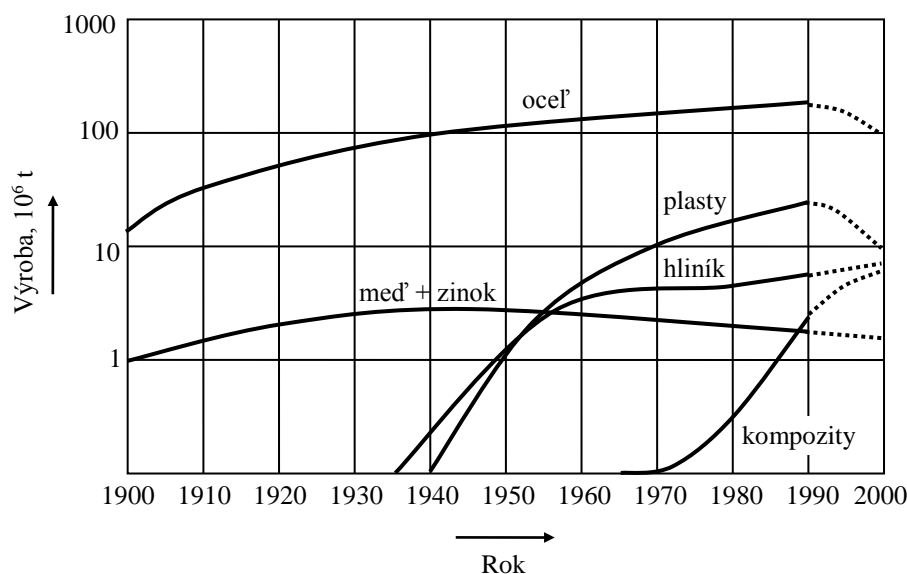


2. ŠTRUKTÚRNA PODSTATA VLASTNOSTÍ MATERIÁLOV

2.1 Vývoj a rozdelenie materiálov

Historický vývoj konštrukčných materiálov. Vývoj materiálov je zviazaný s vývojom ľudského poznania všeobecne a špecificky potom v prírodných vedách. Prakticky do začiatku XX. storočia sa používajú prírodné materiály a materiály vyvinuté empiricky (pozri tab. 2.1). Novšie typy materiálov boli v XX. storočí vyvinuté na základe kvalitatívnej analýzy vedeckých poznatkov prírodných vied. Od polovice XX. storočia sa vedecký výskum zameriava na možnosti vývoja materiálov s vopred definovanými vlastnosťami.

Súčasný význam hlavných druhov materiálov je možné posúdiť z obr. 2.1, na ktorom je graficky znázornený vývoj ich výroby v priebehu XX. storočia. Je zrejmé, že výrazný vzostup zaznamenala najmä výroba plastov a kompozitov. Ocele si však udržujú prioritné postavenie, predovšetkým pre výhodnú kombináciu mechanických vlastností a ceny.



Obr. 2.1. Vývoj produkcie vybraných materiálov v USA [1]

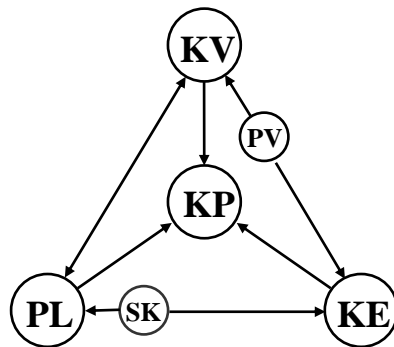
Tab. 2.1

Prehľad vývoja materiálov z historického hľadiska [1]

	Rok začiatku technického využívania v širšom rozsahu
Prírodné materiály	
Drevo, keramické minerály, zlato, meď, meteority	skôr ako 2500 pred n.l.
Empiricky vyvinuté materiály	
Bronz	2500 pred n.l.
Oceľ	1500 pred n.l.
Liatina	1500
Materiály vyvinuté na základe kvalitatívnej analýzy vedeckých výsledkov	
Zliatiny hliníka	1910
Antikorózna austenitická oceľ	1930
Plasty	1940
Titánové zliatiny	1960
Mikrolegované ocele	1965
Materiály vyvinuté na základe kvantitatívnej analýzy vedeckých výsledkov	
Polovodiče	1950
Monokryštalické zliatiny niklu	1960
Kompozity	1965
Zliatiny s pamäťou tvaru	1970
Kovové sklá	1970
Rezná keramika	1980
Polovodiče s heterogénnou štruktúrou	1990

Rozdelenie konštrukčných materiálov. Konštrukčné materiály je možné podľa ich vnútornej stavby a charakteristických vlastností rozdeliť do troch základných skupín na *kovové materiály*, *keramické materiály* a *plasty*. Fyzikálnym spojením najmenej dvoch materiálov odlišných vlastností (z rovnakej základnej skupiny, napr. kov - kov, alebo z rôznych základných skupín, napr. plast - keramika) vznikajú združené materiály, čiže *kompozity* [2]. Na obr. 2.2 je uvedená schéma štyroch základných materiálových skupín spolu s materiálmi, predstavujúcimi prechody medzi nimi. *Polovodiče* (anorganické) sú určené predovšetkým ako materiály pre

elektroniku a ležia svojou stavbou a vlastnosťami medzi kovmi a keramikou, *silikóny* (oleje, gummy, živice) medzi keramikou a plastami [1].



Obr. 2.2. Hlavné skupiny materiálov: KV - kovové materiály, KE - keramické materiály, PL - plasty, KP - kompozity (do základných skupín nemožno jednoznačne zaradiť: PV - polovodiče, SK - silikóny) [1]

Atómová a molekulárna stavba. Výrazné odlišnosti vo vlastnostiach materiálových skupín vyplývajú z ich odlišnej vnútornej stavby. Z hľadiska rozdelenia materiálov je významná väzba medzi časticami (atómami, molekulami). Materiály pozostávajú z atómov, ktoré sú vzájomne spojené jednak magnetickými silami (fyzikálna väzba), jednak elektrostatickými silami medzi elektrónmi a jadrami (chemická väzba).

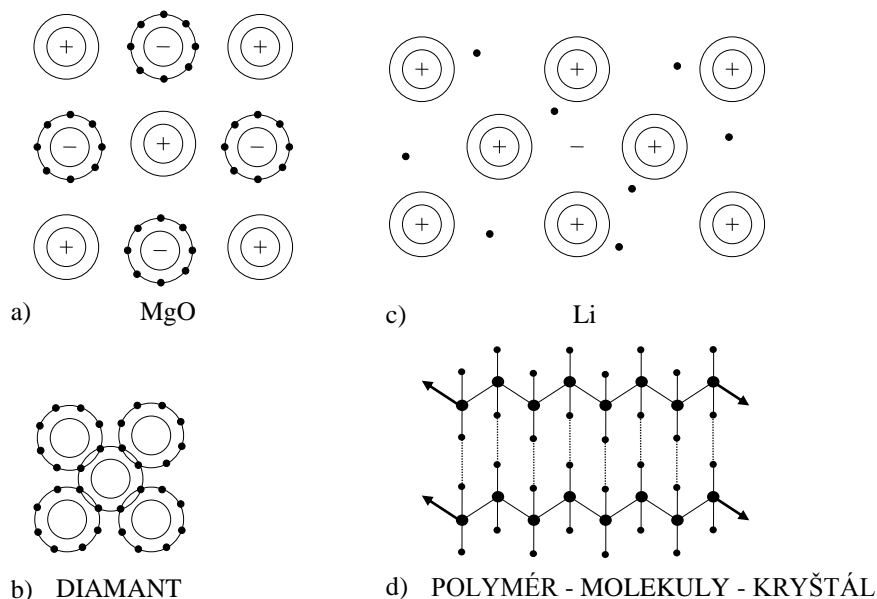
Chemická väzba je charakteristická tým, že niektoré elektróny prislúchajú niekoľkým atómom ako dôsledok prekrytia časti vonkajších elektrónových obalov. Toto spoločné vlastníctvo elektrónov smeruje k energeticky výhodnejšiemu usporiadaniu, ktorým je *valenčný oktet* (plný počet 8 elektrónov vo valenčnej sfére). To je možné tromi spôsobmi, ktoré závisia od štruktúry elektrónového obalu atómov [3]:

Iónová väzba je výsledkom elektrostatických príťažlivých síl medzi opačne nabitými iónmi, je preto možná len medzi atómami rôznych prvkov a neprichádza do úvahy u jedného čistého prvku. Na obr. 2.3a je uvedený príklad oxidu horečnatého, v ktorom sa šesť valenčných elektrónov horčíka dopĺňa na oktet dvoma valenčnými elektrónmi kyslíka. Je to veľmi pevná väzba.

Kovalentná väzba vzniká rovnomerným zdieľaním elektrónov dvoma alebo viacerými atómami a uplatňuje sa u prvkov s veľkým počtom valenčných elektrónov (ako príklad väzby medzi rovnakým druhom atómov, v tomto

prípade uhlíka, je na obr. 2.3b uvedená schéma medziatómových väzieb v diamante). Ide takisto o veľmi pevnú väzbu.

Kovová väzba je výsledkom príťažlivých síl medzi kladnými iónmi (pravidelne usporiadanými v kryštalickej mriežke) a elektrónmi, ktoré v tomto druhu väzby nie sú viazané k určitému atómu (príklad na obr. 2.3c) a sú preto ľahko pohyblivé (elektrická a tepelná vodivosť). Príťažlivé sily majú dlhý dosah a každý atóm je príťahovaný všetkými susedmi, preto je možný vzájomný posuv atómov bez narušenia väzby (plastická deformácia).



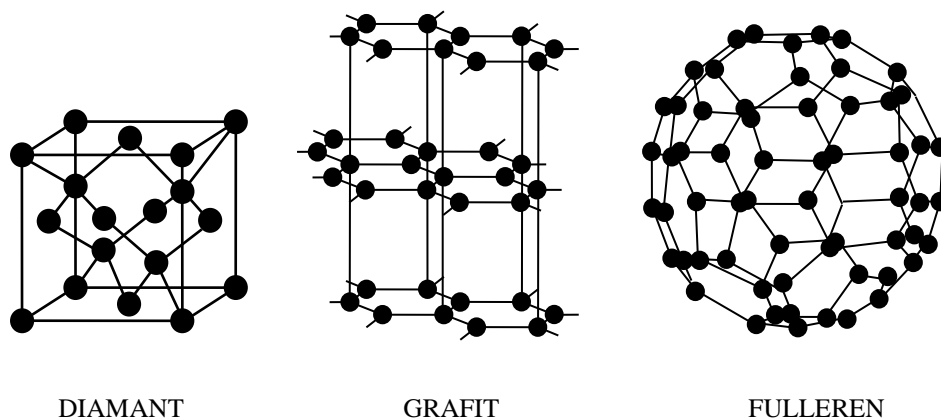
Obr. 2.3. Druhy väzieb medzi atómami a časticami: a - iónová väzba - MgO, b - kovalentná väzba - diamant, c - kovová väzba - lítium, d - Van der Waalsova väzba - medzi molekulami polyméru (atómy v molekule spojené kovalentne) [1]

Fyzikálna väzba, nazývaná tiež *väzba van der Waalsova*, súvisí s okamžitými elektrickými momentmi (dipólmi), ktoré vznikajú pri pohybe elektrónov v určitých polohách voči jadrú. Dipóly sa pri vhodnom natočení príťahujú. Táto väzba sa uplatňuje pri všetkých materiáloch, je však pomerne slabá. Často sa uplatňuje ako medzičasticová väzba (príkladom je väzba medzi molekulami polyméru na obr. 2.3d).

Pre kovy je charakteristická kovová väzba, pre keramické materiály iónová alebo kovalentná väzba. Kovy aj keramika sú látky kryštalicke, v špeciálnych prípadoch amorfné. Plasty sú materiály na báze makromolekulárnych látok [4].

2.2 Kryštalické materiály

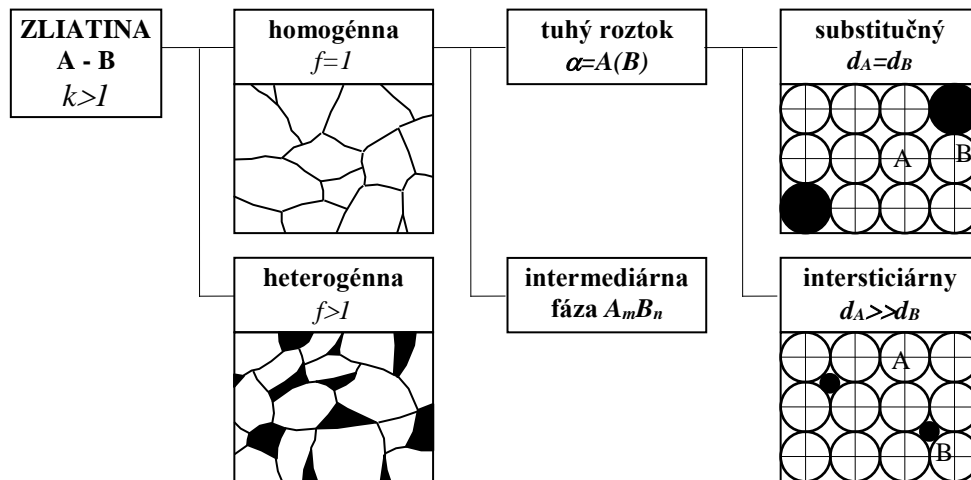
Kryštalické látky sú charakteristické pravidelným priestorovým usporiadaním uzlových bodov v kryštalovej mriežke, ktoré sú rovnovážnymi polohami častíc (atómov, iónov). Najmenšia časť priestorovej mriežky, ktorá obsahuje najmenší možný počet uzlových bodov, sa nazýva *elementárna bunka*. Najmenšiu vzdialenosť dvoch uzlových bodov v smere niektorej osi nazývame *mriežkové parametre* a , b , c . Kryštalové mriežky rozdeľujeme podľa bodovej symetrie do 7 *kryštalografických sústav* [4]. *Kryštalové mriežky*, v ktorých sa nachádzajú uzlové body len vo vrcholoch elementárnej bunky sa nazývajú *jednoduché*. Mriežky, obsahujúce uzlové body aj v strede stien, alebo v strede základní, alebo v strede objemu elementárnej bunky sa nazývajú *plošne, alebo bazálne, alebo priestorovo centrované*. U celého radu materiálov sa vyskytuje aj iná, často veľmi zložitá, kryštalická stavba. Napr. uhlík vystupuje v troch kryštalických modifikáciách (obr. 2.4), ako diamant (tetraedricky usporiadané atómy uhlíka tvoriace zložitú kubickú mriežku), grafit (kryštalizujúci v hexagonálnej sústave, atómy v hexa-gonálnych kryštalografických rovinách sú viazané kovalentnými väzbami, roviny navzájom väzbami van der Waalsovými) alebo fulleren (má guľovitú molekulu zloženú zo šesť-, príp. päť-, uholníkovo usporiadaných atómov uhlíka).



Obr. 2.4. Alternatívy vnútornej stavby čistého uhlíka [3]

Kryštalické materiály. Zo základných materiálových skupín sú zvyčajne kryštalickými materiály kovové a keramické. Kovy kryštalizujú v súmerných (kubických, hexagonálnych) tesne usporiadaných mriežkach. *Zliatiny kovov* sú viaczložkové sústavy, v ktorých prevažujúcou zložkou je kov. Zliatiny môžu byť z hľadiska štruktúry (pozri obr. 2.5) *homogénne* (jednofázové) alebo *heterogénne* (viacfázové) *sústavy*. Jednofázové zliatiny majú štruktúru tuhého roztoku alebo intermediárnej fázy. *Tuhý roztok* má mriežku jednej zo zložiek a v nej sú umiestnené častice druhej (resp. ďalších) zložky. Medzi časticami prevažuje kovová väzba. Podľa umiestnenia častíc rozpúšťajúceho sa kovu (*B*) v mriežke základného kovu (*A*) rozoznávame *substitučný tuhý roztok* (častice rozpúšťajúcej sa zložky sú v uzlových polohách mriežky základnej zložky) a *intersticiárny tuhý roztok* (častice rozpúšťanej zložky sa nachádzajú v medziuzlových polohách mriežky základnej zložky). V oboch prípadoch tuhých roztokov je rozmiestnenie atómov prídavného prvku v kryštálovej bunke náhodné. Takéto tuhé roztoky majú podobné vlastnosti ako čisté kovy, napr. majú dobré plastické vlastnosti. V špecifických prípadoch má tuhý roztok pravidelné usporiadanie častíc rozpúšťaného prvku (*usporiadaný tuhý roztok*) a nemá dobrú plasticosť. *Intermediárne fázy*, na rozdiel od tuhých roztokov, majú vlastný typ kryštalickej stavby (odlišný od zložiek). Medzi atómami sa zvyčajne uplatňuje vo veľkej miere kovalentná väzba. Z dôvodu odlišného druhu medziatomárných väzieb a odlišného typu mriežky sa od zložiek, z ktorých vznikli, značne odlišujú mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Väčšinou ide o veľmi tvrdé a krehké fázy. Intermediárne fázy vznikajú pri určitom pomere zložiek, ktorý je možné vyjadriť stechiometrickým vzorcom. Viacfázové zliatiny z hľadiska ich štruktúry nazývame *mechanické zmesi* a sú charakteristické tým, že ich štruktúru tvorí zmes kryštálov čistých kovov, tuhých roztokov alebo intermediárnych fáz. *Keramické materiály* sú prevažne intermediárne fázy, pri ktorých sa uplatňuje iónová alebo kovalentná väzba a majú preto odlišné typy mriežok ako kovy.

Mikroštruktúra kryštalických materiálov. *Mikroštruktúrou* rozumieme prejavy vnútornej stavby, zodpovedajúce z rozmerového hľadiska kryštalografickým zrnám polykryštalického materiálu. Mikroštruktúra kryštalických konštrukčných materiálov má veľmi často charakter mechanických zmesí s rôznym tvarom fáz vylúčených v základnej matici (obr. 2.6) [6]. Najjednoduchším prípadom je vylúčenie určitej β -fázy vo vnútri zrn α -matrice. V prípade, že energia medzifázovej hranice je



Obr. 2.5. Druhy vnútornej stavby zliatin (k - počet zložiek sústavy, f - počet fáz, d_A , d_B - atómové polomery zložiek)

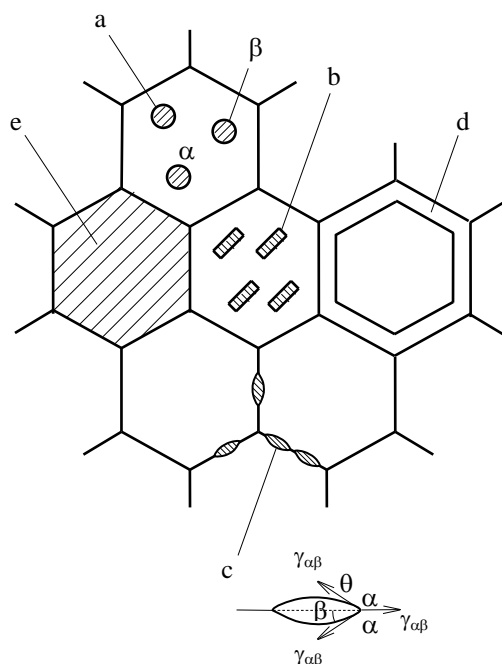
budú mať častice β tendenciu vylučovať sa v čo najviac globulitickom tvare, ktorý zabezpečí najmenšiu možnú energiu medzifázového rozhrania (obr. 2.6a). V prípade, že energia medzifázového rozhrania nie je izotropná, budú mať častice tvar lamiel s dlhším rozmerom pozdĺž nízkoenergetických rovín a kratším rozmerom pozdĺž vysokoenergetických kryštalografických rovín (obr. 2.6b). Tvar častíc vylúčených na hraniciach zrn môže byť diskový (ak pre medzifázové napätie $\gamma_{\alpha\beta}$ a povrchovú energiu hraníc zrn γ_{gb} platí, že $\gamma_{\alpha\beta} \cdot \cos \theta = \gamma_{gb}$), ale v mnohých prípadoch (ak $\gamma_{\alpha\beta} \leq \gamma_{gb}/2$, teda $\theta = 0$) sa môže na hraniciach vylúčiť tenká vrstva (sieťka) fázy β (obr. 2.6. c,d). Vylúčená druhá fáza môže, samozrejme, tvoriť aj samostatné zrná (obr. 2.6e). Tvar a spôsob rozloženia fáz môže výrazne ovplyvniť vlastnosti materiálu. Napr. vylúčenie tvrdej fázy na hraniciach zrn vo forme diskovitých častíc môže mať spevňujúci účinok, ale vylúčenie vo forme vrstvy môže spôsobiť výrazné skrehnutie materiálu.

Vlastnosti materiálov vyplývajú z ich štruktúry. Platnosť tejto tézy predpokladá, že pod štruktúrou materiálu budeme rozumieť jednak *jeho stav*, t. j.:

- chemické zloženie materiálu,
- počet fáz a ich pomerné zastúpenie,
- chemické zloženie každej z fáz,

jednak *geometrické informácie* o:

- tvare zŕn (častíc) každej fázy,
- veľkosti a rozložení častíc.



Obr. 2.6. Príklady tvarov vylúčených fáz v mechanických zmesiach (a - globulitické častice, b - lamelárne častice, c - diskovité častice na hraniciach zŕn, d - vrstva na hraniciach zŕn, e - samostatné zrná)

Štruktúru možno študovať a hodnotiť *metalografickými* [7],[8],[9] alebo *keramografickými metódami* [10].

Spevňovanie materiálov. Najdôležitejšou požiadavkou na konštrukčné materiály je odolnosť proti mechanickému namáhaniu. Vývoj materiálov bol v minulosti spojený najmä s úpravami ich chemického zloženia. Táto cesta sa ukázala byť málo efektívnou a postupne sa sústredila pozornosť na rôzne metódy spevňovania, založené na cieľavedomom riadení štruktúry. U plastických kryštalických materiálov (zliatiny kovov) sú bežné metódy spevňovania spojené s obmedzením pohybu dislokácií (kap. 2.7). Medzi najdôležitejšie spôsoby možno zaradiť [6]:

- spevnenie hranicami zŕn,
- roztokové (substitučné a intersticiárne spevnenie),

- precipitačné spevnenie,
- disperzné spevnenie,
- deformačné spevnenie.

Vybrané podrobnejšie poznatky sú uvedené v kap. 2.8 a v častiach pojednávajúcich o materiáloch, pre ktoré má niektorý zo spôsobov zvlášť veľký význam (kap. 3 a 4). V kap. 5 sú uvedené aj niektoré nekonvenčné spôsoby spevňovania.

2.3 Nekryštalické materiály

Materiály, ktoré nemajú kryštalickú stavbu, sa označujú ako *amorfné materiály*; špecifickú skupinu z nich predstavujú *sklá*, pri ktorých sa amorfná štruktúra dosahuje rýchlym ochladením taveniny. Po prekročení kritickej rýchlosti ochladzovania (kritického podchladenia) dochádza k zbrzdzeniu nukleácie zárodok, na ktorom sa podieľa zmenšenie tepelných kmitov atómov, zastavenie difúzných pochodov a výrazný nárast viskozity taveniny. Najdôležitejší je pravdepodobne posledný faktor. Nakoľko nevzniknú kryštalizačné zárodky, stuhne tavenina pri tejto nadkritickej rýchlosti na tuhú amorfnú fázu.

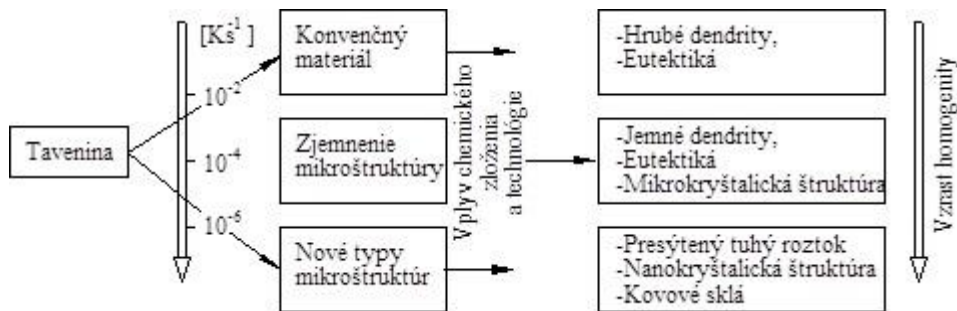
Keramické sklá majú v najjednoduchšom prípade štruktúru nepravidelnej siete, pozostávajúcej z častíc C-, Si- alebo SiO₄-tetraedrov. Vznikajú už pri ochladzovaní taveniny rýchlosťou 1 Kmin⁻¹ a sú dostatočne stabilné.

Nekryštalické kovové materiály vznikajú pri veľmi vysokej rýchlosti ochladzovania (rýchlej solidifikácii) taveniny, čím sa dosiahne nekonvenčná štruktúra a samozrejme aj nekonvenčné fyzikálne, chemické a mechanické vlastnosti. Rýchlou solidifikáciou sa zaoberal v šesťdesiatych rokoch Duwez [11] a rozpracoval fyzikálno-metalurgické a experimentálne základy výroby nekryštalických kovových materiálov. Na Slovensku sa rýchlou solidifikáciou začal zaoberať v sedemdesiatych rokoch Duhaj a kol. [12, 13], Palček [14] a ďalší.

Pri ochladzovaní taveniny rýchlosťou nad 10⁴ Ks⁻¹, možno dosiahnuť nové štruktúrno-metalurgické charakteristiky (obr. 2.7), ktoré sa výrazne odlišujú od konvenčných vlastností [15]. Ide hlavne o:

- zväčšenie rozsahu existencie tuhého roztoku (zvýšenie medznej rozpustnosti) bez precipitácie nových fáz;
- zjemnenie precipitátov (masívne precipitáty zvyšujú krehkosť matrice);

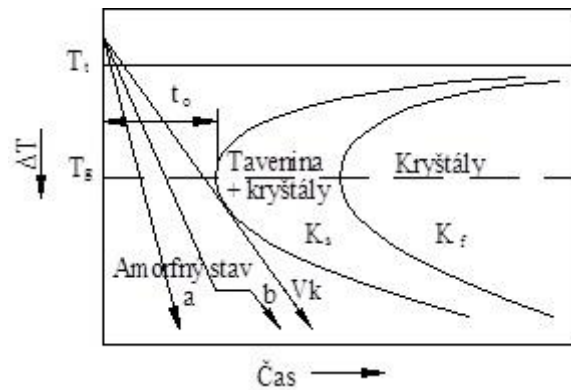
- vznik mikrokryštalickej a mikrodendritickej štruktúry; dendritické ramená sa zjemňujú a mikrokryštalické zrna sú oddelené veľkouhlovými hranicami, pričom ich rozmer je menší ako 1 mm;
- vznik metastabilnej kryštalickej fázy; pri rýchlej solidifikácii sú difúzne procesy potlačené;
- vznik kovových skiel (amorfné, nekryštalické kovy); pri nadkritickej rýchlosti ochladzovania sa zastaví proces nukleácie a rast novej fázy a zachová sa štruktúra taveniny.



Obr. 2.7. Vplyv rýchlosti ochladzovania taveniny na štruktúru tuhej látky

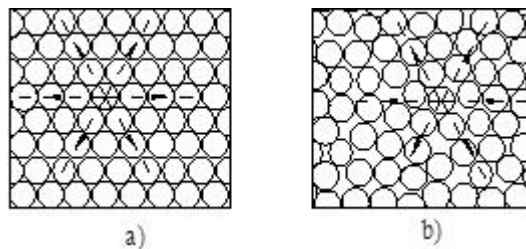
Fyzikálno-metalurgická podstata rýchlej solidifikácie a vznikajúce typy štruktúry sú znázornené na obr. 2.8. Z termodynamického hľadiska, kryštalizácia kovov a zliatin prebieha pri teplotách $T_k < T_t$, kde T_t je teplota topenia. Celý proces je riadený nukleáciou kryštalizačných zárodokov a ich rastom. Rýchlosť nukleácie a rastu kryštálov závisí od fluktuácie atómov a fluktuácia zasa od viskozity prostredia a hlavne od teploty. Z toho vyplýva, že hodnoty týchto rýchlostí závisia od stupňa podchladenia $\Delta T = T_t - T_g$. Ak sústavu podchladíme pod teplotu T_g (teplota amorfizácie – zoskelenia), stupeň podchladenia dosiahne kritickú hodnotu, pri ktorej sa zníži viskozita taveniny, a tým aj fluktuácia atómov. Tým sa potlačí proces nukleácie a rastu zárodokov a tavenina tuhne ako podchladená kvapalina.

Podchladená kvapalina je charakteristická usporiadaním častíc na krátku vzdialenosť (kryštál má usporiadanie na dlhú vzdialenosť) a predstavuje štruktúru skiel a amorfných látok (obr. 2.9). Vznik amorfného stavu kovovej sústavy môžeme charakterizovať pomocou závislosti teplota – čas (obr. 2.8).



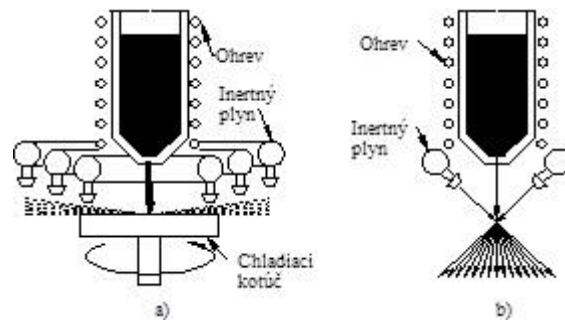
Obr. 2.8. Fyzikálno-metalurgická podstata rýchlej solidifikácie

Inkubačný čas t_0 vzniku amorfného stavu je pre kovové sústavy podstatne kratší ako pre klasické keramické sklá, resp. organické sklá. Ak pre keramické sklá je tento čas rádovo desiatky hodín, pre kovové sklá sú to rádovo mikrosekundy. Z toho vyplýva, že rýchlosť ochladzovania pre kovové sklá bude nad 10^5 Ks^{-1} . Pre čisté kovy je to 10^8 až 10^{10} Ks^{-1} [16]. Vysoká rýchlosť ochladzovania (odvodu tepla - tepelná vodivosť) potom obmedzuje aj hrúbku produktu, v ktorom môžeme dosiahnuť amorfnú štruktúru. Pre kovové sústavy je to 0,01 až 0,05 mm. Z toho vyplýva, že kovové sklá môžeme vyrábať iba vo forme prášku, drôtu alebo fólie [14].



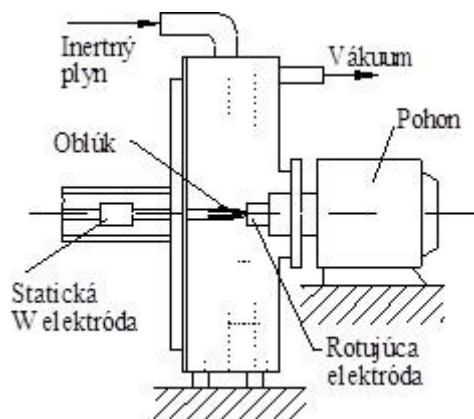
Obr. 2.9. Usporiadanie atómov v tuhej látke a - na dlhú vzdialenosť, b - na krátku vzdialenosť

V súčasnosti je pre proces rýchlej solidifikácie vyvinutých niekoľko technológií, ktoré zabezpečujú podmienky ochladzovania podľa požadovaných vlastností finálneho produktu [14, 15, 17].



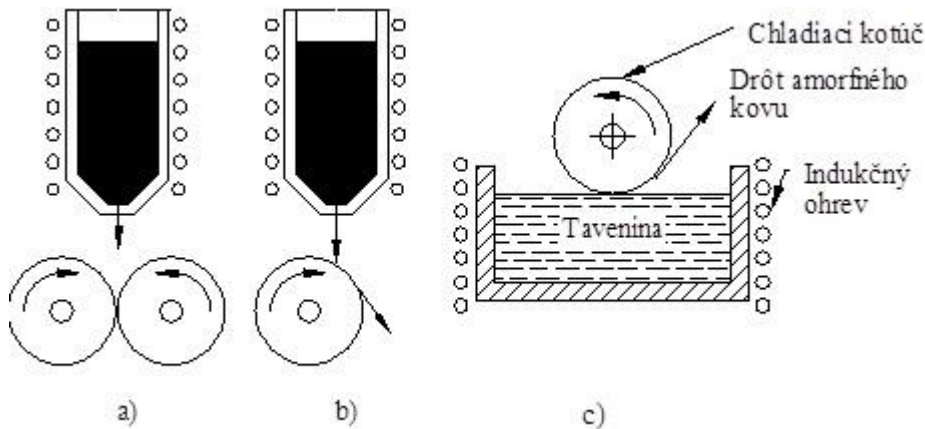
Obr. 2.10. Rýchla solidifikácia taveniny jej atomizáciou

Na obr. 2.10a je schéma zariadenia pre atomizáciu častíc pomocou rozstrekovania kovu na rotujúcom kotúči a dochladením inertným plynom a na obr. 2.10b schéma zariadenia na atomizáciu pomocou vysokorýchlostného prúdu inertného plynu. V oboch prípadoch vznikajú rýchlo solidifikované, veľmi jemné častice. Technika rotujúcej elektródy (centrifugálna atomizácia) využíva vysokonapäťový elektrický oblúk pre natavenie povrchu elektródy, ktorú tvorí predzliatina vhodného chemického zloženia. Pri jej rotácii sa odovzdáva časť kinetickej energie tekutému kovu, ktorý sa jej účinkom atomizuje a na stenách bubna sa dochladzuje na požadovanú teplotu (obr. 2.11).



Obr. 2.11. Atomizácia taveniny rotujúcou elektródou

Ďalší spôsob je vhodný na výrobu veľmi tenkého pásu (fólie), ktorý vzniká pri styku roztaveného kovu s chladiacim rýchlo rotujúcim medeným bubnom. V danom prípade vznikajú tenké kontinuálne pásy (fólie) amorfného kovu (obr. 2.12a, b). Modifikácia tejto technológie je na obr. 2.12c. Ide o extrakciu, pri ktorej rotujúci disk vyťahuje kov priamo z povrchu taveniny a výsledným produktom je kovové sklo vo forme drôtu.

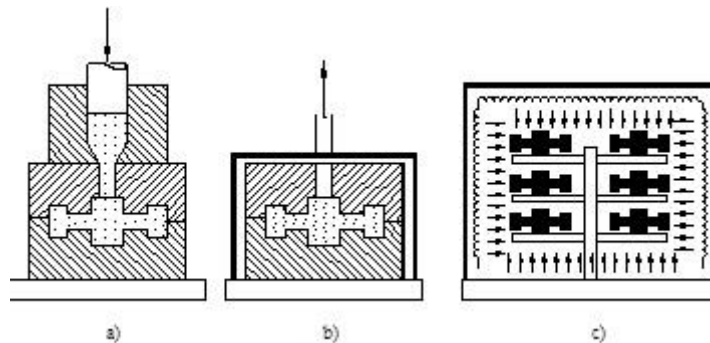


Obr. 2.12. Rýchla solidifikácia ochladzovaním taveniny na povrchu rýchlorotujúceho kotúča

Ďalším z možných postupov získania nekryštalického stavu je spracovanie povrchu kryštalických materiálov pomocou ultrarýchleho laserového, elektrónového alebo plazmového ohrevu, pričom sa povrch môže iónovou implantáciou dolegovať tak, aby mal požadované fyzikálno-metalurgické vlastnosti. Účinkom veľmi rýchleho ochladenia takto spracovaného povrchu sa dosahuje na povrchu amorfná vrstva s vysokou odolnosťou voči oteru, korózii, kontaktnej únave prípadne s veľmi vysokou tvrdosťou. Podľa niektorých autorov takáto vrstva zvyšuje odolnosť proti únavovému namáhaniu a podľa iných ju znižuje [18]. Tenké nekryštalické vrstvy na povrchu možno získať aj intenzívnym trením.

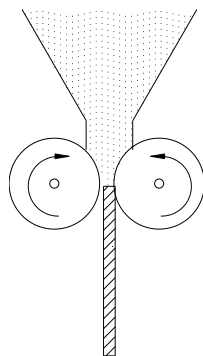
Príprava tenkých amorfných fólií je iba prvý stupeň riešenia. Spojenie práškového materiálu (mikrokryštalického, nanokryštalického, prípadne amorfného) do "trojrozmerných" dielov predstavuje významný stupeň technického rozvoja v danej oblasti. Jeho izostatické lisovanie za tepla a následné kovanie predstavuje v súčasnej dobe efektívny spôsob spracovania rôznych typov superzliatin (obr. 2.13). Jemnozrnnosť práškov

umožňuje dosiahnutie superplastických vlastností v danom teplotnom intervale pri zodpovedajúcej rýchlosti deformácie. Jednou z možných technológií je tvárenie práškov pretláčaním, pričom v dôsledku rekryštalizácie vzniká veľmi jemné zrno (mikro a nanokryštály). Tento jemnozrnný materiál je potom tvárnený (kovaný) v superplastických podmienkach pri nízkej deformačnej rýchlosti. V niektorých mikrokryštalických zliatinách sa dá touto technológiou dosiahnuť deformácia až 10^3 % pri veľkosti zrna $10 \mu\text{m}$.



Obr. 2.13. Kompaktácia prášku kovového skla izostatickým lisovaním

Technológia valcovania práškov predstavuje ďalšiu perspektívnu variantu spracovania, pretože umožňuje priame valcovanie práškového materiálu na plechy (obr. 2.14) [19]. Pri tvárení dochádza k distorzii jednotlivých častíc, a tým aj k výbornej kompaktácii. Takto vopred spracovaný materiál má dostatočnú pevnosť pre ďalšie spracovanie (sintrovanie pri zvýšených teplotách v ochrannej atmosfére).



Obr. 2.14. Kompaktácia prášku kovového skla valcovaním

2.4 Štruktúra spekaných materiálov

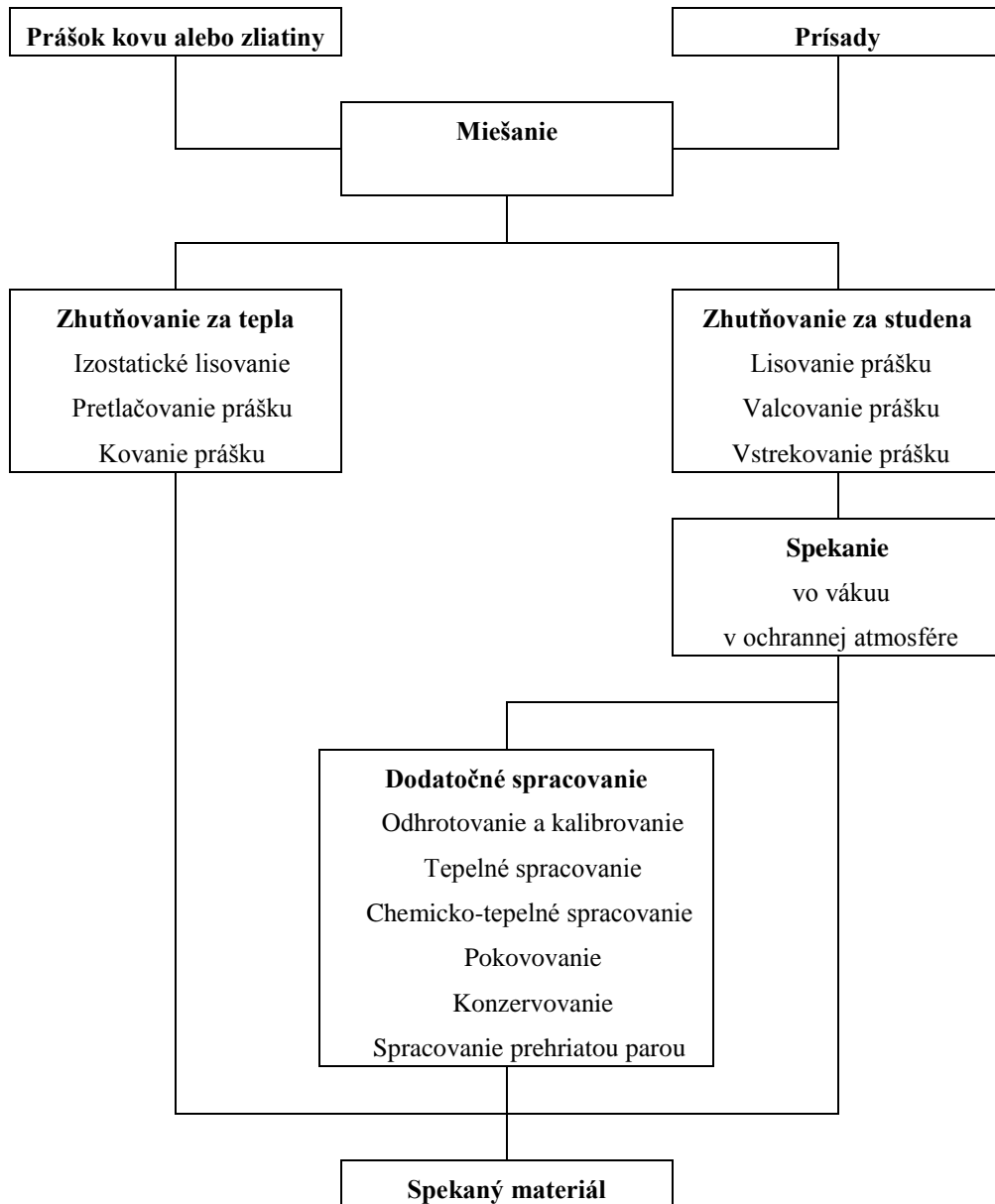
Prášková metalurgia je technologický odbor, ktorý zahŕňa štyri základné výrobné operácie [20], [21]: prípravu kovového prášku, zhutňovanie prášku, spekanie a dodatočné spracovanie (obr. 2.15). Výsledným produktom sú *spekané materiály*. Názov naznačuje, že ide o špecifický spôsob prípravy kovových materiálov. Analogicky (rovnakým postupom alebo postupom založeným prakticky na rovnakom princípe) sa však pripravujú všetky konštrukčné keramické materiály klasické (porcelán, fajansa) aj moderné (napr. zirkoničitá keramika, karbid kremíka ap.) a celý rad kompozitov.

Príprava práškov sa realizuje mechanickými, chemickými alebo elektrochemickými spôsobmi. Mechanické výroby kovových práškov sa zakladajú jednak na rozprašovaní tekutého kovu tlakovou vodou alebo prúdom plynu, jednak na mletí nasekaného kovu v guľových, kladivových alebo vírivých mlynoch. Mletie je aj najbežnejším spôsobom prípravy keramických práškov. Najbežnejším chemickým spôsobom je priama redukcia práškových oxidov (alebo iných zlúčenín) kovu.

Zhutňovanie výrobkov z práškov sa dosahuje pomocou tlaku alebo aj bez použitia tlaku. Základným spôsobom zhutňovania tlakom je lisovanie, pri ktorom kovový prášok alebo zmes získava požadovaný tvar výrobku a relatívnu hustotu. Pri lisovaní sa najskôr čiastočky voľne nasypného prášku zoskupujú, pri rastúcom tlaku sa tvárne čiastočky deformujú, krehké čiastočky sa drvia a vnikajú do pórov. Hustota výlisku sa pritom zvyšuje, ale výlisky vždy majú určitý stupeň pórovitosti. Lisovaním sa okrem žiadaného tvaru dosahuje aj určitá súdržnosť čiastočiek ako dôsledok zvarenia za studena, ktoré tkvie v spojení jednotlivých čiastočiek v miestach dotyku pôsobenia medziatómových síl (pri prekročení teploty nad určitú kritickú hranicu). Potrebné teplo vzniká v miestach dotyku čiastočiek trením. Výlisky majú väčšinou určitú súdržnosť, ktorá stačí na ďalšiu manipuláciu. Izostatické lisovanie za tepla (HIP proces) sa používa vtedy, keď sa požaduje vysoká hustota spekaného materiálu (napr. vysokonamáhané konštrukčné súčiastky). Prášok je umiestnený v obale, ktorý má tvar hotového výrobku a pôsobí sa naň rovnomerne zo všetkých strán tlakom kvapaliny alebo plynu.

Spekanie výliskov je proces, pri ktorom sa dosiahne zmena materiálu z disperzného (práškového) stavu s veľkým merným povrchom na kompaktný

stav, čiže s minimálnym merným povrchom, a to bez dosiahnutia teploty tavenia (teploty spekania sú najčastejšie 60 až 90 % absolútnej teploty tavenia základného kovu). Charakteristické účinky spekania sú zvýšenie pevnosti a zmenšenie pórovitosti. Viaczložkové sústavy možno spekať buď v tuhom stave, alebo pri vzniku kvapalnej fázy (tavné spekanie; v kvapalnom stave nie je základná, ale len vedľajšia zložka sústavy).



Obr. 2.15. Schéma technologického postupu výroby spekaných materiálov [20]

Dodatočné spracovanie po spekaní sa vykoná iba v niektorých prípadoch. Jednotlivé operácie sa vykonávajú za účelom zvýšenia presnosti rozmerov, pevnosti, odolnosti proti korózii a opotrebeniu.

Štruktúra spekaného materiálu je prevažne polykryštalická, len v niektorých prípadoch keramických spekaných materiálov sa vyskytuje v štruktúre malý podiel amorfných (sklených) fáz. Pre spekané materiály je charakteristická pórovitosť, heterogenita a izotropnosť. *Pórovitosť* súvisí s podstatou práškovej metalurgie (jej veľkosť závisí od podmienok zhutňovania a spekania) a prejavuje sa aj na hodnote mernej hmotnosti, ktorá je nižšia ako u deformovaného materiálu toho istého druhu. *Heterogenita* štruktúry je vyvolaná predovšetkým chemickou heterogenitou, ktorá je výrazná najmä u spekaných materiálov vyrobených zo zmesi práškov s rôznym chemickým zložením. *Izotropnosť* vlastností je pojem, ktorý vyjadruje, že vlastnosti (napr. plasticita, elektrická vodivosť ap.) nie sú smerovo závislé (deformované materiály, napr. valcované plechy, sú naopak anizotropné, majú iné vlastnosti v smere valcovania a kolmo na smer valcovania). Pórovitosť (a v niektorých prípadoch čiastočne aj heterogenita) má negatívny vplyv na mechanické vlastnosti; izotropnosť je v rade prípadov výhodná.

2.5 Štruktúra polymérov

Základnou zložkou plastov sú makromolekulové látky - polyméry. Štruktúru polymérov treba posudzovať vždy na dvoch úrovniach:

- molekulová štruktúra - veľkosť, chemické zloženie, tvar makromolekuly a pod.;
- nadmolekulová štruktúra - vzťahy makromolekúl medzi sebou, napr. ich vzájomné usporiadanie.

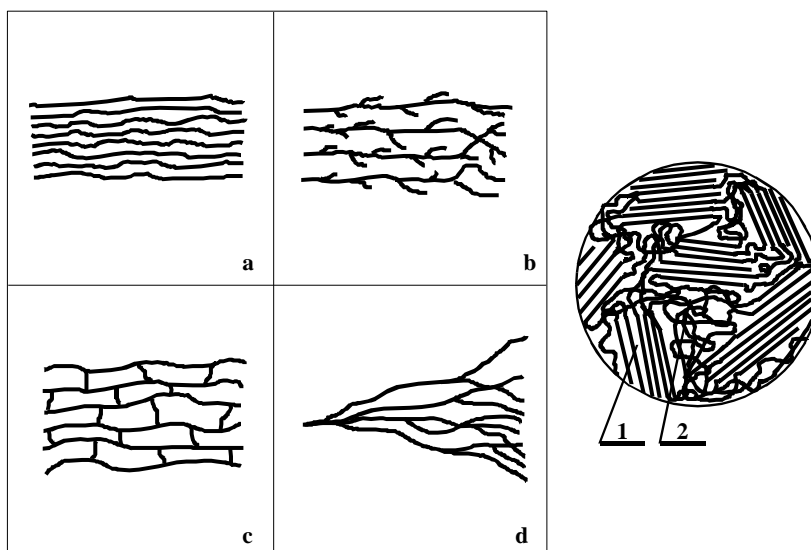
Molekulová štruktúra. Makromolekuly majú obrovské rozmery, sú tvorené z viac než 1000 atómov. Základný reťazec tvoria najčastejšie atómy C (zriedkavejšie atómy O, P alebo Si), na ktoré sa viažu prevažne atómy H, O, N, Cl, F, [22]. Podľa chemickej štruktúry hlavného reťazca delíme makromolekulové látky na:

- karboplasty s uhlíkovým reťazcom;

- karboxy-plasty s uhlíkovo-kyslíkovým reťazcom;
- karbo-azoplasty s uhlíkovo-dusíkovým reťazcom;
- karbotioplasty s uhlíkovo-sírovým reťazcom.

Reťazce s kremíkovými atómami namiesto uhlíkových majú silikóny, ktoré už tvoria medzistupeň medzi organickými a anorganickými polymérmi.

Tvar makromolekuly môže byť lineárny, rozvetvený, sieťovaný alebo priestorový, pozri obr. 2.16, [23].



Obr. 2.16. Štruktúra plastov : molekulová nadmolekulová
 a) lineárna b) rozvetvená 1) kryštalické objemy
 c) sieťovaná d) priestorová 2) amorfné objemy

Každá forma zosieťovania obmedzuje pohyblivosť makromolekuly, čo sa prejaví zvýšením pevnosti, tvrdosti, zlepšujú sa ďalšie fyzikálne vlastnosti plastu a zlepšuje sa jeho odolnosť proti organickým rozpúšťadlám [24]. Negatívnym sprievodným javom je pokles húževnatosti plastu [25].

Vulkanizácia (pridanie zosieťujúcich činidiel pri súčasnom pôsobení tlaku a teploty, kedy sa po určitom čase vytvárajú priečne väzby, ktoré zvyšujú pevnosť celej štruktúry) sa používa nielen pri spracovaní kaučukov, ale aj na zosieťovanie polyetylénov, polyvinylchloridov ako aj v mnohých ďalších aplikáciách lineárnych makromolekúl na zlepšenie ich pôvodných vlastností.

Nadmolekulová štruktúra. Polyméry s lineárnou makromolekulou môžu mať amorfnú alebo kryštalickú stavbu. Zvyčajne však nie sú nikdy dokonale kryštalické, ale sú zložené ako z kryštalických tak aj z amorfných objemov - sú teda semikryštalické. *Kryštalinita polyméru* je trojrozmerné usporiadanie makromolekúl alebo ich častí v kryštalografickej mriežke, ktoré vzniká pri kryštalizácii polymérov. *Orientácia* je prednostné usporiadanie reťazcov makromolekuly v určitom smere. Jedna makromolekula zvyčajne prechádza ako kryštalickou, tak aj amorfnou oblasťou, pozri obr. 2.16 vpravo.

Množstvo kryštalickej fázy vyjadruje tzv. stupeň kryštalinity:

$$S_k = \frac{\text{objem kryštalických oblastí}}{\text{celkový objem plasty}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.1)$$

Zvyšovanie kryštalického podielu sa prejaví väčšou pevnosťou, tuhosťou, tvrdosťou ale aj väčšou krehkosťou a menšou húževnatosťou ako aj zmenou ďalších vlastností polyméru. Amorfné podiely spôsobujú zvýšenie húževnatosti a odolnosti polyméru proti nárazom.

Kryštalinity sú ohraničené kryštalické oblasti (obdoba zŕn v kovových materiáloch), v ktorých molekuly sú usporiadané v určitom priestorovom poriadku. Kryštalinity vznikajúce postupným rastom zo zárodka nazývame sferolity. Polyméry kryštalizujú v rovnakých kryštalografických sústavách ako kovové materiály, ich štruktúrne mriežky však tvorí väčší počet atómov [26].

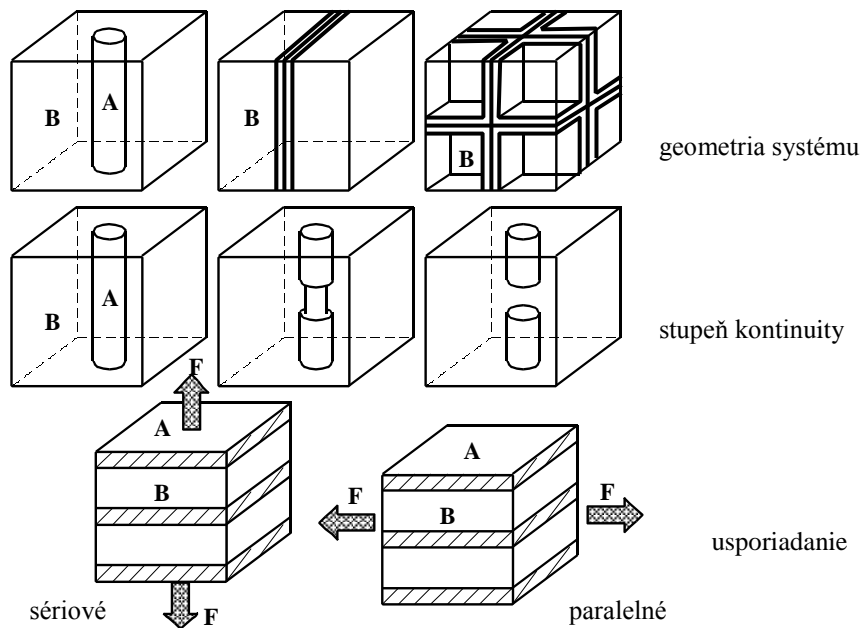
Polyméry s priestorovou štruktúrou nemajú kryštalické usporiadanie molekúl, pretože tuhé priestorové makromolekuly bránia voľnému pohybu segmentov makromolekúl a vytvoreniu kryštalizačných zárodkov, a v konečnom dôsledku tvorbe kryštálov.

2.6 Štruktúra kompozitov

Kompozity sú materiály, ktoré vznikli fyzikálnou kombináciou existujúcich jednoduchých materiálov. Základná hmota, čiže matrica, má funkciu spojiva. Druhá zložka (vlákna, vrstvy alebo disperzné častice) má spevňujúci účinok, [2, 5, 27].

Charakteristické parametre. Na vlastnosti kompozitu zloženého z fáz A a B majú vplyv najmä tieto parametre (obr.2.17):

- a) objemový podiel zložiek V_A , V_B ;
- b) geometria systému, ktorá môže byť charakteristická:
- jednorozmernou kontinuálnou fázou (vlákno, tyčinka),
 - dvojrozmernou kontinuálnou fázou (doska, lamela),
 - trojrozmernou kontinuálnou fázou (priestorová sieť);
- c) stupeň kontinuity (od úplnej kontinuity po diskkrétne častice);
- d) usporiadanie fáz (extrémami sú usporiadania paralelné a sériové).



Obr. 2.17. Charakteristické parametre kompozitov

Mechanické vlastnosti kompozitu najviac ovplyvňuje usporiadanie fáz. Vlastnosti kompozitu môžeme považovať za približne aditívne a dajú sa teda odvodiť od vlastností východiskových zložiek, [2.6.2]. Pri zaťažení paralelného modelu musí byť splnená podmienka rovnakej deformácie fáz, pričom napätia prenášané fázami budú rôzne), u sériového modelu bude naopak rovnaké napätie fáz (ale rozdielna deformácia).

Z toho možno odvodiť moduly pružnosti:

- a) paralelného modelu E_p

$$E_P = E_A \cdot V_A + E_B \cdot (1 - V_A) \quad (2.2)$$

b) sériového modelu E_S

$$E_S = \frac{E_A \cdot E_B}{E_A \cdot (1 - V_A) + E_B \cdot V_A} \quad (2.3)$$

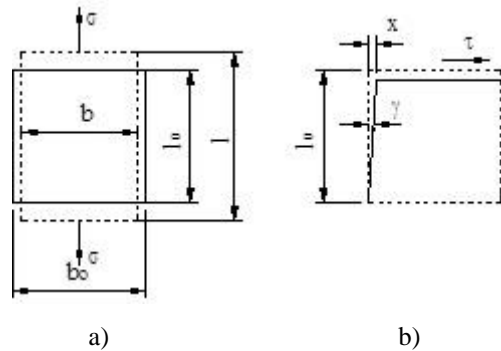
Modul pružnosti kompozitu so sériovým usporiadaním je vždy nižší než pri paralelnom a rozhodujúci vplyv na modul pružnosti má poddajnejšia fáza. V skutočnosti nie je väčšinou usporiadanie ideálne paralelné alebo sériové a hodnoty modulu pružnosti kompozitu ležia medzi hodnotami pre E_P a E_S .

2.7 Deformácia a deformačná štruktúra

Aplikácia materiálov v technickej praxi sa uskutočňuje na základe poznania ich vlastností, ktoré sú určujúce pre daný druh zaťaženia. Konštrukčné materiály sú namáhané takmer vždy mechanickým namáhaním. Z toho dôvodu sú pre bežnú inžiniersku prax rozhodujúce *mechanické vlastnosti*. Mechanické vlastnosti predstavujú súbor javov, ktoré charakterizujú odozvu materiálu na pôsobenie vonkajšieho a vnútorného namáhania (deformácia, únava, vnútorné napätia, korózia, radiácia, teplota, elektrické pole, magnetické pole). V mnohých prípadoch aj zaťaženie iného ako mechanického typu (napr. rozdiel teplôt) sa v konečnom dôsledku transformuje na mechanické namáhanie, prípadne významne ho ovplyvňuje. Odozvou tuhej látky na zaťaženie vonkajšou aj vnútornou silou je deformácia a v krajnom prípade lom. Toto správanie je výsledkom vzájomného pôsobenia vonkajších síl s vnútornými silami v telese, ktoré bránia jeho deformácii a porušeniu [28].

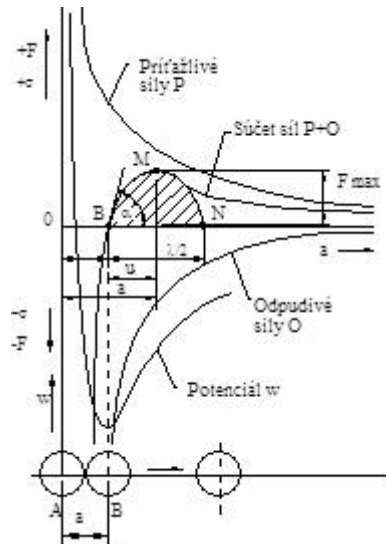
Mierou deformácie je všeobecne posuv jednotlivých bodov telesa proti susedným bodom a s tým spojená zmena jeho tvaru a rozmerov. Normálové napätie vyvoláva posuv v smere pôsobiacej sily a tiež posuv v priečnom smere. Šmykové napätie spôsobuje šmykovú deformáciu, ktorá je spojená so zmenou uhlov smerov a rovín v telese. Pri zložitejšom namáhaní je výsledný posuv daný vektorovým súčtom posuvov od jednotlivých zložiek napätia (obr. 2.18).

Deformácia má vždy elastickú zložku ε_{el} a po prekročení kritickej hodnoty aj plastickú zložku ε_{pl} . Celková deformácia je potom daná súčtom $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$. Strojové súčiastky a konštrukcie pracujú obvyčajne iba v oblasti veľmi malých deformácií, ktoré sú obmedzené elastickou zložkou ε_{el} . Oblasť veľkých trvalých deformácií je významná pre technologické spracovanie (tvárnenie, ohýbanie) a pre optimalizáciu vlastností (spevnenie).



Obr. 2.18. Pružná deformácia telesa zaťaženého a - normálovým napätím, b - šmykovým napätím

Pružná deformácia. Teleso sa pružne (elasticky) deformuje iba do určitého stupňa zaťaženia. V kryštalických látkach sa uskutočňuje vysunutím atómov z rovnovážnych polôh. Po odľahčení sú atómy príťažlivými alebo odpudivými silami (obr. 2.19) vrátené do rovnovážnej polohy a teleso nadobudne pôvodný tvar [28].



Obr. 2.19. Dvojátómový model mriežky a priebeh síl medzi atómami

Čas nevyhnutný na zmenu stredných polôh atómov pri pružnej deformácii je obyčajne o niekoľko rádov kratší ako čas rastu sily na plnú hodnotu pri zaťažovaní, prípade jej návrat pri odľahčení. Z toho dôvodu vo väčšine prípadov môžeme uvažovať, že pružná deformácia sleduje zaťaženie bez časového oneskorenia a je časovo nezávislá. Medzi pružnou deformáciou a napätím je priama úmernosť, ktorú vyjadruje Hookov zákon,

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma; \quad \varepsilon = \frac{1}{E} \sigma, \quad (2.4)$$

kde $1/\alpha$ je modul pružnosti v ťahu alebo tlaku **E**. Jeho súvislosť s modulom pružnosti v šmyku **G** a objemovým modulom **K** udáva rovnica

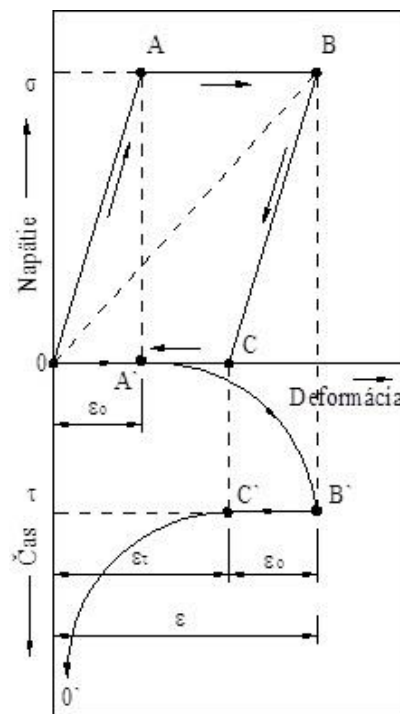
$$G = \frac{E}{2} \cdot \frac{1}{\mu + 1}; \quad K = \frac{E}{3} \cdot \frac{1}{1 - 2\mu}, \quad (2.5)$$

kde μ je Poissonova konštanta (pre mnohé kovy $\mu = 0,33$).

Modul pružnosti charakterizuje pružné správanie látok. Na závislosti $\sigma = f(\varepsilon)$ je vyjadrený smernicou dotyčnice k priamkovej časti ($E \approx \text{tg } \alpha$ v súlade so vzťahom $E = \sigma/\varepsilon$). Hodnota **E** je mierou tuhosti, $1/E$ mierou poddajnosti látky v intervale pružných deformácií. Kryštalické látky (kovy, keramika) vzhľadom na vysokú usporiadanosť a tesnosť atómov dovoľujú iba malé vychýlenie atómu z rovnovážnej polohy a na jeho vychýlenie je potrebné vysoké napätie. Z toho dôvodu modul pružnosti **E** dosahuje hodnoty rádovo 10 až 10^2 GPa a pomerná pružná deformácia iba zlomok

percenta. (Moduly pružnosti keramických polykryštalických látok môže znížiť pórovitosť až na štvrtinu). Anorganické sklá, ktoré majú usporiadanie atómov na krátku vzdialenosť (menšiu mieru usporiadanosti), majú aj možnosť väčšieho vychýlenia atómov z rovnovážnych polôh majú modul pružnosti rádovo $E = 5$ až 11 GPa. Polyméry s rôznou väzbou medzi atómami v molekule a medzi molekulami majú aj rozdielnu poddajnosť v smere osy reťazcov a kolmo na os. S tým súvisí veľký interval modulu pružnosti $E = 10^{-2}$ až 10 GPa (pre vysoko orientované vlákna $E = 100$ až 200 GPa).

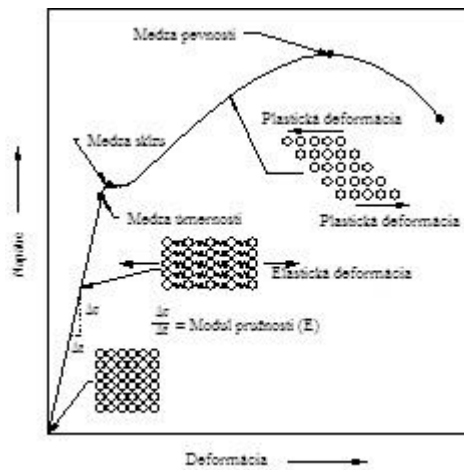
Anelasticita. Pri zaťažovaní rýchlosťou, ktorá je porovnateľná s rýchlosťou šírenia vlny pružnej deformácie (akustickej vlny), prípadne s rýchlosťou ďalších dejov spojených s pružnou deformáciou (napr. premiestňovanie intersticiálov prímiesi zo stlačených oblastí mriežky do rozťahnutých) sa deformácia oneskoruje za napätím a stáva sa časovo závislou. Zároveň sa poruší úmernosť medzi napätím a deformáciou. Takúto časovo závislú, ale dokonale vratnú deformáciu označujeme ako anelastickú a zodpovedá jej ε_{ae} v časovom úseku τ_0 (obr. 2.20).



Obr. 2.20. Anelastická deformácia – dopružovanie

Anelastickú deformáciu pri statickom zaťažovaní zanedbávame. Praktický význam má ako jedna zo zložiek vnútorného tlmenia [29, 30, 31] pri cyklickom zaťažovaní frekvenciou blízkou $f = 1/\tau_0$ a v každom cykle sa rozptýli energia úmerná ploche uzavretej oblasti (hysteréznej slučky obr. 2.19). *Relaxovaný modul* pružnosti potom zodpovedá smernici priamky \overline{OB} .

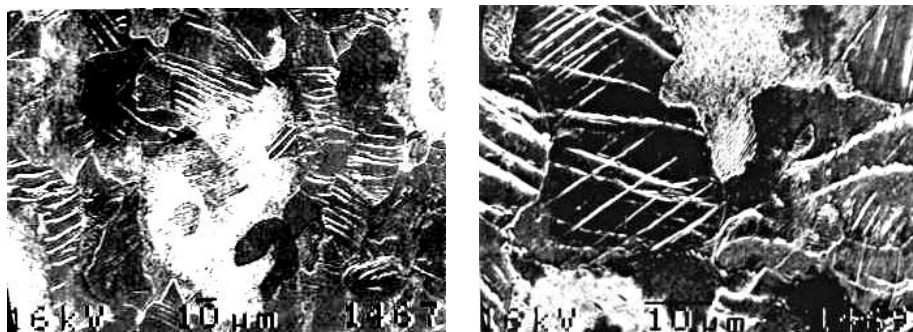
Trvalá deformácia. Zaťaženie nad medzou platnosti Hookovho zákona vyvolá trvalú (plastickú) deformáciu, ktorá po odľahčení nezanikne. Jej závislosť od napätia je zložitejšia, ako ukazuje obr. 2.21 a ovplyvňuje ju teplota a rýchlosť zaťažovania. Približne do homologickej teploty 0,3 možno trvalú deformáciu považovať za časovo nezávislú. Plastická deformácia sa realizuje v kryštalických materiáloch s rôznymi mechanizmami [30].



Obr. 2.21. Závislosť napätia od deformácie pri plastickej deformácii

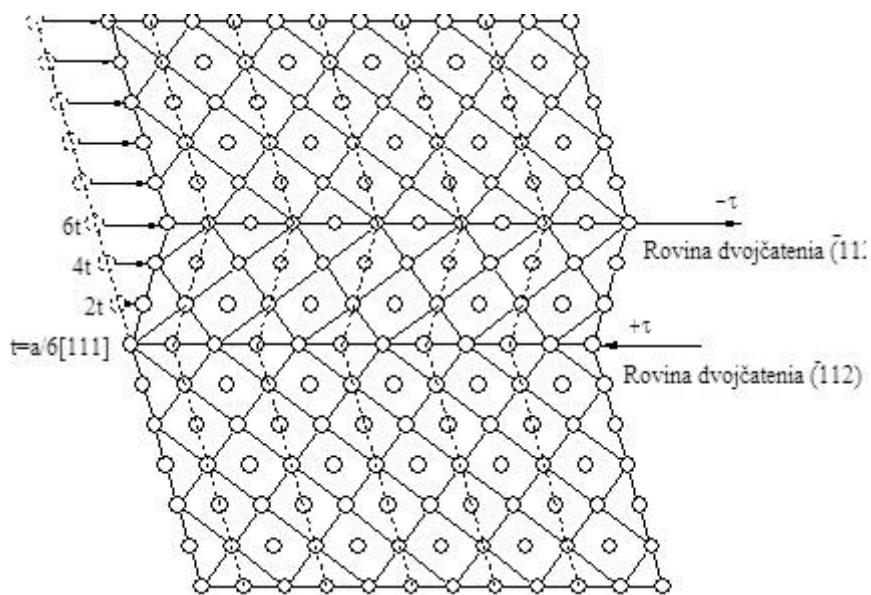
Sklzový mechanizmus plastickej deformácie. V tvárnenom kove je aj po veľkej plastickej deformácii zachované pravidelné usporiadanie atómov v mriežke, ale mriežka má podstatne vyššiu hustotu porúch. Z toho vyplýva, že deformácia musí byť výsledkom posuvov úsekov mriežky pozdĺž určitých kryštalografických rovín a smerov o celé násobky vzdialeností atómov, ako to vidieť na obr. 2.22. Plastickeú deformáciu tohto typu označujeme ako sklzovú. Sklz v kryštále prebehne vtedy, ak šmykové napätie v rovine a smere klzu dosiahne kritickú hodnotu τ_{\max} potrebnú pre

nevratný pohyb dislokácií. Ak prejde dislokácia celým kryštálom, posunú sa jeho časti oddelené rovinou klzu vzájomne o Burgersov vektor, čím vznikne trvalá deformácia rádovou 10^{-10} m. Veľké deformácie preto musia byť výsledkom veľkého počtu elementárnych deformácií. Pri nízkych homologických teplotách $T_h \leq 0,3$ je tepelne aktivovaný pohyb atómov obmedzený a rozhodujúcim mechanizmom plastickej deformácie je sklzový mechanizmus. Pri vyšších teplotách sa v dôsledku zvýšenia intenzity tepelného pohybu uplatňujú aj difúzne mechanizmy (šplhanie dislokácií a napätím usmernený tok). Plastická deformácia sklzom sa realizuje už pri pomerne nízkych napätiach a je pozorovateľná aj na metalograficky pripravenom voľnom povrchu (obr. 2.22).



Obr. 2.22. Sklzné čiary na povrchu plastickej deformovanej nízkouhlíkovej ocele (REM)

Zvláštnym prípadom klzu je *dvojčatenie*, pri ktorom prejde kryštálom sústava neúplných dislokácií a uskutočnia sa presuny len o časť medziatómovej vzdialenosti. Posunutá časť kryštálu, ktorá je zrkadlovo súmerná k neposunutej sa nazýva mechanické dvojča. Dvojčatením sa cez malý posuv atómov dosahuje makroskopická šmyková deformácia. Pochod podporuje nízka teplota a vysoká rýchlosť deformácie (obr. 2.23, 2.24).



Obr. 2.23. Plastická deformácia dvojčatením



Obr. 2.24. Príklad štruktúry po plastickej deformácii dvojčatením na metalografickom výbruse

Ako roviny klzu sa z energetických dôvodov uplatňujú všeobecne len mriežkové roviny husto obsadené atómami. Podobne aj smer klzu je výhradne smer najhustejšie obsadený atómami. Sklzoové systémy pre najbežnejšie mriežky sú uvedené v tab. 2.2.

Tab. 2.2

Kryštalografické roviny a smery pre niektoré kryštalografické sústavy

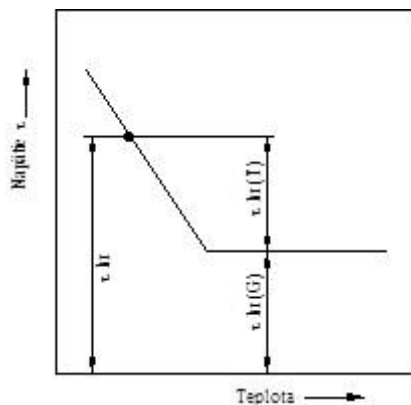
Sústava	Roviny klzu	Smery klzu	Počet systémov	Príklad
fcc	{111}	<110>	12	Al, Cu, Ni
bcc	{110}	<111>	12	Fe _α , Ta, W
	{211}	<111>	12	Fe _α , Ta, W
	{321}	<111>	24	Fe _α
hcp	(0001)	<1120>	3	Mg, Be, Zn
	{1010}	<1120>	3	Ti, Zr _α

Iné deformačné mechanizmy. Pri dostatočne vysokých teplotách sa na deformácii polykryštalických látok podieľajú i sklzy po hraniciach zŕn a usmernená difúzia vakancií. Ide o pochody výrazne tepelne aktivované a časovo závislé, ktoré sa uplatňujú hlavne pri tečení.

Uplatnenie jednotlivých mechanizmov a ich podiel na výslednej deformácii závisí od typu materiálu, veľkosti a podmienok zaťažovania (teplota, rýchlosť a spôsob zaťažovania). Hlavným mechanizmom v polykryštalických materiáloch je však sklz.

Závislosti napätia a deformácie pri kovoch. Kovové materiály na stavbu strojov a na nástroje sú v podstate vždy polykryštalické. Deformačné správanie polykryštálu je však pomerne zložité. Z toho dôvodu sa budeme najskôr zaoberať monokryštálmi.

Deformačné správanie monokryštálov. Sklzová deformácia kryštálu sa realizuje vtedy, keď šmykové napätie v rovine a smere klzu - sklzové napätie τ_s - dosiahne kritickú hodnotu $\tau_s \geq \tau_{kr}$. Hodnoty τ_{kr} čistých kovov sú výrazne rozdielne (napr. kadmium má $\tau_{kr} = 0,13$ MPa a Fe_α 15 MPa) a závisí od teploty a čistoty. Napätie τ_{kr} má zložku teplotne závislú a teplotne nezávislú $\tau_{kr} = \tau_{kr}(T) + \tau_{kr}(G)$ podľa obr. 2.25. Prvé súvisia s uľahčením prechodu dislokácií cez prekážky krátkeho dosahu (napr. atómy prímiesí) pri zväčšení tepelných kmitov mriežky, druhá s prekonávaním napäťových polí dlhého dosahu (napr. pri hromadení dislokácií). Kritické sklzové napätie závisí od modulu pružnosti G. Nečistoty a prímiesy hodnotu τ_{kr} zväčšujú.



Obr.2.25. Zloženie kritického sklzového napätia

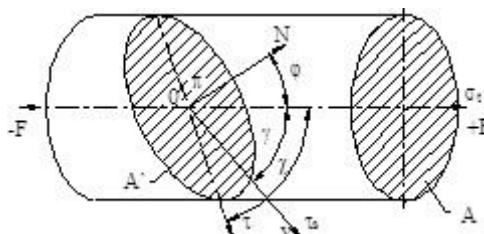
Dôsledkom väzby klzu na určité mriežkové roviny a smery vykazuje monokryštál anizotropiu mechanických a deformačných vlastností [28, 29, 30, 31]. Vzťah medzi sklzovým napätím τ_s a ťahovým σ_t je podľa obr. 2.26 daný vzťahmi

$$\tau_s = \sigma_t \cdot \sin \chi \cdot \cos \lambda \quad \tau_s = \sigma_t \cdot \cos \varphi \cdot \cos \lambda \quad (2.6)$$

kde χ je uhl medzi σ_t a sklzovou rovinou π ,

λ je uhol medzi σ_t a smerom klzu v ,

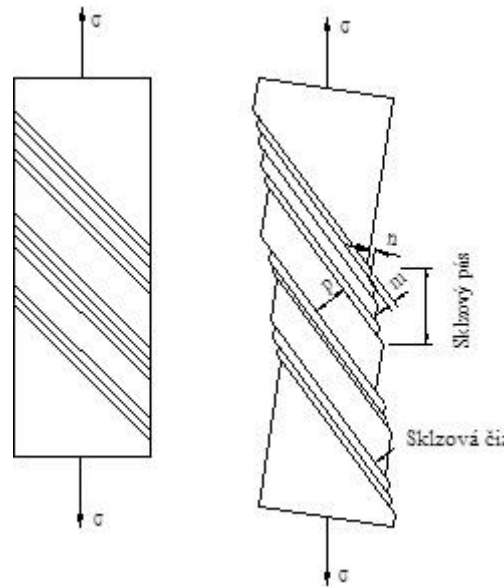
φ je uhol medzi σ_t a normálou k π .



Obr. 2.26. Vzťah medzi ťahovým napätím σ_t a sklzovým napätím τ_s

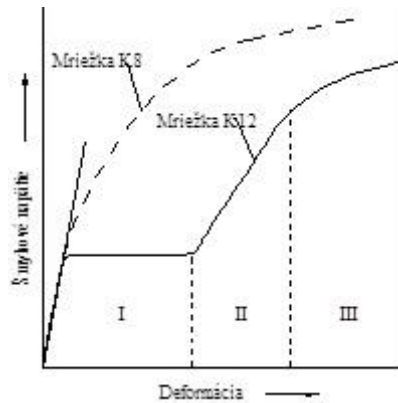
Výraz $m = \sin \chi \cdot \cos \lambda$ sa nazýva Schmitov orientačný faktor. Jeho hodnota sa mení od $m = 0$ (pre $\lambda = 90^\circ$ alebo $\chi = 90^\circ$) do $m = 0,5$ (pre $\chi = \lambda = 45^\circ$). V prvom prípade je sklz vylúčený, pretože $\tau_s = 0$, môže však pri $\chi = 90^\circ$ dôjsť k štiepeniu kryštálu. Sklz sa zahájí pri σ_t , pri ktorom $\tau_s \geq \tau_{kr}$. Medza klzu σ_k monokryštálu je funkciou orientácie sily vzhľadom na sklzový systém a jej minimálna hodnota je $\sigma_{kmin} = 2 \tau_{kr}$. Deformácia monokryštálu

začne v systéme, kde sa najskôr dosiahlo kritické napätie. Kryštál sa pritom natáča a nakláňa vzhľadom na smer sily tak, že sa hodnoty m a τ_s zväčšujú. Toto natáčanie vyvolá postupne sklz v ďalších systémoch - viacnásobný sklz (obr. 2.27). Sklz sa sústreďuje v tom istom systéme do rovín, kde je najmenej prekážok pre pohyb dislokácií. Na povrchu kryštálu vznikajú viditeľné sklzové čiary a ich skupiny - sklzové pásy.



Obr. 2.27. Deformácia monokryštálu sklzom

Deformačné spevnenie. Tvar závislosti $\sigma = f(\epsilon_{pl})$ charakteristický pre kovy s mriežkou K12 je na obr. 2.28, krivka 1. Počiatočná priamková časť zodpovedá pružnej deformácii. Napätie, pri ktorom začína trvalá deformácia (zodpovedá hromadnému pohybu dislokácií), sa získa extrapoláciou závislosti $(\tau - \epsilon)$ na nulovú deformáciu. Z priebehu krivky $(\tau - \epsilon)$ vyplýva, že každé zväčšenie deformácie vyžaduje zväčšenie napätia. Hovoríme o *deformačnom spevnení* a krivku $(\tau - \epsilon)$ nazývame *spevňovacia krivka*. Krivka má tri úseky, ktoré sa líšia intenzitou i podstatou spevnenia. V *úseku ľahkého klzu* (I) je spevňovanie pomalé. Súvisí to s dlhými voľnými dráhami dislokácií medzi prekážkami a nebrzdenou činnosťou Frankových - Readových zdrojov. Nasleduje *úsek rýchleho spevňovania* (II) následkom rastu dislokačnej hustoty, hromadenie dislokácií na prekážkach a pretínanie dislokácií, ktoré vyvolal sklz v ďalšom systéme. V úseku III sa zablokované dislokácie opäť uvoľňujú priečnym sklzom a šplhaním (jav sa niekedy označuje ako *dynamické zotavenie*).



Obr. 2.28. Deformačné spevnenie monokryštálov

K deformačnému spevneniu najvýznamnejšie prispieva úsek II a hlavným faktorom spevnenia je dislokačná hustota ρ . Spevnenie možno vyjadriť prírastkom sklzového napätia $\Delta\tau = f(\rho)$ vzťahom

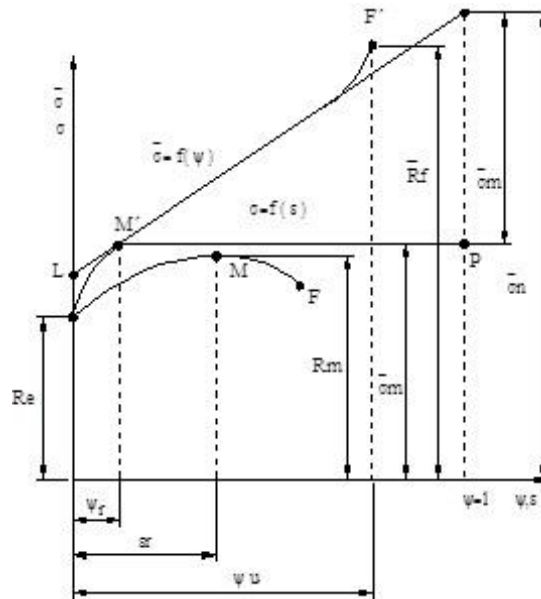
$$\Delta\tau \approx G \cdot b \cdot \rho^{1/2} \quad (2.7)$$

Deformačné spevnenie sa preto označuje aj ako *dislokačné spevnenie*.

Monokryštály kovov s mriežkou H12 s pomerom c/a blízky ideálnemu (napr. Mg, Ti, Zr) majú spevňovaciu krivku podobnú krivke 1. Kovom s c/a väčším ako c/a ideálne (napr. Zn) chýba na spevňovacej krivke úsek II a III. Pri kovoch s mriežkou K8 nastupuje viacnásobný sklz a rýchle spevňovanie už pri malých deformáciách (obr. 2.28, krivka 2).

Deformačná odozva polykryštálov. Polykryštál je zhuk náhodne orientovaných zŕn oddelených hranicami. Deformácia jednotlivých zŕn je orientačne závislá a vzájomne sa obmedzuje. Sklz začne v tom zrne a sklzovom systéme, v ktorom sa dosiahne kritické sklzové napätie najskôr. Rozborom geometrie klzu bolo zistené [4, 28, 31, 32, 33, 34], že pre ľubovoľné zmeny tvaru, musí mať mriežka najmenej 5 nezávislých sklzových systémov, aby sa zachovala celistvosť materiálu. V priaznivo orientovaných zrnách sa už od malých deformácií (1 až 2 %) uplatňuje viacnásobný sklz a rýchle spevňovanie, pričom v ostatných zrnách sklz ešte nezačal. To prispieva k heterogenite plastickej deformácie polykryštálu. Deformačné vlastnosti materiálov sa pre technické účely sleduje obvykle na závislosti menovitého dohovoreného ťahového napätia a pomerného

predĺženia, ktorú nazývame *technický* alebo *dohovorený diagram*. Jeho typický tvar pre tvárne kovové materiály je na obr. 2.29. Zisťuje sa normovanou skúškou ťahom.



Obr. 2.29. Deformačné diagramy nízkouhlíkovej ocele

Úsek OK (obr. 2.29, krivka 1) zodpovedá pružnej a úsek KMU plastickej deformácií. V úseku KM sa tyč deformuje rovnomerne po celej dĺžke. Od bodu M (medza stability), v ktorom sa dosiahla maximálna sila F_m (F_m/S_o zodpovedá pevnosti R_m), sa skúšobná tyč začne lokálne zužovať a pri podmienkach daných bodom U sa vo vzniknutom „krčku“ pretrhne. Napriek tomu, že kov sa v celom úseku plastickej deformácie (KMU) spevňuje a skutočné napätie sa až do lomu zväčšuje, menovité napätie v úseku MU klesá. Reálnejšie popisujú priebeh spevnenia pri ťahovej skúške *skutočné deformačné diagramy*: skutočné napätie $\bar{\sigma}$ - pomerné zúženie ψ alebo $\bar{\sigma}$ - prirodzená deformácia φ . Pre tieto závislosti platí:

$$\bar{\sigma} = \sigma \frac{S_o}{S}, \quad \psi = \frac{S_o - S}{S_o}, \quad (2.8)$$

kde S , S_o je okamžitý a počiatkový prierez skúšobnej tyče.

Skutočné napätie $\bar{\sigma}$ sa môže pre malé deformácie vyjadriť vzťahom (2.8) ako $\bar{\sigma} = \sigma/(1-\psi)$, prípadne z úvahy o nemennosti objemu deformovanej tyče $S_o \cdot L_o = S \cdot L$ pomocou ϵ ako $\bar{\sigma} = \sigma(1 + \epsilon)$.

Na obr. 2.28 sú porovnané priebehy jednotlivých závislostí. Pre oblasť plastickej deformácie môžeme závislosť ($\sigma - \varphi$) popísať vzťahom:

$$\bar{\sigma} = K \cdot \varphi^n, \quad (2.9)$$

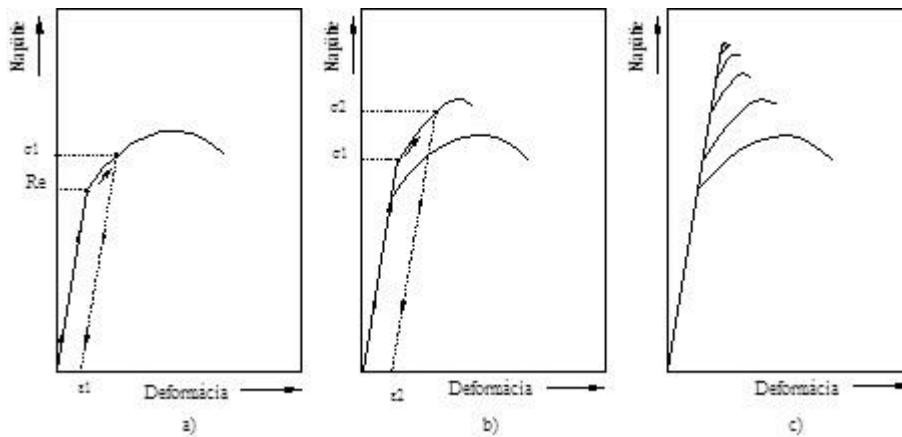
kde K je súčiniteľ spevnenia a n exponent spevnenia. Parametre deformačného spevnenia pre niektoré materiály sú uvedené v tab.2.3. Koeficienty K a n charakterizujú deformačné spevnenie materiálov a sú určujúce pre technologické operácie tvárnením.

Tab. 2.3

Parametre deformačného spevnenia pre vybrané materiály

Materiál	Medza klzu [MPa]	K [MPa]	n
Nízkouhlíková oceľ (norm. žíhaná)	210	500	0,28
12 060 (zušľachtená)	520	1270	0,15
Austenitická oceľ Cr18Ni9	590	1280	0,45
Med' (žíhaná)	60	320	0,54
Hliník (žíhaný)	40	180	0,20

Deformačné spevnenie sa prejaví zväčšením medze klzu, pevnosti a tvrdosti a zmenšením ťažnosti, kontrakcie (pomerné zmenšenie prierezu tyče v mieste pretrhnutia) a húževnatosti. Pretože medza klzu rastie s deformáciou rýchlejšie ako pevnosť, blíži sa pomer R_e/R_m so zväčšujúcou sa deformáciou k jednotke. Ťažnosť zároveň klesá takmer na nulu a kov sa pri ďalšej deformácii porušuje. Charakter týchto zmien vidieť na obr.2.30. Deformačným spevnením môžeme zväčšiť pevnosť približne dvakrát, a medzu klzu trikrát až šesťkrát (podľa východiskového pomeru R_e/R_m). Uplatňuje sa najmä pre neželezné kovy a pre niektoré uhlíkové ocele [32, 33, 34, 35, 36].



Obr. 2.30. Vplyv deformačného spevnenia na hodnotu pevnosti

V závislosti od deformácie za studena sa menia i niektoré fyzikálne a chemické vlastnosti kovu. Zväčšuje sa elektrický odpor a koercitívna sila, znižuje sa permeabilita. Deformačne spevnený kov je menej ušľachtilý ako nespevnený (menej odoláva korózii). Plasticou deformáciou za studena sa ovplyvní aj štruktúra kovu. Pôvodne rovnoosé zrná sa preťahujú v smere tvárnenia, zjednocuje sa ich doteraz náhodná kryštalografická orientácia a vzniká *deformačná textúra*. Textúra je spojená väčšinou s nežiaducou anizotropiou vlastností. Nemožno ju úplne odstrániť ani následným tepelným spracovaním (viď rekryštalizačná textúra), je však možné potlačiť ju úpravou tvárniaceho pochodu (napr. striedaním smeru valcovania pri plechoch). Prvotnou príčinou zmien vlastností deformačne spevneného kovu proti nespevnenému je uložená deformačná energia. Označujeme tak časť z energie, vynaloženej na plasticú deformáciu, ktorá zostala v spevnenom kove predovšetkým vo forme nových mriežkových porúch a zvýšila sa jeho veľná entalpia. Tvárnením za studena stúpa hustota dislokácií až o niekoľko rádov a vznikajú *dislokačné siete*, prípadne *tvárniace bunky* (úseky pomerne dokonalej mriežky ohraničenej spleťami dislokácií). Súčasne sa rádozo zväčšuje i hustota bodových porúch.

Iné mechanizmy spevnenia. Okrem deformačného spevnenia hromadením dislokácií a ich interagovaním s prekážkami a navzájom sa v polykryštalických materiáloch vyskytujú aj ďalšie mechanizmy spevnenia. Ide hlavne o spevnenie hraniciami zŕn, ktoré sú pre dislokácie neprekonateľnou prekážkou. Dislokácie sa pred prekážkou hromadia a napätie potrebné pre ďalšiu deformáciu rastie. Odpor rastie s množstvom (koncentráciou) hraníc na jednotku objemu. Z toho vyplýva, že rastie s klesajúcim rozmerom zrna

[30, 32, 35]. Pre polyedrické štruktúry sa môže vyjadriť Hallovým-Petchovým vzťahom

$$R_{eL} = \sigma_f + k \cdot d^{-1/2}, \quad (2.10)$$

kde σ_f je trecie napätie pre pohyb dislokácie v monokryštáli a závisí od materiálu a podmienok deformácie, k je súčiniteľ vyjadrujúci pôsobenie polí nahromadených dislokácií, d je stredný priemer zrna.

Spevnenie legovaním je založené na interakcii dislokácie s prímiesovými atómami v tuhom roztoku. Spevnenie závisí od koncentrácie prímiesových atómov a od ich veľkosti vo vzťahu k atómom materskej mriežky. Spevnenie substitučnými atómami môžeme vyjadriť vzťahom:

$$\Delta\sigma_s = \sum_i k_i X_i, \quad (2.11)$$

kde k je súčiniteľ charakterizujúci spevňujúci účinok prímiesi a X je koncentrácia prímiesi (v hm. %). Vplyv jednotlivých substitučných atómov je uvedený v tab. 2.4. Intersticiálne atómy spevňujú hlavne vtedy, ak tvoria tuhý roztok (napr. C a N).

Tab. 2.4

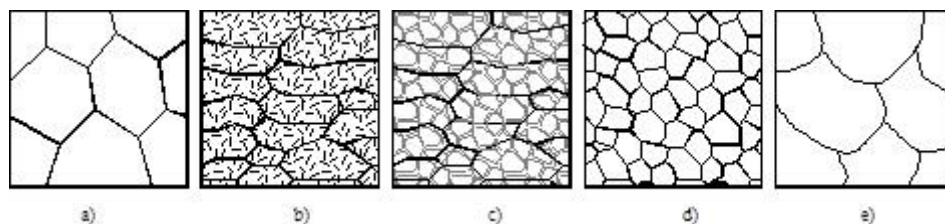
Vplyv substitučného spevnenia jednotlivými prvkami v oceli [28]

Prvok	k [MPa]	Prvok	k [MPa]	Prvok	k [MPa]	Prvok	k [MPa]
Al	60	Ni	30	Cr	-10	Ti	100
Be	420	P	350	Mn	50	V	24
Co	15	Si	80	Mo	22	W	23

Spevnenie časticami vyjadruje zvýšenie napätia potrebného na prechod dislokácie cez pole častíc inej fázy. Ak častice vznikli rozpadom presýteného tuhého roztoku, ide o *precipitačné spevnenie*. Ak sú častice vnesené do matrice metalurgickým procesom ide o *disperzné spevnenie*.

Odpeňovacie pochody v kovochoch. Vyžíhaný kov je takmer v termodynamickovej rovnováhe a jeho štruktúra i vlastnosti sú stále. Deformačne spevnený kov sa vďaka uloženej deformačnej energii vzdialil od termodynamickovej rovnováhy a je v metastabilnom stave. Pri žíhaní sa uložená deformačná energia postupne uvoľňuje. Zároveň miznú vlastnosti, ktoré kov získal deformačným spevnením a obnovuje sa štruktúra i vlastnosti zodpovedajúce vyžíhanému stavu. Uvoľňovanie energie a zmeny

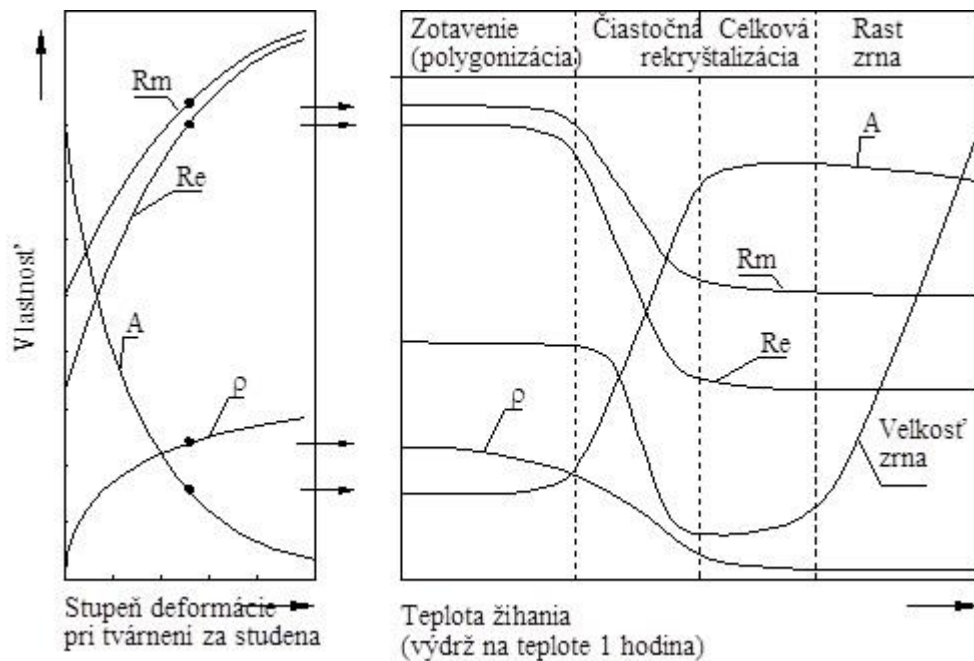
vybraných vlastností v závislosti od teploty žihania zachytáva schématicky obr. 2.31 a 2.32.



Obr. 2.31. Zmena štruktúry pri tvárnení za studena a následnom žihaní, a - pôvodná štruktúra, b - deformačná textúra s dislokáciami, c - štruktúra po zotavení, d - štruktúra po rekryštalizácii, e - hrubnutie zrna

Súbor pochodov, ktorými sa odstraňujú následky deformačného spevnenia, sa označuje ako *odpevňovacie pochody* [28, 35, 36] a delia sa na *zotavenie a rekryštalizáciu*. V súlade s komplexnou povahou dejov pri deformačnom spevňovaní sú i odpevňovacie pochody výsledkom elementárnych dejov, ktoré sa líšia časovou i teplotnou závislosťou a čiastočne sa prekrývajú. Preto zmeny prebiehajúce pri odpevňovacích procesoch môžu mať zložitý priebeh v závislosti od teploty a času žihania. Významné je aj to, či odpevňovacie procesy prebehli až po dokončení plastickej deformácie alebo sa uskutočňujú už počas deformačného pochodu. Podľa toho ich označujeme ako statické alebo dynamické.

Zotavenie. Oblasť zotavenia zodpovedá nízkoteplotnej oblasti uvoľňovania nahromadenej energie (obr. 2.32). Pochod začína premiestňovaním a zhlukovaním bodových porúch a znižovaním ich koncentrácie, t. j.



Obr. 2.32. Zmena vlastností pri tvárnení za studena a pri rekryštalizácii

zotavením bodových porúch. Pri zvýšení teploty sa vďaka väčšej tepelnej aktivácii začnú preskupovať dislokácie a hovoríme o *zotavení dislokácií*. V tejto etape sa znižuje dislokačná hustota (dislokácie opačných znamienok sa rušia - anihilujú) a mení sa rozloženie dislokácií. Dislokácie sa usporiadávajú v zrnách do plošných útvarov, ktoré ako malouhľové hranice oddelia úseky mriežky s malou hustotou dislokácií - *žihacie subzrná*. Podľa ich tvaru (mnohouholníky - polygóny) sa záverečná fáza zotavenia volá *polygonizácia* [35].

Zotavenie prebieha v čistých kovoch v teplotnej oblasti 0,1 až 0,35 T_T . Jeho rýchlosť sa zväčšuje exponenciálne s rastúcou teplotou. Rýchlosť zotavenia i podiel z celkovej uloženej energie, ktorý sa pritom uvoľní, znižujú prímеси a nízka energia vrstevných porúch. S charakterom pochodov pri zotavení sa zotavením menia i vlastnosti kovu.

V prvej fáze zotavenia s klesajúcou hustotou bodových porúch klesá výrazne merný elektrický odpor (bodové poruchy obmedzujú v kryštáloch s kovovou väzbou strednú voľnú dráhu elektrónov, od ktorej závisí vodivosť). Rovnako sa znižuje vnútorné napätie deformačne spevneného kovu v súvislosti so zmenšením pružnej deformácie východiskovej celistvej mriežky (v zrnách) jej rozpadom na subzrná. K ovplyvneniu mechanických

vlastností dôjde až zmenšením dislokačnej hustoty v záverečnej fáze zotavenia: znižuje sa medza klzu, pevnosť a tvrdosť. Zmena býva nevýrazná, výnimočne však môže dosiahnuť až 20 % východiskového deformačného spevnenia. (obr. 2.32).

Rekryštalizácia. Na zotavenie nadviaže pri zvýšení teploty rekryštalizácia (presnejšie primárna rekryštalizácia), ktorej teplotná oblasť približne zodpovedá vysokoteplotnej oblasti uvoľňovania uloženej energie na obr. 2.32. Počas pochodu možno odlišiť:

- nukleáciu zárodkov nových zŕn,
- rast nových zŕn (obr. 2.31).

Prednostnými miestami *nukleácie zárodkov nových zŕn* sú oblasti hranice a trojných stykov zŕn deformovanej štruktúry. Z rozboru energetických podmienok nukleácie pri rekryštalizácii vyplýva, že aktívne zárodky vznikajú splývaním žihacích subzŕn zotavenej štruktúry, ktoré sú dostatočne stabilné. Medzi posledné fázy zotavenia a prvej fázy rekryštalizácie - nukleáciou - je teda úzka súvislosť a jeden dej plynule prechádza do druhého.

Rast nových zŕn sa uskutočňuje migráciou (premiestňovaním) veľkouglových hraníc, ktoré pri pohybe mriežkou pohlcujú („zametajú“) dislokácie. Rekryštalizované zrná majú preto malú hustotu mriežkových porúch, ktoré odpovedajú vyžihanému stavu. Sú termodynamicky veľmi stabilné a ich rast pokračuje na úkor menej stabilných doteraz nereakryštalizovaných susedov.

Pre slabo deformovaný kov je typické výrazne nerovnomerné rozloženie plastickej deformácie. Celková hustota porúch nestačí pri zotavení na vytvorenie žihacích subzŕn. Rekryštalizácia prebieha preto bez vzniku zárodkov tak, že v miestach veľkého rozdielu dislokačnej hustoty po oboch stranách hranice zrna migruje hranica do zrna s väčšou dislokačnou hustotou.

Z mechanizmov rekryštalizácie vyplýva, že nedochádza k premene typu mriežky, ale len k náhrade rovnakou mriežkou s menšou poruchovosťou. Rekryštalizáciu nemožno zamieňať s prekryštalizáciou. Rekryštalizácia čistých kovov začína približne pri teplote $0,35$ až $0,4 T_T$ a končí, keď v podstate rovnoosé rekryštalizované zrná nahradia východiskovú deformovanú štruktúru. Tento okamih súhlasí s uvoľnením posledných zvyškov uloženej energie. Pri rekryštalizácii sa odstránili vlastnosti získané deformáciou a obnovili vlastnosti blízke vyžihanému stavu. Zníži sa

pevnosť, medza klzu a tvrdosť, zvýši sa húževnatosť, ťažnosť a kontrakcia. Obnovia sa i niektoré fyzikálne vlastnosti (predovšetkým elektrická vodivosť).

V technických kovoch prebieha rekryštalizácia v zložitých podmienkach. Uplatňuje sa napr. brzdiaci vplyv nečistôt na migráciu hraníc subzrn pri nuklácii a aj pri ich raste. Nehomogenita plastickej deformácie spôsobuje, že v rôznych miestach prebiehajú súčasne rôzne fázy odpevňovacích pochodov a vzájomne na seba pôsobia (napr. vzájomné obmedzovanie rastu stretávajúci sa nových zrn).

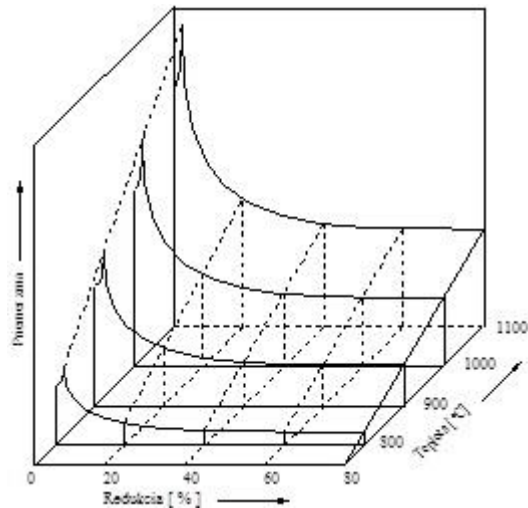
Hybnou silou odpevňovacích pochodov je uvoľňovanie uloženej deformačnej energie. Ich uskutočnenie je spojené s pohybom mriežkových porúch a vyžaduje tepelnú aktiváciu. Priebeh pochodov bude závisieť najmä od:

- veľkosti a rovnomernosti rozdelenia uloženej energie,
- teploty a času žihania,
- prekážok, ktoré brzdia čiastkové pochody.

Uložená deformačná energia je pre ten istý kov a spôsob i podmienky deformácie priamo závislá od veľkosti deformácie. Vo viac deformovanom kove prebehnú odpevňovacie pochody buď za rovnaký čas pri nižšej teplote, alebo pri rovnakej teplote za kratší čas (stačí menšia tepelná aktivácia) (obr. 2.33). Väčšia deformácia kovu vedie vzhľadom na rovnomernejšie rozloženie uloženej energie k vzniku väčšieho počtu zárodkov pri rekryštalizácii, a tým k jemnému rekryštalizovanému zrnú. Odlišný mechanizmus rekryštalizácie po malých deformáciách 5 až 10 % má za následok naopak zrno značne hrubšie ako východiskové. Vzhľadom na menšiu pevnosť a húževnatosť hrubozrnných štruktúr sa preto pri výrobkoch, ktoré budú zahriate na rekryštalizačnú teplotu, uvedenej tzv. *kritickej deformácii* vyhýbame.

Jednou z praktických charakteristík rekryštalizačného správania sa kovov je *rekryštalizačná teplota* T_R (najnižšia teplota, pri ktorej v deformačne spevnenom kove ešte dôjde k rekryštalizácii - obvykle pri žíhaní 2 h). Údaje pre vybrané kovy spolu s vplyvom prímies sú v tab. 2.5. Podľa vzťahu tvárniacej a rekryštalizačnej teploty sa posudzuje aj druh tvárnenia. Tvárnenie pod T_R , ktoré vedie k deformačnému spevneniu, je tvárnením za studena. Pri tvárnení nad T_R prebiehajú v kove súčasne spevňovacie aj odpevňovacie pochody, ktorými sa spevnenie čiastočne alebo úplne (nad $0,7 T_T$) odstraňuje. Hovoríme o *tvárnení za tepla* a odpevňovacie pochody

označujeme ako dynamické. Hovoríme potom o *dynamickom zotavení* a *dynamickej rekryštalizácii*. Ak z dynamicky vytvorených zárodkov rastú nové zrnú až po ukončení deformácie, ide o *metadynamickú* či *postdynamickú rekryštalizáciu*. Podstata dynamických pochodov sa nelíši od statických, rozdielna je však ich kinetika [33].



Obr. 2.33. Vplyv plastickej deformácie na teplotu rekryštalizácie nízkouhlíkovej ocele

Tab. 2.5

Základné rekryštalizačné teploty niektorých kovov

Kov	Technická čistota		Vysoká čistota (po zonálnom čistení)	
	T_R [K]	T_R/T_T	T_R [K]	T_R/T_T
Sn	300	0.38	-	-
Al+0.5Mg	473	0.50	233	0.24
Cu	453	0.33	353	0.26
Ni	873	0.50	573	0.33
Fe	753	0.41	573	0.31
W	1373	0.38	-	-

T_R – rekryštalizačná teplota, T_T – teplota topenia

2.8 Charakteristika hlavných materiálových skupín

V časti 2.1 boli vymedzené štyri skupiny konštrukčných materiálov. Vybraní predstavitelia prvých troch skupín - kovových materiálov, keramických materiálov a plastov - sú uvedení v tab. 2.6 spolu s orientačnými údajmi o cene a vybraných vlastnostiach [6]. Charakteristické rysy základných skupín konštrukčných materiálov sú nasledovné:

Tab. 2.6

Vybrané materiály a ich vlastnosti [6]

Materiál	Cena (r.1995) USD/kg	Hustota [Mg.m ⁻³]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Pevnosť v ohybe [MPa]	Lomová húževnatosť [MPam ^{1/2}]	Tepelná vodivosť [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Nízkouhl. oceľ	0,22	7,8	400		140	60
Nízkoleg. oceľ	0,30	7,8	400-2000		50-170	40
Liatina	1,60	7,8	100-700		6-20	50-80
Mosadz	0,16	7,4	350		30-100	120
Dural	1,43	8,4	300-600		10-50	180
Ti-Al6-V4	7,51	2,8	1000		50-80	6
Porcelán	0,4-1,4	2,3-2,5		45	1,0	1
Diamant	600000	3,5		-	-	70
Karbid kremíka	25-50	3,3		200-700	4,5	84
Nitrid kremíka	30-60	3,2		400-800	4	17
ZrO ₂ (PSZ)	20-40	5,8		1500	10	1,7
Polyetylén	0,78	0,92	7-17		1-2	0,35
Polystyrén	0,91	1,1	35-68		2	0,1
Polyvinylchlorid	0,60	1,4	40-60		2,4	0,15
Polyamid	3,30	1,15	60-110		3-5	0,25
Epoxidové živice	1,60	1,2-1,4	40-85		0,6-1,0	0,2-0,5
Polyizoprén	0,85	0,91	10		-	0,15

Kovové materiály (kap. 3 - 5) predstavujú kovy a ich zliatiny. Kovy sú chemické prvky, ktoré majú v kryštalickom stave častice viazané kovovou väzbou. Zliatiny sú viaczložkové sústavy na báze kovov, ktoré môžu

obsahovať aj nekovové prísady. Z hľadiska ich vlastností možno kovové materiály charakterizovať ako materiály s veľmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivosťou, vysokými pevnostnými vlastnosťami, dobrými plastickými vlastnosťami aj pri nízkych teplotách a väčšinou s veľmi nízkou chemickou (koróznou) odolnosťou.

Keramické materiály (kap. 6) sú polykryštalické materiály na báze anorganických zlúčenín nekovového charakteru, v ktorých sú častice viazané iónovou alebo kovalentnou väzbou. Majú zlú tepelnú a elektrickú vodivosť, nízku hustotu, vysokú tvrdosť, dobrú pevnosť v ohybe, nie sú plasticky tváriteľné, chemicky sú veľmi stábe, tavia sa pri vysokých teplotách.

Plasty (kap. 7) sú materiály na báze makromolekulárnych látok. Sú zlé tepelné a elektrické vodiče, sú veľmi ľahké, pri nízkych teplotách sú krehké, ale pri zvýšených teplotách plasticky tváriteľné, chemicky pri teplotách okolia a na vzduchu stábe a tavia sa (alebo rozkladajú) pri relatívne nízkych teplotách.

Kompozity (kap. 8) sú materiály, ktoré vznikli fyzikálnym spojením dvoch (alebo viacerých) materiálov z predchádzajúcich skupín. Sú charakteristické niektorými vlastnosťami materiálov, ktorých kombináciou vznikli. Zvyčajne ide o kombináciu vlastností, ktoré nie je možné dosiahnuť použitím jednoduchého materiálu, napr. veľmi vysoká pevnosť a súčasne vysoká húževnatosť.