

**MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
KERPELY ANTAL ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA**

**FORMA – FÉM KÖLCSÖNHATÁSAINAK
VIZSGÁLATA, KÜLÖNÖS TEKINTETTEL
A FORMÁZÓANYAGOK
ÚJRAHASZNOSÍTHATÓSÁGÁRA**

Ph.D. értekezés

Détári Anikó
okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:
Dr. Tóth Levente
egyetemi docens

Miskolci Egyetem
Metallurgiai és Öntészeti Tanszék

Miskolc
2009

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| 1. BEVEZETÉS | 4 |
| 2. AZ ÖNTÖDEI HOMOKREGENERÁLÁS | 5 |
| 2.1. A KÜLÖNBÖZŐ REGENERÁLÁSI TECHNOLÓGIÁK ELŐNYEI- ÉS HÁTRÁNYAI..... | 6 |
| 2.1.1. Termikus regenerálás | 6 |
| 2.1.2. Száraz, mechanikus regenerálás (egylépcsős eljárás)..... | 6 |
| 2.1.3. Termikus-mechanikus regenerálás (3 lépcsős eljárás)..... | 7 |
| 2.2. A REGENERÁLÁS HATÁSFOKÁT MINŐSÍTŐ TÉNYEZŐK..... | 7 |
| 3. A REGENERÁLT HOMOK MINŐSÉGÉNEK HATÁSA A MECHANIKAI PENETRÁCIÓRA | 9 |
| 3.1. BEVEZETÉS..... | 9 |
| 3.2. A PENETRÁCIÓS HIBÁK, MECHANIZMUSOK ÉS NYOMÁSVISZONYOK ISMERTETÉSE..... | 9 |
| 3.2.1. FELÜLETI ÉRDESSÉG..... | 10 |
| 3.2.2. RÁÉGÉS | 11 |
| 3.2.3. PENETRÁCIÓ..... | 12 |
| 3.2.3.1. Mechanikai penetráció | 13 |
| 3.2.3.2. Kémiai penetráció..... | 13 |
| 3.2.3.3. Gázrobbanásos (Explosion) penetráció..... | 14 |
| 3.2.3.4. Tágulósos (Expansion) penetráció | 15 |
| 3.3. A MECHANIKAI PENETRÁCIÓ NYOMÁSVISZONYAINAK ISMERTETÉSE..... | 15 |
| 3.3.1. Metallosztatikus nyomás (P_{st})..... | 16 |
| 3.3.2. Dinamikus nyomás (P_{dyn})..... | 17 |
| 3.3.3. Tágulósos (Expansion) nyomás (P_{exp})..... | 17 |
| 3.3.4. Kapilláris nyomás (P_{γ}) | 17 |
| 3.3.5. Sűrűdésből eredő nyomás (P_f)..... | 18 |
| 3.3.6. Gáznyomás (P_{gas})..... | 19 |
| 3.4. A PENETRÁCIÓ TERMODINAMIKAI MEGKÖZELÍTÉSE | 19 |
| 3.4.1. A penetrációt befolyásoló fizikai-kémiai paraméterek..... | 19 |
| 3.4.2. A kapilláris modell..... | 22 |
| 3.4.3. A CPES modell (Closely Packed Equal Spheres) [18, 23]..... | 23 |
| 3.5. A FORMÁZÓANYAG ÖSSZETÉTELÉNEK HATÁSA A PENETRÁCIÓRA | 25 |
| 4. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK | 28 |
| 4.1. A KÍSÉRLETEKBEN FELHASZNÁLT HOMOKOK ALAPTULAJDONSÁGAI ÉS ÚJRAHASZNOSÍTHATÓSÁGUK | 30 |
| 4.2. A PENETRÁCIÓS PRÓBATESTEK ÖNTÉSE ÉS VIZSGÁLATA | 34 |
| 4.3. SCANNING ÉS ENERGIA DISZPERZÍV ELEKTRONMIKROSZKÓPOS VIZSGÁLATOK | 37 |
| 4.4. ÖSSZEFOGLALÁS, ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK | 52 |

| | |
|--|------------|
| 5. TERMIKUSAN REGENERÁLT HOMOKOK HATÁSA A MAG MELEG DEFORMÁCIÓJÁRA..... | 53 |
| 5.1. BEVEZETÉS | 53 |
| 5.2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS | 53 |
| 5.2.1. A MAGOK HŐTÁGULÁSÁT ÉS DEFORMÁCIÓJÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK..... | 54 |
| 5.2.1.1. AZ ALAPHOMOKOK HŐTÁGULÁSA | 55 |
| 5.2.1.2. A KÖTŐANYAG TÍPUSÁNAK ÉS MENNYISÉGÉNEK HATÁSA A TÁGULÁSI HAJLAMRA ... | 57 |
| 5.2.1.3. A REGENERÁTUM HATÁSA A HŐTÁGULÁSRA ÉS A TERMIKUS DEFORMÁCIÓRA | 59 |
| 5.2.2. A FORMÁZÓANYAGOK HŐTÁGULÁSÁNAK MEGHATÁROZÁSA | 60 |
| 5.2.3. A FORMÁZÓANYAGOK HŐTÁGULÁSÁT ÉS TERMIKUS DEFORMÁCIÓJÁT VIZSGÁLÓ BERENDEZÉSEK | 61 |
| 5.2.3.1. DIETERT-FÉLE DILATOMÉTER..... | 61 |
| 5.2.3.2. TERMAL DISTORTION TESTER-WMU FEJLESZTÉS | 62 |
| 5.2.3.3. HOT DISTORTION TESTER-SYMPSON GEROSA-FEJLESZTÉS | 63 |
| 6. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK..... | 67 |
| 6.1. A KÍSÉRLETEKBEN FELHASZNÁLT HOMOKOK ALAPVIZSGÁLATA ÉS A HOT-BOX FORMÁZÓKEVERÉK RENDSZER BEMUTATÁSA..... | 67 |
| 6.2. AZ ALAPHOMOK LINEÁRIS HŐTÁGULÁSA | 71 |
| 6.3. A HOT-BOX FORMÁZÓKEVERÉKEK TERMIKUS DEFORMÁCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA | 75 |
| 6.3.1. <i>A szemcseösszetétel hatása</i> | <i>75</i> |
| 6.3.2. <i>A frissítés hatása.....</i> | <i>81</i> |
| 6.3.3. <i>A polimerizációs hőmérséklet és polimerizációs idő hatása.....</i> | <i>84</i> |
| 6.3.4. <i>A polimerizációs idő hatása.....</i> | <i>87</i> |
| 6.3.5. <i>A gyanta mennyiségének és minőségének hatása</i> | <i>89</i> |
| 6.3.6. <i>A katalizátor mennyiségének hatása.....</i> | <i>92</i> |
| 6.3.7. <i>Összefoglalás, új tudományos eredmények.....</i> | <i>95</i> |
| 7. ÖSSZEFOGLALÁS..... | 97 |
| 9. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBŐL MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK | 100 |
| 10. IRODALOMJEGYZÉK..... | 103 |
| SUMMARY | 106 |

1. Bevezetés

Az öntődei formázóanyagok 30-40%-a műgyantakötésű. Ezen típusú formázóanyagokat csak homokregenerálás útján lehet újrahasznosítani. Az újhomok költségei, valamint a használt homok deponálási költségei nagymértékben növekednek, ezért gazdasági szempontok is mérvadóak. A gazdasági szempontok mellett nagy hangsúlyt kell fektetni a szigorodó környezetvédelmi előírások betartására is. Az öntődék számára cél, hogy regeneráló berendezés működtetésével a használt homokot üzemben belül újrahasznosítsák úgy, hogy a technológiai paraméterek optimalizálásával megfelelő formázóanyag minőséget biztosítsanak. Kutatásaim során megvizsgáltam a termikus, illetve a mechanikus regenerálást követően a homok regenerátumok tulajdonságait különböző típusú forma- és magkészítési rendszerek esetén.

A regenerálás hatékonysága nagymértékben befolyásolja a homokszemcséken maradó kötőanyagtartalmat, ami pedig az öntvény felületi minőségénél játszik fontos szerepet. A kis hatékonyságú regenerálás miatt a homokszemcséken kötőanyag tapadványok maradnak, melyek a későbbi felhasználás során egyrészt a forma, illetve a mag kikeményedését és tulajdonságait hátrányosan befolyásolják, másrészt az öntvény felületi minőségét is rontják. Az öntéskor kialakuló penetráció, illetve a formázóanyag öntvényfelületre történő ráégése olyan hibákhoz vezet, amelyek csak igen költséges eljárással korrigálhatók.

A disszertáció első részében összefoglaltam az öntődei homokregenerálással és a vasöntvényeken létrejövő penetrációs hibák kialakulásával kapcsolatos szakmai ismereteket.

A kísérleti munkám első részében a regenerátum, az öntvény felületi minőségére gyakorolt hatását vizsgáltam. Lemezgrafitos öntöttvasból ún. „lépcsős hengeres” próbákat öntöttem. A formázókeverék tekintetében változtattam az újhomok-regenerált homok arányát. Az öntvényeket hossztengejük mentén kettévágtam és makrofotókat készítettem a felületükről, majd a vizsgált próbatest meghatározott helyeiről töretmintákat vettem, és scanning elektronmikroszkóp, valamint energia diszperzív mikroszkop segítségével elemeztem a töretfelületeket.

Az öntvény felületi minősége mellett fontos paraméter az öntvények méretpontossága is. Ha vékonyfalú magokról beszélünk, akkor előtérbe kerül a mag deformációs képességének vizsgálata, hiszen a nagy dilatációra hajlamos formázóanyagok olyan öntvényhibákhoz vezethetnek, amelyekkel nem tudjuk tartani az öntvény méretpontosságára vonatkozó előírásokat. Így az öntvénykikészítéshez kapcsolódó ráfordítások megnövekednek.

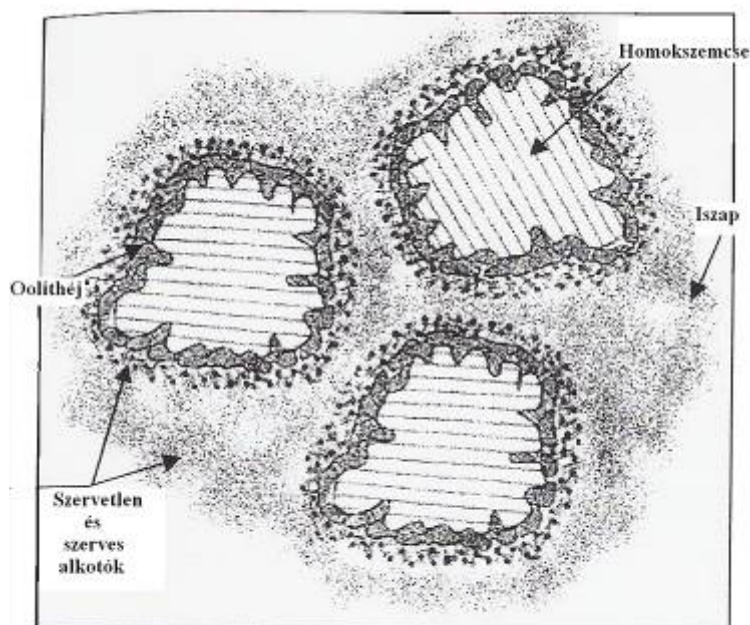
Kísérleteim második részében termikusan regenerált homokokból különböző homokparaméterek változtatásával melegenkötő műgyantakötésű keverékeket készítettem, és Hot Distortion Tester mérőberendezés segítségével megvizsgáltam a keverékekből készült próbatestek dilatációját, valamint a próbatest eltöréséig eltelt időt (Degradációs idő). A célom olyan keverék összetételek meghatározása volt, melyek segítségével mind a magok dilatációjának mértéke, mind pedig a degradációs ideje optimalizálható.

2. Az öntödei homokregenerálás

Az öntödei használt homok regenerálása mind gazdasági, mind környezetvédelmi szempontból nagyon fontos technológia. A minél nagyobb arányú regenerátum felhasználásával csökkenthető az újhomok- és a depóra kerülő használt homok mennyisége is. Az EU környezetvédelmi irányelvei arra sarkalják az üzemeket, hogy lehetőség szerint hulladékszegény technológiákat dolgozzanak ki, és az üzemen belül keletkező hulladékot minél nagyobb arányban újrahasznosítsák. E tekintetben az öntödei homok értékes alapanyag, amely ciklikusan körbejár az öntödei körfolyamatban.

A regenerálás definíció szerint olyan technológia, mely során – az öntést és ürítést követően – a használt homokon lévő maradék kötőanyagot, szennyezőanyagokat eltávolítják, és a formázóanyag rendszer számára újrafelhasználható alapanyagot állítanak elő. Regeneráláskor az a cél, hogy az újhomok minőségéhez hasonló homokminőséget állítsunk elő.

Regenerálás szempontjából megkülönböztetünk „mono” és „keverékrendszereket”. A „mono” rendszer esetén a forma- és magkészítéshez azonos minőségű homokot használnak, míg a „keverék” rendszerben eltérő típusú formázó és maghomokot alkalmaznak. A használt homok attól függően tartalmaz szennyező és maradék anyagokat, hogy milyen formázó keverékrendszerből származik és milyen a termikus múltja.



1. ábra

A szennyező anyagok eloszlása az öntödei homokban [1]

Az 1. ábra az öntődei homokban található szerves és szervesetlen szennyezőanyag eloszlását szemlélteti. Ha ezektől az anyagoktól nem tisztítjuk meg a homokot, a későbbi felhasználás során zavarhatják a kötőanyag kikeményedési reakcióit, ezáltal a forma vagy a mag nem ér el megfelelő szilárdságot, és ez öntvényselejtet eredményezhet.

A különböző formázó és maghomok keverékekből származó homokok tisztítására eltérő technológiát fejlesztettek ki. A regenerálás lehet:

- Termikus regenerálás
- Egylépcsős, száraz „hideg” regenerálás
 - mechanikus eljárás: törő, daraboló, őrlő, dörzsölő;
 - pneumatikus eljárás: ütközéses, dörzsöléses
- Többlépcsős, termikus-mechanikus regenerálás
- Nedves úton történő regenerálás

A nedves úton történő regenerálás a nagy vízigény miatt nem terjedt el. A mechanikus, pneumatikus és termikus eljárások főként műgyantakötésű homokok regenerálására alkalmasak, míg a kombinált eljárásokat (mechanikus-termikus) leginkább olyan öntődékben használják, ahol nyersformázást alkalmaznak, és műgyantakötésű magokat készítenek.

2.1. A különböző regenerálási technológiák előnyei- és hátrányai

2.1.1. Termikus regenerálás

A termikus regenerálás során a használt homokot különféle típusú izzító kemencékben 600-900°C-ra hevítik. Az izzítás hatására az éghető kötőanyagfilmek leégnek a homokszemcse felületéről és füst, hamu, illetve por formájában az égetés alatt, valamint az azt követő légszerezés és hűtés során, megfelelő porelszívó- és ülepítőrendszerekkel eltávolíthatók a homokból [2].

2.1.2. Száraz, mechanikus regenerálás (egylépcsős eljárás)

A száraz eljárások légáramban vagy mechanikus ütköztetéssel bontják meg a homokszemcsék felületén erősen tapadó kötőanyaghártákat. Ez az ütköztetés egyen- és ellenáramú lehet, a mechanikus eljárásoknál pedig, őrlő-, koptató- és ütközőlapoknak ütköztető kivitelű gépek a leggyakoribbak [2].

Előnyök:

- Kisebb beruházási költségek
- A berendezés kihasználhatósága jobb (gazdaságosabb, a kevesebb használt homok mennyisége miatt)
- Rugalmas üzemű
- A maradékanyag csak részben újrahasznosítható por

Hátrányok:

- A maradékanyag szervesanyag-tartalomban dúsult (tárolhatósági problémák, semlegesítő eljárás szükséges)

- Kisebbs regenerátum kihozatal, rosszabb regenerátum minőség, nagyobb arányú újhomok felhasználás szükséges a magkésztítéshez [3].

2.1.3. Termikus-mechanikus regenerálás (3 lépcsős eljárás)

Az egyes eljárások előnyeinek kihasználására kombinált homokregenerálási eljárásokat dolgoztak ki, amelyek a regenerálandó kiinduló anyagok és a felhasználni kívánt regenerátum céljának ismeretében a különböző regenerálási eljárásokat megfelelően párosították. Ezen kombinált technológiák közül az egyik legelterjedtebb a termikus-mechanikus regenerálás [2].

Előnyök:

- Nagyobb a regenerátum kihozatal és jobb a minősége
- A maradékanyag semleges (deponálhatóság)

Hátrányok:

- Nagyobb beruházási költségek, magas üzemi költségek
- Folyamatos üzem, kevés beavatkozási, változtatási lehetőséggel
- Több maradékanyag keletkezik (por), ami nem értékesíthető
- Nagyobb regenerálási költségek [3]

2.2. A regenerálás hatásfokát minősítő tényezők

A regenerátum minőségét a regenerálási fokkal jellemezhetjük:

$$\beta_r = \frac{(P_A - P_E)}{P_A} 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

ahol a β_r a regenerálási fok (minőségi mutató)

$$\beta_r = \beta_{r-a} + \beta_{r-r} \text{ [%]} \quad (2)$$

β_r az összes regenerálási fok, egyszeri körfolyamatnál %-ban kifejezve

P_A a használt homok izzítási vesztesége [%]

P_E izzítási veszteség a regenerátumban [%]

β_{r-a} kiegészítés az öntési hőmérsékleten

β_{r-r} károsanyag lebomlás regeneráláskor

$$A = \frac{M_1}{M_2} 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

A: kihozatal (mennyiségi mutató)

M_1 : regenerátum mennyisége [kg]

M_2 : használt homok mennyisége [kg]

A regenerálás hatékonysága, illetve a regenerálási fok nagymértékben befolyásolja a formázókeverék tulajdonságait, és ez kihat az öntvény minőségére. A regenerátum regenerálási foka a mechanikus regeneráló berendezésben a legkisebb, ezt követi a mechanikus-pneumatikus és a termikus berendezés, majd a nedves regenerálóval kombinált mechanikus-pneumatikus berendezés.

A regenerátum minőségét meghatározó paraméter a formázókeverék kötőanyagtartalma, hiszen a nagyobb mennyiségű kötőanyagból több maradék anyag keletkezhet, ami hatással van a későbbi kötésmechanizmusokra. A másik fontos paraméter a homok / fém arány, hisz ha ez az arány kicsi, akkor a kötőanyag kiégés is nagyobb, és ezáltal a regenerálás hatékonysága is jobb lesz.

Az a gyanta és katalizátor mennyiség, amit a regenerálás során nem tudunk eltávolítani, öntvényhibák kialakulásához vezethet, – ráégés, eresség, gázhólyagosság és penetráció – aminek okozója a nem megfelelően regenerált formázókeverék. Ezeket a hibákat megfelelő formázóanyag összetétel biztosításával lehet kiküszöbölni, és folyamatos minőségellenőrzéssel (nitrogéntartalom, foszfortartalom, izzítási veszteség, granulometria, pH érték) kell kontrollálni [4].

A formázókeverékben lévő kötőanyag maradékok aránya a regenerátumhoz adott újhomok mennyiségétől és az összregenerálási foktól függ. Minél kisebb a regenerálási fok, annál több újhomokot kell a rendszerhez adagolni. A kötőanyag maradékok mennyisége a homokrendszerhez adagolt kötőanyag mennyiségétől és minőségétől függ. A kötőanyag maradékok jelentősen befolyásolják a szilárdsági tulajdonságokat is. A formázóanyag növekvő kén-, nitrogén- és foszfortartalma mellett a szakítószilárdság jelentős mértékben csökken [5].

3. A regenerált homok minőségének hatása a mechanikai penetrációra

3.1. Bevezetés

Az öntvény megfelelő felületi minősége nem csak vevői elvárás, hanem gazdasági szempontból is fontos, hisz ezáltal az öntödék öntvénytisztítási költséget takaríthatnak meg. Ahhoz, hogy kiváló öntvényfelületet kapjunk, nem csak a fém összetételét kell az előírásoknak megfelelően biztosítani, hanem a formázástechnológiai paramétereket is jól kell beállítani, különös tekintettel a regenerálás minél nagyobb hatékonyságára. A penetráció kialakulásával számos szakcikk foglalkozik. Ezek hiányosságai főként abban jelentkeznek, hogy a penetráció kialakulásának pusztán elméleti vonatkozásait tárgyalják, de az elméleti eredményeket nem vetik össze a napi gyakorlattal. Ez az oka annak, hogy a penetrációval kapcsolatos elméleti megfontolások alapján meghatározott összefüggésekkel számolva eredményként azt kapjuk, hogy a gyakorlati és elméleti értékek jelentős mértékben eltérnek. A témakörrel foglalkozó kutatók vizsgálataik során a fémnek a forma pórusaiba szivárgását mindig a fém viselkedése alapján igyekeztek megmagyarázni. Vizsgálták a formázókeverék szemcseösszetételének és a formatömorségének, továbbá a fém összetételének, az öntési hőmérsékletnek, a metallosztatikus nyomásnak és a dermedési morfológia változásának hatását, és a fém felületi feszültségét módosító paraméterek szerepét, de a forma-fém határfelületen lejátszódó kémiai folyamatok reakciókinetikájának és a kémiai reakciók dinamikus egyensúlyának nem tulajdonítottak meghatározó szerepet. A fémnek a forma pórusaiba történő behetolásának folyamatát csak akkor lehet egyértelműen leírni, ha a jelenséget rendszerbe kapcsolva vizsgáljuk a kölcsönhatások figyelembe vételével, és a hiba kialakulásához vezető folyamatot mindig az adott feltételeknek megfelelően tudjuk értékelni, és ezáltal a megelőzés módját pontosabban tudjuk meghatározni.

3.2. A penetrációs hibák, mechanizmusok és nyomásviszonyok ismertetése

A penetrációs hibákat megjelenésük szerint három csoportba osztjuk:

- Felületi érdesség
- Ráégés
- Penetráció

3.2.1. Felületi érdesség

A szabványostól eltérő felületi érdességű öntvényfelületet a 2. ábra szemlélteti. Ez a hiba leggyakrabban a beömlőrendszer rávágásainak közelében, illetve a nagy hőterhelésnek kitett helyeken alakul ki [6].

A felületi érdességet okozhatja:

- Durva homok
- A nem megfelelő formatömorség
- A formázókeverék túltömörítése
- A forma határfelületi rétegének nem megfelelő szilárdsága
- A túl magas öntési hőmérséklet
- A nagy metallosztatikus nyomás [7]

Bentonitos formázókeverék használata során a hiba okai lehetnek:

- A formázókeverék alacsony nedvességtartalma (kiszáradása)
- A kis mennyiségű fényeskarbon-hordozó

A fényeskarbon a homokszemcsék felületén létrehoz egy pyrografit filmet és így csökkenti azok nedvesíthetőségét. A kötőanyagból öntés közben elpárolgó víznek negatív hatása van az öntvény felületi minőségére, mivel a fényeskarbon-hordozó hatékonyságát csökkenti, az olvadék aktivitását pedig az oxidációs folyamatok révén megnöveli [8].



2. ábra

Felületi érdesség megjelenése öntöttvas öntvény felületén [9]

3.2.2. Ráégés

A 3. ábra egy vastag falú öntöttvas öntvényen látható ráégési hibát szemléltet. Ez a hibatípus úgy alakul ki, hogy a folyékony fém a formatöltés során eléri a formát alkotó homokszemcsék első rétegét, és kémiai reakció révén üveges fayalit keletkezik. A homokszemcsék hozzátapadnak a fém felületéhez és ezt a réteget nehéz eltávolítani az öntvény felületéről [10]. Ez a típusú hiba leggyakrabban a vastag falú öntvények felületén fordul elő. Bentonitos homok esetén, magas hőmérsékleten a bentonit (pH~9-10) és a szilikátalkotók szinterelődnek, ráadásul a forma-fém rendszerben mindig jelenlevő vas-oxid összekapcsolódik az alacsony olvadáspontú szilikátokkal, és csökkenti a homok tűzállóságát. A formában lévő szennyező-, és az alacsony olvadáspontú anyagok hatására a fém könnyebben jut be a homokszemcsék közé.

A hiba kialakulásának lehetséges okai:

- A fényeskarbon-hordozó mennyisége túl alacsony
- Túl nagy mennyiségű, alacsony olvadáspontú anyag van jelen
- A homok oolitosodása túl nagy

Öntöttvas esetén a bentonitos homokkeverékben a fényeskarbon-hordozó mennyiségét 0,2 – 0,6% között kell beállítani. Nagyon fontos, hogy minél kevesebb szennyezőanyag legyen a formázókeverékben, mivel ezek az oxidáció révén „elfogyasztják” a keverékhez adott fényeskarbon-hordozót. Ha a homok oolitosodása nagymértékű, akkor a hiba megelőzése érdekében fontos a formázókeverék frissítése [11]. Műgyantakötésű homokkeverék esetén nincs szükség adalékanyagra, hiszen a gyanta maga is karbonhordozó.



3. ábra

Vastag falú öntöttvas öntvényen látható ráégési hiba [9]

3.2.3. Penetráció

A 4. ábra egy öntöttvas öntvényen kialakult penetrációs hibát szemléltet. A penetráció úgy alakul ki, hogy a folyékony fém a formatöltés során nem csak eléri, de túl is lépi a homokszemcsék első rétegét, azaz infiltrálódik. Ebben az esetben nagyon erős fizikai kapcsolat jön létre a homokszemcsék és a fém között, így az öntvény megfelelő felületi minőségét csak forgácsolással biztosíthatjuk, amely jelentős többletköltséggel jár [10, 12]. A penetráció olyan helyeken alakulhat ki, ahol nagy a forma hőterhelése (sarkoknál, nagy falvastagságú öntvényrészeknél).

A penetráció okai lehetnek:

- Durva homok
- Nem megfelelő formatömörség
- A forma határfelületi rétegének nem megfelelő szilárdsága
- Túl magas öntési hőmérséklet
- A nagy metallosztatikus nyomás

Bentonitos formázókeverék használata során a hiba okai lehetnek:

- A formázókeverék alacsony nedvességtartalma (kiszáradása)
- Kis mennyiségű fényeskarbon-hordozó [4]



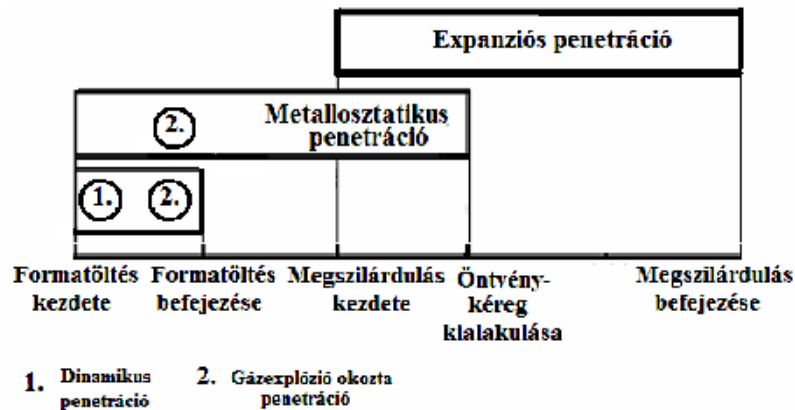
4. ábra

Penetrációs hiba egy öntöttvas öntvényen [9]

A penetrációs hibák típusai:

- Mechanikai penetráció
- Kémiai penetráció
- Gázrobbanásos (Explosion) penetráció
- Tágulósos (Expansion) penetráció

Ezek a penetrációs hibák az öntés során eltérő időpontban alakulnak ki, melyet az 5. ábra szemléltet.



5. ábra

A penetrációs hibák kialakulása az öntés után eltelt idő függvényében [10]

Az 5. ábra alapján megállapítható, hogy a dinamikus és a gázexplózió okozta penetráció a formatöltés kezdetétől, a formatöltés befejezéséig eltelt idő alatt keletkezhet, míg a metallosztatikus és az expanziós penetráció ezt követően alakulhat ki.

3.2.3.1. Mechanikai penetráció

A mechanikai penetráció úgy alakul ki, hogy a folyékony fém a metallosztatikus nyomás hatására belép a formát alkotó homokszemcsék közé. Mivel a folyékony vas nem nedvesíti a kvarchomokot, ezért a penetráció létrejöttéhez olyan nyomásviszonyoknak kell kialakulniuk, hogy az olvadék képes legyen behatolni a forma pórusaiba. [10, 13].

$$P_{\gamma} = -\frac{2\gamma_{LV}}{d_e} \cdot \cos \Theta \quad (4)$$

P_{γ} : kapilláris nyomás [Pa]

γ_{LV} : felületi feszültség a folyadék/gőz határfelületen [N/m]

d_e : átlagos pórusátmérő [m]

Θ : peremszög a fém és a homok között

3.2.3.2. Kémiai penetráció

Ez a hibatípus úgy alakul ki, hogy a forma – fém határfelületen az olvadék vas-oxidja, és a forma szilícium-dioxidja között végbemenő reakció útján, olyan könnyen olvadó vasszilikátok képződnek, melyek hibás

öntvényfelületet eredményeznek [14]. Ez a penetrációs hiba a forma azon részeinél alakul ki, ahol a fém hosszú ideig marad olvadt állapotban, azaz a forma konkáv sarkainál és a vastag falú öntvényrészeknél.

A kémia penetrációt elősegítheti:

- A forma, vagy a mag nem megfelelő tömörsége
- A formázókeverékhez használt homok túl durva szemcseszerkezete
- A formázókeverékhez használt homok alacsony tűzállóképessége
- A formázókeverék kicsi regenerálási hatásfoka, és emiatt magas szennyezőanyag-tartalma

Bentonitos formázókeverék használata során a hiba oka lehet:

- Kis mennyiségű fényeskarbon-hordozó

A 6. ábra a kémiai penetráció során keletkezett vas-homok konglomerátumot szemlélteti.



6. ábra

Az öntvény felületére tapadt vas/homok konglomerátum [9]

3.2.3.3. Gázrobbanásos (Explosion) penetráció

Ez a hibatípus a bentonitos formázókeverékeknél fordulhat elő. A formázóanyag előkészítésekor könnyen kialakulhatnak olyan, porszerű anyagot, bentonitot, és vizet tartalmazó – a forma nedvességtartalmánál lényegesen nagyobb nedvességtartalmú – agglomerátumok, amelyek a formakészítéskor véletlenszerűen a formaüreg felületére kerülhetnek. Öntéskor, amikor a folyékony fém érintkezik ezzel az agglomerátummal, akkor ennek környezetében a víz hirtelen elgőzölög. A képződő vízgőz miatt a forma pórusaiban a gáznyomás pillanatszerűen olyan mértékben

megnövekszik, hogy gázrobbanás következik be. A gázrobbanás miatt a kérdéses helyeken, vékony rétegben a formatömrség értéke lecsökken, így az olvadék, a formázóanyag szemcséi által kialakított nagyobb méretű pórusokba, – igaz csak kis mélységben, – de behatol. Az öntvény felületén a gázrobbanásos penetráció arról ismerhető fel, hogy az öntvényfelület a kérdéses helyeken érdes lesz. A gázrobbanásos penetrációs hiba a formatöltés közben és a dermedés kezdeti szakaszában alakulhat ki [15]. A 7. ábra egy lemezgrafitos vasöntvény felületén kialakult gázrobbanásos penetrációt szemléltet.



7. ábra

Lemezgrafitos vasöntvény felületén kialakult, nagy kiterjedésű gázrobbanásos penetráció [4]

3.2.3.4. Tágulások (Expansion) penetráció

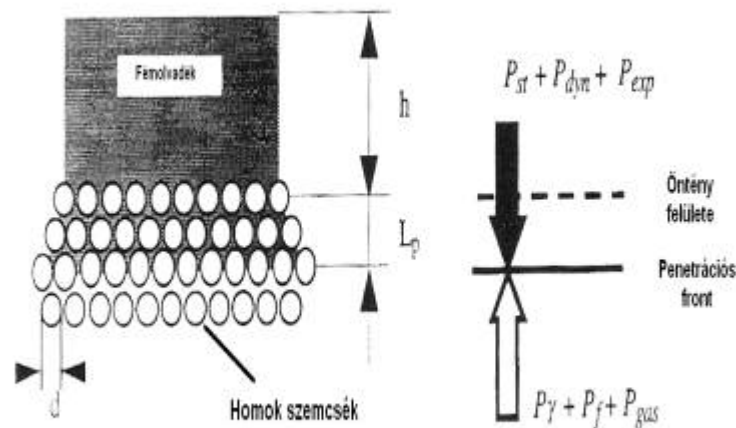
A lemezgrafitos öntöttvas kristályosodása során az ausztenit-grafit eutektikum szignifikáns tágulást mutat, mely jelentős nyomást gyakorol a forma falára. Ha a forma szilárdsága nagy, túltömörített, és a fém nem tud visszaáramlani a tápfejbe vagy a beömlő rendszerbe, akkor az eutektikus fázis beszivárgását okozhatja a forma felületi rétegébe olyan helyeken, ahol a szilárduló kéreg nem zárja el a szivárgás útját. A penetráció által megtámadott formafelület kizárólag konvex geometriájú [4].

3.3. A mechanikai penetráció nyomásviszonyainak ismertetése

Mivel a vasöntvények estén a korábban ismertetett penetráció típusok közül a mechanikai penetráció fordul elő a leggyakrabban, ezért ennek a vizsgálatával foglalkoztam részletesebben.

A mechanikai penetráció kialakulásánál nagy szerepe van a forma-fém határfelületen kialakuló nyomásviszonyoknak. A 8. ábrán az öntés során kialakuló nyomásegysúlyt mutatom be a forma-fém határfelületen.

A 8. ábrán látható, hogy a fémoldalon a metallosztatikus nyomásnak (P_{st}), a dinamikus nyomásnak (P_{dyn}) és az expanziós nyomásnak (P_{exp}) van szerepe. Ezzel szemben a formaoldalon, amikor a fém belép a homokszemcsék közé a kapilláris nyomás (P_γ), a frikciós nyomás (P_f), és a gáznyomás (P_{gas}) a meghatározó.



8. ábra

Nyomásegysúly a fém penetrációja során a szemcsés mátrixban [10]

Ezek a nyomások összefoglalhatók egy egyenletbe, ami a forma-fém határfelületen kialakult egyensúlyt mutatja:

$$P_{st} + P_{din} + P_{exp} = P_\gamma + P_f + P_{gas} \quad (5)$$

Amennyiben az egyenlet bal oldala nagyobb, mint a jobb oldala, akkor a folyékony fém képes penetrálni a homokszemcsék közé [10].

A továbbiakban ismertetem az egyenletben szereplő nyomások szerepét.

3.3.1. Metallosztatikus nyomás (P_{st})

A metallosztatikus nyomás az a nyomás, amit a formában lévő fém a saját súlyánál fogva a formafalra kifejt. Túl nagy metallosztatikus nyomás esetén metallosztatikus penetráció alakulhat ki. Ez a hibatípus az öntés kezdetén a fém, formába történő belépésétől a szilárd kéreg kialakulásáig eltelt idő alatt keletkezhet [9]. Ennek a hibatípusnak a mértékét befolyásolja még a forma-fém határfelületen kialakuló felületi feszültség, a formát alkotó

homokszemcsék nagysága, – hiszen ha a szemcsenagyság nő, a homokszemcsék közötti tér is nő, így kisebb nyomás is elegendő a penetráció elindulásához – és a hőmérséklet. A metallosztatikus nyomás a 6. egyenlet alapján határozható meg:

$$P_{st} = \rho gh \quad (6)$$

P_{st} : metallosztatikus nyomás [Pa]
 ρ : az ötvözet sűrűsége [kg/m^3]
 g : gravitációs gyorsulás [$9,81 \text{ m/sec}^2$]
 h : a formában lévő fém magassága afölött a szint fölött, ahol a penetráció létrejöhet [m]

3.3.2. Dinamikus nyomás (P_{dyn})

A dinamikus nyomás a formába belépő fém sebességéből származtatható. A túl nagy dinamikus nyomás hatására a fém a formafalnak ütődik, és dinamikus penetrációt hoz létre, ami a formatöltés közben alakulhat ki. A dinamikus penetráció megelőzhető a megfelelő beömlőrendszer tervezésével biztosított lassú formatöltéssel [7, 16]. A dinamikus nyomást a 7. egyenlet határozza meg:

$$P_{dyn} = \rho V^2 / 2 \quad (7)$$

P_{dyn} : dinamikus nyomás [Pa]
 V : a fém sebessége, amellyel a formafalnak ütközik [m/sec]
 ρ : az ötvözet sűrűsége [kg/m^3]

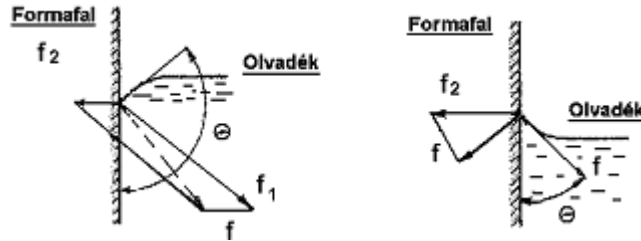
3.3.3. Tágulások (Expansion) nyomás (P_{exp})

Amikor az öntöttvas kristályosodik, az olvadékban oldott karbon atomok egy része átalakul ausztenit-grafit eutektikumá. Az eutektikum fajlagos térfogata nagyobb, mint az olvadéké. Ha a karbon koncentrációja magasabb, mint 3,6%, akkor a szilárd fázis nagyobb mértékben tágul, mint az olvadék [9]. A durvaszemcsés öntöttvas megszilárdulásakor a még olvadt állapotban lévő fém könnyen tud mozogni azokban a csatornáknak, amelyek a nagy eutektikus cellákat kötik össze. A tágulás hatására kialakuló nyomás következtében a fém be tud törni a forma pórusaiba [4, 12].

3.3.4. Kapilláris nyomás (P_γ)

Ahhoz, hogy a kapilláris nyomás szerepét megértsük, szükségünk van a forma-fém határfelületén lévő energia egyensúly tisztázására. Az öntöttvas

olvadék, a formát alkotó SiO_2 -ot nem nedvesíti, azaz a függőleges formafal mentén emelkedő olvadéknak, az érintkezési ponttól domborodó a felülete, az érintkezés szöge tompaszög ($\theta > 90^\circ$ - 9. ábra baloldal). A fém akkor nedvesíti a formafalat, ha az érintkezés szöge hegyes szög ($\theta < 90^\circ$ - jobb oldal) [13].



9. ábra

A forma és fém felületének érintkezése [17]

Ahhoz, hogy a formában a nem nedvesítő olvadék a pórusokban akadálytalanul haladhasson, le kell győznie a domború meniszkusz felületi feszültségéből eredő ellennyomást, azaz elegendő nagyságú metallosztatikus nyomást kell biztosítani:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r} \quad (8)$$

ahol:

σ : a felületi feszültség [N/m]

$$\sigma = \frac{h \cdot r \cdot \rho_f \cdot g}{2 \cdot \cos \theta} \quad (9)$$

h: a kapilláris cső és a fémszint szintkülönbsége [m]

r: a kapilláris cső sugara, amelyben a fém áramlik [m]

ρ_f : a folyékony fém sűrűsége [kg/m^3]

θ : a fém és a forma által alkotott szög, nedvesítési szög, (öntöttvas olvadék esetén θ értéke 130° - 145° között változik) [17].

3.3.5. Súrlódásból eredő nyomás (P_f)

A forma ellenállása a homokszemcsék közé behatoló fémmel szemben [10].

$$P_f = \frac{\mu}{K} L_p V_p \quad (10)$$

P_f : a súrlódásból eredő nyomás [Pa]

μ : a folyékony fém viszkozitása [N/m^2]

L_p : az a hossz, amin keresztül a fém átáramlik (penetrációs mélység) [m]

V_p : az a sebesség, amivel a fém a homokszemcsék között mozog a penetráció során [m/sec]

K: a formázókeverék permeabilitása

ahol:

$$K = \frac{(1-f_d)^3}{180f_d^2} d^2 \quad (11)$$

- f_d : a formázóhomok relatív sűrűsége (tömörített térfogatsűrűség / elméleti sűrűség) [kg/m³]
 d : átlagos pórusátmérő [m]

3.3.6. Gáznyomás (P_{gas})

Amikor az öntöttvasat bentonitos vagy műgyantakötésű formába öntjük, a nedvesség illetve a gyanta illékony szerves vegyületei a hő hatására felszabadulnak. A hirtelen fölmelegedő gázok expandálnak, és nyomást gyakorolnak a forma falára, ami penetrációhoz vezethet. Léteznek olyan kutatási eredmények, melyek szerint ez a gáznyomás a penetráció szempontjából annyira kis mértékű, hogy elhanyagolható [10]. Bentonitos formázókeverék esetén a gáznyomás maximuma elérheti az 1-3 kPa-t, míg a műgyantakötésű formák esetén kisebb, mint 1 kPa.

3.4. A penetráció termodinamikai megközelítése

3.4.1. A penetrációt befolyásoló fizikai-kémiai paraméterek

Termodinamikai szempontból három fontos paraméter definiálható a penetráció szempontjából:

- A forma/fém határfelületen lévő peremszög
- A penetráció elindításához szükséges ún. „küszöbnyomás” P_{th}
- Az egyensúlyi penetrációs mélység [18].

A 3.3. fejezetben ismertetett egyenleteket egy egyenletbe foglalva, és megoldva a penetrációs mélységre (L_p), a következő egyenletet kapjuk:

$$L_p = \left[\frac{d^2 t_p}{180\mu} \cdot \frac{(1-f_d)^3}{f_d^2} \cdot \left(\rho g h + \rho V^2 + \frac{4}{d_p} \gamma_{LV} \cos \Theta \right) \right]^{1/2} \quad (12)$$

Mivel a penetrációval szemben a fő hajtóerő a kapilláris nyomás, és a forma-fém határfelületen lévő peremszöget lehet leginkább kontrollálni, ezért a kutatók megvizsgálták a penetrációs mélység és a peremszög közti kapcsolatot. Amennyiben a peremszög egy bizonyos kritikus érték fölött marad, a penetráció nem következik be, tehát van egy szög, ami fölött a penetrációs mélység nulla. Ez alapján az egyenletet a következőképpen lehet felírni, és meghatározni a kritikus peremszöget, (a gáznyomás és az expanziós nyomás elhanyagolása mellett) [10, 16, 18]:

$$\Theta_{cr} = \cos^{-1} \left[-\frac{d_p}{4\gamma_{LV}} \cdot (\rho gh + \rho V^2) \right] \quad (13)$$

A kritikus peremszög és az aktuális peremszög hányadosa meghatározza a penetrációs indexet:

$$P = \theta_A / \theta_{cr} \quad (14)$$

θ_A : aktuális peremszög

θ_{cr} : kritikus peremszög

- $P > 1$ nincs penetráció
- $0 < P < 1$ mechanikai penetráció valószínű
- $P < 0$ kémiai penetráció valószínű

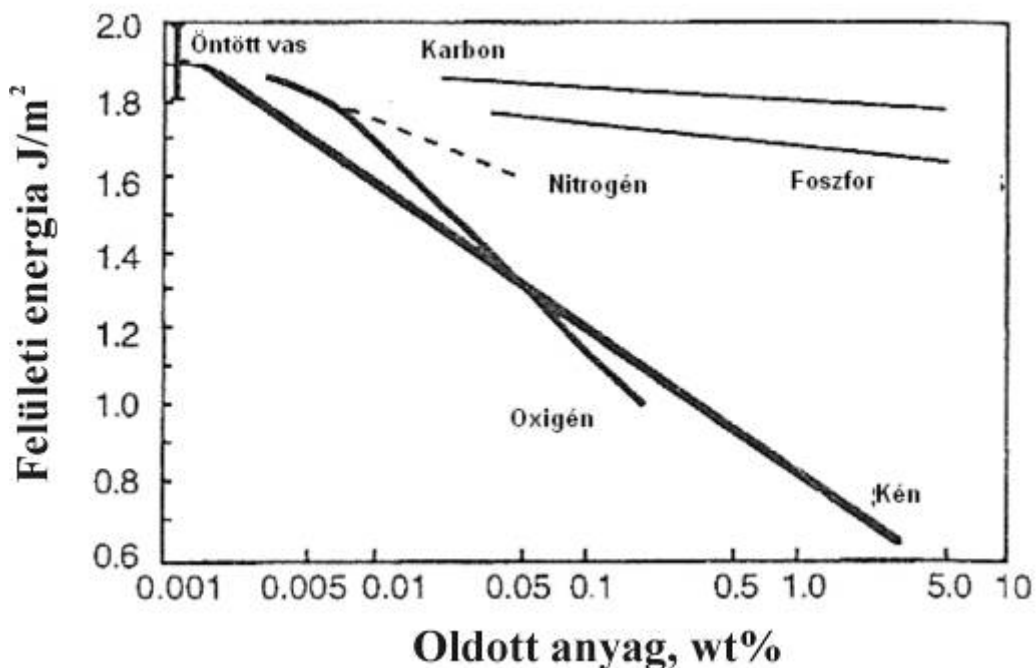
Ahhoz, hogy a penetrációs indexet meghatározzuk, és így a mechanikai penetráció létrejöttét előre jelezzük, a kritikus és az aktuális peremszög becslésére van szükség. Az aktuális peremszög a következő paraméterektől függ:

- A fémolvadék hőmérséklete
- Az olvadék összetétele
- A forma összetétele (homok típusa, kötőanyag mennyisége, adalékanyagok)
- Az öntés során felszabaduló gázok összetétele az olvadék-forma határfelületen.

Ezzel szemben a kritikus peremszöget az alábbi paraméterek befolyásolják:

- Az átlagos pórusátmérő, ami a homokszemcsék méretétől függ
- A homok szemcseösszetétele és térfogatsűrűsége
- A folyékony fém felületi feszültsége és sűrűsége
- A metallosztatikus nyomás
- A fém áramlási sebessége a formában [10]

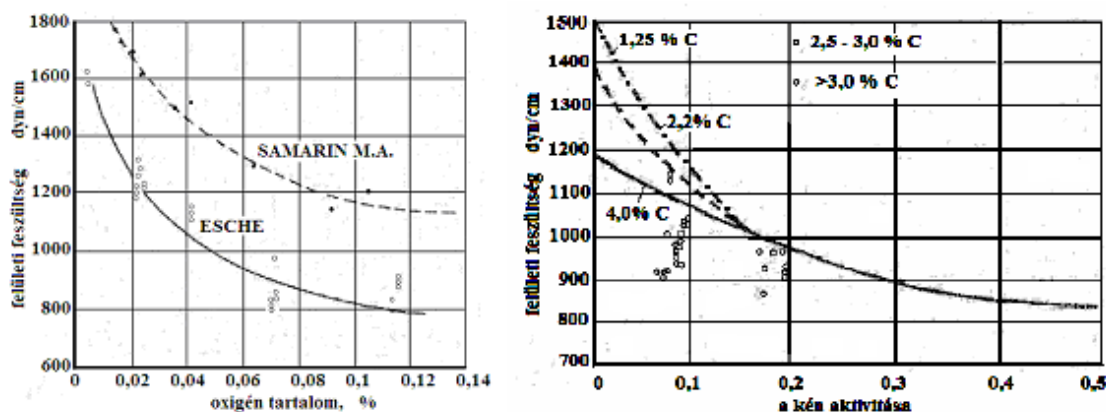
A folyékony fém felületi feszültsége jelentősen befolyásolja a peremszög mértékét, és ezáltal a nedvesíthetőséget. A felületi feszültség csökkenésével nő a penetrációs hajlam. A 10. ábra szemlélteti, hogy a különböző kémiai elemek hogyan hatnak az öntöttvas felületi feszültségre:



10. ábra

Különböző elemek hatása a folyékony vas felületi feszültségére 1550-1570°C között [10]

A 10. ábra alapján megállapítható, hogy az oxigénnek, a kénnek és a nitrogénnek van jelentős hatása a felületi feszültségre [12, 19, 20]. A 11. ábra az oxigéntartalom, és a kénaktivitás felületi feszültségre gyakorolt hatását szemlélteti.



11. ábra

A felületi feszültség változása az oxigéntartalom ill. a kénaktivitás függvényében [21]

További kutatások azt mutatták ki, hogy a mangánnak, 1,5% mangántartalom felett szignifikáns hatása van a felületi feszültség

csökkentésére. Ezen mennyiség alatt a hatása nem jelentős, mivel a kén jelenlétében MnS keletkezik, ami nem oldódik az öntöttvasban [20].

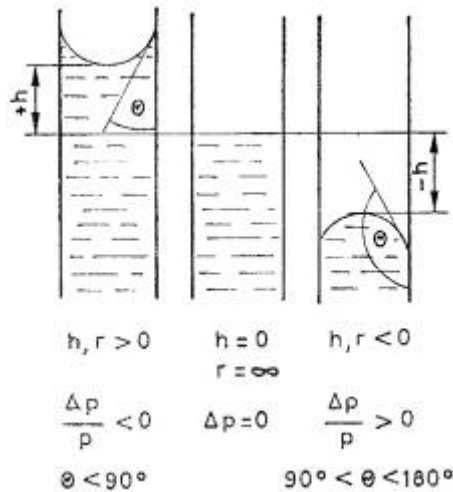
A magnézium szerepe összetettebb. A magnézium reagál mind a kénnel, mind pedig az oxigénnel. Kialakul a MgO és a MgS, amelyek az öntöttvasban nem oldódnak, és növelik a felületi feszültséget, mert a felületaktív elemeket eltávolítják az olvadékból. Ez a jelenség csak 0,018% magnézium-tartalomig tart, e fölött a felületi feszültség csökken a megmaradt szabad magnézium beoldódásának köszönhetően [21].

3.4.2. A kapilláris modell

A felületi feszültség hatásával függ össze az úgynevezett kapilláris emelkedés (eleváció) illetve a kapilláris süllyedés (depresszió) jelensége. Előbbi akkor lép fel, ha sík felszínű folyadékba olyan kapilláris csövet mártunk, amelyet az nedvesít (12. ábra baloldal). Ebben az esetben a folyadék egy bizonyos „h” szintig felemelkedik a kapillárisban. Pontosan ugyanilyen, csak ellentétes irányú jelenség lép fel, ha a folyadék nem nedvesíti a kapillárist. Ebben az esetben, a kapillárisban a folyadék szintje a sík folyadékfelszín szintjénél alacsonyabban fog beállni (12. ábra jobb oldal). Kapilláris emelkedésnél „r” sugarú kapillárisban a folyadékszint emelkedése olyan magassáig történik, amilyen magasságban a kapillárisban a folyadékhatáron kialakuló felületi feszültség ($2r\pi\gamma$) egyensúlyt tart a megemelkedett folyadékoszlop hidrosztatikai nyomásával ($r^2\pi h\rho g$).

Egyensúly esetén:

$$r^2\pi h\rho g = 2r\pi\gamma \quad (15)$$



12. ábra

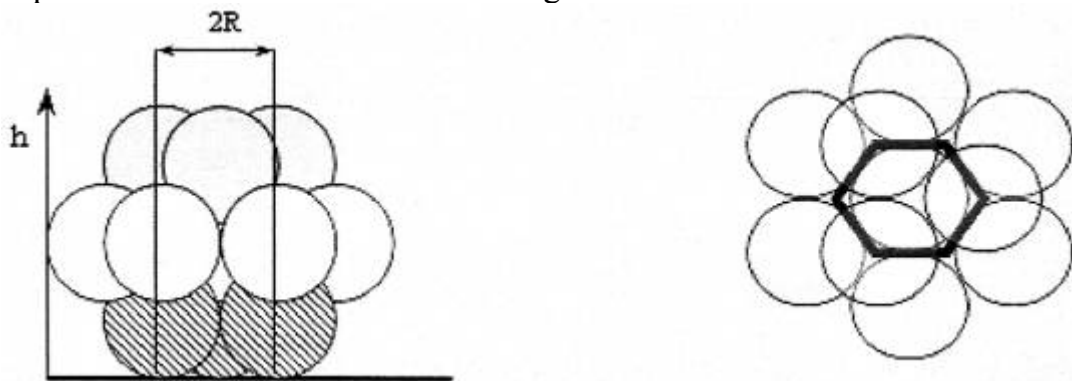
A kapilláris modell

A mechanikai penetrációt vizsgálva, a homokformát úgy tekinthetjük, mint egy felületen nyitott kapilláris rendszert tartalmazó szilárd felületet, ahol

a folyékony fém behatolásának lehetősége az alatt a rövid idő alatt is fennáll, amíg a fém és a forma közötti határfelületen a fém egy vékony rétege megdermed. Ha a fém behatolását egyensúlyira vezethető folyamatnak tételezzük fel, akkor a forma gázképző komponenseiből (H_2O , C, stb.) eredő gázok nyomása egyensúlyt tart a ferrosztatikai nyomással és a kapilláris nyomással. Ha az utóbbi két nyomás összege nagyobb, mint a formában képződő gáznyomás, a fémbeáramlás megindul. A fém első rétegének megdermedése viszonylag gyorsan létrejön, és a formában képződő gázok nyomása megakadályozza a tartós fémáramlást. A penetrációs mélységet azonban növeli az a jelenség, hogy az öntvény felületén vékony oxidhártya képződik, tehát a fázishatáron a fém-oxid, a forma és a gáz közötti határfelületi viszonyok válnak döntővé [22].

3.4.3. A CPES modell (Closely Packed Equal Spheres) [18, 23]

Ez a modell egy újfajta termodinamikai modell, mely sokkal pontosabb képet ad a valós szemcsés anyagok szerkezetéről, mint a hagyományos kapilláris modell. A modellhez tartozó geometria a 13. ábrán látható.



13. ábra

A CPES struktúra a penetráció magasságának (h) és a térfogategység keresztmetszete (vastag vonal) függvényében [18, 23, 45,46].

A porózus homokforma (vagy kerámia) ideális esetben azonos, szoros illeszkedésű gömbökből áll, a felületen középpontos kockarácshoz hasonlóan és a penetrációt e kockarác (111) síkjára merőlegesen vizsgálja. Feltételezi, hogy a folyadékszint a gömbök közt lévő pórusokban alulról fölfelé halad. Felírja a kapilláris nyomáshoz tartozó egyenletet, – aminek a negatívja a küszöbnyomás. Megállapítja, hogy a küszöbnyomás, a penetrációs mélység és a peremszög függvénye. Erre alapozva a következők állapíthatók meg:

- Ha $\Theta=180$, akkor a folyadék bármely magasságba történő penetrációjához külső nyomásra van szükség.
- Ha $50,7^\circ < \Theta < 180^\circ$, akkor kezdetben a penetráció spontán folyamat, majd később a makroszkopikus penetrációhoz itt is külső nyomásra van szükség.

- Ha $\Theta < 50,7^\circ$, akkor a penetráció spontán módon történik.

Így a CPES modell kritikus peremszöge $50,7^\circ$, ellentétben a hagyományos kapilláris modellel, ahol 90° .

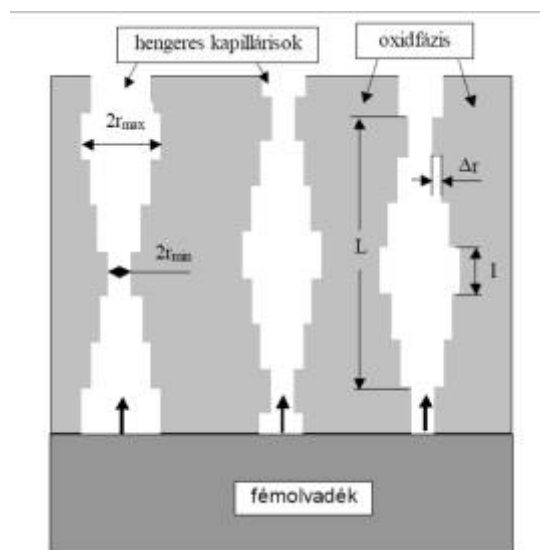
Emellett Kaptay György kidolgozta az elő-penetráció modelljét is, ami alatt a makroszkopikus penetrációhoz tartozó, küszöbnyomás alatti nyomáson fellépő viszonylag kis mértékű penetrációt érti. Ennek bizonyítására kidolgozta a „periódikusan változó kapilláris- sugár” modellt, ami a 14. ábra szerinti morfológiát feltételez, mely szerint:

- Minden pórus egy függőleges, hengeres kapilláris, melynek sugara periódikusan változik egy minimális r_{\min} és egy maximális r_{\max} között.
- Minden kapilláris n fajta, l hosszal leírható, rövid szakaszokból áll, melyen belül a sugár állandó értékű. Függőleges irányban a szakaszok hossza lépésről lépésre változik Δr lépésközzel ($\Delta r \ll r_{\max}$). A kapilláris „periódusa” (L) a két legközelebbi, azonos metszet távolsága.
- A kapillárisok ugyan azonosak egymással, de a kerámia/fémolvadék alsó határfelületen egymáshoz képest véletlen hosszal el vannak tolva.

A $P_{0,th} = -P_{\sigma,x}$ és a (15.) egyenlet alapján értelmezhető egy (a minimális kapilláris sugárhoz tartozó) maximális küszöbnyomás $P_{0,th,max}$ és a (maximális kapilláris sugárhoz tartozó) minimális küszöbnyomás $P_{0,th,min}$. Ezen két érték a penetrációs diagrammot három részre bontja:

- 1. szakasz: $P_0 < P_{0,th,min}$ – ekkor a penetráció egyáltalán nem következik be.
- 2. szakasz: $P_{0,th,min} < P_0 < P_{0,th,max}$ – ekkor a penetráció bizonyos kapillárisokban elindul – ezt nevezzük elő-penetrációnak.
- 3. szakasz: $P_0 > P_{0,th,max}$ – ekkor a penetráció az összes kapillárisban elindul.

[18, 23].



14. ábra

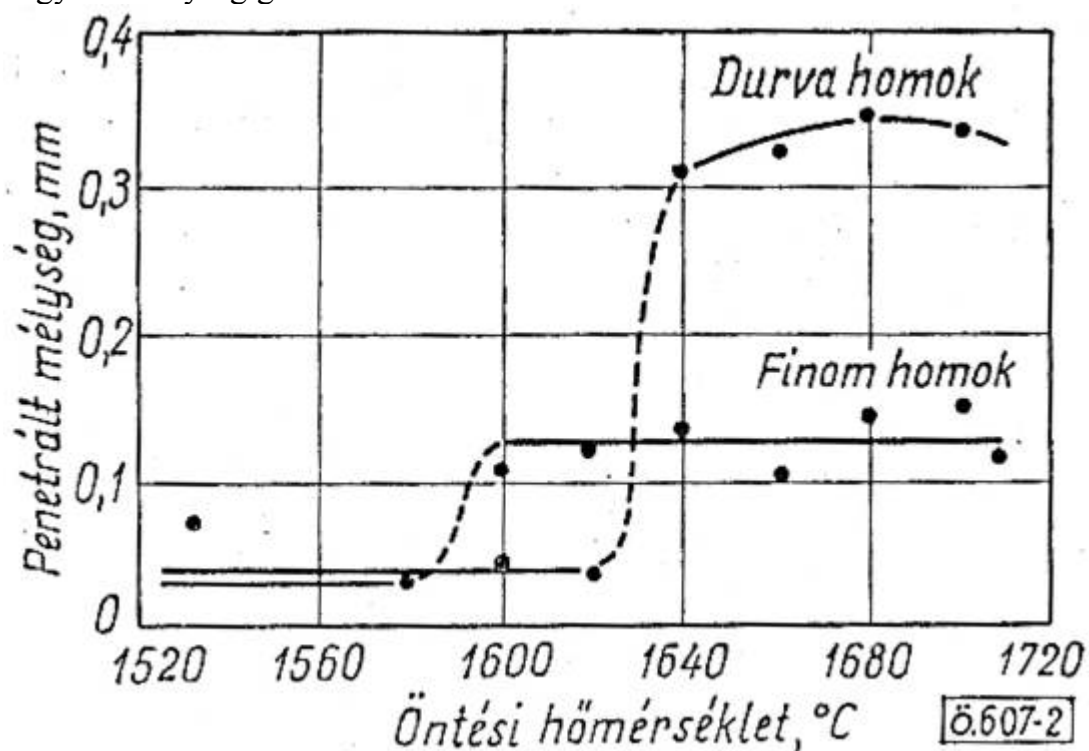
A „periódikusan változó sugarú kapilláris” modell illusztrációja [18]

3.5. A formázóanyag összetételének hatása a penetrációra

A penetráció kialakulásában nemcsak a nyomásviszonyoknak, a felületi feszültségnek és a peremszögnek van döntő szerepe, hanem a formakészítéshez használt formázókeveréknek is. Ha a homokszemcsék sugarát R-rel jelöljük, akkor a vizsgálatok szerint a pórusugár:

$$r=0,154 \cdot R \quad (16)$$

Az öntés folyamán a sugár méretének változására a forma tömörsége, a homok dilatációja, a kötőanyagok mennyisége és a formabevonó anyag van hatással. A 15. ábrán a különböző szemcsefrakciójú homokok az öntvényre történő ráégésre gyakorolt hatását láthatjuk. A 15. ábra alapján elmondható, hogy durva homok esetén, nagyobb hőmérsékleten indul meg a penetráció, és nagyobb mélységig hatol be a homokszemcsék közzé.



15. ábra

Különböző finomságú homokok ráégésének mértéke acélöntvény esetén [24]

Az egyensúlyi pórusátmérőt Stefanescu is meghatározta:

$$d_p = 1,1 \cdot d \cdot (1 - f_d)^{1/3} \quad (17)$$

d_p : egyensúlyi pórusátmérő [m]

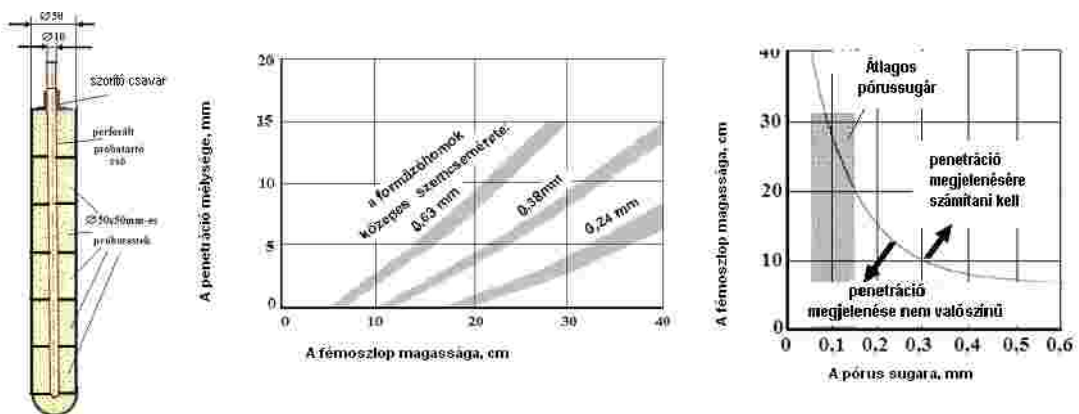
f_d : a formázóhomok relatív sűrűsége

d : átlagos pórusátmérő [m]

Az egyenlet szerint a penetráció valószínűségét csökkenthetjük, ha a szemcseméretet csökkentjük és a frakcionált sűrűséget növeljük. A frakcionált sűrűség a térfogatsűrűség és a valódi sűrűség aránya [10].

A metallosztatikus nyomás hatását Patterson és munkatársai ötvözetlen acélok esetén vizsgálták a 16. ábrán látható próbatest segítségével. Formázóanyag vizsgáló laboratóriumokban szabványos laboratóriumi tömörítő-készülék segítségével olyan gyűrű alakú próbatesteket készítettek, melynek külső átmérője 50mm, belső átmérője 11mm, magassága 50mm volt.

A próbatesteket 10 mm külső átmérőjű vascsőre húzták fel, a legutolsó próbatestet egy szorítócsavar segítségével rögzítették. A próbatest-oszlopot előre meghatározott ideig acéolvadékbába merítették. Kieértékeléskor meghatározták a penetráció mélységét, és ezt a formázókeverék közepes szemcsemérete, a metallosztatikus magasság, és a tömörített próbatestek pórus sugarának függvényében ábrázolták. A vizsgálatok szerint azonos kísérleti feltételek esetén a formakészítéshez használt formázóhomok közepes szemcseméretének növekedésével arányosan növekedett – azonos metallosztatikus nyomás esetén – a fémbehatolás (a penetráció) mértéke. A szárított agyag kötésű formázókeverékek esetén a formázóhomok átlagos szemcseméretének és a forma, illetve a mag átlagos pórus átmérőjének a penetráció mértékére gyakorolt hatását a 16. ábrán láthatjuk. A 16. ábra nagyított verziója a Mellékletben az 1. számú ábrán látható.



16. ábra

A fémoszlop magasságának, a formázóhomok közepes szemcseméretének és a formázókeverék átlagos pórus sugár méretének hatása a penetráció mértékére ötvözetlen acélok esetén [25]

Fontos tényező a homokok tűzállósága is, ami a homok alkotórészeinek az elsalakosodással szemben kifejtett ellenállását jelenti [22]. A gyakorlatban a homok tűzállóságát az öntvényről lefejtett, összesült homokrétegnek, illetve a homokrétegnek az öntvény felé eső oldalán lévő zománcréteg vastagságának, és minőségének alapján határozzák meg [24]. A homok tűzállóképességét az 1%-nál nagyobb FeO tartalom rontja. Ha a tűzálló mátrix tűzállósága alacsony, a forma-fém határfelület összesülhet, ezáltal a homokszemcsék között kinyílnak a pórusok, és a fém be tud penetrálni közéjük [13].

A penetráció vizsgálatakor a homok típusa is fontos paraméter. A leginkább elterjedt homoktípus a kvarchomok, amit mind forma, mind magkészítéshez használnak. A kvarchomok, kereskedelemben könnyen hozzáférhető, újrahasznosítható, jól tűri a nagy hőssokkot, és nem nedvesíti az olvadékot. Azonban, ha fémoxidok vannak jelen, akkor ezek reakcióba lépnek a szilícium-dioxiddal és kémiai penetráció jön létre. Ezt a problémát elkerülhetjük cirkon, olivin, vagy kromit homok használatával, amelyeknek nagyobb a tűzállóképességük, és nem lépnek olyan könnyen reakcióba a fémoxidokkal [12, 13, 22].

A kötőanyagok a homokszemcséket filmszerűen vonják be. A folyékony fém először ezzel a kötőanyagfilmmel találkozik, ezért ennek a rétegnek kell ellenállónak lennie. A vegyi kötésű formázókeverékeknél nincs szükség karbontartalmú adalékokra, mert a kötésből fényeskarbon, szén-monoxid, szénhidrogének és nitrogén képződik, amelyek együttesen redukáló gázként funkcionálnak [13].

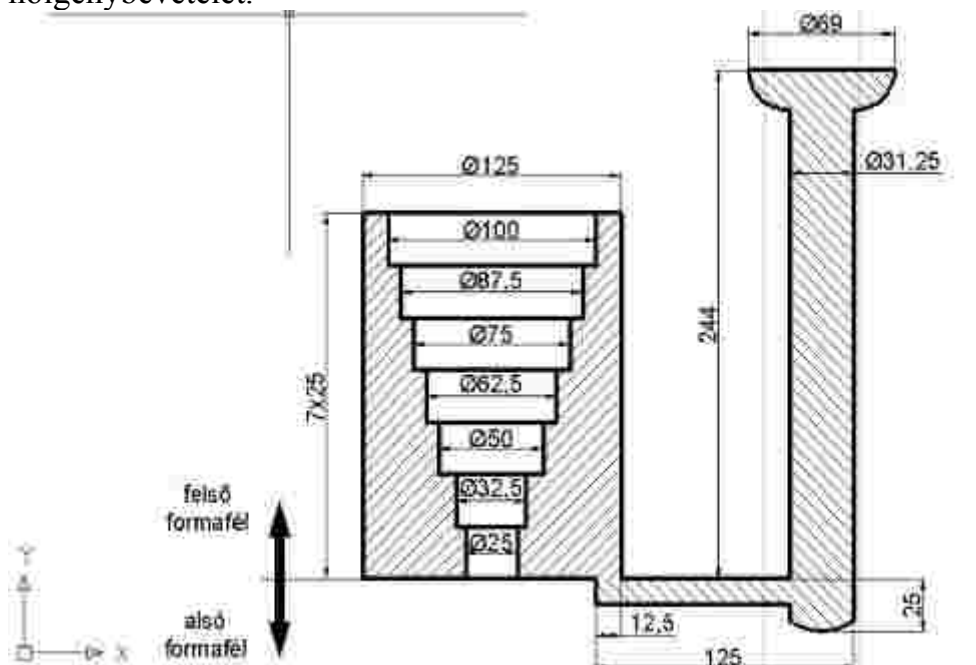
Az adalékanyagok segítségével megakadályozhatjuk a penetráció kialakulását. Ilyen adalékanyag a kőszénliszt, – bentonitos formázókeverékek esetén – melynek hatása azon alapul, hogy öntés közben elég, és a forma pórusaiban lévő oxigént elhasználja. Így redukáló atmoszféra jön létre a folyékony fém határfelületén, ezáltal csökken a folyékony fém oxidációjának, és a ráégésének veszélye. Főként vasöntvények formázókeverékeihez adagolják. A forma és magbevonó anyagokat (fekecsket) szintén a fém pórusokba történő behatolása ellen alkalmazzák [22]. A fekecskekkel szemben támasztott követelmények:

- Ne tartalmazzanak a folyékony fémmel való érintkezéskor a fém öntési hőmérsékletén olvadó anyagokat
- Ne alkossanak az ötvözetet alkotó elemekkel, vagy azok oxidjaival kis hőmérsékleten olvadó vegyületeket
- Jól tapadjanak a forma, vagy a mag felületére, és azokon egyenletes és tömör réteget képezzenek
- A forma, vagy a mag szárítása után se repedezzenek be, és váljanak le annak felületéről [19]
- Ne oldódjon a fémbe

4. Kísérleti körülmények

A vizsgálatok során az volt a kiemelt célom, hogy lemezgrafitos öntöttvas öntésekor regenerált homokot tartalmazó, fenolgyanta – savszilárdítású hidegen-kötő rendszer esetén megvizsgáljam a forma-fém határfelületen létrejövő folyamatokat, és ezen határfelületi folyamatok hatását kimutassam a fémnek a forma pórusaiba történő behatolásakor, illetve az, hogy kimutassam a regenerátum minőségének hatását az öntvény felületi minőségére.

A penetrációs vizsgálatokhoz „7 lépcsős hengeres” próbatesteket öntöttem [26, 27], melyekhez a mechanikusan regenerált, hidegen kötő gyantás formázóhomokot használtam. A „7 lépcsős hengeres” próbatest sajátossága, hogy vertikálisan, meghatározott mértékben változik a homok/fém arány, ami alapvetően meghatározza a magrészek hőigénybevételét.



17. ábra

A vizsgálatokhoz használt „7 lépcsős hengeres” próbatest vázlata

A formakészítéshez mindig nedves bentonitos formázókeveréket használtam, melynek összetétele a következő volt:

- 11 % bentonit (16% karbonadditívvel)
- 4 % víz,
- A többi kvarchomok

A keverés szakaszos működtetésű „S”-lapátos keverőben történt, a betétanyag megolvasztását pedig 50 kg-os tirisztoros indukciós kemencében végeztem. A betétanyag 100% gépöntvény-töredék volt, amely 1470°C-ra történt túlhevítés és tízperces hűntartás után került öntésre úgy, hogy az adagot 1430°C-on csapoltam. Csapolás közben 0,2% Foundryzil csiraképző beoltóanyagot adagoltam, majd a salak eltávolítása után került sor az öntésre.

A forma üritésére 24 óra múlva került sor. Az öntöttvas kémiai összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat
ÖV 200-as öntöttvas összetétele

| Fe, % | C, % | Si, % | Mn, % | P, % | S, % | Cr,% |
|-------|------|-------|-------|------|-------|------|
| 92,87 | 3,7 | 2,3 | 0,68 | 0,03 | 0,041 | 0,1 |

Az általam vizsgált homokrendszer a fenolgyanta - savszilárdítású hidegenkötő rendszer volt. A rendszerben használt gyanta gyártásakor a kiinduló alapanyagok a fenol és a formaldehid, melyet megfelelő tömegviszonyok között kondenzálnak. A gyanta kötési sebességét szerves szulfonsav katalizátorokkal, para-toluol-szulfonsavval, vagy benzol-szulfonsavval lehet elérni [27]. A kísérletekhez üzemi, mechanikusan regenerált homokot használtam. Az üzemben mind a formakészítés, mind a magkészítés területén a hidegen szilárduló fenolgyantás kötőanyagrendszert alkalmaztak. A forma üritését követően a használt homok egy golyós koptatómalomba került, ahol egy előkoptatásnak vetették alá. Ezt követően a használt homokot egy mechanikus - pneumatikus regenerálóban kezelték. A leválasztott port konténerekbe gyűjtötték, és ezt követően deponálták, a regenerátumot pedig visszajáratták a homok körfolyamatba.

A kísérletekhez felhasznált gyanta és katalizátor paramétereit a 2-3. táblázat tartalmazza.

2. táblázat

A kísérletekhez felhasznált Isophen 651 fenol-resol, hidegen kötő gyanta paramétereit

| | |
|------------------------|---|
| Gyanta típusa: | fenol- resol gyanta |
| Összetétel: | Szabad fenol: 5-8% Szabad formaldehid: 0,5-1,5%, Formaldehid: 0,3-0,5%, Nitrogén: < 0,9% |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | barna |
| Gyulladás hőmérséklet: | 390°C |
| Sűrűség 20 °C-on: | 1,20 g/cm ³ |
| pH érték 20 °C-on: | 7,0-7,5 |
| Víztartalom | 25-28% |

3. táblázat

A kísérletekhez felhasznált H-760 katalizátor paraméterei

| | |
|------------------------|---|
| Összetétel: | Benzol-szulfonsav: 25-50%, p-Toluol-szulfonsav: 10-24% Kénsav: 1-2% |
| Állaga | folyékony |
| Szín: | piros |
| Gyulladás hőmérséklet: | 550 °C |
| Sűrűség 20 °C-on: | 1,29 g/cm ³ |
| pH érték 20 °C-on: | savas |
| Víztartalom | 28% |
| Szilárdanyag tartalom | 72% |

A homokvizsgálatok során alkalmazott szabványos mérési eljárások:

- A homok iszaptartalmának és granulometriai tulajdonságának meghatározása
- A homok izzítási veszteségének meghatározása
- A homok pH értékének meghatározása
- A homokkeverékből képződő gáz mennyiségének meghatározása
- A formázókeverék hajlító és nyírószilárdságának meghatározása

4.1. A kísérletekben felhasznált homokok alaptulajdonságai és újrahasznosíthatóságuk

A homokok alapvizsgálati eredményeinek kiértékelése során összehasonlítottam a regenerált és az újhomok paramétereit. A vizsgálatokhoz használt újhomok és regenerátum tulajdonságait a 4. táblázat tartalmazza.

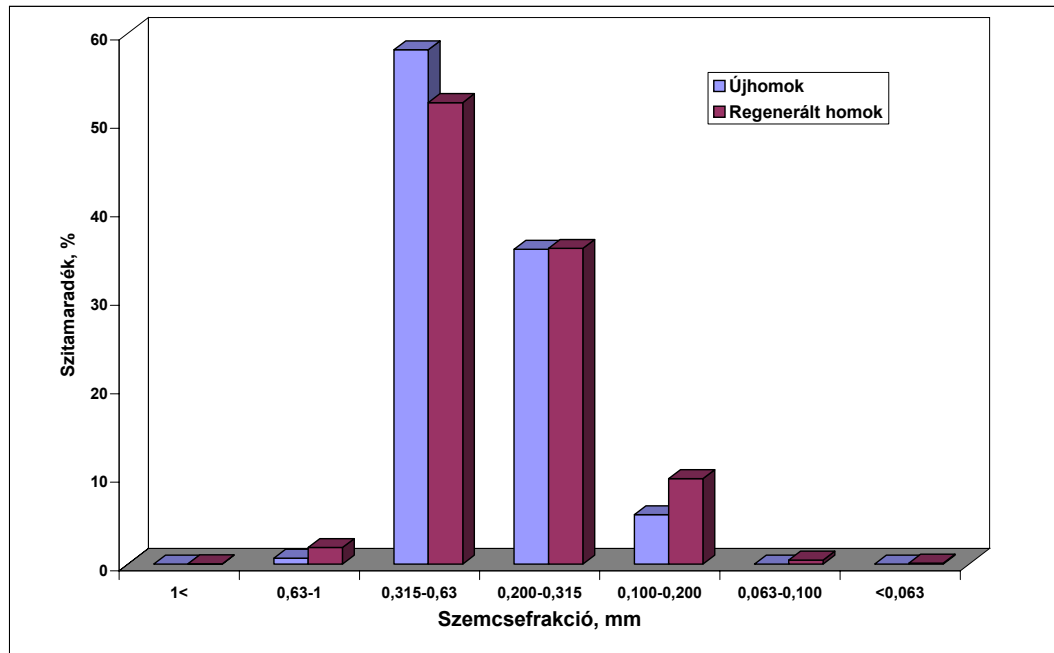
A táblázatban szereplő regenerálási fok az 1. fejezetben ismertetett (1.) egyenlet alapján lett meghatározva.

4. táblázat

A kísérletekhez használt homokok alaptulajdonságai

| Paraméterek | Regenerált homok | Újhomok |
|------------------------------------|------------------|---------|
| Izzítási veszteség, % | 3,1 | 0,3 |
| Iszaptartalom, % | 0,94 | 0,2 |
| Átlagos szemcseméret, mm | 0,31 | 0,32 |
| 0,063 mm alatti szemcsék aránya, % | 0,14 | 0 |
| pH érték | 5 | 5 |
| Regenerálási fok, % | 50 | |

Az újhomok és a regenerátum szemcseösszetételét a 18. ábra ábrázolja.



18. ábra

A különböző homokok szemcseösszetétele

Az alaptulajdonságokat megvizsgálva látható, hogy a regeneráló berendezés alkalmazásával az izzítási veszteség 3,1%, a porfrakció mennyisége pedig 0,14%. A regenerálási fok értéke 50%. A regenerátum szemcseösszetétele megközelíti az újhomok szemcseösszetételét, azonban az alacsony regenerálási fok miatt a porfrakció nagyobb mértékű. A nagyarányú porfrakció nagyobb mennyiségű kötőanyagot vesz fel.

A regenerátum és az újhomok felhasználásával különböző arányú keverékeket készítettem, és megvizsgáltam a keverékekből készített próbatestek szilárdsági tulajdonságait és a keverékek izzítási veszteségét. A kísérletek során azonos gyanta és katalizátor arány mellett csak a regenerált és az újhomok arányát változtattam, és megvizsgáltam a frissítés, azaz az újhomok mennyiségének hatását a keverékek tulajdonságaira. A különböző arányú homokkeverékek összetételét az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat

A homokkeverékek összetétele

| | |
|---|---------------------|
| Isophen 651 fenol-resol gyanta | 1, 5 % |
| H-760 katalizátor (a gyanta mennyiségére vonatkoztatva) | 40 % |
| Frissítés mértéke | 0, 10, 15, 20, 100% |

A különböző keverékekből készített próbatestek hajlítoszilárdságát és nyírósilárdságát a 6. táblázat tartalmazza.

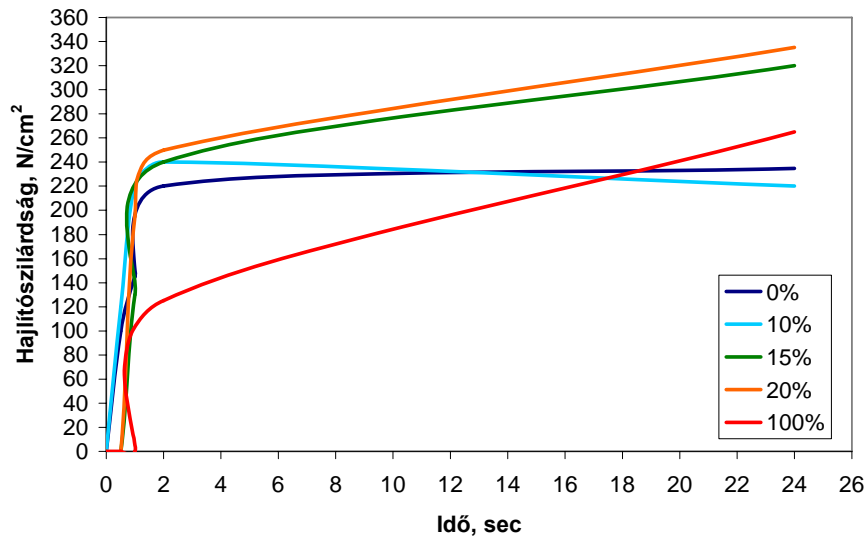
6. táblázat

A regenerátumokból készített keverékek szilárdságértékei

| | A keverés végétől számított idő, óra | | | | | | | |
|------------|--------------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0,5 | | 1 | | 2 | | 24 | |
| | H | NY | H | NY | H | NY | H | NY |
| 0 | 100 | 36 | 145 | 91 | 220 | 99 | 235 | 110 |
| 10 | 120 | 80 | 220 | 77 | 240 | 103 | 220 | 138 |
| 15 | 0 | 17 | 130 | 84 | 240 | 116 | 320 | 127 |
| 20 | 0 | 27 | 195 | 91 | 250 | 120 | 335 | 146 |
| 100 | 0 | 0 | 0 | 7,5 | 125 | 40 | 265 | 102 |

H: Hajlítoszilárdság, N/cm²
 NY: Nyírósilárdság, N/cm²

A különböző homokkeverékek kikeményedési karakterisztikáját a 19. ábra szemlélteti.

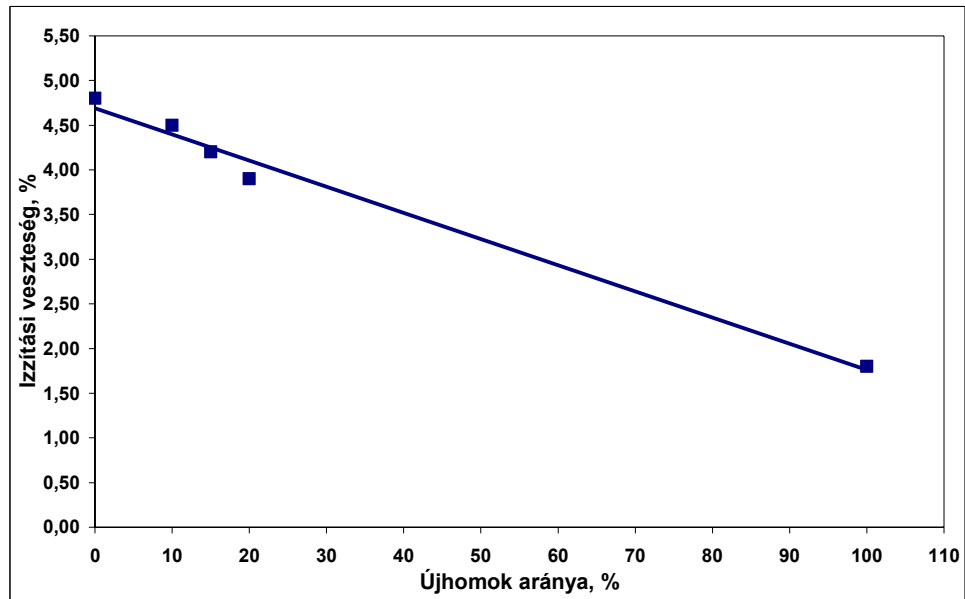


19. ábra

A hajlítószilárdság értékek változása a frissítés függvényében (Kikeményedési karakterisztika)

A 19. ábra alapján megállapítható, hogy a regenerátumot tartalmazó keverékek szilárdság felfutása igen gyors, ezzel szemben a tisztán újhomokot tartalmazó keverék görbéje lassú felfutású. A 15 és 20% újhomokot tartalmazó keverékek végszilárdsága a legmagasabb, ezért mindenképpen szükség van megfelelő mennyiségű frissítésre, hisz a tisztán regenerátumból készült keverék csak 250 N/cm²-es végszilárdságot ért el, mely 20 %-al kisebb, mint az újhomokot tartalmazó keverékek szilárdsága.

A keverékek izzítási veszteségének változását a frissítés függvényében a 20. ábra szemlélteti. Az ábra alapján megállapítható, hogy a keverékek izzítási vesztesége a frissítés mértékével csökken. Az irodalomban ajánlott felső határérték az izzítási veszteség tekintetében 4%, az e fölötti érték elkerülése érdekében hatékonyabb tisztítás szükséges, mert a magas izzítási veszteség olyan öntvényhibák kialakulásához vezethet, mint a gázhólyagosság és a penetráció [25].

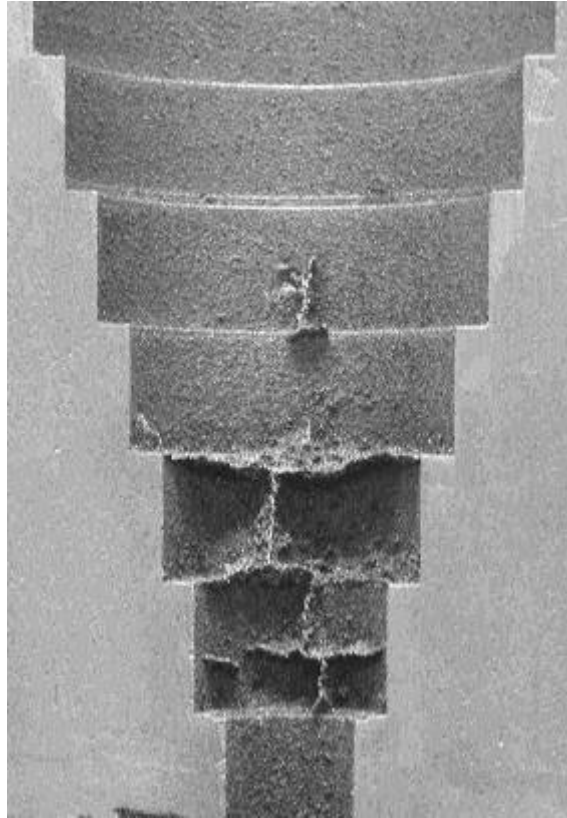


20. ábra

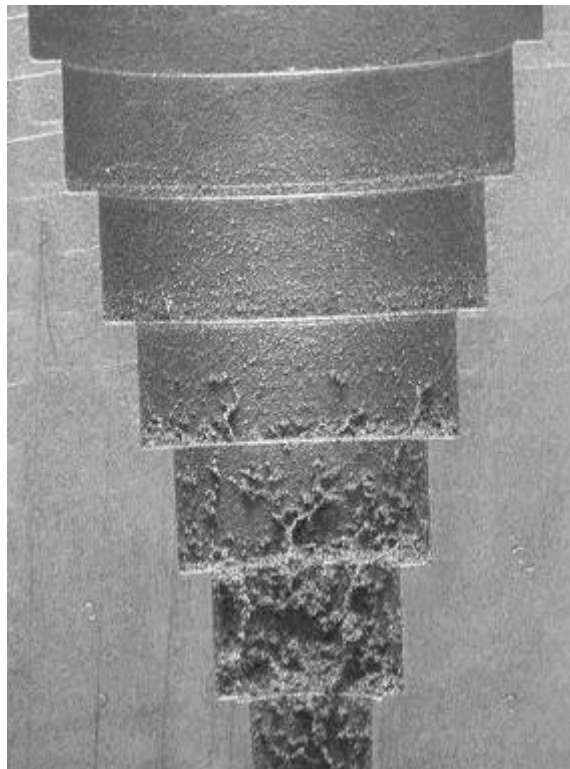
A keverékek izzítási veszteségének változása a frissítés függvényében

4.2. A penetrációs próbatetek öntése és vizsgálata

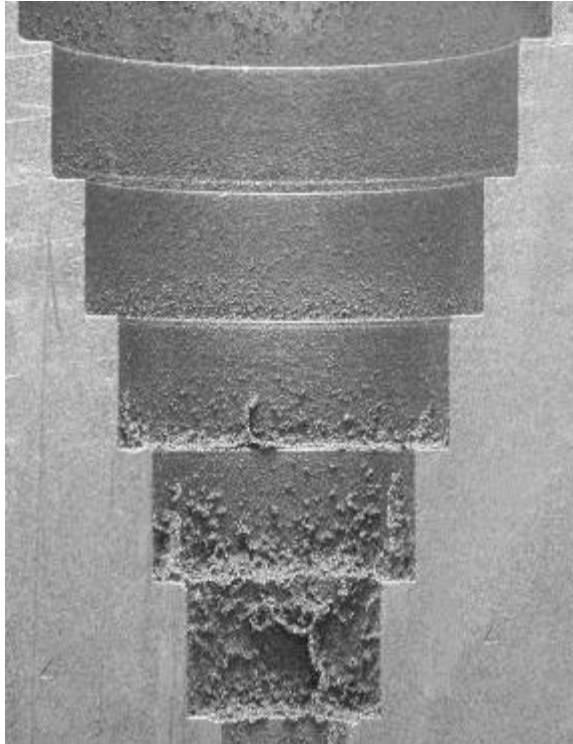
Ennek a kísérletnek az volt a célja, hogy megvizsgáljam a regenerátum mennyiségének hatását az öntvény felületi minőségére. A magkeverékek összetételét az 5. táblázatban bemutatott recept szerint állítottam össze. A forma ürítését követően a megtisztított öntvényeket a próbatest hossz tengelye mentén kettéfűrészelttem, majd a próbatestekről makrofotót készítettem. A különböző összetételű keverékekből készített maggal öntött próbatesteket a 21-24. ábra szemlélteti. A fotókon látható, hogy a mag újhomok arányának növelésével az öntvény felülete egyre tisztább. A különböző mennyiségű regenerátum felhasználásával készült öntvények felülete fáncos, és nagymértékű ráégés figyelhető meg az öntvény alsó lépcsőin. Az öntvény felső felén nem tapasztaltam olyan mértékű ráégést, mint az alsó lépcsőkön. A tiszta újhomokot tartalmazó forma esetében nem tapasztaltam ráégést.



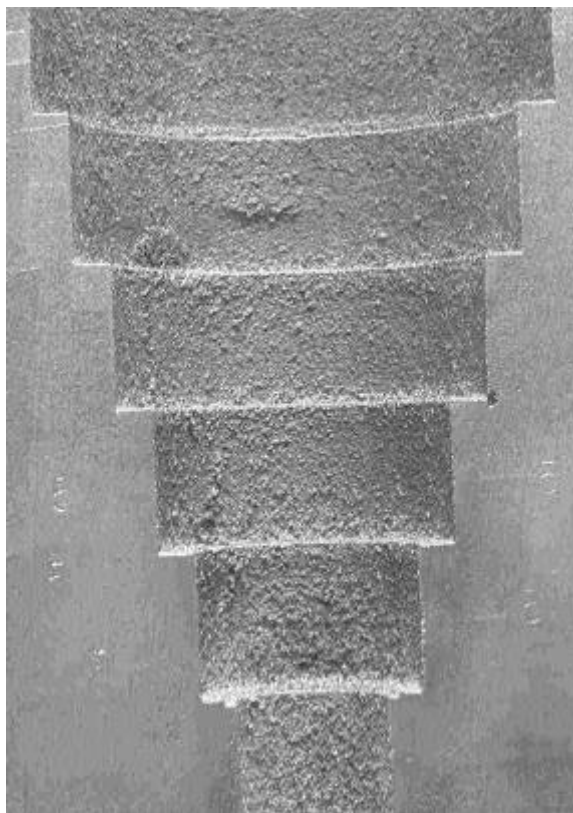
21. ábra
100% regenerátumból készített maggal öntött öntvény



22. ábra
85% regenerátumot-15% újhomokot tartalmazó maggal öntött öntvény



23. ábra
80% regenerátumot-20% újhomokot tartalmazó maggal öntött öntvény

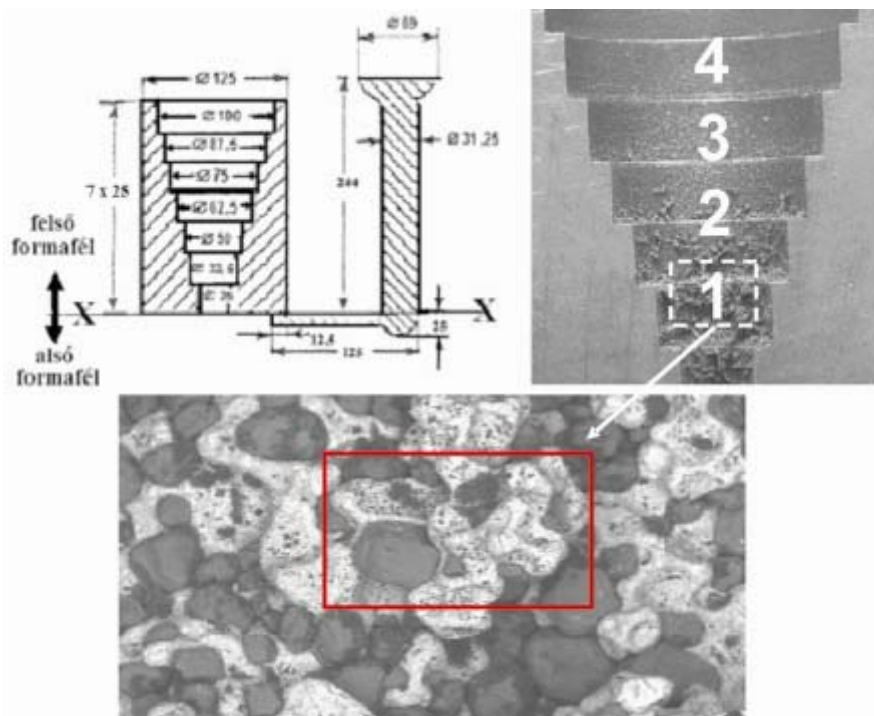


24. ábra
100% újhomokot tartalmazó maggal öntött öntvény

A ráégés okának feltárását scanning elektronmikroszkóp segítségével végeztem.

4.3. Scanning és energia diszperzív elektronmikroszkópos vizsgálatok

A scanning mikroszkópos vizsgálatokat először a nagyobb hőterhelésnek kitett öntvényrészen végeztem el. A vizsgálat célja az volt, hogy eldöntsem azt, hogy a műgyantakötésű homokforma nagyobb hőterhelésnek kitett részén a fémbehatolás melyik típusa alakult ki, (termikus ráégés, kémiai ráégés vagy penetráció), illetve az, hogy feltárjam a hiba kialakulásának mechanizmusát. A 25. ábra a lépcsős hengeres próbatestet és a vizsgált öntvényrészeket szemlélteti.

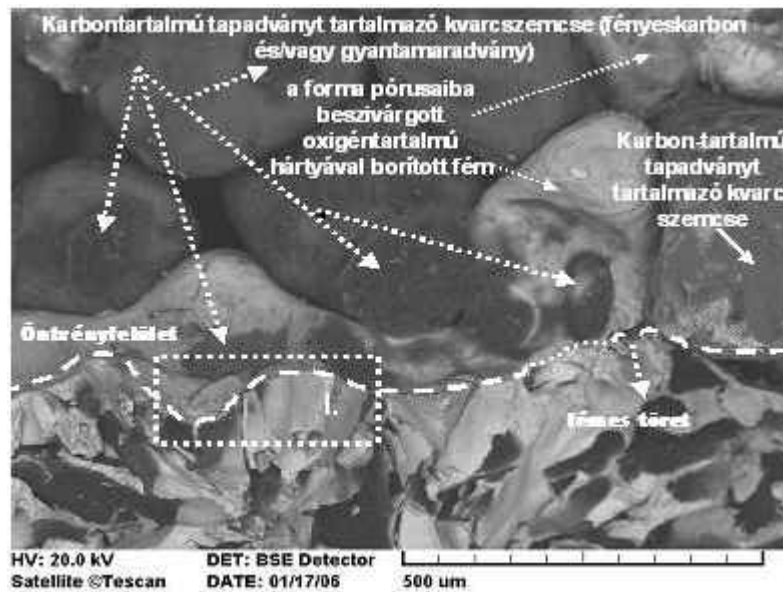


25. ábra

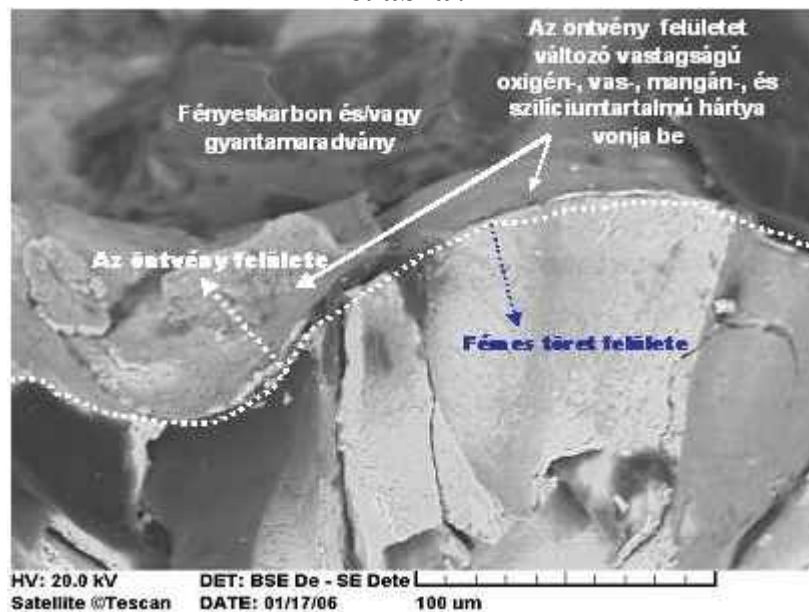
A lépcsős hengeres próbatestet képe öntési helyzetben, a mintavételi hely jelölésével, és a jelölt helyről scanning elektronmikroszkópon készített fényképfelvétellel

A formázókeverék hőterhelésének mértéke a 25. ábra „4.”-es számmal jelzett területe felől az „1.”-es számmal jelzett terület felé növekszik.

A 25. ábra „1”-es területének kinagyított képén a világosabb részek a formázóanyag pórusaiba beszivárgott fémet, a sötétebb részek a formázóanyag szemcséit mutatják. A 25. ábra piros kerettel jelölt részéről készült scanning elektronmikroszkópos felvételeket a 26. ábra szemlélteti. Az öntvény felülete pontosan követi a formázóhomok szemcséinek felületét, kivéve azokat a helyeket, ahol a fém beszivárog a forma pórusaiba. A fém felületét vékony oxigén-tartalmú hártva vonja be. Az öntvényfelületen megtapadt formázóhomok szemcséken helyenként karbon-tartalmú tapadványok láthatók, amelyek el nem égett gyanta maradványok.



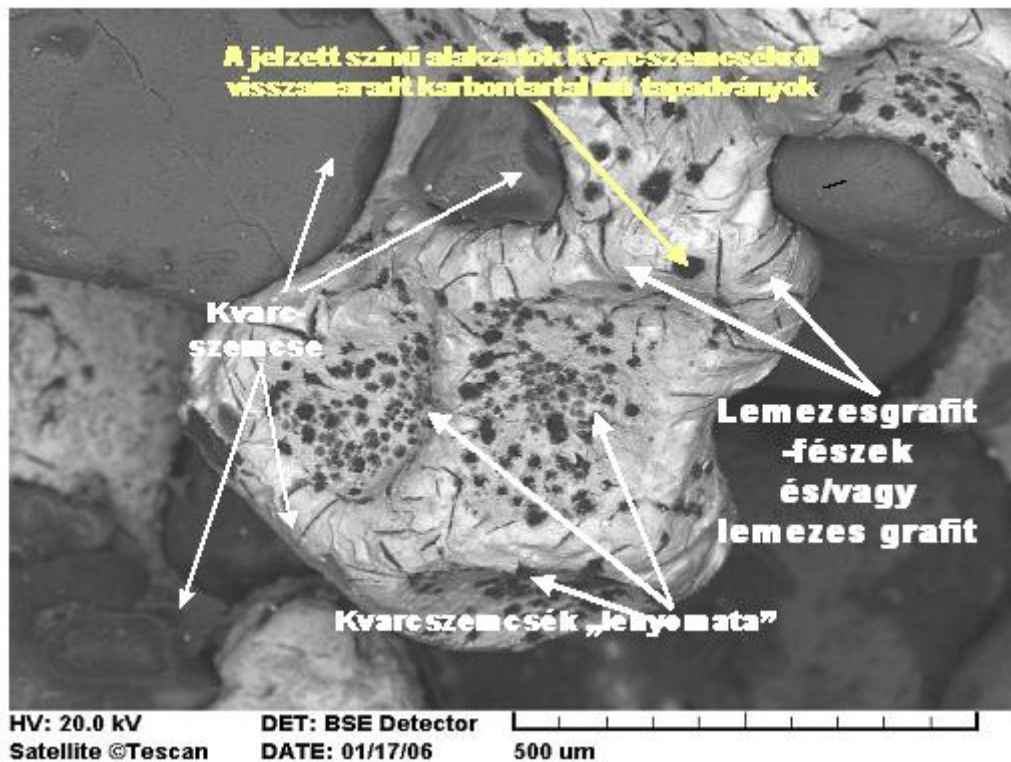
26. ábra / A



26. ábra / B

A 25. ábra piros kerettel jelölt részéről készült scanning elektronmikroszkópos felvételek

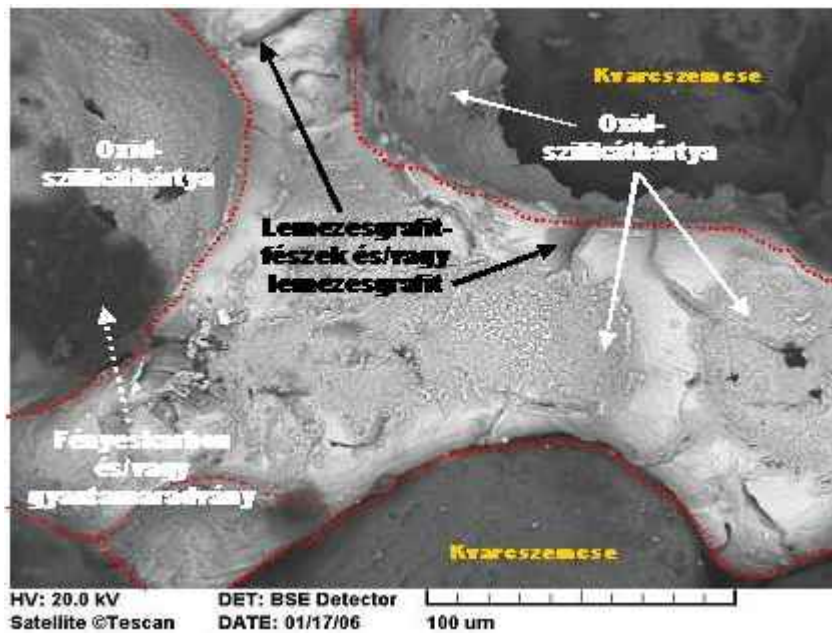
A felvételek alapján megállapítható, hogy sem a pórusokba beszivárgott fém, sem az öntvény felületét borító salakhártya és a formázóanyag szemcséi között nem játszódott le kémiai reakció. A fém csak beszivárgott a homokforma pórusaiba, és a formázóhomok szemcséit körülölelte. A kipergett homokszemcsék helyén található üregekben, a fém felületén megtalálhatók az öntés után el nem bomlott gyantamaradványok. A felvételeken megfigyelhető árkok, bemélyedések, a grafitlemezek fészkei. A 27. ábrán az is megfigyelhető, hogy a fém a formázóanyag kvarcsemmjét nem tudta tökéletesen „átölelni”, a fém folytonossága megszakadt. Ennek oka az, hogy a hőmérséklet csökkenés miatt, vagy az alacsony olvadáspontú oxidhártya lebomlásának következtében a felületi feszültség oly mértékben megnövekedett, hogy a fém nem tudott továbbhaladni a formázókeverék pórusaiba.



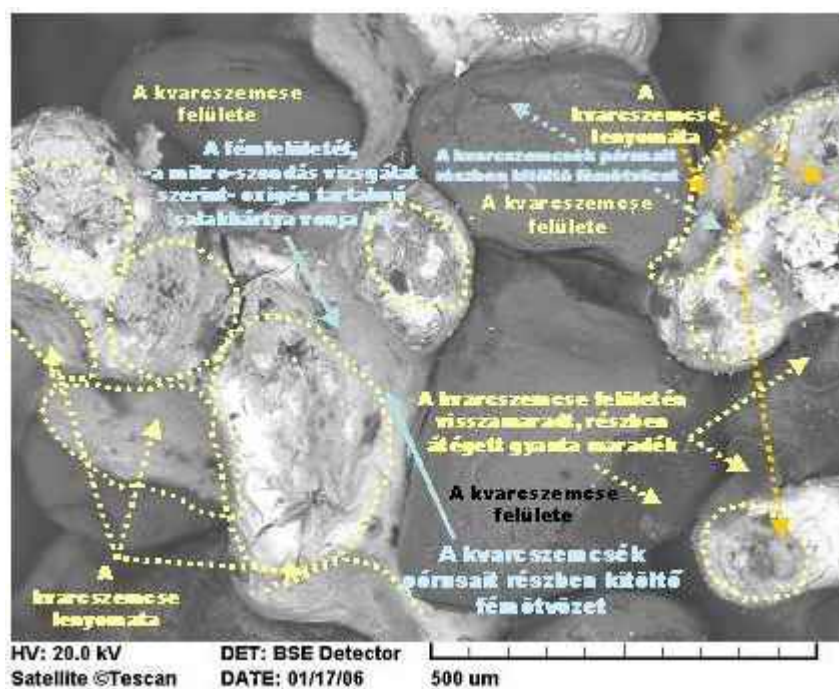
27. ábra

Penetrációs hibáról scanning elektronmikroszkópon készült felvétel

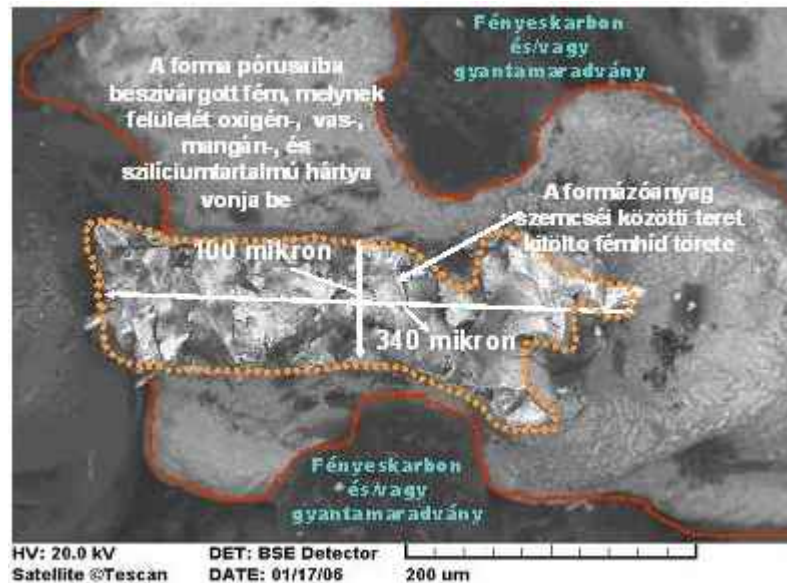
A 28-29. ábrákon jól látszik a kvarcsemmek közé behatolt fém, és a fém felületét beborító oxidhártya, mely lecsökkenti a felületi feszültséget, és ezáltal megkönnyíti a fém behatolását a forma pórusaiba.



28. ábra
A fém felületén lévő oxid-szilicát hártya



29. ábra
A kipergett kvarc szemcsék lenyomatának körvonala



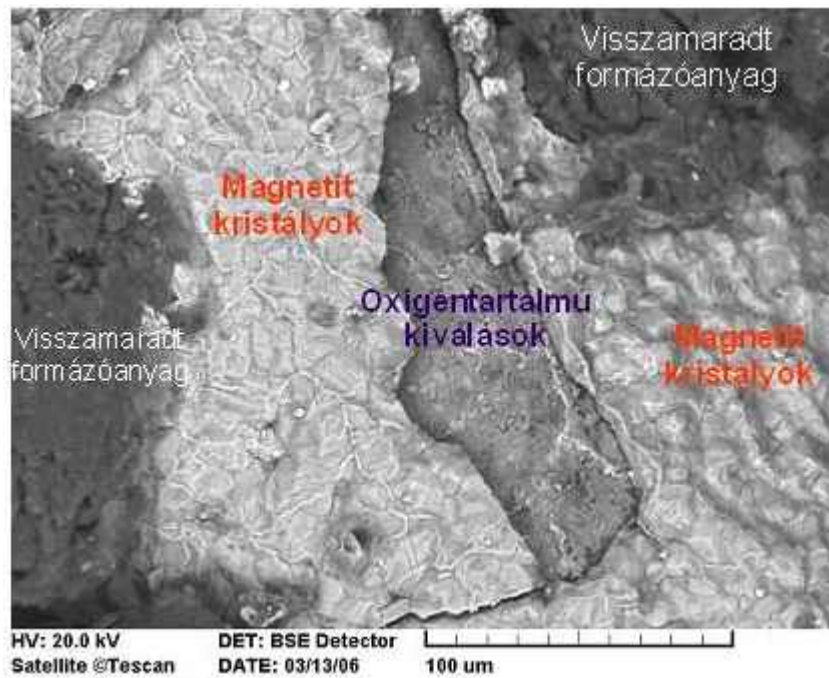
30. ábra

A forma pórusaiba beszivárgott fém keresztmetszete

A 30. ábrán egy olyan terület scanning elektronmikroszkópos felvétele látható, ahol megfigyelhető annak a csatornának a törege, amelyen keresztül a fém beszivárgott a forma pórusaiba.

A formázókeverék hőterhelésének mértéke a 25. ábra „4.”-es számmal jelzett területe felől az „1.”-es számmal jelzett terület felé növekszik, ezzel együtt változik a formázókeverék pórusaiba behatolt fém felületén kivált komplex vegyületek, főleg az oxidok morfológiája. A 25. ábra „1.”-es számmal jelzett részén a penetrálódott felületen, a hematit kristályok mellett minimális mennyiségű szilíciumot, több vasat és oxigént tartalmazó hártva jelenléte mutatható ki.

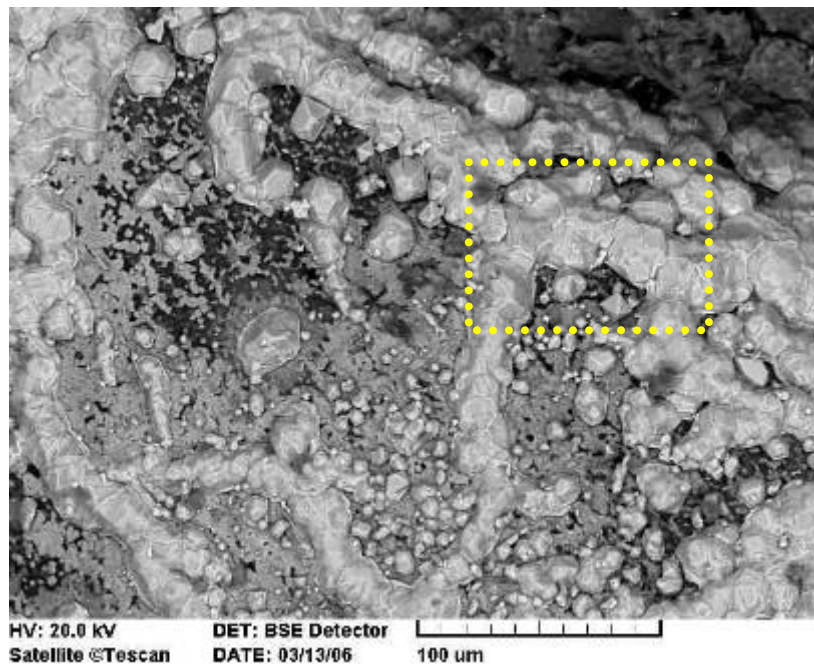
A 31. ábrán látható felvétel a 25. ábra „2.”-es számmal jelölt területéről készült. A töretről készített fénykép négy jellemző területből áll. A két sötétebb terület a mikroszondás vizsgálatok szerint, visszamaradt formázóanyagból, a kép jobboldalán látható terület a formázókeverék pórusaiba behatolt fém felületére tapadt magnetit kristályok halmazából áll. Ezen a területen a magnetit kristályok nem önálló kristályként váltak ki, hanem nagy számuk miatt inkább egy bordás szőnyeghez hasonlítható alakzatot mutatnak, de az egyes kristályok még egyértelműen felismerhetők. A kép közepén látható sötétebb felületen oxigén-tartalmú hálószerű kiválások láthatóak. Ennek a kiválásnak a bal oldalán, a felületet bevonó réteg, a spektrumképe alapján szintén magnetit.



31. ábra

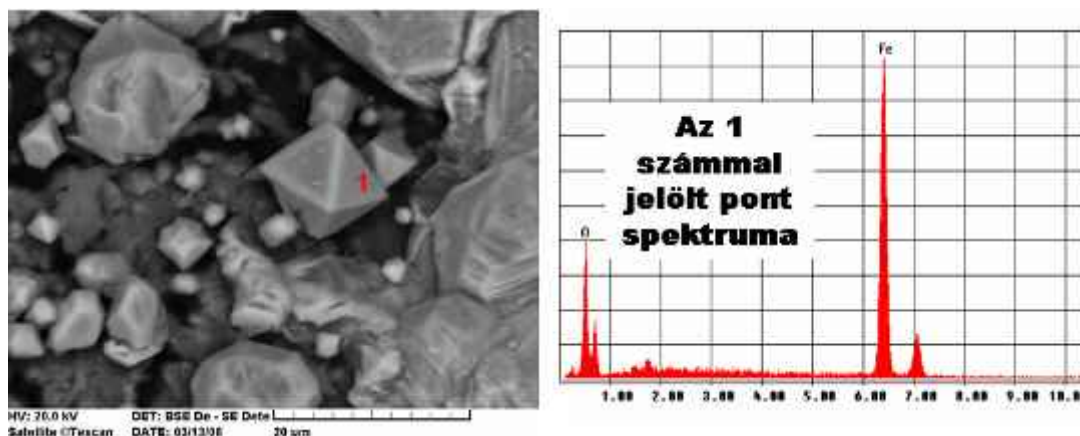
A 25. ábra „2.”-es számmal jelölt részletéről készült felvétel

A 25. ábra „3.”-as számmal jelzett területéről készült felvétel a 32. ábrán látható. Ebben az esetben a magnetit kristályok szigetszerűen és füzérekbe rendeződve helyezkednek el. A 32. ábra jelölt területrészletét és a jelzett kristály spektrumképét a 33. ábra szemlélteti, amely alapján megállapítható, hogy az elemzett kristály, magnetit kristály.



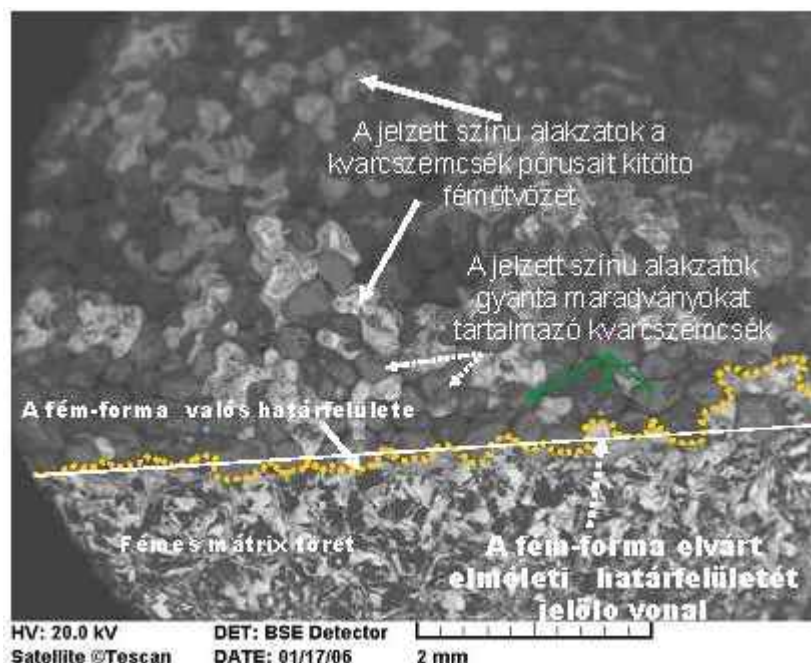
32. ábra

A magnetit kristályok füzérei



33. ábra
A magnetit kristályok spektruma

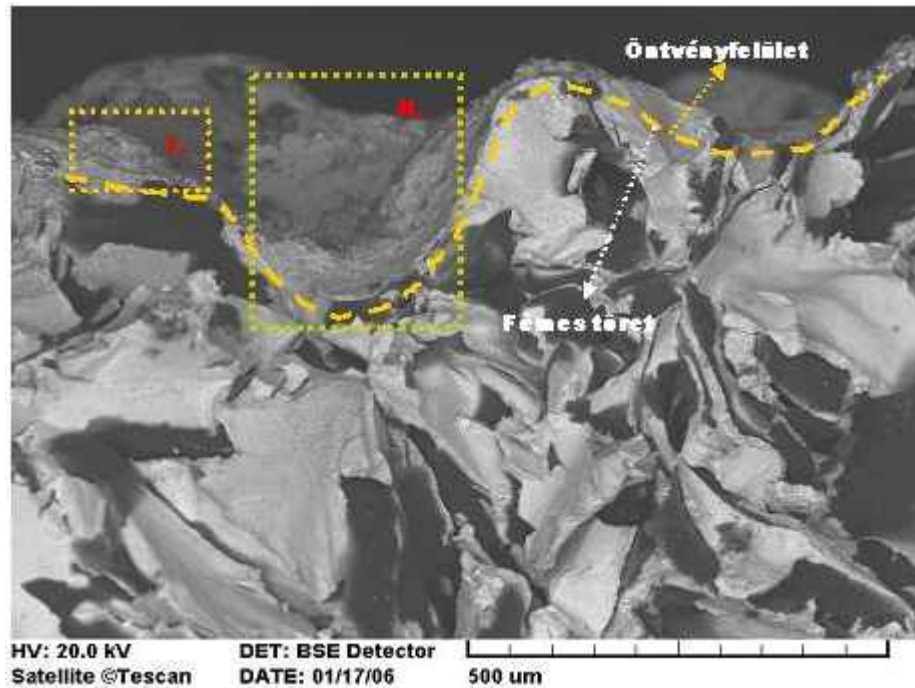
A makrotöretvizsgálatok során megállapítottam, hogy ezeken a helyeken is alapvetően a mechanikus (szivárgásos) penetráció a jellemző, nem a ráégés, tehát a fém és formázóanyag között kémiai reakció nem játszódtott le. Az eddig vizsgált töretek jellegétől, az öntvény felső részéből kivágott töretek jellege (25. ábra „4”-es területe), első ránézésre ugyan nem tér el, de a scanning elektronmikroszkópos és az energia diszperzív mikroszondás vizsgálatok érdemi különbségekre mutattak rá. A 34. ábrán a 25. ábra „4”-es területéről készült töretfelvétel látható.



34. ábra
A forma-fém jellemző határfelülete a „7 lépcsős hengeres” próbatétel felső részén („4-es terület”)

A következő 35.- 40. ábrákon a forma-fém határfelületéről scanning elektronmikroszkópon és energia diszperzív mikroszondán különböző nagyításban készített fényképfelvételek és spektrumképek láthatók.

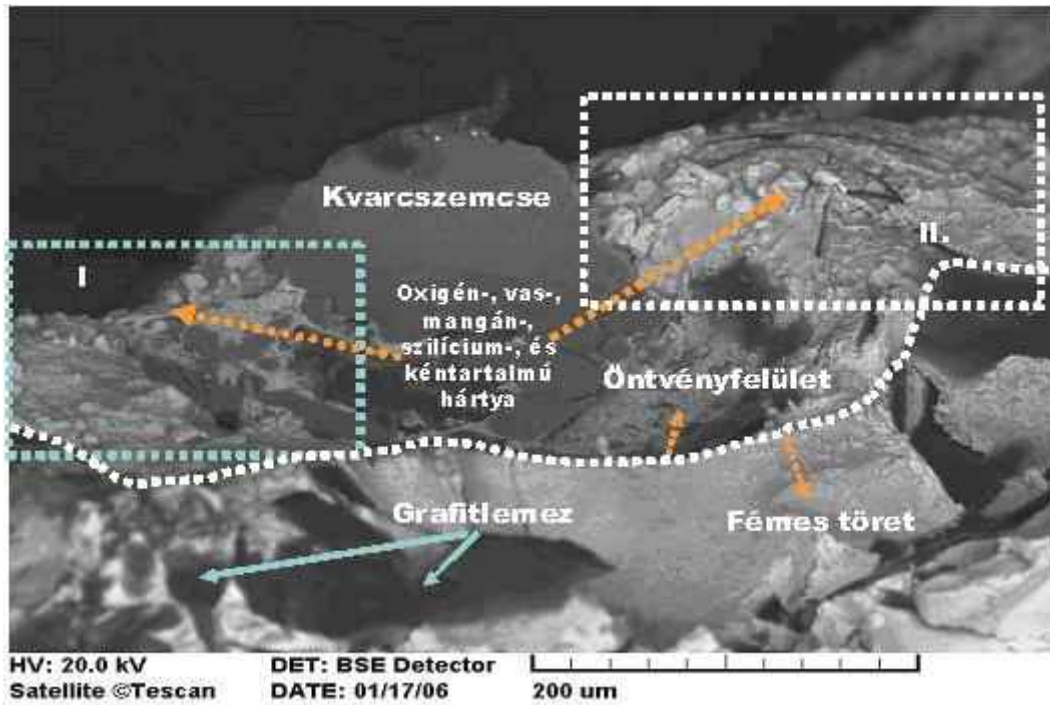
Az ábrák szerint az öntvény felső részén is jelentős fém penetráció figyelhető meg, bár lényegesen kisebb mértékű, mint az öntvény alsó részén. Az is látható a felvételeken, hogy úgy az öntvény felületét, mint a formázókeverék pórusaiba behatolt fém felületét, oxigéntartalmú hártya vonja be.



35. ábra

A 34. ábrán bemutatott töretkép részletének kinagyított felvétele

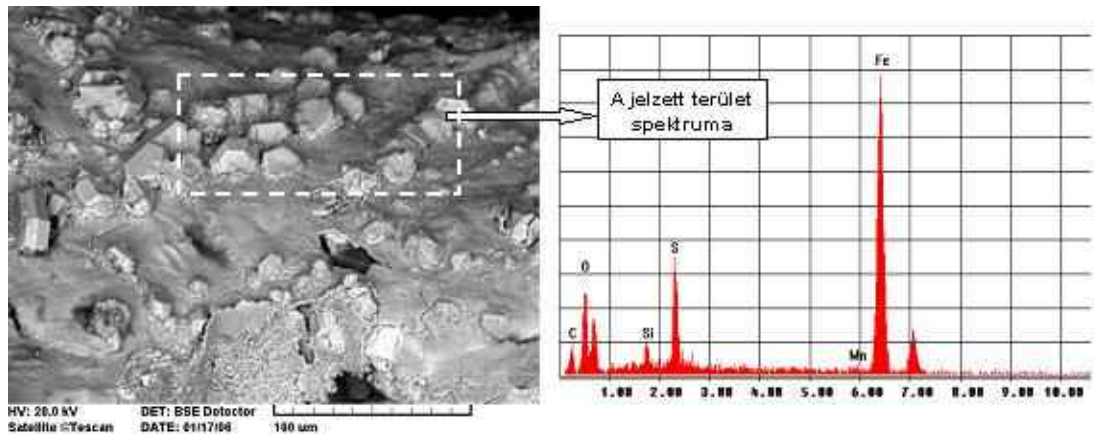
A 36.-41. ábrákon különböző nagyításban olyan felületrészlet látható, amilyenekkel az öntvény alsó részéről kivett minták vizsgálatakor nem találkoztam. Az energia diszperzív mikroszondás vizsgálatok szerint helyenként az öntvény felületén, és a formázókeverék pórusaiba behatoló fém felületén is, lényegesen nagyobb kén tartalmat tudtam a terület elemzéskor meghatározni, mint amelyet a fémes töretfelületen mértem (30. ábra)



36. ábra

A 35. ábrán bejelölt terület kinagyított részlete

A 37. és a 38. ábrákon az I.-es és II.-es számmal jelzett terület kinagyított részletei láthatók. A 37. ábra baloldalán az oxigént, szilíciumot, mangánt, és vasat tartalmazó komplex salakhártyán szabályos kristályok láthatók.

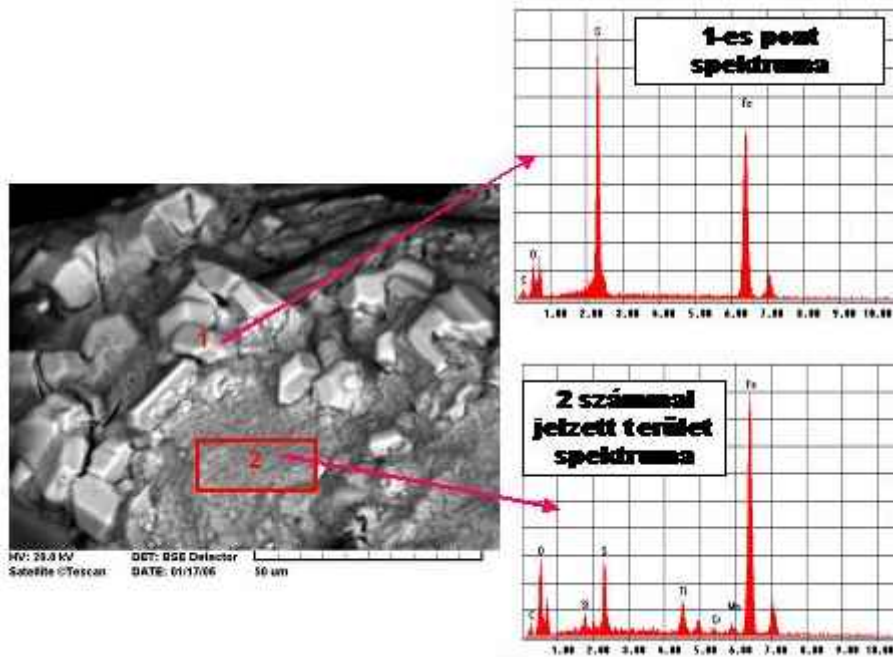


37. ábra

A 36. ábrán I. számmal bejelölt terület kinagyított részlete

A 37. ábra bal oldalán jól látható, hogy a salakhártya felületén szabályos kristályok fordulnak elő, a jobboldali képen a jelzett terület energia diszperzív mikroszondán készült spektrumképe látható. A jelzett területről energia diszperzív mikroszondán készült spektrumkép szerint a szabályos kristályok, pirít kristályok.

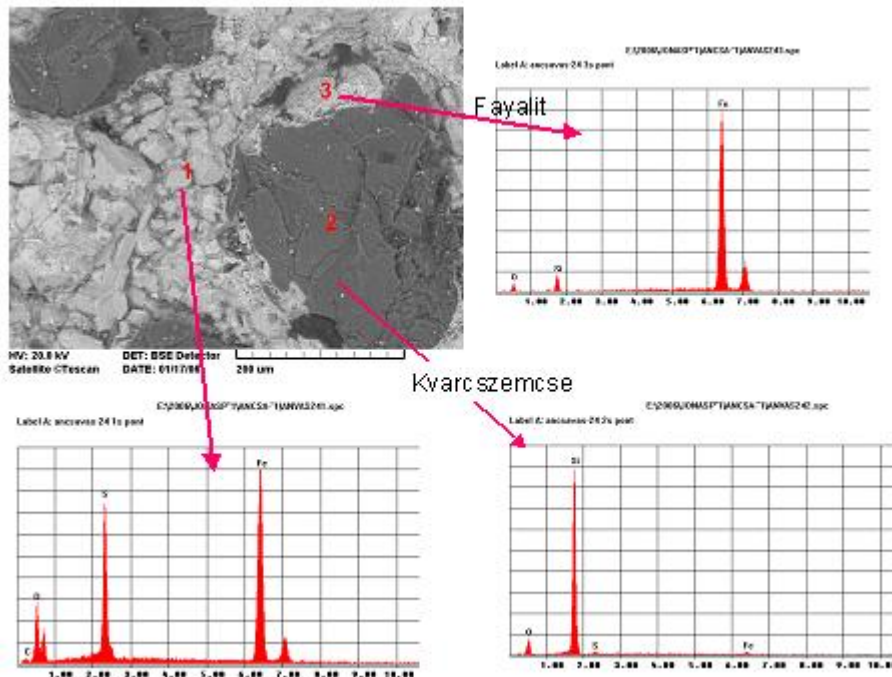
Ezt igazolja a 36. ábra II. számmal jelölt területének kinagyított részletei és az energia diszperzív mikroszondán készített spektrumok képei, melyek a 38. ábrán láthatóak. A fényképfelvételeken a szabályos kristályok az elemzések eredménye szerint piritként azonosíthatók, még a homogénnek tűnő „2.”-es számmal jelölt terület magas kéntartalma utalhat úgy oxisulfid jelenlétére, mint a szilícium-, mangán-, króm-, titán-, és nagy vastartalmú oxidhártyán(ban) diszperz eloszlású pirit jelenlétére is, ami adott körülmények között már a megoszlási hányados értékének megfelelően részlegesen oldódhat a fémbe.



38. ábra

A 37. ábrán bejelölt terület kinagyított részlete, melyen jól látható, hogy a salakhártya felületén szabályos kristályok fordulnak elő

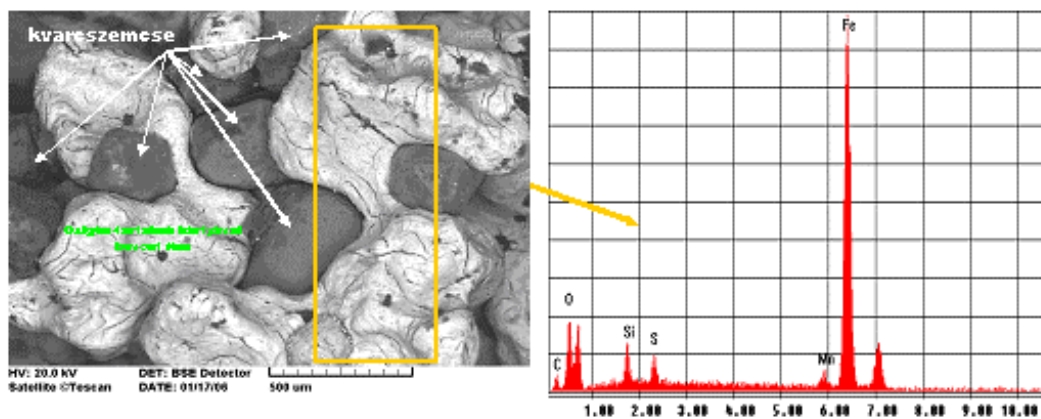
A 39. ábrán a kvarcsemcsék közötti teret kitöltő fém felületén piritkristályok halmaza és a kvarcsemcséket körülölelő fayalitot tartalmazó zónák is láthatók.



39. ábra

A kvarcsemcsék közötti teret kitöltő fém felületén piritkristályok és a kvarcsemcséket körülölelő fayalitet tartalmazó zónák spektruma

A 40. ábrán egy olyan scanning elektronmikroszkópon készült felvétel látható, ahol a kvarcsemcsék közötti teret, „a pórusokat”, olyan beszivárgó fém tölti ki, melynek felületét oxigéntartalmú hártva vonja be. Az ábra jobb oldalán a töretfelület jelzett területéről készült spektrumképen látható, hogy az oxigén, a szilícium, a mangán és a vas mellett a pórusokba beszivárgó fémekben jelentős mennyiségű kén is található.

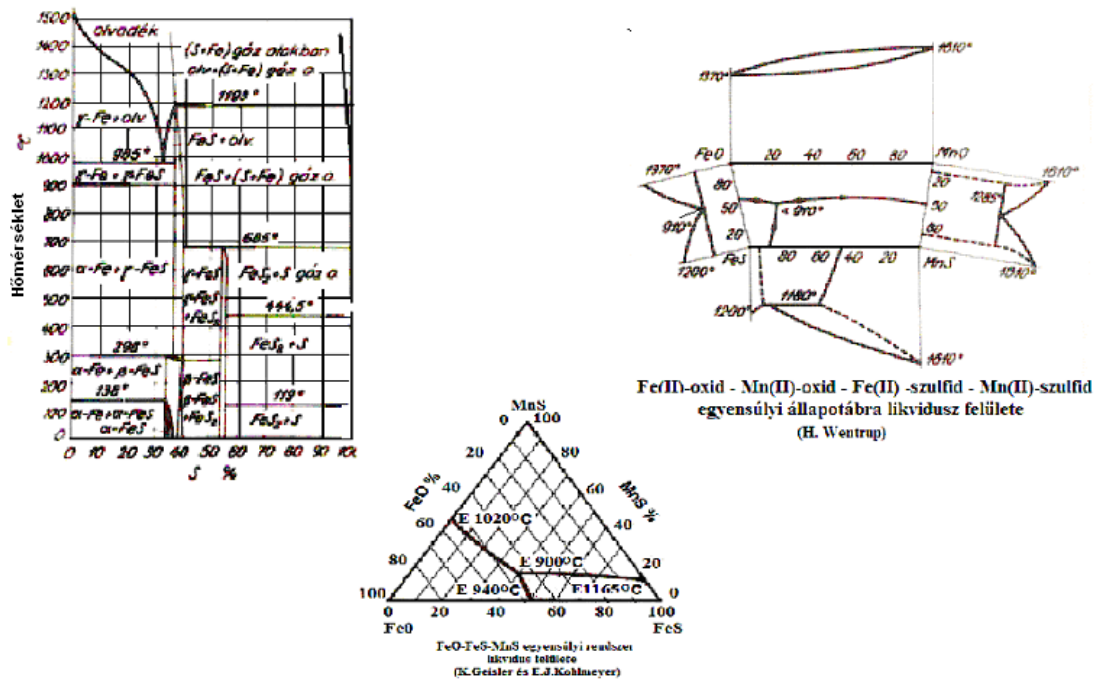


40. ábra

A pórusokba beszivárgó fém spektruma, ami jelentős mennyiségű kén tartalmaz

A forma-fém határfelületen kimutatott magas kéntartalmú vegyületeknek a penetráció ilyen típusú kialakulásában jelentős szerepe van. A

Fe-S egyensúlyi diagram, a FeO-MnO-FeS-MnS, továbbá a FeS-FeO-MnO egyensúlyi diagramok likvidusz felületei (41. ábra) alapján megállapítható, hogy megvan annak a lehetősége, hogy a formázókeverékben képződő kénvegyület és a formázókeverék pórusaiba beszivárgó fémolvadék felületén átmeneti kémiai reakciók („trégerreakciók”) játszódjanak le. Ezen reakciók reakcióterméke a fémnek a póruscsatornába történő behatolásakor, – néhány mikron vastagságban – alacsony olvadáspontú, és kis felületi feszültségű hártát eredményez. Ez a hártya jelentős mértékben csökkentheti a fém behatolási nyomásának küszöbértékét. A 41. ábra nagyított verziója a Mellékletben 2. számú ábraként található.



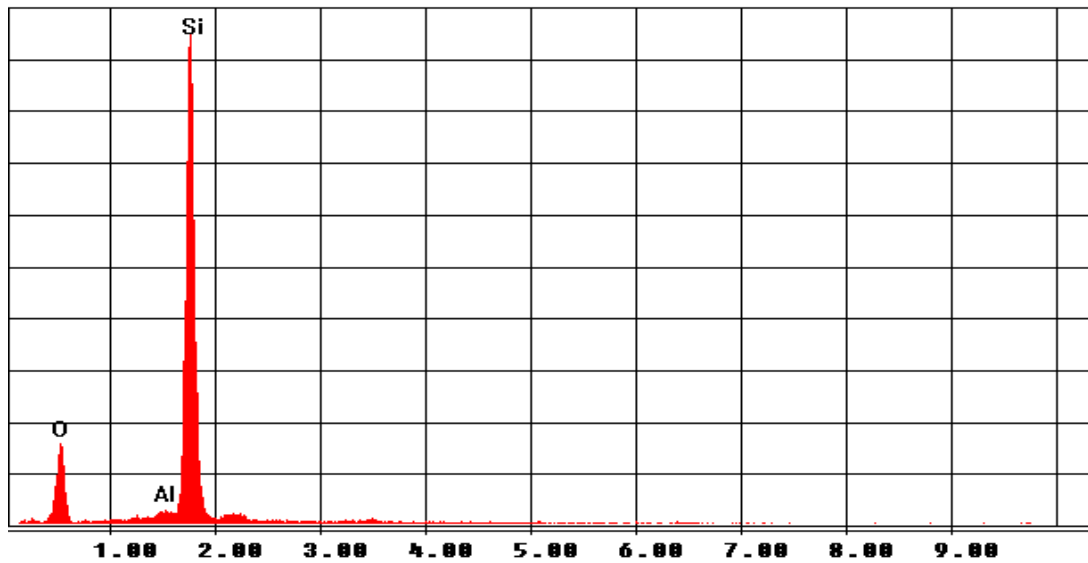
41. ábra

A Fe-S, a FeO-MnO-FeS-MnS, továbbá a FeS-FeO-MnO egyensúlyi fázisdiagramok [28]

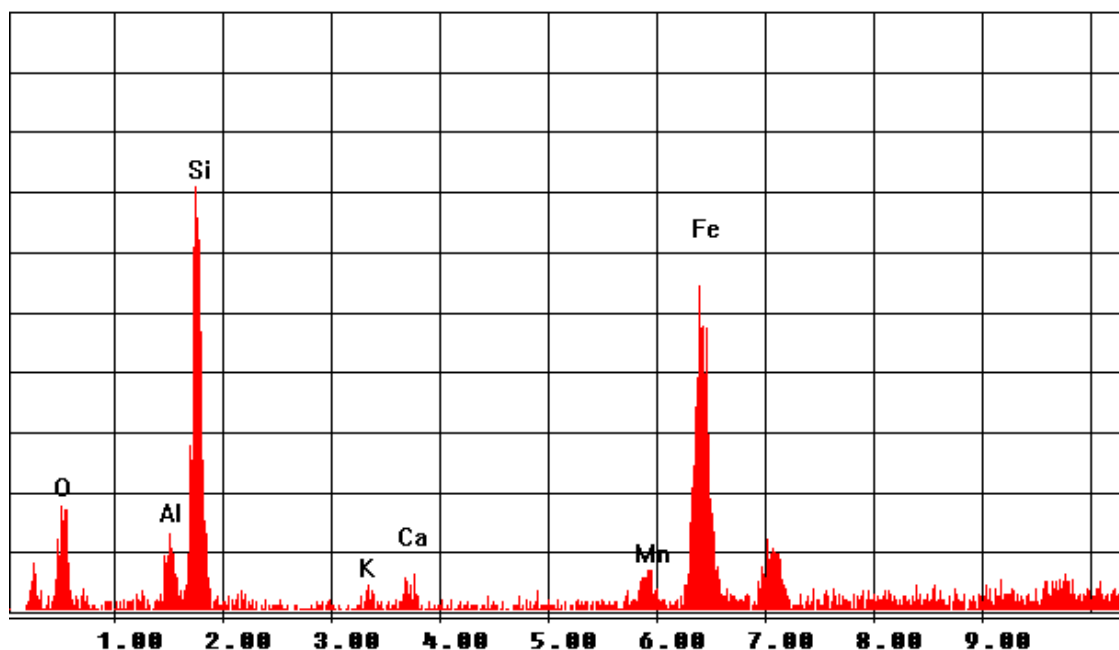
Ahhoz, hogy igazolni tudjam a forma-fém határfelületén lévő nagy mennyiségű kén eredetét, megvizsgáltam a formázóanyag összetételét és a felületét is, melyet a 42-44. ábrák szemléltetnek.



42. ábra
Az újhomok szemcseösszetétele



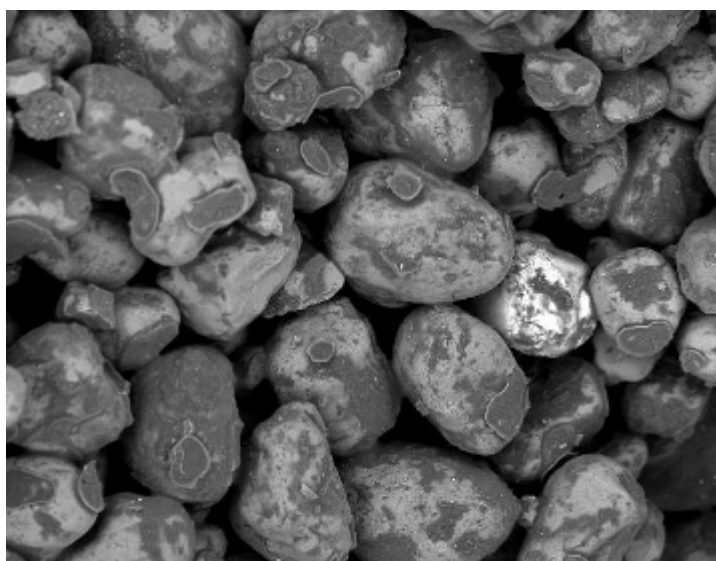
43. ábra
A 42. ábrán lévő 1. pont spektruma



44. ábra

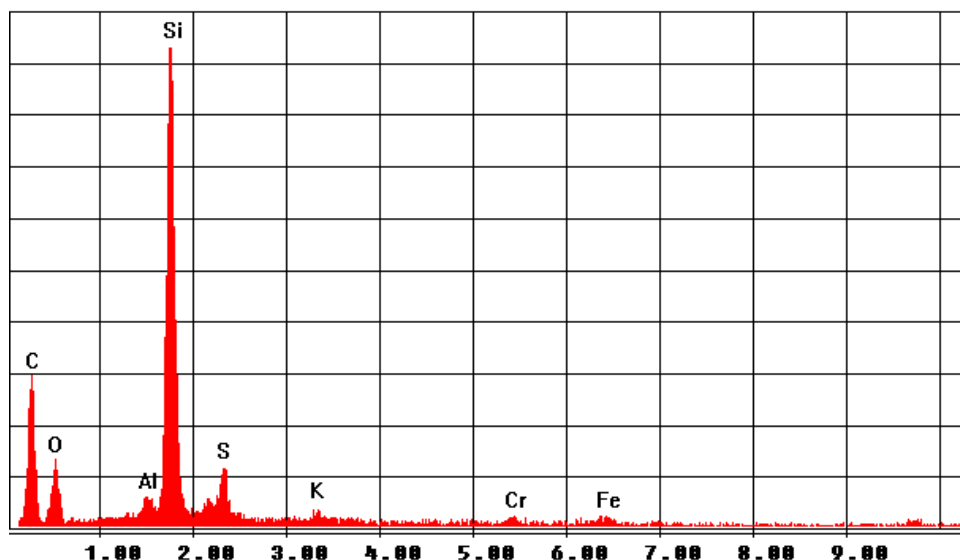
A 42. ábrán lévő 2. pont spektruma

Az újhomok szemcséje gömbölyű, nem töredezett, azonban ha nagyobb nagyításban megvizsgáljuk, felületét helyenként barázdák borítják és a 42. ábra jobb oldali ábráján a 2. pont olyan egyéb kiválásra utalhat, amit a homokszemcse már eredetileg is hordoz. A homokszemcse felülete alumíniumban, káliumban és vasban gazdag. A barázdáknak a kötőanyag felvétel szempontjából van jelentősége, hisz a kötőanyag a szemcsékre való felvitelekor ezeket a barázdákat tölti meg. A 45. ábrán a regenerált homokot tartalmazó keverék mikroszkópos felvételét mutatom be:



45. ábra

A regenerált homokot tartalmazó keverék mikroszkópos felvétele



46. ábra

A regenerált homokot tartalmazó keverék spektruma

A 45. ábra alapján elmondható, hogy a regenerált homok szemcséin nagy mennyiségű, a nem megfelelő regenerálásból származó gyanta tapadvány található, és az is látható, hogy a homokszemcsék közötti kötőhidak sem alakultak ki megfelelően.

A 46. ábrán a regenerált homokot tartalmazó keverék spektruma látható. A spektrum egyértelműen jelzi az előzőekben már ismertetett reakciókat kiváltható elemeket úgy mint a karbon, ami a gyantából ered, és a nagy mennyiségű kén, ami pedig a formázókeverék katalizátorából származik.

A regenerált homok kéntartalmát elégetéses jodometrikus módszer segítségével is meghatároztam [29]. A homok kéntartalma 0,224% volt. Ez a magas érték is azt bizonyítja, hogy a homokszemcséken regenerálás után nagy mennyiségű kötőanyag maradvány maradt, amiből a felszabaduló kén hozzájárult a penetráció kialakulásához.

A "7 lépcsős hengeres" próbatest nagyobb hőterhelésnek kitett alsó részéből kivett próbatöret vizsgálata során a kéntartalmú vegyületeket nem találtam meg, mert a hosszabb dermedési idő, és az 1100°C feletti hőmérsékleten való tartózkodás lehetővé tette, hogy ezek a vegyületek a fémbe oldódjanak. Más megfogalmazás szerint, a vizsgált töretek esetén a nagyobb mértékű penetráció – fémbeszivárgás – ott volt, ahol a vizsgálat során nem találtam meg a kénvegyületeket a forma-fém határfelületén a fémet borító salakhártyában, csak a kvarcsemmek felületén. Mondhatjuk azt is, hogy adott esetben, a kisebb mértékű penetrációra – fémbeszivárgásra – akkor kerül sor, amikor a kénvegyületek még megtalálhatók az öntvény felületét borító oxigéntartalmú salakhártyában, mert nem voltak adottak a termodinamikai és reakciókinetikai feltételek a beoldódásukhoz. A fém felületére került kénvegyületből a kén – ha, a feltételek adottak –, oldódik a vasban. A napi üzemi tapasztalatok szerint a formázókeverékből oldódott kéntartalom hatása közvetve kimutatható.

4.4. Összefoglalás, új tudományos eredmények

1. Vizsgálataimmal bebizonyítottam, hogy amennyiben a formázóanyagok elegendő - esetünkben 0,224% - kéntartalma van, öntöttvas öntvény gyártásakor ez a kéntartalom oldódhat a fém-forma határfelületén a fémbe megfelelő feltételek (1.a) esetén és elősegíti a penetráció létrejöttét, más feltételek esetén (1.b) azonban nem oldódik a fém felületi rétegében, így nem hat közvetlenül a penetrációra.
1. a Az általam alkalmazott lépcsős hengeres próbán a scanning elektronmikroszkópos és mikroszondás vizsgálatok segítségével megállapítottam, hogy ha a homokszemcsék felületén kéntartalmú gyanta és katalizátor maradványok találhatók, a pórusokba beszivárgó öntöttvas határfelületén néhány mikron vastagságban kis felületi feszültségű és a vizsgált öntöttvas olvadáspontjához képest alacsonyabb olvadáspontú hártya keletkezik. Ez a hártya csökkenti a fém behatolási nyomásának küszöbértékét. Ez a jelenség a próbatest nagyobb hőterhelésnek kitett részén figyelhető meg, esetünkben a próbatest alsó lépcsőjén.
1. b Megállapítottam, hogy ugyanezen homokkeverék esetén, a próbatest felső részén, ahol a vizsgált formázókeveréket kisebb hőterhelés érte, az öntvény felületi oxidrétegében pirit kristályok keletkeztek, és a kén nem oldódott be az öntvény felületi rétegébe.

5. Termikusan regenerált homokok hatása a mag meleg deformációjára

5.1. Bevezetés

Napjainkban fontos vevői elvárás a méretpontos öntvények gyártása. A formázás és magkészítés szempontjából cél a formák és a magok méreteinek biztosítása, ezért nagyon fontos a különböző kötőanyagrendszerek magas hőmérséklettel szembeni viselkedésének ismerete, hiszen a különböző típusú formázókeverék rendszerek eltérő módon viselkednek öntés és dermedés alatt. Ha vékonyfalú magokról beszélünk, akkor előtérbe kerül a mag deformációs képességének vizsgálata, hiszen a nagy dilatációra hajlamos formázóanyagok olyan öntvényhibákhoz vezethetnek, amelyekkel nem tudjuk tartani az öntvény méretpontosságára vonatkozó előírásokat. Ilyen lehet például a hengerfejöntvényeknél az előöntött olajcsatorna magja, melynél 5-10 mm átmérőhöz akár 3-400-milliméteres hossz is tartozhat. Ezek a magok nagyon érzékenyek a dilatációból eredő törésekre, és egyetlen ilyen mag teljes vagy részleges törése olyan, nem javítható selejttípust eredményez, melynek következtében az egész hengerfej felhasználásra alkalmatlanná válik. Szakirodalmi kutatások számos magkészítési eljárással foglalkoztak a meleg deformáció tekintetében, azonban a hot-box magok viselkedését mélyrehatóan nem vizsgálták. A hot-box eljárással készült magokra főként autóiipari öntvényeknél (pl. hengerfejöntésnél) van szükség, mely magoknál az egyik legfontosabb kritérium a méretpontosság. A maghomokokat öntés és ürítést követően regenerálják és újrahasznosítják, ezért az volt a célom, hogy a hot-box eljárással készült magok esetén, különböző kötőanyagrendszer és eltérő gyártástechnológia mellett megvizsgáljam a regenerált homok meleg-deformációs tulajdonságait.

5.2. Irodalmi áttekintés

A forma és magkészítési technológiák fejlődése során napjainkra sikerült elérni, hogy a magok és a formák szilárdsága, keménysége és stabilitása szobahőmérsékleten az előírásoknak megfelelő legyen, azonban a magok és a formák stabilitása igazán az öntés és a dermedés folyamata alatt kérdéses. A magok hőtágulása, deformációja, törése, öntés alatt a kötőanyagtípustól, és a felhasznált tűzállóanyagtól függ. A különböző magokhoz felhasznált homokok jelentős dimenzionális változáson mennek keresztül az olvadék hő- és mechanikai igénybevételének hatására. A magoknak és a formáknak az öntés során ezen igénybevételeknek kell ellenállniuk. A különböző kötőanyag típusok deformációs jellegzetessége más és más. Ha a kötőanyagrendszer nem kellően stabil, akkor megvan annak a lehetősége, hogy a formázókeverék öntés közben tágul. A formaüreg deformációja a hőtágulásnak és a folyékony fém nyomásának köszönhető. A kötőanyag típuson kívül más egyéb paraméter is befolyásolja a méretpontosságot úgy mint a beömlő rendszer kialakítása, a fém hőmérséklete, az öntési sebesség, az olvadékkezelés és a forma tömörsége.

A fentiek alapján, az előírásoknak megfelelő öntvényminőség biztosítása érdekében fontos ismernünk a különböző homok/kötőanyagrendszerek termo-mechanikai tulajdonságait.

A gyártás során felmerülő fontosabb kérdések:

- Hogyan tágulnak ezek a rendszerek?
- Hogyan alakulnak ki a deformációs hibák (krakkolódással vagy plasztikus deformációval)?
- Képződik e jellegzetes füst a termikus degradáció alatt a kötőanyagból?
- Van e termikus hatása, ha a magok és formák különböző kötőanyagait összekeverjük [30, 31].

5.2.1. A magok hőtágulását és deformációját befolyásoló tényezők

A magok és formák hőtágulása – különösen a műgyanta kötésű technológiák esetén – hajszálrepedések és törések kialakuláshoz vezethet. A hibát – hajszálrepedés esetén – kifejezett fémkitüremlés jelzi, amelynek elhelyezkedése megfelel a magban előforduló repedéseknek. A forma megtöltése közben a mag felületi rétegeiben repedések keletkeznek, amelyekbe aztán a fém behatol. A mag belseje – újhomok esetén – eléri a kvarc átalakulási hőmérsékletét, ami a külső rétegben húzófeszültséget idéz elő. Ha ebben a pillanatban, ennek a rétegnek a kötőanyaga kiég, vagy részben rideggé válik, akkor repedések keletkeznek, és amint ezek a repedések kinyílnak, a fém behatol ezekbe a résekbe [2]. A 7. táblázat a magok és a formák tágulását befolyásoló tényezőket tartalmazza.

7. Táblázat

A formák és magok hőtágulását befolyásoló tényezők[32]

| Formázóanyag tulajdonságainak hatása | Formakészítés | Öntés/Dermedés |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Szemcsenagyság • Szemcseeloszlás • Homoktípus • A szemcsék alakja • A szemcsék hőtágulása • A homok termofizikai tulajdonságai • Az adalékanyagok típusa és mennyisége • A kötőanyag típusa • A kötőanyag mennyisége | Tömörítés intenzitása <ul style="list-style-type: none"> • Formatömörtség • Sűrűség eloszlás | <ul style="list-style-type: none"> • A beömlőrendszer kialakítása • Öntési hőmérséklet • Formafal/Olvadék kölcsönhatások |
| | Kikeményedési feltételek <ul style="list-style-type: none"> • Hőmérséklet, Idő • Kikeményedési sebesség • Kikeményítés mértéke • Tárolási idő (magszekrényben, raktárban) | |

5.2.1.1. Az alaphomokok hőtágulása

Az öntészeti formázóanyagok alapvetően kvarchomokból és kötőanyagból állnak. A kvarcnak több módosulata ismeretes, mely egy meghatározott hőmérsékleti tartományban állandó. Az átalakulás lehet reverzibilis és irreverzibilis. A kvarc átalakulásait a 47. ábra szemlélteti.

A különböző kvarc módosulatok és a fajsiük változásai

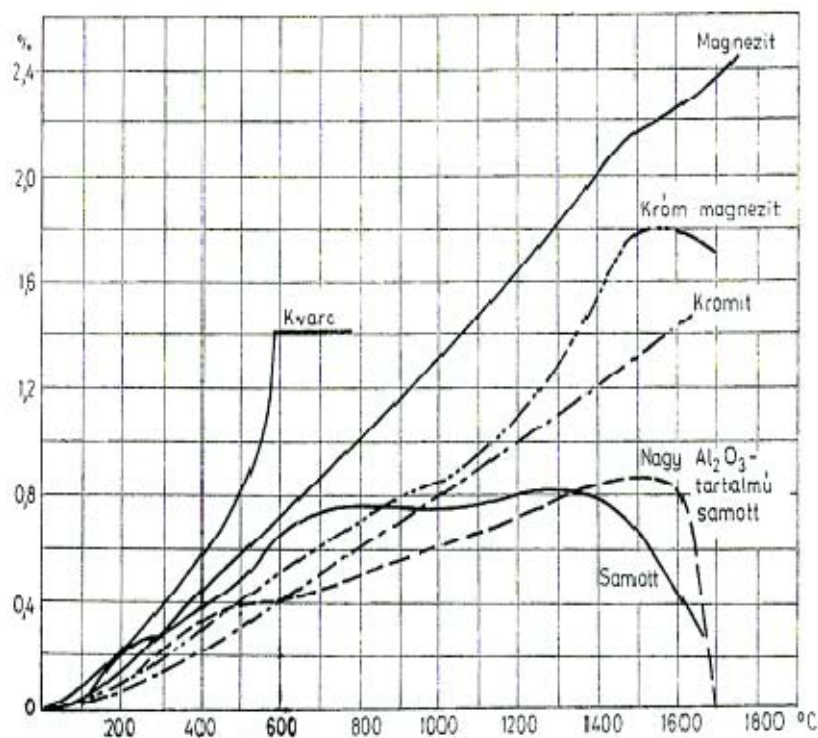
| | | | | | |
|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------|
| Térfogat-változás | + 0,8% | + 16% | nincs jelentős | nincs jelentős | |
| Fajsúly g/cm ³ | 2,65 | 2,53 | 2,19 | 2,21 | 2,20 |
| Módosulatok | β kvarc | ↔ α kvarc | → α Tridimit | → β krisztoballit | → kvarcúveg |
| Átalakulás hőmérséklete | 573 ^o C | 870 ^o C | 1470 ^o C | 1725 ^o C | |
| | reverzibilis | irreverzibilis | irreverzibilis | irreverzibilis | |
| Különböző átalakulások | | β Tridimit | | β krisztoballit | |
| Térf. változás | | + 0,2% | | + 2,8% | |
| Fajsúly g/cm ³ | | 2,23 | | 2,32 | |
| Átalakulás hőmérséklete | | 163 ^o C | | 230 ^o C | |
| | | γ Tridimit | | | |
| | | + 0,2% | | | |
| | | 2,26 | | | |
| | | 117 ^o C | | | |

47. ábra

A kvarc különböző hőmérsékleten történő átalakulásai [14]

A kvarc a hőmérséklet növekedésével fokozatosan tágul. Két nagyobb térfogatváltozással járó átalakulása van. Az első 573^oC-on, amikor a β kvarc átalakul α kvarccá (0,8%) és 870^oC-on, amikor az α kvarc alakul át α Tridimitté (16%). E fölött a hőmérséklet fölött az átalakulások során már nincs számottevő térfogatváltozás, és lehűléskor sem megy végbe jelentős mértékű zsugorodás, mert a Tridimit átalakulása irreverzibilis. A finomabb szemcsés homokok, és az új, nyers bányahomok mindig nagyobb mértékben tágulnak, mint az öntödei körfolyamatban lévő homok, mert ezek még nem estek át az allotróp átalakuláson [14].

A hőmérsékletnövekedés hatására a különböző típusú homokok különböző mértékben tágulnak, amit a 48. ábrán láthatunk.



48. ábra

Különböző tűzálló anyagok hőtágulása [22]

A 48. ábra alapján elmondható, hogy a különböző tűzálló anyagok hőtágulása és a görbék lefutása is eltérő. A hőtágulás szempontjából a legkedvezőbb a samott homok, mert nagyobb a tűzállósága, mint a leggyakrabban használt kvarchomoké, és a hőtágulása is kisebb és egyenletesebb. Leginkább nagy falvastagságú vas- és acélöntvények gyártásához használják [22].

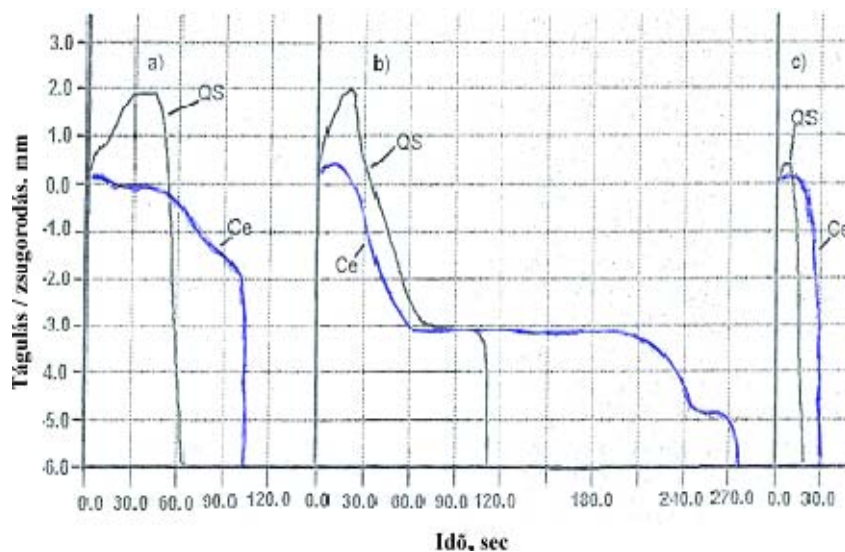
A formázókeverék szemcseösszetétele tekintetében elmondható, hogy nagyobb egyenletességi fok esetén a kvarc szemcsék, az allotróp átalakulás során nagyobb feszültségnek vannak kitéve, míg a kisebb egyenletességi fok esetén az átalakulás, a szemcsés mátrix egészében egyenletes eloszlású.

A forma hővezető képességének is jelentős szerepe van. Nagyobb hővezető képességű forma esetén a feszültségkülönbségek kisebbek, a hő gyorsabban vezetődik el, és ezáltal az olvadék is gyorsabban dermed meg [32].

5.2.1.2. A kötőanyag típusának és mennyiségének hatása a tágulási hajlamra

A különböző típusú kötőanyagok eltérő módon viselkednek, különösen a hőre lágyulás és a melegszilárdság tekintetében. A próbatestek tágulása a kötőanyaghidak szilárdságcsökkenése, lágyulása és zsugorodása révén kiegyenlítődik, sőt negatív értéket is fölvehet. A különböző gyanták szilárdságcsökkenése különösen a műgyantakötésű homokok esetén eltérő mértékű. Ezt a magok meleg-deformációs viselkedése mutatja. A különböző kötőanyagok kétféle módon veszíthetik el kötőképességüket. Furángyanta esetén a rideg kötőanyaghidak megszakadhatnak, cold-box gyanták esetén pedig a gyanta olyan gyorsan meglágyul a nagymértékű termikus igénybevétel hatására, hogy a magok melegszilárdsága lecsökken. A gyanták termikus stabilitása kicsi, így öntéskor gyors szilárdságcsökkenés következik be. A termikus igénybevétel a gyantahidakat összezsugorítja. A deformációs tulajdonságokra hatással van még a kötőanyaghidak hossza, a kötőanyag tartalom, és a kötőanyag maradvány mennyisége is [33].

A 49. ábrán különböző típusú formázóanyagok meleg deformációs görbéjét láthatjuk: QS: kvarchomok, Ce: Cerabeads (kerámia bázisú) homok



49. ábra

Különböző formázóanyagok meleg deformációs viselkedése: a, resol-CO₂; b, héjhomok; c, PUR-CB [32]

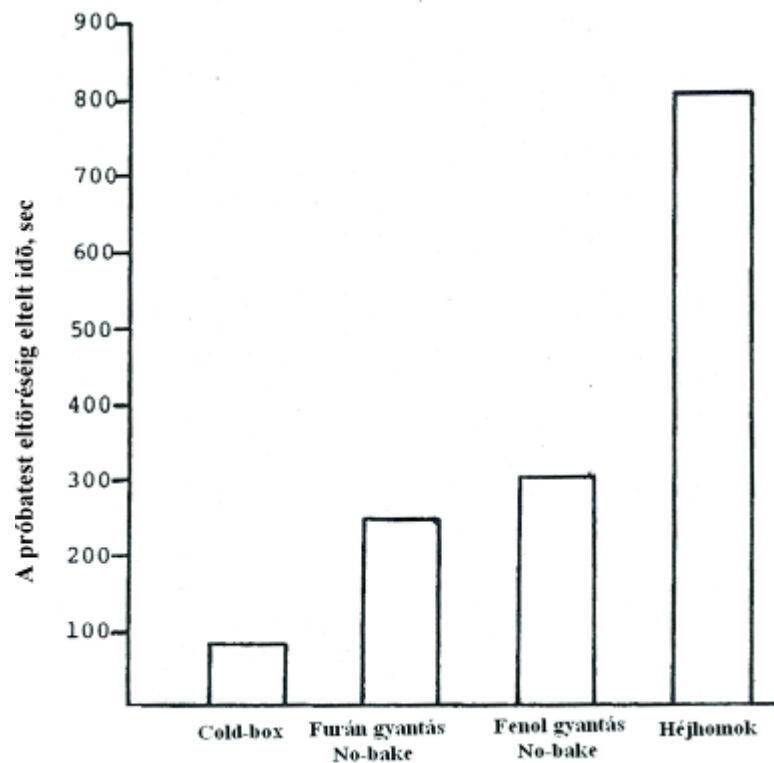
A poliuretán-cold-box (PUR-CB) formázóanyag esetén a hőtágulás már nagyon rövid időn belül megindul (5-10 sec), amit a formázóanyag zsugorodása követ. A hőre lágyulási fázis gyakorlatilag nem látható. A próbatest törése, azaz a teljes kötőanyag degradáció 10-15 sec-on belül megtörténik [32, 34]. A deformációs görbék lefutását a kötőanyagrendszer két komponensének aránya jelentős mértékben befolyásolja. Minél nagyobb a fenolgyanta aránya a di-izocianát arányával szemben, annál rövidebb időn belül törnek el a próbatestek [35, 36]. A szemcsefinomság tekintetében elmondható, hogy minél nagyobb a finomszemcsék aránya, annál nagyobb a magok „melegszilárdsága”, mert ebben az esetben a hővezetés kisebb [35].

A 49. ábra alapján megállapítható hogy a héjhomok kiváló termoplasztikus tulajdonságokkal rendelkezik, ugyanis a görbe lefutása elnyújtott, a próbatest törése hosszabb időn keresztül megy végbe, és a tágulást egy termoplasztikus deformáció követi. Ez a jelenség a novolak gyantarendszerre és a gyanta kikeményedési tulajdonságára vezethető vissza. A héjhomokon lévő kötőanyag nem keményedik ki teljesen resit állapotba. Az öntéskor fellépő termikus behatások által a még jelen lévő resitol alkotók átmenetileg meglágyulnak, és biztosítják a gyanta hőre lágyuló képességét. A kötőanyag mennyisége ebben az esetben is jelentősen befolyásolja a tágulási, és a meleg deformációs tulajdonságokat. Ha növekszik a gyantatartalom, akkor a homokszemcsék között megnövekednek a kötőanyaghidak. A felmelegedés hatására a kötőanyag meglágyul és kitölti a homokszemcsék közti üreget, ezáltal pozitív hatással van a kötőanyag meleg deformációjára, és így a melegszilárdság is nő [33].

S.N. Ramrattan és kutatótársai saját fejlesztésű Thermal Distortion teszterrel vizsgáltak héjhomok, és fenolgyanta kötésű hot-box formázóanyag rendszert, kifejezetten az alumínium olvadék hőmérsékletén (649°C-on, 760°C-on és 871°C-on). Megállapították, hogy a héjhomok a teszt első 30 másodpercéig stabil, ezt követi egy újabb 30 másodperces szakasz, amikor hőtágulás figyelhető meg, amit a maradék 60 másodpercben a lágyulási szakasz követ, majd a kötőanyag fokozatosan kiég. A fenol-formaldehid alapú no-bake kötőanyagrendszer deformációját összehasonlították a héjhomok meleg deformációjával és kiderült, hogy a no-bake gyantarendszerrel készült próbatesteknek hatszor nagyobb volt a termikus deformációja, sőt a héjhomok pozitív, a no-bake rendszer negatív deformációt mutatott [31].

A furángyantas hot-box kötőanyagrendszer esetén, a deformációs görbén kezdetben egy emelkedő szakasz figyelhető meg, ami a két percig tartó mérési időtartam alatt a maximum pont elérése után nem változik, és plasztikus deformáció nem figyelhető meg [37].

Az 50. ábrán különböző kötőanyagrendszerek esetén mért, a deformációs próbatest töréséig eltelt idő értékei láthatók:



50. ábra

A deformációs próbatestek eltöréséig eltelt idő, különböző formázóanyagok esetén [34]

Az 50. ábra igazolja azt, hogy a héjhomoknak van a legnagyobb melegszilárdsága, és a termikus igénybevétel hatására, a cold-box kötőanyagrendszerrel készült magok törnek el a leghamarabb.

5.2.1.3. A regenerátum hatása a hőtágulásra és a termikus deformációra

Német kutatók megvizsgálták három különböző regenerátum hőtágulásának mértékét, és a termikus deformációs tulajdonságokat [32]. A vizsgált regenerátumok:

- mechanikusan regenerált furángyantás homok
- mechanikusan-termikusan regenerált monoregenerátum
- mechanikusan-termikusan regenerált poliregenerátum

Megállapították, hogy a lineáris hőtágulás mértéke és a tágulási görbék lefutása tekintetében a három regenerátum eredményei közel azonosak. A termikus deformáció vizsgálatakor kiderült, hogy a regenerátumban maradt anyagok a furános regenerátum, és a bentonitot tartalmazó poli-regenerátum

zsugorodni kezdenek, mielőtt a hőmérséklet eléri a kvarchomok tágulásának hőmérsékletét (300°C). Ez főként a furános regenerátum esetén érhető, hisz a homokban maradt anyagok a magas hőmérséklet hatására meglágyulnak, felbomlanak, és lehetővé teszik a táguló kvarchomok szemcsék mozgását. A szerves kötőanyag tartalmú formázóhomokokból származó regenerátumok (furános, cold-box) esetén a regenerálás után mindig marad a homokszemcséken maradék kötőanyag, ami a többszöri homok-előkészítés hatására egy vastag maradékgyanta bevonatot képez a szemcséken, ezáltal a kötőanyag hidak meghosszabbodnak, és pozitív hatást gyakorolnak a tágulási, és deformációs tulajdonságokra [33].

5.2.2. A formázóanyagok hőtágulásának meghatározása

A szilárd anyagok mérete a magas hőmérséklet hatására megváltozik. Vagy méretnövekedés (hőtágulás) történik, vagy pedig csökken az adott anyag mérete (zsugorodás, lágyulás). A hőmérsékletváltozás hatására két különböző méretváltozást különböztetünk meg:

- Termikus tágulás-hőtágulás
- Fázisátalakulás

A hőtágulás alatt egy reverzibilis méretnövekedést értünk, ami hőmérsékletváltozás hatására alakul ki.

A formázóanyagok tágulási viselkedését több módon lehet meghatározni:

- Közepes lineáris hőtágulási együttható megadása egy meghatározott hőmérsékletintervallumon

$$\alpha = \Delta l / (l \cdot \Delta T) \quad (19)$$

ahol:

α : [1/K]

Δl : hosszváltozás a ΔT hőmérsékletintervallumban

l : eredeti hossz [mm]

ΔT : hőmérsékletintervallum.

- A kezdeti hosszra (l_0) vonatkoztatott relatív hosszváltozás megadása, amely a hőmérséklettől függ.

$$\Delta l_{rel} = ((l_T - l_0) / l_0) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (20)$$

- A felhasználás során fellépő problémára vonatkoztatott mutatószám:
pl. α_{max} : a próba maximális hőtágulása
 $\epsilon_{300^\circ C}$, $\epsilon_{500^\circ C}$, $\epsilon_{600^\circ C}$: A próba abszolút hőtágulása 300°C, 500°C, 600°C-on [μm , mm].

- A hőmérséklettől függő hosszváltozás grafikus ábrázolása: (Tágulás-, zsugorodás görbe)
- Az idő függvényében ábrázolt hosszváltozás, ami egy adott hőmérséklethez, vagy termikus behatáshoz tartozik [32].

5.2.3. A formázóanyagok hőtágulását és termikus deformációját vizsgáló berendezések

A formázóanyagok hőtágulásának és termikus deformációjának mérésére többféle mérőberendezést fejlesztettek ki. Ezek közül a három leggyakrabban használt berendezést ismertetem:

5.2.3.1. Dietert-féle dilatométer

Ez a berendezés magas hőmérsékleten tud vizsgálni többféle formázóanyag tulajdonságot (melegszilárdság, termikus deformáció, omlékonyság, tágulás-kontrakció). A próbatest mérete $\varnothing 28,575 \times 50,8$ mm. A kör keresztmetszet azért optimális, mert a próbatest a magas hőmérséklet hatására sem reped olyan könnyen. A műszer kemencéje szobahőmérsékletről 1510°C -ra fűthető, de rövid ideig 1565°C -on is működtethető. A terhelési tartomány $0-70,3 \text{ kg/cm}^2$. A mérőegység egy acélszekrényben van elhelyezve, amire egy szigetelt kemence van felszerelve. Négy darab magas hőmérsékletű fűtőelem biztosítja azt, hogy a próbatest egyenletesen melegedjen. A kemence belső hossza 127 mm. A kemence alulról nyitható, és a kemencefenék átmérője 57,15 mm. Egy hőálló üvegen keresztül ellenőrizhető a próbatest. Az egész egységhez egy expanziós mikrométer csatlakoztatható. A próbatest behelyezéséhez a kemencét a felső pozícióba kell emelni, majd a próbatestet a tűzálló talpra kell helyezni, hogy terhelés alá kerüljön. A kemencét ezután le kell engedni. A próbatestet a szabályozható volumenű olajpumpa segítségével lehet előterhelni. Egy speciális felső fedél is tartozik a berendezéshez, mely a próbatestet tökéletesen megvédi, ezáltal mérhető a melegszilárdság, az omlékonyság, vagy a próbatestben kialakuló penetráció a próbatest saját atmoszférájában [38]. Az 51. ábrán a Dietert-féle mérőberendezést látható.



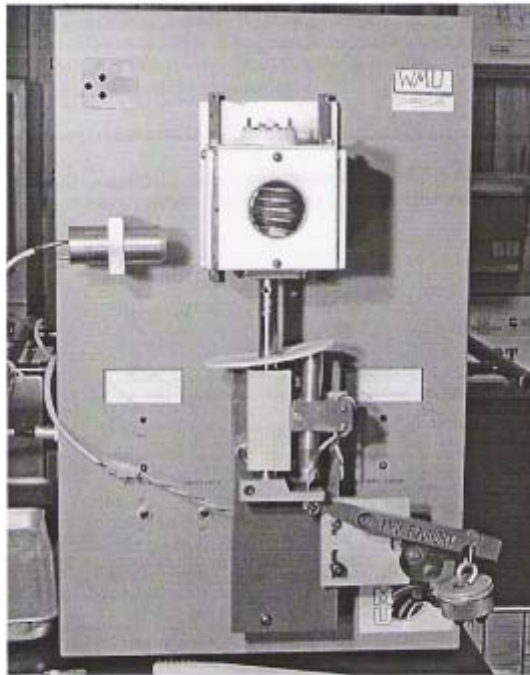
51. ábra

A Dietert-féle hőtágulás mérő berendezés [38]

5.2.3.2. Termal Distortion Tester-WMU fejlesztés

Ezen műszer segítségével különböző formázóanyagok termikus deformációját lehet mérni az idő függvényében.

Ehhez a vizsgálathoz korong alakú próbatestet használnak, melynek vastagsága 8mm, átmérője 50mm. A berendezés az 52. ábrán látható:



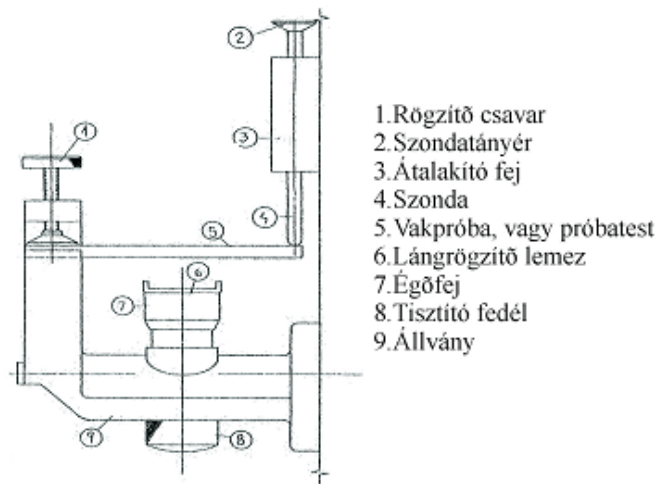
52. ábra

Termal Distortion Tester-WMU fejlesztés [39]

A vizsgáló berendezésen beállítható a hőmérséklet, amelyen vizsgálni kívánjuk a formázóanyag viselkedését, valamint a fém nyomása, amelyet öntéskor az adott hőmérsékleten a formafalra kifejt. A hőmérsékletmérés optikai pirométer segítségével történik, amely a próbatest termikusan igénybevett felületére fókuszálódik. A próbatestet egy tartóállványra kell helyezni, amely kör alakú próbatest befogására lett kialakítva. A próbatestet tartó állvány egy emelőkaron van elhelyezve, ami kardángyűrűként funkcionál. A próbatest az állványba történő behelyezés után automatikusan felemelkedik, amíg teljesen szimmetrikus kapcsolatba nem kerül a műszerben lévő 2 cm átmérőjű forró felülettel. Ehhez egy lineáris feszültség-átalakító kapcsolódik, mely segítségével a deformáció mérhetővé válik. A műszerhez tartozó számítógép ellenőrzi, figyeli, és grafikusan is ábrázolja a deformációt a hőmérséklet, illetve az idő függvényében. Ha a kardángyűrű lefelé irányuló mozgást végez, akkor ez hőtágulásként értelmezendő és grafikus megjelenítés során, a deformációs görbén felfelé irányuló mozgás látható. Ha a kardángyűrű felfelé irányuló mozgást mutat, akkor a próbatest kötőanyaga a hő hatására meglágyul, és a grafikus kiértékelés esetén, a deformációs görbén ezt a jelenséget a lefelé irányuló szakasz mutatja. A hőtágulás és a hőre lágyulás szakaszai jól elkülöníthetők egymástól, így a görbe pontosan kiértékelhető [30, 31, 37, 39].

5.2.3.3. Hot Distortion Tester-Sympson Gerosa-fejlesztés

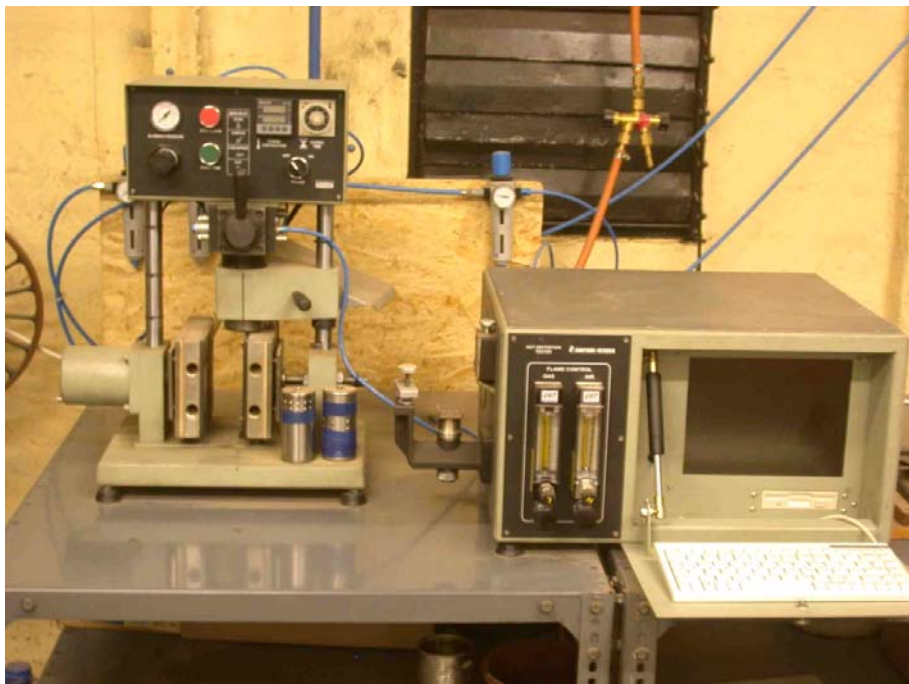
A meleg deformációs vizsgálatok (HOT DISTORTION TESTER) segítségével a műgyantakötésű homokmagok hő hatására történő deformációját és hőtágulását tudjuk vizsgálni, valamint képet kapunk arról, hogy hogyan viselkedik a forma és a mag, amikor a fémmel érintkezésbe kerül. A mérőberendezésbe egyik végén befogott próbatestet alulról egy kalibrált gázégő segítségével melegítjük és a próba másik végére illesztett elmozdulásmérő szonda méri a próba deformációját. A mérésekhez használt próbatest mérete 114,3x25,4x6,35 mm. A próbatest mérőberendezésbe történő befogását az 53. ábra szemlélteti.



53. ábra

A próbatest befogása a mérőberendezésbe

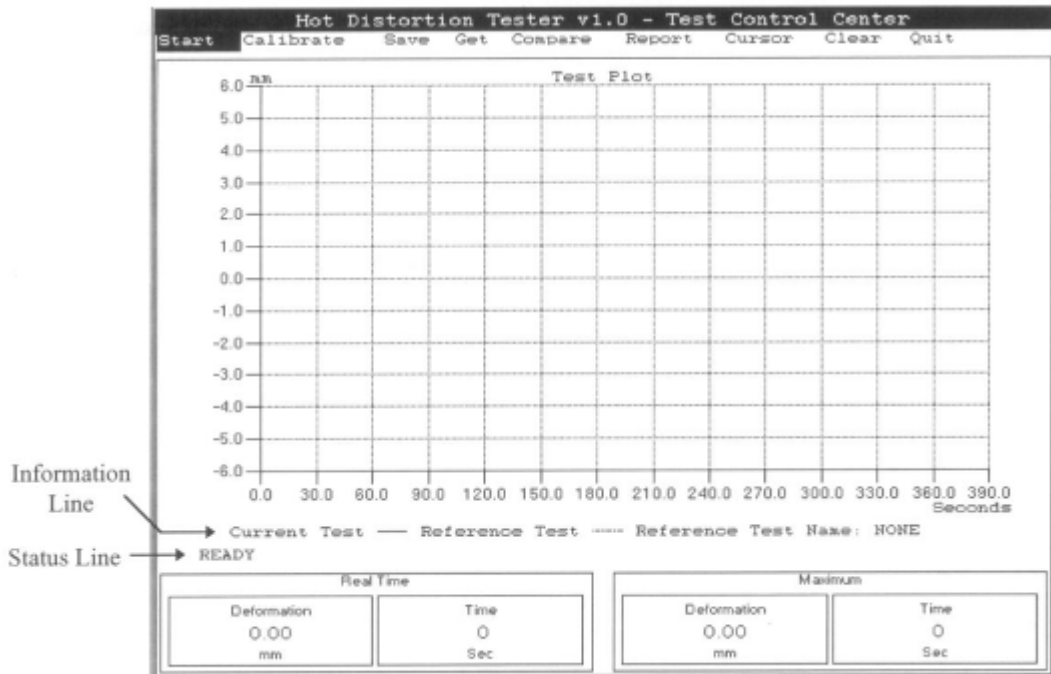
A berendezéshez egy maglövő egység is tartozik, amelynek segítségével műgyantakötésű próbatesteket készíthetünk (54. ábra).



54. ábra

A maglövő berendezés és a Hot Distortion Tester

A szonda által érzékelt elmozdulást egy jelátalakítón keresztül, a berendezéshez tartozó számítógép regisztrálja, és a próba melegítésének kezdetétől eltelt idő függvényében ábrázolja a próba deformációját (55. ábra).



55. ábra
A számítógép kijelzője [40]

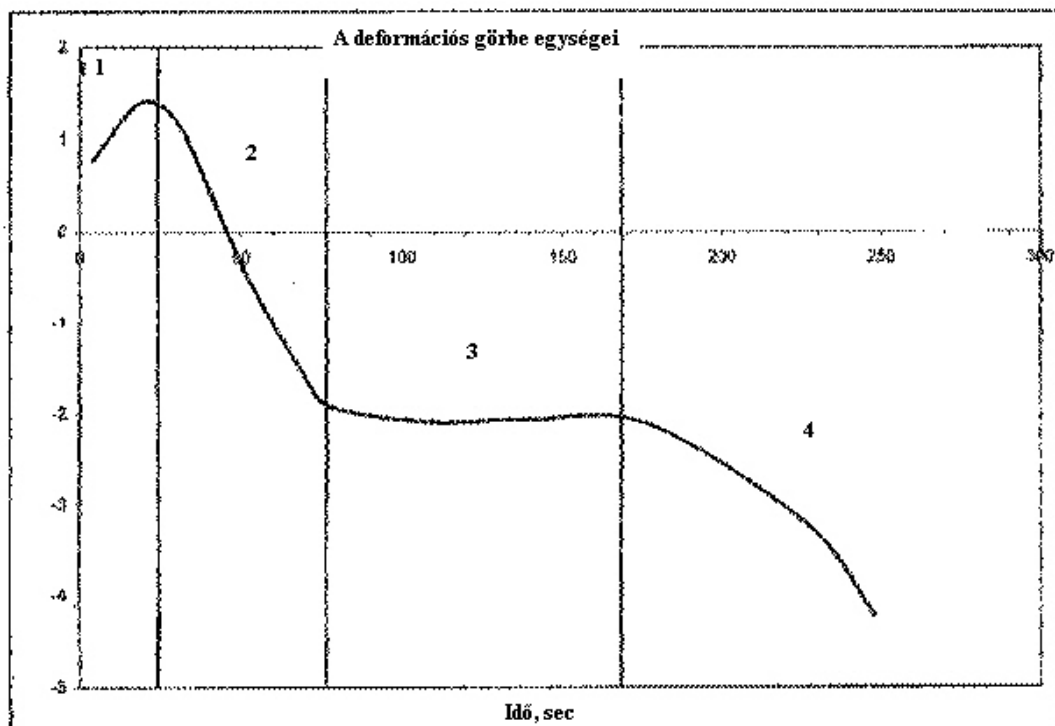
A számítógép által felvett deformációs görbét héjhomokok esetén négy szakaszra bonthatjuk (56. ábra).

1. szakasz: Pozitív deformáció (Dilatáció)

Ebben a szakaszban az alaphomok tulajdonságai érvényesülnek leginkább. A próba melegített oldala nagyobb mértékben tágul, mint a másik oldala, így a próbatest felfelé hajlik, és a homok hőtágulása pozitív eredményt ad a görbén. Ennél a szakasznál a görbe lefutására hatással van a homok típusa, szemcseösszetétele, és a tömörítettsége.

2. szakasz: Megereszkedés (Thermoplastic Relaxation)

Ennek a szakasznak a lefutását az alaphomok és a kötőanyag tulajdonságai határozzák meg. A polimereknél, ebben az esetben a kémiai kötőanyagok a termoplasztikus relaxáció alatt domináns deformációt szenvednek. A próbatest lefelé hajlik és „negatív” értékű deformációt mérünk. A plaszticitás ellenőrzése segít elkerülni a melegtörést és az erresség problémájának kialakulását.



56. ábra
A deformációs görbe szakaszai [41]

3. szakasz: Hőre keményedés (Thermosetting)

A műgyanta kötésű magok a nagy hőmérséklet hatására fokozatosan elvesztik szilárdságukat, és jelentős deformációt szenvednek. Abban az esetben, amikor a műgyanta kötési folyamata (térhálósodása) csak részben ment végbe, a műgyanta egy része még megolvadhat, ami jelentősen befolyásolja ezen szakasz lefutásának jellegét, így komoly technológiai problémákat okozhat.

4. szakasz: Degradáció, Törés, Összeomlás

A próbatestben lévő kötőanyag további melegítés hatására kiég, és a próbatest eltörik. Az, az idő, amit a próbatest melegítésétől kezdve a mechanikus törésig mérünk, fontos technológiai jellemző érték, és a mag „melegszilárdságaként” értelmezzük [34]. Ha nagyon hosszú a deformációs görbe lefutása, azaz igen nagy a mag melegszilárdsága, ötvényhibák kialakulásához vezethet, mert a mag az ötvény megdermedése után is rideg marad [41].

A deformációs görbe egyes szakaszainak lefutását befolyásoló tényezők összességét a 8. táblázat tartalmazza.

8. táblázat

A deformációs görbe szakaszainak lefutását befolyásoló paraméterek

| 1. szakasz Dilatáció | 2. szakasz Megeerszkedés | 3. szakasz Hőre keményedés | 4. szakasz Degradáció, Törés |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Alaphomok tulajdonságai | Kötőanyag típusa | Kötési arány | Próbatest tömörsége |
| Alaphomok típusa | Kikeményítési fok | Kikeményítési fok | Mag üríthetőség |
| Alaphomok alakja | Méretállandóság | Kötőanyag típusa | Gyanta mennyisége |
| Próbatest tömörsége | Termikus krakkolódási hajlam | Hexametilén mennyisége (Héjhomok) | Melegszilárdság |

6. Kísérleti körülmények

Az autóiipari alkatrészgyártás során széles körben felhasznált hot-box formázókeverékekre vonatkozó mérési adatok hiányosak és számos, a magkészítés során jellemző paramétert nem vizsgálnak. Több olyan tulajdonság van, melyet a vékony keresztmetszetű, de nagy hosszúsággal rendelkező magoknál figyelembe kell venni, mert ezek a speciális geometriával rendelkező hot-box magok különösen érzékenyek a repedésre, illetve a törésre, melynek oka lehet az alaphomok és a kötőanyagrendszer hőtágulása, ezért a kísérleteim során megvizsgáltam a műgyantakötésű, ezen belül a hot-box formázókeverékekből készült próbatestek meleg deformációját különböző homokok és kötőanyagok felhasználásával. Vizsgálataimat három részre bontottam. Az első részben a felhasznált homokok alapvizsgálatait végeztem el, ezt követte a homokok lineáris hőtágulásának vizsgálata, majd végezetül a termikus deformációs kísérletek eredményeit ismertetem.

6.1. A kísérletekben felhasznált homokok alapvizsgálata és a hot-box formázókeverék rendszer bemutatása

A hot-box magkészítési technológia esetén nedves magkeveréket állítanak elő száraz homokból, egy hőre keményedő gyantából és egy látens sav katalizátorból. Ezt a homokkeveréket lövik be a fűtött magszekrénybe. Az ideális magszekrényhőmérséklet 190-260°C. Az alkalmazott katalizátorok elsősorban ammónium-sók, erős szerves- és szerves savak, a gyanta pedig lehet fenol vagy furángyanta [42]. A gyanta kikeményedési reakciója 100°C körül indul meg és 150°C-on nagyon erőteljes. A reakció során víz és nem reagáló monomer szabadul fel gáz formájában. Mivel a reakció folyamatos, a

polimeren belül zsugorodás megy végbe. 500°C fölött a gyanta 95%-a bomláson megy keresztül. Ha a gyanta nagy része elbomlott a forma környezetétől függően néhány stabil aromás molekula keletkezhet, és további bomlás nem következik be [36].

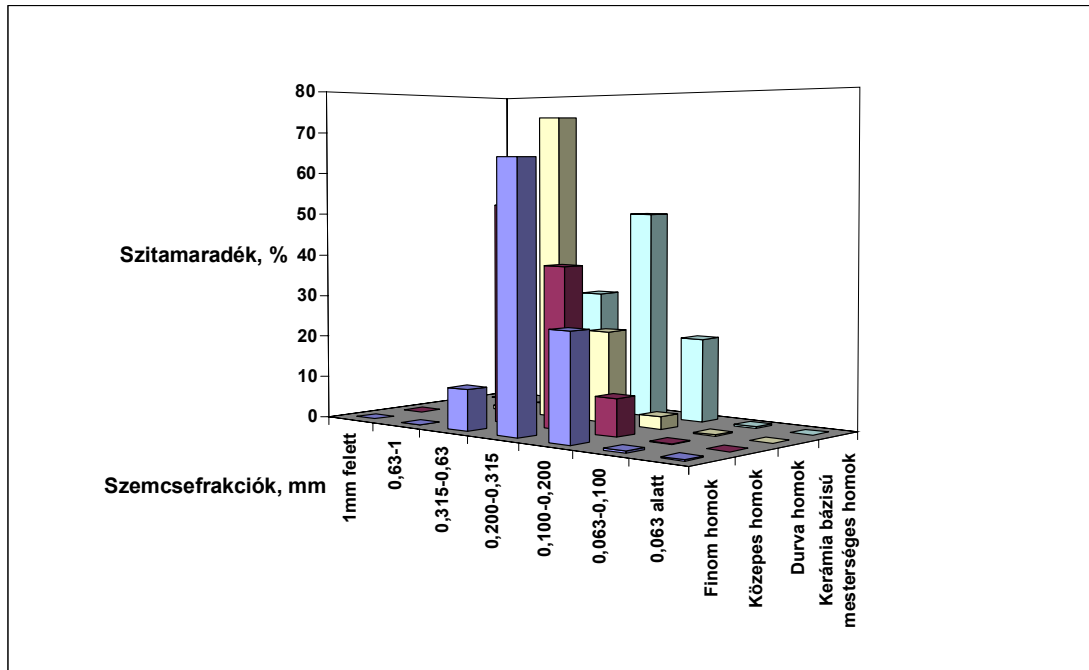
A termikus deformációs vizsgálatokhoz két különböző típusú fenolgyantát és egy fajta furángyantát használtam.

Az alaphomok, termikusan regenerált homok volt, melyet fluidágyas kemencében regeneráltak 600°C-on. A kísérletekhez felhasználtam még újhomokot és "kerámia bázisú" mesterséges homokot. A kísérletekhez felhasznált homokok alapvizsgálati eredményeit a 9. táblázatban foglaltam össze:

9. táblázat
Az alaphomokok technológiai paraméterei

| Paraméterek | Újhomok | Finom homok | Közepes homok | Durva homok | Kerámia bázisú mesterséges homok |
|---|----------------|--------------------|----------------------|--------------------|---|
| Izzítási veszteség, % | 0,155 | 0,037 | 0,064 | 0,007 | 0,113 |
| Halomsűrűség, g/cm³ | 1,55 | 1,50 | 1,56 | 1,55 | 1,46 |
| pH érték | 6,4 | 8,0 | 7,6 | 7,4 | 6,8 |
| Iszaptartalom, % | 0,039 | 0,200 | 0,120 | 0,030 | 0,175 |
| Átlagos szemcse nagyság, mm | 0,31 | 0,27 | 0,32 | 0,40 | 0,24 |
| Fajlagos felület, cm²/g (számolt) | 205,7 | 272,1 | 203,9 | 116,1 | 243,0 |
| Használt homok izzítási vesztesége, % | - | 1,50 | 1,56 | 1,55 | - |
| Regenerálási fok, % | - | 97 | 95 | 99 | - |

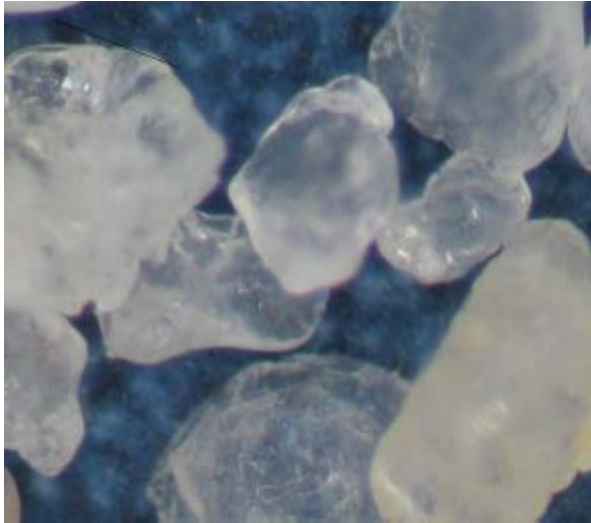
Az 9. táblázat alapján elmondható, hogy az izzítási veszteség tekintetében a durva homok mutatta a legkisebb értéket, az újhomok pedig a legnagyobbat. Mind a négy homoknál az előírásoknak megfelelő ez az érték, a regenerálás hatékony volt. Ugyanez mondható el a pH értékekre is, mert közel semleges értéket mutatnak. A regenerálási fok mindhárom regenerátum esetén 90% fölött van, ami szintén a hatékony regenerálást bizonyítja. Az átlagos szemcseméret tekintetében elmondható, hogy az újhomok és a közepes homok szemcsemérete közel azonos, a kerámia bázisú homok szemcseösszetétele pedig a legfinomabb. Ezt szemlélteti az 57. ábra is.



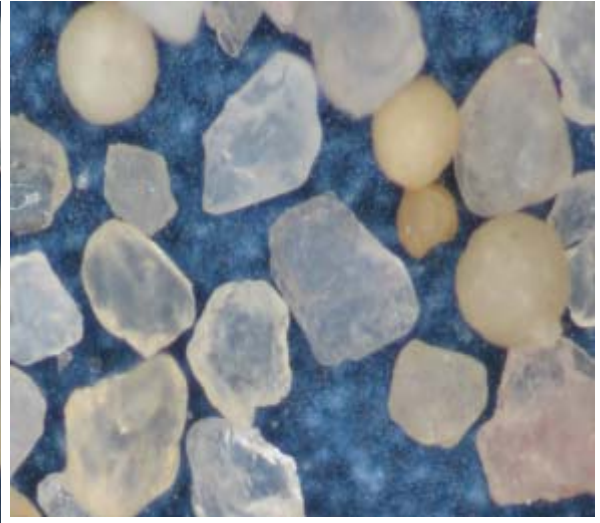
57. ábra

A vizsgált homokok szemcseösszetétele

Az 58. ábrán a különböző homoktípusok szemcséiről készített makrofotókat mutatom be. Látható, hogy az alaphomokok alakja némileg sarkos, felületük azonban kötőanyagmentes, tiszta. A sarkosságnak a kötőanyagfelvételnél van jelentősége, hiszen a nem gömbölyű szemcsének nagyobb a fajlagos felülete, mint a gömbölyűnek. A szemcsedurvulás jól megfigyelhető a finom homoktól a durva homok irányába. A regenerált homokok gömbölyű mullit szemcséket is tartalmaznak.



Újhomok



Finom homok



Közepes homok



Durva homok



“Kerámia bázisú” mesterséges homok

58. ábra

Az újhomok és a regenerált homokok makrofotói

6.2. Az alaphomok lineáris hőtágulása

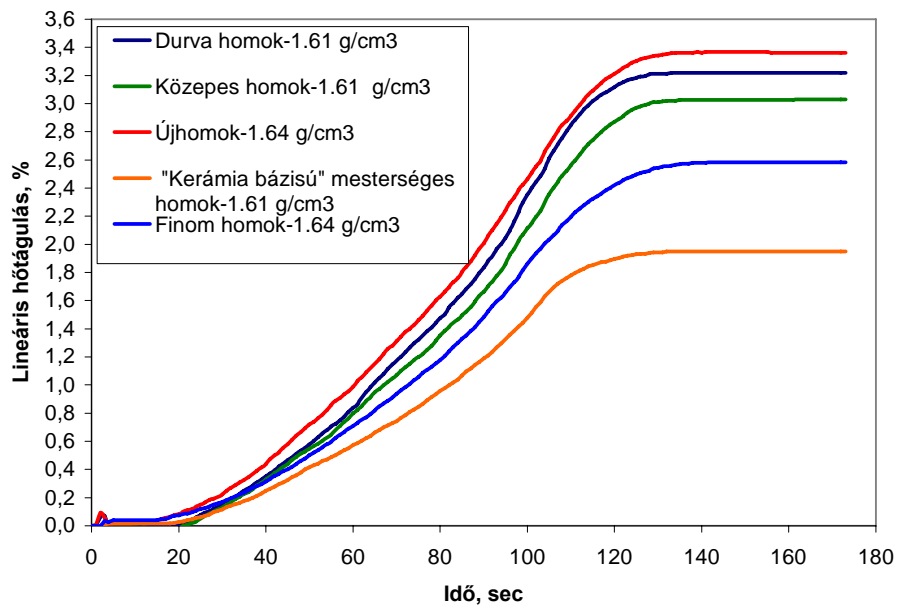
A deformációs mérésekhez kiinduló adatként megvizsgáltam az alaphomokok lineáris hőtágulását. A mérőberendezés az 59. ábrán látható:



59. ábra

SPMT+GF+ típusú lineáris hőtágulásmérő berendezés

A dilatometer alsó hidraulikus emelő asztalára egy kvarcrúd van erősítve. A mintának szánt homokot egy kvarccsőbe helyeztem, amelyet két végén kvarcdugóval lezártam. Az így elkészült próbatestet a berendezésben található két kvarcrúd közé helyeztem, és az emelőasztalt a hidraulikus tápegység segítségével addig emeltem fel, amíg a próbatest el nem érte a dilatometer felső kvarcrúdját. A terhelő erőt addig fokoztam, amíg a tápegység nyomóerőt mérő műszerén a 98 N terhelő erőt elértem. A megfelelő nyomásérték elérése után a 600°C-ra előmelegített kemencét ráengedtem a próbatestre. A próbatest méretváltozását Hottinger W 5 Tk induktív útjeladóval mértem. Ennek villamos jelét egy Hottinger KWS mérőerősítő alakítottá át analóg feszültségjellé. Ezt a feszültséget egy ADVANTECH gyártmányú, ADAM 4017 típusú jelátalakító digitális jellé alakította, és a számítógépnek továbbította. Az ADAM modulok konfigurálása és az adatgyűjtés Genie programmal történt. A különböző homokok hőtágulásgörbéjét az eltelt idő függvényében a 60. ábra szemlélteti [42, 43].



60. ábra
Az alaphomokok lineáris hőtágulása

10. táblázat
Az alaphomokok adatai

| Homoktípusok | Térfogatsűrűség, g/cm ³ | Lineáris hőtágulás, % |
|---|------------------------------------|-----------------------|
| Finom homok | 1,64 | 2,58 |
| Közepes homok | 1,61 | 3,03 |
| Durva homok | 1,61 | 3,22 |
| Újhomok | 1,64 | 3,36 |
| „Kerámia bázisú” mesterséges homok | 1,61 | 1,95 |

A 60. ábra és a 10. táblázat alapján megállapítható, hogy a regenerált homokok hőtágulása a szemcsedurvulással növekszik, az újhomok esetén pedig a legnagyobb értéket mértem. Ennek az az oka, hogy az újhomok még nem esett át az allotróp átalakuláson. Ez a mag meleg deformációjára is hatással van. A „kerámia bázisú” mesterséges homok lineáris hőtágulása a legkisebb. Olyan magok gyártásánál, ahol a hőtágulásból eredő deformáció miatt magtörés következhet be, célszerű ennek a homoktípusnak a használata. A próbatestek térfogatsűrűség értékei közötti eltérés 2%-on belül van, tehát a tágulási értékek közötti eltérésnél a homokok szemcseösszetétele meghatározó.

A kísérletekhez 3 különböző kötőanyagot használtam, melyeknek adatait a 11-16. táblázatok tartalmazzák:

11. táblázat
Fenolgyanta /A

| | |
|------------------------|-------------------------------------|
| Gyanta típusa: | Módosított fenol-formaldehid gyanta |
| Összetétel: | Fenol<2,5%; Formaldehid<2,5% |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | vörösesbarna |
| Gyulladás hőmérséklet: | > 300°C |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,24 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | 6,8-7,5 |

12. táblázat
Az „A” típusú Fenolgyantához tartozó katalizátor

| | |
|------------------------|--|
| Összetétel: | Veszélytelen adalékot tartalmazó keverék |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | színtelen |
| Gyulladás hőmérséklet: | nincs adat |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,1 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | 7 |

13. táblázat
Fenolgyanta /B

| | |
|------------------------|-----------------------------|
| Gyanta típusa: | Fenol-karbamid műgyanta |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | vörösesbarna |
| Gyulladás hőmérséklet: | nincs adat |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,23-1,25 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | 7,5-8,5 |

14. táblázat
A „B” típusú Fenolgyantához tartozó katalizátor

| | |
|------------------------|--|
| Összetétel: | Benzol-szulfonsav:25-50%, Anilin- etanol:15-25%, Propanol:5-10%, Toluol-szulfonsav:5-10%, Kénsav:5- 10% |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | piros |
| Gyulladás hőmérséklet: | 410°C |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,21 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | 1 |

15. táblázat
Furángyanta

| | |
|------------------------|---|
| Gyanta típusa: | Módosított furángyanta |
| Összetétel: | Furfuril-alkohol:>50%, Formaldehid: 0,3-0,5%, Formaldehid: 0,3-0,5%, Glioxal:2% |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | sötétbarna |
| Gyulladás hőmérséklet: | 390°C |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,19-1,20 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | 4,8-5,2 |

16. táblázat
A furángyantához tartozó katalizátor

| | |
|------------------------|---|
| Katalizátor típusa: | Fenol-szulfonsavak, azok alumíniumsavainak, kénsav és szerves alkotórészeinek vizes oldata. |
| Összetétel: | Hidroxi-benzolszulfonát:<40%, Fenol-szulfonsavak:<20%, Kénsav: 5-8%, |
| Állaga: | folyékony |
| Szín: | világosbarna |
| Gyulladás hőmérséklet: | nincs adat |
| Sűrűség 20°C-on: | 1,27-1,28 g/cm ³ |
| pH érték 20°C-on: | <1% |

6.3. A hot-box formázókeverékek termikus deformációjának vizsgálata

A termikus deformációs vizsgálatokat az 5.2.3.3. fejezetben bemutatott Sympson-Gerosa fejlesztésű, Hot Distortion Tester berendezéssel végeztem. Különböző összetételű magkeverékeket készítettem és vizsgáltam a szemcseösszetétel, a gyanta minőségének és mennyiségének, a katalizátor mennyiségének, a mag polimerizációs idejének és polimerizációs hőmérsékletének hatását a magok termikus deformációjára. A kísérletekhez a „finom homokot” választottam alaphomokként, - mert a méretváltozásra hajlamos magokhoz leginkább ezt a típusú homokot használják- melyet a továbbiakban regenerált homokként említek.

6.3.1. A szemcseösszetétel hatása

A kísérletek során a gyanta és a katalizátor mennyiségét állandó értéken tartottam, csak a „kerámia bázisú” mesterséges homok és a regenerált homok arányát változtattam, és vizsgáltam a próbatestek termikus deformációját.

17. táblázat

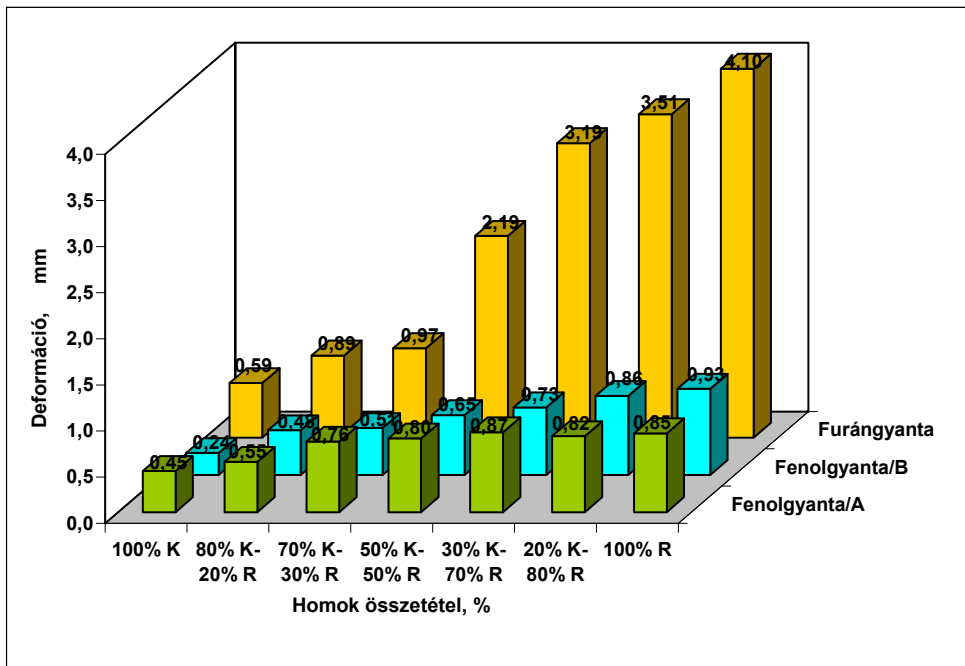
A szemcseösszetétel hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

| | |
|---|---|
| Szemcseösszetétel, % | 100, 80, 70, 50, 30, 20, 0% „Kerámia bázisú” mesterséges homok- 0, 20, 30, 50, 70, 80, 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 2% Fenolgyanta /A, 2% Fenolgyanta /B, 2% Furángyanta |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 25% |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 25 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 200°C |
| Lövőnyomás, bar | 4,5 bar |

A 61. ábrán a szemcseösszetétel, pozitív deformáció mértékére gyakorolt hatása látható. A 62. ábrán a szemcseösszetétel, degradációs időre gyakorolt hatása látható.

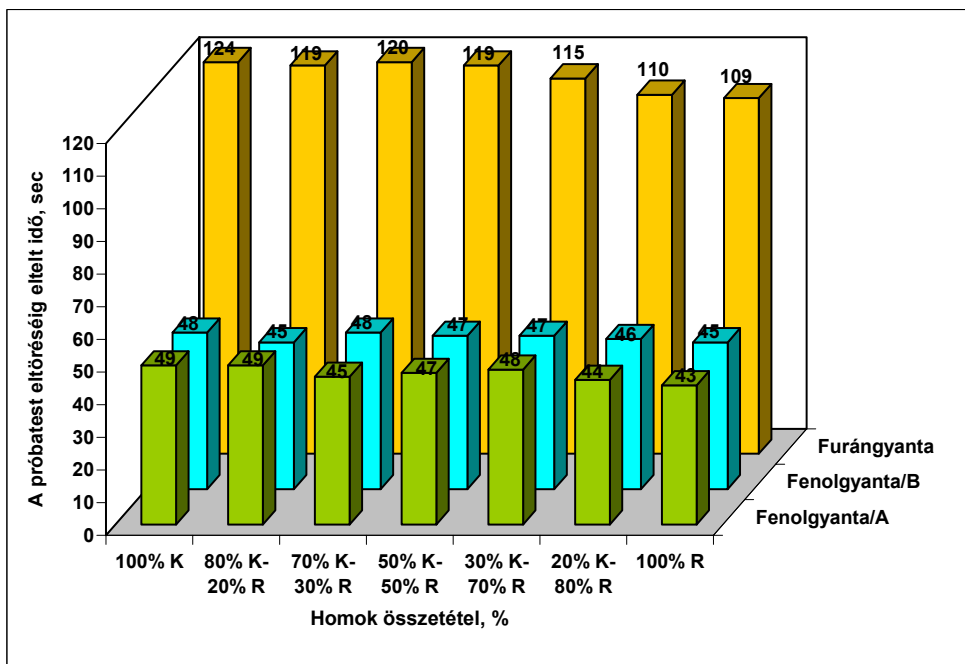
A diagramokon látható jelölések:

- R: „Regenerált homok”
- K: „Kerámia bázisú” mesterséges homok



61. ábra

A szemcseösszetétel hatása a pozitív deformáció mértékére

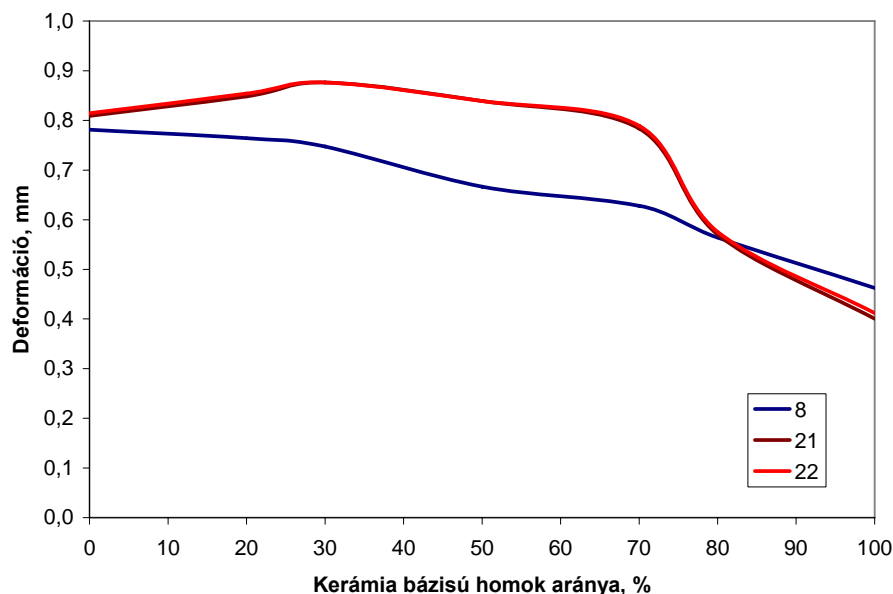


62. ábra

A szemcseösszetétel hatása a degradációs időre

A 61.-62. ábrák alapján megállapítható, hogy a furángyantas homokkeverékek pozitív deformációja 2-4-szer nagyobb, mint a fenolgyantas keverékeké. A próbatest töréséig eltelt időknél (degradációs idő) is jelentős eltérés tapasztalható. A furángyantas keverékek degradációs ideje több mint

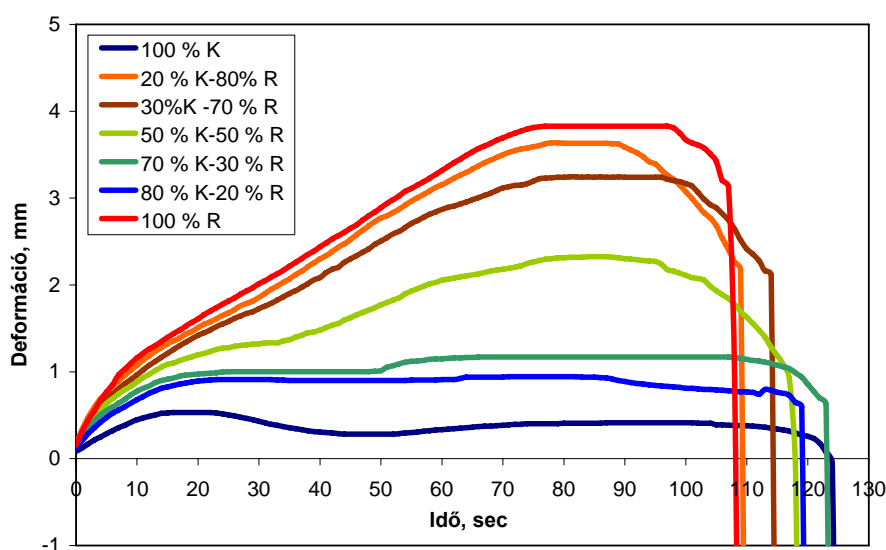
kétszerese a fenolgyantás keverékeknél mért időknél. Ebből azt a következtetést lehet levonni, hogy azoknál a magoknál, ahol fontos a deformáció minél kisebb értéken tartása (hosszú, vékony magok), fenolgyantás keverékek használata ajánlott. Ezeknek a magoknak az öntés közbeni törése azonban hamarabb bekövetkezik, mint a furángyantás keverékeké. Ha az öntvénykéreg a fenolgyantás keverékekből készített magok alkalmazása esetén nem tud kialakulni addig, amíg a mag „egyben van”, akkor furángyantás keveréket kell alkalmazni, és az alaphomok megfelelő megválasztásával kell a deformáció mértékét csökkenteni. Ehhez is jó támpontot adnak a 61.–62. ábrák. Az ábrákon jól látható, hogy a kis hőtágulású „kerámia bázisú” homok pozitív hatással van a próbatestek termikus deformációjára, hiszen a pozitív deformáció, azaz a dilatáció mértéke a regenerált homok mennyiségének növelésével növekedett és a próbatest eltörése is rövidebb időn belül megtörténik, tehát a 100%-ban regenerált homokot tartalmazó próbák „melegszilárdsága” a legkisebb. Mindhárom mérés sorozat ezt a tendenciát mutatja. Ennek oka egyértelműen az alaphomok hőtágulására vezethető vissza. Ha a degradációs idő a meghatározó paraméter és a fenolgyantás keverék nem felel meg az elvárásoknak, akkor olyan furángyantás keveréket kell alkalmazni, melynek alapja „kerámia bázisú” homok. Ha a degradációs idő szempontjából a fenolgyantás keverék is megfelelő, akkor a keveréket elő lehet állítani regenerált homokból is, mely jelentős költségmegtakarítást eredményez. A kerámiabázisú homokok alkalmazásának az az egyik hátránya, hogy lényegesen drágább, mint a kvarchomok. A magok előállításához külön adagoló és keverő-berendezés szükséges, mely tovább növeli a költségeket. A másik hátrány az, hogy (többféle homokminőség alkalmazása esetén) a formák ürítése, és az öntvények tisztítása és a homok regenerálása során a „kerámia bázisú” homokot nem tudjuk szeparáltan visszanyerni a rendszerből, ezért az ilyen magok előállításához mindig újhomokra van szükség. Ez a költségek további növekedését eredményezi, ezért ha az öntvény minőségét nem befolyásolja negatívan, akkor célszerű a mag előállításához használt homokkeveréknél a „kerámia bázisú” homok arányát csökkenteni, tehát kvarchomokkal keverni. Ahhoz, hogy kiderítsem, milyen arányú keverék esetén nem változik jelentős mértékben a deformáció, megvizsgáltam, hogy egy adott időpillanathoz tartozó dilatációs értékek hogyan változnak a „kerámia bázisú” homok arányának változtatásával. A 63. ábrán az adott időpillanathoz tartozó deformáció, és a szemcseösszetétel kapcsolata látható. A 63. ábra alapján elmondható, hogy a mesterséges homok 80% és a fölötti aránya hoz nagy volumenű változást a deformáció mértékében, ezért ennél kisebb arányban nem célszerű homokkeverékeket készíteni. Ez a technológia tervezés szempontjából fontos, a gyakorlatban is hasznosítható eredmény, mely nagy szériában gyártott öntvények esetén jelentős költségmegtakarítást eredményezhet.



63. ábra

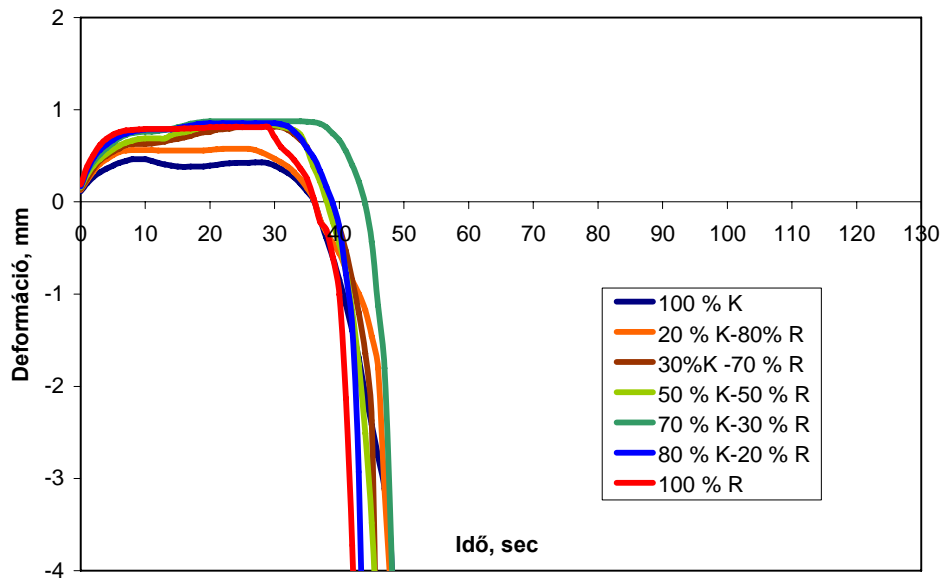
Adott időpillanathoz tartozó deformáció és a szemcseösszetétel kapcsolata

A 64.-66. ábrákon a három különböző gyantafajtával készült keverékeknel, a szemcseösszetétel, deformációs görbék lefutására gyakorolt hatása látható. A három ábrát összehasonlítva megállapítható, hogy a szemcseösszetételnek leginkább a furángyanta magoknál van hatása a deformációs görbék lefutására. A „kerámia bázisú homok” deformációra gyakorolt jótékony hatása egyértelműen kimutatható, hiszen a 100% „kerámia bázisú” homokot tartalmazó keverék görbéje fut a legalacsonyabb értéken. Ezzel szemben a 100% regenerátumot tartalmazó mag deformációs görbéjén látható a legnagyobb mértékű pozitív deformáció.



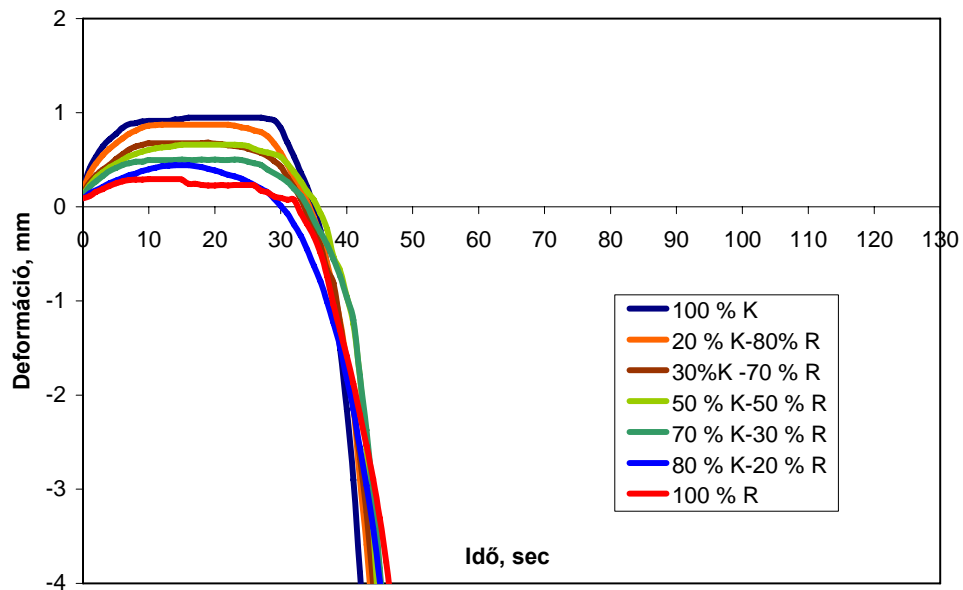
64. ábra

A szemcseösszetétel hatása a deformációs görbék lefutására (Furángyanta)



65. ábra

A szemcseösszetétel hatása a deformációs görbék lefutására (Fenolgyanta /A)

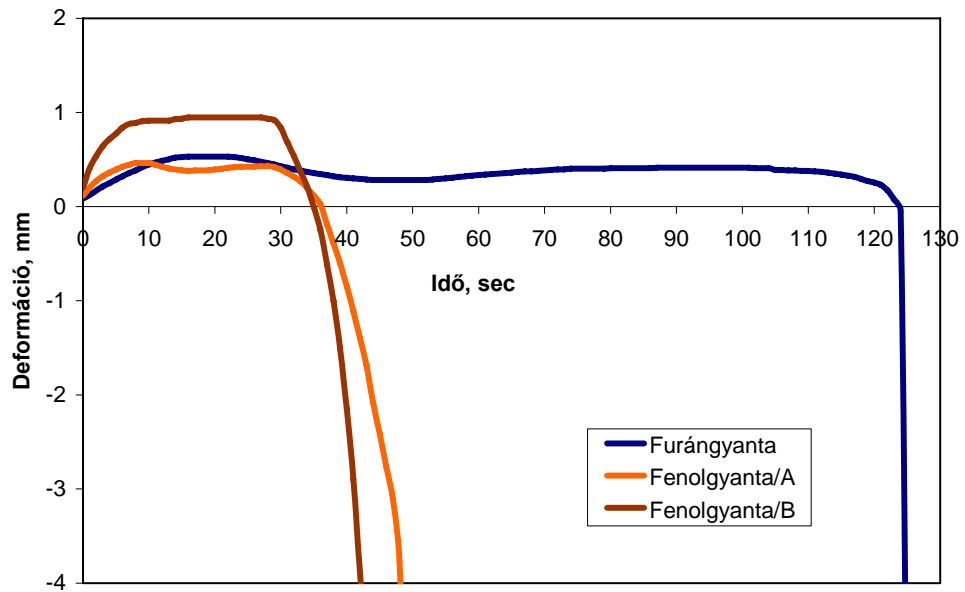


66. ábra

A szemcseösszetétel hatása a deformációs görbék lefutására (Fenolgyanta /B)

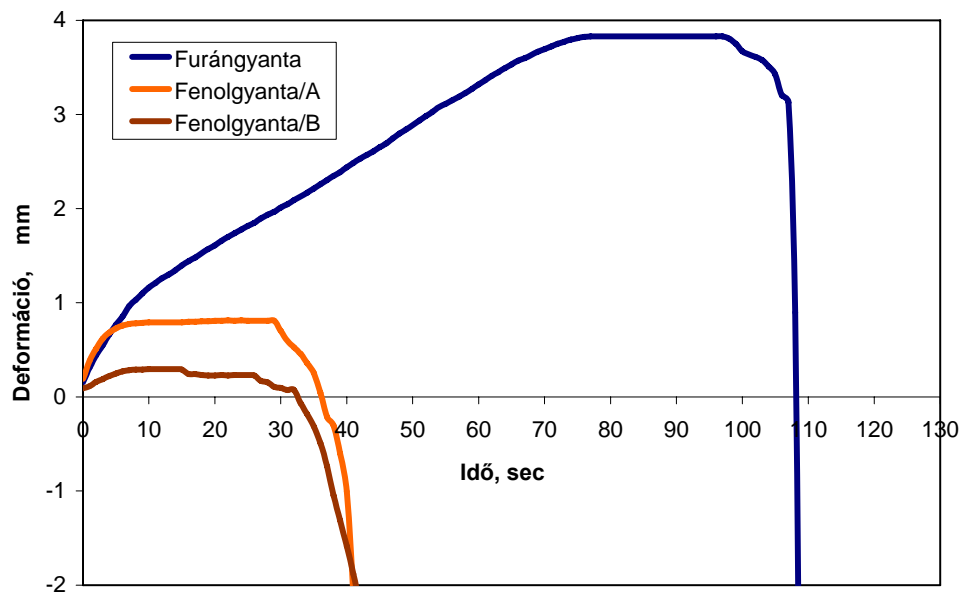
A 65.-66. ábra alapján megállapítható, hogy a különböző szemcseösszetételhez tartozó deformációs görbék lefutása egymáshoz képest nem mutat nagy eltérést. Nem állapítható meg egyértelmű tendencia a görbék lefutása és a szemcseösszetétel között. A 67.-68. ábrákon szintén a deformációs görbék lefutását hasonlítottam össze 100% regenerátum és 100%

„kerámia bázisú” homokot tartalmazó magok esetén, a gyantafajták függvényében.



67. ábra

A különböző kötőanyaggal készült magok deformációs görbéinek összehasonlítása 100% „kerámia bázisú homok” esetén



68. ábra

A különböző kötőanyaggal készült magok deformációs görbéinek összehasonlítása 100% regenerált homok esetén

A 67.-68. ábra alapján megállapítható, hogy a 100% „kerámia bázisú” homokot tartalmazó keverékek esetén a deformáció mértékére, illetve a degradációs időre a gyanta típusának van hatása. Ezzel szemben a 100% regenerátumot tartalmazó magok deformációs görbéi egymáshoz képest nagy eltérést mutattak, tehát a homok és a kötőanyag típusa együttesen határozzák meg a magok deformációjának mértékét.

6.3.2. A frissítés hatása

Az újhomok mennyisége fontos paraméter a formázókeverék rendszerben. A szilárdsági tulajdonságokat javítja, azonban az a cél, hogy minél kisebb mennyiségben kerüljön felhasználásra, mert az újhomok ára folyamatosan növekvő tendenciát mutat, ezenkívül környezetvédelmi szempontból is előnyösebb, ha minél több regenerált homokot használunk.

A kísérletek következő lépcsőjében az újhomok-regenerált homok arányát változtattam azonos gyanta és katalizátor mennyiség mellett.

18. táblázat

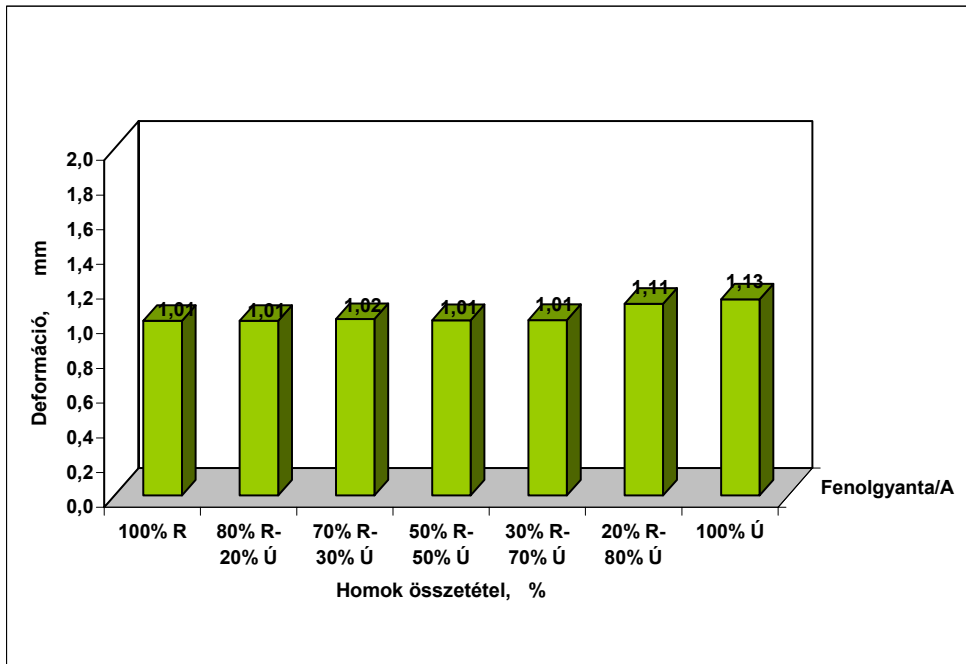
A frissítés hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

| | |
|---|--|
| Szemcseösszetétel, % | 100, 80, 70, 50, 30, 20, 0% Újhomok- 0, 20, 30, 50, 70, 80, 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 1,55% Fenolgyanta /A, |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 16% |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 35 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 200°C |
| Lövényomás | 4,5 bar |

A 69. ábrán a regenerált homok/újhomok arányának, a dilatáció mértékére gyakorolt hatása látható. A 70. ábrán a regenerált homok/újhomok arányának, a degradációs időre gyakorolt hatása látható. A 71. ábrán a frissítés, deformációs görbékre gyakorolt hatása látható.

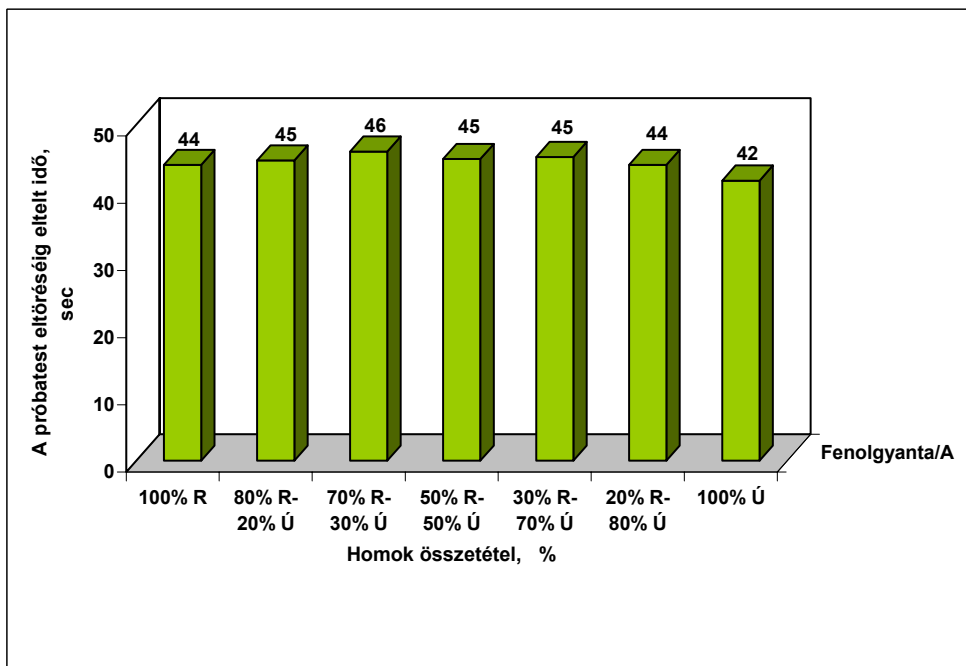
A 69. ábra alapján elmondható, hogy a legnagyobb mértékű deformáció a tisztán újhomokot tartalmazó keverékből készült próbatesthez tartozik. Ennek az az oka, hogy az újhomok még nem esett át termikus behatáson, tehát még nem játszódott le a kvarc átalakulása. A regenerált homok, amennyiben termikusan regenerált homok, már átesett az allotróp átalakulásokon. A fenolgyanta alkalmazása során, a 80%-nál kevesebb újhomokot tartalmazó keverékek esetén a maximális pozitív deformáció mértékei között nincs jelentős eltérés. A deformáció mértékében mintegy 10%-os növekedés következik be a 80% újhomokot tartalmazó keverékek esetén (1,11 mm), mely érték a 100%-ban újhomokból készült keverék esetén tovább növekszik (1,13 mm).

A degradációs idők tekintetében nem állapíthatunk meg egyértelmű összefüggést. A különböző homokkeverékek degradációs idői 42-46 sec között vannak, tehát nincs közöttük jelentős eltérés.



69. ábra

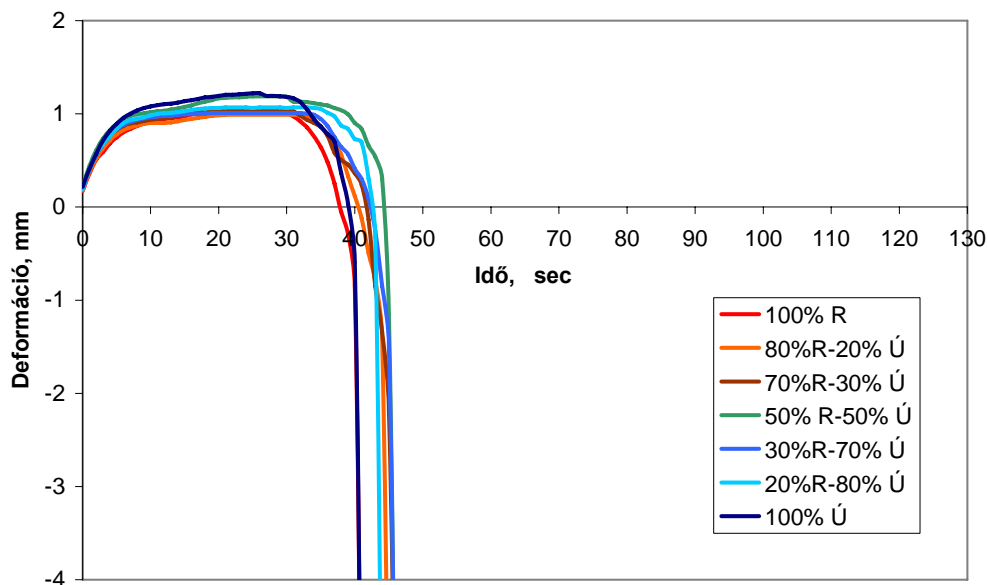
A regenerált homok / újhomok arányának hatása a dilatáció mértékére (Fenolgyanta /A)



70. ábra

A regenerált homok / újhomok arányának hatása a degradációs időkre (Fenolgyanta /A)

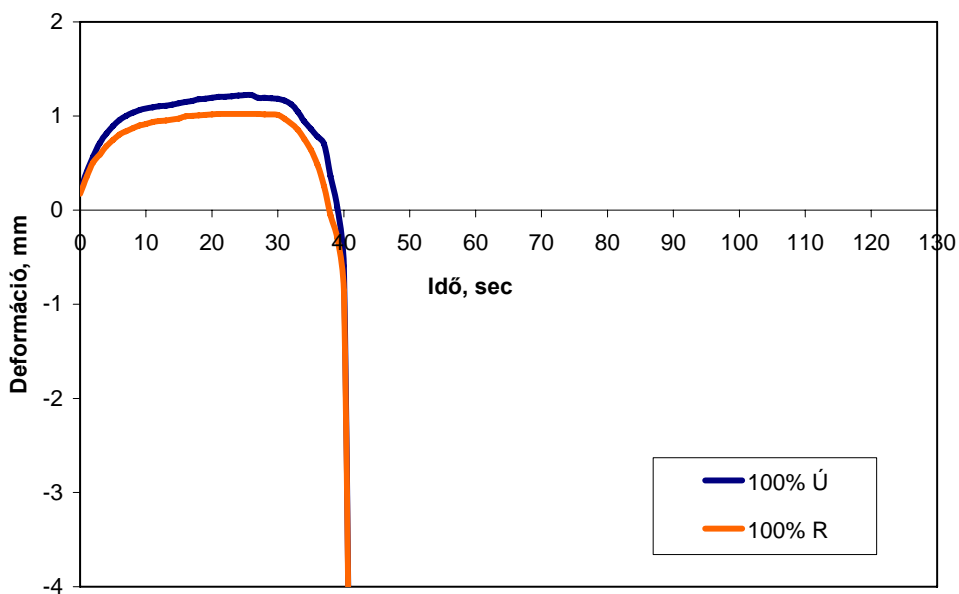
A 71.-72. ábrákon a frissítés, deformációs görbékre gyakorolt hatását mutatom be.



71. ábra

A frissítés hatása a deformációs görbék lefutására

A 71. ábra alapján megállapítható, hogy a fenolgyantával készült, különböző szemcseösszetételű magok deformációs görbéinek lefutása közel azonos jellegű, tehát a görbe lefutására az újhomok mennyiségének nincs hatása.



72. ábra

A 100% regenerátumból és a 100% „újhomokból” készült magok deformációs görbéjének összevetése

A 72. ábra alapján elmondható, hogy az alaphomok összetétel két szélső értékénél csak a deformáció mértékében látható különbség, a mag degradációs idejét tekintve nincs lényeges eltérés.

6.3.3. A polimerizációs hőmérséklet és polimerizációs idő hatása

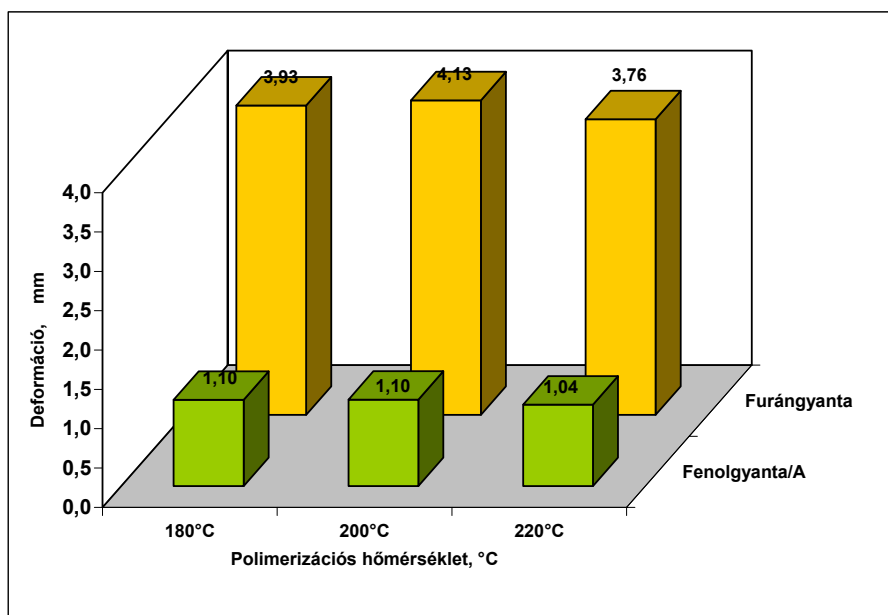
A mag polimerizációs hőmérséklete és polimerizációs ideje a kötőanyag térhálósodása szempontjából mérvado. A meleg magszekrény hőmérsékletének növelésével a polimerizációs időszükséglet lerövidül. A magok sütésekor a magszekrényvel érintkező homok felületének csupán néhány mm vastagságú rétege éri el a végszilárdságot, a mag belső része nyers marad. A rövid ideig tartó hőközlés azonban elegendő ahhoz, hogy a magot torzulásmentesen kiemelhessük a magszekrényből, és ezt követően a gyanta térhálósodása már szobahőmérsékleten folytatódik [38].

Kísérleteim során megvizsgáltam, hogy van-e hatása a magok polimerizációs idejének, illetve polimerizációs hőmérsékletének a próbatetek meleg deformációjára.

19. táblázat

A polimerizációs idő hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

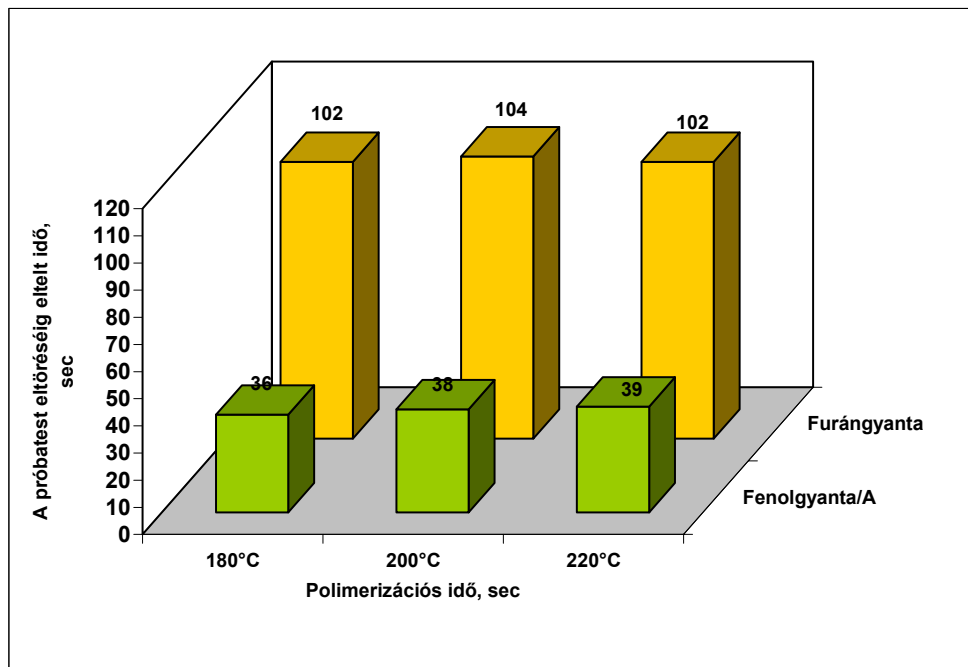
| | |
|---|----------------------------------|
| Szemcseösszetétel, % | 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 1,5% Fenolgyanta /A, Furángyanta |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 16,7% Katalizátor |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 25 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 180°C, 200°C, 220°C |
| Lövőnyomás, bar | 4,5 bar |



73. ábra

A polimerizációs hőmérséklet hatása a dilatáció mértékére

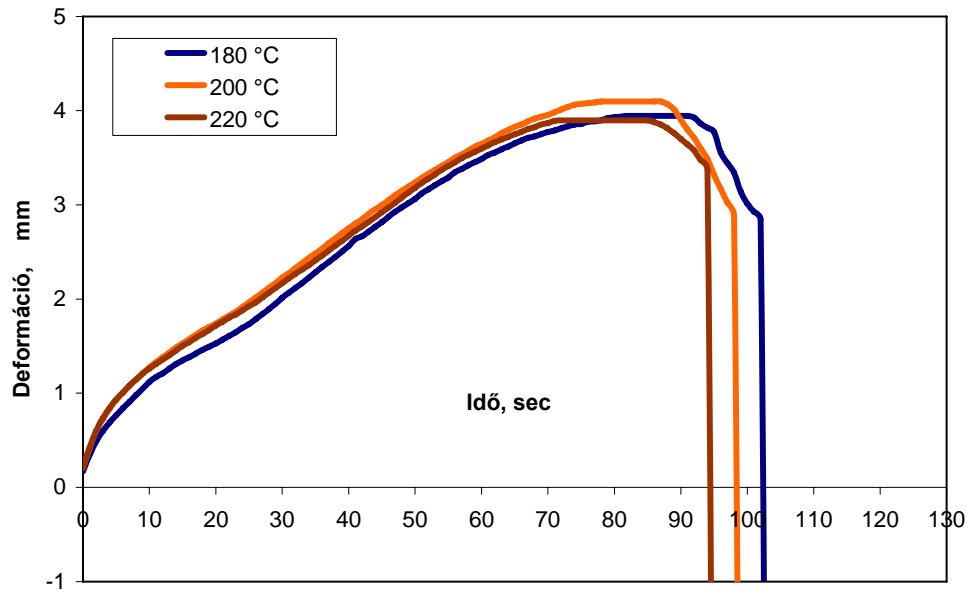
A 73. ábrán a polimerizációs hőmérséklet, dilatáció mértékére gyakorolt hatása látható. Az 73. ábra alapján megállapítható, hogy mindkét gyantatípusnál a 200°C-os polimerizációs hőmérséklethez egy dilatációs csúcs tartozik. A legkisebb deformációt a 220°C-hoz tartozó eredmények mutatják, tehát a polimerizációs hőmérséklet növelésével a dilatáció mértéke csökkenthető.



74. ábra

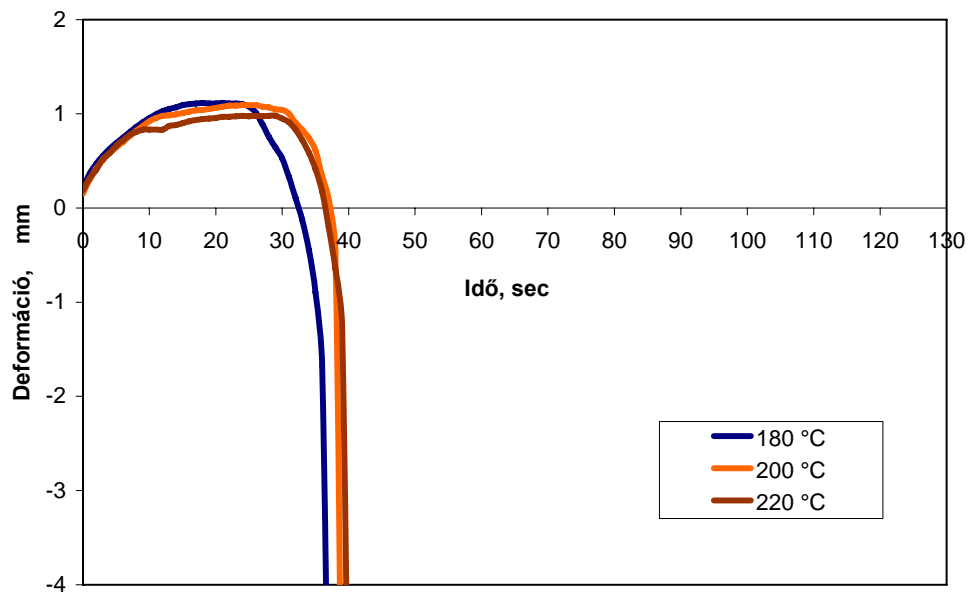
A polimerizációs hőmérséklet hatása a degradációs időkre

A 74. ábrán a polimerizációs hőmérséklet degradációs időre gyakorolt hatása látható. A 74. ábra alapján megállapítható, hogy azonos gyantatípus esetén, a polimerizációs hőmérséklet nem okoz jelentős változást a degradációs időben. Furángyanta esetén a degradációs idő értéke 102-104 sec, fenolgyanta esetén 36-39 sec közötti értékeket mértem. A 75-76. ábrákon a furángyantás és a fenolgyantás keverékeknél vizsgált polimerizációs hőmérséklet, deformációs görbék lefutására gyakorolt hatása látható. A 75-76. ábrák alapján megállapítható, hogy a két gyantarendszer esetén a gyanta típusának és nem a polimerizációs hőmérsékletnek van szignifikáns hatása a deformációs görbék lefutására.



75. ábra

A polimerizációs hőmérséklet hatása a deformációs görbék lefutására (Furángyanta)



76. ábra

A polimerizációs hőmérséklet hatása a deformációs görbék lefutására (Fenolgyanta/A)

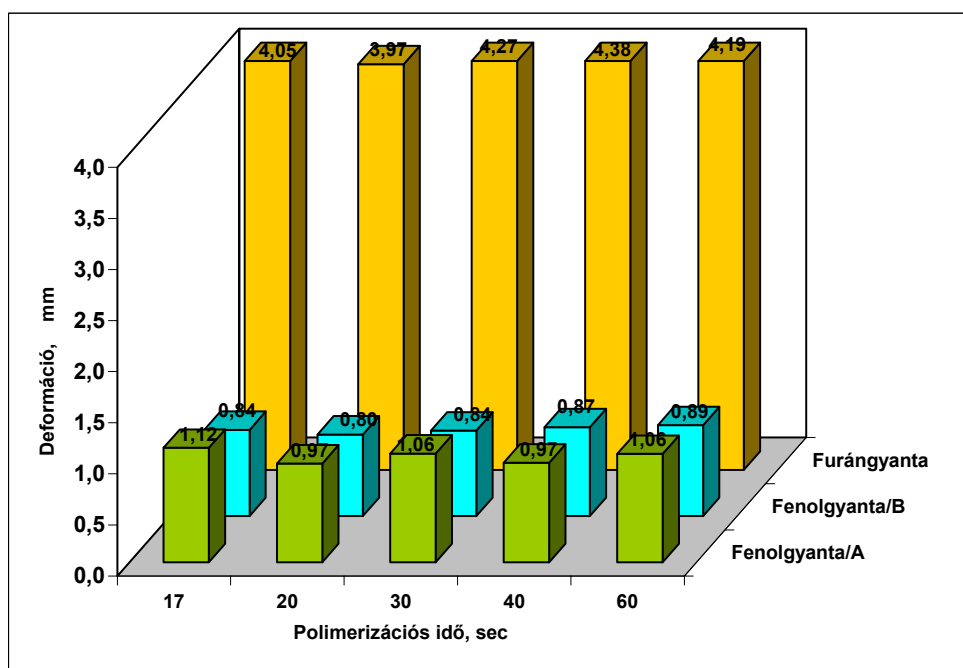
6.3.4. A polimerizációs idő hatása

20. táblázat

A polimerizációs idő hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

| | |
|---|---|
| Szemcseösszetétel, % | 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 1,5% Fenolgyanta /A, Furángyanta, 1,4% Fenolgyanta /B |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 16,7% Katalizátor |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 17, 20, 30, 40, 60 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 200°C |
| Lövényomás, bar | 4,5 bar |

A 77. ábrán a polimerizációs idő, meleg deformációra gyakorolt hatása látható.



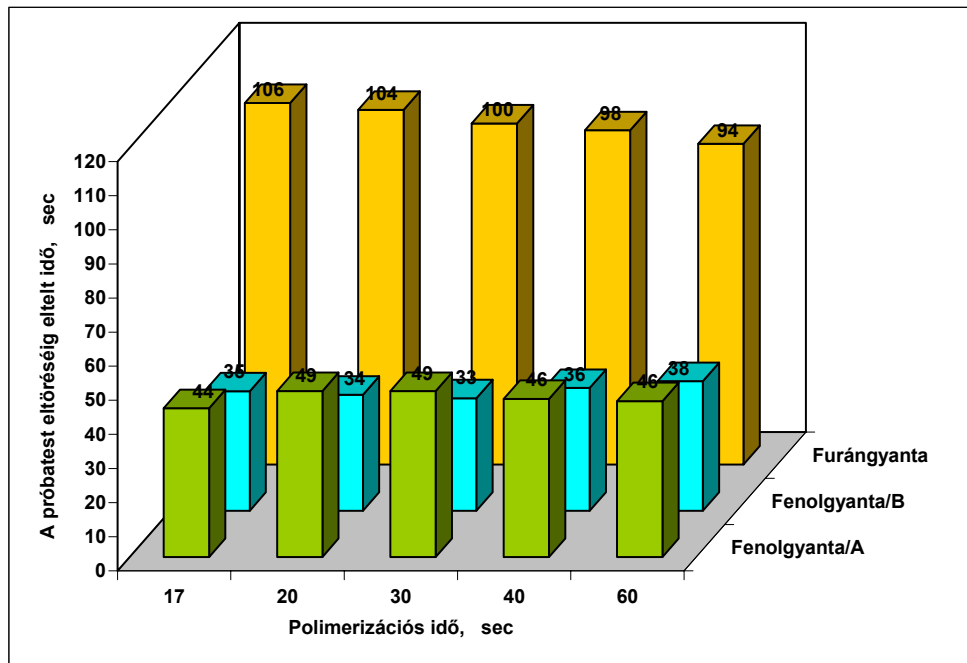
77. ábra

A polimerizációs idő hatása a meleg deformációra

A 77. ábra alapján megállapítható, hogy az „A” és a „B” jelzésű fenolgyantából készült próbatestek esetén a polimerizációs idő növekedésének, a dilatáció mértékére nincs jelentős hatása. A mért értékek „A” típusú fenolgyanta esetén 0,97-1,12 mm között vannak, tehát a maximális eltérés 0,1 milliméter. A „B” típusú gyanta esetén a mért értékek 0,8-0,89 mm között voltak. A maximális eltérés 0,9 mm, mely szintén nem jelentős. A furángyantás keverék a 30-40 sec közötti polimerizációs idők esetén érte el a maximális deformációt, mely több mint 0,4 milliméterrel volt nagyobb, mint a legkisebb mért érték. Mivel a legkisebb pozitív deformáció is

négymilliméteres volt, ezért ez a plusz 10%-os növekedés jelentősnek mondható. Ezek alapján megállapítható az, hogy a furángyantás keverék esetén, a deformáció mértékének csökkentése céljából, helyénvaló a legrövidebb, de még technológiailag megfelelő polimerizációs időt alkalmazni.

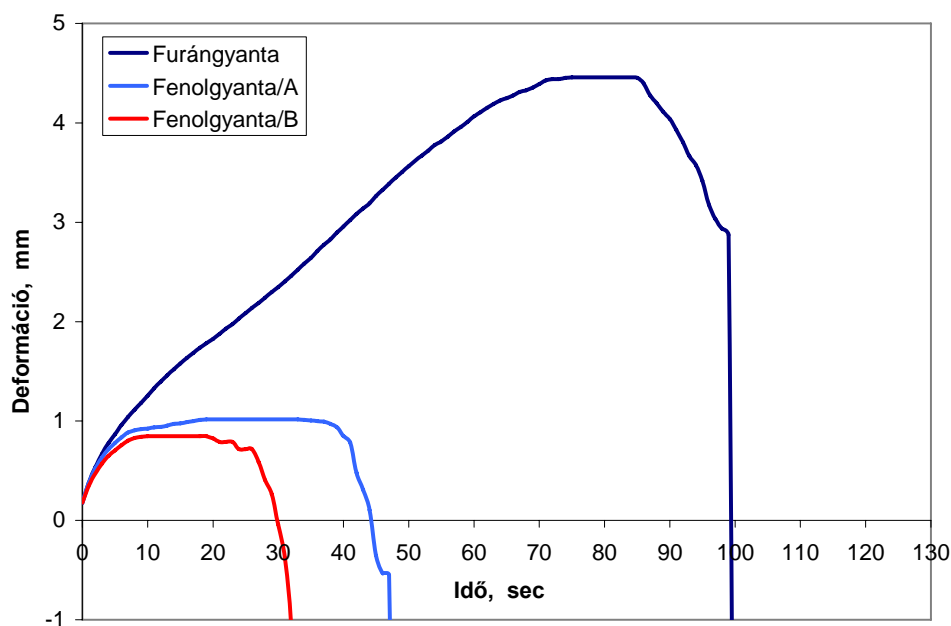
A 78. ábrán a polimerizációs idő, degradációs időre gyakorolt hatása látható.



78. ábra

A polimerizációs idő hatása a degradációs időkre

A degradációs idők tekintetében a két fenolgyanta, két szélső értéke között 5 sec különbség tapasztalható, mely alapján megállapítható, hogy a polimerizációs idő növelésének, fenolgyantás keverék esetén a degradációs időre nincs számottevő hatása. A furángyantás keverék esetén a polimerizációs idő növelésével a degradációs idő értéke csökken. A két szélső érték között a különbség 12 sec, tehát a minél nagyobb degradációs idő elérésének érdekében is kedvezőbb, ha a legrövidebb, de még technológiailag megfelelő polimerizációs időt alkalmazzuk. A 79. ábrán a polimerizációs idő, deformációs görbék lefutására gyakorolt hatása látható.



79. ábra

A polimerizációs idő hatása a deformációs görbék lefutására (Fenolgyanta/A)

6.3.5. A gyanta mennyiségének és minőségének hatása

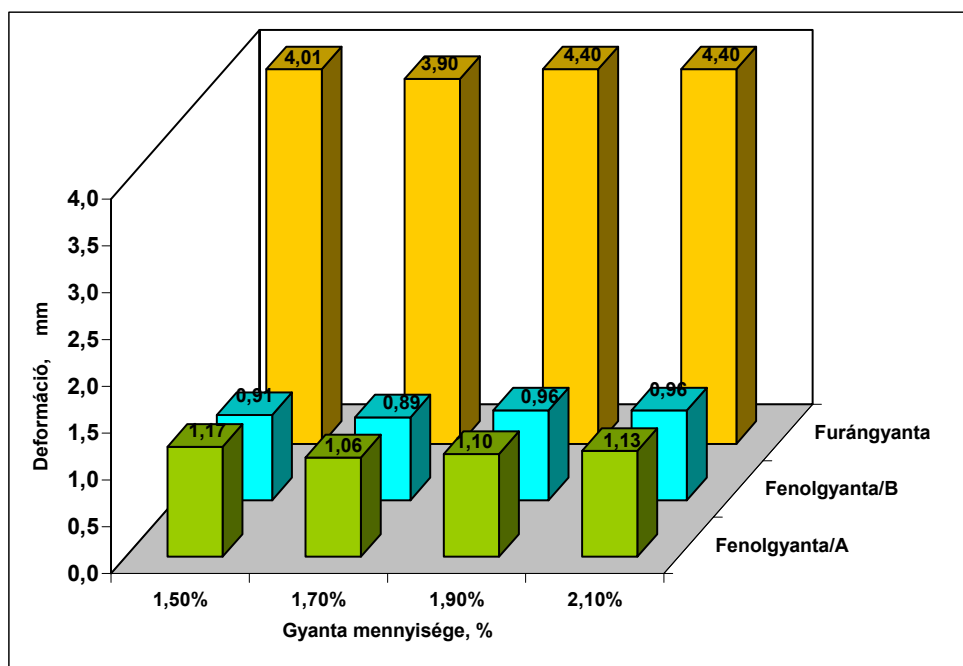
A gyanta mennyiségének növelésével nő a kötőanyaghidak hossza és ez szintén befolyásolja a deformációs tulajdonságokat, ezért megvizsgáltam a gyanta mennyiségének és minőségének, a deformációs tulajdonságokra gyakorolt hatását.

21. táblázat

A gyanta mennyiségének és minőségének, a deformációs tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

| | |
|---|---|
| Szemeseösszetétel, % | 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 1,5%, 1,7%, 1,9%, 2,1% Fenolgyanta /A, Fenolgyanta /B, Furángyanta, |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 20% Katalizátor |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 25 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 200°C |
| Lövényomás, bar | 4,5 bar |

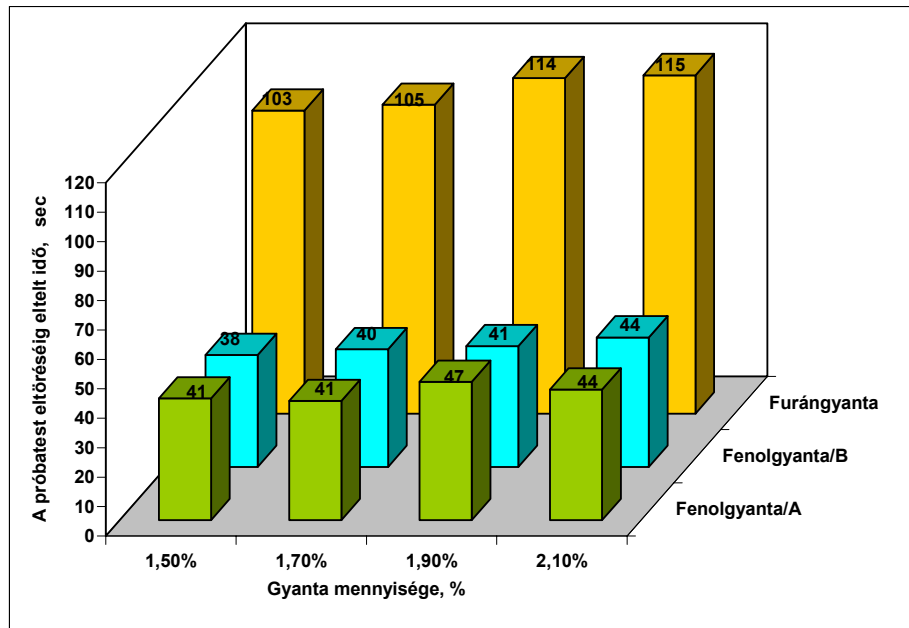
A 80. ábrán a gyanta mennyiségének, a dilatációra gyakorolt hatása látható.



80. ábra

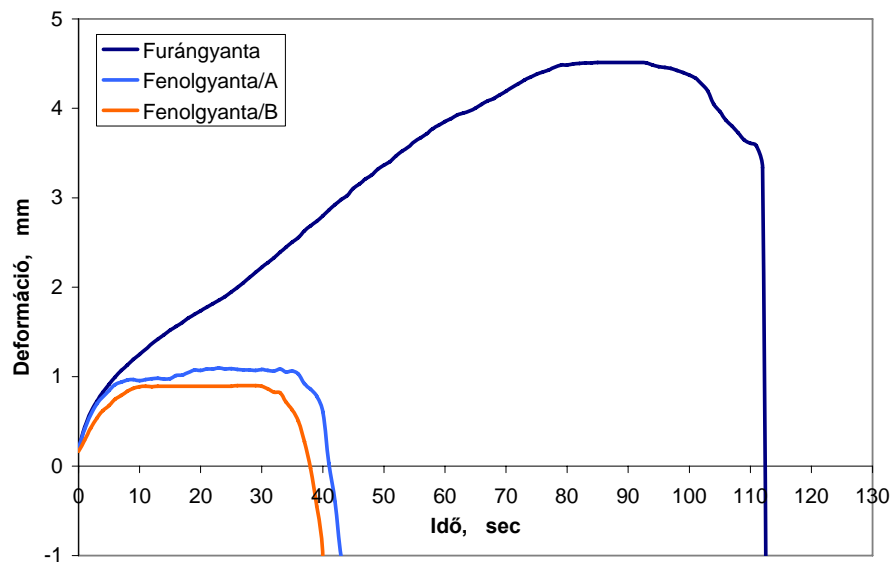
A gyanta mennyiségének hatása a dilatációra

A 80. ábra alapján megállapítható, hogy a fenolgyantás keverékek esetén a gyanta mennyiségének növelése nem gyakorol jelentős hatást a maximális pozitív deformáció értékére. A furángyantás keveréknél az 1,9%-os gyantataralomnál egy ugrás tapasztalható a deformáció nagyságában. A különbség a két szélsőérték között több mint 0,5 milliméter, mely a 3,9 milliméteres legkisebb deformációs értéket alapul véve több, mint 10%-os növekedés, amely jelentősnek mondható. Ezért furángyantás keverék esetén a deformáció minél kisebb értéken tartásának érdekében nem célszerű a gyanta mennyiségét 1,7% fölé vinni. A 81. ábrán a gyanta mennyiségének, degradációs időre gyakorolt hatása látható. A 81. ábra alapján megállapítható, hogy a gyanta mennyiségének növelése pozitívan hat a degradációs időkre, mert mindhárom gyanta esetén növekszik, tehát a magok később törnek el a hőközlés hatására. A növekedés a fenolgyantás keverékek esetén csak kismértékű (38-44 sec), furángyantás keverék esetén jelentősebb (103-115 sec). Amennyiben a degradációs idő növelése a cél, akkor célszerű lehet a gyanta mennyiségének a növelése, és a dilatáció értékének csökkentését más technológia paraméterekkel kell befolyásolni, (pl. más típusú alaphomok, polimerizációs idő, polimerizációs hőmérséklet). A 82. ábrán a gyanta mennyiségének, a deformációs görbék lefutására gyakorolt hatása látható.



81. ábra

A gyanta mennyiségének hatása a degradációs időkre



82. ábra

A gyantatípusok hatása a deformációs görbék lefutására (1,7% gyantatartalom esetén)

A 82. ábrán a különböző típusú gyantákkal készült próbatestek deformációs görbéi láthatóak. A különböző típusú gyanták deformációs görbéinek összehasonlításakor látható, hogy a fenol, illetve a furángyanta eltérő deformációs és degradációs értékeket mutat. A dilatáció szempontjából a furángyanta közel négyszeres értékeket mutat a fenolgyantához képest, a degradációs idők tekintetében pedig közel két és félszerest. A deformációs görbék lefutásában is nagy különbség van a kétféle gyantatípussal készült próbatestek esetén. A fenolgyantás keverékeknél a görbe egy gyors felfutás után a maximális pozitív deformációt több másodpercen keresztül megtartja, majd ezt követi a gyanta lágyulása – azaz a próbatest negatív deformációt szenved – és végül eltörik. Ezzel szemben a furángyanta egy lassabb felfutású görbét mutat, amit egy rövidebb, azonos értéken maradó dilatációs szakasz követ, majd a gyanta kiegészése után a próbatest eltörik. Ha olyan öntvényt öntünk, melynél az öntvénykéreg kialakulása néhány másodpercen belül megtörténik (maximum 10 sec), akkor mind a dilatáció, mind a degradációs idő szempontjából mellékes, hogy fenol- vagy furángyantás keveréket használunk, mivel az első tíz másodpercben mindkét gyantatípus közel azonosan viselkedik. Ebben az esetben a technológiai tulajdonságok közötti kis különbség miatt, előtérbe kerülhetnek a gazdaságossági és a gyárthatósági szempontok, tehát ezek alapján történhet a gyantatípus kiválasztása.

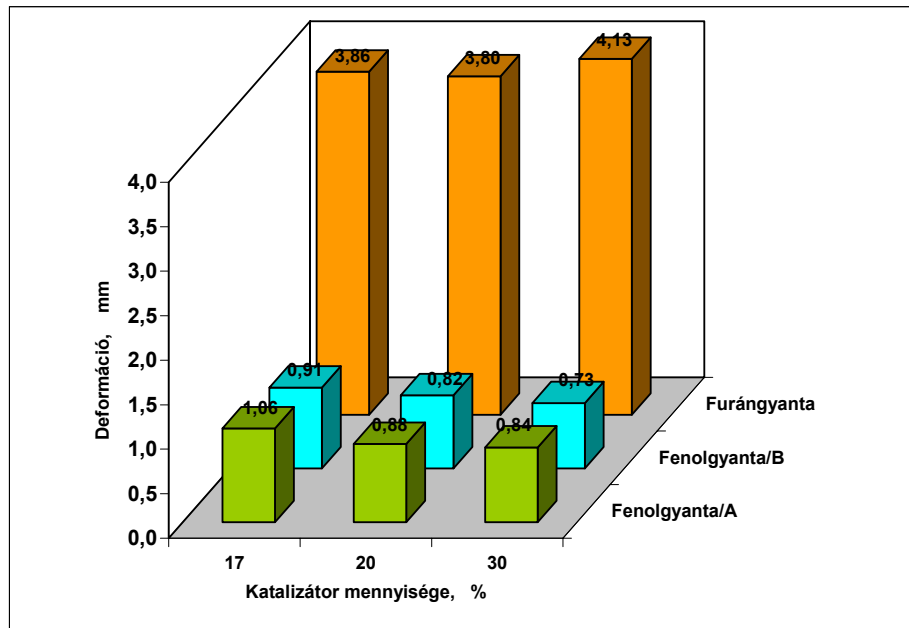
6.3.6. A katalizátor mennyiségének hatása

A kötőanyaghoz adagolt katalizátor, a mag deformációs tulajdonságaira gyakorolt hatását eddig nem vizsgálták a kutatók. A katalizátor mennyiségének növelése rideggé teszi a magokat, ugyanis túl gyorsan megy végbe a kikeményedési folyamat és nem minden gyantahíd alakul ki megfelelően.

22. táblázat

A különböző mennyiségű katalizátor hatásának vizsgálatához felhasznált anyagok és technológiai paraméterek

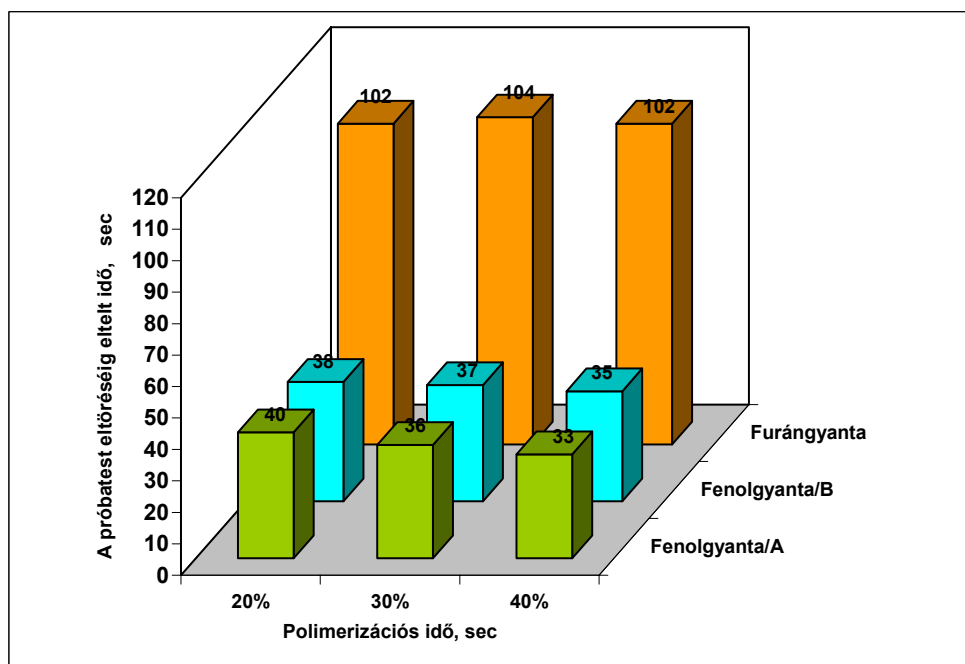
| | |
|---|---|
| Szemcseösszetétel, % | 100% Regenerált homok |
| Gyanta mennyisége, % | 1,5% Fenolgyanta /A, Fenolgyanta /B, Furángyanta, |
| Katalizátor mennyisége a gyanta mennyiségére vonatkoztatva, % | 20%, 30%, 40%, Katalizátor |
| Keverési idő, sec | 120 sec |
| Polimerizációs idő, sec | 25 sec |
| Polimerizációs hőmérséklet, °C | 200°C |
| Lövőnyomás, bar | 4,5 bar |



83. ábra

A katalizátor mennyiségének hatása a dilatációra

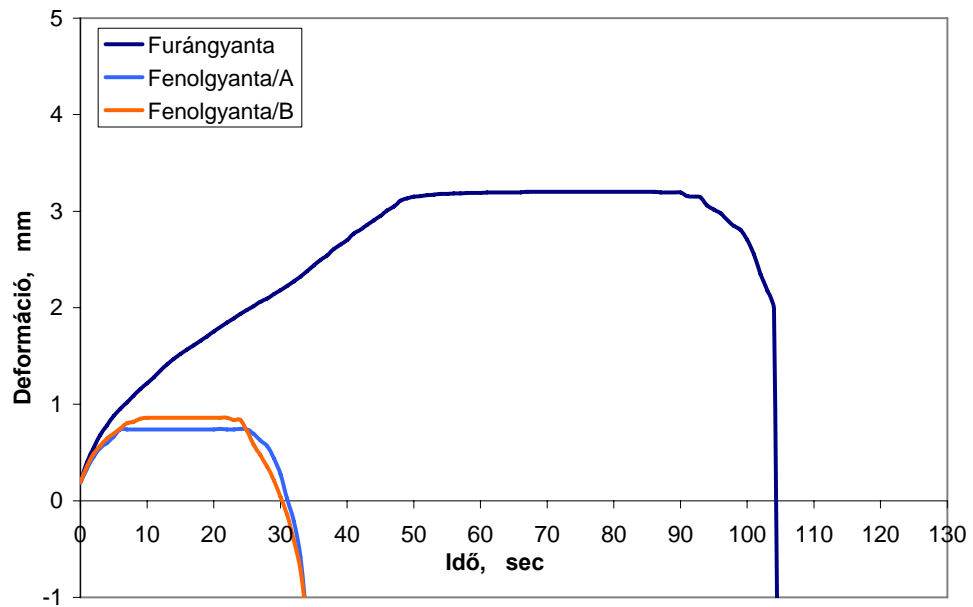
A 83. ábrán a különböző mennyiségben alkalmazott katalizátor, deformációra gyakorolt hatása látható. Az ábra alapján megállapítható, hogy a katalizátor mennyiségének növelésével a maximális pozitív deformáció a két fenolgyanta esetén kismértékben csökken, a furángyanta esetén pedig növekszik. A 84. ábrán a katalizátor mennyiségének, degradációs időre gyakorolt hatása látható.



84. ábra

A katalizátor mennyiségének hatása a degradációs időkre

A degradációs idők tekintetében elmondható, hogy a két fenolgyanta esetén a katalizátor mennyiségének növelésével a degradációs idő csökken, a furángyanta esetén pedig nem tapasztalható jelentős változás. A 85. ábrán a különböző mennyiségben alkalmazott katalizátor, deformációs görbékre gyakorolt hatása látható.



85. ábra

A katalizátor mennyiségének hatása a deformációs görbék lefutására
(Furángyanta)

6.3.7. Összefoglalás, új tudományos eredmények

A melegdeformációs vizsgálatok során, a „Hot Distortion Tester” mérőműszer segítségével meghatároztam a különböző típusú homokokból készült, furángyanta és fenolgyanta kötésű próbatestek hő hatására bekövetkező deformációs tulajdonságait.

2. Megállapítottam, hogy a kötőanyagként alkalmazott műgyanták minősége, mennyisége és polimerizációs körülményei jelentősen befolyásolják a homokmagok meleg deformációs folyamatait. A befolyásoló tényezők mennyiségi és minőségi hatásait mutatom be a 2.a - 2.f alpontokban:
- 2.a A furángyantás homokkeverékek pozitív deformációja - azonos gyantatartalom mellett 2-4-szer nagyobb, mint a fenolgyantás keverékeké, valamint a furángyantás keverékek degradációs ideje több, mint kétszerese a fenolgyantás keverékek esetén mért időnek. Ennek oka, hogy a furánbázisú gyanta kiégése lényegesen hosszabb időt vesz igénybe, mint a fenolbázisú gyantáé.
2. b A fenolgyantás keverék esetén a gyanta mennyiségének növelése nem gyakorol jelentős hatást a maximális pozitív deformáció értékére.
- 2.c Az 1,5-2,1% közötti gyantamennyiség hatásának vizsgálata során az 1,9% gyantatartalomnál, a termikus deformáció mértéke a legkisebb deformáció mértékéhez képest mintegy 10%-al megnő. A gyantamennyiség további növelése esetén a deformáció mértéke már csak kis mértékben változik.
- 2.d A kötőanyaghoz adagolt katalizátor arányának változtatása kis mértékű hatást gyakorol a termikus deformációra, a fenolgyantás keverékek esetén kismértékben csökkenti, a furángyantás keverékek esetén kismértékben növeli a pozitív deformáció mértékét.
2. e A mag polimerizációs hőmérsékletét 180-220°C között változtatva megállapítottam, hogy a 200°C-os hőmérsékletre mind a fenol, mind a furángyanta esetén egy dilatációs maximumpont tartozik.
- 2.f A próbatestek polimerizációs időtartam változtatásának hatása 17-60 sec között a fenolgyantás kötés esetén nem mérhető, furángyantás keverékek esetén 30-40 sec közötti időtartamnál egy, a legkisebb értékhez képest mintegy 10%-al nagyobb értékben megmutatkozó maximum tapasztalható.

- 3.** Az elvégzett kísérletek során bebizonyítottam, hogy kétféle ásványtani minőségű homokszemcsék keveréke esetén bármelyik minőség dilatációs tulajdonságai akkor válnak meghatározóvá, ha az adott minőségből legalább 80% van a rendszerben. Ugyanez vonatkozik a termikus deformáció mért értékeire is az alábbi eredmények szerint:
- 3. a** Megállapítottam, hogy ha a „kerámia bázisú” (mullit) mesterséges homok és a regenerált homok különböző arányú keverékeiben fokozatosan növelem a kerámia homok mennyiségét, a deformáció mértéke kezdetben kis mértékben fokozatosan csökken, azonban 80%-os kerámia homok arány elérésekor ugrásszerűen a felére csökken, ezután 100%-os arányig már csak kis mértékben csökken tovább.
- 3. b** Ha az alaphomok keverékben a mesterséges homok aránya növekszik a regenerált homokhoz képest, a degradációs idő, furángyantás kötés esetén 10%-al nő.
- 3. c** Az újhomok-regenerált homok különböző arányú keverékeiből készített próbatestek vizsgálata során megállapítottam hogy, az újhomok arányának fokozatos növelésekor az újhomok 80%-os arányánál a pozitív deformáció ugrásszerűen, mintegy 10%-al növekszik, ezután kis mértékben tovább nő az újhomok 100%-os arányáig.

7. Összefoglalás

Doktori kutatómunkám elsődleges célkitűzése a regenerált homokok tulajdonságainak vizsgálata volt hidegen és melegenkötő formázókeverék rendszerek esetén.

Kísérleteim első felében a mechanikusan regenerált homok hatását vizsgáltam az öntvény felületi minőségére. A vizsgálatokhoz lemezgrafitos öntöttvasból „7 lépcsős hengeres” próbatesteket öntöttem. A kísérleti öntvény öntéséhez hidegenkötő homokmagokat használtam, melyek regenerált homok-„újhomok” meghatározott arányú homokkeverékeiből készültek. Az öntés után, a próbatestek hossz tengely menti kettőfürészelését követően, a felületekről készült makrofotók elemzésekor megállapítottam, hogy a regenerátumot tartalmazó magokkal készült öntvények felületén minden esetben ráégés volt látható.

Ahhoz, hogy a felületi hibát mélyrehatóbban elemezhessem scanning mikroszkópos, és energia diszperzív mikroszondás vizsgálatokat végeztem. Ehhez a próbaöntvény alsó, felső és középső részéből töretmintákat vételeztem. A próbatest nagyobb hőterhelésnek kitett alsó részén nagymértékű penetráció volt látható, azonban csak mechanikai penetráció volt, mert az olvadék csak körülölelte a homokszemcséket, kémiai reakcióba nem lépett velük. Megvizsgáltam a penetrált fém és a homokszemcsék kémiai összetételét. A kvarcsemcséken lévő, le nem tisztított gyanta tapadványok nagy mennyiségű kenet tartalmaztak, azonban a fém-kvarcsemcsék határfelületén lévő, a fémet borító salakhártya nem tartalmazott kenet. A kén a szakirodalmi adatok szerint elősegíti a forma-fém határfelületen kialakuló felületi feszültség, és ezzel együtt a küszöbnyomás mértékének csökkentését, ezáltal elősegíti a penetráció kialakulását. Mondhatjuk azt is, hogy adott esetben, a kisebb mértékű penetrációra - fémbeszivárgásra- akkor került sor, amikor a kénvegyületek még megtalálhatók voltak az öntvényfelületet borító oxigén-tartalmú salakhárttyában, mert nem voltak adottak a termodinamikai és reakciókinetikai feltételek a beoldódásukhoz. A próbatest felső-, kisebb hőterhelésnek kitett helyéről vett minta esetében nem találtam penetrációra utaló jeleket, azonban a fémet borító oxigén-tartalmú salakhárttyában pirit kristályok alakultak ki. Az alacsonyabb hőmérséklet miatt nem oldódott a kén a vasban, és olyan termodinamikai feltételek alakultak ki, melyek hatására ezek a kén-tartalmú kristályok kialakulhattak.

Az előbbi megállapítások alapján elmondható, hogy a regenerálás hatékonysága nagyon fontos paraméter az öntvények felületi minőségének biztosításakor.

Kísérleteim második részében melegen-kötő úgynevezett hot-box kötőanyagrendszerrel készült magok termikus deformációját vizsgáltam a Symphon Gerosa-fejlesztésű Hot Distortion Tester mérőberendezéssel. A laboratóriumi kísérletek során megvizsgáltam a homokkeverékek szemcseösszetételének, a gyanta és katalizátor arányának, a gyanta típusának, a keverék polimerizációs idejének és hőmérsékletének hatását a magok dilatációjának mértékére és a próbatest eltöréséig eltelt időre. Mindkét

mutatószám igen fontos paraméter a magok magas hőmérséklettel szembeni viselkedésének leírásakor. Magtípustól függően, eredményeimben megállapítottam alapján optimalizálható a dilatáció mértékének csökkentése és a degradációs idők növelése. Nemcsak technológiai, hanem gazdasági szempontok figyelembevételével tudunk megfelelő homokkeverék összetételeket összeállítani a magok termikus deformációjának csökkentésére vonatkozóan.

Az eredmények kiértékelése alapján megállapítottam, hogy a keverék szemcseösszetétele, különösen a regenerátum -„újhomok” aránya, valamint a kis hőtágulású „kerámia bázisú” homok - regenerátum aránya jelentősen befolyásolja a magok termikus deformációját. A regenerátum arányának növelésével a termikus deformáció csökkenthető, hiszen a regenerátum már számos termikus behatáson esett át, és ezért már nem szenved méretnövekedéssel járó allotróp átalakulást az újhomokkal szemben. A „kerámia bázisú” homok alkalmazásával szintén nagymértékű csökkenés érhető el a dilatáció tekintetében.

A magok polimerizációs hőmérsékletének vizsgálatakor kiderült, hogy 200°C- hoz tartozó próbák esetén egy dilatációs maximum figyelhető meg.

A gyanta típusának és arányának vizsgálati eredményei azt mutatták, hogy a furángyanta a fenolgyantához képest nagyobb mértékű deformációt mutat. Ez a megállapítás a degradációs időkben is megmutatkozik. Ez az optimalizálásnál azért fontos paraméter, mert ha vékony magokat használunk, akkor célunk a kis dilatáció biztosítása.

8. AZ ÉRTEKEZÉS TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEINEK JELENTŐSÉGE ÉS HASZNOSÍTÁSUK LEHETŐSÉGEI

A tézisekben megfogalmazott tudományos eredmények új ismeretekkel bővítik a formázóanyagok tudományterületét. Az elért új eredmények beépíthetők az oktatásba, kutatásba és a gyártásfejlesztésbe is.

Az 1. téziscsoportban megfogalmazottak szerint a regenerátum minősége, valamint a regenerálási fok nagy hatással van a formázókeverék tulajdonságai mellett az öntvény felületi minőségére is. A regenerátumon lévő kötőanyag maradványok kéntartalmának és az öntés során alkalmazott homok/fém aránynak nagy jelentősége van az öntés során kialakuló penetrációra, ugyanis adott esetben (1.a) elősegítheti a fémbehatolást a mag pórusaiba, más feltételek (1.b) esetén nem.

A 2. téziscsoportban megfogalmazott eredmények felhasználásával a mag gyanta és katalizátor tartalma, valamint polimerizációs tulajdonságai optimalizálhatóak a mag dilatációjának csökkentésére vonatkozóan.

A 3. téziscsoportban ismertetett megállapítások alapján a megfelelő szemcseösszetétel és homokminőség megválasztásával a dilatáció mértéke csökkenthető, a magok degradációs ideje pedig növelhető

A 2. és 3. téziscsoportokban megfogalmazottak alapján optimalizált magkészítési technológia dolgozható ki, illetve az adott öntvény adott magjának gyártásához megválasztható az optimális homokminőség-kötőanyag variáció.

Az értekezésben foglalt eredmények az öntő szakirányos hallgatók oktatási anyagának gazdagításában közvetlenül hasznosítható. Az értekezésben foglalt eredmények eddig 1 db. TDK dolgozat és 6 db. diplomaterv elkészítésénél, valamint ipari technológia fejlesztésben hasznosultak.

9. Az értekezés témaköréből megjelent publikációk

Nyomtatásban megjelent publikációk:

1. *Anikó Détári*: Regenerierung und Verwertung der Giesserei Formstoffe
11. Internationaler Studententag der Metallurgie, 2004. április 1-3.,
Aachen, Konferenciakiadvány, s. 36-41
2. *Anikó Détári*: Mechanical reclamation of resin mould sand
MicroCad Tudományos Konferencia, 2005. 03. 10-11,
Konferenciakiadvány, 7-12 o.
3. *Détári Anikó*: Furángyanta kötésű homokok regenerálása
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, 2005. 03. 18-19,
Konferenciakiadvány
4. *Anikó Détári*: Regenerace slévárenských smesi se syntetickými
pryskyricem
42. Czech Foundry Days, 2005. 09. 20-22, DVD kiadvány
5. *Anikó Détári*: Examination of cast iron penetration of resin bonded sand
13. Internationaler Studententag der Metallurgie, Leoben, 2006. 03.-30-
04. 01, Konferenciakiadvány, s. 213-218
6. *Anikó Détári*: Hot distortion test of hot box cores
43. Czech Foundry Days, 2006. 11. 14-15, DVD kiadvány
7. *Jónás Pál, Détári Anikó, Svidró József*: Az öntvények felületminőségét
befolyásoló tényezők vizsgálata
Bányászati és Kohászati Lapok, 140. évf. 2., 2007, 17-26 o.
8. *Anikó Détári, Dr. Levente Tóth*: Untersuchungen zu den Eigenschaften
von Sandkernen aus thermisch regeneriertem Sand unter den
Bedingungen der Warmverformung, Giesserei-Praxis, 2009.
Megjelenés alatt a szerkesztőség nyilatkozata szerint.

Szóbeli előadások:

1. *Détári Anikó*: Öntödei formázóanyagok újrahasznosítása Miskolci Egyetem Tudományos Ülésszaka, Miskolc
2003. 09. 4-5.
2. *Détári Anikó*: Az öntödei formázóanyag körforgalom néhány problémája
17. Magyar Öntőnapok, Lillafüred
2003. 10. 5-7.
3. *Détári Anikó*: Műgyanta kötésű formázókeverékek újrahasznosításának környezetvédelmi problémái
Doktoranduszok Fóruma, Miskolci Egyetem
2003. 11. 06.
4. *Détári Anikó*: Az öntödei formázóanyagok regenerálásának lehetőségei
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia
2004. 03. 26-27.
5. *Détári Anikó*: Regerierung und Verwertung der Giesserei Formstoffe
11. International Studententag der Metallurgie, Aachen, Németország
2004. 04. 1-3.
6. *Détári Anikó, Dr. Tóth Levente*: Műgyanta kötésű formázóanyagok regenerálása
Bányászati Kohászati Földtani Konferencia, Petrozsény Románia
2004. 05. 20-23.
7. *Détári Anikó*: Műgyantakötésű homokok regenerálása
Doktoranduszok fóruma, Miskolci Egyetem
2004. 11. 4.
8. *Détári Anikó*: Mechanical reclamation of resin mould sand MicroCad
2005 Nemzetközi Tudományos Konferencia
2005. 03. 10-11.
9. *Détári Anikó*: Furángyanta kötésű homokok regenerálása
Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, Románia
2005. 03. 18-19.
10. *Détári Anikó*: Műgyanta kötésű öntödei használt homokok újrahasznosítása Bányászati, földtani, kohászati konferencia, Nagyvárad, Románia
2005. 03. 31-04. 03.
11. *Détári Anikó*: Regenerace slévarenských smesi se syntetickými pryskyricemi
42nd Czech Foundry Days, Brno, Csehország
2005. 09. 20.

12. *Détári Anikó*: Homok regenerátum felhasználhatóságát befolyásoló paraméterek vizsgálata
XVIII. Magyar Öntőnapok, Balatonfüred
2005. 10. 9-11.
13. *Détári Anikó*: Examination of cast iron penetration of resin bonded sand
[Internationaler Studententag der Metallurgie](#), Leoben, Ausztria
2006. 03. 30-04. 01.
14. *Détári Anikó*: Regenerált homokok hatása az öntvény felületi minőségére Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia,
Sepsiszentgyörgy, Románia
2006. 04. 6-9.

Poszter előadások:

1. *Détári Anikó*: Forma-fém interakciók vizsgálata műgyantakötésű formázókeverékeknél
Miskolci Egyetem Doktoranduszok Fóruma Magyar Tudomány Napja
2002. 11. 06

10. Irodalomjegyzék

- [1] G. Röth, R. Döpp: Untersuchungen zur Verträglichkeit regenerierter organisch und anorganisch gebundener Produktionssande mit verschiedenen Kunstharzbindersystemen sowie zur Regenerierbarkeit von Gießereisanden, Giessereiforschung 1998, 50, S. 10-24
- [2] Bakó Károly: Öntödei formázóanyagok, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1976, 156-157 o., 185-186 o., 216 -221 o.
- [3] W. Tilch: Scripte zur Vorlesung Umweltschutz in Gießereien, Szeminárium, Miskolc, 2003
- [4] H.G. Levelink, F.P.M.A. Julien: Penetrations- und Lunkererscheinungen infolge Wechselwirkung zwischen erstarrendem Gußstück und Form, Giesserei, 1973, 60. Jahrgang, S. 488-495
- [5] H. Löblich, W. Schlesiger, K. Nowacky, W. Siefer: Wirkungsgrad mechanischer Regenerieranlagen für kaltharzgebundene Umlaufformstoffe, Giessereiforschung 41, 3/1989, S. 87-98
- [6] J. Winterhalter, W. Hoffmann, K. Orths: Wirkungen feinstkörniger Bestandteile in Formstoffen Giesserei.-Forschung. 32, 1980, S. 17-28
- [7] H. Berndt: Neue Aspekte in der Aufbereitungstechnik und Qualitätssicherung von tongebundenen Sanden, Gießerei 67, 1980, S. 667-675
- [8] H. Berndt: Die Überwachung von Verschleißerscheinungen an einem Sandumlaufsystem, Gießerei 55, 1968, S. 441-453
- [9] http://www.ikomaterials.de/german/habu_d/handbuch/
- [10] D. M. Stefanescu, S.R. Giese, T.S. Piwonka, A.M. Lane: Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part I.: Physics of Penetration Defects and Penetration Model, AFS Transaction, 1996, vol 206, pp. 1233-1248
- [11] J. Winterhalter, W. Seifer: Zur Wirkung von Feinanteilen und Glanzkohlenstoffbildern im Formstoff auf die Gussstückeigenschaften, Gießerei 74, 1987, S. 633-639
- [12] J. M. Svoboda: Mechanisms of Metal Penetration in Foundry Molds, AFS Transaction, 1994, vol 24, pp. 461-471
- [13] AFS Mold Metal Interface Reactions Committee: Mechanical Penetration Defects, Modern Casting, 9/1994, pp. 43-44, 51
- [14] Dr. Nándori Gyula, Dr. Vereskői János: Vas-, acél- és fémöntészet, Tankönyvkiadó, 1970, Budapest, 154-156 o.
- [15] H. G. Levelink, H. van den Berg, Giesserei Praxis, 11/1974, S. 219-225
- [16] J. O. Barlow, M. Owens, D.M. Stefanescu, A.M. Lane, T.S. Piwonka: Chemical Penetration in Sand Molds in Steel Casting, AFS Transaction, 1997, vol 145, pp. 325-331
- [17] Werner Tilch: Unterlagen zur Lehrveranstaltung Formtechnik: Grundlagen und Formstoffe 2002

- [18] G.Kaptay, T.Matsushita, K.Mukai, T.Ohuchi: On Different Modifications of the Capillary Model of Penetration of Inert Liquid Metals into Porous Refractories and their Connection to the Pore Size Distribution of the Refractories - Metall. Mater. Trans. B, 2004, vol.35B, pp.471-486
- [19] Dr. Nándori Gyula: Elméleti Öntészeti II. Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó Bp. 1975, 88-90 o.
- [20] S.R. Giese, D. M. Stefanescu, J. Barlow, T.S. Piwonka: Cast Iron Penetration in Sand Molds, Part II.:Experimental Evaluation of Some Main Parameters Responsible for Penetration, AFS Transaction, 1996, vol 207, pp. 1249-1257
- [21] K.I. Waschenko, A.P. Ruday, AFS Transaction, 1962, vol 70, pp. 855-864
- [22] Öntészeti kézikönyv: Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1985, 308-315, 346-353,
- [23] T.Bárczy, G.Kaptay: Modelling the infiltration of liquid metals into porous ceramics - Materials Science Forum, 2005, vols. 473-474, pp.297-302
- [24] Bakó Károly: Ötvözetlen acélöntvény ráégésének optikai vizsgálata, Öntöde, 1968/6, 19. Évfolyam, 105-109,
- [25] Patterson, W. D. Ammann és S. Engler.: Giesserei Techn. Wissensch. Beiheft 20
- [26] E. Ireland, K. Chang, J. Kroker: New Horizon in Nobake Binder Technology, AFS Transaction, 2002 vol 25, pp. 623-629
- [27] G.R. Crandell, L. Stahl, V. Lafay, C.R. Glowacki, S.Knight : Core Additives: Effects on Core Strength, Casting Quality and Air Emissions, AFS Transaction, 2005 vol 129, pp. 381-392
- [28] Dr. Jónás Pál: Járműipari öntvények előadási anyag (K. Geisler, E. J. Kohlmeyer, H. Wentrup)
- [29] Szopory Béla: Elemző kémia III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1976, 43-
- [30] S.N. Ramrattan, S. Vellanki, O. Jideaku, C. Huang: Thermal Distortion in Process Control of Chemically-Bonded Sands, AFS Transaction, 1997, vol 152, pp.161-164
- [31] M.J. Keil, J. Rodriguez, S.N. Ramrattan: Thermal Distortion of Shell and Nobake Binder Systems, AFS Transaction, 1999, vol 99, pp. 71-74
- [32] U. Recknagel, W. Tilch: Untersuchungen zum Ausdehnungsverhalten von Formstoffen im Hinblick auf die Vermeidung typischer Gußfehler – Teil 1, Gießerei-Praxis, 8/2000, S. 337-344
- [33] U. Recknagel, W. Tilch: Untersuchungen zum Ausdehnungsverhalten von Formstoffen im Hinblick auf die Vermeidung typischer Gußfehler – Teil 1, Gießerei-Praxis, 9/2000, S. 378-384

- [34] R. Laitar, C.K. Johnson: High Hot Strength Phenolic Urethane Cold Box System, AFS Transaction, 1986, vol 34, pp. 187-194
- [35] G.C. Fountaine, K.B. Horton: Hot Distortion of Cold Box System, AFS Transaction, 1990 vol, 70, pp. 9-16
- [36] S.N. Ramrattan, S.F. Cheach, S.M. Zandarski: Effects of Aluminium Fill Temperatures on the Distortion of Chemically Bonded Sand System, AFS Transaction, 2003, vol 154, pp. 599-605
- [37] R. Iyer, S.N. Ramrattan, J. Lanutti: Thermo – Mechanical Properties of Chemically Bonded Sands, AFS Transaction, 2001, vol 109, pp. 1-9
- [38] Dietert dilatometer, műszerleírás, www.diertlab.com/products
- [39] M.B. Krysiak, T.J. Keener, Dr. S.N. Ramrattan, S.F. Cheah: Thermal Distortion of Green Sand and Chemically Bonded Sand at Cast Iron Fill Temperatures, AFS Transaction, 2002, vol 037, pp. 1-14
- [40] Symphon+Gerosa Sand Laboratory Instrumentation Product Catalog, <http://www.simpsongroup.com/sandtest/sandtest.htm>
- [41] S. McIntyre, S. M. Strobl: Adapting Hot Distortion Curves to Process Control, Foundry Management and Technology, 3/1998, pp. 22-26
- [42] Integrated Pollution Prevention and Control-Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry, 11/2002 Draft pp. 56
- [43] Dúl J., Nándori Gy., Szalai Gy., Gedeonova Z.: Einfluß verschiedener Formstoffparameter auf die Maßgenauigkeitänderungen von Abgüssen aus Gußeisen während der Erstarrung, GIESSEREIPRAXIS 2001, No. 2, pp. 75-80
- [44] Dúl J., Gedeonova Z., Szalai G.: Dimensional changes of cast iron during crystallisation at different mold parameters, Materials Science Forum 2000, Vol. 329-330, pp. 501-506
- [45] G.Kaptay, T.Bárczy: On the asymmetrical dependence of the threshold pressure of infiltration on the wettability of the porous solid by the infiltrating liquid - J.Mater.Sci, 2005, vol.40, pp.2531-2535
- [46] Kaptay G., Stefanescu D.M. Theoretical Analysis of the Effect of Oxygen on the Penetration Factor in the Iron/Silica System - AFS Transactions, 1992, v. 100, pp. 707 - 712.

Summary

The major aim of my thesis was to study the effects of the reclaimed sand on the no-bake and the hot-box sand systems.

In the first part of my experiments I examined the effects of the reclaimed sand on the casting surface. Step-cone castings were prepared, which made of grey cast-iron. I used no-bake cores for my step-cone castings, which contained of predetermined ratio of reclaimed sand and new sand. After cast process the castings were sawn direct axis. During examination of the casting surfaces I established that all casting surfaces were burnt on but one, which containing 100% new sand.

Thereafter I made SEM and EDS examinations, so I sampled fracture specimens from the upper, central and lower parts of step-cone casting. At the lower part of casting, which has been larger thermal stress can be seen penetration largely. At the same time the mechanical penetration has been formed only because the melt encompassed the sand grains and chemical connection was not evolved between them. I examined the chemical composition of the penetrated iron and the sand grains. However, the residual materials on the quartz sand grains contained much sulphur, this can not be seen on the slug overlaying the melt at the sand grains-melt interface. The sulphur reduces the threshold pressure and the surface tension in the interface thereby the chance of the penetration is larger. In case of the examination of the upper part of the casting, which has been less thermal stress I did not find mechanical penetration, although pyritic crystals formed in the oxygen containing slag covering metal. The sulphur was not solubled in the iron because of the lower temperature so these crystals could be formed due to the thermodynamical conditions. According to the previous establishments the effectiveness of the sand reclamation is very important parameter to assure the acceptable casting surface.

In the second part of my experiments I examined the thermal distortion of the hot-box cores using Hot Distortion Tester (by Simpson-Gerosa). I examined the effects of granulometric composition of the sand mix, the ratio of resin and catalyst, the type of the resin, the temperature and time of the polymerization on the expansion and the degradation time of the sand cores. According to in my establishments can be optimized the reducing expansion and increasing the degradation time depending on the type of the sand cores.

I established that the grain composition of the sand mix in especial the ratio of the reclaimed sand-small expansion ceramics sand and the ratio of the reclaimed sand-new sand affect the thermal distortion of the cores greatly. The increasing of the reclaimed sand ratio can be reducing the deformation as the reclaimed sand has already been come trough the thermal stress to compare the new sand. Using of the ceramics sand can be reduced the expansion largely.

At the examination of the polymerization temperature of the cores turned out that the case of the test-piece which made at 200°C can be seen an

expansion maximum. According to the examination results of the resin type and ratio the furan resin showed larger expansion than the phenol resin. This establishment is appropriate in case of degradation time. The effect of the ratio of the catalyst using different type of resin on the thermal distortion showed disparate tendency.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani tudományos vezetőmnek, Dr. Tóth Leventének, a szakmai és vezetői segítségéért, és azért, hogy megteremtette a lehetőséget a kutatásaim elvégzéséhez.

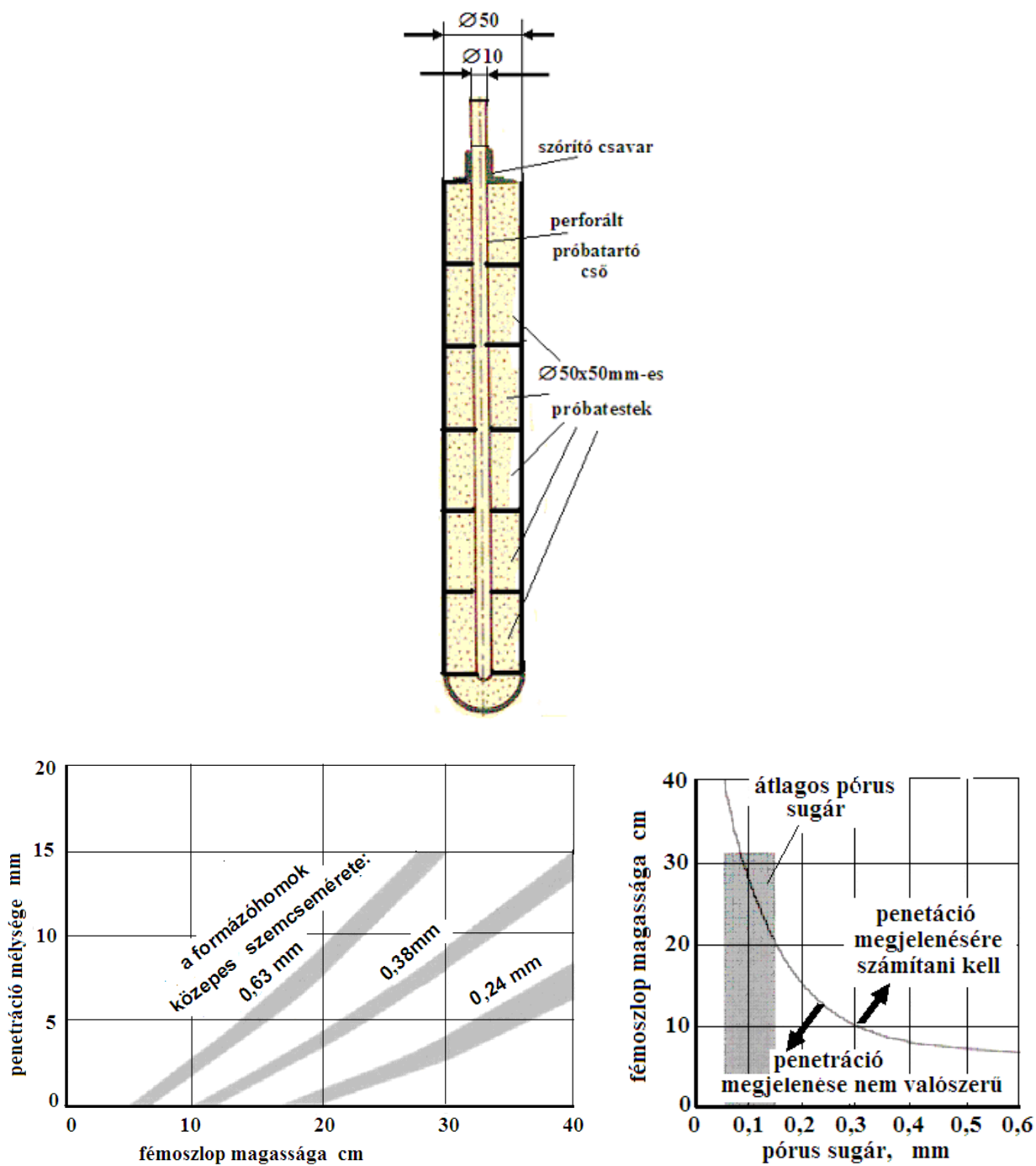
Köszönöm a Miskolci Egyetem Műszaki Anyagtudományi Kar Metallurgiai és Öntészeti Tanszékének támogatását, és azt, hogy segítették szakmai fejlődésemet. Külön köszönetemet fejezem ki Kovács Árpádnak a SEM és az EDS felvételek készítéséért és Dr. Jónás Pálnak, hogy mind szakmai, mind emberi támogatásukkal segítették a kísérletek és a kutatómunka kivitelezését.

Emellett szeretnék köszönetet mondani a Csepel Metall Vasöntöde Kft. dolgozóinak, különös tekintettel Püspöki Erzsébetnek. Továbbá köszönettel tartozom a NEMAK Győr Kft. dolgozóinak, különös tekintettel Dr. Fegyverneki Györgynek és Zubács Róbertnek.

Továbbá szeretném köszönetemet kifejezni a Freibergi Egyetem Öntészeti Tanszékének, különös tekintettel Werner Tilch professzor úrnak és Dr. Hartmut Polzin-nak a DAAD ösztöndíj keretében végzett kutatómunkámban való szakmai és emberi támogatásért.

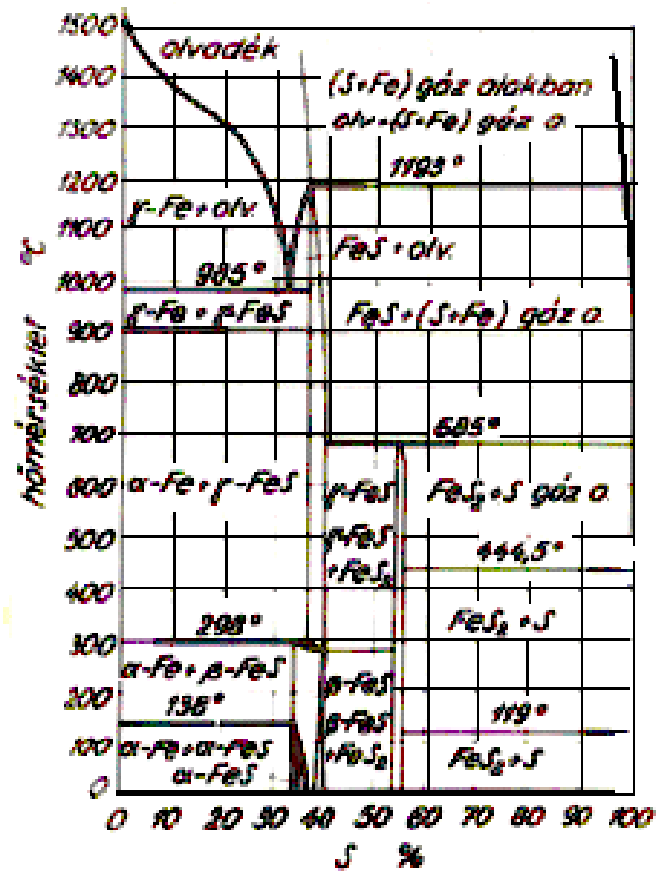
Détári Anikó

Melléklet

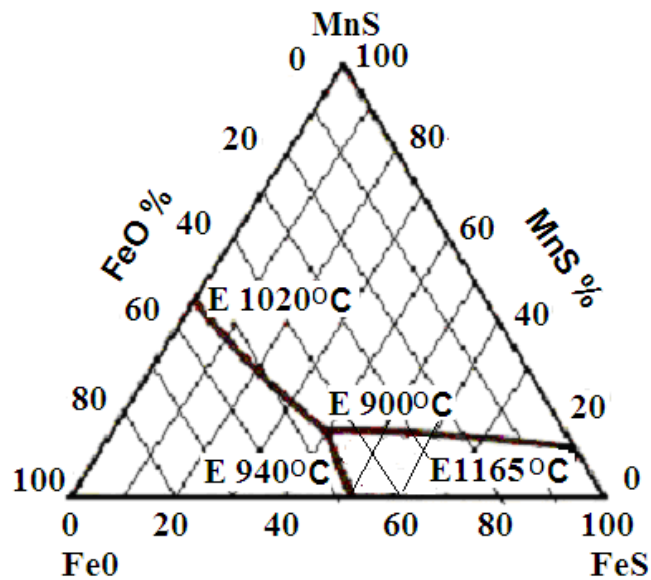


1. ábra

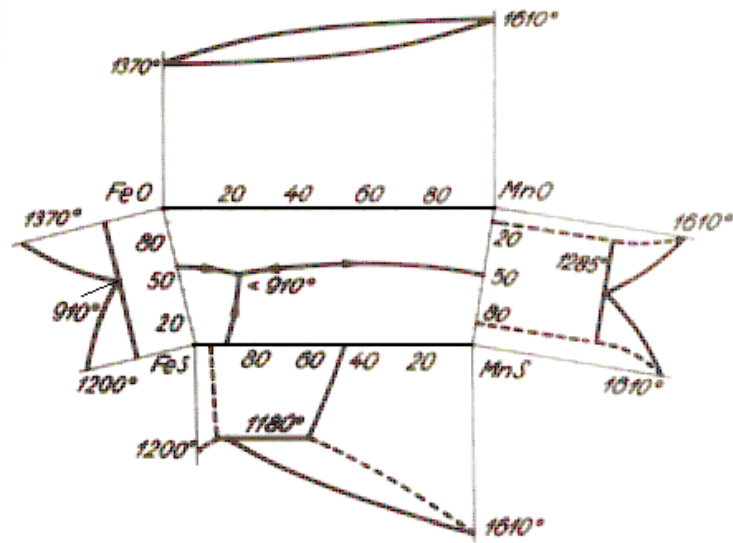
A fémoszlop magasságának, a formázóhomok közepes szemcseméretének és a formázókeverék átlagos pórus sugár méretének hatása a penetráció mértékére ötvözetlen acélok esetén [25]



Az Fe-S egyensúlyi fázisdiagram



FeO-FeS-MnS egyensúlyi rendszer
 likvidus felülete
 (K.Geisler és E.J.Kohlmeyer)



Fe(II)-oxid - Mn(II)-oxid - Fe(II) -szulfid - Mn(II)-szulfid
 egyensúlyi állapotára likvidusz felülete
 (H. Wentrup)

2. ábra

A Fe-S, a FeO-MnO-FeS-MnS, továbbá a FeS-FeO-MnO egyensúlyi
 fázisdiagramok