnyük, hogy viszkozitásuk – ellentétben a hagyományos olajokkal – alig változik széles hőmérséklet határok között.

A szilikon olaj hordozós vagy hordozó nélküli *permet (aerosol)* formájában kitűnő formaleválasztó anyag, pl. sajtolószerszámok belső felületén. Itt a szilikon polimer *anti-adherens* (tapadásgátló) hatása érvényesül.

A *szilikon zsírok* magasabb móltömegű, de még mindig csak előpolimer jellegű szilikonok. A vákuumtechnika kitűnő, hőálló tömítő- és kenőanyagai.

A szilikontermékek másik fele valóban nagymóltömegű polisziloxánként kerül felhasználásra. A polisziloxán lakk kitűnő bevonószer papíron, fémen, üvegen, – amelyek azután vízlepergető (hidrofób) jelleget kapnak így.

Az építőipar kerámia és szilikát anyagai – és akár kész építményei – sokat köszönhetnek a szilikonpolimerek víztaszító jellegének. Akár utólagosan is vízzáróvá tehetünk, pl. műemléki építményekben felületet és belső rétegeket egyaránt.

A *szilikon gyanták* kitűnő felületbevonó-szerek. A sziloxán lánc nem tapadó (*antiadherens*) jellege ugyanis molekula-tervezési (*molecular engineering*) módszerekkel jól társítható reaktív funkciós csoportok felvitelével. Így éppen hogy *tapadás közvetítő* feladatot teljesítő, kétarcú gyantát kapunk, amely vékony határfelületi rétegben két különböző jellegű anyagot kapcsol. A *vinilsziloxánok* például a polimer kompozitban az üvegszál felületén teljesítenek jól ellátott szolgálatot.

A *szilikon gumi* sokoldalú anyagcsaládot képezve adja a szilikonpolimerek legszélesebb felhasználását. Ezek mechanikai és egyéb tulajdonságairól nem is tudunk leegyszerűsített, táblázatos összefoglalást adni, hiszen ez a tulajdonság együttes a *térháló sűrűségével* szinte fokozatmentesen beállítható, tetszés szerint.

A szilikon gumik alapanyaga, *előpolimerje* tipikusan 100–200 lánchosszúságú 10–20 000 Dalton móltömegű folyadék, amelybe aktív töltőanyagként igen nagyfelületű ún. *aeroszil-t* adnak. Ez nem más, mint mesterségesen előállított, igen finom SiO<sub>2</sub> por több, mint 100 m<sup>2</sup>/g (!) fajlagos felülettel. A szilikon gumi előpolimerjének térhálósítására kétféle lehetőség is van:

- szobahőfokú térhálósítás (*RTV, room temperature vulcanization*) és
- magas hőmérsékletű térhálósítás (*HTV, high temperature vulcanization*).

A *szobahőfokú térhálósítás (RTV)* mechanizmusa lehet polikondenzáció és poliaddíció is. A modern kémia mindezt megoldja olyan egykomponensű rendszerekkel is, amelyek – pl. tubusból szabad levegőre kinyomva – a levegő nedvességtartalmának hatására térhálósodnak. A mai építési és gépészeti technikák, tömítéstechnika rendkívül sokféle RTV szilikonpolimert használ.

A *magasabb hőmérsékleten történő térhálósítás (HTV)* kiindulási anyaga (előpolimerje) már sokkal magasabb molekulatömegű (400 000 – 1 M Dalton) és igen magas viszkozitású ( $2 \cdot 10^4$  Pa·s), akár 10<sup>4</sup> monomerből álló polisziloxán. Ezekből sajtolt, kalanderezett, extrudált és öntött termékek készíthetők, kétkomponensű rendszerek alkalmazásával, amelyek a szükséges katalizátorral az előpolimert a magas hőmérsékletű szerszámban hozzák össze. A szilikon gumi fröccsöntése is lényegében két folyadékkomponens *reaktív fröccsöntése*, hasonlóan a poliuretánok reaktív fröccsöntéséhez. A HTV térhálósítást tipikusan peroxidok iniciálják, pl. a vinilszilán csoportok aktiválásával. A szilikon gumik a természetes és a szintetikus gumik között kimagasló hőállóságukkal tűnnek ki. Ezt mutatja be a 4.12 ábra.

### 4.2.3 A polikarbonátok

A szintetikus polimerek molekuláris tervezőmérnökei viszonylag hamar felismerték, hogy e szerkezeti anyagcsalád hőtűrését alapvetően kétféle módon lehet emelni:

- térhálósítással,



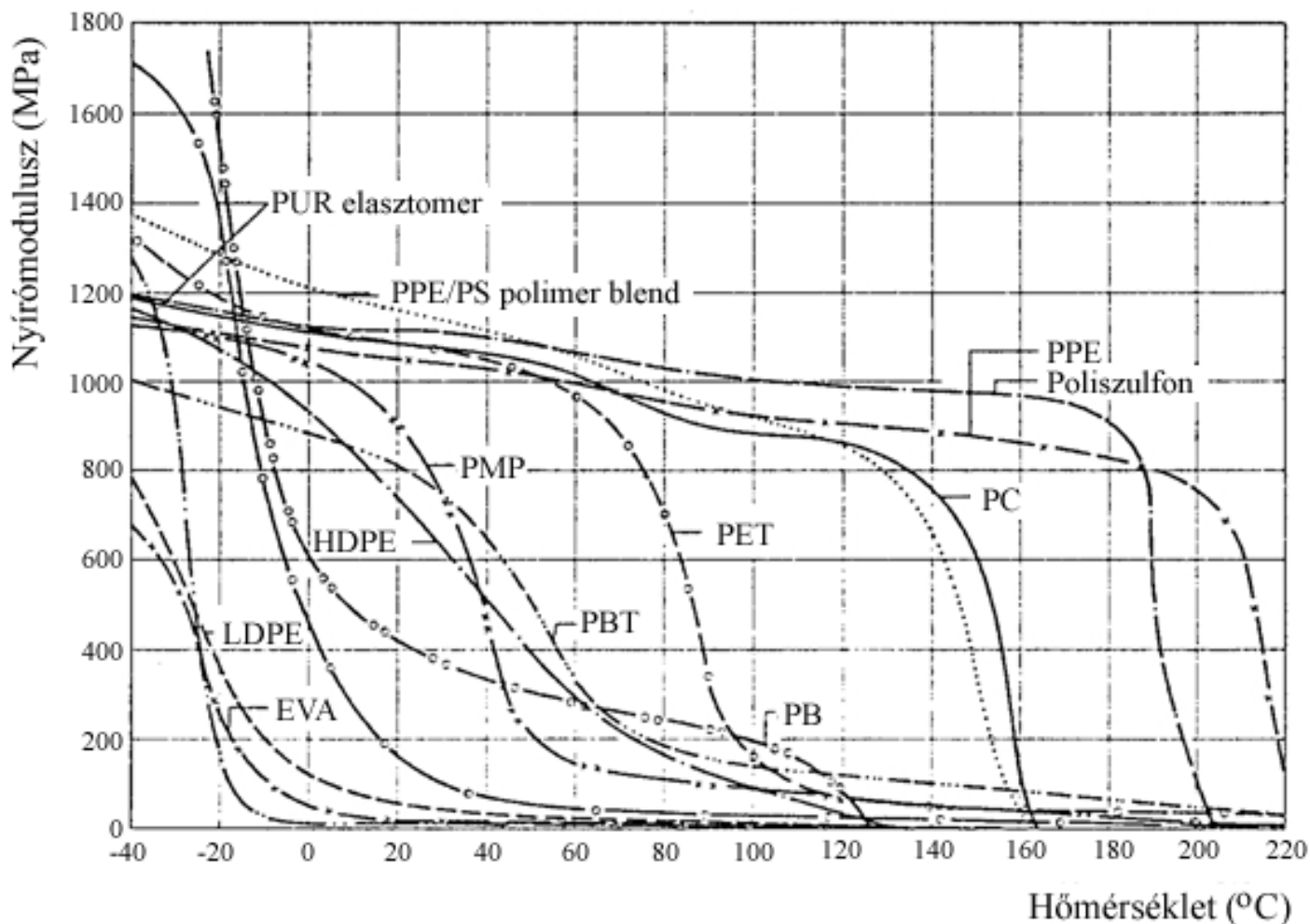
- a különlegesen stabil aromás benzolgyűrűnek a láncba építésével.

A következő 4.2.3 – 4.2.8 fejezetek *hőálló polimerjeiben* ez utóbbi elem a közös:

- a polikarbonátok (PC)
- az aromás poliamidok (ARAMIDOK, PAA)
- poliimidek (PI, PAI, PEI)
- a poliszulfonok (PPS, PSU, PESU)
- a poliéterek (PEEK) és a
- folyadékkristályos polimerek (LCP)

mind attól kapják különleges hőtűrésüket, magas hőmérsékleten is kiváló mechanikai tulajdonságaikat, mérettartásukat, csekély zsugorodásukat a szerszámban, sőt lángállóságukat, a tűzben ön-kioltóként megjelenő égésgátoltságukat, hogy a főláncban *aromás gyűrűt* (a poliimidek esetén többszörösen összetett gyűrűrendszert) tartalmaznak. E gyűrűk  $\pi$ -elektron felhője a többletenergia különleges eloszlatására (*disszipációjára*) alkalmas.

A 4.26 ábra különféle hőre lágyuló polimerek nyírési modulusának tükrében jól mutatja a PC, a poliszulfonok és a poli-fenilénéterek (PPE) különleges hőállóságát.



**4.26 ábra:** Különbéféle hőre lágyuló polimerek nyírási modulusza a hőmérséklet függvényében

[4.2]

E gyűrűs polimerek különösképp szálal erősítéssel valóban a polimertechnika legkitűnőbb anyagai az ezredfordulón. Közös hátrányuk az – egyenlőre – viszonylag magas ár, és a feldolgozástechnika nehézségei: pl. az, hogy a fröccsöntés előtt gondos szárítást igényelnek, a magas hőmérsékletű fröccsöntés magas hőmérsékletű szerszámtemperálást (fűtést) kíván meg, és termikus utókezelésre is szükség lehet.

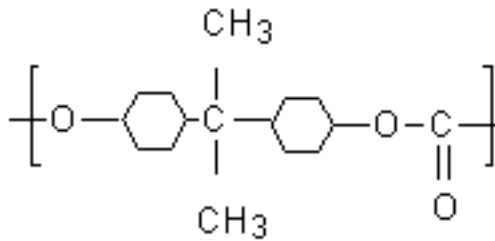
Bár ezek az aromás hőálló polimerek többnyire lineárisak, némelyikük (pl. a poliimidek) nem tekinthetők egyszerű *hőre lágyuló* polimereknek. Szerkezeti átalakulási hőmérsékleteik ( $T_g$ ,  $T_m$ ) – elvileg – olyan magasra kerülhetnek ugyanis, amely hőmérsékletek már káros hőbomlást okozhatnak. Így több ezek közül alkalmatlan extrúzióra, filmképzésre, és fröccsöntésük is különlegesen magas nyomást, hőmérsékletet, és egyéb különleges technikai megoldásokat kíván.

Tulajdonságok	Egység	PC	PC + 30 % GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>			
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,2	1,43
Kristályosság	%	0	0
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,15	0,11
Telítettségi vízfelvétel	%	0,35	0,28
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>			
Szakító szilárdság	MPa	63	144
Szakadási nyúlás	%	6	4
Szakító modulusz	GPa	2,4	6-10
Hajlító szilárdság	MPa	85	145
Hajlító modulusz	GPa	2,4	6,7-9,5
Ütőmunka 23 °C, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	35
Ütőmunka 23 °C, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	64-80	10-15
<b>Termikus tulajdonságok</b>			
Olvadási hőmérséklet	°C	240	240
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	150	150
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	128	145
Tartós hő-terhelhetőség	°C	125	135
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,7	0,25
Szerszámzsugor	%	0,6	0,3
<b>Elektromos tulajdonságok</b>			
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>16</sup>	10 <sup>16</sup>
Diel. állandó (50–10 MHz)	–	3,0	3,2
Diel. veszt. tény. (50–10 MHz)	–	0,01-0,001	0,01
Előnyök:	kiválóan egyesítik a hajlítómerevség és a kiugróan magas ütésállóság követelményét, átlátszó, magas törésmutatóval (n= 1,586)		
Hátrányok:	Szénhidrogénekkal és mosószerekkel szemben kevésbé ellenálló		
Alkalmazások:	CD-gyártás, optikai cikkek, fotolencsék, szélvédő, szemüveg, bukósisak átlátszó része, vandál-biztos lámpabúrák, sterilizálható orvostechnikai (átlátszó) cikkek, elektrotechnikai cikkek		

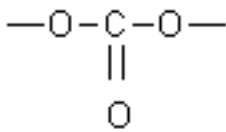
N.T.: nem törik

4.27 ábra: A polikarbonátok tulajdonságai

A polikarbonátok tulajdonképpen a hőre lágyuló poliészterek rokonai. Tipikus szerkezetük:



A lineáris láncban tehát aromás gyűrű és észtercsoport is van, ez az észterkötés azonban



a legegyszerűbb *szénsav észtere*, innen a név: *polikarbonát*. A *szénsav a természetben bőven* előforduló széndioxid (CO<sub>2</sub>)ből származik, s még az is lehet, hogy a jövő században ezt fogjuk hasznosítani a polikarbonátgyártásban. (Egyenlőre nem abból, hanem foszgénből /OCCL<sub>2</sub>/ és difenilpropánból készül.)

A polikarbonát az 1970-es évek végén megjelent első igazán különleges műszaki polimer. Kiváló szilárdságát akár 125 °C-on is tartósan megtartja, – és itt sikerült először a magas modulusz (2,4 GPa) és kiváló ütésállóság, törésbiztonság – egyébként ellentmondó – tulajdonságait egyesíteni. A PC hornyolt ütőmunkája a legjobb ABS típusoknál is háromszor jobb. Mindezt egy víztiszta, átlátszó, fényes felületű, optikai tulajdonságaiban is kiemelkedő, kis fajsúlyú, szerves üvegtípus biztosítja. Az amorf hőre lágyuló PC tulajdonságai nemcsak a CD-kben és a törhetetlen üvegekben váltak közismertté. Szálerősített hőre lágyuló polimerként különleges technikai alkalmazásokban is kitűnően helytáll. Tulajdonságait a 4. 27 ábra mutatja be.

#### 4.2.4 Aromás poliamidok (aramidok)

A poliamidok kitűnő mechanikai tulajdonság-együttesét (kiváló húzószilárdság, szívós ütésállóság, magas modulusz) az utóbbi években két irányban is tovább javították a molekula-tervezés (*molecular engineering*) céltudatos módszereivel:

- a hőállóság növelés és
- a nedvesség-érzékenység csökkentése irányában.

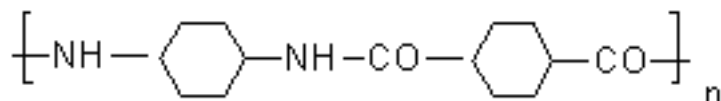
Ahogy azt már hangsúlyoztuk: az aromás gyűrű bevitelle a polimerláncba általában megnöveli a lánc stabilitását. A kívülről érkező hőenergia, sugárzó energia ugyanis eloszlik a benzolgyűrű

különleges elektronrendszerében, mielőtt a lánc felszakításához szükséges mértékben koncentrálna.

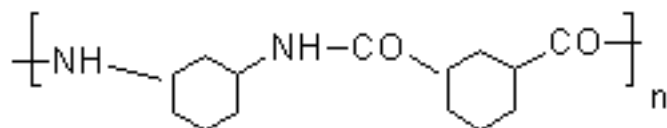
Az aromás poliamidok: a *polimerláncban* aromás gyűrűket tartalmazó poliamidok. (Az oldalláncban megjelenő benzolgyűrűnek – mint pl. a polisztirolban – nincs akkora stabilizáló hatása.)

Az aromás poliamidok között három alaptípus lett igen sikeres az elmúlt időben:

- *para*-feniléndiamin-ftálsavamid, ismert márkaneve: KEVLAR (DuPont)

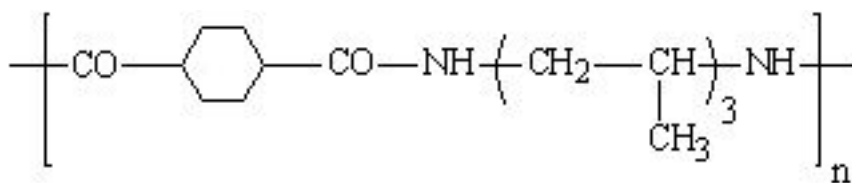


- *meta*-feniléndiamin-ftálsavamid, ismert márkaneve: NOMEX (DuPont)



Mindkét fenti típus tehát poli-ftalamid (PPA) csak a benzolgyűrűhöz kapcsolódás helyzetében különböznek (*para*: átellenes pontokon... *meta*: mellette...) A KEVLAR és a NOMEX típusok nagyszilárdságú szálerősítő-anyagként jelentek meg kompozit célokra, de önálló műszaki anyagként is alkalmazhatók.

- a harmadik alaptípus csak egyik komponensében aromás (*semi-aromatic*) poliamid



Ezt az alaptípust TROGAMID márkanevvel forgalmazzák (HÜLS).

Tulajdonságaikat a 4. 28 ábra mutatja.

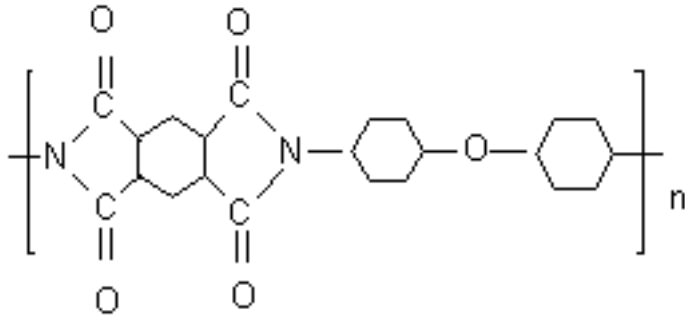
Az aramidok elsősorban mint nagyszilárdságú szálal erősítőanyagok arattak sikert. Epoxigyanta mátrixban igen előnyös a *hibrid* szálerősítés: karbonszál és aramidzál együttes alkalmazása.

- A karbonszál: nagy moduluszt és nyomószilárdságot
- az aramidzál: szívósságot, ütésállóságot, csökkentett sűrűséget biztosít az epoxi kompozitban.



#### 4.2.5 A poliimidek

A poliimidek esetén a bevált amidkötést megkettőzve, az aromás gyűrűvel többszörös gyűrűt képezve vitték a polimerláncba:



Tulajdonságok	Egység	PAA	PAA + 30 % GF	PA 6.3T
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,15	1,46	1,12
Kristályosság	%	..		
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,68	0,21	..
Telítettségi vízfelvétel	%	..	1,8	7,8
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	76	221	87
Szakadási nyúlás	%	6	2,5	8
Húzó rug. modul.	GPa	2,4	13,1	2,8
Hajlító szilárdság	MPa	128	317	135
Hajlító modulusz	GPa	2,6	11,4	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	..	52,3	N.T.
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	96	11,2	9
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	310	310	280
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	127	127	149
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	120	285	119
Tartós hő-terhelhetőség	°C	..	170	..
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	..	0,6	0,5
T <sub>g</sub> felett	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	..	1,3	..
Szerszámzsugor	%	1,5	0,8	0,7
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	..	10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>
diel. állandó (50-10 MHz)	-	..	4,4	3,6
diel. vesz. Tény. (50-10 MHz)	-	..	0,009	0,03
Előnyök		kitűnő mechanikai tulajdonságok, tág hőmérsékleti határok között, jó mérettartás		
Hátrányok		továbbra is nedvességérzékeny		
Alkalmazások		halogén lámpák, foglalatok, kompozit-szálerősítés	diesel-szűrők háza, villamos kapcsolók, gázórák, üzemanyag szivattyúk alkatrészei	

N.T.: nem törik

4.28 ábra: Az aromás poliamidok tulajdonságai

A poliiimidek (PI) kitűnő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyre széles hőmérsékleti tartományban  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  és  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  között számítani lehet. Többszörös gyűrűs láncszerkezetük adja ezt a hőtűrést, de innen származik ellentmondásos jellegük is: lineáris makromolekulájuk sem ténylegesen hőre lágyuló. Legtöbbször fólia, film alakjában hozzák forgalomba (KAPTON fólia, Du Pont) – ez oldószerrel feloldható, de nem hőre lágyuló (ebben hasonló a cellulózhoz).

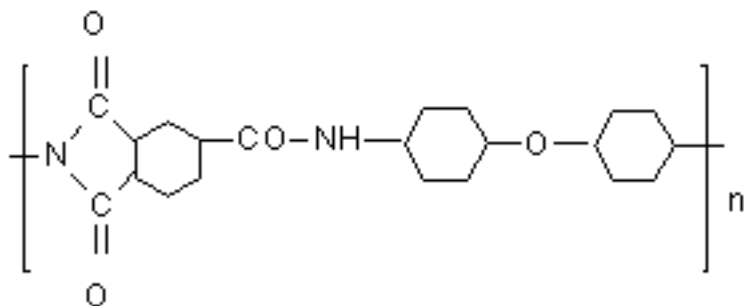
Az újabb poliiimid típusban – amely vágott üvegszállal fröccsönthető anyag, l. (4.29 ábra: PI + 40 % GF) – a *fröccsöntés* után utólagos hőkezelést írnak elő (pl. 12 óra  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on), amelyben poliaddíciós mechanizmussal utólagos térhálósodás történik.

A PI feldolgozható még

- fröccs-sajtolással (*transfer molding*)
- sajtolással,
- porzsugorítással (sintering) és
- prepreg technológiákkal.

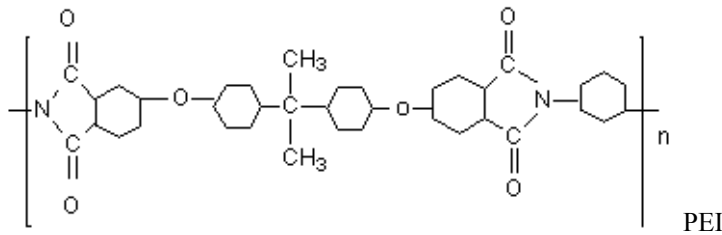
Ez utóbbi kompozit célú előgyártmány, amelyben a karbonszál szövetet oldószerben feloldott poliiimiddel átítatják, megszáritva feltekercselik, majd szerszámba sajtolják (az SMC kompozittechnológiához hasonlóan, amelyről később, a 14. fejezetben esik szó). A korszerű sugárhajtású repülőgép hajtómű alkatrészig rengeteg műszaki cikk készül ebből a nagyszilárdságú kompozitból.

A poliamid-imid-ben amid kötés is van:



PAI

Ehhez hasonló a poliéter-imid szerkezete:



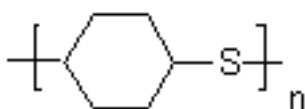
Tulajdonságok	Egység	PI + 40 % GF	PAI + 30 % GF	PEI + 30 % GF
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,6	1,61	1,51
Kristályosság	%	..	0	0
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,6	0,24	0,16
Telítettségi vízfelvétel	%	..	..	0,9
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	50	205	160
Szakadási nyúlás	%	..	7	3
Húzó rug. modul.	GPa	..	10,8	8,7
Hajlító szilárdság	MPa	..	338	230
Hajlító modulusz	GPa	6,5	11,7	9,0
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	..	50	43
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	0,8	8	10
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	..	..	..
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	..	282	215
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	320	..	210
Tartós hő-terhelhetőség	°C	250	..	170
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,15	1,62	0,2
Szerszámzsugor	%	0,3	0,1	0,3
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	3·10 <sup>16</sup>	10 <sup>15</sup>	3·10 <sup>14</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	3,5	4,2	3,7
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	7·10 <sup>-3</sup>	22·10 <sup>-3</sup>	5,3·10 <sup>-3</sup>
Előnyök	kitűnő mechanikai tulajdonságok, magas hőmérséklettűrés, méretstabilitás, vegyszerállóság, sugárállóság			
Hátrányok	magas ár, körülményesebb feldolgozástechnika			
Alkalmazások	a repülés- technika reaktorainak hőálló alkat- részei, elektro- technika	kopásálló, hőálló mechanikai alkatrészek, elektronika	halogénlámpa foglalata, kapcsolók, konnektorok	

4.29 ábra: A poliimidek tulajdonságai

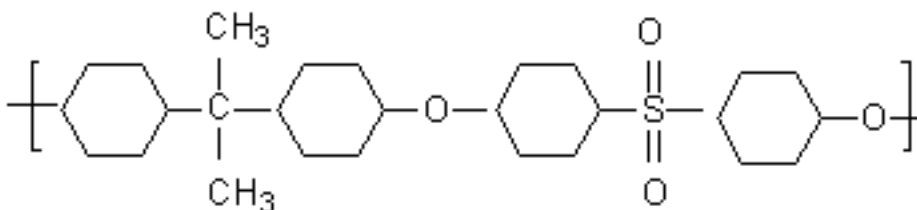
A poliiimidek is amorf, *elméletileg* hőre lágyuló polimerek, igen magas üveges átalakulási hőmérséklettel, és a PI családra jellemző feldolgozási nehézségekkel. Szálerősítéssel rendkívül nagyszilárdságú, hőálló, igen megbízható anyagot adnak, amely utólagos hőkezelés után térhálósnak tekinthető. A korszerű számítógépek alaplemeze – amely a nyomtatott áramköröket hordozza, PEI alapú kompozit. Tulajdonságaik a 4.29 ábrán láthatók.

#### 4.2.6 Poliszulfonok

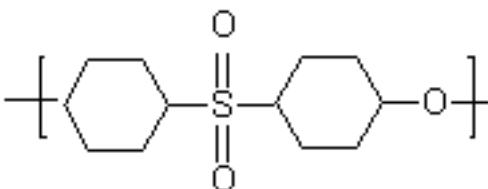
A poliszulfidok és poliszulfonok is aromás, hőálló lineáris polimerek, amelyek a főláncban *ként* is tartalmaznak.



Polifenilén szulfid, PPS



Poliszulfon, PSU



Poliarilétersulfon, PESU

A szulfidkötésben két vegyértékű kén, a szulfonkötésben hat vegyértékű kén épül a láncba. Ezekről a kitűnő műszaki polimerekről a 4.16 táblázat mutat irányértékeket a fizikai-, mechanikai-, és termikus tulajdonságok tekintetében.

A poliszulfidok és a poliszulfonok közötti legnagyobb szerkezeti különbség az, hogy a PPS (poliszulfid) nagymértékben (pl. 40 %) kristályos, míg a PSU, PESU poliszulfonok amorf szerkezetűek.

A szakító szilárdságban, a rendkívül magas hajlítómerevségben, amelyet az üvegszállal társított PPS fröccsanyagban megfigyelhetünk, ez a jelentős fokú rendezettség tükröződik. A PSU és a PESU fröccsanyagok viszont extrém hőállóságukkal tűnnek ki. (4.30 ábra)

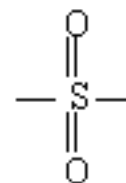
A PPS időjárásálló, lángálló, vegyszerálló, sugárálló technikai anyag. Kénhidakon keresztül térhálósítható is, így kitűnő szolgálatot tesz a modern magasépítészet üvegfelületeinek illesztésénél, tömítő-fugázásánál.

A PPS kitűnő kompozit mátrix, a vágott üvegszálak fröccsanyag szárítandó kb. 160 °C-on. Fröccsöntése magas hőmérsékleten lehetséges (340–370 °C-on), a szerszám temperálása (fűtése) 200 °C-ig is felmehet. A fröccsöntött termék hőkezelése javasolt pl. 125 °C-on, ahol átkristályosodás után kiegyenlített szilárdságnövekedést kaphatunk.

Tulajdonságok	Egység	PPS + 40 % GF	PSU	PESU
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,64	1,24	1,37
Kristályosság	%	40	0	0
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,03	0,3	0,7
Telítettségi vízfelvétel	%	..	0,8	2,1
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	180	80	90
Szakadási nyúlás	%	1,6	6	6
Húzó rug. modul.	GPa	14	2,6	2,7
Hajlító szilárdság	MPa	250	106	129
Hajlító modulusz	GPa	13	2,7	2,6
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	32	N.T.	N.T.
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	10	5	6
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	283	340	360
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	90	190	210
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	260	165	195
Tartós hő-terhelhetőség	°C	220	160	190
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,2	0,55	0,55
Szerszámzsugor	%	0,3	0,6	0,7
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>16</sup>	5·10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	4	3,1	3,5
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,002	0002	0,003
Előnyök	Nagy szilárdság, igen magas hőállóság, láng-álló, onkioltó, vegyszer-álló, kis vízfelvétel	jó szilárdság, hőállóság, láng-álló, onkioltó, β- és γ-sugárálló		
Hátrányok	Csak magas hőmérsékleten fröccsönthető, nem extrudálható, magas ár	Aromás szénhidrogénben nem ellenálló, feldolgozása nehéz		
Alkalmazások	Elektrotechnikai alkatrészek, vegyszerálló szelepház, porlasztó alkatrészek	Elektrotechnika, TV-készülék alkatrészek, hajszárító, orvostechnika: sterilizálható alkatrészek		
N.T.: nem törik				

4.30 ábra: A polifenilén-szulfid (PPS) és a poliszulfonok (PSU, PESU) tulajdonságai

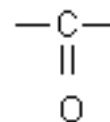
A PSU és PESU fröccsöntését is előszáritással kell kezdeni, magas fröccsöntési hőmérsékleten (400 °C) és magas szerszámhőmérsékleten (150 °C) kell lefolytatni. A PSU-ből fólia extrudálható, palackká formázható, a lemeze melegformázható, hegeszthető, ragasztható. A PESU különleges stabilitását az aromás szerkezet adja, amelyben a szén-szén kötés energiája 520 kJ/mól, szemben az



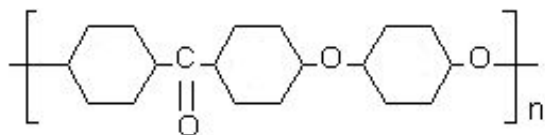
egyszerű szén-szén kapcsolatot 348 kJ/mól-os kötési energiájával. (l. 2.2 táblázat) Az csoport stabilizálja a PESU-t oxidációval szemben, az –O– éterkötés pedig a lánc *szívósságát*, a polimer ütésállóságát biztosítja.

A PESU különleges alkalmazásai között is érdekes a forró kenőanyagoknak is ellenálló jelleghez kapcsolódó, *csapágy(betét)*ként történő alkalmazás az autóiiparban. A korszerű gépkocsik egyre csökkenő szerviz-igénye ilyen és ehhez hasonló polimer-alkalmazásokon múlik.

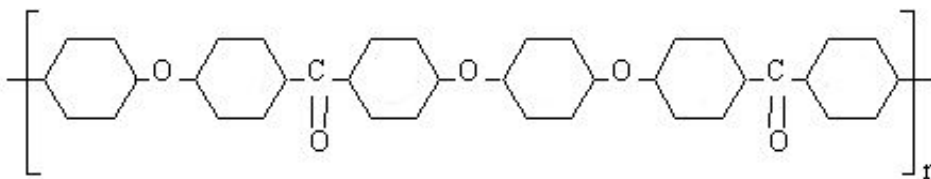
#### 4.2.7 Poliéterek, éterketonok (PEEK)



Az aromás poliéterketonok az aromás gyűrű, az éter-kötés (–O–) és a keton lánca építésének változataival az 1980-as években a „*high tech*” polimerek legkülönlegesebbjeként jelentek meg:



PEEK poli-éter-éterketon



PAEK poli-aril-

éterketon

Mindkét anyagcsoport részben kristályos.

A PPEK polimercsoport tagjainak kiváló tulajdonságai vannak (l. 4.31 ábra)

- a húzó szilárdság és hajlítószilárdság,



- az ütésállóság
- az ismételt, ciklusos igénybevétel,
- a hőállóság,
- a villamos tulajdonságok,
- a vegyszerállóság,
- a sugárállóság tekintetében.

Tulajdonságok	Egység	PEEK	PEEK + 30 % CF	PAEK
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,32	1,44	1,3
Kristályosság	%	35	35	..
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,5	0,06	0,07
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	100	230	118
Szakadási nyúlás	%	4,9	1,5	5,2
Húzó rug. modul.	GPa	3,6	13,0	4,0
Hajlító szilárdság	MPa	170	355	130
Hajlító modulusz	GPa	4,1	20,2	..
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	N.T.	42	..
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	6,5	9	5,6
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	334	334	380
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	143	143	170
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	152	315	170
Tartós hő-terhelhetőség	°C	250	240	260
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,47	0,15	0,41
Szerszámzsugor	%	0,7	0,3	1,4
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	5·10 <sup>16</sup>	1,4·10 <sup>5</sup>	10 <sup>16</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	4	..	...
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	3·10 <sup>-3</sup>	..	...
Előnyök	kiemelkedő szilárdság, különösen karbonszállal erősítve, igen magas hőtűrés, magas hőmérsékleten is mérettartó, kifáradás-álló, vegyszerálló, lángálló			
Hátrányok	Drága, fröccsöntés igen magas hőmérsékleten, (közel 400 °C-on), szerszámtemperálással (pl. 180 °C-on)			
Alkalmazások	Magas hőmérsékletű gépelemek, csapágyelemek, csapágy-koszorúk, elektrotechnikai cikkek, orvostechnika: csípőizület-protézis			

N.T.: nem törik

**4.31 ábra:** A poliéterketonok tulajdonságai

Kevés a vízfelvétele, jól társítható szálerősítéssel, kitűnő a tribológiai karaktere: hasonlít a grafitozott szinterbronz-hoz, így kiválóan alkalmas önkenő csapágyazáshoz.

Feldolgozhatósága sokoldalú: extrudálható, fröccsönthető, hőálló kábelbevonat is készül belőle az autó- és repülőgépipar számára. Fólia és szál is készíthető PEEK-ből.

Kompozit alkalmazásban ebből is készítenek előre impregnált előterméket (pre-preg), amely könnyebben feldolgozható, mint az epoxi prepregek.

Sokan a PEEK-ben látják a 20. század legsokoldalúbb, legkitűnőbb polimer szerkezeti anyagát. Rendkívül magas árfekvése is erre utal (l. 3.1 táblázat)

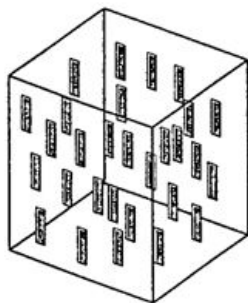
#### 4.2.8 A folyadékkristályos polimerek (LCP)

Folyadékállapotban is lehetséges (bizonyos mértékű) rendezettség. A polimerek között néhány különösen alkalmas arra, hogy viszkózus folyadékállapotban vagy megszilárdult folyadékállapotban bizonyos számú molekula határozott irányban rendezett legyen.

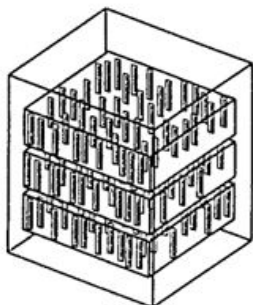
Tulajdonképp minden részlegesen kristályos polimer, amelyet pl. mechanikai orientációnak vetettünk alá (pl. nyújtott szálát készítettünk) hasonló rendezettséget mutat.

A kifejezetten folyadékkristályos polimer a rendezettség *mezomorf* (a rendezett, izomorf-hoz közeli) állapotában háromféle lehet:

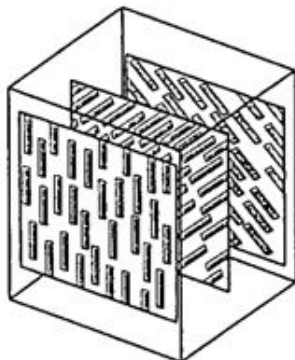
- *nematikus* (statisztikusan elosztott, de *egyirányban* rendezett molekulák)



- *szmektikus* (rétegenként megjelenő, *egyirányban* rendezett molekulák)



- *koleszterikus* (rétegenként eltérő irányban rendezett molekulák)



A folyadékkristályosodásra hajlamos molekulák *orientációja*, irányba állítása érdekében mobilizálhatjuk azokat

- a hőmérséklettel,
- oldatba vitellel,
- vagy elektromos mező alkalmazásával.

A hőmérséklettel mobilizált (*thermotrop*) folyadékkristályos lemez megjelenítheti a hőmérséklet különbségeket. Az oldatba vitellel mobilizálható (*lyotrop*) orientálás elvét alkalmazzák a nagyszilárdságú, orientált polimerszálak *gél szálképzésénél* is (KEVLAR, HOPE). Ez az eljárás különösen olyan polimereknél fontos, amelyek ömlesztési hőmérséklete meghaladja a polimerlánc bomlási hőmérsékletét.

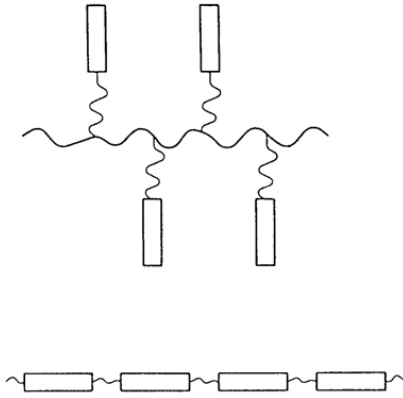
A (csekély) villamos erőtér hatására mobilizált folyadékkristályos lemez működését láthatjuk az egyszerű folyadékkristályos kijelzővel ellátott karórában, zsebszámológépben stb.

A folyadékkristályos karaktert, a *mezomorf* szerkezetet okozó, *mezogén* csoportok, amelyek rendszerint merev, aromás molekulacsoportok, elhelyezkedhetnek

- oldallánc formájában, vagy
- a főláncban.

Ezt mutatja be a 4.32 ábra.

A mai LCP polimerekben főleg aromás poliészter, poliészterkarbonát, poliészterimid vagy hasonló csoport adja a *mezogén* csoportot. Ez a merev *mezogén* és irányított molekulacsoport egészen hasonlóan viselkedik, mintha rövid *szálas erősítést* vittünk volna be a polimer mátrixba. Innen az elnevezés: *ön-erősítő poliészterek*.



**4.32 ábra:** Az LCP merev, mezogén csoportjainak elhelyezkedése [4.15] a) elágazásként (fent) vagy b) a polimer főláncon

Emellett még további, tényleges üvegszál vagy karbonszál erősítés is alkalmazható ezekben a hőre lágyuló és gyakorlatilag *teljes mértékben kristályos* (parakristályos) polimerekben. Kitűnő tulajdonságaikat a 4.33 ábra mutatja.

Tulajdonságok	Egység	LCP-V	LCP-S	LCP-Z
<b>Fizikai tulajdonságok</b>				
Sűrűség	g/cm <sup>3</sup>	1,62	1,69	1,67
Kristályosság	%	~100	~100	~100
Vízfelvétel (egyens., 50 % RH)	%	0,02	..	0,002
Telítettségi vízfelvétel	%	0,05	0,02	0,05
<b>Mechanikai tulajdonságok</b>				
Szakító szilárdság	MPa	207	111	150
Szakadási nyúlás	%	2,2	4,8	2,7
Húzó rug. modul.	GPa	16,6	12,4	21,0
Hajlító szilárdság	MPa	250	127	170
Hajlító modulusz	GPa	15	12,2	12,0
Ütőmunka 23°, hornyolatlan	kJ/m <sup>2</sup>	..	44	65
Ütőmunka 23°, hornyolt	kJ/m <sup>2</sup>	13,7	8,8	13
<b>Termikus tulajdonságok</b>				
Olvadási hőmérséklet	°C	340	360	335
Üveges átalak. hőm. (T <sub>g</sub> )	°C	..	..	120
HDT hőállóság (1,8 MPa)	°C	232	335	265
Tartós hő-terhelhetőség	°C	220	220	220
Lineáris hőtágulás T <sub>g</sub> alatt	10 <sup>-4</sup> K <sup>-1</sup>	0,4	0,6	0,4
Szerszámzsugor	%	0,4	0,3	0,5
<b>Elektromos tulajdonságok</b>				
Villamos ellenállás	Ohm·cm	10 <sup>16</sup>	10 <sup>13</sup>	10 <sup>17</sup>
Diel. állandó (50-10 MHz)	-	3,4	4,5	4,4
Diel. veszt. tény. (50-10 MHz)	-	0,014	0,018	0,020
Előnyök	Nagy szilárdság, magas modulusz, igen nagy hőállóság, tűzállóság, csekély lineáris hőtágulás, igen csekély vízfelvétel			
Hátrányok	Fröccsöntés, feldolgozás előtt szárítandó, a termék nagy mértékben anizotróp, fröccsöntés összezsugorodási hegedése gyengébb			
Alkalmazások	Elektronikai alkatrészgyártás, elektrotechnika: hőálló szigetelők, kapcsolók, kommutátorok...			

LCP-V: VECTRA (*Hoechst*) + 30 % üvegszállal

LCP-S: SUMIKA-Super (*Sumitomo*) + 40 % üvegszállal

LCP-Z: ZENITE (*Du Pont*) + 30 % üvegszállal

4.33 ábra: A folyadékkristályos polimerek

## 4.3 Szakirodalom

- Rodriguez F., *Principles of Polymer Systems*. Hemisphere Publ. Co., New York . 1989.
- Domininghaus H., *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. VDI Verlag, Düsseldorf . 1992.
- Brandrup J., Immergut E. H., *Polymer Handbook*. Wiley-Int., New York . 1974.
- Seymour R. B., *Engineering Polymer Sourcebook*. McGraw-Hill, New York . 1990.
- Gächter R., Müller H., Klemchuk P. P., *Plastics Additives Handbook*. Hanser, München . 1990.
- Munk P., *An Introduction to Macromolecular Science*. J. Wiley, New York . 1989.
- Seymour R. B., Carraher C. E., *Polymer Chemistry*. M. Dekker, New York . 1987.
- Gomez L., *Engineering with Rigid PVC: Processability and Applications*. M. Dekker, New York . 1985.
- Margolis J. M., *Engineering Thermoplastics, Properties and Applications*. M. Dekker, New York . 1985.
- Bottenbruch L., *Hochleistungs-Kunststoffe*. Hanser, München . 1994.
- Moore E., *Polypropylene Handbook*. Hanser-Gardner, Munich-Cincinnati . 1996.
- Zahradnik F., *Hochtemperatur-Thermoplaste*. VDI Verlag, Düsseldorf . 1993.
- Karger-Kocsis J., *Polypropylene*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht-Boston . 1999.
- Füzes L., Kelemen A., *Műszaki műanyagok zsebkönyve*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest . 1989.
- Trotignon J. P., Verdu J., *Matieres Plastiques*. Editions Nathan, Paris . 1996.
- Macskási L., *Műanyagok előállításának kémiai és műveleti alapjai*. Abigél Kiadó, Budapest . 1996.
- Osswald T. A., Menges G., *Materials Science of Polymers for Engineers*. Hanser-Gardner, Munich-Cincinnati . 1995.

## A POLIMEREK FELDOLGOZÁSTECHNIKÁJÁNAK REOLÓGIAI ALAPJAI

### Tartalom

#### [5.1 Képlékeny alakítás és reaktív feldolgozástechnika](#)

#### [5.2 Az ömledékreológia alapjai](#)

##### [5.2.1 Az ömledékreológia alapmodelljei](#)

##### [5.2.2 A viszkozitást befolyásoló tényezők](#)

#### [5.3 Polimer ömledékek áramlása](#)

##### [5.3.1 Newton féle ömledék áramlása](#)

##### [5.3.2 Hatványtörvényt követő közeg áramlása](#)

##### [5.3.3 Bingham féle közeg áramlása kapillárisban](#)

#### [5.4 Reális polimer ömledékek viselkedése](#)

##### [5.4.1. A folyásgörbe felvétele](#)

##### [5.4.2 A rugalmas tulajdonságok hatása](#)

#### [5.5 Szakirodalom](#)

A *reológia* az anyagok deformációját leíró tudomány. Deformáción a testek alakjának, vagy más szóval szimetriaviszonyainak megváltozását értjük. A meghatározásból láthatóan a reológia tárgyát képezi a szilárd és a folyékony halmazállapotú anyagok deformációjának tanulmányozása is (sőt, bizonyos értelemben még a gázok áramlása is). A reológiát gyakran csoportosítják a vizsgált anyagok szerint: így beszélhetünk a kenőanyagok reológiájáról, szuszpenziók reológiájáról, vagy bioreológiáról. Mi a következőkben a *polimer ömledékek* reológiájával fogunk foglalkozni.

A polimer ömledékek reológiáját érdemes az *áramlástan (fluid mechanics)* tudományával kapcsolni, amely a 20. században óriási eredményeket ért el, főleg a nagysebességű közlekedési eszközök kifejlesztésében. Mint ahogyan azt a következőkben látni fogjuk, nemcsak a folyadékok és gázok áramlási jelenségei függenek igen nagymértékben az alakváltozás sebességétől. A polimerek folyadékmechanikája talán egy fokkal még összetettebb, makromolekuláris karakterük miatt. Könnyen belátható, hogy az óriásmolekulás polimerek, a bonyolult módon és sokféle, eltérő

elemből felépített, ellentmondásos jellemű *viszko-elasztikus* anyagok *áramlástanának*, reológiájának ismerete milyen kiemelt jelentőségű a polimertechnika szempontjából.

### **5.1 Képlékeny alakítás és reaktív feldolgozástechnika**

Mind a hőre lágyuló, mind a hőre nem lágyuló műanyagok feldolgozástechnológiai folyamatának van olyan, az alakadást megelőző fázisa, amikor az anyag folyékony halmazállapotú. Ez teszi lehetővé, hogy az alakadás viszonylag kis erők hatására is megfelelő módon végbemenjen. Adott esetben, pl. öntés, ehhez elegendő a nehézségi erő is.

A hőre lágyuló műanyagok feldolgozásánál alapvetően csak fizikai folyamatról (olvadás – megszilárdulás) beszélhetünk. Itt a kiindulási alapanyag kémiai összetételét tekintve ugyanaz, mint ami a késztermék (pl. PE; PP; PS; PA...). Kémiai folyamat csak a nemkívánatos degradáció, beégés esetén lép fel. A feldolgozási ciklusok ennek megfelelően viszonylag rövidek, melléktermék – elvileg – nem keletkezik, a gyártási hulladék újra feldolgozható.

Ezzel szemben a térhálós szerkezetű polimerek feldolgozása során kémiai reakció is lejátszódik, ezért ezeket reaktív technikáknak is nevezik. Ilyenkor a kiindulási anyag lehet monomer, előpolimer (oligomer), vagy a polimerképződéshez szükséges komponensek keveréke. Ebből az alapanyagból aztán az alakadó szerszámban kémiailag teljesen más, új anyag keletkezik. Ezek a kémiai reakciók időigényesek, nem ritkán melléktermék keletkezésével is járnak, és a hulladék kezelése is problematikus.

### **5.2 Az ömledékreológia alapjai**

A polimerek feldolgozási eljárásai során az anyagot általában ömledék állapotban deformálják (alakítják), ezért az ömledékreológiai alapok ismerete a feldolgozás szempontjából nélkülözhetetlen.

Tágra értelmezve a reológia a testek deformációs mechanizmusával foglalkozó tudomány. Amíg szilárd anyagok (főleg fémek) esetén a reológia elsősorban az igénybevétel (erő, feszültség) és a deformáció (nyúlás) kapcsolatát vizsgálja, addig folyadékok esetén a feszültség-deformációsebesség kapcsolatot elemzi. Ezen széles tudományterület egyik része a polimer ömledékek reológiája, mely a folyadékok reológiájához áll közelebb, de a polimer ömledékek viszkoelasztikus viselkedése (szegmensmozgás) miatt bizonyos, a szilárd anyagokra jellemző jelenségekkel (rugalmas, illetve késleltetetten rugalmas deformáció) is foglalkozik.

Az ömledékreológia alapjellemezői:

- *Erők*

A komprimáló erők az ömledék térfogatát csökkentik. Mivel a polimer ömledék bizonyos mértékben (kompresszibilitás kb.  $10^{-4}$  /bar) összenyomható, a nemkívánatos zsugorodás elkerülésére néha igen jelentős komprimáló erőket kell alkalmazni.

A nyomó erőknek az ömledék áramlásának biztosításában és az alakadásban van jelentős szerepük.

A nyíró erők az ömledék áramlásakor a csatorna falánál ill. az ömledéken belül is igen jelentősek.

- *Deformációk*

Az alakadási (feldolgozási) folyamat során viszkózus- és rugalmas deformáció, ill. térfogatváltozás lép fel, ami még utódeformációval is kiegészülhet.

Molekuláris szintű deformációt okozhat a kristályosodási – ill. orientációs rendeződés.

- *Időtartam*

Mivel a viszkózus deformáció nem pillanatszerűen zajlik le, az áramlás, a szerszámüreg kitöltése bizonyos időt igényel.

A terhelés hatására az ömledékben kialakult rugalmas deformáció az idő (exponenciális) függvényében alakul át viszkózus deformációvá, folyássá.

Az alakrögzítés hűtéssel vagy kémiai reakcióval történik, ami szintén bizonyos időt igényel.

A polimer – nem kívánatos – termikus bomlása a hőterheléstől függ, amit a hőmérséklet nagysága és időtartama határoz meg.

- *Hőmérséklet*

Az anyag hőmérséklete meghatározza annak fizikai állapotát (üvegszerű... viszkózusan folyó), ezáltal alapvetően befolyásolja feldolgozhatóságát. (forgácsolás – melegalakítás – képlékeny alakítás)

A polimer ömledék viszkozitása a hőmérséklet növelésével – bizonyos határok között – exponenciálisan csökken.

A kémiai reakciók sebessége a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan növekszik.

Az orientációra a hőmérséklet komplex módon hat, attól függően, hogy az orientációt fokozó nyíró igénybevételt, vagy a dezorientációt elősegítő makro Brown mozgást növeli jobban. Nyugvó rendszerben minden esetre a hőmérséklet növelése csökkenti az ömledék orientációját.

A hőmérsékletváltozás – hűtés – sebessége nagy mértékben befolyásolja a polimer termék finomszerkezetét, ezáltal annak tulajdonságait.

A hőmérséklet növekedésével nő a zsugorodás ill. az utózsugorodás mértéke.



A következőkben – a teljesség igénye nélkül – ismertetjük az ömledékreológia legfontosabb alapösszefüggéseit. Arra törekszünk, hogy a feldolgozástechnológia számára használható eredményeket mutassunk be. Már most jelezzük, hogy – e területen – minél egyszerűbb egy összefüggés, az annál inkább csak minőségileg közelíti a valóságot.

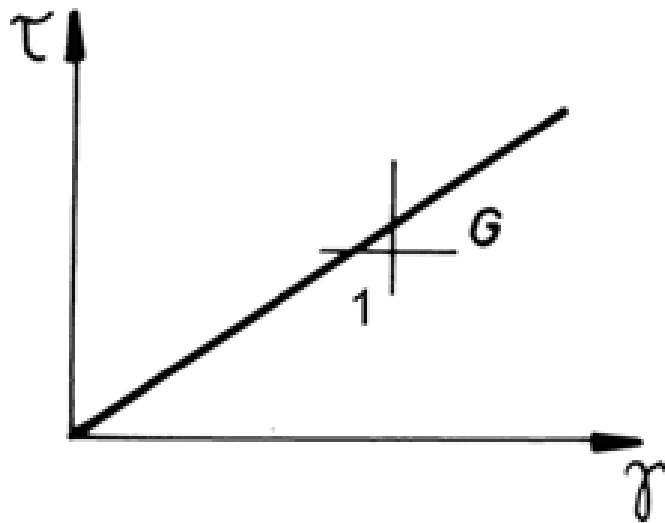
### 5.2.1 Az ömledékreológia alapmodelljei

Ahogy sok más tudományterület, az ömledékreológia is él a modellezés lehetőségeivel. Különböző, matematikailag jól megfogalmazott ideális modellekkel próbáljuk leírni a reális (valós) ömledékek viselkedését. Tekintettel arra, hogy a feldolgozás során a *nyírás* a legjellegzetesebb igénybevétel, megfontolásainkat erre korlátozzuk.

#### 5.2.1.1 Hooke modell

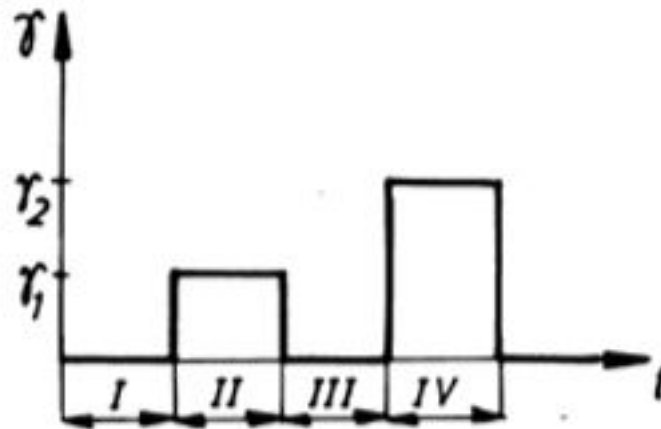
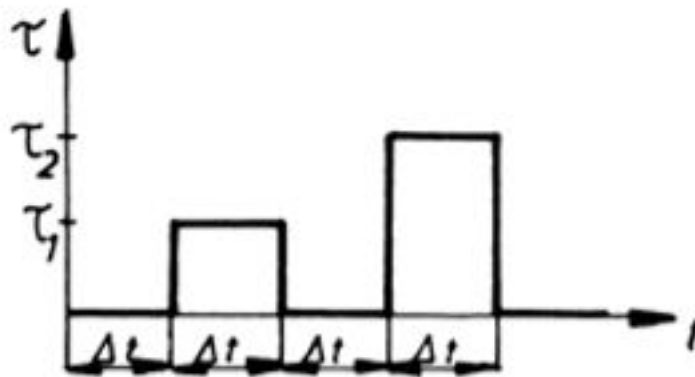
A jól ismert modell az ideálisan rugalmas viselkedést írja le, miszerint az anyagban ébredt  $\tau$  feszültség annak  $\gamma$  deformációjával arányos, arányossági tényező a  $G$  nyíró rugalmassági modulus (5.1 ábra).

$$\tau = G \cdot \gamma$$



5.1 ábra: A Hooke modell feszültség-deformáció kapcsolata

Ez a fajta viselkedés a polimer ömledékekre csak kis mértékben jellemző, de bizonyos esetekben nem hagyható figyelmen kívül. Az igénybevétel – deformáció – időtartam kapcsolat elemzésében válasszuk az alábbi modellt:  $\tau = \tau_1 =$  állandó igénybevétel  $\Delta t$  ideig (II. tartomány),  $\tau = 0$  igénybevétel (tehermentes állapot)  $\Delta t$  ideig (I és III. tartomány),  $\tau = 2 \tau_1 = \tau_2$  igénybevétel  $\Delta t$  ideig (IV. tartomány), és vizsgáljuk az anyag  $\gamma$  deformációját (5.2 ábra)



5.2 ábra: A Hooke modell feszültség-deformáció-idő kapcsolata

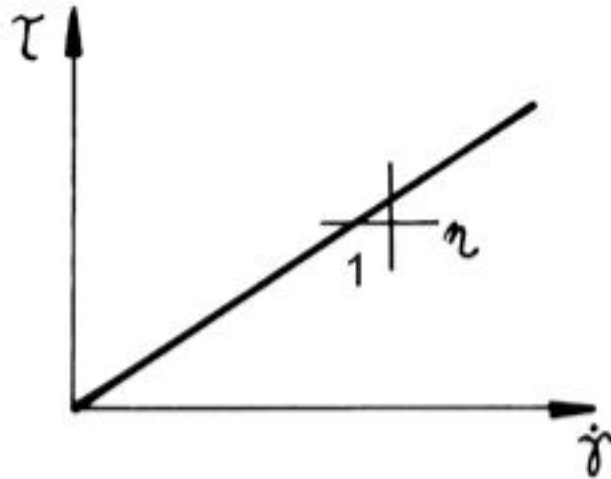
Az (5.1) összefüggés alapján a  $\gamma$  deformációk értékei:

$$\gamma_{II} = \frac{\tau_1}{G} \text{ ill. } \gamma_{IV} = \frac{\tau_2}{G} = \frac{2\tau_1}{G} = 2\gamma_{II}$$

### 5.2.1.2 Newton modell

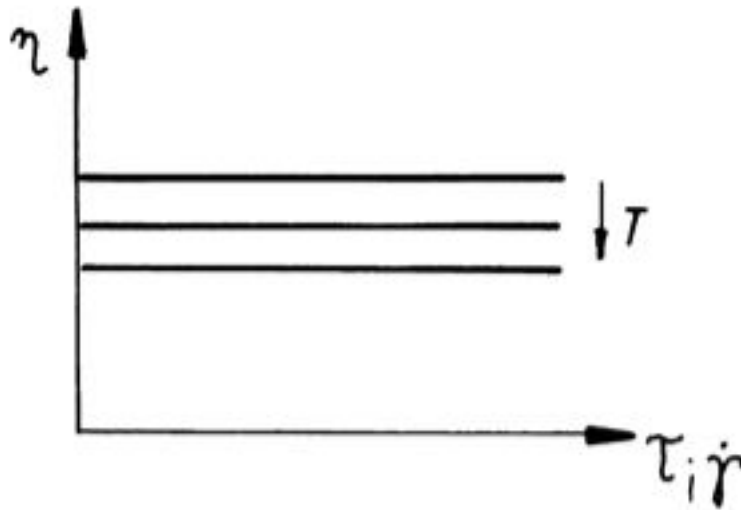
Ez a reális folyadékok viselkedésének leírására is használatos modell az ömledékreológia alapmodellje. Az ideálisan képlékeny anyagban ébredt  $\tau$  feszültség a  $\dot{\gamma}$  deformáció sebességgel arányos, arányossági tényező az  $\eta$  newtoni viszkozitási tényező (5.3 ábra).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$



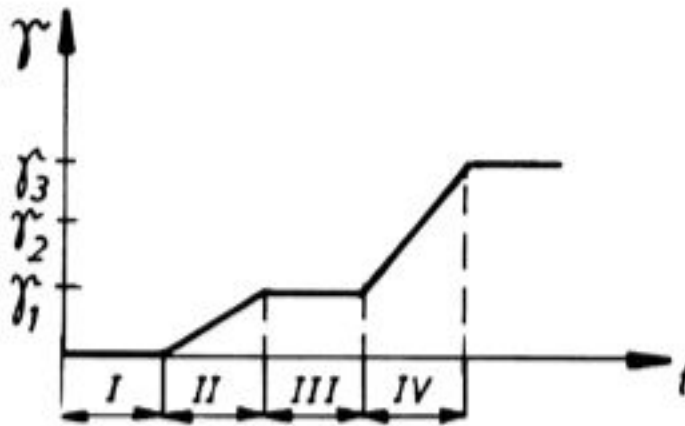
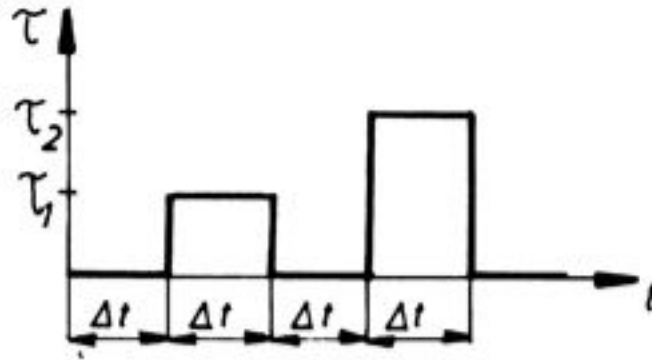
**5.3 ábra:** A Newton modell feszültség-deformációsebesség kapcsolata

Ennek alapján a newtoni közeg viszkozitása független az igénybevételtől ( $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$ ), csak a hőmérséklettől függ (5.4 ábra)



**5.4 ábra:** A newtoni viszkozitási tényező igénybevétel-hőmérséklet függése

Az 5.2 ábrán látható különböző szintű, időben állandó  $\tau$  igénybevétel esetén a newtoni közeg  $\gamma$  deformációja az 5.5 ábrán látható módon alakul.



5.5 ábra: A Newton modell feszültség-deformáció-időtartam kapcsolata

Az (5.3) összefüggés alapján a  $\gamma$  deformációk értékei:

$$\gamma_{II} = \frac{\tau_1}{\eta} \Delta t ; \gamma_{IV} = \frac{2\tau_1}{\eta} \Delta t = 2\gamma_{II}$$

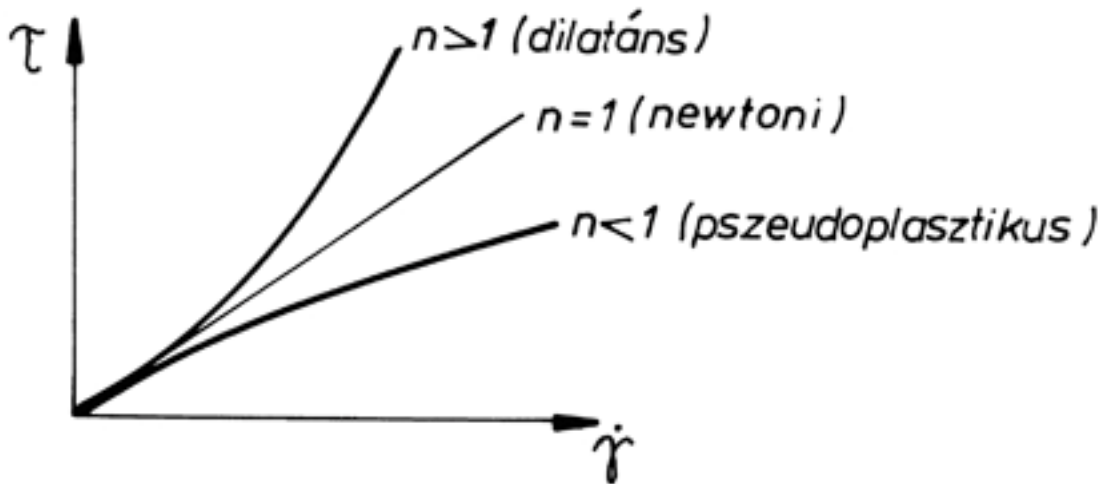
A viszkozitási tényező a polimer ömledék legfontosabb feldolgozástechnológiai jellemzője. Ha ismerjük nagyságát az adott technológiai körülmények ( $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $T$ ,  $p$ ) között, szinte minden fontos számítást eredményesen tudunk elvégezni. Sajnos, amíg a kis molekulájú anyagok közül pl. a víz, sok oldószer vagy a kőolaj követi a newtoni viselkedést, addig a polimerek közül csak a *nagyon híg polimer oldatok* viselkednek newtoni módon, a polimer ömledékek a feldolgozási tartományban gyakorlatilag *nem!*

### 5.2.1.3 Ostwald-de Waele modell

A polimer ömledékek viselkedését már jobban közelítő ún. hatványtörvényt követő anyagok esetén az ömledékben ébredt  $\tau$  feszültség a  $\dot{\gamma}$  deformációsebesség valamilyen  $n > 0$  hatványával arányos:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n$$

A legtöbb polimer ömledék esetén  $n < 1$ , azaz az ömledék viszkozitása – állandó hőmérsékleten – az igénybevétel ( $\tau, \dot{\gamma}$ ) növekedésével csökken. Ezt a fajta viselkedést **pszeudoplasztikusnak** nevezik (az anyag nyírásra „vékonyodik”). Bizonyos, ritkábban előforduló esetekben (pl. erősen töltött polimer rendszerek esetén) ezzel ellentétes viselkedést tapasztalhatunk: Az igénybevétel ( $\tau, \dot{\gamma}$ ) növekedésével a viszkozitás is növekszik. Az ilyen, nyírásra „vastagodó” viselkedést *dilatánsnak* nevezik. (5.6. ábra)



**5.6 ábra:** A hatványtörvényt követő ömledék feszültség-deformációsebesség kapcsolata

A későbbiek során csak a sokkal nagyobb gyakorlati jelentőséggel bíró  $n < 1$

A pszeudoplasztikus viselkedést mutató polimer ömledékeknél kétfajta viszkozitási tényezőt különböztethetünk meg (5.7 ábra).

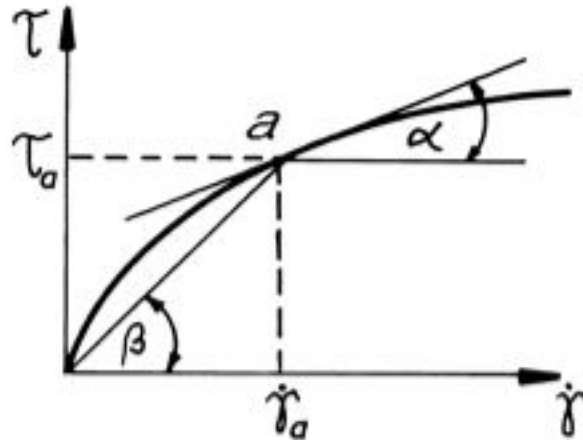
Egy tetszőleges  $a$  pontra:

$$\eta_D = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \operatorname{tg} \alpha$$

- Dinamikai viszkozitási tényező:

$$\eta_a = \frac{\tau_a}{\dot{\gamma}_a} = \operatorname{tg} \beta$$

- Látszólagos viszkozitási tényező:



5.7 ábra: A dinamikai és a látszólagos viszkozitási tényező értelmezése

A két viszkozitási tényező közti kapcsolat:

$$\eta_D = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} = \frac{d(K\dot{\gamma}^n)}{d\dot{\gamma}} = nK\dot{\gamma}^{n-1} = nK\frac{\dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = n\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = n\eta_a$$

A gyakorlatban az  $\eta_a$  látszólagos viszkozitási tényezővel jellemzik az anyagokat. Amíg a víznél ez az érték kb. 0,001 Pa·s, az öntőgyantáknál, ahol még a nehézségi erő is elegendő az alakításhoz, kb. 1–10 Pa·s, a polimer ömledékek – anyagtól erősen függő – viszkozitása a gyakorlati feldolgozási tartományban 1000 – 100 000 Pa·s. Ez annyit is jelent, hogy az ilyen nagy viszkozitású, nehezen folyó anyagok (ömledékek) alakításához igen nagy erőkre van szükség.

A pszeudoplasztikus anyag deformációja az 5.2, ill. 5.5 ábrán már megismert igénybevétel esetén (5.8 ábra) a deformáció növekmények:

$$\gamma_{II} = \frac{\tau_1}{\eta_{II}} \Delta t; \quad \gamma_{IV} = \frac{2\tau_1}{\eta_{IV}} \Delta t$$

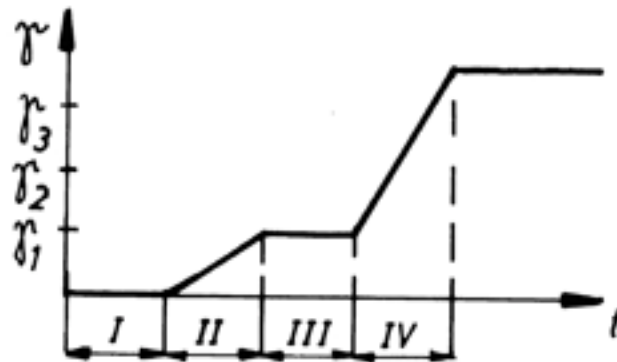
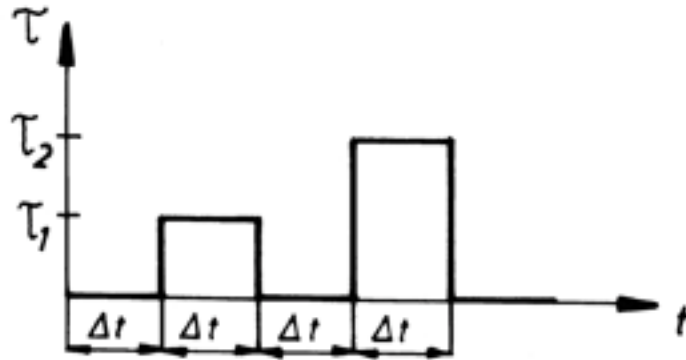
mielvel  $\eta_{IV} < \eta_{II}$ , ezért  $\gamma_{IV} > \gamma_{II}$

ahol  $\eta_{II}$  és  $\eta_{IV}$  a II. és IV. tartományban érvényes, a  $\tau_1$ , ill.  $\tau_2$  nyírófeszültségekhez tartozó látszólagos viszkozitási tényezők.

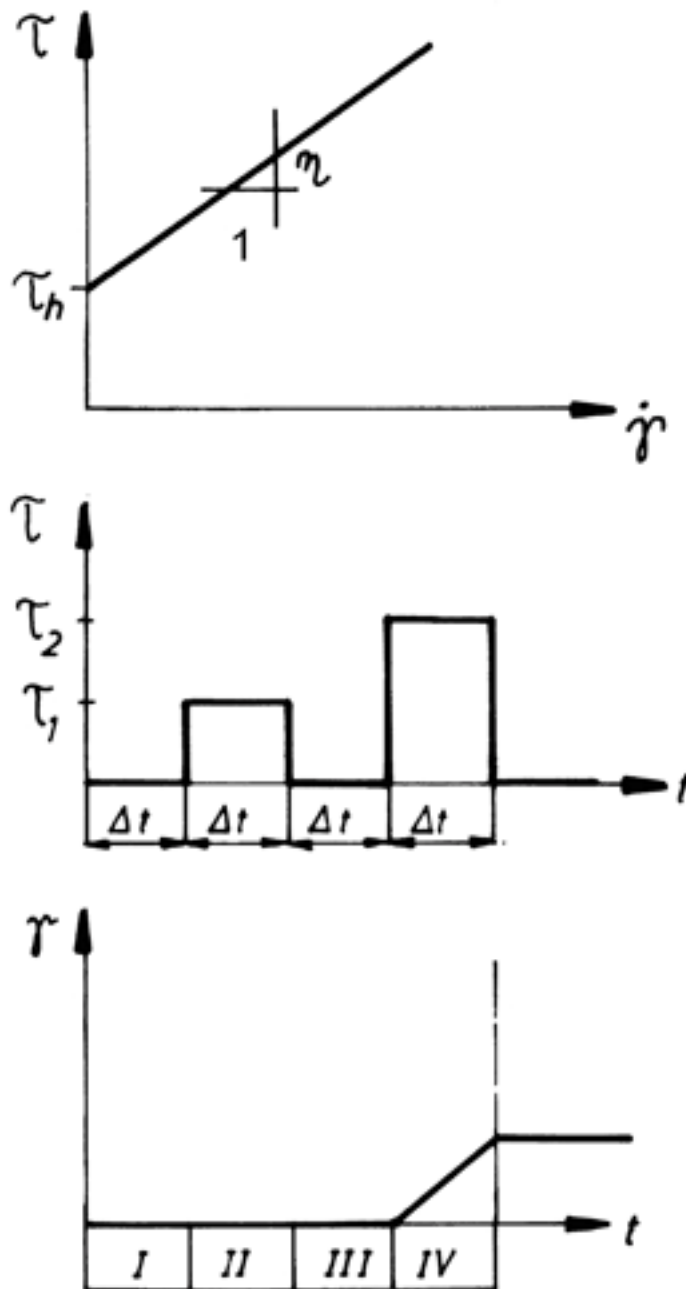
### 5.2.1.4 Bingham modell

A polimer ömledékek képlékeny alakításában nem elhanyagolható a Bingham féle viselkedés, mely szerint áramlás csak egy  $\tau_h$  határfeszültség felett jön létre, afelett viszont a newtoni viselkedés

a jellemző (5.9 ábra) ( $\dot{\gamma}^* > 0$ ):



5.8 ábra: A pszeudoplasztikus anyag feszültség-deformáció-időtartam kapcsolata



5.9 ábra: A Bingham modell viselkedésének jellegzetessége

$$\tau = \tau_h + \eta \dot{\gamma}$$

A Bingham féle közeg deformációja az 5.2 és 5.8 ábrán már megismert igénybevétel esetén a deformáció növekmények:



$$\tau_1 < \tau_R; \tau_2 > \tau_R$$

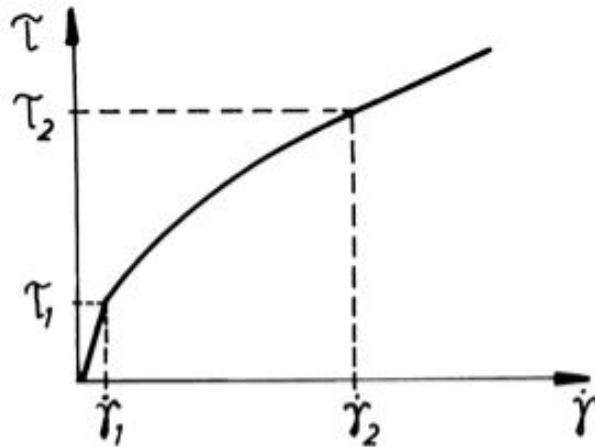
$$\gamma_{II} = 0, \quad \gamma_{IV} = \frac{\tau_2 - \tau_R}{\eta} \Delta t$$

### 5.2.1.5 Szerkezeti – vagy struktúrvizkózus ömledék

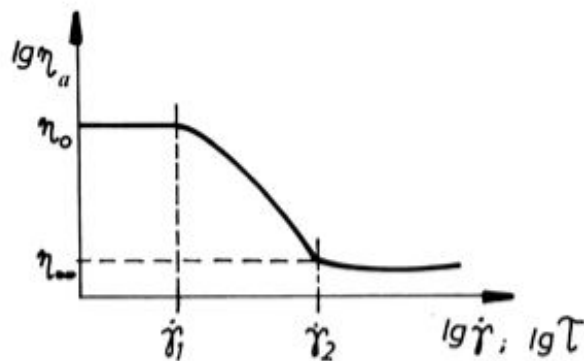
Mai ismereteink szerint azt mondjuk, hogy a *reális* (valós) polimer ömledék *struktúrvizkózusan* viselkedik. Ennek az a sajátossága, hogy az ömledék (extrém) kis ill. (extrém) nagy igénybevételek tartományában newtoni jelleget mutat, a kettő között, a feldolgozási technológiák tartományában

pedig a hatványtörvényt követi (5.10 ábra). Az (5.10) ábrán látható  $\tau - \dot{\gamma}$  függvényt

**folyásgörbének**, a belőle megszerkeszthető  $\eta = f(\tau, \dot{\gamma})$  függvényt pedig **viszkozitásgörbének** (5.11 ábra) nevezzük.



5.10 ábra: A struktúrvizkózus ömledék folyásgörbéje



5.11 ábra: A struktúrvizkózus ömledék viszkozitásgörbéje

A logaritmusos lépték használata azért célszerű, mert mind az  $\eta$ , mind a  $\dot{\gamma}$  tartománya igen széles. Így pl. a  $\dot{\gamma}$  tartományai a legtipikusabb feldolgozási technológiáknál (ld. később, 9.1 táblázat):

- Sajtolás  $\dot{\gamma} \sim 10^1$  [sec<sup>-1</sup>]
- Kalanderezés  $\dot{\gamma} \sim 10^2$  [sec<sup>-1</sup>]
- Extrudálás  $\dot{\gamma} \sim 10^3 - 10^4$  [sec<sup>-1</sup>]
- Fröccsöntés  $\dot{\gamma} \sim 10^4 - 10^6$  [sec<sup>-1</sup>]
- Szálhúzás  $\dot{\gamma} > 10^6$  [sec<sup>-1</sup>]

Amint azt a struktúr vagy szerkezeti viszkozus elnevezés is mutatja, az 5.10, ill. 5.11 ábrán látható viselkedésformát az ömledék szerkezetének (struktúrájának) változásával magyarázzuk. Az ún. fluktuációs háló elmélet szerint az amorf fázisú polimer ömledékekben nyugalmi állapotban a szekunder erők laza „halmazokat”, keresztkötések hoznak létre. Ezek az időben fluktuáló „háló” csomópontok a kis igénybevétel ( $\tau < \tau_1$ ) tartományában még nem szakadnak fel, az ömledék newtoni jellegű. Az igénybevétel növekedésével ( $\tau_1 < \tau < \tau_2$ ) egyre nő az ömledék nyírása, a háló tömegközéppontja elmozdul, csomópontjai fokozatosan megszűnnek (elnyíródnak), így csökken a viszkozitás („vékonyodik” az ömledék). Egy bizonyos, ( $\tau > \tau_2$ ) igénybevétel felett már minden csomópont felszakad, nem tud a viszkozitás tovább csökkenni, az ömledék ismét newtoni jellegű lesz.

Az 5.11 ábrán látható viszkozitásgörbe matematikai leírását viszkozitásfüggvénynek nevezzük, melyre számos kutató állított fel különböző összefüggést. Első közelítésben nézzük az  $\eta_a$  látszólagos viszkozitási tényező  $\dot{\gamma}$ -tól, illetve  $\tau$ -tól való függését.

Az  $\eta_a$  definíció szerint:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Az (5.3) és (5.5) összefüggés alapján a nulla igénybevételi tartományra írhatjuk:

$$\tau_0 = \eta_0 \dot{\gamma}_0 \text{ ill. } \tau_0 = K \dot{\gamma}_0^n$$

$$\text{amelyből } \eta_0 \dot{\gamma}_0 = K \dot{\gamma}_0^n \quad \text{ill.} \quad K = \frac{\eta_0}{\dot{\gamma}_0^{n-1}}$$

Az (5.11) összefüggésbe behelyettesítve (5.5)-t, kapjuk:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{K \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = K \dot{\gamma}^{n-1}$$

Végül a  $K$  helyére beírva annak (5.13) szerinti alakját a végeredmény:

$$\eta_a = \eta_0 \left| \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right|^{n-1}$$

amely az  $\eta_a$  látszólagos viszkozitási tényező  $\dot{\gamma}$  nyírsebességtől való függését írja le ( $\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_0$ -ra).

Az  $\eta_a$   $\tau$  nyírófeszültségtől való függésének leírásához (5.12) összefüggésből fejezzük ki  $\dot{\gamma}_0$ -t:

$$\dot{\gamma}_0 = \frac{\tau_0}{\eta_0} \quad \text{ill.} \quad \dot{\gamma}_0 = \frac{\tau_0^n}{K^n}$$

Ebből:

$$\frac{\tau_0}{\eta_0} = \frac{\tau_0^n}{K^n}$$

melyből:

$$K^n = \eta_0 \frac{\tau_0^n}{\tau_0} = \frac{\eta_0}{\tau_0^{n-1}}$$

Ha az  $\eta_a$ -t definiáló (5.11) egyenletbe az (5.5) összefüggésből  $\dot{\gamma}$ -ot behelyettesítjük, írhatjuk:

$$\eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \tau = K \dot{\gamma}^n \quad \text{amelyből} \quad \dot{\gamma} = \frac{\tau^{\frac{1}{n}}}{K^{\frac{1}{n}}}$$

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{\tau^{\frac{1}{n}}}{K^{\frac{1}{n}}}} = K^{\frac{1}{n}} \tau^{\frac{n-1}{n}}$$

Ha  $K^{1/n}$  helyére beírjuk annak (5.18) szerinti alakját, kapjuk a végeredményt  $\tau \geq \tau_0$ -ra:

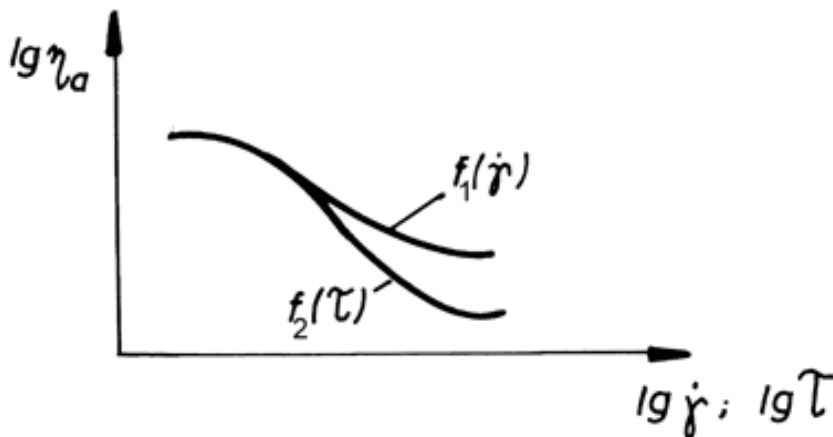
$$\eta_a = \eta_0 \left| \frac{\tau}{\tau_0} \right|^{\frac{n-1}{n}}$$

mely az  $\eta_a$  látszólagos viszkozitási tényező  $\tau$  nyírósebességtől való függését mutatja.

Az (5.15) és (5.19) összefüggésből látható, hogy nem mindegy, hogy az  $\eta_a$ -t a  $\tau$  vagy a  $\dot{\gamma}$  (igénybevétel) függvényében vizsgálom. Ezt a jelleget szemlélteti az 5.12 ábra.

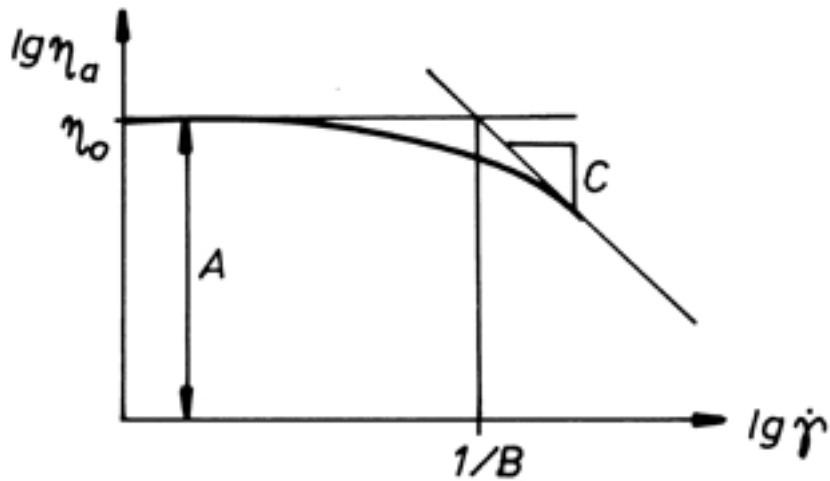
A gyakorlatban széles körben használják a *Carreau egyenletet*, melynek a korábbiakhoz hasonló alakja:

$$\eta_a(\dot{\gamma}) = \frac{A}{(1 + B\dot{\gamma})^C}$$



**5.12 ábra:** A látszólagos viszkozitási tényező függése a deformációsebességtől ill. a nyírófeszültségtől, ahol az 5.13 ábrának megfelelően:  $A$ : nullviszkozitás [Pa·s]  $B$ : reciprok átmeneti nyírósebesség [s]  $C$ : a viszkozitásgörbe esése a struktúrvizkozus tartományban

$$\left( c = -\frac{d \lg(\eta_a)}{d \lg \dot{\gamma}} \right)$$



**5.13 ábra:** A Carreau egyenlet konstansainak értelmezése

Formailag hasonló Vinogradov és Malkin univerzális viszkozitásfüggvénye (5.14 ábra), mely szerint:

$$\eta_a(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_0}{1 + A_1 \left( \frac{\dot{\gamma}}{\eta_0} \right)^\alpha + A_2 \eta \left( \frac{\dot{\gamma}}{\eta_0} \right)^{2\alpha}}$$

ahol  $\eta_0$ : nullviszkozitás [Pa·s]

$A_1$ :  $6,12 \cdot 10^{-3}$

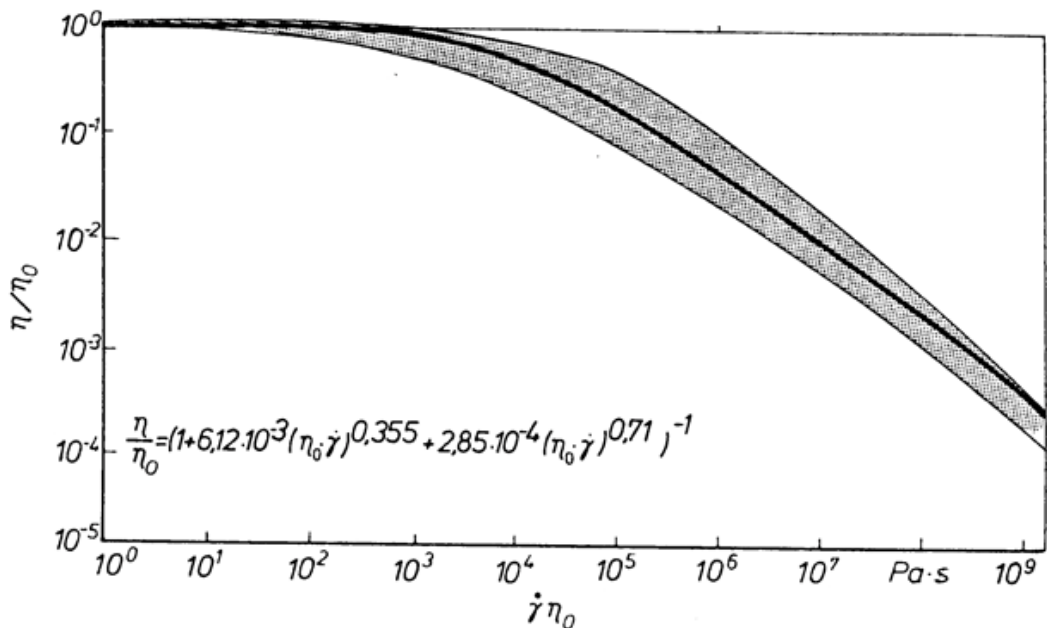
$A_2$ :  $2,85 \cdot 10^{-4}$

$\alpha$ : 0,355

ha

$[\eta]$  Pa·s

$[\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$



5.14 ábra: A Vinogradov-Malkin féle univerzális viszkozitásgörbe

Az 5.15 ábrán bemutatunk néhány ismertebb viszkozitásfüggvényt. Meg kell jegyeznünk, hogy a háromnál több paraméterrel rendelkező egyenletek használata ma még elég szűkörű.

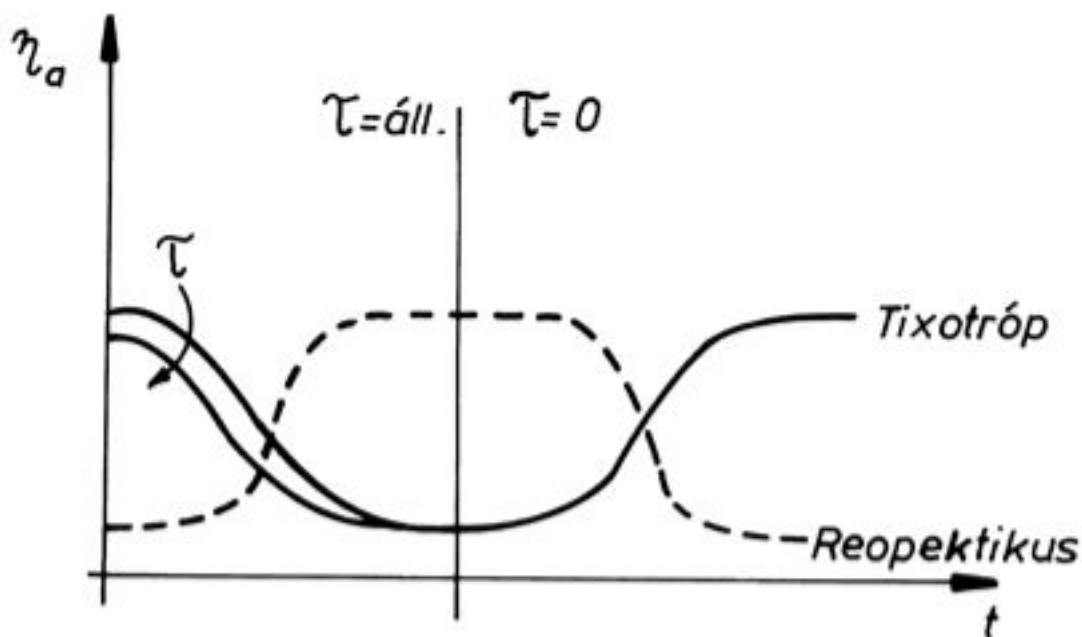
### 5.2.1.6 Időtől függő viszkozítású anyagok

Az eddigiekben tárgyalt esetekben az ömledék viszkozitása csak az igénybevétel ( $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$ ) pillanatnyi állapotától (nagyságától) függött. Bizonyos esetekben azt tapasztaljuk, hogy állandó nyíró igénybevétel esetén az anyag viszkozitása az idő függvényében változik, majd az igénybevétel megszűnte után visszaáll az eredeti értékre. Azt a fajta viselkedést, amikor az idő függvényében csökken a viszkozitás, **tixotrópiának** nevezzük. Ez lehet jellemző bizonyos polimer ömledékekre, de ilyen pl. a vaj, a tejföl vagy a legtöbb festék. Amikor pl. festünk, a keverés, ill. az „ecsetelés” által létrehozott nyíró igénybevétel hatására csökken (leesik) a festék (polimer oldat) viszkozitása, a festék szétterül, elfolyik a festendő felületen. Amikor az „ecsetelést” abbahagyom, megszűnik a nyíró igénybevétel, a festék viszkozitása megnő, nem folyik le a függőleges felületről. Ez a viselkedés a többkomponensű kolloid diszperz rendszerekre jellemző, ahol a részecskék és az őket körülvevő folyékony közeg (szolvátburok) között működő adhéziós erők hatására szol-gél-szol átmenetek jönnek létre.

A tixotróppal ellentétes viselkedést, amikor is az idő függvényében nő a viszkozitás, **reopektikusnak** nevezzük (5.15 ábra). Ez nem jellemző a polimer ömledékekre.

Egyenlet	Jellemző paraméterek	Viszkozitásra	Nyírósebességre
		kifejezett alak	
Hatványtörvény	$\eta_0, n$	$\eta = \eta_0 \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{n-1} = \eta_0 \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0} \left( \frac{\tau}{\eta_0 \dot{\gamma}_0} \right)^{\frac{1}{n}}$
Általános viszkozitás-egyenlet	$\eta_0$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + 6,12 \cdot 10^{-3} \left( \dot{\gamma} \eta_0 \right)^{0,355} + 2,33 \cdot 10^{-4} \left( \dot{\gamma} \eta_0 \right)^{0,71}$	$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_0} \tau + 5 \cdot 10^{-3} \tau \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{0,34} + 5,75 \cdot 10^{-4} \tau \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{0,68} + 8,8 \cdot 10^{-13} \tau \left( \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{2,38}$
Ferry-egyenlet	$\eta_0, k$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + k \tau$	$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_0} (\tau + k \tau^2)$
De Haven egyenlet	$\eta_0, k$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + k \tau^2$	$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_0} (\tau + k \tau^3)$
Prandtl-Eyring egyenlet	$\eta_0, k$	$\frac{\eta_0}{\eta} = \frac{k \dot{\gamma}}{\text{arsh}(k \dot{\gamma})}$	$\dot{\gamma} = \frac{\text{sh}(k \tau)}{\eta_0 k \tau^2}$
Spencer-Dillon egyenlet	$\eta_0, k$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + \frac{5k\tau}{4} + \frac{3k^2\tau^2}{4} + \frac{7k^3\tau^3}{24} + \frac{k^4\tau^4}{12}$	$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_0} \left( \tau + \frac{5k\tau^2}{4} + \frac{3k^2\tau^3}{4} + \frac{7k^3\tau^4}{24} + \frac{k^4\tau^5}{12} \right)$
Carreau egyenlet	$A, B, C$	$\eta = \frac{A}{\left( 1 + B \dot{\gamma} \right)^C}$	
Ellis-egyenlet	$\eta_0, k, n$	$\frac{\eta_0}{\eta} = 1 + k \tau^n$	$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_0} (\tau + k \tau^{n+1})$
Vinogradov-Malkin egyenlet	$\eta_0, A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + A_1 (\eta_0 \dot{\gamma})^{\alpha_1} + A_2 (\eta_0 \dot{\gamma})^{2\alpha_2}}$	
Cross-egyenlet	$\eta_0, \eta_\infty, k$	$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = 1 + k \dot{\gamma}^{\frac{2}{3}}$	
Williamson-egyenlet	$\eta_0, \eta_\infty, k$	$\frac{\eta_0 - \eta}{\eta - \eta_\infty} = k \dot{\gamma}$	

5.15 ábra: Néhány fontosabb viszkozitásegyenlet



5.16 ábra: A tixotróp, ill. a reopektikus viselkedés jellege

## 5.2.2 A viszkozitást befolyásoló tényezők

Amint azt az előző (5.2.1) fejezetben már láttuk, a polimer ömledékek viszkozitása nem független az igénybevételtől, hanem annak növekedésével csökken. A viszkozitást még egyéb paraméterek is, jóllehet eltérő mértékben, de befolyásolják. Ezek közül messze a legfontosabb a hőmérséklet hatása, de nem hanyagolható el a nyomás és az átlagos molekulatömeg sem.

### 5.2.2.1 A viszkozitás hőmérsékletfüggése

A hétköznapi életünk során gyakran tapasztalhatjuk, hogy az anyagok viszkozitása a hőmérséklet növekedésével csökken. Gondoljunk csak a nyári napsütésben megolvadó aszfaltra, csokoládéra, vagy a téli hidegben beálló sebességváltóra. A polimer ömledékek viszkozitása hőmérsékletfüggésének leírására két összefüggés használatos. *Részben kristályos* polimerekre az **Arrhenius** (ld. 2.2.3 fejezet), *amorf* polimerekre pedig a **WLF** egyenlet használata az előnyösebb, amit a jelen fejezetben fejtünk ki.

Az Arrhenius egyenlet ide vonatkozó alakja:

$$\eta(T) = A e^{\frac{E}{RT}}$$

ahol  $A$ : anyagállandó [Pa·s]

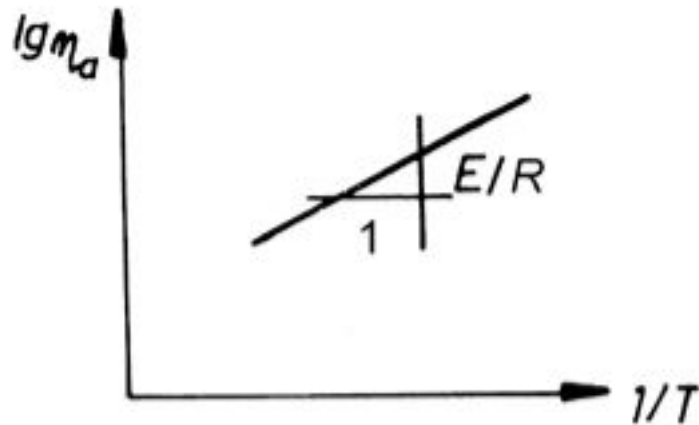
$E$ : aktiválási energia [J/mol]



$R$ : egyetemes gázállandó (8,314 [J/mol·K])

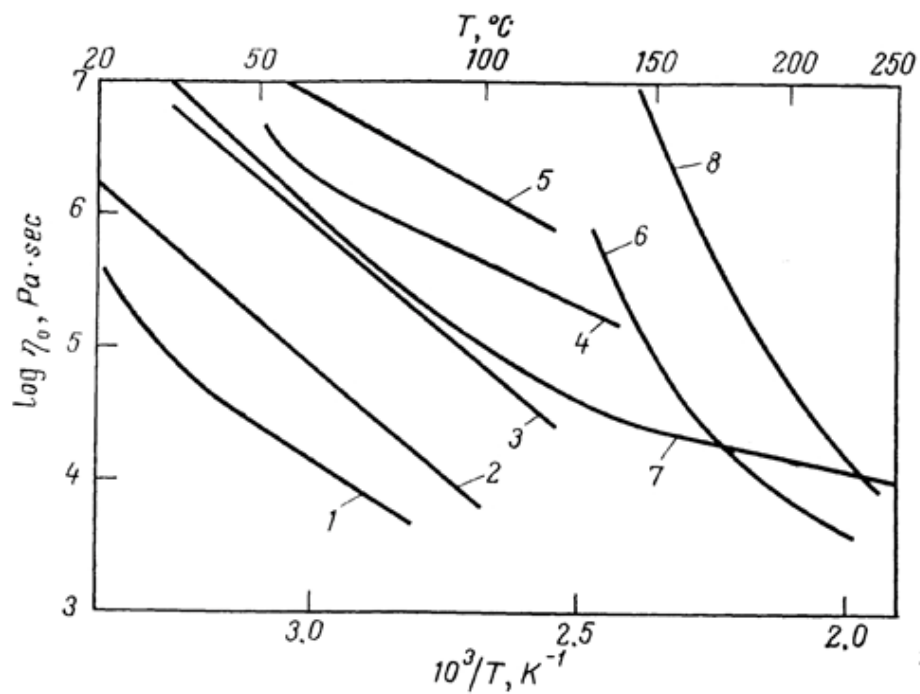
$T$ : abszolút hőmérséklet [K]

Az egyenlet érvényességét úgy ellenőrizhetjük, hogy a viszkozitás logaritmusát a hőmérséklet reciprokának függvényében ábrázoljuk. Az összefüggés érvényességi tartományán belül (kb. 40 °C) egyenest kapunk (5.17 ábra).



**5.17 ábra:** A viszkozitási tényező hőmérsékletfüggése az Arrhenius egyenlet szerint

Szélesebb hőmérséklettartományban már észrevehető egy görbület (5.18 ábra), ami az  $E$  és az  $A$  hőmérsékletfüggésére utal.



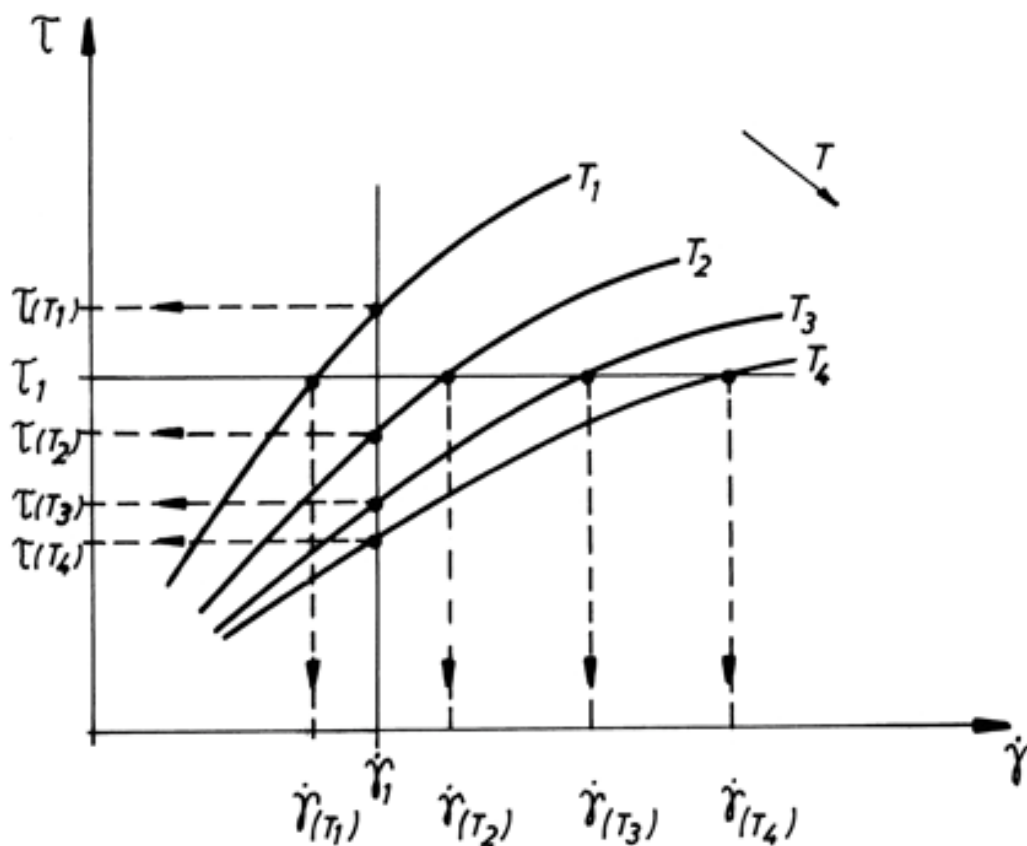
**5.18 ábra:** Néhány polimer viszkozitásának Arrhenius diagramja 1: poli-izobutilén (PIB),  $M_w \sim 8 \times 10^4$ ; 2: PIB,  $M_w \sim 1 \times 10^5$ ; 3: butil kaucsuk; 4: természetes gumi; 5: SBR; 6: LDPE; 7: etilén-propilén kopolimer; 8: PS,  $M_w \sim 3,6 \times 10^5$

Amint azt az előző fejezetekben már láthattuk, a viszkozitási tényező a hőmérsékleten kívül a  $\tau$ -val és a  $\dot{\gamma}$ -tal jellemezhető nyírási állapottól is függ. Ezt az alábbi függvénykapcsolattal fejezhetjük ki:

$$\eta = \eta(\tau, T), \text{ ill. } \eta = \eta(\dot{\gamma}, T)$$

Az  $\eta$  hőmérsékletfüggésének vizsgálatakor tehát meg kell különböztetni, hogy azt állandó  $\tau$  nyírófeszültségen, vagy állandó  $\dot{\gamma}$  nyírósebességen hajtották-e végre.

Tekintettel arra, hogy a viszkozitási tényező különböző módon függ  $\tau$ -tól, illetőleg  $\dot{\gamma}$ -tól (ld. 5.12 ábra), a hőmérséklettől való függés is különböző lesz. Az 5.19 ábra szerint a különböző hőmérsékleteken felvett folyásgörbék közül:



**5.19 ábra:** A folyásgörbe hőmérsékletfüggésének jellege

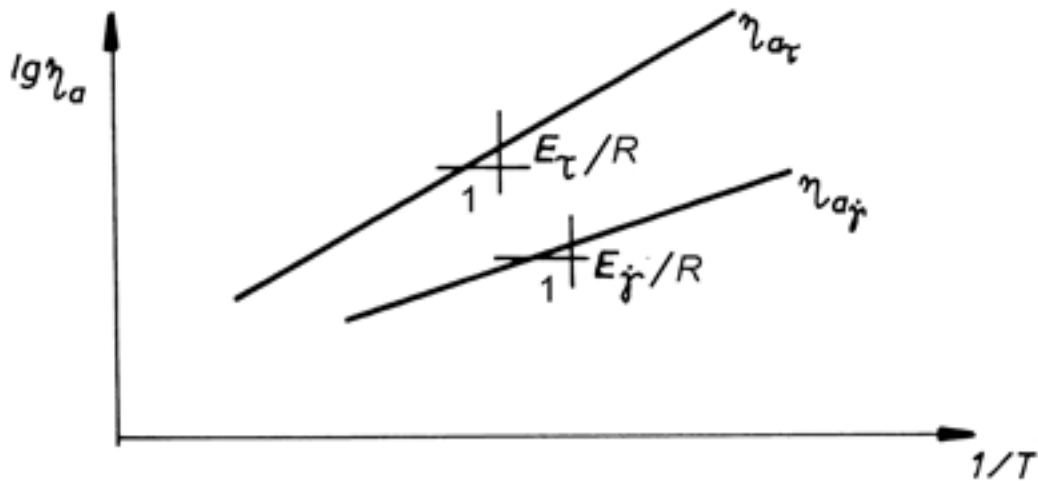
- Állandó  $\tau_1$  feszültség esetén:

$$\eta_a(T)_\tau = \frac{\tau_1}{\dot{\gamma}(T)}$$

- Állandó  $\dot{\gamma}_1$  nyírósebesség esetén:

$$\eta_a(T)_{\dot{\gamma}} = \frac{\tau(T)}{\dot{\gamma}_1}$$

Ha az 5.17 ábrának megfelelően ábrázoljuk az  $\eta_a(T)_\tau$  és  $\eta_a(T)_{\dot{\gamma}}$  értékeket a hőmérséklet reciprokának függvényében, akkor az 5.20 ábrán látható jelleget kapjuk. Látható, hogy az  $\eta$  hőmérsékleti gradiense ebben az esetben nem egyenlő, azaz:



5.20 ábra: A viszkozitási tényező hőmérsékletfüggésének igénybevételtől függő eltérő jellege

$$\left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)_\tau = -\eta \frac{E_\tau}{RT^2} > \left(\frac{\partial \eta}{\partial T}\right)_{\dot{\gamma}} = -\eta \frac{E_{\dot{\gamma}}}{RT^2}$$

Ez annyit is jelent, hogy az  $E$  aktiválási energiák sem egyenlők, azaz

$$E_\tau > E_{\dot{\gamma}}$$

Kimutatható, hogy pszeudoplasztikus anyagok ( $\tau = K \dot{\gamma}^n$ ;  $n < 1$ ) esetén:

$$E_{\dot{\gamma}} = nE_{\tau}$$

Az Arrhenius egyenlet (5.22) szerinti alakját felírhatjuk két különböző ( $T_0$  ill  $T$ ) hőmérsékletre:

$$\eta_0(T_0) = A \exp \frac{E}{RT_0} \quad \text{ill.} \quad \eta_0(T) = A \exp \frac{E}{RT}$$

Abban a hőmérséklettartományban, ahol  $A$  és  $E$  értéke állandó, a két viszkozitás hányadosára írhatjuk:

$$\frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} = \exp \frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) = a_T(T)$$

ahol  $a_T(T)$  az ún. hőmérsékleti eltolási tényező. Az Arrhenius egyenlet (5.30) szerinti alakjának segítségével becsülhető a viszkozitás értéke  $T$  hőmérsékleten, ha ismerem nagyságát egy  $T_0$  hőmérsékleten.

Az amorf anyagok viszkozitási tényezőjének hőmérsékletfüggését leíró **WLF (Williams-Landel-Ferry)** egyenlet használatos alakja:

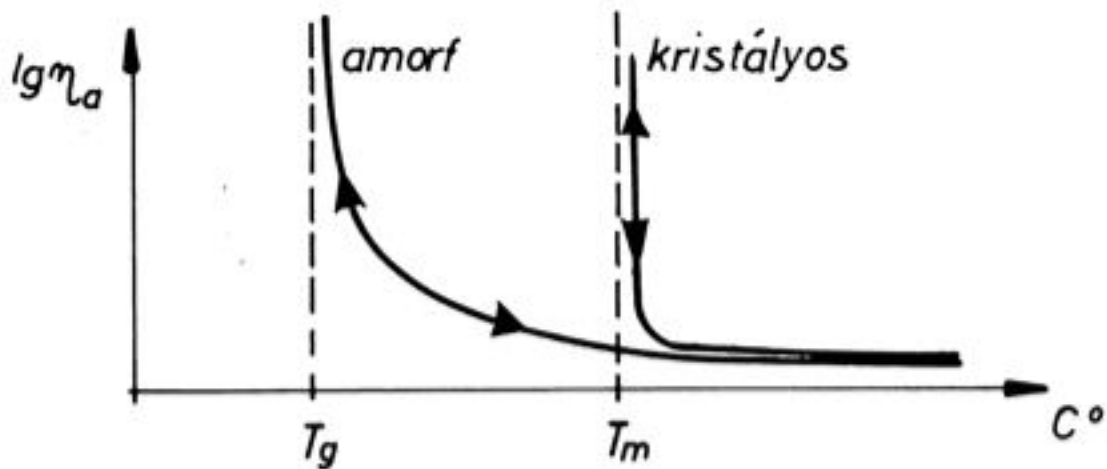
$$\lg a_T(T) = \lg \frac{\eta_0(T)}{\eta_0(T_0)} = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

Abban az esetben, ha a  $T_0$  vonatkoztatási hőmérséklet (ahol ismerem a viszkozitást) kb.  $T_g + 50$  °C, a két  $C$  konstans értéke:  $C_1 = -8,86$ ;  $C_2 = 101,6$ .

Az  $a_T$  eltolási tényezők ismeretében felírhatjuk a hőmérsékletváltozás hatását is figyelembe vevő, ún. hőmérséklet invariáns viszkozitásfüggvényeket. Így pl. a *Carreau egyenlet* (5.20) alatti alakjának módosulása ebben az esetben:

$$\eta_a(\dot{\gamma}, T) = a_T(T) \eta_a(a_T \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0 a_T(T)}{\left[ 1 + B a_T(T) \dot{\gamma} \right]^2}$$

Végezetül, ha összehasonlítjuk az amorf ill. a részben kristályos polimerek viszkozitásának hőfokfüggését, akkor az 5.21 ábra szerinti jelleget tapasztaljuk.



**5.21 ábra:** Amorf és kristályos polimerek lágyulási karakterisztikáinak jellege

Az ún. lágyulási karakterisztikából az következik, hogy az amorf hőre lágyuló műanyagok széles hőmérséklettartományban lágyulnak, lassan olvadnak meg, a kristályos termoplasztoknál ez a folyamat gyors, néhány  $^{\circ}\text{C}$  hőmérséklettartományban lezajlik.

### 5.2.2.2 A viszkozitás nyomásfüggése

A viszkozitás  $p$  nyomástól való függése napjainkig sokkal kevésbé tanulmányozott, feltárt terület, mint a hőmérséklet vagy igénybevétel folyóképességre gyakorolt hatása. Ez talán magyarázható azzal, hogy a hidrosztatikus nyomásnak szerényebb hatása van a viszkozításra, mint pl. a hőmérsékletnek.

A nyomás viszkozitást növelő hatását leíró összefüggés:

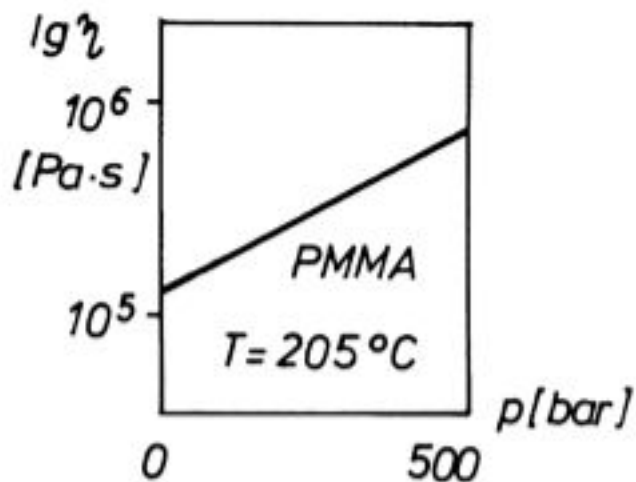
$$\eta_p = \eta_0 \exp(\alpha_p \cdot p)$$

ahol:  $\eta_p$ : a viszkozitás  $p$  nyomáson, állandó  $\tau_0$  esetén

$\eta_0$ : a nullviszkozitás állandó  $\tau_0$  esetén

$\alpha_p$ : nyomási kitevő

Az (5.33) egyenlet szerinti viszkozitásváltozást szemlélteti az 5.22 ábra.



5.22 ábra: A viszkozitási tényező nyomásfüggésének jellege

Az ömledék anyagi minőségétől függő  $\alpha_p$  értéke pl. PS esetén kb. 1/1000; LDPE esetén 1/3000...1/4000, míg HDPE esetén 1/7000...1/8000. Ez annyit jelent, hogy ha a légköri nyomást pl. 2000 bar-ra növeljük, a viszkozitás növekedése PS esetén 22 %, polietilénél pedig csak 3...5 %.

Általánosságban megállapítható, hogy a nyomás hatása a viszkozításra *amorf* polimereknél jóval erőteljesebb, mint a *kristályosoknál*.

Végezetül ezúttal is megfogalmazhatjuk az  $a_T$  eltolási tényezőt, ami már a hőmérséklet mellett a nyomás hatását is figyelembe veszi. A  $T_1$  hőmérsékletről és  $p_1$  nyomásról a  $T_2$  hőmérsékletre és  $p_2$  nyomásra való átszámításra használatos  $a_T$  értelmezése:

$$\lg a_T(T, p) = \lg \left( \frac{\eta(T_2, p_2)}{\eta(T_1, p_1)} \right)$$

Ezzel a hőmérséklet és a nyomás hatását is figyelembe vevő viszkozitásfüggvények:

Carreau:

$$\eta_a(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{a_T(T, p) \cdot A}{\left[ 1 + a_T(T, p) \cdot B \cdot \dot{\gamma} \right]^c}$$

Vinogradov-Malkin:

$$\eta_a(\dot{\gamma}, T, p) = \frac{a_T(T, p) \cdot \eta_0}{1 + A_1 \left[ a_T(T, p) \cdot \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \right]^\alpha + A_2 \left[ a_T(T, p) \cdot \eta_0 \cdot \dot{\gamma} \right]^{2\alpha}}$$

ahol:  $A_1 = 1,386 \cdot 10^{-2}$

$A_2 = 1,462 \cdot 10^{-3}$

$\alpha = 0,355$

ha  $[\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}$

$[\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$

### 5.2.2.3 A viszkozitás függése az átlagos molekulatömegtől

A tapasztalat azt mutatja, hogy egy adott anyag esetén annak móltömegének növekedésével csökken az ömledék folyóképessége, nő a viszkozitása. Ezt a hatást az

$$\eta_a = K' \overline{M}_w^{3,5}$$

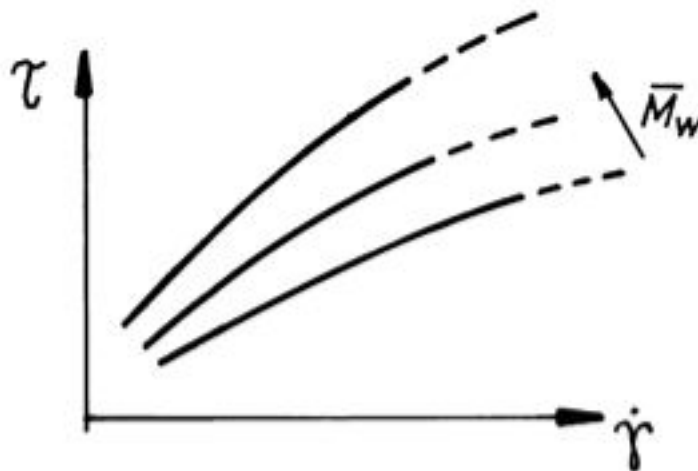
összefüggés írja le, ahol  $\overline{M}_w$ : a tömeg szerinti átlagos molekulatömeg

$K'$ : anyagi minőségtől függő állandó

Az (5.37) összefüggés alapján, ha az adott anyag átlagos móltömege pl. a duplájára nő, akkor a többi paraméter ( $\tau$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $T$ ,  $p$ ) állandósága esetén:

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left( \frac{\overline{M}_{w2}}{\overline{M}_{w1}} \right)^{3,5} = 2^{3,5} = 11,3$$

azaz az ömledék viszkozitása kb. a tízszeresére nő! Ez annyit is jelent, hogy amíg a móltömeg növekedésével (egyre hosszabbak a láncmolekulák) javulnak a termék bizonyos használati tulajdonságai, a feldolgozhatósága egyre nehezebb (energiaigényesebb) lesz (ld. 5.23 ábra).



5.23 ábra: Az átlagos móltömeg hatása a folyásgörbére

### 5.3 Polimer ömledékek áramlása

Tipikusnak mondható – különösen a hőre lágyuló – műanyagok feldolgozásánál az alábbi folyamat: A szilárd műanyagot – többnyire granulátumot – egy olvasztó egységben – plasztifikáló berendezés – megolvasztjuk, azaz alakítható állapotba hozzuk, majd innen, többnyire nyomáskülönbség segítségével, egy hűtött (temperált) szerszámba juttatjuk, ahol az ömledék felveszi a szerszám alakját, lehül és megszilárdul (Bizonyos esetekben az ömledék a fűtött szerszámon keresztül áramlik, kap egy alakot, majd ezután egy kalibráló-hűtő egységben hűl le, szilárdul meg.). Ez annyit jelent, hogy viszkózusan folyó polimer ömledék áramlik, pl. már a plasztifikáló henger bizonyos zónájába, innen különböző csatornákon keresztül eljut a szerszámba, ahol szintén áramlik. A polimer ömledék áramlásának elemzése tehát a feldolgozástechnológiai folyamatok megismeréséhez nélkülözhetetlen.

Mivel a polimer ömledékek ilyen fajta áramlása meglehetősen összetett folyamat, matematikai leírásuk nagyon bonyolult feladat. A következőkben csak a legegyszerűbb esetek ismertetésére szorítkozunk, melyekből a folyamatok minőségileg megismerhetők.

Az áramlás leírásához a reológiai anyagtörvények mellett fel kell használni a tömegmegmaradás tételét (kontinuitási összefüggések), az impulzusmegmaradás tételét (mozgási összefüggések), és amennyiben a folyamat közben még hőcsere is lejátszódik, szükség van az energiamegmaradás törvényére, valamint a termodinamikai anyag és állapottörvényekre. Az elfogadható kezelhetőség érdekében az alábbi egyszerűsítéseket tesszük:

- Az áramlás stacioner, azaz minden pontjában időtől független.
- Az áramlás lassú (lamináris, a Reynolds szám kisebb mint 2100), a tehetetlenségi erő a súrlódási erőhöz képest elhanyagolható.



- Az áramlás izoterm, azaz hőmérsékletében homogén.
- A rendszer hidrodinamikailag teljesen kitöltött. (A teljes keresztmetszetben ömledék van.)
- Az ömledék összenyomhatatlan ( $\rho = \text{áll.}$ ).
- A nehézségi erők elhanyagolhatók.
- Az áramlás és a nyomáscsökkenés is csak egyirányú. (Esetünkben  $x$  irányú.)
- Az áramlás Poisson típusú (a be- és kilépési hatások elhanyagolhatók).
- Az ömledék sebessége a falnál nulla.

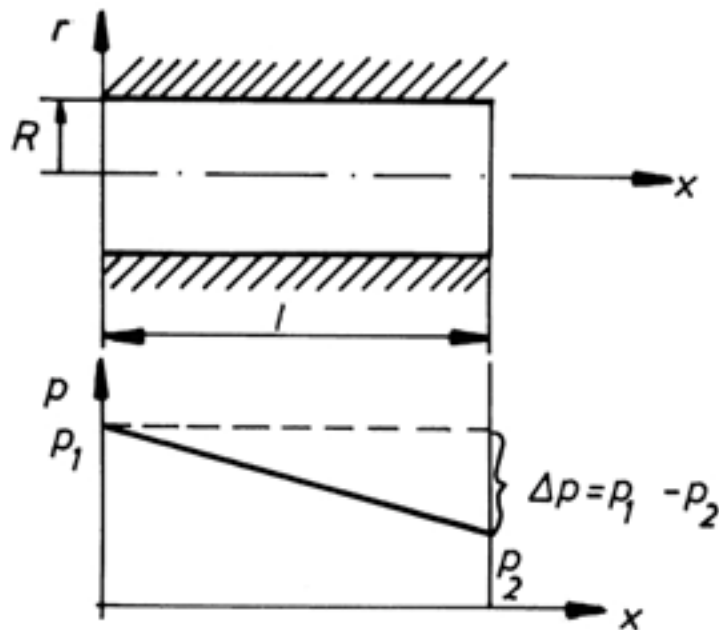
Ilyen egyszerűsítő feltételek mellett a legfontosabb összefüggések már viszonylag egyszerűen levezethetők.

### 5.3.1 Newton féle ömledék áramlása

Mint sok hasonló esetben, ezúttal is a legegyszerűbb anyaggal kezdjük a probléma megközelítését. Vizsgáljuk az (5.3) összefüggéssel definiált newtoni közeg áramlását csőben ill. sík lapok között. Már most hangsúlyozzuk, hogy a gondolatmenet valamennyi, a későbbiekben tárgyalandó esetben a mostanival megegyező lesz.

#### 5.3.1.1 Áramlás kapillárisban

Első lépésben az áramlás  $v(r)$  sebességeloszlását határozzuk meg. A newtoni közeg kapilláris áramlására az 5.24 ábra alapján írhatjuk:



**5.24 ábra:** A kapilláris áramlás jelöléseinek értelmezése

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = -\eta \frac{dv}{dr}$$

ahonnan

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\tau}{\eta}$$

$\tau$  értékének meghatározásához írjuk fel az ömledékre ható erők egyensúlyát:

$$R^2 \pi \Delta p = 2R \pi l \tau_f$$

ahol  $\tau_f$  a falnál ébredő nyírófeszültség

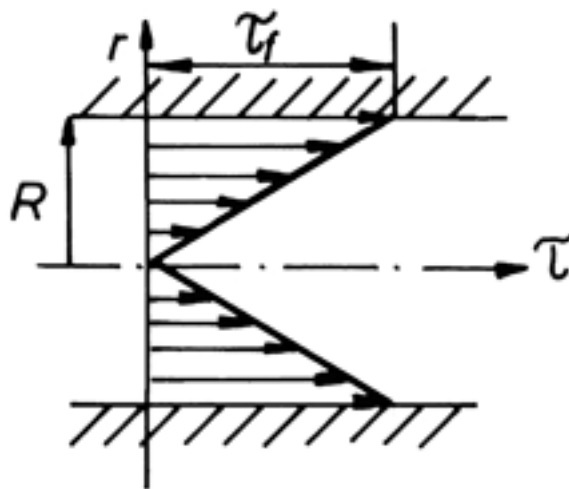
$$\tau_f = R \frac{\Delta p}{2l}$$

Ezzel analóg módon a  $\tau$  nyírófeszültség eloszlása:

$$\tau = r \frac{\Delta p}{2l}$$

Ez az *anyagi minőségtől független* összefüggés annyit jelent, hogy az áramlás az 5.25 ábra szerint tengelyében feszültségmentes, a falnál pedig a kúpszerű feszültségeloszlásból következően a maximális  $\tau_f$  nyírófeszültség ébred.

Behelyettesítve a  $\tau$  (5.42) alakját az (5.39) összefüggésbe:



**5.25 ábra:** A nyírófeszültségek eloszlása kapillárisáramláskor

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{r\Delta p}{2\eta l}$$

melyből integrálással:

$$v(r) = -\frac{r^2\Delta p}{4\eta l} + c$$

A  $c$  integrálási állandó meghatározásához azt használjuk fel, hogy  $r=R$  helyen, tehát a falnál a sebesség nulla [ $v(R)=0$ ].

$$v(R) = -\frac{R^2\Delta p}{4\eta l} + c = 0$$

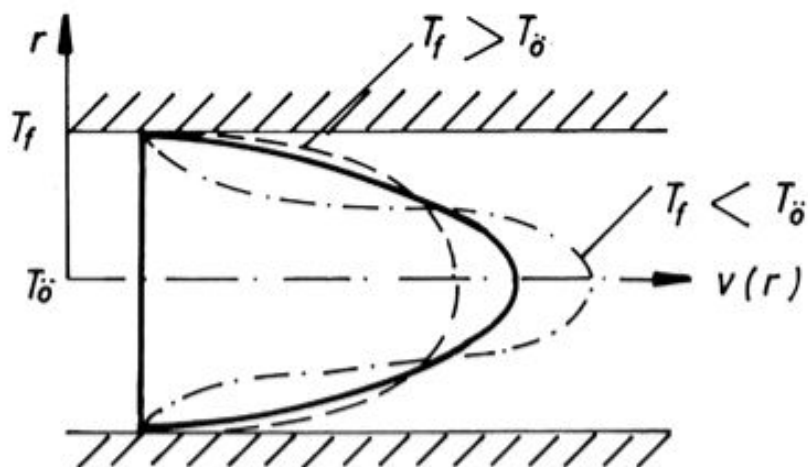
melyből:

$$c = \frac{R^2\Delta p}{4\eta l}$$

Az integrálási állandót visszahelyettesítve (5.44)-be kapjuk a végeredményt:

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2)$$

A newtoni közeg sebességeloszlása kapillárisban áramló izoterm (folytonos vonal) és anizoterm (szaggatott, ill. eredményvonal) körülmények között



**5.26 ábra:** A sebességeloszlása jellege kapillárisban áramló newtoni közeg izoterm (folytonos vonal) és anizoterm (szaggatott, ill. eredményvonal) körülmények között

Az  $\eta$  viszkozitási tényező hőmérsékletfüggéséből következően a parabolikus sebességeloszlás módosulása is érzékelhető, ha a  $T_f$  falhőmérséklet és a  $T_\delta$  ömledékhőmérséklet nem egyezik meg.

Az áramlás tengelyében fellépő maximális sebesség:

$$v_{\max} = \frac{\Delta p}{4\eta l} R^2$$

amelynek felhasználásával az (5.47) összefüggés egy másik alakja:

$$v(r) = \frac{R^2 \Delta p}{4\eta l} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] = v_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Az (5.47) összefüggés ismeretében meghatározható a könnyen mérhető  $\dot{V}$  térfogatáram, amelyből nagyon fontos eredményekre lehet jutni:

$$d\dot{V} = v(r) dA$$

ahol a  $dA$  elemi felület:

$$dA = 2r \pi dr$$

Ezzel a térfogatáram:

$$\dot{V} = 2\pi \int_0^R r v(r) dr$$

melybe behelyettesítve  $v(r)$  (5.47) szerinti alakját kapjuk:

$$\dot{V} = \frac{\Delta p}{4\eta l} 2\pi \int_0^R r (R^2 - r^2) dr$$

Elvégezve a műveleteket írhatjuk:

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \int_0^R (rR^2 - r^3) dr$$

azaz:

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \left[ \frac{R^2 r^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \left( \frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4} \right)$$

$$\dot{V} = \frac{R^4 \pi \Delta p}{8\eta l}$$

Ez az ún. **Hagen-Poiseuille** összefüggés, amely minden reológiai mérés alapjának tekinthető.

Ugyanis ha pl. egy, az 5.23 ábra szerinti  $l$  hosszúságú,  $R$  sugarú kapillárist használva mérem a  $\dot{V}$  térfogatáramot, a  $\Delta p$  nyomáskülönbség ismeretében az  $\eta$  newtoni viszkozitási tényező:

$$\eta = \frac{R^4 \pi \Delta p}{8\dot{V} l}$$

vagy pl. meghatározhatjuk  $\dot{\gamma}_f$  fal melletti nyírósebességet:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{\tau_f}{\eta}$$

amelybe behelyettesítve  $\tau_f$  (5.41) alatti alakját, kapjuk:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{R \Delta p}{2\eta l}$$

Ezzel a  $\dot{V}$  térfogatáram:

$$\dot{V} = \frac{R \Delta p}{2\eta l} \frac{R^3 \pi}{4}$$

ahol  $\frac{R \Delta p}{2\eta l} = \dot{\gamma}_f$ , melyből:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3 \pi}$$

Így eljutottunk a  $\tau-\dot{\gamma}$  folyásgörbe egyik meghatározási lehetőségéhez, hisz az anyagi minőségtől

független  $\tau_f = \frac{R\Delta p}{2l}$  összefüggés mellett most már ennek „párja”, a  $\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3\pi}$  is ismert.

Különböző  $\Delta p$  nyomáskülönbségek esetén mérve  $\dot{V}$  értékét, a folyásgörbe megszerkeszthető.

Felhasználhatjuk az (5.56) összefüggést a  $\bar{v}$  (keresztmetszeti) átlagsebesség meghatározásához is, ugyanis

$$\dot{V} = R^2\pi\bar{v} = \frac{R^4\pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

melyből:

$$\bar{v} = \frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

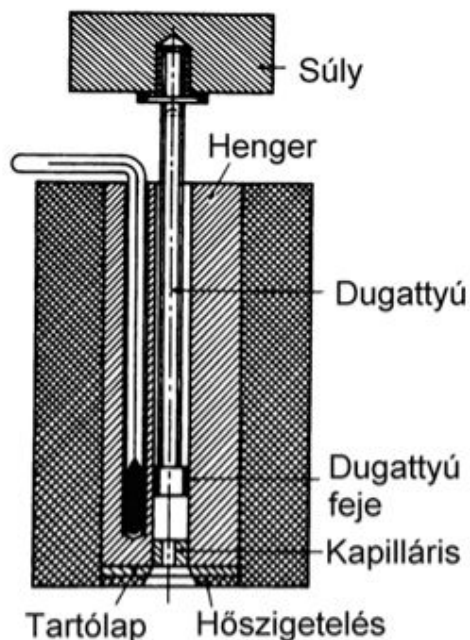
mely pontosan fele a  $v_{max}$  maximális sebességnek. A  $\bar{v}$  ismeretében felírható még a  $v(r)$  sebességeloszlás egy másik, a későbbiekben még felhasználásra kerülő alakja, miszerint:

$$v(r) = 2\bar{v} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Ugyancsak kiszámítható az ún. átlagos tartózkodási idő ( $\bar{t}$ ) is:

$$\bar{t} = \frac{l}{\bar{v}} = \frac{8\eta l^2}{R^2\Delta p}$$

Jóllehet a polimer ömledékek viselkedését a folyás vagy viszkozitásgörbékkel (5.10, 5.11 ábrák) kellene jellemezni, ezek meglehetősen költséges kimérése miatt a mai felhasználói gyakorlatban az ömledék folyóképességének jellemzésére nem azokat, hanem az ún. MFI (MFR) (Melt Flow Index, Melt Flow Rate) értéket, az *ömledék folyási indexét* használják. Ez az érték nem más, mint egy adott kapillárison ( $d \approx 2$  mm,  $l = 8$  mm) időegység (10 min) alatt átáramló ömledék mennyisége grammban előírt hőmérsékleten és terhelés mellett. Így pl. az  $MFI(190; 2,16) = 3,5$  annyit jelent, hogy 190 °C-on, 2,16 kg-os súlyterhelést alkalmazva, 10 min alatt 3,5 g ömledék áramlik át a szabványos kapillárison. Az állandó  $\tau$  nyírófeszültséggel dolgozó MFI mérőberendezés elvi vázolata látható a 5.27 ábrán.



5.27 ábra: Az MFI készülék vázlata

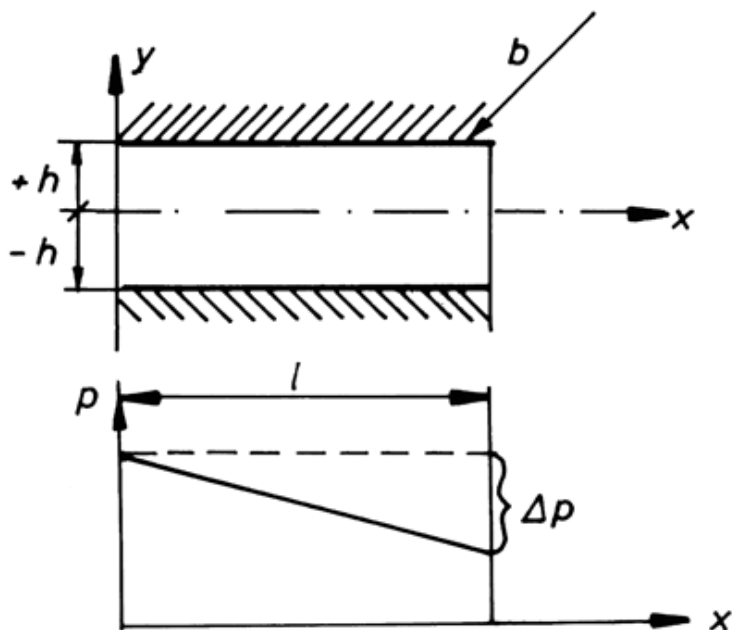
Az MFI mérését – főként minőség-ellenőrzés céljára – széles körben használják a gyakorlatban annak ellenére, hogy a  $\tau$ - $\dot{\gamma}$  folyásgörbének csak egyetlen pontját szolgáltatja, és azt is nagyon alacsony ( $\dot{\gamma} \approx 1 \dots 50 \text{ s}^{-1}$ ) nyírósebesség mellett. Az minden esetre megállapítható, hogy az egyes polimerek MFI értéke döntően befolyásolja, hogy az milyen technológiával dolgozható fel. A különböző feldolgozási eljárásokra ajánlott MFI értékek a következők:

Feldolgozási eljárás	MFI [g/10 min]
Fröccsöntés	5...100
Rotációs öntés	5...20
Fólia extrudálás	0,5...6
Fröccsfúvás	0,1...1
Profil extrúzió	0,1...1

1. táblázat - Különböző feldolgozási eljárásokra ajánlott MFI értékek (v.ö.: 9.1 tábl.)

### 5.3.1.2 Áramlás részben

A sík lapok közötti ún. résáramlás nem kisebb jelentőségű, mint az előző fejezetben megismert kapillárisáramlás. A téma tárgyalását a kapillárisáramlásnál megismert módszer szerint végezzük, azaz először a  $v(y)$  sebességeloszlást határozzuk meg.



5.28 ábra: A rásáramlás jelöléseinek értelmezése

Az 5.28 ábra jelöléseit használva egy  $b$  szélességű,  $2h$  magasságú ( $b \gg 2h$ ) résre írhatjuk ( $-h \leq y \leq h$ ):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} = -\eta \frac{dv}{dy}$$

ahonnan:

$$\frac{dv}{dy} = -\frac{\tau}{\eta}$$

A  $\tau$  kifejezését ezúttal is erőegyensúlyból kapjuk:

$$2hb\Delta p = 2bl\tau_f$$

$$\tau_f = h \frac{\Delta p}{l} \text{ ill. } \tau = y \frac{\Delta p}{l}$$

Ezt behelyettesítve (5.67) összefüggésbe:

$$\frac{dv}{dy} = -\frac{y\Delta p}{\eta l}$$

ahonnan  $v(y)$  sebességeloszlás:



$$v(y) = \frac{-\Delta p}{2\eta l} \frac{y^2}{2} + c$$

A  $c$  integrálási állandót ezúttal is a faltapadás ( $v(h)=0$ ) feltételezésével határozzuk meg:

$$v(h) = \frac{-\Delta p}{2\eta l} h^2 + c = 0$$

ahonnan

$$c = \frac{\Delta p}{2\eta l} h^2$$

Ezt behelyettesítve (5.71) összefüggésbe a sebességeloszlást leíró egyenlet:

$$v(y) = \frac{\Delta p}{2\eta l} (h^2 - y^2)$$

Ezúttal is egy parabolikus sebességeloszlást kaptunk, melynek jellege megegyezik az 5.25 ábrán látottal.

Az áramlás tengelyében lévő  $v_{max}$  maximális sebesség értéke:

$$v_{max} = \frac{\Delta p}{2\eta l} h^2$$

Második lépcsőben határozzuk meg a  $\dot{V}$  térfogatáramot.

$$d\dot{V} = v(y) dA$$

ahol  $dA = b \cdot dy$

Ezzel a térfogatáram:

$$\dot{V} = b \int_{-h}^h v(y) dy = \frac{b\Delta p}{2\eta l} \int_{-h}^h (h^2 - y^2) dy$$

$$\dot{V} = \frac{b\Delta p}{2\eta l} \left[ h^2 y - \frac{y^3}{3} \right]_{-h}^h = \frac{b\Delta p}{2\eta l} \left[ h^3 - \frac{h^3}{3} + h^3 - \frac{h^3}{3} \right]$$

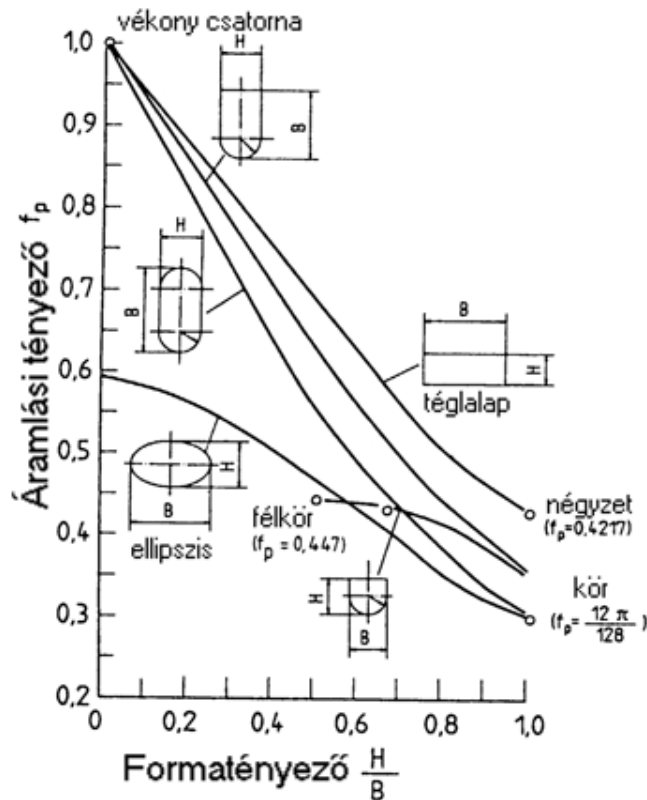
$$\dot{V} = \frac{2}{3} \frac{bh^3}{\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

A gyakorlatban elterjedt az a fajta kifejezőmód is, amikor az 5.27 ábrán vázolt résznek a teljes magasságát jelölik  $h$ -val. Ebben az esetben a  $\dot{V}$  térfogatáramot megadó összefüggés ( $h \rightarrow h/2$ ):

$$\dot{V} = \frac{bh^3}{12\eta} \frac{\Delta p}{l} = \frac{bh^3}{12l} \frac{\Delta p}{\eta} = K \frac{1}{\eta} \Delta p$$

A  $\frac{bh^3}{12l}$  kifejezést *fúvókaállandónak* nevezzük. Ha a rés ideális téglalaptól eltérő alakját egy  $f_p$  *áramlási tényezővel* (ld. 5.29 ábra) figyelembe vesszük, a térfogatáramra felírható általános összefüggés:

$$\dot{V} = K \frac{1}{\eta} \Delta p \cdot f_p$$



**5.29 ábra:** Az áramlási tényező értékei különböző alakú csatornákra, izoterm newtoni áramlás esetén

A mérhető  $\dot{\gamma}$  térfogatáram ismeretében az előző (5.3.1.1) fejezetben leírtakkal teljesen analóg módon meghatározható az  $\eta$ , a  $\dot{\gamma}$  vagy a  $\bar{v}$ .

### 5.3.2 Hatványtörvényt követő közeg áramlása

Amint azt az 5.2.1 fejezetben már említettük, a reális polimer ömledék a feldolgozástechnológiák által megvalósított igénybevételi tartományban pseudoplasztikusan viselkedik, melyre a

$\tau = K \dot{\gamma}^n$ ,  $n < 1$  reláció az érvényes. Így ha a newtoni ömledéknél tett gondolatmenetünket ebben az esetben is végigvisszük, a valóságot jobban megközelítő eredményekre jutunk.

#### 5.3.2.1 Áramlás kapillárisban

Az 5.23 ábrán már bemutatott koordináta – ill. jelölésrendszert használva először  $v(r)$  sebességeloszlást határozzuk meg. Definíció szerint:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n = -K \left( \frac{dv}{dr} \right)^n$$

amelyből

$$\frac{dv}{dr} = - \frac{\tau^{\frac{1}{n}}}{K^{\frac{1}{n}}}$$

$$\tau = r \frac{\Delta p}{2l}$$

A  $\tau$  nyírófeszültségre az anyagi minőségtől független (5.42) összefüggés szerint amit (5.82)-be behelyettesítve kapjuk:

$$\frac{dv}{dr} = - \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}}$$

amelyből a  $v(r)$  sebességeloszlásra

$$v(r) = - \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} r^{\frac{n+1}{n}} + c$$

adódik.

A  $c$  integrálási állandó – a korábbiakhoz hasonlóan – a faltapadás ( $v(R)=0$ ) feltételből:

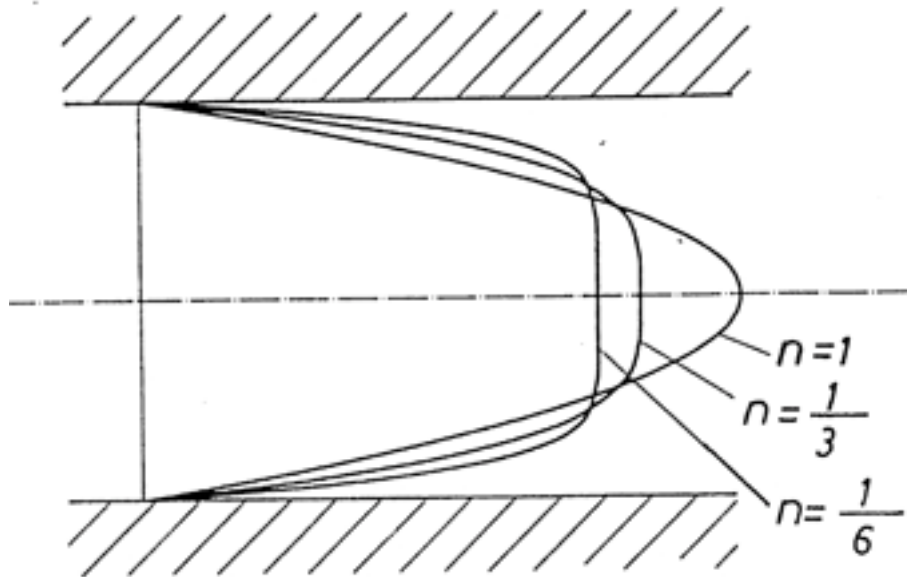
$$c = \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{n+1}{n}}$$

Ezzel a sebességeloszlást leíró végső összefüggés:

$$v(r) = \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right]$$

Megfigyelhető, hogy  $n=1$  esetben a newtoni közeg sebességeloszlását leíró (5.47) összefüggést kapjuk.

Az (5.86) összefüggés az 5.30 ábrán vázolt sebességeloszlást ír le, miszerint  $n$  értéke minél jobban eltér egytől, a görbe annál jobban eltér a parabolától, annál kisebb lesz a különbség a maximális – és az átlagsebesség között.



**5.30 ábra:** A hatványtörvényt követő ömledék sebességeloszlásának jellege

Második lépésben (a már ismert módon) határozzuk meg a  $\dot{V}$  térfogatáramot:

$$d\dot{V} = v(r) dA$$

$$dA = 2r \pi dr$$

$$d\dot{V} = 2\pi r v(r) dr$$

$$\dot{V} = 2\pi \int_0^R r v(r) dr$$

Ide helyettesítsük be  $v(r)$  (5.86) alatti alakját:

$$\dot{V} = 2\pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \int_0^R \left( r R^{\frac{n+1}{n}} - r r^{\frac{n+1}{n}} \right) dr$$

Tovább írva:

$$\dot{V} = 2\pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ \frac{r^2 R^{\frac{n+1}{n}}}{2} - \frac{r^{\frac{3n+1}{n}}}{\frac{3n+1}{n}} \right]_0^R$$

$$\dot{V} = 2\pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ \frac{R^{\frac{3n+1}{n}}}{2} - \frac{n}{3n+1} R^{\frac{3n+1}{n}} \right]$$

$$\dot{V} = 2\pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} R^{\frac{3n+1}{n}} \left( \frac{1}{2} - \frac{n}{3n+1} \right)$$

A végeredmény:

$$\dot{V} = \pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{3n+1} R^{\frac{3n+1}{n}}$$

Megfigyelhető, hogy  $n=1$  esetében ( $K=\eta$ ) ezúttal is a newtoni közegre kapott eredményre, ezúttal a „klasszikus” Hagen-Poiseuille összefüggés (5.56) alatti alakjához jutunk.

a  $\dot{V}$  térfogatáram ismeretében ezúttal is meghatározható:

- A  $\dot{V}$  átlagsebesség

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{R^2 \pi} = \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{3n+1} R^{\frac{n+1}{n}}$$

mellyel a  $v(r)$  sebességeloszlás egy másik alakja:

$$v(r) = \bar{v} \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]$$

- A  $\dot{\gamma}_f$  falmenti nyírósebesség:

$$\tau_f = K \dot{\gamma}_f^n$$

$$\dot{\gamma}_f^n = \frac{\tau_f \frac{1}{n}}{K \frac{1}{n}} \quad \tau_f \frac{1}{n} = \frac{R^{\frac{1}{n}} \Delta p \frac{1}{n}}{(2l) \frac{1}{n}}$$

$$\dot{\gamma}_f^n = \frac{R^{\frac{1}{n}} \Delta p \frac{1}{n}}{(2Kl) \frac{1}{n}}$$

$$\dot{V} = \pi \left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{1}{n}} R^3 \frac{n}{3n+1}$$

ahol  $\left( \frac{\Delta p}{2Kl} \right)^{\frac{1}{n}} R^{\frac{1}{n}} = \dot{\gamma}_f$

$$\dot{\gamma}_f = \frac{\dot{V}}{R^3 \pi} \frac{3n+1}{n}$$

mely  $n=1$  esetben ( $K=\eta$ ) ezúttal is a newtoni közeg azonos, (5.61) szerinti alakját adja.

### 5.3.2.2 Áramlás részben

A newtoni közeg részáramlása kapcsán az 5.27 ábrán bemutatott koordináta és jelölésrendszert használva első lépésként ezúttal is a  $v(y)$  sebességeloszlást határozzuk meg ( $-h \leq y \leq h$ ):

$$\tau = K \dot{\gamma}^n = -K \left( \frac{dv}{dy} \right)^n$$

$$\frac{dv}{dy} = - \frac{\tau^{\frac{1}{n}}}{K^{\frac{1}{n}}}$$

melyből

$$\tau = y \frac{\Delta p}{l}$$

A  $\tau$  eloszlását leíró, anyagi minőségtől független (5.69) összefüggés szerint felhasználva:

$$\frac{dv}{dy} = - \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} y^{\frac{1}{n}}$$

melyből

$$v(y) = - \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} y^{\frac{n+1}{n}} + c$$

A  $c$  integrálási állandót ezúttal is a faltapadásból [ $v(\pm h)=0$ ] kapjuk:

$$c = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} h^{\frac{n+1}{n}}$$

mellyel a  $v(y)$  sebességeloszlást leíró összefüggés végső alakja:

$$v(y) = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ h^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}} \right]$$

Megfigyelhető, hogy az 5.29 ábrán látható jellegű sebességeloszlást leíró összefüggés  $n=1$  esetén ( $K=\eta$ ) a newtoni közegre kapott (5.73) egyenlet szerinti alakot ölti.

Második lépésben – a korábban már alkalmazott gondolatmenet alapján – a  $\dot{V}$  térfogatáramot határozzuk meg:

$$d\dot{V} = v(y)dA = bv(y)dy$$

Behelyettesítve a  $v(y)$  sebességeloszlás (5.99) szerinti alakját és felhasználva azt, hogy a sebességeloszlás az áramlás tengelyére szimmetrikus:

$$\dot{V} = 2b \int_0^h v(y)dy = 2b \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \int_0^h \left( h^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}} \right) dy$$

Elvégezve az integrálást:

$$\dot{V} = 2b \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ h^{\frac{n+1}{n}} y - \frac{n}{2n+1} y^{\frac{2n+1}{n}} \right]_0^h$$

$$\dot{V} = 2b \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} \left[ h^{\frac{2n+1}{n}} - \frac{n}{2n+1} h^{\frac{2n+1}{n}} \right]$$

$$\dot{V} = 2b \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} h^{\frac{2n+1}{n}} \left( 1 - \frac{n}{2n+1} \right)$$

Végül a végeredmény:

$$\dot{V} = b \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{2n+1}{n}} \frac{2n}{2n+1}$$



amely  $n=1$  esetén ( $K=\eta$ ) a newtoni közeg térfogatáramát leíró (5.78) összefüggés szerinti alakot ölti.

A  $\dot{V}$  térfogatáram ismeretében meghatározható ezúttal is:

- A  $\bar{v}$  átlagsebesség

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{2hb} = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{2n+1} h^{\frac{n+1}{n}}$$

- A  $\dot{\gamma}_f$  falmenti nyírósebesség:

$$\tau_f = K \dot{\gamma}_f^n = h \frac{\Delta p}{l}$$

amelyből

$$\dot{\gamma}_f = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{1}{n}}$$

A  $\dot{V}$  térfogatáram e szempontból célszerűbb alakja:

$$\dot{V} = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{1}{n}} b h^2 \frac{2n}{2n+1}$$

$$\dot{\gamma}_f = \left( \frac{\Delta p}{Kl} \right)^{\frac{1}{n}} h^{\frac{1}{n}}$$

amelyből az (5.108)-al:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{\dot{V}}{bh^2} \frac{2n+1}{2n}$$

### 5.3.3 Bingham féle közeg áramlása kapillárisban

A polimer ömledék áramlási viszonyait elemző fejezet végén nézzük a Bingham típusú ömledék áramlását, az egyszerűség kedvéért ezúttal csak kapillárisban.

A  $v(r)$  sebességeloszlást az (5.9) egyenletből határozhatjuk meg ( $\dot{\gamma} > 0$ ) az (5.42)-t felhasználva:

$$\tau = \tau_h + \eta \frac{dv}{dr}$$

$$\frac{dv}{dr} = \frac{1}{\eta} (\tau_h - \tau) = \frac{1}{\eta} \left( \tau_h - \frac{r\Delta p}{2l} \right)$$

$$v(r) = \frac{1}{\eta} \left( \tau_h r - \frac{r^2 \Delta p}{4l} \right) + c$$

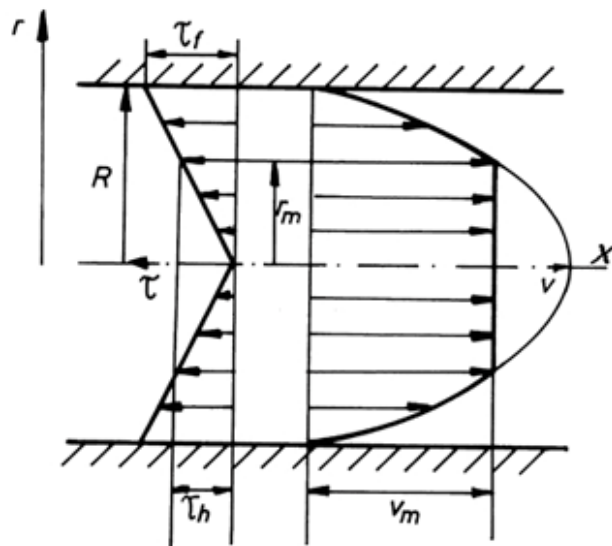
A  $c$  integrálási állandó a faltapadás [ $v(R)=0$ ] feltételéből:

$$c = -\frac{1}{\eta} \left( \tau_h R - \frac{R^2 \Delta p}{4l} \right)$$

Így a végeredmény (feltéve, hogy  $\tau > \tau_h$ ):

$$v(r) = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{\Delta p}{4l} (R^2 - r^2) - \tau_h (R - r) \right]$$

Az (5.115) összefüggés az 5.31 ábrán vázolt sebességeloszlást írja le. Látható, hogy  $\tau > \tau_h$  tartományban az áramlás newtoni, míg az alatt ( $\tau < \tau_h$ ) nincs réteges (lamináris) áramlás, az ömledék  $r_m$  sugárral jellemezhető hányada  $v_m$  sebességgel csúszik! Ez a mag (vagy belső dugó) erősen töltött rendszereknél akár a teljes keresztmetszet 60...80 %-a is lehet! Elmondható, hogy ez a *dugószerű mozgás* a polimer ömledék nagy részénél előfordul, és egyfajta rugalmas viselkedést okoz.



5.31 ábra: A Bingham féle közeg sebességeloszlása kapillárisáramlásban

A  $\dot{V}$  térfogatáram meghatározásához először a mag  $v_m$  csúszási sebességét kell megismernünk.

$r=r_m$  helyen a  $\tau_h$  értéke:

$$\tau_h = r_m \frac{\Delta p}{2l}$$

amit (5.115)-be helyettesítve kapjuk:

$$v_m = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{R^2 \Delta p}{4l} - \frac{r_m^2 \Delta p}{4l} - \frac{r_m R \Delta p}{2l} + \frac{r_m^2 \Delta p}{2l} \right]$$

melyből rendezés után

$$v_m = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r_m^2 - 2r_m R + 2r_m^2) = \frac{\Delta p}{4\eta l} (R - r_m)^2$$

adódik.

A  $\dot{V}$  térfogatáram ebben az esetben:

$$\dot{V} = r_m^2 \pi v_m + 2\pi \int_{r_m}^R r v(r) dr$$

melybe beírva (5.115), (5.116) és (5.118) összefüggéseket:

$$\dot{V} = \frac{(R - r_m)^2}{4\eta} \frac{\Delta p}{l} r_m^2 \pi + 2\pi \frac{\Delta p}{4\eta l} \int_{r_m}^R [R^2 - r^2 - 2r_m(R - r)] r dr$$

adódik.

A kijelölt műveleteket elvégezve – a részleteket ezúttal mellőzve – a  $\dot{V}$  térfogatáram

$$\dot{V} = \frac{R^4 \pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} \left( 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{r_m}{R} \right)^4 - \frac{4}{3} \left( \frac{r_m}{R} \right) \right)$$

Láthatjuk, hogy ha egy kicsit is eltérünk a newtoni viselkedéstől, összefüggéseink egyre bonyolultabbak lesznek, de ezzel egyidejűleg egyre jobban leírják a reális ömledék viselkedését.

## 5.4 Reális polimer ömledékek viselkedése

Az előző, 5.3 fejezetben mindig éltünk azzal a lehetőséggel, hogy a kiindulási sebességeloszlást leíró összefüggéseink meghatározásához feltételeztük valamilyen modell érvényességét. Ha viszont a reális ömledékek áramlását valós körülmények között elemezzük, számos, az ideálistól eltérő viselkedést tapasztalhatunk. Ebben a fejezetben néhány ilyen jelenséget ismertetünk, és adjuk meg magyarázatukat.

### 5.4.1. A folyásgörbe felvétele

Az ömledékreológia egyik alapfeladata a különböző anyagok  $\tau - \dot{V}$  folyásgörbéjének meghatározása a mérhető  $\dot{V} - \Delta p$  adatpárokból. Addig, amíg kapilláris áramlásnál az

erőegyensúlyból meghatározott  $\tau_f = R \frac{\Delta p}{2l}$  összefüggés anyagi minőségtől független, addig a

$\dot{V}$  térfogatáramból meghatározható  $\dot{\gamma}_f$ -ra kapott összefüggéseink (pl. newtoni közegre

$\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3 \pi}$ ) eddig mindig anyagtól (modelltől) függőek voltak.

A feladat tehát egy anyagi minőségtől független összefüggés felállítása  $\dot{\gamma}_f$ -re: A következőkben ismertetésre kerülő gondolatmenetet első publikálója nyomán *Rabinowitsch korrekciónak* nevezik, melynek számos variációja ismeretes. Ezúttal az egyik legegyszerűbbet mutatjuk be.

Kiindulásként írjuk fel a  $\dot{V}$  térfogatáramot kapilláris áramlásra:

$$d\dot{V} = v(r)dA, \text{ ahol } dA = 2\pi r dr$$

$$\dot{V} = 2\pi \int_0^R r v(r) dr$$

Ezek az összefüggések megegyeznek pl. a newtoni közegnél megismert (5.50...5.52) egyenletekkel. Az eltérés a következő lépésben van: a  $v(r)$  sebességeloszlás helyére nem írjuk be valamelyik modell ide vonatkozó eredményét, hanem ezt ismeretlennek tekintjük! Mivel ismeretlen, parciálisan kell integrálni:

$$\dot{V} = 2\pi \left[ \frac{r^2}{2} v(r) \right]_0^R - 2\pi \int_0^R \frac{r^2}{2} dv(r)$$

Az (5.124) egyenlet első tagja zérus  $r=0$  és  $r=R$  helyen is, így a térfogatáramra:

$$\dot{V} = -\pi \int_0^R r^2 \frac{dv}{dr} dr$$

adódik. Felhasználva a  $\tau$  feszültségeloszlásra már megismert (5.41) és (5.42) összefüggéseket, írhatjuk:

$$\tau = r \frac{\Delta p}{2l}, \text{ ill. } \tau_f = R \frac{\Delta p}{2l}$$

melyekből

$$\tau = \tau_f \frac{r}{R}$$

valamint

$$r = \frac{R}{\tau_f} \tau \text{ és } dr = \frac{R}{\tau_f} d\tau$$

fejezhető ki. Figyelembe véve, hogy kapilláris áramlásra  $\dot{\gamma}_f = -\frac{dv}{dr}$ , az (5.125) egyenletet az alábbi alakban írhatjuk:

$$\dot{V} = \pi \int_0^{\tau_f} \frac{R^2 \tau^2}{\tau^2} \dot{\gamma} \frac{R}{\tau} d\tau = \frac{R^3 \pi}{\tau^3} \int_0^{\tau_f} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau$$

A jobb kezelhetőség érdekében (5.129) egyenletet az alábbi alakban célszerű rendezni:

$$\frac{\tau^3 \dot{V}}{R^3 \pi} = \int_0^{\tau_f} \tau^2 \dot{\gamma} d\tau$$

Elvégezve a  $\tau_f$  szerinti differenciálást a Leibnitz szabály szerint (ahol  $\dot{V}$  természetesen függ  $\tau_f$ -től):

$$3\tau_f^2 \frac{\dot{V}}{R^3 \pi} + \tau_f^3 \frac{d\left(\frac{\dot{V}}{R^3 \pi}\right)}{d\tau_f} = \tau_f^2 \dot{\gamma}_f$$

Itt megjelent az anyagi minőségtől független  $\dot{\gamma}_f$ . Elosztva az egyenlet mindkét oldalát  $\tau_f^2$ -tel, és

$\left(\frac{1}{R^3 \pi}\right)$ -t kiemelve írhatjuk:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{1}{R^3 \pi} \left( 3\dot{V} + \tau_f \frac{d\dot{V}}{d\tau_f} \right)$$

Ez elvileg már a végeredmény, melyet a jobb érthetőség kedvéért célszerű más formában is felírni.

Tudjuk, hogy  $\tau_f = R \frac{\Delta p}{2l}$  melyből  $d\tau_f = R \frac{d(\Delta p)}{2l}$ , melyet behelyettesítve (5.132)-be írhatjuk:

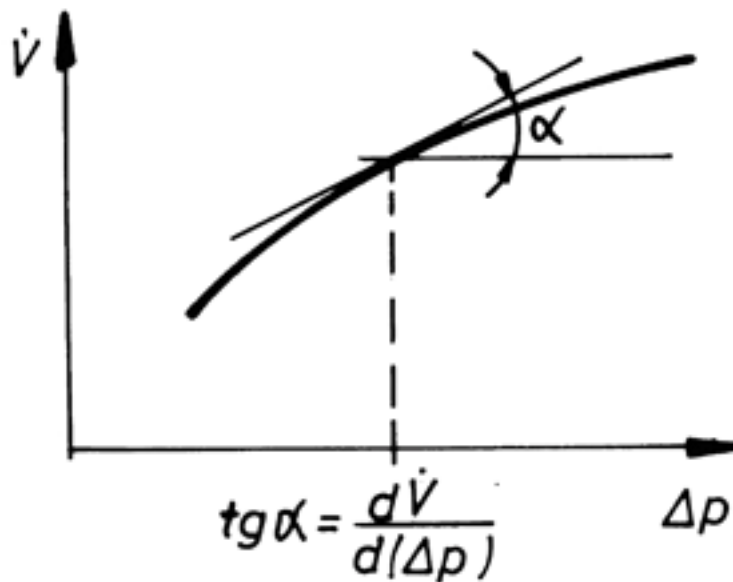
$$\dot{\gamma}_f = \frac{1}{R^3 \pi} \left( 3\dot{V} + R \frac{\Delta p}{2l} d\dot{V} \frac{2l}{R d(\Delta p)} \right)$$

Egyszerűsítve  $R$ -el és  $2l$ -el, kapjuk:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{1}{R^3 \pi} \left( 3\dot{V} + \Delta p \frac{d\dot{V}}{d(\Delta p)} \right)$$

Ez az egyenlet már lehetőséget nyújt a valós  $\dot{\gamma}_f$  meghatározására, hiszen ha megmértem a különböző  $\Delta p$  nyomáskülönbségekhez tartozó  $\dot{V}$  térfogatáramot, az 5.32 ábra szerint a görbe

meredeksége adott  $\Delta p$  esetén épp  $\frac{d\dot{V}}{d(\Delta p)}$ .



**5.32 ábra:** A térfogatáram nyomáskülönbségtől való függésének jellege

A még jobb szemléltetés kedvéért tovább alakítjuk (5.134) kifejezést. Felhasználva, hogy  $d$

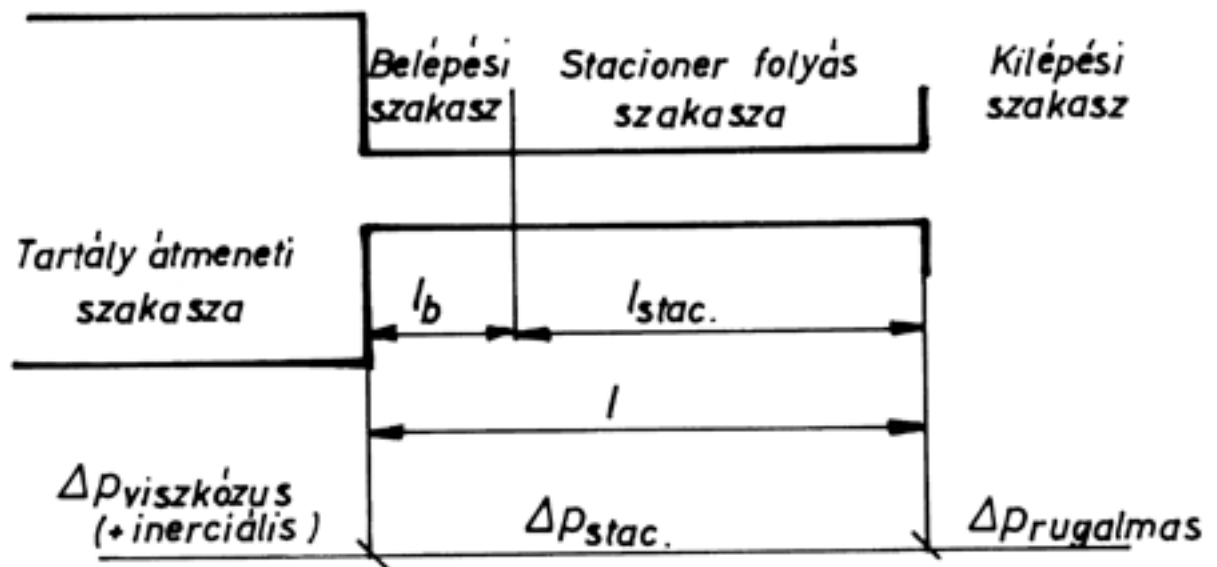
$d\dot{V} = \dot{V} d(\log \dot{V})$ , ill. hogy  $\frac{\Delta p}{d(\Delta p)} = \frac{1}{d(\log \Delta p)}$ , a fal melletti valós  $\dot{\gamma}_f$  nyírósebesség legszemléletesebb alakja:

$$\dot{\gamma}_f = \frac{4\dot{V}}{R^3 \pi} \left( \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \frac{d(\log \dot{V})}{d(\log \Delta p)} \right)$$

$$\frac{4\dot{V}}{R^3\pi}$$

Az (5.135) kifejezésben szereplő  $\frac{4\dot{V}}{R^3\pi}$  mennyiség megegyezik az (5.61) összefüggéssel, azaz a Newton féle ömledék fal melletti nyírósebességével! Jól látható tehát az összefüggés az ideális és a valós viselkedés között.

A Rabinowitsch korrekció alkalmazásával még mindig nem tudjuk a folyásgörbét korrektül felvenni, ehhez tovább kell elemezni a valós áramlási viszonyokat. Az 5.33 ábra jelöléseit használva a kapilláris áramlást az alábbi szakaszokra lehet osztani:

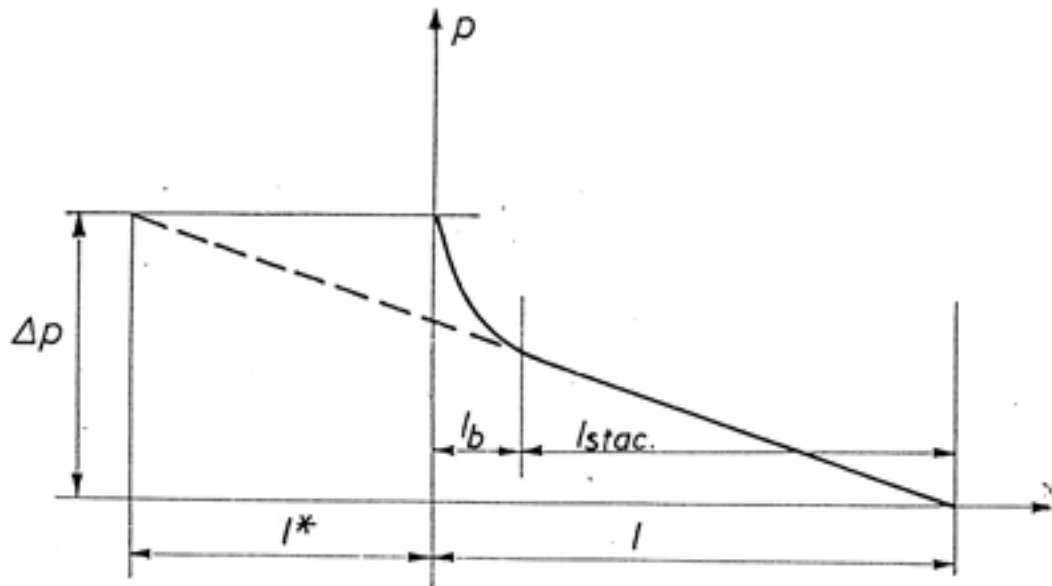


**5.33 ábra:** A kapillárisáramlás szakaszai

- A tartály átmeneti szakasza: A hirtelen nagy átmérőváltozás, valamint az ömledék bizonyos rugalmas tulajdonságai következtében kialakuló jelenségekkel az 5.4.2 fejezetben fogunk foglalkozni.
- A stacioner áramlási szakaszban kialakuló instabil áramlás következményeivel szintén a következő fejezetben foglalkozunk.
- A kilépesi szakaszban kialakuló sebességátrendeződés következményeit is az 5.4.2 fejezetben tárgyaljuk.
- A belépesi szakaszban kialakuló, az ideálistól (ld. 5.23 ábra) eltérő viszonyok figyelembe vétele a folyásgörbe korrekt felvételéhez szükséges, ezért ezt most itt ismertetjük.



A belépési szakaszban a tartályból a kapillárisba belépő ömledékrészecskék az átmérők négyzeteinek arányában felgyorsulnak a stacioner áramlási sebességre. Ez a felgyorsulás energia felvétellel jár, ami azt jelenti, hogy ebben a szakaszban nagyobb nyomásesés jön létre, mint ami a stacioner szakasz konstansnak feltételezett  $\Delta p/l_{stac}$  nyomáseséséből következne. Tekintettel arra, hogy valamennyi eddigi fontosabb összefüggésünkben a konstans  $\Delta p/l$  szerepel, célszerűnek látszik az  $l$  kapilláris hosszt megnövelni az összefüggéseinkben egy akkora  $l^*=\zeta R$  értékkel, hogy ezen az  $l+l^*$  szakaszon már konstans nyomáseséssel lehessen számolni. Az 5.34 ábra jelöléseivel az ú.n. *Bagley korrekció* gondolatmenete a következő:



5.34 ábra: A Bagley korrekció jelölésrendszere

A falnál ébredt  $\tau_f$  nyírófeszültség az (5.41) összefüggés alapján:

$$\tau_f = R \frac{\Delta p}{2(l+l^*)}$$

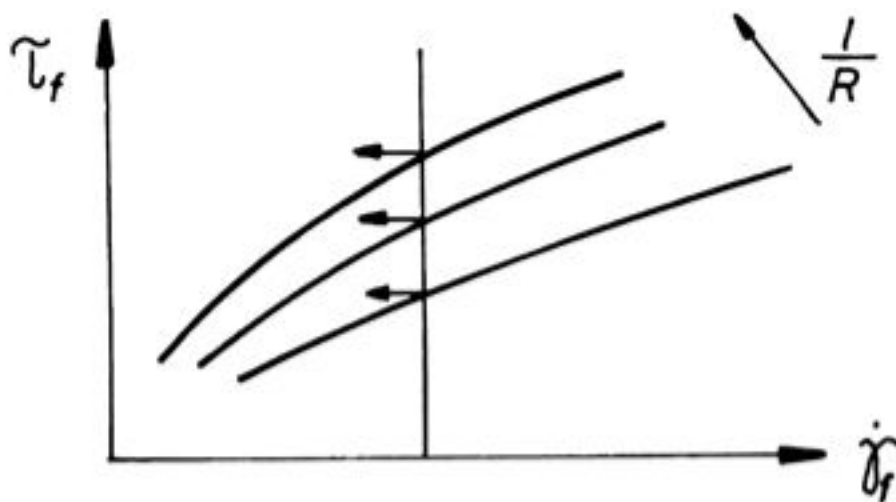
melyet kicsit átrendezve írhatjuk:

$$\tau_f = \frac{\Delta p}{2 \left( \frac{l}{R} + \frac{l^*}{R} \right)}$$

Felhasználva, hogy  $l^*/R=\zeta$ , a  $\Delta p$  nyomásesésre az alábbi kifejezést kapjuk:

$$\Delta p = 2 \left( \frac{l}{R} \right) \tau_f + 2 \xi \tau_f$$

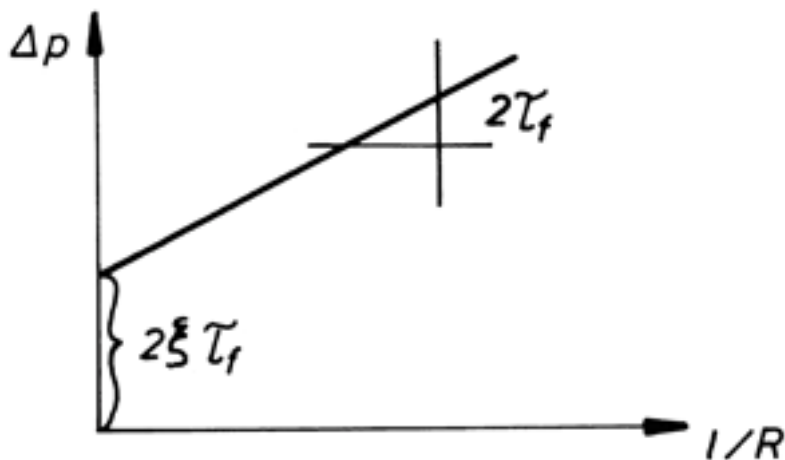
Ha ennek ismeretében különböző  $l/R$  arányú kapillárisokkal felvesszük a folyásgörbét (5.35 ábra), meghatározhatjuk az azonos  $\dot{\gamma}_f$ -hez tartozó  $\Delta p$  értékeket:



5.35 ábra: Az  $l/R$  viszony hatása a folyásgörbére

$$\Delta p = 2 \tau_f \frac{l}{R}$$

Ha ezek után ábrázoljuk  $\Delta p$ - $l/R$  összetartozó értékpárjait, az (5.138) összefüggés szerint egyenest kapunk (5.36 ábra), melynek meredekségéből ( $2\tau_f$ ) és tengelymetszetéből ( $2\xi\tau_f$ ) kiszámítható a keresett  $\xi$  ill.  $\tau_f$  értéke!



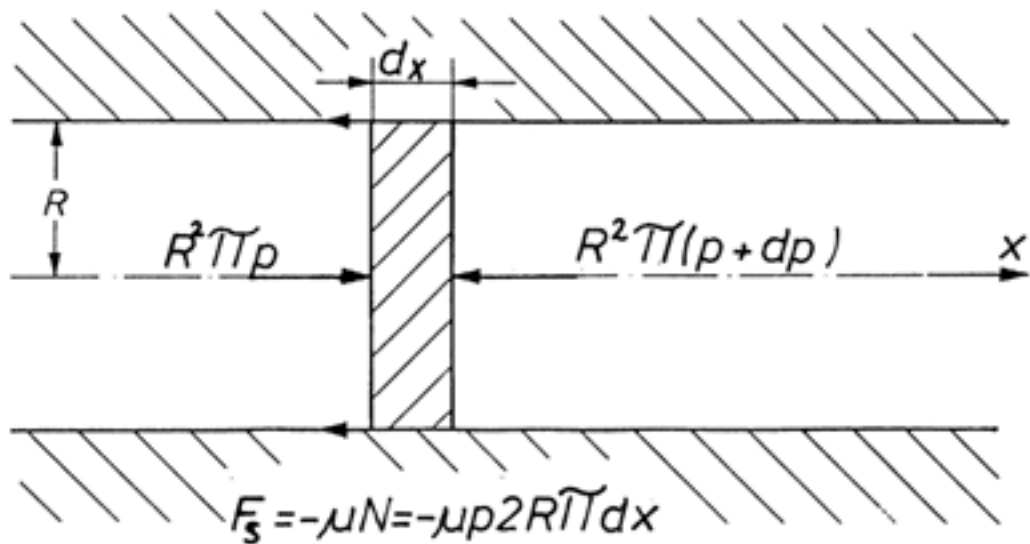
**5.36 ábra:** Az  $l/R$  viszony és az azonos fal melletti nyírósebességhez tartozó nyomáskülönbség kapcsolata

#### 5.4.2 A rugalmas tulajdonságok hatása

A polimerfeldolgozási gyakorlatban számos esetben találkozunk olyan jelenséggel, ami arra utal, hogy a polimer ömledék is rendelkezik bizonyos rugalmas tulajdonsággal. Ha pl. a kapillárisból kifolyó ömledéket kicsit meghúzzuk, majd elengedjük, az többé-kevésbé visszatér eredeti helyzetébe. Vagy ha az ömledékből golyót formálunk, és azt kemény felületre ejtjük, az bizonyos mértékben felpattan. Ez annyit jelent, hogy a polimer ömledékek is rendelkeznek viszkoelasztikus tulajdonságokkal, azaz terhelés hatására – rövid időskálán – képesek energiát tárolni, ami a terhelés megszűntekor részlegesen visszaalakul. A következőkben – amint azt már az előző fejezetben jeleztük – kapilláris áramláson keresztül magyarázunk néhány olyan jelenséget, amit az ömledékek rugalmas tulajdonságával lehet összefüggésbe hozni.

Az 5.32. ábra kapcsán elmondott szakaszokat elemezve a következőket mondhatjuk:

- A tartály átmeneti szakaszában a polimer ömledék hirtelen nagy keresztmetszet változáson megy keresztül, erősen összenyomódik. Ha az ömledékben ébredő igénybevétel (nyomó feszültség) meghaladja az anyag nyomószilárdságát, ún. *olvadéktörés* (lágú törés, melt fracture) lép fel. A kapillárisba történő belépés kör keresztmetszete mentén kialakuló majd továbbterjedő törés eredményeként a kapillárist elhagyó ömledéknek *spirális alakja* lesz.
- A stacioner áramlási szakaszban az áramlás – elvileg – független az időtől. A kapillárist elhagyó ömledék alakját, térfogatáramát elemezve azt kell gondolnunk, hogy ez – sajnos – nem így van. Nem ritkán tapasztalhatjuk ugyanis azt, hogy a kapillárisból kifolyó ömledék felszíne nyugtalan, tömegárama egyenetlen, keresztirányú áramlások miatt alakja teljesen kaotikus, széteső, azaz az áramlás turbulens. Turbulens annak ellenére, hogy az ömledék nagy viszkozitása miatt a kritikus Reynolds számnak még a közelében sem vagyunk. Ezt a jelenséget *rugalmas turbulenciának* nevezik, és magyarázatát az ömledék falhoz való tapadásában, ill. megcsúszásában találhatjuk meg. Eddig ugyanis mindig azt tételeztük fel, hogy a fal mellett ( $r=R$  helyen) a sebesség nulla, azaz a molekulák a falhoz tapadnak. A folyamat alaposabb elemzéséhez használjuk az 5.37 ábra jelöléseit, és vegyük figyelembe a falnál fellépő súrlódást is.



5.37 ábra: Az ömledékelemre ható erők értelmezése

A falnál ébredő  $\tau_f$  feszültségek értékei:

- Tapadás esetén, amikor  $\tau_f$  konstans:

$$\tau_f = \frac{R}{2} \frac{dp}{dx}$$

- Csúszás esetére:

$$\tau_f = \frac{F_s}{A} = \frac{-\mu 2R\pi p(x) dx}{2R\pi dx} = -\mu p(x)$$

ahol  $\mu$  a mozgó súrlódási tényező.

- Egyensúlyi állapotban:

$$\frac{R}{2} \frac{dp}{dx} = -\mu p(x)$$

azaz

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2\mu}{R} p(x)$$

Hasonló eredményre jutunk, ha az erők egyensúlyából indulunk ki:

$$F_1 = R^2 \pi p(x); \quad F_2 = -R^2 \pi p(x+dx) = -R^2 \pi \left[ p(x) + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right];$$

$$F_3 = -\mu p(x) 2R\pi dx$$

$$R^2 \pi p(x) - R^2 \pi p(x) - R^2 \pi \frac{\partial p}{\partial x} dx - \mu 2R\pi p(x) dx = 0$$

Egyszerűsítések után kapjuk:

$$-R \frac{dp}{dx} - 2\mu p(x) = 0$$

amelyből

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2\mu}{R} p(x)$$

adódik. Következő lépésben integráljuk az (5.143) ill. (5.147) egyenleteket:

$$\ln p(x) = -\frac{2\mu}{R} x + c$$

A  $c$  integrálási állandó meghatározásához azt használjuk fel, hogy a kapilláris végén ( $x=l$  helyen) a nyomás  $p_l$ .

$$\ln p_l = -\frac{2\mu}{R} l + c$$

melyből

$$c = \ln p_l + \frac{2\mu}{R} l$$

Visszahelyettesítve ezt (5.148) összefüggésbe, írhatjuk:

$$\ln p(x) = -\frac{2\mu}{R} x + \ln p_l + \frac{2\mu}{R} l$$

Átrendezve:

$$\ln p(x) - \ln p_l = \frac{2\mu}{R} (l - x)$$

azaz

$$\ln \frac{p(x)}{p_l} = \frac{2\mu}{R} (l-x)$$

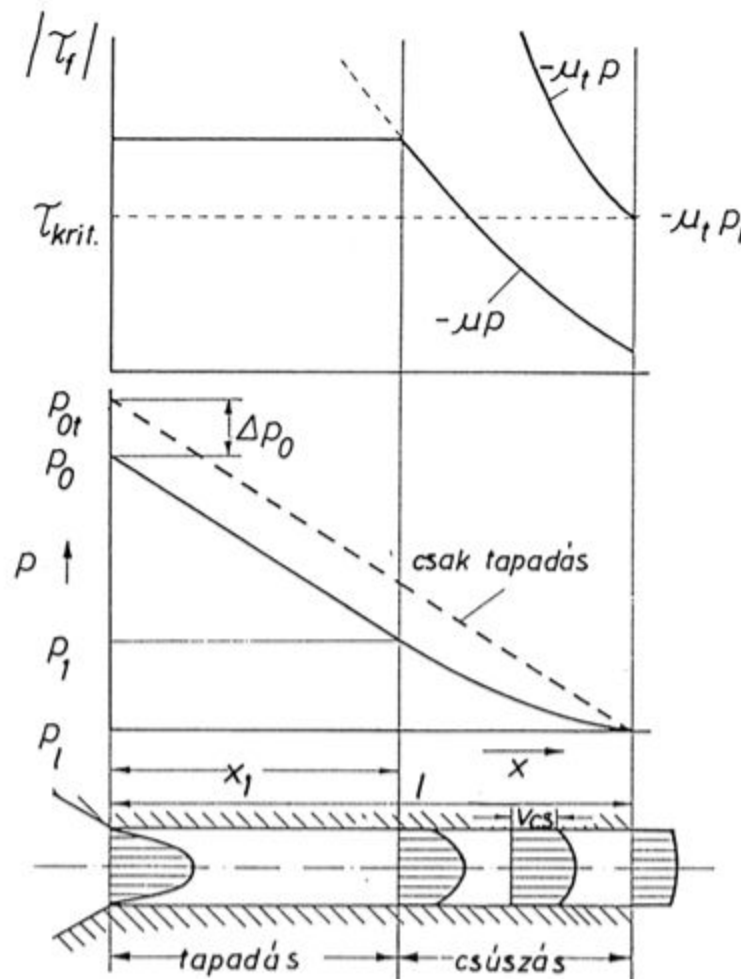
amelyből a végeredmény:

$$p(x) = p_l e^{\frac{2\mu}{R}(l-x)}$$

vagy (5.141) szerint csúszás esetén:

$$\tau_f = -\mu p(x) = -p_l \mu e^{\frac{2\mu}{R}(l-x)}$$

Ez annyit jelent, hogy csúszás esetén a  $\tau_f$  nem konstans, ellentétben a faltapadás esetével! Az  $F_s$  súrlódó erő ( $F_s = -\mu 2R\pi p(x) dx$ ) a kapilláris végétől való távolság  $(l-x)$  növekedésével nő. (5.38 ábra).



5.38 ábra: Tapadás, ill. csúszás a kapillárisban

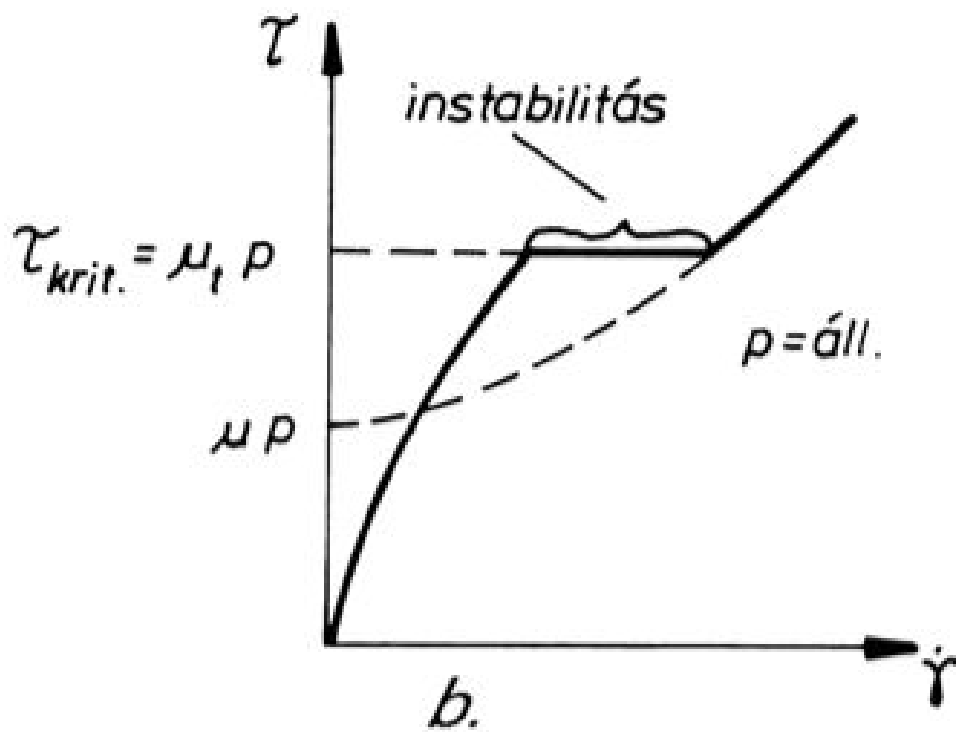
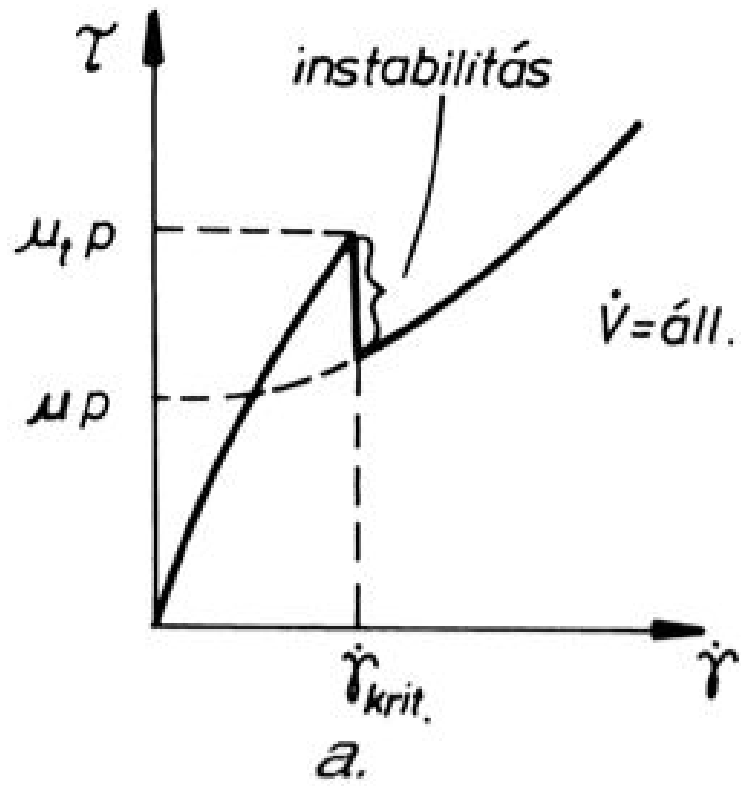
Ez okozhatja azt, hogy a kapilláris végétől távol a súrlódó erő olyan nagy lehet, hogy csúszás már nem tud fellépni ( $x < x_l$ ). Ebben a tartományban a tiszta nyíró áramlással összefüggő  $\tau_f$  (

$$\tau_f = \frac{R}{2} \frac{dp}{dx} \text{ =állandó) kisebb, mint a súrlódó erő leküzdéséhez szükséges nyírófeszültség.}$$

Ezért az ömledék a kapilláris elején ( $0 < x < x_l$ ) hozzátapad a falhoz. Távolodva a belépéstől, a kapilláris vége felé ( $x_l < x < l$ ) a súrlódóerő átlépéséhez szükséges  $\tau_f$  kisebb lesz, mint a tiszta nyíróáramlással összefüggő  $\tau_s$ , és az ömledék megcsúszik a falnál. Ebben a zónában fal melletti csúszással és járulékos nyíróáramlással kell számolnunk.

A gyakorlatban ez annyit jelent, hogy a folyásgörbe felvételénél a következő jelenségeket tapasztalhatjuk:

- Átlépve egy kritikus – a kísérlet során konstansnak tartott –  $\dot{V}$  térfogatáramot, ugrásszerű változás áll be a nyírófeszültségben (5.39/a ábra)
- Túllépve egy kritikus  $\tau$  feszültséget – a kísérlet során a nyomás állandó –, ugrásszerű változás áll be a térfogatáramban (5.39/b ábra).



5.39 ábra: Instabilitási jelenségek



Az előzőek alapján a jelenség magyarázata a következő:

Meg lehet határozni a falnál ébredt nyírófeszültségre egy kritikus értéket (5.141) alapján, amely alatt nem lép fel csúszás:

$$\tau_{krit} = \mu_t P_l$$

ahol  $\mu_t$  a *tapadási* (v. *nyugvó*) *súrlódási tényező* (5.38 ábra). Ha a falnál ébredt nyírófeszültség nagyobb ennél a kritikus értéknél, akkor a kapilláris vége közelében egy labilis tartomány alakul ki. Ebben a zónában az ömledék tapadásból csúszásba megy át, a súrlódási tényező ugrásszerűen változik ( $\mu_{tapadási} \rightarrow \mu_{csúszási}$ ,  $\mu_{álló} \rightarrow \mu_{mozgó}$ ), de hirtelen változás áll be a nyírófeszültségben és a nyomásban is. Ebben az instabil tartományban egyidejűleg lehetséges tapadás ill. csúszás. Ez az ún. *akadozva csúszás* (*stick-slip*) esete, amely a kapillárist elhagyó ömledék nyugtalan áramlását okozza.

Ezek után vizsgáljuk meg, mire tudjuk használni még a gyakorlatban az (5.154) és (5.155) összefüggéseket. Megfontolásainkat – az egyszerűség kedvéért – newtoni közegre korlátozzuk.

- Határozzuk meg azt a kritikus  $x_l$  értékét, ahol a tapadás csúszásba megy át. Tudjuk,

hogy  $\tau_f = \eta \cdot \dot{\gamma}_f$ , melybe  $\dot{\gamma}_f$  (5.61) alatti alakját beírva kapjuk:

$$\tau_f = \frac{4V\eta}{R^3\pi}$$

Felhasználva ezt  $\tau_f$  (5.155) alatti kifejezésénél:

$$\frac{4V\eta}{R^3\pi} = p_l \mu e^{\frac{2\mu}{R}(1-x_l)}$$

Rendezve az egyenletet:

$$e^{\frac{2\mu}{R}(1-x_l)} = \frac{4V\eta}{p_l \mu R^3 \pi}$$

melyből

$$\frac{2\mu}{R}(l - x_1) = \ln \left[ \frac{4V\dot{\eta}}{p_1\mu R^3\pi} \right]$$

adódik, melyet a kívánt alakra rendezve kapjuk:

$$x_1 = l - \frac{R}{2\mu} \ln \left[ \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right) \right]$$

$$\tau_f = \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi}$$

Látható, hogy az összefüggésben szerepel a newtoni közegre érvényes tag is.

• Ezek után meghatározható az  $x=x_1$  helyen ébredt  $p_1$  nyomás is. Az (5.154) kifejezés alapján írhatjuk:

$$p(x_1) = p_1 = p_l e^{\frac{2\mu}{R}(l-x_1)}$$

( $l-x_1$ ) értékét (5.160)-ból kifejezhetjük:

$$l - x_1 = \frac{R}{2\mu} \ln \left[ \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right) \right]$$

melyet behelyettesítve (5.162)-be kapjuk:

$$p_1 = p_l e^{\frac{2\mu R}{R 2\mu} \ln \left[ \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right) \right]}$$

melyből egyszerűsítés után a végeredmény:

$$p_1 = \frac{1}{\mu} \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi}$$

$$\text{ahol } \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} = \tau_f$$

Ha azt akarjuk, hogy a kapilláris teljes  $l$  hosszán csússzon meg az ömledék a fal mentén, akkor az ehhez szükséges  $\dot{V}$  térfogatáram az  $x_l=0$  feltételből az alábbiak szerint határozható meg. Az (5.161) összefüggés alapján:

$$0 = l - \frac{R}{2\mu} \ln \left[ \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right) \right]$$

Átrendezve:

$$\frac{2\mu l}{R} = \ln \left[ \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right) \right]$$

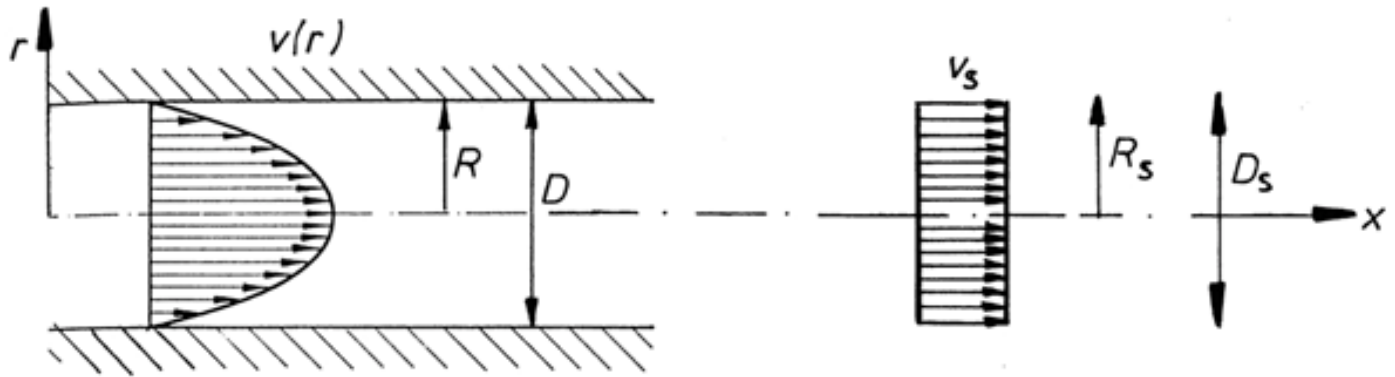
ill.

$$e^{\frac{2\mu l}{R}} = \frac{1}{p_1\mu} \left( \frac{4V\dot{\eta}}{R^3\pi} \right)$$

melyből a végeredmény:

$$\dot{V} = \frac{R^3\pi}{4\eta} p_1\mu e^{\frac{2\mu l}{R}}$$

- A kilépési szakaszban megszűnik az ömledék érintkezése a kapilláris falával (megszűnik a „falhatás”), ennek következtében az 5.40 ábrán látható egyenletes  $v_s$  sebességgel jellemezhetjük a szabad sugár sebességét. A kérdés az, mekkora lesz  $D_s$ , a szabad sugár átmérője.



**5.40 ábra:** Sebesség átrendeződés a kilépési tartományban

Ennek meghatározásához feltételezzük, hogy az ömledékmozgáshoz tartozó, tömegegységre vonatkoztatott átlagimpulzus a kapilláris végén ( $v$  index) és a szabad sugárban ( $s$  index) megegyezik:

$$\bar{I}_v = \bar{I}_s$$

A levezetést az egyszerűség kedvéért Newton típusú közegre végezzük el.

$$\bar{I}_s = \frac{\rho R_s^2 \pi v_s^2}{\rho R_s^2 \pi v_s} = v_s$$

$$\bar{I}_v = \frac{\rho \int_0^R 2r \pi v(r)^2 dr}{\rho R^2 \pi \bar{v}} = \frac{2}{R^2 \bar{v}} \int_0^R r v(r)^2 dr$$

A newtoni közeg sebességeloszlására korábban levezetett (5.64) összefüggést

$$\left( v(r) = 2\bar{v} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \right)$$

behelyettesítve írhatjuk:

$$\bar{I}_v = \frac{8\bar{v}^2}{R^2} \int_0^R \left( r - 2 \frac{r^3}{R^2} + \frac{r^5}{R^4} \right) dr$$

Elvégezve az integrálást:

$$\bar{I}_v = \frac{8\bar{v}^2}{R^2} \left[ \left( \frac{r^2}{2} - 2 \frac{r^4}{4R^2} + \frac{r^6}{6R^4} \right) \right]_0^R = \frac{8\bar{v}^2}{R^2} \left[ \left( \frac{R^2}{2} - 2 \frac{R^4}{4R^2} + \frac{R^6}{6R^4} \right) \right]$$

melyből  $R^2$ -tel egyszerűsítve kapjuk:

$$\bar{I}_v = \frac{4}{3} \bar{v}$$

A két impulzus (5.170) szerinti egyenlősége szerint:

$$\frac{4}{3} \bar{v} = v_s$$

vagy

$$\frac{\bar{v}}{v_s} = \frac{3}{4}$$

Ez annyit jelent, hogy a szabad sugár konstans vs sebessége nagyobb, mint a newtoni közeg átlagsebessége. Ebből az következik, hogy a fal menti ömledékreszeknek fel kell gyorsulniuk erre a  $v_s$  sebességre, ami egy *húzó igénybevétel*t jelent ezen a szakaszon. Ha ez az igénybevétel nagyobb, mint az ömledék húzó szilárdsága, az ömledék a felületén felszakadozik, pikkelyes, hártvás lesz. Ezt a jelenséget nevezik „*cápbőrnek*”.

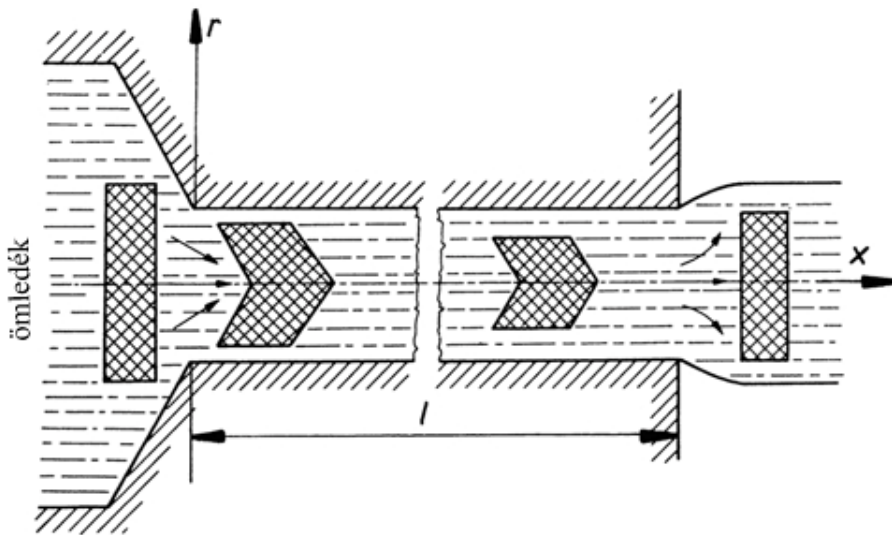
Végül a tömegáramok egyenlőségéből

$$\bar{v} D^2 = v_s D_s^2$$

kapjuk a választ az átmérők viszonyára

$$\frac{D_s}{D} = \sqrt{\frac{\bar{v}}{v_s}} = \sqrt{\frac{3}{4}}$$

Ez annyit jelent, hogy a szabad sugárnak kb. 13 %-al kisebb az átmérője, mint a kapillárisnak, tehát newtoni közeg kilépéskor összehúzódik. Ezt tapasztaljuk pl. ha olaj folyik ki egy csőből. Polimer ömledékek estén viszont épp a newtoni viselkedéstől való eltérés miatt a kapillárist elhagyó ömledék duzzadását figyelhetjük meg. A jelenséget különböző elméletekkel lehet magyarázni, de abban mindegyik megegyezik, hogy az ún. *kifolyási duzzadás* legfontosabb oka az ömledék rugalmas viselkedése. *Mc.Intosh* szerint a kapillárisba belépő ömledék középső zónájában egy dugó csúszik (5.41 ábra), amely a tengelyében ugyan feszültségmentes, de a palástján  $\tau_h$  nyírófeszültség ébred.



**5.41 ábra:** A kifolyási duzzadás szemléltetése Mc.Intosh szerint

Ez a feszültség a kapillárisban való előre haladás során relaxálódhat, de meg nem szűnik, torzítja a dugót, és egy rugalmas nyíródeformációt ébreszt benne. Kilépéskor a feszültség feloldódik, a torzult dugó visszarugózik, az ömledék megduzzad. A gondolatmenet

helyességét látszik bizonyítani az, hogy mindazon hatások, melyek a nagyobb mértékű relaxációt segítik elő, csökkentik a duzzadás ( $D_s/D$ ) mértékét. Így pl. a kifolyási duzzadás csökken:

- o a hőmérséklet növekedésével
- o a kapilláris  $l$  hosszának növekedésével
- o a tartózkodási idő növekedésével
- o az átlagos móltömeg csökkenésével.

## 5.5 Szakirodalom

Gogos C. G., *Principles of Polymer Processing*. SPE- Wiley Int., New York . 1979.  
Pearson J. R. A., *Mechanics of Polymer Processing*. Elsevier. Amsterdam . 1985.  
Pearson J. R. A., *Mechanics of Polymer Processing*. Elsevier. Amsterdam . 1985.  
Middleman S., *Fundamentals of Polymer Processing*. McGraw Hill. New York . 1977.  
Halász L., Molnár I., Mondvai I., *A polimerek feldolgozásának reológiai alapjai*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1978.  
Isayev A. I., *Modelling of Polymer Processing*. (Polymer Processing Society Progress in Polymer Processing.) Hanser. Munich . 1991.  
Agassant J. F., Avenas P., *Polymer Processing*. Hanser. München . 1991.  
Brydson J. A., *Flow Properties of Polymer Melts*. Goldwin. New York . 1987.  
Charier J. M., *Polymeric Materials and Processing*. Hanser. München . 1987.  
Mózes Gy., Vámos E., *Reológia és reometria*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1968.  
Nauendorf W., *Mathematik in der Kunststoff- und Kautschuk Verarbeitung*. Vogel Buchverl., Würzburg . 1992.  
Tadmor Z., Gogos C. G., *Principles of Polymer Processing (Society of Plastics Engineers Monographs)*. J. Wiley. New York . 1979.  
White J. L., *Principles of Polymer Engineering – Rheology*. J. Wiley. New York . 1990.  
Lenk R. S., *Polymer Rheology*. Applied Sci. Publishers. London . 1978.  
Carreau P. J., De Kee D. C. R., Chhabra R. P., *Rheology of Polymeric Systems*. Hanser-Gardner. Munich – Cincinnati . 1997.

## A POLIMER FELDOLGOZÁSTECHNIKA ELŐKÉSZÍTŐ LÉPÉSEI ÉS GÉPEI

### Tartalom

#### [6.1 A száraz keverékek keverőgépei](#)

#### [6.2 Keverés ömledék állapotban](#)

#### [6.3 Granulálás, szárítás](#)

#### [6.4 Szakirodalom](#)

Az alapanyag kiválasztás után, az adott alapanyag ömledék tulajdonságainak ismeretében foghatunk hozzá a polimerfeldolgozáshoz. Mielőtt azonban a tényleges alakadási technológiához – a kalenderezéshez, extrúzióhoz, fröccsöntéshez kezdenénk, rendszerint *be kell kevernünk* az alapanyagba az adott alkatrész számára a feladat ellátásához szükséges *adalékokat*. Ezek egyrészt

- *védő adalékok* (valamilyen hatás ellen):
  - antioxidánsok (oxidáció ellen),
  - stabilizátorok (öregedés ellen),
  - antisztatikumok (feltöltődés ellen),
  - lángállóságot, tűzvédelmet biztosító adalékok,

biostabilizátorok stb., másrészt

- *funkcionális adalékok* (valamilyen növekmény érdekében):

lágýtók,

csúsztatók, feldolgozást segítő adalékok,

antisztatikumok (feltöltődés ellen),

ütésállóságot javító adalékok,

töltőanyagok, (vágott) erősítősálak,

habosítószerke,

térhálósítást indító adalékok,

kristályosodást indító gócképzők,

színezékek, festékek stb.

Egy szokványos műszaki célú PVC cső *recepturája* (összetétele) 6–8 adalékot tartalmaz, egy gumibroncs alapanyag keveréke ennél is többet. Általában: a legritkább esetben használhatjuk fel a kereskedelmi polimer alapanyagot adalékolás nélkül.

A polimer feldolgozási technológiák tipikus előkészítő lépése tehát a keverése. A polimer alapanyagot a rendszerint *granulátum* (2–3 mm-es szemcsék) vagy por alakban hozzák kereskedelmi forgalomba. Az adalékok egy része szemcsés vagy poralakú, de van közöttük sok folyadék, (vagy paszta) halmazállapotú is. A keverés technológiáinak és gépeinek a polimertechnikában két alaptípusa van

- száraz (por) keverékek (dry blend) keverés, és
- ömledék keverés, magasabb hőmérsékleten.

A szobahőfokon kevert száraz porkeveréket a legtöbbször változatlanul, ebben a (*dry blend*) formában adagolják a fröccsöntőgépbe, az extruderbe. A melegen kevert polimer ömledék vagy lehülés nélkül közvetlenül táplálja a feldolgozó gépsort (pl. kalandert) – vagy az elkészült keveréket (újra) granulálni, szemcsézni kell.

A műszaki polimerek értékes alapanyagai rendszerint olyan igényes feldolgozástechnikát követelnek meg, amelyben az alapanyagot pl. granulátum állapotban gondosan meg kell *szárítani*.

A keverés során – amely egyébként a vegyipari technológiák, a vegyipari gépészet egyik legfontosabb művelete – meg kell különböztetnünk két módot:

- *Diszperzív keverés:*



kohezív, összetartó komponensek méretcsökkentésével összekapcsolt intenzív keverés,  
pl.: összetapadt festékpórá bekeverése polimer (pl. PVC) porba (a festékszémek aprításával  
összekötve)

pl. örvény elvű porkeverőben (*fluid mixer*).

- *Disztributív keverés:*

a komponensek méretcsökkentésével nem járó eloszlató, extenzív keverés,

pl.: polisztirol (PS) és polifenilénoxid (PPO) ömledékek keverése kétcsigás extruderben.

A polimertechnikában az adott célra összeállított keveréket „kompaund”nak, (*compound*)  
nevezzük. Pl. az épületgépészeti célú PVC-cső gyártásához minden szükséges adalékot tartalmazó  
keverék ilyen kompaund.

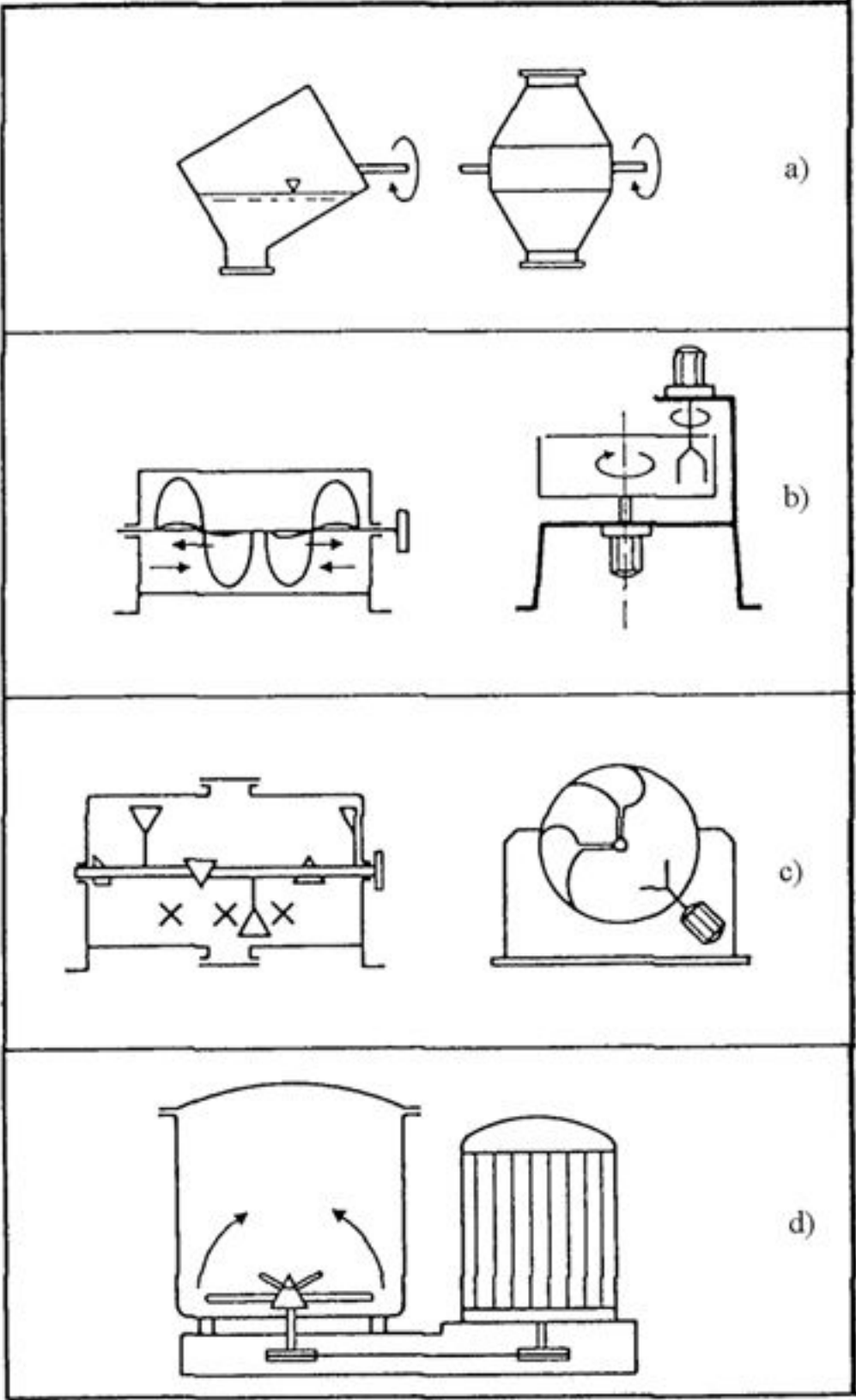
A *blend* kifejezést a célszerűen együttműködő komponensekből álló *polimer-polimer* keverékekre  
alkalmazzák. Pl.: a polisztirol (PS) és a polifenilénoxid (PPO) ömledékben homogén *blendet* képez,  
és úgy viselkedik akár egy homopolimer vagy kopolimer. Ez természetesen feltételezi a  
termodinamikai összeférhetőséget (*compatibility*) – amit később (a 16.4 fejezetben) tárgyalunk.

Az ilyen összeférhetőség elég ritka. Ha mégis társítani akarunk két különböző –  
termodinamikailag összeférhetetlen, – vagyis az ömledékszilárdulás után (akár mikrométerű)  
szétkeveredést mutató – polimert, hogy *ötvözetet* (*alloy*) hozzunk létre, akkor *kompatibilizáló*  
adalékokra, eljárásokra van szükség. Ebben nagy szerepe lehet a különleges, nagyon intenzív  
keverési módszereknek és keverőgépeknek is.

## 6.1 A száraz keverékek keverőgépei

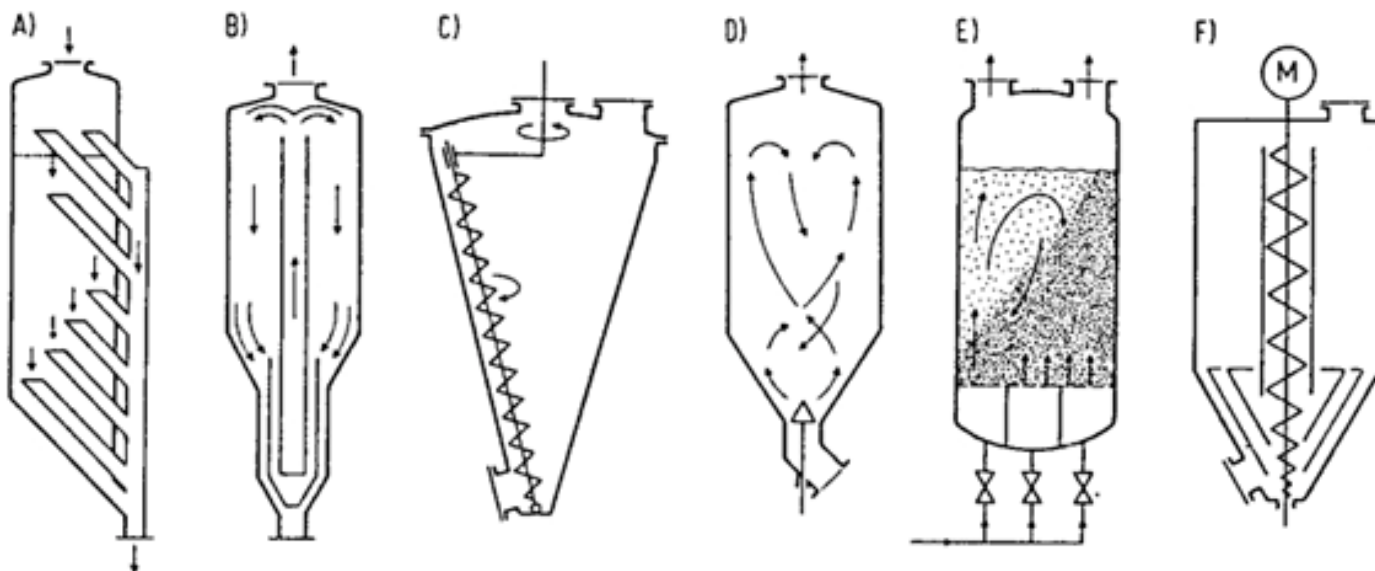
Száraz porok vagy apró szemcsézett (granulált) polimeranyagok összekeverésére felhasználhatjuk  
a gravitációt, a szabadesés hajtóerejét, de felhasználhatunk különféle keverőhatású gépelemeket is.  
Az alaptípusokat a 6.1 ábra mutatja be.

Az egyszerű *eltolás* elvű keverőelemek fordulatszáma lassú 0,1–1/ sec nagyságrendű. A kisebb,  
másodlagos keverőelemek fordulatszáma jóval magasabb. A 6.1 ábra első három géptípusát  
tipikusan a *mesterkeverék* (*masterbatch*) megjelenésű adalékok – pl. színezék – bekeverésére  
használgják. A mesterkeverék az alapanyaghoz hasonló megjelenésű *koncentrátum*: – pl. granulátum  
alapanyaghoz hasonló méretű granulátum mesterkeverék. Így pl. 1 % tömény fekete festéket  
*mesterkeverék* formájában egyenletesen bekeverve a szintelen polimer alapanyagba kifogástalanul  
fekete terméket kapunk.

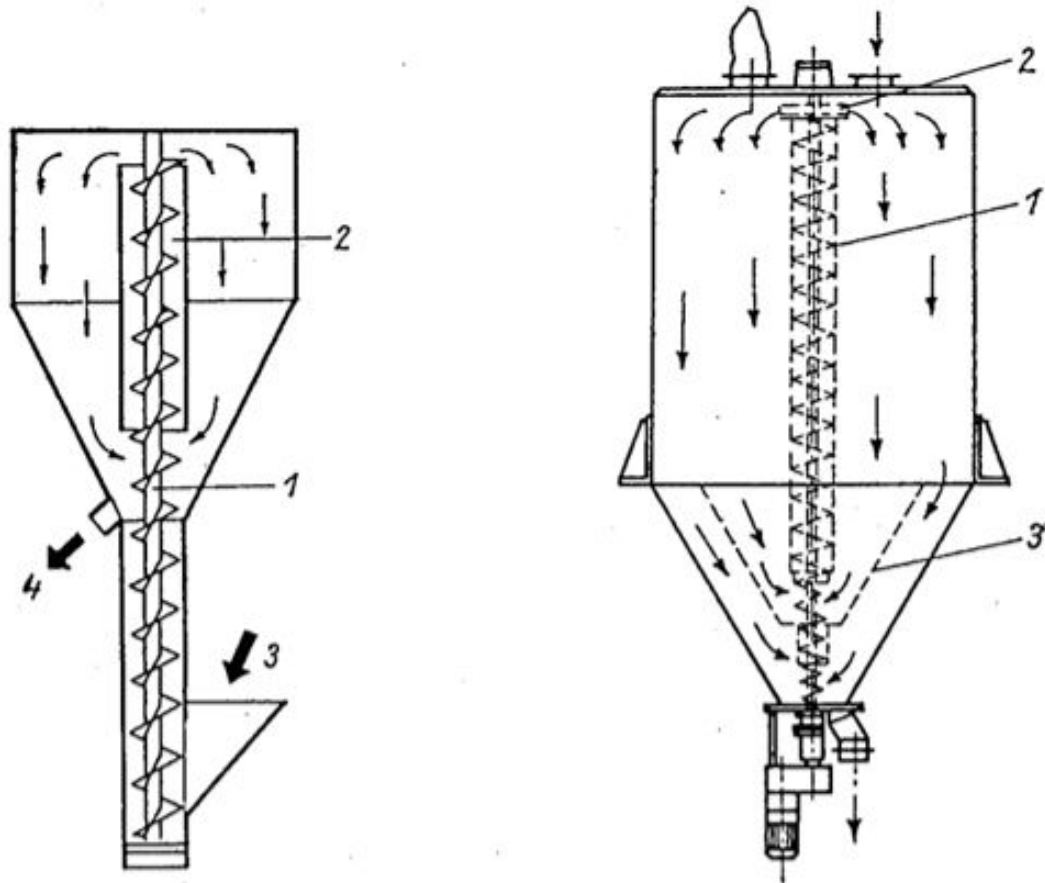


**6.1 ábra:** Száraz porkeverék keverőgép alaptípusok [6.4] a) szabadesés elvű buktatott hordó, b) eltolás elvű keverők, forgó keverőlapát forgatott edényben, c) eltolás és repítés alapelvű fekvő henger keverő, d) repítés (centrifugális) elvű nagysebességű örvény keverő

A száraz keverékek viszonylag lassú keverése nagyobb méretű – több m<sup>3</sup>-es – függőleges hengeres *silókban* is történhet.



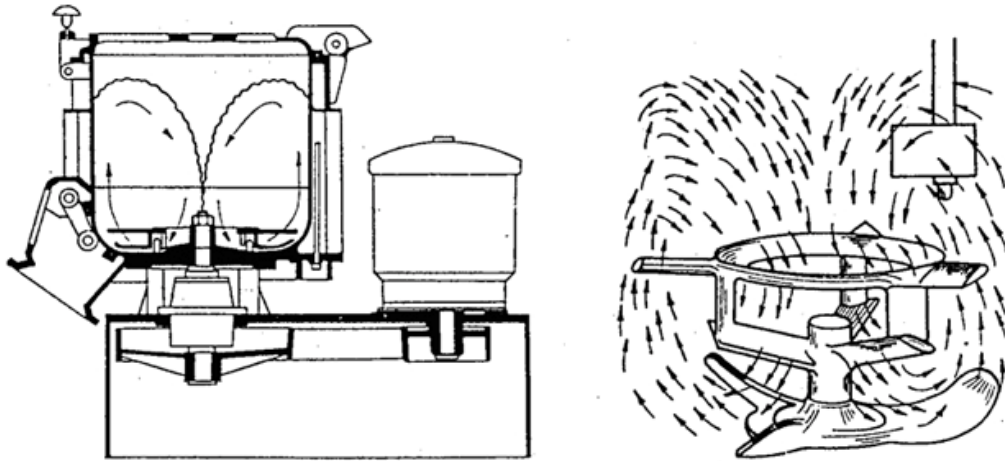
**6.2 ábra:** Száraz porkeverék és granulátum- tároló keverősilók [6.4] A) gravitációs siló – „orgonasíp” keverőrendszer, B) granulátumkeverő pneumatikus átkeveréssel, C) vándorcsigás keverővel ellátott kúpos siló (porhoz), D) sűrített levegővel működő keverő (porkeverékhez) E) örvénylő porkeverés (szitaméret: 0,5 mm), F) függőleges keverőcsigás siló



**6.3 ábra:** Függőleges csigás keverősilók a) alsó- és b) felsőbetöltéssel [6.6]

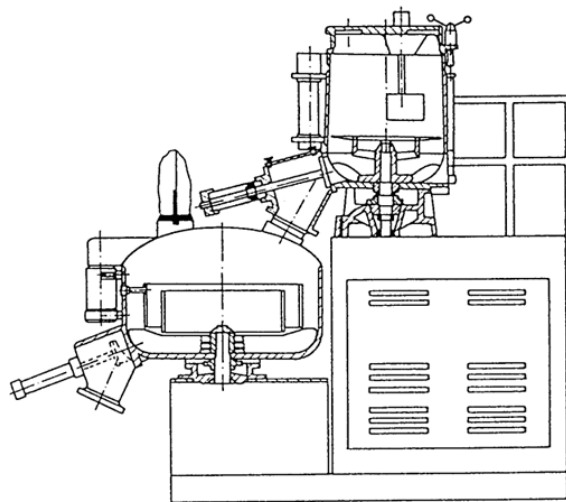
Ezekben a keverés történhet pneumatikus úton vagy mechanikai keverőelemekkel. A 6.2 ábra C) változata például forgó és bolygó mozgást is végző keverőcsigát tartalmaz, amely *felfelé* hordja – és keveri – a siló falánál fellazított anyagot. Gyakran alkalmazott és jól bevált keverő a 6.2 ábra F) típusa, amelynek kétféle változatát valamivel részletesebben a 6.3 ábra mutatja be. Mindkettőben a központi helyzetű csiga egy másodlagos csőben *felfelé* hordja az egyre homogénebb porkeveréket, ill. adalékolt granulátumot. A sikeres keverés előfeltétele, hogy az összekeverendő anyagok mérete és sűrűsége elég közel legyen egymáshoz. Ellenkező esetben a nehezebb komponens óhatatlanul feldúsul a keverőberendezés alján.

A PVC-porból kiinduló száraz porkeverék-gyártás tipikus keverőberendezése a fluid-ágyas *örvénykeverő*. Alapelvét a 6.4 ábra mutatja be.



**6.4 ábra:** Örvénykeverő alapelve és laborméretű (3l) megvalósítása [6.6]

A finom por-jellegű PVC alapanyag és adalékai, amelyek között por-jellegű, és folyadék konzisztenciájú egyaránt található, alkalmasan kialakított nagy fordulatszámú keverőlapáttal olyan nagy sebességű örvénymozgásra kényszerített, hogy a keverék csaknem „folyadék”-jellegű (*fluid*) állapotban „lebegni” kezd. A fordulatszám a kisebb (néhány l) térfogatú laboratóriumi keverőkben 1000 ford./perc feletti, s az ipari méretekben is (1–10 m<sup>3</sup>) 50 m/s kerületi sebességű a keverés. A porszemcsék (és az adalékok) *súrlódása* ilyen körülmények között 5–10 percen belül szobahőfokról mintegy 100 °C-ra melegíti fel a keveréket, ami éppen azt segíti elő, hogy a különféle adalékok (amelyek között folyadékállapotú lágyítók, alacsonyan olvadó csúsztatóanyagok, stabilizátorok, antioxidánsok stb. is vannak) bediffundáljanak a PVC por szemcséjébe, – és az ezután következő feldolgozási lépésben homogén módon eloszoljanak. Az eljárás *szakaszos* keverés.



**6.5 ábra:** Kétfokozatú örvénykeverő porkeverékek üzemi méretű gyártásához [6.1] Felül: forró keverő, terelőlapát, ürítőnyílás, meghajtás Alul: hűtő-keverő, ürítőnyílás

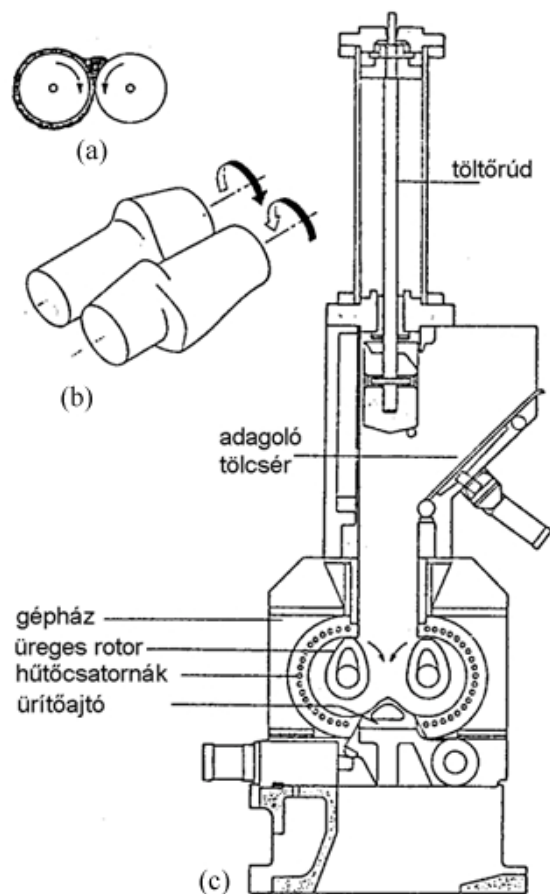
Az örvénykeverők (*fluid* keverők, gyorskeverők) ipari kivitelezésénél a gépészeti berendezés (6.5 ábra) tipikusan kétszintes, hiszen a gyors keverés fő berendezése akár 10 m<sup>3</sup>-es álló henger is lehet – amely természetesen nincs *teletöltve* PVC por anyaggal alapállapotban, hiszen a pornak fel kell lazulnia. A tipikusan 1 kW/m<sup>3</sup> fajlagos teljesítményű meghajtás 50 m/s kerületi sebességgel ipari körülmények között is gyors felmelegedést okoz a súrlódó porszemcsék között (~10 perc alatt ~100–120 °C-ra). Az ipari méretű megvalósításban is szakaszos a művelet. Ekkora adag (pl. 5 tonna) forró keverék azonban kezelhetetlen masszává állna össze egy második lépcsőben beiktatott *hűtő*-keverő nélkül. Az alsó szinten működő, rendszerint 2 adag befogadására méretezett hűtő keverő sokkal lassabb fordulató, kettős falú (hűtött) edényből áll, amelynek arányai is eltérőek (nagyobb átmérőjű, kisebb magasságú). Ebben a kb. 40 °C-ra visszahűtött PVC „száraz keverék” már jól kezelhető, nem liszt-jellegű, de alkalmasan morzsalékos ahhoz, hogy közvetlenül betáplálhassuk pl. a PVC csőgyártó extruderbe vagy csőkötést (*fitting*) gyártó fröccsöntőgépbe.

## 6.2 Keverés ömledék állapotban

A polimerek és adalékaik bensőséges, homogén elkeverésére előbb vagy utóbb képlékeny (plasztikus) állapotba kell hoznunk az anyagot. A megömlesztett állapotban keverő berendezéseknek két alaptípusa van:

- szakaszos és
- folytonos működésű.

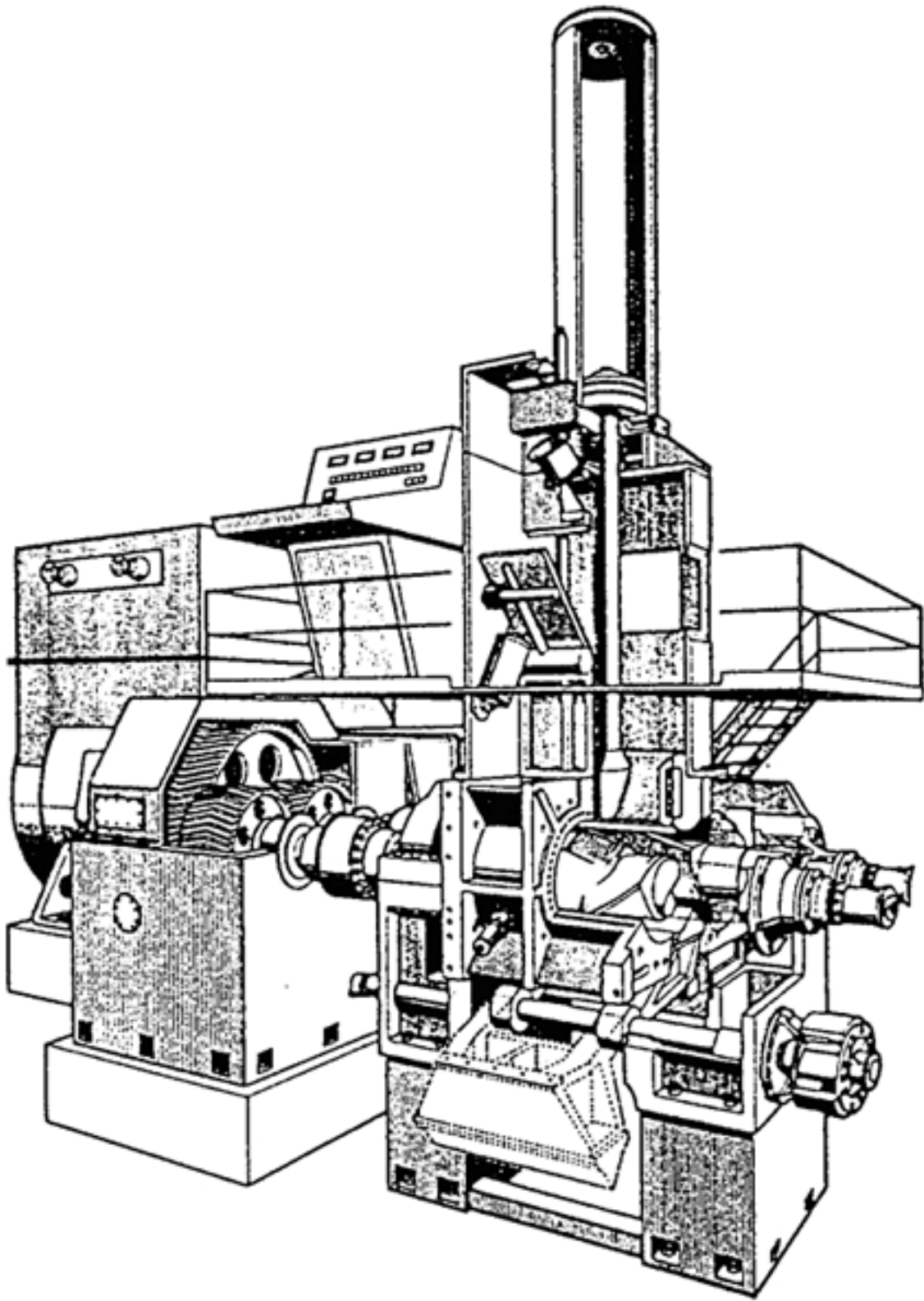
A szakaszos működésű, ömledékállapotban keverő berendezések a korai gumiiparban alakultak ki, de ma is nélkülözhetetlenek pl. a gumia-broncs-gyártásban.



**6.6 ábra:** Banbury-típusú belső keverő viszkózus polimer ömledék diszperzív [6.1] keveréséhez  
(l. 6.7 ábrát is) a) alapelv: szemben forgó hengerek, b) Banbury henger, c) belsőkeverő

Alapvető gépük a *hengerszék* (6.6 ábra, a) vázlat), amely két közeli (de nem érintkező) egymással szemben forgó fűtött henger, kissé eltérő (pl. +10 %) fordulatszámmal. Ebből fejlődött ki a polimer *lemezhengetés*, a *kalanderezés* technológiája, amelynek külön fejezetet szenteltünk (7. fejezet).

Az u.n. *Banbury* típusú *belső keverő* (6.6 ábra) alapvető keverő gépeleme ugyancsak egymással szembeforgó, fűthető-hűthető, „bütykösre” módosított formájú hengerpár, amely fűthető-hűthető, fekvő 8-as keresztmetszetű házban forog. A lassú fordulatú (pl. 1 ford./sec) keverés tulajdonképpen gyúrás, dagasztás, – hasonlóan a kenyértészta homogenizálásához (*Kneter*, *kneader*). Ez is szakaszos művelet, és rendkívül energiaigényes.

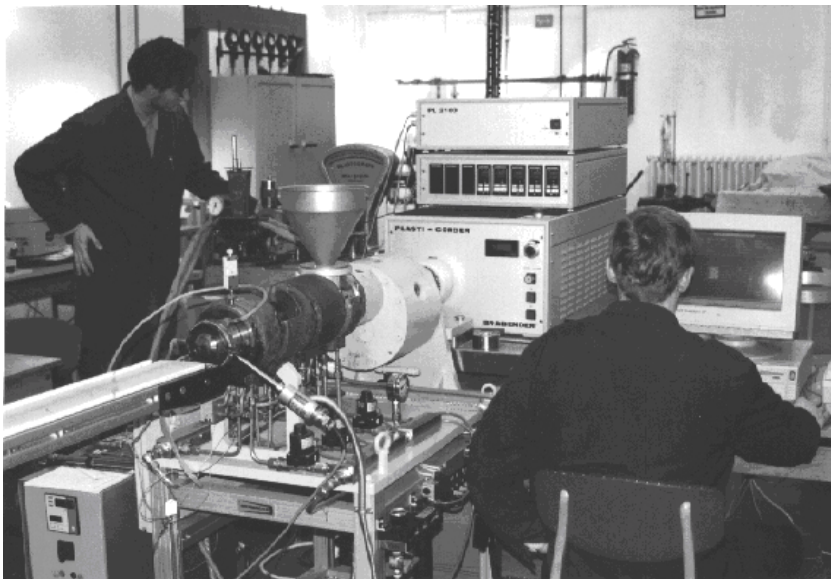


6.7 ábra: Kétszintes Banbury keverő 3D képe [6.3] Hasznos térfogat:  $\sim 1 \text{ m}^3$  (l. 6.6 ábrát is)



A 6.7 ábra ipari kivitelű keverőjéből megítélhetjük a hajtómű és a motor arányait is. Ez is kétszintes berendezés, néhány t/óra kapacitással, tipikusan gumikeverékek homogenizálására.

A belső keverő gyűrőelemeinek változatos formáira hasonlítanak, azt modellezik a Brabender PLASTOGRAF gyűrőkamrái is. Ez az univerzális laborgép a polimerfeldolgozó laboratóriumok nélkülözhetetlen vizsgáló (– és félüzemi gyártás modellező –) eszköze. A gyűrőkamra itt tipikusan 30–300 g befogadására alkalmas térfogatú, fűthető, és *méri* az egymással szembeforgó gyűrőelemek meghajtásához szükséges energiát, a *forogónyomaték* mérése útján.

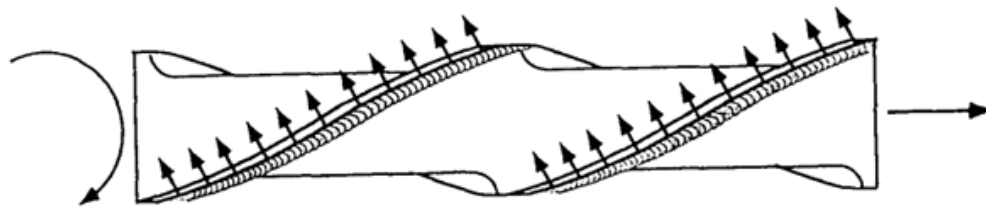


**6.8 ábra:** A BME Polimertechnika és Textiltechnológia tanszék Brabender PLASTOGRAF-ja (háttérben: gyűrőkamra, előtérben: extruder)

A laboratóriumi gyűrőkamra működése is szakaszos, és itt is hasonló gyúrési időkre van szükség, mint az ipari gyűrőkeverőkben. Az ömledék kívánt homogenitásának megközelítését az jelzi, hogy a gyúrési nyomaték görbéje egy gyorsan elért maximum után néhány perc alatt egyensúlyi minimumot közelít meg.

A polimer ömledékek keverésének korszerű,  *folyamatos* műveleti megoldása az extruder extrudercsiga alapelvét hasznosítja. Az extrudert, mint alapgépet a rúdsajtolás, a csőgyártás, a profil-és lemezgyártás legfontosabb berendezését, és annak elméleti hátterét is részletesen tárgyalni fogjuk (8. fejezet).

Az extrudercsiga, mint az ömledékkeverés gépeleme tehát határozott menetirányszárny szélességű *csavarorsó*, amely jól illesztett fűtött hengerben forog.



nagy menetemelkedésű csiga diszperzív keveréshez

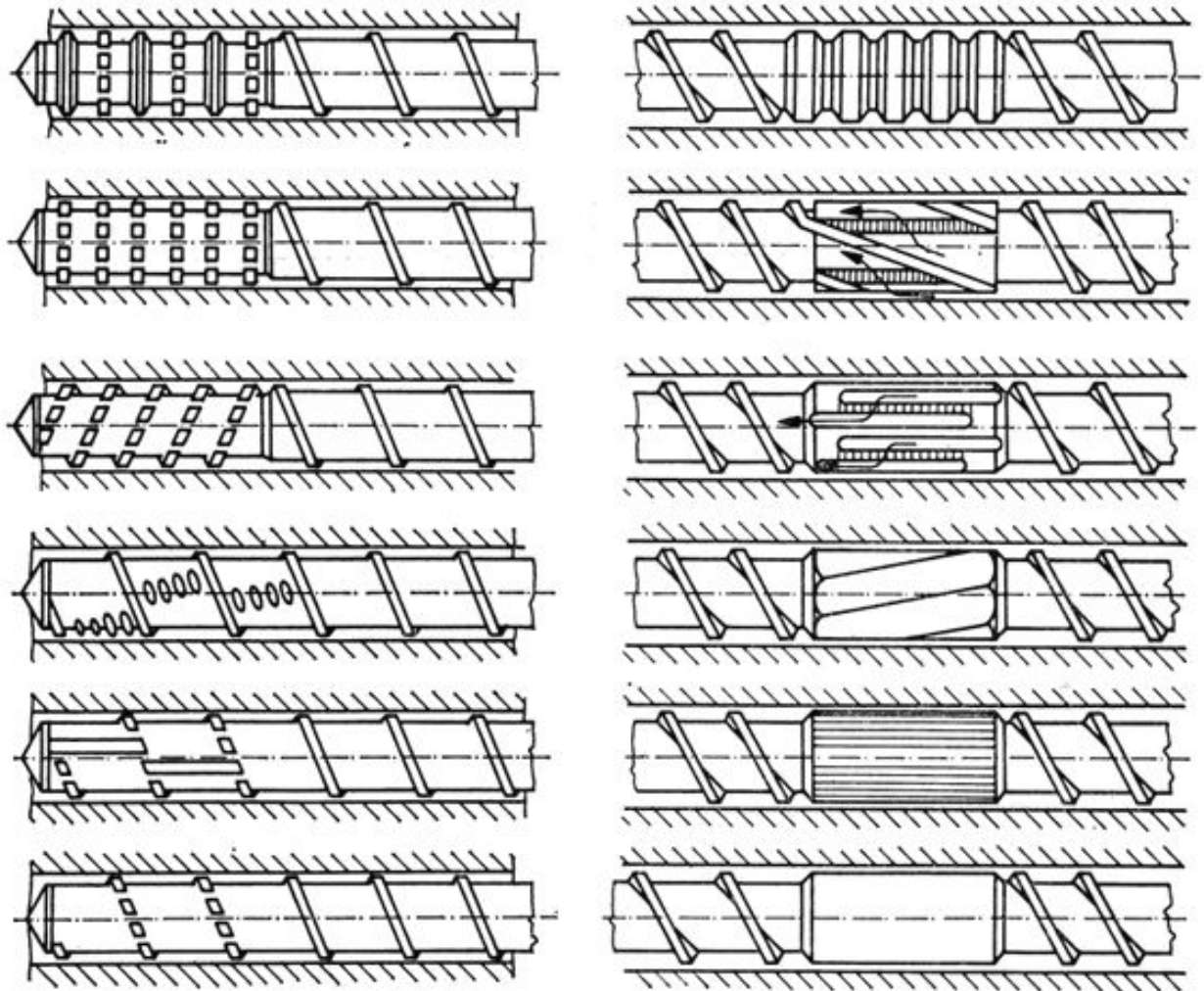


kis menetemelkedésű csiga disztributív keveréshez

**6.9 ábra:** Egycsigás extruder csigája, mint ömledék-keverő gépelem Fenn: nagy menetemelkedés – diszperzív keverés Lenn: kis menetemelkedésű – disztributív keverés

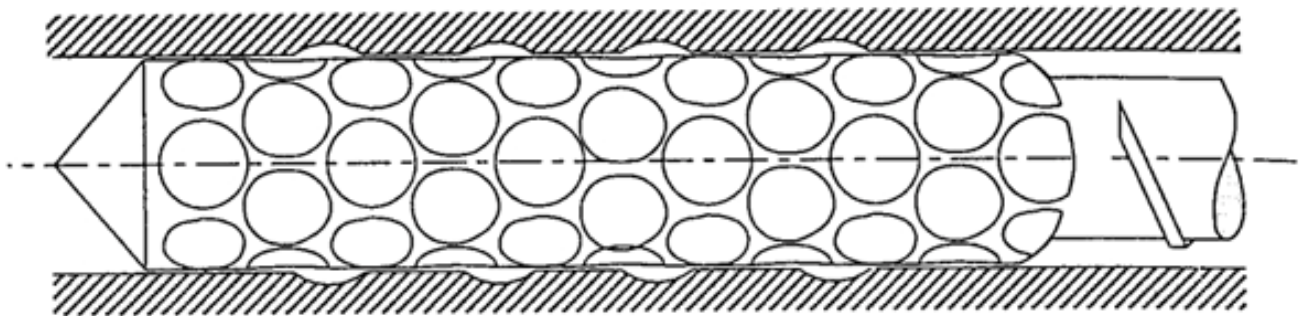
A menetemelkedéstől nagymértékben függ a keverés jellege. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a tipikus extrudercsigáknál, amelyek hosszúsága az átmérő 20–30-szorosa, a menetemelkedés egy fordulatra tipikusan azonos az átmérővel. A 6.9 ábrán látható, hogy ennél nagyobb menetemelkedés jellegzetesen (csak) diszperzív keverést eredményez, míg ennél sűrűbb menet (kisebb menetemelkedés) már bensőséges, disztributív keverést ad.

Az egycsigás extruderek keverési hatékonyságának növelésére természetes számos más megoldás is adódik. A 6.10 ábra ilyen keverőelemeket mutat be. Ezek a rövidebb szakaszok váltakozva, ismételten is megjelenhetnek az itt is  $L/D \sim 20$  hosszú extrudercsigán, és lelassítják, vagy felgyorsítják, „megtörik”, turbulenssé teszik az ömledékáramot, sőt, helyenként vissza is fordíthatják azt átmenetileg. Az áramlási képet befolyásoló gépelemeket (pl. tüskét) maga a befoglaló henger is tartalmazhat. A keverőextruder csigájának végső szakaszában pl. sikerrel alkalmazzák a hengeren és a csigán egyaránt megjelenő gömbszeletekből kialakított *cavity transfer* (üreges anyagvitel) rendszerű csiga-megoldást. (6.11 ábra).



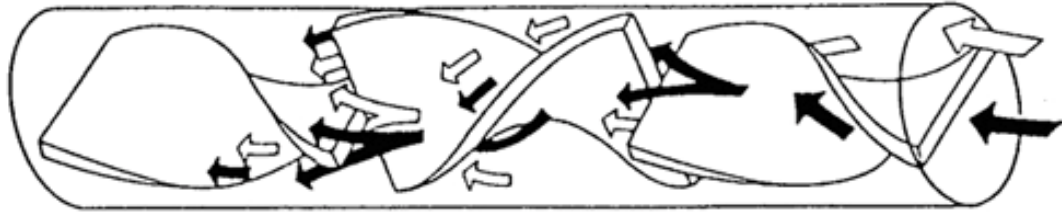
**6.10 ábra:** Különféle keverőelemek egycsigás keverőextruder csigáján [6.1]

Inkább csak az érdekesség kedvéért említjük meg, hogy az ömledékáramot fűtött csőben keverőhatású csiga- ill. hullámmozgásra kényszeríthetjük anélkül is, hogy a fűtött henger mozgó gépelemet tartalmazna. (6.12 ábra).



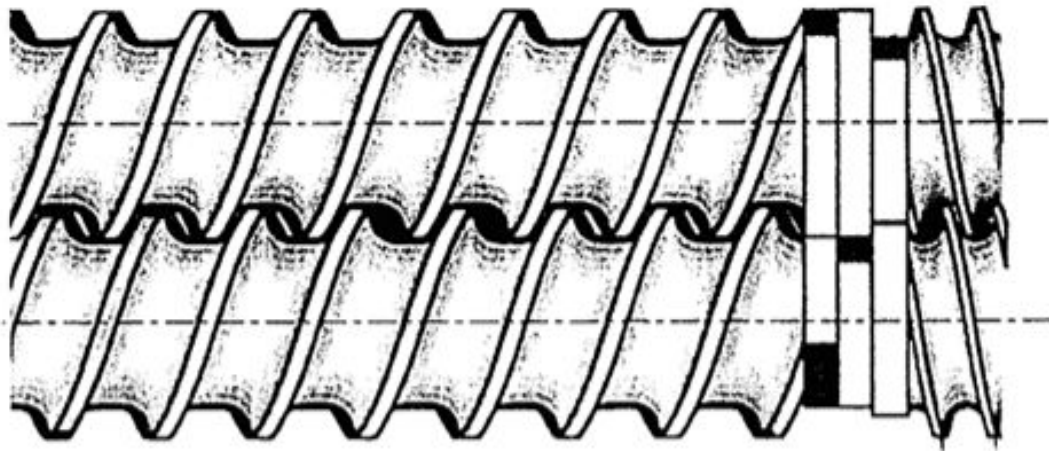
**6.11 ábra:** Gömbszeletes keverőelem egycsigás keverőextruderén (cavity transfer mixer) [6.7]

A statikus keverő alapelvét a 6.12 ábra mutatja be. Ennek gyakorlati jelentősége azonban egyenlőre csekély a polimertechnikában.



**6.12 ábra:** Statikus keverő ömledékáram keverésére [6.4]

Az extruder alapelvű keverőberendezés homogenizáló hatásfokát a csiga megkettőzésével lehet nagymértékben fokozni. A kétszigás keverőextruder alapelvét a 6.13 ábra mutatja be.



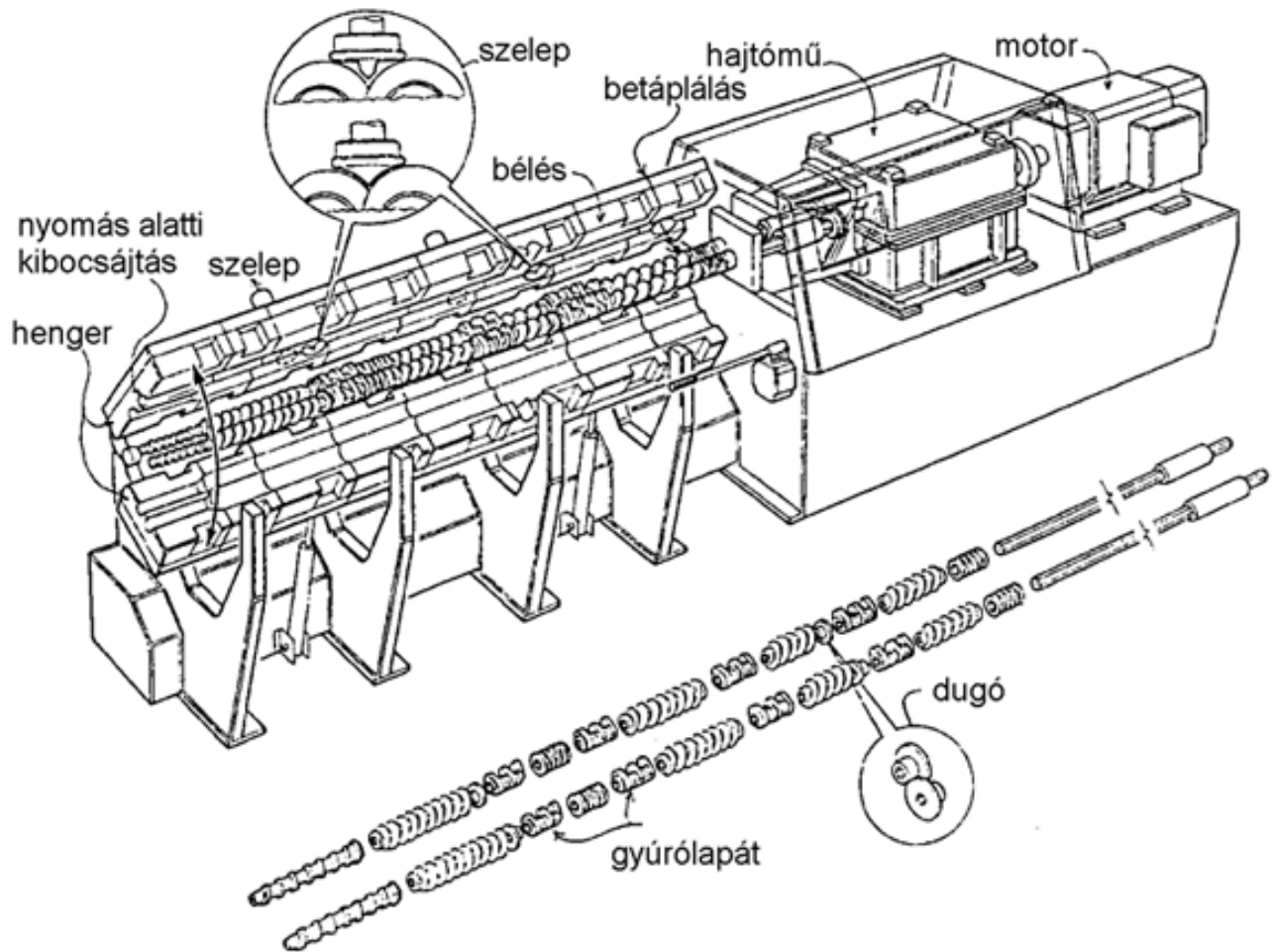
**6.13 ábra:** A kétszigás keverőextruder alapelve [6.5] (egymásba hatoló menetszárnyak esetén)

Ahogy a Banbury keverő két eleme, ezek az ikerszigás extruder keverők is (*twin-screw extruder, Doppelschnecken-extruder*) fekvő 8-as keresztmetszetű, fűtött házban működnek, alapvetően kétféle elrendezésben:

- egymást nem érintő és
- egymásba hatoló (*intermeshing, Kämmand*) menetszárnyakkal. Mindkét esetben kialakíthatunk
- azonos irányban forgatott és

- egymással szemben forgó csigákat, ahol az első esetben nyilvánvalóan nagyobb nyíró igénybevétel adódik, a második esetben pedig hatékonyabb (és kíméletesebb) anyagtovábbítás.

A kétcsigás keverőextruder, amelynek ipari méretű kivitelét 3D ábrázolásban a 6. 14 ábrán láthatjuk, abban különbözik az egycsigás extruder elrendezéstől, hogy itt az összetett hengert hosszirányban kettéhasítva teszik nyithatóvá és így a berendezést hozzáférhetővé, tisztíthatóvá.



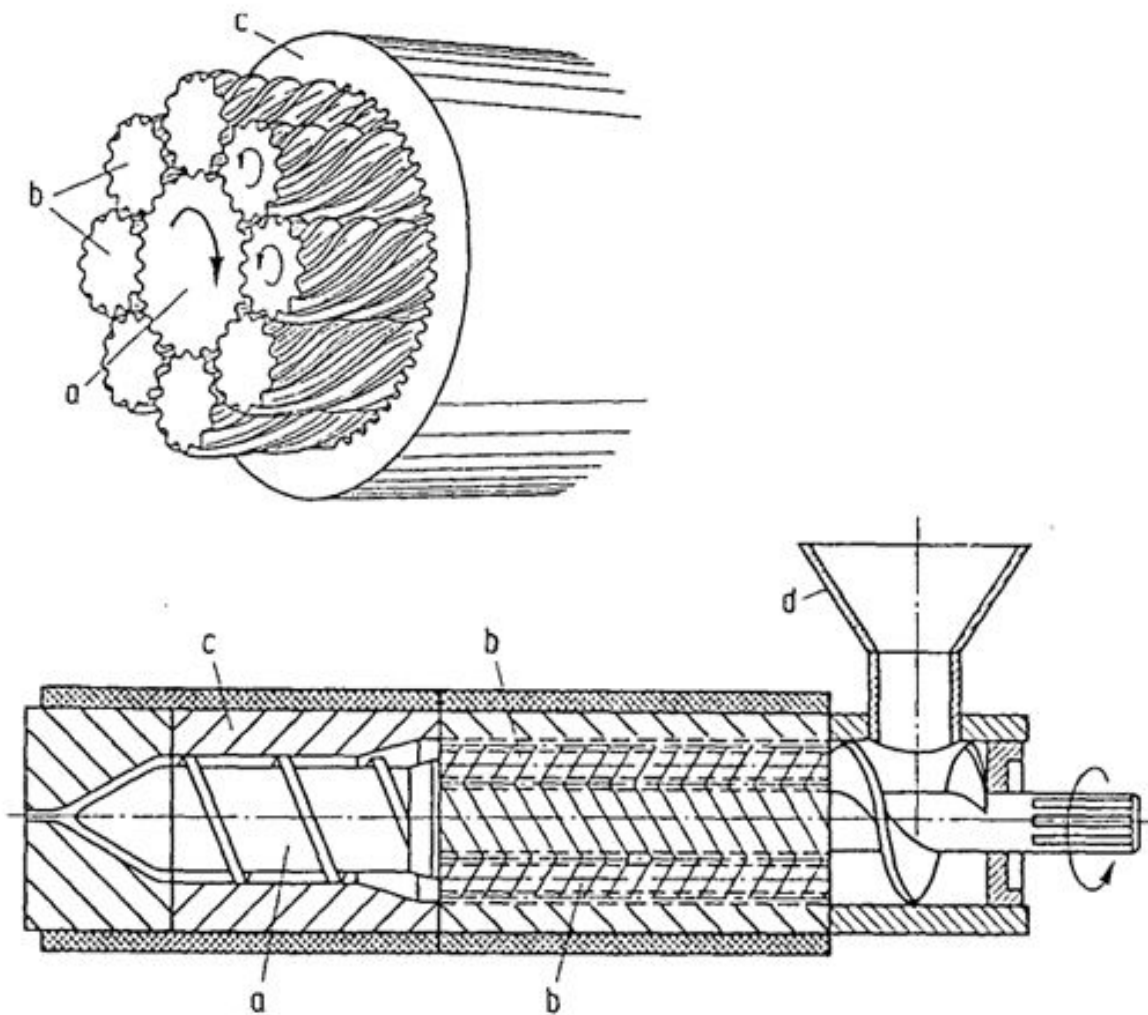
**6.14 ábra:** Kétcsigás keverőextruder 3D képe [6.8]

A kétcsigás extruder – az egycsigás extruderhez hasonlóan – nemcsak keverő funkciót ellátó, hanem önálló feldolgozó gép is. További változatairól a 8. fejezet szól.

Az extrudercsigák összetett alkalmazásának és így a keverési hatékonyság megsokszorozásának kitűnő példája az ún. bolygócsigás keverőextruder (6.15 ábra).

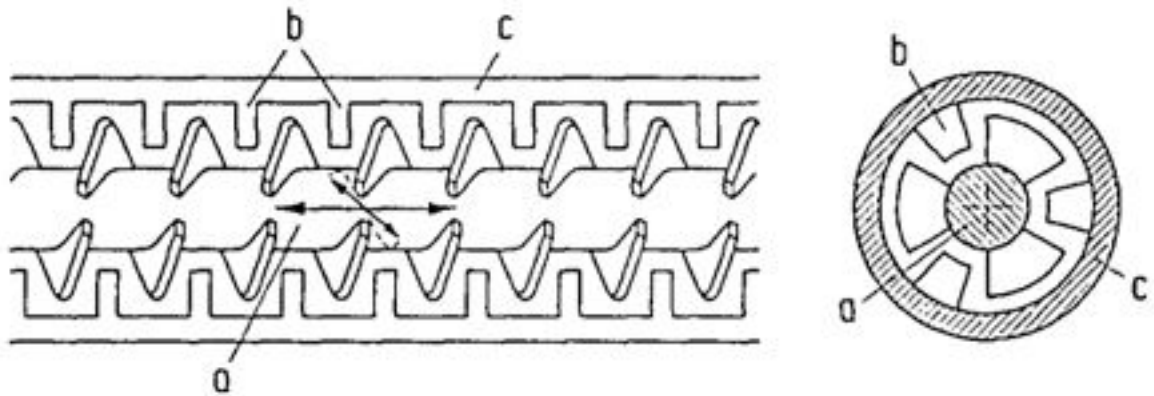
Ebben egy központi helyzetű extrudercsigát az adott esetben 8 kisebb csiga úgy vesz körül, hogy a központi csiga minden kis csigával kényszerkapcsolatban forog, és a kis csigák ugyanígy

kényszerkapcsolatban vannak a fűtött külső hengerrel. Az ömledék nyilvánvalóan intenzív keveredésnek van alávetve, különösen a kis csigák közötti nagy nyírású térben. Ilyen bolygócsigás keverőextruderrel például igényes, átlátszó PVC lemezanyag készíthető gyógyszeripari tabletták „átnyomó” csomagolása számára.



**6.15 ábra:** Bolygócsigás keverőextruder alapelve, elrendezése [6.4] a) főcsiga, b) bolygócsigák, c) a bolygócsigák háza, d) betáplálás

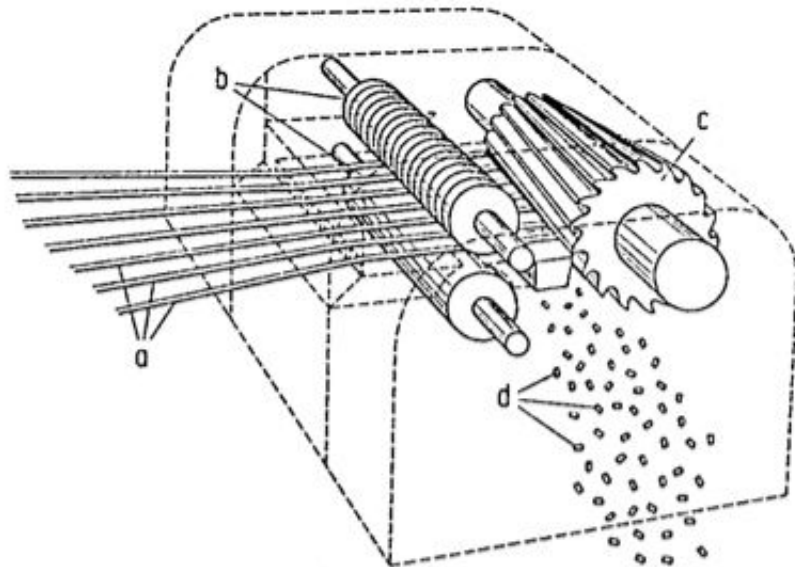
Az extrudercsiga keverő hatását eredeti ötlettel fokozták fel az ún. *ko-knéter*-ben. Ennek lényege egy olyan extrudercsiga, amely nemcsak forgó mozgást, hanem eközben kismértékű *tengelyirányú* előre-hátra mozgást is végez, hogy 120 °-onként megszakított menetszárnyai „kikerüljék” a henger palástján (belül) beépített keverő-fogakat. (Az alapelv a 6.16 ábrán látható.) A *ko-knéter* (kompaundáló gyúrógép) rendkívül hatásos ömledékkeverést biztosít.



**6.16 ábra:** A ko-knéter működési elve [6.2] a) csiga, amely a forgás mellett himba-mozgást is végez, b) keverő-fogak, c) henger

### 6.3 Granulálás, szárítás

A folyamatos üzemű ömledékkeverő extruderből kijövő polimer szemcsézésére, *granulálására* többféle technológia használatos. A legegyszerűbb granuláló alapelvét a 6.17 ábra mutatja. Az extruderből kijövő, még viszkózusan képlékeny polimert 2–3 mm átmérőjű „zsinórok” formájában rendszerint vízfürdőn áthúzva lehűtik (megszilárdítják), majd szemben forgó késes hengerrel felaprítják. Az aprítás kiindulhat lemezről is, amelyet előbb csíkokra vágnak, majd hasonló késes hengerrel felaprítják. Mindez történhet körgyűrű (cső) mentén is.



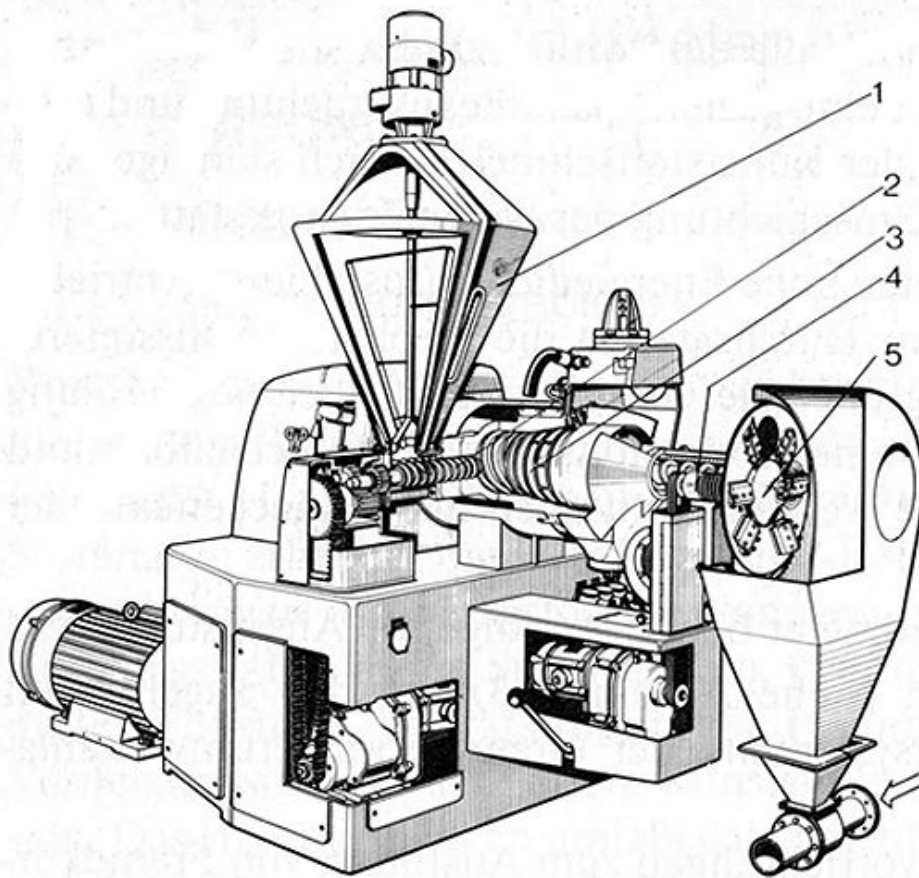
**6.17 ábra:** A granulálás alapelve [6.4] a) extrudált zsinórok, b) behúzó hengerek, c) szembeforgó késes henger, d) granulátum szemcsék

Az ömledékkeverés és a *kompaund* aprítása történhet többszörösen összetett, folytonos üzemű berendezéseken is, amire példát a 6.18 ábra mutat. Ebben a keverés kétcsigás keverőextruderen indul, majd ezt az ömledékáramot 90 °-os irányban egy kúpos tárcsás nyíróelemben újra megkeverik, egy egyszerű extrudercsigával továbbítják majd az aprítószerszám közvetlen vizes permetezése mellett granulálják. A granulátumot – amely ez esetben jelentős víztartalmú – ezután szárítani kell.

A polimer granulátum *szárítására* a legtöbbször tálcás melegítőszekrényeket alkalmaznak. A nagyértékű műszaki polimerek nedvességtartalmát 0,1 %-nál is kevesebbre kell csökkenteni.

A 6.19 ábra olyan műszaki megoldást javasol, amelyben szárítás – és az előnyös elő-melegítés – magában a fröccsöntőgépre vagy extruderre illeszkedő tölcserben történik.

A bemutatott gépek és technológiák csak a polimer előkészítés leggyakoribb, leginkább tipikus eljárásait érintették. E területen is egyre újabb gépészeti megoldások jelennek meg, amelyek az ömledék mozgását még változó irányban módosítva eredményeznek homogén polimerkeveréket egyre javuló energiahasznosítással.

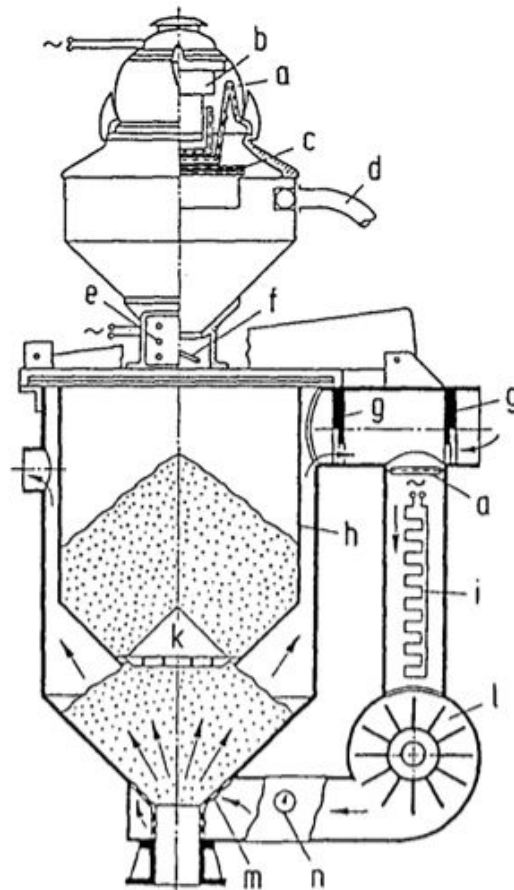


**6.18 ábra:** Összetett, többszigás keverőberendezés, granulálással [6.3] 1) betápláló tölcser, keverővel, 2) kétcsigás keverőextruder, 3) kúpos nyíró-keverő, 4) kihordócsiga, 5) granuláló



Az ömledékállapotban való keverés és homogenizálás újabb, hatékony gépészeti megoldásainak rendkívül nagy szerepe lehet a jövőben a polimerek *újrahasznosításának (recycling)* és *ötvözésének (alloying)* területén. Ezeknek a gépeknek a lehető legkisebb hőterhelés mellett, azaz lehetőleg alacsony ömledék hőmérsékleten és rövid idő alatt kell, – még hozzá kémiai *reaktív adalékanyag* jelenlétében, – a többkomponensű ömledék bensőséges keverését megoldanunk.

A fejlődés útja e területen is az *integrált*, összevont technológiák felé vezet, amelyben fizikai és kémiai folyamatok együttes hatása alatt a gépeknek nemcsak mechanikai (folyadékmechanikai, áramlástan, homogenizálási, elosztási és elosztási) feladatokat kell megoldaniuk, hanem egyidejűleg a makromolekulák bizonyos kémiai átalakítását is. Ezek az összetett új típusú gépek *reaktív keverők*, *reaktív extruderek* lesznek.



**6.19 ábra:** Előmelegítő és szárító funkciójú adagoló tölsér fröccsöntő géphez, extruderhez [6.4]  
a) szűrő, b) meghajtó motor, c) szűrő papirosbetéttel, d) megszívó csomák az alapanyag granulátum automatikus felszívására pneumatikus úton, e) kapcsoló, kontroll izzó, f) automatikus adagolókapu, g) beállítható levegőadagoló, h) belső tölsér, i) fűtőtest, k) mágneses fémleválasztás, l) ventilátor, m) szűrőfelület, n) hőmérő

## 6.4 Szakirodalom

- Schwarz O., Ebeling F.W., Lüpke G., Schelter W., *Műanyagfeldolgozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest . 1987.  
Macskási L., *Műanyagok előállításának kémiai és műveleti alapjai*. Abigél Kiadó, Budapest . 1996.  
Michaeli W., *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser, München . 1992.  
Knappe W., Lampl A., Heuel O., *Kunststoffverarbeitung und Werkzeugbau*. Hanser, München . 1992.  
Johannaber F., *Kunststoff-Maschinenführer*. Hanser, München . 1992.  
Fejes G., *Ipari keverőberendezések*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest . 1970.  
Todd D.B., *Plastics Compounding – Equipments and Processing*. Hanser-Gardner, Munich-Cincinnati . 1998.  
Wildi R.H., Maier C., *Understanding Compounding*. Hanser-Gardner, Munich-Cincinnati . 1998.  
Rauwendaal C.H., *Polymer Mixing*. Hanser-Gardner, Munich-Cincinnati . 1998.

## KALANDEREZÉS

### Tartalom

#### [7.1 A kalanderek szerkezete](#)

#### [7.2 A kalander működése](#)

#### [7.3 A kalanderek működésének reológiai alapjai](#)

#### [7.4 A kalander alkalmazása összetett gyártósorokban](#)

#### [7.5 Szakirodalom](#)

Kalanderezés alatt azt a polimerfeldolgozási műveletet értjük, amelynek során a hőre lágyuló polimerből két vagy több forgó henger között fóliát vagy lemezt állítunk elő, illetve valamilyen (többnyire textil) hordozóra polimer bevonatot készítünk.

Kalanderezésre – amely a fémfeldolgozási technológiák közül a lemezhangérlésre hasonlít, – leginkább az *amorf* hőre lágyuló polimerek alkalmasak, amelyeknek széles olvadási hőmérséklettartománya van, és így viszonylag széles hőmérséklethatárok között vannak szívós-képlékeny állapotban.

A kalanderezés elődjének a hengerszékek tekinthetők. Hengerszékeket nagyon régóta használnak a kaucsukok (gumi) feldolgozásában. A legegyszerűbb típus két fűtött, egymással szemben forgó hengerből áll. A gumifeldolgozásnál e két henger fordulatszám, és kerületi sebessége sem egyforma. A kalanderek ezekből a hengerszékekből fejlődtek ki, de természetesen kapcsolhatók az acéllemezgártás hengersorához is.

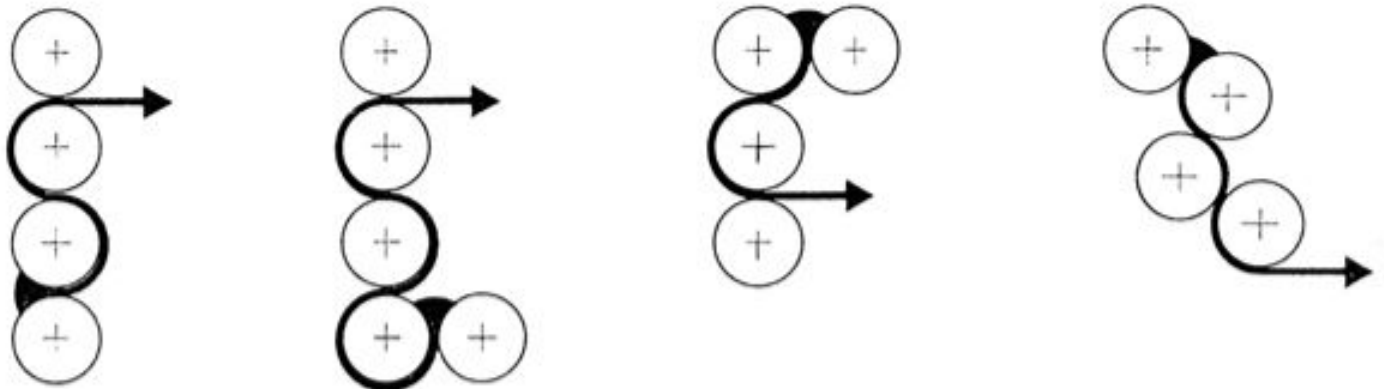
A kalanderezéssel folyamatos üzemben vékony filmeket, fóliákat állítanak elő. A gyártható fóliaszélesség többnyire 2 és 4 m között változik, a gyártási sebesség elérheti a 100 m/percet is. Kalanderezéssel elsősorban hőérzékeny polimer anyagokat, például kemény és lágy PVC-t, PVC kopolimereket, ütésálló polisztirolt, ABS-t, és cellulóz-észtereket dolgoznak fel. A kalanderezés ugyanis alacsonyabb hőterhelést jelent az alapanyag számára, mint a hasonló lemeztermékek alternatív gyártástechnológiája, az extrúzió.

Elvileg valamennyi hőre lágyuló polimer alkalmas kalanderezésre, különösen az amorf típusok (PVC, PS, ABS). A részlegesen kristályos poliolefinből (pl. PE) sokáig nem tudtak kalanderen fóliát gyártani. Ma már megfelelő adalékkal ez is lehetséges, de az extrúziós technika gazdaságosabb.

A kalanderezéssel előállított fóliák, filmek vastagsága általában 30 és 800  $\mu\text{m}$  között van. Speciális kalanderekkel ennél vastagabb lemezeket is előállítanak, pl. a különböző PVC-padló féleségeket, hang-és hőszigetelő műanyag tapétákat.

### 7.1 A kalanderek szerkezete

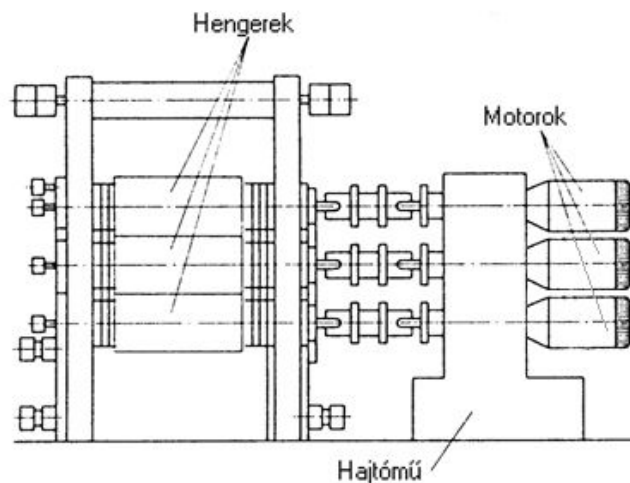
A modern kalanderek legalább 3, de esetenként 4 vagy 5 hengerből állnak (7.1 ábra).



7.1 ábra: Kalander elrendezések (balról jobbra): I-, L-, F-, Z-kalander [7.1]

Az, hogy milyen kalander-típust részesítenek előnyben, az adott feladattól függ. Az *I* kalandert a nehézkes betáplálás miatt ritkán alkalmazzák. Az *L* típus előnye, hogy a betáplálás alul, az első fokozatnál történik, ezért a legkényelmesebben és a legrövidebb úton végezhető el. Ezt az elrendezést szívesen alkalmazzák kemény PVC feldolgozására. Lágy PVC feldolgozásához inkább az *F* típust alkalmazzák, mert az *L* típusnál a fóliára lágyító gőzök csapódhatnak le. Szövet, vagy egyéb hordozóanyag bevonására legalkalmasabb a *Z*-kalander elrendezés.

A 7.2 ábrán 3 hengeres kalander vázlatos elrendezése látható.

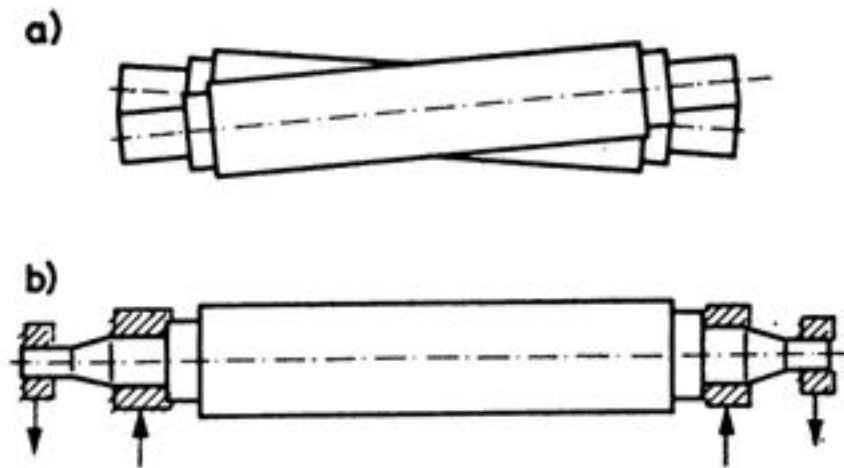


7.2 ábra: Háromhengeres kalander vázlata [7.1]

A párhuzamos tengelyű hengereket stabil keretszerkezet tartja. A hengerek közti távolságot nagyon pontosan be lehet állítani. A hengerek tengelyében az egyik oldalon a fűtőközeg be és elvezetéséhez szükséges furatokat alakítják ki, a tengelyek másik oldala a meghajtáshoz csatlakozik. Mindegyik hengernek külön, fokozatmentes fordulatszám szabályozással ellátott egyenáramú motorja van. A 600–800 mm átmérőjű és 2–4 m hosszú kalander-hengereknek egyrészt ellent kell állniuk a résben fellépő igen nagy erőknek, másrészt felületüknek keménynek és kopásállóknak kell lennie (500–550 HB). Ezért többnyire kéregöntéssel készítik azokat.

A hengerek felületi minőségével szemben is magasak a követelmények. A hengereket a jó tapadás eléréséhez 0,1  $\mu\text{m}$  felületi érdességre köszörülnek, vagy 0,01  $\mu\text{m}$  felületi érdességre polírozzák. PVC feldolgozásnál a korróziós veszély miatt keménykrómozott hengereket alkalmaznak.

A hengerek között nagy nyomás lép fel, ezért azok kihajlanak. Ezt a kihajlást kompenzálni kell, hogy a fólia teljes szélességében egyenletes vastagságot lehessen előállítani. A kihajlás kompenzálására három módszer terjedt el: a profilköszörülés (bombírozás), a henger tengelyeinek szögállítása, illetve a visszahajlítás ellennyomatékkal, 7.3. ábra.



**7.3 ábra:** Kalander hengerek kihajlásának kompenzálása [7.8] a) szögállítás, b) ellenhajlítás

A szögállításkor az utolsó előtti henger tengelyének befogását elfordíthatóan képezik ki. A henger tengelyének elfordításával a rés nagysága a henger két szélén nagyobb lesz, mint középen, ez fogja kompenzálni a hengerek kihajlását.

Az ellenhajlításnál az utolsó henger tengelyét hidraulika segítségével oly módon deformálják, hogy az az anyagtól származó erő okozta kihajlást kompenzálja.

Ezzel a két módszerrel többnyire nem tudjuk a termék kellő méretpontosságát biztosítani; további korrekció alkalmazása is szükséges. Ez a korrekció a két utolsó henger felületének meleg állapotban

történő méretre köszörülése, az ún. bombírozás (hordó- vagy bomba alakot közelítés.) Napjainkban ezzel a módszerrel a termék vastagságának kb. 5 µm-es méretpontossága érhető el.

## 7.2 A kalander működése

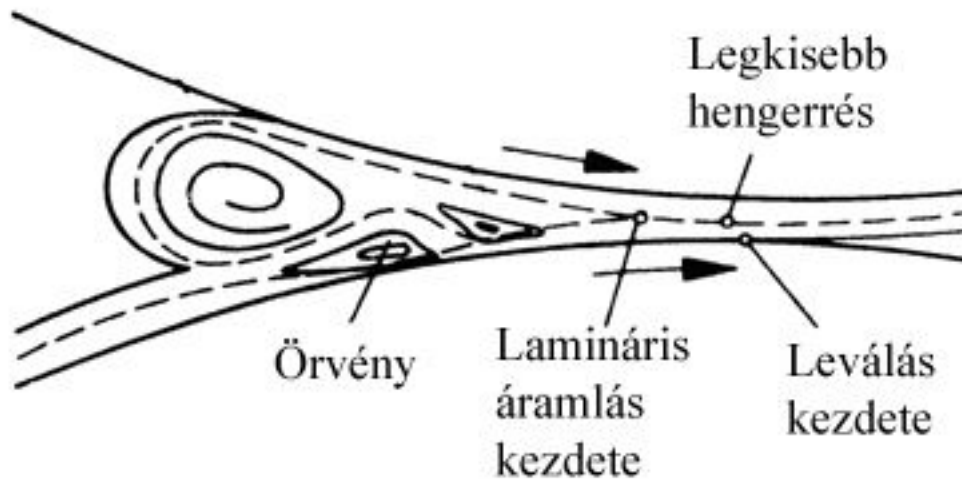
A kalanderezés során a kalander hengerei a polimert az adott formára (fólia, film) hozzák. Célszerű, ha a kalander hengereinek csak az alakadással kapcsolatos munkát kell elvégezniük, és a polimer megömlesztése, plasztifikálása más műveleti egységben történik. (A kalander túl drága berendezés, ezért plasztifikálásra igénybe venni nagyon gazdaságtalan megoldás.)

A kalanderre a megfelelő adalékokkal előre összekevert **homogén** polimer ömledéket visznek fel. Ezt a homogén ömledéket az **előplasztikálás** során állítják elő. Az előplasztikálás történhet a keverés után szakaszos üzemben, különböző belsőkeverőkkel, vagy folyamatosan, a keveréssel egy lépésben, keverőextruderrel.

A folyamatos előplasztikálás előnyösebb a késztermék minősége szempontjából, mert könnyebben biztosítható az egyenletes ömledékminőség, az állandó hőmérséklet és az ömledék azonos termikus és deformációs „előélete”.

A folyamatos előplasztikálást végző keverőextrudereknél nagy gondot fordítanak a polimer homogenizálására. Az extruder csigáján különféle keverő és gyúró elemeket alakítanak ki a homogenizálás minél tökéletesebbé tételére.

A kalander előtt keverő hengerszéket alkalmaznak. Ez a további homogenizálás mellett *pufferként* (kiegyenlítőként) is működik, valamint a polimer ömledékben jelen levő gázok eltávolítására is lehetőséget ad. A keverő hengerszéknél a hengerek közötti rés nem párhuzamos, ezért az anyag a hengerek egyik végétől a másikig „vándorol”. Itt forgó késsel egy szalagot leválasztanak, és azt szállítószalag segítségével folyamatosan a kalanderre vezetik. A kalanderre adagolt anyag mennyiségének egyenletesnek kell lennie, különben a kalander hengerei előtt, a hengerrésnél képződő szakáll (7.4. ábra) túlzottan lehülne, ami a fólia minőségének romlását idézné elő. A szakállképződés minden hengerpár előtt szükséges, ez biztosítja az egyenletes fóliavastagságot.



7.4 ábra: Szakállképződés a kalander hengerei között [7.8]

A szállítószalag mentén célszerű fémkereső berendezést is felszerelni. A polírozott kalander hengerek felülete nagyon kényes a közéjük kerülő fémdarabokra, és a javíttatás igen költséges. E miatt gyakran a keverőhengerszék és a kalander között ömledékszűrőt, un. *strainer*-t (szita) alkalmaznak. A *strainer* olyan csigás extruder, ahol az extruder szerszám hiányzik, a henger végén csak egy szitaszövetből álló szűrőbetét található.

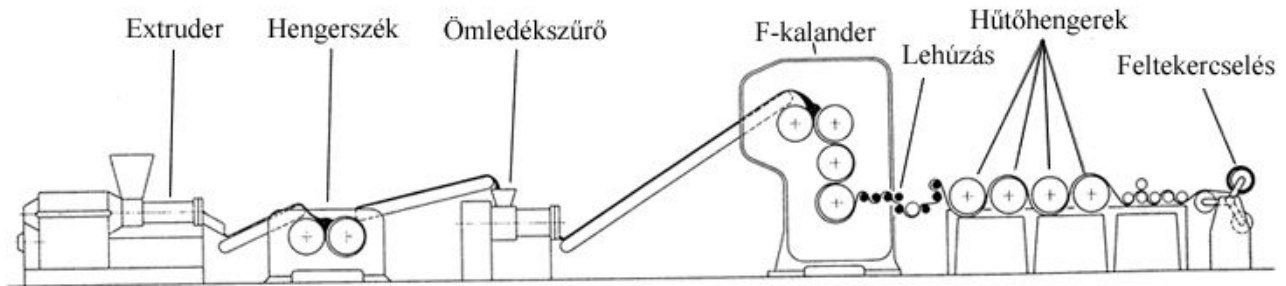
A két henger közül a polimer a melegebb, a mattabb, vagy a nagyobb kerületi sebességű hengerre tapad fel, és így kerül a következő hengerpárra. Fontos, hogy a hőmérséklet egyenletes legyen a henger szélessége, valamint kerülete mentén, mivel nagyobb hőmérsékletkülönbség a henger egyes területeinek eltérő hőtágulását, és ezzel egyenetlen fóliavastagságot okoz. A hengereket nyomás alatt levő forró vízzel fűtik. A fűtőközeg furatait a henger felületétől mintegy 50 mm távolságban képezik ki.

Egyes alkalmazásoknál a fólia felületét mintázattal látják el. Ez az eljárás az un. **préglés v. barkázás**. A préglést a kalandert elhagyó fólia kismértékű lehülése után, annak *termoplasztikus állapotában* végzik egy hűtött, mintás nyomóhenger és gumibevonatú ellen henger között.

A fóliát ezek után hűtőhengerek során átvezetve szobahőmérsékletre hűtik. A fólia széleit vágóhengerekkel levágják, és a hulladékot a keverőegységbe visszavezetik. A kalander utolsó hengereinek egyike felett vastagságmérő készüléket helyeznek el. Az itt használt vastagságmérők általában  $\beta$ -sugárzó izotópokkal működnek. A vastagságmérő jelével az utolsó hengerpár résméretét tudják korrigálni, és így a fólia vastagságot azonos értéken tartani.

A kalandersor (7.5 ábra) végén a fóliát feltekerceslik. A tekerceselőnek biztosítani kell az állandó (kerületi) sebességet, miközben a tekerces átmérője folyamatosan nő. Ehhez speciális, nyomatékváltóval és fordulatszám szabályozóval ellátott hajtásokat használnak. A modern

tekerceslőknek általában három állása van. Amíg az első állásban folyik a tekerceselés, a másodikban leveszik a kész fóliatekerceset, a harmadikban pedig elhelyezik az új tekerceselő-hüvelyt.



7.5 ábra: Kalandersor [7.5]

### 7.3 A kalanderek működésének reológiai alapjai

A kalander hengerei közti résben az áramlást a 7.6 ábra szemlélteti. Derékszögű koordináta rendszerben a

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \eta \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)$$

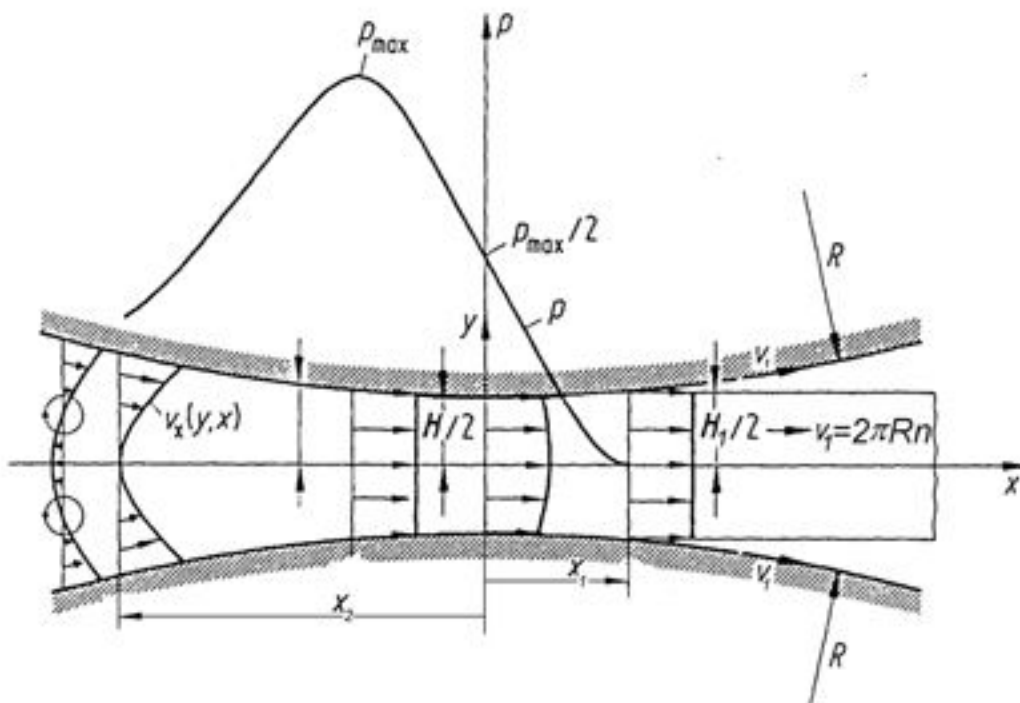
impulzusegyenletet a  $v_x = v_1$  ha  $y = \pm H/2$  peremfeltételek mellett integrálhatjuk ( $\eta$  a newtoni viszkozitási tényező):

$$v_x = v_1 - \frac{1}{2\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left( \frac{H^2}{4} - y^2 \right)$$

A sebességeloszlás ismeretében a térfogatáramot a következő kifejezés adja:

$$\dot{V} = 2W \int_0^{H/2} v_x dy = WHv_1 - \frac{WH^3}{12\eta} \left( \frac{dp}{dx} \right)$$

ahol  $W$  a kalander hengerének szélessége.



7.6 ábra: Áramlás a kalander hengerei között [7.9]

A leválási pontnál, ahol  $H = H_1$ , a nyomás megegyezik a környezeti nyomással és a nyomásgradiens nulla. Feltételezzük, hogy a hengereket elhagyó lemez nem duzzad és nem is zsugorodik. Ekkor (7.3) egyszerűbb alakra hozható:

$$\dot{V} = v_1 W H_1$$

A  $H$  és az  $x$  koordináta közötti geometriai összefüggés:

$$H - H_0 = 2 \left[ R - \left( R^2 - x^2 \right)^{1/2} \right] \approx x^2 / R$$

ahol  $H_0$  a két henger tengelyvonalában levő (legkisebb) távolság. A (7.2), (7.3) és (7.4) felhasználásával a nyomásgradiens:

$$\frac{dp}{dx} \approx \frac{12\eta v_1 (x^2 - x_1^2)}{R(H_0 + x^2/R)^3}$$

A (7.6) egyenletet integrálhatjuk a következő határfeltétel mellett:  $p=0$  a leválási pontban. A meglehetősen bonyolult végeredmény szerint a legnagyobb nyomás a következő összefüggéssel adható meg:



$$P_{\max} = \frac{16\eta v_1 x_1^3}{RH_0^3}$$

Az egyes hengerekre ható erő

$$F_y = \int_{x_2}^{x_1} Wp dx$$

Az integrálást (7.6) felhasználásával csak numerikusan lehet elvégezni.

Az itt vázolt modell több egyszerűsítést is tartalmaz, melyek az eredmény pontosságát befolyásolják. Az első egyszerűsítés a newtoni viszkozitás feltételezése. Ez az egyszerűsítés „konzervatív” abban az értelemben, hogy a pszeudoplasztikus ömledékeknél ténylegesen fellépőnél nagyobb erőket jósol, vagyis a kalandert túlméretezzük. Második egyszerűsítés az állandó vastagság feltevése. A valódi polimereknél az ömledék rugalmas tulajdonságai miatt általában nem állandó a vastagság. Végül a kalander hengerei között kialakuló konvergáló, illetve divergáló áramlások miatt a viszkoelasztikus polimerekben normálfeszültségek keletkeznek, melyek további nyomást, illetve erőt jelentenek a kalander hengereire. A modell eredményeinek tervezési célokra történő felhasználását a (newtoni) viszkozitás értéke nagymértékben befolyásolja.

Hatványtörvényt követő reológiai modell választásával a következő eredményeket kaphatjuk:

$$F_s = \eta_0 \left( \frac{2v_1}{H_0} \right)^n RS(n)$$

$$F_d = \eta_0 \left( \frac{2v_1}{H_0} \right)^n \left( \frac{RH_0}{2} \right)^{1/2} D(n)$$

ahol a betűk jelentése :

$F_s$  hengereket eltávolítani igyekvő erő

$F_d$  a súrlódóerő, ez határozza meg a kalander energiaszükségletét.

$\eta_0$  és  $n$  a hatványtörvény paraméterei

A többi betű jelentése a 7.6 ábrán látható.

$S(n)$  és  $D(n)$  a hatványtörvény kitevőjétől függő paraméterek, amelyeket numerikusan határoztak meg:

$n$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$S(n)$	0,9	0,8	0,6	0,5	0,35
$D(n)$	6,0	3,5	2,2	1,6	1,2

**1. táblázat - A (7.9) és (7.10) egyenletben szereplő paraméterek értéke a hatványkitevő függvényében [7.9]**

## 7.4 A kalander alkalmazása összetett gyártósorokban

A kalander, amely a keverést célzó *hengerszék*hez kapcsolódik a kezdeteknél, majd a fémlemez gyártó hengerekhez hasonlóan önálló feldolgozástechnikai géppé és eljárássá vált, végül összetett gyártósorok részegységeként is jelentős szerepet játszik.

Amint azt a 8. fejezetben látjuk majd, a kalander gyakran követi a lemez-extrudert, ahol simítóhengerlést, vagy éppen mintázó („barkázó”) hengerlést biztosít. A kalandertermékek között a legnagyobb volumenű termékcsalád, a padlóburkoló lemez tipikusan *sokrétű* termék. A rétegelt termékben van szövetjellegű hordozóréteg, habosított középső réteg, dekor-funkciójú (nyomtatott) réteg, lehet színezett réteg, átlátszó fedőréteg, kopásálló borítóréteg. A rétegek összeállíthatók

- önmagukban is tekerceselhető polimerrétegek társításával (dublírozás),
- kenéssel, amelyhez a leggyakrabban szintén hengereket alkalmaznak (roll-coating)
- pasztaformájú anyag késes (*rakel*) kenésével
- merítéssel
- rá-extrudálással.

Szinte megszámlálhatatlan a változatok száma, amelyekben a hengerlés alapelve a képlékeny polimerfeldolgozás egyéb módszereivel társítva jelenik meg.

## 7.5 Szakirodalom

- Schwarz O., Ebeling F.W., Lüpke G., Schelter W.. *Műanyagfeldolgozás*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1987.
- Dunai A.. *Műanyagfeldolgozó gépek*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1983.
- Johannaber F.. *Kunststoff – Maschinenführer*. Hanser. München . 1992.
- Michaeli W.. *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1992.
- Knappe W., Lampl A., Heuel O.. *Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau*. Hanser. München . 1992.
- Osswald T. A.. *Polymer Processing – Fundamentals*. Hanser-Gardner. Munich – Cincinnati . 1998.
- McKelvey J. M.. *Polimerek feldolgozása*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1966.
- Halász L.. *Szabályozás, vezérlés, folyamatirányítás a műanyagfeldolgozásban*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1983.
- Belofsky H.. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.

# EXTRÚZIÓ

## Tartalom

- [8.1 Az extrudálás technikájának alapfogalmai](#)
- [8.2 Az ömledékáramlás főbb összetevői az egycsigás extruderben](#)
- [8.3 Az extrudercsiga karakterisztikája, az extruder munkadiagramja](#)
- [8.4 Az extruder termikus viszonyai](#)
- [8.5 Különleges extrudercsigák, különleges extruderek](#)
  - [8.5.1 Gáztalanító extrudercsiga](#)
  - [8.5.2 Különleges kiszállító szakaszú csigák](#)
  - [8.5.3 Ömledék szétválasztó csiga](#)
  - [8.5.4 Moduláris csiga](#)
  - [8.5.5 Többcsigás extruderek](#)
- [8.6 Extruderszerszámok](#)
  - [8.6.1 A csőgyártás szerszáma](#)
  - [8.6.2 A lemezgyártás szerszáma](#)
  - [8.6.3 A kábelgyártás extruderszerszáma](#)
  - [8.6.4 Fóliatömlő extrúzió és szerszáma](#)
  - [8.6.5 Többüreges profilok extrúziója](#)
- [8.7 Az extruder követőberendezései](#)
  - [8.7.1 Kalibrálás vákuummal, túlnyomással](#)
  - [8.7.2 Különleges lehúzó: gégecső-gyártás](#)
  - [8.7.3 Extrúziós gyártósor](#)
- [8.8 Összetett extrúziós technikák](#)
  - [8.8.1 Extrúziós szinterezés](#)
  - [8.8.2 Koextrúzió](#)
- [8.9 Szakirodalom](#)

Ahogy a kalanderezés eljárása a polimertechnikában a fémek lemezhengerlési technikájához hasonlít, úgy a polimerek *extrúziójának* technikáját is kapcsolhatjuk a fémek *rúdsajtolásához*. Valóban, a polietilén cső extrúziójához hasonló technológiával extrudált ólomcsövet használtak a vízvezetékknél már több mint 200 évvel ezelőtt is. A PVC ablakszárny-profilhoz hasonló extrudált alumíniumprofilok ma is használatosak, főleg ipari építményekben. A fémek szakaszos, viszonylag alacsony hőmérsékletű rúdsajtolása és a polimer ömledékek folyamatos üzemű extrúziója között azonban igen sok különbség van, főleg a technikai, gépészeti megoldásokban.

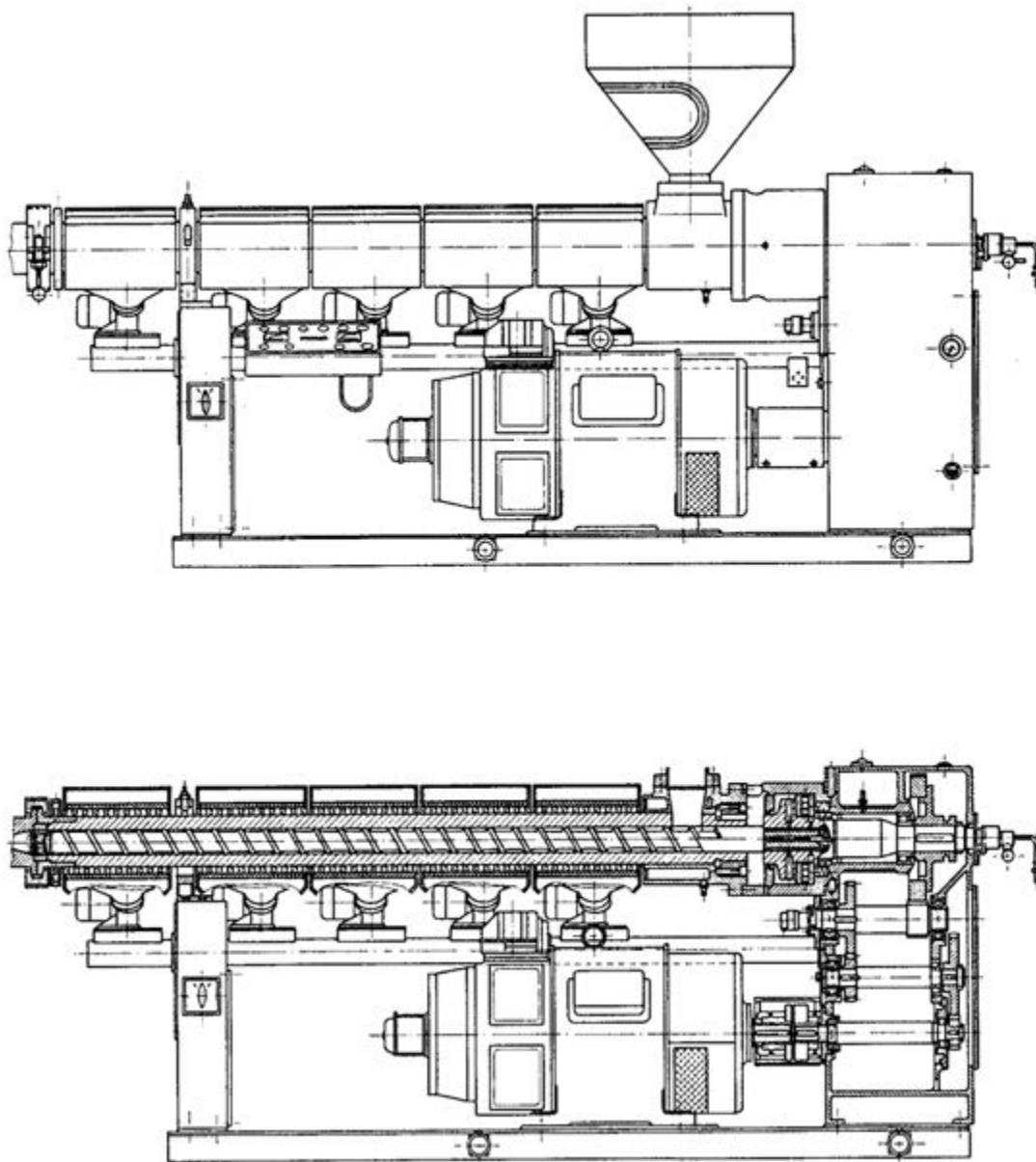
Az *extrúzió* a polimerfeldolgozás leghatékonyabb, legjelentősebb technológiája, amelynek során a (tipikusan hőre lágyuló) polimert az extruder

- *képlékeny* állapotba hozza, majd a viszkózus ömledéket
- *homogenizálja*, s ha kell, gáztalanítja, ezután
- *nyomás* alá helyezi (komprimálja),
- adott, változatlan keresztmetszetű, nyitott *szerszámon keresztülsajtolja*, a továbbiakban a követő-berendezésekkel

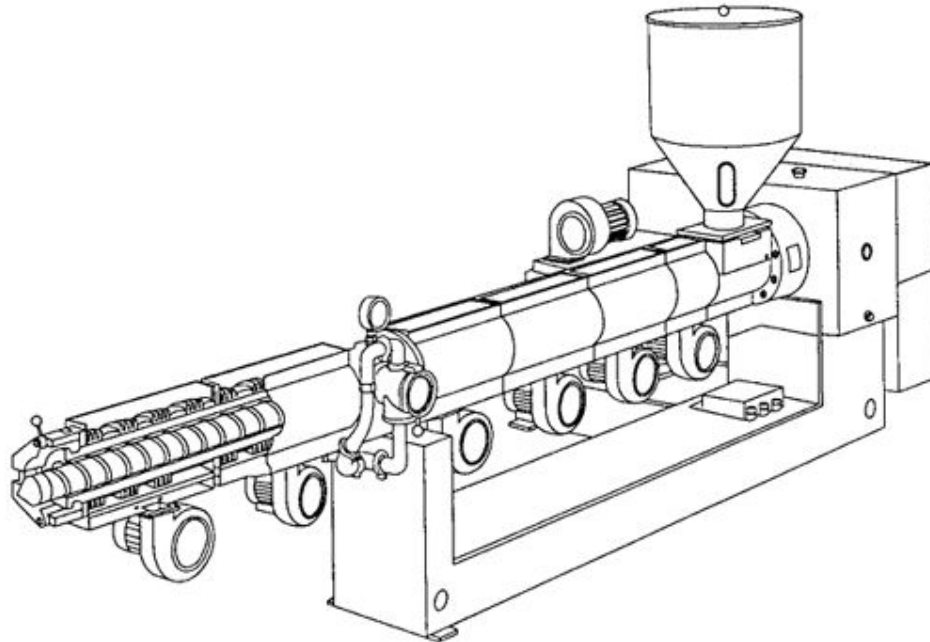
- méretállandóságot biztosítva *lehűti*, s így
- állandó keresztmetszetű polimerterméket gyárt tetszőleges hosszúságban, *folytonos üzemben*.

Az extrúzió *terméke* lehet lemez, fólia, cső, szál, vagy többszörösen összetett üreges termék, amilyen pl. egy többszekrényes, hőszigetelő PVC ablakprofil.

A korai *elektrotechnika* megjelenése a 19. század közepén hozta magával a polimer extrúzió technikáját: dugattyús extruderrel készítettek gumibevonatot rézhuzalra már 1849-ben. Az első *csigás* extruder (ld. 1.1 ábra, 16. oldal) is elektromos vezetékek bevonására volt hivatott. A hőre lágyuló polimerek extrúziójának technológiája a PVC megjelenéséhez kötődik az 1930-as évek közepén. Ekkortájt bontakozott ki az extrudercsiga szerepe a folyamatos üzemű, ömledékállapotú *keverésben*, ekkortájt kezdték megismerni és leírni a viszkoelasztikus polimer ömledék áramlási jellegzetességeit, folyadék-mechanikáját, és innentől kezdve lépett mindez gyümölcsöző kölcsönhatásba az extruder gépkonstruktőrök munkájával. Az extruder szerkezetét a 8.1 ábra, távlati képét a 8.2 ábra mutatja be. Figyeljük meg a 8.1 ábrán az alul beépített meghajtómotort, a jobboldalon helyet foglaló hajtóművet és a tipikusan jobbról bal felé szállító csigát.



**8.1 ábra:** Az egycsigás extruder felépítése [8.8] fent: külső megjelenés; lent: belső szerkezet Alul a gépalapban: meghajtómotor, jobboldalt: hajtómű, a tölcser alatt: garat (vízzel hűtve), az öt fűtőzóna fűtése: elektromos, hűtése: légbefúvással



8.2 ábra: Tipikus egycsigás extruder „3D” képe [8.10]

## 8.1 Az extrudálás technikájának alapfogalmai

Az extruder tehát nem egyszerűen olvasztó-ömlesztő és az ömledéket szállító szivattyú, ill. kompresszor szerepű gép. A folyamatos üzemben – mégpedig akár hetekig – hónapokig megállás nélkül – működő *extrudercsiga (extruder screw, Extruder-Schnecke)* egymás utáni szakaszai (*zónái*) valósítják meg az extruder legfontosabb *funkcióit*.

Ahogy azt a 8.3 ábrán láthatjuk, a legegyszerűbb extrudercsigán három zónát figyelhetünk meg (ismét az anyagszállítás irányában, jobbról balra):

Csiga zónák	Funkciók
etető vagy „behúzó” zóna sűrítő (kompressziós) zóna homogenizáló, kiszállító zóna	a polimer granulátum betáplálása, az ömlesztés kezdete, az ömlesztés folytatása, befejezése, sűrítés (komprimálás), homogenizálás, a homogenizálás befejezése, kiszállítás megemelt nyomáson

### 1. táblázat - Extrudercsigák zónái és funkciói

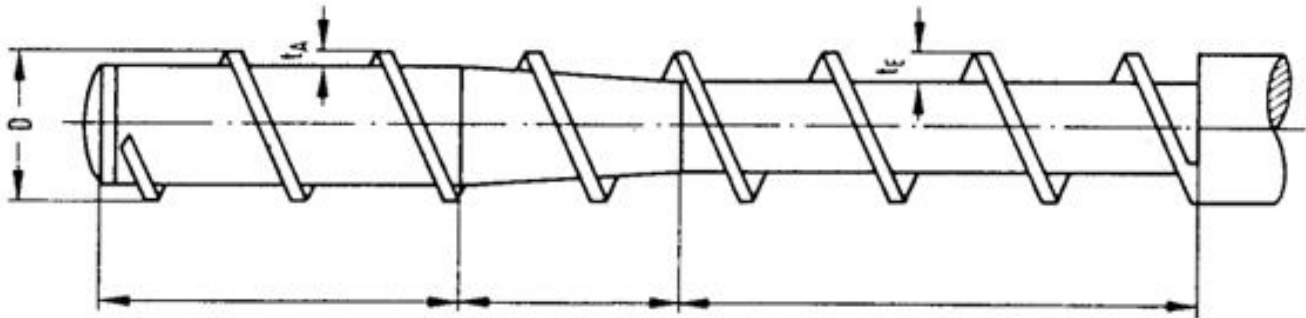
Az *extrudercsiga* tehát lényegében egy menetes orsó, (többnyire jobbmenetű), „ritka vágású”, nagy menetemelkedéssel, a menetemelkedés egy fordulatra általában megegyezik a csiga külső átmérőjével. Ez a csiga laza illesztéssel forog az extruder *hengerben* (a rés mérete tipikusan  $0,005 D$ ) amelyet több szakaszra osztva villamos fűtéssel fűtenek, és amelynek temperálásához szükséges hűtést rendszerint levegőhűtés adja (ezek a hűtő-befűvő csonkok láthatók a 8.1 ábrán is). Az extruder henger etetőnyílásának (garatjának) környékét vízhűtéssel hűtik a csapágyazás túlmelegedésének elkerülése céljából.

A 8.3 ábrán látható sematikus extrudercsiga a három zóna három fő funkcióját úgy valósítja meg, hogy a csavarorsó magátmérője a középső zónában határozottan megnövekszik. A *kompresszió funkciója* természetesen nemcsak

- *mag-progresszív*, hanem

- *szög-degresszív* csigával is, sőt
- a menetszárny *szélességének* megváltoztatásával

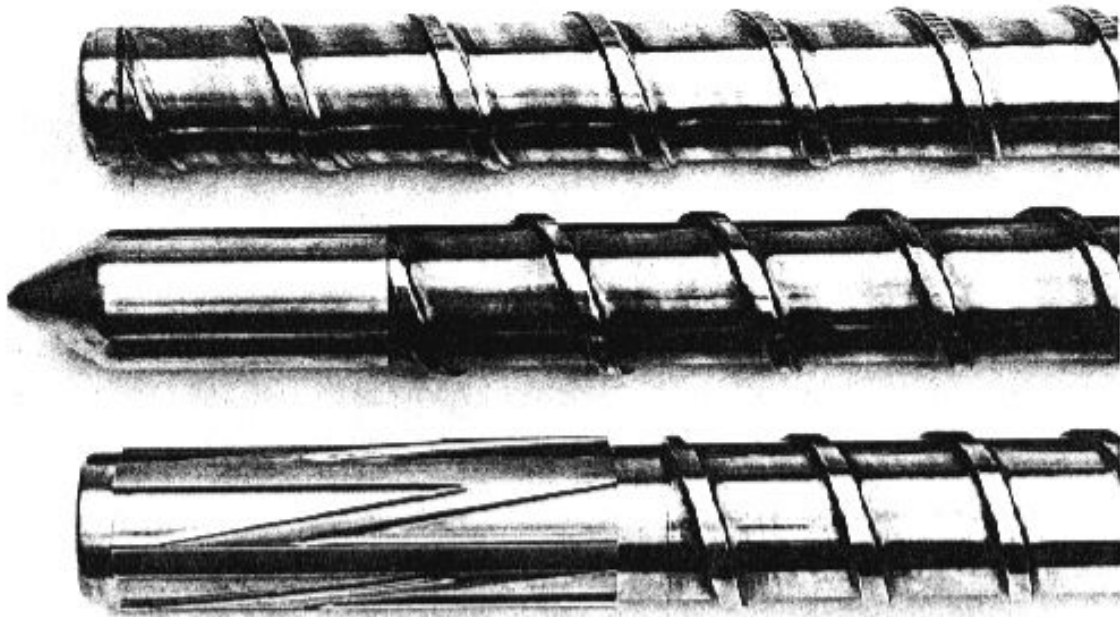
is megvalósítható. A második esetben a menetemelkedés szögét csökkentjük, a harmadik esetben a menetárok „térfogatát” a vállszélesség növelésével csökkentjük.



**8.3 ábra:** Az extrudercsiga zónái. (Jobbról balra: behúzó zóna; kompressziós zóna; kiszállító zóna) [8.5]

A 8.4 ábra fotóján tipikus kiszállító zónák, különféle csiga-végződés láthatók. Feltűnő, hogy ebben a zónában a menetárok mélysége csak egy tizede a menetszélességnek. A kiszállító zóna hossza tipikusan  $5 \dots 7 D$ , a teljes csigahosszat pedig  $L/D = 20 \dots 30$  arány jellemzi. A  $D=25$  mm-es átmérőjű extrudercsiga laboratóriumi extrudert jellemez. Ilyen méretű csigája van a BME Polimertechnika és Textiltechnológia Tanszék extruderének is (6.8 ábra, 175. old.) Az ipari extrudercsiga átmérője akár 250 mm-t is elérheti (ld. 8.30 ábra, 221 oldal). A laborextruder ömlesztőteljesítménye néhány kg/ó, míg a legnagyobb extruderek gyártókapacitása az 1500 kg/ó-t is meghaladhatja.

A 8.4 ábra fotója nemcsak eltérő csigavégződéseket, hanem keverőelemeket is bemutat, amelyekből sokféle konstrukciós változatot láttunk az ömledékkeverő extruderek esetében is (6.10 ábra).



**8.4 ábra:** Extrudercsigák tipikus végződése: (felülről) [8.6] lekerekített csiga, csúcsos csigavégződés, nyíróelemekkel végződő csiga (keverést, homogenizálást javító elem)

Az átmeneti, kompressziós zóna hossza (ld. 8.3 ábra), aránya a behúzó- és kiszállító zónához mérten, összefügg az extrudált polimer megömlesztésének időbeli lefutásával. Amint tudjuk, az *amorf* hőre lágyuló polimer széles hőmérséklet-tartományban lágyul és olvad meg, míg a *kristályos* hőre lágyulóknál ez a hőmérséklettartomány szűkebb, (lásd 5.20 ábra, 133. oldal). Ennélfogva az amorf hőre lágyuló polimert extrudáló csiga hosszabb kompressziós zónát tartalmaz, mint a kristályos hőre lágyuló polimerhez használt csigáé. Az extrudercsiga geometriája tehát a felhasználandó polimerhez illeszkedik, ilyen értelemben akár beszélhetünk PVC-hez való csigáról, és PP- csigáról is. Egy extruderhez természetesen több csigát vásárolhatunk, ha termékpalettánk széles.

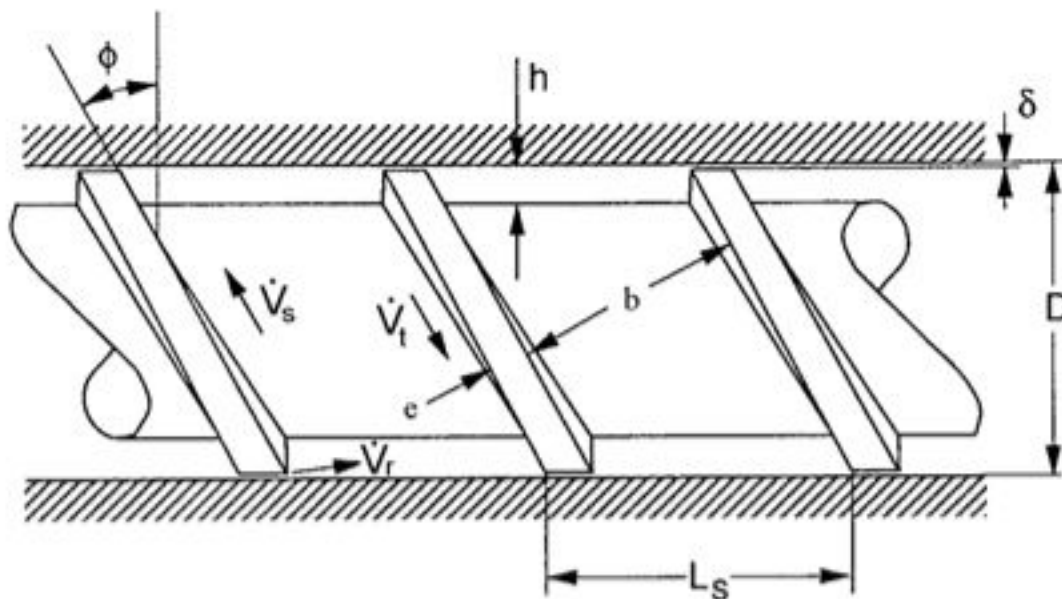
Terjedőben vannak az ún. moduláris csigák is, amelyeket változtatható hosszúságú szakaszokból állítanak össze (ld. 8.5.4 fejezet, 211. oldal).

## **8.2 Az ömledékáramlás főbb összetevői az egycsigás extruderben**

Az extruder hozamának, ömledékszállító teljesítményének felméréséhez vegyük szemügyre az extrudercsiga kiszállító szakaszát a 8.5 ábrán.

Ez az extrudercsiga tehát jobbról balra szállít, és a csigának a néző-felőli palástja felülről lefele forog.





**8.5 ábra:** Az extrudercsiga kiszállító szakaszának sémája [8.2]  $\Phi$  a menetemelkedés szöge, h) menetmélység, D) az extruder henger belső átmérője,  $\delta$ ) illesztési hézag („játék”) a csiga és a ház között,  $L_s$ ) (egy fordulatra jutó) menetemelkedés, b) menetárok szélesség, e) menetszárny szélesség

A szállító-teljesítmény – térfogatáramban kifejezve – három összetevőből áll össze:

$$\dot{V}_e = \dot{V}_s - \dot{V}_f - \dot{V}_r$$

ahol:

$\dot{V}_e$  = az összes (eredő) térfogatáram (pl.  $\text{cm}^3/\text{s}$ ) egységben

$\dot{V}_s$  = a sodróáram (*drag flow*, *Schleppströmung*) amely kiszállítási irányú

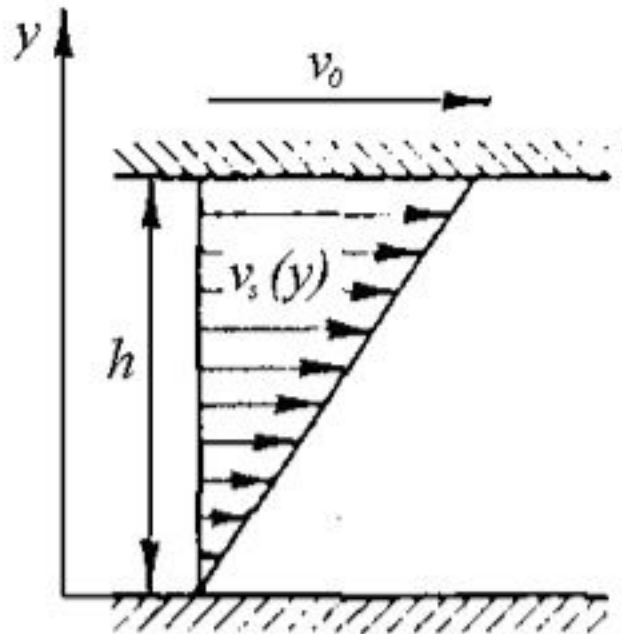
$\dot{V}_f$  = a torlóáram (*pressure-flow*, *Leckströmung*, *Druckströmung*) amely ellentétes irányú, és

$\dot{V}_r$  = a résáram (*clearance-flow*), a  $\delta$  illesztési rés következményeként, amely ugyancsak csökkenti a hozamot, a szállítóteljesítményt.

Az extrudercsiga és a henger közötti rés, a „játék” eléggé csekély: tipikusan  $0,002 D$  és  $0,005 D$  közötti, amelyet a viszkózus polimer ömledék tömít, ill. ken a forgás közben. Kopott csiga esetén a rés  $\delta$  méretének harmadik hatványával arányosan nő a résáram, így csökkenhet a kihozatal. Jól működő csiga esetén azonban a szűk résben a polimer film jó „tömítést” ad.

A  $\dot{V}_s$  résáramot ezek után első közelítésben el is hanyagolhatjuk. A másik két összetevőt a legegyszerűbb egydimenziós áramláson keresztül elemezzük izotermikus körülményeket és newtoni közeget feltételezve.

A *sodró áramlás* modellje a következő: az áramlás két síklemez (csigamag ill. a henger belső felülete) között jön létre annak hatására, hogy az egyik lemez (a csigamag)  $v_0$  (kerületi) sebességgel mozog. Ellenállás ill. nyomáskülönbség nincs az áramlás irányában (nyitott csatorna). A 8.6 ábra alapján a sebességeloszlást a



8.6 ábra: A sodró áramlás sebességeloszlása

$$v_s(y) = v_0 \frac{y}{h}$$

összefüggés írja le. A  $\dot{V}_s$  térfogatáram egyszerű módon számítható:

$$d\dot{V}_s = v_s(y) dA$$

$$dA = b dy$$

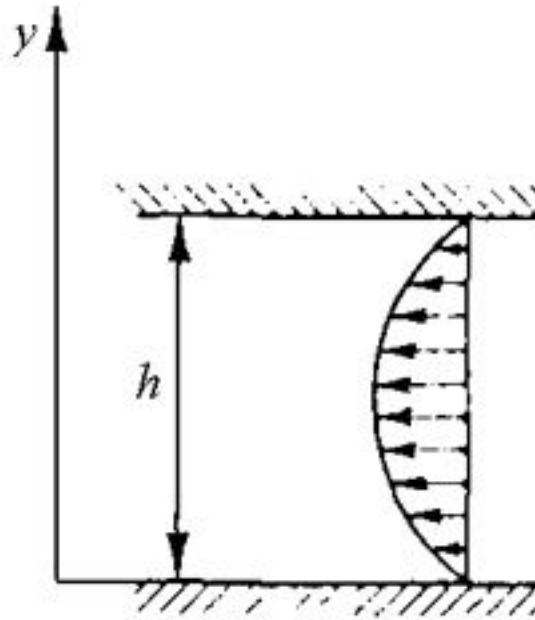
$$\dot{V}_s = \frac{bv_0}{h} \int_0^h y dy = \frac{bv_0}{h} \left[ \frac{y^2}{2} \right]_0^h = bh \frac{v_0}{2}$$

Mivel a  $v_0$  kerületi sebesség arányos a csiga  $n$  fordulatszámával, a  $\dot{V}_s$ -re kapjuk:

$$\dot{V}_s \sim b h n \sim h n$$

Tehát minél szélesebb és mélyebb a csigacsatorna, ill. minél nagyobb a csiga fordulatszáma, az előre haladó térfogatáram annál nagyobb.

A *torló áramlás* az extruderben fellépő nyomásnövekedés hatására jön létre, és a sodró áramlással ellentétes irányú (8.7 ábra).



8.7 ábra: A torlóáramlás sebességeloszlása

Felhasználva az 5. fejezetben a newtoni közeg résáramlására kapott (5.73) ill. (5.79)-es összefüggéseket, a sebességeloszlást a

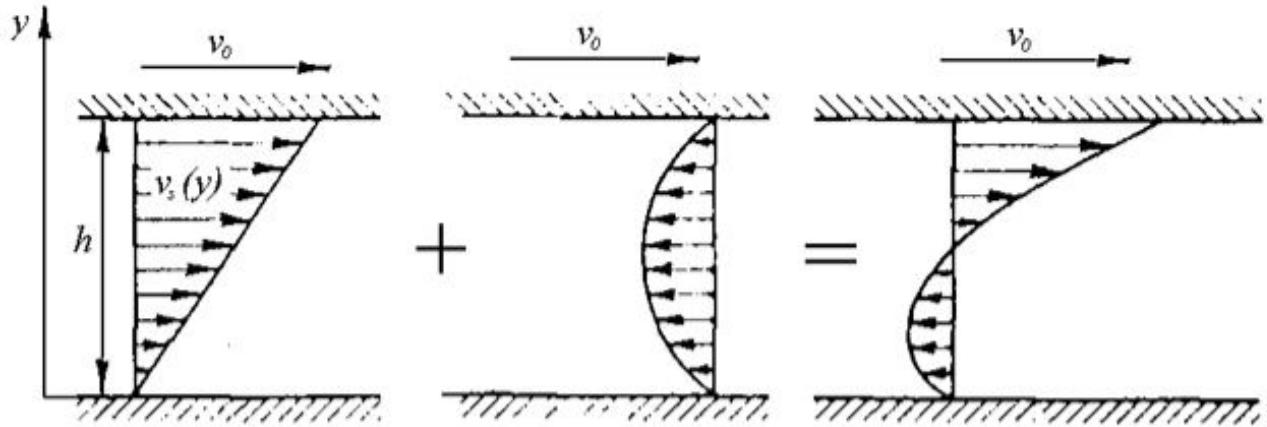
$$v_t(y) = \frac{\Delta p}{2\eta l} \left( \left( \frac{h}{2} \right)^2 - y^2 \right)$$

a torlóáramlás térfogatáramát a

$$\dot{V}_t = \frac{1}{12} \frac{b h^3}{\eta} \frac{\Delta p}{l} \sim \frac{b \Delta p h^3}{\eta l} \sim \frac{\Delta p h^3}{\eta l}$$

egyenlet írja le.

Ezek után nézzük az eredő sebességeloszlást, 8.8 ábra.

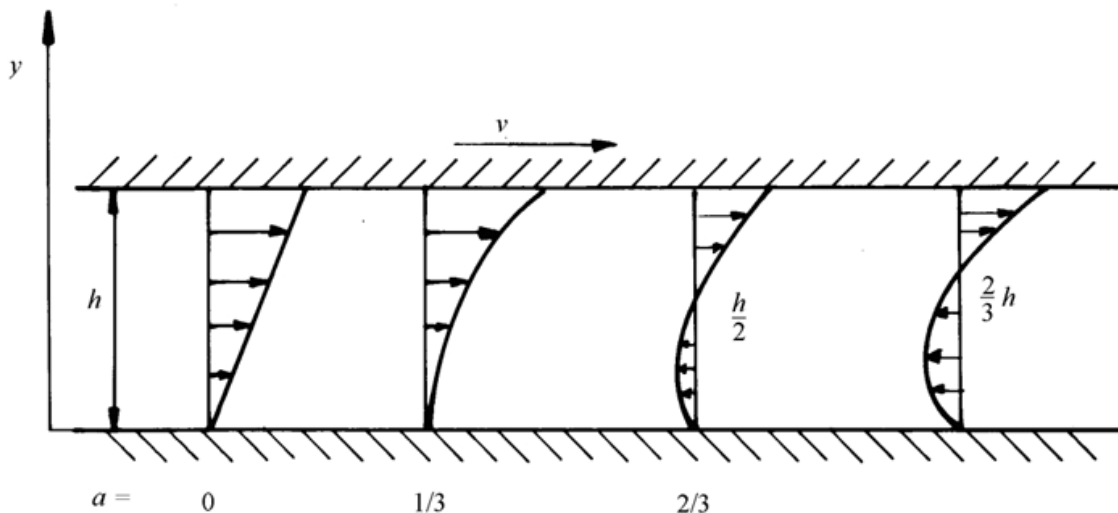


**8.8 ábra:** A sodróáramlásból és a torlóáramlásból eredő sebességeloszlás

A 8.8 ábra nagyon jól szemlélteti a csigacsatornában kialakuló keveredési folyamatot. A két sebesség viszonyára a

csiga ún „*a*” zártági foka a jellemző, ami a torló és a sodró áramlások hányadosa,  $a = \dot{V}_t / \dot{V}_s$  (8.9 ábra).

A zérus értékű zártági fok azt jelentené, hogy nincs ellenirányú torlóáram. A jelentős nyomás-különbség (10 – 50 bar) miatt azonban a torlóáramot figyelembe kell venni. Ebből adódik az *ömledékviszkózitás* hatása is: kis viszkózitású ömledékkel az extruder hozama kisebb, mint nagyobb viszkózitású anyaggal. Figyeljük meg, hogy a  $\Delta p$  és a  $\eta$  viszkózitás ilyen hatása jelent meg a Hagen-Poiseuille összefüggésben is (5.56 egyenlet, 139. old.), illetve az ebből levezethető térfogatáramban is. Az ömledékviszkózitást az extrúzióban a hőmérsékletviszonyok megváltoztatásával befolyásolhatjuk.



$$\alpha = \frac{\dot{V}_t}{\dot{V}_s}$$

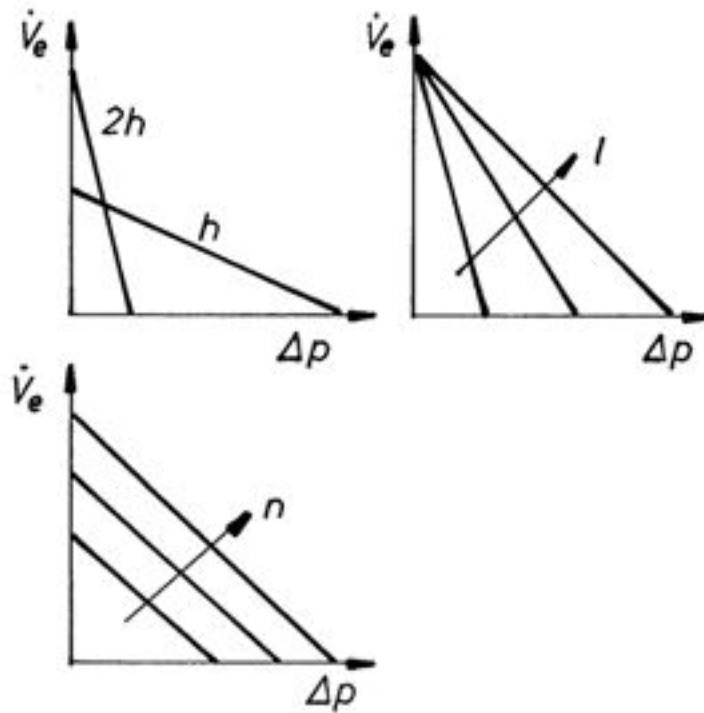
**8.9 ábra:** A sodróáramlásból és a torlóáramlásból eredő sebességeloszlás különböző zártsági fok esetén

### 8.3 Az extrudercsiga karakterisztikája, az extruder munkadiagramja

Ha a  $\dot{V}_e$  eredő térfogatáramot a főbb változók ( $\Delta p$ ,  $\eta$ ,  $n$ ) függvényében elemezzük, akkor kapjuk a *csigakarakterisztika* egyenletét:

$$\dot{V}_e = \dot{V}_s - \dot{V}_T \sim C h n - \frac{\Delta p h^3}{\eta l}$$

ahol  $C$  konstans. Ábrázolva a  $\dot{V}_e$ -t a  $\Delta p$  függvényében, a 8.10 ábrán látható tipikus csigakarakterisztikákat kapjuk. Látható, hogy mindhárom paraméternél ( $n$ : fordulatszám,  $h$ : menetmélység,  $l$ : csigacsatorna hossza a kitoló zónában) a  $\dot{V}_e$  kihozatal csökken a nyomásnövekedés függvényében. Ugyanakkor az is látható, hogy hosszabb kitolózóna és kisebb menetmélység kedvezőbb („lágyabb”) karakterisztikát eredményez. Ez annyit jelent, hogy az ilyen csiga kevésbé nyomásfüggő, azaz a  $\dot{V}_e$  térfogatáram (a kihozatal) kevésbé függ a szerszám ellenállásától (a szerszámcserétől).



**8.10 ábra:** A növekvő fordulatszám ( $n$ ), menetmélység ( $h$ ) és a homogenizáló zóna menetárkának hossza ( $l$ ) hatása az eredő ömledékáramra a nyomásnövekedés ( $\Delta p$ ) függvényében.

Hasznos még ismernünk az anyag ún. *belső extrudálási karakterisztikáját* is, amely a csiga által létrehozott  $\Delta p$  nyomás és a csiga  $n$  fordulatszáma között állít fel kapcsolatot.

Az ömledék  $\Delta p$  nyomáskülönbség hatására kialakuló  $\bar{v}$  átlagsebessége definíció szerint

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}_t}{bh}$$

Felhasználva a  $\dot{V}_t$  térfogatáram (5.79) alatti alakját, írhatjuk:

$$\bar{v} = \frac{1}{12} \frac{h^2}{\eta} \frac{\Delta p}{l}$$

amelyből a  $\Delta p$  nyomáskülönbség:

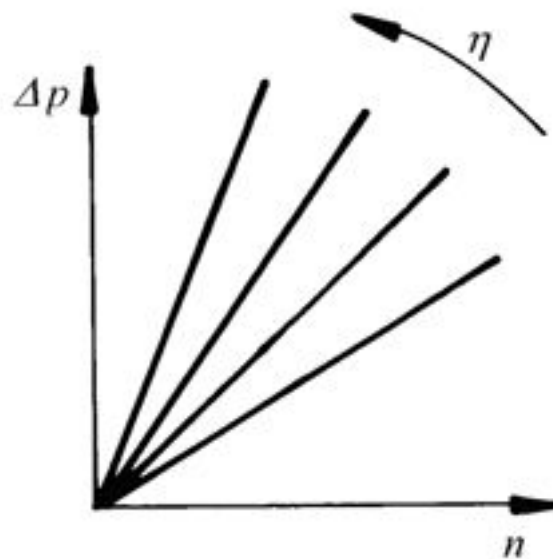
$$\Delta p = 12 \frac{l}{h^2} \eta \bar{v}$$

Mivel a  $\bar{v}$  átlagsebesség arányos a csiga  $n$  fordulatszámaival, kapjuk:

$$\Delta p \sim \eta n$$

azaz a csiga által létrehozott nyomás az ömledék  $\eta$  viszkozitásával és a csiga  $n$  fordulatszámaival egyenesen arányos (ld. 8.11 ábra).

Az extruder munkadiagramjához ismernünk kell még a szerszámkarakteristikát is, amely a szerszámon átáramló ömledék  $\dot{V}$  térfogatárama és a  $\Delta p$  nyomáskülönbség között teremt kapcsolatot. Abban a legegyszerűbb esetben, ha a szerszám egy  $R$  sugarú,  $l$  hosszúságú furat (kapilláris), akkor az (5.56) összefüggés szerint



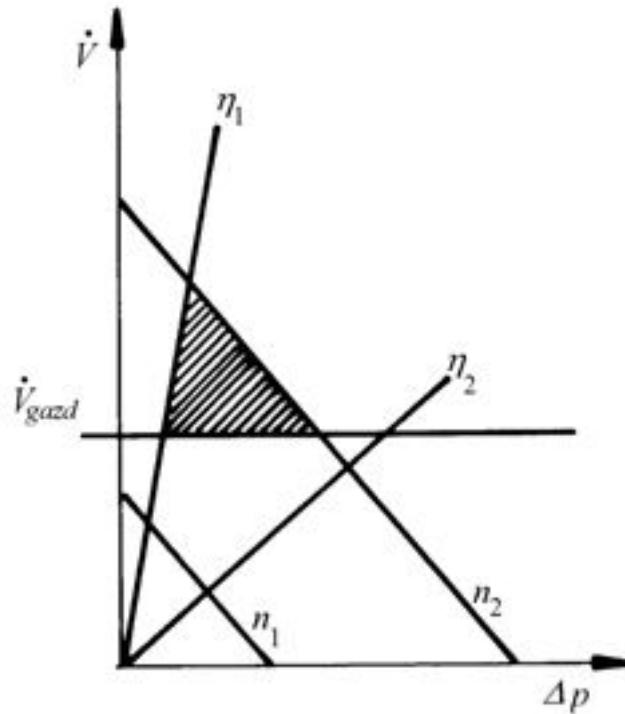
**8.11 ábra:** A viszkozitásnövekedés hatása a nyomásnövekedés és a fordulatszám összefüggésében

$$\dot{V} = \frac{R^4 \pi \Delta p}{8l \eta}$$

azaz a térfogatáram a  $\Delta p$  nyomáskülönbséggel egyenesen, az ömledék  $\eta$  viszkozitásával fordítottan arányos.

Ezek után már összeállíthatjuk az extruder ún. egyszerűsített munkadiagramját, mely minimum négy egyenesből kell hogy álljon: az extruder legnagyobb és legkisebb fordulatszámaéhoz tartozó csigakarakteristikából, és az adott ömledékre (anyagra) alkalmazható minimális és maximális fojtás (rés) jelleggörbéjéből (szerszámkarakterisztika). A négy egyenes

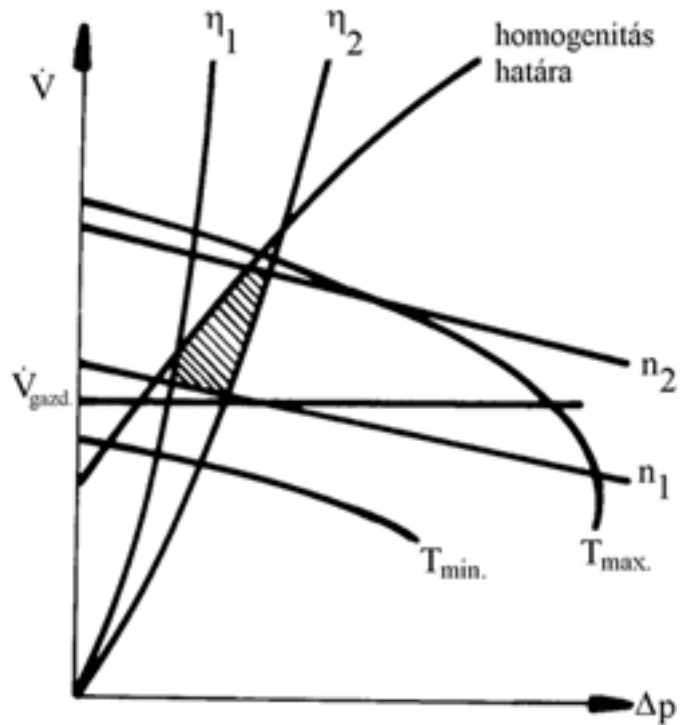
által határolt terület az adott anyagra vonatkozó munkaterület, melyet ha kiegészítünk  $\dot{V}_{gazd}$  gazdaságossági határral, megkapjuk az extruder valós munkadiagramját. (8.12 ábra)



**8.12 ábra:** Az extruder egyszerűsített munkadiagramja  $n_2 > n_1$  : fordulatszám,  $\eta_2 > \eta_1$ : viszkozitás

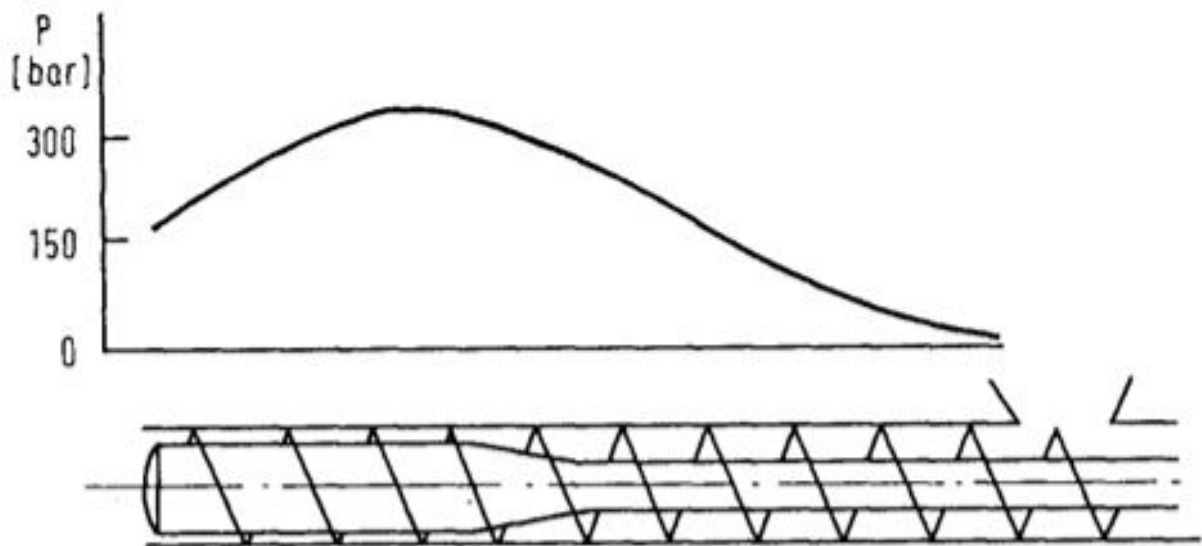
Meg kell jegyeznünk, hogy a 8.10 – 8.12 ábrákon vázolt jelleg csak newtoni közegre érvényes, csak ilyenkor kapunk egyeneseket (lineáris kapcsolatokat). A valóságot jobban közelítő munkadiagram látható a 8.13 ábrán, ahol még a feldolgozás alsó- és felső hőmérséklete, ill. a homogenitás határa is fel van tüntetve.





**8.13 ábra:** Az extruder valós munkadiagramja

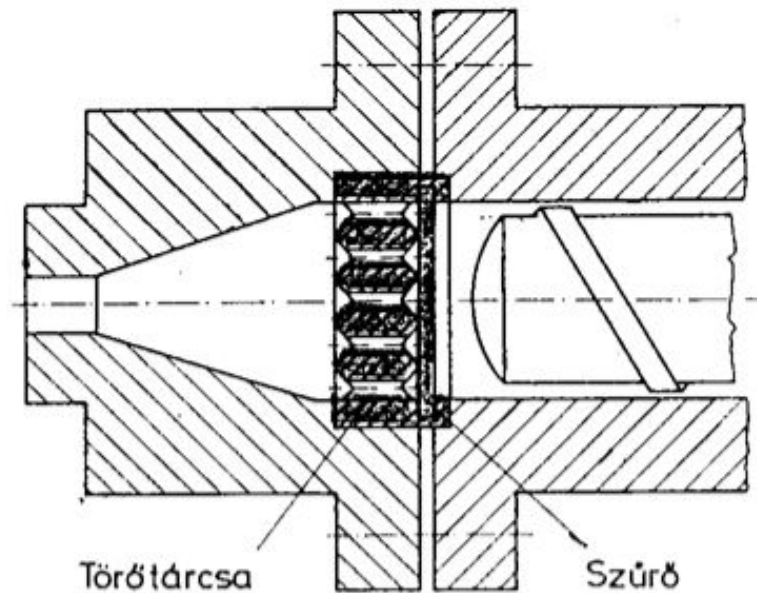
A  $\Delta p$ , a kompresszió, a sűrítési viszonyok alakulását egy szokványos extruderben a 8.14 ábra mutatja be.



**8.14 ábra:** Kompresszió a szokványos egycsigás extruderben

Amint a konkrét példából láthatjuk, az ömledéknyomás jelentős, nagyságrendileg a 100 bar tartományban van, amely a nyitott végződés közelében csökken. A következő (9.) fejezetben a *fröccsöntés* során látni fogjuk, hogy ott az ömledéknyomás még egy nagyságrenddel nagyobb: 1500–2000 bar-t is elérheti. E nyomásnak a méretpontos

termékgyártásban jelentős szerepe van mindkét technológiában. Az extruderben ezt a nyomásfokozást is szolgálja az ún. *törőlemez és szűrő* (8.15 és 8.16 ábra).

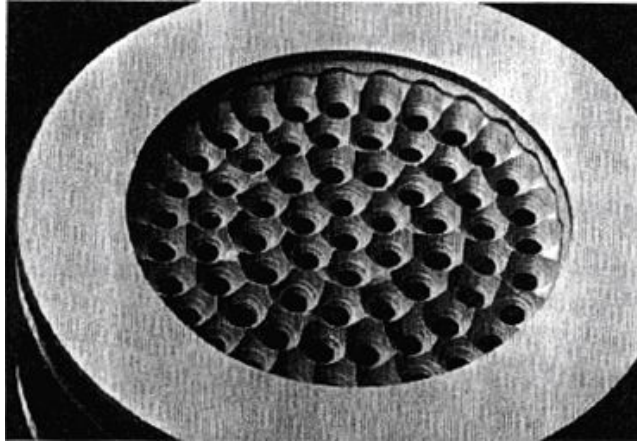


**8.15 ábra:** Törőlemez (törőtárcsa) és szűrő az extruderben

Természetesen a törőlemez is és a drótszövetből készült szűrő is *ömlékszűrést* is biztosít, és még egy utolsó homogenizálást is végez azzal, hogy az ömlék-áramlást „megtöri”, megosztja. Figyeljük meg a 8.16 ábra fotóján, hogy a törőlemez furatai az áramlás irányából tekintve szűkítő átmenettel készültek.

A nyomásviszonyok különleges szabályozására van szükség az ún. „kigázosító” extruderben. Gyakran előfordul, hogy polimerömlédekből az extrúzió végső szakasza előtt *gázokat* kell eltávolítanunk. Ezek lehetnek

- nedvességnomok,
- beoldott, a granulátum által magával vitt (okkludált) gázok
- monomermaradékok.



8.16 ábra: Törőlemez fotója [8.2]

Az extruder hengere természetesen nem nyitható meg („csapolható” meg) a 100 bar nyomás alatti szakaszban e gázok eltávolítására, hiszen ott a polimerömladék is eltávozna. A megoldás: a szokványos 3 zónás csiga helyett 6 zónás csiga-konstrukció, tulajdonképpen két szokványos csiga egymás utáni sorbakapcsolása, összeépítése. Ezt a megoldást a későbbiekben (8.18 ábra, 209. old.) mutatjuk be.

#### 8.4 Az extruder termikus viszonyai

Amint azt a korábbiakban már említettük, az extruder hengert több zónában szabályozottan temperálják, többnyire fűtik. A fűtés villamos ellenállásfűtés, 5 vagy több zónában. A hűtés rendszerint levegő ráfúvással történik. A folyamatszabályozást a gyakorlatban a henger falába szerelt hőmérők irányítják, tehát nem az ömladék, hanem a hengerfal adott pontjának hőmérsékletét szabályozzák. Kísérletek során viszont azt tapasztalták, hogy az extrudert elhagyó ömladék hőmérséklete – néha jelentősen – magasabb, mint az utolsó zóna hőmérséklete. A jelenség megértéséhez nézzük, hogy egy adott anyag megolvasztásához szükséges  $\Delta T$  hőmérsékletnövekedés milyen hőáramok eredményeként valósul meg.

A polimer megolvadása az extruderben a kívülről bevezetett *fűtési hő* ( $Q_f$ ) és az ömladék belső *súrlódásából* származó hő ( $W_{kin.}$ ) együttes hatására történik.

A kívülről bevezetett hőmennyiségre vonatkozólag felírhatjuk:

$$Q_f = m \cdot c \cdot \Delta T,$$

Melyből a hőáram (teljesítmény)

$$\dot{Q}_f = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T,$$

Tudjuk, hogy az  $\dot{m}$  tömegáram a csiga  $n$  fordulatszámaival arányos, így stationer üzemmódra azt kapjuk, hogy

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{m}c} \sim \frac{\dot{Q}_f}{n} \sim \frac{1}{n}$$

A 8.15 összefüggés annyit jelent, hogy a csiga  $n$  fordulatszámának növekedésével – a frikciós hő elhanyagolása esetén – a  $\Delta T$  hőmérséklet hiperbolikusan csökken. Ez az eredmény logikusan is belátható, hisz az adott hőenergiát egyre több anyag veszi fel („viszi el”), ezáltal kevésbé melegszik fel.

Nézzük ezután a súrlódásból származó hőt. A csiga által végzett munka:

$$W_{kin} = F \cdot \Delta l$$

ahol

$$F = \tau A \quad \text{és} \quad \Delta l = \gamma \cdot l,$$

melyekkel:

$$W_{kin} = \tau A \gamma l$$

Ezek után az  $N$  teljesítményre írhatjuk:

$$N = \dot{W}_{kin} = \tau A l \dot{\gamma}$$

Felhasználva, hogy a  $V = A \cdot l$  térfogat állandó, ill. newtoni közegre  $\tau = \eta \dot{\gamma}$ , a (8.19) összefüggés újabb alakja:

$$N = \eta \dot{\gamma}^2 \cdot V \sim \eta \dot{\gamma}^2$$

Tekintettel arra, hogy  $\dot{\gamma} \sim n$ ,

$$N \sim \eta n^2$$

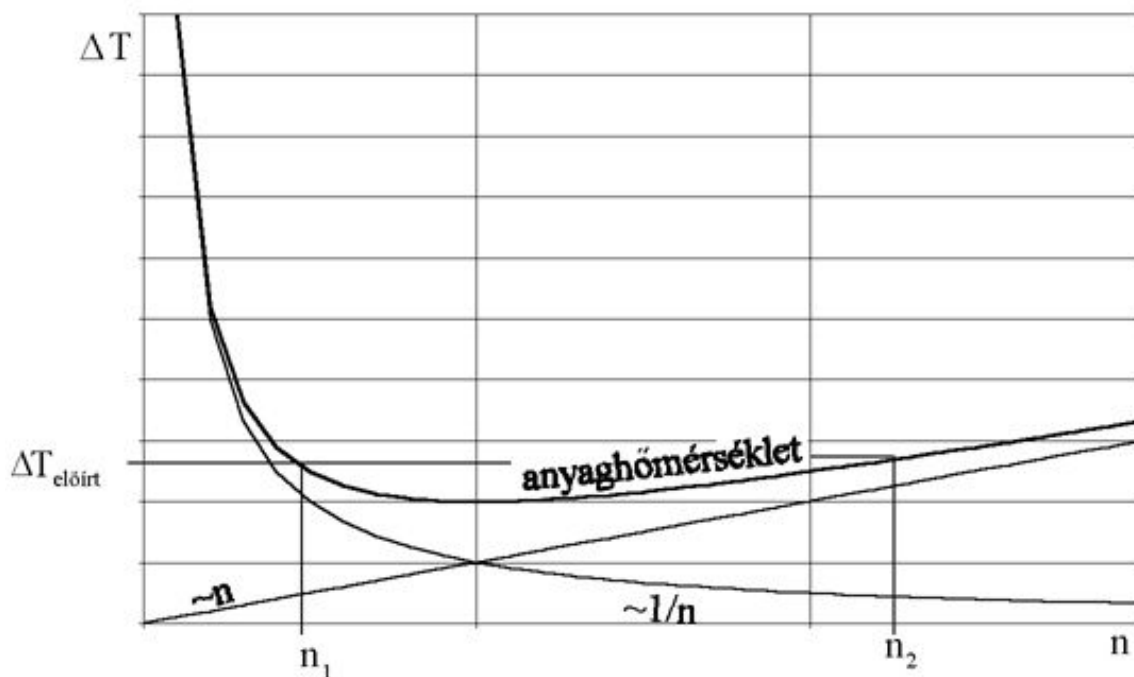
kifejezést kapjuk. A (8.15) összefüggés analógiája alapján, miszerint a  $\Delta T$  hőmérsékletnövekedés a teljesítmény és a fordulatszám hányadosával arányos,

$$\Delta T \sim \frac{N}{n} \sim \eta n \sim n$$

végeredmény adódik. Ez annyit jelent, hogy a belső súrlódásból származó hőmérsékletnövekedés egyenesen arányos az ömledék  $\eta$  viszkozitásával és a csiga  $n$  fordulatszámával.

Ha közös koordináta-rendszerben ábrázoljuk a (8.15) és a (8.22) összefüggéseket, a 8.17 ábra szerinti jelleget kapjuk. A külső fűtés és a belső súrlódás együttes figyelembevételével kapott eredő görbe azt jelenti, hogy egy adott anyagra előírt  $\Delta T_{\text{ömledék}}$  hőmérsékletet állandó fűtési teljesítmény esetén két fordulatszámon lehet elérni.

Egy alacsonyabb,  $n_1$  fordulatszámon ( $v_{kerületi} \sim 0,5$  m/s), ahol a külső fűtés dominál, ill. egy magasabb  $n_2$  fordulatszámon ( $v_k \sim 1-7$  m/s), ahol viszont a frikciós hő a jelentősebb. Az alacsonyabb fordulatszámon, intenzív külső fűtéssel üzemelő extrudereket **politróp**, a magas fordulatszámon, külső fűtést szinte csak az indításkor igénylőket pedig **adiabatikus** extrudereknek nevezik. A gyakorlatban a politróp üzemmód az elterjedtebb. Ennek egyrészt az az oka, hogy a hőmérséklet szabályozás a külső elektromos fűtéssel sokkal egyszerűbb, másrészt pedig az, hogy ha a hőmérsékletet a fordulatszámmal szabályozzuk, akkor az a kihozatalban is változásokat okoz, amit az egész extrudersornak (ld. később) követni kell.



8.17 ábra: Hőmérsékletemelkedés a fordulatszám függvényében az extruderben

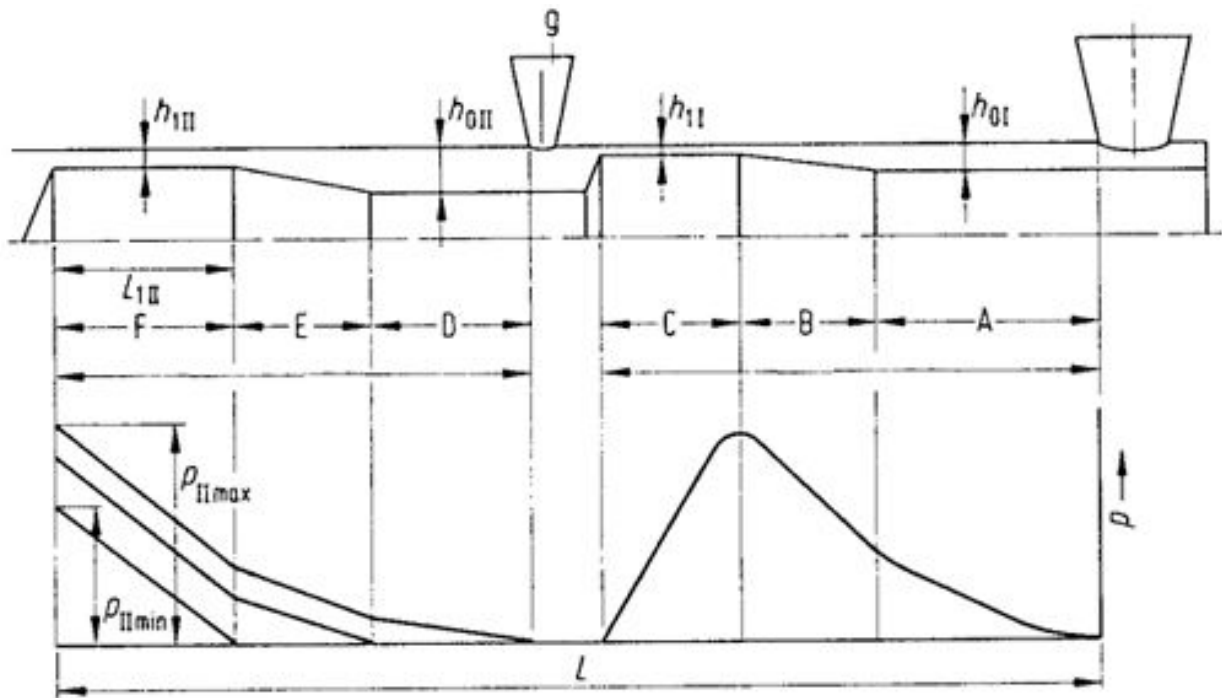
## 8.5 Különleges extrudercsigák, különleges extruderek

Amint azt a fejezet elején hangsúlyoztuk, az eddig elmondottak az egybekezdéses, állandó menetemelkedésű és fejszalag szélességű háromzónás, magprogresszív csigával dolgozó egycsigás extruderekre vonatkoztak. Annak ellenére, hogy a gyakorlatban ezek a rendszerek a legelterjedtebbek, speciális igények kielégítésére különleges extrudereket fejlesztettek ki. A következőkben ezekből ismertetünk néhányat.

### 8.5.1 Gáztalanító extrudercsiga

Jóllehet a szintetikus polimerek nedvességfelvétele többnyire nagyon szerény (néha csak néhány tized vagy század százalék), az ebből a feldolgozás hőmérsékletén keletkező gőz, valamint az egyéb gázok bizonyos kényes esetekben (pl. fóliagyártás, kábelszigetelés stb.) erősen ronthatják a termék minőségét. Ennek elkerülésére dolgozták ki az ún. *gáztalanító extrudereket*, melyek első megoldása az ún. kaszkád extruder volt. Ez nem más, mint két „klasszikus” extruder sorba kapcsolása, melynél az első extruder a polimer ömledéket a második extruder etető részébe táplálja. A

nyitott, jobb esetben vákuumozott, (második) garaton a gázok- és gőzök jól eltávolíthatók. Ez a kézenfekvő megoldás üzembiztos termelést eredményez, de meglehetősen drága, és nagy helyigényű. A fejlesztés abba az irányba haladt, hogy a két extruder funkcióját egyetlen speciálisan kiképzett, egy hengerben elhelyezett csigával oldják meg. Az ilyen rendszerű plasztifikáló egységek csigája általában két, egymást követő, hasonló geometriájú csigaszakaszból áll (8.18 ábra). A megoldás lényege az, hogy a „klasszikus” behúzó-ömlesztő-homogenizáló szakaszok után egy dekompresziós szakasz következik.



**8.18 ábra:** Gáztalanító extrudercsiga és nyomásviszonyai A, D) behúzó zónák, B, E) kompressziós zónák, C, F) kiszállító zónák  $p_{II\max}$ ) maximális végső nyomás,  $p_{II\min}$ ) minimális végső nyomás, g) gázeltétel helye. Látható, hogy az első behúzó szakasz (A) magátmérője nagyobb, mint a második behúzó szakaszé (D),  $h_{0II} > h_{0I}$ . A kitoló zónák aránya hasonló ( $h_{1II} > h_{1I}$ ). L a teljes csigahossz [8.8]

Itt 2–3 meneten keresztül a mag átmérője lecsökken a behúzó szakasz átmérőjének értékére, vagy még kisebbre, ezáltal a hengerben uralkodó nyomás is az atmoszférikus körüli értékre esik. Ennek a szakasznak a közepén megfűrva a hengert, és e furatot vákuumcsatlakozással ellátva, a nem kívánatos légnemű anyagok elvezethetők. Ezután következik a második kompressziós, majd a kitoló szakasz, ahol már – elvileg – gőz- és gázmentes ömledék áramlik. A gyakorlatban alkalmazott számos „trükk” a módszer két hibáját igyekszik kiküszöbölni. Az egyik veszély ugyanis az, hogy a dekompresziós zóna ellenére is ömledék kerül a vákuumvezetékbe, és megszüntetheti a gáztalanító hatást. A másik hibaforrás a gáztalanításhoz rendelkezésre álló kis felületből adódik, aminek eredményeként ismét csak tökéletlenül gáztalanított ömledéket kapunk.

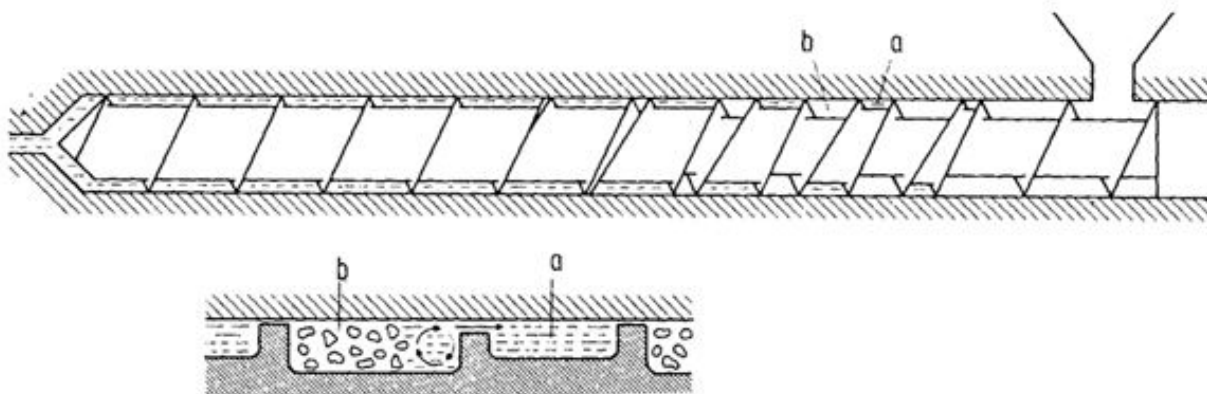
### 8.5.2 Különleges kiszállító szakaszú csigák

Amint azt már korábban is említettük, a plasztifikáló egység egyik legfontosabb feladata a *homogén* ömledék előállítása. Nem engedhető ugyanis meg, hogy a szerszámba szilárd, fel nem olvadt részecskék, erősen különböző hőmérsékletű ömledékáramok, nem megfelelően „feltárt”, inhomogén anyagrészek kerüljenek. Ennek érdekében a csiga homogenizáló- vagy kitoló zónáját különleges elemekkel láthatják el, melyek az ömledék tökéletes homogenitását hivatottak biztosítani. A különböző keverő- és nyíróelemek az ömledék áramlásának módosításával, ill. a szűkített résben fellépő nagyobb nyíródeformációval érik el ezt a hatást. Ezeket mutattuk be a keverőextruderek csigáin a 6.10 és a 6.11 ábrán a 177. oldalon.

Meg kell jegyezni, hogy termikusan érzékeny, beégésre hajlamos anyagok feldolgozása esetén fokozott óvatossággal kell eljárni ezen elemek alkalmazásánál.

### 8.5.3 Ömledék szétválasztó csiga

Az eddig megismert, hagyományos extrudercsiga megoldásoktól teljesen eltér *Ch. Maillefer* 1959-ben szabadalmaztatott elve alapján előállított ún. ömledék szétválasztó (v. extraháló) csiga (8.19 ábra). Az eljárás alap gondolata az volt, hogy az ömlesztő zónában szét kell választani egymástól a rossz hővezetésű megolvadt polimer ömledéket a még szilárd granulátumtól, ezáltal csökkenteni lehet az ömledék termikus terhelését, meg lehet gátolni a szilárd ágy szétesését, és növelni lehet a plasztifikáló teljesítményt.



**8.19 ábra:** A Maillefer-csiga alapelve [8.8] a) kis térfogatú horony ömledékszállítása b) mélyebb horony granulátum-ömlesztésre

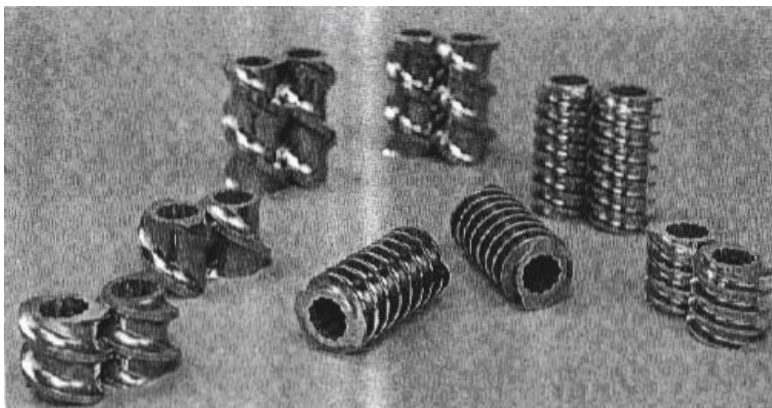
A Maillefer csiga működési elve röviden a következő. Az ömlesztő zónában egy új, második, ún. elválasztó menet indul, melynek menetemelkedése nagyobb, mint a fő meneté, és úgy van megválasztva, hogy az ömlesztő zóna végére utol is éri azt. (Tehát a kiszállító – v. homogenizáló zónában már ismét csak egy menet van.) Az elválasztó menet fejszalagja és a csigaház belső felülete közti hézag úgy van kiképezve, hogy azon az ömledék át tud jutni (az ömledékcsatornába), a granulátum viszont nem. A második, elválasztó menet nagyobb menetemelkedése azt is biztosítja, hogy a csigacsúcs felé haladva, az olvadás folyamatának megfelelően az ömledékszállító csatorna térfogata nő, a

szilárdanyag-szállítóé viszont csökken. A két csatorna térfogatának arányát egyébként a menetmélységekkel is lehet szabályozni.

#### 8.5.4 Moduláris csiga

Amint az az eddigiekből is látszik, az extrudercsigáknak nagyon sok kialakítási formája létezik. Ha ehhez hozzátesszük azt, hogy elvileg minden anyaghoz és minden termékhez más és más csiga kellene, akkor beláthatjuk a variálható – vagy moduláris – csigák kialakítása iránti igény jogosságát.

Az ilyen csigákat ugyanis egy központi tengelyre felfűzött elemekből (modulokból) a kívánalmaknak megfelelően lehet összeállítani. Így – bizonyos határokon belül – változtatható a kompresszióviszony, összeállíthatunk rövid és hosszú kompressziójú, dekompressziós szakasszal, különböző nyíró- és keverőelemekkel, sőt különböző menetprofillal is csigákat.



8.20 ábra: Moduláris csiga elemei

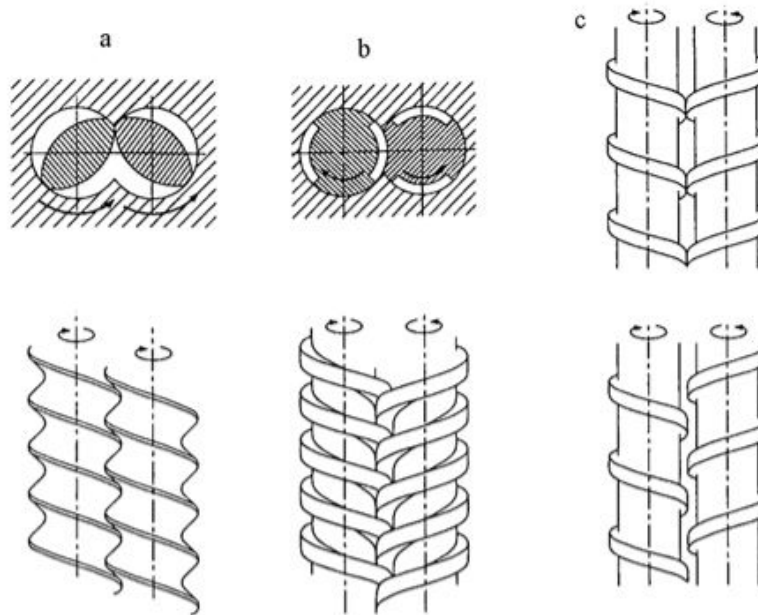
#### 8.5.5 Többcsigás extruderek

Ahogy az már az ömledékkeverés technikájánál érintettük (6.2 fejezet, 173. oldaltól) az extruder keverési hatásfokát és szállítóteljesítményét is nagymértékben fokozni lehet az *iker csigás* (*twin-screw*, *Doppelschnecken*) megoldással.

Az iker csigás extrúzió elsősorban a kemény PVC-*porkeverékek* feldolgozásánál vált be. Kezdetben csak a behúzó szakaszon alkalmaztak egy ún. segéd-csigát, amely a biztonságos anyagtovábbításra szolgált.

Az itt szerzett kedvező tapasztalatok alapján alakultak ki a plasztifikáló egység teljes hosszában két csigával dolgozó extruderek, melyek jellemzőit röviden az alábbiakban lehet összefoglalni.

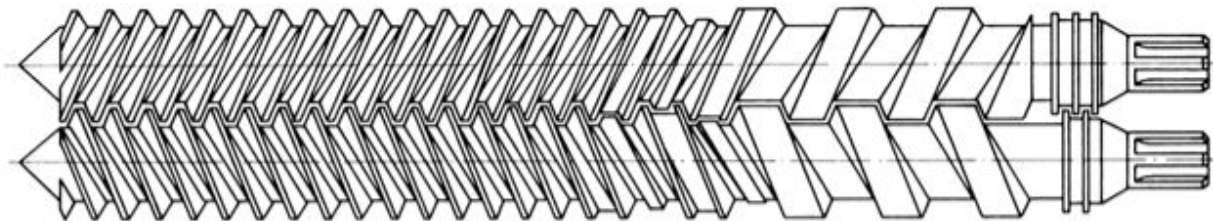




**8.21 ábra:** Az ikercsigás extenzió alapvető elrendezései a) együttforgó, egymásba hatoló, b) szemben forgó, egymásba hatoló, c) szemben forgó, nem egymásba hatoló [8.8]

A csigák forgásiránya lehet azonos vagy ellentétes. Az azonos forgásirányú csigák menetemelkedése azonos, az ellentétes forgásirányuké pedig ellentétes irányú (bal-jobb).

A csigák illesztése lehet laza, közepes és szoros. Az ikercsigák általában olyan szoros illesztéssel dolgoznak egymás mellett, hogy meneteikkel a másik csiga menetárákába az illesztési hézag megengedte mértékig belenyúljanak.



**8.22 ábra:** Ikercsiga változó menetszárnnyakkal [8.1]

Minél mélyebben nyúlnak egymásba a menetek, annál kevesebb anyag tud átjutni a két csiga közti keskeny résen. A nagyobbik, át nem jutott anyaghányad kénytelen a c alakú zárt térben a csigacsúcs felé áramolni. Ez a *kényszeráramlás* az ellentétes forgásirányú kétszigás extruderek fő jellemzője.



**8.23 ábra:** Kétcsigás extruder szerelés közben [8.9]

Jóllehet a kényszeráramlás kíméletes plasztifikálást biztosít, a keverő hatás fokozására gyakran megszakítják a menetek folytonosságát, és gyúrótárcsákkal segítik elő a keveredést.

Az ellenkező forgásirányú ikercsigák hajtása egyszerűbb – csak az egyik csigát kell kívülről hajtani, a másikat ez a csiga egy fogaskerék-párral hajtja – de ezeknél szerényebb a nyíróhatás. Az azonos irányban forgó csigák jobb keverést biztosítanak.

Az ikercsigás extruderekben igen nagy nyomások uralkodnak, ezért:

- 1.) Szállítóteljesítményük jelentősen meghaladja az egycsigás extruderekét, ezért alkalmasak pl. nagy átmérőjű csövek gyártására.
- 2.) A nagy igénybevétel miatt nem mindig engedhető meg a tengely elvékonyítása. Ilyenkor a kompressziót a menetemelkedés szögének csökkentésével vagy a fejszalag szélességének növelésével lehet biztosítani. (8.22 ábra)

Ezek a berendezések meglehetősen drágák.

Az egymásba hatoló menetszárnyú ikercsigás extruder hatékonyságának felismerésén felbátorodva hozták létre a *bolygócsigás extrudereket*, amelyeket a 6.2 fejezetben ismertettünk (180. oldal, 6.15 ábra).

## 8.6 Extruderszerszámok

Az extrudercsiga végső pontja után kialakuló, a legtöbbször kör-keresztmetszetű polimer anyagáramot elvileg bármilyen szabályos vagy szabálytalan keresztmetszetű anyagárammá alakíthatjuk, majd lehűtése után féltermékké, szerkezeti elemként szolgáló csővé, lemezzé, profillá stb. dolgozhatjuk fel. A polimerek viszkoelasztikus karaktere azonban, és különösképpen azok a „szabálytalan” áramlási jelenségek, amelyeket az 5. fejezet végén érintettünk (kifolyási duzzadás, *die swell* stb.) korlátozzák a profilkialakítás szabadságát. A lehűtésekor az extrudált termékbe, profilokba befagyott feszültségek ugyanis később, a tartós igénybevétel során helyileg eltérő relaxációs jelenségeket, méretváltozást, torzulást, feszültségi repedezést, korai tönkremenetelt okozhatnak. Ezek jórésze az extruderszerszám tervezése során elkerülhető. Célszerű tehát áttekintenünk a polimer extrúzió szerszámainak bevált alaptípusait.

Az extruder végére illesztett szerszámok közös vonása, hogy az anyagáramot a következő szakaszokon vezetik át:

- *átmeneti* szakasz
- *alakadó* szakasz
- *simító* („*vasaló*”) szakasz

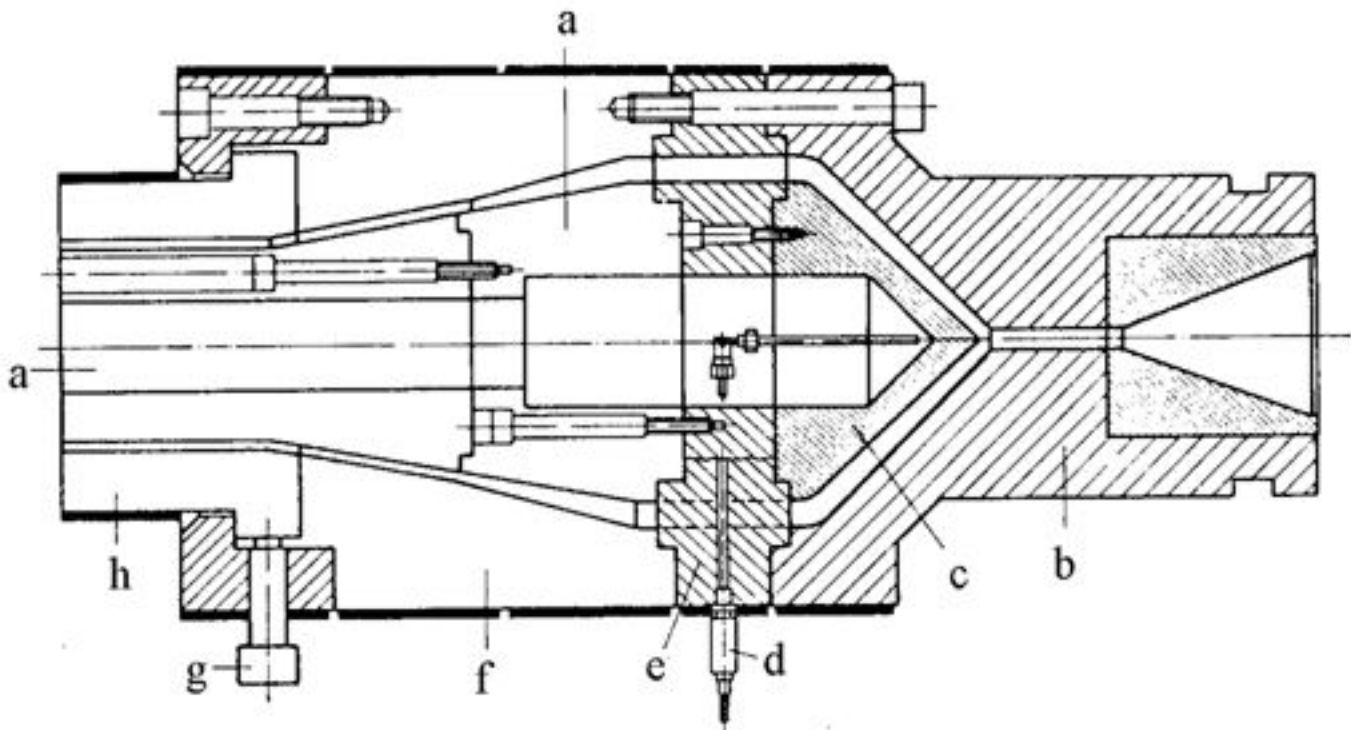
Az átmeneti szakasz a kör-keresztmetszetű viszkózus anyagáram átvezetését biztosítja a kívánt profilhoz közelítő keresztmetszetű szelvénybe. Az alakadó szakasz már a kívánt végső keresztmetszet képét alakítja ki. Ezt a keresztmetszetet a következő szakaszban valamelyest még szűkíteni érdemes. A profilt ebben a szakaszban stabilizálják, a helyi nyomás enyhe növelésével az anyagáramot még „kivasalják”.

A szerszámából kilépő polimer anyagáram még nem teljesen szilárd. A végső megszilárdulás az extrudersoron a következő *kalibráló* egységben következik be, amelyben a kívánt méretpontosságot biztosítjuk.

### 8.6.1 A csőgyártás szerszáma

A szintetikus polimerek építőipari, épületgépészeti alkalmazásai között a legfontosabb a műanyag-csőgyártás. A 21. század környezetének tisztasága nagymértékben az infrastruktúrától függ. A legkisebb település is el kell hogy legyen látva HDPE-ből és kPVC-ből készült víz-, gáz és csatorna-csőhálózattal.

Az extrúziós csőgyártás bevált szerszámtípusát a 8.24 ábra mutatja be.



**8.24 ábra:** Csőgyártó-szerszám [8.8] a) kétrészes „tüske”(mag), b) az extruderhez csatlakozó elem, c) torpedó, d) sűrített levegő bevezetés a kalibrációhoz, e) tüske-rögzítés, f) szerszámház, g) központosító csavar, h) központosítható szerszámelem.

A 8.24 ábra csőszerszámában a kép jobb felén elhelyezkedő extruderből érkező ömledékáram egy torpedó-formájú központi maggal (*a, c*) (tüskével) találkozik. Ezt a központi szerszámelemet rögzítő elem (*e*) az ömledékáramot helyenként megosztja, de ezután az anyagfolyam újra egyesül. Az *f* szakaszban, ill. elemben történik az alakadás, a *h* szakasz szolgálja az ún. vasalást, simítást. Ez a *h* elem egyúttal három rögzítőcsavar finombeállításával a központosítást, a készülő cső szigorúan egyenletes falvastagságát is biztosítja.

Ilyen típusú szerszámokon készülnek a kPVC csatornacsövek, villamos és távközlési kábeleket vezető csövek, vízvezeték-csövek. Hasonló a HDPE gázcsövek szerszáma is. A csőátmérő elérheti az 1500 mm-t is, a falvastagság gyakran 25 mm-nél is nagyobb.

A csőszerszám után következő kalibrálás módját, eszközeit a későbbiekben (8.7.1 fejezet) tárgyaljuk.

### 8.6.2 A lemezgyártás szerszáma

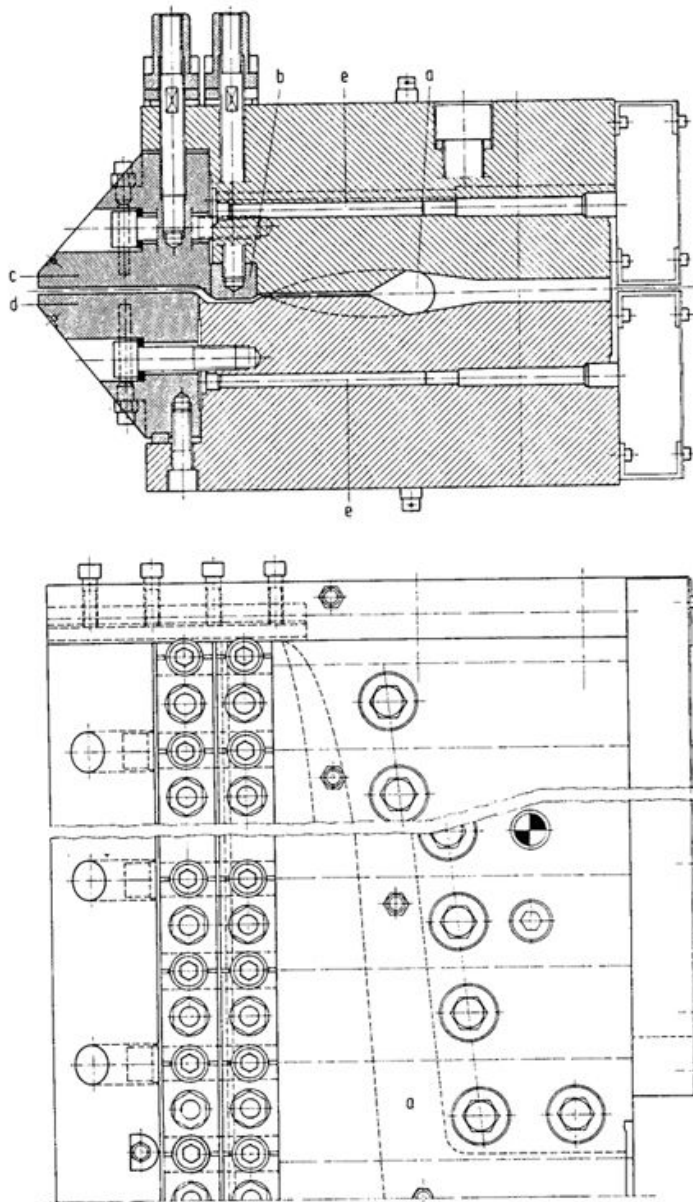
*Lemeznek* a műanyagiparban a 0,5 mm-nél (sőt: a leggyakrabban 1 mm-nél) vastagabb síklapot nevezik. A vékonyabb termék, a néhány tized mm vastag, vagy annál is vékonyabb fólia ugyanis alkalmazástechnikájában eléggé elkülönül. A fólia elsősorban rövidtávú célra (csomagolóstechnika, agro-fólia stb.) használatos, tekercsben forgalmazott termék.

A sokféle technikai alkalmazású féltermék, a merevlemez extruziója a gyártási technika, a szerszám felől tekintve is elválasztható a fóliától. A merevlemez tipikus gyártószerszáma az ún. *szélesrésű* szerszám a 8.25 ábrán látható.

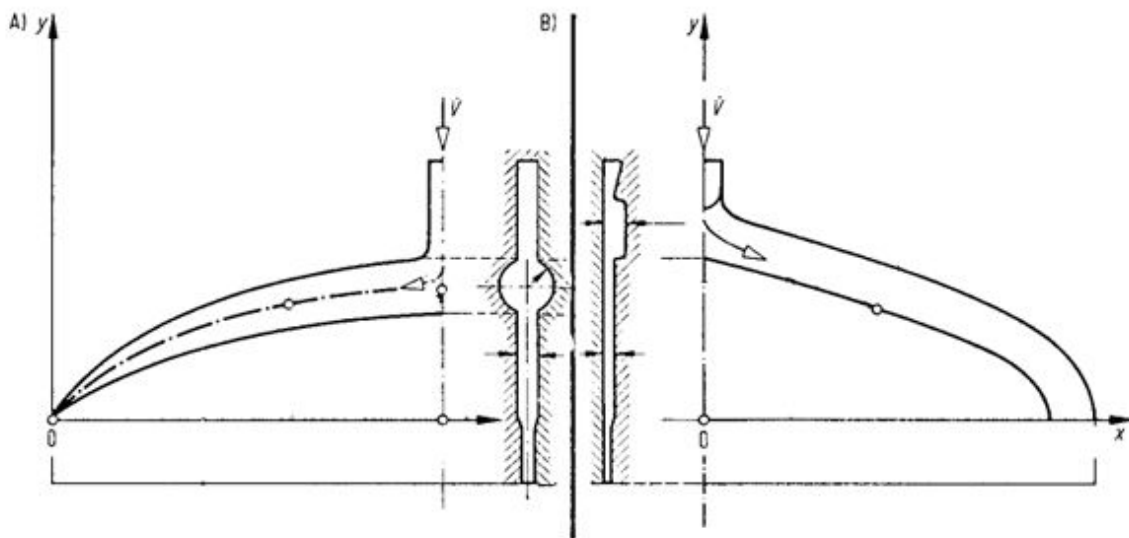
Az alapvető feladatot az jelenti, hogy egy kör-keresztmetszetű anyagáramot kell egyenletesen, síkban szétteríteni, akár 2000 mm-nél is szélesebb 15 mm-nél is vastagabb lemezzé. A szétterített anyagáram leginkább egy delfin vagy egy cápa farkához hasonlít, de a szétterítő csatornák formája miatt hívják vállfa (*Kleiderbügel, coathanger*) szerszámnak is (8.26 ábra).

A szélesrésű *szerszám* feladata az egyenletes vastagságú, feszültség- és elhúzóadás- („kardosság”)-mentes lemezgyártás. A lemezgyártó sor természetesen nemcsak extruderből és szélesrésű szerszámból, hanem ezt követően *kalander* hengerekből is áll (l. 8.7.3 fejezet, 8.37, 8.8.2 fejezet 8.41 ábrák). Valójában nagyon sok múlik a szerszám, a széles rés pontos finombeállításán. Ezt a 8.25 ábra c) és d) jelű kilépő ajaknyílásának szabályozásával érjük el, egy vagy (ahogyan itt a 8.25 ábrán) két oldalról. Egy 1600 mm széles lemezt gyártó szerszámon akár 40 ilyen állítócsavar is lehet. Az egyenletes lemezminőség feltétele az, hogy a szélesrésű szerszámból való kilépés minden pontján az anyagáram sebessége azonos legyen. Ezt a szabályozást szolgálja a *torlóléc* is. (8.25 ábra, b) jelű alkatrész). A legkritikusabb azonban a „vállfa” formájú *elosztócsatorna* konstrukciója.

A 8.26 ábra kétfajta konstrukciót is bemutat: a baloldalon (A) a gyakoribb, közelítőleg kör-keresztmetszetű elosztócsatornát látunk, amelynek átmérője csökken a középponttól távolodva. A jobboldalon (B) az újszerűbb megoldás látszik: négyszög- keresztmetszetű az elosztócsatorna, amelynek egyik mérete változatlan, míg másik mérete (vastagsága) csökken a középponttól távolodva a kilépési (lemez) vastagságig. Nyilvánvaló a B megoldás korszerűsége, az egyszerűbb kivitelezhetőség. Ez abból adódik, hogy az elosztócsatorna kiképzéséhez csak az egyik szerszámfelet kell marással kialakítani, a másik szerszámfél síklap.



**8.25 ábra:** Szélesrésű, lemezgyártó szerszám oldalnézeti metszetben (fent), és felülnézetben (lent) [8.8] a) elosztócsatorna, b) torlóléc, c) és d) állítható szerszámajkak, e) fűtőelemek

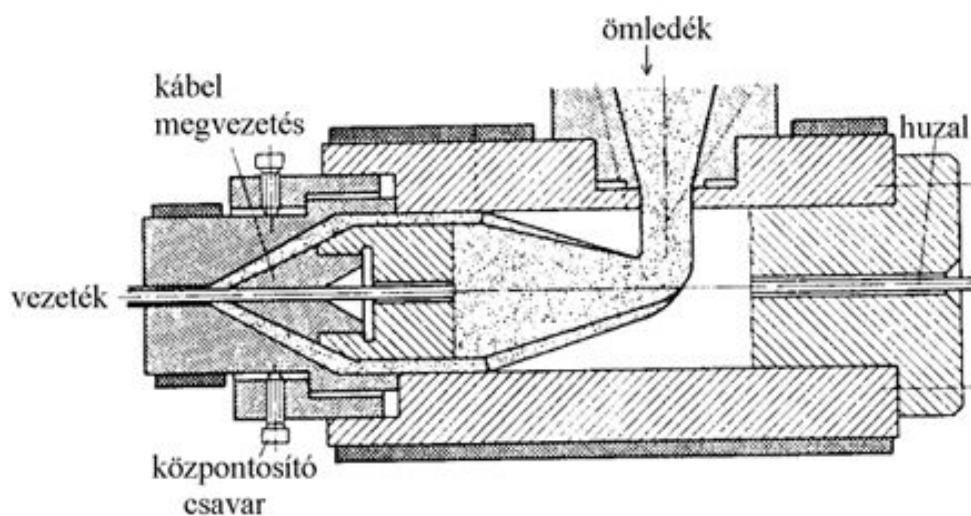


**8.26 ábra:** A szélesrésű szerszám elosztócsatornája felülnézetben (kétféle változatban) [8.8] A) körkörös elosztócsatorna, B) négyszögszelvényű elosztócsatorna

### 8.6.3 A kábelgyártás extruderszerszáma

Villamosvezeték szigetelőanyaggal való borítása volt az extrúzió egyik legkorábbi technikája, a gumiipar kezdetén, már a 19. század közepén. A villamos-szigetelőkábelek, zsinórok gyártására az 1930-as évek óta *PVC*-t, 1950 óta pedig igen sok *LDPE*-t is használunk.

Az extruderszerszám szempontjából itt a fő feladat: körgyűrű keresztmetszetű bevonat kialakítása adott mag körül de úgy, hogy a kiindulási, osztatlan polimer-anyagáram fő iránya és a késztermék fő iránya nem azonos, hanem jelentős szöveget – rendszerint  $90^\circ$ -ot – zár be.



**8.27 ábra:** Kábelbevonó „keresztfej” szerszám [8.8]

Ilyen „keresztfej” szerszámot használnak a kábelgyártásnál (8.27 ábra) és ahogyan azt később látni fogjuk a fűvott fóliatömlők (8.29 ábra), sőt a fűvott üreges testek gyártásánál is (10.8 ábra, 278. oldal).

Az ilyen u.n. *pinolén*-szerszámmag alapelve az, hogy az oldalirányból érkező anyagáramot úgy teríti rá a keresztirányú hengerpalástra, hogy abban csak egyetlen vonal mentén legyen anyagáram-összecsapás. Az ideális esetben a kilépő, köpeny-bevonat sebessége a körgyűrű minden pontján azonos. A feladat ennyiben a szélesrésű szerszám vállfa terítési elvéhez hasonlít, és a *pinolén*-fej elosztó csatornája kissé olyan, mintha a „vállfat” hengerpalástra borították volna. Érdeemes megjegyeznünk, hogy az extrudálás sebessége igen nagy: híradástechnikai (pl. telefon) kábelek gyártásánál nem kizárt az 1000 m/perc-et is meghaladó – gyorsvonat! – sebesség. Vékony kábelek gyártásánál már az 50 m/perc extrudálási sebesség is  $\dot{\gamma} = 10^6 \text{ s}^{-1}$ , vagyis igen magas nyírósebességet jelent.

A többezer, sodrott fémszálból álló vezetők extrúziós bevonásánál a *nyomás alatti* ömledék találkozik a fémsodrattal (*Druck-Ummantelung*). A többezres, már szigetelt vezetékcsalád burkolatának kialakításánál nyomásra nincs szükség, ott elég a központi kábelgyűjtemény körüli enyhe vákuum is (*Schlauch-Ummantelung*).

#### 8.6.4 Fóliatömlő extrúzió és szerszáma

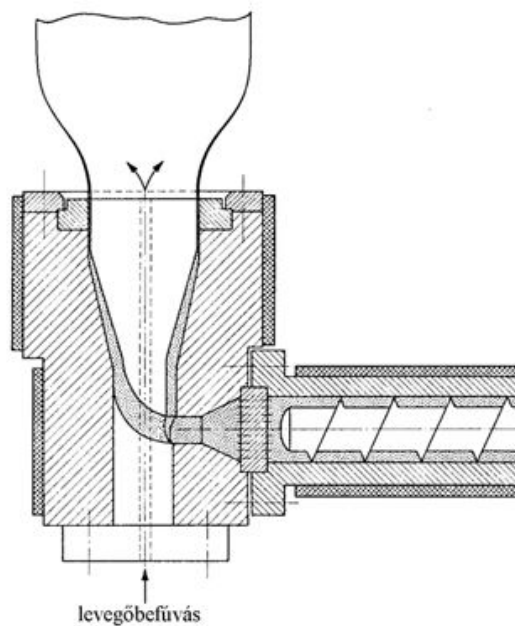
A csomagolástechnika lehetővé teszi a mezőgazdasági hajtatóházak (0,2 mm vastag és) akár 16 m szélességű *agro-fóliájáig* a vékony PE filmek nagyrésze *tömlő extrúzió (fóliafűvás)* technikájával készül. (8.28, 8.29, 8.30 ábra). A vízszintes extruder anyagáramát itt is 90 °-kal elfordítják, mégpedig tipikusan *felfelé*. A fordítószerszám lehet itt is *pinolén* típusú (8.28 ábra), de lehet több anyagáramra osztó, majd az anyagáramokat egyesítő alapelvű is.

A tömlőfűvás technológiájának elve jól hasznosítja a polimerek viszkoelasztikus állapotban megfigyelhető jelentős nyújthatóságát és az ezzel együtt megjelenő szilárdságnövekedést. A tömlőfűvás technológiáját kifejezetten az LDPE típusokra optimálták, de hasonló módszerrel fel lehet dolgozni HDPE-t, LLDPE-t, sőt PS habfóliát is.

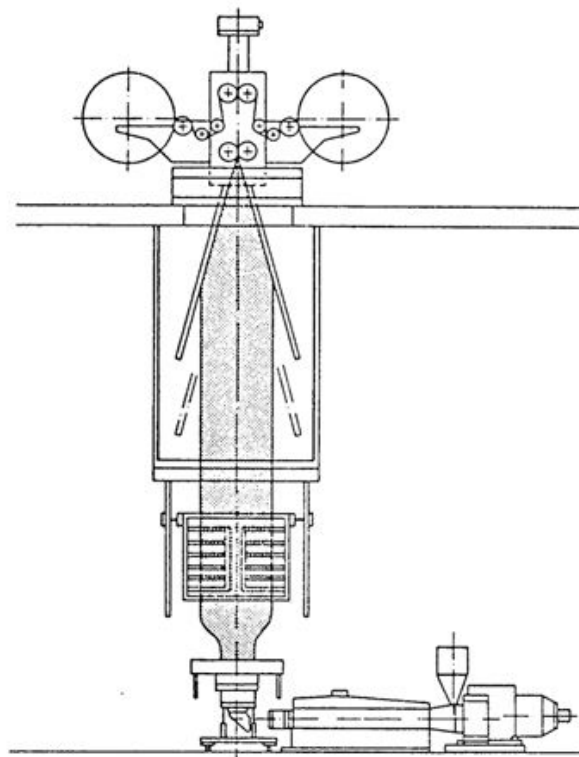
A fóliatömlő extrúzió elvi vázlatát a 8.29 ábra mutatja.

Az eljárás lényege, hogy a függőlegesen felfelé kilépő *tömlőt* még a teljes lehülés előtt enyhe túlnyomással „*felfűjjük*”: átmérőjét kétszeres vagy annál is nagyobb arányban megnöveljük, egyidejűleg az elhúzás sebességének beállításával hasonló arányú *hosszirányú* nyújtást is alkalmazva. Az átmeneti szakasz után a tömlő hőmérséklete a polimer kristályos olvadáspont alá kerül, mérete már nem változik, a felmenő szakasz további része már csak a természetes hűlést szolgálja. A „*háztető*” formájú terelő lapok (görgőcsatorna) között a tömlőt lapított formában tekercesel fel. A több emeletnyi magas gyártósor fényképét és néhány adatát a 8.30 ábra mutatja. Magyarországon két ilyen gyártósor működik, összesen 30 000 to/év kapacitással.



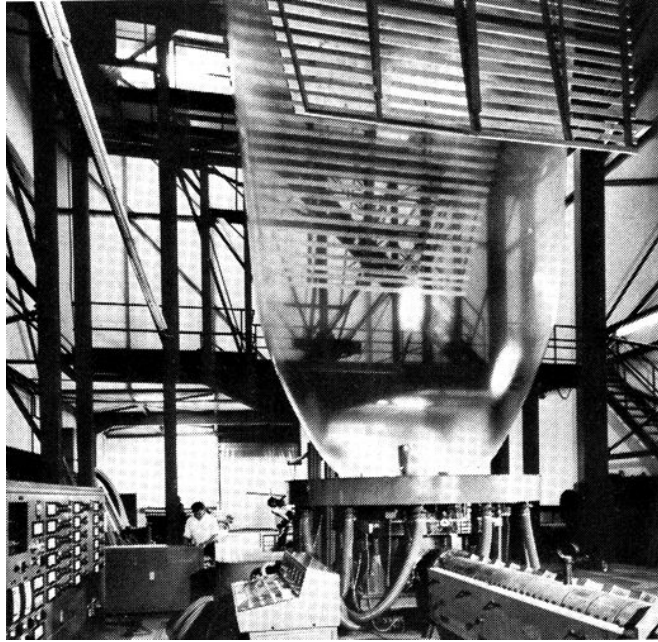


**8.28 ábra:** Fóliatömlő extrúzió pinolén szerszámmal [8.10]



**8.29 ábra:** A fóliatömlő extrúzió elvi vázlata

A fóliatömlő extrúzió, mint tipikus képlékeny polimer alakítási eljárás szemléletesen bizonyítja a polimertechnika sajátos előnyeit. Anyagunk viszonylag alacsony hőmérsékleten alakítható (a PE típusok kristályolvadási hőmérséklete 110–130 °C közötti) s akár egy óriási légbuborékra is – mint „szerszám”-magra – felhúzható.



**8.30 ábra:** Agrofólia extrúziója LDPE-ből. A tömlő átmérője 5 m, kiterített szélessége 16 m, vastagsága 0,15 mm. Gyártási sebesség: 60 m/h. Az extruder ömlesztő teljesítménye 1500 kg/h, éves gyártókapacitás: 12.000 to [8.9]

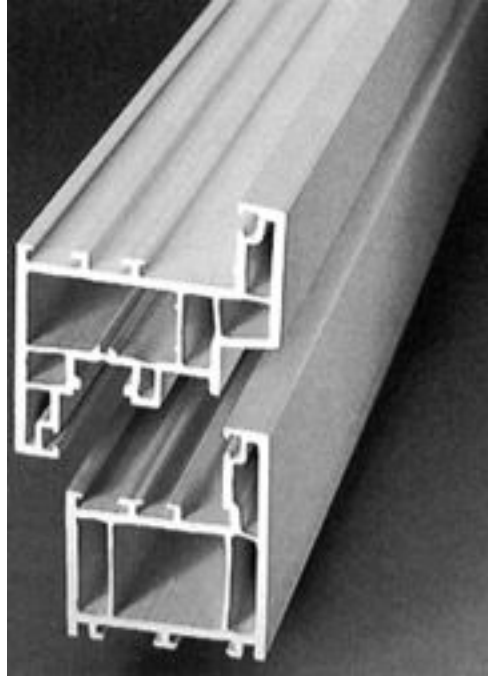
A légpárna túlnyomása mindössze néhány tized bar a tömlő-buborékban. A fólia lehül, mielőtt a néha több emelet magasságban elhelyezett tekerceselő berendezéshez érne.

A tömlőfúváshoz felhasznált alapanyagoknak *ömledékállapotban is megfelelő szilárdságot* kell felmutatnia. Ez a megfelelően *magas ömledékszilárdság* minden egyéb technikájú extrúzióknak is fontos előfeltétele. A tömlőfólia gyártáshoz felhasznált PE esetében a megkívánt ömledékszilárdságot a százezres nagyságrendű móltömeg biztosítja.

A minőségbiztosításnak szigorúan vett előírása a körkörös egyenletes falvastagság. A tömlőfúvásban ezt egyrészt a leleményes technika biztosítja: a fúvás során az esetleg (helyenként) vastagabb előtermék ömledéke nagyobb hőkapacitással rendelkezik, lassabban hűl, tovább fog nyúlni, vékonyodni. Másfelől a szerszám külső gyűrűje (l. 8.29 ábra) lassú forgó mozgást (vagy lassú oda-vissza ingamozgást) végezve is kiegyenlíti az esetleges helyi vastagodást. Végül ugyanezt a kiegyenlítést úgy is szolgálhatjuk, hogy megfelelő *spirális* hornyokkal a szerszámban már felfelé áramló polimer ömledéknek adunk a kilépés előtt egy kiegyenlítő áramlást.

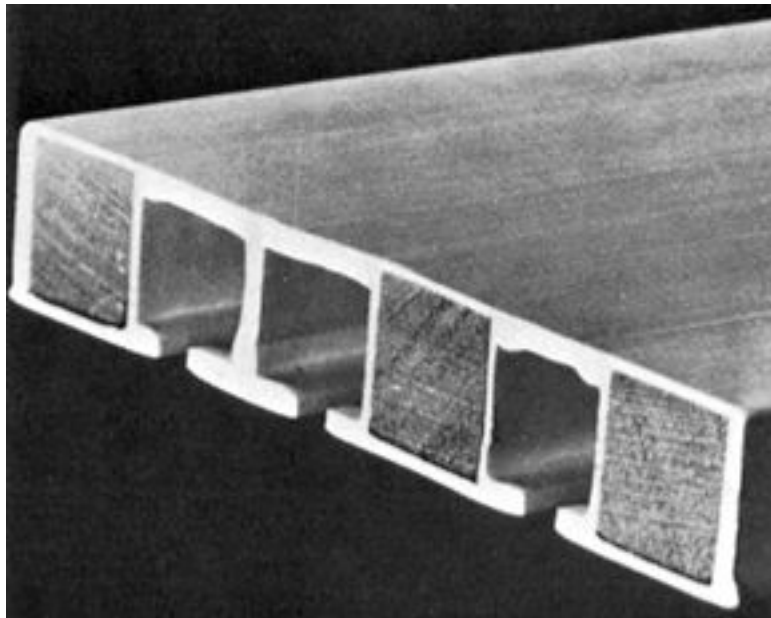
### 8.6.5 Többüreges profilok extrúziója

Az extrúzió technikája sokféle bonyolult alakú, többszörösen üreges profilok gyártását is lehetővé teszi. A kPVC-ből készült mérettartó és viharálló ablakprofil jó mechanikai „tartását”, merevségét és hőszigetelő képességét többszörösen összetett üreges (szekrényes) szerkezetének köszönheti. (8.31 ábra)



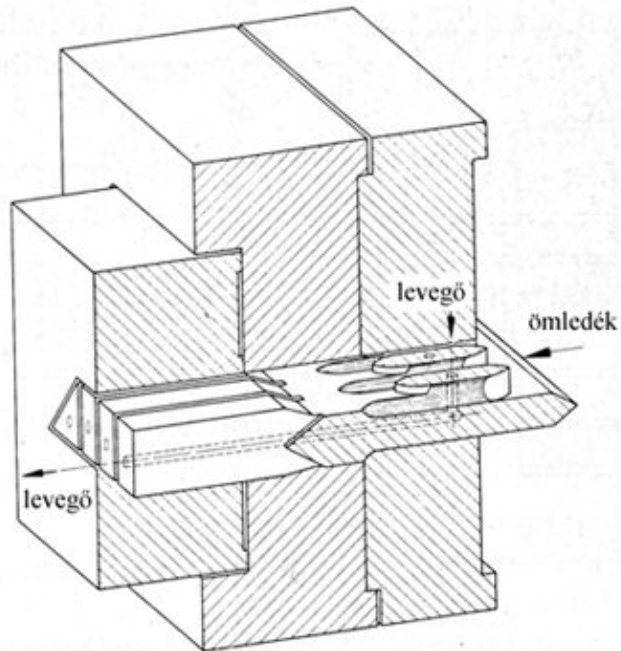
**8.31 ábra:** kPVC ablakprofilok [8.8]

Az extrúzió hossz-toldott fa-lécekre is történhet (8.32 ábra).



**8.32 ábra:** kPVC extrúziója fa-lécekre [8.9]

A szerszámkonstruktor előtt álló feladat hasonló, mint a csőszerszámnál vagy a tömlőszerszámnál: az alapanyag ömledékáramát meg kell osztani, hogy körbejárhassa a szerszám magjait, majd újra egyesülve kialakítsa a profilokat. Az ablakprofil szerszámnál még szigorúan síkba illeszkedő homloklapokat és kifogástalan felületi fényességet is biztosítani kell. Ezzel szemben a belső felületek alakja, felülete, sőt a belső bordák vastagsága is bizonyos tűréseket megenged. A kérdés: a külső mérettűrés szigorú betartásához milyen kalibrálási módszereket, szerszámokat alkalmazunk?



**8.33 ábra:** Az üreges profilextrúzió szerszáma [8.1]

A 8.33 ábrán is felismerhető az extruderszerszámok közös vonása: itt a három lapból felépített szerszám *betétei* hordozzák a fő funkciókat: az első szakasz az extruder kör-keresztmetszetű anyagáramát egy

- átmeneti szakaszban megosztja, majd egy
- alakadó szakaszban kialakítja a profil-közeli alakot, s végül egy
- vasaló szakaszban „lesimítja”, végleg megformálja.

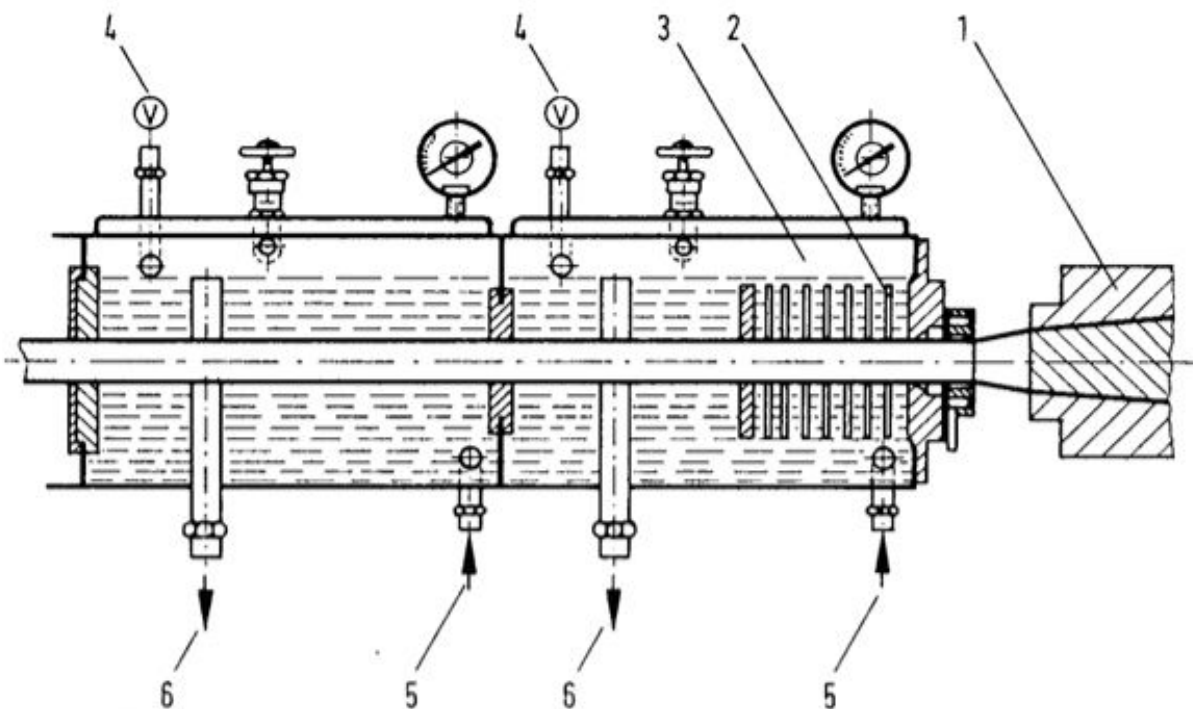
Ezekben az egymás utáni szakaszokban az anyagáram fokozatosan felgyorsul, a torlónyomás növekszik.

A profilextrúzió még számos kombinációs lehetőséget tartogat. Szó esik még majd (8.8.2 fejezet) a ko-extrúzióról, amikor kétfajta polimer anyagáramát egyesítjük az extruderben, hogy a profil megfelelő részében eltérő terméktulajdonságokat kapjunk.

## **8.7 Az extruder követőberendezései**

### **8.7.1 Kalibrálás vákuummal, túlnyomással**

Az extruderszerszámból kilépő anyagfolyam ugyan megkapta a kívánt keresztmetszetű alakot, ezt azonban kontrollált körülmények között kell – hűtéssel – rögzíteni. Ezt a megkívánt tűréshatárok közötti méretre hűtést hívjuk *kalibrálásnak*.

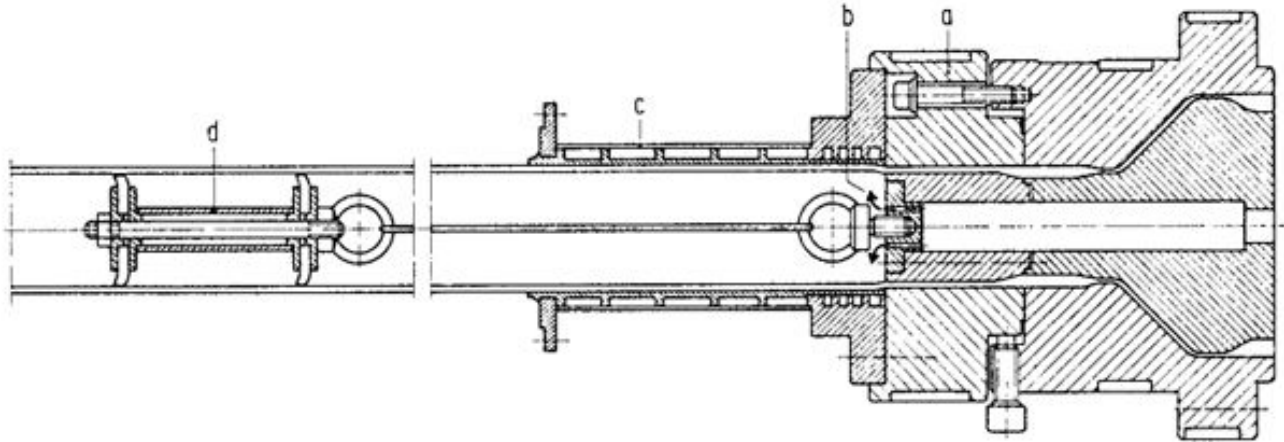


**8.34 ábra:** Vákuumkalibrálás a csőgyártás során 1) csőszerszám, 2) kalibráló lemezek, 3) vákuum-tank, 4) csatlakozás a vákuumszivattyúhoz, 5) hűtővíz-bevezetés, 6) víz-elvezetés

A kalibrálásnak különös jelentősége van az extrúziós csőgyártásban. Az extruder csőszerszámából (215. old, 8.24 ábra) kilépő anyagfolyam még nem teljesen szilárd, hanem viskoelasztikus állapotú anyag. Méretpontos lehűtésére alapvetően kétfajta eljárás adódik: kalibrálás vákuummal vagy túlnyomással.

A vákuumkalibrálásnál (8.34 ábra) a szerszámából kilépő cső alkalmas gumitömítésen keresztül belép egy csökkentett nyomású tankba, amelyben vízfürdőbe merülve egyre szűkebb belső átmérőjű lemezek közt hűl le. A vákuumkalibrálás nyilvánvalóan a külső méretet rögzíti a kívánt pontosságban. Ezt a módszert alkalmazzák a bonyolult keresztmetszetű profilok, pl. a PVC ablakprofilok esetében is. Ott a „kalibert” nem tárcsák képezik, hanem a külső profilnak megfelelő kemény krómozott sima felületű kalibrálószerszám. Ennek belső felületén áttörések (kis furatok, hasítékok) közvetítik a vákuumot.

A belső *túlnyomással* történő kalibrálás a nagyméretű csövek méretpontos hűtéséhez alkalmazott módszere. Alapelve a 8.35 ábrán látható. A csőbe a túlnyomás a szerszám felől érkezik. A hosszan hűtött szakaszt belül egy tömített dugó zárja le, amelyet a szerszámhoz rögzített sodrony tart meg, vonszol a haladó cső belsejében (vonszolt dugó). Többüreges profiloknál, amilyen pl. ablakprofil-család, ez a módszer nyilvánvalóan nem alkalmazható.



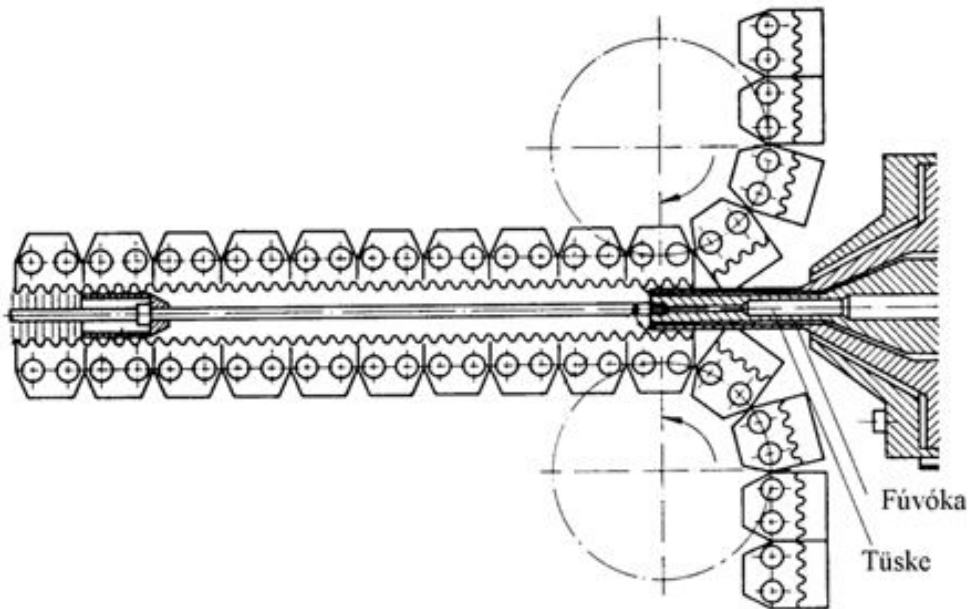
**8.35 ábra:** Kalibrálás túlnyomással a csőextrúzió során [8.8] a) a csőszerző kilépő része, b) sűrített levegő bevezetés, c) hűtött kalibráló szerző, d) vonszolt (gumitömítéses) dugó

A síklemezek kalibrálását az extruder követő kalandersor biztosítja. Ezt a 8.7.3 fejezetben mutatjuk be.

### 8.7.2 Különleges lehúzó: gégecső-gyártás

A kalibrálás után a síkfelületű termék egyenletes sebességű elvezetését lehúzó hengerpárok végzik. A nagytérű (pl. több száz mm) kemény csövek elvezetését rendszerint 6 darab gumifelülettel érintkező „hernyótalpas” lehúzó biztosítja, amelyek szorosan körülvevő a már lehűlt csövet, kihúzzák azt és továbbítják a termékkel együtt mozgó (néhány m/perc sebességgel „utazó”) daraboló vagy feltekercselő egység alá.

A „hernyótalp” elvű lehúzás különleges alkalmazását látjuk a 8.36 ábrán, ahol a lehúzó egység egyszersmind kaliberként és melegen formázó szerzőként is szolgál. Poliolefin vagy kPVC gégecsövek gyárthatók így:



### 8.36 ábra: Hernyótalpas lehúzó berendezés gégecső gyártására [8.1]

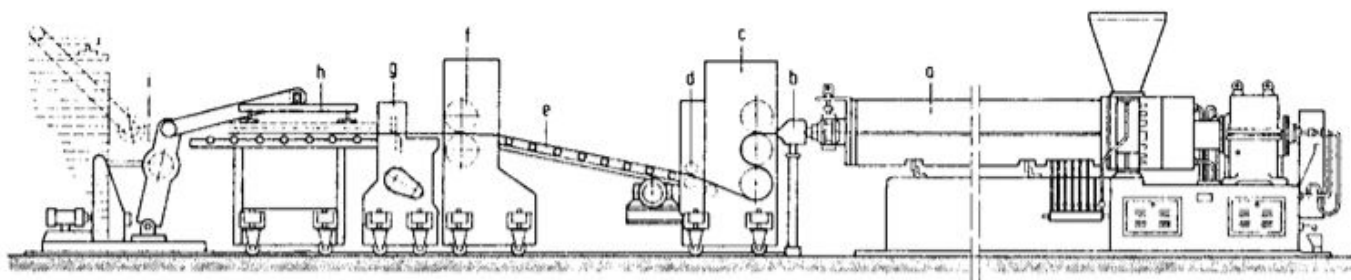
A hóálló gumipofájú hernyótalp egységek konkáv félkör alakúak, és szorosan egymáshoz illeszkednek. A kalibráció belső túlnyomással történik, amelyet a vonszolt dugó tart meg. Az így készült félkemény gégecsövek alkalmas ívben jól hajlíthatók keresztmetszetük leszűkülése nélkül. Építőipari alkalmazásuk pl. villamos vezetékek betonba fektetett alagútjaként, vagy lyukasztás után mezőgazdasági területek lecsapolására („*drain*”-csőként) igen jelentős.

### 8.7.3 Extruziós gyártósor

Az extrudált termékeket gyártó *gépsor* magas fokon automatizálható, folytonos üzemű gyártórendszer, amely magában foglalja

- az előkészítő (szárító, mérő, keverő, adagoló, szállító stb.) berendezéseket,
- az extrudert,
- a szerszámot,
- a kalibráló és hűtőegységet és az egyéb
- követőberendezéseket (daraboló, tekercselő, konfekcionáló, csomagoló stb) kiegészítő berendezéseket, célgépeket.

Néhány ilyen gyártósorról már fogalmat alkothattunk az eddigiekben is, pl. a fóliatömlő-gyártás (8.6.4 fejezet, 8.29, 8.30 ábra 220, 221. oldal) során, vagy a gégecső-gyártás során. A kábelek gyártósora felcsévéléssel záródik. Az 1–2 mm-nél is vastagabb (merev) lemezgyártó-sor vázlatát a 8.37 ábra mutatja be.



**8.37 ábra:** Lemezgyártó extrudersor a) extruder, b) szélesrésű szerszám, c) simító kalander, d) kivezető hengerpár, e) görgős szállító-hűtő szakasz, f) lehúzó hengerpár, g) daraboló olló, h) vákuumos lemezemelő, i) rakományképző robot

A lemezgyártó-sort táplálhatja granulátum is (pl. HDPE, PP lemezgyártás esetén), de készülhet lemez kPVC-ből is, ilyenkor a gyártósor elején a száraz porkeveréket előállító keverő-berendezést kell beállítanunk (6.1 fejezet, pl.: 6.5 ábra).

A 8.37 ábrán bemutatott elrendezéshez hasonló gyártósorban még jó néhány részegység helyet kaphat: ellenőrizhetjük a lemezvastagságot, pl.:  $\beta$ -sugárzó izotóppal, jelét visszavezethetjük a simító kalander hengerpárjának beállítására, a még meleg PP-lemezre textilbevonatot, műbőrt, vagy más felületet (tulajdonságot) adó polimerréteget „kasírozhatunk” egy-egy újabb hengerpár beállításával, és így tovább. A kábelek, csövek gyártósorában a minőségbiztosítás mai szintjén

*tampon nyomásos* feliratkészítő jelzi – akár méterenként többször is – a kábel vagy cső minőségi jellemzőit, eredetét, gyártási dátumát. A síklemez gyártósor kiegészülhet egy – a melegformázás elve alapján működő – hullámosító berendezéssel, így tekercselhető hullámlemez kaphatunk. A tömlőfólia gyártó gépsor közvetlenül is kiszolgálhat egy nyomtató és konfekcionáló gépsort.

Az extruder, mint a hőre lágyuló polimerek folytonos üzemű ömlesztő – szállító – és formaadó gépe kitűnően illeszthető a *többszörösen összetett gyártósorokba*, amelyek a mai gépipar, villamosipar, építőipar, élelmiszeripar és más iparágak céljait optimális módon, – igen jó hozammal – szolgálják.

## 8.8 Összetett extrúziós technikák

Az extrúzió mint polimerfeldolgozási technika jól illeszthető összetett, más feldolgozástechnikai alapelvet is alkalmazó rendszerekhez. Kiszolgálhat sajtológépet, kalandersort, palackfűvő gépet, és sok más feldolgozó gépet is, sőt: az extrudercsiga megjelenése a fröccsöntőgépben a 20. század második felében a fröccstechnikát is forradalmasította (ahogyan azt a következő, 9. fejezetben látni fogjuk). Az összetett alkalmazások sokoldalúságára itt még két példát szeretnénk adni: a szinterezéssel kapcsolt extrúzió és a ko-extrúzió példáját.

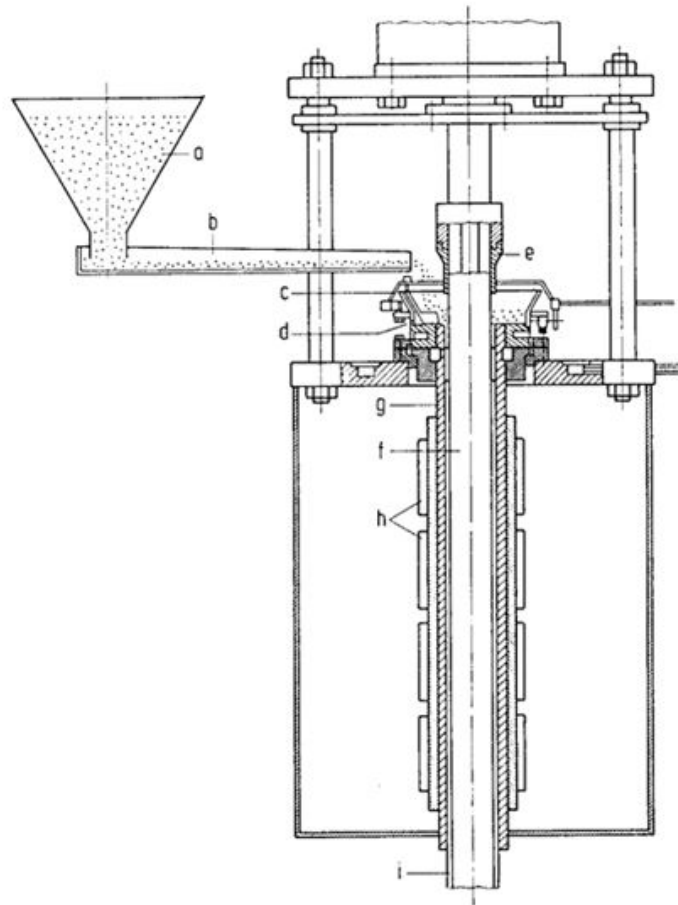
### 8.8.1 Extrúziós szinterezés

Már megismertük, hogy egyes „hőre lágyuló”, tehát nem térhálós polimerek különleges szerkezetük, vagy igen nagy móltömegük miatt nem dolgozhatók fel a hőre lágyulók leggyakoribb feldolgozási technikáival, az extrúzióval és a fröccsöntéssel. Így viselkedik a PVC is (adalékok nélkül), ilyen a természetes eredetű cellulóz, de bizonyos mértékig még az acetilcellulóz is, és van két polimer család, amely értékes használati tulajdonságai miatt különösen sok feldolgozástechnikai gondot okoz: a fluorpolimerek (PTFE, „Teflon” és társai) és a különlegesen nagy móltömegű PE (UHMWPE, *ultra-high molecular weight polyethylene*).

A 8.38 ábra bemutatja a PTFE csövek és rudak előállítására szolgáló *dugattyús* extrudert (*ram-extruder*, *Kolben-extruder*). Ez a függőleges rúdsajtoló-gép tehát *porból* (nem granulátumból) indul ki, és a porzsugorítás (szinterezés, porkohászat) elvén alapszik. A porrészececskék egyesítése alkalmas formájú tömbbé nagy nyomás és magas hőmérséklet egyidejű alkalmazásával történik. Így készülnek a henger alakú PTFE tömbök is, amelyekből azután a vékony szigetelő vagy tömítőfóliát mechanikus úton: forgácsolás elvén alapuló kése *hámozással* készítik. Az eljárás lassú, költséges, és gyakran *szakaszos* elvű. Ugyancsak ezzel a módszerrel dolgozzák fel a 106 Dalton-t is elérő móltömegű UHMWPE port is, hogy azután a kapott tömbökből, pl. kitűnő csípőprotézist (gömbcsuklót, vagy inkább annak ellendarabját) forgácsoljanak.

A dugattyús szinterező extruderbe az *a*) adagoló tölcserén beadagolt poralakú polimert az *e*) sajtoló bélyeg ismételt (intermittens mozgással) összetömöríti, s így az *f*) túske és a *g*) fűtött szinterező extruder cső közé préseli. A szükséges nyomást tulajdonképpen a polimer alapanyag és az *f*) ill. *g*) elemek közötti nagy súrlódás biztosítja. A PTFE csövet szinterező ilyen extruderben a polimerre ható nyomás 50 és 500 bar közötti értéket is elérhet.

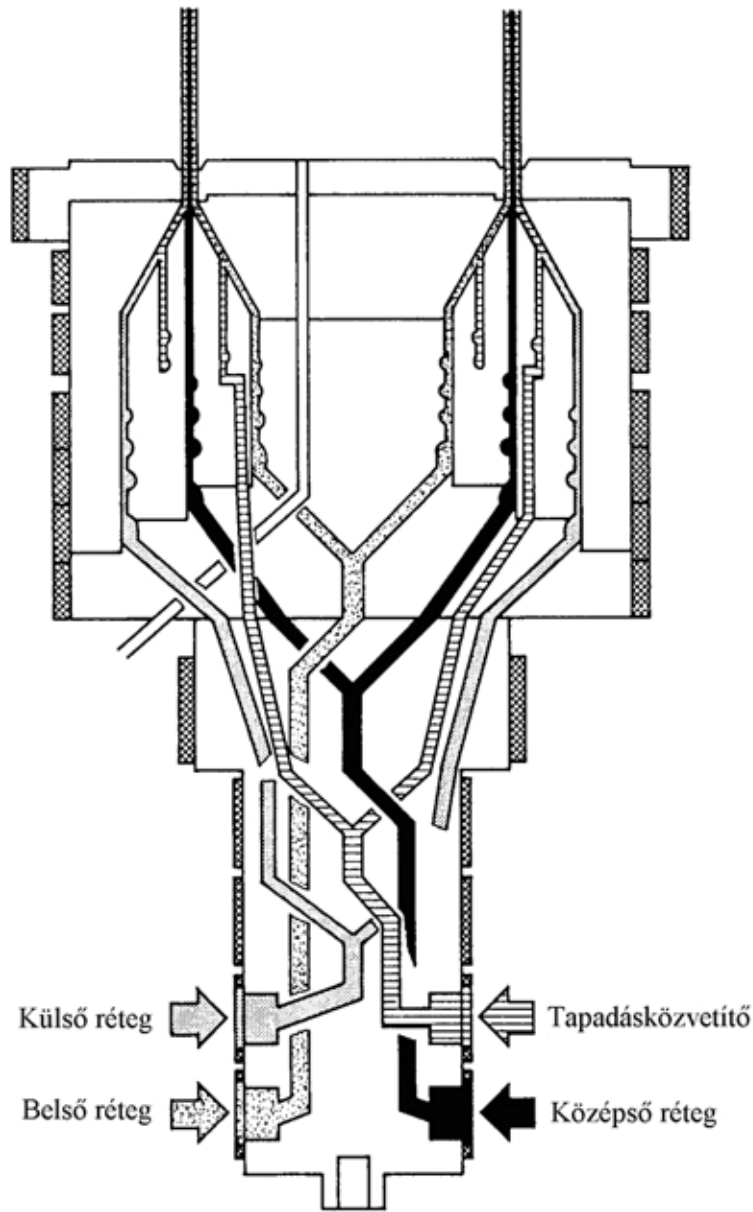




**8.38 ábra:** Dugattyús extruder PTFE csövek előállításához [8.8] a) adagolótölcsér, b) adagolócsatorna, c) körben forgó elosztótányér, d) töltő-tölcsér, e) sajtoló bélyeg, f) túske, g) a külső átmérőt biztosító extrudercső, h) fűtés, i) az extrudált késztermék (cső)

### 8.8.2 Koextrúzió

Az extrúzió mint rugalmas gyártási rendszer kitűnő lehetőséget ad arra, hogy a gyártott termékben többféle polimer egymást kiegészítő tulajdonságait megjelenítsük, érvényre juttassuk, anélkül, hogy az anyagáramokat összekevernénk. Jó példa erre a többrétegű csomagolófóliák extrúziója (8.39 ábra).

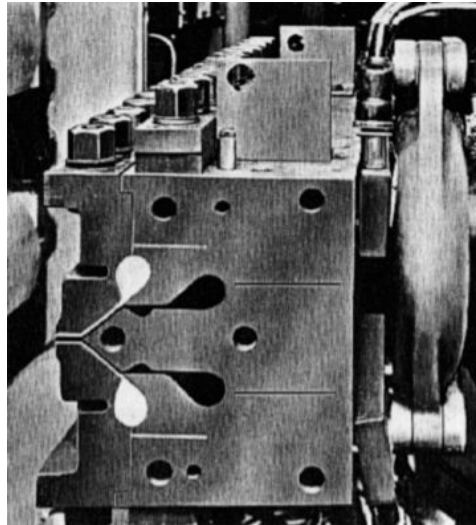


**8.39 ábra:** A koextrudált tömlőfólia szerzsám alapelve

A koextrúzió során tehát több extruder anyagáramát egyesítjük egyetlen szerzsámban. Így készíthetünk többrétegű csövet, lemezt, síkfóliát, sőt akár tömítőprofilokat is magukban foglaló, sok üreges ablakprofil, szegélylécet, autóiari alkatrészeket és sok más terméket.

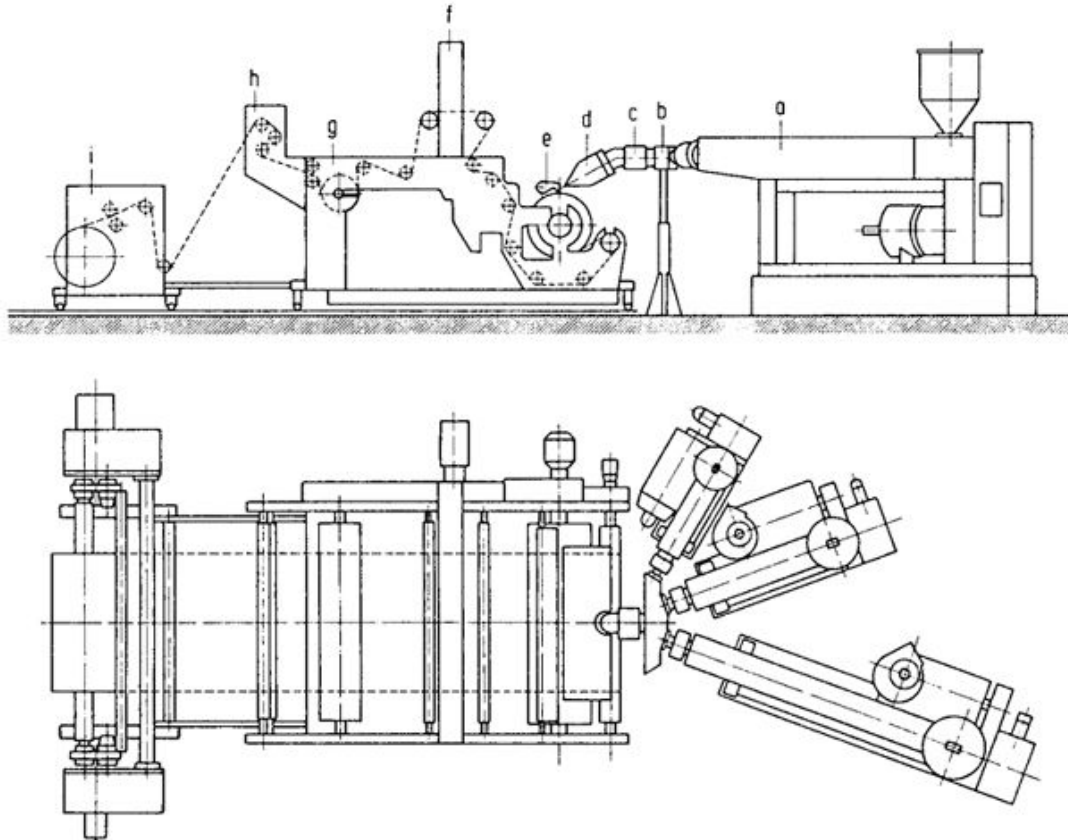
A koextrúzió kitűnő lehetőséget ad arra, hogy a különféle hőre lágyuló polimerek eltérő gáz- gőz- és aromaáteresztő képességét („*barrier*” = áteresztést gátló) tulajdonságait a korszerű csomagolási rendszerekben érvényre juttassuk. A 8.39 ábrán megjelenő, körgyűrű jellegű tömlőszerzsám-keresztmetszet, ötrétegű fűvott fóliák gyártására szolgál, négyféle anyagból, négy független extrudert használva.

A középső réteg ezekben az összesen 0,1 mm vastag fóliákban (pl. fűszerek, sajtok, felvágottak automatikus csomagológépeihez) rendszerint kitűnő aromazáró, de nedvességre érzékeny PA (a legsötétebb réteg a 8.39 ábrán). A külső (és belső) rétegek (az adott esetben kétféle) poliolefinből készülnek. A fólia hegeszthetőségét és a vízgőz-zárást a PE biztosítja. A három fő réteg között azonban különleges tapadásközvetítő (*Haftvermittler, adhesion promoter*) rétegekre van szükség, mivel a PE és PA nem tapad jól egymáshoz. Ez rendszerint *ionomer* réteg: akrilsavval módosított poliolefin, amelynek szabad savcsoportjait sóvá alakították. Így alakul ki az ötrétegű csomagolófólia.



**8.40 ábra:** Négyrétegű ko-extrudált lemez szélesrésű szerszámának keresztmetszete. A szerszám négy fő elosztócsatornájának a lemezsíkra merőleges metszete látható. [8.9]

Hasonló alapelvű a síkfólia gyártásban alkalmazott koextrúzió is (8.41 ábra). A síkfóliák vagy lemezek koextrúziójának is legköltségesebb eleme a szerszám és a hozzá tartozó anyagáram-elosztó közdarab (adapter), amely az eltérő reológiai tulajdonságú anyagáramok elosztását, majd a szerszámából való kilépés *előtti* egyesítését kell, hogy biztosítsa, kiegyenlített termékminőség mellett.



**8.41 ábra:** Többrétegű síkfóliák koextrúziója (oldal-és felülnézet) [8.8] a) extruder b) adapter, c) közdarab, d) szerszám, e) simítóhenger-hűtőhengerpár, f) vastagsgmérés, g) hűtőhenger, h) vágókés, i) feltekercselés

A koextrúzióban az egymással nem eléggé tapadó, nem jól hegedő rétegek egyesítésére használt *tapadásközvetítő* szerepével még találkozni fogunk a későbbiekben: hasonló tapadásközvetítő réteg kiépítésére van szükség a kompozit erősítőszál és mátrix között, és hasonló ehhez a polimer keverékekben (polimer ötvözetekben) használt, az összeférhetőséget javító kompatibilizálók (*compatibilizer*) szerepe is.

## 8.9 Szakirodalom

- Schwarz O., Ebeling F.W., Lüpke G.: *Kunststoffverarbeitung*. Vogel Buchverl., Würzburg . 1991.  
 Belofsky H.: *Plastics – Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Rauwendaal C.: *Polymer Extrusion*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1994.  
 Wobcken W.: „Saechtling” *International Plastics Handbook*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Ramos F.: *Extrusion de Plasticos*. Editorial LIMUSA S.A., Mexico . 1993.  
 Johannaber F.: *Kunststoff – Maschinenführer*. Hanser. München . 1992.  
 Michaeli W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1992.  
 Knappe W., Lampl A., Heuel O.: *Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau*. Hanser. München . 1992.  
 . *Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch*. Badische Anilin- & Soda Fabrik AG. Ludwigshafen . 1971.  
 Osswald T. A.: *Polymer Processing – Fundamentals*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1998.  
 Michaeli W.: *Extrusions-Werkzeuge für Kunststoffe und Kautschuk*. Hanser. München . 1991.  
 Xanthos M.: *Reactive Extrusion: Principles and Practice*. Hanser-Oxford Univ. P., Munich-New York . 1992.  
 Grefenstein A.: *Reaktive Extrusion und Aufbereitung*. Hanser. München . 1996.

## FRÖCCSÖNTÉS

### Tartalom

## 9.1 A fröccsöntés alapelve

## 9.2 A fröccsöntő gép részei

## 9.3. A fröccsöntési ciklus a mechanikai mozgáselemek tükrében

## 9.4. A fröccsöntés folyamata az állapothatározók függvényében

## 9.5 A fröccsöntő gépek főbb műszaki jellemzői

### 9.5.1. Záróerő

### 9.5.2. Fröccsöntési kapacitás, fröccsmunka

### 9.5.3. Ömlesztő teljesítmény, egyéb kapacitás adatok

## 9.6 A fröccsöntő szerszámok alaptípusai

## 9.7 Különleges fröccsöntési technikák

### 9.7.1 Kétkomponensű fröccsöntés

### 9.7.2 Gázzal hajtott fröccsöntés

### 9.7.3 Fröccsöntés olvadóbetétes szerszámba

## 9.8 A fröccs-sajtolás

## 9.9 A fröccsöntés modellezése számítástechnikai úton

### 9.9.1 A számítógépes fröccsöntési programok jellemzői

### 9.9.2 A fröccsöntés-szimulációs programok felépítése

### 9.9.3 Anyagi tulajdonságok szerepe a szimulációban

## 9.10 Szakirodalom

A fröccsöntés és az extrudálás a polimerfeldolgozási technológiák két legfontosabb alakadási eljárása. Amíg azonban az extrúzió csak változatlan keresztmetszetű terméket gyárt tetszőleges hosszúságban (és ilyen értelemben az „egy- és kétdimenziós” termékek eljárása), addig a *fröccsöntéssel*

- tetszőleges alakú *3D* alkatrészeket és termékeket gyárthatunk,
- *zárt* szerszámban történő formaadással,
- nagy nyomású, kis viszkozitású polimerömladék gyors belövellésével (injection molding, Spritzgiessen),
- szakaszos üzemmódban.

Mindkét *nagyvolumenű* eljárásnak, a fröccsöntésnek és az extrúzióknak megvan az a nagy előnye, hogy gyakorlatilag *hulladékmentes* feldolgozást biztosít a hőre lágyuló polimerek plasztikus alakadása révén, a termék pedig újra *feldolgozható* marad (*recycling*). Mindkét eljárás rendkívül termelékeny és jól automatizálható, robotosítható. S bár a fröccsöntés tipikusan szakaszos üzemű, szemben az extrúzió folytonos üzemmódjával, igen jó termelékenységgel azáltal, hogy itt *még nagyobb nyírósebességgel* dolgozzuk fel, alakítjuk képlékenyen szerkezeti anyagunkat. A polimerfeldolgozás alapeljárait hasonlítja össze a 9.1 táblázat a nyírósebesség, az alkalmazható ömladékviszkozítás, és az ehhez szükséges optimális polimerlánc-hossz szempontjából.

Az eljárás	Jellege	Nyíró- sebesség $\dot{\gamma}$ (1/sec)	Viszkozi tás $\eta$ (Pa·s)	Átlagos móltömeg $M_w$ (g/mol)	Folyási mutatószám MFI (g/10 min)
Sajtolás	szakaszos	10	10 000	$>10^6$	0,5
Kalanderezés	folytonos	$10^2$	1 000	$>10^5$	1
Extrúzió	folytonos	$10^3$ - $10^4$	100	$>10^5$	5
Fröccsöntés	szakaszos	$10^4$ - $10^6$	100	$>10^4$	10
Szálgyártás	folytonos	$>10^6$	10	$>10^3$	50

### 1. táblázat - A főbb polimerfeldolgozási technológiák összehasonlító adatai

A 9.1 táblázat adatai természetesen csak durva, *nagyságrendi* arányokat jelölve, – a nyírósebesség növekedésével párhuzamosan egyre termelékenyebb eljárásokra utalnak. Azt is világosan láthatjuk e táblázatból, hogy a különféle eljárásokhoz eltérő móltömegű alapanyagokra van szükség. Pl. sajtolásra a különlegesen nagy molekulájú polipropilén is alkalmas, kalanderezéshez, extrúzióhoz kisebb, fröccsöntéshez még kisebb móltömeg ad optimális hozamot. A szálgyártáshoz pl. általában még ennél is kisebb átlagos móltömegű, az adott feldolgozási hőmérsékleten még kisebb ömledékviszkózitású PP-t használunk.

Az extrúzió és a fröccsöntés polimerfeldolgozási technológiájának – amelyek együttesen manapság a polimerfeldolgozás *volumenének* jóval több, mint felét adják – főbb paramétereit (hőmérséklet, nyomás) hasonlítja össze a 9.2 táblázat a legfontosabb hőre lágyuló polimerek esetében. Látható, hogy amíg a polimerömledék tipikus nyomása az extruderben 10–40 MPa, addig a fröccsgépben ez a nyomás tipikusan 80–120 MPa, sőt e fölötti. Hasonlóan általános érvényű összefüggés, hogy a kisebb viszkozitás elérése érdekében a fröccsgépben az ömledék hőmérséklete jelentős mértékben magasabb, mint az extruderben.

	Extrúzió hőmérséklete °C	Extrúzió nyomása MPa	Fröccsöntés hőmérséklete °C	Fröccsöntés nyomása MPa
LDPE	125–135	10–40	134–145	20–50
HDPE	140–170	10–40	200–260	60–120
PP	185–240	15–40	200–280	80–150
PS	170–200	15–20	160–240	60–150
PVC	155–160	10–20	160–170	80–100
ABS	180–200	15–25	180–220	80–120
PA	250–300	15–25	260–320	70–100
PMMA	160–180	5–10	180–240	50–100
POM	180–200	5–10	180–230	80–140
CA	190–210	15–25	170–210	100–140
PC	250–300	15–25	270–350	100–140

	<b>Extrúzió hőmérséklete</b>  °C	<b>Extrúzió nyomása</b>  MPa	<b>Fröccsöntés hőmérséklete</b>  °C	<b>Fröccsöntés nyomása</b>  MPa
PTFE	por szinterezés /ömlasztés/ 370–400 °C-on, forgácsolás			

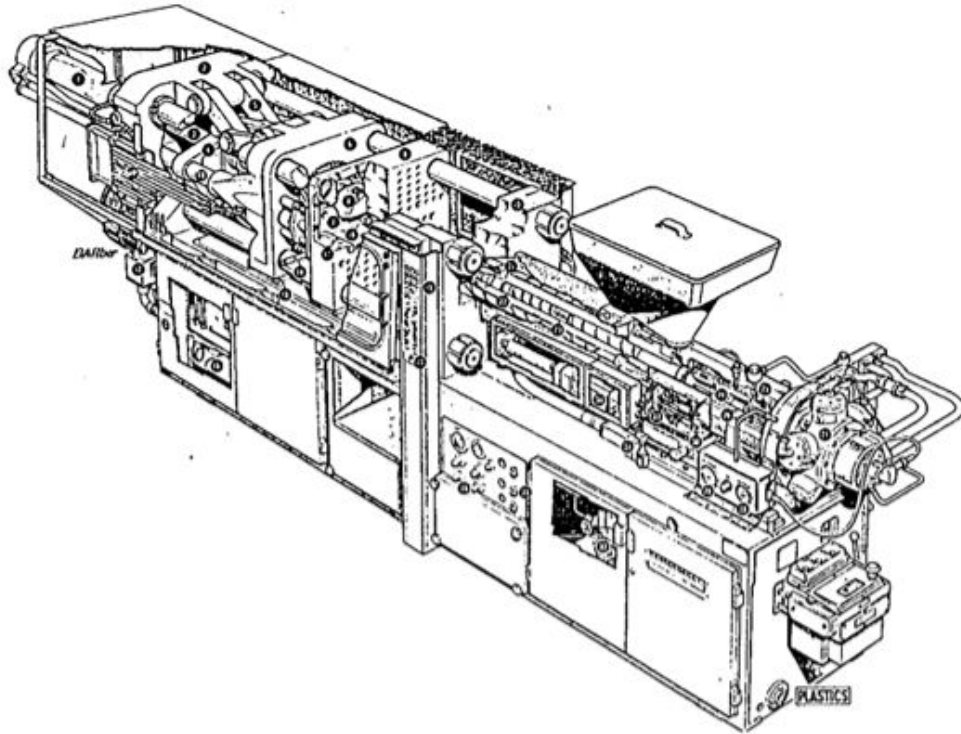
**2. táblázat - Hőre lágyuló polimerek feldolgozásának főbb (T,p) paramétere**

### **9.1 A fröccsöntés alapelve**

A fröccsöntés alapelve tehát az, hogy a polimer ömledéket, – amelyet az olvadáspont fölé melegítve *kis viszkozitású* folyadékállapotba vittünk, – nagy sebességgel, szűk beömlő nyíláson át zárt szerszámba „fecskendezzük”, és ebben a zárt szerszámban a *nagy nyomás* alatt kihülő polimerből alakul ki a tetszőlegesen bonyolult formájú (3D) alkatrész, gyakorlatilag *hulladékmentes*, képlékeny alakítással, nagy méretpontossággal.

A kis ömledékviszkozításra a bonyolult szerszámtér gyors és teljes kitöltése miatt van szükség. A szerszám kitöltés ideje tipikusan a másodpercek tartományába esik. A fröccsöntés, mint nagy pontosságú és rendkívül termelékeny alkatrészgyártás mérethatárai rendkívül tágak: 50 mg-os fogaskerék és 50 kg-os kád egyaránt gyártható megfelelő méretű fröccsöntő gépen. Az elsősorban a *hőre lágyuló* polimerekre, tipikusan PE, PP, PS, PVC, PMMA, ABS, POM, PC, stb. anyagokra kidolgozott eljárás alkalmazható a *hőre nem lágyuló* polimerek feldolgozása terén is. A *duromer* anyagsaládban (fenoplasztok, aminoplasztok, melamin-epoxi kombinációk stb.), ill. az *elasztomerek* (gumik) esetében a *térhálósítás* magában a fröccsöntő szerszámban történik. Ez utóbbi eljárásokban, amelyeket *reaktív fröccsöntésnek* (RIM) nevezünk, sokszor *prepolimerből* (*előpolimer*) indulnak ki (pl. a szilikonok, poliuretánok esetében tipikusan két folyadékfázisú alapanyagból), és az ilyen fröccsöntést viszonylag kis nyomáson hajtják végre.

A fröccsöntő gép tipikus megvalósítási formáját a 9.1, 9.2 és 9.3 ábra mutatja.

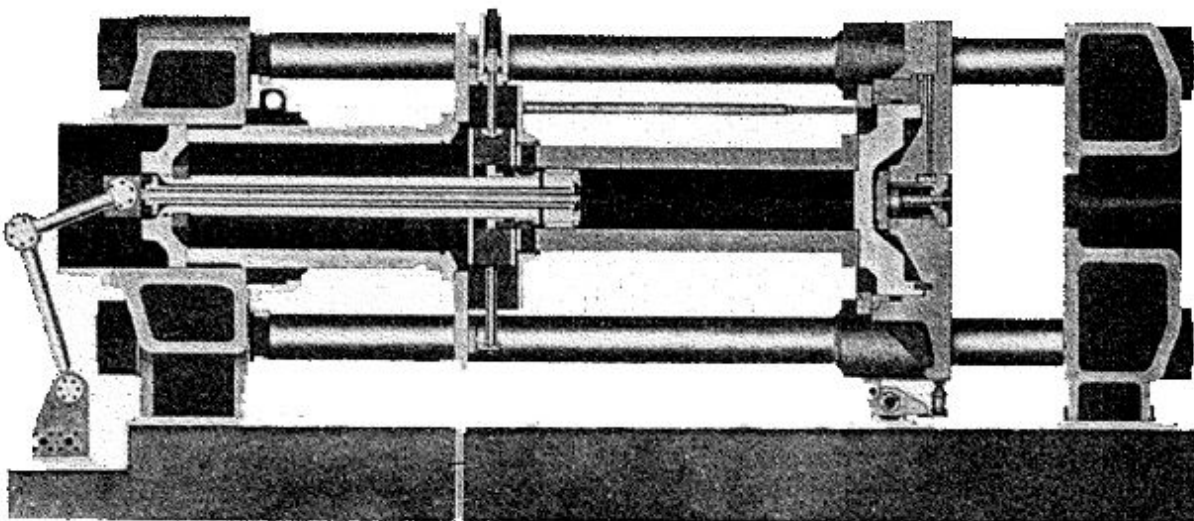


**9.1 ábra:** Egy 300 t záróerős tipikus fröccsöntő gép (Peco MM) „áttört” szerkezeti képe [9.3]

A fröccsöntés technológiáját származtathatjuk a fémek nyomás alatti öntéséből is, a korai műanyag fröccsöntő gépek azonban valószínűleg ettől független fejlesztés eredményei. Már 1872-ben megjelent egy szabadalom [9.1] a kámmal lágított nitrocellulóz, a celluloid feldolgozásáról egy ún. dugattyús „töltőgépen”. A korai dugattyús fröccsöntő gépek sorozatgyártása Németországban az 1920-as években indult el. Az igazi áttörés azonban a *csigadugattyús* fröccsöntő gép megjelenésével az 1960-as évekre tehető. A forgó- és oda-vissza mozgásra is képes csigadugattyús fröccsöntő gépet 1956-ban szabadalmaztatták [9.2].



## 9.2 A fröccsöntő gép részei



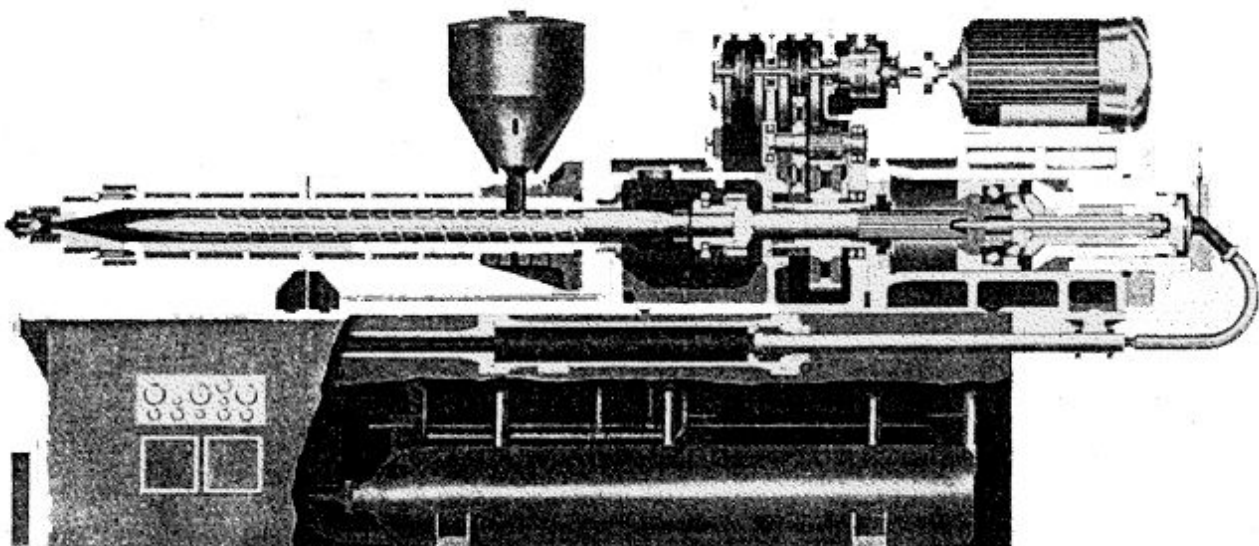
**9.2 ábra:** Csigadugattyús fröccsöntő gép hidraulikus záróegysége (A túloldali 9.3 fröccsöntő egységhez csatlakozó géprész) [9.14]

A 9.2 és a 9.3 ábrákon, amelyek egy korszerű csigadugattyús fröccsöntő gép két fő egységét mutatják, (–a fröccsöntés iránya jobbról balra–) jól látható, hogy a korszerű fröccsöntő gép alapvetően két fő részből áll: a fröccsöntő egységből (9.3 ábra) és a szerszámhordozó, szerszám záró egységből (9.2 ábra). A fröccsöntő gépek legfőbb alkatrésze a **csigadugattyú**, amely méreteiben és arányaiban is igen hasonló az extrudercsigához, azzal a lényeges különbséggel, hogy a csigadugattyú nemcsak forgásra, hanem egyidejűleg (ezzel „ellentétes”:  
*reciprok*) **dugattyú-szerű mozgásra** is képes.

Az ilyen típusú csigás fröccsöntő gép (*reciprocating screw injection molding machine*) tette lehetővé azt, hogy a visszavonuló dugattyúmozgás közben a forgó csiga az extruderhez hasonlóan megömleszt, (plasztikálja) és maga elé tolja a hőre lágyuló alapanyagot. Ezekkel a gépekkel ugyanakkor jelentős utónyomás (> 100 MPa), nagyfokú automatizálás, és korábban soha nem tapasztalt alkatrészgyártási sebesség, ill. hatékonyság valósítható meg.

A 2000-es évforduló táján a világ 120 Mt/év feletti *műanyag-feldolgozásának* több mint 25 %-a fröccsöntéssel történik, a *műanyag-feldolgozó gépgyártásnak* pedig értékben 2/3-át adja az évi > 10 000 db csigás fröccsöntő gép legyártása. [9.2]

A fröccsöntő gép egyik fő része tehát maga a *fröccsöntő egység* (fröccs-aggregát) (tipikusan a gép jobb oldalán), amelyhez a másik fő rész, a robosztus *szerszám záró egység* csatlakozik. Mivel a polimer ömledék igen nagy nyomása jelentős méretű felületen érvényesül, az osztott szerszám részeit összeszorító erő, amely 15–20 %-kal meg kell hogy haladja a szerszám üregben kialakuló nyomásból fakadó erőt, már a közepméretű fröccsöntő gépeken is >106 N, vagyis több, mint 100 t záróerőt követel meg.



**9.3 ábra:** Csigadugattyús fröccsöntő gép fröccsöntő egysége (A túloldali 9.2 záróegységhez csatlakozó géprész) [9.14]

A *szerszám záró egység* egy álló és egy mozgó szerszám felfogó (függőleges) lapot tartalmaz, ez utóbbit tipikusan 4 vaskos vízszintes vezető oszlop vezet. Újabb típusú gépeken a szerszámzárás egy nyitott, fekvő C alakú keretben történik. A szerszám záró egység mozgását a 9.2 ábrán bemutatott változaton hidraulikus rendszer biztosítja, de gyakori a könyökemelő mechanizmus is.

A szerszám záró egység elülső és hátulsó része tehát mozdulatlan, míg középső része a függőleges szerszám felfogó lappal mozog, minden ciklusban egyszer összezárja, majd ciklus végén kinyitja a szerszámot.

A csigadugattyús fröccsöntő gép fröccsöntő egysége a hengerrel, csigadugattyúval és tartozékaival együtt szintén elmozdul a géphez képest minden egyes ciklusban: a szerszámzárás után rázár (szorosan csatlakozik) a szerszámra, majd a befröccsöntés befejeztével, alkalmas időpontban elszakad, (visszahúzódik) a szerszámtól. A szoros csatlakozásra a megfelelő (> 1000 bar) ömledéknyomás átadása miatt van szükség. Az ismételt elszakadást (eltávolodást) technológiai okok indokolják: a fröccsegység csúcsa, a fúvóka fűtött, míg a szerszám hűtött.

A fröccsöntő gépek csigájának tipikus átmérője 20 mm és 200 mm közötti, L/D értéke általában 20, de bármennyi lehet 18 és 25 között, – a csiga fordulatszáma 100 és 250 ford/perc közötti (a nagyobb gépe lassúbb).

### **9.3. A fröccsöntési ciklus a mechanikai mozgáselemek tükrében**

A fröccsöntés tehát a polimer alkatrészgyártás *szakaszos, ciklusos* képlékeny alakítási technológiája. A fröccsöntési ciklus összetevőit, legfontosabb lépéseit a 9.4 ábra mutatja. Ez az ábrsorozat a következő 6 részfolyamatot mutatja be:

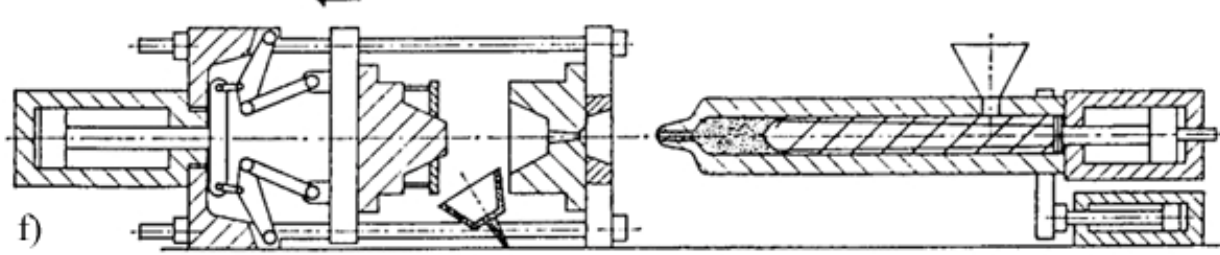
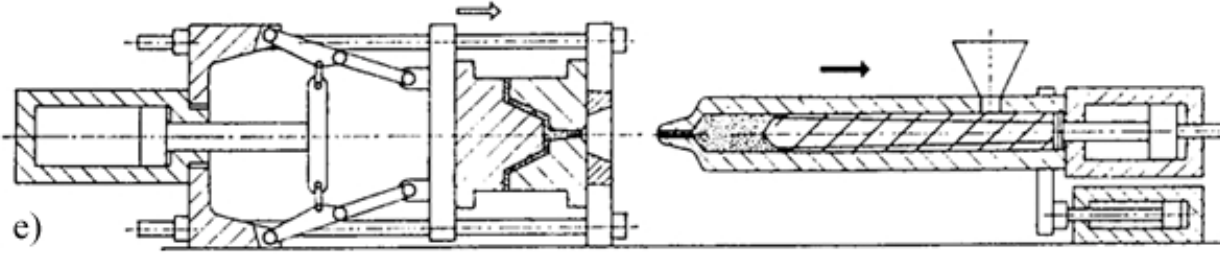
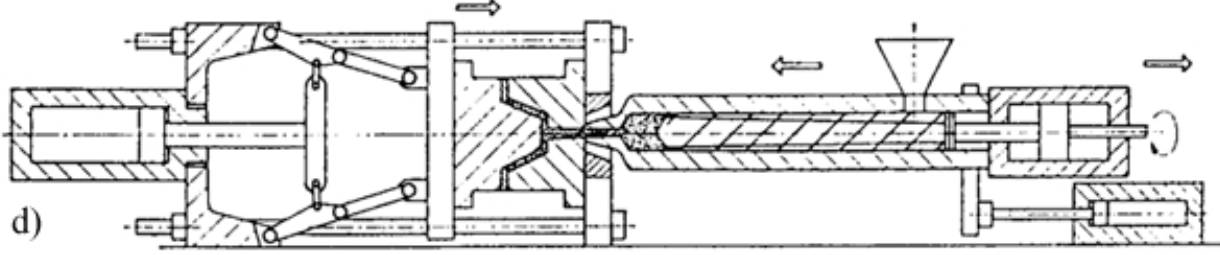
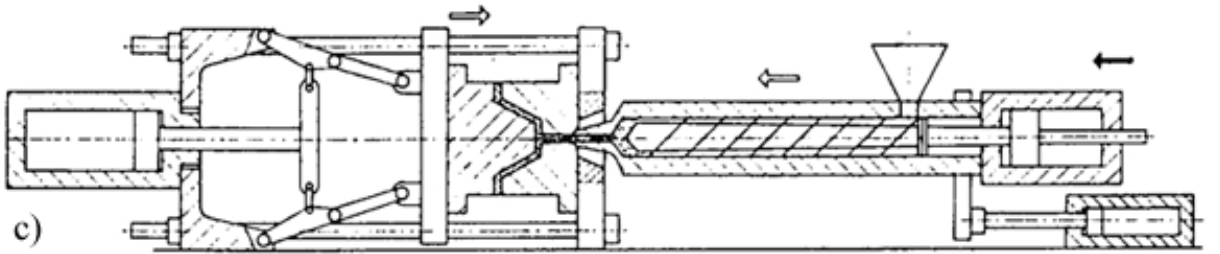
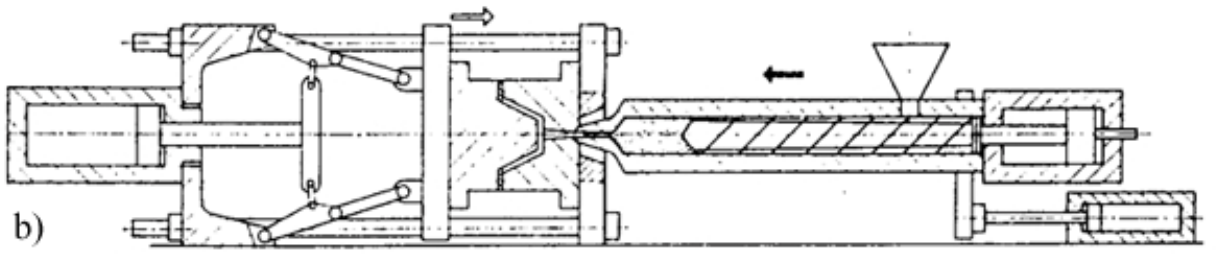
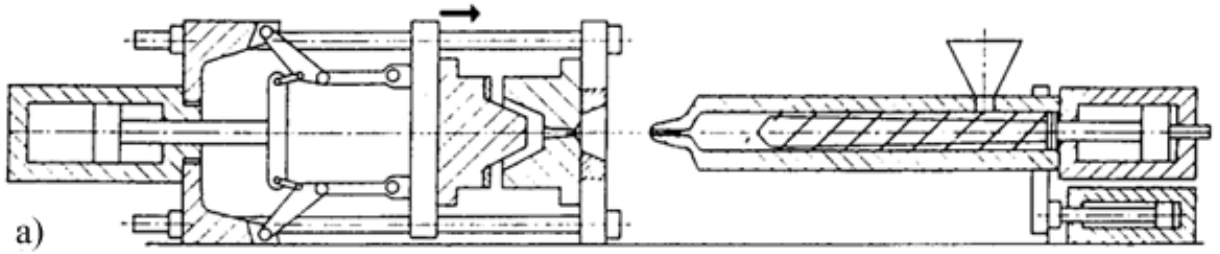
- a szerszám bezáródik;
- a fröccsöntő egység előre halad, csatlakozik az álló szerszámfelfogó laphoz (a fröccsaggregát „rázár” a szerszámra),
- befröccsöntés, amely a csiga *dugattyúmozgásával* történik, majd ezt követő nyomásfokozás („utónyomás”);
- hűtés, miközben a csiga *forgómozgással* egyidejűleg hátrafelé mozog és *plasztikál*: ömledék állapotba hozza és maga elé tolja a következő ciklusban befröccsöntendő anyagot;
- a fröccsöntő egység visszahúzódik, elszakad a szerszámtól, miközben a termék tovább hűl a zárt szerszámban;
- a szerszám nyit, a terméket a szerszám kidobó alkatrésze kidobja.

A mozgáselemek időszükségletét jól jellemzik példaként egy tipikus, igényes fröccstermék, egy PC (polikarbonát)-ból készült CD (*compact disc*) lemez fröccsöntésének részadatai:

szerszámzárás, aggregát zárás	0,84 sec.
befröccsöntés	0,22 sec.
utónyomás	0,25 sec.
hűtés	2,22 sec.
szerszámnyitás (+ beömlőcsonc levágása)	0,73 sec.
a kész CD kiemelése (robottal)	0,74 sec.
Összes ciklusidő	5,00 sec.

### 3. táblázat - CD lemez fröccsöntésének időszükséglete

A ~10 g-os CD lemez tehát 5 másodpercenként készül el nyers lemezként, amire még a lézer-fényt visszaverő tükröző réteget gözölnek fel, a lemez bevonatot, majd címkét kap, csomagolják, szállítják. A hűsleges adatvisszaadás, ill. *high fidelity* hangvisszaadás mindenesetre a fröccsöntés hibátlanságán (is) múlik. Manapság egy CD teljes technikai önköltsége (0,06 DEM anyagfelhasználással) nem kerülhet többé 1,0 DEM-nél (természetesen szerzői jogokat nem számolva).



**9.4 ábra:** A fröccsöntő gép munkaciklusának elemi lépései [9.13] a) szerszám zárás, b) fröccsegyység csatlakozik, c) befröccsöntés, d) hűtés a szerszámban, ömlesztés a csiga körül, e) fröccsegyység visszavonul, f) szerszámnyitás

## 9.4. A fröccsöntés folyamata az állapotváltozók függvényében

Az előbbi (CD) példából is nyilvánvaló, milyen nagy jelentősége van a szigorúan alakhű, mérettartó, vetemedésmentes formaadásnak a fröccsöntésben.

A CD-lemez mikroméretű barázdáinak modulációja vezérli az ezeken a barázdákon visszatükröződő lézerefényt. A domborulatok finomságára és sűrűségére jellemző, hogy az előrejelzések szerint a közeljövőben egyetlen CD-n akár 100 000 db A4-es oldal információit rögzíthetjük(!). Nos, ezt a barázdásűrűséget, ezt a 3D-s alkatrészt kell hibátlanul, torzulásmentesen és gazdaságosan előállítanunk fröccsöntéssel. A fröccsöntési ciklus optimalizálásában rendkívüli fontossága van a polimerömledék *állapotváltozói* (nyomás, fajtérfogat, hőmérséklet) helyes beállításának.

Az állapotváltozók ( $p$ ,  $v$ ,  $T$ ) összefüggését egy tipikus *amorf* hőre lágyuló polimerre (polisztirol, PS) a 9.5 ábra mutatja.

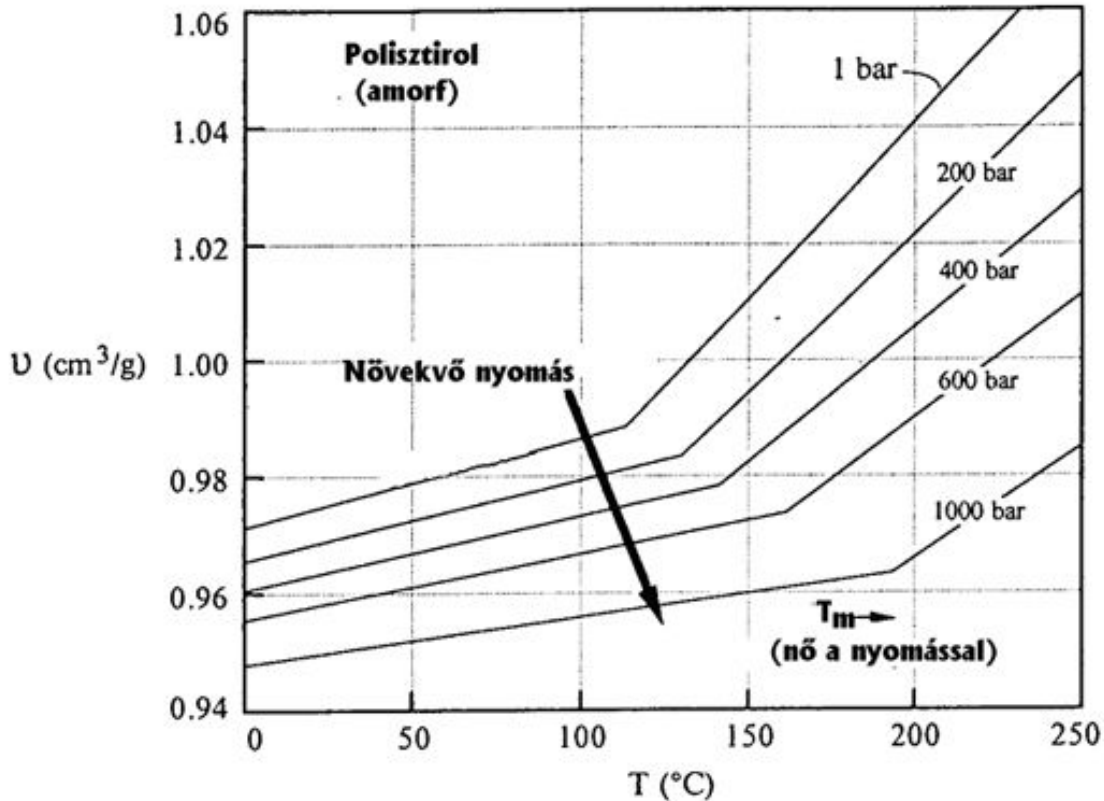
A 9.5 ábrán látható, hogy elegendően nagy nyomás (több száz bar) hatására a polimer szilárd állapotában is egy-két %-os mértékben összenyomható, ez az összenyomhatóság (kompresszibilitás) pedig ömledékállapotban még ennél is nagyobb.

A fröccsöntő gépben lejátszódó folyamatokat a gép két fő részében: a fröccsöntő (aggregát) egységben és a szerszámban elemezhetjük. Az első géprészben, a fröccsöntőcsiga mentén lejátszódó reológiai folyamatok egészen hasonlóak az extrudercsiga mentén már bemutatottakhoz, így ezt itt nem részletezzük, utalunk az extrúzió (8.2; 8.3; 8.4) fejezeteire.

A *szerszámban* lejátszódó folyamatokat legjobban a  $p$ ,  $v$ ,  $T$  állapotváltozók függvényében érthetjük meg.

A polimerek fajlagos térfogatát  $\left( v = \frac{1}{\rho} \right)$  a külső (hidrosztatikus) nyomás ( $p$ ) és a hőmérséklet ( $T$ ) nagymértékben befolyásolja. A polimerek fajtérfogat-változása azonos nyomáson a hőmérséklet függvényében szilárd halmazállapotban is nagyobb mértékű, mint a többi szerkezeti anyag esetében: ez a magasabb hőtágulási együttható is megnyilvánul. Szilárd polimereknél  $\alpha_{\text{lin}} > 10^{-5}/\text{K}$ , míg fémeknél  $\alpha_{\text{lin}} < 10^{-6}/\text{K}$  a lineáris hőtágulási együttható.

A polimer *ömledék* fajtérfogat-növekedése még nagyobb arányú a növekvő hőmérséklettel. A fajtérfogat – változás érzékenyen megmutatja a  $T_g$  üvegesedési hőmérsékleti átmeneteket és még inkább a  $T_m$  „olvadási” hőmérsékletet.



**9.5 ábra:** A polisztirol fajtérfogatának, hőmérsékletének és nyomásának összefüggése (p - v - T diagramja)  
[9.5]

A görbesorozatból szembetűnő, hogy az amorf hőre lágyuló PS fajlagos térfogata néhány száz *bar* nyomással *jelentős mértékben* befolyásolható. (Pl. a 200 °C-os PS ömledék 1000 bar nyomás alatt kb. 8 %-kal kisebb fajtérfogatot mutat, mint atmoszférikus nyomáson). Ez azt jelenti, hogy a polimer ömledék, mint (viszkózus) folyadék e nyomásokon összenyomható, kompresszibilis. Bár kisebb mértékben, de ugyanez állítható a szilárd polimerről is.

Még nagyobb mértékű fajtérfogat változást mutatnak a *kristályos hőre lágyuló* polimerek. A 9.6 ábra ezt mutatja be. Nyilvánvalóan a kristályos olvadás még nagyobb térfogatváltozással jár. Ha a lehűlő polimer ömledék magasabb fokú rendezett állapotban: kristályrácsban szilárdul meg, az zártabb, nagyobb sűrűségű szilárd anyagot eredményez. Azt is megfigyelhetjük a 9.5 és 9.6 ábrán, hogy a  $T_m$  megömlési hőmérséklettartomány is eltolódik a nyomás hatására, a magasabb hőmérsékletek felé.

*Spencer és Gilmore* írta le először (1950) hogy a polimerömledék állapotthatározóit a termodinamikából ismert gáztörvényhez hasonló egyenletbe foglalhatjuk.

$$(p + a)(v - b) = \frac{RT}{M}$$

ahol:

$p$ : a hidrosztatikus nyomás

$v$ : a fajtérfogat

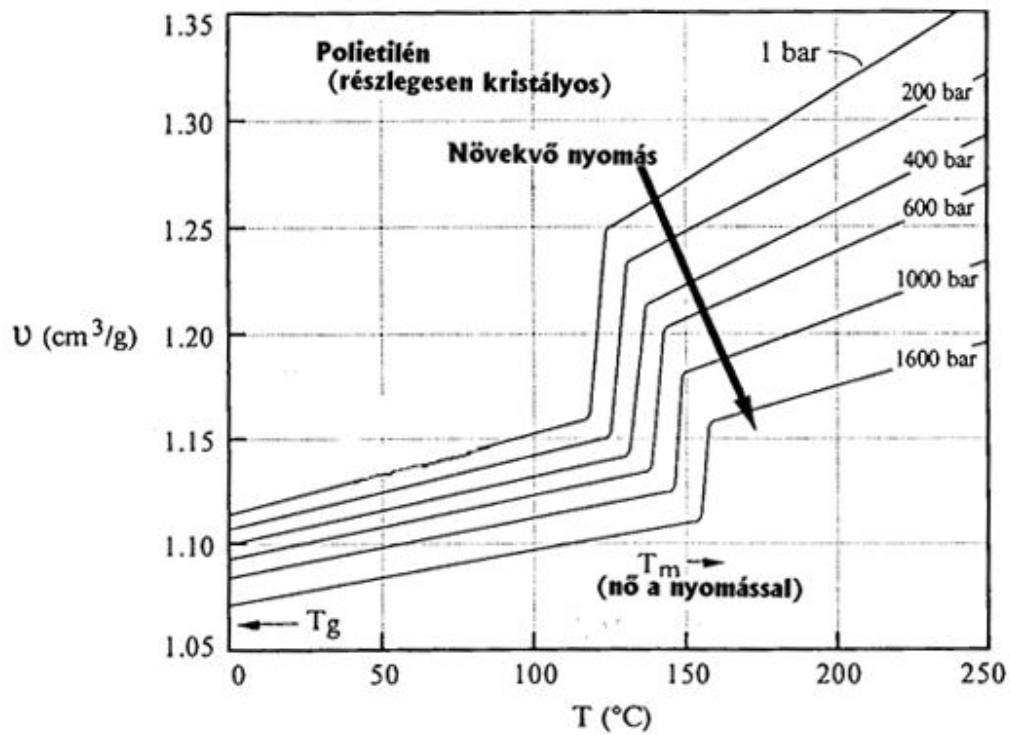
$R$ : az egyetemes gázállandó

$T$ : az abszolút hőmérséklet

$M$ : a polimerlánc *monomer-egységének* móltömege

$a$ : „kohéziós nyomás”, az anyagra jellemző nyomáskorrekciós állandó

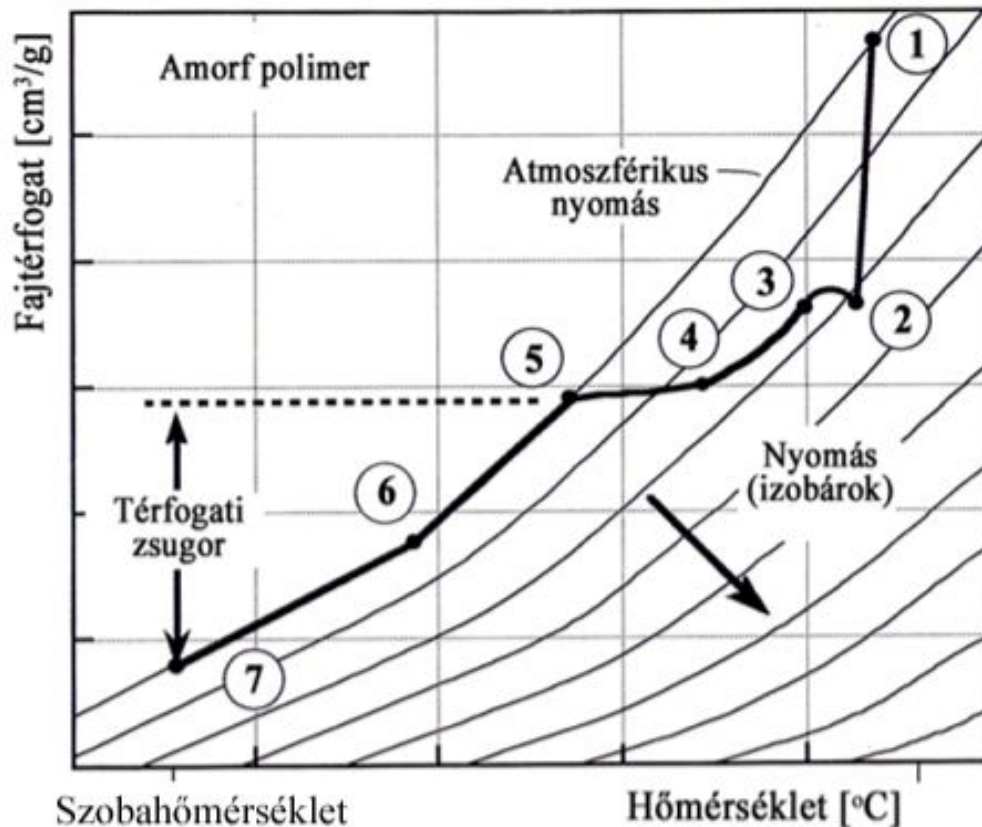
$b$ : a makromolekula *saját térfogatát* figyelembe vevő korrekciós állandó.



**9.6 ábra:** A nagy sűrűségű polietilén (HDPE)  $p$  -  $v$  -  $T$  diagramja [9.5]

A fröccsöntés folyamatát a termodinamikai állapothatározók összefüggésében a következő 9.7 ábra mutatja be.

A fröccsöntési folyamat döntő kitézési pontjai a  $p$  -  $v$  -  $T$  diagramon a következő lépéseket tükrözik: (9.7 ábra)



9.7 ábra: A fröccsöntés folyamata egy amorf hőre lágyuló polimer p - v - T diagramján [9.5]

- 1-2. A polimer ömledék megtölti a szerszámüreget (befröccsöntés),
- 2-3. Átkapcsolás utónyomásra,
- 3-4. Utónyomás, ami egészen a lepecsételésig tart (4-es pont),
- 4-5. Az ömledék – közel állandó fajtérfogaton – hűlni kezd, miközben a nyomás csökken.
- 5-6. Izobár hűlés,
6. Kidobás,
- 6-7. A termék a szabadban tovább hűl és zsugorodik.

A 9.7 ábra jól bemutatja a fröccsöntési folyamat „műszaki logikáját”. A jelentős termikus dilatáció miatti, nagy fokú *zsugorodás* csak úgy tartható kézben, ha a fajtérfogat-változás jelentős részét az ömledék erőteljes *kompressziójával* kompenzáljuk. Az olvadási hőmérséklet ( $T_m$ ) feletti túlmelegítésre ugyanis a megfelelően alacsony viszkozitás elérése céljából feltétlenül szükség van. *Ezt a dilatációt, az 1. és 6. pontok között (tipikusan 3–4 térfogat %), ill. az ebből következő zsugorodást kompenzáljuk az ömledék túlnyomásával.* A polimernek az ömledécsatornában történő megszilárdulása („lepecsételés”) után természetesen ilyen kompenzációra nincs további mód, az ezután következő *zsugorodást* (a 6. és a 8. pontok között) nem tudjuk



elkerülni, azt csak a szerszám megfelelő *méretezésével* vehetjük számításba. Ez a tényleges zsugorodás, amely általában- megkönnyíti a készterméknek a szerszámból való kiemelését, műszaki műanyagok esetében néhány tized %-os, a kristályos homopolimerek esetében, azonban mint pl. a közönséges polipropilén, 1,5–2 %-ot is elérhet. (Ezt az értékes adatot mutatják be a 4.1–4.18 táblázatok a *szerszámzsugor* sorban (58–112. oldal).

## 9.5 A fröccsöntő gépek főbb műszaki jellemzői

A fröccsöntési technológia hatékonysága azon múlik, hogyan illeszkednek a termék, a fröccsöntő gép és a szerszám műszaki paraméterei. A gép *nagysága*, kapacitása nyilvánvalóan optimum-függvénye a termék tömegének, volumenének. A túlságosan nagy gép egy adott kis méretű alkatrész gyártásánál technológiai, stabilitási problémákat vet fel, ami ugyanolyan gond, mintha az optimálisnál nagyobb alkatrészt szeretnének gyártani egy viszonylag kisebb fröccsöntő gépen.

Melyek tehát a gép kiválasztás legfőbb paraméterei?

### 9.5.1. Záróerő

A maximális  $F$  erő, amelyet a polimer ömledék kifejt a szerszám zárósíkján

$$F = P_{cav} \cdot A$$

ahol  $P_{cav}$ : a tényleges ömledéknyomás a szerszámüregben (*cavity*), tipikusan 30 ÷ 150 MPa

$A$ : a szerszám osztósíkjára vetített felülete a munkadarabnak.

Az „ $A$ ” felület mintegy az árnyéka a munkadarabnak, amelyet az osztósíkra merőlegesen (párhuzamos fényel) megvilágítottunk. Az a belső felület, amely erre merőlegesen jelenik meg, nem növeli a szükséges záróerőt, hiszen az ott keletkező erők nem a szerszámnyitás irányában hatnak.

A szerszámüregben az ömledék csúcs-nyomása jóval kisebb, mint a fröccsöntő csiga csúcsánál mérhető maximális nyomás, mivel az ömledéknyomás a fűvókán a csatornáknban, a szerszám sokszorosán osztott tereiben viszonylag gyorsan csökken az áramlás irányában, és az ömledék hamarosan lehül és megszilárdul, különösképpen a vékony falú részekben. Az átlagos  $P_{cav}$  függ tehát az ömledék viszkoelasztikus karakterisztikájától, a munkadarab (és a szerszám) alakjától, a hűléstől és az egyéb gyártási paraméterektől, – még hozzá eléggé összetett módon. Általánosságban: a termék vastagabb fala, a hosszabb folyási úthossz, a magasabb ömledékhőmérséklet, a kiszélesített belépőnyílás a szerszámon, és a rövidebb ciklusidő (nagyobb fröccsöntési sebesség) – mind növeli a maximális  $P_{cav}$  nyomást, közelebb hozva a fröccsöntőcsiga előtt mérhető maximális ömledék-nyomáshoz.

Durva közelítő szabályként azt lehet mondani, hogy

- a könnyen folyó (MFI > 10) ömledékek vastag falú munkadarab szerszámában 80 – 100 MPa
- a közepesen folyó ömledékek 120 – 150 MPa

- a nagyviszkozitású polimer ömledékek (MFI < 1) kisebb, mint 150 MPa ömledéknyomással jelennek meg, és ennek megfelelő záróerővel rendelkező gépet kívánnak meg.

A fröccsöntő gép záróerejét általában tonnában adják meg. Amennyiben hidraulikus szerszám záró mechanizmust alkalmaznak, a maximális záróerő a következőképpen függ össze a hidraulikus nyomással.

$$CF = P_{hyd} \pi D^2 / 4$$

ahol  $D$ : a hidraulikus henger átmérője. A biztonságos zárás érdekében 15 %-kal több hidraulikus nyomást alkalmazunk, tehát  $CF = 1,15F$ .

Egy mai személygépkocsi ütközőjének vagy műszerfalának fröccsöntéséhez tipikusan 3000 ÷ 5000 to (30 ÷ 50 MN) záróerővel rendelkező fröccsöntő gépre van szükség.

### 9.5.2. Fröccsöntési kapacitás, fröccsmunka

A fröccsöntő gép kapacitását az egyetlen ciklusban legyártható polimer alkatrész maximális súlyával vagy térfogatával is jellemezhetjük. Hagyományosan ezt a kapacitást a polisztirolra vonatkoztatjuk.

A fröccsmunkát  $W_f$  a fröccsöntési löket elméleti térfogata ( $v_{elm}$ ) és az ömledék nyomása ( $p$ ) együtt határozza meg:

$$W_f = \frac{v_{elm} p}{100}$$

ahol a  $v_{elm}$  az elméleti löket-térfogat  $\text{cm}^3$ -ben,  $p$  a maximális fröccsnyomás MPa-ban, és amely fröccsmunkát a 100 MPa fröccsnyomásra vonatkoztatjuk.

### 9.5.3. Ömlesztő teljesítmény, egyéb kapacitás adatok

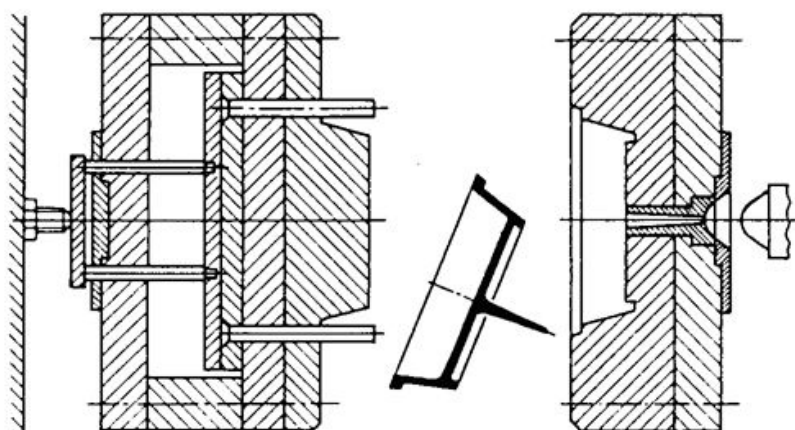
A fröccsöntő gép teljesítményét nyilvánvalóan az is meghatározza, hogy a gép csigája óránként hány gramm anyag megömlesztésére képes. Ez a teljesítménymutató függ attól, hogy milyen polimert dolgozunk fel, hiszen a különböző polimerek megolvadásához szükséges hőmennyiség eltérő, és attól is, hogy azt mennyire melegítjük fel a  $T_m$  ömlesztési hőmérséklet fölé, hiszen a  $c_p$  fajhők is különböznek. Hagyományosan a géptípus mutatószámaként ezt a teljesítmény adatot is (kg/h-ban) polisztirolra vonatkoztatjuk.

A záróerő, a fröccskapacitás és az ömlesztőkapacitás mellett, amelyek a legtöbbször a fröccsöntő gép típuszámában is szerepelnek, természetesen még számos műszaki jellemző megadható a mai fröccsöntő gépekről. Fontos jellemző még a szerszám felfogó lapok mérete (400 X 400  $\text{mm}^2$ -től akár 3000 X 2500  $\text{mm}^2$ -ig), a közöttük megnyitható legnagyobb távolság (200 mm-től 2000 mm-ig), a gép energia felvétele (tipikusan 20 – 300 kW) és még sok más adat. Az óriás fröccsöntő gépek, amelyeken pl. a gépkocsi műszerfala vagy ütközője készül, akár a 18 m hosszúságot és 200 to önsúlyt is elérhetik és a néhány kg-os műszerfal bonyolult

szerszáma 15 to súlyú is lehet. Az ömledéknyomás ezekben a gépekben is 150 MPa feletti, a befröccsöntés sebessége (PS-ra vonatkoztatva) 2000 cm<sup>3</sup>/s. [9.3]

### 9.6 A fröccsöntő szerszámok alaptípusai

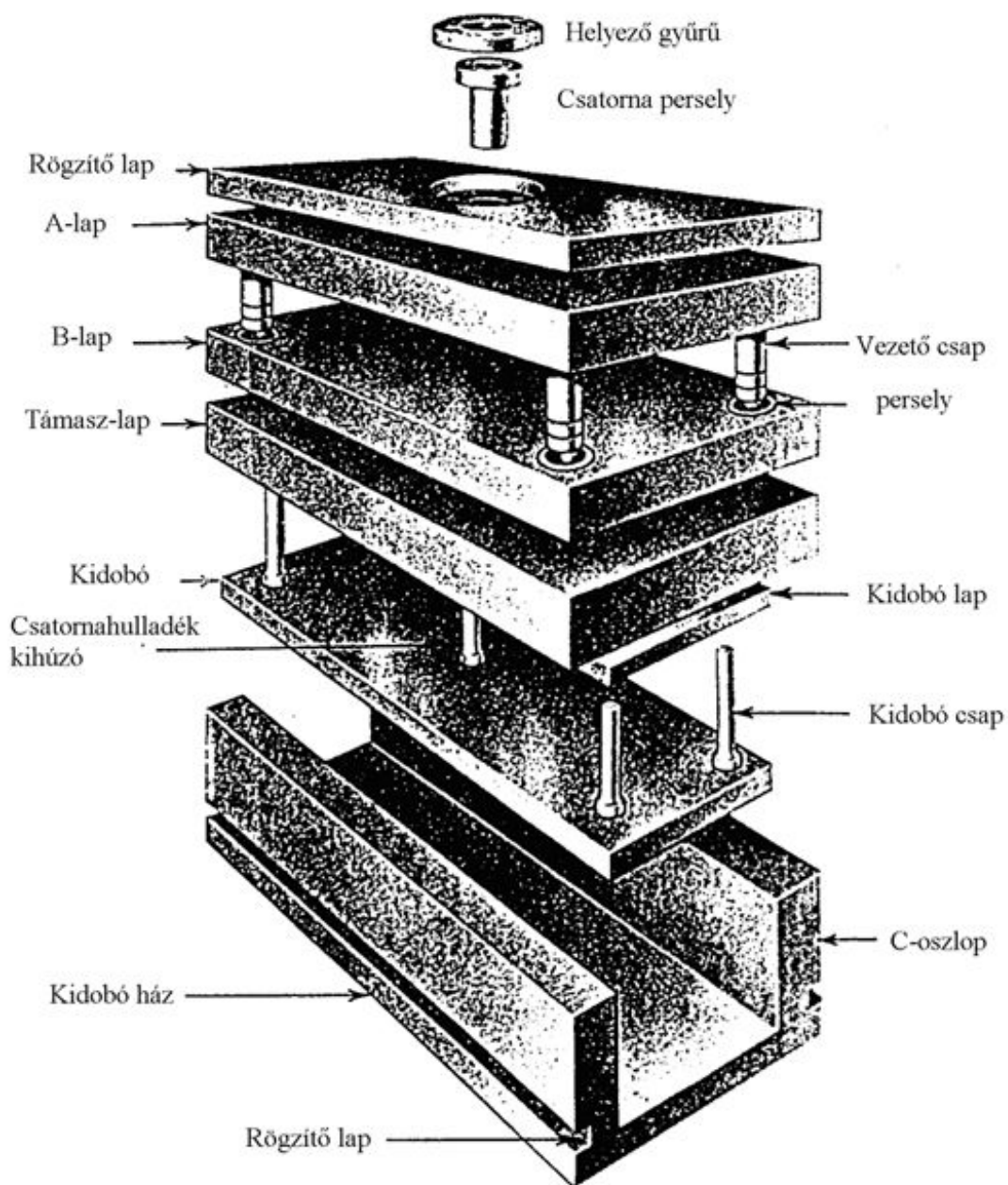
A fröccsöntés legfontosabb gépszerkezeti eleme maga az *alakadó szerszám*. A fröccsöntőszerszám képezi ki, fogja körül azt a zárt üreget, amelybe a forró polimer ömledéket fröccsöntjük nagy sebességgel, nagy nyomással. A fröccsöntőszerszám tehát nagyszilárdságú acélból készült, sokféle mozgó elemet is tartalmazó, nyitható és igen pontos illesztéssel zárható üreges berendezés, célgép (9.8 ábra). Egy-egy fröccsgépen szerszámcserevel igen sokféle polimeralkatrészt gyárthatunk, egy fröccsöntő géphez tehát több szerszám tartozhat.



9.8 ábra: A fröccsöntő szerszám működési elve

A fröccsöntő-, sajtoló- és extrudáló szerszámok tervezése és gyártása önmagában terjedelmes tananyag, külön studiumok tárgya, amelyekhez számos szakkönyv áll rendelkezésre napjainkban [9.8 – 9.11]. E fejezetben csak a szerszámépítés alapelveit, a szerszámok alaptípusait mutathatjuk be.

A fröccsöntő szerszámban *lapok* közé illesztjük a gyártandó 3D-s alkatrészt, úgy hogy azt lehetőleg egy megtörtlen *osztósíkkal* képzeletben megosztjuk, majd ezen osztósík két oldalán képezzük ki az acélszerszám konkáv domborulatait, amelyek az üreget zárják, 9.9 ábra.



**9.9 ábra:** Szabványosított, előre gyártott építőelemek fröccsöntőszerszám előállításához [9.14]

Az acéllapokra bontható szerszám építési elve lehetővé teszi azt is, hogy manapság a szerszámgyártásban egyre több szabványosított, előre gyártott építő elemet alkalmazzunk.

A fröccsöntőszerszám főbb részei a következők:

- beömlőcsatorna
- elosztó csatornák (több fészkes szerszám esetén)

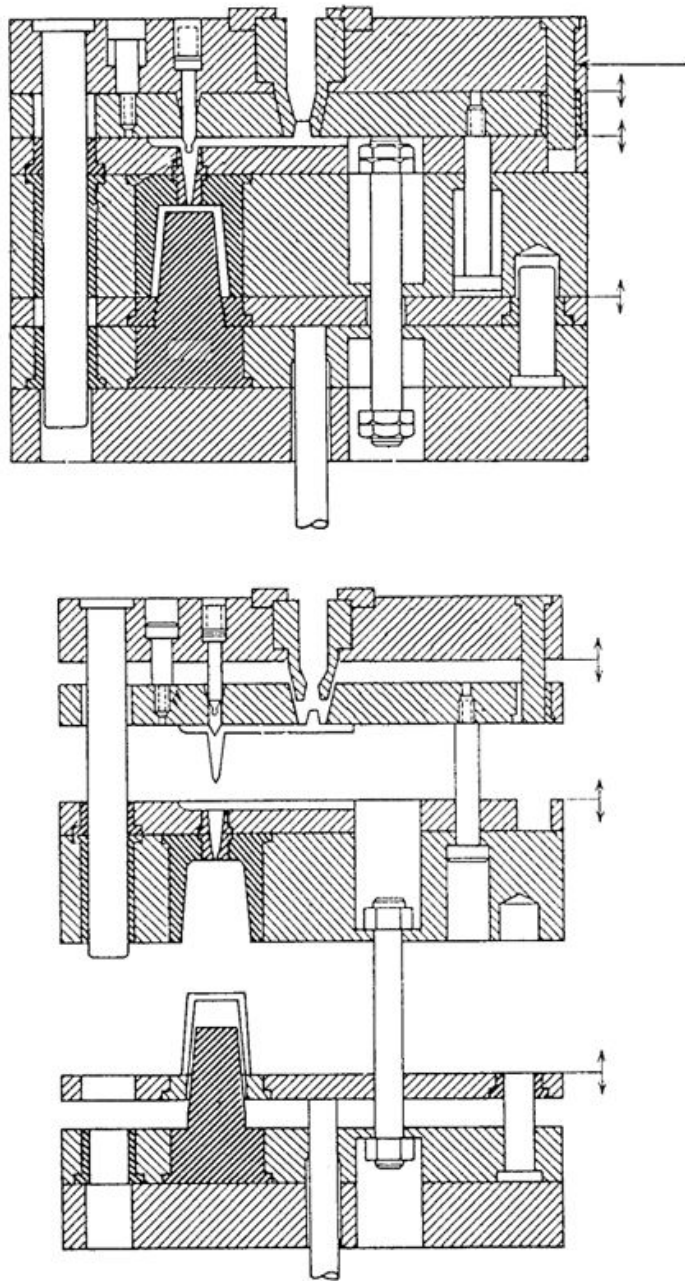
- gát (szalag-gát, tűhegy-gát, alagút-gát, stb.)
- hagyományos, ill. melegcsatornás beömlőrendszerek
- kidobórendszerek (a késztermék kilökésére a nyitott szerszámból)
- hűtő, ill. temperáló rendszerek, a szerszám megkívánt hőmérsékletének állandó szinten tartására.

A *beömlőcsatornán* keresztül áramlik át nagy sebességgel a polimer ömledék a fröccsöntő gép fűvókájából a szerszámba. Ez a csatorna tipikusan 2,5 ÷ 5,0 mm átmérőjű, a szerszám felé bővülő, kúpos alakú, hogy a beledermelő polimeranyag a szerszám nyitásakor a termékkel együtt eltávolítható legyen. A hőre lágyuló polimer termék csatornamaradéka kihűlt állapotban természetesen visszaőrölhető, újrafeldolgozható. A fröccsöntés gyakorlatilag *hulladékmentes* technológia.

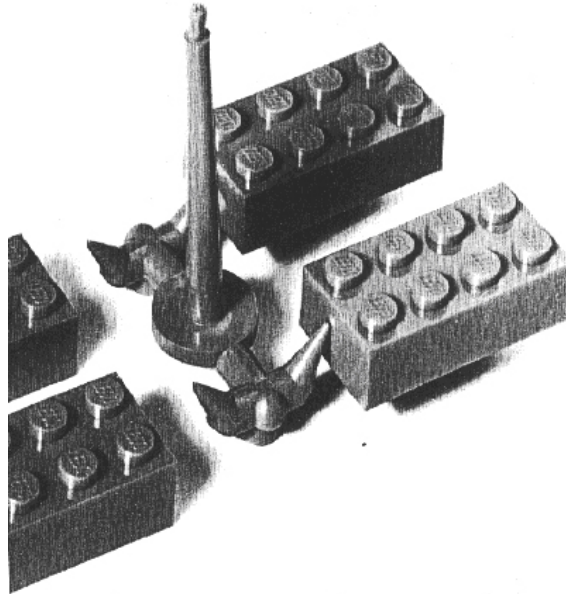
Az *elosztó csatornákra* tipikusan több munkahelyes, több fészkes szerszámok esetén van szükség, de az is sokszor előfordul, hogy egy bonyolult térformájú alkatrészhez több csatornán vezetjük oda az anyagáramot. Ezek a csatornák is tipikusan kör-, vagy félkör szelvényűek, induló keresztmetszetük *összegét* nem választjuk nagyobbra, mint a beömlőcsatorna végső keresztmetszetét. Sokfészkes szerszámban a csatornákat úgy kell megtervezni, hogy a polimeranyag minden egyes fészek gátjához ugyanabban az időpillanatban, és azonos nyomáson érkezzen el.

A *gát* az elosztó csatorna és a tervezett munkadarabot megvalósító szerszámüreg találkozási pontja, a kapu, amelyen át a polimer az üregbe lép. Szűkített keresztmetszete azt a célt szolgálja, hogy a késztermékről a csatornamaradékot könnyen, nyomtalanul el lehessen távolítani. A gát tehát erősen leszűkített keresztmetszetű hozzávezető csatorna, amelyen áthaladva a felgyorsuló, felmelegedő polimer ömledék viszkozitása lecsökken. A gát alakja és elhelyezése szerint megkülönböztetünk filmszerű beömlést, ill. gátat, szalaggátat, tűhegy-gátat és alagút-gátat. Az alagút-gát (l. 9.11 ábra) az alkatrészhez rendszerint oldalirányból érkező erősen leszűkített csatorna, amely olyan ponton van az alkatrészen elhelyezve, hogy a szerszám nyitásakor, az *alkatrészkidobó* erőhatására a lehűlt csatornamaradékot maga a szerszám *lenyírja*, így nincs szükség sorjázásra.

A fröccsöntés termelékenysége nagymértékben a szerszámkonstrukciótól függ. A termelékenységi mutató növelhető és a visszaforgatás (*recycling*) hányada is javítható, ha a munkadarabhoz vezető elosztócsatornában nem marad szilárd polimeranyag, a késztermékről eltávolítandó csatornamaradék (*Anguss*). A korszerű (több munkahelyes, „többfészkes”) szerszám szerkesztésben ezt úgy oldják meg, hogy a szerszámnak azt a lapját amely az elosztócsatornát foglalja magában – fűtik, hogy a polimeranyag ne dermedjen be, ezek az ún. *fűtött csatornás* vagy *forrócsatornás* szerszámok.



9.10 ábra: Lapokból összeépített pohárgyártó fröccsöntőszerzőm metszete zárt és nyitott állapotban [9.3]



**9.11 ábra:**Négyfészkés fröccsöntőszerszám nyers terméke kónuszos beömlőcsatornával, elosztócsatornákkal és túl-hegy-beömlésű alagút csatornákkal

A szerszám főtömegét hűteni kell. A 200–300 °C hőmérsékletű polimerömladék lehűtéséhez a szerszámban ma már nem elégedhetünk meg egyszerű csapvíz-hűtéssel. A késztermék zsugorodására, maradó feszültségeire, felületi minőségére, általában a pontos *mérettartásra* igen nagy hatással van a *kiegyenlített, temperált* (vagyis azonos hőmérsékletű hűtőfolyadékkal dolgozó) hűtés. A szerszámtemperálást külön hűtőkör valósítja meg, amelynek keringetését és elkülönített visszahűtését külön hűtőagregát végzi. A hűtőkör megtervezése a szerszámtervező fontos részfeladata. A 9.3 táblázat irányértékeket ad a legfontosabb hőre lágyuló polimerek fröccsszerszámának temperálásához.

Alapanyag	Fröccs-nyomás MPa	Fröccsöntési hőmérséklet °C	A szerszám tem-perálás hőmérséklete °C
LDPE	20–50	200–250	30–50
HDPE	60–120	250–300	40–70
PP	80–150	250–300	50–80
/PVC	80–100	160–180	30–40
PS	60–150	160–240	40–65
ABS	60–120	180–200	60–80
PA-6	70–100	230–260	40–60
PMMA	45–100	210–240	70–100

**4. táblázat - Néhány fontos hőre lágyuló polimer fröccsöntési és szerszámtemperálási hőmérséklete**

Ahogy jeleztük, a fröccsöntő szerszám tervezésének még számos kritikus eleme, *csinja-binja* van. Szoros összefüggésben a fröccsöntött anyag karakterével, gondosan meg kell tervezni

- a szerszámkitöltés során az áramló ömladék útját,
- az elosztó csatornák, gátak elhelyezését,

- az anyag várható orientációját,
- az ömledéknyomás csökkentését az egyes szerszámrészekben,
- az összehegedési helyeket, vonalakat a munkadarabban (az esetleges akadályokat, oszlopokat megkerülő és egyesülő anyagáramok találkozási pontjánál),
- a zsugorodást,
- a kidobó rudak felfekvési helyét a munkadarabon,
- az *alámetszések* kialakításához szükséges mechanizmusokat,
- *a csavarmenetek, egyéb üregek kialakításához és kiszabadításához (kiforgatásához) szükséges mechanizmusokat,*
- *az optimális szilárdsági mutatók eléréséhez szükséges erősítéseket (bordák, támaszok),*
- *a szerszám hűtőkörét, hőmérséklet-temperálásának módját,*
- *magáta* folyamatirányítást, a fröccsöntési ciklus részének időbeli programozását.

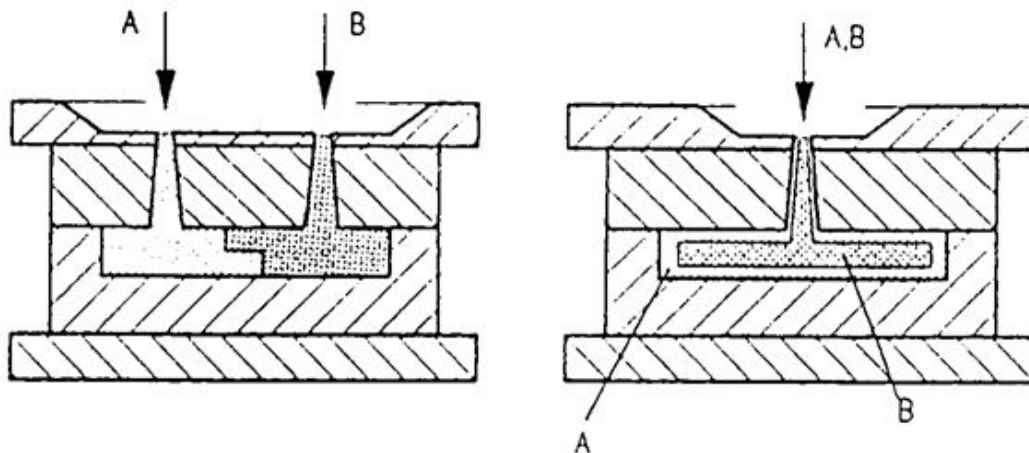
Mindebben igen sokat segít a modern számítástechnika, de mivel minden szerszám lényegében egyedi darab, a szerszámtervezés még sokáig a gépészmérnök egyéni konstrukciós találékonyságát igénylő, izgalmas alkotómunka marad.

## **9.7 Különleges fröccsöntési technikák**

### **9.7.1 Kétkomponensű fröccsöntés**

A ko-extrúzió alapelveihez hasonlóan a fröccsöntés során is egyesíthetünk két (vagy akár több) polimeranyagot is. A 9.12 ábra mutatja be a kétkomponensű fröccsöntés alaptípusait. Mindkét alapeljárás kiinduló pontja: a kétkomponensű fröccsöntő gépnek két fröccsegysége (fröccs-agregátja) van. Az ún. 2F eljárásban (*2 Farben*) a kétféle polimert (pl. két különböző színű akrilát polimert a gépkocsik stop-lámpájának burkolataként) *együtt* fröccsöntik két elhatárolt szerszámfélben, egymás utáni lépésben. Ehhez különleges, további mozgó alkatrészt is tartalmazó szerszámra van szükség, hiszen a második anyag *térfelét* az első lépésben zárva kell tartani.

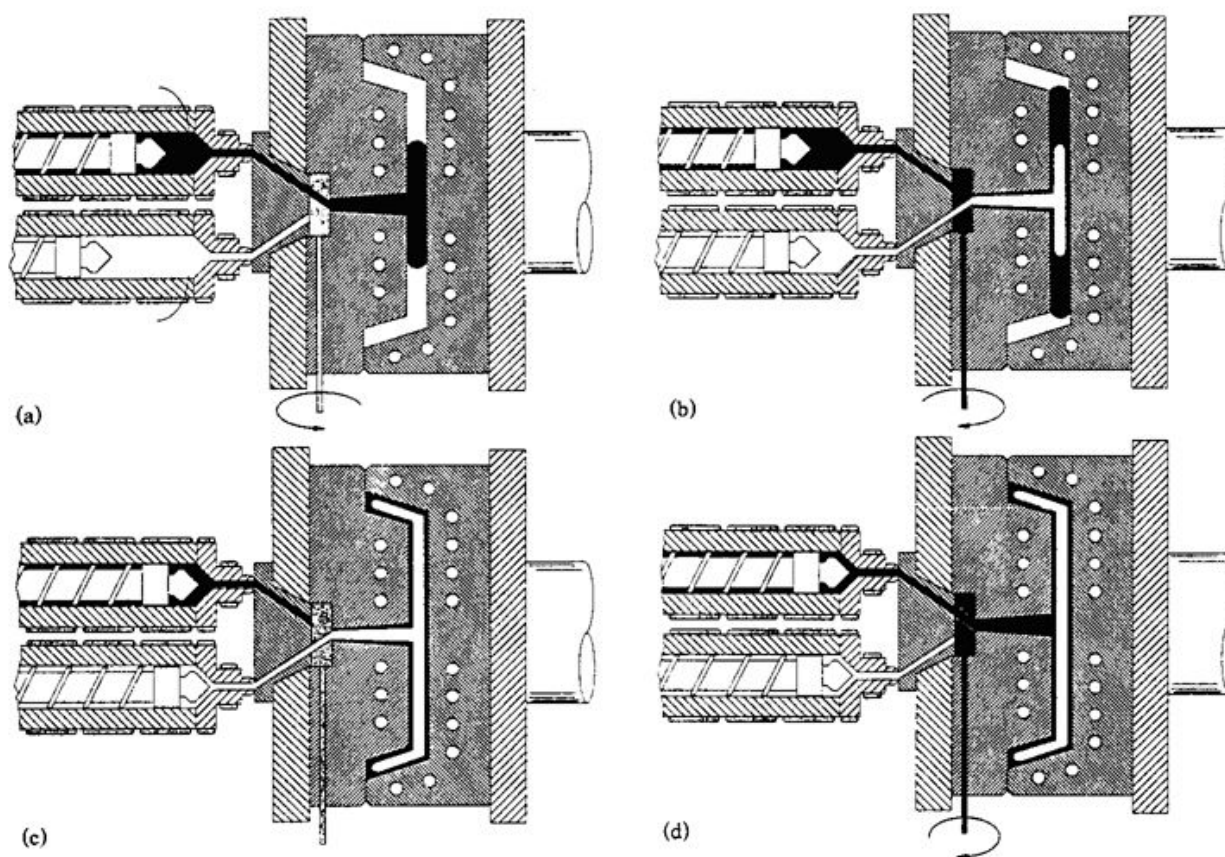




**9.12 ábra:**A kétkomponensű fröccsöntés két alaptípusa Baloldalt: 2F (két szín, egymás mellett), Jobboldalt: 2K (két komponens egymás alatt, szendvics-szerűen)

A 2K (*2 Komponenten*) eljárás úgy hajtja végre a fröccsöntést, hogy először A anyaggal kezdi meg a szerszámüreg kitöltését, majd átkapcsolva B anyaggal fejezi azt be, és az utónyomás során újra A anyaggal *pecsételi le* a „szendvics” szerkezetű terméket. Ezt az eljárást a 9.13 ábra mutatja be vázlatosan. A *szendvics* fröccsöntésnél a szerszám akár egy hagyományos szerszám is lehet, mert a két anyagáram *átkapcsolása* történhet ugyan a szerszámban (mint a 9.13 ábrán), de történhet magán a két aggregáttal felszerelt fröccsgépen is. (Manapság ez a gyakori.)

A 2F eljárás tehát bonyolultabb szerszámot igényel. Egy közismert épületgépészeti alkatrész: a fürdőszobák keverőszelepe („vízcsapja”) forgatókereke a leggyakrabban átlátszó külsejű és fekete maggal készülő kétkomponensű (2F) fröccstermék. Ennek szerszámát mutatja be a 9.14 és 9.15 ábra.

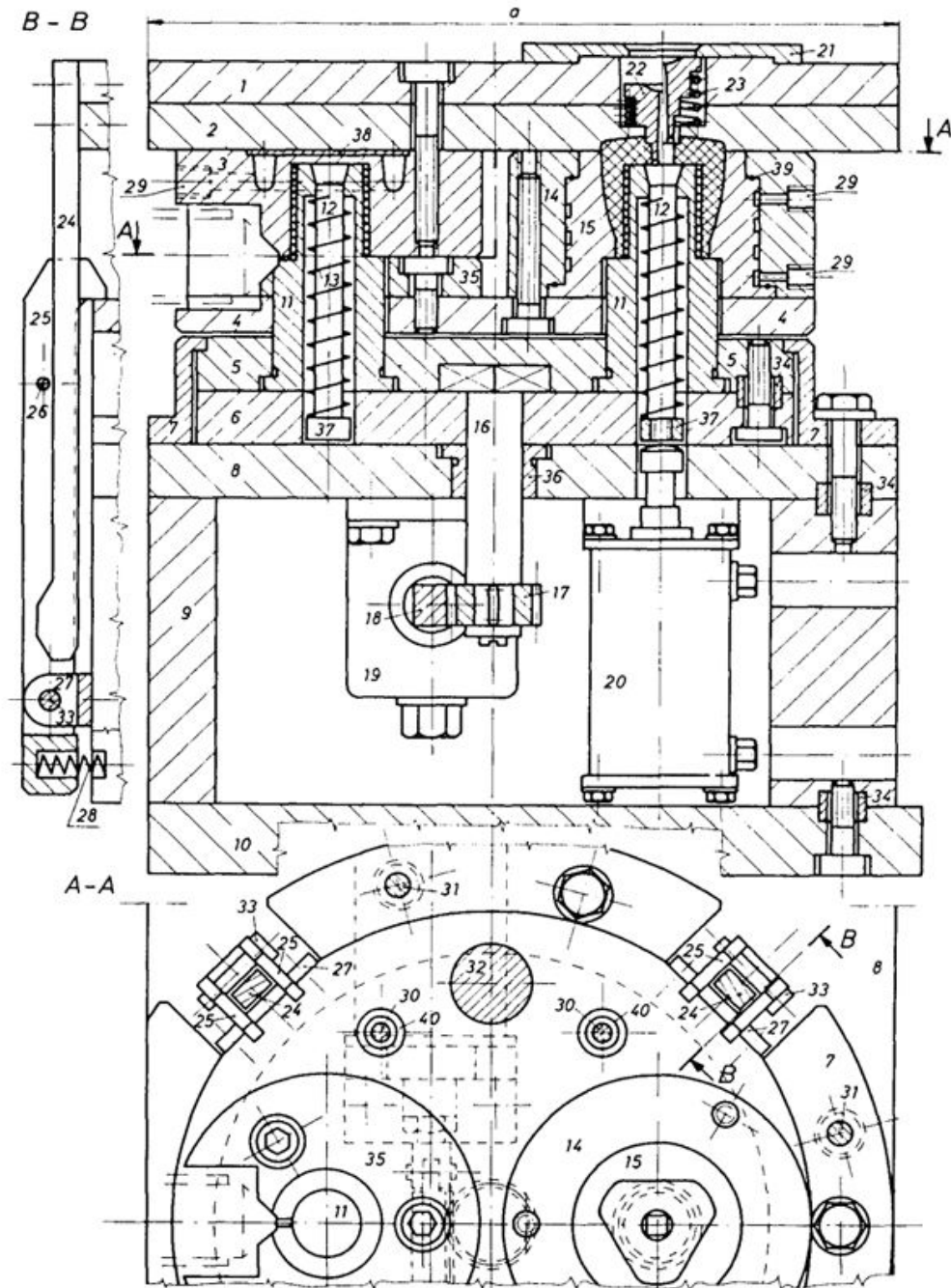


**9.13 ábra:**A kétkomponensű („szendvics”) fröccsöntés alapelve [9.5] a) a (sötét) borítóanyag befröccsöntése, b) a (világos) maganyag befröccsöntése c) teljes kitöltés a (világos) maganyaggal, d) utánnnyomás a (sötét) borítóanyaggal

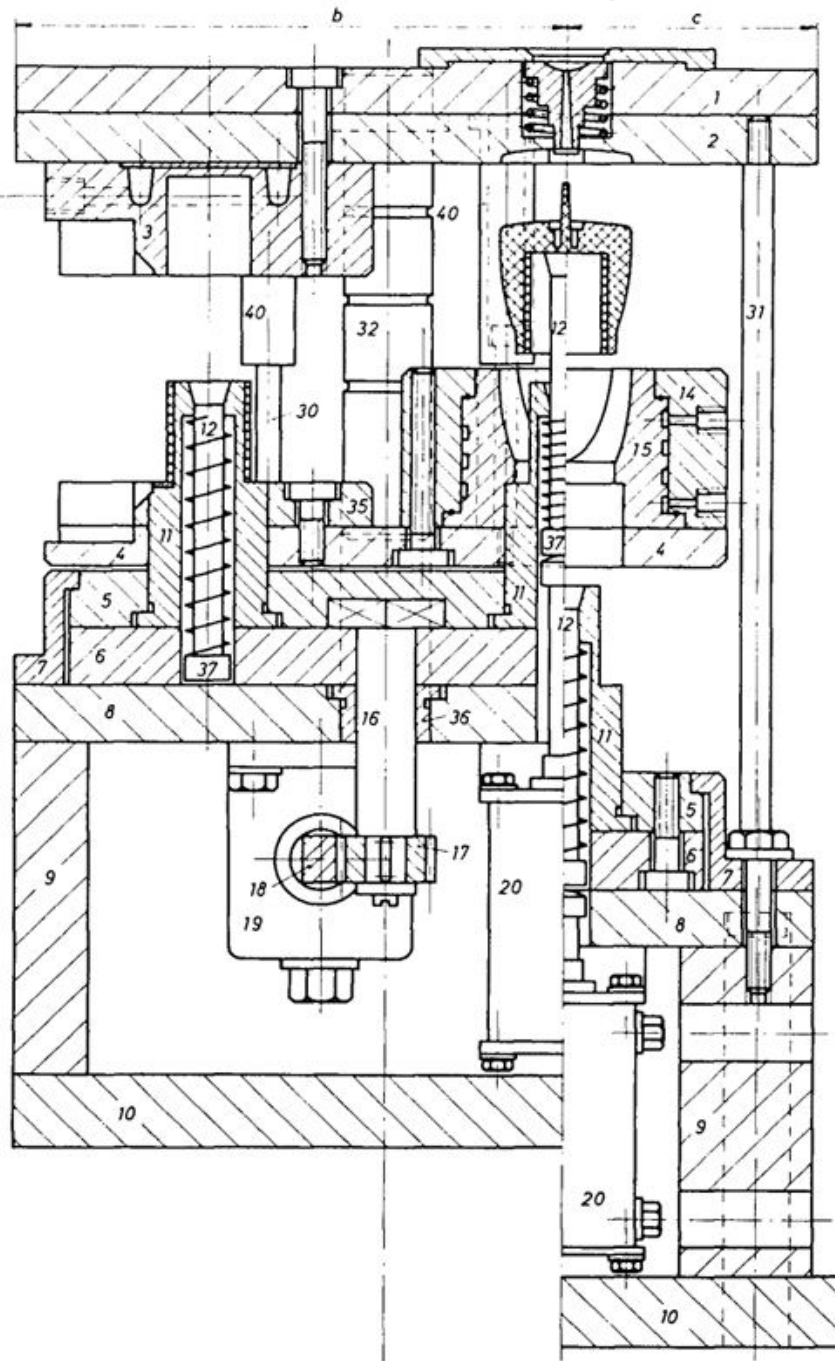
Az első lépésben tehát a sötét anyagból a belső, hengeres előgyártmány készül el. Rövid hűtés után a szerszám nyit, majd fogazott lécs és fogaskerék alkalmazásával a szerszám középső része 180 °-os fordulatot tesz.

Újrazárás után megtörténik a külső (átlátszó) poliakrilát ráfröccsöntése az előgyártmány (azonos anyagú, csak sötét színű) hengerre. A két anyag összehegedése a gyártási paraméterek beállításával biztosítható.

A 2K eljárás szerszáma kevésbé látványos, e módszer azonban sokat ígér másodlagos anyagok (pl. reciklátumok, kissé elszíneződött anyagok) vagy különleges mechanikai tulajdonságú, de nem esztétikusan „szép” megjelenésű polimeranyagok hasznosítására. Ez tehát nem igényel bonyolult szerszámot, de nagyon fontos, hogy az ömledékek viszkozitásából képezhető arányszám bizonyos határok között maradjon.



**9.14 ábra:** Kétkomponensű (2F) fröccstermék szerszáma (nyitva l. 9.15 ábra) [9.8] 1,2) felső felfogólapok, 3) csésze az előgyártmányhoz 4) tárcsa 5,6) forgó lapok, 7) központosító gyűrű, 8) alaplapp, 9) távtartó gyűrű) 10) alsó felfogólap), 11) az előgyártmány belső furatát kialakító persely, 12) kúposfejű kidobócsap, 13) visszahúzó rugó, 14) a második munkahely háza, 15) a második munkahely szerszámürege, 16) négyszögletes fejú tengely) 17) fogaskerék, 18) fogazott lécs, 19) pneumatikus henger



**9.15 ábra:** Kétkomponensű (2F) fröccstermék szerszáma (Zárva l. 9.14 ábra) [9.8] 20) pneumatikus henger, a munkadarab kiemeléséhez, 21) illesztő tárcsa, 22) beömlő persely, 23) rugó, 24) vezérlőrúd, 25) kampós kar, 26) keresztcsap, 27) csapágybak, 28) rugó, 29) hűtővíz-csatlakozás, 30) lökethatároló csavar, 31) lökethatároló csavar, 32) vezetőcsap, 33) tengely a 27-hez, 34) illesztő gyűrűk, 35) tárcsa, 36) persely a 16-hoz, 37) anya a 12-höz, 38) gumi tömítőlap, 39) „O” gyűrű, 40) teleszkóp hüvely a 30-hoz

A 2K (szendvics) fröccsöntés rétegeloszlását befolyásoló legfontosabb tényezők:

- a viszkozitások aránya ( $\eta_B / \eta_A$ )
- a viszkozitások átlagos szintje

$$\left( \frac{\eta_B + \eta_A}{2} \right)$$

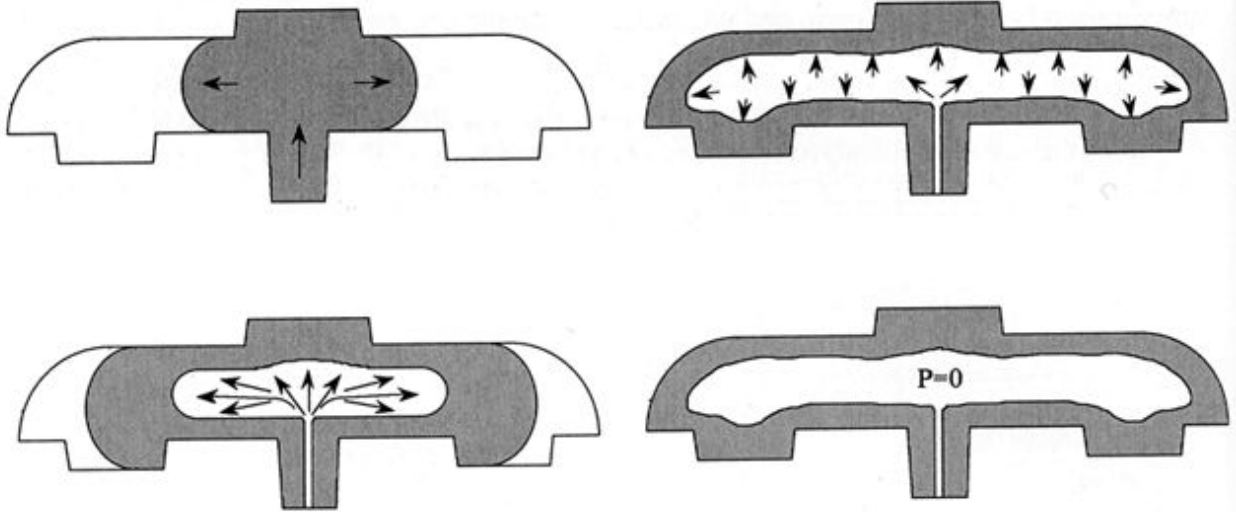
- a fenti két adatból kapott viszonzyszám:

$$K_\eta = \frac{\frac{\eta_A + \eta_B}{2}}{\frac{\eta_B}{\eta_A}} = \frac{\eta_A^2 + \eta_A \cdot \eta_B}{2 \eta_B}$$

- a szimultán időfázis (két anyag egyidejű áramlása) hossza,
- az anyagáramok viszonya az átfedő szimultánfázisban,
- anyagmennyiségek, anyagsebességek, hőmérséklet,
- szerszám hőmérséklet,
- szerszámgeometria (folyási úthossz, falvastagság-különbségek) stb.

### 9.7.2 Gázzal hajtott fröccsöntés

A korszerű fröccsöntési eljárásban alkalmazott igen nagy ömledéknyomások műszaki indokát a 9.4 fejezetben (242. oldal) már részletesen ismertettük. A jelentős zsugorodást a szerszámban csak ezzel a nagy nyomással kompenzálhatjuk, és még ennek a kiegyenlítésnek is határa van. A vastag falú és változó falvastagságú termékek fröccsöntése nehezen oldható meg „beszívódások”, felületi besüllyedések nélkül. A gázbefúvásos, „gázzal segített” (*gas-assisted*) fröccsöntés egyik előnye ezek kiküszöbölése. Alapelvét a 9.16 ábra mutatja be.



9.16 ábra: A gázzal hajtott (gázbefűvások) fröccsöntés alapelve [9.5]

A gázbefűvások fröccsöntés koncepcióját hasonlíthatjuk a kétkomponensű (2K) *szendvics* fröccsöntéshez is, amelyben a „mag”: légbuborék. Innen már csak egy lépés a hab-magú 2K fröccsöntés, amelynek során a helyben felhabosodó belső mag „buborékja” fejt ki a gáznyomást.

A gázbefűvások fröccsöntés előnyei:

- a zsugorodás csökkentése,
- kisebb az ömledéknyomás, nagyobb alkatrész gyártható az adott gépen,
- súlycsökkentés, anyag megtakarítás, költség-előny,
- ciklusidő csökkentés: a leghosszabb rész-ideje, a hűtés lerövidül,
- minőségi javulás: esztétikus (beszívódás mentes) felület.

A gázbefűvások fröccsöntés előnyei lényegében onnan vezethetők le, hogy a zsugorodás kompenzálásánál felhasznált *Spencer-Gilmore* alapelv, ill. összefüggés (244. old.) csak *formálisan* hasonlít a reális gázok összenyomhatóságát leíró *van der Waals* egyenlethez,

$$(p + p^*)(V - V^*) = RT$$

A  $p^*$  és  $V^*$  állandók, a kohéziós nyomást és a molekula saját térfogatát figyelembe vevő korrekciós tényezők a polimerömledékre vonatkozólag óriásiak, míg a gázokra igen csekélyek. És innen adódik a gázbefűvások előnye: a könnyen, kis nyomásokkal is jól komprimálható gáz a szerszám falához szorítja a polimer ömledéket, csökkenti a szerszámhoz képest kialakuló zsugorodást, meggyorsítja a hűlést, stb.

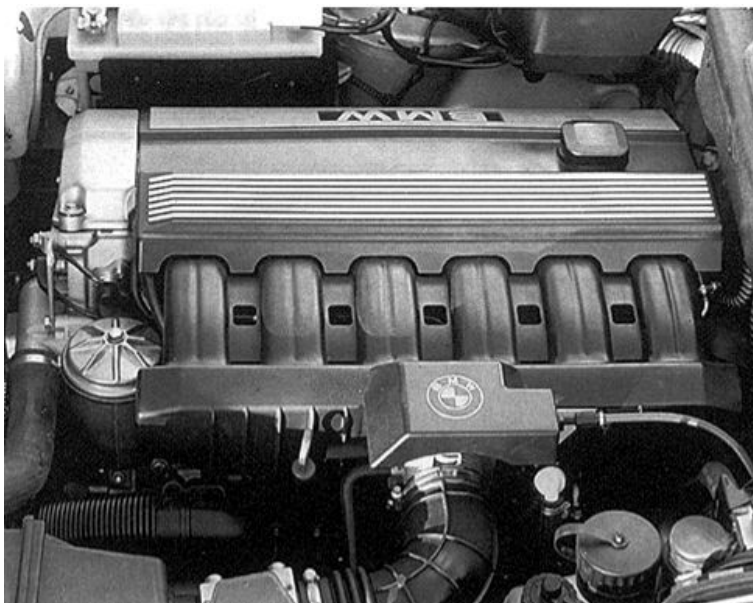
A gázbefűvások fröccsöntés alapvető problémája a szendvics fröccsöntéssel összevetésben derül ki. A 2K szendvics fröccsöntés gyakorlatában kiderült, hogy ott a *mag* ömledéke magasabb viszkozitású kell, hogy legyen, mint a *héj* ömledék viszkozitása, az egyenletes héjvastagság elérése céljából.

A gázzal hajtott fröccsöntésnél ez a viszkozitás-viszony *fordított*: a hajtógáznak *sokkal* kisebb a viszkozitása, mint a polimerömledék viszkozitása, ez váratlan elvékonyodásokhoz, sőt gáz-áttörésekhez (kilyukadáshoz) vezethet.

### 9.7.3 Fröccsöntés olvadóbetétes szerszámba

A fémöntészetben régtől fogva alkalmazzák az ún. mag-öntést, azaz *egyszer használt magú* öntőformába történő öntés (*lost core vagy fusible core*) technikáját bonyolult formájú üreges öntvények gyártására. Ezek az öntőmagok lehetnek *viaszból*, porladásra, szétesésre képes homok, só vagy polimer keverékekből. Az ilyen anyagok szilárdsága azonban nem teszi lehetővé, hogy fröccsöntő szerszámok egyszer használatos magjaként felhasználjuk azokat.

A fémből készült, kiolvasztható betét alkalmazása a fröccsöntő szerszámban önmagában nem új ötlet. Már az 1950-es évek végén felmerült, hogy kisebb üreges alkatrészek prototípusát így is lehetne gyártani. A mai technológiát egy 1968-as szabadalom védte, ennek lejártja után, az 1980-as évek második felében terjedt el az eljárás. Elsősorban a robbanómotorok levegő-beszívó csatornarendszerének (*intake manifold*) sorozatgyártásával értek el nagy sikereket a BASF alkalmazástechnikai fejlesztői (9.17 ábra).



**9.17 ábra:** Olvadóbetétes fröccsöntéssel készült 35 % (vágott) üvegszál tartalmú PA-66 kompozitból a BMW motorblokkjához illeszkedő beszívó csatorna öntvény [9.12]

Az 1990 óta készült 4 és 6 hengeres BMW motorok már ilyen technológiával fröccsöntött üvegszálás PA-66 kompozit beszívócsontokkal működnek. Ez a megoldás 1992-ben Detroitban is díjat nyert, azóta a Chrysler és a GM új V6 és V8- motor típusai is műanyagból készült levegő beszívó-csatornarendszerrel készülnek,

amelyeket *fémötvözetből készült* olvadóbetétes maggal működő szerszámba fröccsöntenek. Az ilyen bonyolult térformájú, 8–16 levegőcsatornát egymáson átvezető üreges alkatrész azelőtt csaknem kizárólag könnyűfém öntvényből készült.

A műszaki műanyagok lehetővé teszik az osztott darabokból műanyaghegesztéssel történő előállítás is, egyszerűbb, négyhengeres (főleg diesel-) motoroknál a hasonló polimer részegységek vibrációs hegesztését alkalmazzák. A legbonyolultabb, a levegőáramlás-technika szempontjából is optimált műanyag beszívó-feltétek azonban igen jó minőségben, utómegmunkálást nem igénylő, nagy méretpontossággal, olvadóbetétes fröccsöntéssel készülnek.

A technológia főbb elemei:

- magkészítés, az olvadóbetét elhelyezése a szerszámban,
- fröccsöntés, a fröccstermék kiemelése a fémbetéttel együtt,
- a fémbetét kiolvasztása, az alkatrész megtisztítása,
- az olvadó fémbetét anyagának újrafeldolgozása.

A könnyen olvadó *fém*ből készült betét előnye a fröccsöntésben a következő tényezőkből adódik:

- nagy szilárdságú, méretpontos magot ad,
- nagy hőkapacitású, jó hővezető és így gyors hő-disszipációt eredményez,
- viszonylag alacsony hőmérsékleten, kevés energiával kiolvasztható,
- veszteség nélkül újrafeldolgozható,
- a kiolvasztás sebessége nagy, jól illeszthető a fröccsöntés rövid ciklusidejéhez, és mindezt egybe véve:
- gazdaságos megoldás.

Az olvadóbetétek anyagának többféle ötvözet szolgálhat. Két tipikus ötvözetet a következő, 9.4 táblázat mutat be.

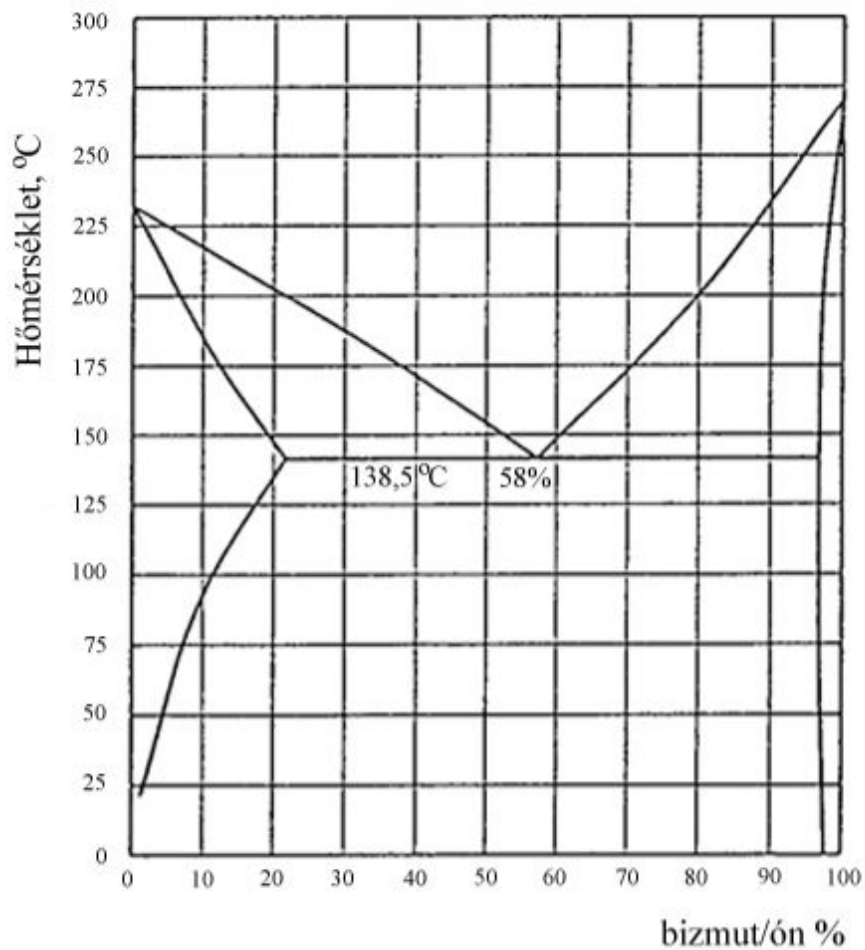
Típus	Bi Sn	Sn Pb Sb
Összetétel (tömeg %)	58/42	56/41/3
Olvadási hőmérséklet (°C)	138,5	187
Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )	8,55	8,50
Szakító szilárdság (MPa)	66	59
Rug. modulusz (GPa)	18,0	4,0
Szakadási nyúlás (%)	0–3	20–30
Fajhő (kJ/kg °C)	0,17	0,21



Típus	Bi Sn	Sn Pb Sb
Olvadási hő (kJ/kg)	44,8	56,5
Hővezetés (W/m°C)	50,2	46,0
Hőtágulási együttható (1/ °C•10 <sup>-6</sup> )	15,2	24,0
Szerszámzsugorodás (%)	-0,061	0,3

**5. táblázat - A főbb polimerfeldolgozási technológiák összehasonlító adatai**

A „Bi Sn 138” ötvözetet (9.18 ábra), 138 °C-on olvadó eutektikum, amely 58 (tömeg) % bizmutból és 42 % ónból áll, jól használhatjuk a motorgyártásban sikeres, üvegszál erősítésű PA fröccsöntés olvadóbetétjeként. Az olvadóbetétet magát lényegében a fröccsszerszámokhoz hasonló szerszámban gyártják. Ez a szerszám készülhet alumíniumból is, kisebb sorozatok esetén. Tömeggyártáshoz acél szerszámot használnak itt is.

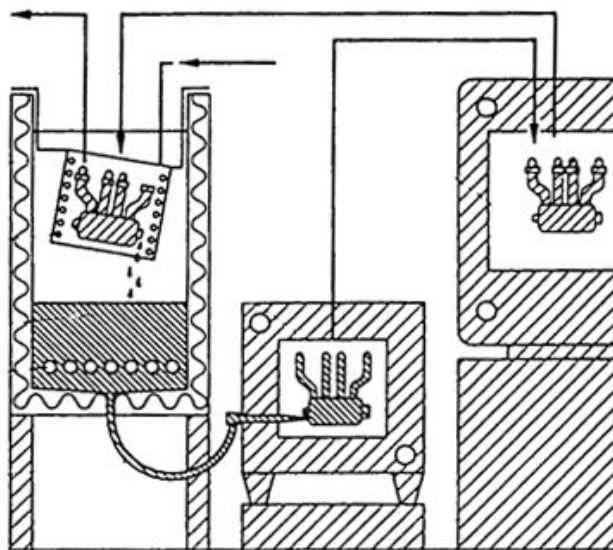


**9.18 ábra:** Az olvadóbetétes fröccsöntésben felhasznált bizmut-ón ötvözetek fázisdiagramja [9.12]

A *konstrukciós szempontok* az olvadóbetétes szerszámba fröccsöntésnél külön megfontolást igényelnek. Az alkatrész konstrukció tipikusan összetett, bonyolult formák létrehozására irányul, – hiszen ezért választják az olvadó magos technológiát. A külső arculat is lehet olyan bonyolult térformájú, hogy még a külső fronton is

szükséges lehet olvadó „betét” szerszámrészekre. A konstrukció optimalizálása több fontos tényező *minimalizálására, ill. harmonizálására* irányul:

- az érzékeny olvadó betétekre jutó mechanikai és hőterhelést minimumra kell hozni,
- az olvadómag kiolvasztásának ideje a legrövidebb legyen,
- szerszámkitöltés optimalizálása: egynél több beömlés legyen a munkadarabon,
- az olvadó betét legyen több helyen rögzített a szerszámban,
- az olvadó betét deformációját (pl. végeelem módszerrel) számításba kell venni,
- a hőátadást, a fröccsöntés és a szerszám hőmérsékletét gondosan elemezni kell. (pl. a PA-66- GF 35 fröccsöntés esetén a Bi Sn eutektikum 138 °C-on olvad. A fröccsöntés hőmérséklete 290 °C. A PA-66 olvadási hőmérséklet-tartománya: 230–270 °C. A szerszámhőmérséklet: 70 °C.



**9.19 ábra:** Az olvadóbetét alkalmazásának vázlata [9.12] közepén: az olvadó mag nyomás alatti öntése jobbra: a fröccsöntő gép balra: a fémbetét kiolvasztása a kész fröccstermékből forró folyadékfürdőben

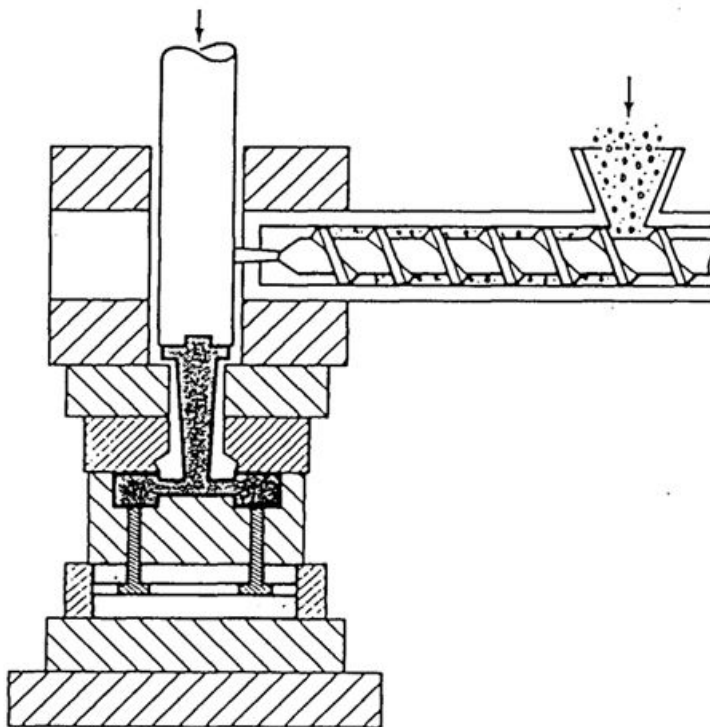
Az a látszólagos ellentmondás, hogy a 290 °C-os PA-66 alapú ömledéket ráfröccsöntjük a 138 °C-on olvadó fémbetétre egy olyan szerszámban, amelyet még fűtünk is (70 °C-ra temperáljuk), és az olvadóbetét *mégsem olvad meg*, könnyen feloldható, ha ismerjük a *hőkapacitás* adatait. A 9.17 ábrán látható tipikus motoralkatrész falvastagsága ugyanis a legtöbb helyen 2–3 mm közötti, a PA alkatrész hőkapacitása így igen csekély. Az ön-bizmut betét méretét tipikusan a kialakítandó csatornák mérete határozza meg (30–40 mm átmérő), és végül a befoglaló acél szerszám tömege és így hőkapacitása a legnagyobb. Mindehhez figyelembe veendő a fémek kitűnő hővezetőképessége is a polimerrel szemben.

Az eljárás természetesen jelentős beruházást igényel, gazdaságosságára a tömeggyártásban mégis kitűnő példák vannak az autóiparban.

## 9.8 A fröccs-sajtolás

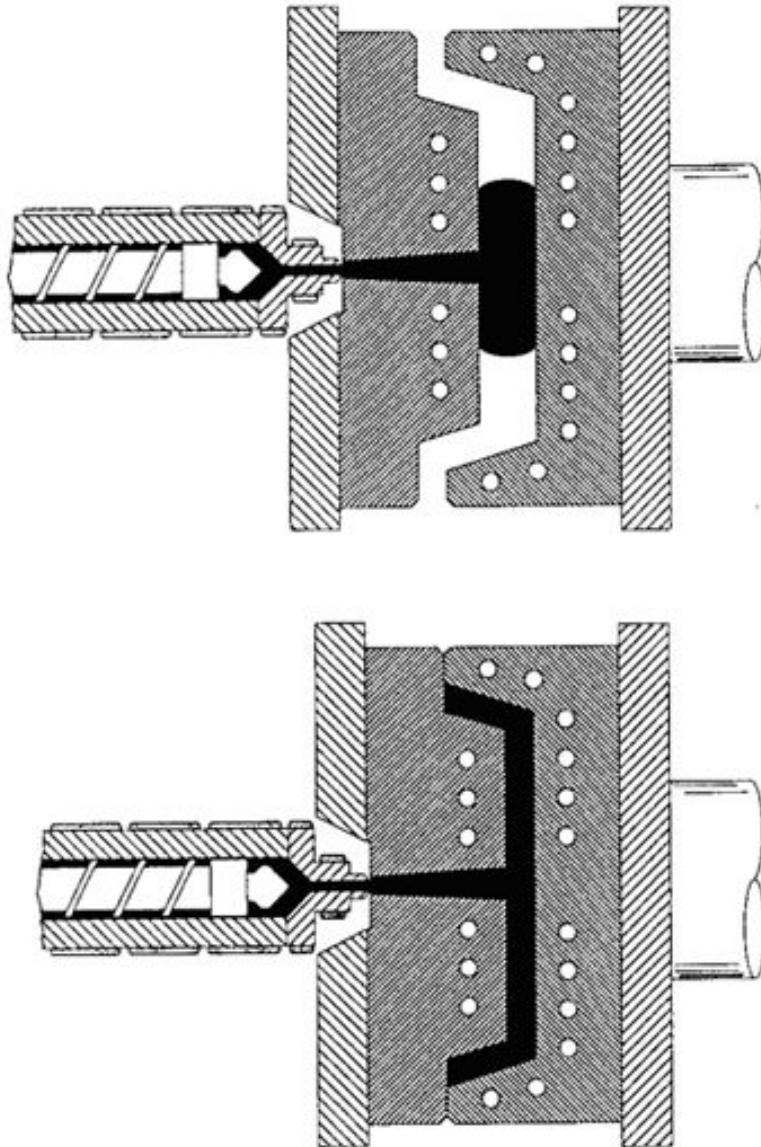
Az eddigiekben, az 5–6–7–8 fejezetekben ismertetett polimerfeldolgozási technikák hőre lágyuló polimerekre vonatkoztak. A 9. fejezet eddigi módszerei is *hőre lágyulókra* alkalmazható fröccsöntési eljárások, van azonban egy sajátos fröccstechnika, amely átmenetet képez, és hőre lágyulókra is, de méginkább hőre keményedőkre alkalmazható. Ez a fröccs-sajtolás. (A sajtolást, mint tipikus hőre keményedő, térhálósodó polimerek feldolgozási technikáját a 13. fejezetben érintjük.)

A fröccs-sajtolás a korábbi értelmezés szerint olyan *sajtolási* eljárás, amelyben a sajtolóanyagot (a még nem térhálós, *oligomer* anyagot) *különálló* kamrában, – nem a szerszámban – ömlesztik meg, s onnan juttatják (akár egyszerű dugattyú segítségével) a szerszámba. Ezt az elő-kamrát *csigás fröccsöntő dugattyú* is kiszolgálhatja.



9.20 ábra: A fröccs-sajtolás alapelve [9.11]

A fröccs-sajtolás másik, – újabb – értelmezése szerint a *fröccsöntő gépből* érkező ömledék nem teljesen zárt, hanem kissé nyitott szerszámba érkezik. A teljes kitöltéshez elégséges polimer anyagot ezután a szerszám összezárásával *sajtolásnak* vetik alá. Az így készült termék legnagyobb előnye a hőre lágyulók esetén is jól érvényesül: az *utónyomás* egyenletesebb (pl. a nagyfelületű, körszimmetrikus munkadarabon) és a termék zsugorodása így jobban kézmentartható, kevesebb belső feszültséghez vezet.



**9.21 ábra:**A fröccs-sajtolás (injection-compression molding) újabb értelmezése. Fent: ömledék befroccsöntés kissé nyitott szerszámba, Lent: szerszámzárás, hűtés [9.5]

### 9.9 A fröccsöntés modellezése számítástechnikai úton

A fröccsöntés (és a többi polimerfeldolgozási művelet, mint pl. az extrúzió) matematikailag meglehetősen bonyolult. A lejátszódó folyamatokat nem lehet analitikusan, zárt formában leírni, kivéve a legegyszerűbb geometriai viszonyokat, newtoni folyadék feltételezése mellett. Az utóbbi 10 évben elterjedt, már kereskedelemben is kapható szoftverek numerikus módszerek alkalmazásával és a folyamat szimulációjával segítik a mérnököt a bonyolult feldolgozási műveletek jobb megismerésében.

Napjainkban a polimerfeldolgozás minden területén alkalmaznak valamilyen számítástechnikai eszközt és módszert. Nagyteljesítményű számítógépekkel („mainframe”) oldanak meg rendkívül bonyolult módon

egymásra ható áramlási és hővezetési feladatokat, ahol az áramlás geometriája is igen bonyolult lehet, valamint a polimer fázisátalakulásokon (olvadás, megszilárdulás) is keresztül megy a feldolgozás során.

Mikroszámítógépeket (és mikroprocesszorokat) használnak a folyamatszabályozásban, adatgyűjtésben, minőségbiztosításban. Az elektronika fejlődésével a néhány éve még csak nagyszámítógépen futtatható programok jó része megjelent a személyi számítógépeken (PC), munkaállomásokon (*workstation*) is.

A számítógéppel segített tervezés/számítógéppel segített megmunkálás (*CAD/CAM = Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing*) az 1950-es években először a nyomtatott áramkörtervezés/gyártás területén terjedt el. Az első „polimeres” CAD/CAM alkalmazás a polimerek extrúziójának szimulációja volt. Bár az extrúziós folyamat számítógépes modellezése volt az első polimeres alkalmazás, napjainkban a legnagyobb aktivitás a *fröccsöntés* területén érzékelhető. Ennek néhány oka a következőkben foglalható össze:

- a fröccsöntés a második legjelentősebb polimerfeldolgozási eljárás,
- sok polimer fröccsönthető,
- bár a folyamat ciklikus, reológiaiailag mégis viszonylag egyszerűen modellezhető,
- a folyamat paraméterei jól mérhetők és szabályozhatók.

A tervezés és megmunkálás (CAD/CAM) után a folyamat tervezése (modellezése, szimulációja) (*CAE = Computer Aided Engineering*) a következő igen fontos mérföldkő a számítógépek mérnöki alkalmazásában. Korábban egy extrúziós– vagy fröccsszerszám megtervezése inkább műszaki érzék és tapasztalat, semmint tudomány volt. Egy használható szerszám kialakítása jó néhány iterációs ciklust jelentett, amikor is elkészítették a szerszámot, kipróbálták, majd a tapasztalt hibákat korrigálták, újból kipróbálták, és ezt a folyamatot addig ismételték, míg elfogadható eredményt kaptak (*trial and error*). A számítógépes szimulációs programokkal a mérnök a számítógépen végezheti el a szerszám vizsgálatát, anélkül, hogy azt a valóságban ténylegesen el kellene készíteni. Ez a „virtuális” szerszám a számítógéppel addig módosítható, míg a kívánt eredményt nem nyújtja, megépíteni csak a már tökéletes változatot kell. Ez rengeteg idő– és pénzmegtakarítást jelent.

A fröccsöntés folyamatát szimuláló programok a következő területeken segítik a tervezőmérnök, illetve a technológus munkáját:

- A szerszám kitöltési folyamatának modellezése, az ömledékfront előrehaladása az idő függvényében. A módszerrel előre jelezhetők az összecsapási vonalak, valamint meghatározható a fröccsöntési ciklus ideje, és annak változása különböző paraméterek függvényében.
- Zsugorodás és vetemedés modellezése. Meghatározhatók az anyagban maradó feszültségek és az orientáció mértéke.
- A szerszám hűlési viszonyainak modellezése, az optimális (egyenletes) hűléshez szükséges hűtőcsatorna geometria kialakítása.

- A folyamat változóinak, mint pl. fröccsöntési sebesség, szerszámhőmérséklet optimalizálása.
- A fröccsöntött termék terhelés hatására kialakuló feszültségi viszonyainak meghatározása.
- Számítógéppel segített fröccsszerszám gyártás (CAM), a szerszámüreg megmunkáláshoz szükséges NC (Numerical Control, számjegyvezérlésű) programok előállítás.

### 9.9.1 A számítógépes fröccsöntési programok jellemzői

A programok általában három fő egységből állnak:

- Grafikus tervező program. Ebben a programrészben adható meg a termék geometriája.
- Folyamat szimulációs program, amely a fröccsöntési folyamat során kialakuló hő- és áramlási viszonyokat számítja részekre osztásos vagy végeelemes módszerrel (*FEM, FEA: Finite Element Method, Finite Element Analysis*). Léteznek két- (2D) és háromdimenziós (3D) változatok. A legtöbb program automatikus hálógenerálási funkciót is tartalmaz
- A polimerek reológiai, fizikai (hőtani) adatait tartalmazó adatbázis. Gyakran a fröccsöntő gépek adatait tartalmazó adatbázist is mellékelnek a programokhoz.

A 9.22 ábrán néhány kereskedelmi forgalomban beszerezhető fröccsszimulációs program jellemzőit foglaltuk össze [9.15] alapján. Mint a táblázatból jól megállapítható, a programok egy kivételével gyakorlatilag azonos színvonalúak, így a választást főként az ár (amely 17 000 és 80 000 USD közötti!) és az itt nem részletezett kényelmi szolgáltatások – pl. van-e csatlakozási felülete más, elterjedt gépészeti szoftverekhez – befolyásolják.

Program neve	Hardverigény	Szerszámkitöltés	Utónyomás	Hűtés	Zsugorodás	Vetemedés	Grafikus megjelenítés	Felvási út számolás	Gépi korlátok figyelése	Anyag adatbázis
<u>Moldflow</u>	M, W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>C-Mold</u>	M, W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>Timconcept</u>	W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>Moldfill/Moldcool</u>	W, P	+	-	+	-	-	+	+	+	+
<u>I-Deas</u>	W	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>Simulflow</u>	W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>CAM-Mold</u>	W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+
<u>Cadmould</u>	W, P	+	+	+	+	+	+	+	+	+

+: számítja; -: nem számítja

M: nagygépen (mainframe), W: munkaállomáson (workstation), P: személyi számítógépen (PC) futtatható

**9.22 ábra:** Fröccsszimulációs programok jellemzői [9.15]

### 9.9.2 A fröccsöntés-szimulációs programok felépítése

Az egyszerűbb szimulációs programok a bonyolult geometriájú szerszámot egyszerűbb geometriájú elemekre osztják, és az elemi áramlási utakra számítják ki a megfelelő reológiai és termikus egyenleteket. Ilyen elemi áramlási geometriák:

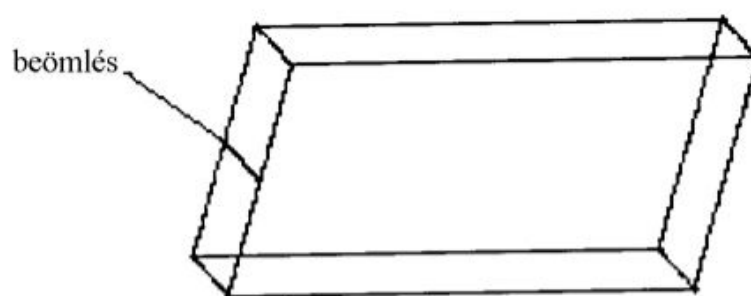
- kör keresztmetszetű cső,
- körgyűrű keresztmetszetű cső,
- kör keresztmetszetű, fűtött felületű cső,
- körgyűrű keresztmetszetű, fűtött felületű cső,
- hasáb alakú csatorna,
- körszelet,
- ívekkel határolt körszelet,
- elágazás.

Ezekre az egyszerű geometriájú áramlási utakra számítják ki a programok az *anyagi minőségtől független*, ún. **megmaradási** egyenleteket (tömeg-megmaradás, impulzus-megmaradás és energia-megmaradás). Az egymáshoz kapcsolódó elemi áramlási utaknál a kapcsolódási helyeken a polimer azonos módon kell, hogy

viselkedjen, így egy sor egyensúlyi feltétel keletkezik. A programok addig számolják az áramlást, amíg a feltételek teljesülnek (iteráció). Sajnos a folyási problémák megoldásához a megmaradási egyenletek nem elégségesek, szükség van az *anyagi minőségtől függő állapotegyenletekre* is. Az állapotegyenletek a polimerek *reológiai, termikus és fizikai* tulajdonságait írják le. A bennük szereplő *anyagi állandók* (pl. newtoni viszkozitás, ld. 5. fejezet 118. old.), vagy *anyagfüggvények* (pl. hatványtörvény, Carreau egyenlet, ld. 5. fejezet 125. old.) pontos ismerete nélkülözhetetlen a valóságot megfelelő pontossággal leíró szimulációhoz.

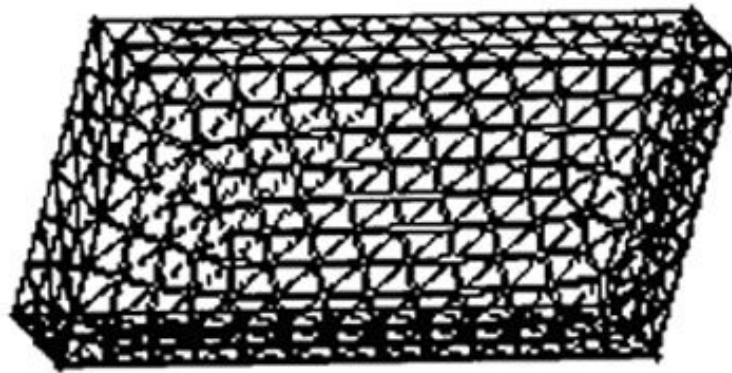
A részekre osztás módszerénél jóval pontosabb eredményt adnak, de sokkal számításigényesebbek a *végeselemes* programok. A vizsgált polimer terméket (többnyire) háromszögekből álló hálózattal (végeselemes háló) fedik le. A kritikus területeken a hálót alkotó háromszögek méretét csökkentve, illetve a lefedő háromszögek számát növelve, ezeken a helyeken a számítás pontossága növelhető. A háromszögek egymáshoz három *csomópontban* csatlakoznak. Az egyszerű elemek feszültség, deformáció és deformációsebesség értékeit könnyen ki lehet számítani; ezeknek az értékeknek a találkozási pontokban (csomópontok) azonosnak kell lenniük. Az egyensúlyi feltételekből itt is egy sor egyenlet adódik, amelyeket iterációval lehet megoldani. Elfogadható pontosságot csak nagyszámú elem alkalmazásával lehet elérni, ezért nagyméretű problémákat csak gyors, sok memóriával rendelkező számítógépeken érdemes futtatni. A személyi számítógépek gyors fejlődése következtében ma már a PC k is alkalmasak pl. fröccsöntés szimulációs végeselemes programok futtatására.

A 9.23–9.25 ábrákon a C-Mold fröccsöntés szimulációs program használatának néhány fázisát mutatjuk be. A 9.23 ábra a gyártandó termék geometriájának és a beömlési pont helyének megadását szemlélteti. A következő, 9.24 ábrán a program által a termékre generált végeselem háló, míg a 9.25 ábrán a fröccs-szimuláció lefuttatása után az ömledékfront helyzete látható különböző időpontokban.

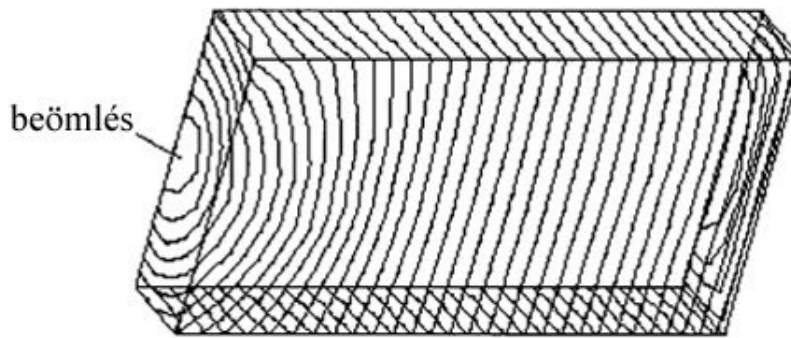


**9.23 ábra:**A fröccstermék geometriájának és a beömlési pont helyének megadása a C Mold fröccsöntés szimulációs programban [9.18]





9.24 ábra: A C Mold által generált végelem háló [9.18]



9.25 ábra: Az ömledékfront előrehaladása a fröccsöntés során [9.18]

### 9.9.3 Anyagi tulajdonságok szerepe a szimulációban

A fejlettebb fröccsöntés szimulációs programok egy sor anyagi állandót igényelnek, de az egyszerűbbekhez is legalább nyolcra van szükség. A viszkozitás hőmérséklet-függését három állandóval tudjuk figyelembe venni, három állandó szükséges a fizikai tulajdonságok leírására, és két jellemző hőmérsékletet is ismernünk kell. A három viszkozitási állandóval ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) csak a newtoni (lineáris, nyírsebességtől független) viszkozitásfüggvény írható le (vagyis a legegyszerűbb, a valóságot legkevésbé jól leíró eset):

$$\eta = A(\dot{\gamma} - B)e^{CT}$$

(A viszkozitás hőmérsékletfüggésének és nyírsebességfüggésének leírásához 5 anyagi állandót kell ismerni.)

A fizikai állandók közül egyik az ömledék sűrűsége, a másik kettő hőtani jellemző: az ömledék fajhője és hővezetőképessége. A két hőmérséklet: a befagyási hőmérséklet (*freeze temperature*) és az ún. folyási határhőmérséklet (*non-flow temperature*). A folyási határhőmérséklet az a legkisebb hőmérséklet, amely alatt a polimer 0,7 MPa nyomáskülönbség hatására már nem folyik. A befagyási hőmérséklet a kristályosodás

hőmérséklete a részben kristályos polimereknél, míg amorf polimereknél az üvegesedési hőmérsékletnél ( $T_g$ ) valamivel magasabb hőmérséklet.

Nyolc anyagállandóval természetesen nem lehet jól leírni egy olyan bonyolult rendszert, mint a polimer. Rendszerint figyelembe kell venni a viszkozitás nyírósebesség- és nyomásfüggését, és a fröccsöntés során ömledék állapotból megszilárduló polimer fizikai/hőtani tulajdonságainak változását a fázisátalakulás során. További nehézséget okoz a részlegesen kristályos polimerek fizikai tulajdonságainak leírása. Az egyszerűbb fizikai állapotegyenletek (pl. Spencer-Gilmore egyenlet) csak az ömledékre alkalmazható, a szilárd fázisra nem.

A végeelem programokhoz általában összetettebb polimer adatbázisok tartoznak. Sajnos ezeknek az adatbázisoknak a megbízhatósága erősen megkérdőjelezhető. Progelhof [9.15] írja: „A hővezetőképesség mérése nem egyszerű feladat; úgy tűnik, a különböző laboratóriumok mérési eredményei ugyanarra a polimerre jelentősen eltérnek egymástól.” Szintén problémát jelent az egyszer már kimért anyagi állandók rendszeres karbantartása. A gyárak időről időre lecserélik termékeiket, vagy ugyanazt a típusjelű anyagot korszerűbb technológiával kezdik el gyártani, ami egyes anyagi paraméterek jelentős megváltozását okozhatja. Problémát jelent a kellő pontosság is. Egy extrúziós szimulációs programhoz pl. *három értékes jegy* pontossággal kellene ismerni a szilárd polimer és a fém közötti *súrlódási tényezőt*, miközben két jegyre pontos adatok is eléggé megkérdőjelezhető megbízhatósággal állnak rendelkezésre.

## 9.10 Szakirodalom

- Hyatt I. W.. *U.S. Patent 133.2929*. 1872.  
Johannaber F.. *Kunststoff-Maschinenführer*. Hanser. München . 1992.  
Belofsky H.. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
Osswald T.A.. *Polymer Processing Fundamentals*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1998.  
Malloy R. A.. *Plastic Part Design for Injection Molding*. Hanser. Munich . 1994.  
Macosko C.W.. *RIM - Fundamentals of Reaction Injection Moulding*. Hanser-Oxford Univ. Press. Munich . 1989.  
Sors L., Bardócz L., Radnóti I.. *Műanyagalkító szerszámok*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1977.  
Sors L., Balázs I.. *Példatár a műanyagalkító szerszámok tervezéséhez*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1980.  
Gastrow H.. *Der Spritzgiess-Werkzeugbau in 100 Beispielen*. Hanser. München . 1998.  
Mennig G.. *Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1995.  
Kelemen A., Baranovics P.. *Hőre keményedő műanyagok sajtólása, fröccs-sajtólása és fröccsöntése*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1974.  
Stevenson J. F.. *Innovation in Polymer Processing – Molding*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1996.  
Trepte H.. *Plastwerkzeuge*. VEB Verlag Technik. Berlin . 1981.  
BASF. *Kunststoff-Verarbeitung im Gespräch – Spritzguss*. Badische Anilin- & Soda Fabrik AG. Ludwigshafen . 1970.  
Progelhof R. C., Throne J. L.. *Polymer Engineering Principles*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1993.  
Halász L.. *Számítógépes technológia és szerszámtervezés a fröccsöntésben*. Műanyag és Gumi. 32. 5. 123-130. 1995.  
Bencsik M.. *Műanyagtermékek és technológiai tervezés számítógéppel*. Műanyag és Gumi. 32. 5. 115-122. 1995.  
*C-Mold Design Guide*. A C Technology. Cornell Univ.. USA . 1995.

## ÜREGES ALKATRÉSZGYÁRTÁSI TECHNIKÁK POLIMEREKBŐL

### Tartalom

#### [10.1 Extrúziós fúvás](#)

##### [10.1.1 Terméktervezés](#)

##### [10.1.2 Az extrúziós fúvás berendezései](#)

##### [10.1.3 Különleges extrúziós fúvási technológiák](#)

#### [10.2 Fröccsfúvás](#)

### 10.2.1 A fröccsfúvás berendezései

### 10.2.2 Terméktervezés

## 10.3 Előnyújtásos fröccsfúvás

## 10.4 Fúvásos technológiák polimerjeinek reológiai tulajdonságai

### 10.4.1 Viszkozitás

### 10.4.2 Duzzadás, viszkoelasztikus tulajdonságok

## 10.5 Rotációs öntés

### 10.5.1 A rotációs öntés alapvonásai

### 10.5.2 Rotációs öntőberendezések

## 10.6 Szakirodalom

Az eddig megismert műanyagfeldolgozó eljárásokkal nem lehet gazdaságosan palackokat, tartályokat vagyis *üreges testeket* előállítani. Az ilyen termékek előállítására több módszert is kifejlesztettek. A leggyakrabban alkalmazott technikák:

- extrúziós fúvás
- fröccsfúvás
- rotációs öntés
- összeépítés két héjből.

Az *extrúziós fúvásnál* a hőre lágyuló műanyagból extrudált cső-darabot, (amely még nem hűlt le) behelyezik az alakadó szerszámba, és a csőbe vezetett sűrített levegővel a nagyrugalmas állapotban levő csövet nekiperéselik a szerszám falának.

A *fröccsfúvásnál* annyi a különbség, hogy a polimerből először előformát fröccsöntenek, és ezt helyezik el a végső alakot adó szerszámban, ahol felfújják. Mindkét eljárásban a felfúvás után a polimert hagyják lehűlni a temperált szerszámban, majd mikor a termék már kellően alacsony hőmérsékletű, eltávolítják a szerszámból.

A *rotációs öntésnél* fűthető szerszámban helyezik el a hőre lágyuló műanyag granulátumot vagy port, a szerszámot felmelegítik, és közben két egymásra merőleges tengely körül forgatják. A megolvadó polimer a centrifugális erő hatására veszi fel a szerszám alakját. Ezzel az eljárással zárt termékek is előállíthatók.

Az *összeépítésnél* két – fröccsöntéssel vagy vákuumformázással kialakított – héj-részt (pl. két félgömböt) építenek össze. Az eljárás különlegessége, hogy különböző anyagú héj-részeket is össze lehet építeni.

A fúvásos technológiákkal napjainkban 2 millió tonna feletti hőre lágyuló polimer mennyiséget dolgoznak fel, főként csomagolóanyagként (üdítőitalos, olajos, mosószeres palackok, kozmetikai cikkek flakonjai, stb.) A két leggyakrabban használt anyag a HDPE és a PET, együttesen a teljes felhasznált polimer mennyiség 90 %-át teszik ki. Legnagyobb felhasználó az élelmiszeripar. Ezen kívül PVC-t és PP-t is gyakran dolgoznak fel extrúziós vagy fröccsfúvással.

Új piacot jelent a fúvós technológiák számára a különféle műszaki műanyagok feldolgozása. Az autóiparban üreges lökhárítókat, kocs ülés vázát, valamint üzemanyag tartályokat állítanak így elő. A bútortiparban üreges bútorlapokat készítenek, főleg irodai berendezési tárgyak előállításához.

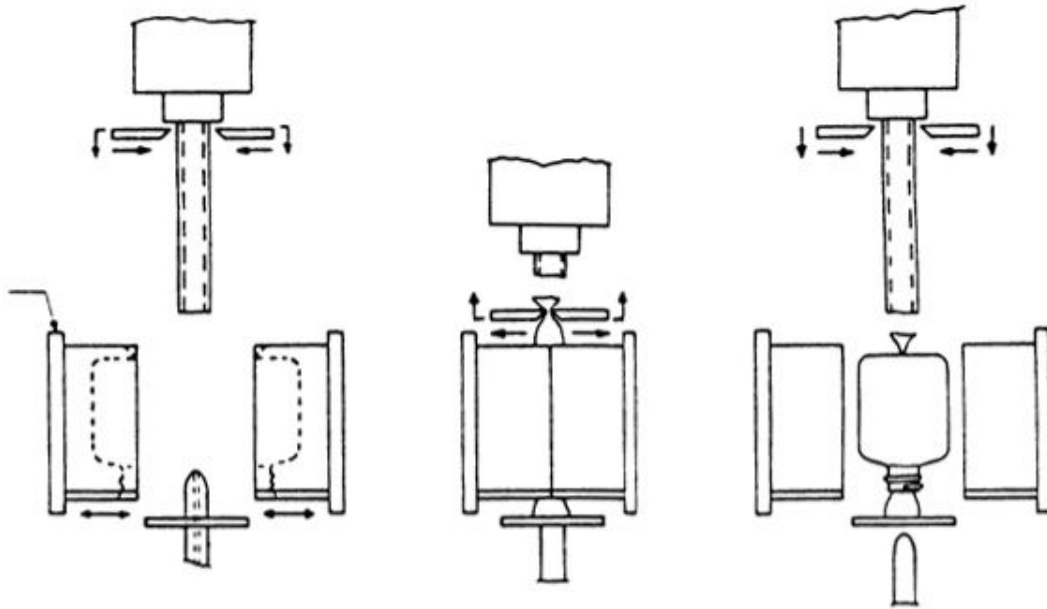
A fúvós technológiával feldolgozható műanyagok választékában napjainkban még nem szerepelnek erősen töltött vagy szálerősítésű anyagok, mert ezek folyóképessége és ömledékszilárdsága nem megfelelő. Kis mértékben töltött (főként a folyóképességet kevésbé befolyásoló töltőanyagokkal, pl. talkum, faliszt) műanyagok feldolgozására már történtek kísérletek.

### **10.1 Extrúziós fúvás**

Az extrúziós fúvásnál extrúzióval csövet készítenek a polimerből. A még meleg, nagy rugalmas állapotban levő csövet (előgyártmány) két félből álló szerszámban, sűrített levegővel (ritkábban, degradációra érzékenyebb polimerek esetén nitrogén gázzal) a szerszám falához préselik, ahol a műanyag felveszi a szerszám alakját. A leggyakrabban készített palackoknál a (többnyire csavaros) nyak kiképzése az ún. **tüske** segítségével történik.

A 10.1 ábrán látható az extrúziós fúvás vázlata. Mivel az extrudált cső nincs megtámasztva, a polimer kiválasztásánál a legfontosabb szempont az ömledékszilárdság. A csőnek nem szabad elszakadni saját súlya alatt, ugyanakkor kellően rugalmasnak kell lennie ahhoz, hogy a szerszám alakját felvegye.

Extrúziós fúvással tipikusan 250 ml és 5000 l közötti üreges testeket lehet előállítani. A folyamatosan dolgozó extruderrel működő technológiákat előszeretettel használják a termikus degradációra érzékeny anyagok, mint a PVC, feldolgozására. Az extrúziós fúvással előállított termékeknél kevesebb kötöttség van, mint a fröccsfúvással előállítottaknál, így pl. itt könnyen kialakítható a palackon üreges fogantyú. Szintén viszonylag szabad keze van a tervezőnek erősen nyújtott, vagy lapos alakok kialakításában. Az extrúziós fúvás szerszámait gyakran készítik alumíniumból, így a szerszám költsége kb. egyharmada a fröccsszerszáménak. Az előgyártmány tömegét, illetve vastagság-eloszlását viszonylag könnyen lehet változtatni, ezért az extrúziós fúvást gyakran alkalmazzák prototípus kifejlesztésére.



**10.1 ábra:** Extrúziós fúvás [10.1] balra: cső extrudálása, középen: a cső felfújása a szerszámban, jobbra: szerszámnyitás és kidobás

### 10.1.1 Terméktervezés

Az extrúziós fúvással előállított termék tervezésénél is célszerű néhány szabályt betartani. Ilyenek pl. a felfúvási arány, lekerekítési sugarak, a szerszámok geometriai méretei, stb. A jó termék tervezésének alapfeltétele a folyamat és a berendezés alapos ismerete.

A legtöbb extrúziós fúvással előállított terméknel célszerű lekerekített formákat, kúpos felületeket kiképezni. A nagyobb lapos felületeket, éles sarkokat kerülni kell. Az ilyen sarkok elvékonyodnak, a lapos felületek pedig általában deformálódnak, eltorzulnak. Hasonló módon a kiemelkedő vonalak sugara is legalább 1,5 mm legyen, különben az előgyártmány nem tudja kitölteni az alakot, és a bezárt levegő beégést okozhat.

Az extrúziós fúvásnál a 4:1 felfúvási arányt lehet maximumnak tekinteni. Ezt az arányt az egyes részeknél sem szabad túllépni. Az olyan fogantyú-kialakítások például, amelyek mélyebbek, mint amilyen szélesek a szerszám osztósíkjá mentén, gyakran elvékonyodnak és gyengék lesznek.

Merevítő bordák kialakításával gyakran ellentétes hatást érünk el. Ezek megnövelik a lefedendő területet, így szintén a falvastagság csökkenését, és ezzel a merevség csökkenését idézik elő. (Csőharang vagy harmonika-hatás.)

Az extrúziós fúvási technológia és a terméktervezés nemcsak a palackok mechanikai tulajdonságait, de azok úrtartalmát is befolyásolják. A vékonyabb falú palackok nem csak könnyebbek lesznek, de jobban „kihasasodnak”. Egy 4 l-es palack tömegét 5 g-mal csökkentve azt tapasztalták, hogy a palack térfogata 12 ml-el megnőtt. A részletesebb vizsgálat szerint 5 ml ebből a tömegcsökkenés, míg 7 ml a kihasasodás

következménye volt. A nagyobb ömledék és szerszámhőmérséklet, rövidebb előgyártmány-hossz, rövidebb ciklusidő és megnövelt levegőnyomás mind a palack térfogatát csökkentő tényező.

### 10.1.2 Az extrúziós fűvás berendezései

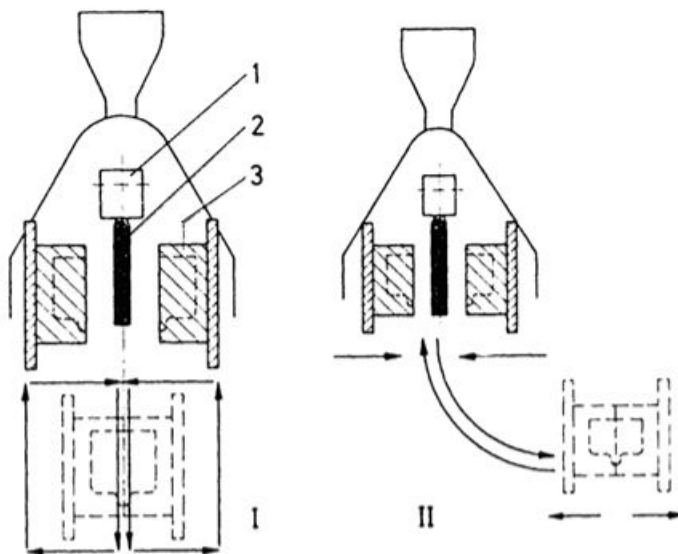
Az extrúziós fűvásnál tehát az extruder a plasztifikált polimer ömledékből csövet állít elő, amelyet a szerszám két fele közrezár. A szerszámba fűvótüskét helyeznek, amelyen keresztül a túlnyomásos levegő a nagyrugalmas állapotban levő csövet a szerszám falához nyomja. A cső (más néven előgyártmány) felveszi a hideg szerszám alakját, és lehűl. A szerszám összezáródásakor minden esetben sorja keletkezik, amelyet a termékről leválasztanak és visszadolgoznak.

Két alapvető extrúziós fűvási technológiát különböztethetünk meg:

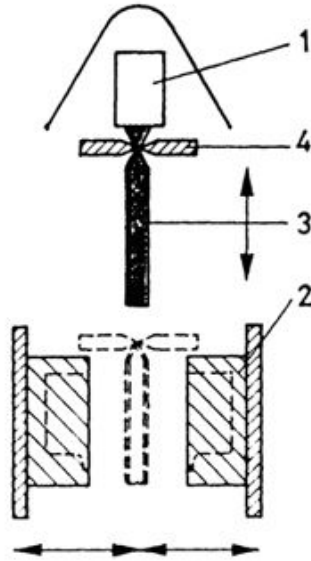
- a folyamatos és
- a szakaszos extrúziós fűvást

#### 10.1.2.1 Folyamatos extrúziós fűvás

A folyamatos technológiánál az előgyártmány csövet olyan (mérsékelt) sebességgel extrudálják, amely megfelel a fűvás, hűtés és eltávolítás sebességének. A fűvószerszámot nem helyezhetjük közvetlenül az extruder alá, hiszen az akadályozná a folyamatos előgyártmány készítést. Itt is két alapvető megoldás terjedt el: kisebb (kb. 1000 ml-ig) termékeknél a szerszámot mozgatják a 10.2 ábra szerint, nagyobb terméknél az előgyártmányt lecsípi, és azt szállítják a formázószerszámhoz, 10.3 ábra.

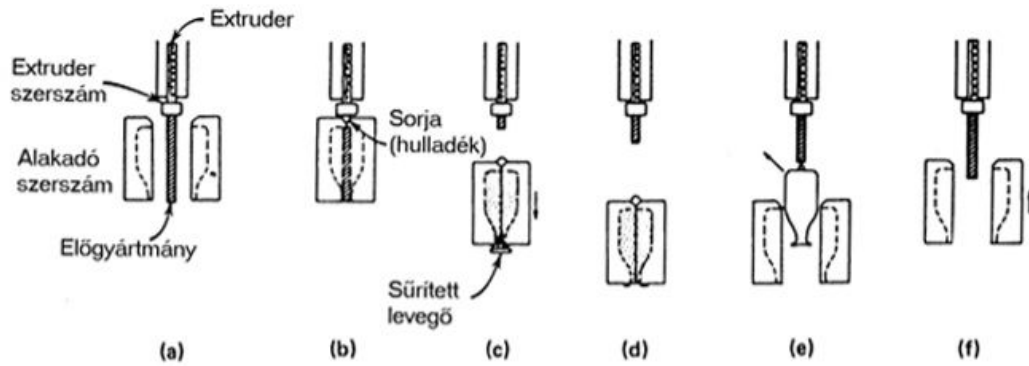


**10.2 ábra:**Szerszámmozgatás függőlegesen vagy oldalirányban [10.4]: I) függőlegesen, II) oldalirányban, 1) extruder fej, 2) cső, 3) fűvószerszám

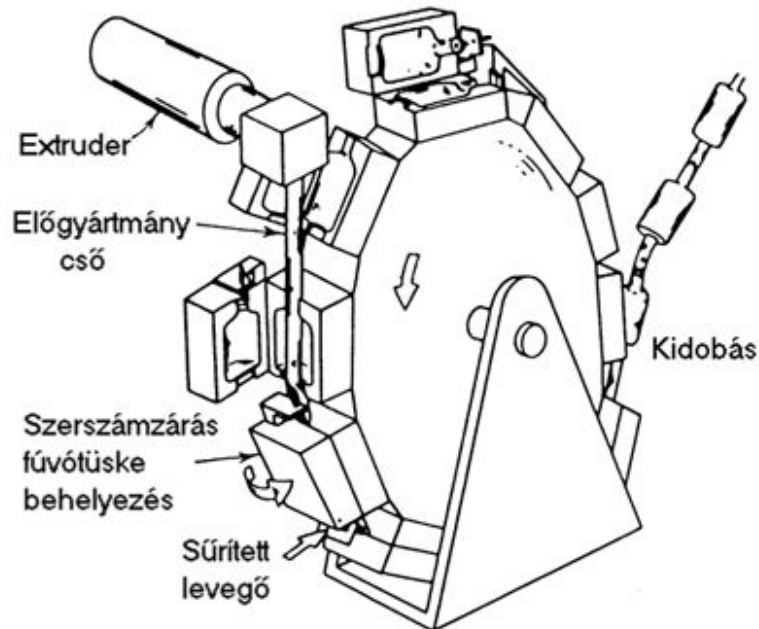


**10.3 ábra:**Előgyártmány mozgása [10.4] 1) extruder fej, 2) fűvőszerszám 3) cső, 4) lecsípő fogó

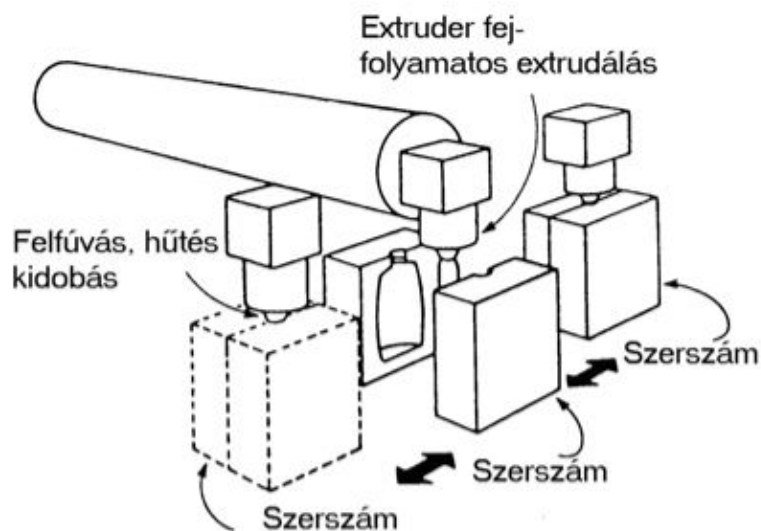
A 10.2 ábrán vázolt szerszámmozgatásos módszerek is több változata terjedt el: a szerszámot emelő módszer, 10.4 ábra, a karusszel-elrendezés, 10.5 ábra, illetve a váltószerszám, 10.6 ábra.



**10.4 ábra:**Folyamatos extrúzió emelt szerszámmal [10.4] a) előgyártmány extrúzió, b) szerszámzárás, c) felfűvés, d) hűtés, e) késztermék eltávolítás, f) szerszám felemelése



**10.5 ábra:**Több szerszamos függőleges karusszel elrendezésű extrúziós fúvó berendezés. Az egyes palackokat a szerszámnyitáskor választják le a folyamatos előgyártmányról [10.2]



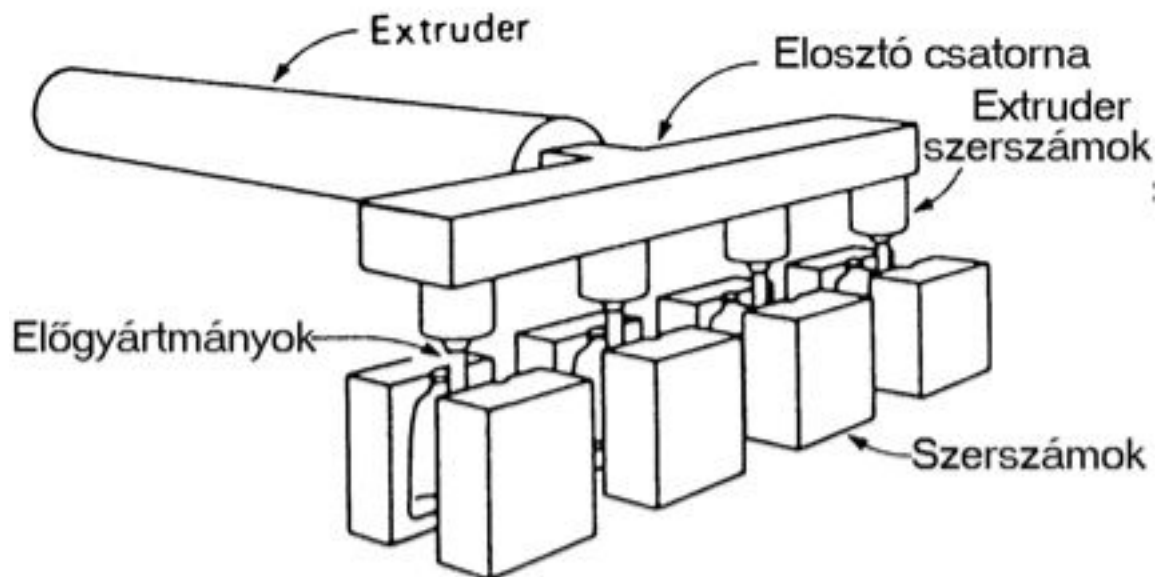
**10.6 ábra:**Váltószerszamos folyamatos extrúziós fúvó berendezés. Ennél a kétoldalas rendszernél a szerszámok felváltva fogadják az előgyártmányt [10.1]

A folyamatos extrúziós fűvás termelékeny, és egyes esetekben, mint pl. hőérzékeny polimerek feldolgozásakor az egyetlen elfogadható megoldás.

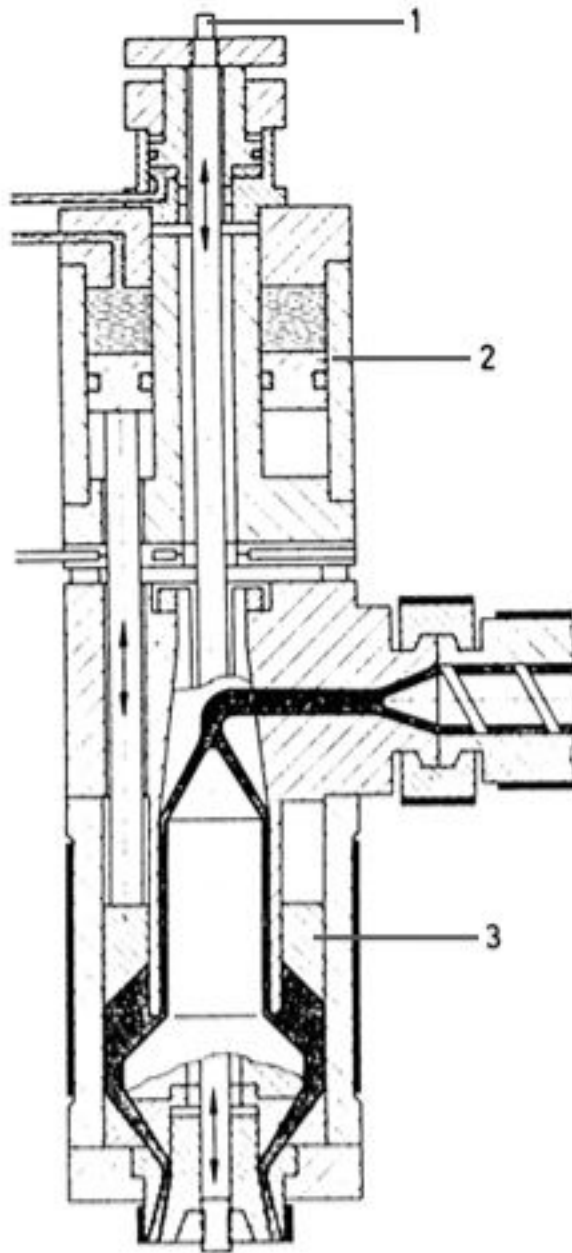


### 10.1.2.2 Szakaszos extrúziós fűvás

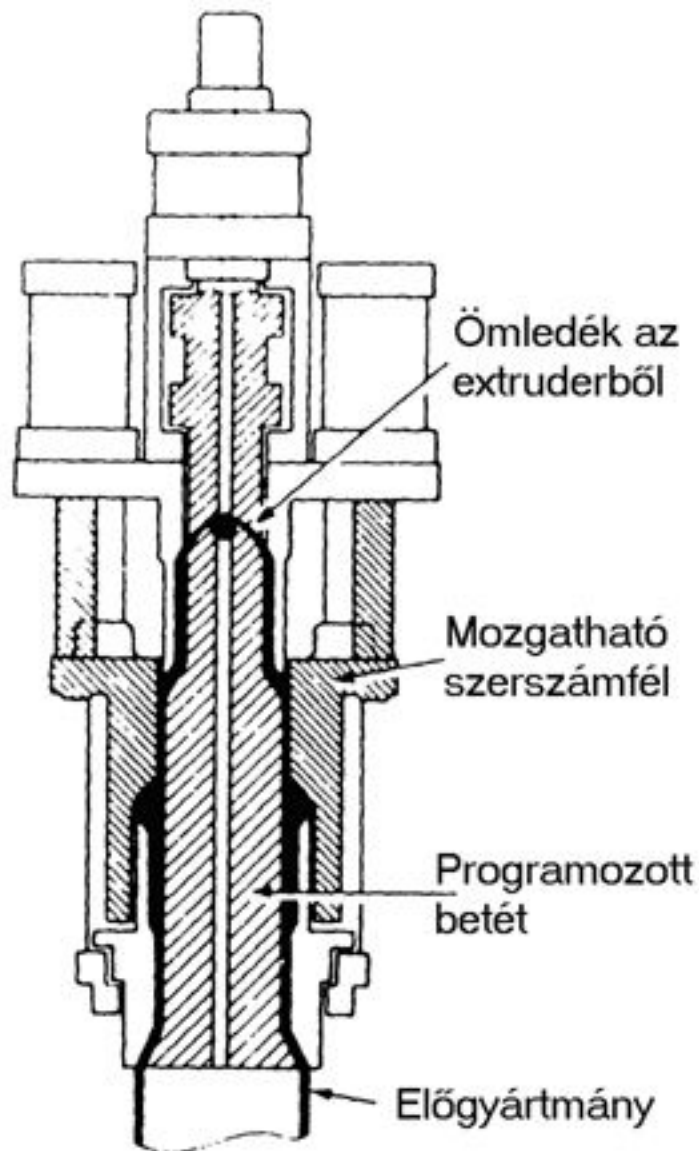
A szakaszos extrúziós fűvás a másik elterjedt technológiai megoldás. Itt az előgyártmány csövet az előző termék eltávolítása után közvetlenül az extruder szerszám alatt elhelyezett, és nem mozgatott formaadó szerszámra extrudálják. A teljes folyamat, a felfűvás, lehűtés, és késztermék eltávolítás mind az extruder fej alatt elhelyezett szerszámokban történik. Ennél a megoldásnál az előgyártmányt befogó szerkezet egyszerűbb megoldású lehet, mint a folyamatos technológiáknál. A szakaszosan működő extrudercsiga miatt a módszer leginkább a kevésbé hőérzékeny poliolefinok feldolgozásához alkalmas. A szakaszos extrúziós fűvási technológiának is több változata terjedt el: a tengelyirányban elmozduló csigadugattyús változat (hasonló a fröccsöntőgépeknél alkalmazott megoldáshoz), 10.7 ábra, a napjainkban már ritkán alkalmazott gyűrűdugattyús ömledéktárolós (akkumulátoros) változat, 10.8 ábra, és a 10.9 ábrán látható akkumulátor (tároló)-fejes változat.



10.7 ábra: Szakaszos extrúziós fűvó berendezés [10.4]



**10.8 ábra:**Gyűrűdugattyús ömledéktárolós extrúziós fúvó fej vázlata [10.4] 1) falvastagság állító rúd, 2) hidraulikus henger, 3) gyűrűdugattyú

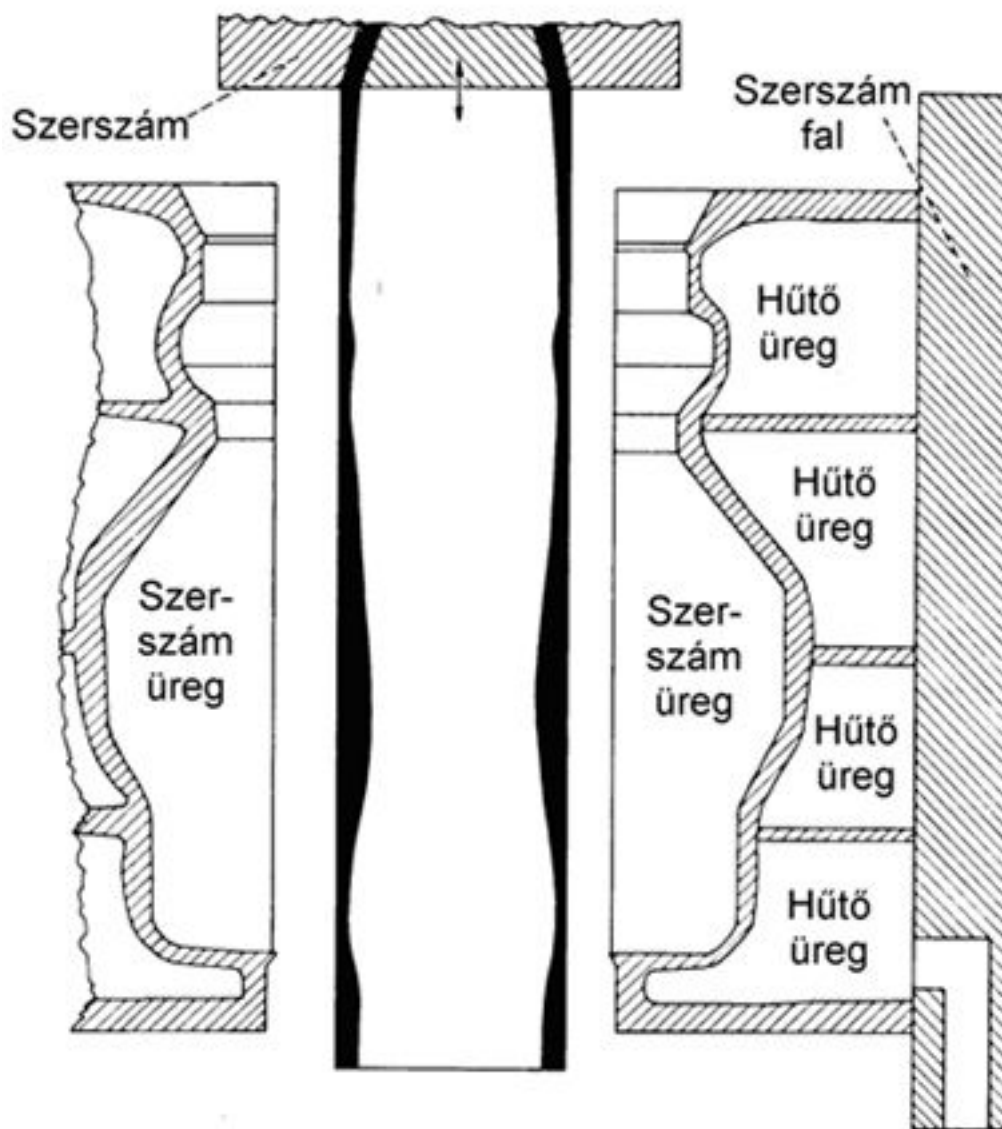


10.9 ábra: Tárolós (akkumulátor) fej vázlata [10.4]

Az akkumulátor-fejes szerszámok főleg nagyobb méretű termékek előállítására használatosak. Előnyösebbek a korábban alkalmazott gyűrűdugattyús ömledéktárolós fejeknél, mert míg azokban működési módjukból adódóan az először a szerszámba került ömledék utolsónak hagyta el a szerszámot, az akkumulátor-fejes szerszámoknál az először bekerült ömledék elsőként távozik a tárolófejből.

A modern gépeken (akár szakaszos, akár folyamatos működésűek) a cső előgyártmány falvastagsága programozható (10.10. ábra), például az extruder csiga fordulatszámának változtatásával, vagy olyan szerkezeti egységgel, amely a szerszám résméretét tudja programozottan változtatni. Az előgyártmányon így vékonyabb-vastagabb gyűrűket tudunk kialakítani, a késztermék falvastagság igényének megfelelően. A programozott

falvastagságú előgyártmány előnye, hogy a késztermék mechanikai tulajdonságainak javításán túl tömeg, és ezzel árcsökkentést is lehetővé tesz.



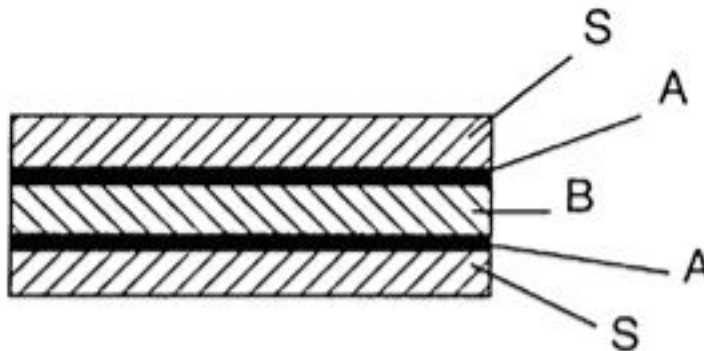
**10.10 ábra:** Extrúziós fűvsnál az előgyártmány (cső) falvastagsága programozható. A falvastagságot ott növelik meg, ahol a termék alakja miatt a nyúlás nagy [10.1]

### 10.1.3 Különleges extrúziós fűvási technológiák

#### 10.1.3.1 Koextrúziós fűvás

A fóliáknál, illetve egyéb extrúziós termékeknél jól bevált koextrúziós technológia az extrúziós fűvsnál is alkalmazható. Az első koextrúziós fűvási technológiával előállított termékek élelmiszeripari csomagolóanyagok voltak, amelyeknél fontos az oxigén és párazárás, valamint a jó ütészállóság. Ezeket a tulajdonság kombinációkat monolitikus szerkezettel elérni nem, vagy csak drágán lehet. A HDPE és a PP pl. jó

párazáró képességű anyag, ugyanakkor oxigénáteresztő képességük nagy. Az etilén-vinilalkohol kopolimer (EVOH) gázáteresztő képessége (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) kicsi, viszont víz hatására bomlik. Élelmiszersomagolásra ezeket az anyagokat kiválóan lehet kombinálni; ötrétegű szendvicsszerkezet kialakítását láthatjuk a 10.11 ábrán.



**10.11 ábra:**Koextrúzióval előállított ötrétegű szendvicsszerkezet [10.1] A betűk jelentése: S) külső réteg, pl. HDPE, B) középső, kis gázáteresztő képességű réteg, kb. 5-15 % (pl. EVOH, ionomer), A) ragasztó (kötő) réteg, kb. 2 %

Néhány egyéb, koextrúzióval kialakítható szendvicsszerkezet: háromrétegű szendvics, ahol a középső réteg a gyártási folyamatban keletkező, vagy a felhasználóktól begyűjtött és újrafeldolgozott hulladék. Itt nincs szükség ragasztóréteg(ek)re, mert mindhárom réteg azonos polimert tartalmaz. Kétrétegű szerkezet: a fal külső vékony rétege anyagában színezett polimer, a belső réteg natúr polimer. Ragasztóréteg itt sem szükséges. Mindkét megoldás előnye a monolit szerkezettel szemben az alacsonyabb alapanyag-ár. Bár az első, és ma is legnagyobb felhasználó az élelmiszeripari csomagolóanyagok előállítása, a módszer más területeken is egyre jobban terjed; pl. gépkocsik üzemanyagtartálya, ipari és mezőgazdasági vegyszerek tároló tartályai.

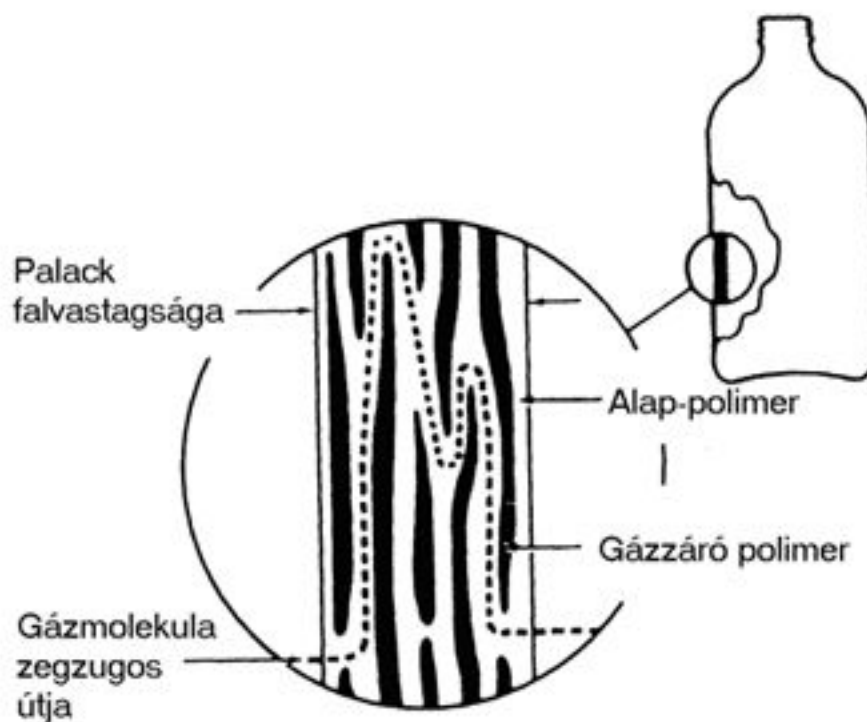
Az előzőekben ismertetett extrúziós fűvási technológiák mind alkalmasak koextrúziós fűváásra is. A megfelelő technológia kiválasztásához a termék és az anyag ismeretén kívül szükséges a várható termelési volumen ismerete is.

### 10.1.3.2 Lamináris termékek extrúziós fűvása

A koextrúziós fűvás alternatívája lehet a DuPont cég által kifejlesztett ún. *lamináris morfológiájú* extrúziós fűvási technológia. Ennél az eljárásnál egyesítik a koextrúzióval előállítható termékek jó tulajdonságait a hagyományos extrúziós fűvás viszonylag egyszerű berendezéseivel és relatív alacsony költségével.

Az előgyártmány készítéséhez két polimert használnak itt is, mint a koextrúziónál: egy jó gázzáró tulajdonságú polimert, amelyet 10–15 %-os arányban mechanikusan hozzákevernek a (viszonylag) olcsó jó víz-gázzáró, másik polimerhez (pl. poliolefinhez). Az előgyártmány készítéshez egyszerű extrudert használnak, amelyben a nyírás hatására a két anyag a 10.12 ábra szerinti átlapoló, réteges szerkezetet hozza létre. Bár a gázzáró polimer nem alkot folytonos réteget, a gázmolekuláknak igen hosszú, zezugos utat kell

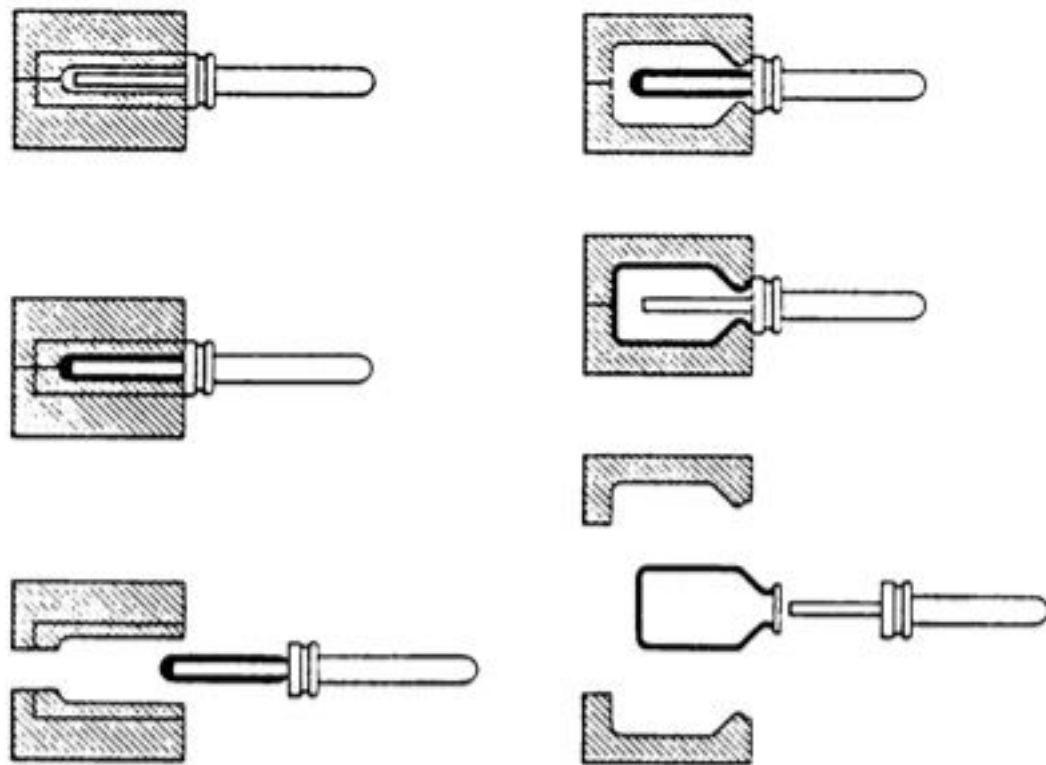
megtenniük a falban, hogy az egyik oldalról átjussanak a másikra, ezért a gázáteresztő képesség igen kicsi lesz. A folytonos vízgőz-záró réteg ugyanakkor nedvesség áteresztéssel szemben teljes biztonságot ad.



10.12 ábra:Lamináris morfológiájú palack falának vázlatos szerkezete [10.2]

## 10.2 Fröccsfúvás

A fröccsfúvásnál a polimerömléket egy előgyártmány szerszámban elhelyezett fém betétre (tüske) fröccsöntik. A még meleg előgyártmányt ezután a tüskével együtt áthelyezik a készterméknek megfelelő alakú szerszámba, és a betéten keresztül felfújják, 10.13 ábra. Van arra is eljárás, hogy a teljesen lehűlt előformát (tüske nélkül) egy másik gépen újramelegítve fújják fel.



**10.13 ábra:**A fröccsfúvás vázlata [10.1] balra: az előgyártmány fröccsöntése és eltávolítása az előgyártmány szerszámból jobbra: a préslevegő a betéten keresztül fújja fel az előgyártmányt

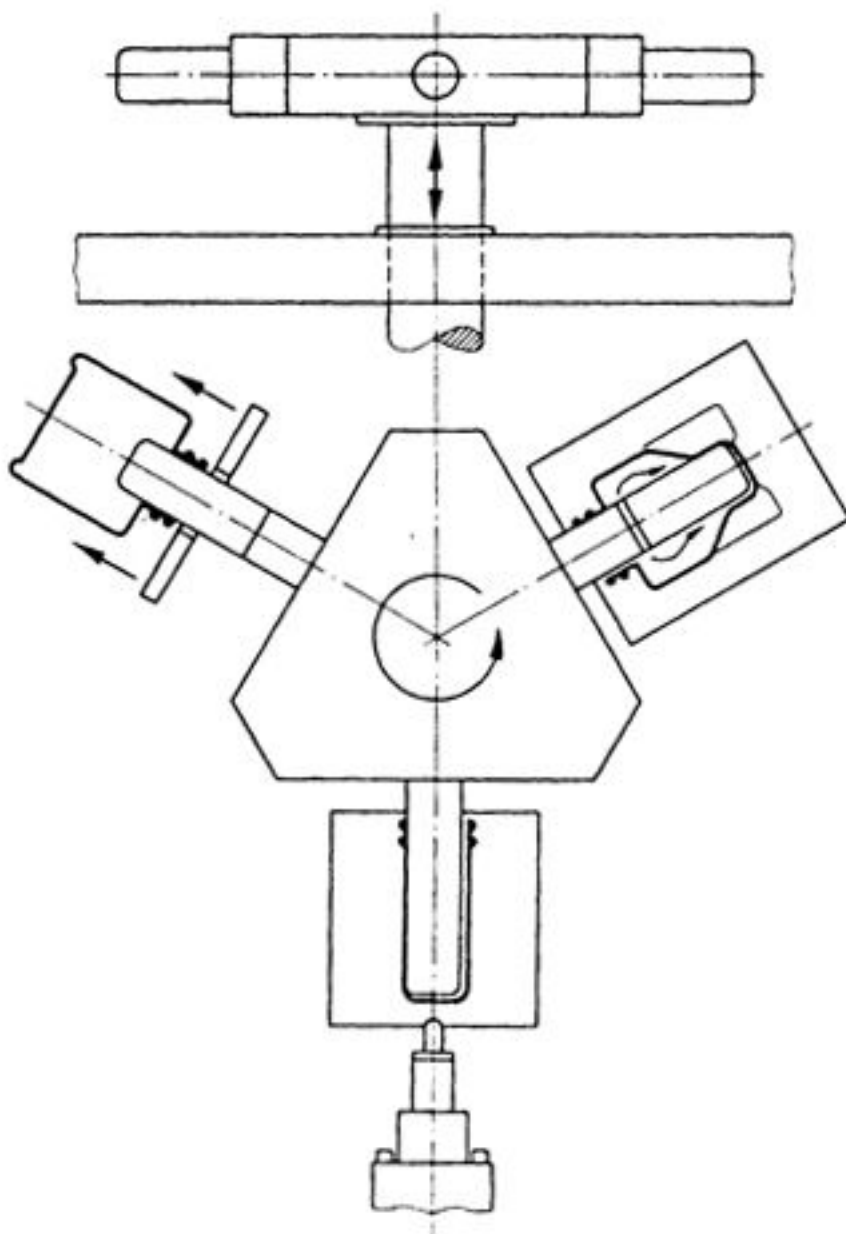
A betét segítségével a fröccsfúvásnál a kisebb ömledékszilárdságú polimerek is alkalmazhatók, mint például általános célú PS vagy PET, amelyeket extrúziós fúvással nem lehetne feldolgozni. A technológiának vannak korlátai is, például fröccsfúvással csak tömör fogantyúval ellátott palackot lehet készíteni, míg az extrúziós fúvással üreges fogantyú is készíthető. A fröccsfúváshoz használt szerszámok ára kb. háromszorosa az extrúziós fúvásnál használtakénak, mert ott alumíniumból készíthetők a szerszámok. Nagy térfogatú és nagy tömegű termékek előállítására is az extrúziós fúvás alkalmasabb, fröccsfúvással leggyakrabban 500 ml-nél kisebb űrtartalmú palackokat állítanak elő. Nagy sorozatú, kis térfogatú termékeknél a fröccsfúvás a leggazdaságosabb technológia.

A fröccsfúvási technológiánál sokkal kevesebb sorja keletkezik, mint az extrúziós fúvásnál. A palackok nyak-kialakítása is precízebben oldható meg, mint az extrúziós fúvásnál. A pontosan fröccsöntött előgyártmány miatt a késztermék térfogata is pontosabban tartható, a nyomástartó üdítőitalos palackok így készülnek.

### 10.2.1 A fröccsfúvás berendezései

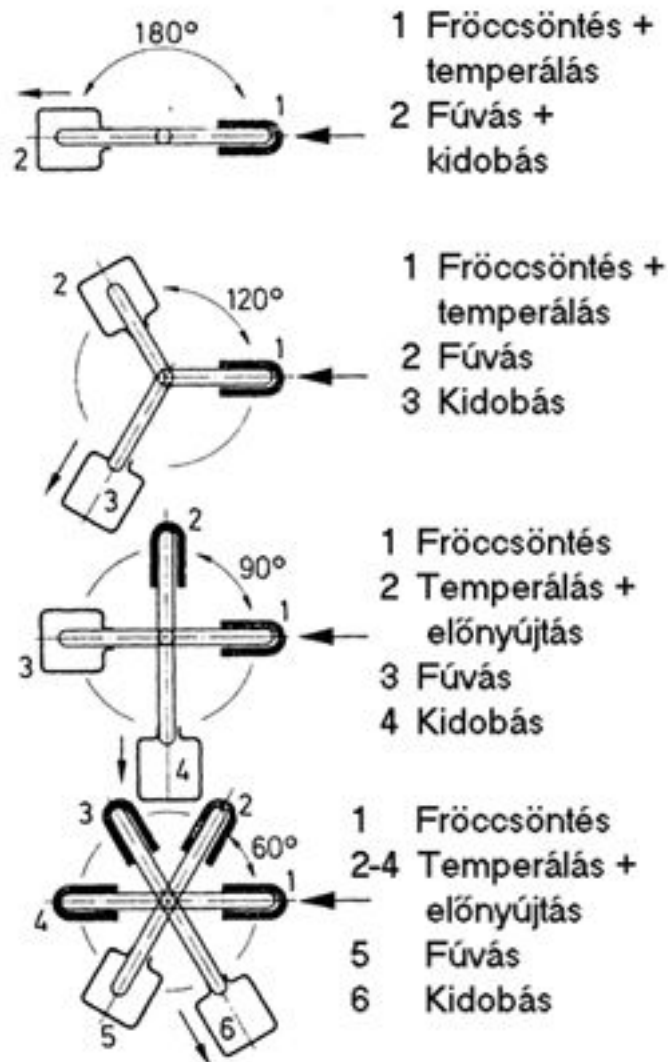
Az első fröccsfúvó berendezések hagyományos fröccsgépek voltak, a fúvási technológiának megfelelő szerszámmal. Ennek a megoldásnak a hátránya a fröccsgép kapacitásának rossz kihasználása volt (meg kellett

várni a fűvást és a termék lehűlését). 1961-ben az olasz Gussoni bevezette a 3 fejes, folyamatos szerszámmozgatást; ma is ezen az elven működik szinte minden korszerű fröccsfúvó berendezés. A három szerszámot vízszintes vagy függőleges síkban, általában 120°-os szögeltolással szerelik fel egy mozgó karusszelre, 10.14 ábra. Az első pozícióban történik az előgyártmány fröccsöntése, a másodikban a fűvás, a harmadikban a késztermék eltávolítás.



**10.14 ábra:** Vízszintes elrendezésű három fejes szerszámmozgató vázlata [10.4]





**10.15 ábra:**Két és több pozíciós termékmozgató rendszerek vázlata [10.4]

A három pozíciós elrendezés továbbfejlesztett változatainál további pozíciókat alakítottak ki a három alappozíció között. Ezeknél az újabb pozícióknál lehet temperálni a fúvótüskét, előnyújtani az előgyártmányt, festeni/dekorálni a kész palackot. Néhány elrendezési vázlatot a 10.15 ábrán mutatunk be.

### 10.2.2 Terméktervezés

Fröccsfúvásnál két szerszámot használnak, egyet az előgyártmány, és egyet a késztermék előállítására. A következőkben néhány alapvető szempontot ismertetünk a késztermék, illetve a szerszámok kialakításához.

Az ideális előgyártmány hossz/átmérő (L/D) viszonya 10:1, vagy annál kisebb érték. Ennél az aránynál a tűske még nem hajlik ki túlzottan a fröccsnyomás hatására, így egyenes lesz az előgyártmány falvastagsága és hőmérsékleteloszlása. Nagyobb L/D viszony esetén a tűske kihajlását csúszógyűrűvel szükséges megakadályozni.

Az ideális előgyártmány palack méretarány (a felfúvási arány) 3:1, vagy ennél kisebb érték. Nagyobb felfúvási aránynál az előgyártmány felfúvás közben hajlamos kilengeni, ami megnöveli az egyetlen falvastagság kialakulásának valószínűségét.

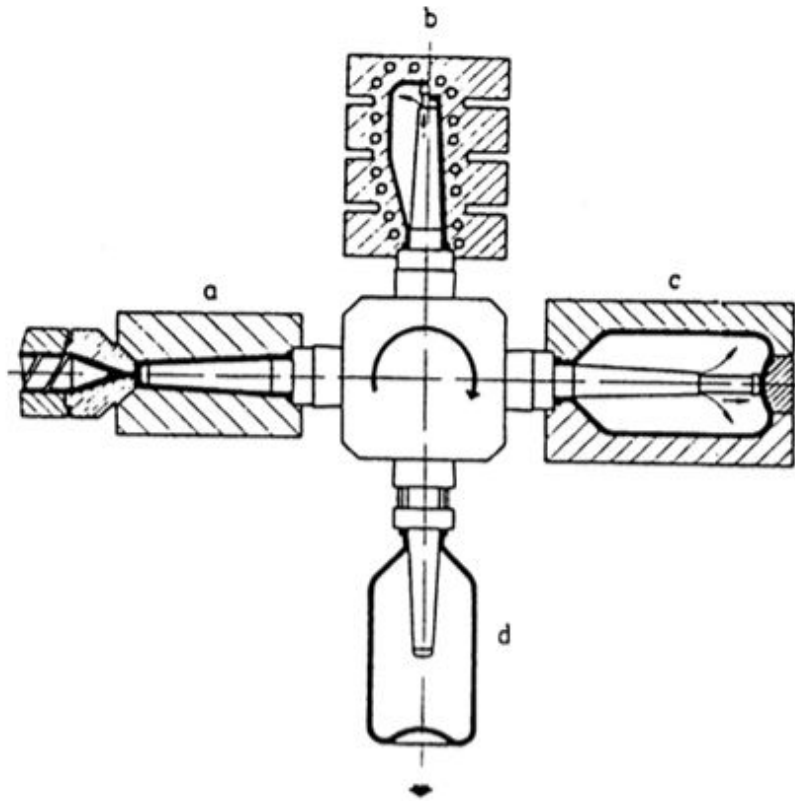
Az ideális előgyártmány falvastagság 2 és 5 mm között van. 6 mm-nél vastagabb előgyártmánynál nehéz biztosítani a szükséges hőmérsékleti viszonyokat. A 6 mm-nél vastagabb és a 2 mm-nél vékonyabb falú előgyártmányok felfúvás közben előre nem látható módon viselkedhetnek.

A fröccsfúvás előnye, hogy az előgyártmány falvastagságát könnyű „programozni” a fröccsszerszám-üreg, illetve a tüske kialakításával. Ez különösen az ovális alakú palackoknál fontos. Itt azt a szabályt célszerű betartani, hogy a legvastagabb terület falvastagsága ne haladja meg 30 %-nál nagyobb mértékben a legvékonyabb terület falvastagságát. Általában az ovális formát a szerszámüreg kialakítása biztosítja, a tüske kör keresztmetszetű marad. Ha az oválisság, vagyis a gyártmány szélességének és mélységének viszonya nagyobb 2:1-nél, a gyártmányon (palackon) függőleges összecsapási vonal alakulhat ki, amit mindenképpen célszerű elkerülni az oválisság fenti értéken tartásával.

A késztermék alakját meghatározó fúvószerszám kiképzésének egyetlen korlátja az előbb említett oválissági mérték betartása. A polimer zsugorodását a szerszámüreg kismértékű növelésével tudjuk kompenzálni. A zsugorodást a feldolgozási körülmények és a felhasznált polimer típusa határozza meg. Poliolefineknél a formazsugor 1,6 és 2 % közötti érték.

### **10.3 Előnyújtásos fröccsfúvás**

Az előnyújtásos fröccsfúvási technológiánál a fröccsfúvó berendezést felszerelik egy olyan egységgel, amely a fúvótüskét felfúvás közben tengelyirányban tudja mozgatni, 10.16 ábra.



**10.16 ábra:**Előnyújtásos fröccsfúvás vázlata [10.1] a) előgyártmány fröccsöntése, b) újbóli felmelegítés, c) nyújtás és felfúvás, d) késztermék eltávolítás

Az előnyújtás célja a termék két tengely menti arányos megnyújtása, orientálása. A két tengelyű (biaxiális) orientáció miatt a késztermék mechanikai tulajdonságai tengelyirányban magasabbak lesznek, mint orientáció nélkül. A jobb mechanikai tulajdonságok miatt olcsóbb polimert lehet használni, vagy kisebb falvastagságú terméket tudnak előállítani; mindkettő jelentős költségsökkentést eredményezhet bizonyos végtermékeknel. Az orientáció a mechanikai tulajdonságokon kívül előnyösen befolyásolja (csökkenti) a palack gázáteresztő képességét, megnöveli a felületi fényességet és az átlátszóságot, valamint jobb méretpontosságú termékek előállítását teszi lehetővé.

A szénsavas üdítőitalok tárolására használt 2,5 l-es PET palackoknál pl. 3,8-szoros kerületi, és 2,8-szoros tengelyirányú nyújtást alkalmaznak. Ez tengelyirányban 100 MPa, az erre merőlegesen kivágott próbatesteknél pedig 200 MPa szakító-szilárdságot eredményez. A CO<sub>2</sub> miatt kialakuló belső túlnyomás miatt a megfelelő szilárdság biztosítása az ilyen palackoknál fontos tervezési szempont.

Amint az a 10.16 ábrán is látható, az előnyújtásos fröccsfúvó berendezéseknél fontos az előgyártmány megfelelő hőmérsékletének biztosítása. Orientáció csak az anyag nagyrugalmas állapotában történő nyújtásakor alakul ki. A palack nyak-része fröccsfúvásos technológiánál nem orientálható. (Extrúziós fúvásnál a nyak részt is lehet orientálni.)

A következőkben a PET palack nyújtásos fröccsfúvása kapcsán bemutatjuk a polimerben lezajló változásokat. A többi részlegesen kristályos polimer fröccsfúvásakor hasonló jelenségeket lehet tapasztalni, természetesen más hőmérsékleti értékeknél. Az előgyártmány előállításakor nem szabad túl nagy fröccsöntési sebességet alkalmazni, hogy elkerüljük az ún. *feszültség-indukált kristályosodást*. Az ömledék hőmérséklete a kristályos olvadáspont felett 30–40 °C-al lehet, ennél magasabb hőmérsékleten a PET már bomlik, amit az acetaldehid gáz megjelenése jelez. Az előgyártmányt hűtött fúvótüskére fröccsöntik, így az ekkor még amorf marad. Amikor ezt az amorf előgyártmányt ( $T_g = 80\text{ °C}$ ) visszamelegítik 100 °C körüli hőmérsékletre, és tengelyirányban megnyújtják, valamint a nyújtással egyidőben felfújják, akkor a polimerben kis méretű, egyenletes eloszlású kristályok (krisztallitok) képződnek, de a szferolitos szerkezet nem tud kialakulni. A látható fény hullám-hosszánál kisebb méretű krisztallitokon nem jön létre fénytörés, ezért a palack fala átlátszó marad, mint az amorf polimeré, viszont a mechanikai tulajdonságai sokkal jobbak lesznek, mint akár az amorf, akár a szferolitos szerkezetű PET mechanikai tulajdonságai. A termék magasabb hőmérsékleten mérhető tulajdonságait tovább javíthatjuk 150 °C-os hőmérsékleten való temperálással (ez a poliészter szálak ún. hőregzésének hőmérséklete is). A PET palackok felfúvásánál a sűrített levegő nyomásának is fontos szerepe van: legjobb eredményeket két lépcsős felfúvással tudtak elérni. Az első lépésben kisebb nyomást (13 bar körül), a második lépésben, amikor a terméket a szerszám falához kell préselni, magasabb (40 bar) nyomást célszerű alkalmazni.

Az előgyártmány felfújásakor, illetve a kész palackban a CO<sub>2</sub> túlnyomás hatására a következő feszültségek alakulnak ki a falban (*kazánformulák*):

$$\sigma_t = \frac{Dp}{2v}$$

$$\sigma_a = \frac{Dp}{4v}$$

$$\sigma_r = -p$$

ahol  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$  és  $\sigma_r$  rendre a palack vagy előgyártmány falában ébredő tangenciális, tengelyirányú (axiális) és sugárirányú (radiális) feszültségeket jelenti;  $D$  a palack, illetve előgyártmány belső átmérője,  $v$  a falvastagsága, míg  $p$  a belső túlnyomás.

## 10.4 Fúvásos technológiák polimerjeinek reológiai tulajdonságai

### 10.4.1 Viszkozitás

A fúvásos technológiákra optimalizált polimerek reológiai tulajdonságai eltérnek a fröccsöntésre, vagy extrudálásra használt polimerek tulajdonságaitól. A fúvásos technológiáknál (különösen az extrúziós fúvásnál) fontos követelmény az ömledékszilárdság, valamint a nyújthatóság. Ezeket a tulajdonságokat általában nagyobb molekulatömegű polimerekkel tudják elérni, amelyek ömledékvizkozitása is magasabb. A nagyobb

móltömeg általában jobb ütésállóságot és jobb feszültségkorróziós tulajdonságokat is jelent. A fűvások technológiához ajánlott nagysűrűségű polietilén (HDPE) ömledékindexe  $MFI < 0,1$  g/10 perc.

Az ömledék nyújthatósága határozza meg, milyen könnyen lehet sarkokat és éleket kialakítani a túlzott elvékonyodás veszélye nélkül. Az ún. *természetes nyújtási viszonyszám*, ami adott próbatest nyújtásmentes, és az elszakadáskor mérhető vastagságának a viszonya, jó kiindulási érték. PET esetén ez a viszonyszám 16, míg PC esetén csak 6, ezért PET-ből könnyen lehet előnyújtás nélkül is palackokat előállítani.

Amorf termoplasztikus anyagokat könnyebb fűvások technológiával feldolgozni, mint a részlegesen kristályos polimereket. Minél nagyobb a különbség a feldolgozási és a dermedési hőmérséklet között, annál több ideje van az anyagnak a szerszámüreg alakját felvenni. Az amorf polimereknél felfűvaskor kisebb az előgyártmány és az alakadó szerszám falának egyenetlen érintkezéséből adódó belső feszültség kialakulásának veszélye is.

#### 10.4.2 Duzzadás, viszkoelasztikus tulajdonságok

A cső előgyártmány (különösen extrúziós fűvásnál) szabadon függ a levegőben. Ezért a gravitáció hatására hossza megnő, a falvastagsága kissé csökken. Ezzel ellentétes hatást fejt ki az ömledékduzzadás: a cső átmérője és falvastagsága is növekszik a viszkoelasztikus polimerben tárolt belső feszültségek relaxációja következtében. Az egymással ellentétes hatások miatt a duzzadás mértékét nehéz megjósolni; a különböző polimereknél 10 és 60 % közötti értékeket tapasztaltak. A túl nagy duzzadás miatt a cső egyes helyeken érintkezhet a szerszám fallal, ami megnehezíti az eltávolítását, esetleg el is szakadhat. A túl kismértékű duzzadás az üreges részek, pl. a flakonok fogantyújának kialakítását nehezíti meg. Az egyenletes termékminőség eléréséhez a duzzadást adott értéken kell tartani. A duzzadás főként a nyírósebességtől függ, amelyet a hőmérséklet és az extrudálási/fröccsöntési sebesség befolyásol. A magasabb hőmérséklet és kisebb sebesség csökkenti a duzzadás mértékét. A poliolefinok duzzadása viszonylag magas, de a hőmérséklettől csak gyengén függ. Egyes műszaki műanyagoknál erőteljesebb hőfokfüggést figyeltek meg. A felfűvás közben lejátszódó reológiai jelenségek bonyolultsága miatt a folyamatot végeelem-analízissel tanulmányozták. Ez a módszer alkalmas az optimális előgyártmány alakjának és méretének meghatározására, valamint segítségével a késztermék tulajdonságai is megjósolhatók.

### 10.5 Rotációs öntés

#### 10.5.1 A rotációs öntés alapvonásai

Nagyméretű ( $1-10$  m<sup>3</sup>), zárt és nyitott üreges testek előállítására használt eljárás. Elsősorban hőre lágyuló műanyagokat dolgoznak fel ezzel a módszerrel is, de lehetséges a reaktív (vagyis az alakadással egyidejűleg kémiai reakció is lejátszódik) feldolgozástechnika is.

Előnye:

- az olcsó szerszám és berendezés,

- a termékek nagyon kis belső feszültsége,
- a szinte tetszőleges (és könnyen változtatható) falvastagság,
- hegedési varratmentes termékek készíthetők,
- a szerszám – vagy anyagcsere gyorsan megvalósítható.

A módszernek van néhány hátránya is:

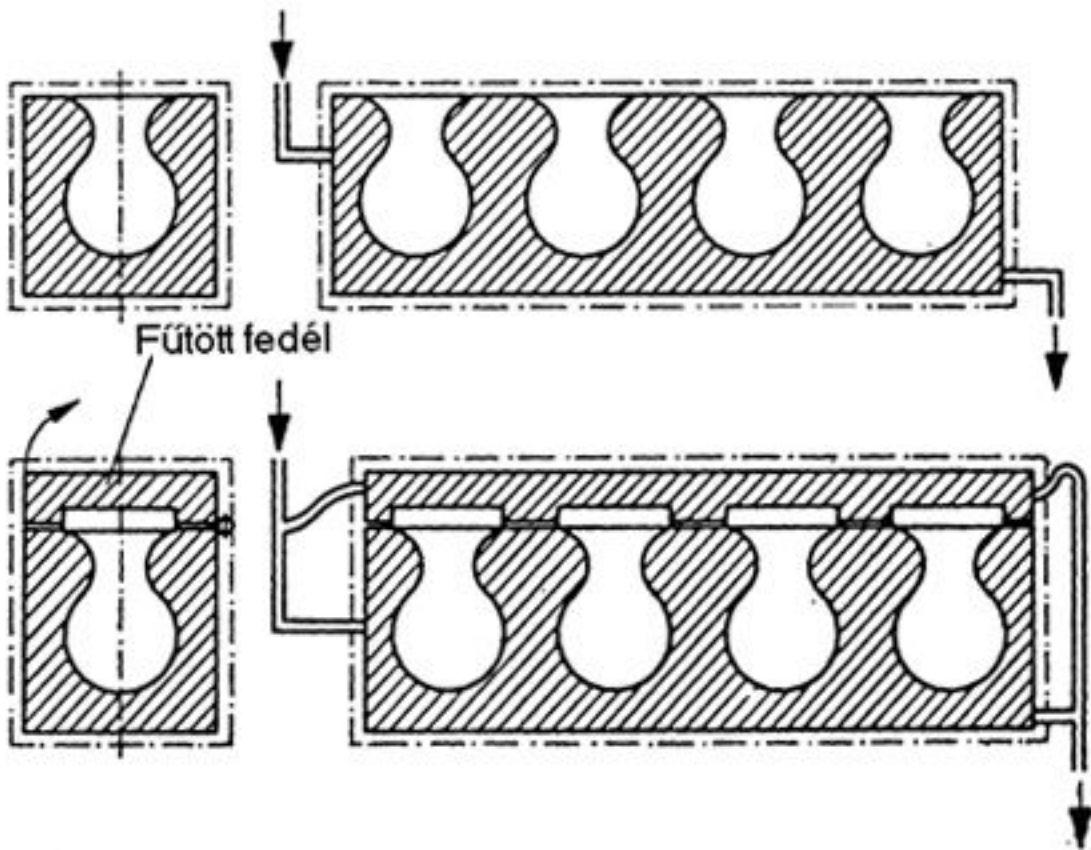
- kis falvastagságú termékek (0,75 mm alatt) készítésére nem alkalmas
- a fűvások technológiákhoz képest lassú, kis méretű termékeknél nem versenyképes
- nem minden polimer alkalmas rotációs formázásra

A rotációs öntés a következő lépésekből áll:

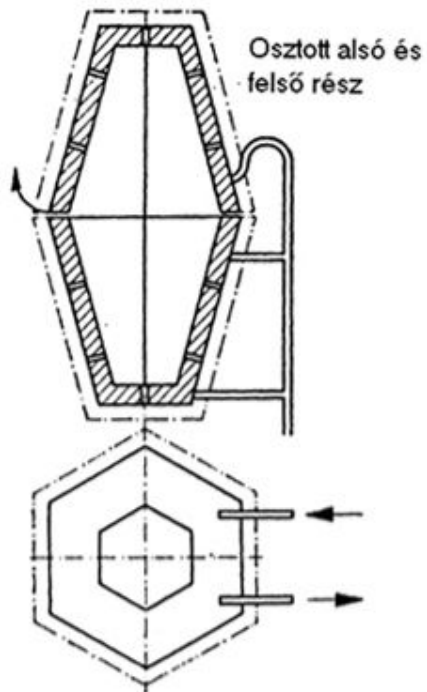
- a fűthető szerszámba meghatározott tömegű műanyagot helyeznek el granulátum, vagy por formájában,
- a szerszámot összezárják, felmelegítik (a szerszám típusától függően légcirkulációs kemencében, vagy duplafalú szerszám esetén fűtőközeget cirkuláltatva a szerszám falai között), és két egymásra merőleges tengely körül forgatják (a fordulatszám nem szokta túllépni a 30 fordulat/perc értéket, általában 3–10 ford/perc),
- a polimer megolvad, a keletkező ömledék a centrifugális erő hatására egyenletesen eloszlik és felveszi a szerszám alakját. A folyamat időtartama változik a polimer minőségétől és a falvastagságtól függően; általában 5–25 perc közötti érték,
- a szerszámot ezután tovább forgatás mellett lehűtik, szintén típustól függően hűtőkamrában levegővel, illetve vízpermettel, vagy duplafalú szerszámnál megfelelő hűtőközeget cirkuláltatva a szerszám falai között. A hűtés időtartama is kb. 10–20 perc,
- a készterméket eltávolítják.

### 10.5.2 Rotációs öntőberendezések

A rotációs öntőberendezésnek alkalmasnak kell lennie a szerszám (két tengely körüli) forgatására, a szerszám fűtésére és hűtésére. A legegyszerűbb szerszámkonstrukcióknál a szerszámot acéllemezből készítik. Mivel a szerszámban nem alkalmazunk túlnyomást, annak csak a forgatásból származó erőhatásokat kell elviselnie, azonban a szerszám tervezésénél tekintettel kell lenni a nagy hőterhelésre, hiszen a szerszámot gyakran melegítik fel és hűtik le. Kisebb termékek gyártásához többfészkés szerszámokat alkalmaznak, amelyeket többnyire alumínium-ötvözetből készítenek. A 10.17 ábrán többfészkés, alumínium öntvényből készült öntőszerszám, a 10.18 ábrán kettősfalú acéllemez szerszám vázlatos elrendezése látható.

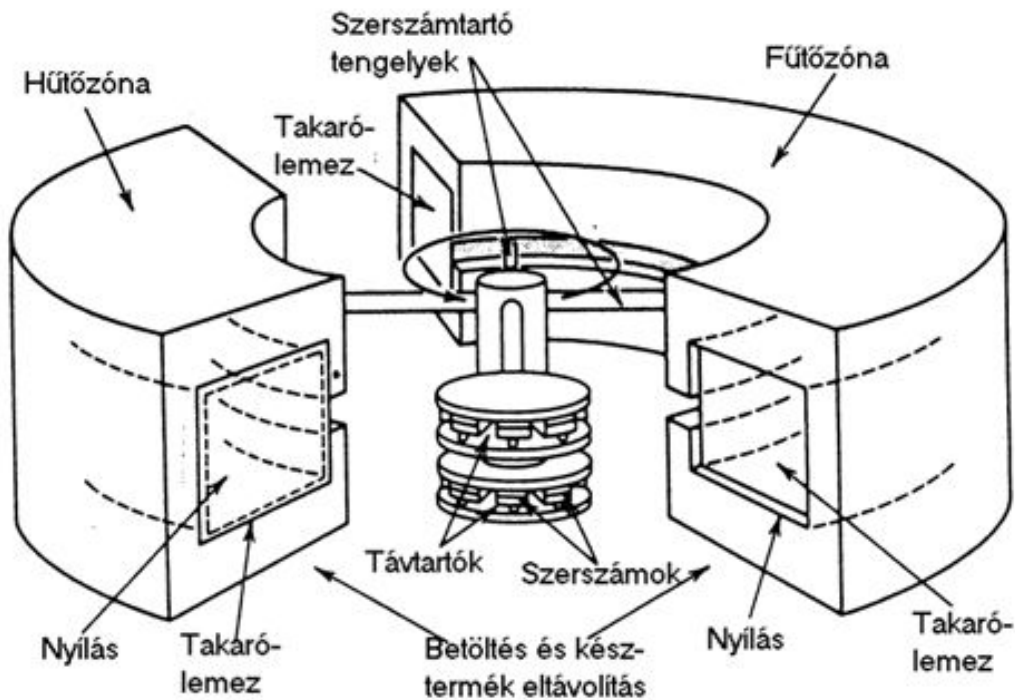


10.17 ábra: Több fészkes, alumínium öntvény szerszám vázlata [10.4]

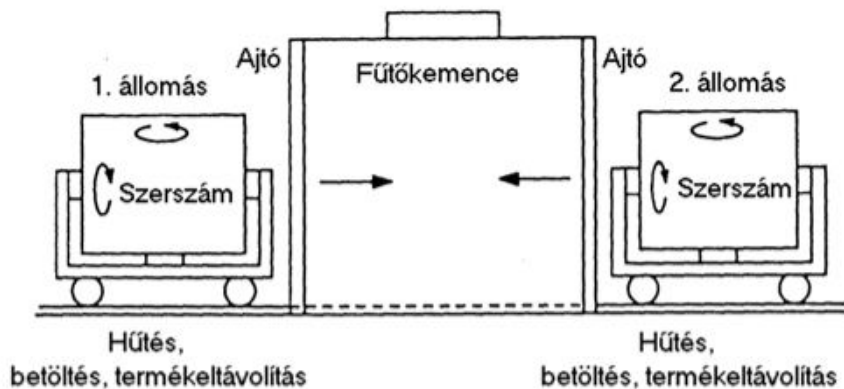


**10.18 ábra:**Kettős falú, acéllemezből készült öntőszerszám [10.4]

A 10.19 és 10.20 ábrán rotációs öntőberendezések vázlatos elrendezése látható. A 10.19 ábra berendezése egy egységben tartalmazza a fűtést, hűtést, polimer anyag betáplálást és késztermék eltávolítást. A 10.20 ábra berendezésénél az egyes állomások helyileg elkülönültek, közöttük szállítókoszók hordják az öntőszerszámokat.



**10.19 ábra:**Rotációs öntőberendezés. Az öntőszerszámokat tartó tengelyek a körívesen kiképzett fűtő- és hűtőállomások között körpályán mozgatják a szerszámokat, és közben forgatják is azokat. [10.1]



**10.20 ábra:**Rotációs öntőberendezés szállítókoszikkal [10.4]

## 10.6 Szakirodalom

Belofsky H.. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
Rubin I. I.. *Handbook of Plastic Materials and Technology*. John Wiley & Sons Inc.. New York . 1990.



Progelhof R. C., Throne J. L.. *Polymer Engineering Principles*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1993.  
Schwarz O., Ebeling F.W., Lüpke G.. *Kunststoffverarbeitung*. Vogel Buchverl.. Würzburg . 1991.  
Johannaber F.. *Kunststoff Maschinenführer*. Hanser. München . 1992.  
Kiss A.. *Üreges testek előállításá műanyagból*. Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1982.

## **MELEGALAKÍTÁS**

### **Tartalom**

[11.1 A vákuumformázás kapcsolata a termomechanikai tulajdonságokkal](#)

[11.2 A vákuumformázás technológiája](#)

[11.3 Egyéb melegalakítási eljárások](#)

[Túlnyomásos hőformázás](#)

[Mélyhúzás](#)

[11.4 Szakirodalom](#)

A melegalakítás alapvetően különbözik az eddig megismert feldolgozási technológiáktól, melyeknél a kiindulási alapanyag granulátum vagy por formájú volt, és a feldolgozás (alakadás) viszkózan folyó (ömledék) állapotban történt. Ezzel szemben a melegalakítási eljárások közös sajátossága, hogy – többnyire extrudálással előállított – hőre lágyuló polimer lemezeket, fóliákat (előgyártmányokat) alakítunk tovább, és viszonylag kis erővel állítjuk elő a végterméket. A folyamat lényege a következő: A polimer lemezt – általában sugárzó hővel – előmelegítjük a kívánt hőmérsékletre, kilágyítjuk, de nem olvasztjuk meg csak alakítható állapotba hozzuk. Ezt követően ezt a lágy, kis modulusú (kis merevségű) anyagot viszonylag kis erővel a hideg szerszámba (szerszámra) préseljük vagy szívjuk (alakadás). A folyamat végén a szerszámban (szerszámon) lévő anyagot – többnyire levegő ráfúvással – lehűtjük (alakrögzítés), és a késztermék eltávolítható. A módszer a fémlemezek mélyhúzására hasonlít.

A módszer nagy előnye, hogy a megfelelően kilágyított lemez kis erővel is nagy mértékben alakítható, ezáltal a szerszám anyagköltsége alacsony. Így pl. egy keményfa szerszámmal akár 1000, vagy alumínium szerszámmal több 10 000 formázás is megvalósítható. Az eljárás hátrányaként meg kell említeni a viszonylag magasabb anyagköltséget, hisz pl. a granulátumból valamilyen technológiával elő kell állítani, vagy meg kell vásárolni a formázandó, azonos vastagságú, lehetőleg feszültségmentes lemezt.

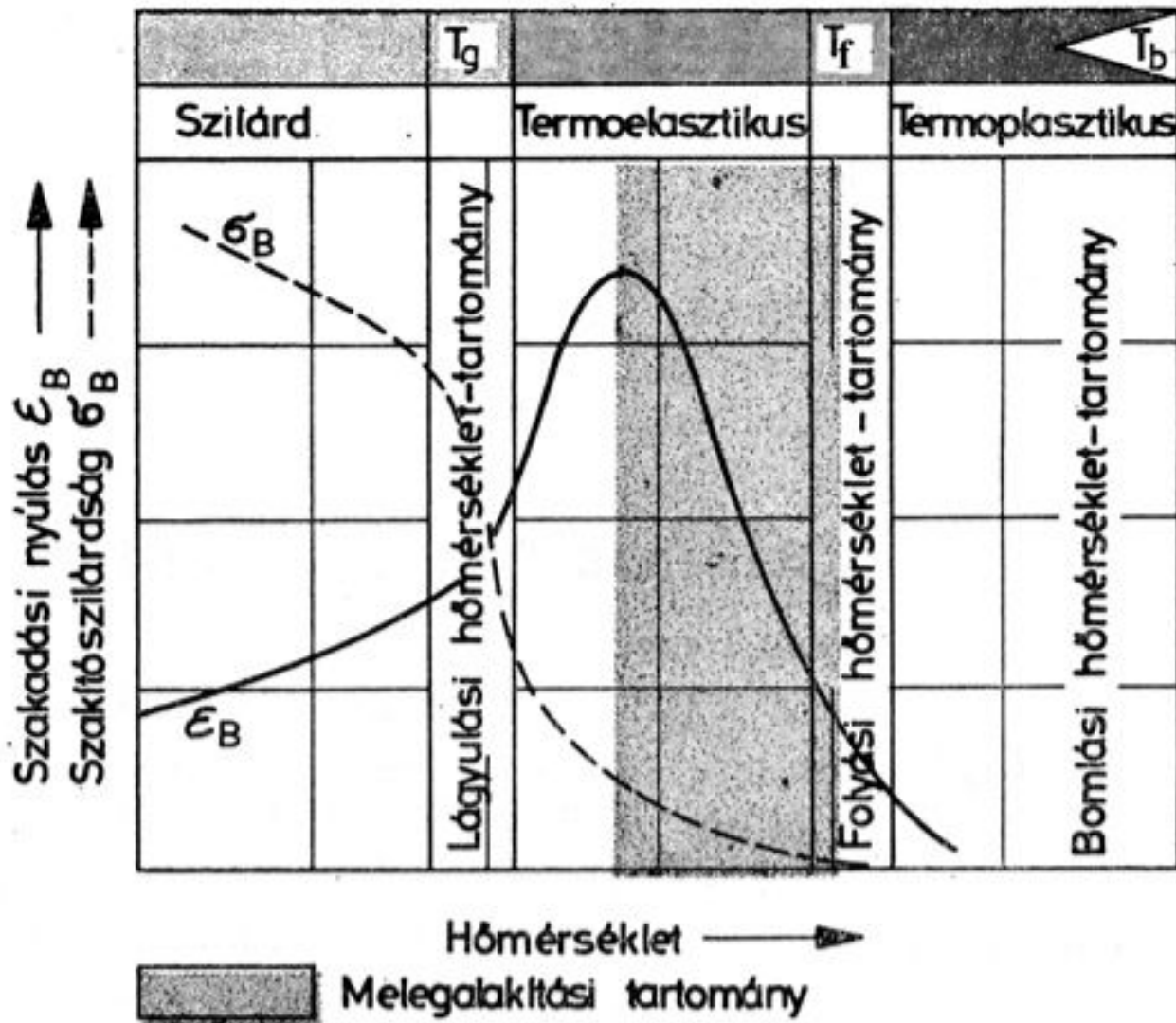
### **11.1 A vákuumformázás kapcsolata a termomechanikai tulajdonságokkal**

A melegalakítási technikák kritikus része a formázandó lemez *megfelelő hőmérsékletének* biztosítása. Ebből a szempontból lényeges különbség van az *amorf* és a kristályos polimerek között, ami legjobban a termomechanikai görbék segítségével magyarázható. Az amorf hőre lágyuló polimereknél (11.1 ábra) a legnagyobb alakítást a *maximális nyúlás tartományában* lehet elérni, de ilyenkor nagy lesz a gyártmányban a belső feszültség. Magasabb hőmérsékleten, a nyúlás leszálló tartományában is megvalósítható az alakítás, de ennek mértéke kisebb, viszont a termék kevésbé lesz feszültséges. Elmondható, hogy melegalakításra az *amorf* hőre lágyuló polimereket használjuk szívesebben, mivel ezek alakíthatósági hőmérséklettartománya szélesebb. Így pl:

Polimer neve	Melegalakítási hőmérséklettartománya °C
PS	95...135
ABS	100...150
PMMA	130...170
PC	150...210
PVC	90...150

**1. táblázat - Amorf polimerek melegalakítási hőmérséklettartományai**

(Vessük össze a következő 11.1 és a 11.2 ábrákat és a 46–47. oldalon a 3.2 és 3.3 ábrákat, amelyek a modulusz *logaritmusát*, és nem nyúlását, hanem a mechanikai veszteségi tényezőt ábrázolták.)



**11.1 ábra:** Amorf polimerek termomechanikai görbéje

A kristályos szerkezetű termoplasztok csak a meglehetősen szűk kristályosodási hőmérséklettartományban (11.2 ábra) alakíthatóak. A megjelölt hőmérséklet-tartomány felett az anyag megömlik, alatta pedig a

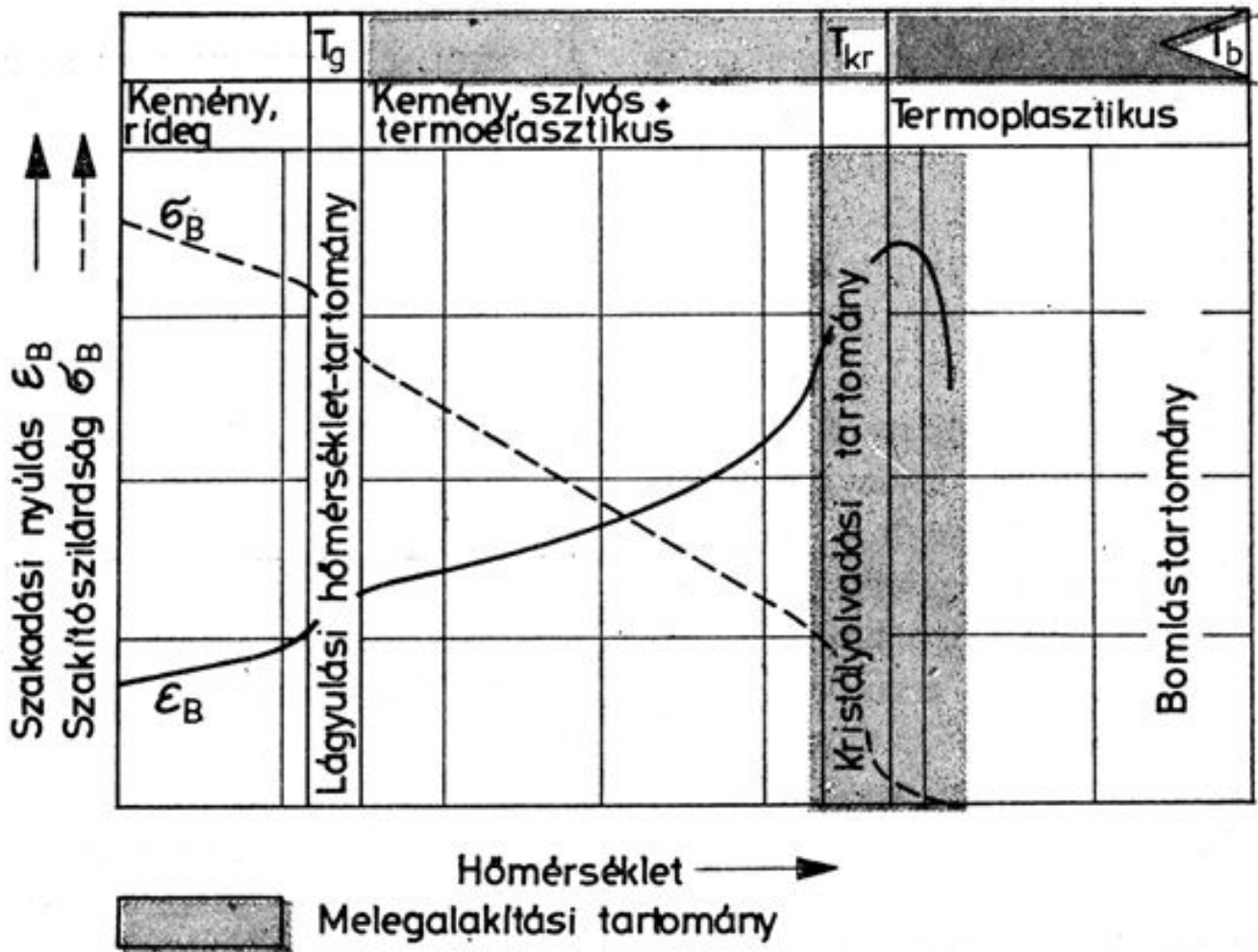
kristályos fázis gátolja az alakíthatóságot. Tájékoztatásul néhány jellegzetes értéket kristályos hőre lágyulókra a 11.2 táblázat tartalmaz.

<b>Polimer neve</b>	<b>Melegalakítási hőmérséklettartománya °C</b>
LDPE ( $\rho=0,92 \text{ g/cm}^3$ )	105...107
HDPE ( $\rho=0,96 \text{ g/cm}^3$ )	130...135
PP ( $\rho=0,90 \text{ g/cm}^3$ )	160...164
POM ( $\rho=1,41 \text{ g/cm}^3$ )	164...167

## **2. táblázat - Kristályos polimerek melegalakítási hőmérséklettartományai**

Ha ez utóbbi szűk hőmérséklettartományok mellett még azt is figyelembe vesszük, hogy ezt a hőfokot – néha több  $\text{m}^2$ -es – rossz hővezető képességű lemez teljes felületén, homogén-eloszlásban kell biztosítani, belátható a precíz hőmérsékletszabályozás fontossága.

A melegalakítás során – az alakítás mértékétől függően – orientálódik a termék. Az orientáció értelemszerűen nyújtásirányú, és ha a gyors hűtés következtében a szerkezet nem tud dezorientálódni, a gyártmányunk erősen anizotróp, repedésérzékeny lesz.



11.2 ábra: Kristályos polimerek termomechanikai görbéje

Attól függően, hogy a kilagyított lemezt túlnyomással, vákuummal, merev szerszámféllel vagy ezek kombinációival alakítjuk, nagyon sokféle melegalakítási eljárás ismeretes. Tekintettel arra, hogy a legelterjedtebb talán a vákuumformázás, ezt részletesebben ismertetjük, a többi módszert kicsit vázlatosabban.

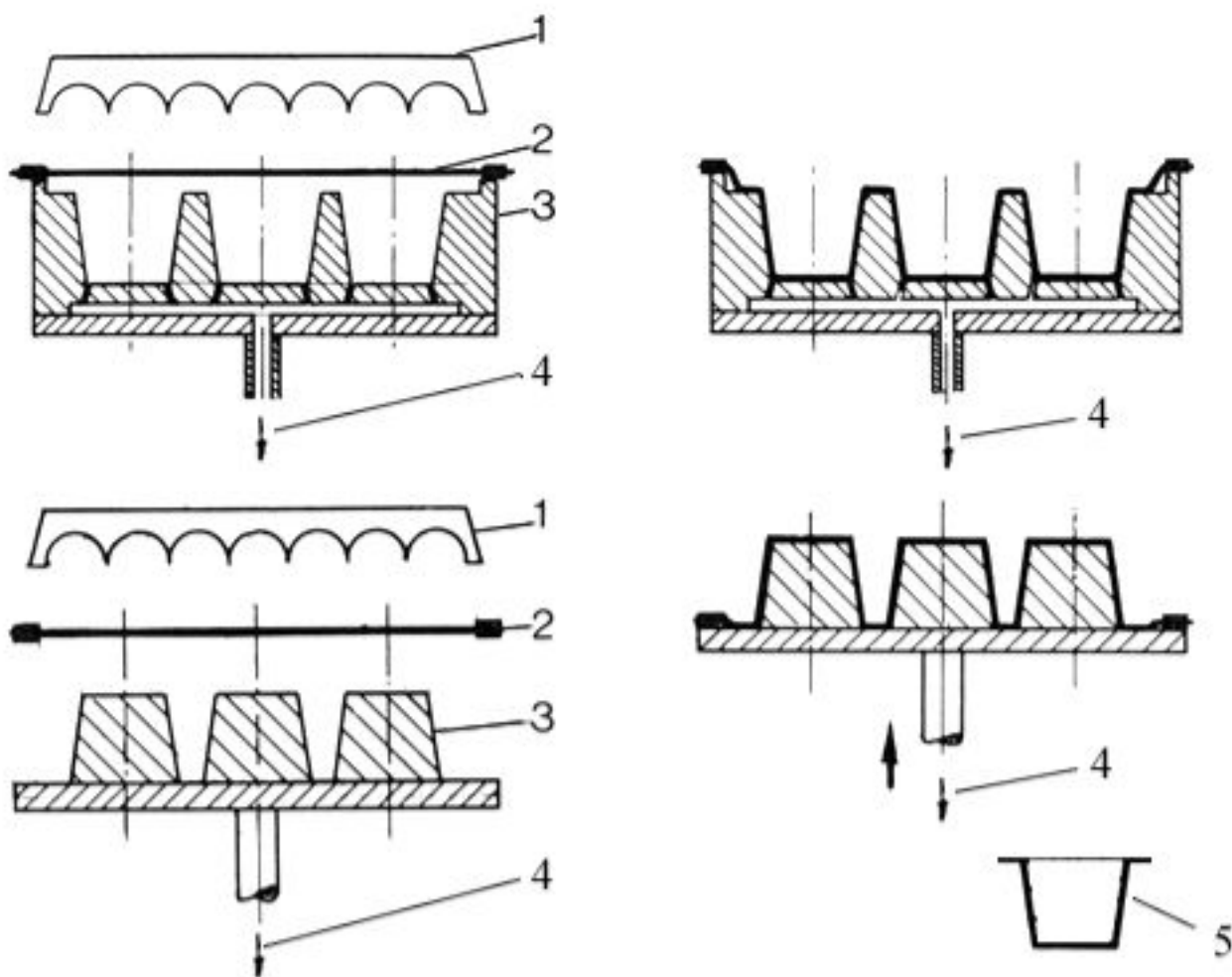
### 11.2 A vákuumformázás technológiája

Vákuumformázással általában nagyméretű, vékonyfalú termékeket állítanak elő. Alapelve szerint a formázandó meleg lemez és a szerszám között vákuumot létesítenek, és ez a max. 1 bar nyomáskülönbség alakítja a lágy polimert.

A szerszámkiakítástól függően negatív és pozitív vákuumformázást különböztetünk meg (11.3 ábra). Egy-egy termék elvileg mindkét szerszámmal előállítható, hogy mégis mikor melyiket alkalmazzák, annak eldöntésére ismertetünk néhány szempontot:

- A terméknek mindig a szerszámmal érintkező felülete a pontosabb, így a pozitív szerszámmal gyártottnak a belső, a negatívval előállítottnak pedig a külső mérete.
- Pozitív szerszámra a termék rázsugorodik, eltávolítása problémás, míg negatív szerszámból kizsugorodik, tehát könnyen eltávolítható.
- A pozitív szerszám előállítása egyszerűbb, mivel a külső felületeket kell megmunkálni, így a szerszám olcsóbb.

Ezek után a vákuumformázásos technikák néhány sajátosságát foglaljuk össze.



**11.3 ábra:**A negatív és a pozitív vákuumformázási eljárások összehasonlítása 1) fűtőelemek, 2) fólia, 3) szerszám, 4) vákuum, 5) végtermék

- a) *Melegítés.* Az előgyártmány megfelelő hőmérsékletre történő melegítése történhet az alakító gépen, melegítő kemencében vagy kontakt fűtőlemezek segítségével. Vákuumformázás esetén ez többnyire a gépen, infravörös hőszugárzókkal történik, mivel a nagyméretű, meleg, lágy lemez mozgatása problematikus. Sőt, azokat a polimereket, amelyeknek a melegalakítás hőmérsékletén

minimális a szilárdságuk (PE, PP), célszerű a melegítés alatt a formázógépen légpárnával alátámasztani.

Tekintettel arra, hogy a műanyagok rossz hővezetők, a felmelegítést csak viszonylag lassan lehet elvégezni. A túlzottan gyors melegítés a felületen károsodást (elszíneződést, hólyagképződést) okozhat, míg a lemez belseje még „hideg”. Vastagabb lemezek, igen jó hőszigetelő képességű habfóliák alakítására ajánlatos a kétoldali (alsó-felső) fűtés alkalmazása. Ezzel elkerülhető a megengedhetetlen hőmérsékletkülönbség a lemez két oldalán.

Még egyszer hangsúlyozzuk, hogy az alakítandó lemez hőmérsékletének a felület minden pontján azonosnak kell lennie! Ellenkező esetben egyenlőtlen lesz a hűléskor fellépő zsugorodás, aminek következtében megengedhetetlen vetemedések, elhúzódasok jönnek létre. A lemez homogén hőmérséklet-eloszlását az infravörös hőszugárzók különböző (középen kisebb, a szélső zónában nagyobb) teljesítményre állításával lehet biztosítani.

- b) *Előnyújtás.* A melegalakítási technológia lényegéből következik, hogy a vákuum bekapcsolása után a lágy lemez folyamatosan tölti ki a szerszámüreget, vagy feszül rá a pozitív szerszámra. Tekintettel arra, hogy a hideg (temperált) szerszámrészsel érintkező anyag a továbbiak során már nem nyúlik, az ilyen egyszerű esetekben jelentős, néha megengedhetetlen falvastagság különbségek lépnek fel. Ennek elkerülésére különböző előnyújtási módszereket dolgoztak ki (11.4 ábra). A 11.4/b ábrán nagyon jól látható, hogy miért kell az alakítandó lemezeknek egyenletes vastagságúaknak lenni. Az előfűtés fázisában ugyanis belső túlnyomással nyújtjuk a lemezt. Ha ennek falvastagsága különböző, a nyomás egyenletes terjedéséből következően a vékonyabb részben jobban nyúlik, extrém esetben kilyukad.

## 11.3 Egyéb melegalakítási eljárások

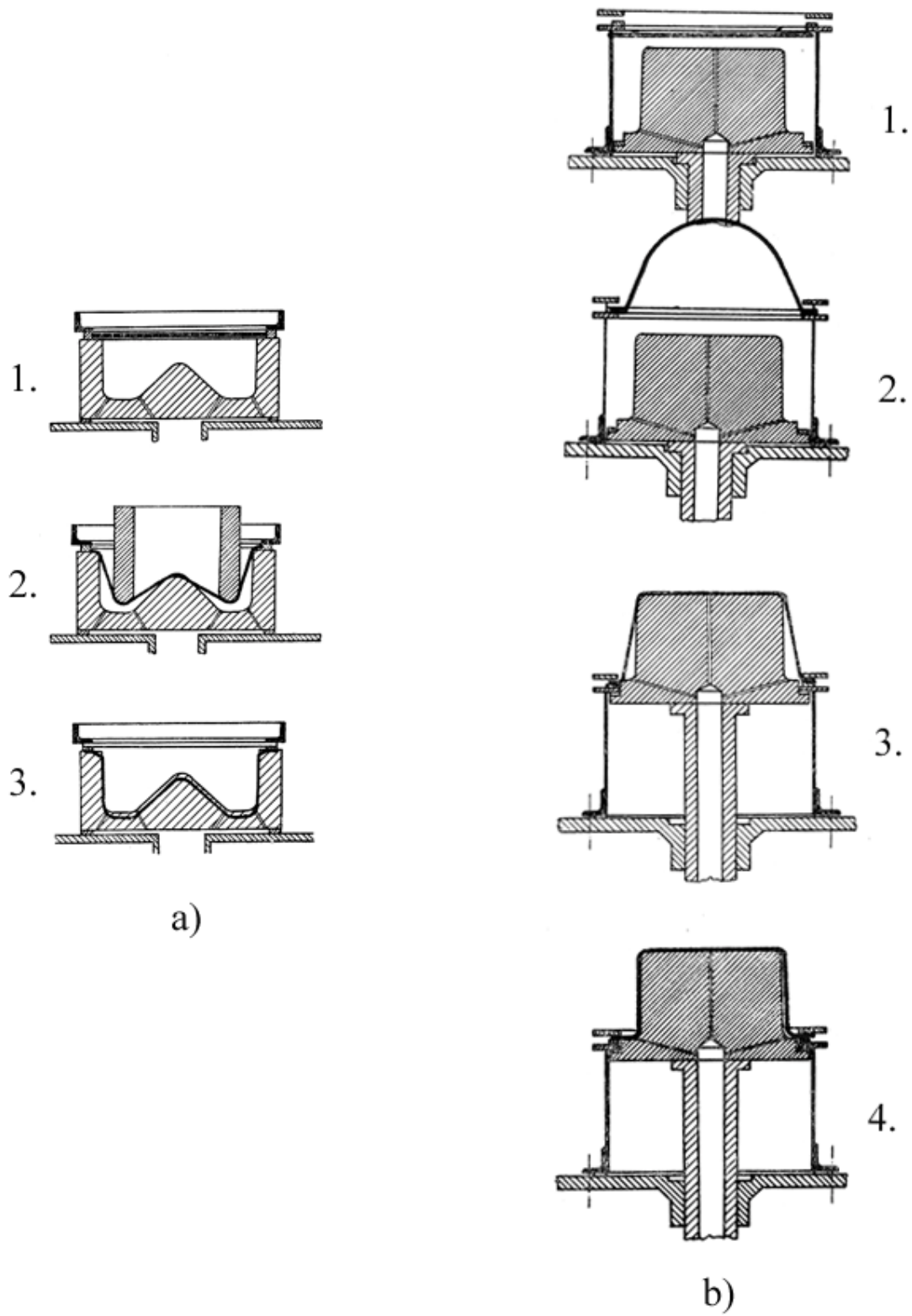
### Túlnyomásos hőformázás

A túlnyomásos (vagy préslég-) formázás elvét a 11.5 ábra szemlélteti. Elve megegyezik a vákuumformázással, azaz az alakítandó lemez egyik oldalán túlnyomást alakítunk ki, és ezzel kényszerítjük azt pl. a negatív szerszámba. A különbség az, hogy a túlnyomás nagyobb lehet 1 bar-nál, ezáltal nagyobb alakítóerőket lehet megvalósítani.

Az eljárás során az anyag felmelegítése és a légtömör zárás megvalósítása jelent nehézséget, hisz a lemezt melegítő infravörös hőszugárzó és a légtömör zárást is biztosító alakadó szerszám is az alakítandó lemez felett kell, hogy elhelyezkedjék. Mivel mindkettő nem lehet egyszerre ott, ezért a melegítő testet (kocsit) a felmelegítés után el kell onnan távolítani, ezután a szerszámot a lágy lemez fölé (lemezre) vezetni, létrehozni a légtömör zárást, és csak ezután hozható létre az alakadáshoz szükséges túlnyomás. Természetesen lehet a lemezt is mozgatni, a problémát azonban ez sem oldja meg.

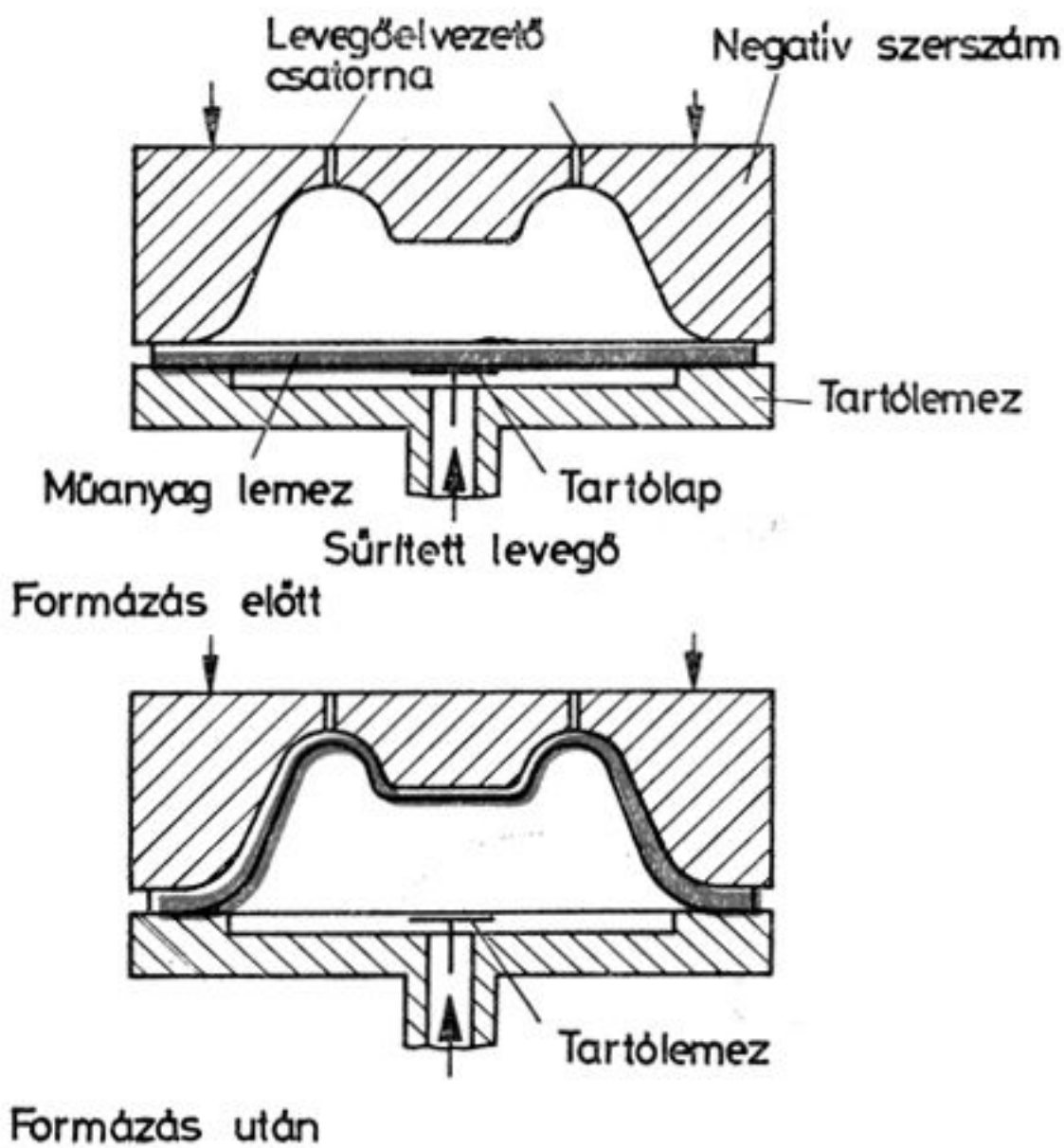
## Mélyhúzás

A húzóformázások során a felmelegített lemez leszorítására rugózó keretet (ráncfogót) használnak, aminek következtében alakításkor a lemez szélei el tudnak csúszni, ezáltal egyenletesebb falvastagságú termékeket lehet előállítani. A mélyhúzást sűrített levegővel vagy nyújtóbélyeggel végeztetik. A sűrített levegős mélyhúzásnál (11.6 ábra) a körben leszorított, kilágyított lemez alakítását sűrített levegő aláfúvásával oldják meg. Látható, hogy ezzel az eljárással csak egyszerű geometriájú termékek (pl. nagyméretű világítókupolák) gyárthatók. Hátránya a módszernek a gyártmányok rossz reprodukálhatósága, ezért viszonylag ritkán használják. Ezt a hátrányt azzal lehet kiküszöbölni, hogy a lemez fölé egy alakadó szerszámot helyeznek, de ez már a korábban megismert présleégformázáshoz vezet.

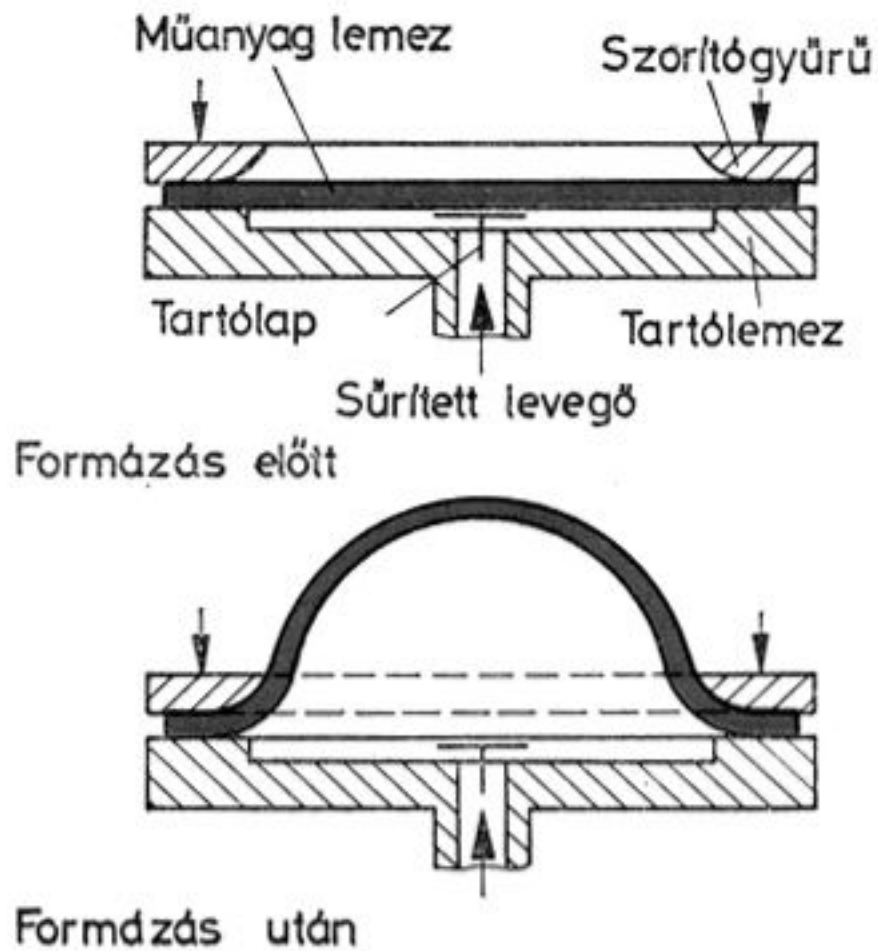


**11.4 ábra:**Előnyújtási lehetőségek a) 1. felmelegítés, 2. mechanikai előnyújtás, 3. vákuumformázás, b) 1. felmelegítés, 2. előnyújtás sűrített levegővel, 3. mechanikai nyújtás, 4. vákuumformázás



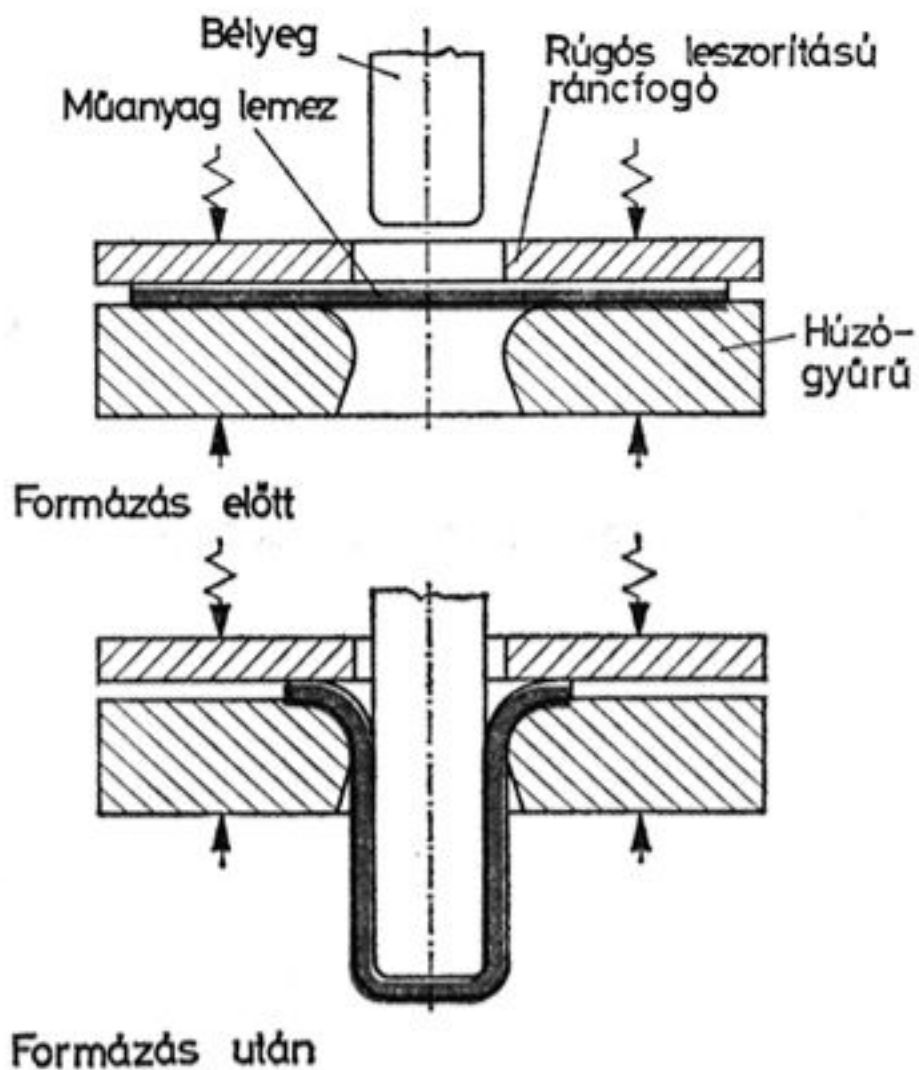


11.5 ábra: Túlnyomásos formázás [11.4]



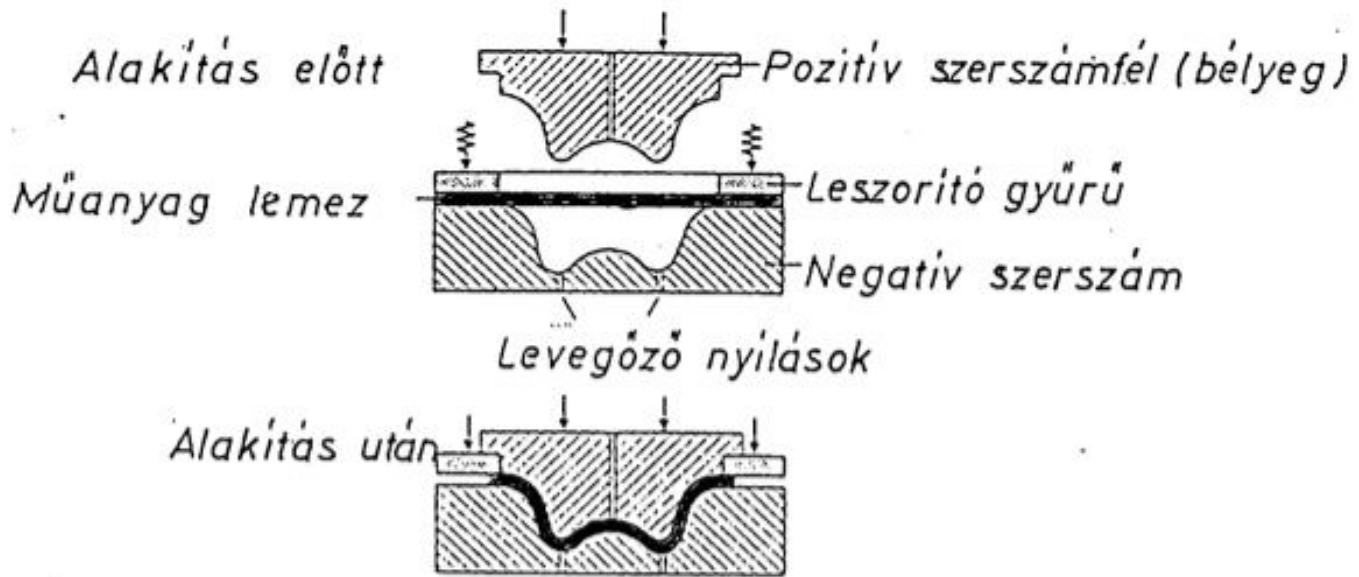
**11.6 ábra:**Mélyhúzás sűrített levegővel [11.4]

A bélyeggel történő mélyhúzáskor (11.7 ábra) a lágy lemezt a húzótüske alakítja a kívánt mértékig. A termék geometriája ebben az esetben is korlátozott.



11.7 ábra: Mélyhúzás bélyeggel

Az eddig ismertetett valamennyi eljárásnál fennállt annak a veszélye, hogy a késztermék falvastagságában nem kívánatos különbségek jönnek létre. Ennek az az oka, hogy az alakítás során a lemeznek max. csak az egyik oldala érintkezett merev alakadó szerszámmal, míg a másik oldalon levegő volt. Ezt a hátrányt azzal lehet kiküszöbölni, ha az alakításra kétoldali merev szerszámot használunk.



11.8 ábra: Mélyhúzás pozitív-negatív szerszámmal

A 11.8 ábrán vázolt módszer, melyet akár sajtolásnak is nevezhetünk, a szerszámköltség jelentős növekedésében is eltér a korábbi technikáktól.

## 11.4 Szakirodalom

Belofsky H., *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Rubin I. I., *Handbook of Plastic Materials and Technology*. John Wiley & Sons Inc., New York . 1990.  
 Progelhof R. C., Throne J. L., *Polymer Engineering Principles*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1993.  
 Schwarz O., Ebeling F.W., Lüpke G., *Kunststoffverarbeitung*. Vogel Buchverl., Würzburg . 1991.  
 Michaeli W., *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. Hanser. München . 1992.

## POLIMER ILLESZTÉS-, HEGESZTÉS- ÉS RAGASZTÁSTECHNIKÁK

### Tartalom

#### [12.1 Polimerkötések mechanikai kötőelemekkel](#)

##### [12.1.1 Menetmetsző csavaros kötések](#)

##### [12.1.2 Bepattanó kötések](#)

#### [12.2 Polimer alkatrészek hegesztése](#)

##### [12.2.1 A hegedés folyamata](#)

##### [12.2.2 A hegeszthetőség feltételei](#)

##### [12.2.3 Hegesztő eljárások](#)

#### [12.3 A ragasztástechnika alapjai](#)

##### [12.3.1 A ragasztás elméleti alapjai](#)

##### [12.3.2 Nedvesítés és adhézió](#)

##### [12.3.3 Ragasztók csoportosítása](#)

##### [12.3.3 A ragasztás technológiája](#)

#### [12.4 Szakirodalom](#)

Hasonlóan a fémalkatrészek szerelési technológiájának szerepéhez, a műanyag alkatrészek illesztésének, kötésének szilárdsága megbízhatósága, a szerelés technológiája és gazdaságossága nagymértékben

meghatározza az adott termék funkcionális és piaci értékét. A polimerből készült alkatrészek vitathatatlan előnyét sokszor éppen a termelékeny és mégis kifogástalan *szerelestechnika* biztosítja.

Napjainkban nagyszámú polimer típus áll a gyártók rendelkezésére, így könnyen belátható, hogy a termékekben gyakran kell összeilleszteni *azonos*, vagy *különböző* anyagú polimer alkatrészeket. Egy sor termékben a hőre lágyuló polimer részeken kívül még fémeket, fát, hőre nem lágyuló polimerből készített részeket és egyéb anyagokat is találunk. Bizonyos területeken a kötéseknek igen szigorú minőségi követelményeket kell kielégíteniük – gondoljunk csak a gépkocsik fékbetétjére, ahol a betét és a fém alkatrész közötti kötés jóságán emberek élete múlhat.

A kötéseket funkciójuk alapján a polimerek esetén is két nagy csoportba sorolhatjuk: az **oldható** és a **nem oldható** kötésekre. Az első csoportba tartoznak a különböző *csavarkötések*, és a polimereknél egyre gyakrabban alkalmazott *bepattanó kötések* (ezeket *mechanikai kötőelemeknek* is nevezhetjük), míg a nem oldható kötések csoportjába a *hegesztés* és a *ragasztás* tartozik. (Természetesen mechanikai kötőelemekkel nem oldható kötés is készíthető – pl. szegecseles.)

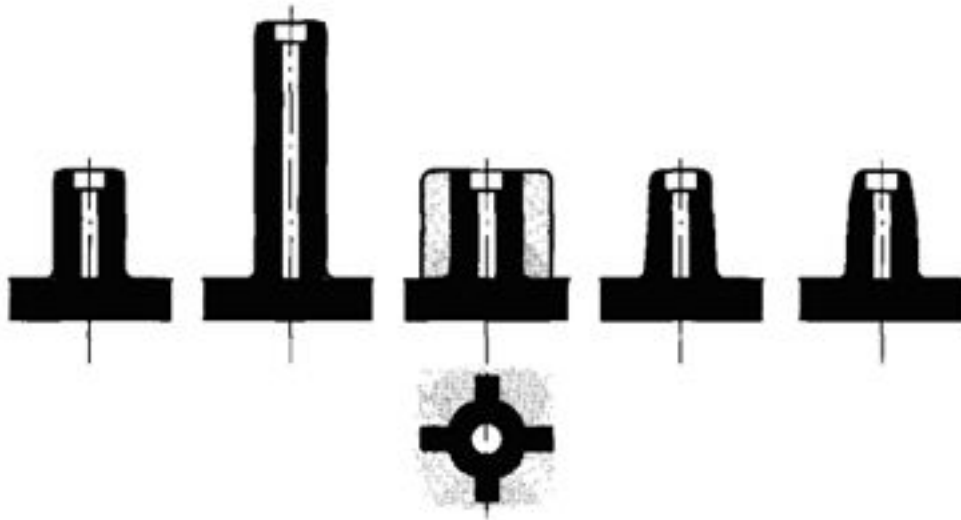
## **12.1 Polimerkötések mechanikai kötőelemekkel**

### **12.1.1 Menetmetsző csavaros kötések**

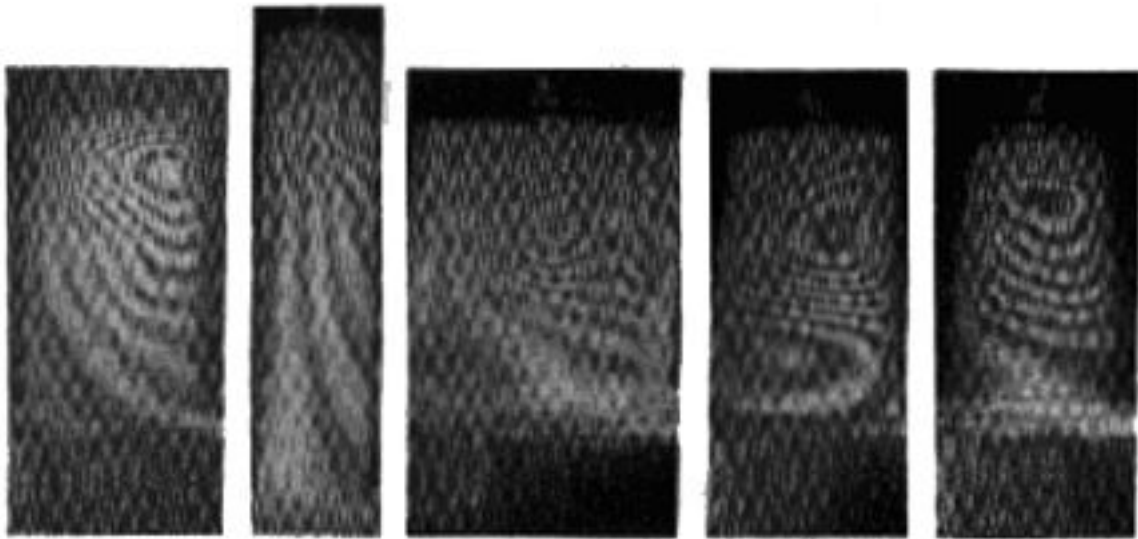
A hagyományos átmenő csavarkötéseknek (fém csavar és fémből készült csavaranya) a polimerek esetében csekély jelentőségük van. Az ilyen hagyományos kötések fő előnyét, a nagy és egyenletes feszültséget a polimerek kúszási és relaxációs tulajdonságai miatt nem lehetne kihasználni, ugyanakkor a kötés kialakítása meglehetősen munkaigényes.

Kis terhelésnek kitett polimer alkatrészeket gyakran erősítenek össze menetmetsző (fém) csavarokkal, és ez az eljárás napjainkban egyre jobban terjed a nagyobb terhelésnek kitett alkatrészek esetén is. A kötés szilárdságának biztosításában nagy szerepe van a csavar geometriáján és a polimer anyag mechanikai tulajdonságain túlmenően a csavart befogadó „szem”, vagy tubus kialakításának is. Néhány hőre lágyuló polimereknél (ABS, kPVC, POM...) használatos tubus-formát láthatunk a 12.1 ábrán.

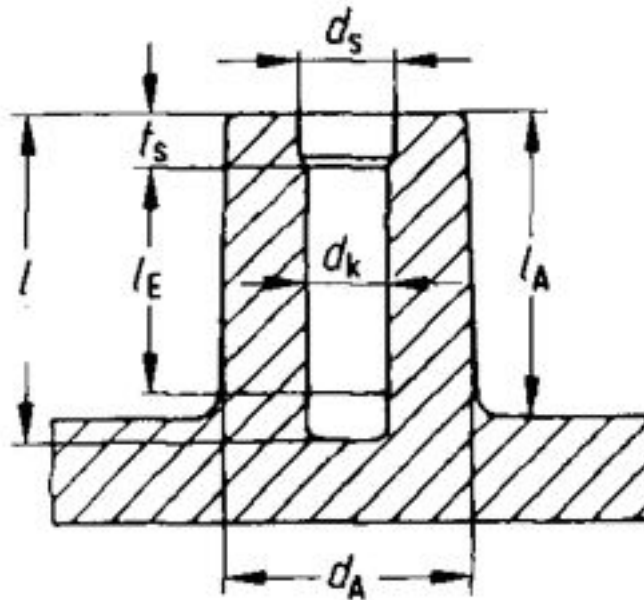
A 12.1. ábrán bemutatott tubusok feszültségeloszlását feszültségoptikai módszerrel vizsgálták, 12.2. ábra. A feszültségoptikai felvételeken az egyenletesen váltakozó sötét/világos sávok egyenletes deformációt, illetve igénybevételt jelentenek, míg egy erősebb deformáció a sávok szabálytalan lefutását eredményezi. Az egyes tubus-formák feszültségeloszlása a 12.2. ábra alapján a következő:



**12.1 ábra:** Tubus-formák hőre lágyuló polimerekhez [12.3] Balról jobbra: hengeres (enyhén kúpos), hosszú, bordázott, hengeres/kúpos és parabola-alakú



**12.2 ábra:** Az 12.1. ábrán látható tubus-formák feszültségeloszlása feszültségoptikai módszerrel mérve [12.3] Balról jobbra: hengeres (enyhén kúpos), hosszú, bordázott, hengeres/kúpos és parabola-alakú



12.3 ábra: Tubus méreteinek jelölése [12.1]

- *Hengeres forma:* A felső részén feszültségmentesítő furattal (12.3. ábra,  $d_s$ ) ellátott tubusnak csak a felső harmadában található kifejezett kihasasodásra utaló interferencia jel. A kismértékben torzult sávok kis igénybevételre utalnak.
- *Hosszú tubus:* Feszültségmentesítő furat nélküli tubusnál a kihasasodás a tubus felső részén figyelhető meg. A tubus alsó része torzióra van igénybevéve. A tubus felső részének igénybevétele feszültségmentesítő furattal, a torziós igénybevétel bordák kialakításával csökkenthető.
- *Bordázott kialakítás:* Feszültségmentesítő furat nélküli tubusnál a kihasasodás a tubus felső részén figyelhető meg. A tubus alsó része torzióra van igénybevéve. A tubus felső részének igénybevétele feszültségmentesítő furattal, a torziós igénybevétel bordák kialakításával csökkenthető.
- *Hengeres/kúpos forma:* Jól láthatóan két jelentős igénybevételi zóna alakul ki. A felső, vékonyabb hengeres tubusrészben erőteljesebb az igénybevétel és a kihasasodás, mint a nagyobb falvastagságú alsó behúzó részben.
- *Parabola alak:* A parabola alakú kialakítás jelentősen csökkenti az alsó behúzó zóna terhelését, ugyanakkor a kis falvastagságú felső zóna túlterheltté válik. A felső részben az interferenciavonalak sűrű lefutásából arra lehet következtetni, hogy a tehermentesítő furat ellenére a csavarfej alatt jelentős deformációnak van kitéve a tubus.

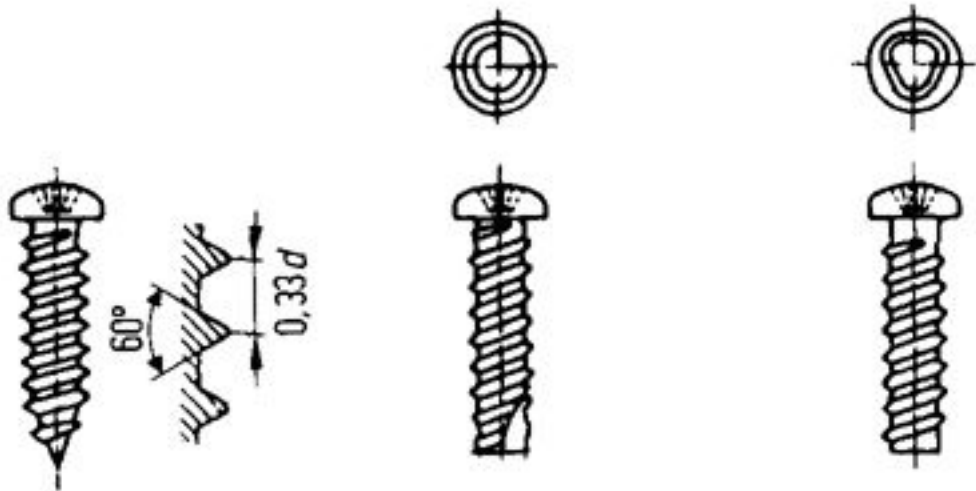
A következő három ábrán (12.4, 12.5 és 12.6 ábrák) néhány, hőre lágyuló polimerekhez, illetve duromerekhez kifejlesztett csavarkialakítást mutatunk be. Az optimális csavarkialakításnak a következő feltételeket kell teljesítenie:

- a tubus kismértékű radiális deformációja,
- kis behajtási nyomaték, nagy túlhúzási nyomaték,
- nagy menetszárnnyfedés,
- kis toleranciatartomány.

A polimer alkatrészek összeerősítésére gyakran használt lemezcsavarok (12.4 ábra) nem elégítik ki maradéktalanul ezeket a feltételeket. A fához, illetve polimerhez kifejlesztett csavar-típusok (12.5 ábra) használata kedvezőbb. A vágóélel ellátott lemezcsavar (12.4 ábra, középen) megkönnyíti a csavar behajtását, de nem biztosítja a szabványok által előírt legalább 10-szeri újra-behajtás követelményét, ezért inkább a repedésérzékeny termoplasztokhoz, vagy duromerekhez ajánlott.

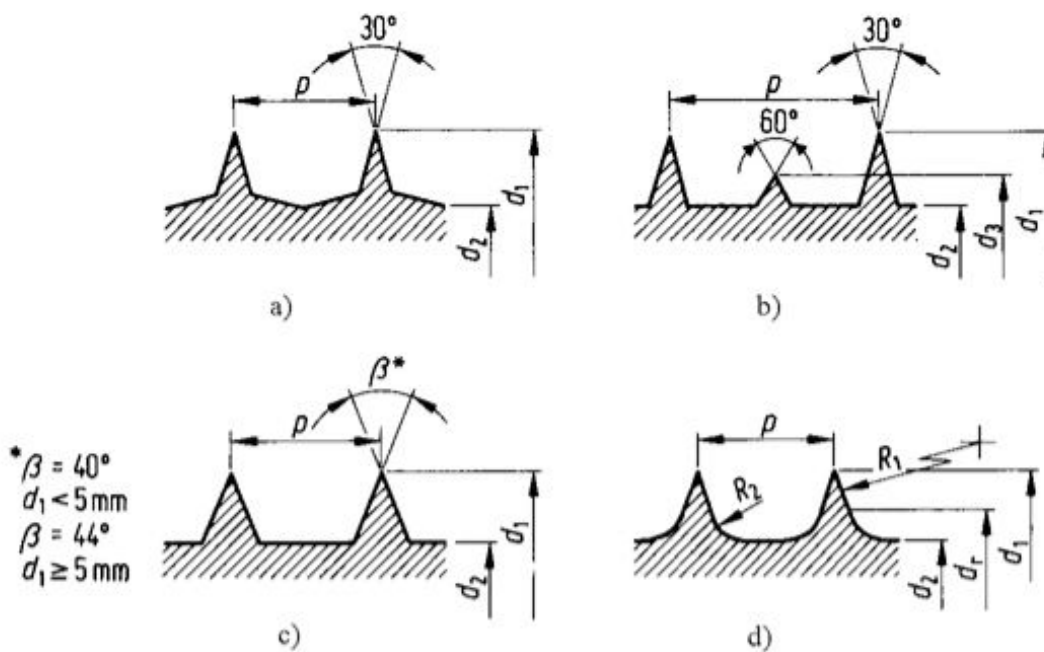
Kis csavarszárnny-szögek csökkentik a szükséges becsavarási nyomatékot és a radiális terhelést is, így a tubus átmérője és falvastagsága alacsony értéken tartható.

A csavar kenése csökkenti a becsavaráshoz szükséges nyomatékot, ugyanakkor csökkenti az önzárási képességet is. (Önzárásról beszélünk, amikor a csavarra ható tengelyirányú erő nem hoz létre forgatónyomatékot. Ez az eset áll fenn, ha a csavarszárnny menetemelkedési szöge kisebb a súrlódási szögnél.) A 12.4 ábra jobb szélén látható, nem kör keresztmetszetű csavargeometria alkalmazásával az önzáró-képesség javítható.



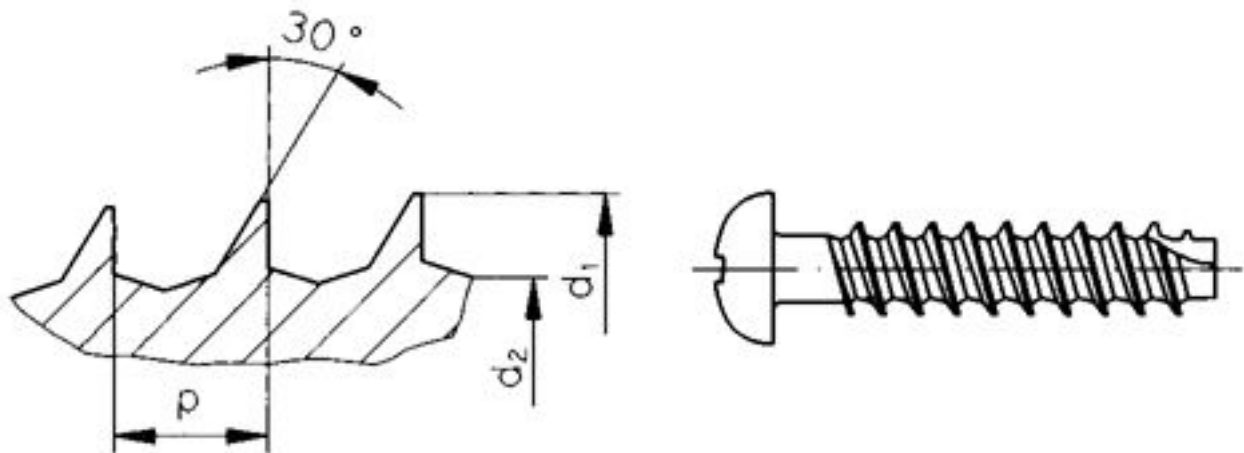
**12.4 ábra:**Lemezcsavarok [12.1] Balról jobbra: egyszerű lemezcsavar, vágóélel ellátott lemezcsavar, nem kör keresztmetszetű lemezcsavar



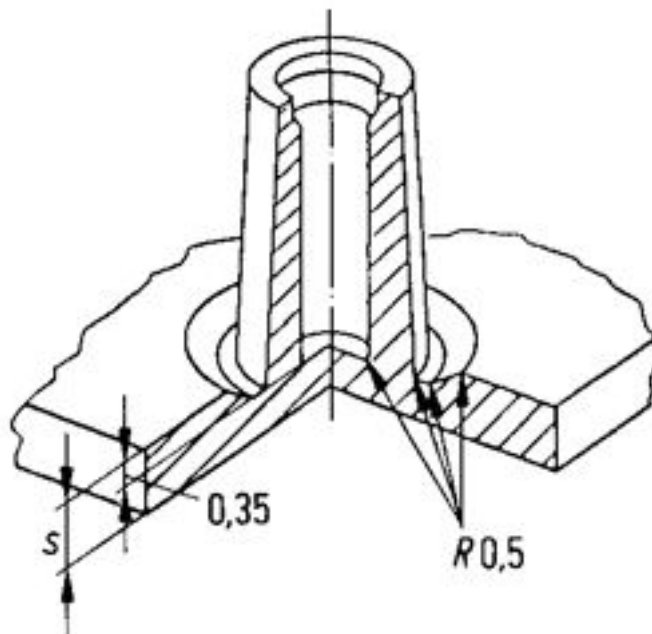


**12.5 ábra:**Hőre lágyuló polimereknél használatos menetkialakítások [12.1] a) 30 °-os menetszárnyú csavar, b) kétbekezdésű csavar, c) feszítőlemez csavar, d) csavar polimerekhez

A tubus és a polimer alkatrész találkozásánál szükségszerűen megnő a falvastagság, amely a fröccsöntés során vetemedéshez, beszívódásokhoz, üregek (*lunkerek*) kialakulásához vezethet. Ezért a tubus üregét úgy alakítják ki, hogy az az alkatrész falvastagságának kb. 1/3-áig behatoljon az alapba ( $l-l_e$  a 12.3 ábrán). Másik megoldás szerint a tubus talpánál alakítanak ki gyűrű-szerű kikönyvitést, 12.7 ábra. Ez utóbbi megoldás jelentősen növelheti a szerszámköltséget.



**12.6 ábra:**Duromereknél használatos aszimmetrikus menetprofilú csavar [12.1]



**12.7 ábra:** Tubus megnövelt üreg-hosszúsággal, és a tubus talpa körüli gyűrű-szerű kikönnnyítéssel [12.1]

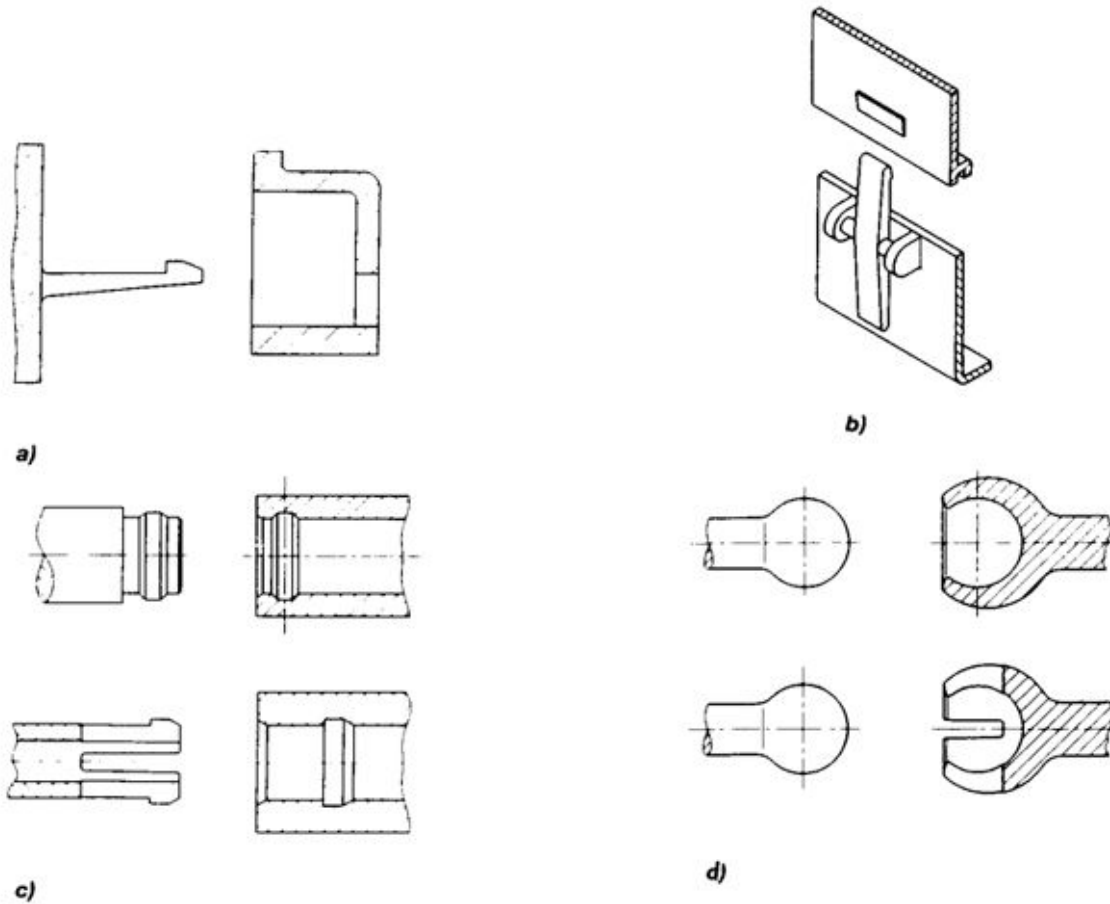
A menetmetsző csavaros kötések méretezésének megkönnyítésére egyes polimergyártók PC-n futtatható programokat bocsátanak a felhasználók rendelkezésére (ilyen pl. a BASF gyár SCREWS programja). Ezek a programok a számítási képleteken túl a gyár polimer alapanyagainak a tervezéshez szükséges adatait is tartalmazzák. A csavar geometriai adatai és az alkalmazási hőmérséklet ismeretében a program meghatározza az optimális tubus-paramétereket (belső átmérő, falvastagság, stb.)

### 12.1.2 Bepattanó kötések

A bepattanó kötések olcsóságuk miatt szívesen alkalmazzák a hőre lágyuló polimerekből készült alkatrészek összeerősítésére. Néhány tipikus bepattanó kötést a 12.8. ábrán mutatunk be.

A fröccsszerszám előállítás ideje és költségei szempontjából előnyösebbek a kör keresztmetszetű elemek, amelyeket fúrással és köszörüléssel lehet megmunkálni. A négyszög keresztmetszetű horgokat csak a lényegesen lassabb szikraforgácsolással, illetve marással lehet előállítani. A kör és a négyszög keresztmetszet előállításának időaránya kb. 1:4.

A bepattanó kötések méretezésénél nagy gondot kell fordítani a feszültséggyűjtő helyek elkerülésére. A legnagyobb igénybevétel általában a bepattanó kötés horga, illetve egyéb formájú eleme, és az alkatrész találkozásánál lép fel. Itt a nagyobb szerszámköltségek ellenére is mindig megfelelő lekerekítési sugarat kell alkalmazni.



**12.8 ábra:** Bepattanó kötések alaptípusai [12.3] a) bepattanó horog (hajlításra igénybevett tartó), b) torziós bepattanó kötés, c) hengeres bepattanó kötés, d) gömb-kialakítású bepattanó kötés

A bepattanó kötések méretezésének megkönnyítésére egyes polimergyártók PC-n futtatható programokat bocsátanak a felhasználók rendelkezésére (ilyen pl. a BASF gyár SNAPS programja). Ezek a programok a számítási képleteken túl a gyár polimer alapanyagainak a tervezéshez szükséges adatait is tartalmazzák.

## 12.2 Polimer alkatrészek hegesztése

A szintetikus polimerek nagyobb családja: a hőrelágyuló műanyagok hegesztése során – ugyanúgy mint a *fémek* esetén a képlékeny, ill. megömlesztett állapotba hozott szerkezeti anyagot megfelelő hőmérsékleten, megfelelő nyomással, rövid, de megfelelő ideig kapcsolatba hozva – ugyanabból az anyagból készült másik alkatrésszel jól **köthetjük**. A kötés tehát *fizikai úton*: hőközléssel és *képlékeny alakítással* jön létre. Maga a kötés a polimer láncok, – de legalább láncszegmensek – az eredeti határfelületen túl érvényesülő *diffúziójával* jön létre. A hegesztendő hőrelágyuló polimer tehát megfelelő mértékben folyékony (megfelelő viszkozitású) ömledéket kell, hogy képezzen.

Elasztomerek, duromerek (térhálós polimerek) értelemszerűen nem hegeszthetők. Különböző anyagú hőrelágyulók összehegesztését – pl. PS és PE – a polimerek keverhetőségének *termodinamikai korlátai* szabályozzák.

Hőkonvekciós eljárások (hővezetés, hőáramlás)			Sugárzásos eljárások		Közvetlen melegítés				
A varrat helyének közvetlen melegítése		A varrat helyének közvetett melegítése	Elektromágneses energia elnyelése		Mechanikai energia		Elektromos energia		
Hőközlés gáznemű anyaggal (meleg levegő, meleg inert gáz)	Hőközlés folyékony anyaggal	Hőközlés szilárd testtel (többnyire fémmel)	Hőközlés szilárd testtel, tartós melegítés	Hőközlés szilárd testtel, rövid idejű melegítés	Melegítés nem koherens sugárzással	Melegítés koherens sugárzással	Melegítés sűrűdással	Melegítés nyomás-változással	Poláros molekulák <u>dielektromos melegítése</u>
Meleg (forró) levegős hegesztés, láng-hegesztés	Extrúziós hegesztés	Fűtött ékes (folyamatos), hőtükros, fűtődrót-betétes hegesztési eljárások	Tartósan melegített fűtőszalagok, huzalok, fűtőlapok	Hőimpulzus fűtőszalagok és lapok	Infravörös hegesztés	Lézeres hegesztés	Dörzshegesztések (forgató-, kúp- és rezgő)	Hang és ultrahang hegesztés	Nagyfrekvenciás (NF) hegesztés

**12.9 ábra:** Polimerek hegesztési eljárásai [12.5]

A 12.9 ábrán a hőrelágyuló polimerek hegesztési eljárásait foglaltuk össze, az *energiaátadás (hőközlés) módja* szerinti csoportosításban.

### 12.2.1 A hegedés folyamata

A tökéletes hegedésnél az egyes anyag-részek határfelületei eltűnnek, és a hegedésnél levő anyag összetétele és fizikai állapota megegyezik a határfelülettől távolabbi részek összetételével és fizikai állapotával. Ez az ideális hegedés csak akkor jöhet létre, ha a hegedő felületek anyagai kémiai és fizikai tulajdonságaikat tekintve is teljesen azonosak.

A hegedés folyamatából következik, hogy létrejöttéhez szabad részecskemozgás (vagyis folyékony halmazállapot) szükséges. Fémek hegesztésénél az olvadék kis viszkozitású, így a részecskék mozgása (diffúziója) gyors és kötetlen, ezért a hegedés gyorsan és tökéletesen végbemegy. A hőre lágyuló polimerek „részecskéi” igen nagyok (makromolekulák), és leginkább egy fonalgombolyaghoz, vagy vattacsomóhoz hasonlítanak. A polimer felületek összehegedéséhez szükséges feltételeket a fémekhez viszonyítva sokkal nehezebb létrehozni.

A polimerek hegedésénél a megolvasztott felületeken levő makromolekulák, illetve azok szegmensai és láncvégei „kaszakodnak”, nemezelődnek egymásba. A hegedés annál tökéletesebb, minél sűrűbben és

mélyebben hatolnak egymás anyagába ezek a szabad láncvégek és szegmensek, valamint minél szélesebbé és szerkezetileg az összehegesztendő anyagokhoz minél hasonlóbbá válik a hegedési zóna.

### 12.2.2 A hegeszthetőség feltételei

Polimerek esetén öt *technológiai paraméter optimumát* kell biztosítani a jó hegedés létrejöttéhez:

- *összeférhető* anyagok
- *a megfelelő reológiai állapotot* biztosító hőmérséklet (a rugalmas és viszkózus tulajdonságok optimuma)
- a hegesztendő felületek molekuláris közelségét és a folyamat optimális lefutását biztosító *nyomás*
- az előző két feltétel (2 és 3) hatásának optimális *időtartama*
- a hegesztett kötés lehűtése a kezelhetőségi állapot eléréséig.
- A polimerek hegesztésénél általában azonos anyagokat hegesztünk össze, bár a többrétegű csomagolófóliák elterjedésével előtérbe kerültek olyan rendszerek is, ahol az egyes komponensek nem azonosak, csak hasonlóak. A „hasonlóság” azt jelenti, hogy azonos kémiai szerkezet mellett a molekulatömeg, a molekulatömeg-eloszlás, az orientáció, a segédanyagok típusa és/vagy mennyisége, illetve az alkatrészek felületeinek állapota (pl. a koronakisüléssel kezelt felület polárosabb) eltérő.

Eltérő kémiai szerkezet esetén is lehet hasonlóság, összeférhetőség, amennyiben az anyagok ömledékei (termodinamikai értelemben) egymással korlátlanul elegyednek.

- Az optimális reológiai állapot létrehozásához szükséges hőmérséklet fontos technológiai paraméter. A felmelegítési folyamat a hegesztés legbonyolultabb és legkényesebb része. A polimerek viszkoelasztikus anyagok, ezért ömledék állapotban is rendelkeznek rugalmassággal. Ez elősegíti a felületeket összeszorító nyomás kialakulását. A kissűrűségű polietilén pl. még kellően nagy ömledék rugalmasságnál megolvad.
- Polimereknél nem lehet olyan sima, nagy merevségű hegesztendő felületeket előállítani, mint fémeknél. Ennek oka a polimer felületek nagy flexibilitása, egyenetlensége, és a nagy hődilatáció. A nyomást a hegesztési folyamat során néha bonyolult program szerint vezérlik, hogy a melegeedés, a hegedés és a lehűlés alatt fellépő dilatációs, deformációs változásokhoz optimálisan illeszkedjen.
- A termelékenység legfontosabb technológiai paramétere a hegesztés időtartama. A nagy sebességű eljárások megvalósításához alapfeltétel a rendkívüli pontosság biztosítása, valamint az egymást követő folyamatok minél nagyobb mértékű „átlapolása”. Ez a gyakorlatban az egyes műveletek megkezdésének és befejezésének olyan időzítését jelenti, amelyben a felmelegedés, lehűlés,

illetve a mechanikai mozgások egymást idővesztés nélkül tudják követni. A technológiai műveletek célszerűen automatizáltak, és folyamatos kontroll alatt állnak.

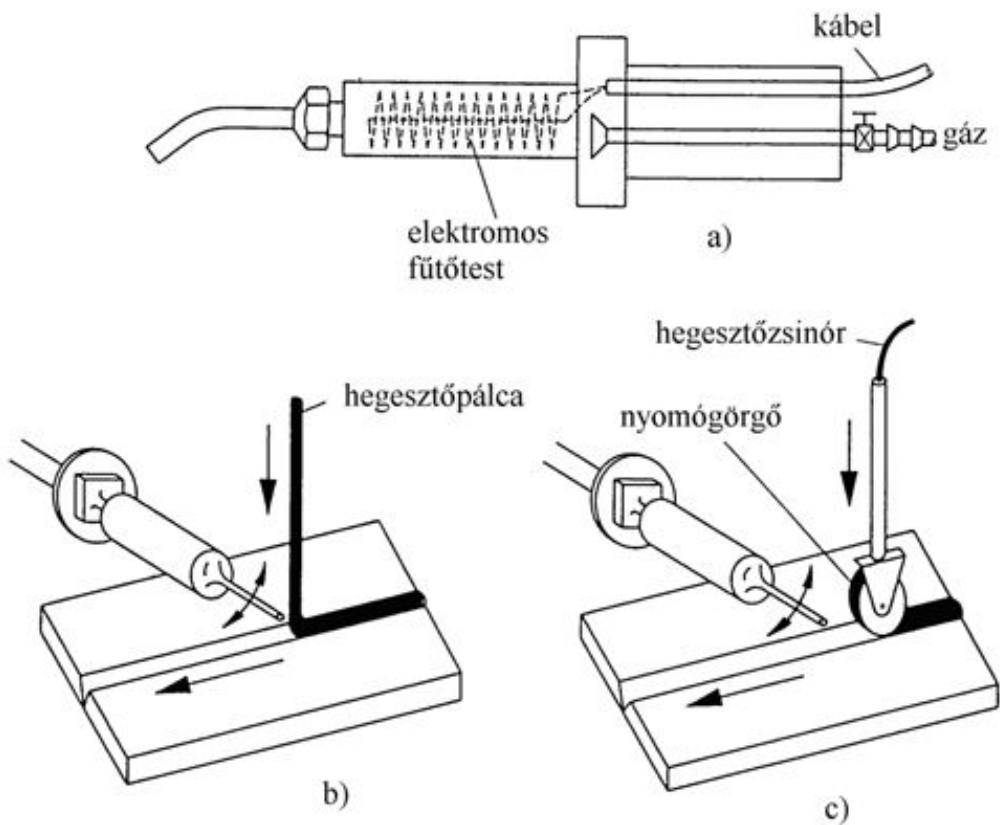
- Egyes hőközlési módok igen gyors (néhány század másodperc) felmelegítést tesznek lehetővé (pl. NF), a lehűtést, a hő elvezetését azonban a hegesztési konstrukció szerkezeti feltételei határozzák meg, függetlenül a hőközlés módjától. Kezelhetőségi állapot alatt a hegesztett kötés olyan hőmérsékletre való lehűlését értjük, ahol már károsodás nélkül „elviseli” a hegesztést követő technológiai műveletek igénybevételét.

Nagyobb hegedési zóna esetén a hegesztést és a lehűtés folyamatát szétválasztják, külön műveleti helyen végzik el. A lehűlési szakaszban nagy szerepe van a programozott nyomásnak. A nyomás szabályozásával tudjuk kompenzálni a hegesztett kötésben a hűlés során lejátszódó zsugorodási és utódeformációs (retardációs), valamint a feszültség csökkenési (relaxációs) folyamatok hatását.

### **12.2.3 Hegesztő eljárások**

#### **12.2.3.1 Hegesztés forró gázzal**

A polimerek klasszikus hegesztési módszereinek egyike, amely a pálcás fémhegesztéshez hasonlít a leginkább (12.10 ábra). Elsősorban vastagfalú, nagyméretű alkatrészek (tartály-bélések, idomdarabok, csövek) összehegesztésére használják. A fémekkel ellentétben a polimerek pálcás hegesztésénél a hegesztendő felületeknek csak a külső rétegei olvadnak meg; és a pálca anyaga sem egyezik meg a hegesztendő darabokéval. Ennek oka, hogy a forró levegő ráfúvatása során a pálca anyaga jobban felhevül, nagyobb a termikus károsodás (degradáció) veszélye.



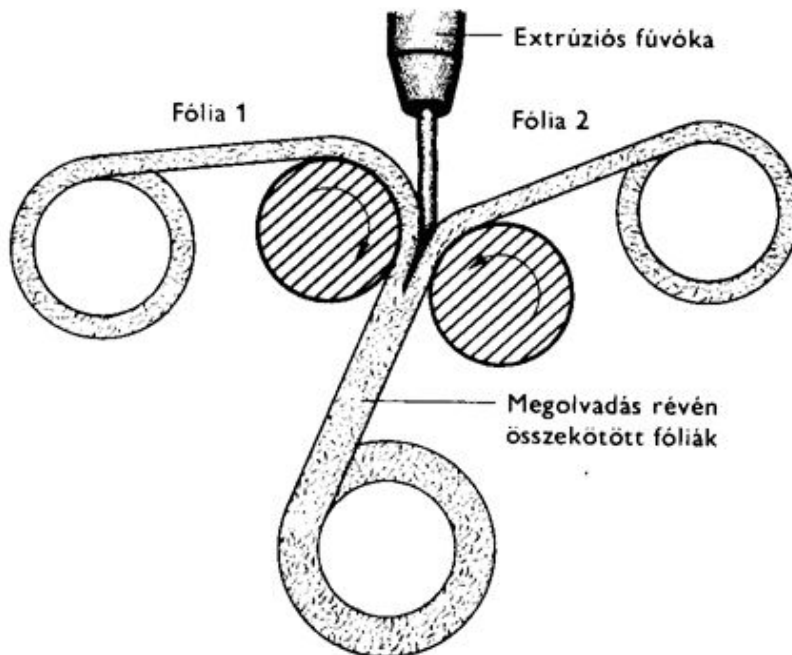
**12.10 ábra:** Forrógáz-as-pálcás hegesztés [12.5] a) hegesztőkészülék, b) kemény és c) lágy polimer hegesztése

### 12.2.3.2 Hegesztés forró ömledékkal, extrúziós hegesztés

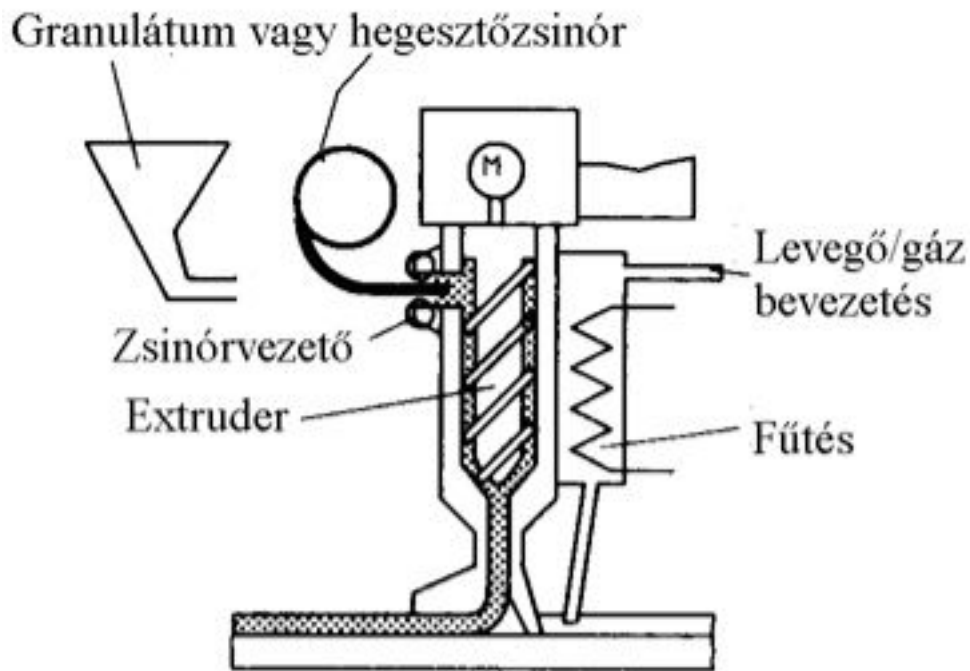
Folyékony anyaggal való hegesztésre azonos összetételű polimer (ömledék) használható, amely a kihűlés után a hegesztési területen marad, és folyamatos kötést biztosít. *(Csak hőközlésre* folyadékokat – a gázokkal ellentétben – nem szoktak alkalmazni.) Az extrúziós hegesztésnél (szemben a melegragasztással, „hot-melt”) a hegesztendő darabok felülete is meglágyul. Vékony termékeknel elég lehet az extrudátum hőtartalma a darabok kellő hőmérsékletre való melegítésére; vastag falú termékeknel járulékos fűtés (legtöbbször forró levegő) is szükséges. A 12.11 ábrán fóliák extrúziós hegesztésének vázlata, míg a 12.12 ábrán kézi extruderer hegesztőberendezés vázlata látható.

### 12.2.3.3 Fűtőelemes hegesztés közvetlen melegítéssel

A hegesztési hely közvetlen melegítését szilárd testekkel, legtöbbször fém betétekkel, ékekkel, bordákkal oldják meg. A legegyszerűbb fűtőelemes hegesztőberendezés a szabályozható hőmérsékletű páka. Minden kézi vezérlésű hegesztőberendezés közös hátránya az egyenetlen hőleadás, illetve a nem szabályozható hegesztési nyomás. Ezt a hátrányt küszöbölik ki az állandó továbbítási sebességű hegesztőberendezések, mint pl. a 12.13 ábrán látható fűtőékes fóliahegesztő.



12.11 ábra: Fóliák extrúziós hegesztésének elve [12.5]



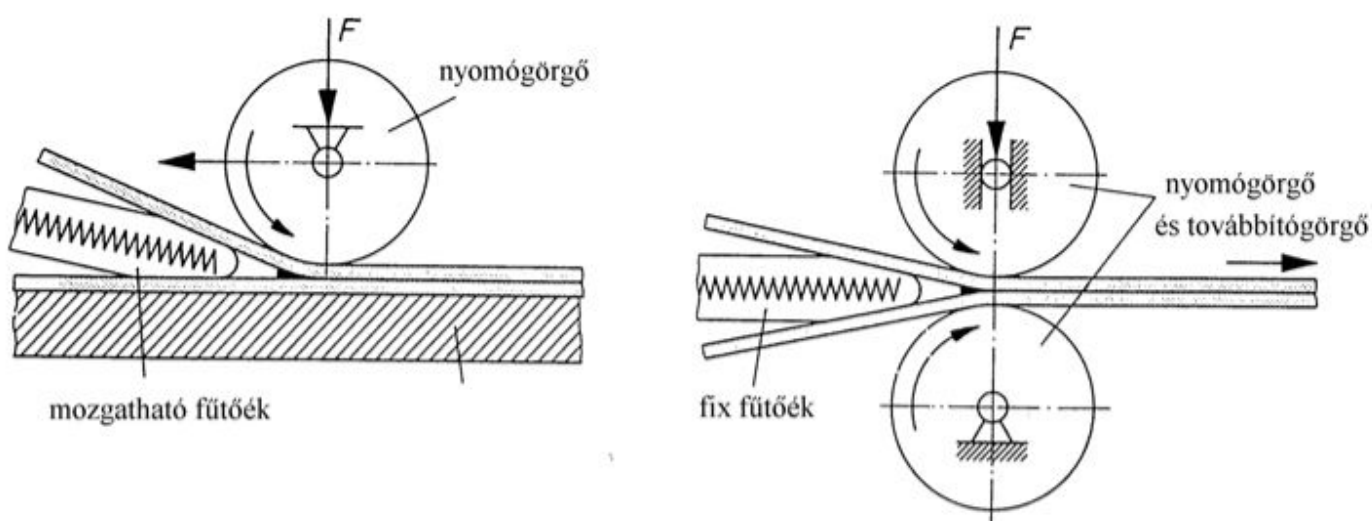
12.12 ábra: Extrúziós kézi hegesztőberendezés elve [12.5]

Vastagfalú csővezetékek (gázcövek, vízcövek) hegesztésére fejlesztették ki az ún. *tükörhegesztést*, amely a pálcás hegesztést váltotta fel. Ez a hegesztési mód kifejezetten a polimerek tulajdonságaira épül, fémipari analógiája nincs. Az eljárás elvét a 12.14 ábra. szemlélteti. Az összehegesztendő csővégeket mindkét oldalán

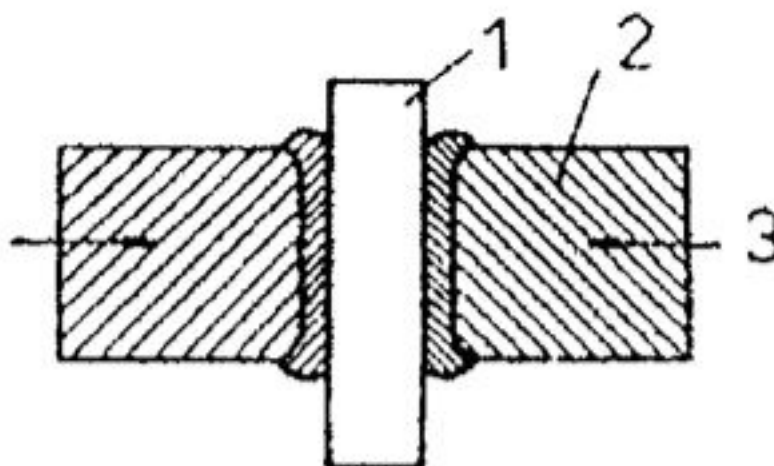


sima felületű fűtött tárcsához (a „tükörhöz”) szorítják. A kellő mértékben felmelegített csővégeket a tárcsa eltávolítása után egymáshoz szorítják és nyomás alatt lehűtik. A látszólag egyszerű eljárás sok hiba forrását rejti magában. A hegesztés jóságát több tényező is jelentősen befolyásolja:

- a hegesztendő csövekben levő orientáció mértéke, és esetleges eltérő volta,
- a cső külső és belső palástjában meglévő belső feszültségek,
- a hegesztendő csövek anyagának, kristályosságának, kristályszerkezetének különbözősége,
- a csővégek felületének párhuzamossága.



**12.13 ábra:** Fóliák fűtőékes hegesztése [12.5] bal oldalon kézi, jobb oldalon automatikus mozgatóssal

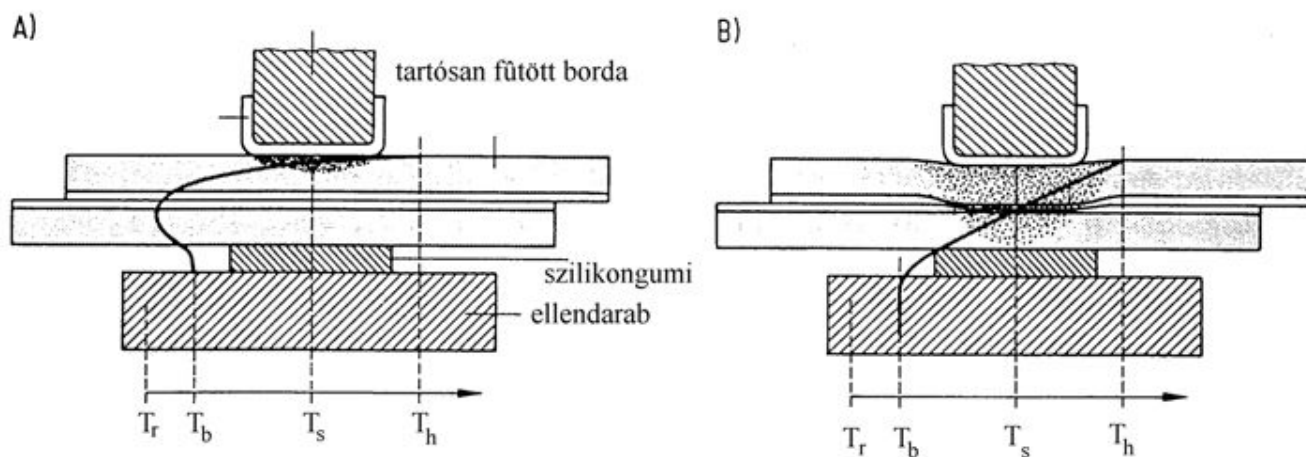


**12.14 ábra:** Tükörhegesztés alapelve 1) fűtőbetét („tükör”), 2) csővég, 3) nyomás iránya

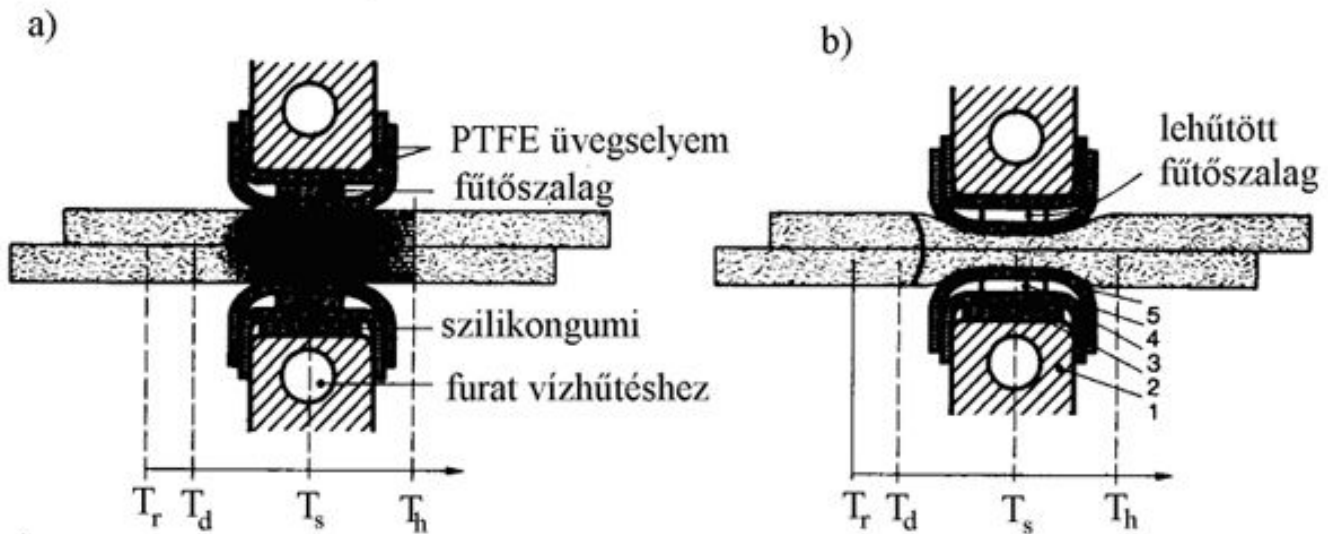
Ahol más módon nem oldható meg a hegesztés (pl. egymásba dugott csövek és csőídomok esetén), ott használják az anyagban maradó *fűtőszál-betéteket*. Ezeket vagy megfelelő áramcsatlakozón keresztül áramforrásra kapcsolják (fűtőellenállás), vagy zárt hurkot képeznek belőlük, és nagyfrekvenciás árammal, induktív úton hevítik fel a betéteket. Az indukciós hegesztés berendezése lényegesen költségesebb, ezért nem tudott széles körben elterjedni.

### 12.2.3.4 Fűtőelemes hegesztés közvetett melegítéssel

Közvetett melegítésű hegesztésről beszélünk, ha a hőt a *hegesztendő darabon keresztül* vezetik a hegesztési helyhez. A polimerek rossz hővezetési tulajdonságai miatt ez a módszer csak vékony (fólia) anyagokhoz alkalmazható, ott azonban a legelterjedtebb eljárás, különösen a csomagolástechnika területén. A közvetett fűtéssel végzett hegesztésnek két változata terjedt el: a tartósan melegített, illetve a szakaszosan melegített fűtőelemeket alkalmazó eljárások (ez utóbbi elven működnek a háztartási fóliahegesztő készülékek is). A szakaszos fűtésű eljárás előnye, hogy a fűtés megszűnte után az optimális hegedéshez szükséges *nyomás* biztosítható, ellentétben a folyamatosan fűtött változattal. A fűtőelemeket a folyamatos és a szakaszos eljárásnál is gyakran PTFE (Teflon), vagy poliimid fóliával vonják be, hogy elkerüljék a hegesztett anyag feltapadását a fűtőelemre. A 12.15 ábrán folyamatosan fűtött, a 12.16 ábrán szakaszosan fűtött bordás fóliahegesztés elve látható, a kialakuló hőmérsékleti profilokkal együtt.



**12.15 ábra:** Folyamatosan fűtött bordás fóliahegesztés elve és hőmérsékleteloszlása [12.5] A) a hegesztés kezdetén; B) a hegesztés végén;  $T_r$ ) környezeti hőmérséklet,  $T_b$ ) ellendarab hőmérséklete,  $T_s$ ) hegesztési hőmérséklet,  $T_h$ ) a fűtőelem hőmérséklete



**12.16 ábra:** Szakaszosan fűtött bordás fóliahegesztés elve és hőmérsékleteloszlása [12.5] a) a hegesztés alatt, b) a hegesztést és a hűtést követően,  $T_r$ ) környezeti hőmérséklet,  $T_d$ ) nyomóborda hőmérséklete,  $T_s$ ) hegesztési hőmérséklet,  $T_h$ ) a fűtőszalag hőmérséklete, 1) nyomóborda, 2) szilikongumi kiegyenlítő csík, 3) PTFE/üvegselyem szövet, 4) fűtőszalag, 5) PTFE/üvegselyem szövet

### 12.2.3.5 Elektromágneses sugárzás elnyelésén alapuló hegesztési eljárások

Mint a 12.1 táblázatból látható, két típusuk létezik: a koherens és az inkohere ns sugárzások elnyelésén alapuló hegesztési eljárások. Az inkohere ns sugárzásoknál az infravörös fény mellett látható fényvel is végezhető hegesztés, különösen a sötétre színezett anyagoknál. Sugárforrásként aranytükrös jód-kvarclámpát alkalmaznak, amelynek sugárzását elliptikus tükrökkel fókuszálják a hegesztendő területre.

Infravörös hegesztésnél a sugárforrás izzószalag lehet, amely nem érintkezik a hegesztendő anyaggal. Nehézkessége miatt ez az eljárás a gyakorlatban nem terjedt el.

Koherens sugárzást lézerekkel állítanak elő; különösen a rövid hullámhosszú, folytonos működésű  $CO_2$  lézer érdekes, mert  $10,6 \mu\text{m}$ -es sugárzását a PE fólia jól elnyeli. Ezzel a módszerrel  $0,2 \text{ mm}$ -es fóliákat  $25\text{--}40 \text{ cm/s}$  sebességgel tudnak összehegeszteni. A berendezés drága, ezért még széles körben nem tudott elterjedni.

Az eddigi eljárások mindegyikénél külső hőforrás szolgáltatja a szükséges hőt, amelyet valamilyen anyag közvetítésével, esetleg sugárzás révén juttattak a hegesztendő anyagba. A következőkben olyan eljárásokról lesz szó, ahol a hőt *magában az anyagban* hozzák létre mechanikai, vagy elektromos energia felhasználásával.

### 12.2.3.6 Melegítés súrlódással – dörzshegesztés

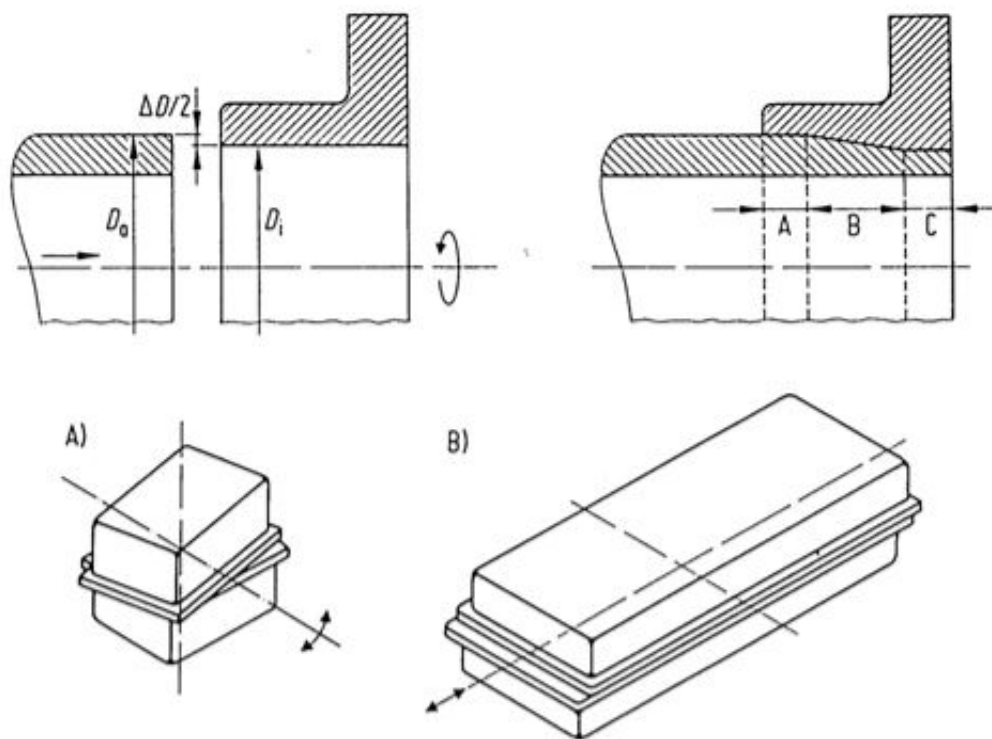
*Dörzshegesztésnél* a szükséges hőmérsékletet az összekötendő részek egymás közti súrlódása szolgáltatja, külső hőforrásra nincsen szükség. Az alkatrészek mozgatása alapján a dörzshegesztést *rotációs* (forgató), *vibrációs* és *dörzskúp* hegesztésre lehet felosztani.

Rotációs dörzshegesztéssel (12.17 ábra, fent) forgásszimmetrikus testek, elsősorban csövek összekötése oldható meg. Előfeltétel, hogy legalább az egyik alkatrészt meg lehessen forgatni. Nem forgásszimmetrikus testek összekötésére fejlesztették ki a vibrációs eljárást (12.17 ábra, lent). Itt az alkatrészeket csak néhány fokkal kell tudni elfordítani egymáshoz képest. A vibrációt a szögelfordításon kívül tengelyirányú, vagy excentrikus mozgással is el lehet érni. Az alkalmazott rezgetési frekvencia 90–120 Hz, amivel kb. 180 cm/s relatív sebesség érhető el. Fóliahegesztésre egyik dörzshegesztő eljárás sem alkalmas.

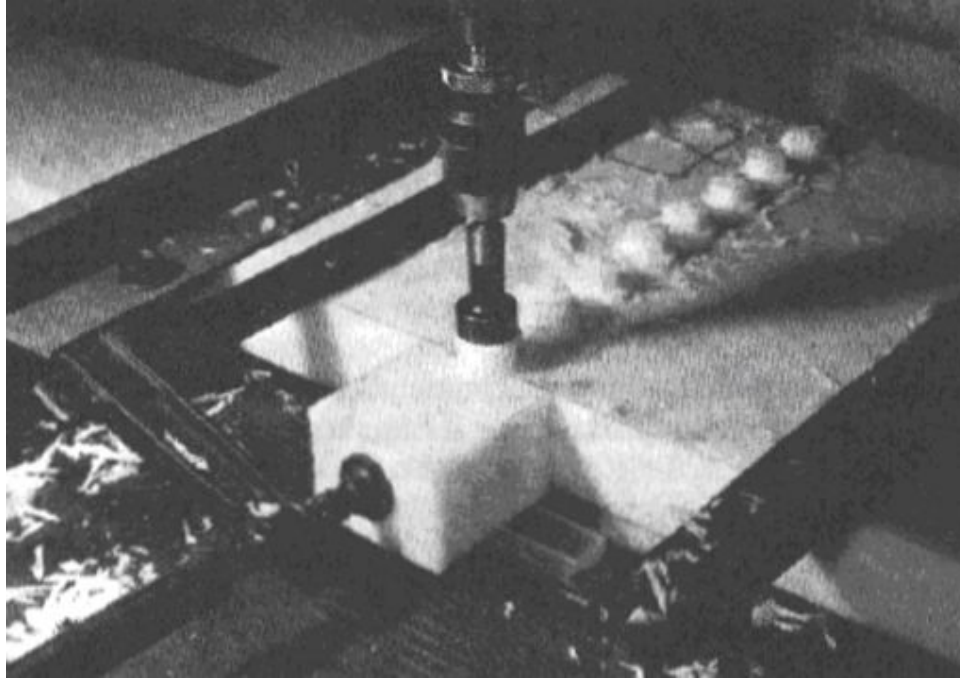
Dörzkúp hegesztéssel vastag (20 mm feletti falvastagságú) polimer elemeket, főként PE táblákat hegesztenek össze. A 12.18 ábrán látható eljárás során az összeszorított táblákba kúpos lyuksort fűrnak, amelyekbe jól illeszkedő PE kúpot helyeznek, és azokat kb. 3000 ford/perc fordulatszámmal megforgatják. A súrlódás hatására a kúpok és a PE táblák anyaga összeolvad, összeheged. A kúpok kiálló részét később síkba munkálják.

### 12.2.3.7 Hegesztés nyomásváltozással – hang és ultrahang hegesztés

*Hegesztés 10 kHz-es hanggal:* A vibrációs dörzshegesztéstől annyiban tér el az eljárás, hogy itt a kötési helyeket nem csúsztatják el egymáson, hanem a hegesztendő anyag felületét gyors nyomásváltozásnak teszik ki. A 10 000 rezgés/másodperc körüli frekvencia kedvező, azonban a hallható hangok tartományába esik, ezért különleges zajvédelemről kell gondoskodni.

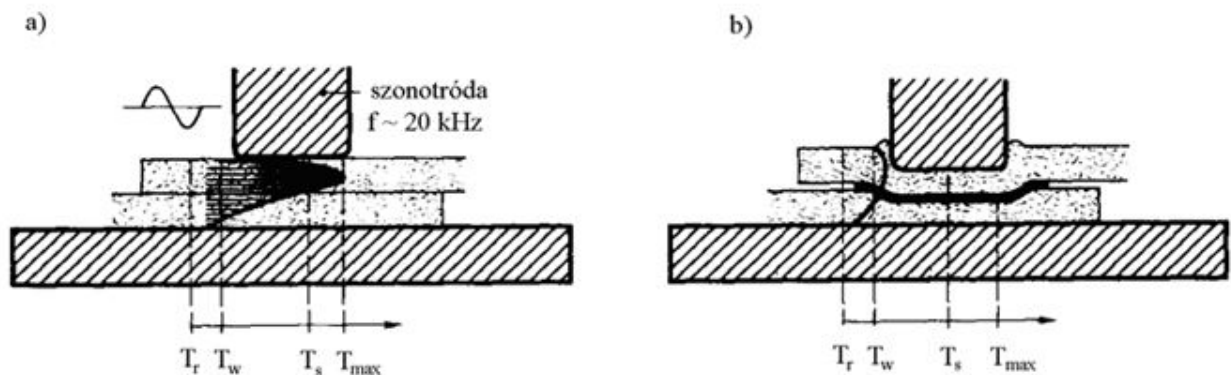


12.17 ábra: Rotációs (fent) és vibrációs (lent) dörzshegesztés elve [12.5]



**12.18 ábra:** PE lemezek dörzskúp hegesztése [12.5]

*Hegesztés ultrahanggal:* Előnyösebb a hallható tartományon kívüli (20–25 kHz) frekvenciák használata. (Nagyon kis alkatrészeket még magasabb – pl. 40 kHz-es – ultrahanggal célszerűbb hegeszteni.) Az ultrahangos hegesztésnél a molekuláris súrlódás miatt jön létre a hőfejlődés. A polimerben a bevezetett ultrahang intenzitása gyorsan csökken, ezért a legmagasabb hőmérséklet nem a szonotróda és a polimer felületének érintkezésénél, hanem a polimer anyagában, a felülettől kissé beljebb keletkezik, 12.19 ábra. Megfelelő alkatrész kiképzéssel ez a hátrányos tulajdonság kiküszöbölhető, erre azonban az ultrahangos hegesztéssel összekötendő alkatrészeknél már a tervezéskor gondolni kell.

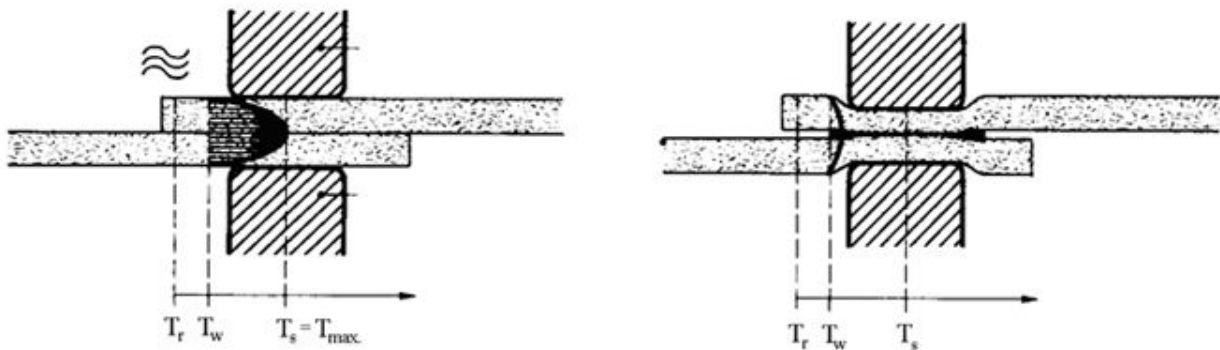


**12.19 ábra:** Fóliák ultrahang hegesztésének elve és a hőmérsékleteloszlás [12.5] a) az ultrahang bekapcsolása után, b) az ultrahang kikapcsolása után

### 12.2.3.8 Dielektromos melegítés – nagyfrekvenciás (NF) hegesztés

Az eddigi eljárásoktól eltérően a kondenzátorlemezek (elektródák, fegyverzetek) közé helyezett, elegendően nagy dielektromos állandóval rendelkező anyagok egyenletesen melegsznek fel, ha a kondenzátor fegyverzeteire nagyfrekvenciás (10...100 MHz) elektromos feszültséget kapcsolunk.

A nagyfrekvenciásan melegíthető polimereknek tehát *poláros molekulaszervezettel* kell rendelkezniük (pl. PVC). A polimer térfogatában egyenletesen jelentkező felmelegedés nem előnyös a hegesztés szempontjából, ezért az elektródákat úgy képezik ki, hogy a polimer alkatrész (vagy fólia) felületéről vezesse el a hőt, így már a hegesztéshez alkalmas hőmérsékleteloszlást kapunk, 12.20 ábra. Ez azt is jelenti, hogy adott elektróda-konstrukció csak bizonyos vastagságú alkatrészekhez alkalmazható, más vastagsághoz más elektróda szükséges.



12.20 ábra: Nagyfrekvenciás hegesztés elve és hőmérsékleteloszlása [12.5]

Az engedélyezett frekvenciatartomány országonként eltérő lehet, Európában a 27,12 MHz terjedt el. Adott működési frekvencia mellett a szükséges fölmelegítési teljesítmény meghatározza az  $E$  villamos térerősséget, amelynek viszont a polimer alkatrész (fólia) villamos átütési szilárdsága szab határt:

$$E = \sqrt{\frac{P}{2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta}}$$

ahol  $P$  a (fajlagos) fölmelegítési teljesítmény,  $\varepsilon_0$  a vákuum permeabilitása,  $\varepsilon_r$  az anyag relatív permeabilitása,  $f$  a frekvencia és  $\operatorname{tg} \delta$  az anyag dielektromos veszteségi tényezője.

### 12.3 A ragasztástechnika alapjai

A ragasztás két szilárd test összeerősítését jelenti ragasztó segítségével; az összeerősített részek anyaga nem szükséges, hogy azonos legyen. A ragasztott kötés tehát a ragasztandó anyag(ok)ból és a ragasztóból áll. A ragasztott kötések szilárdságát döntően két erő-típus adja: a ragasztandó anyagok, valamint a ragasztó belső szilárdsága, *kohéziója*, és a ragasztandó anyag – ragasztó határfelületén fellépő erőhatások, az *adhézió*. Jó ragasztott kötésben az adhéziós erők legalább olyan nagyok, mint a kohéziós erők. Ez más szavakkal azt

jelenti, hogy a jól összeragasztott anyagdarabokat nagy erőhatásnak kitéve a tönkremenetel (szakadás, törés) a ragasztandó darabban történik, és nem határfelületen, a ragasztó elválása miatt.

Napjainkban a ragasztástechnika egy sor fejlett technológia alapját képezi, mint pl. laminálás, polimerek bevonása fémekkel, vagy szálerősített polimer kompozitok előállítása. A ragasztástechnika elméleti alapjaival egy viszonylag új tudományág, a *mérnöki felülettudomány (surface engineering, surface science)* foglalkozik.

### **12.3.1 A ragasztás elméleti alapjai**

Amint az előzőekben röviden vázoltuk, a ragasztott kötések jóságát döntően a ragasztandó anyag–ragasztó *határfelületén* fellépő erőhatás, az adhézió határozza meg. A következőkben a különböző anyagok között fellépő erőhatások magyarázatára kidolgozott elméleteket foglaljuk össze.

#### **12.3.1.1 Mechanikai kapcsolódás**

A mechanikai kapcsolódás elmélete szerint a hordozó és a ragasztó (vagy bármilyen bevonat, festék) között a kötést a bevonatnak a hordozó anyag felületi érdességébe, pórusaiba történő behatolása hozza létre. Ez az elmélet azonban nem lehet általános, mert erős ragasztott kötés hozható létre sima felületű anyagokkal is (pl. üveg, integrált áramkör gyártásnál használt szilícium hordozó–*silica wafer*). Az elmúlt kb. két évtized kutatásai alapján a felületi érdesség növelésével elért kötésező növekedésre más magyarázat is adható, mint amely a mechanikai kapcsolódás elméletéből következik. Természetesen azokban az esetekben, amikor ténylegesen kimutatható a ragasztó behatolása a felület egyenetlenségeibe, a mechanikai kapcsolódás hatására létrejövő kötésező növekedés jelentős lehet. Ez a helyzet pl. ABS (akrilonitril–butadién–sztirol) kopolimerek fémréteggel való bevonásánál. Az ABS felületi érdessége a butadién fázis kémiai kioldásával jelentősen megnövelhető.

#### **12.3.1.2 Diffúziós elmélet**

Az elmélet szerint polimerek adhéziójáért elsősorban a diffúzió felelős, akár különböző típusú polimerekről (*hetero–adhézió*), akár azonos típusúakról (*auto–adhézió*) van szó. A diffúzióhoz a polimer makromolekuláknak, illetve szegmenseiknek megfelelő mozgékonyssággal kell rendelkezniük, és ezen kívül egymással kompatibiliseknek kell lenniük üvegesedési hőmérsékletük felett. A diffúzió magyarázatot ad a hőre lágyuló polimerek ragasztásánál tapasztalt jelenségre, amikor a két anyag között kezdetben meglévő határfelület (*interface*) egy idő után eltűnik, és valódi közös fázis alakul ki.

#### **12.3.1.3 Elektrosztatikus elmélet**

Az elmélet a ragasztott kötést kondenzátornak tekinti, ahol az egyik fegyverzet a ragasztó, a másik a hordozóanyag (substrate). A két különböző típusú anyag között elektromos kettősréteg alakul ki, és az elektrosztatikus vonzás felelős a kötésezőért. Hasonló módon, a ragasztott felületek szétválasztásához szükséges „adhéziós munkát” a kondenzátorban tárolt energiával lehet kapcsolatba hozni.

### 12.3.1.4 Fizikai adszorpció elmélete

A kondenzált fázisú (szilárd) anyagok kohéziójáért felelős vonzóerők kialakulhatnak két különböző, egymással igen közeli (molekuláris szintű) kapcsolatba hozott anyagdarab között is. A létrejövő erőhatást az atomok közötti vonzóerő, a *másodlagos (van der Waals)* kötések kialakulása hozza létre. Mint ismeretes, a másodlagos kötések a kötéserősség nagysága szerint három csoportba sorolhatjuk:

- *Dipólusos (vagy Keesom) erők:* Amikor a nagyobb távolságból ("kívülről") elektromosan semlegesnek tűnő molekulában egyenlő nagyságú, ellentétes előjelű töltések vannak, a molekulát polárosnak nevezzük. Molekuláris távolságokon belül a töltés elkülönülés (a dipólus) fontossá válik, és jelentős szerepet játszik a molekulák közötti vonzóerő kialakulásában. A kölcsönhatási energia függ a dipólusoktól és a hőmérséklettől.
- *Indukciós (vagy Debye) erők:* A poláros molekulák által kifejtett erők befolyásolják az apoláros (eredetileg molekuláris szinten is semleges, dipólusokat nem tartalmazó) molekulákat. A dipólus elektromos mezeje kölcsönhatásba lép az apoláros molekula atommagjának és elektronjainak töltésével, és azok kis mértékű elmozdulását okozza, ezáltal az eredetileg apoláros molekula dipólussá válik. Ezt a jelenséget nevezik indukciónak, és a kialakuló dipólust indukált dipólusnak. A dipólusos molekula és az indukált dipólussal rendelkező molekula közötti kölcsönhatás eredménye az indukciós erő. Ez az erő típus független a hőmérséklettől.
- *Diszperziós (vagy London) erők:* Minden molekulánál létezik egy időben változó dipólusmomentum, amelynek az átlaga hosszabb időre és az összes molekulára nézve nulla. Ez a dipólusmomentum az elektronok és magok pillanatnyi fluktuációjából adódik. Ezek a pillanatnyi fluktuációk a szomszédos atomok elektronfelhőjének megzavarásához vezetnek. Az ilyen módon kialakuló vonzó erőket diszperziós erőknek nevezzük. A diszperziós erők minden molekulában jelen vannak, és ha nincsenek jelentős dipólusok, akkor a molekulák közti erők jelentős részét képviselik. Nempoláros rendszerekben csak diszperziós erők léteznek. A diszperziós erők függetlenek a hőmérséklettől.

A kötéserősség a diszperzióستól a dipólusos irányába növekszik. Gyakran külön csoportként említik a dipólusos kötés egy speciális esetét, a *hidrogén hidas kötést*, mivel itt a kölcsönhatás még erősebb. Az adhéziónál nagyon fontos szerepe van a fizikai adszorpciónak, amelyben a diszperziós kötésnek tulajdonítanak nagy szerepet. Fontos megjegyezni, hogy az adhézió és a felületek *nedvesítése* egymással szorosan összefüggő jelenségek, hiszen jó nedvesítés nélkül nem jöhet létre az adhézió kialakulásához szükséges molekuláris szintű érintkezés a két fázis (a szilárd hordozó és a folyékony halmazállapotú ragasztó) között.



### 12.3.1.5 Kémiai kötések elmélete (kemoszorpciós elmélet)

Az előző szakaszban láttuk, hogy másodlagos (főként diszperziós) kötések kialakulása már kellően nagy kötéseerőséget biztosít. Egyes esetekben erős elsődleges (kovalens) kötések is kialakulnak az egymással érintkező felületek között. Az elsődleges kötések jelentősen megnövelik a kötések szilárdságát.

Erős elsődleges kovalens ( $-Si-O-M$ ) kötés alakul ki a tapadásjavítóként alkalmazott *szilánok* és szervesetlen hordozók, mint pl. üveg, fémoxidok között. A szilán *köztes fázis* és a polimer között erősebb kötés alakul ki, mint a hordozó és a polimer között. Sok ehhez hasonló, kémiai kötésen alapuló tapadásjavító mechanizmus ismert. A kialakuló kötések típusát a hordozó és a ragasztó (vagy bevonat) kémiai összetétele határozza meg.

### 12.3.1.6 Sav-bázis elmélet

Amint azt a fizikai adszorpciós elmélet kapcsán láttuk, a másodlagos kölcsönhatásokat feloszthatjuk poláros (Keesom, Debye) és apoláros (London) kölcsönhatásokra. Ma már általánosan elfogadott az az elmélet, miszerint poláros kölcsönhatások csak az egymással kapcsolatba kerülő anyagok savas és bázikus területein alakulhatnak ki. E mellett a hidrogénhidás kölcsönhatások vizsgálata kimutatta, hogy azok az általános sav-bázis elmélettel jól leírhatók. A sav-bázis elmélet az egymással szoros (molekuláris, illetve atomi szintű) kapcsolatba kerülő anyagok molekuláinak elektron-pályái alapján, az elektron leadás és felvétel segítségével értelmezi a kialakuló kötések, kölcsönhatásokat, amelyeket a korábban ismertetett elméletekkel nem lehetett leírni.

### 12.3.1.7 Gyenge határréteg modell

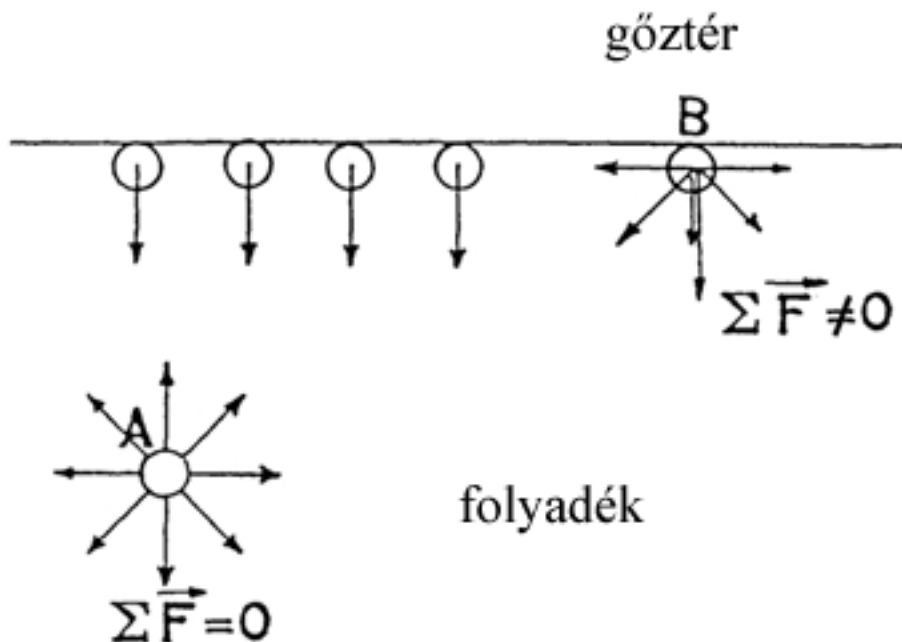
A ragasztott kötések szétválásának vizsgálata alapján megállapították, hogy a tönkremenetel szinte sosem a hordozó-ragasztó határfelületen következik be, hanem ahhoz közel, egy alacsony kohéziós szilárdságú rétegben. Ez a *gyenge határréteg (WBL, weak boundary layer)* lehet egy rideg fémoxid réteg a fém felületén, vagy kismolekulájú szennyeződés a nagymolekulájú polimer felületén. A gyenge határréteg vastagsága és összetétele függ a ragasztandó anyagok típusától és a felület-előkészítés módjától. Ez teszi a gyenge határréteg modellt nagyon hasznos elméletté, hiszen a ragasztott kötések szilárdságát mechanikai vizsgálatokkal állapítjuk meg, ahol a tönkremenetel helye, vagyis a gyenge határréteg jelenléte vagy hiánya döntően befolyásolja a mérési eredményeket.

Összefoglalásul megállapíthatjuk, hogy a ragasztás, az adhézió leírására nincsen egyetlen általános modell vagy elmélet, amely az összes jelenséget helyesen tudná számításba venni. Az egyes mechanizmusok jobb megismerése teremti meg a mind szilárdabb kötések kialakításának elvi alapjait.

### 12.3.2 Nedvesítés és adhézió

Az adhézió és a nedvesedés két egymással szorosan összefüggő jelenség. Könnyű belátni, hogy jó nedvesedés, vagyis a hordozó és a ragasztó igazán jó, molekuláris szintű érintkezése nélkül erős kötés nem tud kialakulni. Ezért kell a ragasztónak folyékony (vagy legalábbis pasztaszerű) állapotban lennie. A ragasztással

foglalkozó gyakorlati szakemberek szerint a felület nedvesíthetősége akkor jó, ha a víz (vagy kis viszkozitású ragasztó) szétterül rajta. A jelenség megértéséhez először vizsgáljuk meg egy saját gőzével érintkező folyadék molekuláinak erőegyensúlyát, 12.21 ábra:

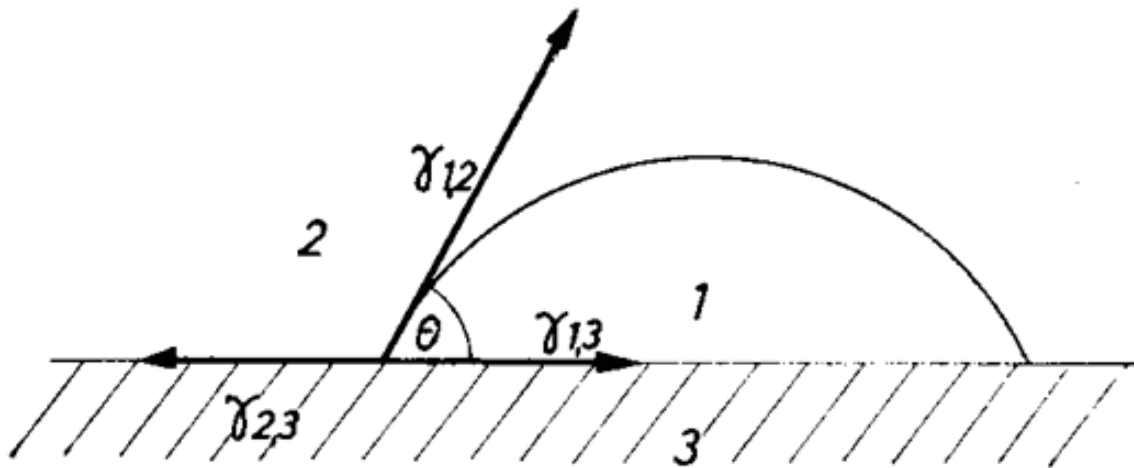


**12.21 ábra:** Saját gőzével érintkező folyadék molekuláinak erőegyensúlya [12.7] „A” molekula a folyadék belsejében, „B” molekula a folyadék felszínén

A folyadék belsejében található „A” molekulára a környezetében levő többi molekula minden irányból azonos vonzóerőt fejt ki, ezért az eredő erő nulla. A folyadék felszínén levő „B” molekulára a folyadékfázisból jóval több „szomszéd” fejt ki vonzóerőt, mint a sokkal ritkább gőztérből, ezért a felszíni molekulára ható erők eredője nem nulla, hanem a folyadék belseje felé mutató erő. Ez az erő a folyadékot egy másik, vele nem elegyedő folyadékban (vagy gravitációmentes térben) *gömb* alakúra igyekszik összehúzni (adott térfogathoz a gömb alak adja a minimális felületet). Az egységnyi folyadékfelületre ható összehúzó erőt **felületi feszültség**nek nevezzük, és  $\gamma$ -val jelöljük.  $\gamma$  mértékegysége N/m.

Folyékony ragasztó és szilárd hordozó esetén a határfelületi viszonyok kissé bonyolultabbak, 12.22 ábra. A rendszer ebben az esetben háromfázisú, mert a légtér is jelen van. Az ábrán alkalmazott jelölésekkel

- a szilárd fázis és a gázfázis közötti felületi feszültség:  $\gamma_{2,3}$ ;
- a szilárd fázis és a folyadékfázis közötti felületi feszültség:  $\gamma_{1,3}$ ;
- a gázfázis és a folyadékfázis közötti felületi feszültség:  $\gamma_{1,2}$ ;



**12.22 ábra:** A kontaktszög és a határfelületi feszültségek [12.6] 1) folyékony fázis, 2) gázfázis, 3) szilárd fázis

A háromfázisú rendszer egyensúlyi feltétele:

$$\gamma_{2,3} = \gamma_{1,3} + \gamma_{1,2} \cos \Theta$$

vagy átrendezve

$$\cos \Theta = \frac{\gamma_{2,3} - \gamma_{1,3}}{\gamma_{1,2}}$$

A teljes nedvesítés feltétele, ha  $\gamma_{2,3} > \gamma_{1,3} + \gamma_{1,2}$ ; ekkor a  $\Theta$  nedvesítési szög nem értelmezhető. Ebben az esetben a folyadék teljesen szétterül a szilárd felületen. Nem kapunk valós nedvesítési szöget akkor sem, ha a szilárd test és a folyadék közötti felületi feszültség ( $\gamma_{1,3}$ ) nagyobb a másik kettőnél. Ekkor a folyadék gömb alakot vesz fel a szilárd test felületén. A többi esetben a  $\Theta$  nedvesítési szög optikai komparátorral könnyen mérhető.

### 12.3.3 Ragasztók csoportosítása

A ragasztókat különböző szempontok szerint csoportosíthatjuk:

- kémiai szerkezetük
- fizikai tulajdonságaik
- kötésmódjuk
- a velük ragasztható anyagok szerint

### 12.3.3.1 Csoportosítás a kémiai szerkezet szerint

A ragasztók általában nagymolekulájú anyagok, polimerek, amelyek a ragasztandó anyagot jól nedvesítik, és azzal (többnyire) másodlagos kötéseket tudnak kialakítani. Léteznek *természetes* és *mesterséges* polimer alapú ragasztók is. A *természetes alapú* ragasztók közül napjainkban a *kaucsuk alapú* ragasztóknak, illetve *ásványi szurkoknak, bitumeneknek* van nagyobb jelentőségük.

A *szintetikus polimer* alapú ragasztók közül a gépiparban a következő csoportok a legfontosabbak:

- Epoxigyanták, társított epoxigyanták
- Poliészterek: alkid- és allilgyanták
- Poliuretánok
- Fenoplasztok, aminoplasztok
- Akril- és metakrilsavészterek
- Cianakrilátok („pillanatragasztók”)
- Vinilszármazékok
- Poliamid alapú ragasztók
- Szilikongyanták

Nagyon magas hőmérsékleteknek (>400–500 °C) kitett ragasztott kötéseket *szervetlen (kerámia) alapú ragasztóanyagokkal* lehet készíteni.

### 12.3.3.2 Csoportosítás a fizikai tulajdonságok szerint

Folyékony ragasztók: monomerek, oligomerek, oldatok, diszperziók. A diszperziók többnyire vízben finoman elosztatott ragasztóanyag-szuszpenziók, egyes esetekben kolloid oldatok. A kötést a diszpergált részecskék (1–500 µm) *koagulálása* (kicsapódása) hozza létre.

A szilárd ragasztók szobahőmérsékleten szilárd anyagok. Megolvasztva, majd újból lehűtve hozzák létre a kötést. A reaktív ragasztóknál a hő kémiai változást is okoz. A szilárd ragasztók különleges csoportja a hordozóra felvitt tartósan tapadó, nyomás-érzékeny ragasztók, amelyek *nyomás hatására* hozzák létre a kötést (PSA = *Pressure sensitive adhesives*).

A ragasztópaszták kenhető, gittszerű anyagok. A bennük levő nagymennyiségű töltőanyag miatt nagy a viszkozitásuk.

### 12.3.3.3 Csoportosítás a kötés módja szerint

Két nagy csoportot különböztetünk meg: a *kémiai reakció nélkül*, csak fizikai változással, és a *kémiai reakcióval* kötő ragasztókat.

A kémiai reakció nélkül kötő ragasztók egyik típusa a hidegen kötő, tartósan tapadó ragasztó, amely nem is köt, csak nedvesít. Másik típusuk az oldószer (vagy diszpergálószer) elpárolgással kötő ragasztók. A melegén kötő ragasztók (*hot melt*) csak olvadék (ömladék) állapotban nedvesítik a ragasztandó felületet. A kötés a ragasztó lehűlésével jön létre. Ebbe a csoportba lineáris polimerek tartoznak.

A kémiai reakcióval kötő ragasztóknál a 2.2 fejezetben megismert mindhárom polimerlánc kialakítási módszer – a polimerizáció, a poliaddíció és a polikon–denzáció – is előfordul. A polikondenzációs típusnál (pl. fenoplasztok) nagy figyelmet kell fordítani a melléktermék eltávolításának biztosítására. A legtöbb esetben a viszonylag nagymértékű zsugorodás (kivétel: epoxigyanták) miatt nyomás alkalmazása is szükséges.

### 12.3.3 A ragasztás technológiája

Technológiai szempontból a kötésben résztvevő elemek szerint három csoport különböztethető meg:

- homogén kötések: a ragasztandó anyagok között csak a ragasztóréteg található,
- inhomogén kötések: a ragasztórétegben még valamilyen erősítőanyag (pl. üvegszövet) is van,
- kombinált kötések: a ragasztás mellett más (pl. szegecselés, csavarozás) kötést is alkalmaznak.

A homogén kötések kialakításához szükséges technológiai lépések a másik két csoport esetében is szükségesek. A fő műveletek a következők:

- *A ragasztandó felületek kezelése.* A ragasztott kötés szilárdságát nagymértékben befolyásolja a felületek megfelelő előkészítése. A felületkezelés egyes esetekben csak a felület tisztítását és a megfelelő érdesség kialakítását jelenti (zsír- és egyéb szennyeződések eltávolítása, csiszolás, szemcseszórás), más esetben hatékonyabb módszereket kell alkalmazni, pl. Al ragasztásánál vegyszeres kezelést a megfelelő oxidréteg kialakításához, koronakisülést poliolefinnek (PE, PP) felületi energiájának növelésére, stb. Általában minél kisebb a ragasztandó anyag felületi energiája (minél kevésbé nedvesíti a ragasztó), annál bonyolultabb, költségesebb előkészítést igényel.
- *A ragasztó előkészítése.* Ez a művelet a ragasztó típusától függően kétkomponensű ragasztóknál a komponensek kimérését és összekeverését, diszperziós ragasztóknál a kiülepedett rész felkeverését, oldószeres ragasztóknál az esetleges hígítást jelenti. Ide sorolhatjuk a töltőanyag bekeverés műveletét is.
- *A ragasztó felvitele a ragasztandó felület(ek)re.* Ez a művelet történhet kézzel vagy gépi úton. A kötés–szilárdság függ a felhordás módjától is. Folyékony ragasztók felhordása legtöbbször kenéssel, mártással vagy hengerléssel történik. A szilárd ragasztókat szórással, megömléssel, vagy egyszerűen ráhelyezéssel hordják fel a ragasztandó felületre.

- *A ragasztandó munkadarabok illesztése és rögzítése.* A ragasztandó darabokat a rögzítés előtt össze kell illeszteni. Ez a gyorsan kötő ragasztóknál jelenthet nehézséget. Nagy alkatrészeket néhány csavarral lehet rögzíteni. Egyes ragasztók (pl. fenolgyanták) igénylik a nagy (1 MPa körüli) nyomást. Nagyobb alkatrészekhez ilyen ragasztót a nagyméretű, drága illesztőkészülék miatt nem célszerű használni.
- *A ragasztó kikeményítése.* Oldószeres vagy diszperziós ragasztók kikeményedése az oldószer, illetve a víz elpárolgását jelenti. Ezeknél a ragasztótípusoknál, hacsak nem pórusos, nyitott cellás (hab) anyagot ragasztunk velük, szükséges időt biztosítani az oldószer elpárolgásához (ún. nyitott idő). Ömledékragasztóknál a kötés a lehülés után jön létre. A reaktív ragasztók kikeményedését a hőmérséklet és az idő befolyásolja. Itt is érvényes a van't Hoff szabály, amely szerint a reakció sebessége kb. 10 fokként megduplázódik (bővebben ld. 13.2.5 fejezet).
- *Utóműveletek.* Reaktív ragasztóknál utólagos hőkezeléssel a kötésszilárdság jelentősen növelhető. Nem kellően víz- vagy klímaálló ragasztók esetén a ragasztóréteg szélét védőréteggel (festékkel, lakkal) látják el. Ide sorolható a munkadarab felületére került felesleges ragasztóréteg eltávolítása is.

## 12.4 Szakirodalom

Erhard G.. *Konstruieren mit Kunststoffen.* Hanser. München . 1993.  
 Hennemann O. D.. Brockmann W.. Kollek W.. *Handbuch Fertigungstechnologie Kleben.* Hanser. München . 1992.  
 BASF. *Konstruieren mit thermoplastischen Kunststoffen, Teil 2: Schraubverbindungen.* BASF Aktiengesellschaft. 1991.  
 Farkas F.. *A ragasztás kézikönyve.* Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1997.  
 Abele G. F.. *Műanyagok nagyfrekvenciás hegesztése.* Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1982.  
 Balázs Gy.. *Ragasztástechnika.* Műszaki Könyvkiadó. Budapest . 1982.  
 Romand M.. *Surface Science and Adhesion.* Tempus Short Course Programme, TUB. Budapest . 1996.

## TÉRHÁLÓS POLIMERTERMÉKEK GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁJA

### Tartalom

#### [13.1 Bevezetés](#)

#### [13.2 A gumitechnológiák alapjai](#)

##### [13.2.1 Keverékgyártás](#)

##### [13.2.2 Kalanderezés](#)

##### [13.2.3 Gumitermékek extrudálása](#)

##### [13.2.4 Oldás, itatás, kenés](#)

##### [13.2.5 Vulkanizálás](#)

#### [13.3 Gépjárműabroncs gyártás](#)

##### [13.3.1 A gumiabroncsok osztályozása](#)

##### [13.3.2 A gumiabroncs szerkezete](#)

##### [13.3.3 Gumiabroncsok gyártása](#)

#### [13.4 Polimer habok és habosítási technológiák](#)

##### [13.4.1 A habosítási technológiák alapjai](#)

[13.4.2 Poliuretán habok előállítása](#)

[13.4.3 RIM \(Reaction Injection Molding, reaktív fröccsöntés\) habgyártás](#)

[13.4.4 Habosítható polisztirol \(EPS, Expandable Polystyrene\)](#)

[13.4.5 Hőre lágyuló struktúrhabok fröccsöntése](#)

## [13.5 Szakirodalom](#)

### 13.1 Bevezetés

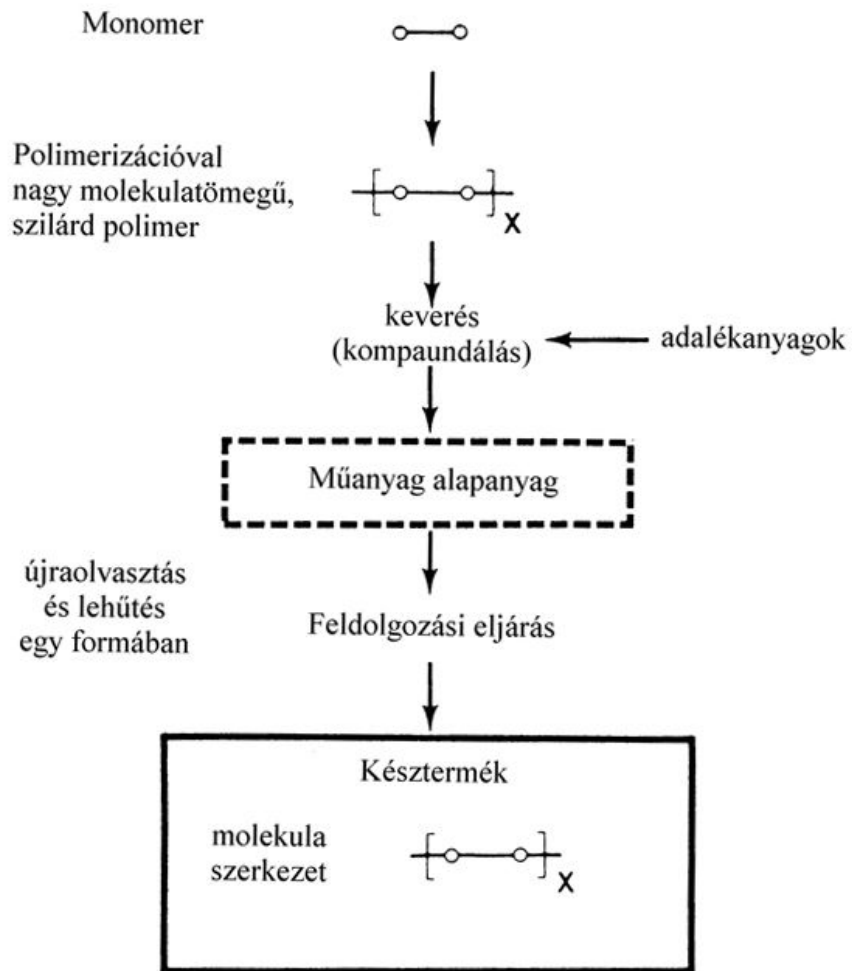
Ahogy korábban már említettük, a polimereket két nagy csoportba lehet sorolni ciklikus hő hatására mutatott viselkedésük alapján. Az ismételten megolvasztható anyagokat hőre lágyuló (termoplasztikus) polimereknek nevezzük. Az ismételt hő hatására is szilárd állapotban maradó (legfeljebb bomló, degradálódó) műanyagok a hőre nem lágyuló polimerek (a szakirodalomban néha a *hőre keményedő* műanyag megjelölés is előfordul). A két csoport viselkedésbeli különbsége a polimer molekulák szerkezetével hozható kapcsolatba. A *hőre nem lágyuló* polimerek túlnyomó többségében a polimert alkotó molekulaláncokat elsődleges, kovalens, *keresztkötések* kötik össze egymással, és az anyagdarab egyetlen óriásmolekulának tekinthető. Az egész műanyag terméket a tér minden irányában behálózó keresztkötések miatt az ilyen polimereket **térhálós** polimernek nevezzük. A polimer nem tud olvadt állapotba kerülni a keresztkötések kialakulása után, hiszen azok megakadályozzák a makromolekulák egymáshoz képesti elmozdulását, vagyis a folyást. A kovalens kötések nagy összetartó energiája miatt az ilyen térhálós polimerek viszonylag magas hőmérsékletig hőállóak (szemben a *hőre lágyuló* polimer molekulák közti másodlagos erőkkel, amelyek viszonylag alacsony hőmérsékleten felbomlanak, és az anyag olvadt, nagy viszkozitású ún. *ömladék* állapotba kerül).

A térhálós polimereket további két csoportba sorolhatjuk az egységnyi térfogatban található keresztkötések száma alapján. A *sűrű térhálós* polimereket *duromerek*-nek nevezzük. Ezek a felhasználási hőmérsékletükön kemény, szilárd anyagok. A *ritka térhálós* műanyagok az *elasztomerek*, amelyek közül legismertebb és legrégebbi anyag a **gumi**.

Meg kell jegyezni, hogy ez a klasszikus csoportosítás napjainkban már nem teljesen helytálló, ugyanis a polimerkémikusok kifejlesztették a *termoplasztikus elasztomerek* családját. Nevükből láthatóan ezek olyan polimerek, amelyek gumyszerűen viselkednek (vagyis elasztomerek), viszont a hőre lágyuló polimerekhez hasonlóan többször megolvaszthatók.

Az eltérő molekulaszervezet miatt a hőre lágyuló és a térhálós polimerek előállítása és *feldolgozása* is jelentősen eltér egymástól. Jól megfigyelhetők a különbségek a 13.1 és 13.2 ábrákon, ahol a hőre lágyuló és a térhálós polimerek előállítását hasonlítjuk össze. A térhálós polimertermékek gyártása közben kémiai reakció is lejátszódik, ezért az ilyen termékek előállítását *reaktív feldolgozástechnikának* nevezzük.

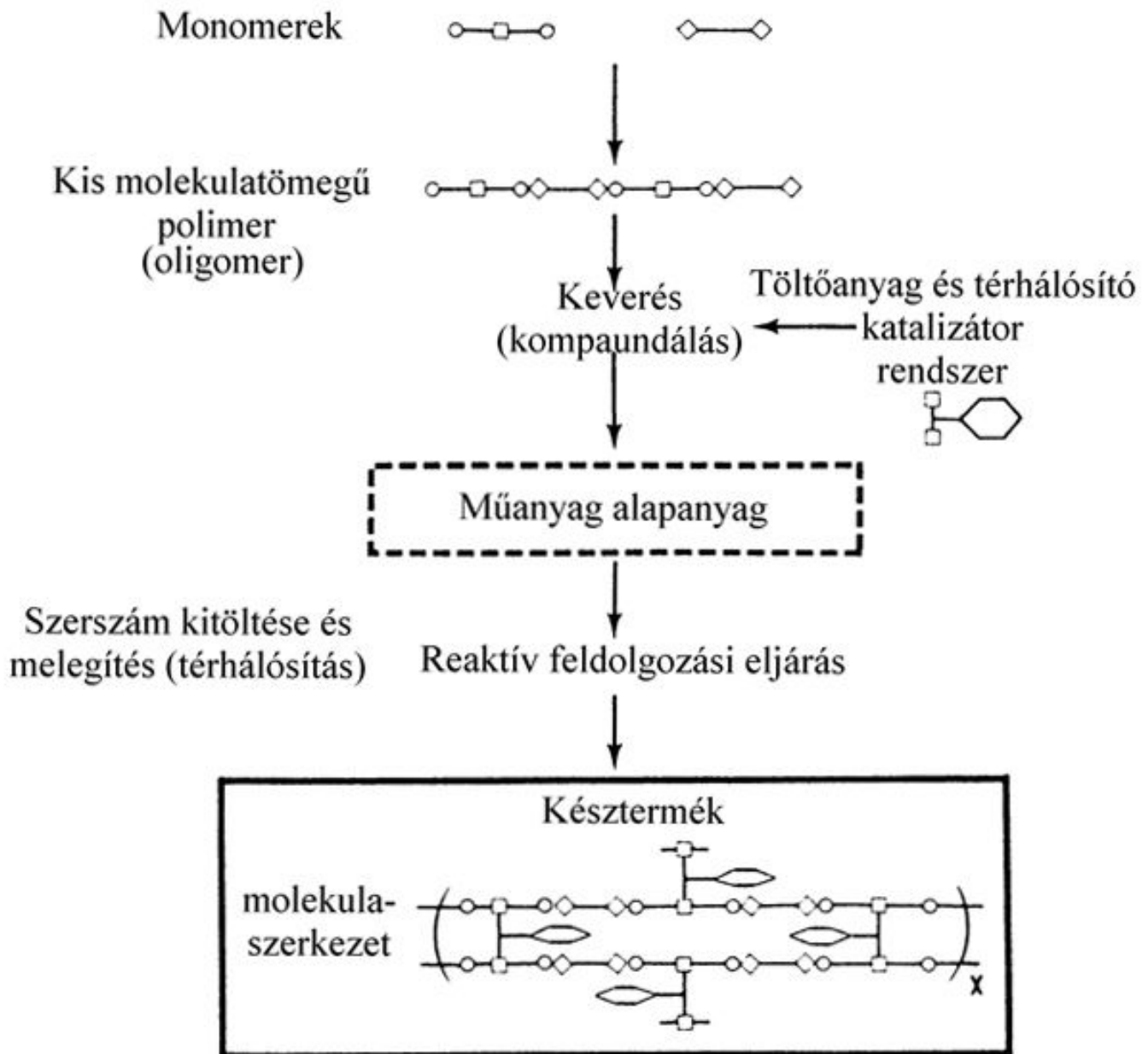
## Hőre lágyuló polimer termékek gyártása



13.1 ábra: Hőre lágyuló műanyagok gyártásának sémája



## Hőre nem lágyuló polimer termékek gyártása



13.2 ábra: Hőre nem lágyuló (térhálós) műanyagok gyártásának sémája

A gumitermékek gyártástechnológiája több vonatkozásban is eltér a többi (térhálós) polimer termék gyártásától (pl. itt gyakran 10–15 komponensből áll egy receptúra, szemben a többi térhálós polimer előállításnál szokásos 3–5 komponenssel), ezért indokolt külön tárgyalni azt.

## 13.2 A gumitechnológiák alapjai

A nyersgumi (kaucsuk) feldolgozása során több műveleten megy keresztül, míg a késztermék elkészül. Ezek a következők:

- keverékkészítés
- kalanderezés
- extrudálás
- oldás, itatás, kenés
- konfekcionálás
- vulkanizálás

A fenti technológiák közül a konfekcionálás, és kisebb mértékben a vulkanizálás is termékfüggő, vagyis megvalósítása (és gépi berendezése is) a gyártandó gumitermékthől függ. Itt említjük meg, hogy könyvünkben a latex– (vagy mártásos) gumitechnológiákkal nem foglalkozunk, ezek leírását az érdeklődő Olvasó a [13.1] irodalomban találja meg.

### 13.2.1 Keverékgyártás

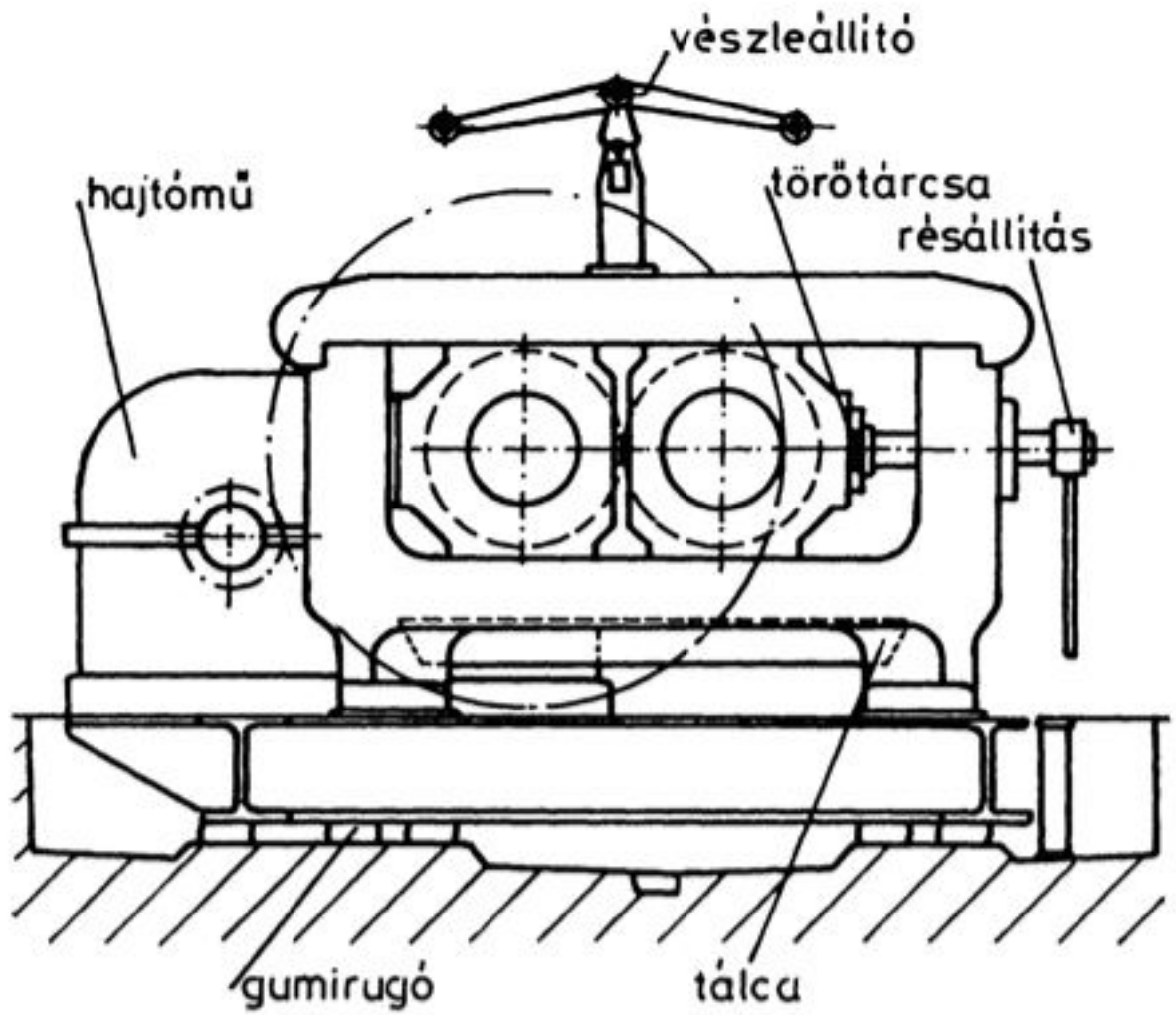
A keverékkészítés az első lépés a gumi feldolgozása során; a művelet alatt fizikai és kémiai változások is lejátszódnak a gumiban. A keverékkészítéskor alakulnak ki a későbbi feldolgozási műveletekben nagyon fontos reológiai és feldolgozhatósági jellemzők.

A kaucsukot a gyárak bálában (egy ilyen tömb kb. 100–110 kg kaucsukot tartalmaz) kapják, ezt először kisebb darabokra vágják bálavágógépek segítségével. A bálavágógépek többnyire hidraulikus működtetésűek (egy bála felvágásához 300–1000 kN nyomóerő szükséges). A bálavágógépek lehetnek egy- vagy többkésesek; működésük megegyezik a hidraulikus prések működésével. A legelterjedtebb közepes méretű keverőgépek számára 15–20 kg az egy darabban beadagolható kaucsuk mennyisége.

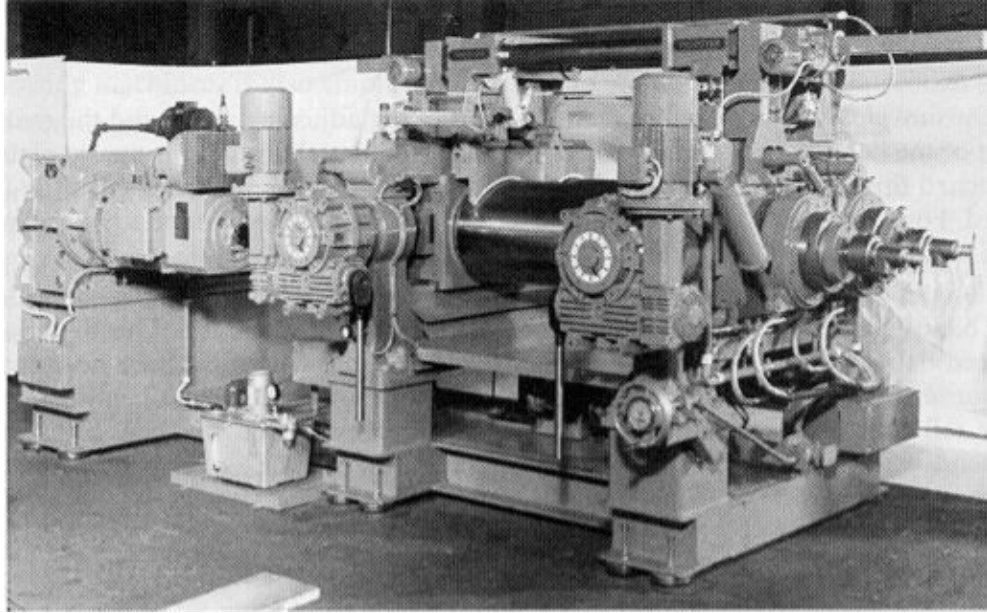
A modern keverékgyártási technológiáknál gyakran alkalmazzák a többlépcsős keverést. Először mesterkeveréket állítanak elő, amelyet lap vagy granulátum formában tárolnak. Ezt a mesterkeveréket keverik azután össze a még hiányzó adalékanyagokkal. Napjainkban a teljes keverési folyamatot – a bálák tárolásától az adalékanyagok automatikus bemérésén keresztül a keverékeknek a feldolgozó gépekhez való eljuttatásáig – számítógépes rendszer felügyeli.

#### 13.2.1.1 Hengerszékek

A kaucsukot az adalékanyagokkal korábban szinte kizárólag hengerszéken dolgozták fel. Ma már (főleg a nagyiparban) sokkal gyakoribb a zártkeverők (vagy más néven belsőkeverők) használata. A hengerszék alapelvét már a 6.2 fejezetben bemutattuk. Egy gumiipari hengerszék vázlatos szerkezeti felépítését a 13.3 ábrán, míg fotóját a 13.4 ábrán láthatjuk.



13.3 ábra: Hengersizék szerkezeti vázlata [13.1]



**13.4 ábra:**Gumiipari hengerszék (450 mm átmérőjű, 1100 mm hosszú hengerek) [13.3]

A hengerszéknek ma is fontos szerep jut, mint követő-berendezések a belső keverők után, vagy mint előkészítő, keverék-felmelegítő berendezések a kalanderek előtt. Szintén fontos szerepük van a természetes kaucsuk (NR) molekulatömegének beállításában, az ún. masztikálásban. (A természetes kaucsuk az optimálisnál nagyobb molekulatömegű polimer. A hosszú polimerláncokat mechanikai munkával, a kaucsuk „gyúrásával” tördelik rövidebb részekre. A folyamat elég bonyolult, a nyírásen kívül szerepe van benne a levegő oxigénjének és a hőmérsékletnek is.) Ma is hengerszéken állítják elő az egyébként nehezen kezelhető – pl. ragadós – gumikeverékeket.

A hengerszék két egymással párhuzamos, vízszintes helyzetű hengerből áll. A hengerek tengelyének csapágyazását acélöntvény keret tartja. A két henger eltérő fordulatszámmal forog egymással szemben.

A hengerek belül üregek, itt oldható meg fűtésük vagy hűtésük. Az egyenletes felületi hőmérséklet biztosításához a hengerek falvastagságának is egyenletesnek kell lennie. Ellentétben a hőre lágyuló polimerek feldolgozásával, a hengereket csak ritkán kell fűteni (többnyire induláskor). A fűtést gőzzel, forróvízzel, vagy zárt rendszerű fűtőközeg áramoltatással oldják meg. A gőzfűtés hátránya, hogy a hőmérsékletet nem lehet szabályozni. Laboratóriumi méretű hengerszékknél használnak jól szabályozható elektromos fűtést is.

A hengerek hűtése nagyon fontos, mivel a nagyviskozitású kaucsuk keverékek feldolgozásakor sok hő keletkezik. Hűtésre legtöbbször vizet alkalmaznak.

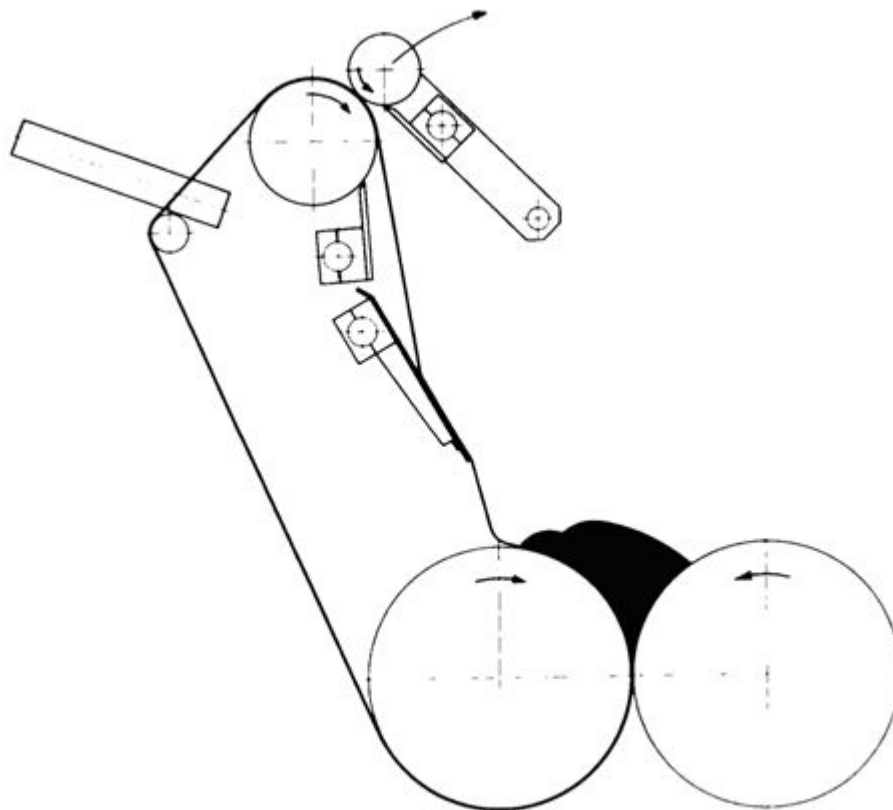
A hengereket hajtóművön keresztül elektromotor hajtja meg. A két hengerhez kapcsolódó fogaskerekek fogszám viszonya határozza meg a *frikciót* (a két henger kerületi sebességének arányát). Nagyobb frikció fokozza a keverés, gyúrás hatékonyságát. Egyes üzemi hengerszékknél két fogaskerék-párt használnak; az egyiknél szinkronban forognak a hengerek (nincs frikció), a másikonál eltérő a kerületi sebesség. A frikció mértéke a hengerszék típusától függően 1,05–3,5 között lehet.

Míndegyik hengerszéknel oldalt terelőlemezek vannak, amelyek megakadályozzák, hogy a keverék a hengerek közötti résből a csapágyazáshoz juthasson.

A hengerek közötti rés méretét mechanikusan vagy elektromotorral lehet változtatni. A hengerek túl nagy nyomás miatti sérülésének, törésének megakadályozására az állítócsavar fej részéhez egy adott nyomásnál elnyírózó tárcsát helyeznek. Amikor a hengerek közötti nyomás nagyobb lesz a megengedettnél, a tárcsa elnyíródik, így a hengerek közötti rés megnövekszik, a nyomás pedig lecsökken.

A hengerek alatt tálcát helyeznek el a lehulló anyagdarabok felfogására. A keverés kezdetén, amikor az anyagból még nem alakul ki palást, elég sok anyag lehullik. Ezt a hengerszékét üzemeltető munkás mindig visszajuttatja a hengerek közötti részbe. Több próbálkozás is történt ennek a műveletnek az automatizálására (a keverék minősége nagymértékben függött a munkás odafigyelésétől), a legismertebb az ún Stockblender, 13.5 ábra.

A Stockblender a hengerszék felett elhelyezkedő segéd hengerpárból, és két váltakozó irányú (alternáló) mozgást végző terelőgörgőből áll. A keverés elején az első hengeren palástot képeznek az anyagból, amelyet azután levágnak, és átvezetnek a Stockblender segédhengerei közötti résen. A segédhenger hajtása biztosítja a palást mozgását. A palást a terelőgörgők alternáló mozgása miatt ide-oda „vándorol” a főhengerek közötti rés hossza mentén, így jóval intenzívebben keveredik, és nincs szükség az operátor odafigyelésére sem. A módszer előnye még, hogy javul a keverék hűtése, nem ég be, és nem tud holt réteg kialakulni a hengerek felületén.



**13.5 ábra:**Hengerszék Stockblenderrel [13.3]

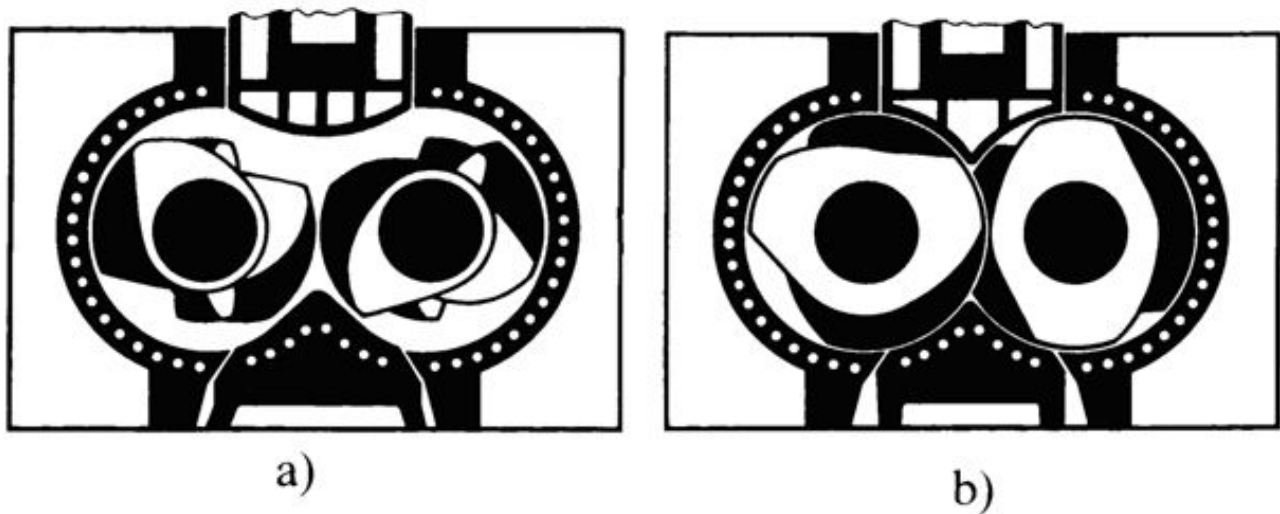
A hengerek között lejátszódó áramlást a 7.6 ábra, a szakállképződést a 7.4 ábra mutatja be, míg a hengerek között ható erőket a (7.9) egyenlet szerint lehet meghatározni.

### 13.2.1.2 Zártkeverők

A gumigyárakban, különösen az autó abroncs gyártásban, a zártkeverők, vagy belső keverők, ld. 6.6 és 6.7 ábrák, szinte teljesen kiszorították a hengerszékeket. A zártkeverőkben a keverést forgó rotorok, gyúrókarok végzik. Előnyük az egyenletesebb keverékminőség és a nagyobb termelékenység. További előnyt jelent a zárt tér a port tartalmazó keverékeknél (a gumiiparban sok keverék aktív töltőanyaga a korom), és nem utolsósorban a kisebb baleseti veszély. Beruházási és üzemeltetési költségeik is általában kedvezőbbek, mint a hengerszékeké. Egyedüli hátrányuk, hogy a hengerszéken elérhető adalékanyag diszpergálást nem mindig lehet velük megvalósítani.

A zártkeverők, ahogy nevük is mutatja, zárt és hűtéssel ellátott gyúrókamrából, és a benne forgó két rotorból állnak. A gyúrókamra metszete vízszintes helyzetű 8-asra hasonlít, 13.6 ábra.

A rotorok fordulatszáma a legtöbb konstrukciónál eltérő (frikció), de léteznek frikció nélküli zártkeverők is. Az iparban a 13.6 ábrán látható két eltérő rotorkonstrukció terjedt el. A rotorkonstrukciónak döntő szerepe van az elérhető keverési, diszpergálási hatékonyságban.



**13.6 ábra:**Zártkeverők metszetei [13.3] a) érintőleges (tangenciális) és b) egymásba hatoló elrendezés

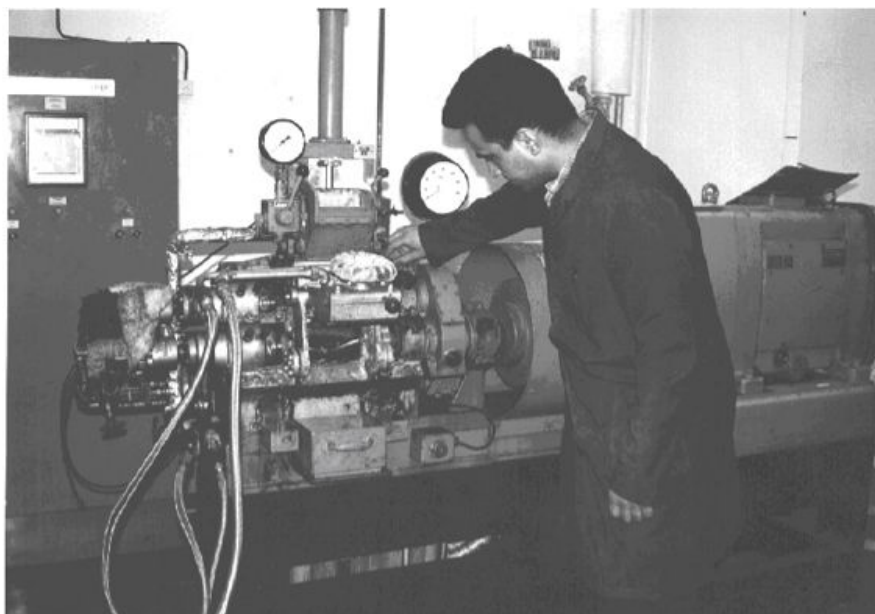
A tangenciális rendszernél a rotorok „taréjos” kiképzésűek, általában eltérő sebességgel forognak. A rotorszárnyak által leírt körívek között állandó réstávolság van. A tangenciális rendszernél a következő fő áramlásokat lehet megkülönböztetni:

- A rotorszárnyak és a kamra fala között van a legnagyobb nyírású zóna, itt a *résáramlás* alakul ki.
- A rotorok közötti térben *forgó áramlás* jön létre. A por alakú adalékanyagok főként itt keverednek, diszpergálódnak el a polimerben. Ez az áramlás hasonló a hengerszékeknél, illetve kalandereknél kialakuló szakáll áramlási viszonyaihoz. (7.4 ábra)

- A *tengelyirányú* vagy *axiális* áramlás a rotorok csavart felülete miatt alakul ki (hasonlóan az extrudereknel kialakuló áramláshoz, ld. 8. fejezet)

Az egymásba hatoló elrendezésnél a rotorok azonos fordulatszámmal forognak. A legnagyobb a nyírás a rotorok közötti résben, a diszpergálási, keveredési folyamatok itt játszódnak le. Ennél az elrendezésnél az anyag nagyobb hányada tartózkodik a nagynyírású zónában, mint a tangenciális elrendezésnél, ezért intenzívebb keveredést biztosít. A rotorok felülete nagyobb, ami jobb hűtést tesz lehetővé, ezáltal kb. 30–40 %-al gyorsabbá tehető a keverési folyamat.

A modern zártkeverőknél az anyag keverőtérbe juttatásához, és a keverés ideje alatt a kamra lezárásához pneumatikus működtetésű hengert használnak, 13.7 és 6.6.c ábra. A pneumatikus henger által kifejtett nyomás 2–12 bar közötti érték. A magasabb nyomás (6–12 bar) kifejtésére alkalmas keverőket nagynyomású, ill. nagy hatékonyságú keverőknek hívják.

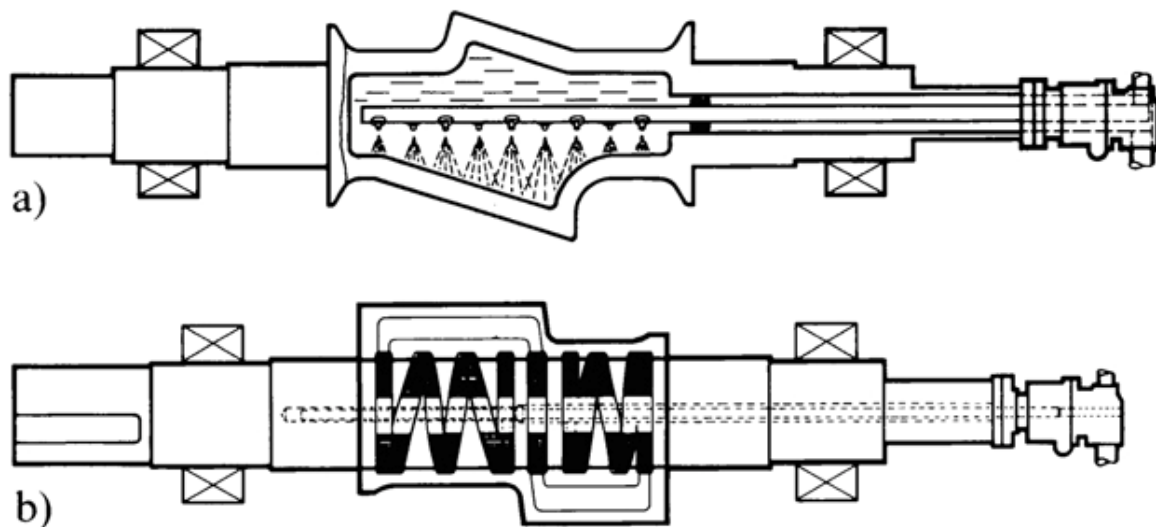


**13.7 ábra:**Zártkeverő (Werner-Pfleiderer)

A gyúrókamra belső felületét kopásálló anyagból készítik. A nagy hatékonyságú keverőknél a folyékony adalékanyagok (pl. lágyítók) keverőtérbe juttatásáról külön injektoros megoldással gondoskodnak.

A nagy erők közlésére alkalmas, belül üreges kiképzésű gyúrókarok, vagy rotorok, anyaga acélöntvény, amelynek felületét szintén kemény, kopásálló bevonattal látják el. (13.8 ábra). A rotorok átmérő/hossz ( $d/l$ ) viszonya 1:1,4 és 1:1.7 között van.

A belsőkeverőket a *teljes*, illetve a *hasznos térfogat* alapján lehet osztályozni. Az üzemi berendezéseknél a teljes térfogat néhány litertől az 1 m<sup>3</sup> gépóriásokig terjed. A hasznos térfogat kisebb a teljes térfogatnál (általában annak 70 %-a körüli); új keverék esetén kísérleti úton határozzák meg. Az optimális hasznos térfogat az a térfogat, amelynél a keverék tulajdonságai a többi paraméter változatlanul hagyása mellett a legjobbak.



**13.8 ábra:** Üreges kiképzésű gyúrókarok [13.3] a) permetező hűtés, b) körkörös (vagy spirál) hűtés

A rotorokat elektromotorok hajtják, sebességcsökkentő hajtóművön keresztül. A rotor kiképzésétől és sebességétől függően 8–12 kW motorteljesítmény szükséges minden liter hasznos térfogatra. Ez 2000 kW körüli motorteljesítmény igényt jelent pl. egy 450 l-es zártkeverőnél.

A rotorok gyúrókamra falán átvezetett tengelyénél jó zárást kell biztosítani, nehogy kenőolaj vagy zsír jusson a keverőtérbe. Erre különböző csúszógyűrűs megoldásokat alkalmaznak.

Ahogy korábban már említettük, a zártkeverőket intenzíven kell hűteni. A legmodernebb konstrukciónál hűtőközeg csatornákat képeznek ki a kamra falában és a rotorban is, amelyben a hűtőközeg turbulensen áramlik, így megnő az egységnyi idő alatt elvonható hőmennyiség.

A teljes keverékkészítési idő meglehetősen rövid, 90–180 másodperc. Ez azt jelenti, hogy a komponenseket is a lehető leggyorsabban kell tudni beadagolni, valamint a kész keveréket is gyorsan kell tudni eltávolítani a keverőből.

A nagy tömegű keverékalkotókat (gumi, töltőanyagok, lágyító) általában automatikus, számítógép vezérlésű mérlegek adagolják a keverőbe. A vulkanizáláshoz szükséges kis tömegű adalékokat ma is gyakran manuálisan adagolják, de egyre jobban terjednek itt is az emberi tényezőt kiküszöbölő megoldások.

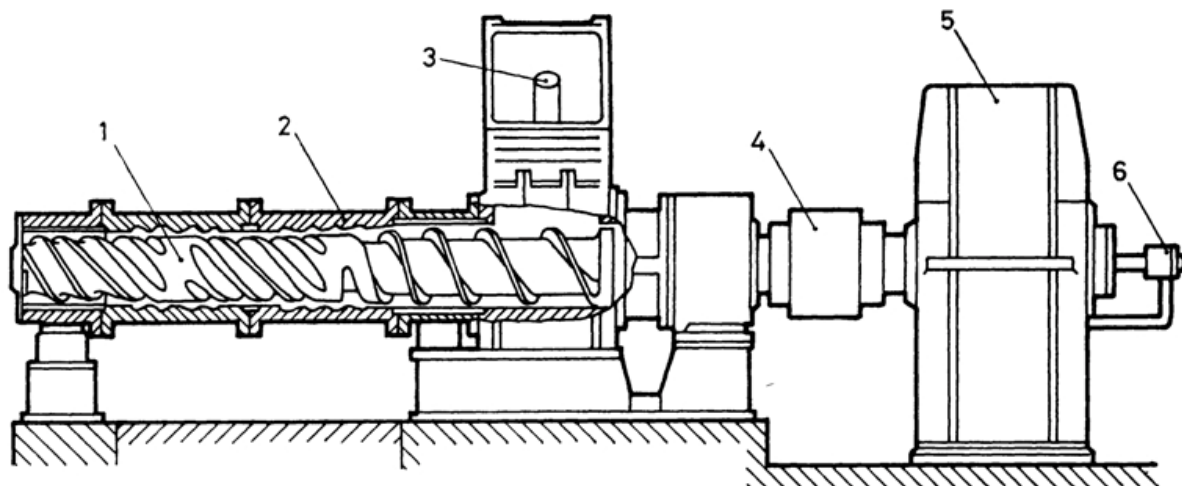
### 13.2.1.3 Folyamatos működésű keverők

Az elmúlt években több folyamatos keverőtípust is kifejlesztettek, azonban a feldolgozandó anyagok csak kevésbé alkalmasak a folyamatos feldolgozásra. A gumikeverékek nem ritkán 20, különböző megjelenési formájú alkotóelemet is tartalmaznak, ezeknek kellő pontosságú, folyamatos bevitele alig megoldható feladatot jelent. Speciális keverőcsigákkal mesterkeverékek folyamatos összekeverése viszont jól megoldható. Az egyik mesterkeverék kaucsukot és töltőanyagot tartalmaz, a másik mesterkeverék pedig kaucsukot és a többi segédanyagot.



Másik módszer szerint a kaucsuk és a töltőanyag felületén kötik meg a többi segédanyagot, vegyszert. A felületükön megfelelő mennyiségű segédanyagot tartalmazó kaucsukot és töltőanyagot juttatják a folyamatos keverőbe.

A folyamatos működésű keverők speciális kialakítású *extruderek*. A csiga geometriája a minél jobb diszpergálást, keverést szolgálja. Egyes típusoknál a henger fala sem sima, mint a hőre lágyuló polimerek feldolgozására használt extrudereknél, hanem menetes, mint a csiga. A menetek térfogata egymással ellentétesen változik, ezért igen intenzív keverő hatás érhető el (Transfermix, 13.9 ábra).

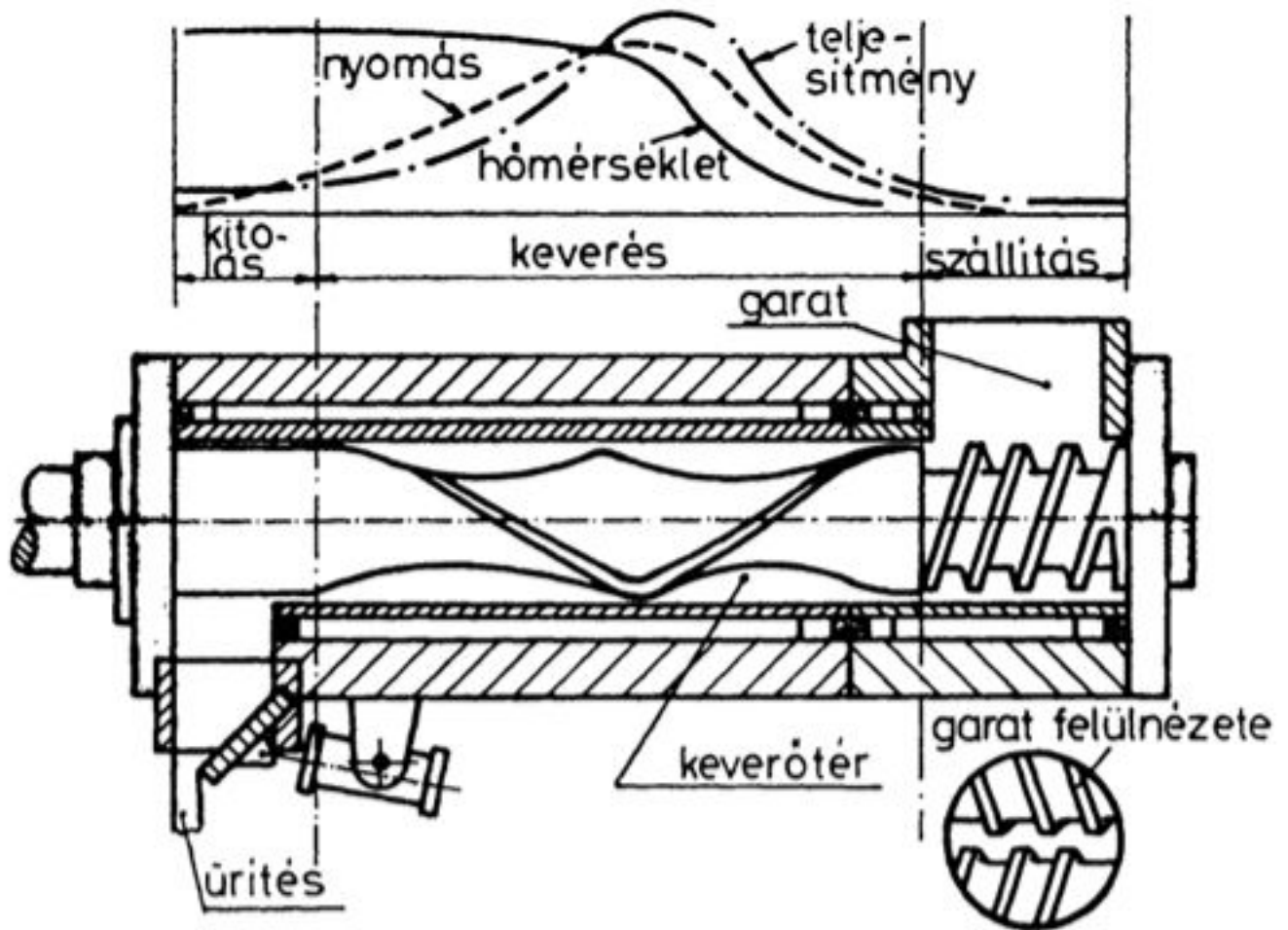


**13.9 ábra:**Werner-Pfleider gyártmányú Transfermix folyamatos keverőextruder vázolata 1) csiga, 2) henger, 3) adagológarat, 4) tengelykapcsoló, 5) hajtómű, 6) csigahűtés csatlakozója [13.1]

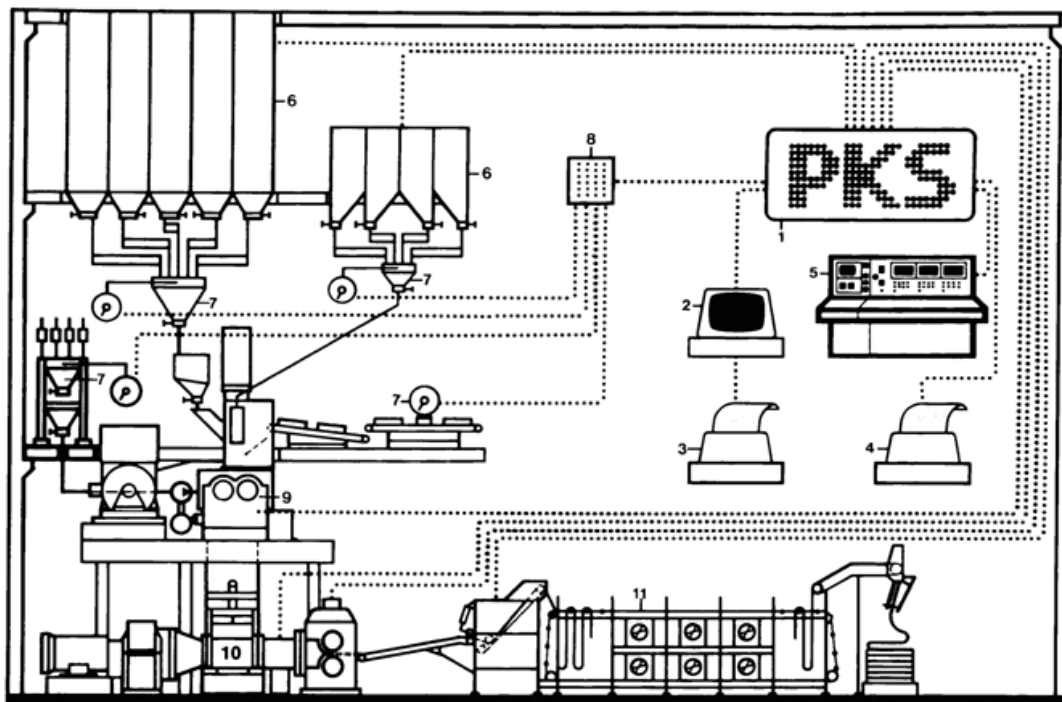
A kétcsigás extruderek keverési, diszpergálási hatékonysága általában jobb, mint az egycsigás változatoké. Ilyen kialakítású folyamatos keverőgépeket is kifejlesztettek, 13.10 ábra, ahol a csiga kialakítása a hagyományos extrudercsiga és a tangenciális rendszerű zártkeverő rotor kombinációja.

### 13.2.1.4 Keverősorok

A nagyobb gumigyárakban a keverősorok működtetése nagymértékben automatizált, számítógéppel vezérelt folyamat. Az anyagok tárolása, bemérése (a kaucsuk és a nagyon kis mennyiségben alkalmazott vulkanizálási segédanyagok kivételével) automatizált. A keverősorok egyes berendezéseinek összehangolt működtetése a keverékgyártás megbízhatóságának egyik alapfeltétele. A 13.11 ábrán számítógéppel (és mikroprocesszorokkal) vezérelt teljes keverőüzem vázolata látható.



13.10 ábra: Farrel FCM kétszigás folyamatos keverő működési elve [13.1]



**13.11 ábra:** Számítógép vezérlésű keverőüzem vázlata [13.3] 1) rendszervezérlő számítógép (PKS=Prozess Kontrol System), 2) képernyő és adatbeviteli egység, 3) és 4) adat – és műveletkiíró printerek, 5) nagy hatékonyságú belső keverő vezérlőpultja, 6) tárolótartályok (silók), 7) kaucsuk, korom, lágyító és egyéb adalékok bemérése, 8) bemérés-vezérlő, 9) nagy hatékonyságú belső keverő, 10) lemez húzó (Roller-die) extruder, 11) hűtő, lehúzó, daraboló és rakodó berendezések

### 13.2.2 Kalanderezés

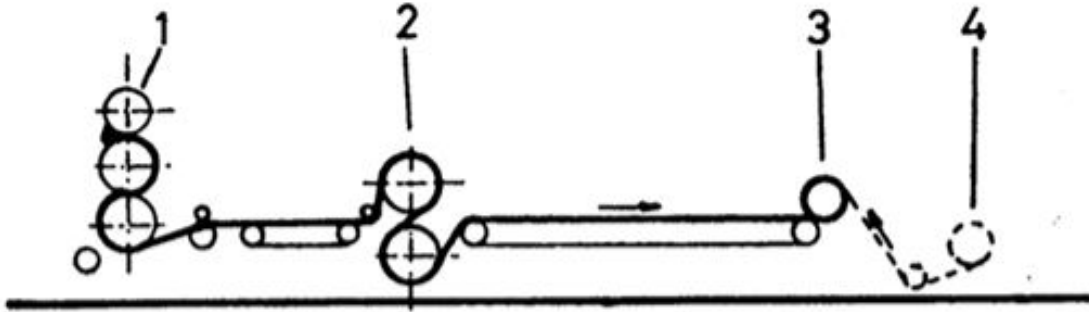
*Kalanderezéssel* gumilemezeket és gumival bevont textiltermékeket állítanak elő. A gumiipari kalanderezés berendezései és műveletei hasonlítanak a hőre lágyuló polimerek kalanderezésénél megismertekhez (ld. 7. fejezet), azonban néhány különbségre fel kell hívni a figyelmet. Az egyik legfontosabb különbség, hogy a *gumitermékeket lényegesen alacsonyabb* hőmérsékleten kell feldolgozni a „beégés” (idő előtti térhálósodás) veszélye miatt. Alacsony hőmérsékleten a polimerek viszkozitása nagyobb, ezért a gumiipari kalandereknél még nagyobb erőhatásokra lehet számítani, mint a hőre lágyuló polimerek feldolgozásánál, ami megfelelően masszív gépkialakítást igényel.

A kalanderek „melegtetésű” berendezések, ezért a keverő és a kalander között egy, nagyteljesítményű kalandereknél kettő, vagy három hengerszékot helyeznek el. A kalander egyenletesebben etethető két vagy három keskenyebb és vékonyabb, mint egyetlen széles és vastag keverécsíkkal.

Hengerszékeken kívül extrudereket is alkalmaznak a kalanderek etetésére. Az extruderes etetés előnye, hogy jobban automatizálható, szabályozható, és kisebb a munkaerő-szükséglete. A hengerszékről vagy extruderről szállítószalag viszi a gumicsíkot a kalanderhez. Külön berendezéssel gondoskodnak arról, hogy a kalander rés teljes hosszában egyenletes legyen a betáplált anyag mennyisége.

### 13.2.2.1 Lemezhúzás

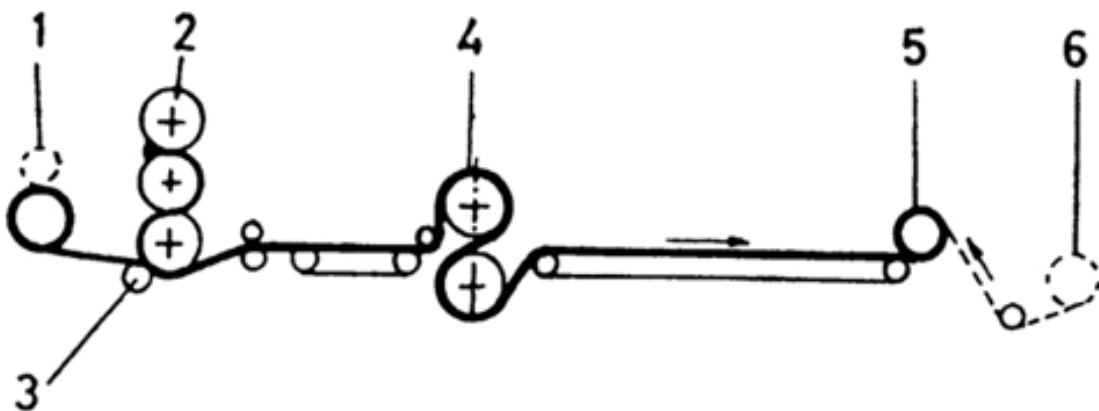
Lemezhúzásra 3 vagy 4 hengeres kalandereket használnak a gumiiparban. A kalanderhengerekről lekerülő lemezt hűtik, és a menetek összetapadásának megakadályozása céljából polietilén fóliával vagy textil kísérőszövetrel együtt tekercselik fel, illetve „porolják” (cink-sztearát port szórnak rá). A kalanderezett lemezek vastagsága 0.1–2 mm közötti lehet, vastagabb lemezeket nem lehet pórusmentesen előállítani. A 13.12 ábrán három hengeres lemezhúzó kalandersor látható.



**13.12 ábra:**Három hengeres lemezhúzó kalander [13.1] 1) I-kalander, 2) hűtődobok, 3) feltekereslés, 4) kísérőszövet (fólia)

A kalander hőmérséklete és a hengerek sebességaránya (a frikció) az a két paraméter, amelyet az operátor változtatni tud. A gumikeverékek nem mindig követik a polimereknél megismert kalanderezési törvényszerűségeket, pl. nem mennek át a melegebb hengerre. Az ilyen, ún. hidegen tapadó keverékek kalanderezésénél a frikciót lehet megnövelni, vagy csökkenő hőprogramot kell alkalmazni.

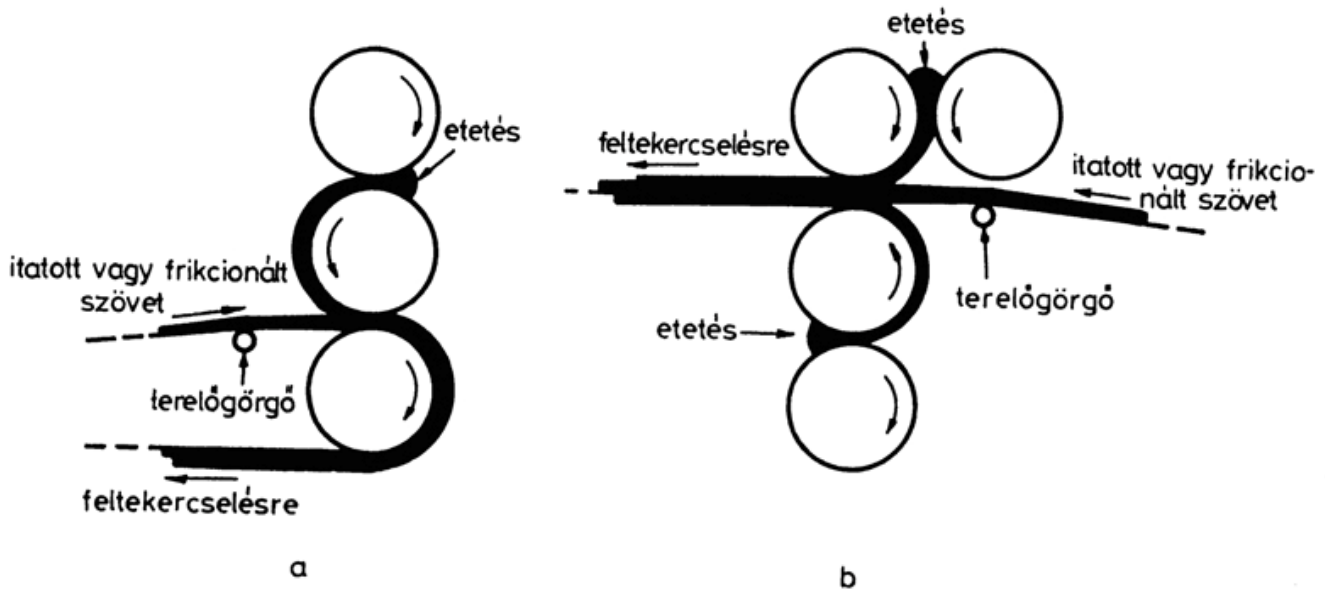
Jó minőségű, hólyagmentes, 2 mm-nél vastagabb lemezeket *dublírozással, kettőzéssel* állítanak elő. Dublírozásnál a korábban előállított és feltekereselt lemezt az újonnan kalanderezett lemezzel összepréselik, „összevasalják”, 13.13 ábra.



**13.13 ábra:**Dublírozás [13.1] 1) korábban készült lemez, 2) kalander a 3) dublírhengerral, 4) hűtődobok, 5) és 6) feltekereslés kísérőszövetrel

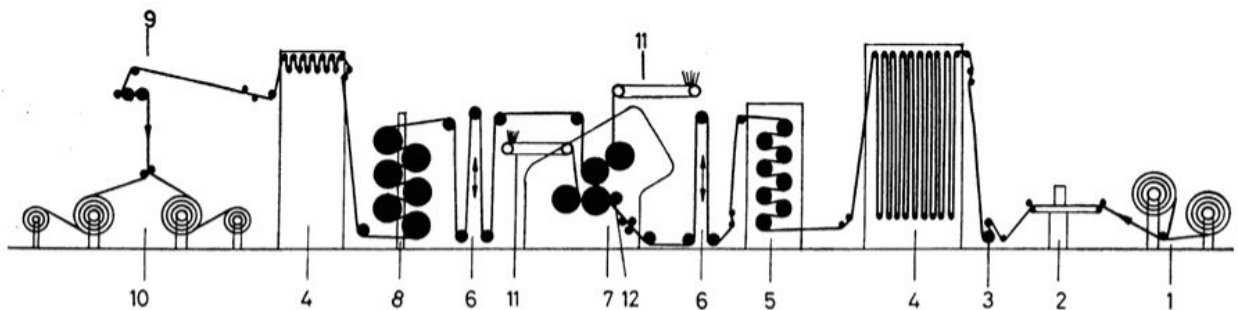
### 13.2.2.2 Szövetfelpréselés

A szövettel erősített gumitermékek igen elterjedtek, pl. a gumiabroncs-gyártásban, hevederek előállításánál. A szövet egyik, vagy mindkét oldalára préselhetnek fel gumiréteget. Kétoldalas felpréselés 3 hengeres kalanderral csak két lépésben oldható meg, 4 hengeressel egy lépésben is, 13.14 ábra.



13.14 ábra: Szövetfelpréselés 3 és 4 hengeres kalanderen [13.1]

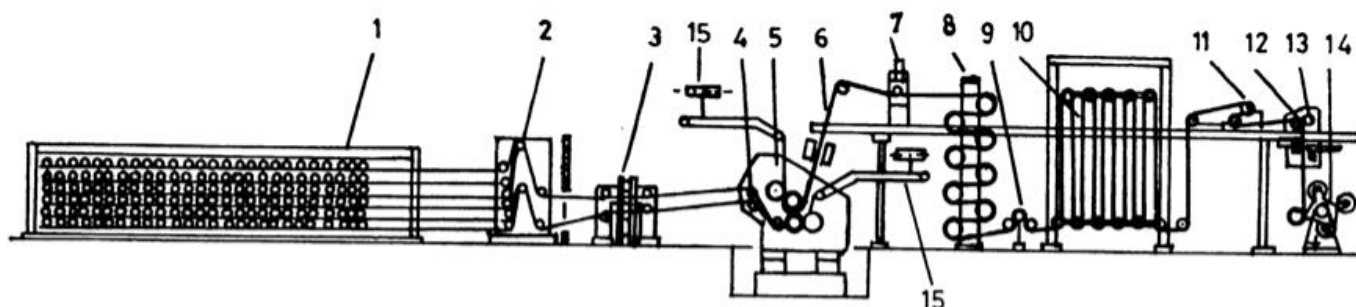
Szövetfelpréselő kalandersor vázlatos elrendezése látható a 13.15 ábrán. A kalander előtt a szövetleeresztő és a végtelenítő prés található. A kalander folyamatos működéséhez a kifutó szövet-véget a következő tekeres kezdetével össze kell kapcsolni, ezt a célt szolgálja a végtelenítő prés. A végtelenítés műveleti ideje alatt a szövet folyamatos kalanderbe jutásáról a kompenzátor gondoskodik. A szövet előmelegítés után, kellő mértékben előfeszítve jut el a kalanderre, ahol gumiréteggel vonják be. A gumirozott szövetet hűtik és feltekerceselik.



13.15 ábra: Kétoldalas szövetfelpréselő kalandersor [13.1] 1) szövetleeresztő, 2) végtelenítő prés, 3), 9) szövettovábbító, 4) kompenzátor, 5) szövet előmelegítő dobok, 6) feszítésszabályozás, 7) Z-kalander 8) hűtődobok, 10) feltekerés, 11) etetőheveder, 12) nyomóhenger

A gépjárműabroncs gyártásnál (acél radiál abroncsok) szükséges acélkordra is gumiréteget kell felvinni. A lényeges különbség a szövet és az acélkord között, hogy a szövetnél vetülékszálak tartják egyben az anyagot, míg az acélkordnál

egyenként megvezetett szálakat vezetnek a kalander hengerei közé. A felpréselés után a gumiréteg tartja egyben az acélkordszálakat. A 13.16 ábrán négyhengeres kalanderrel kivitelezett acélkordfelpréselő sor vázlatja látható.



**13.16 ábra:** Acélkord felpréselő sor [13.1] 1) orsóállvány, 2) feszítőgörgők, 3) végtelenítőprés, 4) szálvezető henger, 5) kalander, 6) vastagságmérő, 7) feszítésmérő, 8) hűtődobok, 9), 11) továbbítómű, 10) kompenzátor, 12) húzó és megfogó egység, 13) vágó berendezés, 14) feltekerceselő (kísérő szövet leeresztővel), 15) etetőszalag

### 13.2.3 Gumitermékek extrudálása

Extrudálással egyrészt lemezeket, csöveket és egyéb profilokat állítanak elő; másrészt kábelek, tömlők bevonására is ezt az eljárást használják. A gumiipari extruderek konstrukciója több ponton is eltér a polimerfeldolgozásnál használatos extruderekétől. Az eltérések fő oka, hogy a gumi nem olvad meg, csak meglágyul, és a gumikeveréket lényegesen alacsonyabb hőmérsékleten lehet csak feldolgozni a beégés veszélye miatt.

A gumi meglágyításához szükséges hőenergia túlnyomó részét az extruder csigája szolgáltatja, a viszkózus anyagban hővé alakuló mechanikai munka révén (ld. adiabatikus üzemmód, 8.17 ábra, 208. old.). Az extruder hengerét a gumiiparban legtöbbször elégséges forró vízzel fűteni.

A gumiipari extrudereket gumicsíkokkal etetik (eltérően a műanyagipari extruderektől, ahol az extruder etetése granulátummal, vagy ritkábban porral történik). *Melegetetés*nél hengersizéken előállított gumicsíkot, *hidegetetés*nél szobahőmérsékletű, puhítatlan, csíkokra vágott keveréket használnak az extruder etetésére. A két megoldáshoz eltérő konstrukciójú extruderek tartoznak.

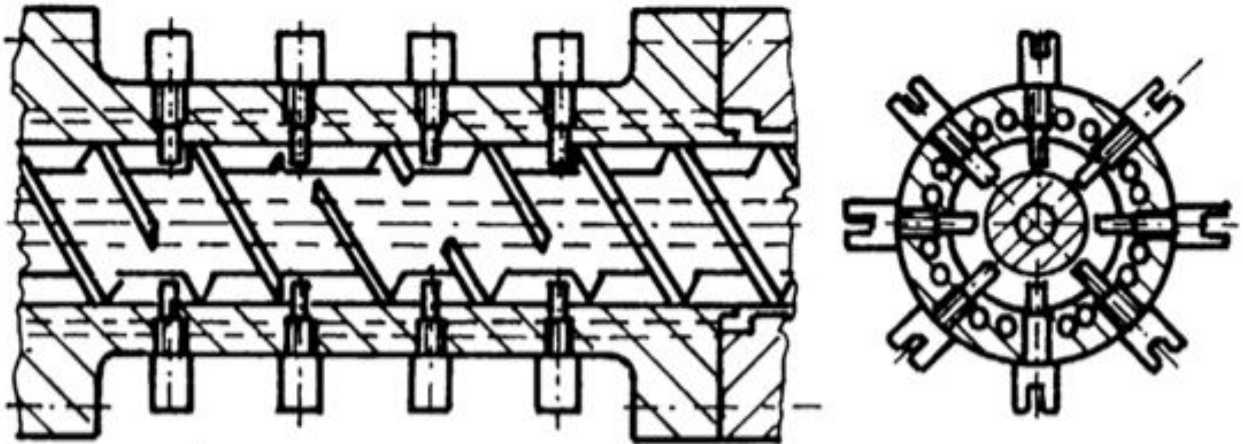
A gumiipari extrudercsiga geometriai kialakítása is eltér a polimerfeldolgozásnál használttól. A csiga kompresszióviszonya 1:1,1 és 1:1,4 közötti, ami jóval kisebb a műanyagiparban elterjedt 1:4 kompresszióviszonynál (az extrudercsiga geometriáját ld. a 8. fejezetben). A gumiipari extrudercsiga  $L/D$  viszonya is kisebb (főleg a melegetetésű extrudereknél), a csigák „zömökebbek” a műanyagfeldolgozásban használatos társaiknál. Melegetetésű extrudereknél az  $L/D$  arány 3:1 és 6:1 közötti érték, hidegetetésű extrudereknél elérheti a 20:1 arányt is.

A melegetetésű extruderek csigái többnyire kétbekezdésűek, ezzel elkerülhető az egy bekezdésű, nagy menetmélységű csigáknál gyakran fellépő lüktető anyagáram. A hidegetetésű extrudereknél használják a korábban bemutatott Transfermix (13.9 ábra) csigakonstrukciót, de a legelterjedtebb a Maillefer csiga (ld. 8. fejezet). A Maillefer konstrukció előnyei:

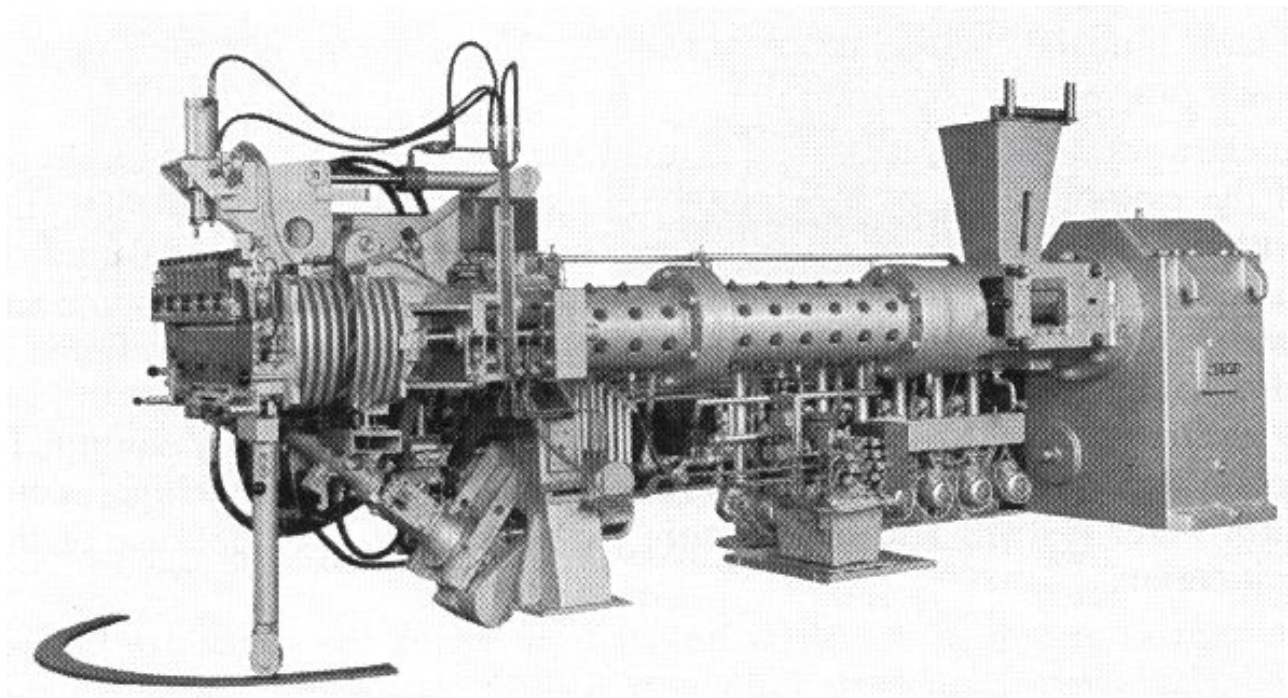
- alacsony hőmérsékleten is nagy a szállítóteljesítménye,
- alacsony és magas fordulatszámon is jó a diszpergáló (keverő) képessége,
- nem érzékeny a keverékminőség váltásra,
- öntisztuló.

Az utóbbi néhány évtizedben a hideg- és melegtetetésű extruderek versengésében többször megfordult a trend; napjainkban úgy tűnik, a különleges konstrukciójú hidegetetésű extruderek iránt nő leginkább az érdeklődés, még a korábban a melegtetetésű változatot preferáló gumiabroncs-gyártás területén is. Ennek egyik legjelentősebb képviselője a *QSM-extruder*, 13.17 és 13.18 ábrák.

A QSM a német *Querstrom-Mischer* = keresztáramú keverő rövidítése, a csigacsatornában kialakuló áramlási viszonyokra utal. A QSM (vagy *Stift*) extruder hengerében a csigamenetek közé tűskék nyúlnak, amelyek megtörik az áramlást, ezzel igen jó diszperziót, keveredést hoznak létre, és a hőmérsékletkülönbségek kiegyenlítődsét is elősegítik (diszperzív és *disztributív* keverés).



13.17 ábra: QSM-extruder csiga és henger kialakítása [13.1]

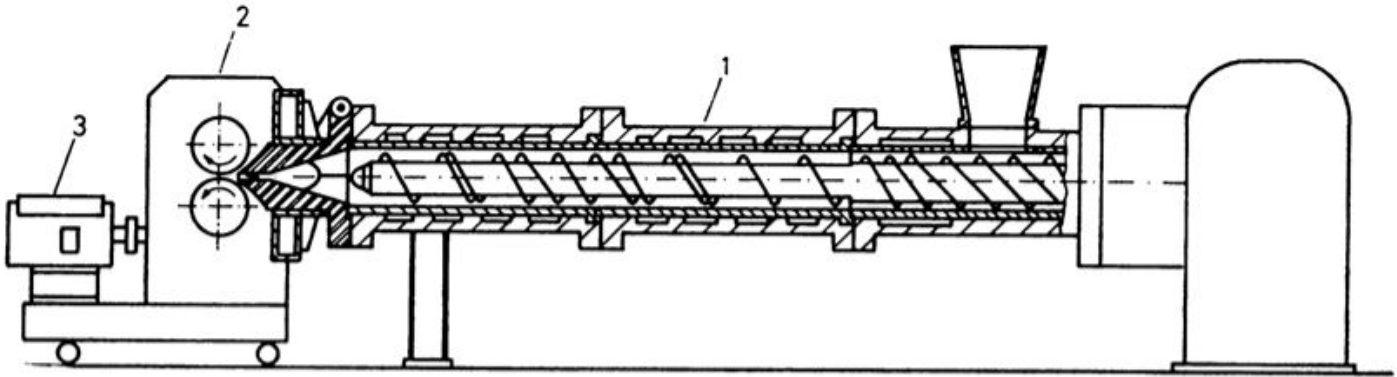


**13.18 ábra:**Gumiabroncs gyártásnál használt QSM extruder [13.3]

A polimerfeldolgozásnál is találkoztunk vákuumozható csigákkal. A gumifeldolgozásnál a *vákuum extruderek*nek nagy jelentőségük van a folyamatos, nyomás nélküli vulkanizálás miatt. A folyamatos vulkanizálás termelékeny módszer, de a keverékben mindig jelen levő levegő és nedvesség pórusossá teheti a gumiterméket. A gumikeverékekből, azok nagyobb viszkozitása miatt, nehezebb eltávolítani a gáznemű anyagokat, mint a polimerekből. Tökéletes gáz eltávolítás csak akkor érhető el, ha a csiga vákuumzónájában az anyag folyamatosan leválk a csigáról, így állandóan új és új felület képződik a gumikeverékből. Ez a folyamatosan megújuló felület csak egy szűk hőmérsékleti sávban tartható fenn, ezért az ilyen extrudereknél a szokásosnál jóval pontosabban kell tudni szabályozni a henger és a csiga hőmérsékletét, különösen a vákuum-zónában.

A gumiextrudálás szerszámai hasonlóak a polimerfeldolgozásnál használatosakhoz, bár van néhány különleges kialakítású, csak itt elterjedt konstrukció is, pl. a kéthengeres kalanderrel egybeépített Roller-Head berendezés, 13.19 ábra. A szerszámot általában nem szükséges fűteni (kivéve az indulást, amikor gázlánggal előmelegítik).





13.19 ábra: Roller-Head extruder [13.1] 1) hidegetetésű extruder, 2) kéthengeres kalander, 3) kalander hajtás

## 13.2.4 Oldás, itatás, kenés

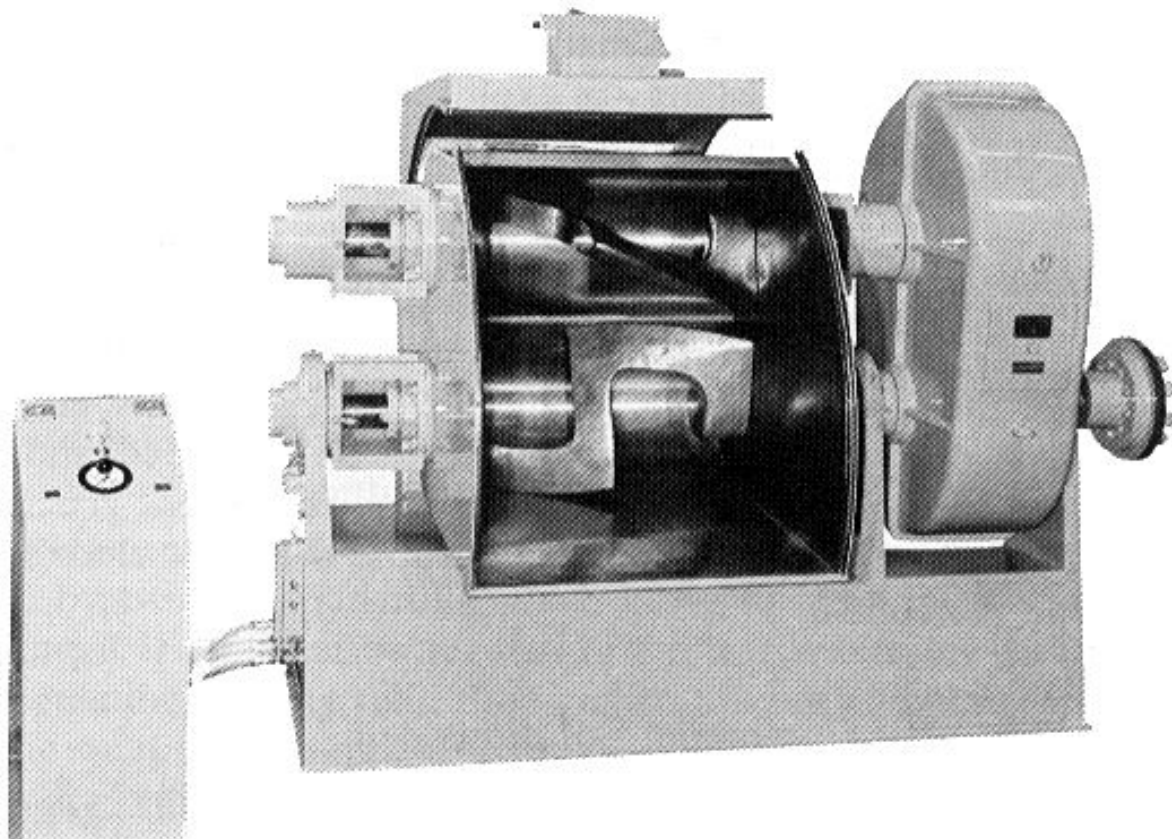
### 13.2.4.1 Oldás

A kaucsukok oldása, és az oldat szövetítatásra, szövetkenésre, illetve mártott termékek készítésére való felhasználása az iparilag alkalmazott első műveletek közé tartozik. Oldásra először terpentint, napjainkban pedig benzint használnak. A benzol jobban oldja a kaucsukot, de erősen mérgező hatása miatt csak ott alkalmazzák, ahol feltétlenül szükséges, mert valamelyik komponens nem oldódik benzinben. Klórozott szénhidrogének is jól oldják a természetes és mesterséges kaucsukokat, de ezek is mérgezőek. Akkor használják őket, ha az oldat nem lehet éghető. Benzinben nem oldódó szintetikus kaucsukok oldására gyakran használnak ketonokat, észtereket, valamint alkoholokat.

Napjainkban a gyárak egészségügyi és környezetvédelmi okok miatt igyekeznek a szerves oldószerek használatát minimálisra csökkenteni. Helyettük vizes diszperziókat, *latexeket* használnak.

A feldolgozhatóság szempontjából fontos a kaucsuk molekulatömegének helyes beállítása. Kis molekulatömegű kaucsuk oldata hígfolyós, nagy molekulatömegűé túlzottan viszkózus, kevésbé duzzadt részecskéket is tartalmazhat.

A kaucsukkeverékek oldását forgólapátos, vagy Z-karú oldógépekben végzik, 13.20 ábra. A keveréket előtte hengershéken kb. 3 mm vastag lemezzé kihúzzák, és a lemezdarabokat melegen helyezik az oldógépbe. A meleg keverék gyorsabban, és kevesebb erőfelvétellel oldódik. Az oldógépbe először csak az oldószer 1/5-ét, 1/3-át teszik bele, hogy kezdetben intenzív gyúrást lehessen megvalósítani. A keverést addig kell folytatni, míg az anyag homogén, csomómentes nem lesz. Az oldószer többi részét ezután kis adagokban keverik hozzá ehhez a masszához.



**13.20 ábra:**Z-karú oldógép [13.3]

Az oldat koncentrációját a felhasználás határozza meg, általában 10–40 % közötti értékeket szokásos előállítani. Felhasználás előtt a kész oldatot lezárt edényben pihentetik, vagy vákuum alá helyezik, hogy a belekevert levegő eltávozhasson (buborékmentes legyen).

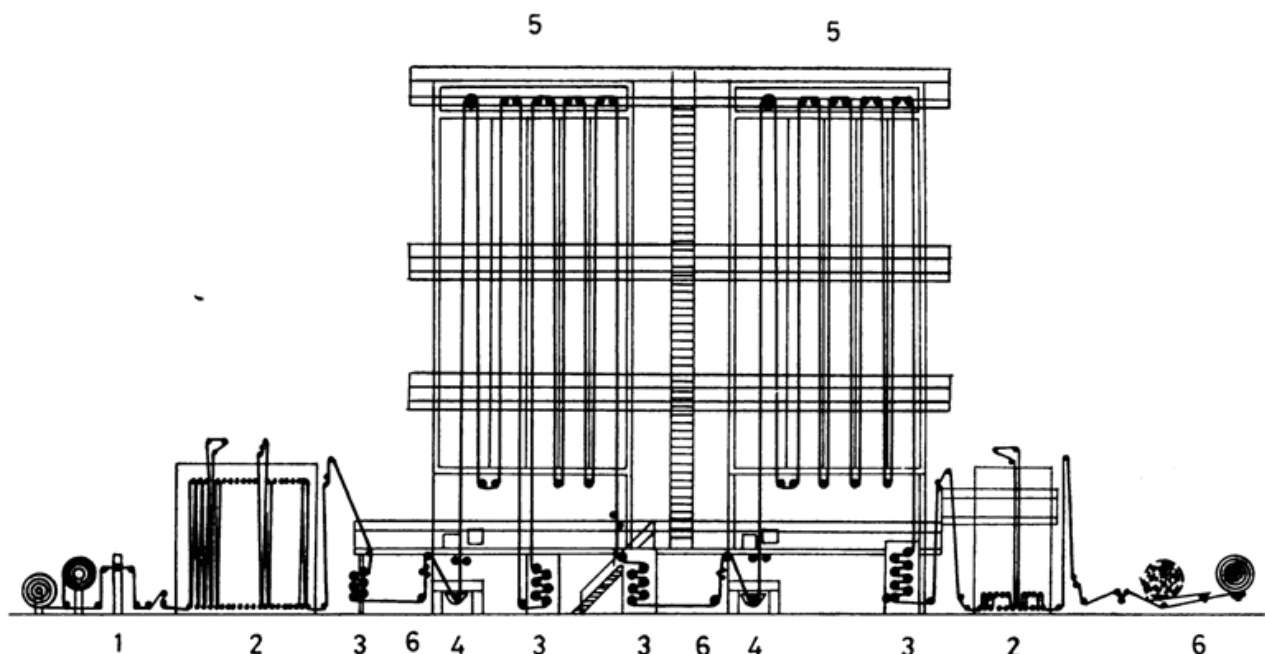
#### **13.2.4.2 Itatás**

Az itatást (impregnálás) ma a gumi-textil tapadás javítására használják. Korábban ezzel a technológiával indult a természetes kaucsuk ipari felhasználása (esőkabátot gyártottak így). Impregnálással csak nagyon kis mennyiségű gumi vihető fel, a textil tömegének maximum 15 %-a, ezért az itatást legtöbbször kalanderezés, ritkábban kenés követi.

Itatásnál a szövetet belemerítik az általában kis viszkozitású gumioldatba. Azért használnak híg, kis viszkozitású oldatot, mert az be tud hatolni a textil elemi szálai közé is. A behatolt gumi összeragasztja, merevíti az elemi szálakat. Nagy modulusú textiliáknál ez a merevítő hatás gátolhatja a feldolgozhatóságot, ezért ilyenkor csökkentik az itatás mélységét. Ezt a szövet megfeszítésével, vagy vízzel történő előitatással tudják elérni. Teljes átítatást használnak az egymást koptató szálakból álló szöveteknél, mint pl. az üvegszövet, illetve ha jó gáz- vagy folyadékzárás a cél.

A kordszövetek impregnálása ma főleg vizes diszperziókkal történik. A korszerű itató-berendezéseknek alkalmasnak kell lenniük a különféle textiliák impregnálására. A pamutszövet például alig igényel feszítést itatás és szárítás közben, a viszkózselvem azonban igen. A poliamid, aramid és poliészter szálakat magas hőmérsékleten nyújtani és hűtőgázzal szárítani kell.

Az univerzális impregnáló berendezéseket két káddal és két, többzónás hőkezelőegységgel készítik, így a megfelelő műveleti sorrend kialakítható, és gyakorlatilag minden textilféleség itatására alkalmasak, 13.21 ábra.



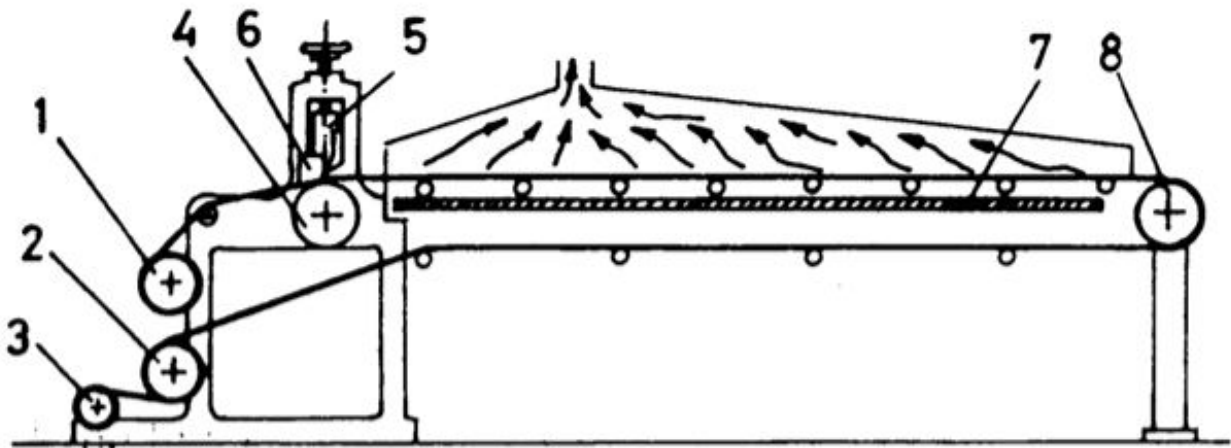
**13.21 ábra:** Univerzális itató és hőrogzitó berendezés [13.1] 1) végtelenítőprés, 2) szövettároló, 3) feszítőberendezés, 4) itatókád, 5) ötzónás szárító és hőkezelő egység, 6) továbbító és feltekerceselő hengerek (trioconter)

Az impregnáló berendezések nagy helyigényű gépek, hosszúságuk elérheti a 70, magasságuk a 20 métert. Az impregnálás sebessége 30–60 m/perc, de léteznek 120 m/perc sebességű típusok is. Ezeket a nagy kapacitású gépeket számos mellék-üzemrész szolgálja ki: latexdiszperziót előállító üzem, fűtőanyagállomás, szövettekercs szállító és emelő gépek, stb.

### 13.2.4.3 Kenés

A szövetek egy-, vagy kétoldalú gumizását a kalanderezésen kívül kenéssel lehet megoldani. A kenésnél alkalmazott gumioldatok, illetve vizes diszperziók koncentrációja és viszkozitása nagyobb, mint az impregnálásnál használt, ezért több anyagot lehet felvinni. Kenést korábban azért használtak, mert kalanderezéssel nem tudtak kellően vékony gumiréteget felvinni a szövetre. A kalanderek fejlődésével egyre vékonyabb gumiréteget lehet felvinni, így ma kenést csak speciális, nagyon vékony, vagy kényes gumizásnál alkalmaznak.

A kenőgépek oldatfelhordó, oldószer elpárologtató, gumizandó szövet, illetve kísérőfólia le és feltekerceselő részegységekből épülnek fel, 13.22 ábra. A szövet feszítéséről itt is gondoskodni kell. Oldatfelhordásra gyakran használják az ábrán is bemutatott kenőkéses megoldást. A kenőkés és a szövet távolsága állítható, a kenőkés élét az egyenletes rétegvastagság elérése céljából a hengerrel összecsiszolják.



**13.22 ábra:** Vízszintes kenőgép [13.1] 1) letekercselő, 2) feltekercselő, 3) kísérőfólia vagy szövet, 4) alátámasztó henger, 5) kenőkés, 6) határolópofo, 7) fűtött asztal, 8) hajtódob

A kenőgépek fontos tartozéka a statikus elektromosság elvezető berendezés. A gumizott szövetek tekercselésénél dörzs (súrlódási) elektrosztatikus feltöltődés alakul ki. A sztatikus töltés szikrázást, így tűz és robbanásveszélyt jelent. A töltés elvezetésére rézdrótot, illetve rézdrótból készült keféket alkalmaznak. Csökkenti a feltöltődést a levegő nedvesítése is. Újabban  $\beta$ -sugárzó levegőionizátorokat is használnak.

Kenés előtt a szövetet előkészítik: a lazán feltekercselt, vagy hajtogatott végben beérkező szövetet áttekercselik, a szövethibákat bejelölik, a nedves szövetet szárítják. A szövet egyenletes feszítése fontos szempont, mert a kenőgépen az egyenetlenül feszített szövet hasasodhat, gyűrődhet. A szövet nem tartalmazhat gumimérgeket (Cu, Mn, Fe), mert ezek az ionok a gumi gyors öregedését okozzák.

A kenőgép sebességét és a kés magasságát (vagyis a rétegvastagságot) úgy állítják be, hogy a felhordott gumiréteg a szárítóasztal végéig megszáradjon. Ha a száradás jóval a szárítóasztal vége előtt következik be, a sebesség vagy a rétegvastagság növelhető. Vastagabb gumiréteget adott gép esetén többszöri kenéssel lehet kialakítani.

Mindkét oldalán kent szövetet az összeragadás megakadályozása miatt kísérőszövettel (futószövet), vagy fóliával együtt kell feltekercselni. A futószövet sűrű szövésű, többnyire beragadásgátló anyaggal is átítatott szövet.

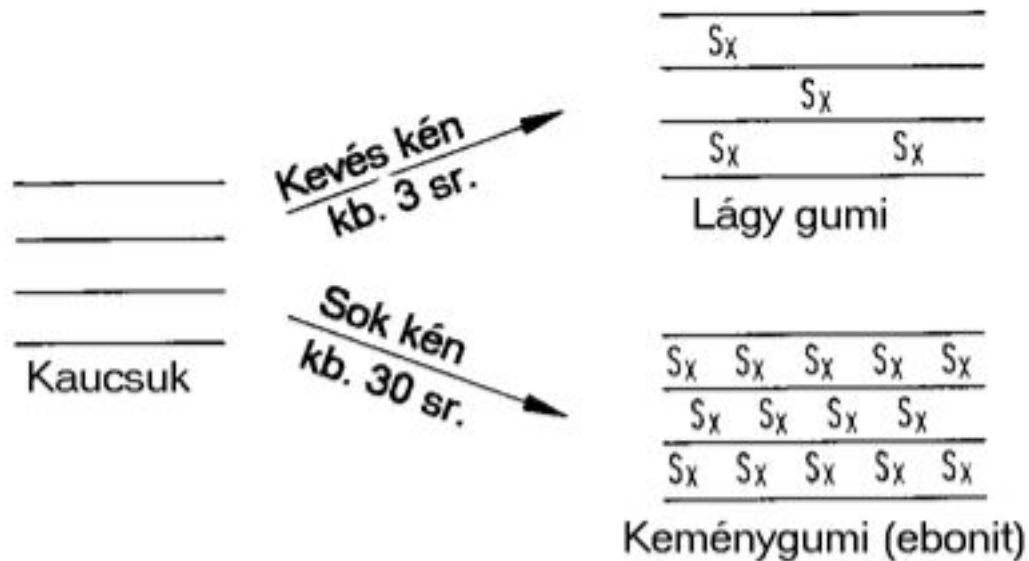
Az elpárologtatott oldószert a gazdaságosság és a környezetvédelem miatt visszanyerik. A szárítóasztal feletti zárt elpárologtatótérből az oldószergőzöket levegőárammal viszik az adszorpciós berendezésbe, ahol aktív szén vagy szilikagél szemcsék kötik meg a szerves oldószert gőzét. A nagy fajlagos felületű adszorbens anyagok ( $600\text{--}1200\text{ g/m}^2$ ) kis oldószerkoncentrációk ( $2\text{--}3\text{ g/m}^3$ ) esetén is működnek, így a levegőben a szerves oldószert koncentrációja a robbanási határkoncentráció alatt tartható. Az adszorberek szakaszosan működnek. Amikor az egyik berendezés telítődött, átkapcsolnak egy másikra. A telítődött adszorbent regenerálják: általában vízgőzzel ellenáramban kihajtják belőle a szerves oldószert, majd a gőz-oldószert elegyet kondenzáltatják, és a kicsapott folyadékot tartályban gyűjtik össze, ahol a víz elválik a szerves oldószertől. Vízen oldódó szerves oldószerek (alkoholok, ketonok, észterek) esetén az oldószert

visszanyerésére még egy desztillációs lépés is szükséges. A regenerált adszorbenst meleg levegővel kiszárítják; ezután a berendezés ismét átkapcsolható telítésre.

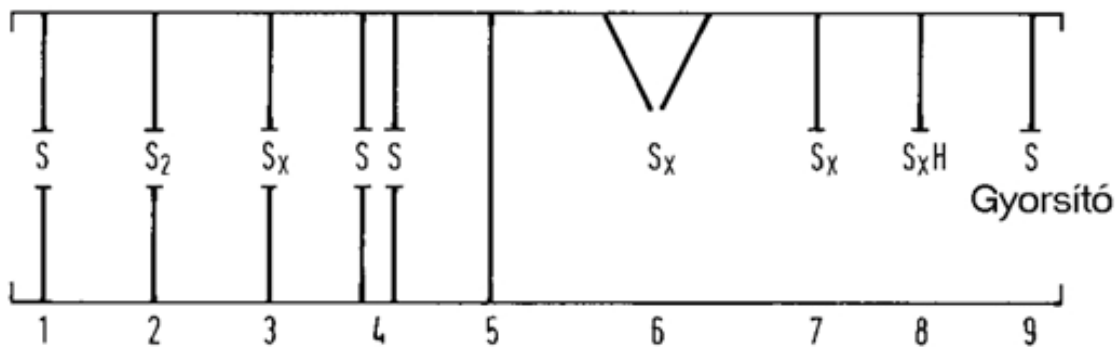
### 13.2.5 Vulkanizálás

Vulkanizálás során a gumit alkotó makromolekulákat keresztkötések segítségével *térhálós* szerkezetűvé alakítjuk. A keresztkötéseket a *vulkanizálószer*ek hozzák létre. A *természetes*- és a *kettőskötéseket tartalmazó* mesterséges-kaucsukok vulkanizálására leggyakrabban **ként (S)**, illetve kéntartalmú vulkanizáló szereket alkalmaznak. Kettőskötéseket nem tartalmazó mesterséges kaucsukokat kénnel nem lehet vulkanizálni. Az ilyen anyagok térhálósítására peroxidokat, vagy egyéb speciális térhálósító szereket alkalmaznak (pl. szilikonkaucsukok vulkanizálása szilikongumivá). A 13.23 ábrán a kaucsuk, a ritka térhálós elasztomerek és a sűrű térhálós (duromer) keménygumi szerkezetének vázlata, a 13.24 ábrán pedig a kénes vulkanizálásnál kialakuló keresztkötés típusok láthatók.

A vulkanizáció, a térhálósítás teszi a gumit a technika számára különlegesen fontos polimer szerkezeti anyaggá. Itt kell megemlítenünk a *korom*, mint aktív társítóanyag szerepét. Rendkívül nagy fajlagos felületével, kémiaiilag is kötődő karakterével, stabilizáló hatásával a korom a modern gumiiipar legfontosabb adalékanyagává vált.



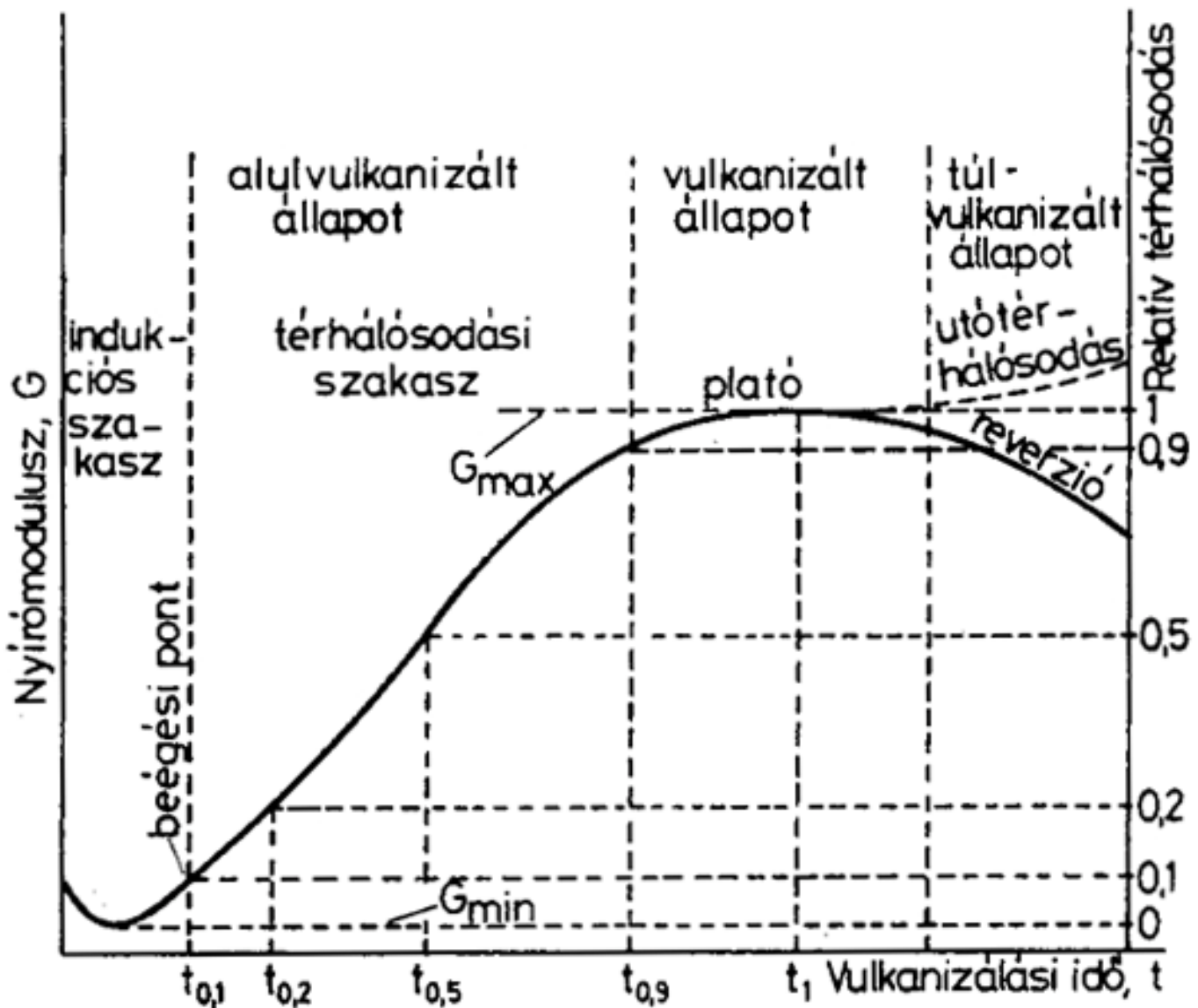
13.23 ábra:Kaucsuk (térhálósítatlan gumi) és vulkanizált, térhálósított gumi szerkezete [13.3]



**13.24 ábra:** Keresztkötések a gumiban 1) monoszulfid, 2) diszulfid, 3) polyszulfid ( $X \geq 3$ ), 4) vicinális szerkezet, 5) szén-szén kötés, 6) gyűrűs kén-szerkezet, 7) kén lánc, 8) tiol csoport, 9) gyorsító vegyület maradványa [13.3]

A gumitermékek készítésénél a vulkanizálás az utolsó technológiai lépés. Ez adja meg a gyártmány végső alakját, és határozza meg annak fizikai-mechanikai tulajdonságait. A vulkanizálást úgy kell beállítani, hogy a lehető legrövidebb idő alatt a termék igénybevételének megfelelő térhálós szerkezet alakuljon ki. A vulkanizáció foka (térhálósági fok, térhálósűrűség) függ az alkalmazott vulkanizálószer mennyiségétől, típusától (aktivitásától) és a vulkanizálási időtől. A töltőanyagok vagy a lágyítók ugyancsak nagy hatása (esetenként a térhálósűrűségnél is nagyobb) van a gumitermék végső tulajdonságaira.

A vulkanizálási reakció minden részletében még ma sem teljesen tisztázott, bonyolult ionos és gyökös mechanizmusú reakciók sorozata. A kaucsuk keverék térhálósodása a vulkanizálási görbével jellemezhető, 13.25 ábra. Méréstechnikai és gyakorlati szempontból is előnyösebb a relatív térhálósodási fok használata, mint az abszolút térhálósűrűség ismerete. Ez a jelzőszám minden gumikeveréknél 0 és 1 (vagy 0 % és 100 %) között változik. Sok esetben elegendő a teljes görbe helyett néhány jellemző pontjának megadása.



13.25 ábra: Vulkanizálási görbe: Nyírómodulusz – vulkanizálási idő összefüggés [13.1]

A vulkanizálási görbe jellegzetes szakaszai:

- *Indukciós szakasz* ( $t_0-t_{0,1}$ ): A keverék még jól alakítható, a térhálósodás kismértékű, még elhanyagolható.
- *Beégési pont, beégési idő* ( $t_{0,1}$ ): Ez után az időpont után a keverék már nem formázható, nem veszi fel a szerszám alakját: a térhálósodás megindult.
- *Térhálósodási szakasz* ( $t_{0,1}-t_{0,9}$ ): Ez után az időpont után a keverék már nem formázható, nem veszi fel a szerszám alakját: a térhálósodás megindult.
- *Porozitási határnak* nevezzük azt az időpontot, ahol a nyomást megszüntetve már nem képződik pórus. Értéke  $t_{0,2}-t_{0,3}$ .

- *Plató:* A térhálósodás befejeződött, a fizikai-mechanikai tulajdonságok már csak nagyon kis mértékben változnak. A plató után a térhálósodási reakció helyett a lebomlási reakciók (degradáció) erősödnek fel.
- *Utótérahálósodás és reverzió:* A plató után felerősödő mellékreakciók miatt a természetes kaucsukok lágyulnak (a gumit alkotó makromolekulák bomlása, *reverziója* miatt), míg egyes szintetikus kaucsuk típusok tovább keményednek, utótérahálósodnak.

A vulkanizálás folyamatát (az ún. bruttó kinetikát) a következő,  $n$ -ed rendű reakciósebességi egyenlettel lehet matematikailag közelíteni:

$$\left(\frac{a-x}{a}\right)^{1-n} = -\frac{k(1-n)}{a^{1-n}}(t-t_0) + 1$$

ahol:

$x$ : térhálósodás mértéke a  $t$  időpontban

$a$ : térhálósodás maximális értéke

$t_0$ : indukciós periódus hossza

$k$ : (bruttó) reakciósebességi állandó

$n$ : reakció rendűsége

### 13.2.5.1 A vulkanizálást befolyásoló tényezők

A vulkanizálási folyamatot befolyásoló tényezőket két nagy csoportba sorolhatjuk:

- *kémiai tényezők:* vulkanizálórendszer (vulkanizálószer, kéndonorok, gyorsítók, aktivátorok, késleltetők (retarderek), koágensek, promotorok),
- *fizikai tényezők:* hőmérséklet, idő, nyomás, nedvesség.

A *kémiai tényezők* igen sokrétűek, részletes ismertetésük messze túlmutat e könyv keretein. Rövid áttekintésként annyit érdemes megemlíteni, hogy a kénes vulkanizálásnál (elemi) ként önmagában ma már nem alkalmaznak, mert lassú, nehezen kézbe tartható, és magas hőmérsékletet igényel.

Az elemi kén mellett mindig megtalálható a különböző *gyorsító vegyületek* valamelyike, esetleg kombinációjuk. A gyorsítók kémiaiilag több mint tíz vegyületcsoportba sorolhatók, és mindegyik csoportban számos vegyület található. Csak néhány fontosabb csoportot megemlítve: merkaptó vegyületek, tiurám vegyületek, ditiokarbamátok, aminok.

Az aktivátorok a gyorsítók működését segítik. Szervetlen és szerves vegyületek is lehetnek aktivátorok, a szervetlen típus legjelentősebb képviselője a cink-oxid (ZnO).

A térahálósodási reakció túl gyors beindulása (a rövid indukciós periódus) megnehezíti a gumikeverékek feldolgozását, ezért a receptúrákban gyakran megtalálhatók a retarderek. Ezek az anyagok késleltetik a térahálósodási reakció erőteljes



beindulását. A legtöbb retarder két vegyületcsoportból kerül ki: aromás szekunder aminok nitrozó vegyületei, illetve szerves savak (benzoesav, szalicilsav, ftálsavanhidrid).

*Koágenseket* elsősorban telített szénláncú (szintetikus) kaucsukok peroxidos vulkanizálásánál alkalmaznak. Növelik a gyökkoncentrációt, elősegítik a vulkanizálószer bomlását. Szintén a kevés kettős kötést tartalmazó mesterséges elasztomerek vulkanizálásánál alkalmazzák a *promotorokat*. Az ilyen keverékeknél nem tud erős kötés kialakulni a töltőanyag (főleg korom) és a kaucsuk között. A promotorok (nitrozó vegyületek) a korom és kaucsuk közti kötések erősségét növelik. (Tulajdonképpen nem a térhálósodást elősegítő vegyületekről van szó, de a gumitermék mechanikai tulajdonságait igen erősen befolyásolja a jó tapadás a kaucsuk és a töltőanyag között.)

A **fizikai tényezők** közül a hőmérsékletemelést hatására, a kémiai reakciónál ismert *van't Hoff szabály* szerint, kb. 10 fokként megduplázódik a reakció sebessége. Képletben kifejezve:

$$W_2 = W_1 \cdot 2^{0,1\Delta T}$$

ahol  $W$  a reakció sebessége,  $\Delta T$  a hőmérsékletváltozás. A szabály szerint tehát 20 °C hőmérsékletemelkedés megnégyszerezzi, 30 °C emelkedés megnyolcszorozza a reakció sebességét. Ez a szabály csak közelítőleg érvényes, a megfigyelések szerint a hőmérsékleti koefficiens nem pontosan kettő, hanem a keverék minőségétől függően 1,7–2,5 között változhat.

A térhálósodási reakció sebességének tágabb hőmérséklettartományban való leírására napjainkban egyre inkább terjed az Arrhenius egyenlet használata, amely a (13.1) egyenletben szereplő  $k$  (bruttó) reakciósebességi állandó hőmérsékletfüggését adja meg (ld. (2.24) kifejezés) :

$$k = Ae^{\frac{-E}{RT}}$$

itt  $A$  a preexponenciális tényező (vagy más néven frekvencia faktor),  $E$  a reakció aktiválási energiája,  $R$  az egyetemes gázállandó és  $T$  az (abszolút) hőmérséklet.

A fenti megfontolások és összefüggések *izoterm* körülményekre érvényesek, vagyis olyan térhálósítási reakciókra, ahol a folyamat során a hőmérséklet állandó. A gumikeverék azonban különböző nagyságú és időtartamú hőhatásoknak van kitéve, amíg a nyerskeverékből a kész, vulkanizált termék elkészül. Ezek alatt a hőhatások alatt a gumi részlegesen vulkanizálódik. A hőhatások a technológiai folyamat során együttesen alakítják ki a termék végső térhálós szerkezetét. Ezen **idő–hőmérséklet** hatások összességét **hőtörténetnek** nevezik. A gyakorlatban a beégési pontig (13.23 ábra) fellépő idő–hőmérséklet hatások jelentősek; ezek adják meg a keverék feldolgozhatósági biztonságát. A végtermék tulajdonságait a *teljes hőtörténet* befolyásolja. Ez az előzőeken kívül magában foglalja a felmelegítési, a vulkanizálási és a lehülési hőtörténetet is.

A vulkanizálási folyamatot a hőtörténeten (idő és hőmérséklet együttes hatása) kívül a nyomás is befolyásolja. A reakció sebességét néhányszor tíz MPa nyomásváltozásig ugyan nyomásfüggetlennek tekinthetjük, a keverékben

jelenlévő levegő, illó anyagok, és főleg a nedvesség azonban a vulkanizált terméket *nyomás* alkalmazása nélkül pórusossá tehetik. Egyszerű számolással belátható, hogy 100 g, 1 % nedvességtartalmú keverékben a vulkanizálás hőmérsékletén 1,5 dm<sup>3</sup> porozitás (vízgőz) képződik. A pórusképződés megszüntethető, ha a külső nyomást a vízgőz adott hőmérsékleten mérhető tenziója fölé emeljük.

A porozitási veszély ellenére egy sor technológiánál nyomás nélküli vulkanizálást szükséges alkalmazni. Ekkor a gőzök és gázok lekötésére különleges adalékanyagokat használnak, pl. égetett meszet (CaO), ólomoxidot (PbO), illetve lehetővé teszik a gázok és gőzök eltávozását a keverékből (vákuumextruder).

### 13.2.5.2 A vulkanizálás hatása a gumi tulajdonságaira

A vulkanizálás a kaucsuk térhálósítását jelenti, a térhálót alkotó kötések mennyisége és minősége jelentősen befolyásolja a keletkező gumi fizikai-mechanikai és egyéb tulajdonságait. Amíg a keresztkötések nem kötik össze a kaucsuk makromolekuláit, az anyagban deformáció hatására ébredő feszültség alacsony, és nullához tart. A vulkanizált gumiban ébredő feszültség a keresztkötések számával növekszik. A **térhálósűrűség** és a **feszültség** között a következő összefüggés írható fel:

$$\sigma = \rho RT \frac{1}{A_0} \frac{1}{M_c} \left( \varepsilon - \frac{1}{\varepsilon^2} \right)$$

itt  $\rho$  a gumi sűrűsége,  $R$  az egyetemes gázállandó,  $T$  az abszolút hőmérséklet,  $A_0$  minta deformáció előtti keresztmetszete,  $\varepsilon$  a deformáció (nyújtás),  $M_c$  pedig két térhálópont közötti molekulalánc átlagos molekulatömege, amelynek reciproka a térhálósűrűségnek felel meg. Minél sűrűbb a térháló, annál rövidebbek a két térhálópont közötti molekulaszakaszok, annál kisebb az átlagos molekulatömegük. A fenti képlet segítségével a térhálósűrűség a mérhető feszültség-nyúlás összefüggésből meghatározható, mégpedig a kaucsuk molekula kémiai összetétele és a térhálótípus (13.24 ábra) ismerete nélkül.

A gumi **keménysege** a feszültséghez hasonlóan függ a térhálósűrűségtől. A gumi **húzószilárdsága** már nem követi ezt az összefüggést, egy optimális értékig növekszik, majd tovább növekvő térhálósűrűség hatására csökkenni kezd (ún. túltérhálósítás, „*overcuring*”).

A gumi **szakadási nyúlása** növekvő térhálósűrűséggel csökken, magas térhálósűrűségnél (ebonit) egészen alacsony értéket mutat.

A **hasadási ellenállása** kissé alulvulkanizált állapotban maximális. Túlvulkanizált gumiknál a hasadási ellenállás rohamosan csökken.

A **gumirugalmasság** (entrópia rugalmasság) a szegmensmozgások (mikro-Brown mozgás, ld. [13.7] 15. fejezete) következménye. A rugalmasság a térhálósűrűség növekedésével egy maximális értékig nő (több keresztkötés = nagyobb visszatérítő erő), majd ismét csökken, ugyanis nagy térhálósűrűségnél az anyag merevebbé válik, mert a szegmensmozgások erősen lecsökkennek. A túlvulkanizált gumiban (pl. keménygumi, ebonit) az energiarugalmas deformáció válik dominánssá. A rugalmassági moduluszt a következő összefüggéssel lehet leírni:

$$E = 1/2 \rho R T M_c^{-1} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 - 3)$$

itt a jelölések megegyeznek a 13.4 egyenlet jelöléseivel,  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  a három koordináta irányában mért deformációt jelenti.

A rugalmas visszaalakulás sosem éri el a 100 %-ot (ellenkező esetben létrejönne az elsőfajú örökmozgó). A molekulák sűrűdése miatt mindig lesz energiaveszteség, vagyis a deformációs energia egy része hővé alakul. A nagyrugalmas elasztomerekben az energiaveszteség kicsi, és ciklikus terhelésüknél csak kevés hő képződik.

A gumik alacsony hőmérsékleten mutatott viselkedését (rugalmasságát, hajlékonyságát) az **üvegesedési hőmérsékletük** ( $T_g$ ) határozza meg. Az üvegesedési hőmérsékletnél megszűnik a szegmensmozgás, tehát az entrópia- vagy gumirugalmas viselkedés is. Az elasztomerek tehát legfeljebb a  $T_g$ -jükig viselkednek gumyszerűen. A rugalmassági moduluszhoz hasonlóan a  $T_g$  is a térhálósűrűség függvényében optimumot (itt az optimum *minimumot* jelent!) mutató tulajdonság.

A **duzzadás** nagyon érzékeny a gumi és az oldószer kémiai összetételére, és csak kisebb mértékben a gumi térhálósűrűségére. Duzzadáson itt azt a jelenséget értjük, amikor egy térhálós polimert *jó oldószerébe* helyezzük. (ld. [13.7] 6. fejezete). A nem térhálós polimer ilyenkor oldatba megy, a térhálós azonban nem, csak több-kevesebb oldószert vesz fel, és megduzzad. Minél több kereszt-kötés van a térhálós polimerben, annál kisebb a megfigyelhető duzzadása. A térhálósűrűség és az egyensúlyi duzzadás között a *Flory-Rehner* egyenlet teremt kapcsolatot [13.3]:

$$-\ln\left[(1 - V_2)V_2 + \gamma V_2^2\right] = \left(\frac{V_1}{V_2 M_c}\right) \left(1 - \frac{2M_c}{M}\right) \left(\frac{V_1}{V_2 M_c}\right) \left(V_2 \cdot 1/3 - \frac{V_2}{2}\right)$$

itt  $V_2$  a duzzadt térhálóban levő gumi térfogathányada,  $V_1$  az oldószer móltérfogata,  $\overline{V}_2$  a polimer fajtérfogata,  $\gamma$  a Huggins oldhatósági paraméter,  $M$  a polimer molekulatömege térhálósítás előtt, és  $M_c$  a két térhálópont közötti molekulaszakasz móltömege.

A **gázáteresztőképesség** is csak kis mértékben függ a térhálósűrűségtől, és sokkal erősebben a kaucsuk kémiai összetételétől, valamint a töltőanyag mennyiségétől és minőségétől. Növekvő térhálósűrűség hatására (a kialakuló kölcsönhatások miatt) kismértékben csökken a gázok diffúziója.

### 13.2.5.3 Vulkanizálási eljárások és berendezések

A vulkanizálási eljárásokat különféle szempontok szerint lehet csoportosítani:

*Az alkalmazott nyomás alapján*

- nyomás nélküli
- nyomás alatti

*Az alkalmazott hőmérséklet alapján*

- hideg vulkanizálás szobahőmérsékleten
- meleg vulkanizálás magas hőmérsékleten

#### *A fűtés módja szerint*

- közvetlen (direkt)
- közvetett (indirekt)

#### *A fűtőközeg szerint*

- gőz
- gáz (levegő, nitrogén)
- folyadék (víz, sóolvadék, glicerin, olvadt fém, stb)
- fluid ágyas
- sugárzásos (infravörös, mikrohullámú nagyfrekvenciás elektromágneses)

#### *A folyamat megvalósítása szerint*

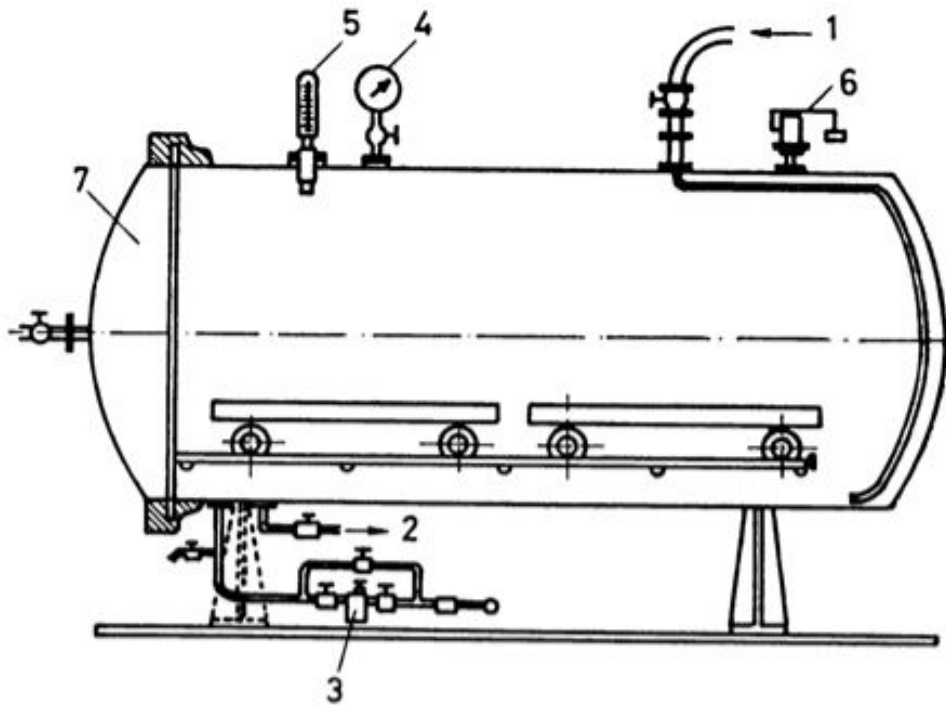
- szakaszos
- folyamatos

**Meleg eljárásnál** a kívánt reakciósebességet a megfelelő hőmérséklet biztosítja (13.2, 13.3 egyenletek). A meleg eljárások fűtőközegei gáz, gőz és folyadék halmazállapotúak. A gázokat csak direkt fűtésre használják, legelterjedtebb a nyomás nélküli vagy túlnyomásos meleg levegő. Gőzt (általában telített vízgőzt) direkt és indirekt fűtésre is alkalmaznak. A folyékony hőhordozók közül legelterjedtebb a víz, amely direkt és indirekt fűtésre egyaránt alkalmas. Sóolvadékot és fluidágyat csak direkt fűtésre használnak.

#### *Szakaszos eljárások*

A szakaszos vulkanizálásnál *vulkanizáló kazánokat* (autokláv), *vulkanizáló kazánpréseket* (autokláv + hidraulikus prés) és *vulkanizáló préseket* használnak.

Nyomás alatti vulkanizáláshoz használatos **vulkanizáló kazán** vázlatos elrendezése látható a 13.26 ábrán. Ezek a kazánok nyomásálló hengeres tartályok, az anyagmozgatás céljából többnyire síneket tartalmaznak. Gőzfűtésen kívül gáz (meleg levegő) is alkalmazható fűtőközeggként (nyomás alatti vagy nyomás nélküli változat is lehetséges).



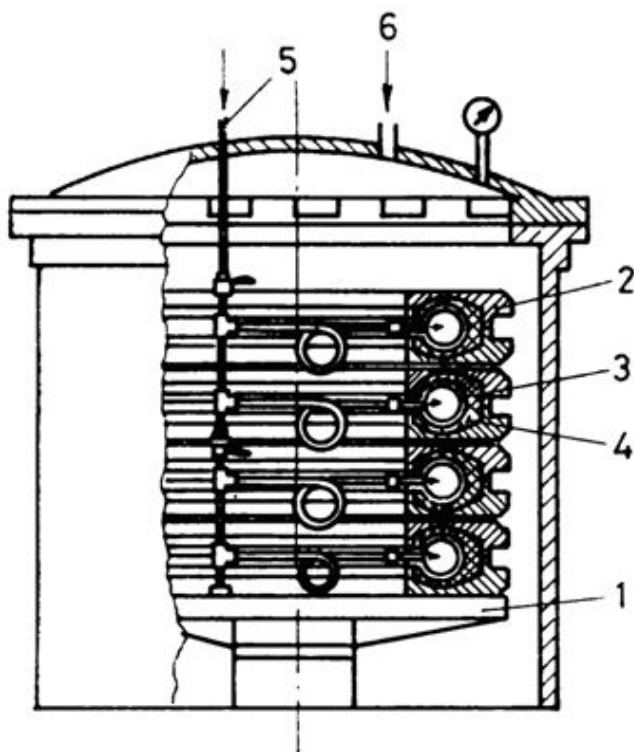
**13.26 ábra:** Vulkanizáló kazán [13.1] 1) gőz bevezetés, 2) gőz kivezetés, 3), kondenzedény, 4), manométer, 5) hőmérő, 6) biztosítószelep, 7) zárófedél

A kazánok egyik, vagy mindkét oldalon nyithatók. A kazánok felfűtése a vulkanizált terméktől függően történik. Vékonyfalú termékeknél gyorsabban, vastagfalúaknál lassabban fűtik fel a kazánt. A meleglevegős vulkanizálás hátránya, hogy a térhálósodási reakciókkal párhuzamosan, velük szinte vetekedve, oxidációs (öregedési, degradációs) reakciók is futnak. Gőzfűtésnél ezek az oxidációs folyamatok az oxigénhiány miatt háttérbe szorulnak, sokkal kisebb értékűek. A gőzfűtés előnye még a meleg levegővel szemben a sokkal jobb hőátadási tényező is.

Kazánt alkalmaznak kábelek, tömlők, cipőtalpak, gumicsizmák, tornacipők vulkanizálására. Tartálybevonatokat is lehet ezzel a módszerrel készíteni, ha a tartály befér a vulkanizálókazánba.

A kazánprések a kazánok és a prések előnyös tulajdonságait egyesítik. A 13.27 ábrán gépjárműabroncsok vulkanizálására szolgáló kazánprés látható. Itt a kazán alsó részéhez csatlakozik a hidraulikus prés dugattyúja. Hátrányuk a nehézkes töltés és ürítés.

Fűtőközegként telített vízgőzt használnak, ami jó hőátadást biztosít. Gumiabroncson kívül nagyméretű formacikkeket vulkanizálnak ezzel a módszerrel.



**13.27 ábra:** Vulkanizáló préskazán [13.1] 1) présasztal, 2) présforma, 3) fűtőtömlő, 4) abroncs, 5) belső fűtés vezetéke, 6) gőzbevezetés

Formacikkek, abroncsok, hevederek vulkanizálására legelterjedtebb megoldás a **vulkanizálóprések** használata. Itt a termék alakját a formaüreg alakítja ki, a préslapok a nyomást közvetlenül a termékre gyakorolják. A prés formaüregébe helyezett keverék a forma zárása során megfolyik, és kitölti a szerszám üregét. A keverék összetételét úgy kell kialakítani, hogy az anyag szétfolyása alatt a vulkanizálás még ne induljon be (késleltetett vulkanizálórendszer). A prés fűtése történhet gőzzel (korábban ez volt a legáltalánosabb), vagy elektromos árammal.

Egyes, hosszú vulkanizációs idejű keverékeket két lépésben vulkanizálnak, a préskapacitás jobb kihasználása miatt. Először a vulkanizálóprésben kialakul a termék alakja, és a vulkanizálást addig folytatják, míg a térhálósodás meghaladja a porozitási határt. Ezután a termék vulkanizálását forró levegővel, vagy gőzzel tovább folytatják.

#### *Folyamatos eljárások*

Folyamatos vulkanizálást főleg extrudált termékeknél alkalmaznak, mint pl. kábelek, profilszalagok, hevederek, lemezek, tömlők, csövek, illetve kalanderezett szöveteknél. Előnye a „végtelen” hosszúság és a túlvulkanizálás kiküszöbölése. Folyamatos vulkanizálást nyomás nélkül és nyomás alatt is végezhetnek, 13.1 táblázat.

<b>Nyomás nélkül:</b> folyadékfürdő forró levegő UHF + forró levegő	<b>Nyomás alatt:</b> folyadékfürdő levegő, N <sub>2</sub> gáz, gőz dobvulkanizáló
--	--

<b>Nyomás nélkül:</b> infravörös sugárzás $\beta$ , $\gamma$ sugárzás fluidágy	<b>Nyomás alatt:</b>
---	----------------------

## 1. táblázat - Folyamatos vulkanizálási eljárások [13.1]

### *Nyomás nélküli eljárások*

A **folyadékfürdős** eljárást (LCM= Liquid Curing Method) főleg profilszalagok vulkanizálására használják. Az extruder szerszámot elhagyó terméket forró folyadékot tartalmazó kádon vezetik keresztül, ahol az térhálósodik. A kádban magas forráspontú folyadékokat, alacsony olvadáspontú fémet vagy sóolvadékot használnak.

A **forró levegős eljárásnál** a terméket hosszú alagúton keresztül vezetik, amelynek mérete a 100 m-t is meghaladhatja. A berendezésben a levegőt cirkuláltatják. Hátránya a korábban említett okok miatt a levegő jelenléte.

**Nagyfrekvenciás előmelegítés (UHF=Ultra High Frequency)** után a forró levegős rész hossza 20 m körüli lehet. Az UHF előmelegítést kombinálhatják **infravörös sugárzásos** fűtéssel is. A különböző országokban az UHF frekvenciájára különböző tartományokat engedélyeztek.

A **fluidágyas** vulkanizálás elve hasonló a folyadékfürdős megoldáshoz, csak itt folyadék helyett lebegő szilárd anyag a hőközlő közeg.

Az **ionizáló ( $\beta$ ,  $\gamma$ ) sugárzás** más mechanizmussal térhálósít, mint az eddig megismert kenes vulkanizálási módszerek. Ionizáló sugárzással telített polimerláncoknál is kialakíthatók keresztkötések (pl. térhálós polietilén).

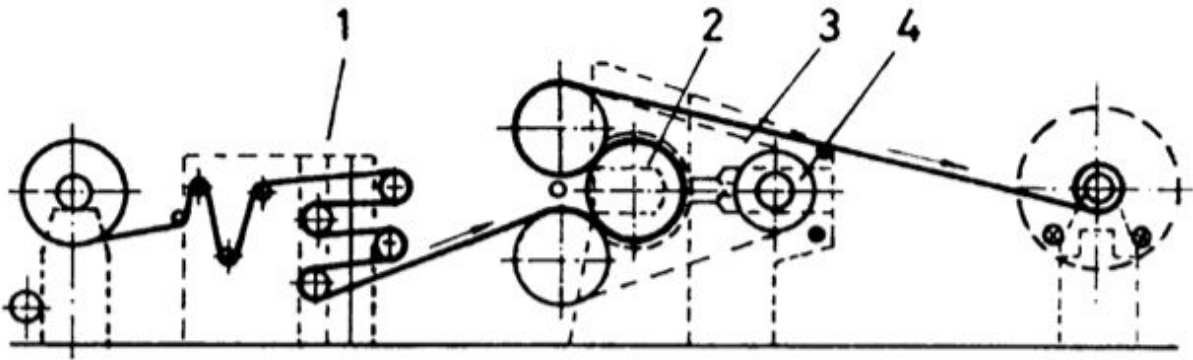
### *Nyomás alatti eljárások*

A nyomás alatti folyamatos vulkanizálásnál a legnagyobb probléma a termék be- és kilépésénél a tömítettség megoldása. Extrudálás után csak a kilépést kell megoldani, mert a belépési tömítést az extruder nyomása biztosítja. A nyomás alatti vulkanizálás gépészeti megoldásai különböző hosszúságú csövek, amelyek elrendezése lehet vízszintes vagy függőleges. A hőközlés különböző módokon oldható meg.

A **folyadékfürdős berendezéseknél (PLCV = Pressurized Liquid Continuous Vulcanisation)** itt is hasonló fűtőközeget alkalmaznak, mint a nyomás nélküli változatnál. A nyomás 10–12 bar sóolvadékoknál, más folyadéknál nagyobb is lehet.

**Gőzcsókazán** és **nagynyomású gázcsókazán** esetén gőz, illetve forró  $N_2$  gáz a hőközlő közeg. Gőzzel kb. 220 °C, gázzal akár 350 °C is elérhető. Leggyakrabban kábelek vulkanizálására használják, a sebesség 200–500 m/perc is lehet.

Az előző megoldásoktól eltérő konstrukciót használnak széles szalagok, lemezek, padlók, bevont szövetek folyamatos, nyomás alatti vulkanizálására, 13.28 ábra.

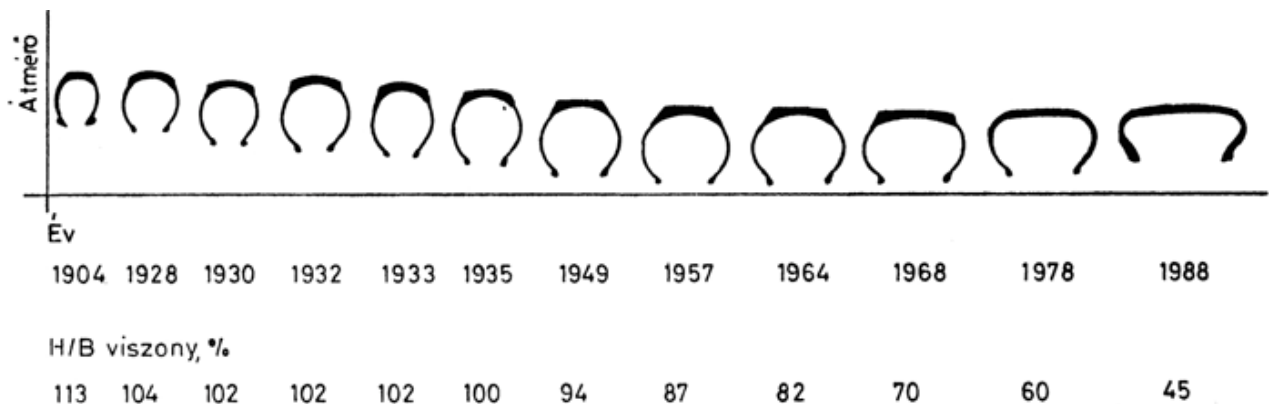


**13.28 ábra:**Forgódobos vulkanizáló berendezés [13.1] 1) hevederfeszítő, 2) vulkanizálódob, 3) feszítőszalag, 4) szalagfeszítő dob

Ez a **forgódobos vulkanizáló (rotocure)** berendezés. A berendezés fő eleme a fűthető vulkanizáló henger, amelyet fémszalag, vagy heveder vesz körül kb. területének 2/3 részén. A vulkanizálandó termék a fémszalag és a dob között halad át a készüléken. Vastagabb termékek vulkanizálásánál (5 mm felett) a szorító acélszalagot infra sugárzókkal fűtik az egyenletesebb hőeloszlás miatt.

### 13.3 Gépjárműabroncs gyártás

A gépjárművek gumiabroncsai mind termelési volumenük (a világ összes NR és SR termelésének mintegy felét a személy – és teherabroncsgyártás használja fel), mind fontosságuk miatt kiemelt jelentőségűek. A légabroncsok 1845-ös feltalálásuk (Thomsen) óta jelentős fejlődésen mentek keresztül, 13.29 ábra. A külsőleg látható változáson kívül az abroncs szerkezete is jelentős fejlődésen ment keresztül, amelyet a mindenkori gépkocsiipar fejlettségi szintje határozott meg.



**13.29 ábra:**A gépjármű abroncsok változása [13.1]

A gumiabroncs az egyetlen kapcsolat a gépjármű és az út között. Egy átlagos személygépkocsi esetén az abroncsot mintegy 4700 N erő terheli 1,9 bar belső nyomás mellett, amelyet 180 km/h sebesség, és a szibériai hidegtől a tartós üzem közben fellépő mintegy +110 °C-os hőmérsékletig kell az abroncsnak (évekig) teljesítenie (és akkor még nem szóltunk a dinamikus terhelésekről!). Ezeket az erőket a gumi egyedül nem tudja elviselni: a gumiabroncs tipikus *szálerősített*



*polimer kompozit rendszer* (ld. 369. oldal). A légzáróan kiképzett teherviselő szerkezet, az ún. karkasz, igen fontos szerepet kap a gumiabroncs felépítésénél.

### 13.3.1 A gumiabroncsok osztályozása

A gumiabroncsokat *felhasználási területük* szerint

- személygépkocsi,
- tehergépkocsi, autóbusz,
- földmunkagép,
- kerékpár, motorkerékpár,
- targonca és
- különleges rendeltetésű.

abroncsokként lehet csoportosítani.

*Szerkezetük* szerint tovább csoportosíthatjuk

- diagonál
- övesdiagonál (bias belted) és
- radiál

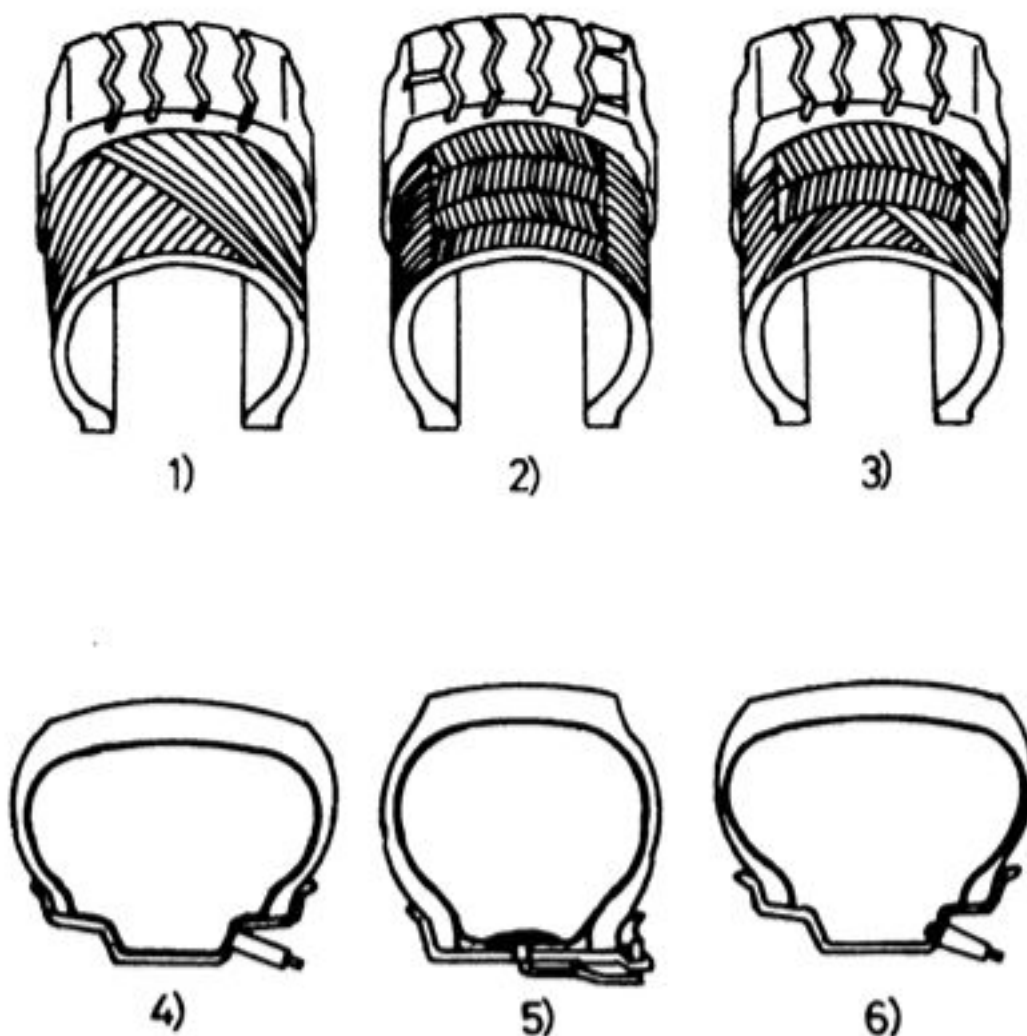
típusokba (13.30 ábra 1–3), amelyeket a

*szövetváz anyaga* szerint

- textil
- acél
- üveg
- egyéb nagyszilárdságú szövet

típusokba sorolhatunk.

Az osztályozás tovább folytatható a *profilarány* (13.30 ábra 4–6), a *futómintázat* (téli, nyári), és a *légzárás módja* (tömlős, tömlő nélküli) szerint.



**13.30 ábra:** Különböző szerkezetű gumiabroncsok [13.1] 1) diagonál, 2) radiál, 3) övesdiagonál, 4) személygépkocsi abroncs, 5) tömlős tehergépkocsi abroncs, 6) tömlő nélküli abroncs

### 13.3.2 A gumiabroncs szerkezete

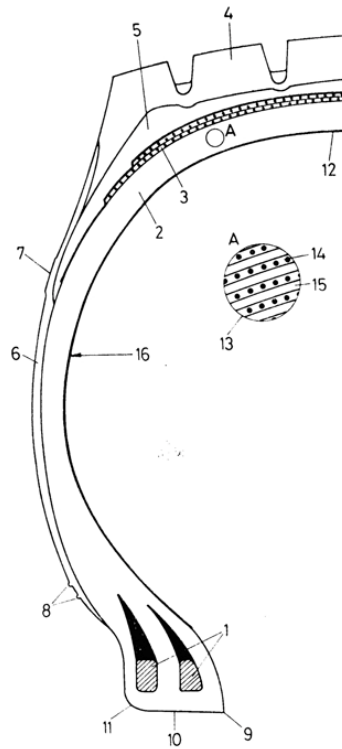
A gumiabroncsok (szerkezeti típusuktól függetlenül) három fő funkcionális részre oszthatók: a **szövetváz**, a **perem-** és a **futó-**, illetve **oldal gumira**. Ez a három zóna az abroncs egy-egy fő funkciójának hordozója, és több elemből, alkatrészből épül fel. A 13.31 és a 13.32 ábrákon a diagonál és a radiálabroncsok vázlatos szerkezeti felépítését láthatjuk.

#### 13.3.2.1 Szövetváz

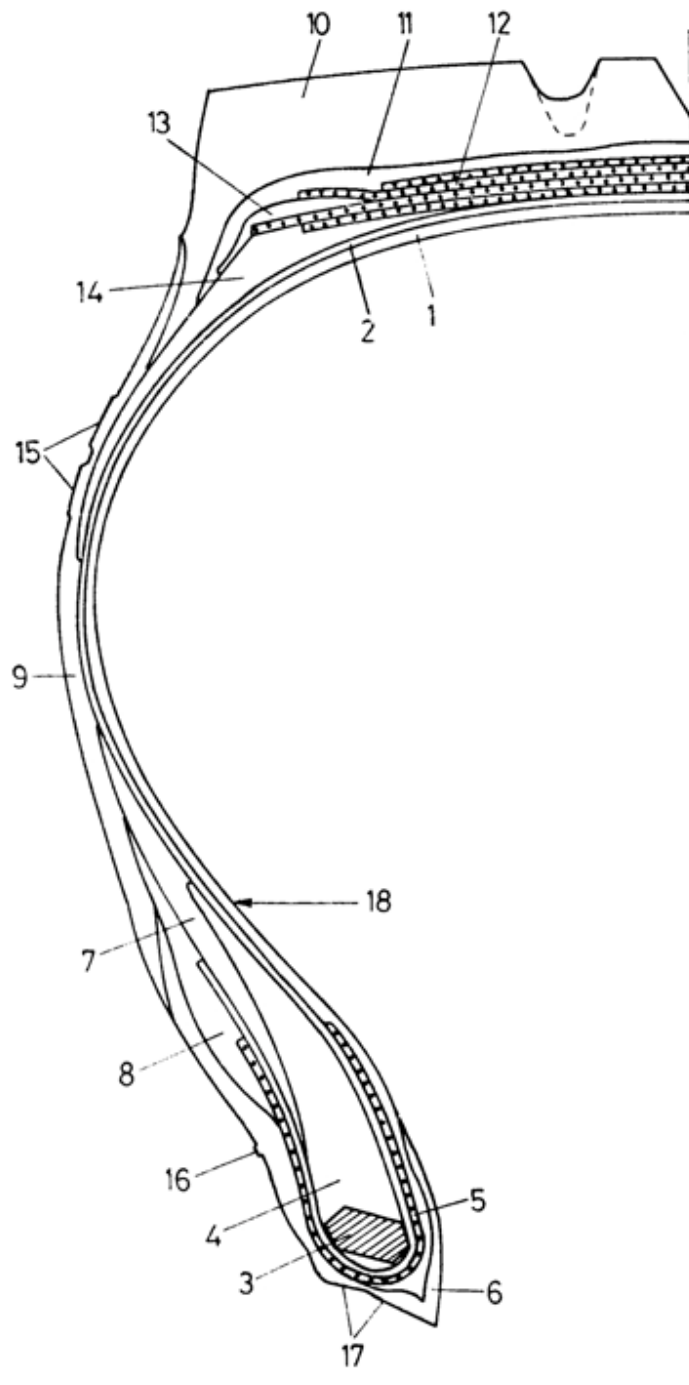
A szövetváz maga is összetett erősített rendszer: szilárd vázát különleges kialakítású (kord) szövet adja, amelyet gumiba ágyaznak. A kordszövet csak kevés keresztirányú ún. vetülékszálát tartalmaz (az egymást keresztező szálak a gumiabroncs igénybevétele során mintegy elfűrészelik egymást). Acélkordnál nincs is keresztirányú szál, az együttmaradást a felpréselt gumi biztosítja. Itt is, mint minden erősített rendszernél, kulcsfontosságú az erősítő szálak és a

mátrix együttdolgozása, a minél jobb tapadás kialakítása. Az acélkordnál az acélszálakat galvanikus rézbevonattal látják el a jobb gumi–kord tapadás elérése miatt.

Az **öv** a szövétváz speciális része, feladata a szilárdság növelése. Az övszerkezet kordbetéteit nem rögzítik a peremkarikához, csak a futórétegben helyezkednek el.



**13.31 ábra:**Diagonál abroncs szerkezete 1) peremkarika, 2) szövétváz, 3) övbetétek, 4) futó, 5) futóalátét, 6) oldalgumi, 7) kopásvédő borda, 8) pánt, központosító borda, 9) perem-orr, 10) perem-talp, 11) perem-sarok, 12) belső zárólemez, 13) inzuláló és kordszövet rétegek elhelyezkedése, 14) felpréselt kordszövet, 15) inzuláló gumiréteg, 16) inzulálóréteg alsó határa [13.1]



**13.32 ábra:**Radiálabroncs szerkezete 1) belső légzáró réteg, 2) szövetváz-betét inzulálóréteggel a külső oldalán, 3) huzalkarika, 4) perem-ék, 5) acélkordos perem erősítő, 6) peremvédő gumiréteg, 7) peremtöltő, 8) perempárna, 9) oldalgumi, 10) futógumi, 11) futóalátét, 12) övbetétek, 13) öv-töltőék, 14) alsó övpárna, 15) oldalfalvédő bordák, 16) pántközpontosító borda, 17) két síkban kialakított (légzáró) peremtalp, 18) inzulálóréteg alsó határa [13.1]

Az **inzulálórétegek** a nagyobb dinamikus igénybevételű helyeken a gumiréteg vastagságát növelik. A **párnalemezek** átmenetet képeznek a nagyon eltérő moduluszú futó és szövetváz között. A **belső gumiréteg** feladata a tömlő és a kord közötti érintkezés megakadályozása (kopásveszély), illetve tömlőnélküli köpenynél a légzárás biztosítása.

### 13.3.2.2 Peremszerkezet

A perem köti össze az abroncsot a pánntal („felni”). Tömlőnélküli abroncsoknál légzáróan kell kiképezni. Fő alkatrésze a nagyszilárdságú acélból készülő **huzalkarika**. A szerelésnél deformálhatónak kell lennie, ezért nem egy nagy átmérőjű, hanem több, kisebb átmérőjű huzalból alakítják ki a kívánt keresztmetszetet. A **peremerősítő** – és **töltőelemek** feladata a merev huzalkarikához csatlakozó kisebb moduluszú gumirétegekhez a fokozatos átmenet, valamint a szilárd felfekvés biztosítása.

### 13.3.2.3 Futó– és oldalgumi

A futó viszi át a motor nyomtatékát az úttestre, ezen a helyen valósul meg a gépjármű és az út közötti kapcsolat. A tórusz-szerű gumibroncs az úttal való érintkezés helyén periodikusan síkfelületté válik, ami a gumi intenzívebb koptatását okozza. Azt gondolhatnánk, hogy nagy futóteljesítményt vastag futóréteg tud biztosítani. A tapasztalat szerint azonban kb. 14–16 mm-nél nagyobb csatornamélység után a futóteljesítmény egyre kevésbé nő, nem lesz arányos a ráfordítással. A romló hülési viszonyok is határt szabnak a futó vastagságnövelésének.

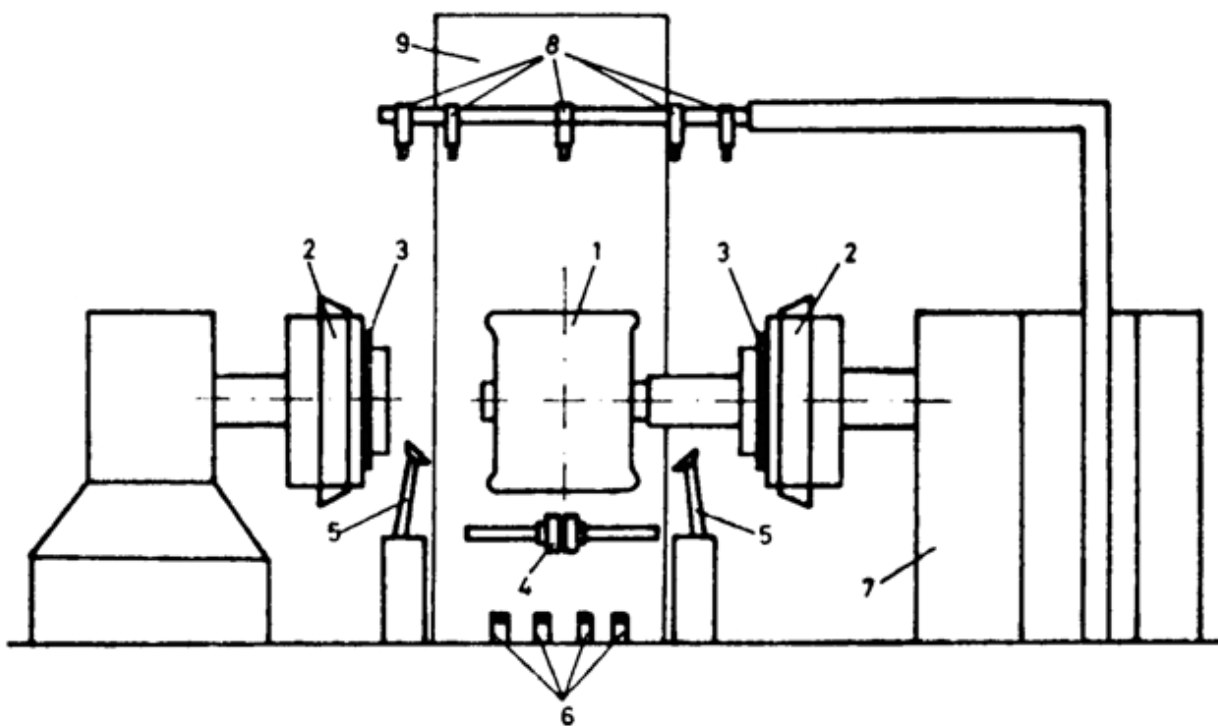
Az oldalgumi a hajlítói igénybevételnek leginkább kitett köpenyrész, ezért fontos a benne felhasznált gumi nagy fáradásállósága. Az oldalgumit kopás ellen bordázattal látják el (pl. amikor a kerék parkolásnál a járdaszegélyen súrlódik). Itt helyezik el a gumi üzemeltetési jellemzőit, illetve típusjelölését.

### 13.3.3 Gumiabroncsok gyártása

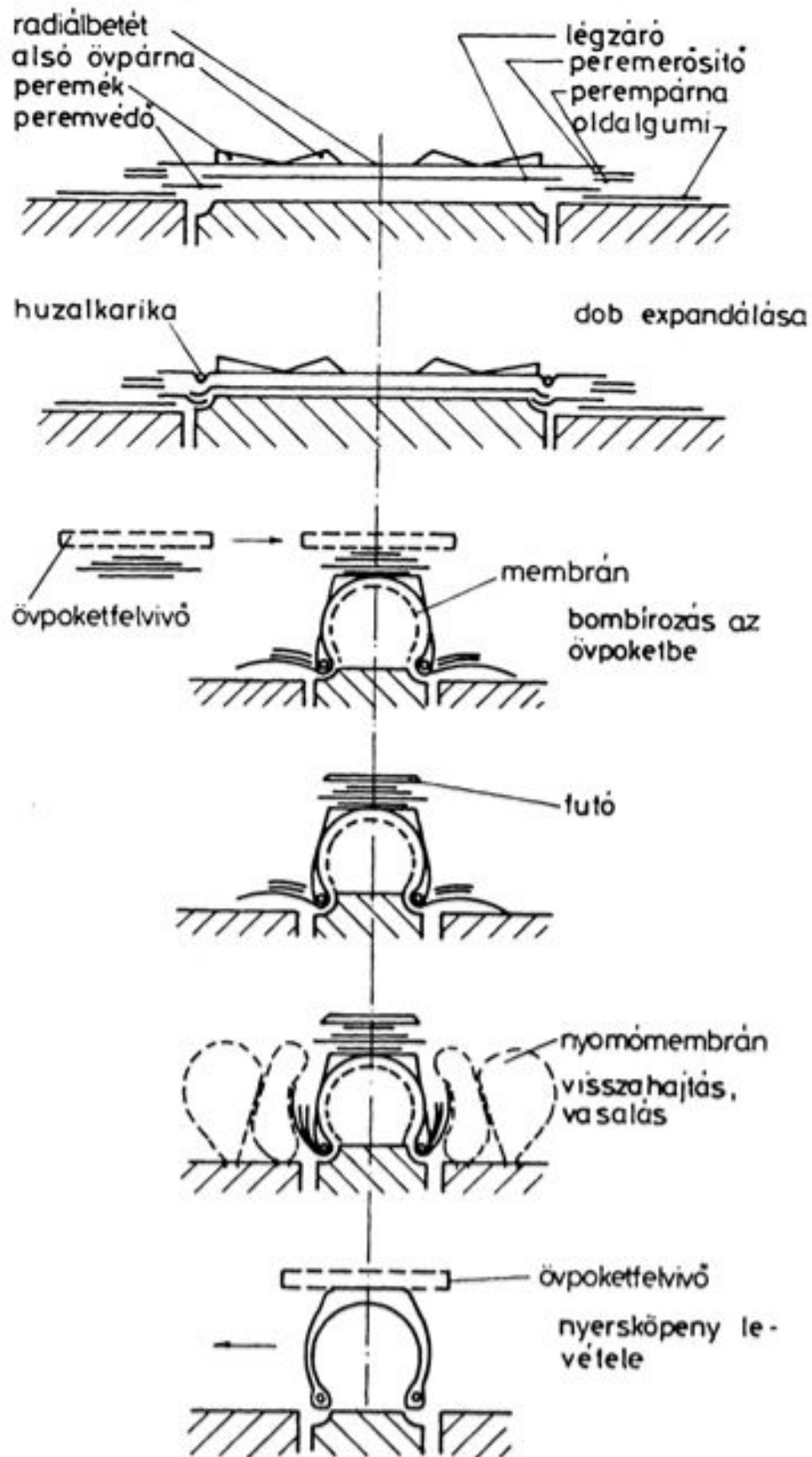
A gumibroncsok gyártását a következő főbb műveletekre lehet felosztani:

- keverékek készítése,
- alkatrészek, félkésztermékek gyártása,
- felépítés,
- vulkanizálás,
- utóműveletek,
- késztermék ellenőrzése.

A gumibroncsot a részegységekből az ún. abroncs-felépítő berendezéseken készítik el. Ezek szerkezeti kialakítása az abroncs típusától (diagonál vagy radiál) függ, 13.33 és 13.34 ábrák. A felépítőgépekről lekerülő gumibroncsokat a diagonálabroncsnál formázzák, (kialakítják a toroid alakot), a radiálabroncsnál erre a műveletre nincs szükség, mert azt toroid alakúra építik fel, majd vulkanizálják.



13.33 ábra: Diagonálabroncs felépítő készülék [13.1] 1) dob, 2) perembeütő, 3) peremkarika, 4) futóvasaló görgők, 5) peremvasaló görgők, 6) vezérlőpedálok, 7) vezérlőszekrény, 8) jelzőlámpák, 9) szervizer



13.34 ábra: Acélbetétes radiálabroncs egyfázisú felépítése [13.1]

Vulkanizálásra vulkanizáló préseket használnak. A diagonálabroncsok szerszáma közepén, a radiálabroncsoké sugárirányban osztott. Fűtést mind a külső, mind a belső oldalon alkalmaznak.

### 13.4 Polimer habok és habosítási technológiák

Polimerekből a legkülönbözőbb megjelenésű és tulajdonságú habokat lehet előállítani: a hab szerkezete lehet *nyitott*–*vagy zárt cellás*, habot lehet készíteni *hőre lágyuló és térhálós* polimerből, és a hab mechanikai tulajdonságai a gumyszerűtől a keményhabig a teljes rugalmassági modulusz skálát lefedhetik. Nagy jelentőségük van az *integrál*, vagy *struktur*-haboknak, ahol egyetlen technológiai lépés során alakul ki a termék belső habszerkezete, amely a külső felületek felé haladva fokozatosan tömörre válik. Az integrálhabokkal a termékek vastagsága és *hajlítómerevsége* növelhető anélkül, hogy a termék tömege (súlya) megnőne.

A habok kétfázisú rendszerek: rendszertelen (statisztikus) eloszlású, változó méretű lég– (gáz) buborékok a polimer matrixban.

Bár habot szinte az összes hőre lágyuló polimerből lehet készíteni (legismertebb talán a PS hab, „Hungarocell”), a térhálós polimerekből készített haboknak napjainkban még nagyobb a jelentőségük, ezért került a habgyártási technológiák ismertetése a térhálós polimerek technológiái közé ebben a könyvben.

Néhány főbb habosított polimer alkalmazási területet a 13.1 táblázatban soroltunk fel.

#### 13.4.1 A habosítási technológiák alapjai

A habot képező gáz előállítási módja szerint hét fő habosítási eljárást ismerünk.

- *Kémiai habosítószer* („*hajtóanyagok*”). A kémiai habosítószer (CBA, Chemical Blowing Agent) finom eloszlású porok, amelyeket 0,25 – 1 t% koncentrációban szárazon a polimerhez kevernek. Extrudálásakor, fröccsöntéskor, vagy egyéb feldolgozási művelet során hő hatására a habosítószer elbomlik, miközben (típusától függően) CO (szénmonoxid), CO<sub>2</sub> (széndioxid), N<sub>2</sub> (nitrogén), vagy NH<sub>3</sub> (ammónia) gázok keletkeznek. A finom eloszlású por mint a buborékképződés *gócképzője* is kifejti hatását. Tipikus kémiai habosítószer a bomlásukkor a fenti gázok szinte mindegyikét fejlesztő azovegyületek, pl. az azobiszformamid (ABFA), vagy az azodikarbonamid (AZ). Az AZ 205–215 °C között bomlik, és grammonként 220 cm<sup>3</sup> normál állapotú gázt fejleszt (66 % N<sub>2</sub>, 24 % CO, 5 % CO<sub>2</sub>, 5 % NH<sub>3</sub>). A kémiai habosító típusok között találunk 110 °C-on bomló, és 400 °C-on bomló vegyületeket is.
- *Gázinjektálás*. Gázinjektálás során nagy nyomással N<sub>2</sub>-t, vagy egyéb gázt juttatnak a feldolgozó gépben ömledék állapotban levő polimerbe, az extruder, vagy a fröccsöntő gép hengerébe. Amint a polimer elhagyja az extruder szerszámot, illetve fröccsöntéskor bekerül a fröccsszerszámba, a külső nyomás lecsökken, így a polimerben levő nagyobb nyomású gáz kitágul, és kialakítja a polimerben a hab-szerkezetet. Ennél az eljárásnál is szükséges *gócképzőkkel* elősegíteni a buborékok kialakulását.
- *Gázfejlesztés a polimerizáció során*. A tömör poliuretánok feldolgozásakor *izocianátot* és *poliolt* kevernek össze sztöchiometriai arányban. Ha kis mértékű izocianát felesleget használnak, és egy kevés vizet



adnak a polioldhoz, CO<sub>2</sub> gáz képződik, és a poliuretánban kialakul a habszerkezet. Ez a technika környezetbarátnak tekinthető, mindenesetre kevésbé környezetszennyező, mint bizonyos kémiai habosítószerke.

- *Gőzképződésen alapuló módszer.* Szintén a poliuretánoknál használt technológia, amely a polimerizációs reakció hőjét hasznosítja. A reakcióelegyhez (poliol és izocianát) alacsony forrtpontú folyadékot (klórmentes Freon, pentán) kevernek. A felszabaduló reakcióhő elgőzölögteti a folyadékot, ami létrehozza a habszerkezetet. A polimerizációs reakció kinetikáját (katalizátorokkal) úgy kell szabályozni, hogy a képződő polimer viszkozitása kellően nagy legyen, mielőtt az összes folyadék elpárologna. (Kis viszkozitású folyadékból nem lehet habot képezni!) Az egyenletesebb pórusedoszlás elérése céljából a rendszerhez felületaktív anyagot (többnyire szilikon olajat) is adnak.

- *„Habverés”.* Kaucsuk latexnél alkalmazott technológia. A háztartási habveréshez hasonlóan, mechanikusan kevernek levegőt a kolloid tulajdonságú polimer latexhez. A keletkezett habot kivulkanizálják.

- *Adszorpciós módszer.* Finom eloszlású adalékanyagok (pl. korom) a felületükön jelentős mennyiségű gázt képesek megkötni, adszorbeálni. Melegítés hatására az adszorbeált gáz felszabadul, és kialakítja a pórusedoszlást.

- *Habosítható gyöngyök.* A polisztirol habgyártásnál alkalmazott módszer. A két legelterjedtebb megoldás szerint alacsony forrtpontú folyadékot (pentán) adnak

- közvetlenül a sztírol szuszpenziós polimerizációjakor
- utólag

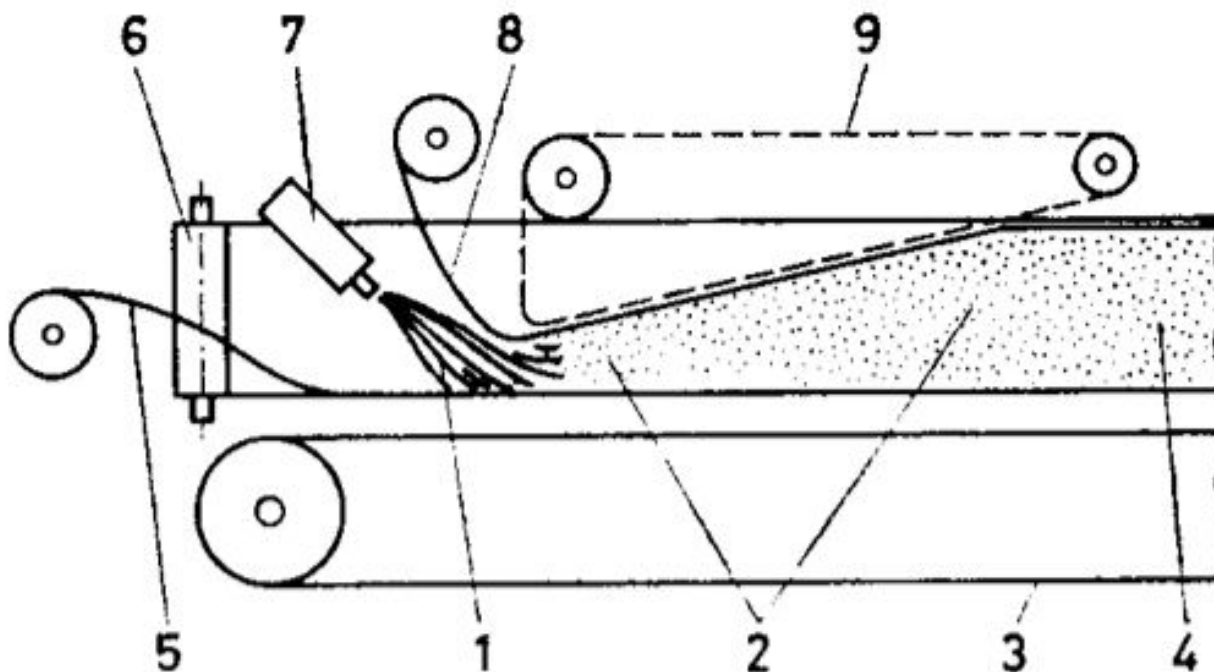
a polimerhez. A termék különálló apró gyöngyökből áll (a polimerizációs eljárást „gyöngypolimerizáció”-nak hívják). Felmelegítéskor a meglágyuló polimert a pentán gőzei felhabosítják.

<b>Alkalmazás</b>	<b>Hab-tulajdonságok</b>
Hűtőszekrény hőszigetelés	Hőszigetelés, merevség
Épületek szigetelése	Hőszigetelés, könnyű súly
Ülés-borítás	Rugalmasság, kis súly
Bútor szerkezeti elem	Fautáztatú, erős
Műszer, TV, HI-FI készülék csomagolás	Ütés elleni védelem, kis súly
Kabát bélésanyaga	Hőszigetelés, tisztíthatóság
Kábelszigetelés	Kis dielektromos veszteség, hajlékonyság
Szőnyeg hátoldala	Rugalmas, hajlékony, tisztítható
Gépkocsi panelek	Hő – és hangszigetelés
Műbőr	Megjelenés, hajlékonyság
Műbőr	Megjelenés, hajlékonyság
Élelmiszer tálca	Íz- és szagmentes, szilárd
Számítógép ház	Merev, ütésálló, elektromosan szigetelő

2. táblázat - Habosított polimerek felhasználási területei

### 13.4.2 Poliuretán habok előállítása

A poliuretán (PUR) habok előállítása során kémiai reakció – poliaddíció – játszódik le. Poliuretánból a habok széles skálája előállítható, a lágytól a keményhabig. A kiindulási anyagok a diizocianát, poliól és a habosítószer. A kiindulási anyagokat intenzíven összekeverik, és folyamatos eljárásnál szállítószalagra terítik, 13.35 ábra, vagy szakaszos eljárásnál a megfelelő formaadó szerszámba adagolják.



**13.35 ábra:**Folyamatos PUR hab gyártó berendezés Hennecke szerint [13.8] 1) monomerek és habosítószer, 2) részleges habosodás, 3) szállítószalag, 4) teljes habosodás, 5) alsó formaleválasztó fólia, 6) oldalsó formaleválasztó fólia, 7) keverőfej, 8) gázáteresztő felső fedőlap, 9) térfogatkiegyenlítő készülék (habvastagság szabályozás)

A felvitel, illetve beadagolás után a hőmérséklettől függő sebességgel végbemegy a reakció és a habosodás. Lehűlés után a habokat méretre vágják.

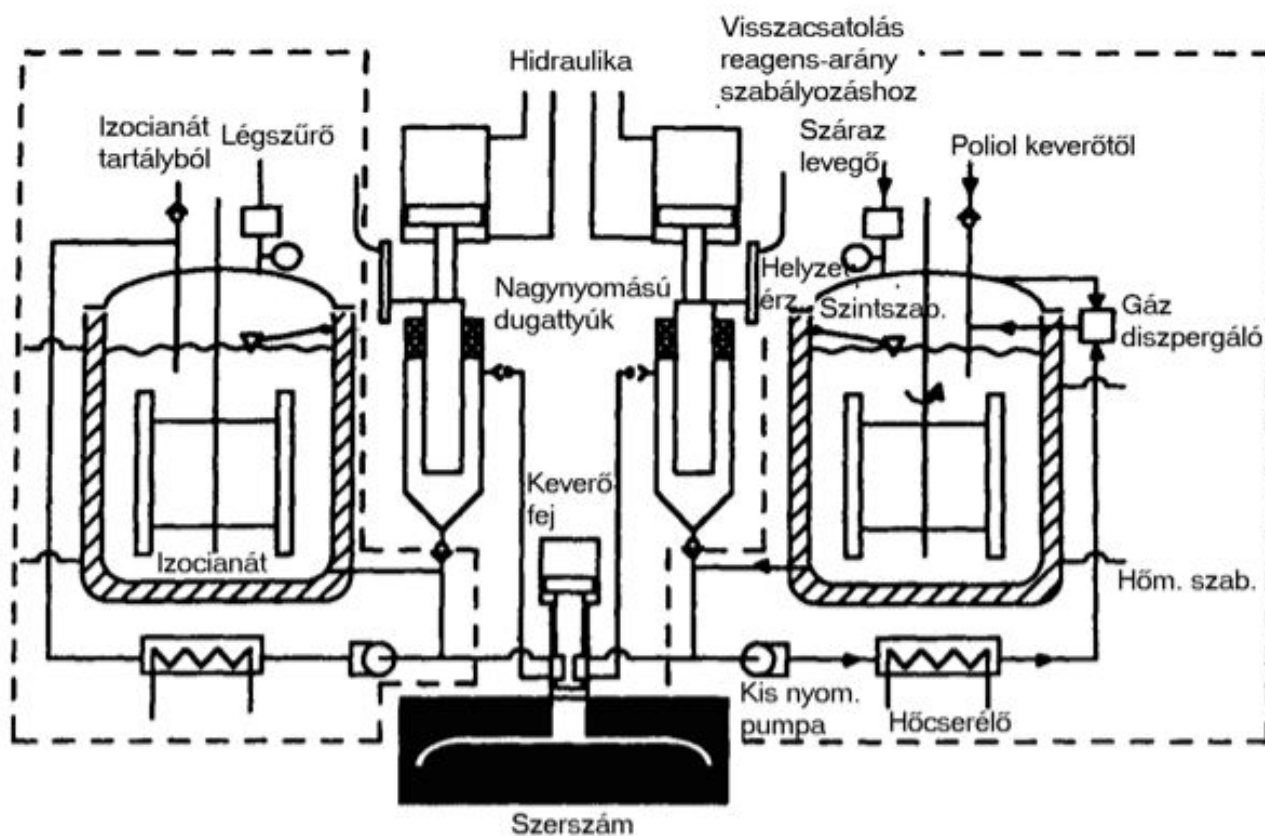
### 13.4.3 RIM (Reaction Injection Molding, reaktív fröccsöntés) habgyártás

Reaktív fröccsöntésnél két kis viszkozitású, egymással reagálni képes (többnyire monomer) folyadékot kevernek össze, és az elegyet azonnal a zárt szerszámba injektálják, 13.36 ábra. Ezzel az eljárással tömör poliuretán (PUR) termékek mellett nagy mennyiségben állítanak elő lágy és félkemény PUR habot. A poliuretán képződése az izocianátból és poliólból, valamint térhálósodása a szerszámban (az alakadással egyidőben) történik. A habképződést kémiai habosítószerekkel (CBA), izocianát felesleg mellett víz adagolásával, valamint N<sub>2</sub> gáznak az egyik reakciókomponenshez való adagolásával érik el. Megfelelően megválasztott technológiával nyitottcellás habszerkezetet lehet készíteni.

### 13.4.4 Habosítható polisztirol (EPS, Expandable Polystyrene)

A habosítható PS előállításához a polimerizáció során, vagy utólag, nyomás alatt kis forrponú folyadékot (többnyire pentán) adnak a PS gyöngyökhöz. Hő hatására a gyöngyök térfogata 2–50-szeresére megnő, és zárt cellás habszerkezet alakul ki. A térfogatnövekedést a hőmérséklettel és a melegítés időtartamával szabályozzák. A habosítható PS feldolgozása a következő lépésekből áll:

- *Elő-habosítás.* A habosítható PS gyöngyöket gőzzel fűtött kamrán viszik keresztül. A gyöngyök sűrűsége jelentősen csökken, de még nem éri el végső értékét.
- *Pihentetés.* 3–12 órán keresztül pihentetik a gyöngyöket. A pihentetés ideje alatt lassú zsugorodás lép fel, és a hab cellák fala szilárdabbá válik.
- *Formaadás.* Az elő-habosított gyöngyöket behelyezik az alakadó formába, és gőzzel felmelegítik. Az alakadó forma lehet egyszerűen egy nagyméretű fém (alumínium) doboz, vagy présgépbe helyezhető forma. A habosítás után a formát vízzel lehűtik, és a terméket eltávolítják.



13.36 ábra: Poliuretán RIM berendezés vázlata [13.5]

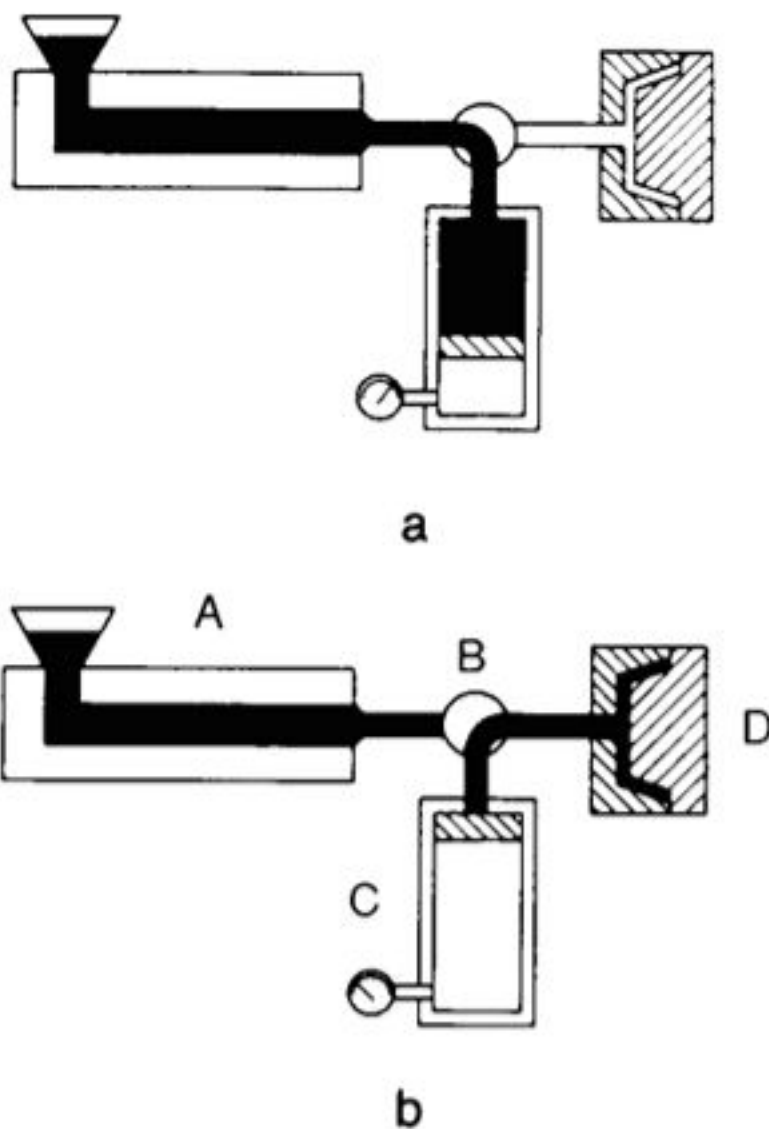
Az EPS habokat könnyű megkülönböztetni az egyéb habosítási eljárással (pl. extrudált PS hab, integrálhab) előállított haboktól, mert a hab felületén jól látszódnak a gyöngyök.

### 13.4.5 Hőre lágyuló struktúrhabok fröccsöntése

Legegyszerűbb esetben a hagyományos fröccsöntőgép is alkalmas hab-szerkezetű termék előállítására. Ehhez a fröccsöntőgépet csak egy zárható fűvókával kell kiegészíteni, ami megakadályozza a gáz elillanását a szerszámból. Hatékonyabb habgyártást biztosít az ömledék-akkumulátor használata, 13.37 ábra.

Az eljárásnál kémiai habosítószer adnak a polimerhez, amely a fröccsgép plastikálóegységében a hő hatására elbomlik. A fejlődő gázok a nyomás alatt levő polimer ömledékben feloldódnak. A szerszámba annak térfogatánál kevesebb polimert fröccsöntenek. A szerszámüregben levő alacsonyabb nyomáson a polimerben oldott gázok felszabadulnak, és felhabosítják azt. Mivel a fröccsszerszám fala hideg, a polimer gyorsan megdermed a fal közelében, ezért a gáz ott nem tudja felhabosítani. Ez az oka a jellegzetes *struktúrhab* szerkezet kialakulásának.

Kémiai habosítószer nélküli megoldást mutat a 13.38 ábra. Ennél az eljárásnál nyomás alatt gázt (többnyire nitrogént) kevernek a polimerömledékhez. Ez az eljárás speciális berendezést igényel, ahogy az az ábrán is látszik.



**13.37 ábra:**Fizikai habképzésen alapuló struktúrhab fröccsöntőgép [13.6] A) hidraulika folyadék, B), C) dugattyú, D) injektáló henger, E) ömledék akkumulátor, F) fröccsfúvóka, G) fröccsgép alaplapja, H) szerszám, I) zárószelep, J) ömledék nyomásmentesítő szelep, K) extruder, L) gázáramlás szabályozó, M) hajtómű, N) motor

## 13.5 Szakirodalom

- Bartha Z.. *Gumiipari kézikönyv I-II*. Taurus-OMIKK. Budapest . 1988.  
 Rubin I. I.. *Handbook of Plastic Materials and Technology*. John Wiley & Sons. New York . 1990.  
 Hofmann W.. *Rubber Technology Handbook*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1996.  
 White J. L.. *Rubber Processing*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Belofsky H.. *Plastics: Product Design and Process Engineering*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Progelhof R. C.. Throne J. L.. *Polymer Engineering Principles*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1993.  
 Bodor G.. Vas L. M.. *Polimer anyagszerkezetten*. Műegyetemi Kiadó. Budapest . 1995.  
 Schwarz O.. Ebeling F.W.. Lüpke G.. *Kunststoffverarbeitung*. Vogel Buchverl.. Würzburg . 1991.

## **POLIMER KOMPOZITOK**

### **Tartalom**

#### [14.1 A polimer kompozitok alapfogalmai](#)

#### [14.2 A polimer kompozitok erősítő szálai](#)

##### [14.2.1 Az üvegszál](#)

##### [14.2.2 A karbonszál](#)

##### [14.2.3 Az aramid szál](#)

##### [14.2.4 A polietilén szál](#)

##### [14.2.5 Egyéb erősítőszálak](#)

#### [14.3 A kompozitmechanika alapjai](#)

##### [14.3.1 A terhelés irányában, hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága](#)

##### [14.3.2. A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen](#)

##### [14.3.3 A kompozit szilárdsága az erősítés irányától eltérő szög alatt](#)

##### [14.3.4 Vágott, rövid szállal erősített polimer kompozitok](#)

#### [14.4 Polimer kompozit termékek gyártástechnológiái](#)

##### [14.4.1 Laminálás, szórás](#)

##### [14.4.2 Sajtolás \(BMC, SMC, GMT\)](#)

##### [14.4.3 Tekercselés](#)

##### [14.4.4 Pultruzió](#)

##### [14.4.5 Összetett kompozit technológiák](#)

#### [14.5 Szakirodalom](#)

### **14.1 A polimer kompozitok alapfogalmai**

A kompozitok a műszaki célú szerkezeti anyagok legkorszerűbb családját képezik. Kialakításuk abból a felismerésből indult ki, hogy az alkatrészek terhelése a legkritikább esetben azonos a tér minden irányában. A leggyakrabban minden műszaki alkotásban, gépben, gépkatrészen, építményben vagy bármely használati eszközben az igénybevétel, a terhelés jól meghatározott erővonalak mentén érvényesül. Ezen erővonalak irányában gyakran nagyságrendekkel nagyobb szilárdságra van szükség, mint más irányokban. Ez indokolja a homogén szerkezeti anyagok *megerősítését* (*reinforcing*, *Verstärkung*) nagyobb szilárdságú erősítőanyagokkal, a teherviselés kitüntetett irányában.

#### **A kompozit:**

- *többfázisú* (alkatrészeiben fázishatárokkal elválasztott),
- *összetett*: több anyagból álló szerkezeti anyag, amely
- *erősítőanyagból* (tipikusan szálerősítésből) és
- befoglaló (beágyazó) anyagból: *matrix*-ből áll,

és az jellemzi, hogy

- a nagy szilárdságú és rendszerint nagy rugalmassági modulusú (szálas) erősítőanyag és a
- rendszerint kisebb szilárdságú, de szívós (nagy ütésállóságú) matrix között

- kitűnő kapcsolat (adhézió, tapadás) van, amely a deformáció, az igénybevétel magas szintjén is tartósan fennmarad.

A kompozit definíciójában az „*összetett*” jelleg kihangsúlyozása keveset mond, hiszen atomi, vagy molekuláris szinten minden szerkezeti anyagunk összetett. Többféle „*építőanyagból*” áll a fémötvözet, sőt maga a homopolimer lánc is. Még a homogén acél is összetett a mikrostruktúra ( $10^{-4} - 10^{-2}$  mm) szintjén, amelyben pl. a ferrit és perlit komponensek optikai mikroszkóp alatt is megfigyelhetők, megkülönböztethetők. Elvileg ez a többfázisú rendszer is, vagy akár a kristályos és amorf fázist is tartalmazó polipropilén homopolimer is tekinthető kompozitnak. A gyakorlatban azonban csak az ennél nagyobb ( $>10^{-2}$  mm), gyakorlatilag szabad szemmel is megkülönböztethető összetevőkből álló, összetett rendszert nevezünk *kompozitoknak*. (A tipikus erősítőszálak átmérője  $10\ \mu\text{m}$  nagyságrendű.)

Az egymástól megkülönböztethető *fázisok* szerkezetükben, tulajdonságukban jelentősen eltérnek egyébként azonos kémiai összetétel esetén is. A legjellemzőbb különbség a termodinamikai állapothatározók eltérése. Pl. az *entrópia* ugrásszerű megnövekedése a fázishatáron a rendezettség mértékének drasztikus csökkenésére utal. Ilyen entrópiaváltozással jellemezhető fázishatárt találhatunk, pl. az *önerősített (self-reinforced)* poliészter szál/amorf határfelületén.

A kompozit *erősítőanyaga* tipikusan – bár nem kizárólag – *szál* jellegű (*fiber-reinforcing, Faser-Verstärkung*). A szál erősítés alkalmazását mindenekelőtt az a műszaki logika indokolja, hogy termékünknek a terhelés kitüntetett irányában kell kiemelkedő szilárdságot mutatnia. Gondoljunk például az előfeszített acélszálakat tartalmazó vasbeton gerendára, a rúdugró üvegszálak kompozit rudjára, vagy a szuperszonikus repülőgép szárnyára.

A *szál* erősítést indokolja a *méret-hatás (size-effect)* jelensége. Az erősítőanyag tönkremenetelét is szerkezeti hibahelyek indíthatják. Ha a hibahelyek számának valószínűsége egy vizsgált térfogatban adott szám, akkor ebből a vizsgált térfogatú erősítőanyagból akkor kapjuk a leghatékonyabb erősítést, ha a lehető legkisebb átmérőjű *szálat* képezzük belőle. Így minimalizáljuk az esélyt, hogy adott véges hosszúságú szálban akár egyetlen hibahely is akadjon. Ez a méret-hatás jól megmutatkozik abban, hogy az üvegszálak vagy a karbonszálak szilárdsága az átmérő csökkenésével jelentősen megnövekszik, különösen a  $10\ \mu\text{m} > \emptyset$  tartományban.

A *szál* erősítés további indoka a *fajlagos felület* növelése a kompozit tulajdonságaira döntő hatású *határfelületen (interface)*.

A kérdés az, hogy mikor lesz az adott ( $V$ ) térfogatú és ideális esetben henger alakú szál (fajlagos) felülete ( $A$ ) maximális? A térfogathoz viszonyított fajlagos felület:

$$\frac{A}{V} = \frac{2r^2\pi + 2r\pi l}{r^2\pi l}$$

ahol  $r$  a szál sugara,  $l$  a hosszúsága. Átrendezve azt kapjuk, hogy ez a fajlagos felület

$$\frac{A}{V} = \frac{2}{l} + \frac{2}{r}$$

két szélső esetben lesz igen nagy:

- ha  $l \gg r$ , vagy
- ha  $r \gg l$

Az első eset a (technikailag megvalósítható) minimális átmérőjű, leghosszabb szál, míg a második eset a lehető legvékonyabb lapos korong (lamella). Ez utóbbi, lamella típusú erősítésre is van példa: a hőre lágyuló polimer kompozitokban igen jó erősítő hatást lehet elérni lemezes csillámmal. Az anizotróp, kitüntetett irányban megvalósított erősítő hatást viszont a lehető legkisebb átmérőjű *szállal* érhetjük el. A későbbiekben – a rövid, vágott szállal erősített polimer kompozitokban – látni fogjuk, hogy a szálak  $l/d$  viszonyának (*aspect ratio*) kitüntetett jelentősége van.

A *vékony szálakból* felépített erősítést még egy érv indokolja. Ismeretes, hogy a vékony szál, mint rúd hajlítómerevségét az

$E \cdot I$  szorzat határozza meg, ahol

$E$  a rugalmassági modulusz,

$I$  pedig az inercianyomaték, amelynek jellege:

$$I = f \left[ \pi \left( \frac{d}{2} \right)^4 \right]$$

és amely tehát a rúd sugarának 4-ik hatványával arányos. Másfelől az is tudott, hogy

$$\mathbf{E \cdot I = M \cdot R}$$

ahol  $M$ : a rúd hajlító nyomatéka

$R$ : a rúd hajlításának görbületi sugara.

A hajlítással szembeni engedékenység, a *hajlékonyság* az előbbi kifejezés reciproka:



$$\frac{l}{E \cdot I} = \frac{l}{M \cdot R}$$

Ez a hajlékonyság

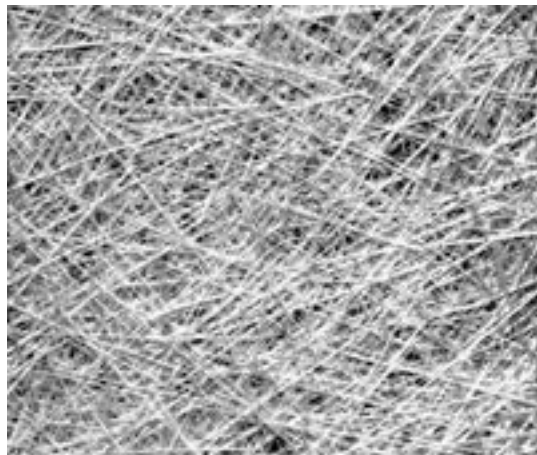
$$\frac{l}{M \cdot R} = \frac{l}{E} \cdot f \left[ \pi \cdot \frac{d^4}{2^4} \right]$$

a hajlított rúd (szál) átmérőjének 4-ik hatványával lesz fordítottan arányos. A finom üvegszál hajlékonysága – szemben az üvegpálca törékenységével – teszi lehetővé a bonyolult, „testre szabott” térformájú kompozitrendszerek technikai kialakítását.

## 14.2 A polimer kompozitok erősítő szálai

### 14.2.1 Az üvegszál

Az üveg, mint szerkezeti anyag, a *szilikátok* családjába tartozik. Elsősorban szilícium-oxidokból (SiO<sub>2</sub>) áll, ez adja az üvegek 55–65 %-át. Emellett tartalmaz egyéb fémoxidokat is, főleg CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alkotókat – de ezek az oxidok együtt a szilíciummal lényegében egyetlen óriásmolekulává egyesülnek, mégpedig *elsődleges (primer)*, és nagy kohéziós energiát képviselő kovalens- és *ionos* kötésekkel. Ezek után nem indokolatlan az üveget is egyfajta különleges *polimernek* tekintenünk. Ezt a polimer jelleget tükrözi az üveg olvadék viszkózusan folyó ömledék karaktere, az amorf vagy kristallin formában megszilárduló anyag szerkezetének függése az orientációtól és sok más vonás. Az ömledékből megfelelő fonófejen át nagyszilárdságú szálát húzhatunk, rendszerint 10<sup>3</sup> nagyságrendű elemi szálból álló köteg (*roving*) formájában. Az elemi szálak átmérője 10 μm vagy aközeli (8–14 μm). A műszaki célú üvegszál tipikus megjelenési formáit a 14.1 ábra mutatja.



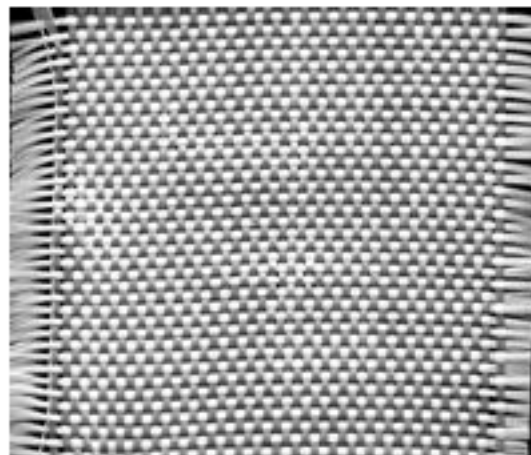
(a)



(b)



(c)



(d)

**14.1 ábra:**A kompozit célú üvegszál tipikus megjelenési formái a) vágott üvegszál paplan, b) üvegfonal, c) roving, d) üvegszövet

A polimerkompozitok erősítő szálainak tipikus adatait a 14.1 táblázat mutatja be.

Az üvegszál felületkezelést igényel. Egyrészt meg kell védeni a szövés, fonás és egyéb feldolgozás során esetleg fellépő károsodástól: ezt írezésnek (*sizing*) hívják. Az *írezőanyagok* feladata tehát ideiglenes védelem, összetartás. Másfelől biztosítani kell az üvegszál és polimer matrix között határfelületi kapcsolódást, lehetőleg minél több elsődleges kötéssel. Ezt epoxivegyületek, vinilszilánok, esetleg fenolgyanta típusú *kapcsolószerek* (*coupling agent*, *Hafvermittler*) felvitele biztosítja.

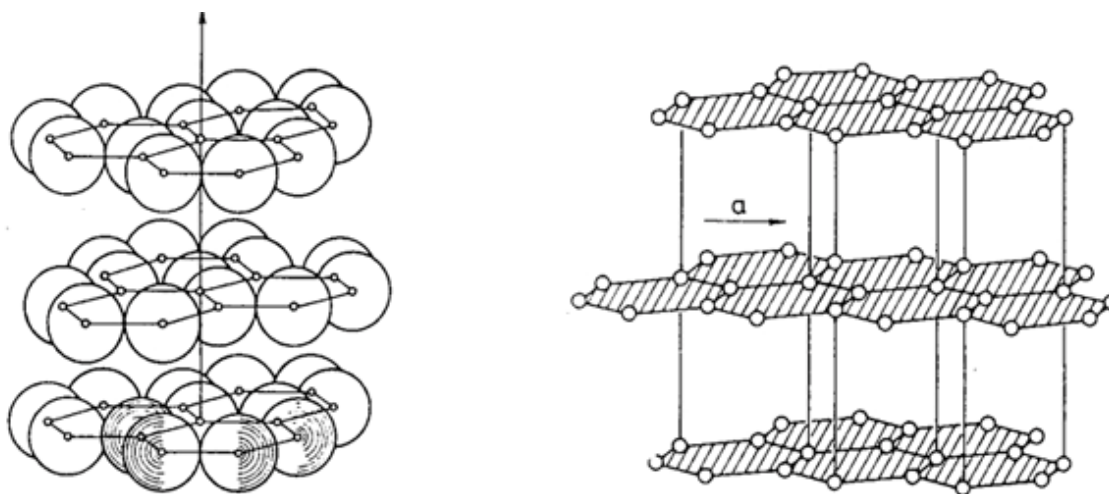
Száltípus	Sűrűség ( $\rho$ ) g/cm <sup>3</sup>	Szakítószilárdság ( $\sigma$ ) GPa	Rugalmassági modulus (E) GPa	Szakadási nyúlás ( $\epsilon$ ) %	Fajlagos szakadási hossz ( $\sigma/\rho$ ) km
Üvegszál (E típus)	2,60	2,5	72	4,8	96
Grafitszál (HS)	1,78	3,4	240	1,4	190
aramid (KEVLAR 49)	1,44	3,3	75	3,6	230
ietilén(SK 66) (HOPE)	0,97	3,3	99	3,7	340
Acélhuzal	7,86	4,0	210	1,1	50

1. táblázat - Kompozit erősítőszálak szilárdsága

### 14.2.2 A karbonszál

A szén kapcsolódási módjainak sokoldalúsága, a sokféle rendezettségi forma, amelyet a szénláncok képeznek, a polimerek műszaki anyagtudományának középpontjában áll. A szintetikus polimerek műszaki tulajdonságait, a polimerlánc szilárdságát a szén-szén kötések szilárdsága biztosítja. A legnagyobb szén-szén kötőerő a legszigorúbb rendezett szénrendszerben közismert: a *gyémánt* a maga kovalens kötésrendszerével, legmagasabb szintű rendezettségével a *keményiség* mértékévé, etalonjává vált. A nagy fajlagos felületű *korom*, mint a gumi kompozitok aktív – kémiaiilag is kötődő – töltőanyaga, szintén régóta ismert. A szénből megalkotott *erősítőszálban* a szén grafitos szerkezetét hasznosítjuk.

A grafit szerkezet a hatszögletű egységekből felépített lamellák síkjának irányában ( $\leftarrow \overset{a}{\rightarrow}$ ) rendkívüli szilárdságot biztosít.



14.2 ábra: A grafit szerkezete [14.10]

A karbonszálakban ezt a rendkívüli grafit-szilárdságot és az ezzel párosuló igen nagy moduluszt használjuk ki kompozit erősítésben.

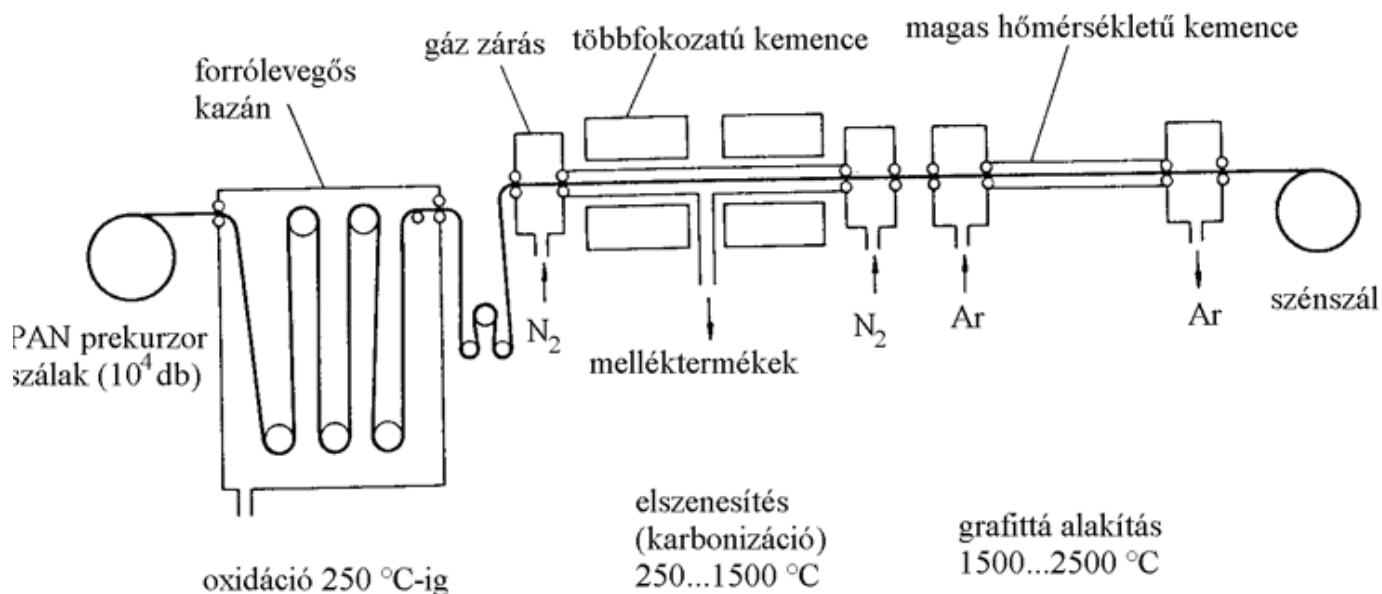
A karbonszálgyártás előterméke (*prekurzor*) többféle polimerszál is lehet, ha azt úgy tudjuk elszenesíteni (*karbonizálni* majd *grafitosítani*), hogy közben ne olvadjon meg, ne égjen el, és a kívánt szén szerkezet alakuljon ki. Korábban főleg

- poliakrilnitril (PAN) és
- regenerált cellulóz (műselyem, viszkóz) szálát alkalmazták prekuzorként. Ma a második helyen a
- kátrányalapú szál (prekurzor) áll.

A PAN-szál alapú grafitszál gyártás technológiáját a 14.3 ábra mutatja be, amelyet 1997 óta Magyarországon is alkalmaznak.

Az eljárás főbb lépései:

- *stabilizálás*: enyhe oxidáció max. 250 °C-ig, amelyben a szál elszenesedik, de nem olvad meg,
- *karbonizáció*: 250–1500 °C-ig történő szenesítés, amelyben a szál 90 %-ban szénként alakul, N<sub>2</sub> (inert) atmoszférában
- *grafitosítás*: 1500–2500 °C-on, szigorúan oxigénmentes atmoszférában, feszített állapotban kialakul a gyakorlatilag tiszta szénből álló grafitos szerkezet.



14.3 ábra: Karbonszál-gyártás PAN prekuzorból [14.10]

A magyar karbonszál-gyártás a Nyergesújfalu-i korszerű, évi 10 000 tonnás PAN szál gyártó kapacitást vette alapul. A karbonszál, amelynek tipikus átmérője 7–8 μm, 40 000 elemi szál tartalmú kötegben (*tow*) készül

és kerül karbonizálásra. Az amerikai tulajdonban lévő magyar karbonszálgár ambíciózus terve, hogy Európa legolcsóbb nagyszilárdságú erősítőszálát olyan nagy mennyiségben hozza forgalomba a 21. század legelején, hogy az valóságos technikai áttörést tegyen lehetővé a polgári célú alkalmazásokban is. Ha ezt sikerül elérni pl. a személygépkocsi alkalmazásokban – Európa egyik kompozitfejlesztési műszaki központja lehetünk.

A kőolaj alapú vagy kőszénkátrány alapú *szurokból (pitch)* is lehet karbonszál *prekurzort* készíteni. A sokat ígérő eljárás egyenlőre nem igazán olcsó (a szurok többszörös tisztítási igénye miatt), és kisebb szilárdságú, de jóval nagyobb moduluszú karbonszálat eredményez. A technológia főbb lépései megegyeznek a PAN alapú technológiával.

### 14.2.3 Az aramid szál

Az aromás poliamidok különleges szerkezetéből adódó szilárdságról és magas hőállóságról már korábban is esett szó (a 4.2 fejezetben).

Az aromás poliamid szálak – a hagyományos /alifás: nem gyűrűs/ poliamid szálakhoz hasonlóan – nagyfokú orientáció (azaz: nyújtás) során nyerik el nagy szilárdságukat. Az aramid szálak esetén ez már a folyadékállapotban vagy géles állapotban megjelenő rendeződéssel párosul, amelynek alapján több ilyen termék az ún. *folyadék-kristályos* polimer kategóriájába tartozik.

Alapjában két fő típus ismeretes:

- a *para*-kötéssel kapcsolódó aramidok (a benzolgyűrű *átellenes* pontjaihoz kapcsolódó kötésekkel), és
- a *meta*-kötéssel kapcsolódó aramidok, amint azt már bemutattuk. A szál-alakban gyártott aramidok azonban – a különleges nyújtási technológia és az így elérhető nagyfokú orientáció révén, – az aramid tömböknél is jóval nagyobb szilárdságot mutatnak.

A para-kapcsolódású aromás poliamid szálak (KEVLAR, TWARON, TECHNORA) 3000 MPa feletti szakítási szilárdságukkal és 60 ÷ 120 GPa közötti húzó moduluszukkal a legjobb acélhuzalokkal vetekszenek, miközben sűrűségük csak 1,44 g/cm<sup>3</sup>, s így még a karbonszálnál is könnyebbek. Az aramid szállal erősített kompozit kitűnik rendkívüli szívósságával, ütésszállóságával is. Ez adja az aramid szálak előnyét ütéssel és nyírással szembeni igénybevétel során, pl. golyóálló mellény formájában. Kompozit erősítőanyagként gyakran alkalmazzák karbonszállal együtt, *hibrid* erősítőrendszerben.

A KEVLAR szálak kitűnő szilárdsága igen jól hasznosul a gumikompozitokban pl. a radiál-gumiabroncsokban. A NOMEX típusú szálból epoxi vagy fenolgyanta kötőanyaggal papírvékony kompozitlemez készíthető, amelyből végső soron különleges kompozitbetét-alkatrész készül: a hullámpapírhoz hasonló küllemű, de igen szilárd *méhsejt* lemez (*honeycomb*).

#### 14.2.4 A polietilén szál

Nagy molekulatömegű ( $10^6$  Dalton) ún. UHMWPE típusból (*Ultra-High-Molecular Weight Polyethylene*) gél jellegű oldatból kiindulva, és nagymértékű orientációt (nyújtást) alkalmazva igen nagy szilárdságú polietilén szálakat lehet előállítani (HOPE: *Highly Oriented Polyethylene*). Az 1990-es évek technológiájának e vívmánya igen sokat ígérő, hiszen a legolcsóbb alapanyagból, nem túl költséges technológiával rendkívüli szilárdságot hoz ki (l. 14.1 táblázat). Az eljárást még néhány évig szabadalmak védik, így egyelőre a termék igen drága, és csak néhány gyártó nyeri vissza a hosszú idejű fejlesztési munka költségeit. A 3000 MPa feletti szakítási szilárdság, amely a víznél kisebb sűrűséggel párosul, a tömeghez viszonyítva mindenesetre messze meghaladja az acél mutatóit.

A HOPE szálak elterjedését a polimer kompozit technikában egyelőre két fő tényező gátolja:

- A PE hőállósága a HOPE esetén is korlátozott. A legmagasabb móltömegű PE is feloldhatóvá, felolvaszthatóvá válik  $140\text{ °C}$ -on.
- A PE csekély kötődése, adhéziója igen nehéz feladat elé állítja a konstruktórt. A PE-típusok rossz ragaszthatósága közismert. A szál kötődése pedig a legfontosabb kompozit kritérium.

Mindkét korlát kiterjesztésére intenzív fejlesztőmunka folyik. A térhálósítás javíthat a hőállóságon. A felületi maratás, utólagos kopolimerizáció a kötődést javíthatja. A HOPE szálak alkalmazása vegyes erősítőszálakkal (*hibrid* kompozitban) pl. karbonszállal együtt, epoxi matrixban sokatígérő.

#### 14.2.5 Egyéb erősítőszálak

A polimerkompozitok egyéb erősítőszálai között kiemelhetők a fémszálak. Az acélszálak erősítő funkcióját a gumikompozitokban (acélradial gumiabroncs, nyomásálló gumitömlők, szállítószalagok) közismert és jól bevált. Itt is különös figyelmet kell fordítani a határfelületi réteg tapadásközvetítő funkciójára. Ezt gyakran az acélhuzal galvanikus rézbevonatával javítják.

Növekvő jelentőséget kapnak a bórszálak az újabb kompozitokban. Ezt rendszerint bórhalidok redukciójával állítják elő igen vékony wolfram szál mag felhasználásával. Újabban egyre több hőálló erősítő szálakat fejlesztenek ki a kvarc-aluminát-bór összetett rendszer alkalmazásával. Ezek a szálak az erősítés mellett villamos vezetőképességet is eredményeznek, ami fontos lehet pl. a repülőgép-szárny vagy kompozit légszárny villám-állósága szempontjából.

### 14.3 A kompozitmechanika alapjai

#### 14.3.1 A terhelés irányában, hosszú szállal erősített kompozit szilárdsága

A hosszú (végtelen, nem vágott) szállal erősített kompozit alkatrészünk méretezéséhez legfontosabb a kompozit  $\sigma_c$  szakítási szilárdságának és az  $E_c$  (húzó) rugalmassági modulusának kiszámítása a szál (*fiber*) és a matrix megfelelő ( $\sigma_f$ ,  $\sigma_m$  és  $E_f$ ,  $E_m$ ) adataiból.

Idealizált kompozit modellünk tehát váltakozó rétegekből áll:

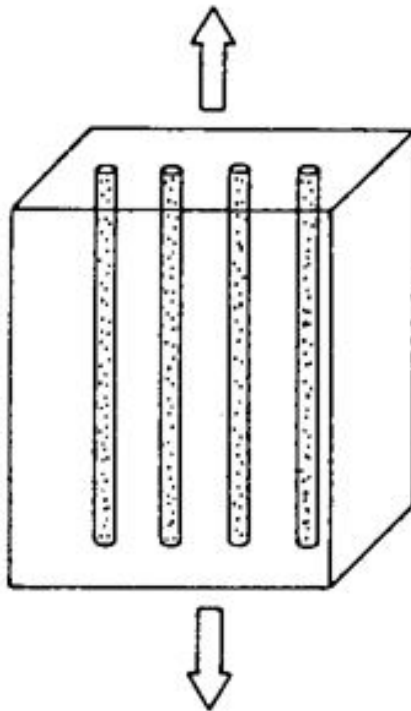
- nagy szilárdságú és nagy moduluszú szálas erősítőanyagból és
- nagy engedékenységgű, ( $J=1/E$ ) szivós matrixból.

Alapfeltételként kell vennünk a kompozit definíció legfontosabb kritériumát: a *kapcsolat*, az adhézió, az együttműködés a szál és a matrix között olyan erős, – és az is marad jelentős deformációk esetén is, – hogy a kompozitra a szállal párhuzamosan ható erő ( $F_c$ ) azonos deformációt okoz a szálaban és a matrixban („*iso-strain*” condition)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f = \varepsilon_m.$$

A kompozitra ható terhelés egy részét a szál, más részét a matrix viseli el:

$$F_c = F_f + F_m$$



**14.4 ábra:** Egyirányú szállal erősített kompozit terhelése a szállal párhuzamosan

Mivel általában  $F = \sigma \cdot A$ , így

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

A 14.4 ábrából az is könnyen belátható, hogy az erőhatásra merőleges keresztmetszet felületarányai egyúttal a kompozit összetevőinek *térfogat arányait* is megjelenítik ( $l_c \cdot A_c = V_c$ ):

$$\sigma_c V_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

Ha  $V_c$ -t egységnyinek tekintjük, (vagy osztunk vele), s mivel az adott kompozitban csak két komponensünk van,

akkor

$$V_f = 1 - V_m \quad V_m = 1 - V_f$$

tehát a kompozit szakítási szilárdsága ez esetben kiszámítható az összetevők szilárdságából és a szálerősítés térfogathányadából.

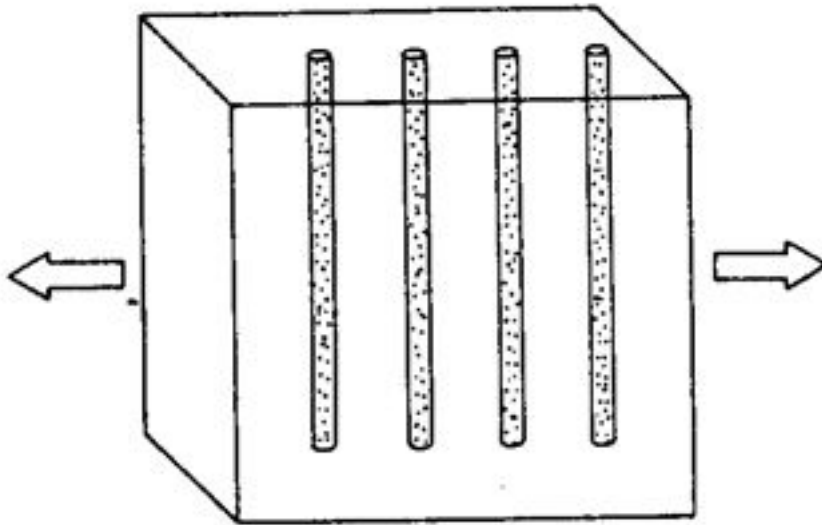
$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)$$

A Hooke törvény érvényessége esetén és a *nyúlásazonossági* feltétel fennállása miatt hasonlóan számolhatjuk ki a kompozit rugalmassági modulusát is

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Ez az ún. *Voigt-szabály*, vagy egyszerű „keverési” szabály (*rule of mixtures*), amely a kontrakciót, illetve Poisson-tényezőt elhanyagolja, ezzel azonban – az alkalmazások többségében – legfeljebb 1–2 %-t téved.

#### 14.3.2. A polimer kompozit szilárdsága a szálerősítés irányára merőlegesen



**14.5 ábra:** Egyirányú szállal erősített kompozit terhelése a szállal merőlegesen

A szálerősítés irányára *merőlegesen* ható erő *azonos feszültségállapotot* („*iso-stress*” *condition*) létrehozni a kompozit rétegeiben:  $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$ , amely azonban az eltérő modulusok miatt eltérő *deformációkat* eredményez a szálon és a matrixban.



Húzó igénybevételnél például a teljes méretváltozás ( $\Delta l_c$ ) a szál és a matrix rétegek deformációjából adódik össze:

$$\Delta l_c = \Delta l_f + \Delta l_m$$

Ugyanezt kifejezhetjük a fajlagos nyúlással is, s mivel  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  így

$$\varepsilon_c \cdot l_c = \varepsilon_f \cdot l_f + \varepsilon_m \cdot l_m$$

Ha a Hooke törvény érvényességi tartományában vagyunk, akkor  $\varepsilon = \sigma / E$  alapján

$$\frac{\sigma_c}{E_c} l_c = \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot l_f + \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot l_m$$

Mivel a  $\sigma$  feszültség az egyes rétegekben – s így a kompozit egészében – azonos, így

$$\frac{l_c}{E_c} = \frac{l_f}{E_f} + \frac{l_m}{E_m}$$

Ezúttal is könnyen belátható, hogy a rétegvastagságok aránya valójában térfogathányadot képvisel, így

$$\frac{V_c}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

Ha a kompozit egységnyi térfogatában ( $V_c=1$ )  $V_f$  a szálerősítés térfogathányada és  $1-V_f$  a matrix térfogathányada, akkor

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{1-V_f}{E_m}$$

ami átrendezés után

$$E_c = \frac{E_f E_m}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}$$

kifejezést ad

Ez az ún. *Reuss-szabály*, amely alapján az összetevők moduluszából kiszámíthatjuk a kompozit moduluszát. Figyelemre méltó, hogy ebben az esetben is az összetevők *térfogathányadából* és nem tömegarányából kell kiindulni, ami a tipikus (1 g/cm<sup>3</sup>-hez közeli) matrix sűrűség és az ennél jóval nagyobb (1,4 – 2,6 g/cm<sup>3</sup>) tipikus szálsűrűségek mellett jelentős különbség.

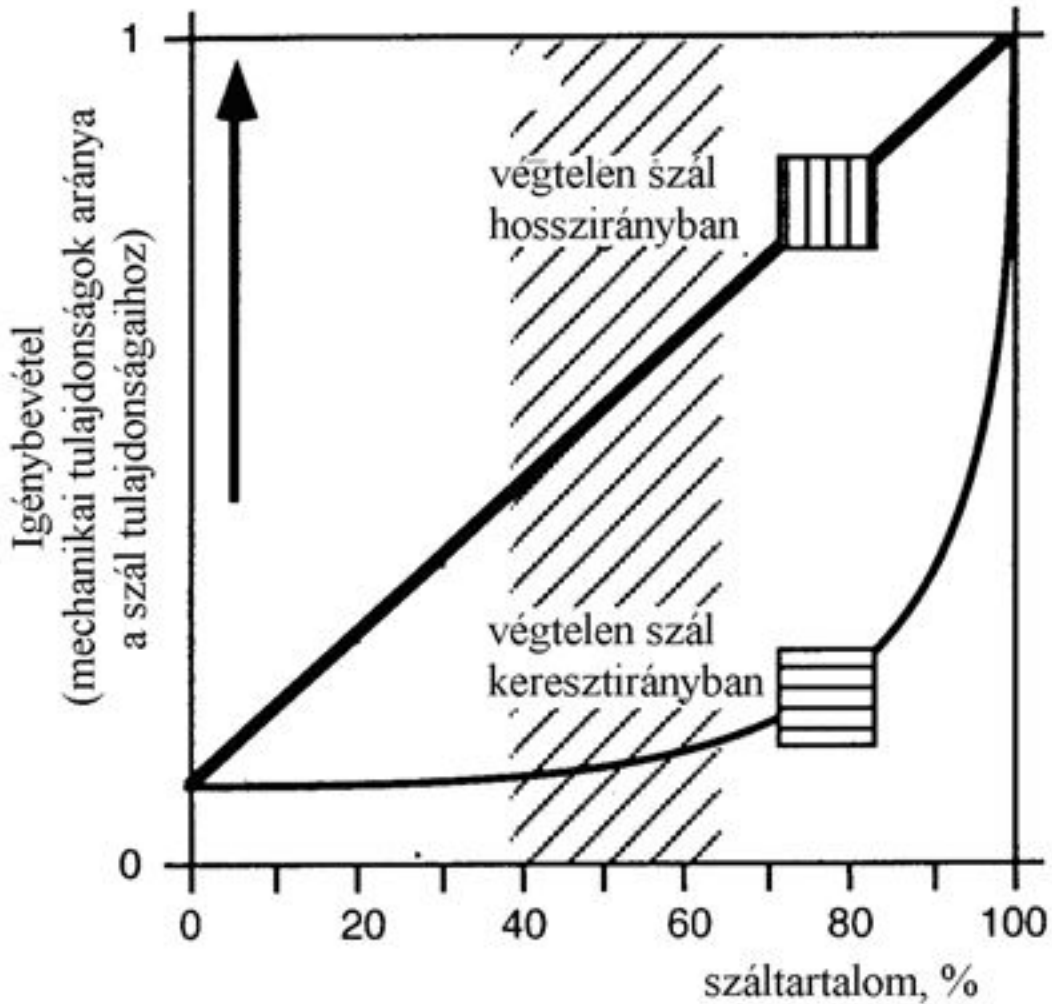
Jegyezzük meg, hogy a szálirányra merőlegesen terhelt kompozit  $\sigma$  szilárdságára nem ilyen alakú képlet érvényes, az ugyanis az első közelítésben a leggyengébb réteg: a matrix szilárdságával azonos.

A terhelés irányában és az arra merőlegesen elhelyezett szálerősítés hatása közti lényeges különbséget jeleníti meg a 14.6 ábra.

A gyakorlatban a szálerősítés térfogathányada nem lép túl a  $0,35 < V_f < 0,65$  tartományon: geometriai és technológiai határok sem teszik lehetővé, hogy polimer kompozitunk több mint 65 térf. % szálerősítést tartalmazzon. Másfelől a szál erősítőanyag modulusza és szilárdsága is tipikusan 1 vagy 2 nagyságrenddel nagyobb, mint a matrixé. Így – ökölszabályként – nem tévedünk nagyot, ha *első közelítésben* a kompozitnak a szállal párhuzamosan mérhető szilárdságát és moduluszát *csak a szál* szilárdságából és moduluszából, a szál térfogathányadával arányosan számoljuk, a matrixra vonatkozó összetevőt pedig elhanyagoljuk.

Közelítőleg érvényes tehát, hogy

$$E_{c,II} \approx E_f \cdot V_f$$
$$\sigma_{c,II} \approx \sigma_f \cdot V_f$$



**14.6 ábra:** Egyirányú szállal erősített kompozit szilárdsága, illetve modulusza a szállal párhuzamos és merőleges terhelés esetén (a vonalkázott terület a gyakorlatban előforduló tipikus kompozitokat jelöli) [14.28]

Ugyanakkor – megint csak első közelítésben – a gyakorlatban megvalósítható szál-koncentrációk tartományában – a terhelés irányára *merőlegesen* beépített szál gyakorlatilag alig növeli a kompozit moduluszát és egyáltalán nem növeli szilárdságát. Ebben az irányban tehát jobb, ha csak a matrix szilárdságával és moduluszával számolunk.

Ezek az egyszerűsített egyenletek a mikromechanikai szempontok miatt finomításra szorulnak. A szálerősítésre merőleges irányban mérhető modulusz például a gyakorlatban valamivel jobbnak mutatkozik, mint az a *Reuss-szabályból* következik. Ezt veszi figyelembe a *Halpin-Tsai* egyenlet

$$E_{c\perp} = E_m(1 + \zeta \cdot \eta \cdot V_f) / (1 - \eta \cdot V_f)$$

ahol  $E_{c\perp}$  : a kompozit modulusza a szálirányra merőlegesen

$E_m$  : a matrix modulusza

$V_f$  : a szál térfogathányada

$\zeta$  : a határfelület minőségét és a szállal töltés (*packing*) geometriáját figyelembevevő állandó, s végül

$$\eta = \frac{E_f / E_m - 1}{E_f / E_m + \zeta}$$

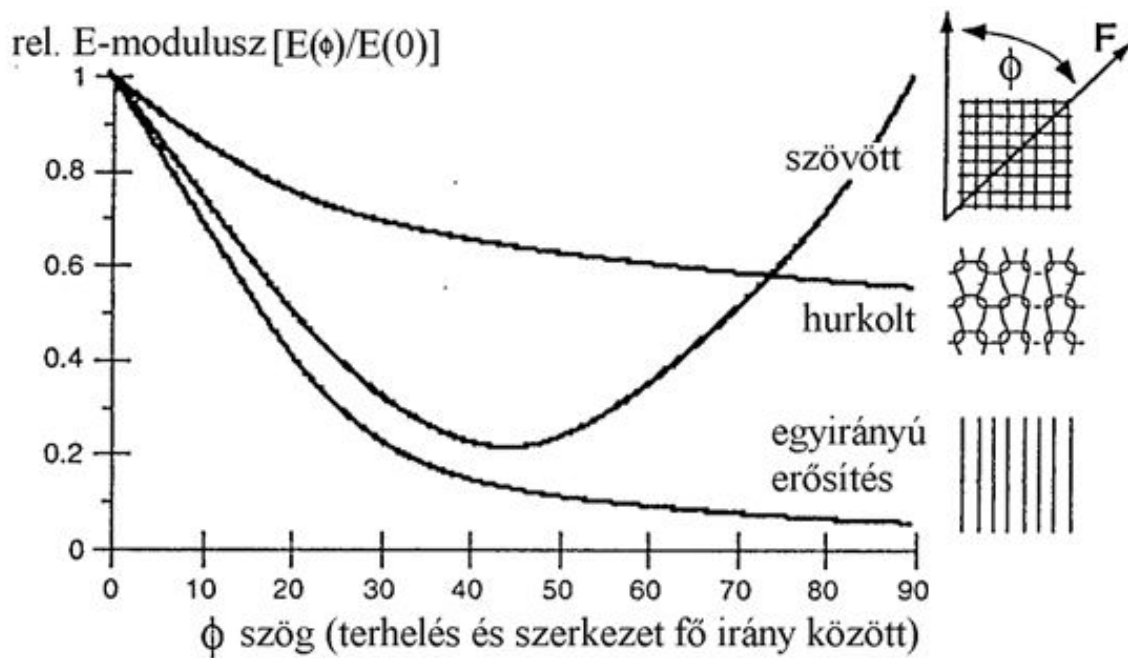
### 14.3.3 A kompozit szilárdsága az erősítés irányától eltérő szög alatt

Az alkatrésztervezésben legfontosabb mechanikai jellemző, a rugalmassági modulusz – és hasonlóképp a szilárdság is – mint láttuk, jelentős mértékben függ a szálirány és a terhelés által bezárt szögtől. Egyebek között ez is indokolja, hogy a párhuzamos szákkal erősített rétegekből egynél jóval többet alkalmazunk, illetve egyéb – szövött és nemszövtt, hurkolt, nemezelt – textilszerkezeteket rétegezzünk egymásra szálereősítésként. A 14.7 ábra háromféle erősítő rendszerhatásának irányfüggését mutatja.

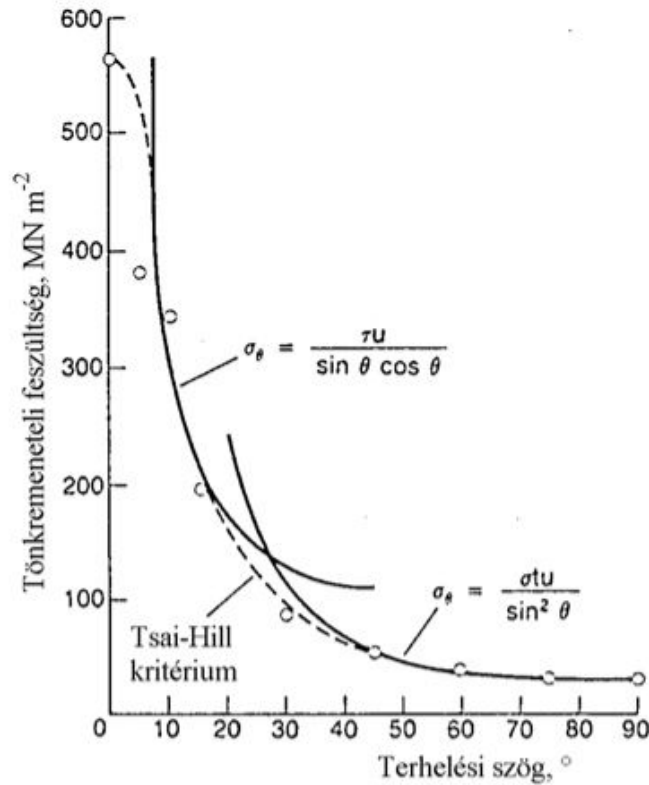
Valójában a szilárdság függése a szálirány szögétől ennél is bonyolultabb, mivel a mikrorepedések terjedésének mechanizmusa más a kis szög ( $0-18^\circ$ ) és nagy szög ( $>40^\circ$ ) alatt érkező terhelés esetén.

Ezt mutatja be a 14.8 ábra az egy irányban erősített karbonszálal epoxi kompozit példáján.

Ezek szerint a kis szögek tartományában a tönkremenetel határfeszültsége a  $\tau$  nyírófeszültségtől függ, nem úgy, mint a magasabb szögeknél ( $>40^\circ$ ), ahol  $\sigma$ -tól függ, de más típusú függésben. A *Tsai-Hill kritérium* pedig nem a feszültséget, hanem a tönkremenetel során végzett munkát veszi számításba.



**14.7 ábra:**A kompozit rugalmassági modulusának függése a száliránytól egyirányú erősítés, 1x1 (vásznonkötésű) szöveterősítés, és hurkolt kelmével történő erősítés esetén [14.28]



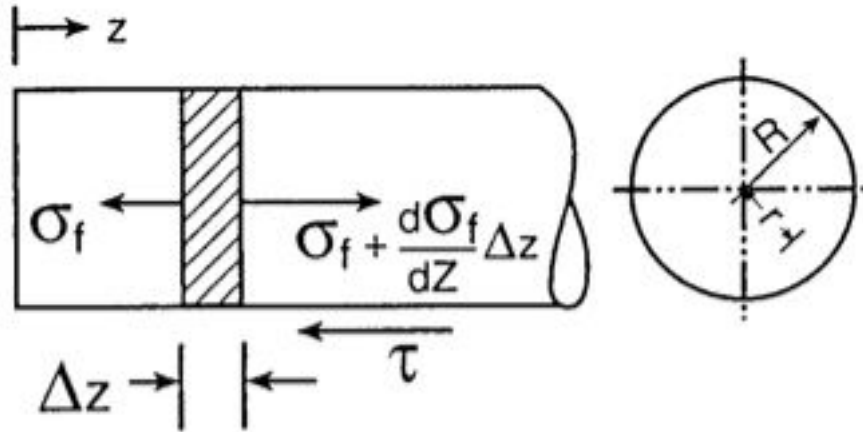
**14.8 ábra:**Az egyirányú karbonszállal erősített epoxi kompozit tönkrementeteli feszültségének függése a terhelés szögétől [14.27]

#### 14.3.4 Vágott, rövid szállal erősített polimer kompozitok

A fenti megfontolások az igen hosszú, gyakorlatilag végtelen szállal erősített kompozitokra vonatkoztak. Az elmúlt 20. század utolsó évtizedében a rövid szállal erősített kompozitok is megjelentek a polimertechnikában. A vágott (1–2 mm hosszú) üvegszállal erősített PA-66 pl. rendkívül fontos szerephez jutott a gépkocsigyártásban, fröccsönthető motor-alkatrészként.

A rövid szálerősítésre is érvényesek a kompozitok definíciójából következő alapelvek: a nagyszilárdságú, lehetőleg nagy fajlagos felületű szállak jó tapadást kell biztosítania a szál-matrix határfelületen. A szál még alkalmas, legkisebb hossza (rövidsége), pontosabban  $l/d$  aránya ezzel a tapadással hozható kapcsolatba. Könnyen belátható, hogy egységnyi határfelületre vonatkoztatott állandó értékű tapadást feltételezve, van egy olyan *kritikus szálhossz*, amelynél rövidebb szálat a húzóigénybevétel alkalmával tönkrement minta felületéből *kihúzzhatunk*, s amelynél hosszabb szál a jó beágyazottság, a jó tapadás következtében maga szakad el a tönkrementel pillanatában. E kritikus szálhossz kiszámításához tekintsük át a következő modellt.

A határfelületen  $\tau$  feszültséget okozó nyíróerőt kell a szál saját szakítási szilárdsága ( $\sigma_f$ ) által behatárolt erővel szembeállítanunk:



14.9 ábra: Kritikus szálhosszúság a rövid szálas erősítésű kompozitban

Erőegyensúly esetén

$$\sigma_f \cdot R^2 \pi + \tau \cdot 2R\pi dz = \left( \sigma_f + \frac{d\sigma_f}{dz} \Delta z \right) R^2 \pi$$

(A jelölések értelmezése a 14.9 ábrán látható)

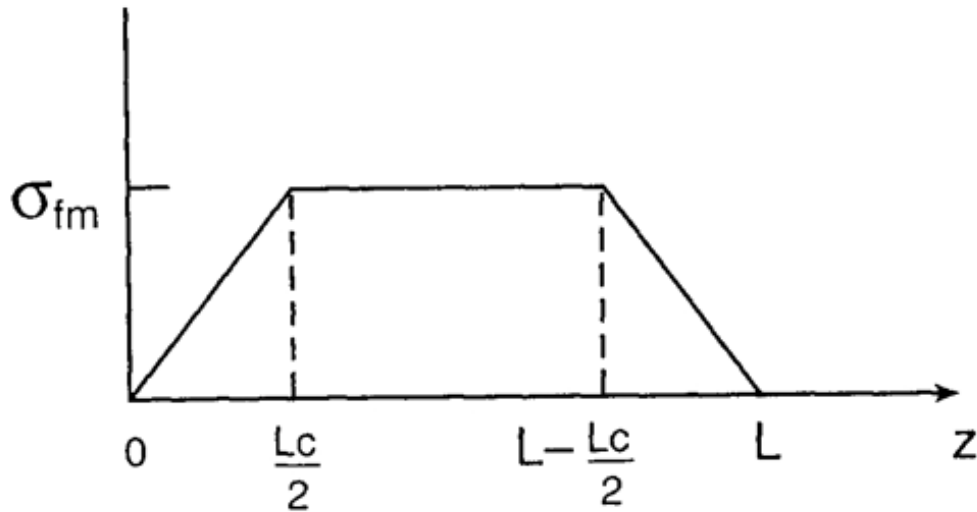
Egyszerűsítve és integrálva azt kapjuk, hogy a feszültség a szálban a z koordinátával lineárisan nő egy  $L_c$  kritikus határ-hosszúságig (14.10 ábra).

$$z = \frac{\sigma_f R}{2\tau} = \frac{L_c}{2}$$

amiből (R sugárról D átmérőre térve át) a kritikus szálhosszúság és az átmérő viszonyára a következő kifejezés adódik:

$$\frac{L_c}{D} = \frac{\sigma_f}{2\tau}$$

Ez az ún. „Kelly-Tyson” összefüggés.



**14.10 ábra:**A szál-matrix határfelületen ébredő feszültség  $\sigma_{fm}$  és a kritikus szálhossz ( $L_c$ ) kapcsolata [14.10]

Egy tipikus E-glass-poliészter kompozitra pl. a következő adatok jellemzők:

Az üvegszál átmérője  $D = 7 \mu\text{m}$

szilárdsága  $\sigma_f = 1750 \text{ MPa}$

a határfelületen a nyírófeszültség  $\tau = 25 \text{ MPa}$

Ezekből az adatokból  $L_c/D = 35$ , vagyis az üvegszál kritikus, minimális hosszúsága az adott esetben 0,25 mm.

Nyilvánvaló, hogy a kompozit alapelv, a szálak erősítés jótékony hatása viszonylag rövid szálakkal is megvalósítható, ha a tapadást jellemző határfelületi nyírófeszültséget ( $\tau$ ) növelni tudjuk. A századvég *molekuláris tervezés* elvű (molecular engineering) megközelítése éppen e vékony rétegek – szélső esetben monomolekuláris határréteg – mint felület tudatos felépítésén (*surface engineering*) ért el jelentős műszaki eredményeket. Az üvegszál-poliészter határfelületen korábban mért  $\tau = 25 \text{ MPa}$  ma már korántsem jelenti az elérhető maximumot. Megfelelő *tapadásközvetítő* (*adhesion-promoter, Haftvermittler*) anyaggal ez a nyírófeszültség jelentősen megnövelhető. A következő 14.2 táblázat jól mutatja ennek hatását a kritikus szálhosszúságra.

$\tau$ (MPa)	5	25	50	100	250
$L_c / D$	175	35	18	9	4
$L_c^*$ (mm)	1,2	0,25	0,13	0,07	0,03

**2. táblázat - A kritikus szálhosszúság változása a határfelületi nyírófeszültség függvényében (\* $D = 7 \mu\text{m}$  tipikus szálátmérő esetén)**

A 7 m körüli szálátmérő közel van mai technikai lehetőségeink határához, másrészt tipikusnak tekinthető a természetes rostok körében (pamut, gyapjú, selyem, „farost”: mint elemi egység a cellulóz alapú

növényekben). Mivel ezek a magas határfelületi feszültségek nem elérhetetlenek a korszerű reaktív tapadásközvetítők segítségével, így akár az  $5 < L/D < 10$  "aspect ratio"-val rendelkező „fűrészport” is felhasználhatjuk szálerősítésként pl. a polipropilénben, hiszen a természetes rost több, mint egy nagyságrenddel nagyobb szilárdsággal és moduluszal rendelkezik, mint egy tipikus poliolefin (l. 16.5. fejezet).

A vágott rövidszálas erősítés rendkívül gyorsan terjed a jelen századforduló hőre lágyuló polimerjei között, annak ellenére, hogy az erősítés hatásfoka több tényező miatt korlátozott:

- a technikailag elérhető száltartalom ( $V_f$ ) kisebb, mint a nagyszilárdságú kompozitokban,
- a hatékonyságot az  $L_c$  korlátozza,
- a szálorientáció hatás: a statisztikus eloszlásban orientált szálak közül csak a terheléssel közelítőleg párhuzamos szálak erősítenek igazán,
- a szálak orientációját az ömledék-áramlás erőteljesen befolyásolja.

A rövidszálas kompozitok moduluszának kiszámítására a fentiek alapján a következő kifejezést javasolták:

$$E_c = \eta_{\theta} \cdot \eta_l E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f)$$

ahol  $\eta_{\theta}$  = a szálorientációt figyelembevevő hatékonysági tényező

$\eta_l$  = a szálhosszúságot figyelembevevő hatékonysági tényező

#### 14.4 Polimer kompozit termékek gyártástechnológiái

Ha a szálerősítésű polimer kompozit alkatrészek és termékek gyártási technológiáit könyvünk alapvető technológiai felosztásának megfelelően kívánjuk tárgyalni, akkor célszerű megkülönböztetnünk

- a hőre lágyuló polimer matrixú rendszerek
- az *elasztomer* alapú kompozitok éshőre lágyuló
- a sűrű térhálós, *duromer* matrix alapján felépített kompozitok előállítási módszereit.

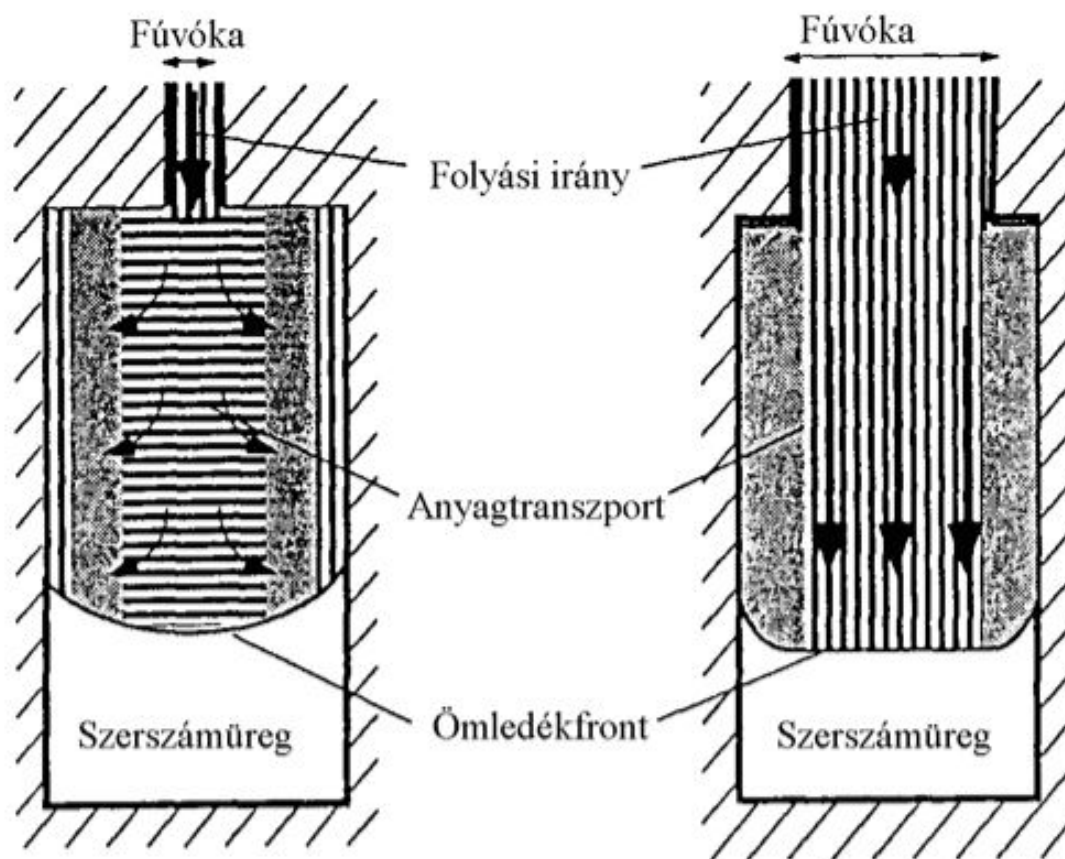
Ezek közül az első csoport, a *hőre lágyuló* polimer matrix alapján felépített és rövid (vágott) szállal erősített kompozitok egyre bővülő családjának feldolgozási technológiái lényegében a *képlékeny alakítás* kémiai reakciókkal nem járó technikái. Ezzel szemben az *elasztomer* és *duromer* kompozit technológiák *reaktív* feldolgozási technikák, amelyben a kompozit matrix kívánatos sűrűségű térhálóját a végső feldolgozási technológia során kell kialakítanunk.

A hőre lágyuló kompozitok feldolgozástechnikái tehát lényegében a már megismert sajtolási, fröccsöntési, extrudálási, melegformázási technikák. A feldolgozási folyamat *reológiája*, az ömledékáramban úszó rövid erősítőszálak végső orientációja természetesen nagymértékben befolyásolni fogja a technológia



eredményességét, a kompozit jellegét, a szálerősítés hasznosulását. A fröccsöntés során pl. a beömlőcsatorna és a termék falvastagság-arányából orientációs hatás állhat elő (14.11 ábra).

A szokásos szűk beömlőnyíláson át, nagy sebességgel megtöltött fröccs-szerszám *falán* a rövid szálak orientációja a fröccsöntés irányával párhuzamos, de a belső *magban*, adott esetben az alkatrész fő tömegében a szál-orientáció erre éppen merőleges lesz: (14.11 ábra, bal oldali képe). Alkalmasabb, előnyösebb, ha a beömlőnyílást kiszélesítjük, így a termék „magjában” is nagyobb esélyünk van a párhuzamos, hatékony szálerősítésre (14.11 ábra, jobb oldali kép). Ez az eljárás már közelebb áll a fröccs-sajtoláshoz. Hasonló megfontolásokat kell alkalmaznunk az extrúziónál is.



14.11 ábra: A szálak orientációja rövid szállal erősített hőre lágyuló kompozitban [14.28]

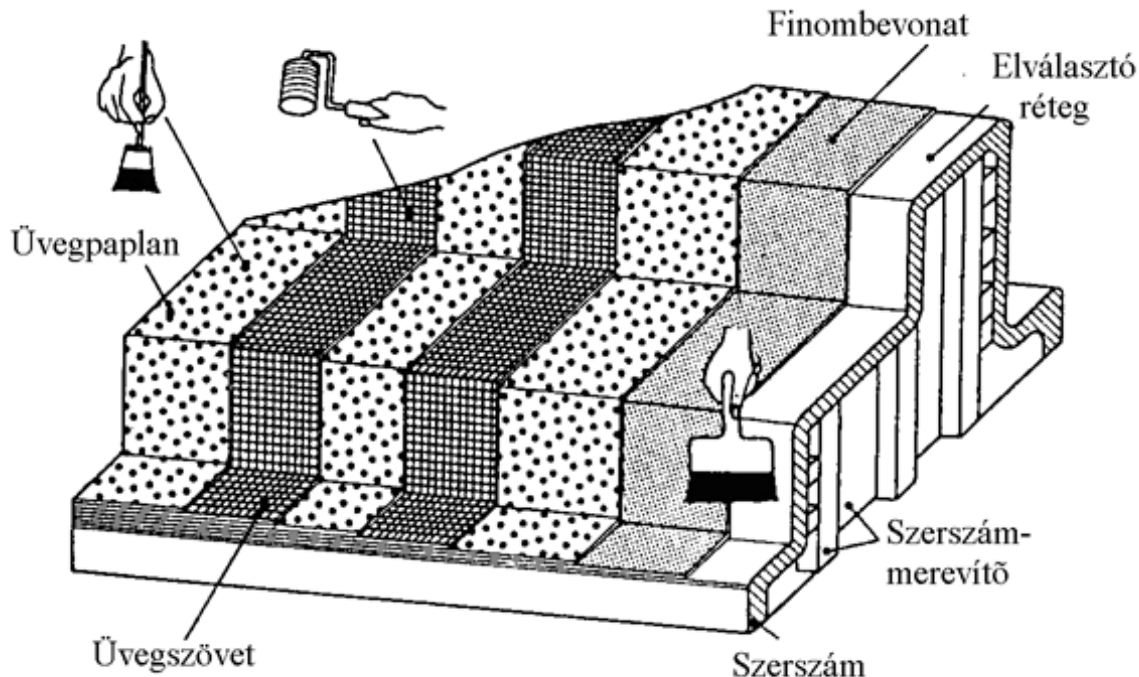
A *hőre lágyuló* matrixú, szálerősített kompozitok között különleges helyet foglal el az autóiipari alkatrészgyártásban növekvő szerepű GMT (*Glasfaser-Mattenverstärkte Thermoplaste*) anyagcsalád. Ez lényegében üvegszálból és hőre lágyuló polimer (pl. PP, PE, PA, PET...) szálból készült nem-szőtt, (pl. tűnemezelt) kelme („paplan”), amelyet előgyártmányként hoznak forgalomba, s amelyből **sajtolással** kitűnő kompozit készíthető. A sajtolás során a hőre lágyuló szál megolvad, s többé-kevésbé összefüggő, igen hatékony matrixot képez. Az üvegszál más természetes szákkal is keverhető. A különféle eredetű és funkciójú, hosszú szálak a textilipar hagyományos gépein együtt feldolgozhatók, kártolhatók, tű-nemezelvek és számos módosítást is kaphatnak.

Az előtermék tartósan tárolható és változatos térformájú sajtolt terméké – pl. autó ajtó belső lemezzé – dolgozható fel.

A következőkben a legtipikusabb polimerkompozit-technológiákat, a sűrű térhálós (duromer) matrix kialakításával együtt járó módszereket, az UP, EP alapú, nagyszilárdságú üveg-, karbon- és aramidzállal erősített rendszerek gyártási technikáit tekintjük át.

#### 14.4.1 Laminálás, szórás

Az erősítő rétegek kézzel történő egymásra illesztésével (*hand-lay-up, lamination*) építették fel mintegy ötven éve az első modern polimer kompozit termékeket sorozatgyártásban: így készültek, pl. a szövetségesek partraszállásakor felhasznált üvegszálaspoliészter hajók. Az egyszemélyes sporthajóktól a családi yachton át az aknaszedő cirkálóig – amelyeket fémmentes szerkezetük érzéketlenné tesz a tengeri aknákkal szemben – ma is a hajóipar a kompozitok egyik legnagyobb felhasználója.



14.12 ábra: A kézi laminálás alapelve [14.15]

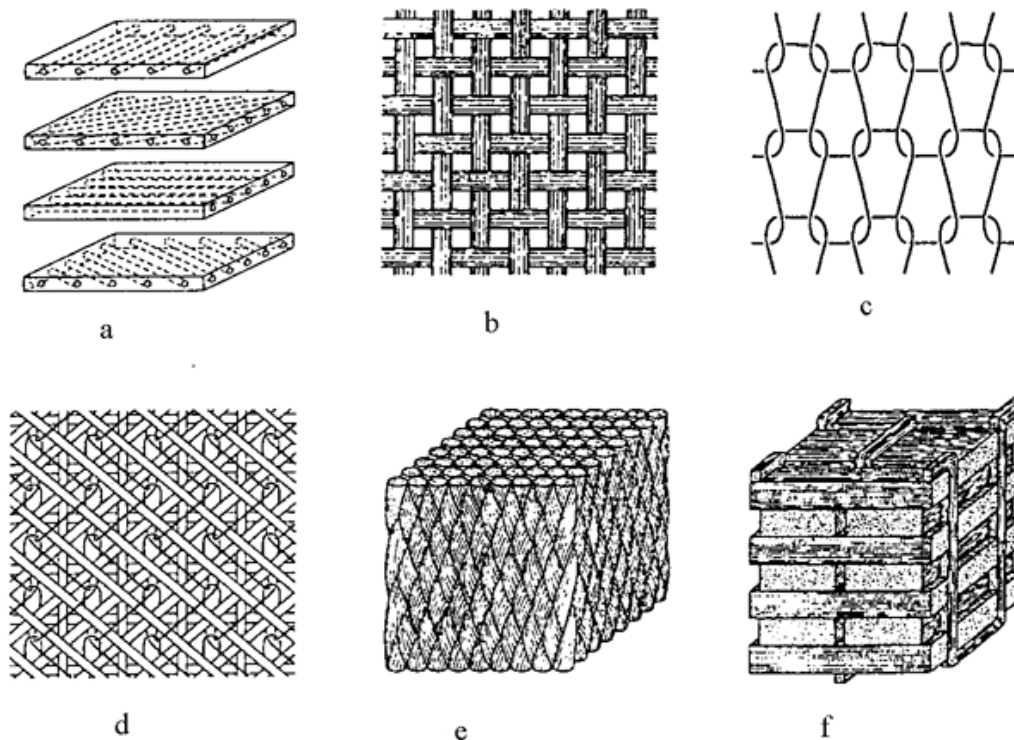
A kézi laminálás alapelvét a 14.12 ábra mutatja. A fémből, fából, vagy akár gipszből készült *szerszámra* egymás után visszük fel a különféle szálerősítő rétegeket, és a megfelelő viszkozitású – a folyamat elején még oligomer állapotú – gyantarétegeket.

A szálerősítőanyag lehet: egyirányban vagy több irányban erősített, szőtt, nem szőtt (nemezelt) vagy hurkolt („kötött”) kelme, vagy vastagabb, 3D szövet, ill. textília (14.13 ábra). Az erősítőanyag rétegvastagságát a  $m^2$ -súly jellemzi:

- az üvegszál paplanoké tipikusan 200 – 400 g/m<sup>2</sup>,
- a „roving”-szöveteké (roving = köteg, pászma, több ezer elemi szálból) tipikusan 300 – 900 g/m<sup>2</sup>,
- az üvegszöveté tipikusan 50 – 500 g/m<sup>2</sup>.

A kész kompozit lemez állhat akár 20 rétegből is, elérheti a 20 mm vastagságot is, és a konstrukció által megkívánt sarokpontokban tartalmazhat jelentős megvastagítást, megerősítést, bordát, fém-betétet stb. Felépülhet szendvics-lemez formájában is, és mindezzel tág teret ad a konstruktőr kívánalmainak.

A réteges felépítés biztosítja a kompozit konstrukció legfőbb műszaki előnyét: a teljes alkatrész, a termék szilárdságát minimális önsúly mellett úgy optimalizálhatjuk, hogy az igénybevétel – előre tervezhető – erővonalai mentén kapjuk a legnagyobb szilárdságot. A korai kézi laminálás ezen alapelve jut érvényre a mai legigényesebb „high-tech” kompozittermékek az aeronautika és asztronautika eszközeinek gyártási technológiáiban is. A konstrukció feladata tehát a rétegek méretezése, az irányok meghatározása, a rétegrend kialakítása.



**14.13 ábra:** Az erősítő textilek alaptípusai [14.28] a) egyirányban erősített szalag b) roving szövet c) hurkolt kelme d) multiaxiális, több rétegű szövet e) 3D szövetek f) 3D szövetek ortogonális kötéssel

A technológia másik kulcs-kérdése: a térhálósítás kézbentartása (kontrollja) az oligomert és monomert is tartalmazó matrix alapanyag teljes átalakulásáig (konverziójáig). Nem lehet eléggé hangsúlyozni a technológus

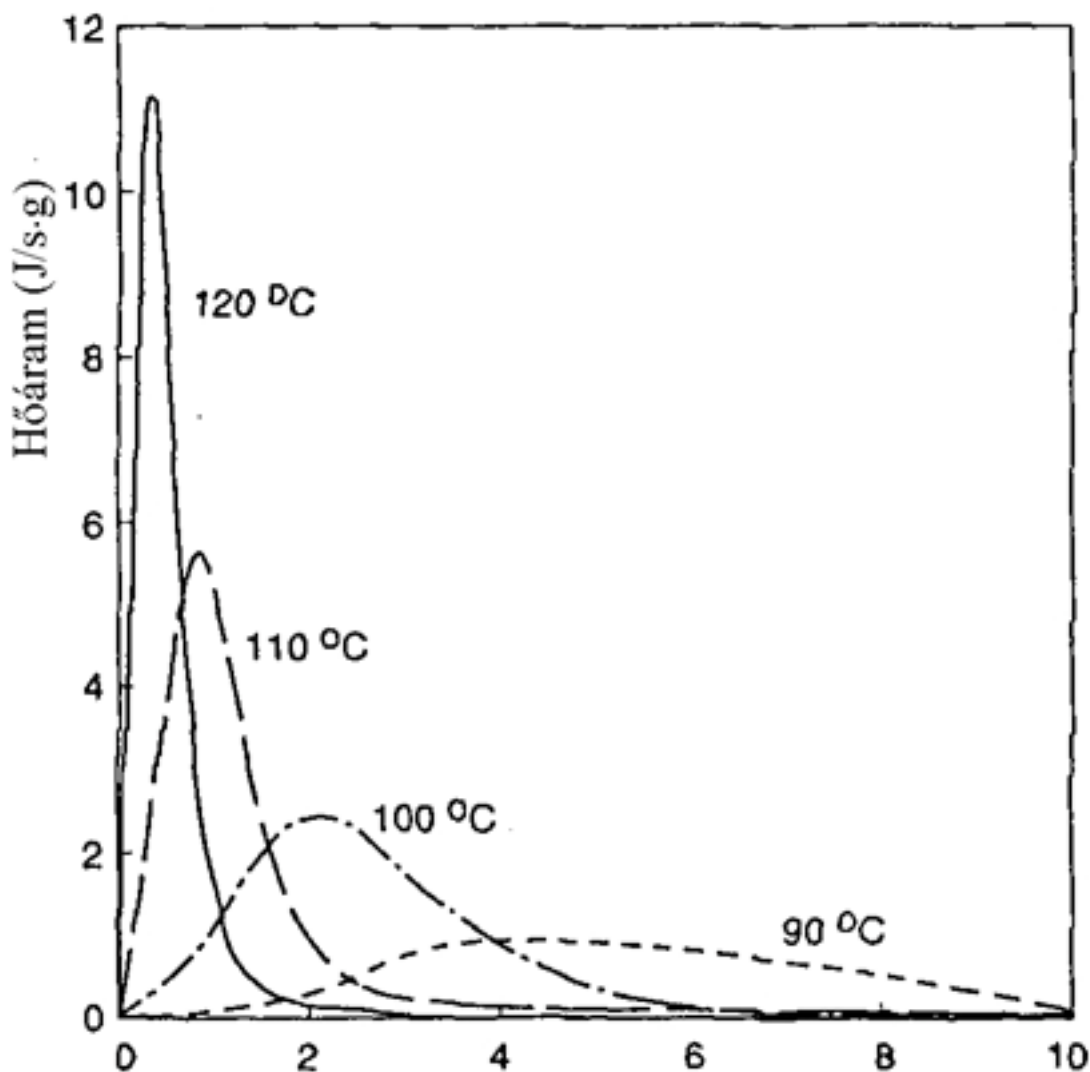
mérnök felelősségét: minden egyes duomer kompozit darab, termék tényleges műszaki teherbírása, fizikai és mechanikai tulajdonságai attól függenek, hogy az adott darabban mennyire közelítettük meg a teljes átalakulást, a reaktív csoportok 100 %-os konverzióját. Könnyű ugyanis belátni, hogy néhány %-os – sőt, akár néhány tizedszázalékos – monomer maradék is jelentősen módosíthatja a kompozit matrix  $T_g$ -jét és így pl. ütésállóságát egy kitüntetett hőmérsékleten. A maradék, nem reagált monomer gyökeresen módosíthatja a termék „öregedését”, fizikai és mechanikai tulajdonságainak változását az időben stb.

A kézi laminálás során pl. az üvegszálvázás poliészterek esetén a konverzió jól nyomon követhető a telítetlen poliészter és sztirol monomer közötti *exoterm láncreakció* hőeffektusának mérésével. Amint azt a 2.2.2 fejezetben megismertük, itt jelentős hőmennyiségek felszabadulásáról van szó. A „tisztá” monomer sztirol teljes polimerizációja *adiabatikus* esetben kb. 360 °C hőmérsékletemelkedést okoz. A kb. 35 % sztirolból és 65 % telítetlen poliészterből álló matrix teljes „kikeményedése”, térhálós láncreakciója még az 5–10 mm vastag technikai kompozitrendszerben is gyakorlatilag *adiabatikus*: elhanyagolhatóan lassú a hőleadás sebessége a láncreakció előrehaladásához képest. (V.ö. 4.13 ábra)

A „G” időtartam a gélesedés (térhálósodás) kezdetéig jól szabályozható a gyantába bekevert iniciátor (pl. 2 % ciklohexanon-peroxid) + gyorsító (pl. 1 % kobalt-naftenát) koncentrációjával. Nemcsak a gélesedés kezdete, de maga a reakció „hevessége”, lefutása is függ egyrészt az iniciálás hőmérsékletétől (14.14 ábra), másrészt az iniciátor koncentrációtól, s így az ettől függő iniciálási sebességtől, ami pl. a 14.15 ábrán az 1 és 6 görbe között 1 teljes nagyságrenddel csökken.

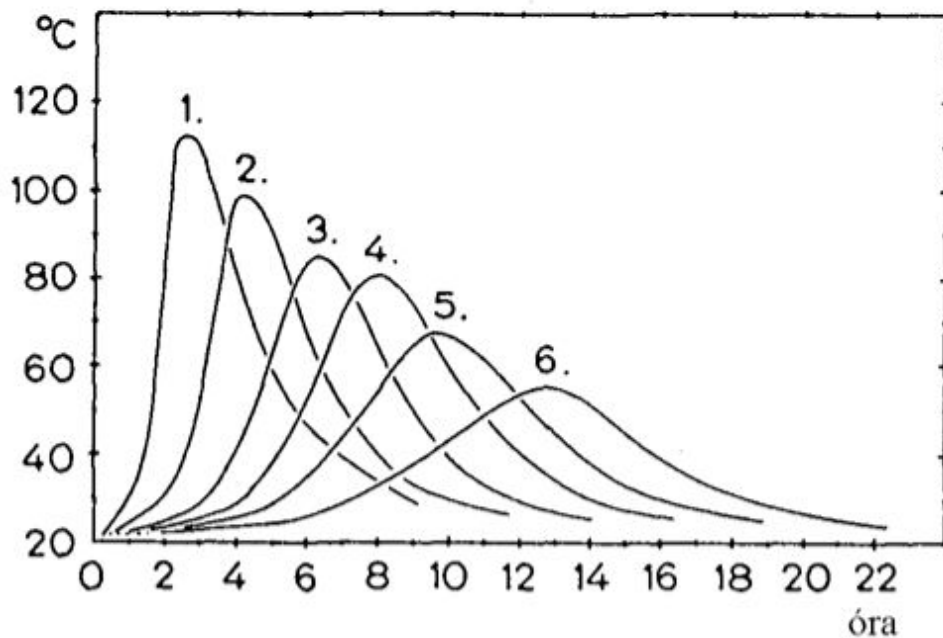
Szokás a reakció bejezésének a hőmérsékleti maximumot tekinteni. Valójában ez a pont a láncreakció legnagyobb sebességét jelöli. A reakció végpontja az a pont (közel a leszálló ág inflexiós pontjához), amelytől kezdve a mintán csak (fizikai) *hűlés* tapasztalható. Ez jól kimérhető a kompozitban (14.15 ábra).

A laminálás felületi – látszó – rétegeit gyantában dús, esetleg színezett gél-bevonat (*gel-coat*) rétegből alakítjuk ki. A szerszám felőli oldalon célszerű formaleválasztó réteget alkalmazni. A levegővel érintkező réteget érdemes  $O_2$ -t át nem eresztő fóliával borítani, hogy elkerüljük a felület „tapadosságát”, amelyet a tökéletlen térhálósodás okoz.

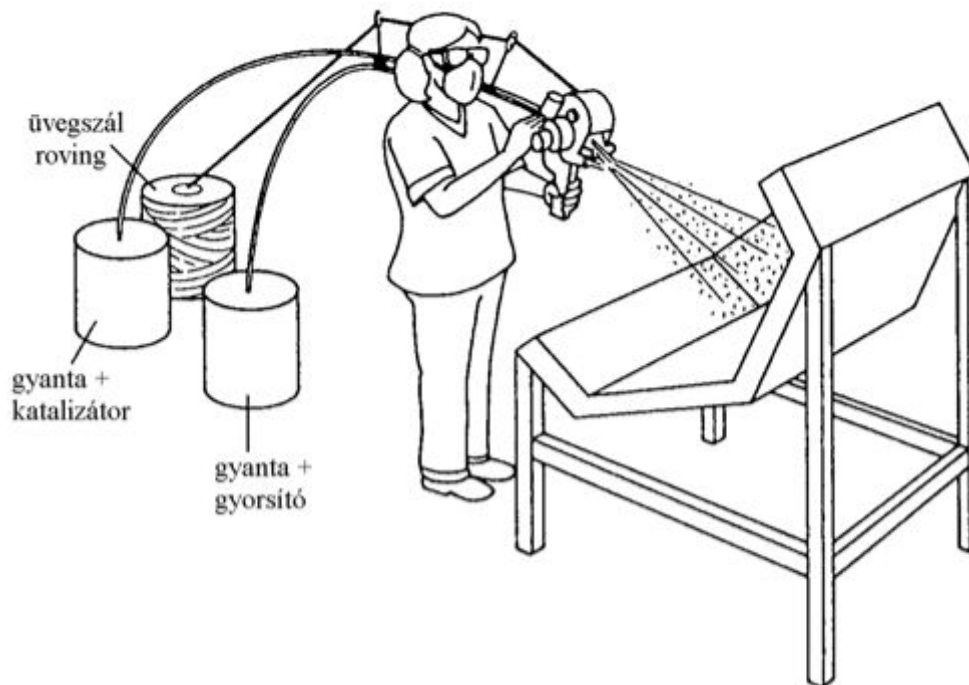


**14.14 ábra:** A hőfelszabadulás sebessége (J/s·g) egy tipikus poliészter gyanta különböző hőmérsékleten (120...90 °C között) indított térhálósítása során

Ha a kompozit termék mérete, formája erre módot ad, a szobahőfokon kivitelezett térhálósítást is érdemes emelt hőmérsékletű utólagos hőkezeléssel befejezni, teljessé tenni. A laminálási technológia némileg „gépesített” változatának tekinthetjük a *szórás* technológiáját, amelyben a vágott üvegszálból nemezelt paplan kézi felrétegezése és átítatása helyett alkalmas szórópisztolyból egyidejűleg szórunk fel – akár függőleges felületre is – vágott üvegszál-rovingot, iniciátorral és gyorsítóval kevert gyantát. A szórásnál és a laminálásnál – amelyeket gyakran kombinációban is alkalmaznak – egyaránt fontos a matrix gyanta és az erősítőszál közé szorult levegő eltávolítása.



**14.15 ábra:**Hőmérsékletemelkedés egy tipikus poliészter gyantakeverék szobahőfokon indított térhálósítása során keményfa kompozitban. Az iniciálási sebesség relatív értéke 1-től 6-ig: 3,0; 1,5; 0,78; 0,45; 0,30; 0,21



**14.16 ábra:**A kompozitszórási technológia vázlatja. A szórógép a kétféle gyantát és a roving-ból helyben vágott (kb. 20 mm-es hosszúságú) szálakat a gép fejében keveri össze és sűrített levegő segítségével a szerszámba juttatja. Az eljárás társítható szövetek kézi laminálásával is [14.13]

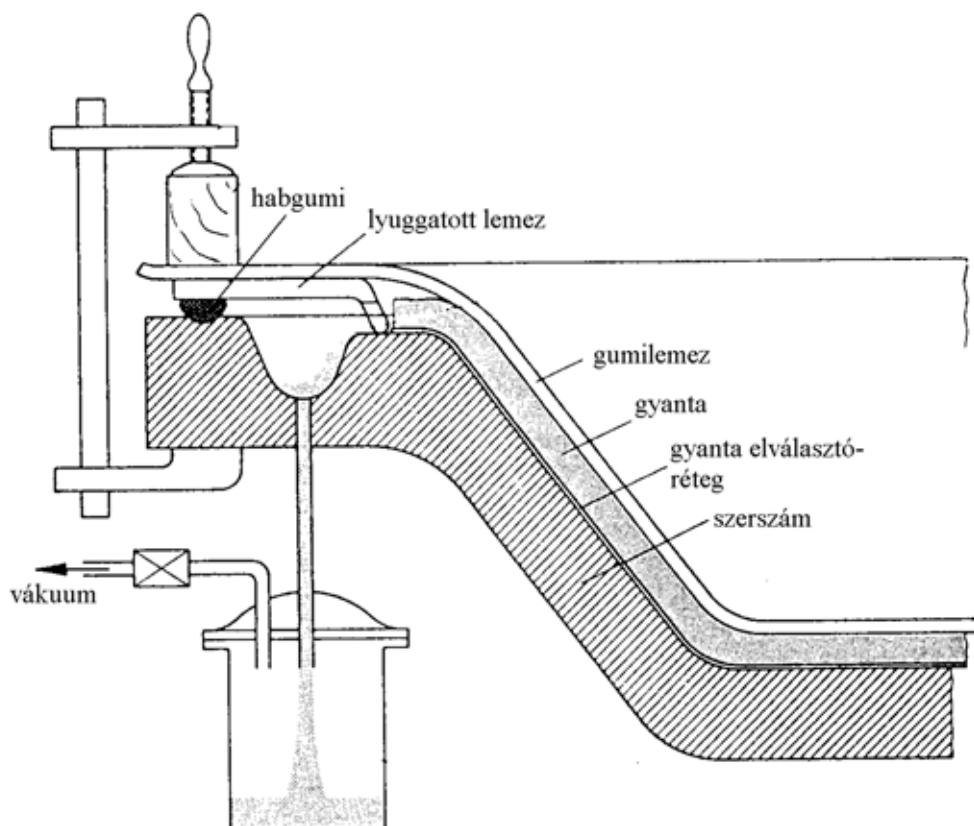
#### 14.4.2 Sajtolás (BMC, SMC, GMT)

A fenti kompozit technológia, a laminálás tulajdonképpen *nyomás nélküli* eljárás. A nyomásnak a térhálósítás során jelentős szerepe lehet a matrix és a szál közti kontaktus, tartós kapcsolat kialakításában.

Enyhe nyomóerőt (max. 1 bar) úgy is alkalmazhatunk a térhálósodó kompozit-lemezen, hogy a rugalmas gumilemezzel befedett laminátumot a szerszám felőli oldalon vákuummal megszívjuk. A vákuum maga végezheti a folyékony matrix-gyantával való feltöltést is, ezt hívjuk *vákuum-injektálásos* eljárásnak (14.17 ábra).

A térhálósodás végéig alkalmazott vákuum hasonló hatású, mintha a „kikeményítést”  $10 \text{ N/cm}^2 = 10^5 \text{ Pa}$  nyomás alatt hajtottuk volna végre.

Természetesen a nyomás alatti eljárásoknál célszerű *kétrészes* szerszámokat alkalmazni az eddig tárgyalt egyrészes – csak a termék egyik oldalát definiáló – szerszámok helyett. A vákuum-injektálás is kivitelezhető kétrészes szerszámokban. A nagyobb sorozatban gyártott kompozit alkatrészeket pl. a korszerű kamion-vezetőfülkéket, autóbusz és személyautó karosszériaelemeket manapság BMC, SMC, és GMT típusú kompozit előgyártmányokból sajtolják.



14.17 ábra: A kompozit vákuum-injektálás alapelve [14.11]

**BMC:** *Bulk Molding Compound*: „alaktalan” kompozit előimpregnátum („*premix*”) szálerősítésből és matrix oligomerből,

**SMC:** *Sheet Molding Compound*: lemezformájú kompozit előgyártmány („*prepreg*”) tekercs alakban tárolva,

**GMT:** *Glass-mat reinforced Thermoplastic*: paplan-formájú kompozit előgyártmány erősítőszálból és hőre lágyuló polimer szálból.

Ahogy azt már említettük, a GMT hőre lágyuló matrixra épül, ezért nem itt tárgyaljuk.

A BMC és SMC típusú prepregek közül az utóbbi a nagyobb jelentőségű. Az SMC előgyártmány („féltermék”, a végtermék alapanyaga) tipikusan 30–40 % vágott üvegszálból és 60–70 % telítetlen poliésztergyanta-keverékből áll, amely egyharmadában sztírol monomert tartalmaz. Az SMC üvegszál tartalma lényegében vágott (tipikusan 50 mm hosszú) *roving* (>1000 elemi szálat tartalmazó köteg, pászma). Az SMC gyártás lényegében folytonos üzemű *lemezgyártást* jelent, amelynek során két elválasztó fólia között (PE-film) kialakítják a gyantából, üvegszálból és adalékokból a képlékeny (–még nem térhálósított! –) tekercselhető előterméket. Az SMC adalékai egyrészt „passzív” adalékok, amelyek a terméket „terjedelmesítik”, vagyis olcsó töltőanyagként szolgálnak, egyúttal csökkentve a szerszámban, nyomás alatt és magasabb hőmérsékleten térhálósodó rendszer zsugorodását is. (CaCO<sub>3</sub>, talkum, PE-por). Másfelől „aktív” adalékokra is szükség van, amelyek közül a legfontosabbak az összeállított lemez matrix gyantájának „beduzzadását”, azaz gyors viszkozitás-növekedését biztosító *fémoxidok* (MgO, ZnO). Ez a viszkozitás növekedés néhány órával a gyártás után 3–5 nagyságrendet (!) is elérhet, biztosítva így, hogy a gyanta nem „folyik ki” az üvegszál mellől. Egyéb adalékok: csúsztatók, formaleválasztók, iniciátorok és gyorsítók is vannak a rendszerben, amely alkalmas tárolási körülmények között (hűtés), hónapokig eltartható a térhálósítás előtt.

Az SMC sajtolás során tehát – a hőre keményedő hagyományos gyantákhoz (bakelit, melamingyanta stb.) sajtolásához hasonlóan – tipikusan 20–40 bar nyomáson, 130–150 °C hőmérsékleten 1–2 min/mm ciklusidő alatt megtörténik a teljes térhálósodás. E ciklus elején az SMC (*prepreg*) először ömledékállapotba kerül: „megfolyik”, kitölti a szerszámüreget, majd hamarosan – a kémiai iniciátor hatására – a viszkozitás újra növekedni kezd és kialakul a térhálós, szálerősített rendszer.

Az SMC alapú teherautó- és személygépkocsi karosszériaelemek rendkívül nagy szilárdságúak, és nagyon jó ütésállóságú, szívós alkatrészek. Manapság az országúti teherforgalom nagy részében ilyen burkolatú kamionok teljesítenek szolgálatot.

#### 14.4.3 Tekercselés

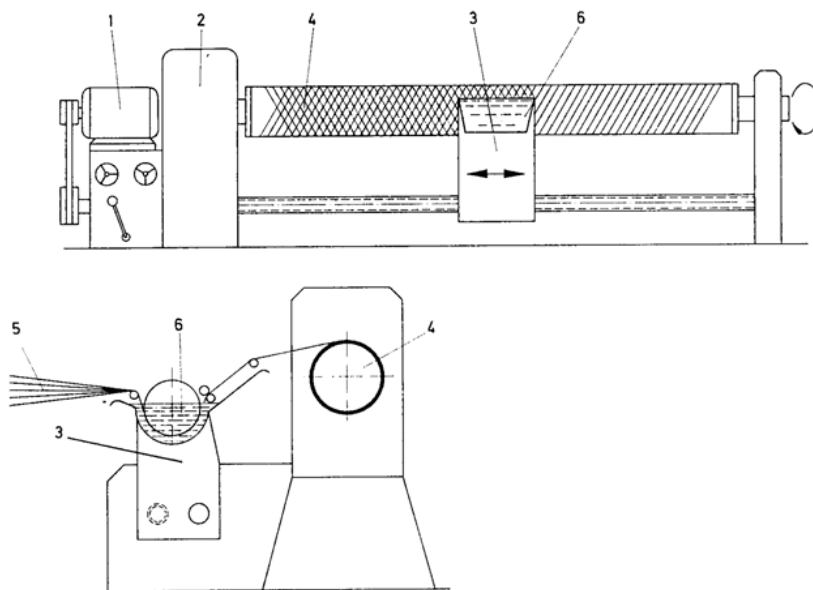
A terhelés kitüntetett irányában történő, anizotrop anyag-erősítés elve, a kompozit konstrukciók alapelve jól érvényesíthető a technika gyakran felhasznált elemei: a nyomásálló csövek ill. tartályok, és az erőátvitelre szolgáló rudak gyártásában. Jól ismert a mechanikából, hogy a nyomásálló csövek, hengeres tartályok héjának terhelése korántsem azonos a cső hosszirányában és arra merőlegesen a hengerpalást kerületének mentén.



Ezt a jól számítható követelményt jól kielégíthetjük polimerkompozit héjakkal, amelyekben a szálerősítést a *kívánt irányban* alkalmaztuk. Így kiemelkedően előnyös szilárdság/tömeg-viszonyú, és különleges követelményeknek is eleget tevő: korrózióálló, robbanásbiztos stb. erősített tartályokat, csöveket, rudakat stb. állíthatunk elő. A technológia vázlatát a 14.18 ábra mutatja.

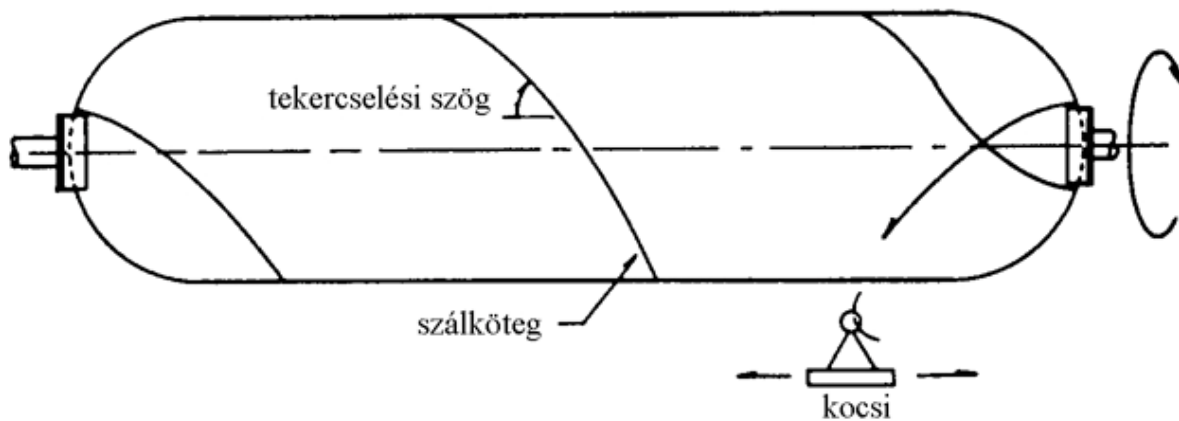
Az eredeti eljárásban enyhén kúpos magra tekerceslik fel az üvegszál köteget, (*roving*), amelyet előzőleg a matrix oligomerrel átítattak. A többszörös oda-vissza tekerceslés alakítja ki a többrétegű, több irányban erősített kompozit szerkezetet, amelynek térhálósítása a kúpos magon történik.

A tekerceslés (*filament winding*) kompozitgyártási technikának számos változata ismert. Újabban hőre lágyuló matrixszal is alkalmaznak folytonos erősítőszálat, és itt a feltekerceslés helyén ráolvasztva alakul ki a kötés. Ugyanígy alkalmazható a szalag formájú (*tape*) prepreg üvegszálás epoxi vagy karbonszálás epoxi előgyártmány tekercesléshez, amely után a technológia következő lépésében *autoklávban*, azaz nyomástartó hengerben, magasabb hőmérséklet és nyomás alatt történik a térhálósítás.

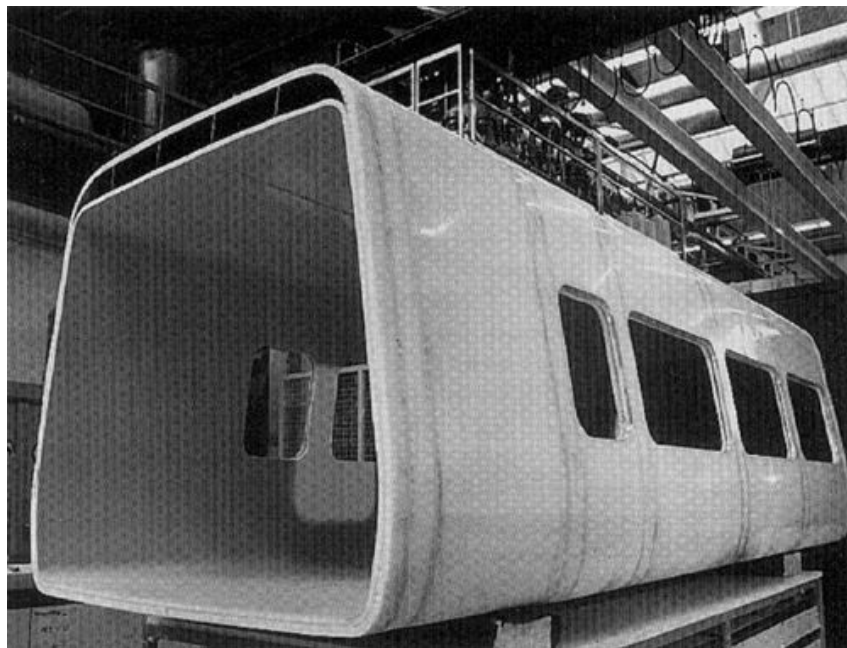


**14.18 ábra:** A kompozit tekerceslés alapelve [14.13] 1) motor, 2) meghajtás, 3) támaszték, 4) tekerceselő túske, 5) üvegszál pászma, 6) impregnáló fürdő

A tekerceslés – amely eredeti formájában is textiltechnológiai tapasztalatokon alapul – legújabb változatában sokoldalú technikát ígér erőátvitelre alkalmas üreges „zártszelvények”: csövek, profilok kialakítására. Ez a technika a fonatolás ill. körszövés (*braiding*) (14.21 ábra).

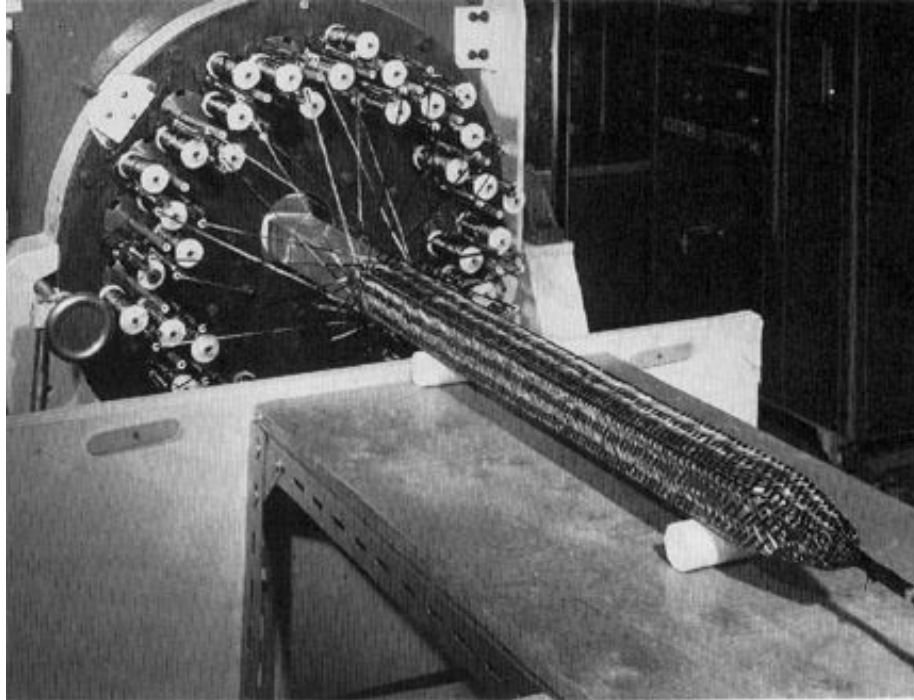


**14.19 ábra:** Poláros tekereléssel előállított nyomástartó edény polimer kompozitból



**14.20 ábra:** Tekereléssel készült üvegszál-as poliolészter kompozit vasúti személykocsi váz [14.28]

A körszövött vagy fonatolt textilrendszer impregnálása történhet utólag és az ezt követő hőkezeléshez hasonlóan megfelelő „alagútban”. Használhatunk gyantával előre átitatott (roving-) köteget is. A fonatolt előterméket ezután már csak térhálósítani kell.



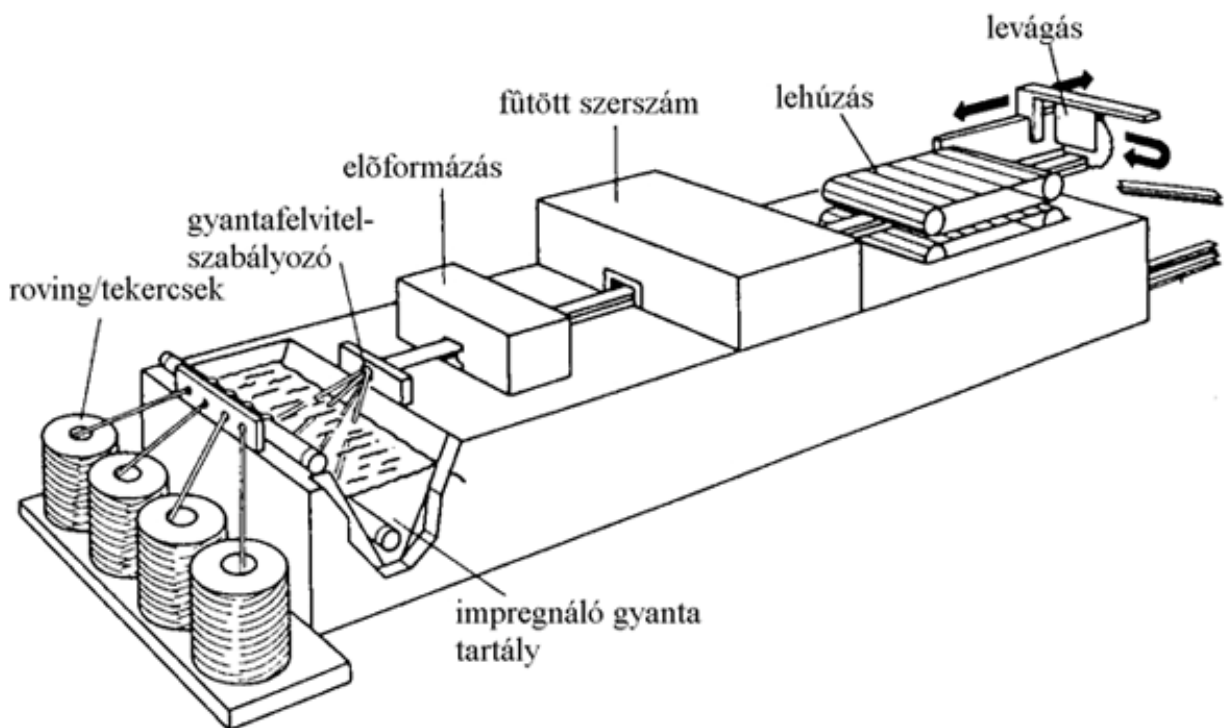
**14.21 ábra:**Karbonszál roving-ból körszövással készített, négyszög keresztmetszetű zártszelvény profil  
[14.27]

#### 14.4.4 Pultruzió

A hosszirányú, folytonos szállal erősített kompozit profilgyártás az extrúzióhoz hasonló eljárás, amelyben a húzásnak (*pulling*) igen nagy szerepe van: a térhálósítás befejeztéig a termék jelentős húzásnak van kitéve. Az erősítőszál hosszirányú kifeszítésének az előnyeit jól ismerjük az előfeszített vasbeton építőelemek kitűnő szilárdsági és rugalmassági adataiból.

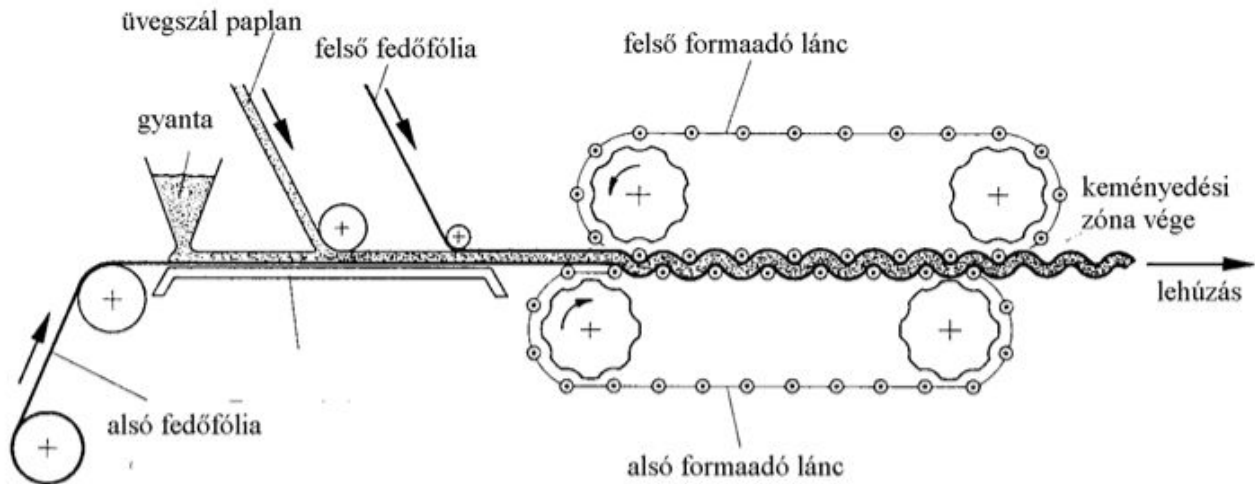
A 14.22 ábra jól mutatja a *folytonos* elvű gyártási eljárás lényegét: A szálkötegeket az oligomergyantával való átítítás után egy fűtött szerszámban egyesítjük, és ebben a szerszámban az állandó hosszirányú feszítés mellett megy végbe a matrixgyanta térhálósítása. A profilgyártó pultruziós sorok sebessége 1,5–60 m/h is lehet. A profilok lényegében kizárólag hosszirányú erősítőszálai a terméknek igen nagy húzó- és hajlítoszilárdságot kölcsönöznek. A termék kritikus tulajdonsága a keresztirányú szilárdság. Ezért újabban szövet-szalag vagy nemszött, nemezelt (*Vlies*) jellegű erősítést is alkalmaznak. A felületi simaságot további üvegszövet fátyol javíthatja a szálköteg szerszámba lépése előtt. A szerszám több előformázó lépcsőt tartalmaz, s egy tipikus U profil vagy C profil esetén akár 150 cm hosszú is lehet. A szerszám hőmérsékleti kontrollja kulcsfontosságú. A merev készterméket a kívánt hosszúságúra darabolják. Az üvegszálas poliészter profilok üvegszáltartalma 55 tömegszázalékig is felmehet. Az ilyen profilok húzó- és hajlítoszilárdsága 200 MPa feletti, a termék rugalmassági modulusa 15 GPa-nál is nagyobb.

A pultruzió alapelvét felhasználhatjuk hőre lágyuló polimer matrix alkalmazásával is. Pl.: üvegszállal erősített poliamid „pálcát” készíthetünk így – amelyet feldarabolva fröccsöntéshez alkalmas granulátumot állíthatunk elő.



14.22 ábra: A pultruzió vázlatja [14.13]

Folyamatos üzemű „elhúzással” készülnek kompozitlemezek is. A 14.23 ábra az építőiparban használt, üvegszál-erősítésű poliészter hullámlemez gyártósorát mutatja be. A síklemez gyártás hasonló elvű. A lemez formaleválasztó fóliára épül fel, ami tipikusan regenerált cellulóz („cellofán”) fólia. Erre kerül a folyékony oligomer gyanta, majd az üvegszál paplan. A fedőfóliát, ami ismét cellulózfólia, úgy hengerelik a lemezre, hogy abban légbuborék ne maradjon. A viszonylag hosszú (néhány méteres) hőalagútban történik meg a térhálósítás. Az 1,5 mm vastagságú, 35 % üvegszál tartalmú síklemez, vagy keresztirányban bordázott lemez rugalmassága megengedi, hogy tekercsben hozzák forgalomba.



14.23 ábra: Üvegszálás poliészter hullámlemez gyártósora [14.13]

#### 14.4.5 Összetett kompozit technológiák

A polimer kompozit gyártási technológiák sokoldalúságát integrált szerkezetek sorozatgyártásában a legjobban a közlekedés néhány mérnöki vívmányán vehetjük szemügyre. Számos szendvics szerkezetű repülőgép alkatrész, légszűrő, helikopter rotor, autóbusz karosszériaelem, személygépkocsi alkatrész készül kompozitból. Az AIRBUS utasszállító repülőgép polimer kompozit alkatrészeit a 14.24 ábra mutatja. Ez gép a koordinált európai műszaki fejlesztés és az összehangolt közös gyártás példája.

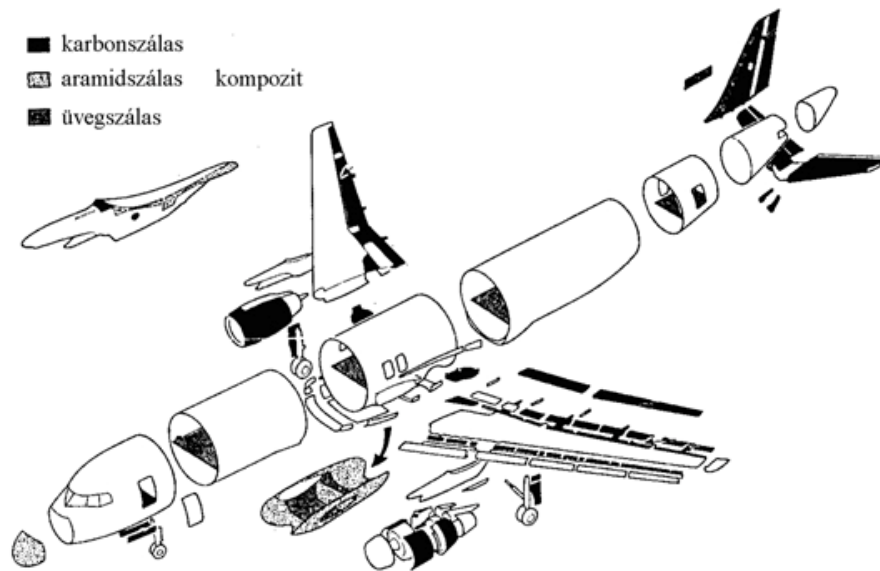
A franciaországi Toulouse-i székhelyű *AIRBUS Industrie* a következő összetételű konzorcium birtokában van:

AEROSPATIALE (F) 37,9 %,

Messerschmidt-Bolkov-Blohm (D) 37,9 %,

British Aerospace (UK) 20,0 %,

CASA (Spain) 4,2 %.



**14.24 ábra:** Polimerkompozit szerkezeti elemek az AIRBUS–320 repülőgépben [14.26]

A több közbülső típus után 1987-ben forgalomba állított A 310–320 AIRBUS most már nemcsak számtalan kis borítólemezt – áramvonalasító kiegészítést – a leszállókerekeket borító ajtókat, fedélzeti padlót és belső borító, tartóelemeket tartalmaz polimer kompozitból, hanem a vízszintes és függőleges *vezérsíkok* – a mozgatható szárnyvégződés – főbb elemeit is. Az AIRBUS függőleges vezérsíkja az oldalirányú kormányzás és stabilizálás fő eleme – a repülőgép „farka” – teljes egészében polimer kompozitból készül (14.25 ábra).

Ez az elem, amely alapjainál 7,8 m hosszú és 8,3 m magas, lényegében szénszál epoxi kompozitból készül. A szerkezet tömege 56,7 kg, és ez több, mint 20 % súlymegtakarítást jelent a korábbi alumíniumötvözet tömegéhez képest.

A rögzítőelemeket (szegecs, csavar) nem számítva, a polimer kompozit szerkezet 95 alkatrészből áll, szemben a korábbi fém-változat 2076 alkatrészével. A függőleges vezérsík mozgatható eleme, az „oldalkormány” tipikus „szendvics” szerkezet (14.26 ábra).

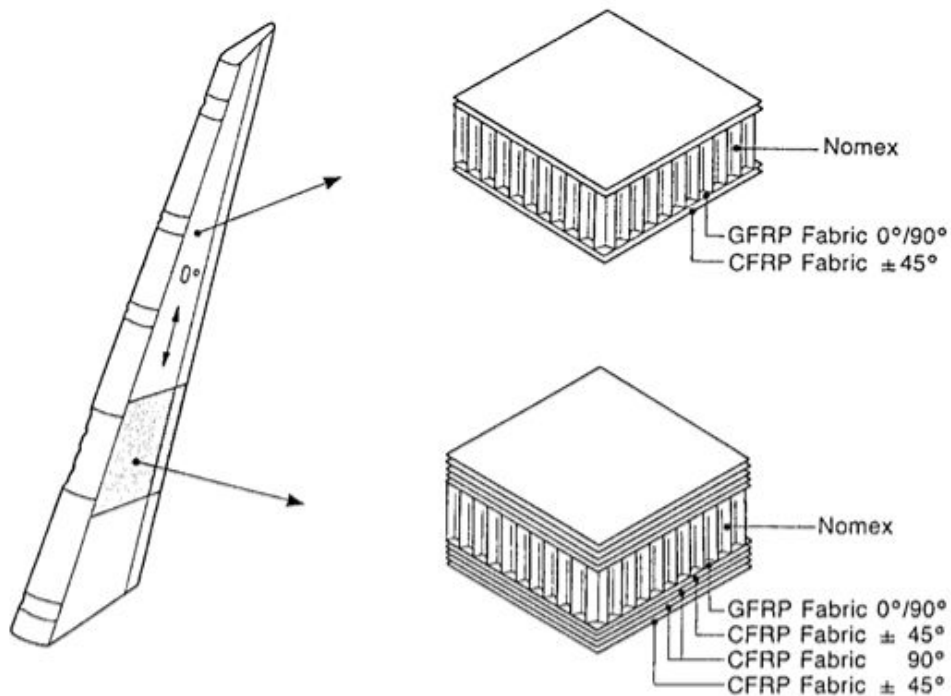
A szendvics technológia műszaki előnyei nyilvánvalóak: a főleg hajlításra igénybevett lemezek szélső rétegeinek kell nagy húzó ill. nyomószilárdsággal rendelkezniük, a mag- a semleges réteg környéke – sokkal kisebb igénybevételnek van kitéve.



**14.25 ábra:** Az AIRBUS–310 repülőgép polimer kompozitból készült függőleges vezérsíkjá [14.13]

A szendvicsmag maga is kompozit: a legtöbb esetben papírvékonyaságú aramid nemez vagy szövédék, amelyet novolak v. epoxi gyantával társítanak, majd a *méhsejt* (*honeycomb*) szerkezetű előgyártmány lemezzé alakítanak. A jól alakítható méhsejt lemez gyártásának két alapvető módszere van.

Az egyik módszernél a hullámpapír-karton belső elemekhez hasonló hullámosított lemezeket ragasztanak egymáshoz félhullám eltolással, majd az összeragasztott „tömbből” szeleteket vágnak úgy, hogy az így kialakított lemez a síkjára merőlegesen átjárható legyen.



**14.26 ábra:** Méhsejt szerkezetű polimer kompozit elemek az AIRBUS–310 függőleges vezérsíkjában [14.26]

A másik eljárásban hasonló tömb-összeragasztás után szeletelés, majd a rács széthúzása következik. Hasonló méhsejt szendvicsbetét alumíniumlemezről is készülhet. Tipikus adataikat a 14.3 táblázat mutatja.

Méhsejt szerkezetek	Lemez vastagság	Sűrűség	Nyomószilárdság
	μm	kg/m <sup>3</sup>	MPa
Alumíniumötvözet 5052	25,4	36,8	1,20
Alumíniumötvözet 5024	38,1	44,8	1,72
Üvegszövet/fenolgyanta	–	56,0	3,45
Üvegszövet/poliészter	–	64,1	3,86
Üvegszövet/poliimid	–	64,1	3,03
Aramid/fenolgyanta	50,8	48,1	2,65
Kraft papír/fenolgyanta	–	80,1	2,76
Balsafa (szálra merőleges)	*	96,1	3,45

### 3. táblázat - Kompozit szendvics maganyagok tulajdonságai [14.27]

A balsafát, amelyet összehasonlításként illesztettünk a táblázat méhsejt szerkezetei közé, sportszer kompozitokban jól hasznosítják. A repülőgépipar követelményei az *égésgátoltság* szempontjából rendkívül magasak. Ezeket legjobban a fenolgyanta matrixú papírvékony üvegszövet és aramid (NOMEX) szálerősítésű méhsejtek elégítik ki, az aluötvözetből készült méhsejtnél jóval magasabb nyomószilárdság mellett.

Egy tipikus kompozit alkatrész, a repülőgép függőleges vezérsíkjának álló része a hagyományos szárnykonstrukcióknak megfelelő bordázatra épül, amely főleg alumíniumötvözetből készül. A felület azonban több rétegben karbonszálalás epoxi prepregből (*tape*-ből) felépített.

Az egyirányú szálerősítést tartalmazó szalag formájú kompozit előgyártmány (*unidirectional tape, prepreg*), ma a haditechnikai és polgári repülés különleges kompozit szerkezeteinek legfőbb konstrukciós eleme. Ez lényegében csak hosszirányban lefektetett karbonszálakból álló, tekercselhető, szinte papírvékonyágú termék, amelyet rendkívül csekély mértékben elő-térhálósított matrix (tipikusan epoxigyanta vagy PEEK) fog össze. A még nem teljesen térhálósított matrix gyanta tapadás, így a szalagot elválasztó fóliák (*release-films, pl. PE*) közé tekercselik, amelyeket a felhasználás előtt el kell távolítani. A matrix gyanta tartalmazza a térhálósítást elindító termikus iniciátor-aktivátor rendszert, így tárolhatósága korlátozott (pl. 4–6 hónap), és a tárolás alatt hűtést kíván (pl. –18 °C). A tipikusan max. 1,5 m széles, 0,1–0,3 mm vastag lemezek kiszabása szabáscsúszalon történik, számítógép-vezérelt lézersugárral. A rétegrend és a rétegek irányítottságának szigorú tervét a konstruktor rögzíti. A korszerű katonai repülőgépek főbb elemei pl. a radar számára nem észlelhető „lopakodó” gyakorlatilag teljes szerkezete – akár 20-nál is több ilyen rétegből épül fel, fokozatosan vastagodva a nagyobb szilárdságot igénylő csomópontok felé. A rétegek felépítése, egymásra felhordása rendkívül gondos minőségellenőrzést igényel, és még ma is meglepően sok manuális munkát tartalmaz.

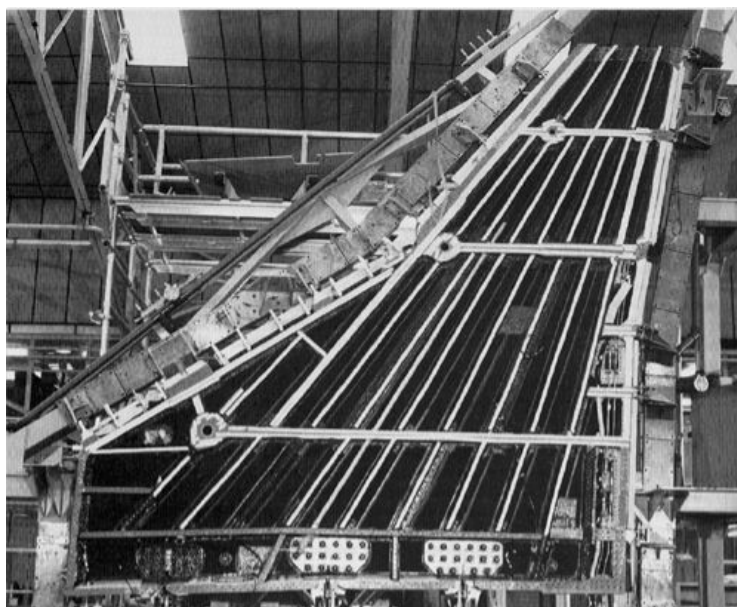


Az így felépített részegység megfelelő fém-szerszámba foglalva, *autoklávban* kerül végső kezelésre (*curing*) (14.28 ábra). Az autokláv óriási méretű (több méter átmérőjű) vízszintesen fekvő henger alakú, nyomástartó edény, amelyben a matrix gyanta *térhálósítása* magasabb hőmérsékleten (pl. 150 °C) és megfelelően hosszú idő – néhány óra – alatt maradéktalanul végbemegy. (Egy gumiiipari „kazánprést” a 13.26 ábra mutatott be.)

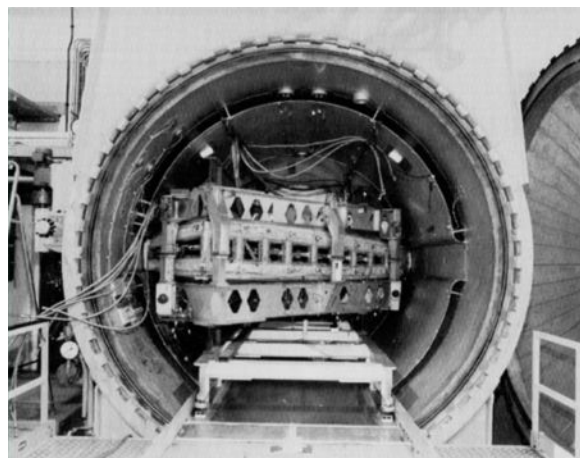
Az egyes részegységek (pl. törzs és farok) összeépítésénél is alkalmazhatunk kompozit technikát. Itt a térhálósítást lokális hőkezelés, esetleg UV-vagy elektronsugár kezelés indítja el.

A nagyszilárdságú, összetett kompozit szerkezetek sorozatgyártását jól illusztrálja a helikopter rotor szárnyak példája. (14.29 ábra)

A Brit Légierők polimer kompozit rotorral felszerelt *Westland Lynx* helikoptere tartja a helikopter sebességi repülés (több mint 400 km/h) rekordját. Elképzelhető, hogy milyen vibrációknak és hajlítóerőknek van kitéve ez a kompozit rotor, amelynek csúcán a sebesség eléri a 0,97-es Mach értéket.

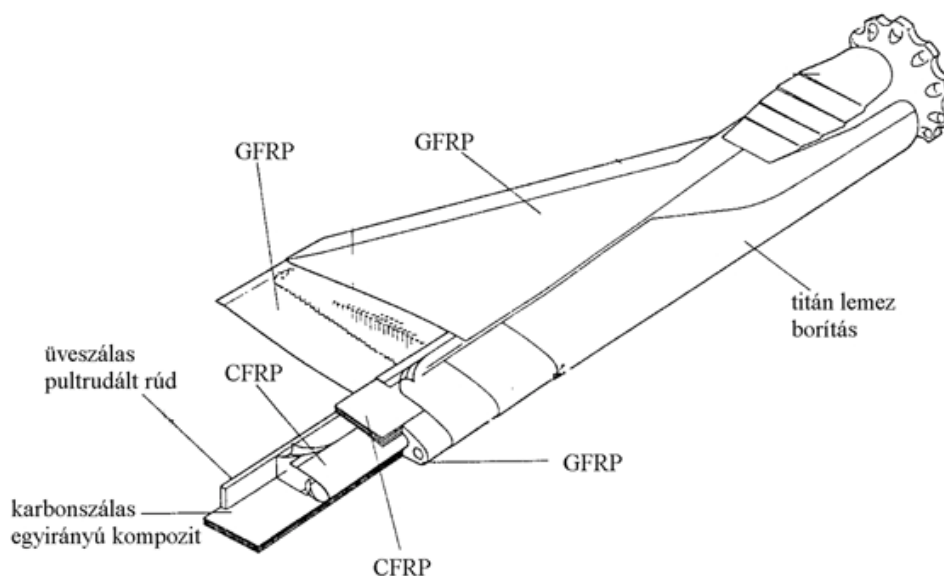


**14.27 ábra:**Polimer kompozit repülőgép részegység (vezérsík) a szerszámban [14.27]



**14.28 ábra:** Polimer kompozit repülőgép részegység az autoklávban [14.27]

A 12 m hosszú rotorok fő kompozit alapanyaga a CIBA-GEIGY Fibredux-Carbon 913 C XAS 5 prepeg, amelyet hasonló üvegszál-karbonszál hibrid erősítésű prepreggel, sőt: nikkellel borított szénszál prepreggel váltakozva alkalmaznak. Ez utóbbi vezetőképes réteg teljes védelmet nyújt villámcsapással szemben.



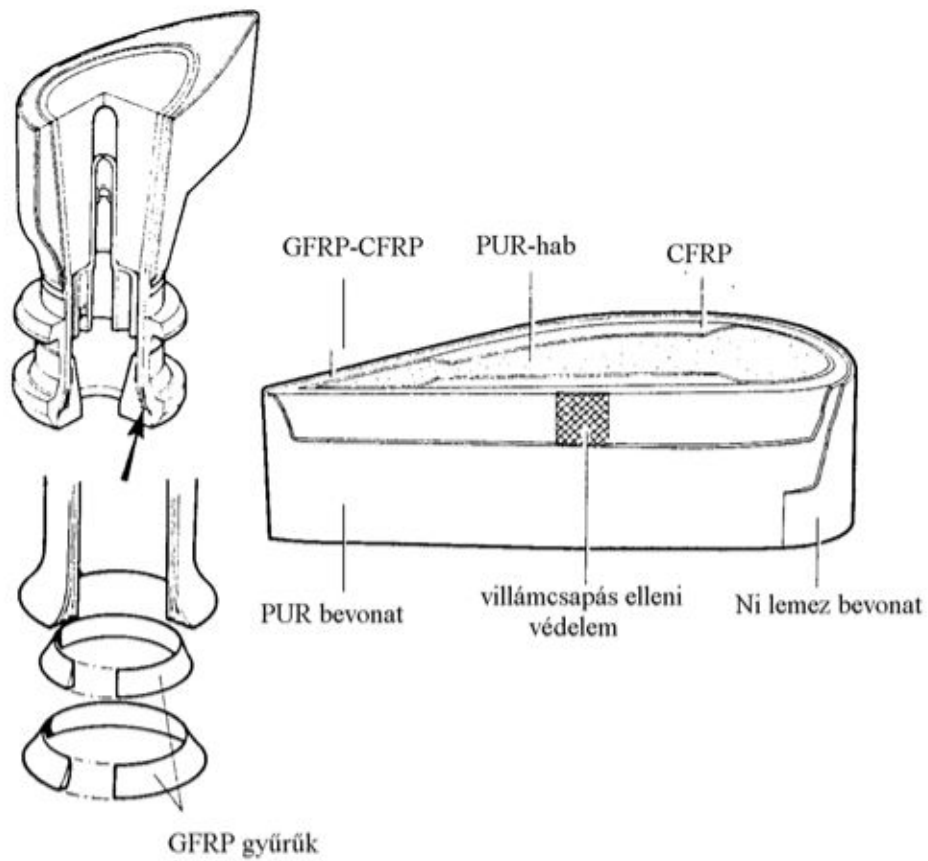
**14.29 ábra:** Helikopter rotor konstrukció polimer kompozitból [14.27]

A kompozitból készült helikopter rotor szárnyak kikeményítése, a térhálósítás alumínium szerszámban történik. A késztermék kétkomponensű PUR lakkbevonatot kap.

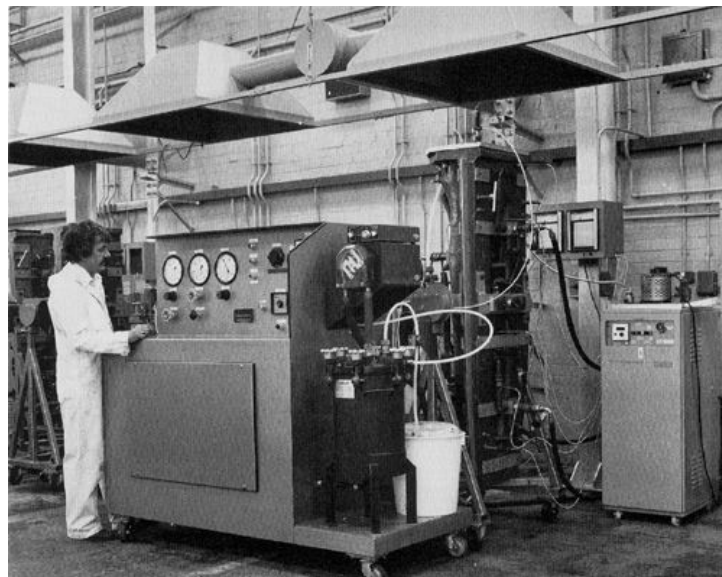
Hasonlóan szép példa az összetett, fémalkatrészeket is tartalmazó és különleges fontosságú kompozit alkatrész technológiájára a sportrepülőgépek légszárjájának gyártása (14.30 ábra).

A kompozit alkatrészgyártás kezdete itt is a szalag (*tape*) rétegek felépítése, az adott esetben alumínium szerszámba fektetése. Az összezárt félszerszámok közé ezután habosítják be a PUR magot, majd újabb erősítőrétegek felvitele következik. Az előgyártmányt ezután újabb – függőlegesen felállított szerszámba zárják, és az utolsó rétegek átítatására meleg epoxi gyantával *vákuum injektálást* alkalmaznak (14.31 ábra).

Ezek után hőkezelés, majd felületbevonás következik (kétkomponensű PUR lakk). A kompozit légszárják tipikusan 50 %-kal könnyebbek, mint a megfelelő duralumínium légszárják. A könnyített súlynak nagy szerepe van a légszárják repülés közbeni szög-állítása során, s így a kapcsolódó szerkezetek is könnyíthetők.



14.30 ábra: Sportrepülőgép légszavarja polimer kompozitból [14.27]



14.31 ábra: Sportrepülőgép légszavar-gyártása vákuum-injektálásos eljárással polimer kompozitból [14.27]

## 14.5 Szakirodalom

Hull D.. *An Introduction to composite materials*. Cambridge Univ. Press. Cambridge . 1981.

Slater K.. *Textile Mechanics Vol.1.*. Textile Institute Publication. Manchester . 1991.  
 Slater K.. *Textile Mechanics Vol.2.*. Textile Institute Publication. Manchester . 1991.  
 Dobran F.. *Theory of Structured Multiphase Mixtures*. Springer. Berlin . 1991.  
 Grosberg P.. *Structural Mechanics of Yarn and Fabrics*. John Wiley. Chichester . 1970.  
 Bobeth W.. *Textile Faserstoffe, Beschaffenheit und Eigenschaften*. Springer-Verlag. . 1993.  
 Hearle J.W.S.. Grosberg P.. Backer S.. *Structural Mechanics of Fibers, Yarns and Fabrics*. Wiley-Interscience. New York . 1969.  
 Morton W. E.. Hearle J.W.S.. *Physical Properties of Textile Fibre*. Butterworths. London . 1986.  
 Li Y.. Ruiz C.. Harding J.. *Modelling of the Impact Response of Fibre-Reinforced Composites*. University Press. Oxford . 1991.  
 Chawla K. K.. *Composite Materials, Science and Engineering*. Springer. Berlin . 1987.  
 Phillips L. N.. *Design with Advanced Composite Materials*. Springer. Berlin . 1989.  
 Kausch H-H.. *Advanced Thermoplastic Composites*. Hanser. München . 1992.  
 Ehrenstein G. W.. *Faserverbund-Kunststoffe*. Hanser. München . 1992.  
 Morena J. J.. *Advanced Composite Mold Making*. Van Nostrand – Reinhold. New York . 1988.  
 Lubin G.. *Handbook of Composites*. Van Nostrand – Reinhold. New York . 1982.  
 Margolis J. M.. *Advanced Thermoset Composites*. Van Nostrand – Reinhold. New York . 1986.  
 Yang H. H.. *Kevlar Aramid Fiber*. J.Wiley. New York . 1993.  
 Ciriscioli P.R.. Springer G.S.. *Smart Autoclave Cure of Composites*. Technomic Publ. Co.. Lancaster-Basel . 1990.  
 Michaeli W.. Wegener M.. *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*. Hanser. München . 1990.  
 Piggott M. R.. *Load Bearing Fibre Composites*. Pergamon Press. Oxford . 1980.  
 Friedrich K.. *Friction and Wear of Polymer Composites (Composite Mats. Ser., 1. Ser.ed. R. B. Pipes)*. Elsevier. Amsterdam . 1986.  
 Bunsell A. R.. *Fibre Reinforcement for Composite Materials (Composite Mats. Ser., 2. Ser.ed. R. B. Pipes)*. Elsevier. Amsterdam . 1988.  
 Chou Tsu – Wei. Ko Frank K.. *Textile Structural Composites (Composite Mats. Ser., 3. Ser.ed. R. B. Pipes)*. Elsevier. Amsterdam . 1989.  
 Neitzel M.. Breuer V.. *Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde*. Hanser. München . 1997.  
 Herakovich C. T.. *Mechanics of Fibrous Composites*. J. Wiley. New York . 1995.  
 Gay D.. *Materiaux Composites*. Hermes. Paris . 1991.  
 Middleton D. H.. *Composite Materials in Aircraft Structures*. Longman - J. Wiley. Singapore-New York . 1990.  
 Flemming M.. Ziegmann G.. Roth S.. *Faserverbund-bauweisen*. Springer. Berlin . 1996.

## **POLIMER ALKATRÉSZ PROTOTÍPUS GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁK**

### **Tartalom**

#### **[15.1 Bevezetés](#)**

#### **[15.2 Prototípus gyártási technológiák](#)**

##### **[15.2.1 Számítógéppel vezérelt forgácsolás](#)**

##### **[15.2.2 Lézer sztereolitográfia \(SLA\)](#)**

##### **[15.2.3 Szelektív lézer-szinterezés \(SLS\)](#)**

##### **[15.2.4 Térbeli nyomtatás \(3D printing\)](#)**

##### **[15.2.5 Ömledékrétegezés \(Fused Deposition Modelling, FDM\)](#)**

##### **[15.2.6 Réteges fotopolimerizáció \(Instant Slice Curing, ISC\)](#)**

##### **[15.2.7 Réteges kivágás és felépítés \(Laminated Object Manufacturing, LOM\)](#)**

#### **[15.2 Prototípusból kiinduló szerszámgyártás és kissorozatú gyártás](#)**

##### **[15.3.1 Vákuum alatti öntés](#)**

##### **[15.3.2 Plazma-szórás](#)**

##### **[15.3.3 Szerszámcélú öntőgyanták](#)**

#### **[15.4 Szakirodalom](#)**

### **15.1 Bevezetés**

A szintetikus polimerek műszakilag eredményes és gazdaságilag is sikeres alkalmazása sokoldalú mérnöki szakértelmet igényel. A műanyagok *alkalmazástechnikája (Kunststoff - Anwendungstechnik, plastics application technology)* ilyen értelemben a polimertechnika fontos része. Végül is minden korábbi fejezet

ebben a könyvben ezt az eredményes alkalmazástechnikát szolgálta. Az egyre újabb alkalmazási lehetőségek kibontakoztatásának, a *műszaki fejlesztésnek* útja, módja és eszközei a 21. századfordulóra jelentős mértékben felgyorsultak. A gyorsított fejlesztés egyik ilyen korszerű eszköze a *rapid prototyping*.

A *prototípus*: a termék első darabja, az *ősminta*, amelynek alapján a sorozatgyártás elindul, nyilvánvalóan döntő mértékben meghatározza a gyártmány sikerét, és a gyártási eljárás, a technológia eredményességét, termelékenységét is.

A termékfejlesztés többféle mintával, modellel dolgozik:

- Az *arányos modell* – pl. egy új autótípus kicsinyített mása, – nem részletes, lényegében a külső forma arányait tükrözi.
- Az *ergonómiai modell* már fontos részleteket bemutat a kezelhetőség, használhatóság értékelése céljából.
- A *tervezési modell* küllemében már teljesen megfelel a sorozatgyártásól kikerülő mintának. Ez teszi lehetővé a vevő, a gyártó, a beszállító, stb. véleményének gyors figyelembevételét.
- A *funkciós modell* lehetővé teszi a legfontosabb funkciók (mechanikai, használati tulajdonságok, szerelhetőség, szervizmunka lehetősége, stb.) idejekorán történő értékelését.
- A *prototípus* már csaknem teljesen megegyezik a sorozatgyártásból származó (első) mintával. Az előbbi funkciókon túl lehetővé teszi a gyártószerszám előállítását.
- A *minta* már a sorozatgyártásból származik: a félüzemi- vagy nullszéria, az elő- vagy a fősorozat egy tipikus darabja, amely egyrészt referenciadarabként a minőségbiztosítást szolgálja, másrészt elősegíti a gyártó és szerviz-személyzet képzését, és a továbbfejlesztett termék minőségének, konstrukciójának finomítását.

A modellek célja tehát általában:

- az alkatrész megformálása, a termék műszaki tervezése, megalkotása, (*creative engineering*),
- a megvalósíthatóság, a gyárthatóság (*feasibility, manufacturability*) felmérése,
- a működőképesség (*functionality*) értékelése,
- a termék felhasználói, piaci fogadtatásának előzetes értékelése (*marketing*).

A prototípusnak pl. egy alkatrész ősmintájának műszaki értéke, technikai hasznossága egyre növekszik a következő sorban:

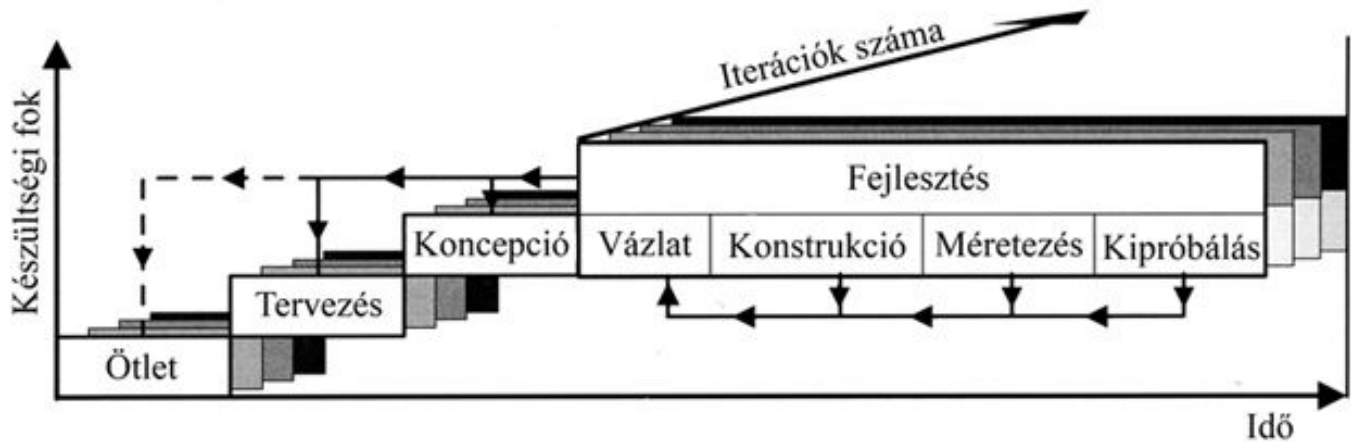
- A formarögzítő prototípus (*facsimile prototype*), noha 1:1 léptékarányú, mégis csak küllemében hasonlít a végtermékhez.

- A gyártási célú prototípus (*processing prototype*), pl.: az öntőforma készítését szolgáló ősminta a gyártás, a feldolgozás minőségbiztosításának fontos eszköze.
- A funkcionális prototípus (*functional prototype*) nemcsak formájában, méretében, küllemében, felületkialakításában stb., hanem minden fontos műszaki tulajdonságában, így pl.: szilárdságában, merevségében, ütésállóságában, hővezető-képességében stb. közel azonos a sorozatgyártásban tervezett végtermékkel. Ez az a modell, amelyet tartós működésben is kipróbálhatunk, értékelhetünk, majd ennek alapján elindíthatjuk a sorozatgyártást, és ez szolgálhat a továbbfejlesztés alapjául is.

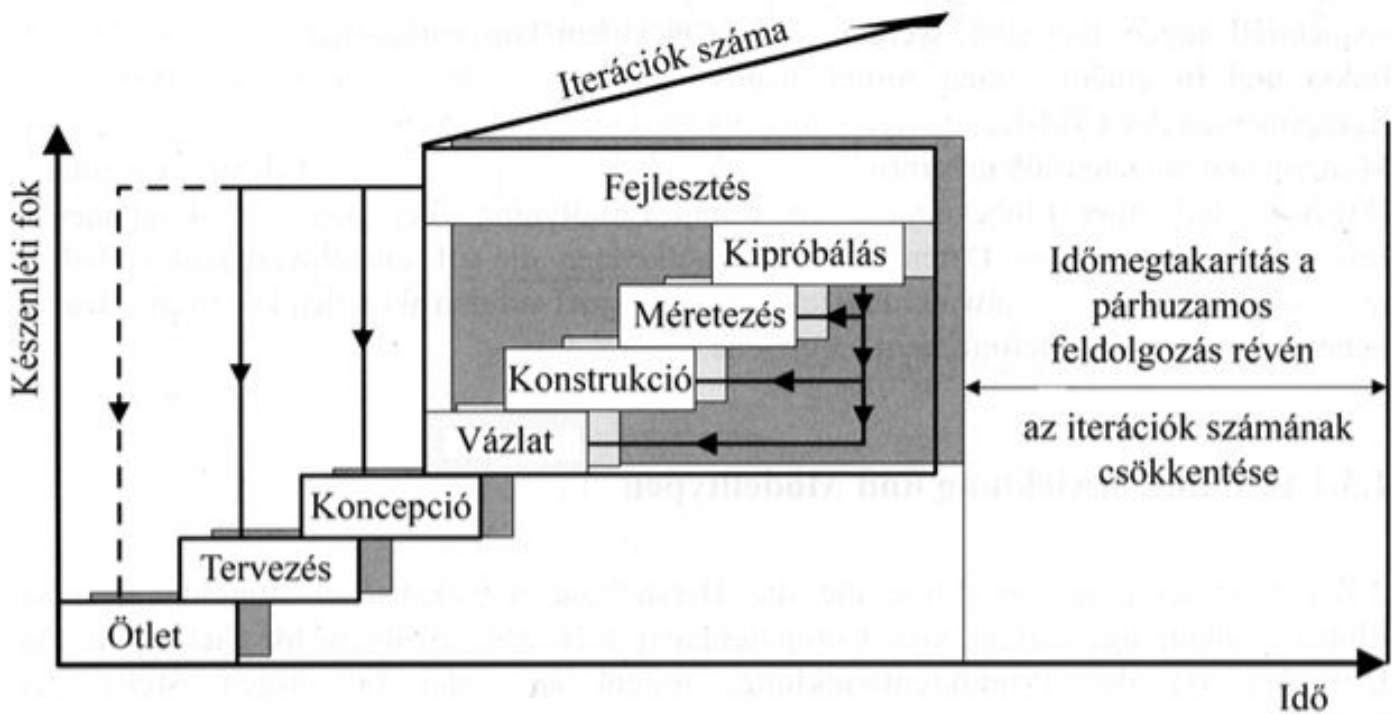
A prototípus előállításának *időszükséglete* fontos műszaki - gazdasági tényező. Az új típusú termék, alkatrész, közszükségleti cikk sorozatgyártásának előkészítése hosszú idők során kialakult műszaki logikát követ, és mindezekig jól definiált tevékenységek egymás utáni lépés-sorozatára épült. Ez a *linear engineering* (*sequential engineering*) a termék koncepcionális megalkotásából, „megálmodásából” kiindulva, a terv vázlatán át majd a részletes terv(rajz) után, rendszerint egy manuálisan előállított prototípus legyártását követelte meg. Ennek a prototípusnak sokoldalú vizsgálata, tesztelése után készítették el a gyártószerszám terveit, majd magát a szerszámot, végül az elkészült szerszámra vonatkoztatva a gyártástervezés során kidolgozták a gyártási technológiát, és ezután következhetett maga a *sorozatgyártás*. Ezt az egymás utáni lépéssorozatot kellett újra végigjárni a közelítések (iterációk) fáradságos, sokszor megismételt sorában. Az ilyen hagyományos fejlesztési logikát mutatja be a 15.1 ábra.

Korunk rohanó tempója, „az idő – pénz” alapelv nemcsak lerövidíteni, sőt egymásba tolni kényszeríti ezeket a korábban szigorúan egymás utáni (*konzekutív*) lépéseket, hanem új típusú visszacsatolásokat is kívánatossá és lehetővé tesz. A lerövidített utat javasoló g, az egyidejű, párhuzamos lépésekből összeálló termékfejlesztés (*simultaneous engineering*) vázlatát a 15.2 ábra mutatja.

A polimer alkatrész, vagy végtermék alapötletét, – amelyet ma már ötletcsíra formájában is 3D képben a számítógépre vihetünk, – a mai technikával közvetlenül, és *gyorsított* eljárással *prototípussá* formálhatjuk. Ez a *rapid prototyping* már a „nulladik közelítés” változatában is kézzelfogható termékmintát ad, majd a prototípus egyre tökéletesedő megformálásával és egyre sokoldalúbb vizsgálata, tesztelése után ez a modellezés többszöri iterációs lépésben megismételhető és így tökéletesíthető. A gyors prototípuskészítést a *szimultán termékfejlesztés* tette szükségessé, és nyilvánvalólag a *számítógépes terméktervezés* tette lehetővé.



15.1 ábra: Hagyományos (lineáris) gyártmányfejlesztés [15.13]



15.2 ábra: Lerövidített, szimultán termékfejlesztés [15.13]

Ide kapcsolható a „fordított gyártmányfejlesztés”, a *reverse engineering* fogalma és technikája is, amely szintén a számítógéppel segített (*computer assisted... CAX*) tervezési és gyártási technológiák eredménye. Ebben az esetben meglévő, már bevált alkatrészből, termékből indulunk ki, ezt visszük fel a számítógépre, és ehhez a termékhez dolgozzuk ki (vagy optimaljuk, számítógépesítjük, robotosítjuk, stb.) a gyártási technológiát, választunk újabb, még alkalmasabb szerkezeti anyagot.

A *rapid prototyping*, az ősminta gyártásának forradalmian új, rendkívül meggyorsított módszerét vitathatatlanul a korszerű számítástechnika tette lehetővé. A számítógépes tervezési technikák egyre

tökéletesedő szoftverjei (AUTOCAD, ProENGINEER, CATIA, EUCLID, UNIGRAPHICS, CAMAND, IDEAS, SOLID WORKS stb.) nemcsak gyorsan megrajzolják a leendő terméket, alkatrészt, hanem a valóságot több dimenzióban megjelenítve sokoldalú, energia-, idő- és anyagtakarékos, fantáziadús tervezést: *virtual engineering*-et tesznek lehetővé. Ennek egyik eleme a termék ősmintájának számítógépes megjelenítése: a *virtual prototyping* (látszólagos ősminta-készítés).





A terméktervezés számítógéppel segített módszereinek rendkívüli jelentőségét aligha lehet túlbecsülni a tervezőmérnök munkájának hatékonyságát illetően. A megtervezett első típus hibáinak ugyanis több mint 75 %-a a tervezőasztalon születik. Ezek nagyrészt elkerülhetjük a több ciklusú iteráció során. Ha mindez a korrekció, tökéletesítés a számítógép képernyőjén valósul meg először, azzal rendkívül sok időt, anyagot és energiát takaríthatunk meg.

A számítógépen megálmodott, megforgatott, megvizsgált és részleteiben is megtervezett ősmintának, a prototípusnak valóságos anyagból, kézzel fogható kivitelezésére ma már számos módszer áll rendelkezésünkre.

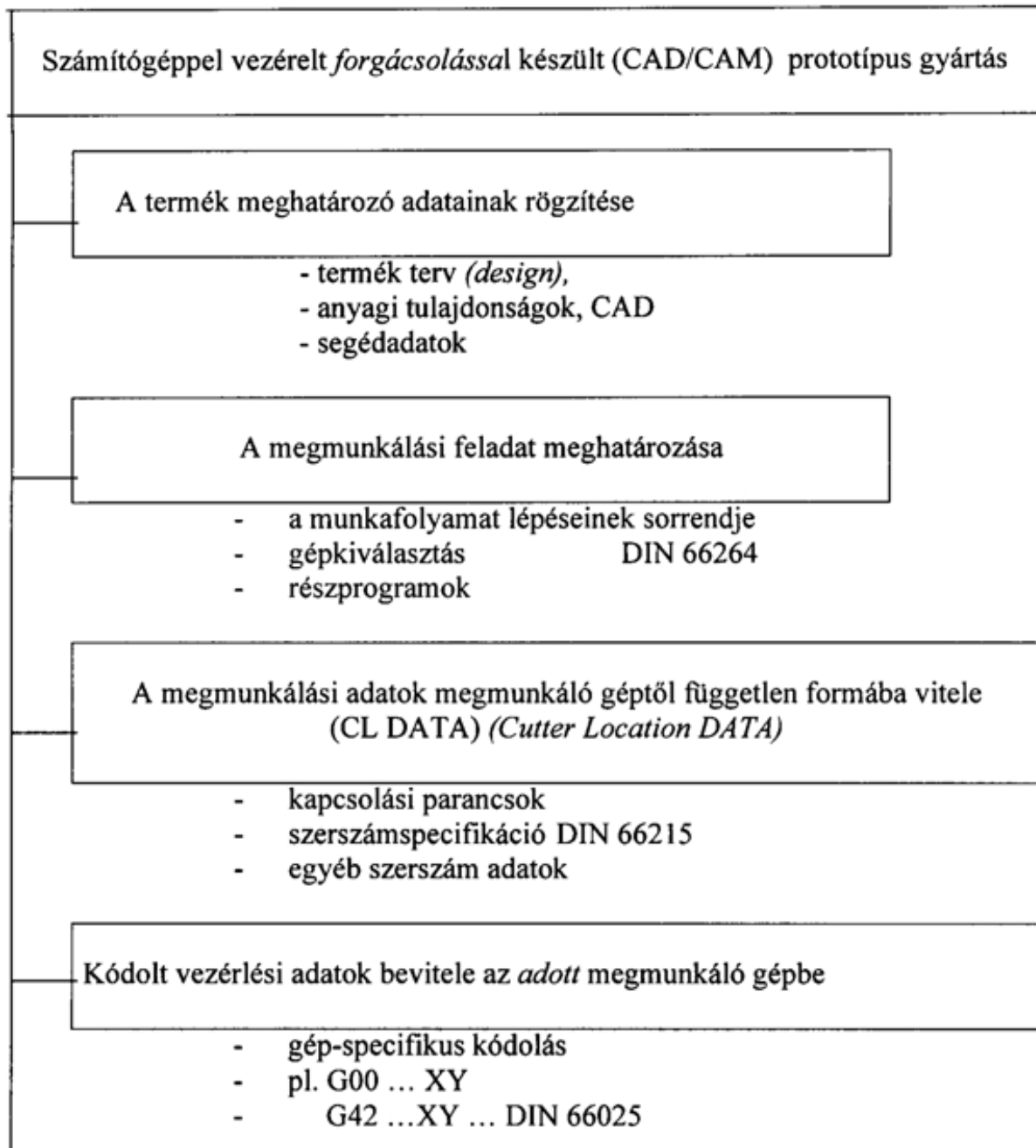
## 15.2 Prototípus gyártási technológiák

### 15.2.1 Számítógéppel vezérelt forgácsolás

A fémalkatrészek CAD/CAM gyártási módszerei lehetőséget nyújtanak a prototípus megvalósítására is a korszerű számjegyvezérelt (NC) forgácsoló automatákon. A prototípus készítés e módszere természetesen a *polimer* alkatrész forgácsolással történő kialakítását is lehetővé teszi a végső műszaki polimert megközelítő tulajdonságú műanyag-tömbből. A poliamidok, a poliolefinok közül a HDPE és a PP, a fluorpolimerek, a poliakrilátok és poliacetálok mind alkalmasak a forgácsolásra. Ez a prototípus gyártás természetesen csak akkor valósítható meg, ha a konstrukciót magát a forgácsolás legáltalánosabb módszeréhez, a maráshoz alkalmassá tették. A CAD módszerekkel felvázolt alkatrész felületi- vagy felületekre bontott térbeli modelljében a görbületeket úgynevezett *bázis-spline*-okkal (*B-splines*) vagy *Non Uniform Rational B-Spline* (*NURBS*)-görbékkel érdemes közelíteni. Ezek műszaki, technológiai logikáját sajátos geometriai törvényszerűségük indokolja. (Ilyen görbületeket vesz fel pl. a szabálytalanul, rendszertelenül bevett szeg-„erdő” közé beillesztett acélvonalzó). Bezárt üregek kialakítása forgácsolással természetesen (geometriai) akadályokba ütközhet.

A számítógéppel vezérelt prototípus gyártás **forgácsoló** módszerének folyamatát a 15.4 séma szemlélteti. Fontos lépés (a 3. lépés) ebben a folyamatban a megmunkálási adatoknak az adott megmunkáló géptől *független* formába vitele. Ezeknek a CL DATA adatoknak (*Cutter Location Data*, a vágószerszám elhelyezkedésének, lokalizációjának adatsora) feldolgozását ma már szabványok rögzítik, ugyanúgy, ahogyan a megmunkálási folyamat meghatározását, a kódolt vezérlési adatoknak az adott gépbe történő bevitelét is.

A komplex geometriájú alkatrészek megmunkálásánál a jövőben célszerű a CAD-CNC rendszert CAD/CAM munkaállomással integrálni. A jövő a közvetlen számjegy-vezérlésű (*Direct Numerical Control*, *DNC*) gépek felé mutat.

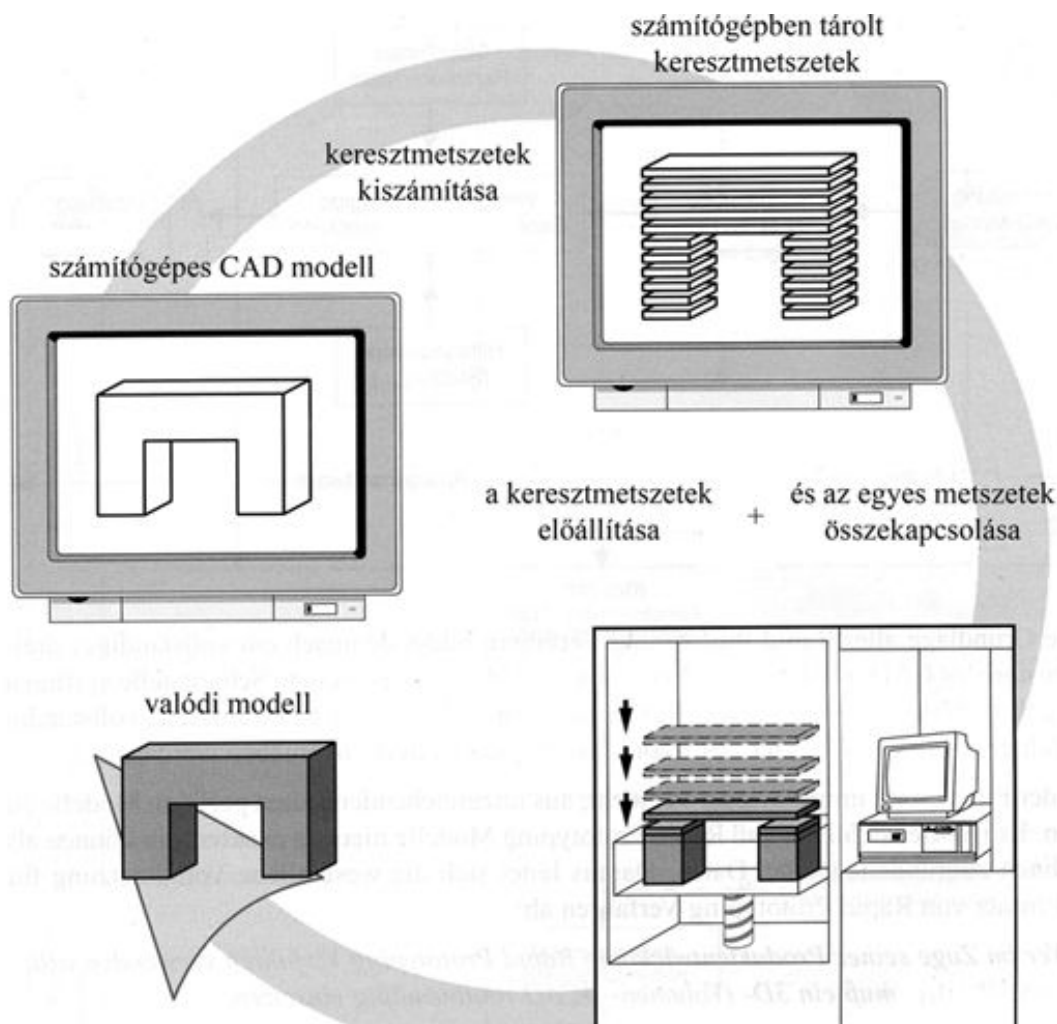


15.4 ábra: A forgácsolással készülő prototípus gyártás sémája [15.5]

### 15.2.2 Lézer sztereolitográfia (SLA)

A polimerizációhoz kapcsolódó prototípus előállítási technikák a fémből készült forgácsolásnál sokkal hatékonyabb, gyorsabb eljárásokat kínálnak. A polimer alapanyagából kiinduló, illetve polimer szerkezeti anyagot felépítő *rapid prototyping* eljárásnak az előnye nyilvánvaló a **polimer alkatrészek** prototípusainak elkészítésénél.

Először tekintünk át a forgácsolással ellentétes *anyagfelhordással* felépített prototípus előállítási módszerek általános sémáját.



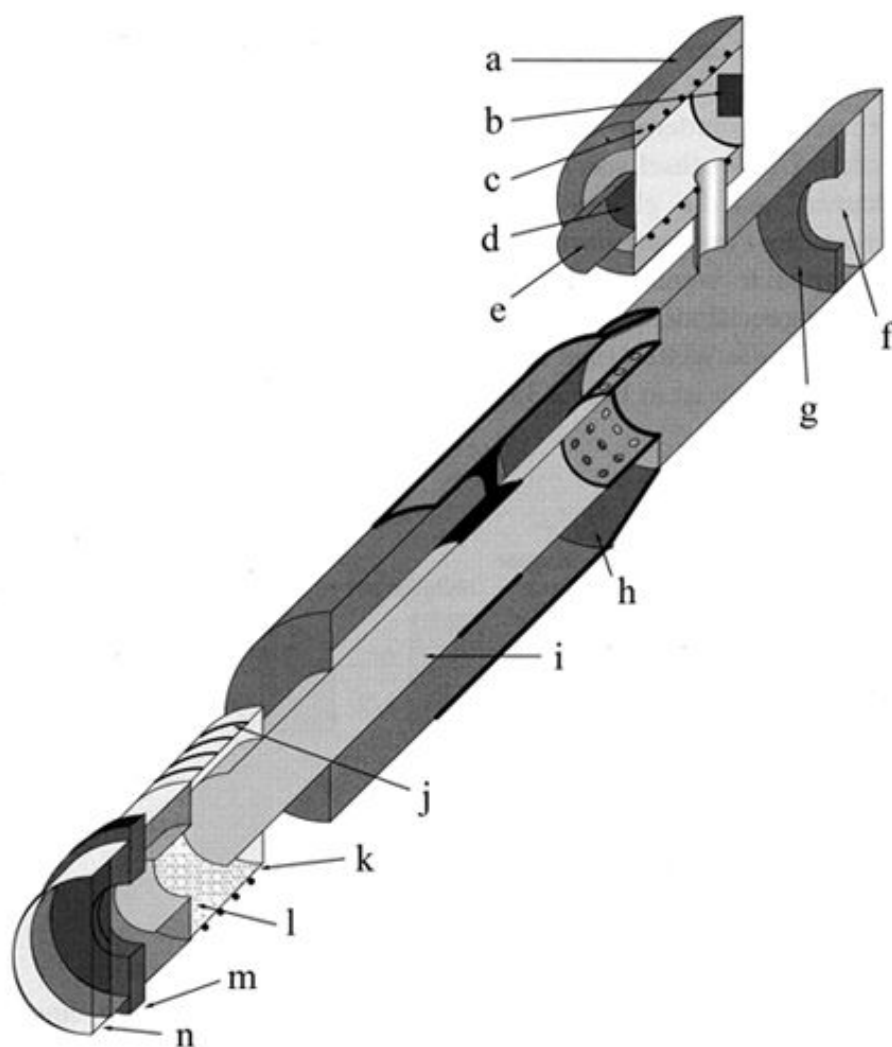
**15.5 ábra:**A gyors prototípusgyártás elve: a rétegekre bontás és felépítés [15.11]

A prototípus alapja tehát egy számítógépen megtervezett termék vagy alkatrész-terv: CAD-modell, amely az alkatrész minden geometriai adatát *réteges bontásban* is tartalmazza. A *lézer sztereolitográfia* technikája, amelyet az USA-ban fejlesztettek ki, és amely az 1990-es évek óta terjedőben van, a *sugárzással iniciált polimerizációt* alkalmazza.

Az oligomerek sugárzással iniciált térhálós polimerizációja sok más polimertechnikai eljárásban is elterjedt. Az UV-fény, a gamma-foton, az elektron-nyaláb (*Electron Beam, EB*), vagy a *lézersugár* ugyanolyan hatású a polimerizációs láncreakcióra képes monomerekre vagy oligomerekre, mint a kémiai iniciátor: a kétfunkciós monomer (oligomer)-rendszereket láncpolimerré alakítja, a (legalább) háromfunkciós monomereket és oligomereket pedig *térhálósítja*. A lézer és a többi sugárzás nagy hatékonysága, igen kis energiabefektetéssel is megvalósuló magas hatásfoka a térhálósításban azon alapszik, hogy a nagy energiájú foton csak az első lépést:

az *iniciálást* kell, hogy megtegye. A láncnövekedés, a propagáció már az így elindított láncreakció eredménye (lásd: 2.2.3 fejezet, 26. oldal), ehhez nincs szükség további energiabefektetésre. A vékony rétegek sugárzásos polimerizációján illetve térhálósításán alapszik a mikroelektronikai alkatrészgyártásban, a számítógépünk ”agyát” képező integrált áramkörök előállításánál nélkülözhetetlen *negatív rezisztalakkok* működése, vagy pl. az öntapadó címkéket hordozó és hasonló funkciójú *release*-filmek bevonása, és sok más bevonatkészítési, lakkozási eljárás. Sugárzásos polimerizációt alkalmaznak akkor is, amikor a korszerű fogászati tömőanyagot, ill. fogpótló anyagot miniatűr UV-sugárforrással a szájüregben a fogorvos kikeményíti, térhálósítja.

A lézer-sztereolitográfiában a számítógéppel vezérelt lézersugár a nagy pontossággal kirajzolt rétegben sugárzással iniciált térhálós polimerizációval építi fel a 3D alkatrészt. Az alkatrész rétegekre bontott számítógépi képe vezérli a lézersugarat, tipikusan a 325 nm hullámhosszú He-Cd lézert (lásd 15.6 ábra), vagy a 364 nm hullámhosszú Ar-Ion lézert.



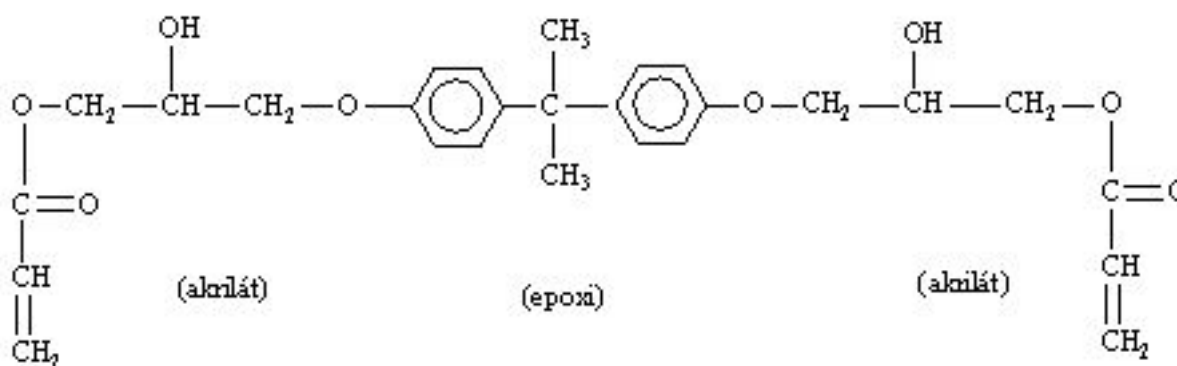
**15.6 ábra:**He-Cd lézer sugárforrás a sztereolitográfiához [15.11] a)szigetelés, b)He-nyomásérzékelő, c) fűtés, d) hőmérsékletfüggő membrán e) kivezetés a He palack felé, f) nagy visszaverőképességű tükör, g)

retesz (blende) h) katód i)kiszülési cső, j) a kadmiumtároló fűtése, k) kadmiumtároló, l) Cd, m) anód, n) részben áteresztő tükör

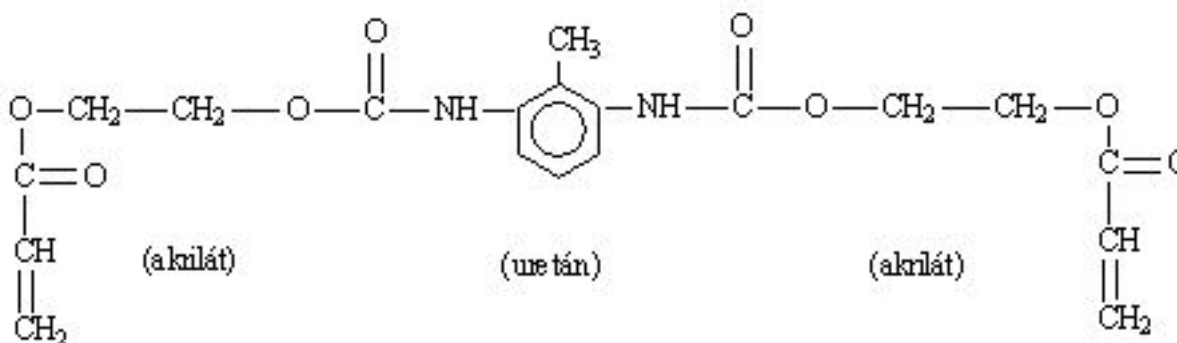
A lézer sugárforrások tipikus teljesítménye a sztereolitográfiában 10 és 500 mW közötti, a nyaláb fókuszáltsága akár 0,1 mm-nél is pontosabb lehet, behatolási mélysége az alkalmazott oligomer-alapanyagban tipikusan 0,1–0,3 mm.

A felépítendő polimer alapanyaga: folyékony *oligomer*, tipikusan epoxi-akrilát, vagy uretán-akrilát, térhálósodásra alkalmas kettős kötésekkel.

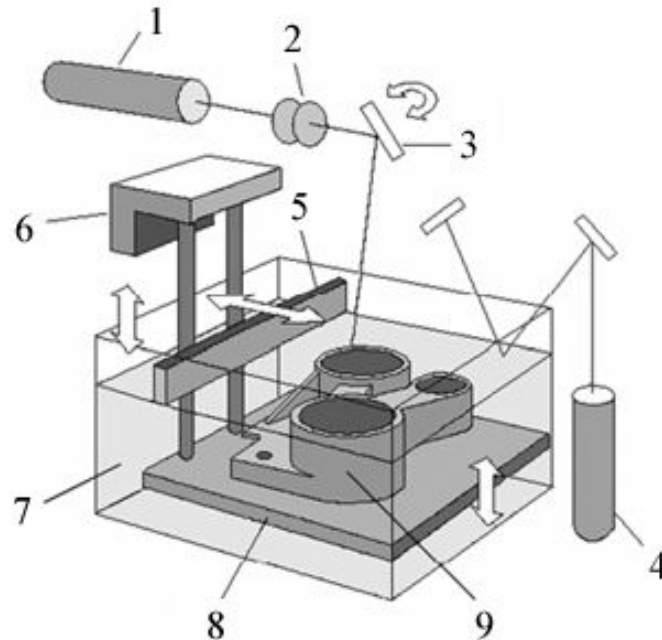
Tipikus epoxi-(di)akrilát:



Egy tipikus uretán (di)akrilát:



A lézer-sztereolitográfia elvi vázlatát a 15.7 ábrán láthatjuk.



**15.7 ábra:**A lézer sztereolitográfias berendezés (SLA) vázlata 1) HeCd vagy YVO4 lézer, 2) fókuszáló lencsék, 3) tükör, 4) HeNe lézer a vastagság mérésére, 5) simító lemez, 6) alaplemez mozgató szerkezet, 7) folyékony műanyag gyanta, 8) alaplemez, 9) elkészült modell)

Az eljárás lényegében két lépésből áll. Az első lépés a folyadékfurdőben a szilárd alkatrész felépítése az oligomer térhálósítása útján. A második lépésben ezt a megszilárdult polimer prototípust kiemeljük és még utókezelésnek vetjük alá.

Az alaplemez, amelyre a prototípus felépül, bemező a reaktív oligomer (pl. epoxiakrilát) folyadékfurdőjébe, úgy, hogy induláskor csak 0,1 – 0,3 mm vastag folyadék réteg lepi el. A lézersugár mintegy 500 mm/s sebességgel rajzolva felépíti az 0,1–0,3 mm vastag első réteget. Ezután az alaplemez egy lépcsővel (újabb 0,1 – 0,3 mm-el) lejjebb merül, és a lézersugár újabb réteget térhálósítva felépíti a prototípus újabb réteget. Ebben a folyamatban pl. az Electro Optical Systems (ZEISS) GmbH STEREOS Desktop S modell-je amely 250x250x250 mm maximális méretű prototípus alkatrészt készíthet, (325 nm-en működő, 40 mW teljesítményű He-Cd lézer-rel) egy réteg felépítéséhez kb. 20–120 s időt használ, így egy tipikus 65 g-os (65 cm<sup>3</sup>-es) polimer alkatrész prototípust kb. 1 óra alatt épít fel.

A berendezés fő részei:

- megvilágító (a LASER egység),
- folyadékfurdő a mozgatható alaplemezzel és újra-bevonó berendezéssel (*re-coating unit*),
- a folyamatirányító computer (a CAD munkaállomással együtt)

- utókezelő berendezés: hőkezelő, UV-kezelő, tisztító, (ultrahangos), üvegporszóró felületkezelő stb.

A *Desktop* berendezés tehát egy laborasztalon elhelyezhető (mérete kb. 1200x550x1000 mm<sup>3</sup>) kb. 200 kg súlyú, ára az 1990-es évek végén kb. 400 000 DM. Jelentős költségtényező az oligomer ára, ami 300 DM/kg feletti is lehet, így a működtetés önköltsége kb. 200 DM/óra.

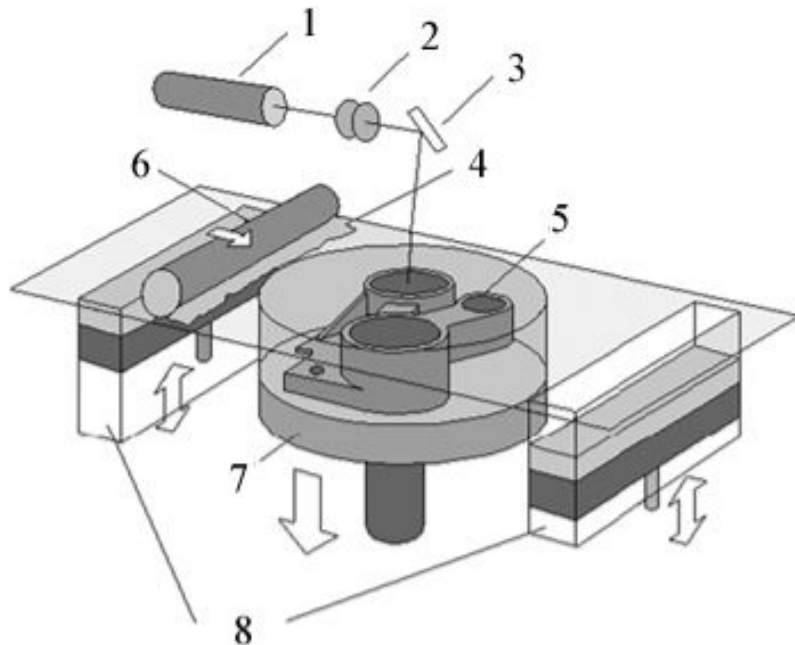
A sztereolitográfiával előállított polimer alkatrész prototípus tehát térhálósított epoxiakrilát gyanta, vagy hasonló, nagy szilárdságú darab, amely megfelelő felületkezelés után nemcsak a „*design*” a formatervezés megjelenítését, hanem bizonyos funkcionális vizsgálatokat is szolgálhat. A natúr állapotban csontszínű, áttetsző műanyag darab jól megjeleníti az alkatrész belső szerkezetét is, és üreges alkatrészek előállításának sincs akadálya. A leképezett, megvalósított prototípus mérettűrési pontossága tipikusan 0,1 mm-es, ami egyrészt a lézernyaláb fókuszáltságából adódik. Az alkalmazott oligomerek egyelőre igen magas költsége a „közönséges” epoxigyantákhoz, poliuretánokhoz képest (6–10 DM/kg) tartalmazhatja az eljárás újdonságértékét is. Az 1990-es évek végén ilyen sztereolitográfiás gyors prototípus gyártó berendezésből már több mint 200 működött Ny-Európában és É-Amerikában. Figyelembe véve az alapberendezés magas amortizációját, a lézerforrás korlátozott élettartamát (2000 óra) és a monomer árát, egy tipikus 100 g-os prototípus darab ára könnyen eléri az 1000 DM-os nagyságrendet, de korszerű gyártmánytervezésben ez a költség bőven megtérül.

### 15.2.3 Szelektív lézer-szinterezés (SLS)

A polimerek szelektív lézer szinterezésével előállítható prototípus gyártási technikája a lézer sztereolitográfiához hasonlít: mozgó asztalra lézersugár építi fel rétegenként a műanyagdarabot azzal a lényeges különbséggel, hogy

- nem folyadékot polimerizál, hanem kész (hőre lágyuló) polimer por-szemcséket olvaszt össze, s ehhez
- nem 40 - 400 mW teljesítményű, hanem jóval nagyobb, tipikusan 50 W teljesítményű CO<sub>2</sub> lézert használ.

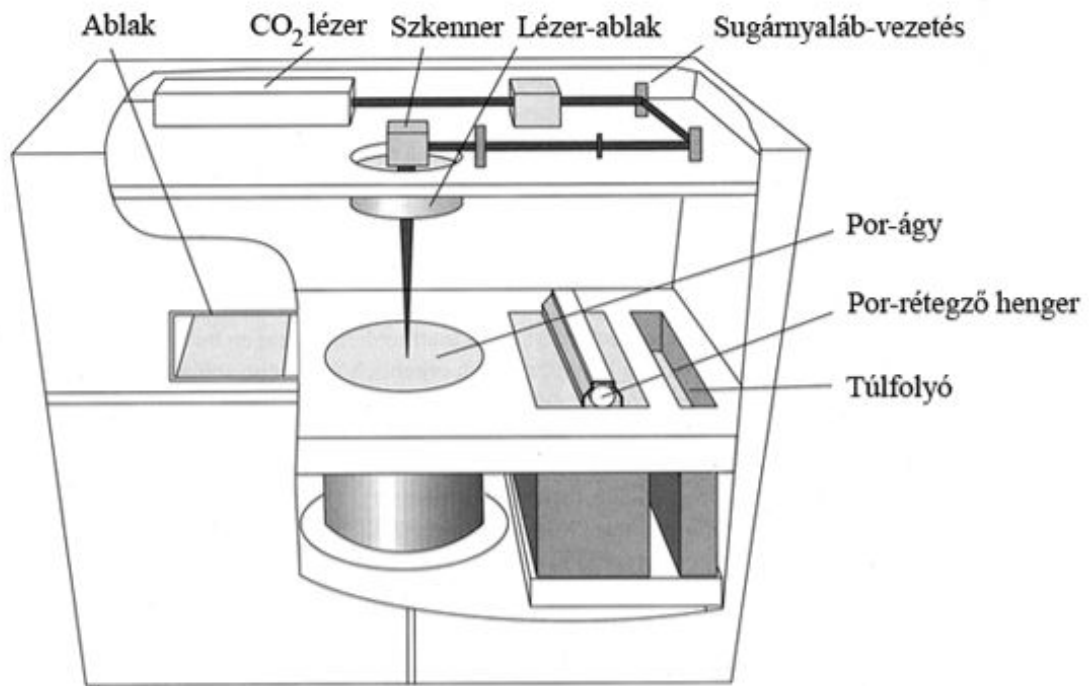




**15.8 ábra:**Szelektív lézer szinterező (SLS) berendezés vázlata 1) CO<sub>2</sub> lézer, 2) fókuszáló lencsék, 3) tükör, 4) szinterezetlen por, 5) modell, 6) terítőhenger, 7) alaplemez, 8) adagoló tartályok

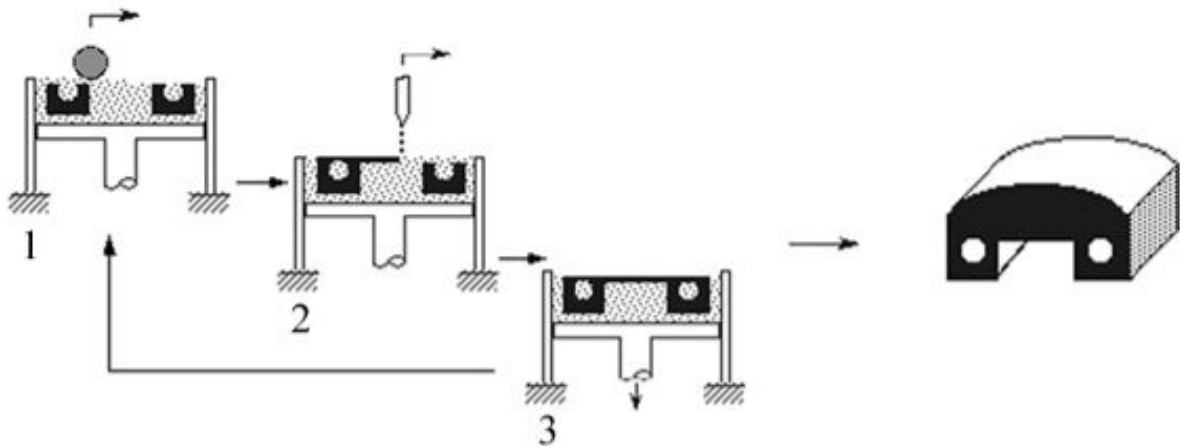
Az eljárásban felhasznált hőre lágyuló polimer por lehet PA, PC, ABS , PVC, de alkalmazhatunk fémport is, vagy kötőanyaggal bevonatolt kerámia porokat is. A polimer-porok lézer-szinterezésénél nincs szükség utókezelésre, hiszen itt nincs szó térhálósításról. A kb. 0,5 mm-méretűre fókuszált lézersugár nyaláb (a CO<sub>2</sub> laser hullámhossza 10,64 μm) 0,05 mm–0,25 mm közötti méretpontosságú prototípus gyártást tesz lehetővé. A lézersugár 1000 mm/s sebességgel pásztáz, így tipikusan néhányszor tiz másodperc alatt épít fel egy 0,15 mm-nél vastagabb réteget, és egy 25 mm magas bonyolult alkatrészt prototípusa kevesebb, mint 1 óra alatt elkészül.

Az eljárásban tehát minden réteg „összeolvasztása” után a félkész alkatrészt újabb porréteggel borítunk be, majd a pásztázott lézersugárral ráolvasztjuk a következő réteget. A rárétegezés tipikusan egy hengerrel történik. Az eljárás előnye a sztereolitográfiával szemben az is, hogy itt nem kell a készülő alkatrészt a folytonosan süllyedő alaplemezhez kötni: a félkész prototípus *megül* a nem-összeolvasztott, tömörített polimer-por ágyzatban.



**15.9 ábra:** Egy szelektív lézer szinterező gép felépítése (SINTERSTATION 2000 DTM) [15.11]

#### 15.2.4 Térbeli nyomtatás (3D printing)



**15.10 ábra:**A térbeli nyomtatás (3D PRINTING) eljárás elve 1) porfelvitel az előző rétegekre, 2) kötőanyag elhelyezése a modell metszetén, 3) porfürdő süllyesztése

Mint az SLS szinterezésnél, a térbeli nyomtatásnál is *poralakú* alapanyagot kötünk meg, de a lézersugár egység helyett a „tintasugaras” nyomtató egységhez hasonló – abból kifejlesztett – számítógép-vezérelt nyomtatófej működik. Ez apró *cseppenként* kötőanyagot (ragasztóanyagot) lövell a poralakú alapanyagra, így készítve el, megint csak *rétegenként* a prototípust.

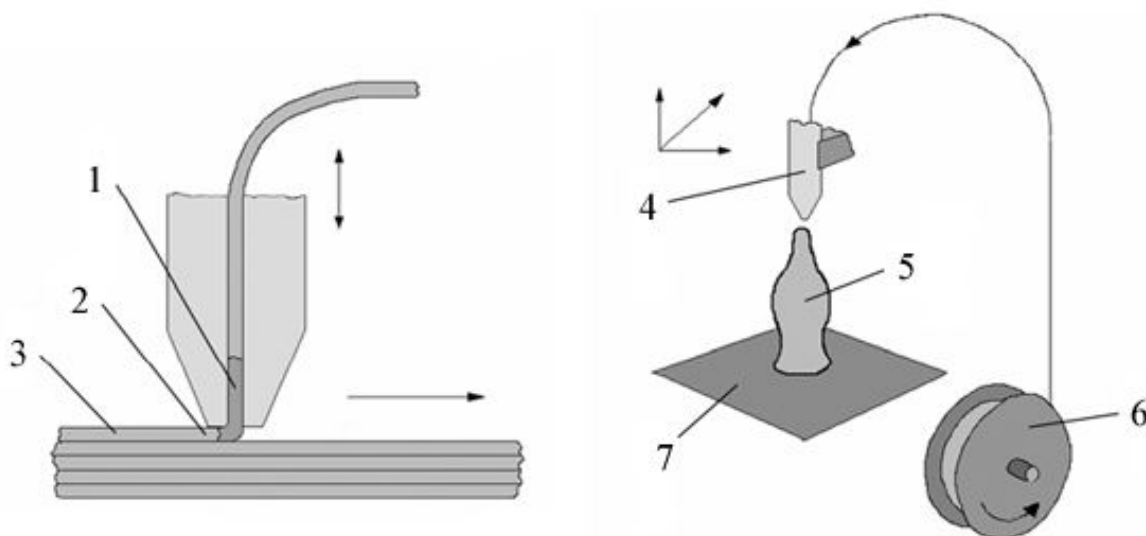
Az új eljárást eddig leginkább kerámiára alkalmazták: kerámiaformákra és kerámiamagokra a fémöntészethez. Az alkalmazott por:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al-SiO}_2$ , a kötőanyag is  $\text{SiO}_2$  tartalmú, a rétegvastagság: 0,18 mm,

a tintasugaras „ágyú” sebessége 0,1 - 20 m/sec. Tipikus „felépítési” sebesség: diszkrét minta esetén 20 mm/h, folytonos minta esetén 270 mm/h.

### 15.2.5 Ömledékrétegezés (Fused Deposition Modelling, FDM)

Az előbbi eljárásokban közös az, hogy az előre adott mennyiségű alapanyag egy *részét* szilárdítottuk meg, a hátrahagyott részből leválasztva. (A visszamaradt anyag rendszerint újra felhasználható).

Az ömledékrétegezés (FDM) módszernél a prototípust úgy készítik el, hogy a megömlesztett anyagot *célzottan* elhelyezve építjük fel a pontos méretű prototípust. Ez az eljárás elvileg közvetlen 3D megformálásra is alkalmas, de működtethető 2D üzemmódban is.



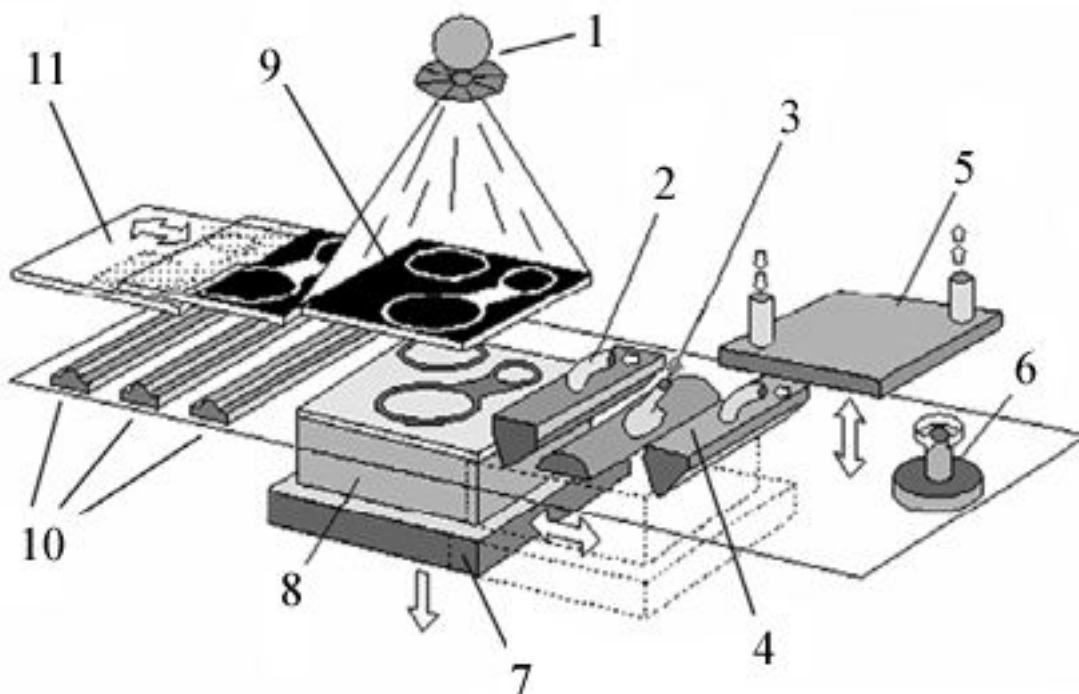
**15.11 ábra:** Az ömledékrétegezés (FDM) elve 1) ömledék állapotba hozott anyag, 2) megszilárdulás kezdete, 3) megszilárdult állapot, 4) hevített FDM fej, 5) modell, 6) anyagadagolás, 7) mozgó asztal

A kulcs-berendezés a fűtött, *mini-extruder* funkciójú FDM fej, amelynek nagysebességű 3D mozgását CAD/CAM program vezérli. A fűtés éppen csak a  $T_m$  fölé viszi az ömledéket, hűtésre általában nincs szükség. Az új eljárás bevezetés alatt van. 1,25 mm átmérőjű hőrelágyuló polimer szállal 0,025 – 1,25 mm rétegvastagság valósítható meg. A 380 mm/s sebességgel mozgó ömledék-sugárral a berendezés 0,125 mm pontosságot (tűrést) biztosít. A max. 300x300x300 mm prototípus előállítására alkalmas berendezés ára 170 000 USD körüli.

### 15.2.6 Réteges fotopolimerizáció (Instant Slice Curing, ISC)

Ez a rétegező prototípus-gyártási eljárás nem vezérelt, pásztázó lézersugárral polimerizál, hanem a mikroelektronikából ismert *maszk* segítségével építi fel a rétegeket, *UV-iniciált fotopolimerizáció* útján. A maszkokat – minden egyes rétegnek megfelelőt – természetesen itt is számítógép készíti, amely *szeletekre* (slice) bontja a prototípusban elkészítendő alkatrészt. A *rajzot*, a „maszkot” elektrosztatikus töltés formájában

üveglemezre viszik fel, majd a *lézer-nyomtatás* alapelvét alkalmazva a „*toner*”-rel előhívják. A megvilágítás után az üveglemezt megtisztítva ugyanaz a lemez kész a következő réteg felvitelére.



**15.12 ábra:**Instant Slice Curing ISC prototípus gyártási eljárás 1) UV lámpa, 2) polimer bevezetés, 3) polimer elvezetés, 4) viasz elvezetés, 5) hűtőlap a viasz megszilárdításához, 6) marófej a viaszréteg marásához, 7) asztal, 8) viasztömb belsejében a modellel, 9) maszk, 10) elektrosztatikus feltöltés, maszk létrehozás, maszk törlés, 11) maszkhordozó

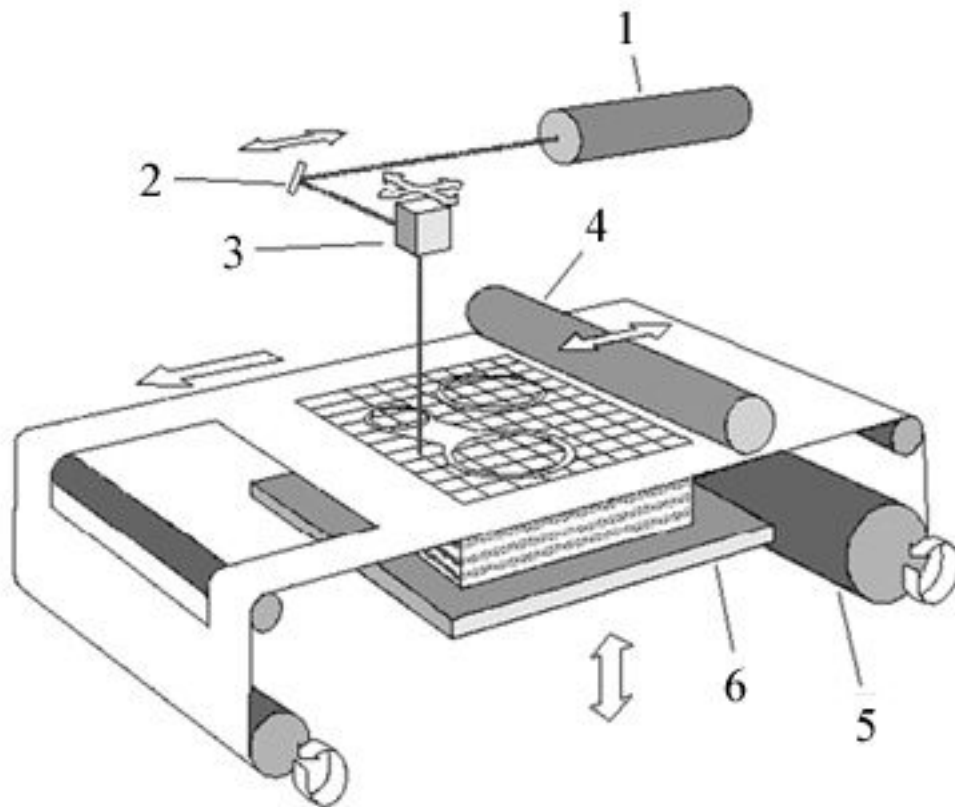
A réteges fotopolimerizáció „holt” tereit viasszal töltik ki, amelyet a folyamat legvégén forró oldószerrel távolítanak el. Ez a viaszba – ágyazás teszi lehetővé, hogy nincs szükség egyéb megtámasztásra.

A „fotopolimer” itt is akrilát oligomer, az UV lámpa nagyteljesítményű (2500 W), a rétegvastagság 0,05–0,15 mm, kb. 100 réteg rakható fel 1 óra alatt (15 mm). Ez a berendezés is igen drága, kb 500 000 USD egy max. 500x500x300 mm-es prototípushoz.

### 15.2.7 Réteges kivágás és felépítés (Laminated Object Manufacturing, LOM)

Az alapelvet a 15.13 ábra mutatja.

Ebben az eljárásban is a rétegekre bontott CAD „tervrajz” játssza a fő szerepet. Ezeket a rétegeket a lézer – most vágóélként – papírból, műanyagfilmből, vagy akár fémlemezből *kivágja* és megfelelő kötőanyaggal egymásra halmozza. A kieső réteg-részeket is ugyanígy felhalmozza, azzal a különbséggel, hogy előtte azokat „kockára vágja”: felaprózza, hogy a kész 3D prototípusról könnyen leválaszthatók legyenek.



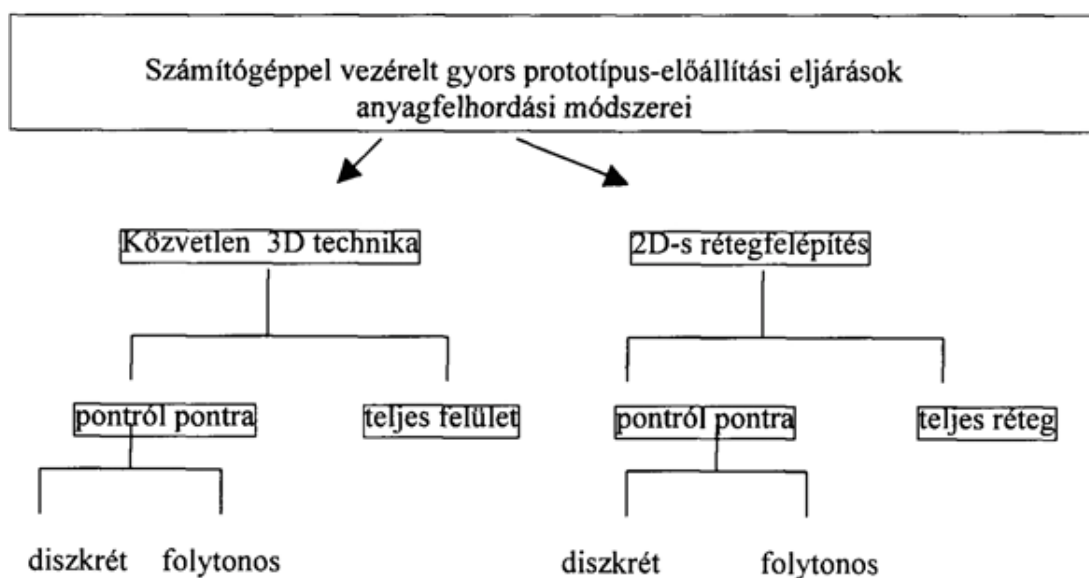
**15.13 ábra:**Réteges kivágás és felépítés ( LOM) 1) CO<sub>2</sub> lézer, 2) optika, 3) x-y pozícionálás, 4) vasalóhenger, 5) papír, 6) munkaasztal

A LOM berendezés a vágáshoz CO<sub>2</sub> lézert használ (25–50 W), a rétegvastagság min. 0,05 mm, a prototípus mérettartása minden irányban 0,12 mm-nél jobb, az „építés” sebessége tipikusan 100 réteg/h, vagy ~10 mm vastagság óránként. Ez a berendezés viszonylag olcsó: kb. 100 000 USD, – az eljárás azonban a rétegek kötésétől (ragasztásától) függően tekinthető – akár csak közelítőleg is, –funkcionális prototípusnak, vagy inkább csak a formatervezést megjelenítő mintának.

A *rapid prototyping* eljárásokat ezeketán a 15.14 ábra sémájában rendszerezhetjük.

A gyors prototípusgyártás eljárásai a közeljövőben valószínűleg számos újabb megoldást kínálnak. Már a jelen fázisban is „alfajok” jelennek meg az ismertetett eljárások árnyékában, vélhetőleg az egyenlőre szabadalmakkal jól lefedett terület megkerülése érdekében. Így pl. a térbeli nyomtatás egyik változatát „ballisztikus” eljárásnak nevezték, amelyben a nyomtató – felépítő anyag apró cseppek „lövedékének” formájában rakódik egymásra.

A gyors prototípusgyártás egyik legnagyobb hozama: a gyors szerszámgyártás (*rapid tooling*) felé vezető út megnyitása.



15.14 ábra: A gyors prototípuskészítés elvi áttekintése [15.13]

## 15.2 Prototípusból kiinduló szerszámgyártás és kissorozatú gyártás

A *rapid prototyping* általában nem ad közvetlenül hasznosítható, funkcionálisan felhasználható terméket: Egyrészt (vagy) szilárdsági okok miatt, vagy pedig (másképpen) az ősminta rendkívül magas ára miatt. Gyakran szükség van mégis kissorozatú előgyártásra, vagy az alkatrész tényleges beépítése céljára, vagy tényleges funkcionális vizsgálatokhoz, vagy akár egy sok szintlépcsőben megvalósítandó design-sorozat céljára. Ekkor használjuk fel az egyedi prototípust pl. *vákuum alatti öntéshez*.

### 15.3.1 Vákuum alatti öntés

Az eljárásban az ősminta (pozitív) formából először szilikonkaucsuk (negatív) mintát készítünk. Ebben a negatív formában célszerű a majdani szerszám végleges osztósíkját megválasztani, azt alkalmazni. A vákuum kamrában való öntés azért előnyös, mert így a folyadék állapotú szilikongyanta alapanyag buborékmentesen körbefoglalja az ősmintát. A szilikongyanta hőkamrában való kikeményítése után (pl. 30 perc 70 °C-on) a közepesen rugalmas „gumiszerű” szilikonkaucsuk mintát a majdani osztósík mentén felvágjuk, majd ebben a *negatív* öntőmintában készíthetünk (ismét) vákuum alatti öntéssel többféle polimerből 10–50 darabból álló kissorozatot. A rendelkezésre álló polimerek e célra is lehetnek szilikongyanták, tipikusan kétkomponensű, térhálósítható gyanták, uretán gyanták vagy egyéb gyanták: keménységük, rugalmasságuk stb. a gyantatípussal, ill. a térháló-sűrűséggel szinte tetszés szerint beállítható (pl. Shore keménység A30-tól D85-ig).

A szilikonkaucsukból készült negatív öntőminta költsége a fém öntőmintákhoz (szerszámhoz) képest kicsi.

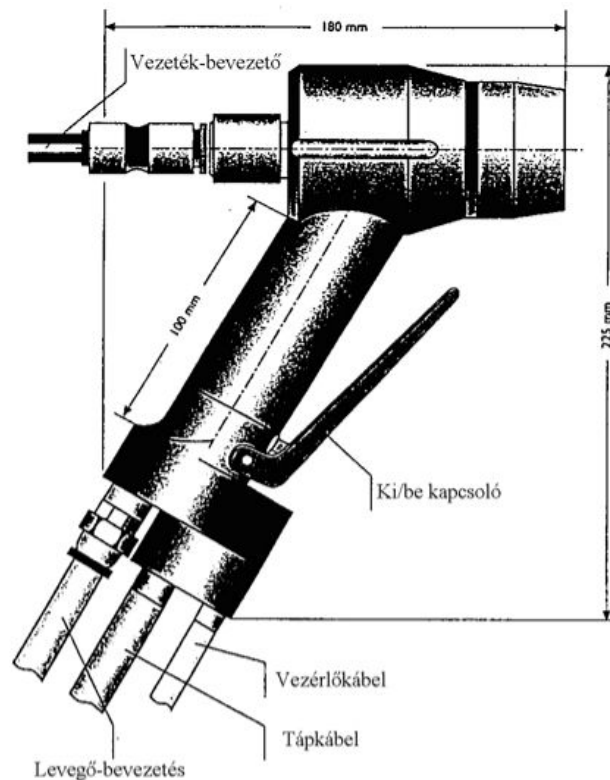
	Költség %	Elkészítési idő	Gyártható darabszám
--	-----------	-----------------	---------------------

	Költség %	Elkészítési idő	Gyártható darabszám
Fémszerszám (forgácsolt)	100	90 nap	>100 000
Finom-cink (öntött)	70	40–50 nap	10 000
szilikon	2–3	8–12 óra	100-nál kevesebb

1. táblázat - Szilikonkaucsukból készült negatív öntőminta költsége a fém öntőmintákhoz képest

### 15.3.2 Plazma-szórás

Ez a prototípus szerszámok másik tipikus előállítási módja a vákuum-öntés mellett. Az eljárás lényege, hogy a plazmaszórásra kiválasztott fémhuzallal, mint elektródával *ívet* létesítünk, ebben a 2000 °C-os ívben a huzal megolvad, az olvadt fémet nyomás alatti levegővel porlasztva *rászórjuk* az ősmintára. Különbféle fémek: Al, Cu, Zn, Fe, bronzok és Mo egyaránt szórhatók így. Az apróra porlasztott fémrészecskék a felületre csapódva a másodperc tört részei alatt lehűlnek (pl. 60 °C-ig) - így akár fából készült, (vagy papírból LOM-rétegezt) ősminta felületén is szórhatunk.

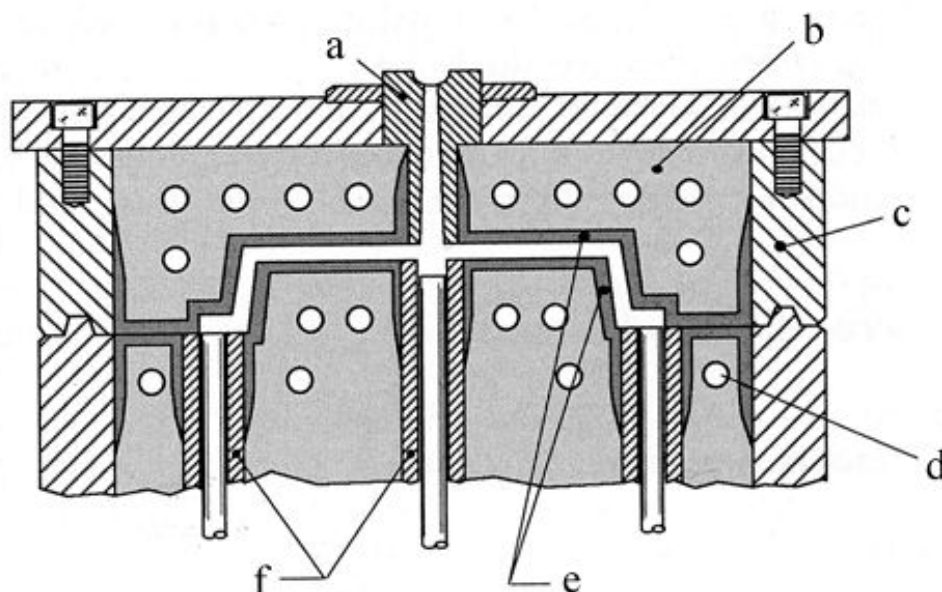


15.15 ábra: Plazma-pisztoly fémszóráshoz [15.13]

A második lépés: a plazmaszórt ősminta *hátdalának kitöltése* („*Hinterfüterung*”) megfelelő acél-szekrényben, könnyen olvadó fémötvözetel (bizmut, ón, cink ötvözetek). A plazmaszórással készült felületű bizmut-ón ötvözet főtömegű fröccsöntőszerszámmal 200 és 5000 közötti darabra kiterjedő kissorozatú gyártást valósíthatunk meg.

### 15.3.3 Szerszámcélú öntőgyanták

Könyvünk első kiadásában (2000) még azt írtuk, hogy a rapid prototyping nem *alkalmas* közvetlenül szerszámként használható (negatív) minták előállítására. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően ma már léteznek kellő szilárdságú anyagok, amelyek lehetővé teszik a szerszámként való (közvetlen) felhasználást is. Korábban ezért epoxigyantával kiönthető pozitív prototípusokat készítettek – az epoxigyanta ugyanis alkalmas szerszámként való felhasználásra. Üvegszálás, -szövetes erősítéssel a megfelelő mechanikai szilárdság biztosítható, bár ezzel az eredetileg is rossz hővezetés tovább romlik. Az öntőgyantába befektetett rézcsővel a temperálás mégis megoldható, különösen ha *töltőanyagként fémport* alkalmazunk. Az Alu-por és a homok töltőanyag az epoxi zsugorodását is jelentősen csökkenti.



**15.16 ábra:**Plazmaszórással kialakított felületű protoszerszám [15.13] a) beömlőnyílás, b) alumíniumporral töltött epoxigyanta szerszámtest, c) szerszám-tok, d) az Al-epoxi „öntvénybe” befoglalt réz hűtőcső, e) plazmával fémszórt felület, f) kidobórudak

Az epoxi szerszám kissorozatú fröccsszerszámként bevált. Poliuretánok reaktív (kisnyomású) fröccsöntéséhez (RIM) az epoxi szerszám nagyszorozatú gyártáshoz is alkalmas.

## 15.4 Szakirodalom

- Ehrenstein G. W.. *Konstruieren mit Polymerwerkstoffen*. Hanser. München . 1983.  
Schalkoff R.. *Digital Image Processing and Computer Vision*. J. Wiley & Sons. New York . 1989.  
Jähne B.. *Digital Image Processing*. Springer. Berlin . 1991.  
Ehrenstein W.. Erhard G.. *Konstruieren mit Polymerwerkstoffen*. Hanser. München . 1983.  
Erhard G.. *Konstruieren mit Kunststoffen*. Hanser. München . 1993.  
Singh A.. Silverman J. . *Radiation Processing of Polymers, (Polymer Processing Society: Progress in Polymer Processing)*. Hanser- Oxford Univ. Press.. München - New York . 1992.  
Woods R. J., Pikaev A. K.. *Applied Radiation Chemistry and Radiation Processing*. J. Wiley. New York . 1994.  
McLaughlin W. L.. *Dosimetry for Radiation Processing*. Taylor and Francis. London – New York . 1989.  
Jagrovc P., Häring E., Holl P., Seidel J.. *Elektronenstrahlhärtung für Beschichtungen und andere Anwendungen, Kontakt und Studium, Band 281*. Expert Verlag. Ehningen bei Böblingen . 1989.  
McDermott C. P.. *Selecting Thermoplastics for Engineering Applications*. M. Dekker. New York . 1984.  
Gebhardt A.. *Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung*. Hanser. München . 1996.



## **POLIMER ÚJRAHASZNOSÍTÁSI TECHNIKÁK (RECYCLING)**

### **Tartalom**

#### [16.1 Bevezetés](#)

#### [16.2 Műanyag a hulladékban](#)

#### [16.3 A polimerek újrahasznosításának szintjei](#)

##### [16.3.1 Hőre lágyuló polimerek újrahasznosítása másodnyersanyagként](#)

##### [16.3.2 A polimerek kémiai újrahasznosítása](#)

##### [16.3.3 A polimerhulladék energetikai hasznosítása](#)

#### [16.4 A vegyes polimerhulladékok újrahasznosításának termodinamikai korlátai.](#)

#### [Kompatibilizáció](#)

#### [16.5 Reaktív kompatibilizáció az újrahasznosításban](#)

#### [16.6 A polimer újrafeldolgozás társadalmi-gazdaságossági összefüggései](#)

#### [16.7 Szakirodalom](#)

### **16.1 Bevezetés**

A 20. század végén idejekorán, már 1972-ben egy felelősségteljes értelmiségi csoport, a „Római klub” – amelynek műszaki szakértőit jó részben a világ talán legnevesebb műszaki egyeteme a „Massachusetts Institute of Technology” adta – tanulmányban foglalta össze figyelmeztető előrejelzéseit a *növekedés hatáiról*. Azóta a *környezetvédelem* nemcsak a környezeti-egyensúly tudományának, az *ökológiának* lett hangsúlyos gondja, hanem minden mérnöki tevékenységnek is. Megkerülhetetlen *erkölcsi kötelességünk* is, hogy az anyaggal és energiával a legtakarékosabban s a környezettel a legkíméletesebben bánó technikát fejlesszük ki, és a fogyasztásra, használatra szánt eszközök tervezése és kialakítása a teljes élelciklust vegye figyelembe. Ebbe a teljes ciklusba bele kell értenünk az alapanyagok használat utáni visszaforgatását (*recycling*), ismételt felhasználását (*reuse*), vagy legalább a befektetett energia visszanyerését (*recovery*).

A műszaki fejlődést természetesen nem állíthatjuk le, de a mainál sokkal kiegyensúlyozottabbá kell tennünk. A fosszilis (*bányászati* eredetű: kőolaj, szén stb.) nyersanyagok és energiaforrások pazarló, kíméletlen felhasználása után meg kell találnunk a *fenntartható fejlődés* (*sustainable development*) útját, ami átvezet bennünket a megújítható nyersanyag- és energiaforrások (*renewable resources*) korszakába, s amelyben a környezettel egyensúlyban lévő technológiák és az újrahasznosítás a technika mindennapi gyakorlatává váltak.

A mennyiségi növekedés bővületében indokolatlanul bővülő termelő tevékenység, a megújíthatatlan kőolaj pazarló felhasználása, és a környezetszennyezés tipikus példajaként sokan éppen a szintetikus polimereket, a műanyagokat emlegetik. Anélkül, hogy elfelejtenénk: ezekhez az érvekhez adtunk némi okot, pl. az „eldobható”, egyszer használatos csomagoló eszközök (pl. üdítőitalos palack) divat-jellegű tömeges bevezetésével, látnunk kell a **polimertechnika valós értékeit**:

- A polimergyártás felfutása évi 1 Mto-s nagyságrendről évi 100 Mto fölé az elmúlt 3–4 évtizedben *valóságos* műszaki- gazdasági előnyökön alapult. Jó példa erre a közlekedési eszközök

fejlődése: a kőolajból készült *polimer* beépítése a személygépkocsiba csak a súlycsökkentés révén műanyaggyártáshoz felhasznált kőolaj sokszorosát takarítja meg a benzin felhasználásban egyetlen év alatt is.

- A kőolaj felhasználás egészéből a műanyaggyártás mindössze 3–4 %-ban részesül. A többi: üzemanyag, kenőanyag, energiaforrás lesz. A szintetikus vegyipar pedig már ma is képes (lenne) arra, hogy akár a teljes polimertechnológiát átalakítsa, és biomasszából kiindulva gyártsa a műanyagokat. (A mai energiaárak mellett viszont ez lenne gazdaságtalanabb.)
- A környezetszennyezés vádja talán a legsúlyosabb. Ezzel kapcsolatban gyakran két szélsőséges nézet áll szemben úgy, hogy mindkettő a polimereket becsüli le:
  - a műanyag a szemétkben sem bomlik el, *örökre* környezetszennyezés marad – mondják gyakran ugyanazok, akik másfelől azt hangsúlyozzák, hogy
  - a műanyag túlságosan *instabil* (bomlik, kúszik, relaxál, hő- és fényérzékeny stb.) ahhoz, hogy műszaki célra alkalmas szerkezeti anyag legyen.

Könnyen belátható, hogy egyik szélsőséges vád sem igaz. Pontosabban olyan skála szélső értékei ezek, amelyen a mai technika (*molecular engineering*) tetszőleges pontot megválaszthat, és technológiai módszerekkel kialakíthat. A műszaki műanyagok stabilizátorai (antioxidánsok, UV stabilizátorok stb.) szinte tetszőlegesen hosszú élettartamot garantálnak sokféle agresszív közegben. A mezőgazdasági fóliák élettartama beállítható 1 vagy 3, vagy akár ennél jóval több évre is. A nylonharisnyák élettartamát a mainak többszörösére is növelhetné az ipar. Másfelől, megfelelő, gyorsabban lebomló adalékokkal (pl. keményítő) a humuszban akár egy éven belül is szétporladóvá lehet tenni a sörösrekeszt. Ez azonban kockáztatná a sörösrekesz hosszú távú – sok évre tervezett – rendeltetésszerű használatát.

## 16.2 Műanyag a hulladékban

A műanyagok a természetes környezetben – pl. beásott, földfelszín alatti lerakóhelyen (*deponia*) hasonló módon bomlanak, mint a természetes polimerek. A cellulóz is nehezen bomlik ligninnel stabilizált formájában: a mocsárba süllyedt famaradványok több millió évet is túlélhetnek. A 19. századi újságpapír – ha tömbben deponálták – a kiásáskor ma is szinte elolvasható állapotú. A természetes eredetű polimereknek mindenesetre nagyobb esélye van – alkalmas körülmények között – mikrobiológiai, fermentatív bomlásra. A selyem, a gyapjú, a pamut könnyebben bomlik, mint a poliészterszál. De az sem ritka, hogy ősrégi temetők feltárásakor ép hajfonatot, vagy több ezer éves textíliákat találunk.

A kommunális hulladékban – akár a nagyvárosi, akár a mezővidéki szemétkben a műanyag hulladék csekély hányadot tesz ki. Ennek felbomlása a többi, szerves eredetű, építési hulladék jellegű és egyéb szemétk között nagymértékben a műanyag hulladék méretétől, aprítási fokától függ. (A finomra aprított műanyag- és papírhulladék még előnyös is lehet talajlazító hatása révén a vegetáció újratelepítése szempontjából.) A kommunális hulladék fejenként (Európában) évenként 400 kg körüli mennyiségéből közelítőleg:

- 5 % a műanyag,
- 15 % papír,
- 10 % fém és üveg,
- 40 % szerves (bio-) hulladék,

a többi pedig túlnyomórészt építési hulladék.

A hulladékban megjelenő anyagok újrahasznosítása igen eltérő arányú. Mint az ismeretes, a *fémek* újrahasznosítása évszázadokra visszavezethető gyakorlat. Németországban a hagyományos acélgyártásban 1 tonnához 0,35 tonna ócskavasat használnak fel, kb. 35 %-os az újrahasznosítás. Az elektro-acél gyártásban ennél magasabb az ócskavas aránya. Az alumínium újrahasznosítása 20 %-ra becsülhető.

Az építőipar *szilikátanyagainak* újrahasznosulása másodlagos formában: talajszilárdító feltöltés formájában nagyarányban, de alacsony gazdaságossággal (szilikáttörmelék, salak, bányameddő) működik. Az üveg újrahasznosítása szintén bevett gyakorlat, de nem problémamentes.

A kommunális hulladék 15 %-át kitevő papír, amelynek felhasználása egyáltalán nem csökken a számítógép elterjedésével, mintegy 40 %-ban újrafelhasználásra kerül. Az újrahasznosított papír rendszerint alacsonyabb szintű felhasználásra jut (újságpapír, csomagoló- és egészségügyi papír).

A háztartási hulladék 5 %-ában megjelenő műanyagok megoszlása közelítőleg azonos a gyártásban elfoglalt arányaikkal (16.1 táblázat).

Hőre lágyulók	LDPE, HDPE	30–35 %
	PVC	20–25 %
	PP	8–10 %
	PS	%
	PU	6–8 %
	GFRP (kompozit)	8–10 %
	PA	6–8 %
		2–3 %

Hőre nem lágyulók	UP	1–2 %
	PF	3–4 %
	EP	1–2 %

### 1. táblázat - A kommunális hulladék kb. 5 %-ában megjelenő műanyag hulladékok összetétele [16.1]

A műanyagok újrahasznosításának igen sokféle nézőpontja (aspektusa) van. Tárgyalható

- az anyagmegtakarítás, a kőolaj (nyersanyag) kímélése szempontjából,
- az energia-megtakarítás (a szintetikus polimergyártási technológiában elfogyasztott energia) szempontjából,
- a környezeti szennyezés, a környezetvédelem, a hulladék-kezelés szempontjából, de ezen felül tekinthetjük
- logisztikai feladatnak: a hulladékbegyűjtés, szétválogatás, szelektálás, csoportosítás, gyűjtő-és újrafeldolgozó helyre szállítás szempontjából,
- konstrukciós szerelési és szétszerelési feladatnak (pl. az autóbontást, a hűtőszekrények, akkumulátorok reciklálását).

A jelen fejezetben a polimerek újrahasznosítását elsősorban anyagtudományi – és technológiai: anyagmérnöki szempontokból tárgyaljuk.

## 16.3 A polimerek újrahasznosításának szintjei

A szintetikus polimerek hulladékát az anyagmérnök több szinten hasznosíthatja.

- A legmagasabb szintű *újrahasznosítás*: a másodnyersanyagként, az újhoz hasonló alapanyagként való *újrafeldolgozás*. A hőre lágyuló polimerek a fémekhez hasonlóan újraolvaszthatók, tiszta állapotukban újra fröccsenhetnek, extrudálhatók, kalanderezhetők stb. A térhálósított (hőre nem lágyuló) polimertermékekkel (mint pl. a gumiabroncs) ez nem valósítható meg.
- A térhálós polimertermékek aprított, őrölt maradéka, hulladéka *töltőanyagként* felhasználható lehet alacsonyabb követelményszintű termékekben.
- A legkülönbélebb polimerek (hőre lágyulók és térhálósak egyaránt) alkalmasak lehetnek vegyipari *pirolitikus bontás* útján (a makroláncok kontrollált tördelése révén) kismolekulás szerves vegyületek előállítására. Új szintézishez alkalmazható közbülső termékek, *intermedierek* állíthatók így elő. Van olyan polimer, amelyből e lánctördeléssel tiszta *monomert* állíthatunk elő (pl. PMMA –ból MMA monomert).

- A hőbontás maradékát „olaj” formájában, vagy akár magát a műanyag hulladékot a szeméttégetőbe vitt hulladék alkotórészeként igen jó hatásfokkal hasznosíthatjuk *energiahordozóként*. A műanyag hulladék fő alkotói, a tiszta PE, PP, PS, PET energiatartalma gyakorlatilag megegyezik a legjobb fűtőolaj 44 MJ/kg fűtőenergiájával, és teljes mértékben hasznosul. Egyedül a PVC fűtőenergiája kisebb (22 MJ/kg) a viszonylag magas klórtartalom és kisebb „kőolajtartalom” miatt.

A legalacsonyabb szintű hasznosítás a műanyagok esetében ugyanaz, mint az építőanyag és kerámiahulladékok tipikus, tömeges végső hasznosítása: a lerakóhelyek feltöltése, *deponálás*. A környezet megkímélése érdekében ez esetben is gondoskodni kell a megfelelő aprításról.

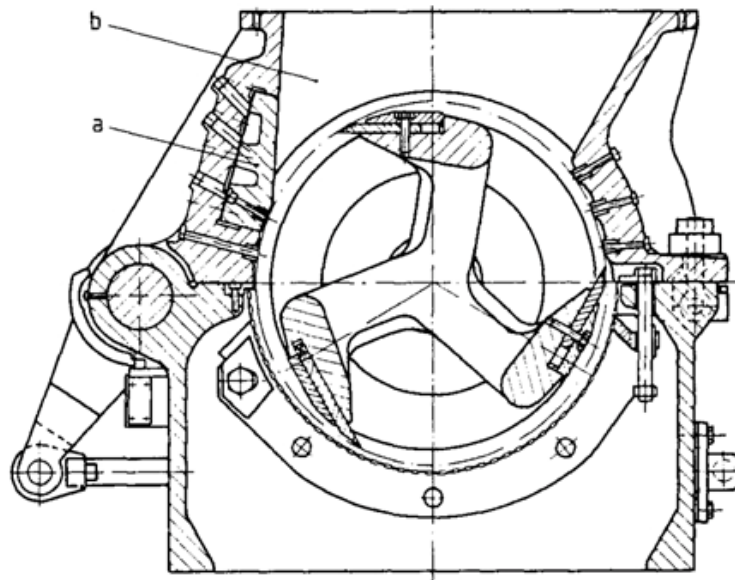
### 16.3.1 Hőre lágyuló polimerek újrahasznosítása másodnyersanyagként

A szintetikus polimergyártás túlnyomó többségét adó *hőre lágyuló* polimerek tiszta, szennyezetlen állapotban nehézség nélkül újra feldolgozhatók a megömlesztés és képlékeny alakítás ismert módszereivel.

Meg kell különböztetnünk a

- munkahelyi, gyártási hulladék és a
- másodlagos, felhasználási hulladék újrafeldolgozását.

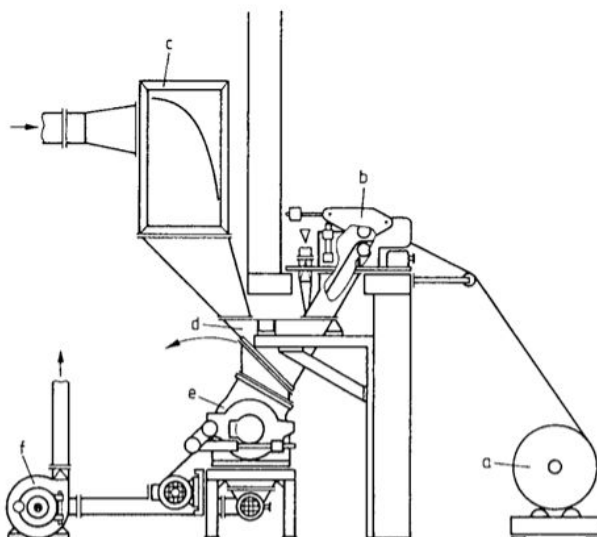
Az első, a polimerfeldolgozás műhelyeiben keletkezik, mint fröccsöntő- csatornamaradék, extrudált lemez szélhulladéka, fűvott hordó vágási maradéka stb. Ez a tisztán, frissen összegyűjtött anyag csak mechanikai aprítást igényel, amely után azonnal újrafeldolgozható.



**16.1 ábra:**Háromkéses aprítógép (cserélhető késekkel és üllőkkel) [16.1]

A 16.1 ábrán egy tipikus aprítógép keresztmetszete látható. A nagysebességű, nagy nyomatékú rotoron a kések cserélhetők, és rendszerint úgy vannak rögzítve, hogy vágóélük nem párhuzamos a tengellyel, hanem azzal csekély szöveget zár be. Különböző elrendezésű és méretű aprítógépekben az a közös, hogy a hosszú etetőcsatornába kézzel még szándékosan sem lehet benyúlni. Az aprítógépnek a kiszolgáló személytől eltávolított elhelyezése nemcsak a biztonságtechnika, hanem az igen nagy zaj miatt is indokolt.

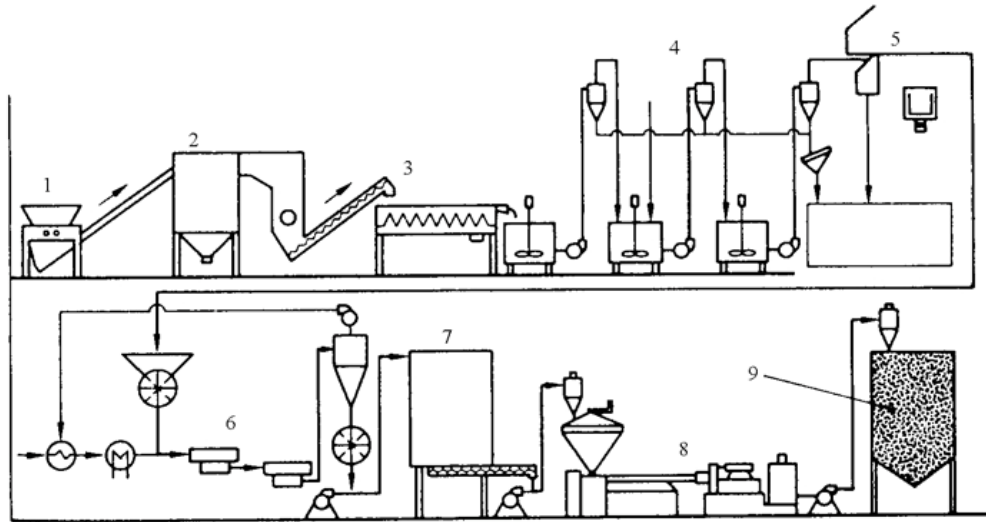
Ezekkel az aprítógépekkel PE, PP, PS, ABS, kPVC stb. alapanyagokból olyan aprított, tiszta másodnyersanyagot kapunk a feldolgozógépek közvetlen közelében, amelyet az eredeti (*original*) anyaghoz keverve – a gyártási hulladék keletkezésének arányában, ami ritkán több mint kb. 5 % – minden káros következmény nélkül együtt feldolgozhatunk. A hőre lágyuló hő-stabilizálása a minőségbiztosítás korszerű szintjén manapság akár *tízszeres* egymás utáni fröccsöntést, extruziót stb. – is lehetővé tesz észrevehető molekulatörődés (*degradáció*) nélkül.



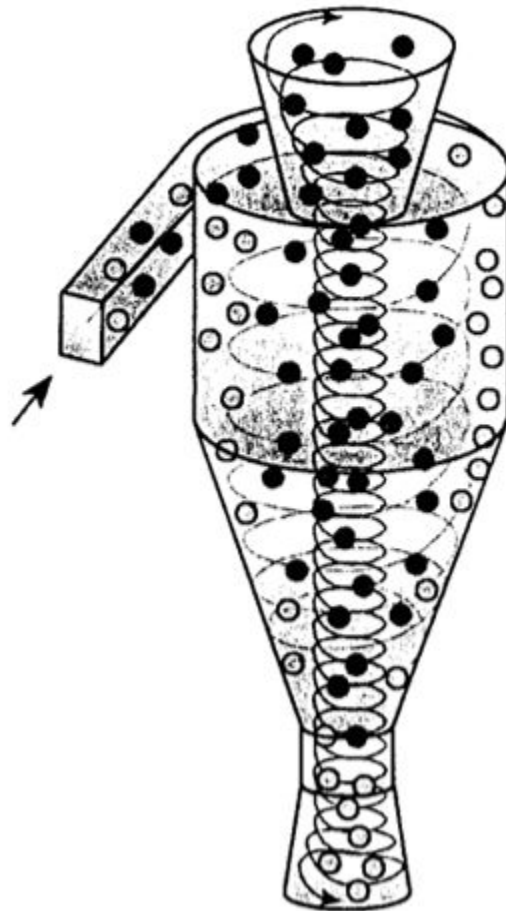
**16.2 ábra:**Hulladék fólia-tekercs aprítógép, hangtompított (elválasztott) elhelyezésben [16.1] a) hulladékfólia tekercs, b) behúzó-gép, c) darabos hulladék beadása, d) aprítógép etetőnyílás, e) aprítógép, f) elszívó

Más a helyzet a már egy teljes életciklust végigjárt hőre lágyuló polimer alkatrész újrafeldolgozásával. Gondoljunk pl. egy 15 évi használat után szétbontott személygépkocsi leszerelt PP lökhárítójára ("ütőközjére"). A másodlagos, felhasználás utáni hulladék jellegű, hőre lágyuló polimert már nem elég csak aprítani, azt gondosan meg is kell tisztítani. Egy ilyen, többszöri mosóállomással, szárítóval is kapcsolt poliolefin recikláló gépsort mutat be a 16.3 ábra. (Ez a gépsor „színre lakkozott” PP ütőköz festékanyagának eltávolítására nem alkalmas.)

Mint látható, a 16.3 ábrán bemutatott gépsor többszöri mosást állít be, detergens jelenlétében, majd öblítést tiszta vízzel, végül extruzió és újra granulálás következik. A mosóállomások között hidro-ciklon végzi a víztelenítést. (16.4 ábra)



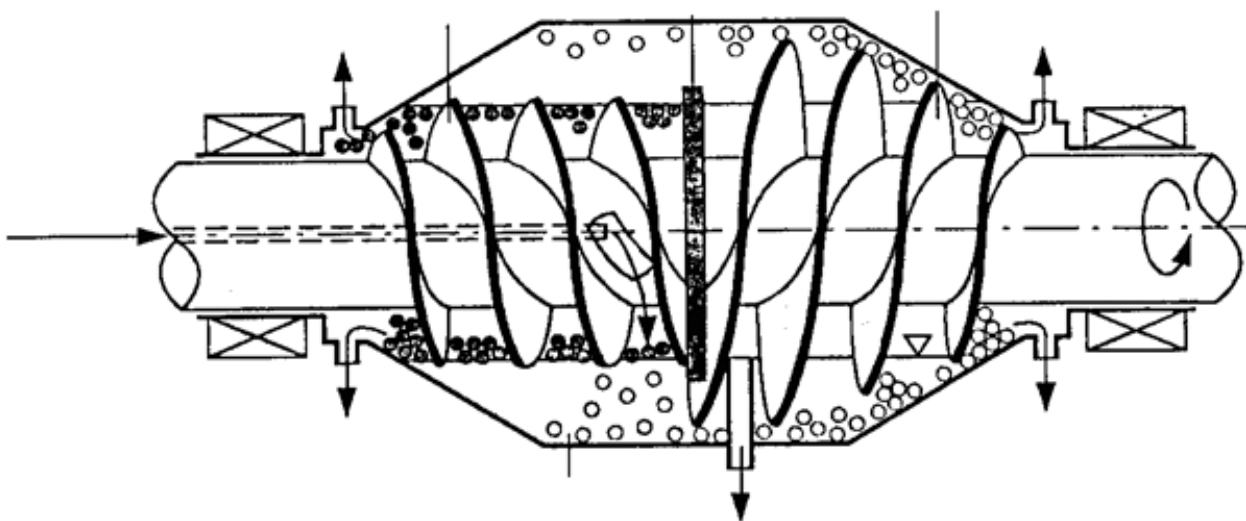
**16.3 ábra:** Poliolefin hulladék visszanyerő gépsor [16.4] 1) örlő, 2) előmosó, aprító, 3) csigás mosógép, 4) kaszkád-mosógépsor hidrociklonnal, 5) centrifuga (vízkezelés), 6) termikus szárítás, 7) tárolósiló, 8) extruder, 9) (reciklált) granulátum siló



**16.4 ábra:**A hidrociklon alapelve (nehéz frakció kijárata: alul, könnyű frakció kijárata: felül) [16.3]

A degradáció esetleges megindulását, szintjét könnyen ellenőrizhetjük az ömledékvizkozitás (MFI, MFR) mérésével az ismételt újrafeldolgozások során.

A hidrociklon olyan vizes zagyok kezelésére alkalmas, mint amilyen pl. a PE aprítékot, vagdalékot tartalmazó mosófolyadék. Amint az a 16.4 ábrán látható, ebben a készülékben a víznél könnyebb ( $0,92 \text{ g/cm}^3$ ) PE vagdalék a felső kijáraton távozik, míg a víz fő tömege és nehéz hordalék alul távolítható el. Hasonló elven, a sűrűségkülönbség elvén működő folyamatos centrifugával akár kétféle polimer is szétválasztható, pl. az  $1,35 \text{ g/cm}^3$  sűrűségű *k*PVC a  $0,94 \text{ g/cm}^3$  sűrűségű HDPE-től.



**16.5 ábra:**Az elválasztó centrifuga elve [16.3] beadagolás: bal felől, tengelyirányból, bevezetés: bal félen középtájt, a könnyű (úszó) frakció lefölezése: bal felé a nehéz (üledő) frakció kihordása jobb felé

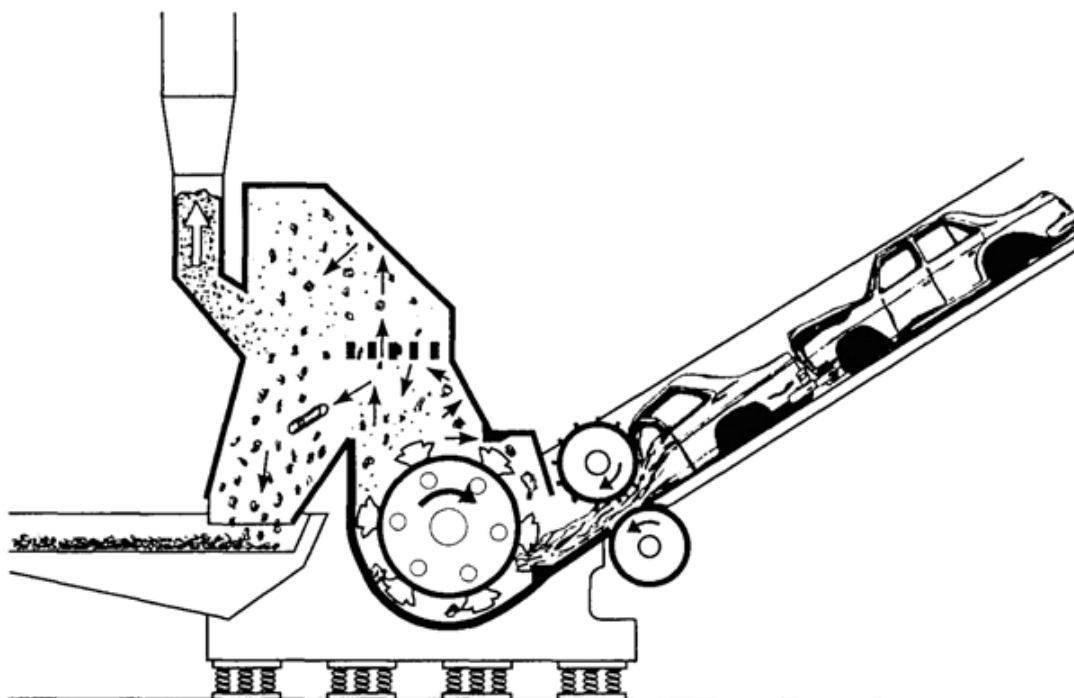
Hangsúlyozandó, hogy az egynemű, tisztított, teljes életciklust kiszolgált hőre lágyuló polimerek újrahasznosításánál gondosan *ellenőrizni* kell az esetleges *degradáció* mértékét, és meg kell határozni az alkalmanként szükségesnek mutakozó pótlólagos stabilizátor mennyiséget. Még ilyen elővigyázat mellett is az újrafelhasználás során ritkán teljesíthető az eredetivel azonos követelményszint (ez lenne a tényleges *recycling*), gyakoribb az alacsonyabb szintű újrahasznosítás (*down-cycling*). A továbbiakban még érinteni fogjuk a minőségjavító újrahasznosítás (*up-cycling*) lehetőségeit.

### 16.3.2 A polimerek kémiai újrahasznosítása

Németországban, ahol évenként több mint 3 000 000 személygépkocsit helyeznek forgalomba, jelentős súlyt kapott a polimer alkatrészek újrahasznosításának programja. A forgalomból kivont és bontásra ítélt több mint évi 2 000 000 db autóból a nagyobb műanyagalkatrészeket leszerelik, mielőtt a roncs-autó maradékát felaprítanák. Gazdasági számításokkal kimutatható volt, hogy csak azokat az alkatrészeket érdemes kiszerezni, amelyek egyrészt a bontóműhelyekben pótalkatrészként, pótlásként szolgálhatnak, másrészt biztosan *fajtatista*



anyagként elkülönítve reciklálhatók az előbbi fejezetben leírt módszerekkel. Erre a leszerelő műveletre azonban egy-egy gépkocsinál maximum 20 perc munkaidő ráfordítás kifizetődő, ami alatt kb. a polimeralkatrészek 40 %-a, mintegy 50 kg-nyi alkatrész gyűjthető be. A többi, a maradék a roncsautóval együtt az aprítógépbe (*shredder*) kerül, ami az egész roncsot felaprítja, és az aprítékot egy elszívó-rendszer segítségével egy „könnyű” frakcióra, egy „nehéz” – és egy végső fémfrakcióra különíti el. (16.6 ábra) A fémfrakciót a kohászat újrahasznosítja.



16.6 ábra: Személygépkocsi aprítógép (*shredder*) [16.3]

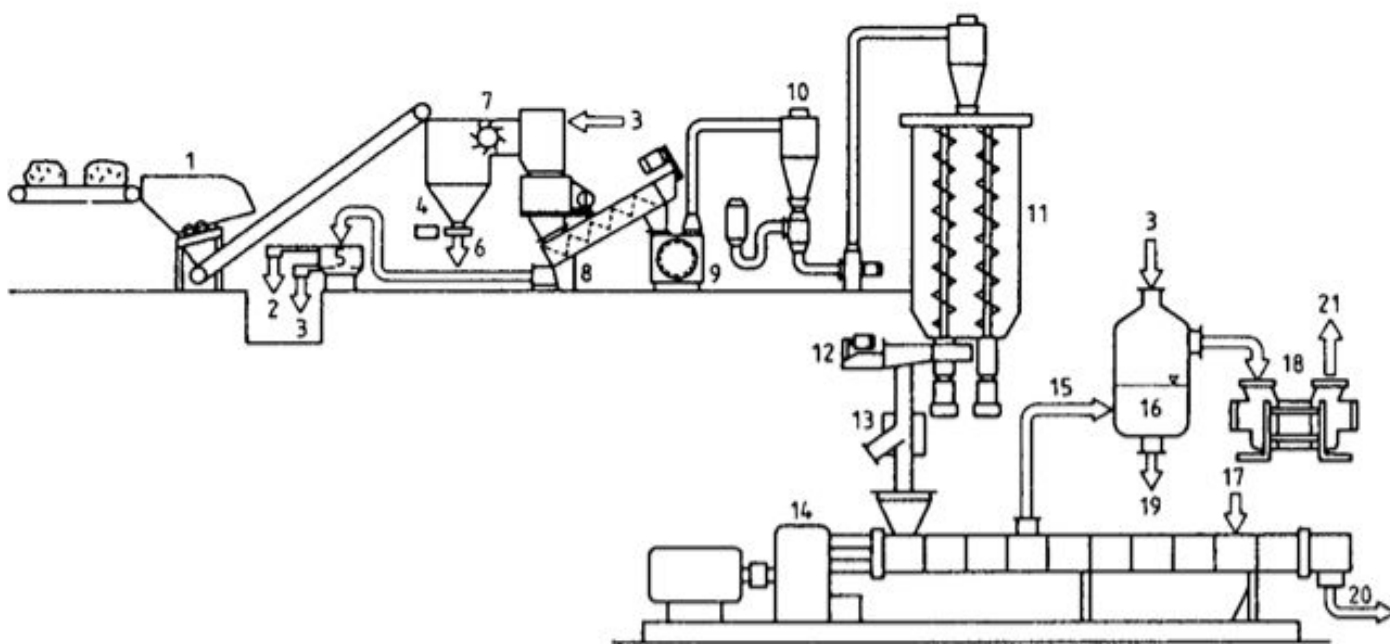
Az a vegyes, szennyezett polimer hulladék, ami a „könnyű” frakcióban megjelenik, a technika mai állása mellett a legelőnyösebben kémiai alapanyagig történő lebontással (*feedstock recycling*) hasznosítható.

Az 1990-es évek közepén Németországban több mint 40 ilyen autó-aprítógép több 400 000 tonna „könnyű” frakcióba tartozó hulladék-aprítékot termelt csak az autóaprításból, és még kb. ugyanennyit háztartási elektromos berendezésekből. E frakciónak kb. 30 %-a szennyezett, vegyes műanyag hulladék, és kb. 23 %-a gumihulladék – ami főleg a gumiabroncsból származik.

A kémiai újrahasznosítás lényege: a polimer makromolekulát olyan kisebb molekula töredékekre bontják, amelyek vegyipari alapanyagként hasznosíthatók. Ehhez mindenképp először a hulladékból lehetőség szerint el kell vonni a halogéneket (klorid, fluorid), mert ezek a magas hőmérsékleten (tipikusan 300 °C felett) igen korrozívak az adott vegyipari berendezésekben.

A polimerhulladékok *kémiai* alapanyagként való *hasznosítása* tehát lényegében a hőbontás (pirolízis) vagy másfelől közelítve: a molekulatördelés (krakkolás) elve alapján történik. Ez a sokféle eredetű és összetételű kőolajból szigorúan egységes minőségű alapanyagokat gyártó *petrokémiai ipar* tipikus eljárása, amelyben jól szabályozott molekulalánc-hosszúságú szénhidrogéneket állítanak elő.

A vegyes polimerhulladékok kémiai újrahasznosításának egy terjedő technológiája a *degradatív extrúzió* (16.7 ábra).



**16.7 ábra:** Degradatív extrúziós gépsor [16.1] 1) durva aprító, 2) iszap, 3) víz, 4) előmosás, 5) iszapkezelés, 6) Fe-eltávolítás, 7) nedves aprítás, 8) mosó, 9) szárító-centrifuga, 10) termikus szárító, 11) siló, 12) kihordó csiga, 13) fémválasztó, 14) extruder, 15) HCl eltávolítás, 16) HCl elnyelő, 17) O<sub>2</sub> bevezetés, 18) vákuumszivattyú, 19) HCl kinyerés, 20) olaj elvezetés, 21) levegőtisztító

Ebben a polimerhulladék keveréket

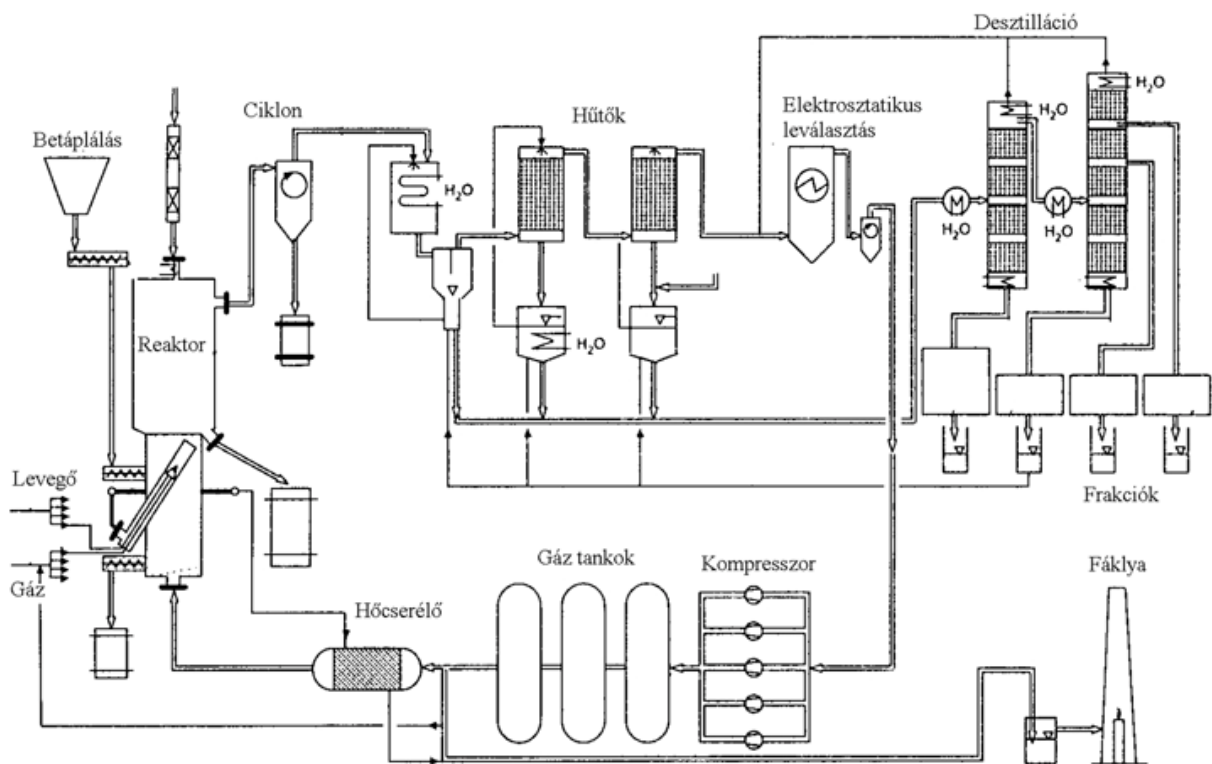
- kismolekulás, kisviszkózitású polimer-oligomer ömledékké alakítják,
- hő- és mechanikai energia (nyíróerők) együttes hatása alatt,
- oxigén, esetleg vízgőz vagy hidrogén jelenlétében, amelyek a degradációt elősegítik,
- dekompozíciós melléktermékek, tipikusan a HCl (sósav-gáz) egyidejű eltávolításával, amely lehűlés után

- degradált, de granulálható szilárd végtermékké, vagy viszkózus folyadékká, vagy akár gázalakú szénhidrogénné válik,

amely azután a további petrokémiai feldolgozás után új, tiszta polimerek – vagy más vegyipari termékek – szintéziséhez szolgáltató alapanyagot (16.7 ábra).

A *degradatív extruder* a szokásosnál magasabb hőmérsékleten dolgozó egycsigás vagy kétcsigás, *gáztalanító* extruder, de lehet kaszkád-extruder is. A 300 °C körüli degradatív extrúzió szilárd, granulálható terméket ad 100 °C körüli olvadásponttal, ami azután kényelmesen betáplálható a petrokémiai feldolgozás következő fázisában. A degradatív extrúzió hőmérsékletét 500 °C-ra emelve gázalakú termékeket kapunk, amelyet lehűtve, kondenzálva közepes viszkozitású olajat nyernek, amely ugyanúgy alkalmas a tovább feldolgozásra – pl. katalitikus hidrogénezésre – mint bármely hasonló kőolajtermék.

A modern petrokémia bevált módszereihez még közelebb visz a műanyag- és gumiabroncs hulladékok közvetlen (*direct*) pirolízise fluid-ágyas reaktorban (16.8 ábra).



**16.8 ábra:** Fluid-ágyas pirolízis reaktor műanyag hulladék és gumiabroncs őrlemény kémiai hasznosítására [16.4]

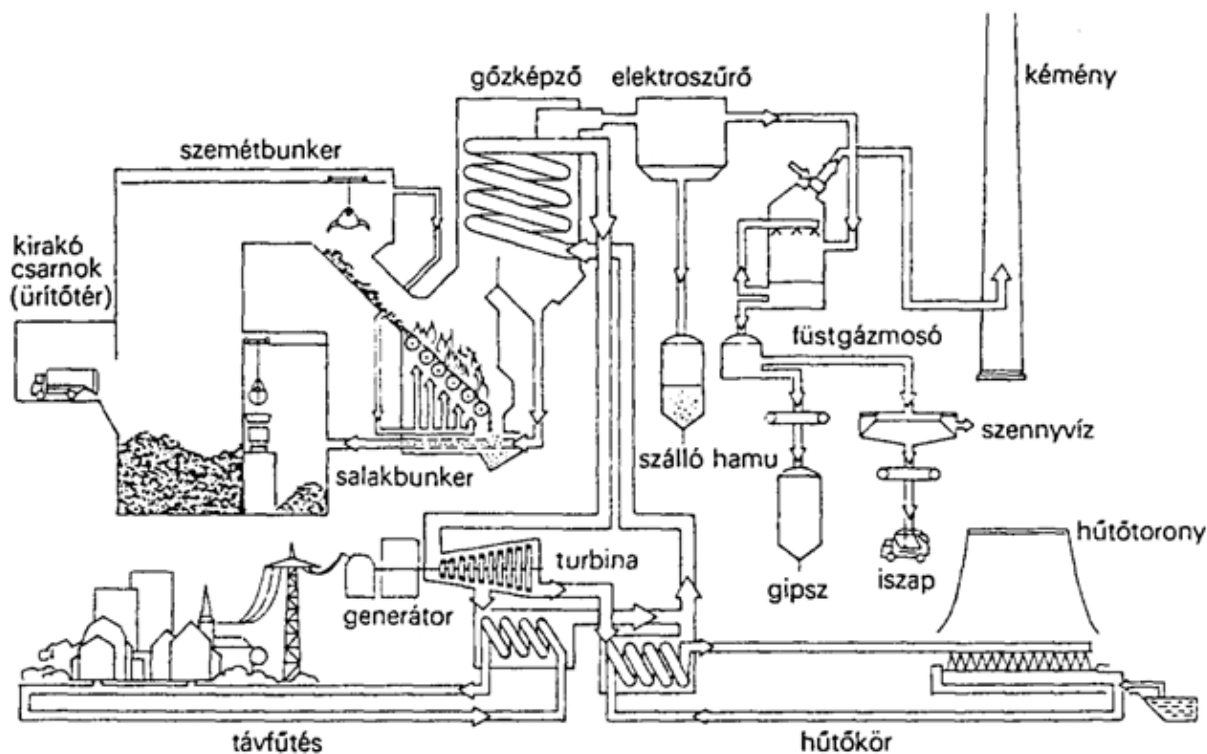
A közvetlen pirolízis tipikus hőmérséklete 700 °C körüli, gázalakú és olajszerű termékeket eredményez. A gáz főleg metánból és etánból áll, benzol és más aromás szénhidrogének is bőven keletkeznek. Két polimer kontrollált pirolízise tiszta monomert szolgáltató: a PMMA-ból a metilmetakrilát monomer 450 °C-on végzett

pirolízisben 97 %-ban visszanyerhető, a PS 580 °C-os pirolízise közel 65 %-ban tiszta sztírol monomert eredményez.

A modern vegyipar még számtalan további eljárást kínál a polimerhulladék mint kémiai alapanyagforrás hasznosítására (hidrogénezés, oldószeres bontás /*solvolysis*/, savas bontás /*acidolysis*/, redukálószerként hasznosítás a vaskohászatban stb.). A fejlesztés költségigénye nagy, az eljárások jórészt a hulladékban rejlő energiát hasznosítják.

### 16.3.3 A polimerhulladék energetikai hasznosítása

A kommunális hulladék 5–6 %-nyi szintetikus polimertartalma kifejezetten előnyös a szemétegetés során. A műanyagszemét átlagos energiataartalma ugyanis 34 MJ/kg feletti, szemben a kevert városi hulladék átlagosan 9 és 13 MJ/kg közötti energiataartalmával. Egy tipikus szemétegetőmű sémáját a 16.9 ábra mutatja be.



16.9 ábra: Városi szemétegetőmű sémája [16.2]

Az égetés tipikusan 850 °C-on történik, s ennek a magas hőmérsékletnek fenntartásához a nagy kalóriatartalmú műanyagszemét kifejezetten előnyös. Csak arra kell vigyázni, hogy a műanyag hulladék viszonylag jól eloszlatva jelenjen meg a kevert hulladékban. Ezen a hőmérsékleten már 2 sec. tartózkodási idő elégséges a teljes elégéshez.

A szemétegetés legszigorúbb ellenőrzési pontja: a füstgáz kibocsátás (emisszió) szennyezettségi szintje. Érdeemes megfigyelni a német előírások szigorodását e tekintetben az elmúlt 25 évben.

Megengedett koncentráció mg/m <sup>3</sup>	A szemétegető füstgáz-emissziójának maximuma 1974 / 1986 / 1990
Pernye	100 / 30 / 10
HCl	100 / 50 / 10
HF	5 / 2 / 1
SO <sub>2</sub>	- / 100 / 50
NO <sub>x</sub>	- / 500 / 200
CO	1000 / 100 / 50
Dioxin, furán	- / - / 0,1

## 2. táblázat - A szemétegető füstgáz-emissziójának maximuma [16.4]

A korszerű szemétegetőműben a szigorú elnyeletési szabályok betartását a következő szűrőrendszerek biztosítják:

- Pernye eltávolítás: elektrosztatikus szűrők, szövet-szűrők, ciklonok, nedves elektrosztatikus szűrők;
- Gázalakú szerves szennyezőanyagok (HCl, HF; sósav, folyosav) eltávolítása: nedves mosóberendezések, permetező elnyeletők, nedves elektrosztatikus szűrők. Így történik – vízzel – a SO<sub>2</sub> elnyeletés is.
- Nitrogénoxidok redukciója: szelektív katalitikus redukcióval, aktivált szénnel, a keletkező salétromsav megkötése ammóniával.

Mindezek a szűrő - elnyelő rendszerek lényegében azonosak a hagyományos és modern hőerőműben is kötelezően alkalmazásra kerülőkkel. A szemétegetésben megjelenő kevés PVC amiből HCl keletkezhet, tehát nem okoz különös gondot, ha a gázok elnyeletése megfelel az előírásoknak. Ami manapság több gondot okoz a hulladékégetésben, az a nyomokban is igen mérgező *dioxin*. A dioxin-féleségek közül a szerves anyagok égetése során a leggyakrabban a 2, 3, 7, 8 – tetraklór-dibenzo- p-dioxin (TCDD) keletkezik a szemétegetőben, de nemcsak a PVC jelenlétében, hiszen a háztartási szemét ezen felül is sok kloridot (pl. konyhasót) tartalmaz. Ilyen és hasonló káros vegyületek pl. a poli-klórozott-bifenilek (PCB) sok más ipari tevékenység nyomán is fellelhetők: a használt motorolajban, a transzformátorolajban, a növényvédőszer-gyártás melléktermékeiben stb. A kontrollált égetésnek, utóégetésnek és füstgázkezelésnek azonban már megvannak az eszközei és technikái az ezredfordulón.

## 16.4 A egyes polimerhulladékok újrahasznosításának termodinamikai korlátai. Kompatibilizáció

Ahogy az a 16.3.1 fejezetben már érintettük, a hőre lágyuló polimerek újrahasznosítása másodlagos nyersanyagként, tisztítás után is csak fajtahomogén, egynemű anyag esetén lehetséges. Tehát pl. a HDPE hulladéknak tiszta, nagysűrűségű polietilénnek kell lennie, és az még csekély százalékban sem keveredhet

PVC, PS, PP vagy PET hulladékkal. Hiába lehet közelálló két hőre lágyuló polimer olvadáspontja, hiába kevernénk össze olvadékukat bármily intenzíven is, lehűtésekor a legtöbbször fázisátalakulást, szétkeveredést tapasztalunk. A leggyakoribb 11 hőre lágyuló polimerből össze-párosított, kétalkotós keverékek összeférhetőségét a 16.3 táblázat mutatja.

Két polimer keverékét (az együttes rendszer lehűlése utáni) szilárd állapotban akkor nevezhetjük *homogén keveréknek*, ha a rendszer egyetlen fázist alkot, és ez megmutatkozik abban is, hogy egyetlen  $T_g$  átalakulási hőmérséklete van. (A fázisátalakulás egyébként jól megfigyelhető mikroszkóp alatt, és befolyásolja a szemmel látható optikai tulajdonságokat is.)

	PS	SAN	ABS	PA	PC	PMMA	PVC	PP	LDPE	HDPE	PET
PS	1										
SAN	6	1									
ABS	6	1	1								
PA	5	6	6	1							
PC	6	2	2	6	1						
PMMA	4	1	1	6	1	1					
PVC	6	2	3	6	5	1	1				
PP	6	6	6	6	6	6	6	1			
LDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	1		
HDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	1	1	
PET	5	6	5	5	1	6	6	6	6	6	1

### 3. táblázat - Hőre lágyuló polimer keverékek kétalkotós rendszereinek összeférhetősége [16.4]

1: jól keveredő 6: (inkompatibilis) összeférhetetlen

Amint az a 16.3 táblázatból látszik, a 11 leggyakoribb hőre lágyuló polimer 55 féle kétalkotós keverékéből csak 7 esetben találkozunk homogén, összeférhető keverékkel. Az esetek túlnyomó többségében (több mint 80 %-ában) a polimer keverékek nem összeférhetőek, *inkompatibilisek*, az összetevők  $T_g$ -je a kevert rendszerben külön-külön jelenik meg. Ez utóbbi tény anyagszerkezeti, *termodinamikai* okokra vezethető vissza.

A keveréssel járó *Gibbs-féle szabadenergia* változás ( $\Delta G_{mix}$ ) két másik termodinamikai állapotjelzőtől függ: a keverési *entalpia* változástól ( $\Delta H_{mix}$ ) és a keverési *entrópia* változástól ( $\Delta S_{mix}$ ):

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix}$$

Ahhoz, hogy egy kétkomponensű polimer rendszer termodinamikailag összeférhető legyen, két feltételnek kell teljesülnie:

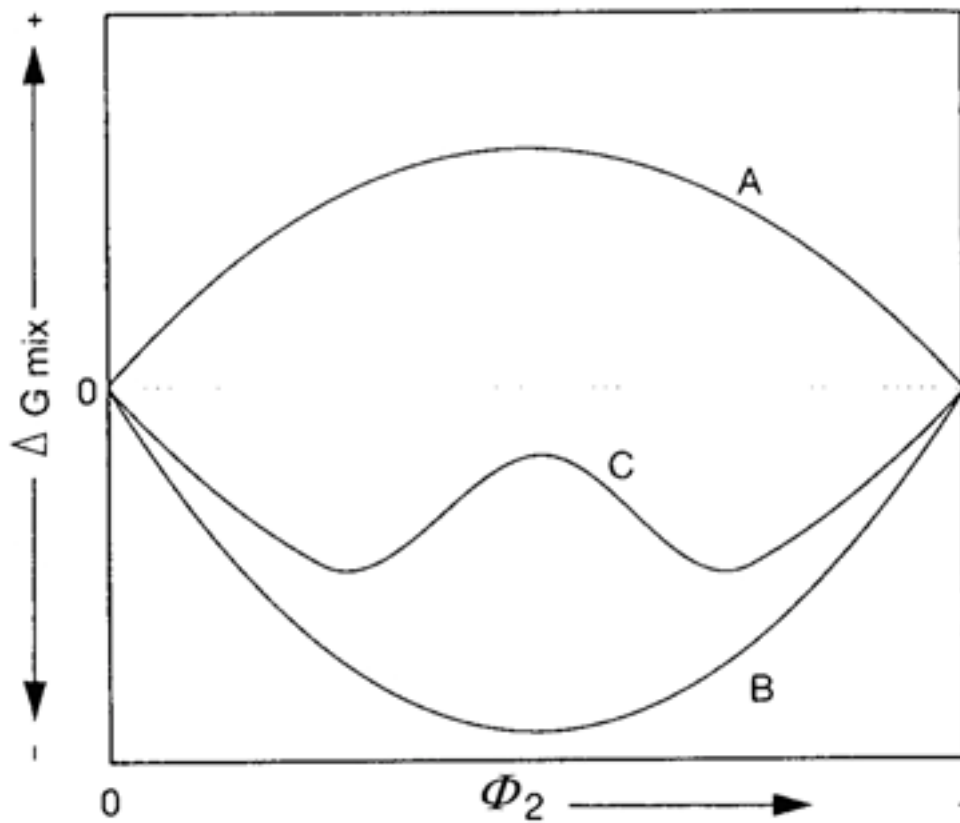
- A keveréssel járó szabadenergia változás legyen negatív, a rendszernek a keveréssel stabilabb, *alacsonyabb* energiaállapotba kell jutnia:

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T\Delta S_{mix} < 0$$

- A szabadenergia változás az összetétel függvényében „potenciálgödörben” legyen, amit definiálhatunk a  $\Delta G_{mix}$ -nek  $\Phi_2$  összetétel szerinti második deriváltjával, amelynek eszerint *pozitívnak* kell lennie:

$$\left[ \frac{\partial^2 \Delta G_{mix}}{\partial \phi_2^2} \right]_{T,p} > 0$$

ahol  $T$  az abszolút hőmérséklet.



**16.10 ábra:** Kétkomponensű polimer keverékek Gibbs-féle szabadenergia változásának lehetséges útjai A) nem keveredő (inkompatibilis), B) kompatibilis, C) részlegesen kompatibilis keverékek [16.9]

Ez a szabadenergia változás ( $\Delta G_{mix}$ ) két polimer különféle arányú keverése esetén a 16.10 ábra szerint változhat a második komponens ( $\Phi_2$ ) növekvő arányban.

Amint azt a 16.3 táblázat sejteti, az esetek túlnyomó többségében egyik feltétel sem teljesül, tehát a 16.10 ábra *A* görbéje a leggyakoribb. A ritkaságszámba menő *B* görbe teljes keveredést jelent. (Pl. a HDPE és az LDPE jól keverhető). A *C* görbe részleges keveredést jelent: az adott esetben 30 % és 70 % második komponens táján homogén a keverék, de 50:50 aránynál nem stabilis a rendszer és szétkeveredik. Ez az összefüggés természetesen erőteljesen függ a hőmérséklettől is: az összeférhetőség magasabb hőmérsékleten általában javul, de van példa az ellenkezőjére is. A technikai célú keveréket mindenesetre széles hőmérséklethatárok közötti kompatibilitás, az alkotók együttműködése kell, hogy jellemezze.

A polimerek összeférhetőségét, amely esélyt adhat a vegyes műanyag hulladékok együttes feldolgozására és újrahasznosítására, *kémiai adalékokkal (compatibilizer: összeférhetőséget javító, közvetítő adalék)* javíthatjuk. Ezek „kétarcú”, azonos molekulán eltérő jellemű csoportokat tartalmazó vegyületek, hasonlítanak pl. a koextrúzióban, eltérő polaritású filmrétegek egyesítésénél alkalmazott *tapadásközvetítő (Haft-Vermittler, adhesion promoter)* adalékokhoz. Néha igen kis mennyiségben (pl. 1 %-ban) is hatékonyak. Szerepük hasonlít a detergenskéhez (szappanok, mosószerek, tenzidek), amelyek hidat, összekötő kapcsolatot képeznek az eltérő jellegű molekulák között. Ilyen *compatibilizer*-típusokból egyre bővülő választékot kínál a modern vegyipar, pl. karboxilcsoportokkal módosított poli-kloroprén, maleinsavval módosított polipropilén, akrilsavval módosított polietilén alapján. Ezek jórésze tulajdonképpen „ionizálható”, só-jellegű csoportot is tartalmazó polimer: *ionomer*.

A polimerek összeférhetőségének javítására intenzív kutató-fejlesztő munka folyik az ezredfordulón. A *kompatibilizálás* ugyanis három, rendkívül gyorsan fejlődő területet befolyásol döntő mértékben:

- az *újrahasznosításban*: vegyes műanyag hulladékok együttes feldolgozásában,
- a polimerek ötvözésében (*alloying*), és az újabb
- *polimerkompozitok* kifejlesztésében.

Ezek közül a fentiekben csak az újrahasznosítást érintettük. Ennél is nagyobb jelentősége lehet – akárcsak 5000 évvel ezelőtt a fémtechnikában, a bronzkor indulásával – ha a különböző, már jól bevált, mégis eltérő alkatú polimerek előnyös de eltérő tulajdonságait egységes anyagban tudjuk egyesíteni: *ötvözni*.

A polimerkompozitok definíciójában nem véletlenül hangsúlyoztuk a fázisok határfelületének *együttműködését* (tapadását, adhézióját). Újabb kompozitokat – pl. természetes rostokkal (akár reciklált rostokkal is) erősített szintetikus polimer matrixú kompozitokat fejleszthetünk ki, ha megtaláljuk a határfelületi fázisokat összeférhetővé tevő, *kompatibilizáló* technika megoldásait.

A *polimer ötvözet* világos értelmezése érdekében érdemes újra definiálni néhány rokonértelmű fogalmat.

- Kopolimer: a főláncban egynél több monomert tartalmaz (pl. SAN),



- Polimer keverék (*blend*): két különböző polimerből álló rendszer, tekintet nélkül arra, hogy az alkotórészek között létrejött-e kapcsolat. Pl. PVC-be nitrilkaucsukot keverhetünk (NBR), amitől ütésállósága javul.
- Inkompatibilis polimer keverék (*blend*) (A 16.10 ábra *A* görbájével jellemezve).
- Kompatibilis polimer keverék (*blend*) (A 16.10 ábra *B* görbájével jellemezve).
- Polimer *ötvözet*: kompatibilizáció útján létrehozott, célszerűen módosított határfelületekkel összeépített (egyébként inkompatibilis) polimer keverék.

A kompatibilizálás technikái közül a „kétarcú” pl. ionomer jellegű kompatibilizáló adalékokat már említettük. Nyilvánvaló, hogy az ilyen ionos jellegű kapcsolószer, az egyik oldalon poláros, másik felén apoláros láncával csak kis kötőerejű, *másodlagos* kötéseket hozhat létre az eltérő karakterű (polaritású) fázisok között. Ha ennél erősebb, *elsődleges* kapcsolatot akarunk kiépíteni, akkor kémiai kovalens kötést kell létrehoznunk.

A kompatibilizáció legtöbbet ígérő technikája a *reaktív kompatibilizáció*. Tulajdonképpen ily módon készül az egyik legkorábbi, s ma is igen sikeres polimer ötvözet, az ABS kopolimer is (l. 77. oldal, 4.10 ábra). Ez ugyanis olyan kopolimer, amelyben a polibutadién vizes diszperziójában, a polibutadién részecskék határfelületén indítjuk a sztírol és az akrilnitril kopolimerizációt, s maga a kémiai reakció hozza létre a tapadást, elsődleges kovalens kötésekkel áthidalva az egyébként összeférhetetlen határfelületeket.

## 16.5 Reaktív kompatibilizáció az újrahasznosításban

Az újrahasznosítás leginkább ígéretes technikája ezek után a *reaktív kompatibilizáció* útján létrehozott polimer ötvözetek, sőt ily módon erősített kompozit rendszerek felé vezet. Ez lehet az az út, amely az újrahasznosítással gyakran együttjáró, szignifikáns minőségromlás (degradáció, *down-cycling*) helyett még minőség-növekedést is hozhat az újrahasznosítás során (*up-cycling*).

Erre a komplex megközelítési módra jellemző példaként szeretnénk bemutatni a különféle természetes és mesterséges polimer rostokkal – textilipari és faipari hulladék rostokkal – társított hőre lágyuló polimer kompozit kutatásainkból néhány kiragadott részletét.

A természetes rostanyagok, a fa, a bőr, a textilipar ősidőktől fogva ismert szálanyagai, mind nagyszilárdságú polimerek. Kimutatható, hogy a hibahely-mentes cellulózrost szakítószilárdsága az acélét is meghaladja. E *természetes* polimereknek a *mesterséges* polimerekkel társított rendszerei már egy ideje a távlati megoldásokat kereső kutatás és fejlesztés figyelmének középpontjában állnak.

A társítás, a kompozitba vitel fő gátja az adott esetben a természetes és mesterséges polimerek számos fontos tulajdonságának gyökeresen eltérő vonása. Ezek az ellentmondások jól bemutathatók, ha pl. farostot vagy kenderrostot akarunk beépíteni erősítőanyagként PP matrixba. A rost poláros, rendszerint inhomogén,

kevésbé reprodukálható minőségű, nedvszívó anyag, míg a szabályos poliolefin matrix kifejezetten apoláros és víztaszító jellegű. A natúrrost nedvességtartalmát lecsökkenthetjük, de akkor elvesztik rugalmasságuk jelentős részét („lágyító tartalmukat”), stabilitásukat. Olyan tapadásközvetítő anyagra van szükség, amely a magas hőmérsékletű feldolgozás során is „nedvesíti” és megvédi az érzékeny natúrrostot, és végső soron jól összeköti, kapcsolja az apoláros és poláros komponenset.

Az egyik – talán a legcélravezetőbb – megoldás: a reaktív kompatibilizáció.

A 16.4 táblázat PP – farost társított anyagok tulajdonságait mutatja be.

		HM-PP (BASF, D)	WF- PP (ICI,U K)	Woodstock (GOR, Italy, USA)	WFRP-S (AECL, Canada- Hungary)	PP
<i>Összetétel</i>	Polipropilén (s%)	60	60	60	65	100
	Farost (s%)	40	40	40	35	0
<i>Tulajdonsá gok</i>	Hajlítószilárdság (MPa)	–	31,3	43,5	62,5	37,8
	Hajlítási modulusz (GPa)	–	2,17	2,86	3,46	1,41
	Szakító szilárdság (MPa)	34,0	19,3	24,2	48,8	37,3
	Szakító modulusz (GPa)	4,0	2,68	3,38	3,39	1,87
	Ütésállóság (hornyolt, IZOD) (J/m)	–	–	–	11	12
	HDT 1,85 N/mm (°C)	–	–	100	116	–
	HDT 0,45 N/mm (°C)	106	–	–	146	–
	Hőtürés * (°C)	–	52	–	142	51
	MFI (2,16 kp, 230 °C)	–	0,3	1,0	4,4	20

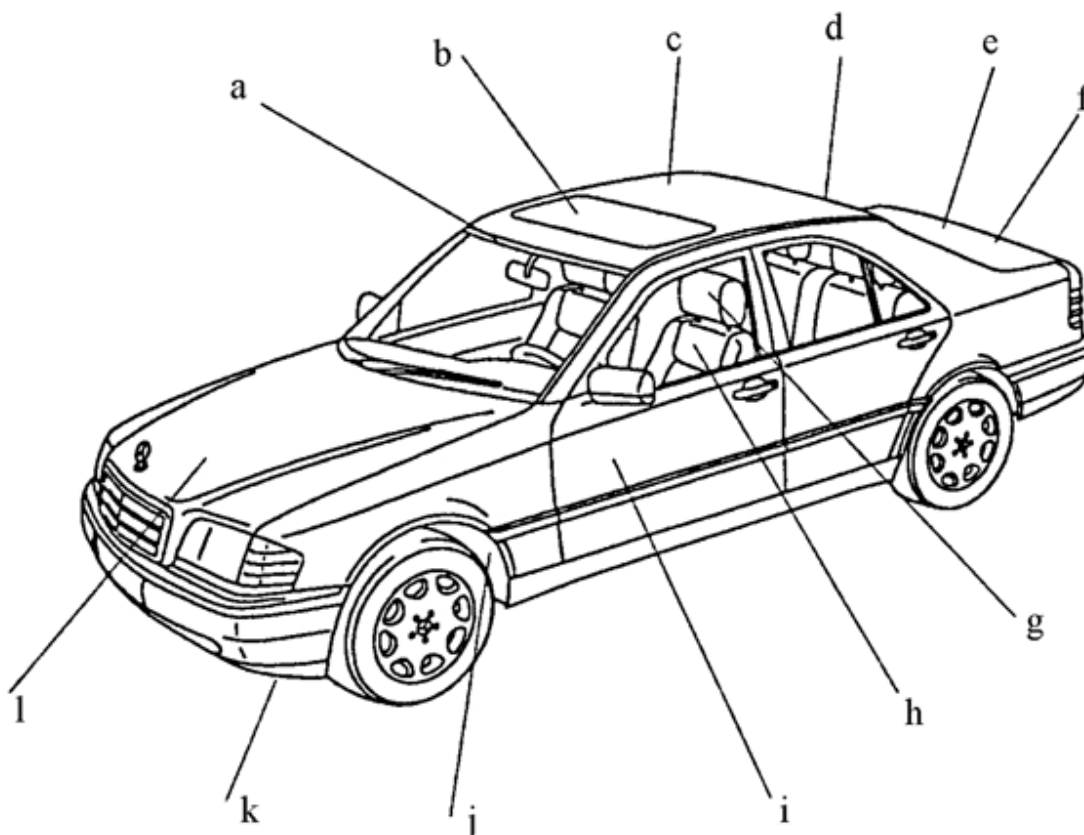
#### 4. táblázat - Farost PP társított anyagok tulajdonságai [16.13]

\* 1 GPa hajlítási modulusznál mérhető hőmérséklet

A 16.4 táblázaton bemutatott farost-PP társított anyagokból három (a BASF, az ICI és a GOR Co. terméke) kereskedelmi termék, és nem tartalmaz nyilvánosságra hozott kompatibilizáló adalékot. A negyedik saját (kanadai-magyar kooperációban megvalósított) fejlesztési termék, amely 1 % poliészter-akrilát típusú reaktív adalékot tartalmaz, melynek reakcióját – alkalmas iniciálási rendszer felhasználásával – az extruderben

indítottuk el (*reactive extrusion*). Látható, hogy a szilárdság és a hőtűrés tekintetében ez mutatkozott a legjobbnak.

Ismeretes, hogy a 16.4 táblázat anyagai közül a GOR cég *Woodstock* anyagát vagy ahhoz egészen hasonló kompozit többször 10 000 to/év nagyságrendű felhasználással alkalmazza több ország személygépkocsi gyártása, textillel (pl. PP-nemizzel) borított belső autóburkoló elemek készítésére. Azt, hogy ez milyen sokoldalúan alkalmazott alapanyag lehet, a 16.11 ábra mutatja be.

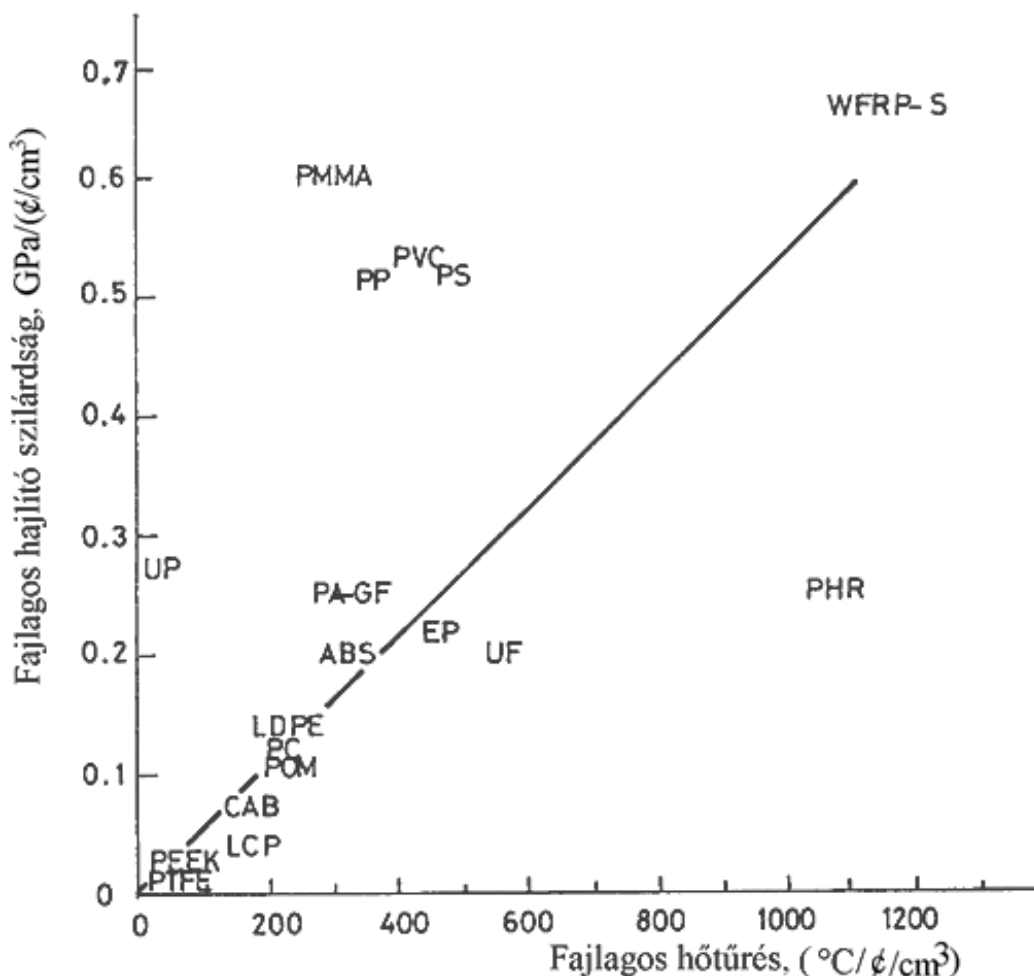


**16.11 ábra:** Természetes rosttal erősített hőre lágyuló kompozit alkalmazások a gépkocsigyártásban a) napellenző lemez, b) árnyékoló redőny, c) tetőborítás, d) hátsó ablak alatti polc, e) csomagtér borítás, f) csomagtartó fedél borítás, g) fejtámla alkatrészek, h) üléstámla, utastér alkatrészek, i) ajtó-belső borítás, j) kerékház borítás, k) köténylemez, l) motorháztető borítás

A 16.11 ábrán bemutatott alkalmazások közül az ajtó borításban bizonyított legmeggyőzőbben a farost-PP kompozit: kellő merevséget és kitűnő melegformázhatóságot nyújt a textilkombinációval együtt – és igen előnyös áron, hiszen a természetes rostok ára még a kedvező árfekvésű PP-nél is egy nagyságrenddel olcsóbb.

Ezt a gazdaságosságot mutatja be a 16.12 és a 16.13 ábra, amikor a 16.4 táblázaton bemutatott, kompatibilizált farost-PP kompozit legfontosabb műszaki tulajdonságait a fajlagos térfogatra eső *arra* vetítve ábrázolja – a legfontosabb műszaki és közszükségleti polimerekkel együtt.

A 16.12 ábrából az látszik, hogy a tervezőmérnök számára kiemelt fontosságú hajlító szilárdság és hőtűrés – közelítő trend jelleggel – együtt javul (vagy romlik). Másfelől az árra vetítve e mutatókat, – amikor azt vizsgáljuk, hogy *mibe kerül* egy adott szintű szilárdság, hőtűrés elérése, – kiderül, hogy szétválík a mezőny: a közszükségleti műanyagokkal (PMMA, PVC, PP, PS) olcsón jó szilárdságot kapunk, de gyengébb hőtűrést.

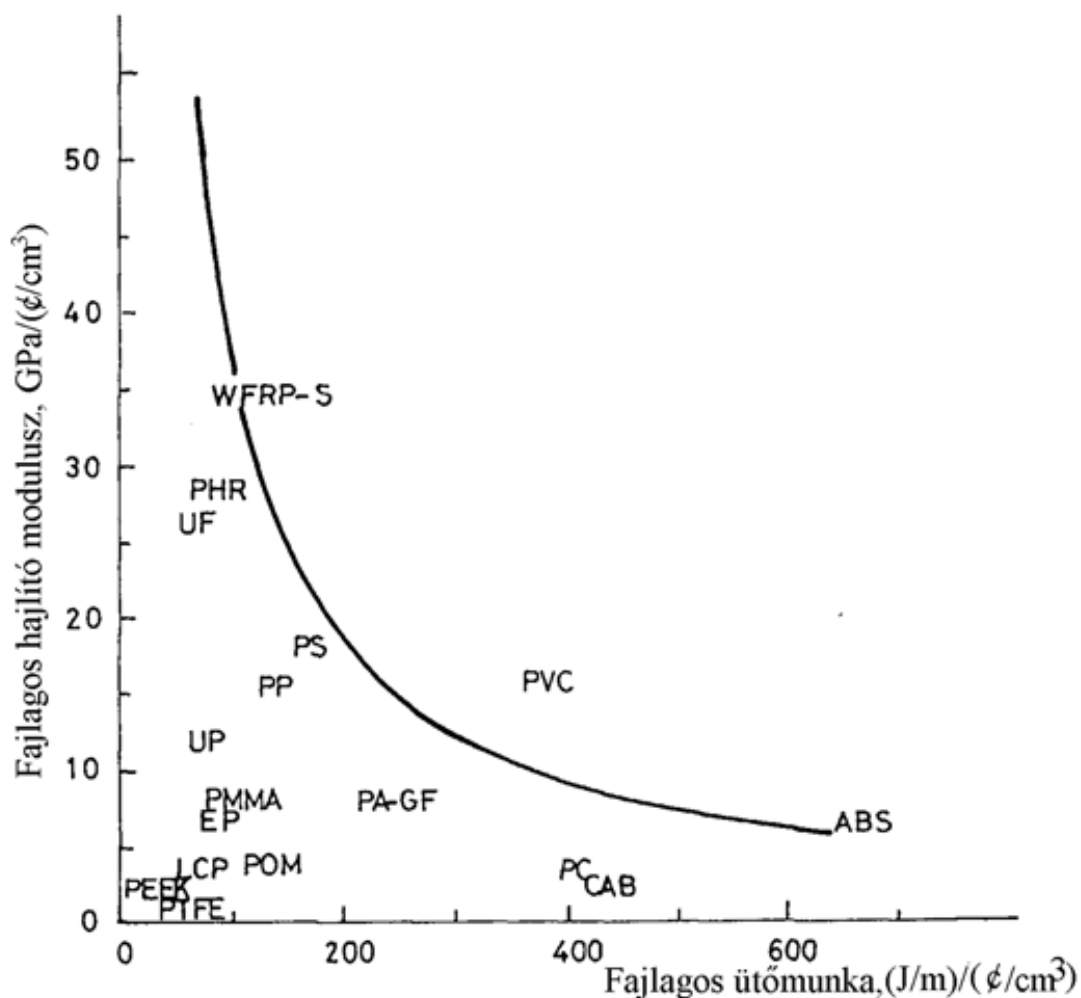


**16.12 ábra:** Az alapanyag árára (US cent/cm<sup>3</sup>) vonatkoztatott (fajlagos) hajlítási szilárdság és hőtűrés különféle polimerek és a farost-PP kompozit (WFRP-S) esetén [16.13]

Fordított a helyzet a PHR fenolgyantával: jó hőtűrést vásárolhatunk olcsón, de kisebb szilárdsággal párosítva. A *műszaki műanyagok* (LCP, PEEK, PC, POM) közismerten jó hajlítási szilárdságot és jó hőtűrést kínálnak, de rendkívül drágán (csekély ár-fajlagos mutatókkal). A farost-PP kompatibilizált kompozit (WFRP-S) arányos, kiegyenlített szilárdságot és hőtűrést nyújt, rendkívül jó gazdasági mutatóval (olcsón).

Érdekes összevetni a hajlítómodulus és az ütészállóság egymásnak ellentmondó követelményeit hasonló fajlagos, gazdaságossági értelmezésben. Az, hogy ez a két mutató egymással  $y = 1/x$  jellegű összefüggésben van, az közismert és könnyen belátható, hiszen a merevség szemben áll a szívóssággal. Ez az összefüggés jól megjelenik egyetlen műanyagcsalád esetén is, ezt mutattuk be a 77. oldalon a 4.11 ábrán a polisztirol-

féleségekre. A 16.13 ábrán a legelőnyösebb anyagok a hiperbola „vágóélén” helyezkednek el: közismert a PVC jó ütészállósága és kellő merevsége pl. az épületgépészetben, méghozzá a legelőnyösebb áron.



**16.13 ábra:** Az alapanyag árára (US cent/cm<sup>3</sup>) vonatkoztatott (fajlagos) hajlító modulusz és ütőmunka különféle polimerek és a farost-PP kompozit (WFRP-S) esetén [16.13]

Az ABS kiemelkedik ütészállóságával, de merevsége kevés. A különleges műszaki műanyagok (PEEK, PTFE, LCP, POM, EP) ismét csak a lehető legkevesebbé gazdaságosak: még az epoxigyanta kínálja moduluszát és szívósságát a viszonylag legkedvezőbb áron e körben. A WFRP-S kompozit az „élen” jár: igen olcsó moduluszt kínál, csekélyebb, de tisztas árú szívóssággal egybekötve.

A reaktív kompatibilizáció elve sikeresen alkalmazható reciklált polipropilén és más természetes hulladékrostok társítására. Az előnyös tulajdonságú anyagok tetszetős megjelenítésére pedig a kétkomponensű feldolgozástechnológiák a legalkalmasabbak: koextrúzióban két eredeti PP réteg közé foglalt reciklált kompozit, vagy hasonlóképpen, a „szendvics” fröccsöntésben eredeti PP bevonattal készült reciklált kompozit

ellen esztétikai kifogás sem eshet. A kétfunkciós eljárások alkalmazása azonban eltérő reológiai karakterű anyagokra még további kutatási-fejlesztési munkát igényel.

## **16.6 A polimer újrafeldolgozás társadalmi-gazdaságossági összefüggései**

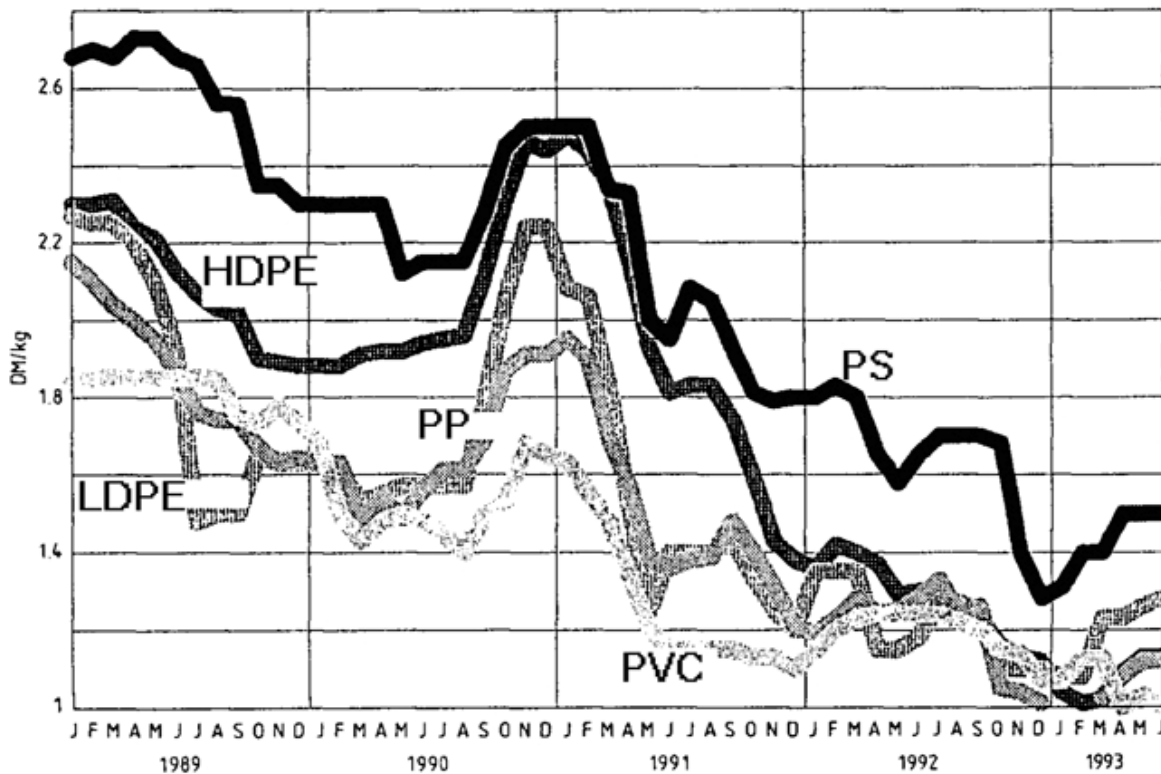
A szintetikus polimerek újrahasznosítási technikái, eljárásai, berendezési – az ezredfordulón már rendelkezésre állnak. A legnagyobb polimerfelhasználók, – az autóipar, a háztartási cikk gyártók, a távközlési és információ-technikai eszközök gyártói – már az 1990-es évek óta bejelölik minden műanyagalkatrész hátoldalát, a fajta-tiszta begyűjtés és homogén újrafeldolgozás megkönnyítése érdekében. Európában és Észak-Amerikában sok helyütt a hulladékgyűjtés szelektív megoldásait szorgalmazzák a törvényhozás oldaláról: külön gyűjtik a háztartási hulladékból az üveget, a műanyagot, – hogy szennyezésüket elkerüljék. Néhány éve sok helyen bevezették a potenciálisan hulladék-képző csomagolóanyagokra a termékadót, amely némi pénzügyi alapot nyújt a szelektív begyűjtés és feldolgozás megkezdéséhez. Mindezek ellenére a hulladék polimerhányadának túlnyomó többségét kitevő „tömeg-műanyagok” (LDPE, HDPE, PS, PP, PVC) újrahasznosítása rendkívül lassan mozdul előre. A fő ok: az alacsony gazdaságosság.

Mindenekelőtt érdemes szemügyre venni a 16.14 ábrát, amely a *közzükségleti* műanyagok (LDPE, HDPE, PP, PVC, PS) árának alakulását mutatja Németországban 1989 és 1993 között. Bár az iraki „öbölháború” kőolaj-árfelhajtó hatása 1990 decemberétől határozottan megjelent a műanyagok árában is, a leszálló trend mégis hamar helyreállt. Hasonló effektus volt megfigyelhető az 1.3 ábrán az 1974-es olajválság után is a műanyaggyártásban: sokkoló visszaesés, majd további fejlődés.

A termelés növekedésével tehát a legfontosabb, legnagyobb volumenű polimer alapanyagok ára ~1 USD/kg alá került. Ezt a trendet láthattuk a 4.14 ábrán is és ilyen árakat láthatunk a 3.1 táblázaton. A polimer árának „érzékenységről” a kőolaj árától információt ad a következő adatsor (1992. febr.-ra vonatkoztatva):

- a kőolaj ára: 150 DM/to
- a vegyipari benzin ára: 230 DM/to
- az etilén monomer ára: 680 DM/to
- a polietilén (HDPE) ára: 1200 DM/to

Nyugat-Európában és Észak-Amerikában – jórészt a társadalom igényes környezettudatára alapozottan – immáron többéves tapasztalat és elemezhető *költségadatok* halmaza áll rendelkezésre a hulladékok szelektív begyűjtéséről és újrafeldolgozásáról. Bár az adatok rendkívül sokfélék és eltérők, a következő irányárak jó tájékozódási pontnak tekinthetők a polimer hulladék újrafeldolgozásának rész-költségeiről.



**16.14 ábra:** Nyugat-európai „közsükségleti” polimer árak 1989 és 1993 között (DM/kg) [16.4]

Logisztikai költségek (szállítás max. 100 km-ről) 120÷240 DM/to

Elválasztási költségek

- mágneses szeparátor költsége 20 DM/to
- ciklonos elválasztás 40 DM/to
- optikai elválasztás 150 DM/to
- durva szelektálás manuálisan 450 DM/to
- részletes kézi válogatás 1700 DM/to

Újrafeldolgozási költségek

- őrlés, aprítás 230 DM/to
- mosás, szárítás 410 DM/to
- extrúzió 300 DM/to

Ezekből az adatokból is látszik, hogy kevésbé szennyezett anyagok durva szelektálása után is az újrahasznosítás költsége megközelíti vagy meghaladja az 1000 DM/to-t. Ez egyszerűen azt jelenti, hogy a

szintetikus polimerfelhasználás több mint 75 %-át kitevő *commodity plastics* család (PE, PP, PS, PVC) újrahasznosítása szubvencionálás nélkül, piaci körülmények között *gazdaságtalan*. Gazdaságosan a jelenlegi árak mellett az értékesebb technikai polimerek, pl. PC, PA-6, PA-66 és társai hasznosíthatók újra. Már az ABS is a gazdaságosság határán van ebből a szempontból.

A polimer újrahasznosításának gazdaságosságán a jövőben két tényező javíthat. Az egyik a törvényhozási úton nyújtott segítség, szubvenció. Erre történt *kísérlet* a csomagolóanyagok „termékdíjának” bevezetésével. A másik tényező: a hulladék-eltávolítás (begyűjtés, megsemmisítés, deponálás) költsége. Közismert, hogy a szemét elhordásáért, deponálásáért vagy energetikai hasznosításáért is egyre többet kell fizetni – különösen a nagyvárosok körzetében. Ez azt jelenti, hogy a polimerhulladéknak valójában *negatív ára* van: fizetni kell érte, hogy elvigyék. Németországban a műanyag hulladék eltávolításának (szemét-begyűjtésének) ára már 1994-ben elérte a 3000 DM/to-t. Ez az árszint megnyitja a lehetőséget a *közszükségleti* polimerek újrahasznosítása előtt is. A polimertechnika ehhez érett technológiákat ajánl.

## 16.7 Szakirodalom

- Menges G., Michaeli W., Bittner M.. *Recycling von Kunststoffen*. Hanser. München . 1992.  
 Förstner U.. *Környezetvédelmi technika*. Springer Hungarica. Budapest-Berlin . 1993.  
 Nickel W.. *Recycling Handbuch*. VDI Verlag. Düsseldorf . 1996.  
 Brandrup J., Bittner M., Michaeli W., Menges G.. *Recycling and Recovery of Plastics*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1996.  
 Olabisi O., Robeson L., Shaw M. T.. *Polymer-Polymer Miscibility*. Academic Press. New York . 1979.  
 Datta S., Lohse D. J.. *Polymeric Compatibilizers*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1996.  
 Chan Chi-Ming. *Polymer Surface Modification and Characterization* . Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1993.  
 Wool R. P.. *Polymer Interfaces, Structure and Strength of* . Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1995.  
 Fried J. R.. *Polymer Science and Technology*. Prentice-Hall. London . 1995.  
 Kim J. K., Mai Y. W.. *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*. Elsevier. Amsterdam . 1998.  
 Rauwendaal C.. *Polymer Mixing*. Hanser-Gardner. Munich-Cincinnati . 1998.  
 Utracki L. A.. *Polymer Alloys and Blends*. Hanser-Oxford Univ. P.. Munich-New York . 1989.  
 Czvikovszky T.. *Wood-Polymer Composites, in: Polypropylene, an A-Z Reference, ed. By J. Karger-Kocsis*. Kluwer Academic Publ. Dordrecht (Netherland) . 1999.  
 Czvikovszky T.. *Recycling and Treatment of Plastics Waste, International Atomic Energy Agency*. TECDOC-1023 IAEA. Vienna . 1998.  
 Czvikovszky T., Hargitai H., Rác I., Csukat G.. *Reactive compatibilization in polymer alloys, recyclates and composites*. Ionizing Radiation and Polymers. Elsevier. Amsterdam . 1999. 190-195.

## FÜGGELÉK

Jelölés	Jelentése
ABS	Akrilnitril-butadién-sztirol kopolimer
ASA	Akrilnitril-sztirol-akrilát kopolimer
BR	Butadién kaucsuk



<b>Jelölés</b>	<b>Jelentése</b>
CA	Cellulóz-acetát
CAB	Cellulóz-aceto-butirát
CPE	Klórozott polietilén
CPVC	Utánklórozott polivinilklorid
CR	Kloroprén kaucsuk
EP	Epoxigyanta, epoxid
EPDM, EPM	Etilén-propilén-dién kaucsuk
E-PP	Etilén-propilén kopolimer
ETFE	Etilén-tetrafluoretilén kopolimer
EVA, EVM	Etilén-vinilacetát kopolimer
HDPE	Nagy sűrűségű polietilén
HIPS	Ütésálló polisztirol
HOPE	Nagy mértékben orientált polietilén
IR	Poliizoprén (kaucsuk)
LCP	Folyadékkristályos polimer
LDPE	Kis sűrűségű polietilén
LLDPE	Lineáris, kis sűrűségű polietilén
MBS	Metilmetakrilát-butadién-sztirol kopolimer
MF	Melamin-formaldehid gyanta
NBR	Akrilnitril-butadién kaucsuk
NR	Természetes gumi
PA	Poliamid, (nylon)
PAA	Aromás poliamid
PAI	Poliamid-imid
PAN	Poliakrilnitril
PBMI	Poli(biszmaleimid)
PBT	Poli(butilén – tereftalát)
PC	Polikarbonát
PCTFE	Poli(klór-trifluor-etilén)
PEBA	Poliéter-amid blokkopolimer
PEEK	Poliéter-éterketon
PEI	Poliéter-imid
PEPF	Fluorozott etilén-propilén kopolimer
PESU	Poliéter-szulfon
PET	Poli(etilén-tereftalát)
PF, PHR	Fenol-formaldehid gyanta
PI	Poliimid
PIB	Poliizobutilén
PMMA	Poli(metilmetakrilát)
POM	Polioximetilén
PP	Polipropilén

<b>Jelölés</b>	<b>Jelentése</b>
PPA	Poliftalamid
PPE	Poli(fenilén-éter)
PPO	Poli(fenilén-oxid)
PPS	Poli(fenilén-szulfid)
PSU	Poliszulfon
PTFE	Politetrafluoretilén
PUR	Poliuretán
PVAC	Polivinilacetát
PVAL	Polivinilalkohol
PVC	Polivinilklorid
IPVC	Lágyított polivinilklorid
kPVC	Kemény polivinilklorid
PVDC	Polivinilidén-klorid
PVDF	Polivinilidén-fluorid
PVF	Polivinilfluorid
SAN	Sztirol-akrilnitril kopolimer
SBR	Sztirol-butadién kaucsuk
SI	Szilikongyanta
TPE	Hőre lágyuló (termoplasztikus) elasztomer
UHMW-PE	Ultra nagy móltömegű polietilén
UF	Karbamid formaldehid gyanta
UP	Telítetlen poliészter

**1. táblázat - A legfontosabb polimerek jelölése**

<b>Jelölés</b>	<b>Jelentése</b>
BMC	Amorf kompozit előgyártmány (premix) (Bulk Molding Compound)
SMC	Lemez alakú kompozit előgyártmány (prepreg) (Sheet Molding Compound)
GMT	Paplan formájú, hőre lágyuló kompozit előgyártmány (Glass-mat Reinforced Thermoplastic)
GF	Üvegszál
CF	Karbonszál
AF	Aramidszál
GFRP	Üvegszállal erősített polimer kompozit
CFRP	Karbonszállal erősített polimer kompozit

Jelölés	Jelentése
SLA	Lézer sztereolitográfia
SLS	Szelektív lézer-szinterezés
3D P	Térbeli nyomtatás Ömledékrétegezés
FDM	(Fused Deposition Modelling)
ISC	Réteges fotopolimerizáció (Instant Slice Curing)
LOM	Réteges kivágás és felépítés (Laminated Object Manufacturing)

2. táblázat - Egyéb szakkifejezések

## UTÓSZÓ

*Tantárgyat* formálni a *technológiából* azzal a veszéllyel jár, hogy megállapodottnak, véglegesen kialakultnak tekintjük azt, ami állandó változásban, fejlődésben van. Hangsúlyosan érvényes ez a *polimertechnikára*, amely a 20. század utolsó négy évtizedében százszorosára nőtt, nemcsak a termelés mennyiségében, de a felhasználható műszaki anyagok számában, változataiban is, - miközben ezen anyagok minősége a legfontosabb vonások (pl. élettartam) tekintetében tízszeresre javult, költsége pedig (összehasonlítható árakon) tizedére csökkent. (Ez a történet hasonlít a még ennél is sokkal rohamosabban fejlődő mikroelektronika történetére.)

*Tankönyvre* – még a multimédia korában is – szükség van. A technológia további fejlődése ugyanis azon is múlik, mennyire értik a további ésszerű felhasználásért felelős jövőbeli szakemberek az adott technika születésének körülményeit, fejlődésének, kibontakozásának belső logikáját, növekedésének határait. A *tananyag* mindezt jól elsajátítható egységekben kell, hogy átadja, még hozzá a 14 - 15 hetes *szemeszter*hez illesztett adagokban, úgy, hogy mindez szilárd - és mégis bővíthető – *elméleti* alapokon nyugodjon, de elindítson a *gyakorlat* felé, a megvalósult technika összehasonlíthatatlanul szakosodottabb, összetettebb, színesebb világa felé.

Nincsenek illúzióink a tekintetben, hogy ebből a nehéz feladatból milyen keveset sikerült megragadnunk ebben a könyvben.

Mentségünkre szolgáljon, hogy megnyílt világunkban ebben a technikában jól látható módon, az utóbbi évtized rendkívül bő termést hozott kitűnő tankönyvekből és monográfiákból, elsősorban angolul és németül. Európa és Amerika legjobb egyetemeinek nemcsak tankönyveibe, de tantárgy-programjában is jó betekintést nyújt az a több mint száz kötet az 1990-es évekből, amelyet a fejezetek végén idézünk. Az az idő is gyorsan

közelít, amikor már nem lesz sem nyelvi, sem egyéb akadálya annak, hogy a magyar szakember az idegennyelvű szakirodalomban is egészen otthonos legyen. Úgy érezzük azonban, hogy a hagyományos módon összefoglalt, kézzel fogható, magyar nyelvű szakirodalomra a sokféle egyéb adatforrás – mint az elektronikus adathalmazok, a képpel is alátámasztott, böngészhető és párbeszédre is fogható világháló, a folyamatokat is szimuláló ismertető stb., – mellett is szüksége lesz azoknak, akik a tanulást és a tudást egyéni erőfeszítésen alapuló, elmélyülést és alázatot igénylő, és elsősorban az anyanyelven működő szellemi teljesítménynek fogják fel, szeretnék megtartani és továbbvinni.

A magunk szerény hozzájárulását letéve elnézést kérünk minden egyes - a legjobb szándékunk ellenére is elkövetett - hibáért. Különösen hálásak leszünk minden megjegyzésért, véleményért, észrevételért, amelyet akár az oktatásban, akár e könyv esetleges következő kiadásában hasznosíthatunk.