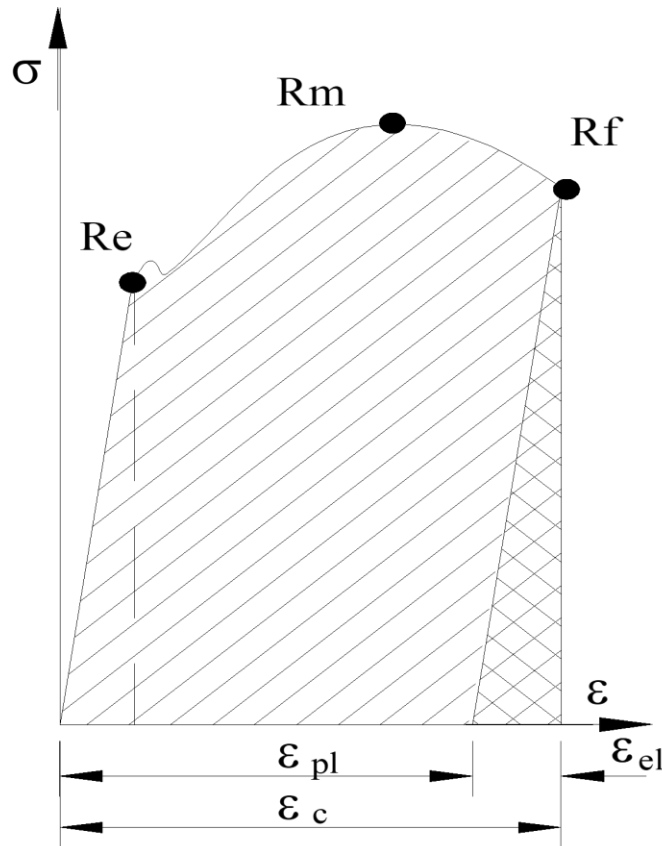

Plastická deformácia kovových materiálov



Plastická deformácia

- Pri plastickej deformácii dochádza k trvalým zmenám materiáli, k trvalej tvarovej zmene, prípadne k vzniku trhlin.



Obr. 1 Konvenčný diagram zo skúšky ťahom

R_e – medza klzu,

R_m – pevnosť v ťahu,

R_f – napätie v okamihu lomu,

ϵ_c – celková deformácia,

ϵ_{el} – elastická deformácia,

ϵ_{pl} – plastická deformácia.

Mechanizmy plastickej deformácie

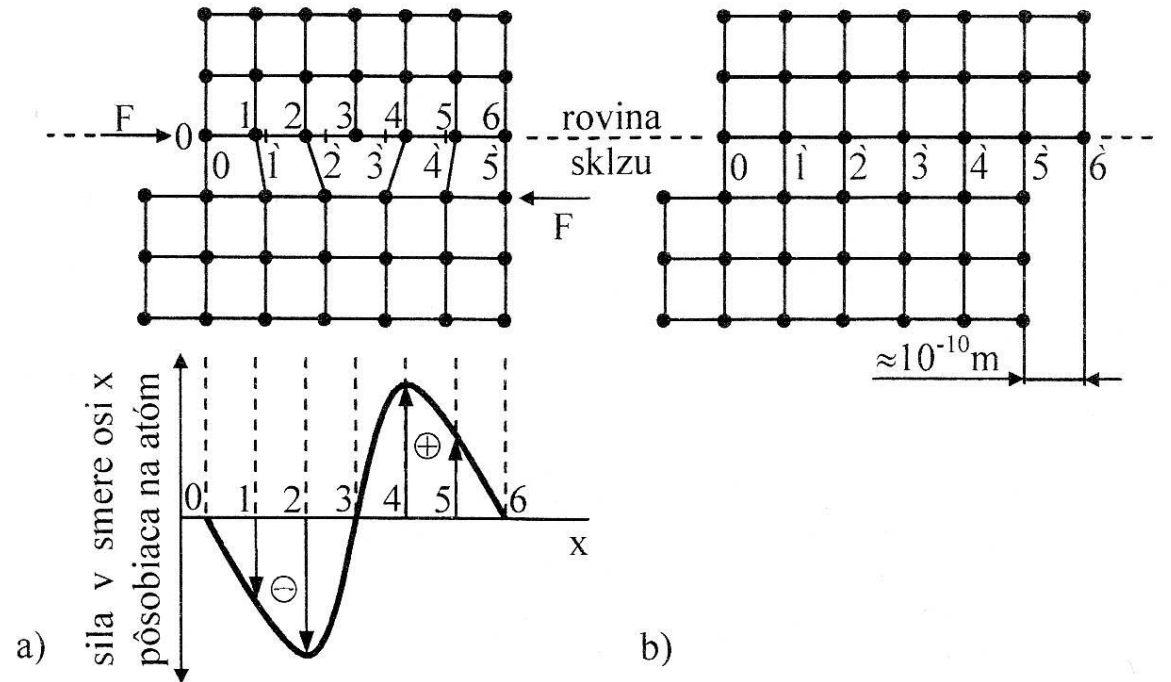
-
- Sklz.
 - Dvojčatenie.
 - Difúzia.
 - Medzikryštálová plastická deformácia.
 - Pohybom fázového rozhrania.

Sklz

- Vzniká pohybom hranových a skrutkových dislokácií vysunutím atómov z rovnovážnych polôh, čím sa zvýši potenciálna energia.
- Dochádza k vychýleniu atómov na viac ako polovicu parametra kryštálovej mriežky.

Obr. 2 Schéma deformácie sklzom

(Skočovský, 2006)

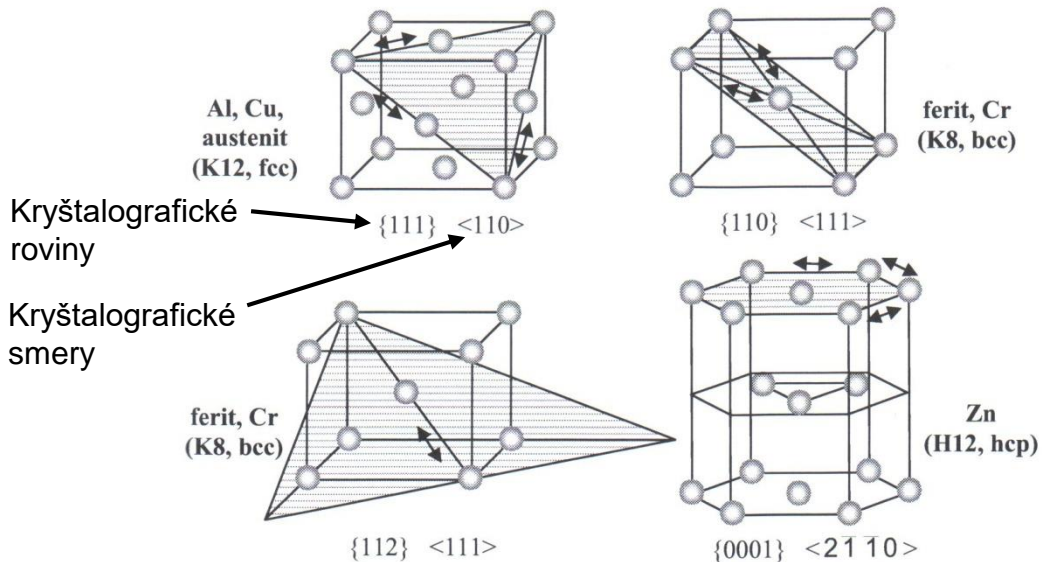


a – mriežka s dislokáciou

b – mriežka po deformácii sklzom

Zákonitosti sklzu

- Prvý sklz nastáva zvyčajne v rovinách sústavy najhustejšie obsadených atómami.
- Druhý smer sklzu sa zhoduje so smerom najhustejšie obsadeným atómami.
- Tretí sklzový systém z danej skupiny rovín a smerov je ten, v ktorom sklzové napätie pôsobiace v rovine sklzu dosiahne určitú kritickú hodnotu – kritické sklzové napätie.



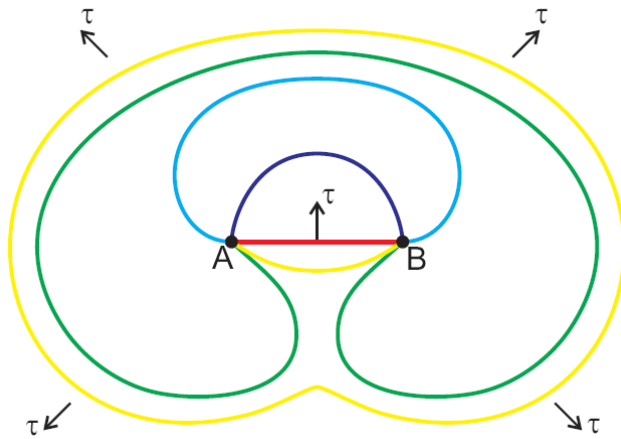
$$\tau_{kr} = \frac{a}{c} \cdot \frac{G}{2\pi}$$

a, c – parametre mriežky,
G – modul pružnosti v šmyku.

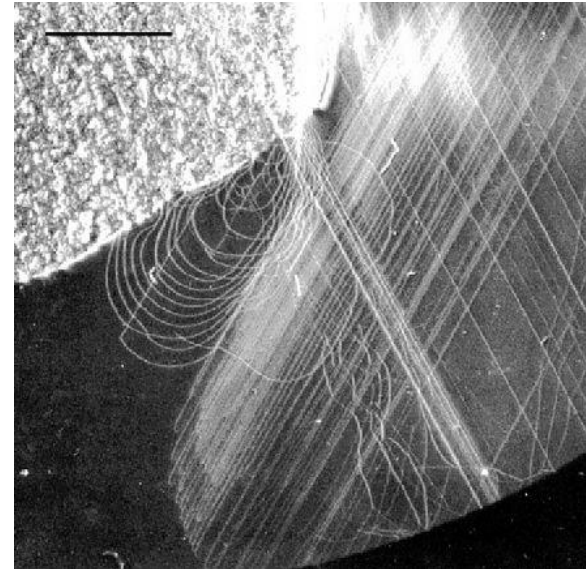
Obr. 3 Sklzné roviny a smery sklzu v kryštalových mriežkach K8, K12 a H12
 (Hazlinger, 2010)

Vznik dislokácií počas plastickej deformácie

- Počas plastickej deformácie narastá hustota dislokácií vo vnútri materiálu (Ptáček, 2003).



Obr. 4 Frankov – Readov zdroj



Obr. 5 Frankov – Readov zdroj, TEM

Pozn. Sir Charles Frank a Thornton Read prišli na tento mechanizmus prakticky v rovnakom čase v roku 1950.

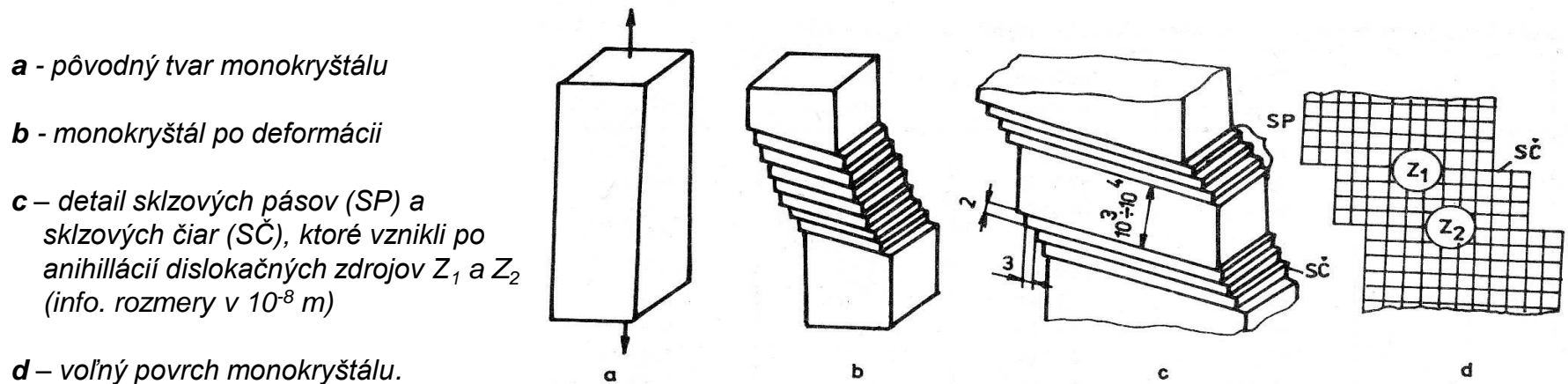
Skiz



Deformácia monokryštálu sklzom

- Makroskopické hodnotenie ukázalo, že po dosiahnutí aj malej deformácie (asi 1%) sa na leštenom povrchu objavia sklzové čiary, ktoré sú v oblasti jedného kryštálu vzájomne rovnobežné.
- Sklzové čiary sú stopy po n-násobnom opakovanom pohybe dislokácií na voľný povrch v aktívnej rovine sklzu (Pluhař, 1987).

Obr. 6 Schéma tvorby sklzových čiar (Puškár, 1986)



Deformácia polykryštálu sklzom

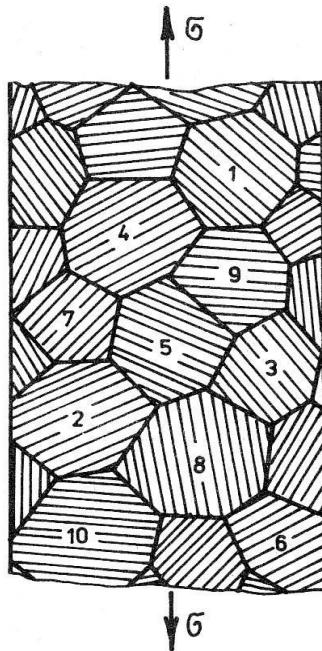


- Orientácia sklzových čiar a pásov v každom zrne po realizovanej plastickej deformácii polykryštálu je funkciou orientácie kryštálovej mriežky.
- Keď sa dislokácia blíži ku hranici zrna, pôsobia na ňu sily krátkeho dosahu, a to zo strany hranice i zo strany susedného zrna.
- Usporiadanie atómov hranice je také porušené, že keď pribudne k hranici ďalšia porucha (dislokácia), energia usporiadania sa prakticky nezmení.
- Dislokácia bude teda priťahovaná hranicou, ale tiež bude odpudzovaná v dôsledku rozdielnej orientácie susedných zrn.

**Obr. 7 Sklzové čiary na povrchu polykryštalickej medi (svetelná mikroskopia,
(C. Brady – National Bureau of standards)**

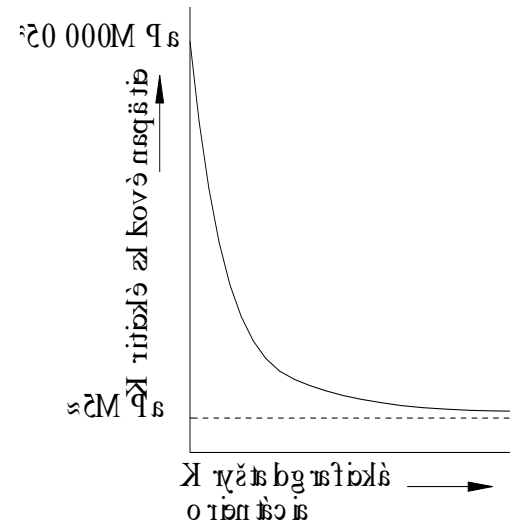
Deformácia polykryštálu sklzom

- Zo začiatku zaťažovania prebieha deformácia sklzom len v zrnách s najpriaznivejšou orientáciou vzhľadom na smer zaťaženia (napr. v zrnách **1, 2 a 3** na obr. 8).
- V dôsledku deformácie, s ňou spojeného spevnenia a naklopenia kryštálov, dostanú sa do výhodnej orientácie aj niektoré ďalšie zrná (napr. zrná **4, 5 a 6** na obr. 8).



Obr. 8 Plošná schéma polykryštalického materiálu (Pluhař, 1987)

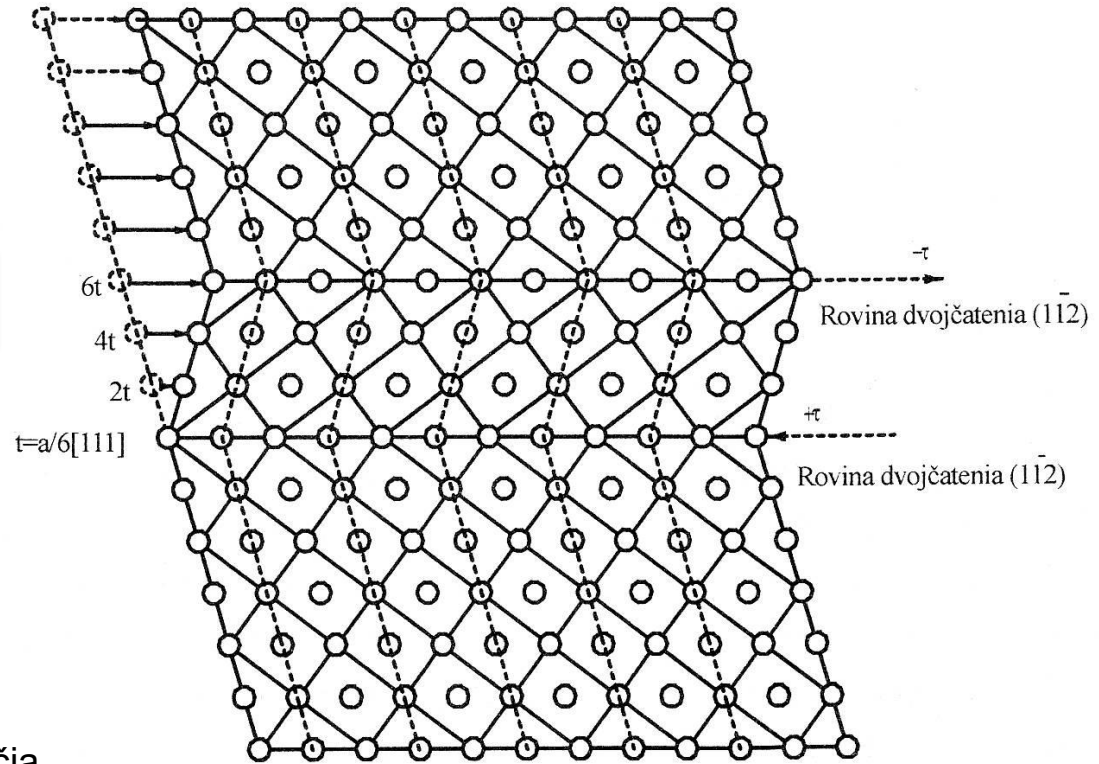
- Súčasne však rastúce zaťaženie vyvoláva vzrast šmykového napätia i v zrnách s menej priaznivou orientáciou na takú hodnotu, že sa začnú aj v iných zrnách pohybovať dislokácie, t.j. prebehne deformácia (napr. v zrnách **7 a 8** na obr. 8).
- Niektoré zrná však nemajú priaznivú orientáciu a v nich proces deformácie nezistíme (napr. v zrnách **9 a 10** na obr. 8).



Obr. 9 Kritické sklzové napätie v závislosti od orientácie kryštálu

Dvojčatenie

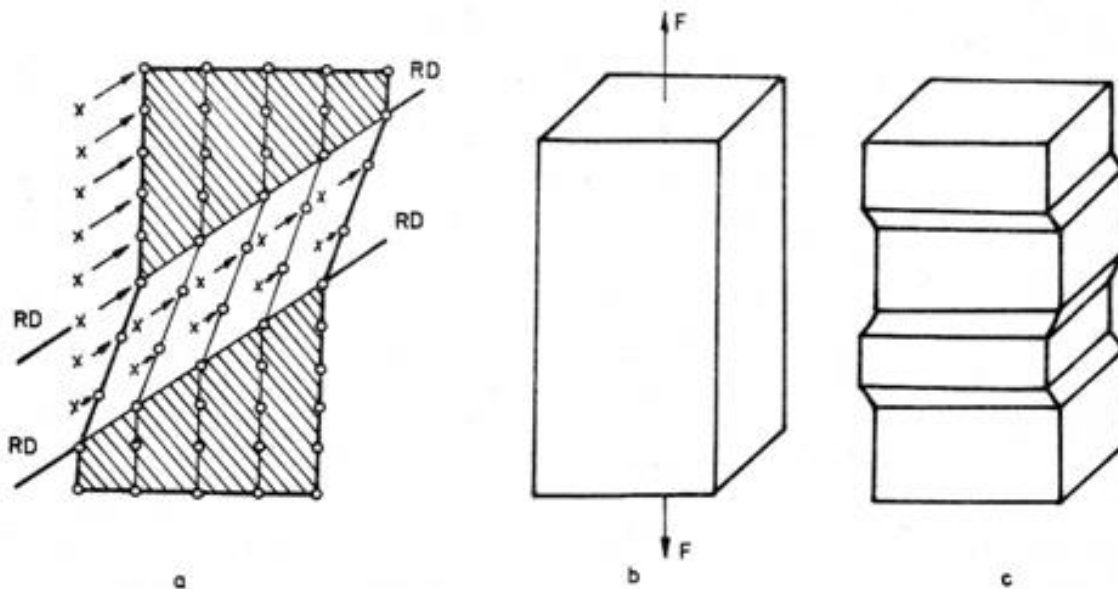
Obr. 10 Plastická deformácia dvojčatením
(Skočovský, 2003).



- Nastáva za určitých podmienok, napr. pri nízkej teplote alebo veľkej rýchlosti deformácie.
- Pri dvojčatení sa veľkou rýchlosťou pootočia rady atómov o určitý uhol vzhľadom na smer posunu.
- Nová mriežka v zdvojenej časti kryštálu má v porovnaní s pôvodnou mriežkou zrkadlovo súmernú orientáciu k určitej rovine, ktorú nazývame rovinou dvojčatenia.
- Atómy sa presunú len o časť medziatómovej vzdialenosti (pohyb neúplných dislokácií).

Dvojčatenie monokryštálu

- Dvojčatá môžu vzniknúť pri plastickej deformácii, ale aj v dôsledku napätí pri ohreve alebo fázovej premene.
- V kubickej plošne centrovanej sústave nastáva dvojčatenie kryštálu tepelnými pnutiami pri ohreve (meď, mosadz) alebo pri fázovej premene (železo γ) a pod.
- V kubickej priestorovo centrovanej mriežke napr. v železe α , sa dvojčatenie pri plastickej deformácii pri normálnej teplote prakticky nevyskytuje.



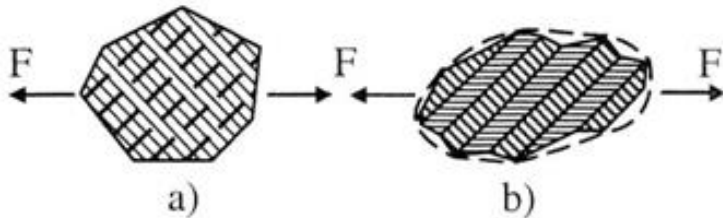
Obr. 11 Dvojčatenie monokryštálu

- (a) Schéma plastickej deformácie monokryštálu dvojčatením,
(b) pôvodný kryštál,
(c) po deformácii dvojčatením.

(Puškár, 1986)

Dvojčatenie polykryštálu

- Dochádza k dvojčateniu jednotlivých zŕn v objeme materiálu.



Obr. 12 Schéma dvojčatenia zrna polykryštálu
(Puškár, 1986)



Obr. 13 Deformačné dvojčatá v mikroštruktúre
AISI 316Ti, lept. elektrolyticky (Pavkov, 2011)

Plastická deformácia difúziou

- Plastickú deformáciu kovov môže sprevádzať aj usmernená difúzia atómov prímiesí. Atómy prísad spôsobujú potom lokálne zmeny medziatomárných vzdialeností a majú veľkú snahu ukladať sa v blízkosti porúch, najmä dislokácií.
- Dislokácie pri svojom pohybe, ako nositeľky plastickej deformácie, môžu časť atómov prímiesí za sebou vliecť. Okrem toho atómy prímiesí, ktoré nie sú viazané na dislokácie, môžu sa tiež presúvať, ale účinkom deformačných síl pohybom cez vakencie a podobne.
- Takto vzniká v smere gradientu napätia usmernená difúzia – preskupenie atómov prímiesí v deformovaných zrnách. Tento jav voláme **plastická deformácia difúziou**.
- Jav difúznej plasticity, ako aj sklz spôsobujú trvalú zmenu rozmerov a tvaru zrn, ktoré vznikajú prevažne v dôsledku premiestňovania dislokácií.

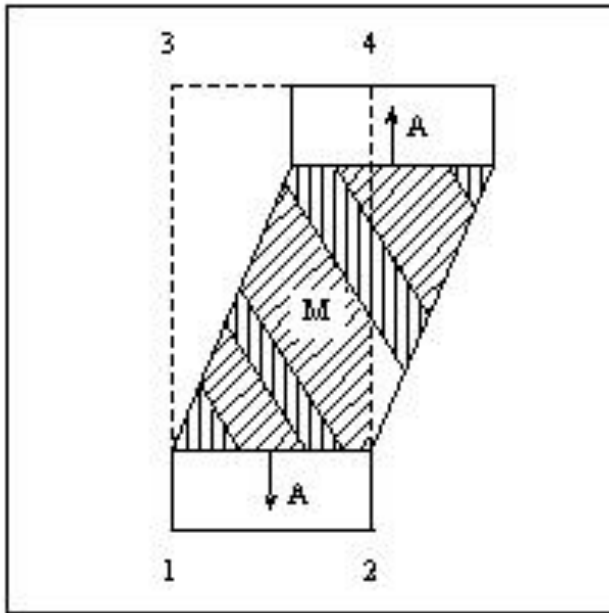
Medzikryštálová plastická deformácia

- Pri celkovej deformácii zohráva len malú úlohu.
- Medzikryštálová plastická deformácia sa prejavuje v relatívnom posuve a natáčaní jedného zrna voči druhému.
- Umožňuje to nepravidelné usporiadanie atómov na hraniciach zrn.
- Posuv atómov v hraničných vrstvách zrn sťažujú nerozpustené prímеси a nepravidelné tvary povrchu zrn, ktoré spôsobujú v procese plastickej deformácie rôzne zauzlenia a zaklinovania.
- V dôsledku medzikryštálovej plastickej deformácie vznikajú na hraniciach zrn poruchy. Pri ďalšom rozvoji tak vznikajú mikrotrhliny a porušuje sa polykryštál.
- Veľká plastická deformácia je možná len v prípade dostatočne pevných hraníc zrn pri malých medzikryštálových posuvoch, ktoré tu majú mať iba sekundárnu úlohu.

Deformácia pohybom fázového rozhrania

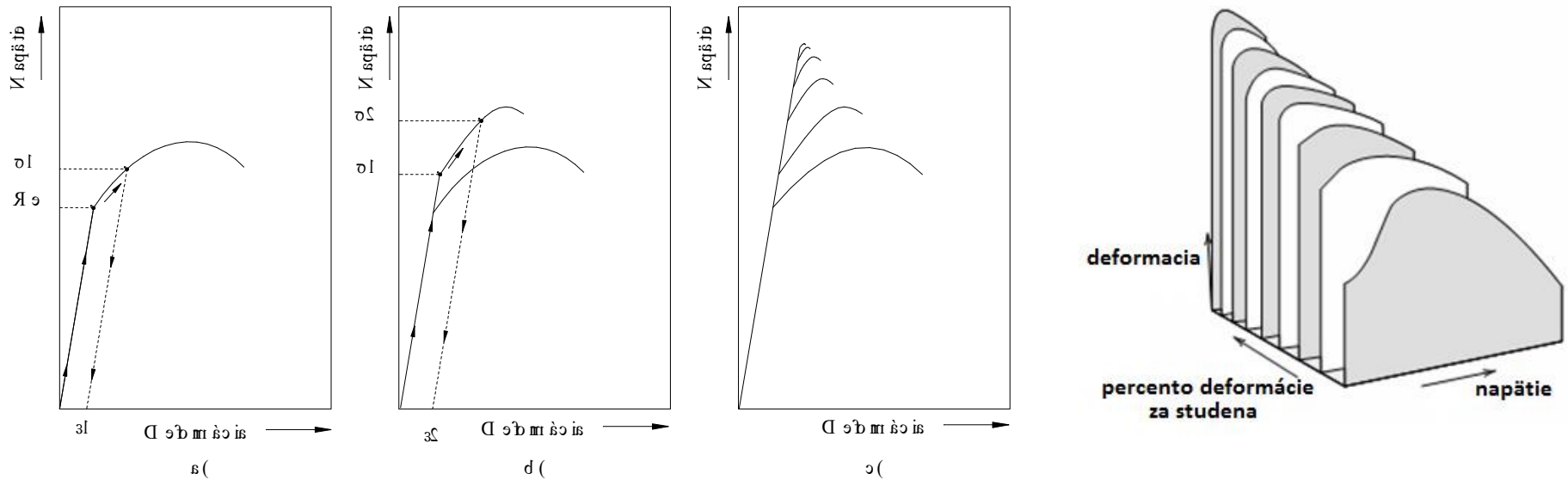
- Zakladá sa na martenzitickej premene vyvolanej plastickou deformáciou.
- Pre martenzitickú premenu je charakteristické, že je bezdifúzna a martenzit má rovnaké chemické zloženie a stupeň usporiadania ako východisková fáza.
- Dôvodom je práve bezdifúzny kooperatívny posuv atómov.

Obr. 14 Samotný vznik martenzitickej dosky je spojený s makroskopickou zmenou tvaru



- *Pôvodný tvar vysokoteplotného monokryštálu A (body 1, 2, 3, 4) je deformovaný v dôsledku vzniku martenzitu M.*
- *Dva konce monokryštálu A (body 1, 2, resp. 3, 4) sú po transformácii posunuté a veľkosť tejto deformácie závisí od hrúbky vzniknutej martenzitickej dosky a od jej kryštalografickej orientácie.*

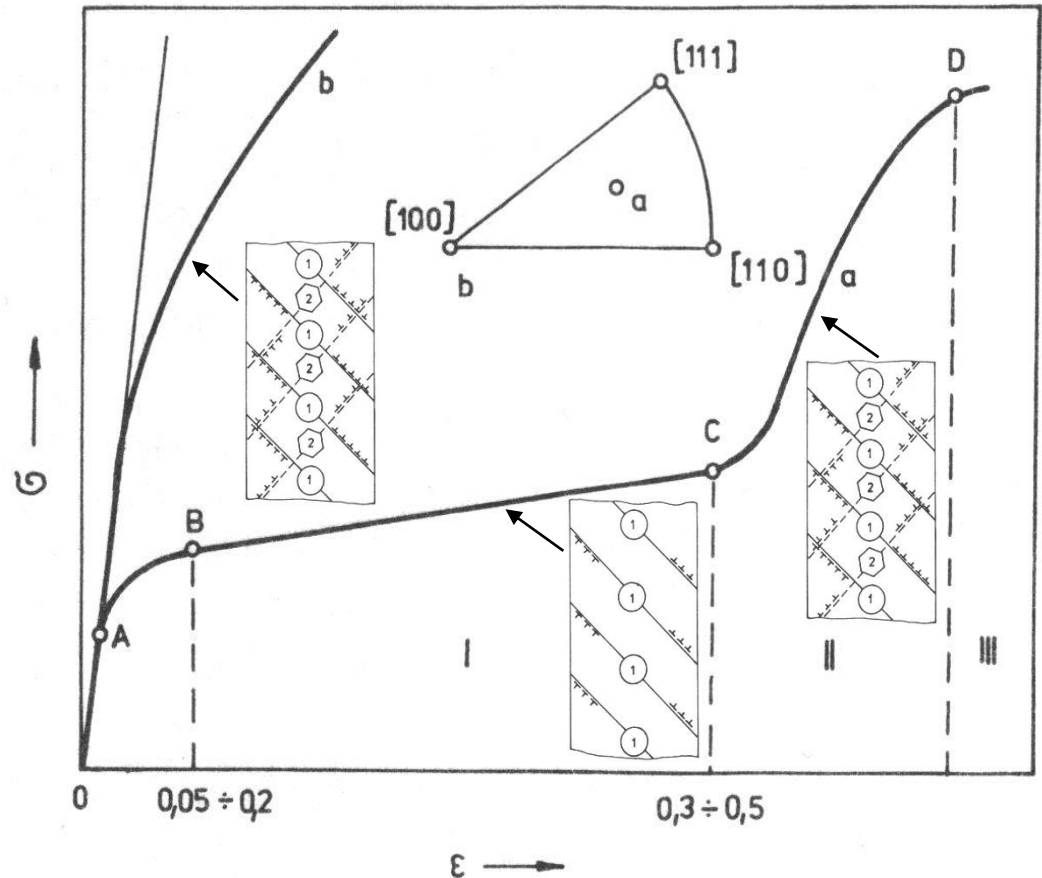
Zmena vlastností materiálu plasticou deformáciou za studena



Obr. 15 nárast medze klzu po opakovanej plastickej deformácii

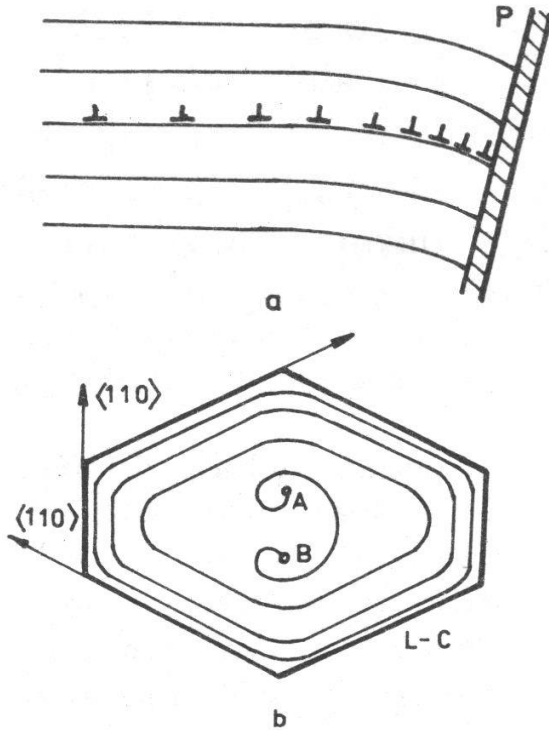
Deformačné spevňovanie monokryštálu

- **OA** – pružná deformácia,
- **A** – medza klzu,
- **BC** – prvé štádium spevňovania, malý nárast napätia vyvolá veľkú deformáciu,
- **CD** – druhé štádium spevňovania.



Obr. 16 Krivky spevňovania monokryštálu s K12, orientovaného na jednoduchý sklz (a) a dvojitý sklz (b) (Puškár, 1986)

Teória pile-up



- Predpokladá, že sa dislokácie zo zdrojov môžu zastaviť pred prekážkou a ďalšie dislokácie sa za nimi nahromadia.
- Pri pokračujúcej deformácii rastie počet bariér, až kým je zdroj nimi úplne obklopený.
- Nevysvetľuje prečo sa nahromadené dislokácie navracajú späť ku zdroju po odstránení napätia.

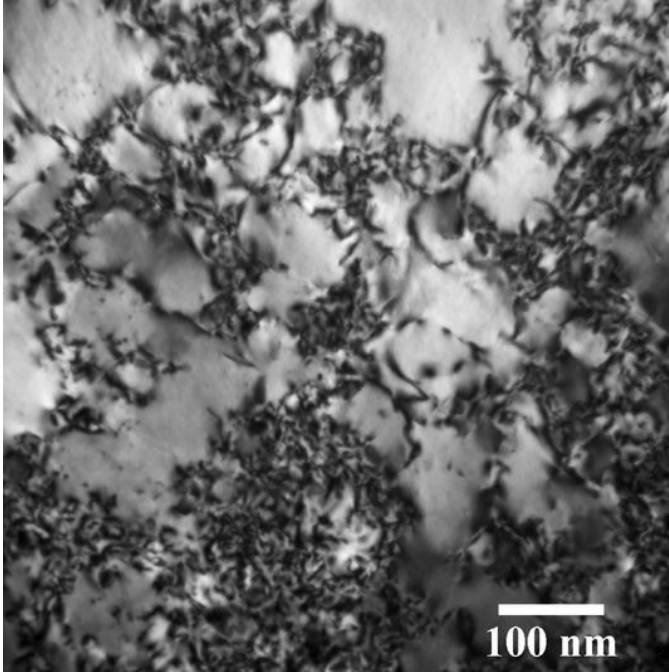
Obr. 17 Nahromadenie dislokácií:

*a – pred prekážkou (napr. hranicou zrna),
b – pred Lomerrovou a Cottrellovou bariérou v rovine (111)*

(Puškár, 1986)

Pozn. Pozorované iba v kovoch s veľmi nízkou energiou chyby vrstvenia, napr. v austenitických oceliach, mosadzi alfa a iba na hraniciach zrn, nie vnútri zrna.

Teória dislokačného lesa



*Obr. 18 Bunková subštruktúra ocele, TEM
(Pozuelo, 2009)*

- Vznikajú husté zhluky dislokácií – bunková subštruktúra.
- Zdroje dislokácií začnú pracovať vtedy, keď je napätie dostatočné na to, aby nové dislokácie mohli pretnúť dislokácie lesa.
- Dislokačný zdroj prestane pracovať v dôsledku zvýšenej hustoty dislokácií v jeho blízkosti.
- Neudáva žiadny mechanizmus pre opätovné uvoľnenie, nevysvetľuje teplotnú závislosť sklzového napätia.

Pozn. Pozorované v kovoch so strednou a vysokou energiou chyby vrstvenia.

Teória dislokačných skokov

- Predpoklad: pri ohybe vakančných skokov, vo väčšine kovov, vznikajú rady vakancií, ktoré brzdia pohyb dislokácií nezávisle od teploty.
 - Deformácia potom prebieha ako dôsledok činnosti zdrojov dislokácií, ktoré sa musia uvoľniť z brzdiaceho účinku skokov, ktoré vznikli sekundárnym sklzom alebo pohybom lesa.
 - Zdroje sa potom môžu uvoľniť v dôsledku lokálnej anihilácie skokov.
-

Použitá literatúra

- HAZLINGER, M. – MORAVČÍK, R. – ČAPLOVIČ, Ľ. 2010. *Degradačné procesy a predikcia životnosti materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. 223 s. ISBN 97880-227-3334-2
- PAVKOV, M. 2011 – *Únavové charakteristiky ocele AISI 316Ti po guľôčkovaní*, Diplomová práca, 2011
- PLUHAŘ, J. et al. 1987. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. 1. vyd. Praha: STNL, 1987. 420 s.
- PTÁČEK, L. et al. 2002. *Nauka o materiálu II*. 2. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- PUŠKÁR, A. 1986. *Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov*. 1. vyd. Bratislava: VEDA, 1986. 300 s.
- ŠKOČOVSKÝ, P. a kol. 2006. *Náuka o materiáli pre odbory strojnícke*. 2. vyd. Žilina: EDIS, 2006. 349 s. ISBN 80-8070-593-3