



**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA**

**FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO
INŽENÝRSTVÍ**

STUDIJNÍ OPORA

Název opory/předmětu: Technické materiály

Číslo předmětu: 636-0811

Autor: prof. Dr. Ing. Jaroslav Sojka

červenec 2013

Předmluva

Studijní opora k předmětu *Technické materiály* je určena především studentům kombinované formy studia. V kombinované formě studia je mnohem menší podíl přímé kontaktní výuky, což činí toto studium pro studenty mnohem obtížnějším. Studijní opora k předmětu *Technické materiály* je pomocníkem, který má tento handicap alespoň jistým způsobem eliminovat. Nejedná se tedy o nová skripta, těch existuje dost. Studijní opora je určitou náhradou, je-li to možné, za chybějící přímou výuku a mezičlánkem k následnému studiu vlastní odborné literatury, ať již to budou skripta nebo jiné publikace.

Při psaní studijní opory jsem se snažil o co největší srozumitelnost textu. Té není možné dosáhnout, alespoň podle mého názoru, bez určitých zjednodušení, omezení a někdy i nepřesností. Pokud by někomu připadalo, že zjednodušení je příliš mnoho, předem se omlouvám. Ale moje pedagogické zkušenosti z výuky tohoto předmětu mě přivedly k výsledku, kterým je právě tento text.

I přes pečlivou kontrolu textu je téměř jisté, že jsem se v něm nevyhnul chybám, překlepům apod., možná i chybám věcným. Budu vám vděčný, když mě na ně upozorníte, abych je mohl postupně opravit. Upozornit mě můžete buď přímo, během výuky, nebo mailem na adresu: jaroslav.sojka@vsb.cz.

Přeji vám všem, kdo budete studijní oporu využívat, hodně sil ke studiu!

Autor

Průvodce studiem

Studijní opora je rozdělena do sedmi velkých celků – kapitol. Většina z nich se dělí na menší celky – podkapitoly. U každé podkapitoly je uveden orientační čas ke studiu. Ten je jen hrubým vodítkem, jak dlouho by vám mohlo zvládnutí daného celku trvat. Neberte tedy tento údaj jako něco jednoznačně daného a do studia se klidně pusťte, i když máte času méně.

Jak byste mohli se studijní oporou pracovat?

Základním učebním celkem jsou **podkapitoly** číslované např. 2.1, 2.2, 3.1 atd.

- Zkuste si podkapitolu celou přečíst.
- Většinu obrázků, zejména schémata a diagramy, si zkuste sami od ruky nakreslit.
- Jsou-li v podkapitole **řešené příklady**, vyřešte je tak, že je přepíšete a výpočty provedete sami.
- Pak se podívejte na **shrnutí pojmů** a zkuste si zodpovědět, zda vám tyto pojmy něco říkají.
- Orientačně se můžete podívat na **otázky** a pokuste se formulovat odpovědi alespoň na některé z nich.

Pokud vám to všechno napoprvé půjde, bude to vynikající, ale spíše to nepředpokládáme.

Tak se pusťte do četby znovu, dělejte si poznámky u toho, co považujete za podstatné. Znovu si nakreslete obrázky, schémata apod. Znovu si přečtěte shrnutí pojmů a zkuste je popsat vlastními slovy. Pak se můžete pustit do odpovědí na otázky. Otázky jsou formulovány jednoduše, tak abyste odpověď našli v textu. Odpovídejte stručně **písemně!!!** Odpovědi na otázky jsou v **Klíči**, který je vždy na konci velkých kapitol. Odpovědi v Klíči srovnajte se svými odpověďmi. Odpovědi v Klíči a vaše odpovědi se nemusí přesně shodovat, ale měly by mít stejný význam.

Pak můžete přistoupit k Úlohám k řešení (jsou-li nějaké uvedeny).

Budete-li mít problémy, s nimiž si nebudete vědět rady, obraťte se mailem, nebo přímo apod. na pedagogy, jejichž jména se dozvíte na úvodní přednášce. Vždy se můžete obracet na garanta předmětu, kterým je prof. Jaroslav Sojka, e-mail: jaroslav.sojka@vsb.cz, tel. č. 596994245.

V rámci předmětu budete zpracovávat semestrální program. Podrobné pokyny k jeho zpracování, rozsahu aj. dostanete během kontaktní výuky, velmi pravděpodobně na 2. přednášce spolu s doporučením, z jakých literárních pramenů by bylo vhodné vycházet apod.

OBSAH:

- 1. Úvod**
- 2. Mechanické vlastnosti materiálů a základní mechanismy jejich porušení**
 - 2.1. Základní mechanické vlastnosti
 - 2.2. Základní mechanismy porušení materiálů
 - 2.3. Chování materiálů s vadami; růst vad v materiálech
 - 2.4. Faktor intenzity napětí
- 3. Mechanismy zpevnění kovových materiálů**
 - 3.1. Zpevnění plastickou deformací
 - 3.2. Zpevnění hranicemi zrn
 - 3.3. Zpevnění precipitační
 - 3.4. Zpevnění tuhého roztoku
- 4. Kovové materiály**
 - 4.1. Vlastnosti kovových materiálů
 - 4.2. Slitiny železa – oceli
 - 4.3. Slitiny neželezných kovů
- 5. Polymery**
 - 5.1. Úvod, základní pojmy, proces polymerace, dělení polymerů
 - 5.2. Z historie polymerů
 - 5.3. Vnitřní stavba polymerů
 - 5.4. Vlastnosti polymerů
 - 5.5. Charakteristiky hlavních skupin polymerů
- 6. Keramické materiály**
 - 6.1. Struktura a vlastnosti keramických materiálů
 - 6.2. Sklo a skelné materiály
- 7. Kompozitní materiály**
 - 7.1. Základní charakteristiky kompozitních materiálů
 - 7.2. Částicové kompozity
 - 7.3. Vlákenné kompozity

1. ÚVOD



Čas ke studiu: neuvádím – kapitola má jen seznamovací charakter



Cíl Po prostudování této kapitoly byste mohli:

- dostat chuť pustit se do podrobného studia všech dalších kapitol.



Výklad – inu, v pravém slova smyslu se o výklad nejedná, ale snad mně to prominete.

Předmět Technické materiály je zařazen do studijního plánu studijních oborů ve studijním programu navazujícího magisterského studia ***Metalurgické inženýrství***. Přestože je vaší specializací metalurgie a příbuzné oblasti, máme zato, že byste měli být schopni orientovat se nejen v různých druzích kovových materiálů, ale i v dalších technicky významných skupinách materiálů, jimiž jsou polymerní materiály, keramické materiály, a to zejména *konstrukční* keramika, a konečně i kompozitní materiály. V předmětu bude kladen důraz zejména na vztah mezi užitnými vlastnostmi materiálů a jejich vnitřní stavbou – strukturou – na různých úrovních měřítka.

V předmětu budeme tedy po obecněji zaměřených kapitolách věnovat pozornost materiálům kovovým, polymerním, keramickým a kompozitním.

Při použití technických materiálů jsou v praxi nejdůležitější jejich užitné vlastnosti, a mezi ni jsou nejvýznamnější vlastnosti mechanické. Platí ale, že téměř veškeré užitné vlastnosti, mechanické nevyjímaje, velmi úzce souvisí se strukturou materiálu a změnou struktury, resp. jejím řízeným ovládním lze užitné vlastnosti materiálů měnit. A to je žádoucí a velmi cenné. Proto budeme na vnitřní stavbu materiálů klást poměrně velký důraz. S vlastnostmi různých materiálů se můžete podrobně seznámit, až s nimi budete pracovat. Ale tu souvislost s vnitřní stavbou už budete později, v zaměstnání, hledat jen obtížně a přitom je to souvislost klíčová.

Předmět Technické materiály navazuje na předměty, které jste absolvovali v průběhu bakalářského studia, a to zejména na předměty: Základy progresivních konstrukčních materiálů (nový název Úvod do studia materiálů) a Nauka o materiálech. Na ty pasáže, které byste si měli osvěžit, vás budu v textu upozorňovat. Nejdůležitější oblasti v některých případech stručně vysvětlím znovu. Víte, že se říká: Opakování je matkou moudrosti.

Na úvod byste si měli zopakovat zejména:

- Vazby mezi atomy, tzn. vazby silné – kovalentní, iontovou, kovovou – a také vazby slabé (molekulární).
- Dále byste si měli zopakovat poruchy krystalové mřížky, zejména dislokace. Dislokace jsou úžasné poruchy, s nimiž je spojena celá řada často velmi užitečných vlastností materiálů kovových, ale i jiných, a budeme se s nimi setkávat poměrně často.
- A konečně byste si měli zopakovat metastabilní binární diagram soustavy železo – uhlík.

2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ MECHANISMY JEJICH PORUŠENÍ

2.1. Základní mechanické vlastnosti



Čas ke studiu: 2,5 hodiny



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- definovat základní mechanické vlastnosti materiálů;
- popsat provedení tahové zkoušky;
- charakterizovat veličiny získané tahovou zkouškou a jejich význam;
- popsat provedení zkoušky rázem v ohybu;
- charakterizovat veličiny, které se získají při zkoušce rázem v ohybu;
- popsat a vysvětlit závislost houževnatosti kovových materiálů na teplotě;
- charakterizovat tzv. tranzitní teplotu křehkosti a způsob jejího stanovení.



Výklad

V řadě předmětů jsme si říkali, že pro použití určitého materiálu v konstrukci, v nějakém větším celku jsou velmi důležité tzv. **užitné vlastnosti**, které představují soubor všech vlastností, které daný materiál musí splňovat za provozu po celou dobu životnosti, aby v konstrukci, nebo onom větším celku plnil dobře svou funkci, aby kvůli němu nedošlo k poruše, nebo např. k nežádoucímu snížení životnosti. Mezi užitné vlastnosti lze zařadit několik skupin vlastností, např. vlastnosti fyzikální, chemické apod. Pro většinu materiálů, alespoň z hlediska hmotnosti výroby, jsou nejdůležitější vlastnosti mechanické, které patří do skupiny vlastností fyzikálních. pro svou mimořádnou důležitost se však mechanické vlastnosti velice často vyčleňují zvlášť a uvádějí se jako samostatná skupina vlastností.

A které mechanické vlastnosti jsou těmi nejdůležitějšími? Určitě si vzpomenete. Jsou to:

- pevnost materiálů;
- houževnatost materiálů.

Pevnost materiálů jsme zjednodušeně definovali jako maximální napětí, které materiál může přenášet, aniž by v něm došlo k porušení, nebo ke vzniku defektů, např. trhlin. Pevnost materiálů se zjišťuje nejčastěji tahovou zkouškou (jinak řečeno zkouškou tahem), o níž se

stručně zmíníme dále. To proto, že tahovou zkouškou se nezjistí jen pevnost materiálu, ale i další velmi důležité charakteristiky.

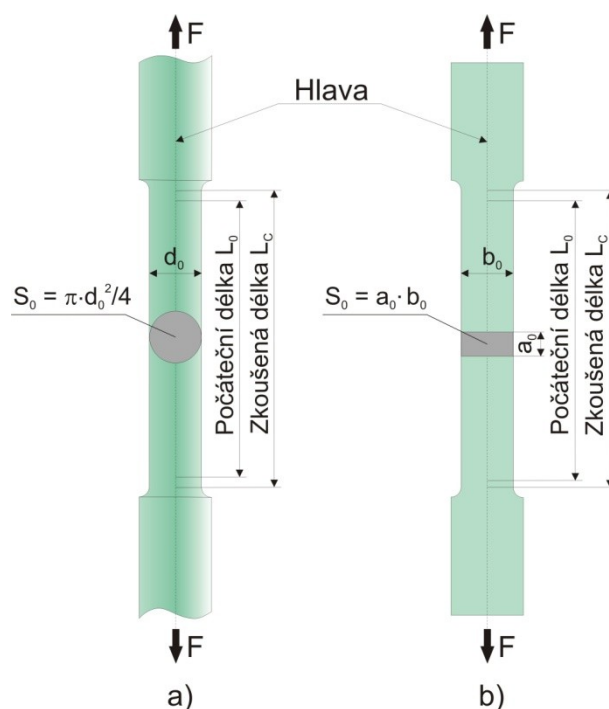
Houževnatost materiálu jsme zjednodušeně definovali jako energii nutnou na porušení materiálu. Někdy je houževnatost materiálu charakterizována jako odpor materiálu proti iniciaci a šíření defektů, zejména trhlin. Houževnatost se u kovových materiálů většinou stanovuje tzv. zkouškou rázem v ohybu (viz dále).

□ Zkouška tahem

Zkouška tahem patří k základním mechanickým zkouškám. Jedná se o statickou zkoušku, při které se zkušební těleso zatěžováním ve zkušebním stroji zatěžuje tahovou silou předepsanou rychlostí, zpravidla až do porušení (přetržení). Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly F (N) na absolutním prodloužení ΔL (mm). Této závislosti se říká **tahový nebo pracovní diagram**. Zkouší se obvykle při určité rychlosti zatěžování (pohybu příčnicku) za teploty 20°C, ale podle požadavků i za teplot vyšších i nižších.

Jak vypadá **zkušební těleso** pro tahovou zkoušku? Je to tyč nejčastěji kruhového nebo obdélníkového průřezu, na které je vyznačena tzv. **počáteční měřená délka** L_0 (obr. 2.1). Zkušební tyče mohou být buď hladké, tzn., že jejich průřez je po celé délce stejný, nebo mohou být opatřeny hlavami, tj. rozšířeným konci tyče, které se upínají do zkušebního stroje. *Pozn. Celková délka hladké tyče zahrnuje také části, které jsou potřebné pro upnutí do zkušebního stroje.*

Počáteční měřená délka L_0 se u plochých tyčí obdélníkového průřezu stanovuje buď jako absolutní délka (50, 80 nebo 100 mm), nebo jako poměr mezi L_0 a počátečním průřezem S_0 ($L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$ pro „krátkou“ tyč., $L_0 = 11,3\sqrt{S_0}$ pro „dlouhou“ tyč). U tyčí válcového průřezu se L_0 stanovuje jako pětinašobek nebo desetinásobek průměru zkušební tyče



Obr. 2.1. Příklady zkušebních tyčí pro zkoušku tahem
a) tyč kruhového průřezu, b) plochá tyč obdélníkového průřezu.

Účinkem zatěžující síly F (N) se zkušební tyč prodlužuje a mění se tedy počáteční měřená délka L_0 na L_1 o úsek ΔL , tzv. absolutní prodloužení, a současně se zmenšuje původní průřez S_0 na okamžitý S' . V tahové tyči vzniká tahové napětí σ (rov. 2.1).

$$\sigma = \frac{F}{S'}, \quad \text{rov. 2.1}$$

které je označováno jako **skutečné napětí**. V praxi je zjišťování okamžitých průřezů obtížné a proto se zatěžující síla vztahuje k počátečnímu průřezu S_0 . Výsledné napětí

$$\sigma = R = \frac{F}{S_0} \quad \text{rov. 2.2}$$

je označováno jako **smluvní napětí** R . Napětí se udává v jednotkách MPa (megapascal); přičemž $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$.

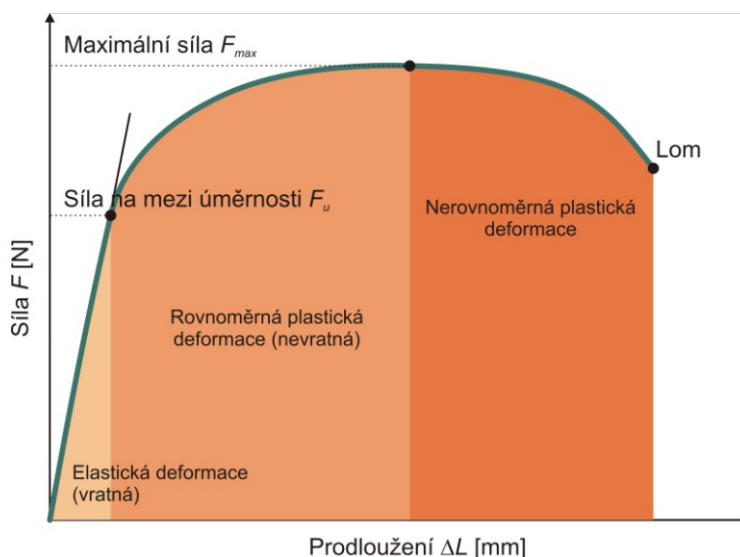
Jak už jsme si uvedli, výsledkem tahové zkoušky je pracovní (tahový) diagram (obr. 2.2 – platí pro houževnatý kovový materiál). Pracovní diagram můžeme rozdělit na několik oblastí. První tvoří **oblast elastické (pružné, vratné) deformace**. Zkušební tyč se v tomto úseku

prodlužuje přímo úměrně se vzrůstající silou zatěžování. Pokud bychom v tomto úseku tyč odlehčili, vrátí se na svou původní délku. Vztah mezi napětím a poměrným prodloužením ε ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) vyjadřuje vztah

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad \text{rov. 2.3}$$

který označujeme jako **Hookův zákon** pro jednoosý tah. Důležitá pro nás je konstanta E , což je **modul pružnosti v tahu** (jednotka nejčastěji GPa – gigapascal). Jedná se o materiálovou konstantu.

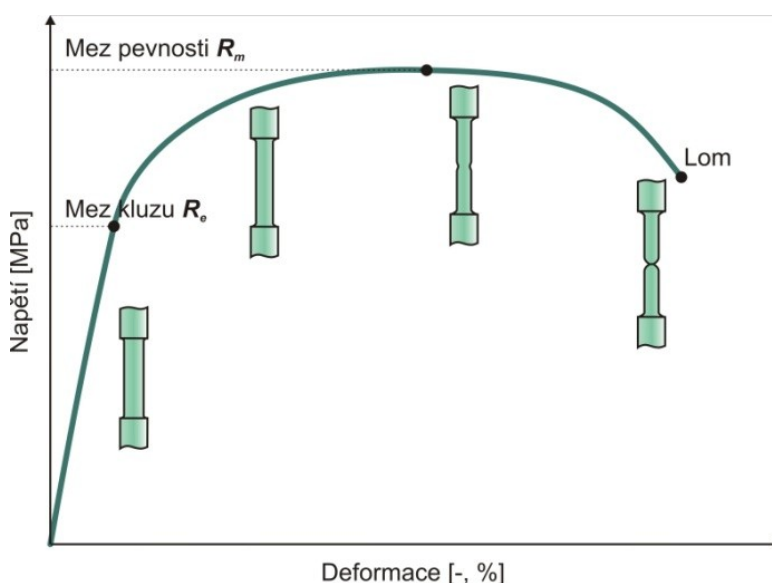
Pozn. Poměrné prodloužení ε vyjadřuje změnu délky $\Delta L = L_1 - L_0$ vztaženou k počáteční délce zkušební tyče L_0 .



Obr. 2.2. Pracovní (tahový) diagram F - ΔL .

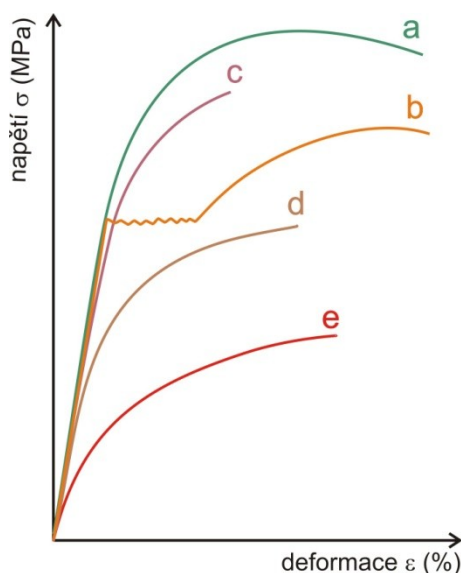
Druhou oblast tvoří **oblast rovnoměrné plastické deformace**. Dislokace se po překročení určitého napětí (tzv. meze kluzu – viz dále) začnou v houževnatém kovovém materiálu pohybovat, dochází také ke vzniku nových dislokací a materiál se začíná trvale (plasticky) deformovat. Dochází zde k odklonu od přímkové závislosti napětí na poměrném prodloužení a přírůstek napětí na poměrném prodloužení (deformaci) klesá postupně až k nule. Až do tohoto okamžiku se měřená část zkušební tyče deformuje rovnoměrně, tzn. zužuje se stejnoměrně po celé délce.

Třetí stádium tvoří **oblast nerovnoměrné plastické deformace**. Dochází zde k poklesu smluvního napětí a na tahové zkušební tyči se začíná vytvářet defekt – materiál se buď zcela nebo částečně poruší a často se vytvoří místní zúžení (zaškrcení), tzv. krček. Toto stádium končí přetržením zkušební tyče. Na obr. 2.3 je patrné, jak během zatěžování dochází k deformaci tahové zkušební tyče.



Obr. 2.3. Deformace tahové zkušební tyče během zatěžování.

Pro vyhodnocení základních pevnostních charakteristik se pracovní diagram $F-\Delta L$ přepočítává na diagram $R-\varepsilon$ (smluvní napětí-poměrné prodloužení). Při výpočtu napětí se budou změřené síly vztahovat vždy k ploše původního průřezu S_0 . Diagramy $R-\varepsilon$ se pro různé materiály liší jak v pevnostních charakteristikách, tak v deformačních hodnotách (obr. 2.4).

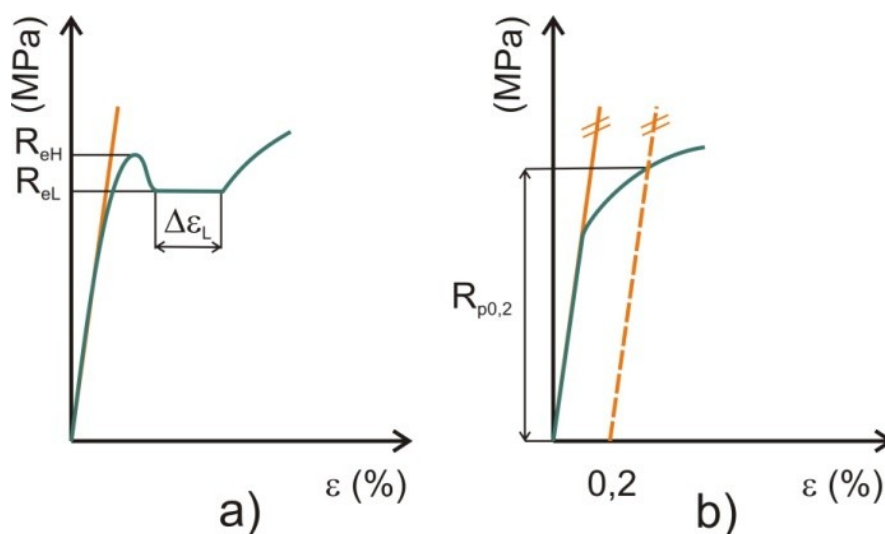


Obr. 2.4. Schematické porovnání tahových diagramů různých kovových materiálů
 a) oceli bez výrazné meze kluzu, b) oceli s výraznou mezí kluzu, c) tvárné litiny,
 d) šedé litiny, e) slitiny hliníku.

Které charakteristiky tedy můžeme z tahové zkoušky a pracovního diagramu odečíst? Základní charakteristiky, které získáme při zkoušce tahem, jsou:

- mez kluzu;
- mez pevnosti;
- tažnost;
- kontrakce (zúžení).

Mez kluzu můžeme zjednodušeně definovat jako maximální napětí, do něhož se materiál deformuje elasticky, tedy vratně. U kovových materiálů platí, že do meze kluzu nedochází k pohybu dislokací. Mez kluzu je smluvní napětí a může být buď výrazná, nebo nevýrazná, a odpovídá síle na mezi kluzu F_e (N). V tahovém diagramu je to místo (obr. 2.5), kde dochází k zastavení nebo dokonce poklesu zatěžující síly při postupující trvalé deformaci. Výraznou mez kluzu označujeme jako horní mez kluzu R_{eH} nebo dolní mez kluzu R_{eL} (obr. 2.5a). Nevýraznou mez kluzu stanovujeme pro určitou plastickou (trvalou) deformaci (např. pro $\varepsilon = 0,2 \%$). Označujeme ji jako smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (obr. 2.6b).



Obr. 2.5. Stanovení meze kluzu z tahových diagramů

a) výrazná mez kluzu horní R_{eH} nebo dolní R_{eL} , b) nevýrazná smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$

Mez kluzu se vypočte jako podíl příslušné zatěžující síly a počáteční plochy příčného průřezu. Např. pro výpočet dolní meze kluzu lze psát:

$$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} \quad \text{rov. 2.4}$$

Mez pevnosti je také smluvní napětí a odpovídá maximálnímu zatížení při tahové zkoušce (obr. 2.3). Označujeme ji jako R_m .

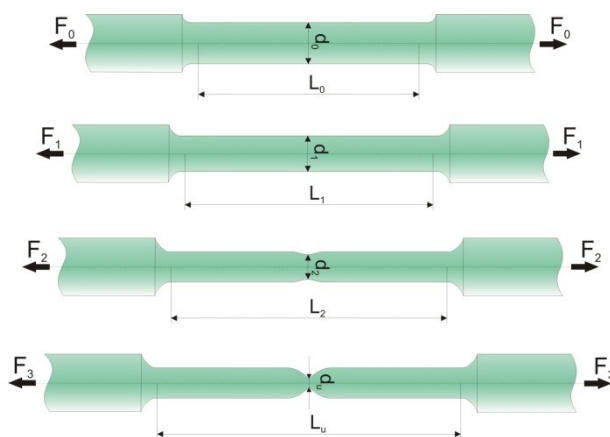
$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad \text{rov. 2.5}$$

Jak už jsme uvedli, mez pevnosti lze definovat jako maximální napětí, při jehož působení ještě v materiálu nevznikají defekty a nedochází k rozvoji porušení.

Tažnost je maximální poměrné plastické (trvalé) prodloužení ε_p vyjádřené v %. Označuje se A , a dále podle velikosti počáteční měřené délky, např. A_5 (pro „krátkou“ zkušební tyč), A_{10} (pro „dlouhou“ zkušební tyč), A_{50} ($L_0 = 50$ mm), atd. Tažnost se vypočítá podle vztahu (rov. 2.6)

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad \text{rov. 2.6}$$

kde L_0 je původní měřená délka, kterou jsme si na zkušební tyči vyznačili a L_u je délka měřeného úseku po přetržení, kterou zjistíme tak, že obě části zkušební tyče přiložíme k sobě a změříme původně vyznačenou délku L_0 . Jak se mění tvar a rozměry zkušební tyče až do stádia přetržení můžeme vidět na obr. 2.6. Pro různé původní měřené délky získáme odlišné hodnoty tažnosti (např. $A_{10} < A_5$) a výsledné hodnoty nelze převádět.



Obr. 2.6. Změna rozměrů zkušební tyče při zatěžování až do lomu.

Kontrakce neboli zúžení vyjadřuje maximální poměrné zúžení po přetržení zkušební tyče v %. Vztah pro výpočet je uveden níže (rov. 2.7):

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100, \quad \text{rov. 2.7}$$

kde S_0 je původní průřez tyče v mm^2 a S_u je minimální průřez tyče v místě po přetržení v mm^2 .

Pozn. Počáteční plocha tyče kruhové průřezu S_0 vypočítáme jako plochu kruhu, tedy

$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$. Obdobně plocha tyče kruhové průřezu po přetržení S_u se vypočítá podle vztahu

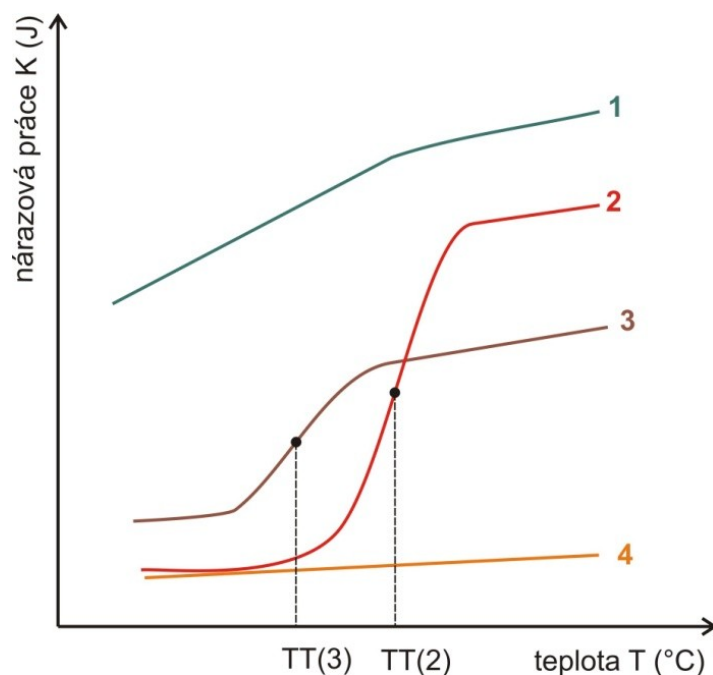
$S_u = \frac{\pi d_u^2}{4}$.

Mez kluzu a mez pevnosti mají tedy charakter napětí, tažnost a kontrakce jsou veličiny bezrozměrné, resp. se uvádějí v procentech. Všechny čtyři veličiny získané tahovou zkouškou jsou velmi důležité. Pokud jde o srovnání důležitosti meze kluzu a meze pevnosti, platí pro kovové materiály, že mez kluzu je přece jen o něco důležitější. Proč? Je tomu proto, že za provozu mohou být kovové materiály zatěžovány pouze napětím, které je nižší než mez kluzu, tj. v oblasti elastické deformace. Plastická deformace není za provozu povolena. Důvodů je celá řada, ale nám budou stačit jen dva nejdůležitější. Plastická deformace není ani při konstantním zatěžujícím napětí v čase stálá, ale postupně s časem narůstá. A to je nepřijatelné. Představte si např., že průhyb ocelového stropu by se s časem zvětšoval. To by mohlo mít celou řadu neblahých následků, jako praskání omítky, apod. Druhým důvodem je fakt, že dislokace sice hodnotíme jako poruchy spíše užitečné, ale nic neplatí absolutně. Dislokace vzniklé při plastické deformaci, resp. nahromadění dislokací, mohou vytvářet zárodky defektů, a to dokonce i trhlin, které mohou vyvolat porušení materiálu. A toho se všichni bojí. Mez kluzu tedy představuje to napětí, podle něhož se konstrukce dimenzují, tzn. určují se jejich rozměry. Tažnost a kontrakce jsou také velmi důležité. Poskytují nám totiž jistou informaci o houževnatosti materiálu, byť zjištěné při statické zkoušce. Zjednodušeně platí, že čím je tažnost a kontrakce vyšší, tím je materiál houževnatější.

□ Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu patří mezi dynamické zkoušky a je základní zkouškou pro stanovení houževnatosti u kovových materiálů. Stanovení houževnatosti kovových materiálů je mimořádně důležité. Víte, že protikladem houževnatosti je křehkost. A jestli se u technických (konstrukčních) materiálů něčeho obáváme, pak je to právě křehkost materiálů, nebo přesněji jejich křehké porušení. Křehké porušení může totiž znamenat náhlé havárie konstrukcí, např. mostů, tlakových nádob apod. se všemi negativními důsledky. Je velmi důležité, že houževnatost materiálů závisí velmi významně na teplotě a obecně houževnatost klesá s klesající teplotou. Tento pokles houževnatosti s klesající teplotou je však významně závislý

na typu krystalové mřížky. U kovů s mřížkou kubickou plošně centrovanou (označovali jsme zkratkou fcc – z angličtiny – face centered cubic) je pokles houževnatosti při klesající teplotě jen mírný a materiály s touto krystalovou mřížkou zůstávají houževnaté i za nízkých teplot. Vyplyvá to z toho, že fcc mřížka má vyšší míru symetrie (koordinační číslo 12 – vzpomenete si?) a v důsledku toho je v této mřížce snadnější pohyb dislokací. Dislokace se mohou pohybovat i za nízkých teplot, kdy je energie vibračního pohybu atomů nízká. Naproti tomu u kovů s mřížkou bcc (body centered cubic) dochází při poklesu teploty k náhlému poklesu houževnatosti v určitém teplotním intervalu a materiál se za nízkých teplot chová výrazně křehce. Je tomu tak proto, že u materiálů s bcc mřížkou je pohyb dislokací obtížnější a napomáhá mu tepelná aktivace, tedy intenzivnější vibrační pohyb atomů. Za nízkých teplot, kdy je intenzita (přesněji amplituda) vibračního pohybu atomů jen nízká, je pohyb dislokací jen velmi obtížný, není tudíž možná plastická deformace a materiál se chová křehce. Kovový materiál s bcc mřížkou se tedy jen změnou teploty může chovat jako houževnatý – za „vyšších“ teplot, nebo jako křehký – za „nižších“ teplot. Srovnání houževnatosti, vyjádřené energií na porušení – tzv. nárazovou prací při zkoušce rázem v ohybu – je uvedeno pro různé druhy kovových materiálů na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Závislost nárazové práce na teplotě pro různé materiály
1 – s fcc mřížkou, 2, 3 – s bcc mřížkou, 4 – litiny.

Zkouška rázem v ohybu je založena na zjištění, kolik energie se při úderu spotřebuje na zlomení zkušební tyče ohybem. Nejčastěji se používá **zkouška rázem v ohybu podle Charpyho**. Podstatou zkoušky je přeražení zkušební tyče opatřené jednostranným vrubem

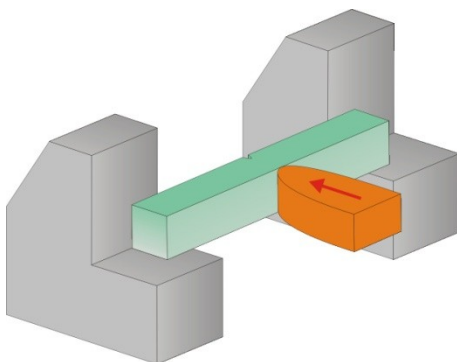
jedním rázem kyvadlového kladiva. Zkušební tyč je umístěna na opěrách, vrubem na opačné straně, než na kterou dopadá kladivo (obr. 2.8). Výsledkem zkoušky je zjištění **nárazové práce** K (J), která vyjadřuje energii spotřebovanou na deformaci tělesa a šíření lomu tělesem. Tuto zkoušku zavedl na počátku 20. století pan Georges Charpy. Jako standardní zkouška pro hodnocení houževnatosti se začala používat bohužel až po druhé světové válce. Bohužel je zde úmyslně. Pokud by se materiály testovaly již dříve, bylo by možné zabránit mnoha katastrofám, k nimž před zavedením testování došlo, mimo jiné i zkáze lodi Titanic.

Zkouška rázem v ohybu má dvě specifika.

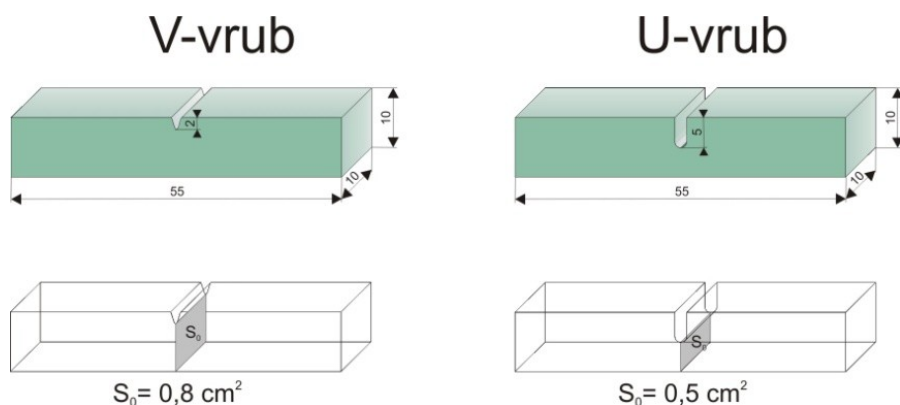
Prvním je, že se jedná o zkoušku rázovou, tzn. že zatížení působí rychle. To je důležité, protože houževnatost materiálů klesá s rostoucí rychlostí zatěžování. Čím rychleji působí zatěžující síla (a s ní související napětí), tím je materiál křehčí. Souvisí to s tím, že křehkost materiálů souvisí s jejich neschopností plastické deformace. Plastická deformace je totiž podmíněna pohybem dislokací a tento pohyb vyžaduje určitý čas....

Druhým specifikem je, že zkušební tělesa jsou opatřena tzv. vruby (viz dále). Vruby představují mj. koncentrátoři napětí, které jsou velmi často přítomny v reálných konstrukcích. Můžeme tedy říci, že zkouška rázem v ohybu bere v úvahu reálné situace při zatěžování konstrukcí, zejména vysokou rychlost zatěžování a přítomnost koncentrátorů napětí.

Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho jsou normovaná o velikosti 10 x 10 x 55 mm. Jsou opatřena V vrubem o hloubce 2 mm (úhel vrubu je 45°) nebo U vrubem o hloubce 5 mm (popř. 2 nebo 3 mm) – obr. 2.9. U vzorků s V vrubem mohou být zhotoveny zkušební tyče i menších rozměrů o šířce 7,5 nebo 5 mm (vrub je na užší ploše). Podle typu vrubu se nárazová práce označuje KV pro vzorky s V vrubem a KU pro vzorky s U vrubem.



Obr. 2.8. Umístění zkušební tyče na opěrách kyvadlového kladiva.



Obr. 2.9. Tvar a rozměry zkušebních tyčí s V-vrubem a s U-vrubem.

Nárazovou práci lze přepočítat na **vrubovou houževnatost** KC (ozn. KCV nebo KCU podle typu vrubu) podle rov 2.8:

$$KC = \frac{K}{S_0}, \quad \text{rov. 2.8}$$

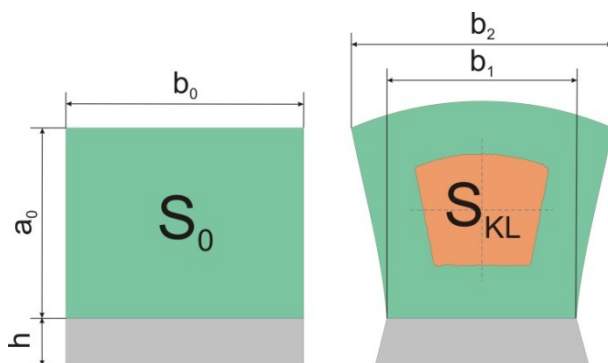
kde K je nárazová práce v J,
 S_0 je plocha pod vrubem v cm^2 .

Vrubová houževnatost KC se uvádí v jednotkách $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Při zkoušce rázem v ohybu se dále vyhodnocuje **podíl křehkého lomu** P_{KL} v % a deformační charakteristika Δb , tzv. **příčné rozšíření**.

Podíl křehkého lomu se určí z poměru plochy křehkého lomu S_{KL} a plochy pod vrubem S_0 (rov. 2.9) – obr. 2.10.

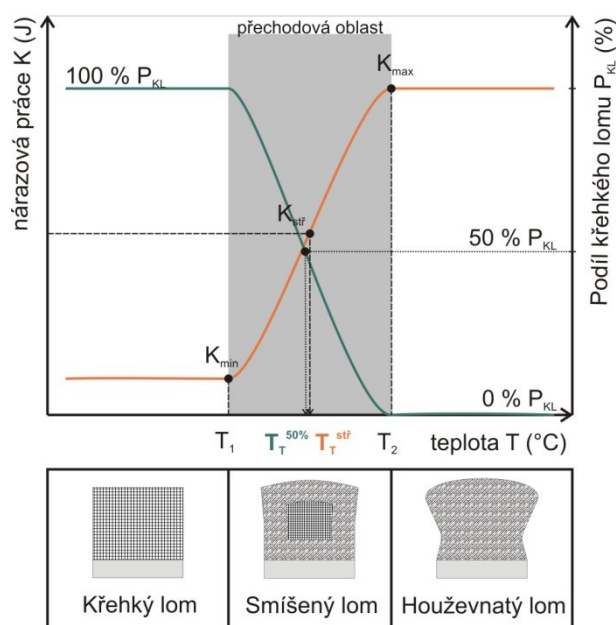
$$P_{KL} = \frac{S_{KL}}{S_0} \cdot 100. \quad \text{rov. 2.9}$$


 Obr. 2.10. Vyhodnocení podílu křehkého lomu P_{KL} .

□ Tranzitní teplota

Provede-li se zkouška rázem v ohybu u materiálu s mřížkou bcc při různých teplotách a výsledné hodnoty nárazové práce K nebo vrubové houževnatosti KCV se vynesou v závislosti na teplotě T do grafu, získáme tzv. **přechodovou křivku** (obr. 2.11). Z přechodové křivky se stanovují tranzitní teploty, které nám slouží k hodnocení odolnosti materiálu vůči křehkému porušení. **Tranzitní teplota** T_T se může stanovit z různých kritérií:

- pro jistou hodnotu vrubové houževnatosti, např. pro $KCV = 35 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ pro nízkouhlíkové svařitelné oceli,
- ze střední hodnoty vrubové houževnatosti $KCV_{stř.}$,
- pro 50 % podílu křehkého lomu P_{KL} .



Obr. 2.11. Přechodová křivka při zkoušce rázem v ohybu.

Přechodová teplota je u ocelí důležitým měřítkem schopnosti materiálu odolávat rázovému zatížení a schopnosti materiálu ke tváření za studena za dané teploty. Pro technickou praxi je důležité, aby konstrukční materiál byl zatěžován při teplotách nad **tranzitní (přechodovou) oblastí**. Tranzitní oblast je ovlivňována metalurgickými faktory, tepelným zpracováním, chemickým složením, velikostí zrna, svařováním, teplotou, rychlostí zatěžování atd. Je však stanovena pro konkrétní podmínky namáhání, kterých bylo použito při zkoušce a za jiných podmínek se materiál může chovat jinak.



Shrnutí pojmů 2.1.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Základní mechanické vlastnosti – pevnost, houževnatost;**
- **Základní charakteristiky získané při zkoušce tahem – mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce;**
- **Základní charakteristiky získané při zkoušce rázem v ohybu – nárazová práce, vrubová houževnatost;**
- **tranzitní teplota a způsoby jejího stanovení.**



Otázky 2.1.

1. Jaké jsou základní mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů?
2. Co vyjadřuje pevnost?
3. Které materiály vykazují vysokou pevnost?
4. Co je to houževnatost?
5. Co je výsledkem tahové zkoušky?
6. Do jakých oblastí můžeme rozdělit tahový diagram?
7. Který zákon platí v oblasti elastické (vratné) deformace?
8. Kterou materiálovou charakteristiku můžeme odečíst z oblasti elastické (vratné) deformace?
9. Jaký je rozdíl mezi smluvním a skutečným napětím? Které napětí je vyšší?
10. Které materiálové charakteristiky můžeme odečíst z pracovního (tahového) diagramu?
11. Co vyjadřuje mez pevnosti R_m ?
12. Co je to tažnost?
13. Co je to kontrakce?
14. Co je výsledkem zkoušky rázem v ohybu?
15. Co vyjadřuje vrubová houževnatost?
16. Jakou materiálovou charakteristiku získáme ze závislosti nárazové práce, resp. vrubové houževnatosti na teplotě?

2.2. Základní mechanismy porušení materiálů



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- popsat nejdůležitější mechanismy porušení materiálu;
- objasnit průběh houževnatého (tvárného) porušení;
- charakterizovat dva základní typy křehkého porušení.



Výklad

□ Rozdělení typů porušení materiálů a jejich průběh

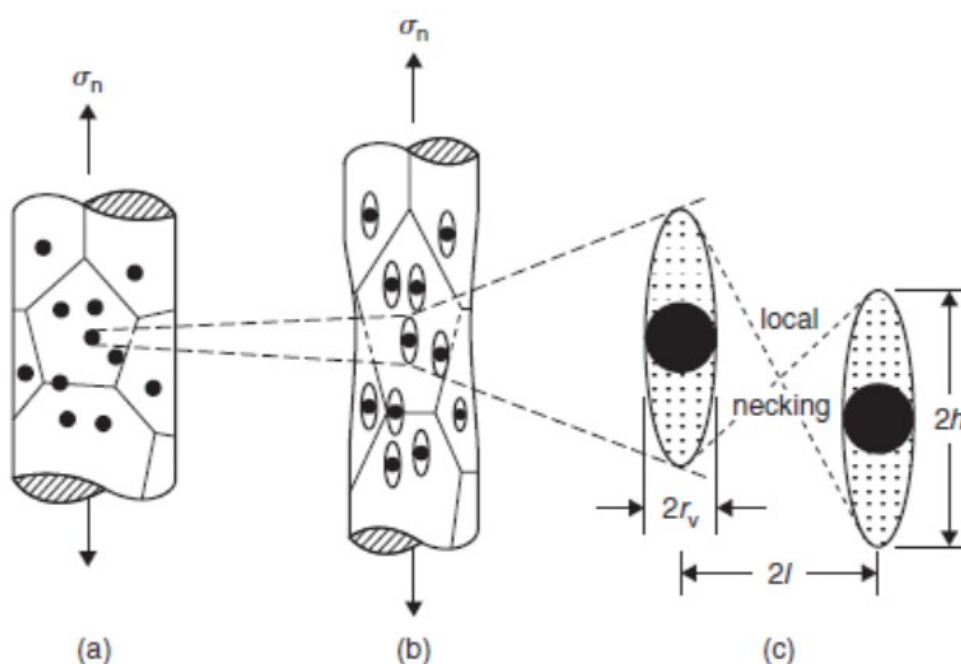
Jak vyplývá z kapitoly 2.1, základními typy porušení materiálů jsou porušení houževnaté (říká se mu také tvárné, protože je spojeno s plastickou deformací, tj. s tvářením), a jeho protikladem pak porušení křehké. Ve většině případů je žádoucí porušení houževnaté, zatímco porušení křehké je ten druh porušení, jehož se všichni konstruktéři (a tedy i výrobci konstrukčních materiálů) bojí. Na porušení můžeme nahlížet z energetického hlediska. Porušení houževnaté je tzv. porušení vysokoenergetické, kdy na porušení materiálu je třeba vysoké energie. Porušení křehké je naproti tomu tzv. porušení nízkoenergetické, kdy na porušení materiálu stačí jen nízká energie. V tom je tedy jeho hlavní nebezpečí.

Nyní si stručně popíšeme, jak tyto základní druhy porušení probíhají, a to na příkladech kovových materiálů.

Jak probíhá houževnaté porušení?

Průběh houževnatého porušení je schematicky znázorněn na obr. 2.12. Můžeme si představit, že provádíme tahovou zkoušku. V oblasti nerovnoměrné plastické deformace začínají v materiálu vznikat dutiny (někdy se jim říká také kavity). Tyto dutiny přednostně vznikají na rozhraní kovové matrice a „cizích“ částic, jimiž mohou být např. nekovové vměstky, nebo různé druhy minoritních fází – karbidy, nitridy, intermetalické fáze apod. Dutiny vzniknou tak, že dojde k oddělení povrchu částice od vlastní matrice a v daném místě začíná vznikat v důsledku schopnosti plastické deformace materiálu dutina (obr. 2.12 – a). Jak dále narůstá skutečné napětí v oblasti nerovnoměrné plastické deformace, dochází k růstu dutin ve směru

působícího napětí, tedy k jejich protahování – obr. 2.12 – b (opět v důsledku toho, že materiál je schopný plastické deformace). V případě, kdy vzniklé dutiny jsou blízko sebe a jsou odděleny jen úzkou oblastí kovové matrice (tzv. můstkem), může dojít k přetržení této úzké oblasti matrice a k následnému šíření „spojené“ větší dutiny. Této etapě rozvoje houževnatého porušení se říká koalescence dutin (obr. 2.12 – c). Při dalším zvyšování skutečného napětí dochází postupně k porušování zbývajících částí matrice (můstků) v oblasti krčku, což vyústí v konečný lom materiálu, který většinou probíhá z makroskopického pohledu v rovině kolmé na směr působícího napětí.

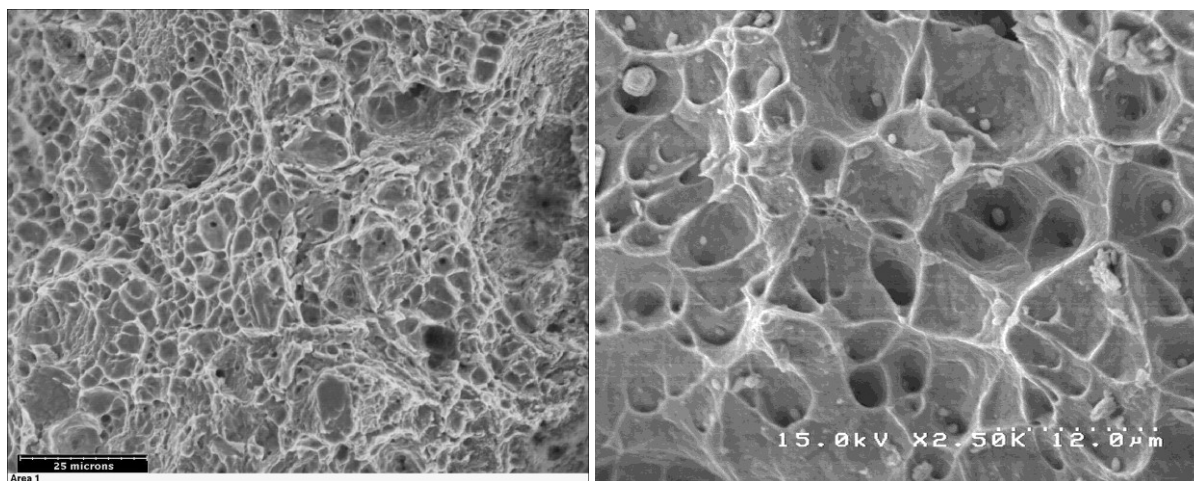


Obr. 2.12 Schematické znázornění počátečních etap houževnatého porušení

Jednotlivé etapy rozvoje tvárného porušení kovových materiálů lze tedy shrnout následovně:

- vznik dutin;
- růst dutin;
- koalescence dutin;
- konečný lom.

Houževnaté (tvárné) porušení kovových materiálů má charakteristický vzhled lomové plochy. Při dostatečně velkém zvětšení jsou na lomové ploše patrné oblasti tzv. jamek, které odpovídají jednotlivým dutinám. V některých případech mohou být v jamkách patrné i nekovové částice, na nichž dutiny vznikaly. Lomové plochy se nejčastěji zobrazují pomocí tzv. řádkovací elektronové mikroskopie. Příklady lomových ploch, které odpovídají tvárnému porušení s jamkovou morfologií, jsou uvedeny na obr. 2.13 a,b. Na obr. 2.13b jsou v řadě jamek pozorovatelné nekovové částice, na nichž dutiny vznikaly.



a)

b)

Obr. 2.13 Lomová plocha tvárného porušení s jamkovou morfologií (zobrazení řádkovací elektronovou mikroskopií)

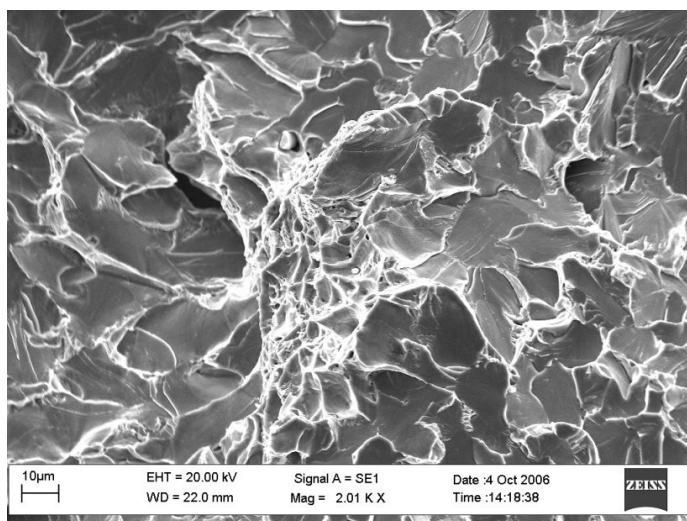
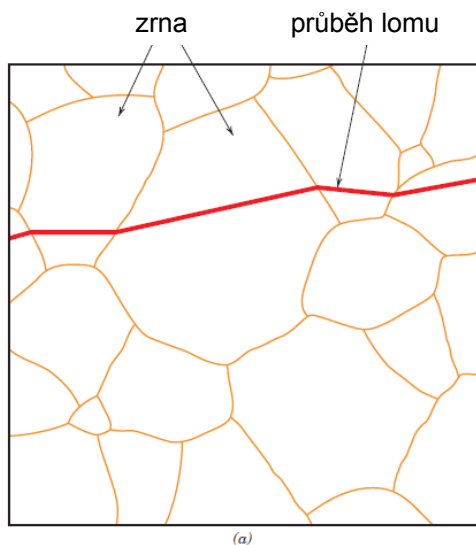
Jak probíhá křehké porušení?

Jak už jsme uvedli, křehké porušení je takové porušení, kdy energie potřebná k jeho vyvolání je nízká. Ke křehkému porušení dochází tehdy, není-li materiál schopen plastické deformace. U křehkého porušení se rozlišují dva základní typy, které se liší tím, kudy lom probíhá, zda po hranicích jednotlivých zrn (tomuto porušení se říká **interkrystalické křehké porušení**), nebo vnitřními částmi zrn – přes zrna (tomuto porušení se říká **transkrystalické křehké porušení**). U transkrystalického křehkého porušení se někdy používá také termínu **transkrystalické štěpné porušení**, protože materiál jakoby se štěpil podél určitých krystalografických rovin. Pro kovy s bcc mřížkou jsou rovinami křehkého štěpení roviny typu $\{001\}$.

Průběh transkrystalického štěpného porušení je schematicky znázorněn na obr. 2.14a, na obr. 2.14b je pak vzhled odpovídající lomové plochy zobrazený pomocí řádkovací elektronové mikroskopie.

Průběh interkrystalického křehkého porušení je schematicky znázorněn na obr. 2.15a, na obr. 2.15b je pak vzhled odpovídající lomové plochy opět zobrazený pomocí řádkovací elektronové mikroskopie.

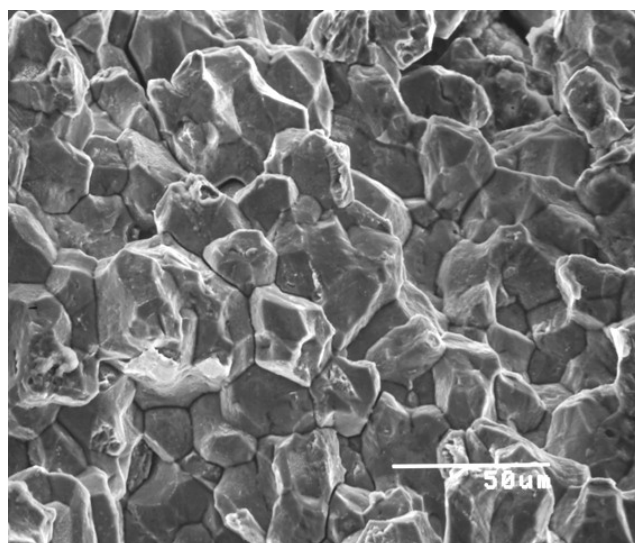
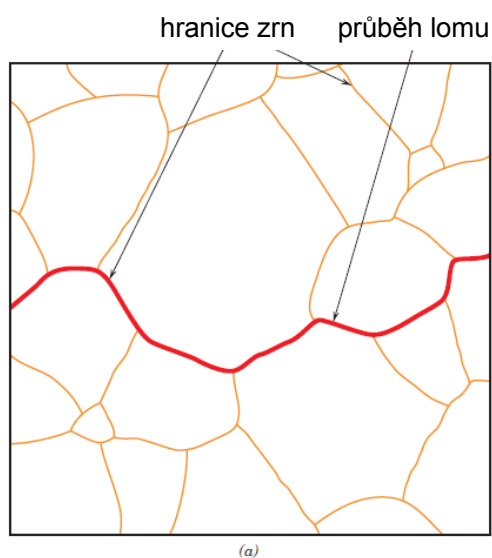
V případě, že u kovových materiálů dochází ke křehkému porušení, je častějším případem transkrystalické štěpné porušení. Interkrystalické křehké porušení nastává tehdy, jsou-li hranice zrn nějakým způsobem oslabeny. K tomu nejčastěji dochází např. v důsledku segregace škodlivých prvků (u ocelí např. v důsledku segregace fosforu a síry) na hranicích zrn.



a)

b)

2.14 Transkrystalické štěpné porušení a) schematický průběh; b) vzhled lomové plochy (řádovací elektronová mikroskopie)



a)

b)

2.15 Interkrystalické křehké porušení a) schematický průběh; b) vzhled lomové plochy (řádovací elektronová mikroskopie)



Shrnutí pojmů 2.2.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- Houževnaté (tvárné) porušení a jeho průběh;
- Interkrystalické křehké porušení;

➤ **Transkrystalické štěpné porušení.**



Otázky 2.2.

17. Jak můžeme z energetického hlediska charakterizovat houževnaté porušení?
18. Jaký termín se také používá pro houževnaté porušení?
19. Kde začíná v kovových materiálech proces houževnatého porušení?
20. Co je první etapou tvárného porušení?
21. Jaký je charakter tvárného (houževnatého) porušení na lomové ploše?
22. Kdy dochází v kovových materiálech ke křehkému porušení?
23. Kudy prochází lom v případě interkrystalického křehkého porušení?
24. Kdy dochází ke křehkému interkrystalickému porušení v kovových materiálech?
25. Proč se transkrystalickému křehkému porušení říká také porušení štěpné?
26. Uveďte Millerovy indexy soustavy rovin, na nichž dochází ke křehkému štěpení v kovech s bcc mřížkou.

2.3. Chování materiálů s vadami; růst vad v materiálech



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- vysvětlit princip koncentrace napětí;
- objasnit růst trhlin v materiálech;
- definovat a vysvětlit pojem kritické velikosti trhliny;
- objasnit, proč je nestabilní růst trhlin velmi nebezpečný.



Výklad

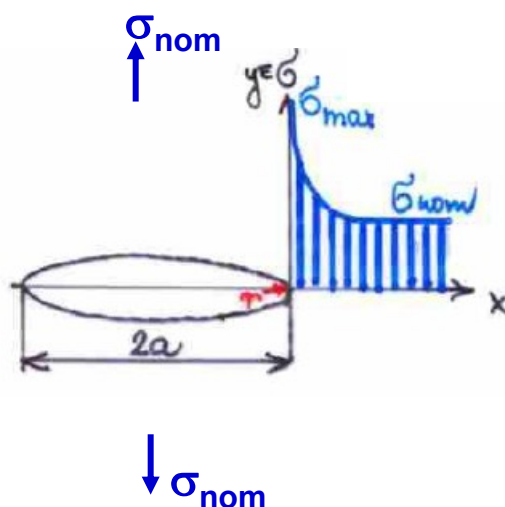
□ Chování materiálů s vadami

Chování materiálů při mechanickém zatěžování je dále komplikováno tím, že v praxi je téměř nemožné vyrobit materiál, který by neobsahoval žádné vady. Vady v materiálech mohou mít různý původ, mohou různě vypadat a mohou se různě projevovat. Asi nejhorším typem vad jsou trhliny v materiálech. Ale i ty mohou být v materiálech přítomny a někdy se jejich přítomnost nemusí projevit po celou dobu životnosti. A jindy mohou trhliny naopak přispět ke katastrofickému porušení, k velkým haváriím s dalekosáhlými dopady.

Trhlinami přitom nemusí být jen klasické vady vzniklé při výrobě a zpracování materiálů (svařování apod.). Trhlinami se mohou stát i různá mezifázová rozhraní, např. rozhraní kovové matrice a nekovových vměstků, v ocelích velmi často třeba sulfidů manganu. Kohezní pevnost rozhraní vměstek MnS – kovová matrice je relativně nízká. Při mechanickém namáhání může dojít k poškození tohoto rozhraní a tím k oddělení částice MnS a matrice. V matici pak jakoby vznikla dutina (trhlina), která se bude dále chovat jako obdobné vady v závislosti na charakteru mechanického namáhání.

Trhliny a jiné vady vyvolávají v materiálech tzv. **koncentraci napětí**. Tím se rozumí, že v okolí vady existuje napětí, které může být mnohonásobně vyšší oproti střednímu (nominálnímu) napětí, které působí ve vlastní matici mimo vadu. Okolí trhliny je tedy mnohem více mechanicky namáháno. Na obr. 2.16 je znázorněna eliptická trhlina o délce $2a$ a poloměru zakřivení na čele trhliny r , zatížená nominálním napětím σ_{nom} . V případě křehkého materiálu, který není schopen plastické deformace, bude v blízkosti trhliny napětí narůstat, a to na hodnotu mnohonásobně vyšší, než odpovídá nominálnímu napětí. Tomuto jevu říkáme

koncentrace napětí. Koncentrace napětí je nebezpečná, protože může přispívat k růstu (zvětšování trhliny).



Obr. 2.16 Koncentrace napětí v okolí trhliny v materiálu bez schopnosti plastické deformace
V případě koncentrace napětí lze definovat součinitel koncentrace napětí α , a to následovně:

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad \text{rov. 2.10}$$

kde $\sigma_{\max}$ je maximální napětí v blízkosti trhliny;

σ_{nom} je střední (nominální) napětí, které na materiál působí.

Pro případ eliptické trhliny a zatěžování v oblasti elastické deformace platí pro součinitel koncentrace napětí α následující vztah:

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} = 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{r}} \quad \text{rov. 2.11}$$

kde a je poloviční délka trhliny;

r je poloměr křivosti na čele trhliny.

Z rovnice 2.11 je zřejmé, že součinitel koncentrace napětí roste s rostoucí délkou trhliny a s klesajícím poloměrem křivosti na čele trhliny.

Pozn.: Trhlina, jejíž poloměr křivosti je velmi nízký ($r \rightarrow 0$), se nazývá **ostrá trhlina**. Ostré trhliny jsou vůbec nejnebezpečnější.

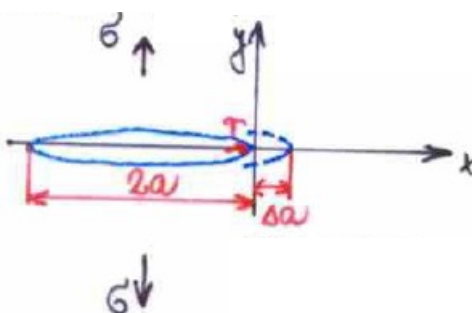
□ Růst trhlin v materiálech

V případě mechanického namáhání mohou v závislosti na geometrických charakteristikách trhlin a parametrech mechanického namáhání nastat tři případy:

- trhliny nerostou (nezvětšují se);
- trhliny se zvětšují pomalu, tzv. stabilním růstem;
- trhliny se zvětšují velmi rychle, tzv. nestabilním růstem.

Rozdíl mezi **stabilním (pomalým) růstem** trhlin a **nestabilním (rychlým) růstem** odvodil pro případ křehkého materiálu, který se porušuje v oblasti elastické deformace, pan Griffith. Bylo to ve 20. letech minulého (tedy 20.) století. Vztahu, který pan Griffith odvodil, se říká **Griffithův vztah**.

Uvažoval ostrou eliptickou trhlinu o délce $2a$ v křehkém materiálu. A provedl energetickou bilanci děje, při kterém se trhlina zvětší (roste) o délku Δa . Situace je znázorněna na obr. 2.17.



Obr. 2.17 Schematické znázornění trhliny k odvození Griffithova vztahu

Co se děje, pokud dochází k růstu trhliny v křehkém materiálu? Dochází zjednodušeně ke dvěma dějům. Při růstu trhliny se porušují vazby mezi atomy a tím dochází k uvolnění elastické energie W_{el} . Zároveň však vzniká nový povrch trhliny, na který je potřeba vynaložit určitou energii W_p , která souvisí s měrnou povrchovou energií γ_p .

Bylo by možné odvodit (ale nebudeme provádět), že uvolněná elastická energie se dá vyjádřit následující rovnicí:

$$W_{el} = \pi \cdot a^2 \cdot \frac{\sigma^2}{E} , \quad \text{rov. 2.12}$$

kde a je poloviční délka trhliny;

σ je působící nominální napětí;

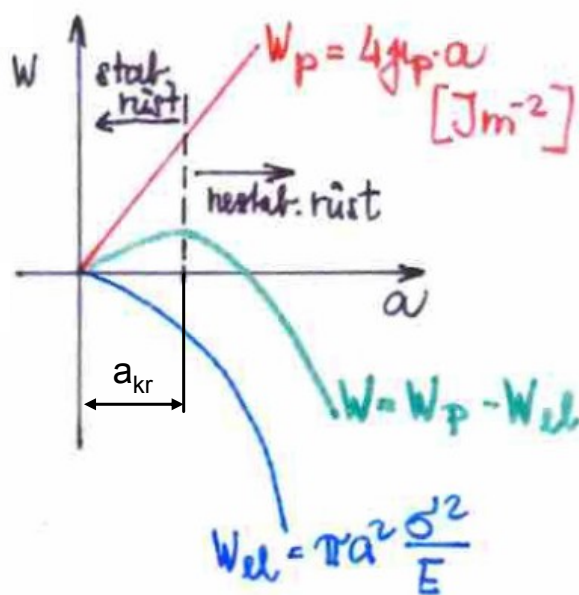
E je modul pružnosti v tahu.

Povrchovou energii W_p lze vyjádřit jako:

$$W_p = 4 \cdot \gamma_p \cdot a, \quad \text{rov. 2.13}$$

kde γ_p [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$] je měrná povrchová energie, tj. energie povrchu připadající na jednotku plochy.

Z rovnic 2.12 a 2.13 je patrné, že obě energie závisejí na délce trhliny a . To je graficky znázorněno na obr. 2.18, kde je kromě hodnot W_{el} a W_p uvedena i celková (součtová) energie doprovázející růst (zvětšení) trhliny.



Obr. 2.18 Schematické znázornění energetické bilance při růstu trhliny v křehkém materiálu

Celková (součtová) energie W spojená s růstem trhliny může být tedy zapsána jako:

$$W = W_p - W_{el} = -\pi \cdot a^2 \cdot \frac{\sigma^2}{E} + 4 \cdot \gamma_p \cdot a \quad \text{rov. 2.14}$$

Na obr. 2.18 je vidět, že křivka znázorňující celkovou (součtovou) energii W je křivka s lokálním maximem. A poloha tohoto maxima (vzhledem k délce a) je velmi důležitá. Délka a odpovídající tomuto maximu se nazývá **kritická délka trhliny**, můžeme ji označit jako a_{kr} ,

a odděluje nám oblast pomalého (stabilního) růstu trhliny a oblast rychlého (nestabilního) růstu trhliny.

Kritickou délku trhliny akr můžeme získat tak, že budeme derivovat rovnici 2.14 podle délky a a 1. derivaci pak položíme rovnu nule (vzpomenete si, že v místě lokálního extrému funkce, je její první derivace rovna nule). Provedeme-li to, dostaneme rovnici:

$$\frac{dW}{da} = -2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{\sigma^2}{E} + 4 \cdot \gamma_p = 0 \quad \text{rov. 2.15}$$

A z této rovnice již můžeme vyjádřit kritickou délku trhliny a_{kr} jako:

$$a_{kr} = \frac{2 \cdot \gamma_p \cdot E}{\pi \cdot \sigma^2} \quad \text{rov. 2.16}$$

Tato rovnice už je tím Griffithovým vztahem. Říká nám, že kritická délka trhliny je přímo úměrná měrné povrchové energii a modulu pružnosti v tahu materiálu a nepřímo úměrná druhé mocnině působícího napětí. Čím je působící napětí vyšší, tím kratší trhlina se stane trhlinou kritické délky.

Griffithův vztah se někdy uvádí v odlišném tvaru, a to:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_p \cdot E}{\pi \cdot a_{kr}}} \quad \text{rov. 2.17}$$

Pořád jsme ale nevysvětlili, v čem tkví hlavní význam dělení růstu trhlín na stabilní a nestabilní a v čem spočívá hlavní význam kritické délky trhliny. Ve vysvětlení by nám mohl pomoci obr. 2.18. Z termodynamiky si vzpomenete, že termodynamicky schůdný a samovolně probíhající je pouze takový děj, při němž dochází k poklesu energie soustavy.

Je-li trhlina kratší, než odpovídá kritické délce, dochází při jejím růstu k nárůstu celkové energie W . To znamená, že v této oblasti neprobíhá růst trhliny samovolně, a aby probíhal, musí být do soustavy energie dodána zvenčí. Jak se to děje? Inu, např. tak, že po jistou dobu působí na materiál vyšší napětí, které povede k určitému nárůstu trhliny. Když napětí poklesne, růst trhliny se zastaví. A takto se děj může opakovat i mnohokrát za sebou. Proto říkáme, že trhlina roste pomalu (stabilně). V některých materiálech a při určitých podmínkách zatěžování může takto růst i několik let.

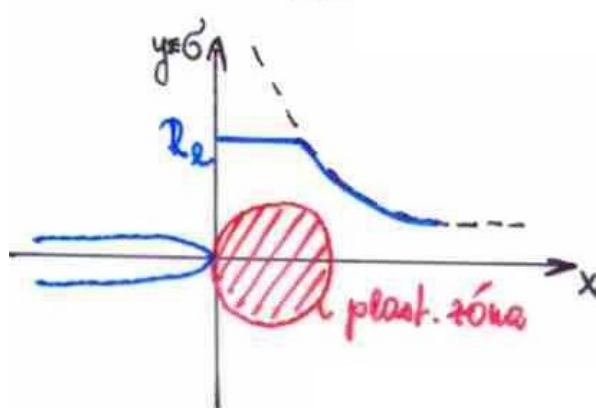
Pokud ale trhlina dosáhne své kritické velikosti, situace se dramaticky změní. Její další růst je totiž spojen s poklesem celkové energie a jedná se tedy, z termodynamického hlediska, o samovolný děj. To znamená, že po překročení kritické délky trhliny může trhlina narůst

obrovských rozměrů (řádově i v metrech) a to pak znamená katastrofická porušení konstrukcí, mostů, tlakových nádob apod. Z důvodu katastrof, k nimž může při nestabilním růstu trhlin dojít, se nestabilnímu (rychlému) růstu trhlin říká také **katastrofický růst**.

A jaké jsou kritické velikosti trhlin pro různé materiály? Víme, že to závisí na působícím napětí, tak můžeme uvést jen hrubě orientační hodnoty. Např. u skla jsou kritické délky trhliny v řádu setin mm, naproti tomu u některých kovových materiálů jsou v řádu několika desítek mm.

Nevýhodou Griffithova vztahu bylo, že platil jen pro křehké materiály a nebylo možné ho použít např. pro materiály kovové. To pak napravil v 50. letech 20. století pan Orowan, a to poměrně elegantním způsobem.

U většiny kovových materiálů dochází před čelem trhliny, v místě koncentrace napětí, k plastické deformaci, která se odehrává v tzv. plastické zóně. To je schematicky znázorněno na obr. 2.19.



Obr. 2.19 Průběh napětí před čelem trhliny u materiálu, v němž dochází k plastické deformaci

Z obr. 2.19 je patrné, že průběh napětí je takový, že i v blízkosti trhliny nepřesahuje působící napětí mez kluzu. Je to v oblasti, kde se před čelem trhliny tvoří plastická zóna. Na vytvoření plastické zóny je potřeba dodat materiálu určitou energii, která může být mnohem vyšší než vlastní energie nového povrchu. To vyřešil pan Orowan modifikací Griffithova vztahu, kdy namísto měrné povrchové energie γ_p zavedl efektivní povrchovou energii γ_{ef} .

Orowanův vztah tedy vypadá následovně:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_{ef} \cdot E}{\pi \cdot a_{kr}}} \quad \text{rov. 2.18}$$

Efektivní povrchová energie je součtem „čisté“ povrchové energie a tzv. plastické práce, která vyjadřuje energii potřebnou na vyvolání plastické deformace před čelem rostoucí trhliny. To lze vyjádřit následovně:

$$\gamma_{ef} = \gamma_p + \gamma_{pl}, \quad \text{rov. 2.19}$$

kde γ_{pl} je zmíněná plastická práce.

Zatímco čistá měrná povrchová energie může dosahovat jen hodnot v setinách $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$, plastická práce může dosahovat hodnot až stonásobně vyšších. Orowanův vztah je velmi cenný, protože umožňuje určovat kritické délky vad i u relativně houževnatých materiálů, u nichž dochází před čelem trhliny k plastické deformaci.



Shrnutí pojmů 2.3.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Koncentrace napětí v blízkosti trhliny, ostrost trhliny;**
- **Stabilní růst trhliny, nestabilní (katastrofický) růst trhliny;**
- **Kritická délka trhliny; Griffithův vztah.**
- **Plastická zóna před čelem trhliny, Orowanův vztah.**



Otázky 2.3.

27. Proč je nutné studovat chování materiálů s **vadami** v podmínkách mechanického namáhání?
28. Co vyjadřuje součinitel koncentrace napětí?
29. Na čem závisí součinitel koncentrace napětí?
30. Co rozumíme pojmem „ostrá“ trhlina?
31. Jak mohou růst trhliny v materiálech při působení mechanického namáhání?
32. Jaké druhy energií vystupují v odvození Griffithova vztahu?
33. Pro jaký typ materiálu platí Griffithův vztah?
34. Zavedením jakého členu modifikoval Orowan původní Griffithův vztah?
35. Proč je nestabilní růst trhlín velmi nebezpečný?

2.4. Faktor intenzity napětí



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- vysvětlit princip koncentrace napětí;
- objasnit růst trhlin v materiálech;
- definovat a vysvětlit pojem kritické velikosti trhliny;
- objasnit, proč je nestabilní růst trhlin velmi nebezpečný.

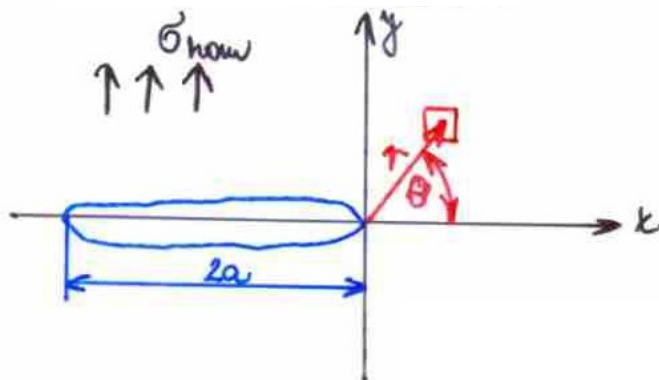


Výklad

□ Zavedení pojmu faktor intenzity napětí

Nebojte se, nechci vás zahltit pojmy z oblasti materiálového inženýrství, která asi nebude vašim chlebem, ale ještě potřebujeme zavést jeden pojem. Důvod je prostý. Pro vyjádření houževnatosti materiálů se někdy nevystačí s nárazovou prací, resp. se zkouškou rázem v ohybu. Např. v keramických materiálech by to nemělo smysl, a tak se pro hodnocení houževnatosti zavádí jiná veličina, a to tzv. faktor intenzity napětí, resp. jeho kritická hodnota. Takže s chutí do toho. Zjednodušíme to, jak je to jen možné.

V šedesátých letech, s rozvojem výpočetní techniky, začali strojaři počítat průběh napětí, resp. složek napětí před čelem trhliny v materiálu zatíženém vnějším napětím (obr. 2.20).



Obr. 2.20 Obrázek k zavedení pojmu faktor intenzity napětí

Zjistili, že složky napětí v určité oblasti před čelem trhliny lze vyjádřit v polárních souřadnicích pomocí vztahu:

$$\sigma_i = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_i(\Theta) \quad \text{rov. 2.20}$$

kde K je zmíněný faktor intenzity napětí;

r a Θ jsou polární souřadnice oblasti, v níž chceme složky napětí určit.

Ve vztahu k nominálnímu napětí σ_{nom} lze faktor intenzity napětí vyjádřit následovně:

$$K = \sigma_{nom} \sqrt{\pi \cdot a} \quad \text{rov. 2.21}$$

kde a je délka trhliny.

Z rovnice 2.21 vyplývá, že s rostoucí délkou trhliny se zvyšuje i hodnota faktoru intenzity napětí. A platí, že při kritické délce trhliny dosáhne i faktor intenzity napětí své kritické hodnoty. Faktor intenzity napětí se určuje nejčastěji při tahovém zatěžování a jeho kritická hodnota se označuje jako K_{IC} . Pro kritické podmínky platí:

$$K_{IC} = \sigma_{nom} \sqrt{\pi \cdot a_{kr}} \quad \text{rov. 2.22}$$

Kritická hodnota faktoru intenzity napětí se nejčastěji vyjadřuje v $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Kritická hodnota faktoru intenzity napětí je za určitých podmínek materiálovou konstantou a v jistém smyslu charakterizuje houževnatost materiálů. Proto je tato veličina tak důležitá a proto se používá. Někdy se kritická hodnota faktoru intenzity napětí označuje jako lomová houževnatost. To je nepřesné, ale dále už to nebudeme pitvat.

Kritická hodnota faktoru intenzity napětí je velmi důležitou materiálovou charakteristikou i proto, že se dá měřit a z ní se může určit kritická velikost vady pro určité konkrétní působící napětí. Koncept kritické velikosti trhliny má svá velmi významná praktická uplatnění, např. v oblasti tlakových nádob vyráběných z ocelí. **Zde se volí takové materiály, pro něž platí, že kritická délky trhliny je vyšší než tloušťka stěny nádoby.** Proč? Není to nelogické? Ne.

K čemu by došlo, kdyby kritická velikost vady byla menší než tloušťka stěny nádoby? Pokud by se např. z vnitřního povrchu stěny šířila trhlina a dosáhla kritické délky, v tom okamžiku by došlo ke katastrofickému, rychlému lomu, tlaková nádoba by prostě „vybouchla“ a nastal by obrovský problém. Pokud bude naopak kritická velikost trhliny větší, než tloušťka stěny nádoby, bude situace mnohem lepší. Bude-li se od vnitřního povrchu šířit trhlina, může prorůst i přes celou tloušťku stěny nádoby, ale stále to bude v režimu stabilního (pomalého)

růstu trhliny. Z nádoby může začít unikat skladované médium, tento únik lze detekovat a přijmout odpovídající opatření (nejčastěji – obsah nádoby přecerpat a nádobu opravit). Podstatné je, že při splnění podmínky, že kritická velikost vady je vyšší než tloušťka stěny nádoby, nedojde k roztržení nádoby jako celku, tzn. nedojde k vážné havárii. Tento přístup se musí uplatnit už při návrhu tlakové nádoby a vžil se pro něj termín „*leak before break*“ – únik před lomem (někdy se používá zkratka **LBB**).



Shrnutí pojmů 2.4.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Faktor intenzity napětí a jeho důležitost.**



Otázky 2.4.

36. Proč je faktor intenzity napětí důležitou veličinou v oblasti materiálů?
37. V jakých jednotkách se vyjadřuje kritická hodnota faktoru intenzity napětí?
38. V jakém vztahu by měla být kritická délka trhliny a tloušťka stěny u tlakových nádob?

	Klíč k řešení – odpovědi na otázky ke kapitole 2
O1	Základními mechanickými vlastnostmi konstr. materiálů jsou pevnost a houževnatost.
O2	Pevnost vyjadřuje maximální napětí, které může materiál přenášet bez porušení a bez vzniku defektů.
O3	Vysokou pevnost vykazují některé kovové materiály (např. některé druhy ocelí) a keramické materiály.
O4	Houževnatost vyjadřuje energii potřebnou na porušení materiálu.
O5	Výsledkem tahové zkoušky je tzv. pracovní diagram, což je většinou závislost mezi zatěžující silou a absolutním prodloužením.
O6	Tahový diagram lze většinou rozdělit na tři oblasti, a to: oblast elastické deformace; oblast rovnoměrné plastické deformace; oblast nerovnoměrné plastické deformace.
O7	V oblasti elastické deformace platí u kovových materiálů tzv. Hookův zákon, tj. lineární závislost mezi napětím a deformací.
O8	Z oblasti elastické deformace můžeme získat hodnotu modulu pružnosti v tahu E .
O9	Smluvní napětí se vztahuje k počáteční ploše příčného průřezu, zatímco skutečné napětí se vztahuje k okamžité hodnotě příčného průřezu v průběhu tahové zkoušky. Skutečné napětí je vyšší, a to zejména v oblasti nerovnoměrné plastické deformace.
O10	Z pracovního diagramu můžeme odečíst mez kluzu, mez pevnosti a event. také tažnost. Z pracovního diagramu nelze získat kontrakci.
O11	Mez pevnosti je podíl max. zatěžující síly a počáteční plochy příčného průřezu zkušební tyče.
O12	Tažnost je maximální poměrné plastické (trvalé) prodloužení vyjádřené v %.
O13	Kontrakce je maximální poměrné zúžení příčného průřezu vyjádřené v %.
O14	Výsledkem zkoušky rázem v ohybu je nárazová práce, nebo vrubová houževnatost.
O15	Vrubová houževnatost je podílem nárazové práce a plochy příčného průřezu pod vrubem. Vyjadřuje se obvykle v $J \cdot cm^{-2}$.
O16	Ze závislosti nárazové práce, resp. vrubové houževnatosti na teplotě můžeme získat, v případě tranzitního chování materiálu, tzv. tranzitní teplotu.
O17	Houževnaté porušení charakterizujeme jako tzv. vysokoenergetické porušení.
O18	Pro houževnaté porušení se používá též termín tvárné porušení.
O19	proces houževnatého porušení začíná na tzv. „cizích“ částicích – nekovových vměstcích, nebo částicích minoritních fází.
O20	První etapou tvárného porušení je vznik dutin (kavit).
O21	Na lomové ploše se tvárné porušení projevuje přítomností jamek.
O22	Ke křehkému porušení dochází v kovových materiálech tehdy, nejsou-li schopny plastické deformace.
O23	V případě interkrystalického křehkého porušení probíhá lom podél hranic zrn.
O24	Ke křehkému interkrystalickému porušení dochází přednostně tehdy, jsou-li hranice zrn z nějakých důvodů oslabeny.
O25	Transkrystalickému křehkému porušení se říká štěpné proto, že dochází ke štěpení materiálu podél určitých krystalografických rovin.
O26	Millerovy indexy rovin křehkého štěpení v mřížce bcc jsou $\{001\}$.
O27	Studovat materiály s vadami je nutné proto, že reálně takové materiály existují.
O28	Součinitel koncentrace napětí vyjadřuje podíl mezi maximálním a středním napětím.
O29	Součinitel koncentrace napětí závisí přednostně na délce trhliny a na poloměru křivosti na čele trhliny.
O30	Ostrá trhlina je taková, jejíž poloměr křivosti je velmi nízký (blíží se k nule).
O31	Trhliny mohou růst buď pomalu (stabilně), nebo rychle (nestabilně, katastroficky).

O32	V odvození Griffithova vztahu vystupuje elastická energie (přesněji energie uvolnění elastických vazeb mezi atomy) a povrchová energie.
O33	Griffithův vztah platí pro křehký materiál, u něhož nedochází k plastické deformaci.
O34	Orowan modifikoval Griffithův vztah zavedením tzv. efektivní povrchové energie, která je součtem čisté povrchové energie a plastické práce.
O35	Nestabilní růst trhlin je nebezpečný, protože může vyvolat vážné havárie konstrukcí, tlakových nádob apod.
O36	Důležitost faktoru intenzity napětí spočívá v tom, že jeho kritická hodnota vyjadřuje houževnatost materiálu.
O37	Kritická hodnota faktoru intenzity napětí se obvykle vyjadřuje v $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.
O38	Kritická délka trhliny by u tlakových nádob měla být větší než tloušťka stěny nádoby.



Další zdroje

Pluhař, J. a kol: *Nauka o materiálech*. SNTL, Praha, 1989, 549 s.

Strnadel B.: *Nauka o materiálu. Konstrukční materiály a jejich degradační procesy*. VŠB Ostrava, 1993. 1. vyd. 187 s. ISBN 80-7078-207-2.

Strnadel B.: *Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů*. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.

Veles P.: *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. ALFA Bratislava, 1989. 2. vyd. 408 s.

Callister, W. D.: *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley&Sons, USA, 2005, 712 s.

Bailon, J. P., Dorlot, J. M.: *Des Matériaux*. Presses Int. Polytechnique, Canada, 2000, 736s.

3. MECHANISMY ZPEVNĚNÍ KOVOVÝCH MATERIÁLŮ

V případě konstrukčních materiálů existují snahy zlepšit jejich mechanické vlastnosti, zejména zvýšit pevnost a houževnatost materiálů. Zvýšení houževnatosti materiálů je velmi problematické. Naproti tomu ke zvýšené pevnosti, tj. ke zpevnění materiálů vede několik cest. S ohledem na zaměření studijního programu se budeme věnovat zpevnění kovových materiálů. Na úvod musíme uvést jedno zpřesnění. když píšeme, že se bude jednat o zpevnění, řekli bychom si asi, že tou veličinou, kterou chceme zvýšit, je mez pevnosti. Ale tak tomu není. Vzhledem k tomu, že kovové materiály mohou být za provozu namáhány jen v oblasti elastické deformace, je tou rozhodující veličinou, kterou chceme při zpevnění zvýšit mez kluzu. Už víme že mez kluzu je maximální napětí, do něhož se materiál deformuje elasticky. Nad mezí kluzu dochází k plastické deformaci, která znamená, že v kovových materiálech se pohybují dislokace a nové dislokace vznikají. Chceme-li zvýšit mez kluzu materiálu, musíme učinit pohyb dislokací obtížnějším, aby se začaly pohybovat až při působení vyššího napětí. Takže se snažíme, aby v materiálu existovaly překážky, které budou pohybu dislokací bránit.

Způsobů, jak zvýšit mez kluzu kovových materiálů, tzn. jak je zpevnit, je několik. Mezi nejčastěji využívané mechanismy patří:

- zpevnění plastickou deformací;
- zpevnění hranicemi zrn;
- zpevnění tuhého roztoku;
- zpevnění precipitační.

Následně si k jednotlivým mechanismům uvedeme alespoň základní informace.

3.1. Zpevnění plastickou deformací



Čas ke studiu: 1 hodina



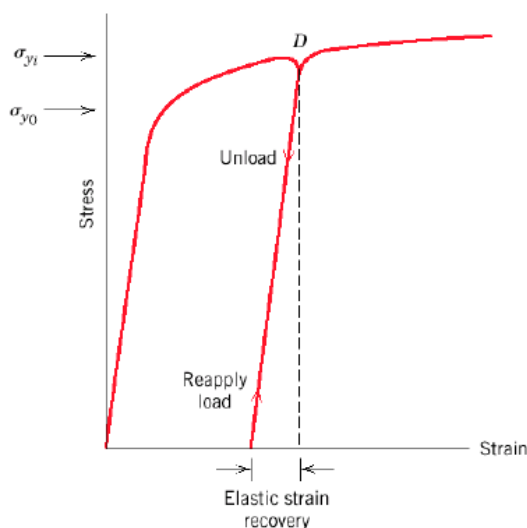
Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- vysvětlit, jak lze kovové materiály zpevnit plastickou deformací;
- určit, na čem závisí míra zpevnění plastickou deformací;
- popsat hlavní přednosti a nevýhody zpevnění plastickou deformací.



Výklad

Zpevnění kovových materiálů plastickou deformací jakoby v sobě skrývalo jistý protimluv. Psali jsme, že zpevnění znamená ztížení pohybu dislokací a teď píšeme o plastické deformaci. Přesněji bychom mohli napsat, že se jedná o plastickou deformaci, která předchází normálnímu užívání materiálu. Jak k tomuto zpevnění dochází, zkusíme ukázat na příkladu tahové zkoušky. Představme si, že provádíme tahovou zkoušku kovového materiálu a zaznamenáváme pracovní diagram. Příklad je uveden na obr. 3.1.



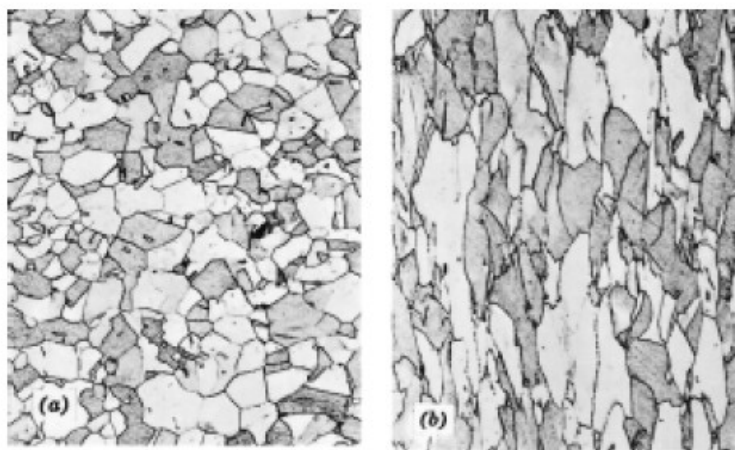
Obr. 3.1 Diagram tahové zkoušky k vysvětlení zpevnění plastickou deformací

Tahovou zkoušku ale neprovedeme až do přetržení zkušební tyče, ale odlehčíme ji v oblasti rovnoměrné plastické deformace (cca v bodě D na obr. 3.1). Z obr. 3.1 je vidět, že materiál měl ve výchozím stavu mez kluzu označenou jako σ_{y0} (*poznámka – v angličtině se mez kluzu*

označuje jako *yield stress* a z toho vyplývá příslušná zkratka). Pokud po odlehčení budeme provádět opakované zatížení, nebude mít materiál totožnou mez kluzu σ_{y0} , ale jeho mez kluzu bude odpovídat zhruba napětí na úrovni bodu D, tzn. mez kluzu bude vyšší (na obr. 3.1 je mez kluzu při opakovaném zatížení označena jako σ_{yi}). Předchozí zatížení do oblasti plastické deformace tedy vedlo ke zvýšení meze kluzu při následném zatížení materiálu. Jak k tomu došlo?

Víme, že při plastické deformaci se v materiálu začínají pohybovat dislokace, ale nové dislokace také vznikají, tzn. zvyšuje se jejich množství (odborněji říkáme, že se zvyšuje hustota dislokací). Každá dislokace okolo sebe vytváří napěťově-deformační pole a čím je v materiálu dislokací více, tím jsou tato pole významnější, mohou spolu interagovat, což vede k tomu, že pohyb dislokací je obtížnější. Můžeme zjednodušeně říci, že překážkou pro pohyb dislokací jsou dislokace samy, když je jich v materiálu mnoho. Navzájem si v pohybu překáží. Plastická deformace tedy vede ke zvýšení hustoty dislokací a to má za následek zvýšení meze kluzu při následném namáhání.

V praxi se samozřejmě zpevnění plastickou deformací neuskutečňuje pomocí tahových zkoušek, ale tvářením materiálů za studena, např. válcováním plechů za studena, tažením drátů, nebo trub za studena apod. Proto se tomuto zpevnění někdy také říká **zpevnění deformační**. Tvářením za studena vede jednak ke změně tvaru zrn, což je ukázáno na obr. 3.2, jednak ke zvýšení hustoty dislokací. Dislokace se mohou zobrazit téměř výhradně metodou transmisní elektronové mikroskopie (obr. 3.3).



Obr. 3.2 Tvar zrn před tvářením za studena (a); po tvářením za studena (b)

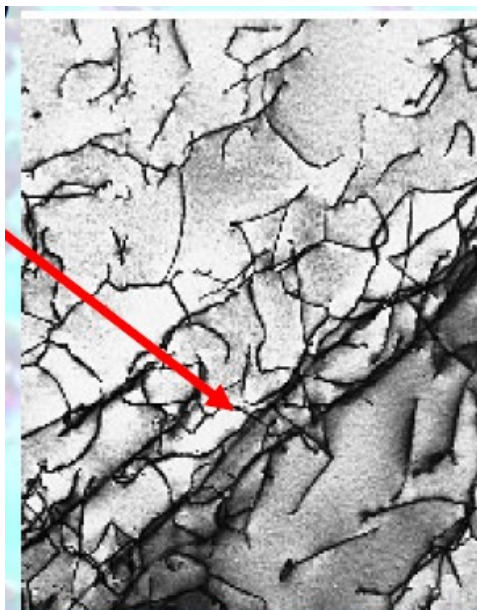
Pro určení zvýšení meze kluzu plastickou deformací je důležitá hustota dislokací po plastické deformaci materiálu. Ta se označuje písmenem ρ a je definována jako podíl délek dislokačních čar k objemu. Nejčastěji se vyjadřuje v cm^{-2} . Rovnici pro stanovení hustoty dislokací lze psát následovně:

$$\rho = \frac{L_{disl}}{V} \quad \text{rov. 3.1}$$

kde L_{disl} je délka dislokačních čar;

V je objem materiálu.

Pro materiály ve vyžíhaném stavu je obvyklá hustota dislokací cca 10^5 cm^{-2} , pro materiály ve stavu po tváření za studena je to cca 10^9 až 10^{11} cm^{-2} .



Obr. 3.3 Dislokace v hliníku zobrazené metodou transmisní elektronové mikroskopie

Přírůstek meze kluzu při zpevnění plastickou deformací lze vyjádřit rovnicí:

$$\Delta R_e \cong 2 \cdot \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho} \approx \sqrt{\rho} \quad \text{rov. 3.2}$$

kde α je konstanta rovna cca 0,5;

G je modul pružnosti ve smyku;

b je Burgersův vektor dislokací;

ρ je hustota dislokací.

Z rovnice 3.2 je zřejmé že míra zpevnění plastickou deformací je přímo úměrná druhé odmocnině z hustoty dislokací ρ .

Řešený příklad:

Vypočtete přírůstek meze kluzu pro nízkouhlíkovou ocel, u které byla po tváření za studena zjištěna hustota dislokací $\rho = 10^{10} \text{ cm}^{-2}$. Uvažujte modul pružnosti ve smyku $G = 70000 \text{ MPa}$ a Burgersův vektor dislokací $b = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Řešení:

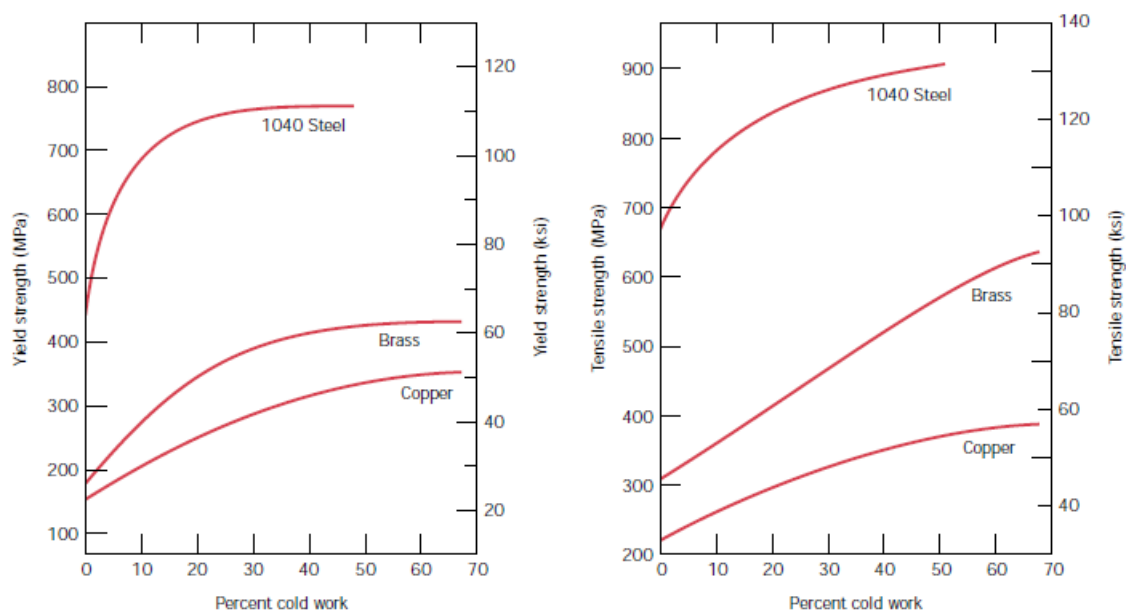
Zadané hodnoty dosadíme do rovnice 3.2 a vyčíslíme.

$$\Delta \tau \cong 2 \cdot \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho} = 2 \cdot 0,5 \cdot 70000 \cdot 2,8 \cdot 10^{-10} \cdot \sqrt{10^{14}} \cong 196 \text{ MPa}$$

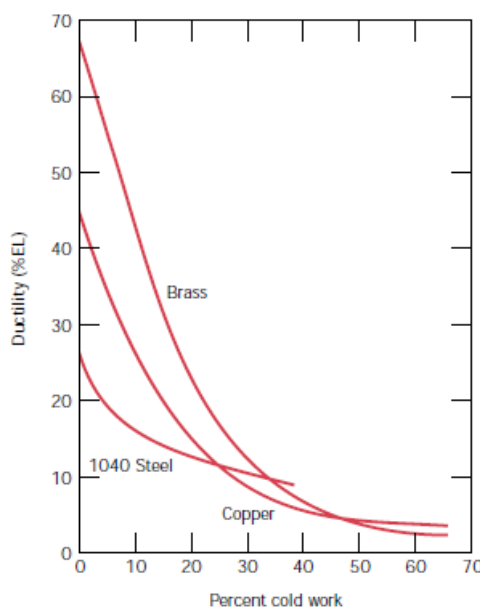
Závěr: Po uvedeném tváření za studena vzroste mez kluzu oceli o 196 MPa. (A to je docela hodně.)

Zpevnění plastickou deformací se používá u nízkouhlíkových ocelí, ale velmi často u kovů a slitin s fcc mřížkou, které mají ve vyžíhaném stavu jen nízké mechanické vlastnosti.

Bohužel, zpevnění plastickou deformací má i své výrazné nevýhody. Tou největší nevýhodou je pokles houževnatosti, tedy zkřehnutí materiálu. V tomto směru je zpevnění plastickou deformací asi nejnebezpečnějším druhem zpevnění. K jak velkému poklesu houževnatosti může dojít je ilustrováno na obr. 3.4 a,b, kde je vyznačen nárůst meze kluzu a meze pevnosti po deformaci za studena pro měď, mosaz a nízkouhlíkovou ocel (a), dále pak pokles tažnosti v závislosti na míře deformace za studena (b).



Obr. 3.4a Nárůst meze kluzu a meze pevnosti pro měď, mosaz a ocel v závislosti na míře deformace za studena



Obr. 3.4b Pokles tažnosti pro měď, mosaz a ocel v závislosti na míře deformace za studena.

Z obr. 3.4b je vidět, že pokles tažnosti poměrně drastický už po 20% deformaci za studena. Pokles houževnatosti po tváření za studena do jisté míry snižuje možnost využití tohoto mechanismu zpevnění pro ty aplikace, kde je žádána vyšší hodnota houževnatosti materiálu.



Shrnutí pojmů 3.1.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **zpevnění plastickou deformací, resp. tvářením za studena;**
- **hustota dislokací.**



Otázky 3.1.

1. Co je překážkou pro pohyb dislokací při dislokačním zpevnění?
2. Jaký jiný termín se používá pro dislokační zpevnění?
3. Jak je definována hustota dislokací?
4. Na kterém parametru závisí zejména míra zpevnění plastickou deformací?
5. U kterých kovových materiálů se využívá zpevnění plastickou deformací?
6. Co je hlavní nevýhodou zpevnění plastickou deformací?

3.2. Zpevnění hranicemi zrn



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- vysvětlit, jak lze kovové materiály zpevnit plastickou deformací;
- určit, na čem závisí míra zpevnění plastickou deformací;
- popsat hlavní přednosti a nevýhody zpevnění plastickou deformací.

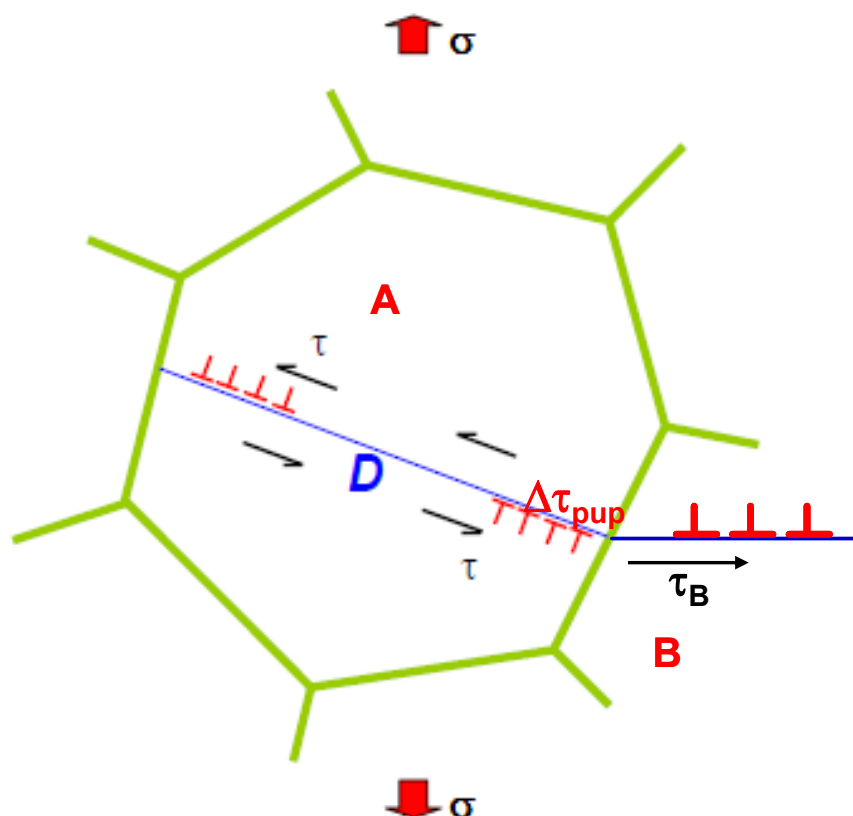


Výklad

Velmi významným mechanismem, který umožňuje zvýšení meze kluzu, tj. zpevnění kovových materiálů, je zpevnění hranicemi zrn. Obecně platí, že vyšší mez kluzu můžeme očekávat u materiálů s malým zrnem, tj., u materiálů jemnozrnných. Naproti tomu u materiálů hrubozrnných můžeme očekávat nižší mez kluzu. Čím to je, že jemnozrnné materiály mají vyšší mez kluzu, tzn. zjemnění zrna vede ke zpevnění? Zkusíme odpovědět opačně, tedy odpovědět, proč mají hrubozrnné materiály mez kluzu nižší.

Nejprve si musíme uvědomit, že hranice zrn představují v polykrystalických materiálech překážku, kterou dislokace nemohou překonat. Dislokace jsou ve svém pohybu vždy omezeny na zrno, v němž vznikly. Představme si situaci, která je znázorněna na obr. 3.5. Uvažujme hrubozrnný polykrystalický materiál, v němž působí tahové napětí σ . Dále si představme, že v tomto materiálu je právě jedno zrno orientované tak, že rovina maximálního smykového napětí (tedy toho napětí, které uvádí do pohybu dislokace) je shodná se skluzovou rovinou v tomto zrně (tj. rovinou, na níž se dislokace pohybují). A ještě si představme, že maximální smykové napětí τ je právě tak velké, že v tomto jediném zrně může dojít k plastické deformaci. Dojde-li k plastické deformaci, znamená to, že v tomto zrně se budou dislokace pohybovat a nové dislokace budou vznikat. Dislokace se budou pohybovat na skluzových rovinách k hranicím zrna, u nichž se zastaví. Jak se budou postupně k hranicím zrna blížit další a další dislokace, vznikne u hranic zrna nahromadění – nakupení dislokací $\Delta\tau_{\text{pup}}$ (v angl. se používá termín dislocation pile up). A toto nakupení dislokací je spojeno s existencí jistého napětí, které působí i do sousedních zrn. Čím je zrno větší, tím více dislokací se nakupí u hranic zrna a tím vyšší bude napětí od tohoto nakupení. Toto napětí se bude sčítat se smykovým napětím na skluzových

rovinách v sousedních zrnech τ_b , které nejsou tak příznivě orientovány, a může zde dojít k překročení napětí nutného pro vyvolání plastické deformace. To znamená, že k plastické deformaci může dojít ve větším počtu zrn a z makroskopického pohledu bude dosaženo meze kluzu.



Obr. 3.5 Schematický obrázek k vysvětlení nízké meze kluzu v hrubozrnném materiálu

Je-li materiál jemnozrnný a bude-li možná při působení určitého napětí σ plastická deformace právě jen v jednom zrna, bude zde nakupení dislokací na hranicích zrna nižší. Tím pádem bude nižší i napětí od tohoto nakupení $\Delta\tau_{pup}$ a velmi pravděpodobně nedojde k plastické deformaci v sousedních zrnech. K té dojde až tehdy, bude-li v materiálu působit vyšší napětí σ . Jemnější zrno tedy znamená zvýšení meze kluzu materiálu.

Závislost meze kluzu na velikosti zrna uvádí tzn. Hall-Petchův vztah, který lze zjednodušeně zapsat následovně:

$$\Delta R \cong \tau_0 + \frac{K}{\sqrt{d}} \quad \text{rov. 3.3}$$

kde τ_0 je tzv. třecí napětí;

K je konstanta;

d je průměr zrna.

V případě ocelí s bcc mřížkou se uvádějí např. následující empirické rovnice:

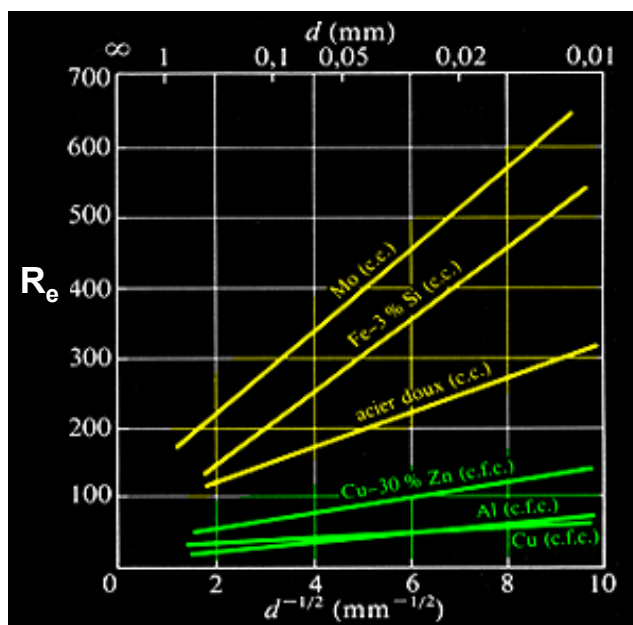
$$R_e = 60 + 0,727 \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \text{rov. 3.4}$$

$$R_e = 80 + 0,523 \cdot \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \text{rov. 3.5}$$

(d se dosazuje v m, R_e je v MPa).

Otázkou je, kam až má smysl zjemňovat velikost zrn, aby stále ještě docházelo ke zvýšení meze kluzu. Hranicí, které se uvádí jsou hodnoty mezi 10 a 100 nm. Velikost zrn v běžných materiálech se pohybuje většinou v jednotkách mikrometrů. Další zjemňování zrn pod hranici mikrometrů má tedy smysl, pokud jde o další možnosti zvýšení meze kluzu materiálu.

Zpevnění hranicemi zrn závisí poměrně významně na typu krystalové mřížky kovového materiálu. Tento typ zpevnění je účinnější u kovů s mřížkou bcc. U kovů s fcc mřížkou je zpevnění zjemněním zrna méně účinné, což je patrné z obr. 3.6.



Obr. 3.6 Vliv velikosti zrna na mez kluzu pro vybrané materiály s mřížkou bcc a fcc

Řešený příklad:

S využitím rovnice 3.4 určete, o kolik se zvýší mez kluzu oceli, dojde-li k poklesu střední velikosti zrna z 10 μm na 1 μm .

Řešení:

Prostým dosazením získáme pro velikost zrna 10 μm , tj. 0,00001 m mez kluzu 290 MPa.

$$R_e = 60 + 0,727 \cdot \frac{1}{\sqrt{0,00001}} = 290 \text{ MPa}$$

Pro velikost zrna 1 μm , tj. 0,000001 m vychází z rovnice 3.4 mez kluzu 787 MPa.

$$R_e = 60 + 0,727 \cdot \frac{1}{\sqrt{0,000001}} = 787 \text{ MPa}$$

Nárůst meze kluzu je tedy $787 - 290 = 497$ MPa.

Závěr: Snížením velikosti zrna z 10 na 1 μm dojde k nárůstu meze kluzu téměř o 500 MPa. (a to je rozdíl mimořádně velký).

Zpevnění hranicemi zrn má v jistém smyslu výsadní postavení mezi všemi zpevněními, a to výsadní postavení pozitivní. Zpevnění hranicemi zrn, tj. zjemněním zrna je jediným zpevněním, které zároveň vede ke zvýšení houževnatosti materiálu. A to je mimořádně cenné.

**Shrnutí pojmů 3.2.**

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **zpevnění hranicemi zrn, tj. zjemněním zrna;**
- **nakupení dislokací u hranice zrna**
- **Hall-Petchův vztah.**

**Otázky 3.2.**

7. Co je překážkou pro pohyb dislokací při zpevnění hranicemi zrn?
8. Co je hlavním důvodem nižší meze kluzu v hrubozrnných materiálech?
9. Jak se dá vyjádřit závislost meze kluzu na velikosti zrna?
10. U materiálů s jakým typem krystalové mřížky je zpevnění hranicemi zrn účinnější?
11. Do jaké velikosti má smysl zjemňovat zrno s ohledem na možné zvýšení meze kluzu?

12. Jak se zpevnění hranicemi zrn projevuje na houževnatosti materiálu?

3.3. Zpevnění precipitační



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

- vysvětlit, jak lze kovové materiály zpevnit pomocí precipitátů;
- popsat mechanismus protínání precipitátů dislokacemi;
- charakterizovat mechanismus obcházení precipitátů dislokacemi;
- srovnat oba výše uvedené mechanismy a vysvětlit na jakých strukturních charakteristikách precipitátů závisejí..



Výklad

Dalším zpevňujícím mechanismem, který umožňuje výrazné zvýšení meze kluzu kovových materiálů, je tzv. precipitační zpevnění. Precipitáty jsou velmi drobné částice minoritních fází, tedy těch fází, které se v materiálu vyskytují v poměrně malém množství (většinou cca v jednotkách procent z hlediska objemu). Minoritními fázemi mohou být v ocelích např. karbidy, nitridy, v jiných kovových materiálech jsou minoritními fázemi různé intermetalické fáze, např. ve slitinách hliníku to mohou být fáze Al_2Cu , ve slitinách niklu fáze Ni_3Al apod.

Základní podmínkou pro to, aby bylo precipitační zpevnění účinné, je, aby částice precipitátů byly malé a aby byly blízko sebe, tzn. aby mezi nimi byly poměrně malé vzdálenosti.

Přesněji se pro precipitáty určují následující stereologické parametry, které je přesněji charakterizují:

Objemový zlomek precipitátů	$V_f(-)$
Počet částic v jednotce objemu	$N_V(\text{m}^{-3})$
Střední průměr (poloměr) částic	$d(r)(\text{m})$
Střední mezičásticová vzdálenost	$\lambda(\text{m})$
(mean interparticle spacing).	

Pravděpodobně nejdůležitějším parametrem je střední mezičásticová vzdálenost a průměr, resp. poloměr částic. Pro většinu materiálů je nejvýhodnější, pohybují-li se hodnoty těchto dvou parametrů v desítkách nanometrů. Je tedy zřejmé, že aby bylo precipitační zpevnění

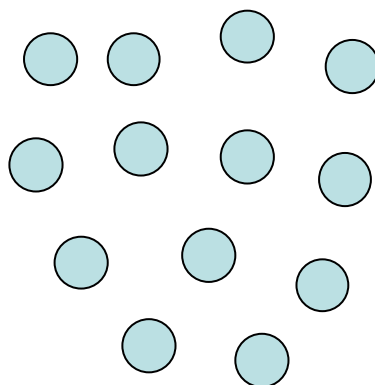
účinné, musí být částice precipitátů skutečně velmi malé a musí být velmi blízko sebe. Tato konfigurace je schematicky znázorněna na obr. 3.7.

Pro stanovení střední mezičásticové vzdálenosti existuje celá řada vztahů, namátkou můžeme uvést:

$$\lambda = \frac{4 \cdot (1 - V_f) \cdot r}{3 \cdot V_f} \quad \text{rov. 3.6}$$

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{N_v} \cdot d} - \frac{2}{3} \cdot d \quad \text{rov. 3.7}$$

Pro konstantní objemový zlomek precipitátů platí, že mezičásticová vzdálenost je tím menší, čím menší je poloměr částic (protože roste jejich počet).



Obr. 3.7 Charakteristické rozložení precipitátů pro zajištění optimálního precipitačního zpevnění.

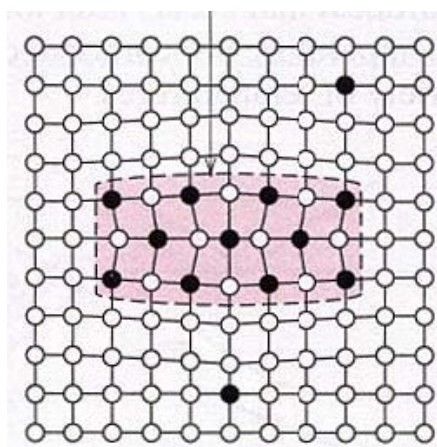
V případě precipitačního zpevnění jsou tedy překážkami pro pohyb dislokací částice precipitátů. Mají-li se dislokace pohybovat v kovové matici, kde jsou částice jiných fází, často i s jiným typem krystalové mřížky, je k jejich pohybu zapotřebí vyššího napětí, což tedy znamená zpevnění, tj. zvýšení meze kluzu.

Pohybuje-li se dislokace v matici, v níž jsou přítomny částice precipitátů, jsou v zásadě možné dva mechanismy vzájemné interakce dislokace a precipitátu. To, který mechanismus se uplatní, závisí primárně na velikosti precipitátu a na jeho charakteru.

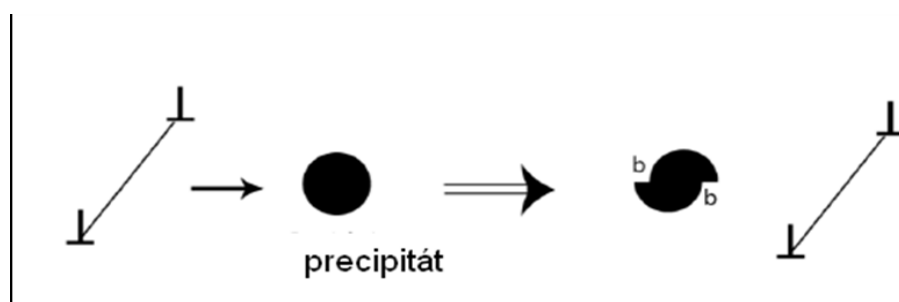
▪ Mechanismus protínání precipitátů dislokacemi

V případě, že precipitáty jsou malé a tak zvaně koherentní s kovovou maticí, uplatní se **mechanismus protínání precipitátů dislokací**. Musíme ale vysvětlit, co je to tzv. koherentní precipitát. Koherence je slovo pocházející z latiny a znamená mj. spojitost. Koherentní

precipitát je takový precipitát, u něhož existuje spojitost jeho krystalografických rovin s krystalografickými rovinami v matici. Můžeme tedy říci, že určité krystalografické roviny matrice přecházejí spojitě do krystalografických rovin precipitátu a následně opět do krystalografických rovin matrice. Případný nesoulad mřížkových parametrů precipitátu a kovové matrice se vyrovnává elastickou deformací. Koherentními precipitáty jsou u většiny materiálů částice do velikosti cca 10 nm, tedy částice jen velmi malé. Příklad koherentního precipitátu je uveden na obr. 3.8. Na obr. 3.9 je pak znázorněn mechanismus protínání precipitátu dislokací.



Obr. 3.8 Příklad koherentního precipitátu



Obr. 3.9 Schematické znázornění protínání precipitátu dislokací

Jak je vidět na obr. 3.9, při protínání precipitátu jednou dislokací dochází k posunutí dvou částí precipitátu (nad a pod rovinou skluzu, v níž se dislokace pohybuje) o hodnotu Burgersova vektoru dislokace b . Příklad protínání částic precipitátů Ni_3Si v soustavě Ni-6% Si je uveden na obr. 3.10. *(Jedná se o příklad poměrně výjimečný, protože si můžete všimnout, že v tomto případě jsou částice precipitátů mimořádně velké.)*

Pro přírůstek zpevnění vyvolaný protínáním precipitátů dislokacemi byla odvozena celá řada vztahů. Jedná se většinou o vztahy semiempirické, a tak se od sebe liší. Nejjednodušší vztah je např.:

$$\Delta R_e \cong \frac{\gamma_{M-P} \cdot \pi \cdot r}{b \cdot \lambda} \quad \text{rov. 3.8}$$

kde γ_{M-P} je měrná povrchová energie rozhraní matrice – precipitát (dosahuje obvykle hodnot 0,01-0,03 J.m⁻²);

r je poloměr precipitátu;

λ je střední mezičásticová vzdálenost;

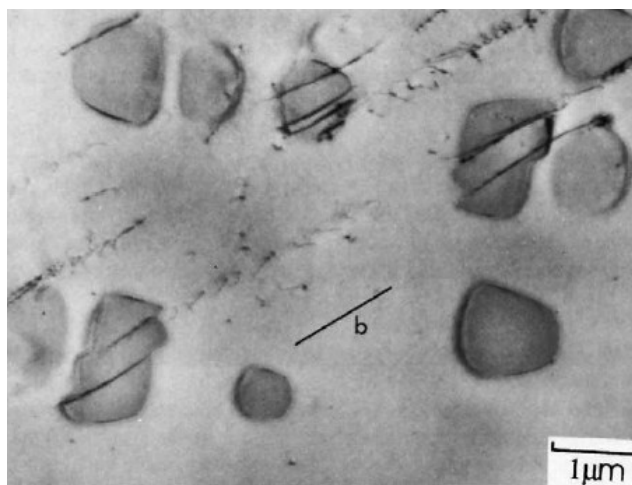
b je Burgersův vektor dislokace.

Při uvažování deformace ε v důsledku rozdílu parametrů mřížky matrice a precipitátu dostáváme např. vztah:

$$\Delta R_e \cong \text{konst.} \cdot \varepsilon^{4/3} \cdot V_f^{2/3} \cdot \left(\frac{r}{b} \right)^{1/3} \quad \text{rov. 3.9}$$

kde ε je elastická deformace vyvolaná rozdílem mřížkových parametrů matrice a precipitátu;

V_f je objemový zlomek precipitátu.



Obr. 3.10 Protínání částic Ni₃Si v soustavě Ni-6%Si (zobrazeno metodou transmisní elektronové mikroskopie)

Nám bude stačit, když si zapamatujeme, že v případě mechanismu protínání precipitátů dislokacemi platí, že čím jsou precipitáty větší, tím je přírůstek zpevnění vyšší. (To vyplývá z toho, že v obou rovnicích 3.8 a 3.9 se poloměr precipitátu objevuje v čitateli).

Řešený příklad:

S využitím rovnice 3.8 určete přírůstek zpevnění (zvýšení meze kluzu) precipitačním zpevněním karbidickými precipitáty v oceli, uvažujeme-li povrchovou energii rozhraní $0,02 \text{ J.m}^{-2}$, střední poloměr precipitátů 20 nm a střední mezičásticovou vzdálenost 50 nm .

Řešení:

Dosadíme do rovnice 3.8 (jen pozor na jednotky, vše budeme dosazovat v základních jednotkách SI a až konečný výsledek převedeme na MPa).

Platí tedy:

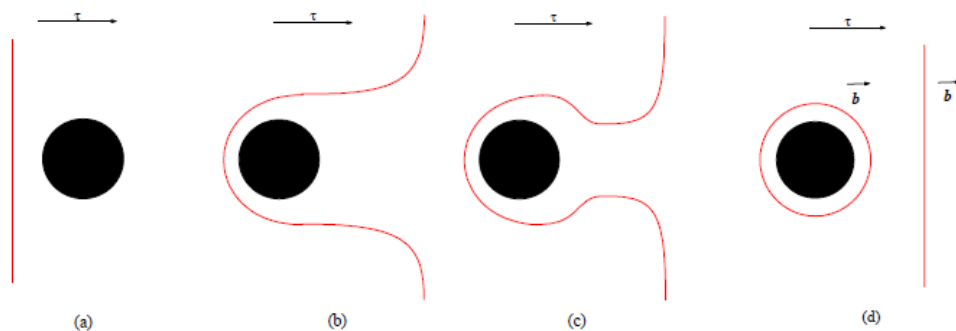
$$\Delta R_e \cong \frac{\gamma_{M-P} \cdot \pi \cdot r}{b \cdot \lambda} = \frac{0,02 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-9}}{2,8 \cdot 10^{-10} \cdot 50 \cdot 10^{-9}} = 224 \cdot 10^6 \text{ N.m}^{-2} = 224 \text{ MPa}$$

Závěr: pro zadané hodnoty vyvolá protínání precipitátů dislokacemi v oceli s karbidickými precipitáty zvýšení meze kluzu o 224 MPa .

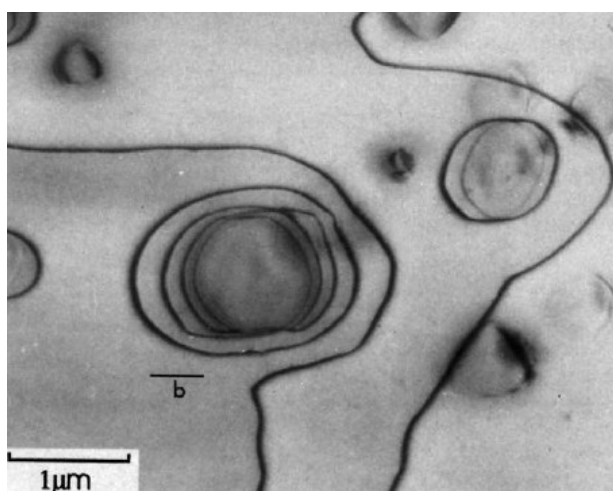
▪ Mechanismus obcházení precipitátů dislokacemi

Jsou-li částice precipitátů větší a precipitáty již nejsou koherentní s maticí (tzn. už neexistuje spojitost krystalografických rovin v matici a precipitátu), nemůže se uplatnit mechanismus protínání precipitátů, ale může se uplatnit jiný mechanismus interakce precipitátů a dislokací. Tím mechanismem je tzv **obcházení precipitátů dislokacemi**. Tento mechanismus poprvé popsal pan Orowan a říká se mu tedy často Orowanův mechanismus. Princip tohoto mechanismu je schematicky znázorněn na obr. 3.11.

Mechanismus obcházení precipitátů dislokacemi funguje následovně: Pokud se v materiálu pohybuje dislokace a blíží se k precipitátu, který není koherentní, a nemůže ho tedy protnout, začne se dislokace v blízkosti precipitátu postupně zakřivovat, až vytvoří okolo precipitátu uzavřenou dislokační smyčku. Rovné části dislokace se po obejití precipitátu opět spojí a dislokace se může pohybovat dále. Na obcházení precipitátů je zapotřebí vyšší napětí, které znamená zpevnění, tj. zvýšení meze kluzu. Příklad obcházení částic precipitátů Ni_3Si dislokacemi v soustavě Ni-6% Si je uveden na obr. 3.12.



Obr. 3.11 Princip obcházení precipitátů dislokacemi

Obr. 3.12 Obcházení částic Ni_3Si dislokacemi v soustavě Ni-6%Si (zobrazeno metodou transmisní elektronové mikroskopie)

Přírůstek zpevnění při obcházení precipitátů dislokacemi může být opět vyjádřen celou řadou různých vztahů, uvedeme ale jen jeden. Přírůstek zpevnění lze popsat vztahem:

$$\Delta R_e \cong \text{konst.} \cdot \frac{G \cdot b \cdot V_f^{1/2}}{r}, \quad \text{rov. 3.10}$$

jednotlivé členy už byly popsány v předchozích rovnicích.

Podstatné je, že ve vztahu 3.10 figuruje poloměr částic precipitátů ve jmenovateli, což znamená, že při obcházení precipitátů je zpevnění tím vyšší, čím jsou precipitáty menší. Vyplyvá to z toho, že na zakřivení dislokace je potřeba tím vyššího napětí, čím je poloměr zakřivení dislokace menší.

Srovnáme-li oba mechanismy interakce precipitátů s dislokacemi, můžeme uvést, že maximálního zpevnění je dosaženo v oblasti, kdy mechanismus protínání precipitátů přechází v mechanismus obcházení precipitátů dislokacemi.

Precipitační zpevnění je využíváno v celé řadě ocelí, např. všechny oceli pro použití za zvýšených teplot (v různých uzlech tepelných elektráren) jsou založeny na precipitačním zpevnění. Toto zpevnění se využívá také u celé řady neželezných kovů, např. ve slitinách hliníku, mědi, niklu apod.

V případě precipitačního zpevnění platí (podobně jako v případě zpevnění plastickou deformací), že jeho negativním rysem je pokles plastických vlastností materiálu, tj. pokles houževnosti. V případě precipitačního zpevnění však není pokles houževnatosti tak dramatický jako v případě zpevnění plastickou deformací.



Shrnutí pojmů 3.3.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **zpevnění precipitační;**
- **protínání precipitátů dislokacemi;**
- **koherentní precipitát;**
- **obcházení precipitátů dislokacemi – Orowanův mechanismus.**



Otázky 3.3.

13. Co rozumíme pojmem precipitáty?
14. Které stereologické parametry precipitátů jsou nejdůležitější z hlediska možné míry precipitačního zpevnění?
15. Jaká je základní podmínka, kterou by měly splňovat precipitáty, aby bylo precipitační zpevnění účinné?
16. Jak lze charakterizovat koherentní precipitáty?
17. Jaký mechanismus interakce se uplatňuje mezi koherentními precipitáty a dislokacemi?
18. Jak závisí přírůstek zpevnění při protínání precipitátů na poloměru precipitátů?
19. Do jaké velikosti precipitátů se obvykle může uplatnit mechanismus protínání precipitátů?
20. Jak se vyrovnává mřížkový nesoulad mezi maticí a precipitáty v případě koherentních precipitátů?
21. Jaký útvar zanechá dislokace okolo precipitátů v případě obcházení precipitátů dislokacemi?
22. Jak závisí přírůstek zpevnění při obcházení precipitátů na poloměru precipitátů?

3.4. Zpevnění tuhého roztoku



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování této části budete schopni:

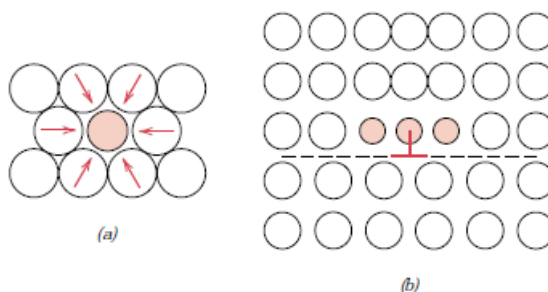
- vysvětlit podstatu zpevnění tuhého roztoku;
- charakterizovat rozdíl mezi tzv. elastickou interakcí a modulovou interakcí.



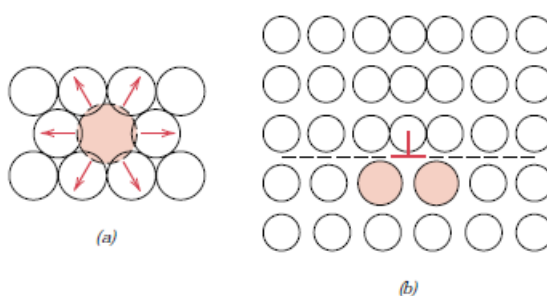
Výklad

Zvýšení meze kluzu kovových materiálů mohou vyvolat i atomy příměsí, které jsou rozpuštěny v matici, tzn. tvoří se základní složkou tuhý roztok. Zpevnění tuhého roztoku mohou vyvolat jak substitučně rozpuštěné atomy, tak intersticiálně rozpuštěné atomy.

Rozpuštěné atomy mají obecně jinou velikost než základní atomy v matici, což vyvolá v blízkosti rozpuštěného atomu napětové pole a s ní související elastickou distorzi mřížky. Atomy prvků o menším poloměru vyvolávají lokální smrštění krystalové mřížky, resp. jsou přednostně umístěny v oblastech tahového pole dislokací (obr. 3.13a,b). Naproti tomu atomy prvků o větším poloměru, než je poloměr atomů základního prvku, vyvolávají roztažení (dilataci) krystalové mřížky, nebo se mohou umísťovat do oblastí tahového pole dislokací (obr. 3.14a,b). Pro pohyb dislokací je v dané oblasti zapotřebí vyššího napětí, což znamená zpevnění materiálu, resp. přesněji zvýšení jeho meze kluzu.



Obr. 3.13 Umístění rozpuštěných atomů o menším poloměru v krystalové mřížce



Obr. 3.14 Umístění rozpuštěných atomů o větším poloměru v krystalové mřížce

Přírůstek zpevnění závisí jednak na míře distorze mřížky, kterou rozpuštěný prvek vyvolá, jednak na jeho koncentraci.

Z existujících vztahů, které popisují přírůstek zpevnění od substitučně rozpuštěných atomů, zde uvádíme jen jeden:

$$\Delta R_e \cong G \cdot b \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{c} \quad \text{rov. 3.11}$$

kde G je modul pružnosti materiálu ve smyku;

b je Burgersův vektor dislokace;

ε je elastická deformace vyvolaná rozpuštěným atomem;

c je koncentrace rozpuštěného prvku.

Výše popsanému zpevnění rozpuštěnými prvky se někdy také říká **elastická interakce**.

Mimo elastické interakce se na zpevnění rozpuštěnými atomy může podílet i tzv. **modulová interakce**, která vyjadřuje skutečnost, že pro některé prvky je jejich vazebná energie se základním prvkem vyšší než vazebná energie mezi atomy základního prvku. To se projeví mj. zvýšením modulu pružnosti ve smyku materiálu a odpovídající přírůstek zpevnění lze vyjádřit následovně:

$$\Delta R_e \approx \Delta G \cdot \sqrt{c} \quad \text{rov. 3.12}$$

kde ΔG je zvýšení modulu pružnosti ve smyku;

c je koncentrace rozpuštěného prvku.

V případě ocelí se často používá jednoduchých empirických vztahů, které zahrnují vliv vyššího počtu rozpuštěných prvků, přičemž se pro přírůstek zpevnění předpokládá aditivní charakter:

$$\Delta R_e = \sum_{i=1}^n k_i \cdot c_i \quad \text{rov. 3.13}$$

kde k je konstanta rozdílná pro každý rozpuštěný prvek (viz tab. 3.1);
 c je koncentrace rozpuštěného prvku v hm. %.

Tab. 3.1. Konstanty k pro zpevnění tuhého roztoku ocelí substitučně rozpuštěnými atomy

Prvek	P	Si	Ti	Mn	Cr	Mo	V
Konstanta k	350	80	100	50	-10	22	24

Z tabulky 3.1 je vidět, že vůbec nejvyšší zpevnění tuhého roztoku v oceli by zajistil fosfor, ale vzhledem k tomu, že se jedná o prvek škodlivý, nelze toho v praxi příliš využít. Z praktického hlediska je v případě ocelí nejvýznamnější zpevnění rozpuštěnými atomy křemíku.



Shrnutí pojmů 3.4.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **zpevnění tuhého roztoku;**
- **elastická interakce;**
- **modulová interakce.**



Otázky 3.4.

23. Na čem je založeno zpevnění tuhého roztoku?
24. Co rozumíme pojmem elastická interakce?
25. Co rozumíme pojmem modulová interakce?
26. Který prvek by v oceli zajistil nejvyšší úroveň zpevnění tuhého roztoku?
27. Který prvek je pro zpevnění tuhého roztoku ocelí nejdůležitější z praktického hlediska?

	Klíč k řešení – odpovědi na otázky ke kapitole 3
O1	Překážkou pro pohyb dislokací jsou dislokace vzniklé při předchozí plastické deformaci.
O2	Deformační zpevnění, nebo zpevnění tvářením za studena.
O3	Hustota dislokací je podíle délek dislokačních čar a objemu materiálu.
O4	Míra zpevnění plastickou deformací závisí přednostně na hustotě dislokací.
O5	Zpevnění plastickou deformací se využívá např. u nízkouhlíkových ocelí, nebo ve slitinách mědi, hliníku apod.
O6	Hlavní nevýhodou zpevnění plastickou deformací je pokles houževnatosti materiálu.
O7	Překážkou pro pohyb dislokací jsou samy hranice zrn.
O8	Vyšší míra nakupení dislokací u hranice zrn a s tím související vyšší napětí od tohoto nakupení.
O9	Mez kluzu závisí přímo úměrně na převrácené hodnotě druhé odmocniny průměru zrna.
O10	Zpevnění hranicemi zrn je účinnější u materiálů s bcc mřížkou.
O11	Zrno má smysl zjemňovat cca na velikost 10-100 nm.
O12	Zpevnění hranicemi zrn se projevuje zvýšením houževnatosti materiálu.
O13	Precipitáty jsou drobné částice minoritních fází, karbidů, nitridů, intermetalických fází apod.
O14	Nejdůležitější stereologické parametry precipitátů jsou jejich průměr a střední mezičásticová vzdálenost.
O15	Aby bylo precipitační zpevnění účinné, musí být precipitáty malé a blízko sebe.
O16	Koherentní precipitáty jsou takové precipitáty, u nichž existuje spojitost krystalografických rovin precipitátu a matrice.
O17	U koherentních precipitátů dochází k jejich protínání dislokacemi.
O18	Při protínání precipitátů se zpevnění zvyšuje s rostoucím poloměrem precipitátů.
O19	Mechanismus protínání precipitátů se uplatňuje do velikosti precipitátů cca 10 nm.
O20	Mřížkový nesoulad mezi precipitáty a maticí se u koherentních precipitátů vyrovná elastickou deformací.
O21	V případě obcházení precipitátů zanechá dislokace okolo precipitátů dislokační smyčku.
O22	při obcházení precipitátů se přírůstek zpevnění snižuje s rostoucím poloměrem precipitátů.
O23	Zpevnění tuhého roztoku je založeno především na rozdílné velikosti rozpuštěných atomů a atomů základního prvku.
O24	Elastická interakce znamená zpevnění tuhého roztoku založené na rozdílné velikosti atomů rozp. prvků a základního prvku.
O25	Modulová interakce znamená zpevnění tuhého roztoku založené na vyšší vazebné energii mezi atomy rozpuštěného prvku a základního prvku.
O26	Nejvyšší úroveň zpevnění tuhého roztoku by v oceli zajistil fosfor.
O27	Z praktického hlediska je v ocelích nejvýznamnější zpevnění tuhého roztoku vyvolané rozpuštěnými atomy křemíku.



Další zdroje

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 2. opr. a rozš. vydání. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Pluhař, J. a kol.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. SNTL/ALFA, Praha, 1987, 418 s.

Strnadel B.: Nauka o materiálu. Konstrukční materiály a jejich degradační procesy. VŠB Ostrava, 1993. 1. vyd. 187 s. ISBN 80-7078-207-2.

Strnadel B.: Nauka o materiálu II. Degradační procesy a design konstrukčních materiálů. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.

Veles P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. ALFA Bratislava, 1989. 2. vyd. 408 s.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering. An Integrated approach. Hoboken: Wiley, 2008. 3rd ed. 882 p. ISBN 978-0-470-12537-3.

4. KOVOVÉ MATERIÁLY

4.1. Vlastnosti kovových materiálů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- rozdělit slitiny kovů
- vyjmenovat vlastnosti kovových materiálů
- vysvětlit rozdíl mezi doprovodnými a přísadovými prvky



Výklad

□ Rozdělení kovových materiálů

Kovové materiály se mohou vyskytovat ve formě čistých kovů nebo ve formě slitin. Ve zcela čistém stavu se kovy vyskytují jen zřídka, pokud mají mít dobré mechanické vlastnosti.

Slitiny kovů se dělí na slitiny železa a neželezných kovů a dále podle základního kovu, který je ve slitině obsažen hlavním podílem. Nejznámější a nejvíce rozšířené jsou **slitiny železa** (asi 12000 slitin Fe). Slitiny železa se dále rozdělují na oceli a litiny. Druhou nejrozšířenější skupinu slitin tvoří **slitiny mědi** (asi 5000 slitin Cu), kde je hlavním prvkem měď, a dělí se na mosazi, bronzы aj. **Slitiny hliníku** obsahují jako základní prvek hliník. Mezi slitiny hliníku (asi 2000 slitin) patří např. siluminy a duraly. Významnou skupinu tvoří **slitiny niklu**.

Kromě základního kovu se ve slitinách vyskytují další prvky, které nebyly odstraněny při samotné výrobě kovu, a tyto **prvky** se označují jako **doprovodné**. Prvky doprovodné se dostávají do oceli neúmyslně. Rozdělují se na škodlivé (nečistoty) a prospěšné, které vyvážejí nebo snižují vliv škodlivých prvků. Mezi nečistoty patří kyslík, síra, fosfor nebo vodík. **Prvky přísadové** neboli legující prvky, zkráceně legury, se přidávají do slitin úmyslně za účelem zlepšení jejich vlastností. Nejčastějšími přísadovými prvky jsou Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Co, Ti, Al, Cu, Zr, B, N, Be.

Další možné dělení kovových materiálů závisí např. na jejich vlastnostech (fyzikálních, mechanických, odolnosti vůči působení prostředí apod.), praktickém použití nebo způsobu výroby.

Podle hustoty můžeme kovové materiály rozdělit na lehké (slitiny Mg, Al, Ti) s hustotou $\rho < 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a těžké (slitiny Fe, Cu, Ni) s hustotou $\rho > 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Podle chemické stálosti rozdělujeme kovy na ušlechtilé (např. Pt, Au, Pd, Ag) a neušlechtilé (např. Mg, Fe, Zn). Podle způsobu výroby tvářením, litím nebo metodami práškové metalurgie rozlišujeme tvářené

slitiny, slitiny na odlitky a slinuté kovy. Podle způsobu použití rozlišujeme např. nástrojové oceli, pružinové oceli, ložiskové kovy, korozivzdorné oceli a další.

□ Vlastnosti kovových materiálů

Jak jsme si uvedli v předchozích kapitolách, vlastnosti materiálů jsou dány jeho vnitřní stavbou – strukturou materiálu, která závisí kromě chemického složení, vlastností atomů a molekul, také na technologii výroby a zpracování materiálu. Změnou technologie výroby nebo zpracování materiálu lze dosáhnout změny struktury a tím i jeho vlastností. Vlastnosti materiálu jsme si rozdělili do čtyř skupin na chemické, fyzikální, mechanické a technologické. Zvláštní skupinu vlastností tvořila odolnost vůči degradačním procesům. Chemické vlastnosti u kovů zastupuje odolnost proti korozi, fyzikální vlastnosti jsou např. elektrická a tepelná vodivost, magnetické vlastnosti aj.. Mechanické vlastnosti nejsou zcela jednoznačné, protože kovy mohou být jak měkké, tak pevné, jak houževnaté, tak docela křehké. Nejdůležitější technologické vlastnosti reprezentují tvárnost, kujnost a svařitelnost. Odolnost vůči degradačním procesům zastupuje odolnost vůči křehkému porušení.

Mechanické vlastnosti kovů jsou nejčastěji určeny materiálovými charakteristikami, získanými při tahové zkoušce. Základní pevnostní vlastnosti jsou mez pružnosti (mez kluzu) – R_e nebo $R_{p0,2}$ a mez pevnosti – R_m . Mez pružnosti (mez kluzu) R_e je maximální napětí, do něhož se materiál deformuje elasticky (vratně), mez pevnosti R_m je maximální napětí, které je materiál schopen přenášet bez vzniku defektů. Plastické vlastnosti kovů charakterizuje tažnost A , tj. poměrné prodloužení při lomu. Tažnost je spjata s houževnatostí: materiál s větší tažností se obvykle vyznačuje větší houževnatostí.

Modul pružnosti charakterizuje pružnost materiálu, což je odpor materiálu proti pružné deformaci při působení vnějších sil. Modul pružnosti většiny materiálů závisí na tuhosti vazby mezi atomy nebo ionty a na hustotě vazeb. Modul pružnosti (v tahu, někdy pojmenován v literatuře jako Youngův modul) E je dán poměrem napětí σ a deformace v tahu ε , modul ve smyku G je dán podílem napětí ve smyku τ a deformace ve smyku γ .

$$E = \sigma / \varepsilon \quad \text{rov. 4.1a}$$

$$G = \tau / \gamma \quad \text{rov. 4.1b}$$

Kovové materiály mají vysoký modul pružnosti v tahu (od 100 GPa u Zn-slitin do 400 GPa u W-slitin).

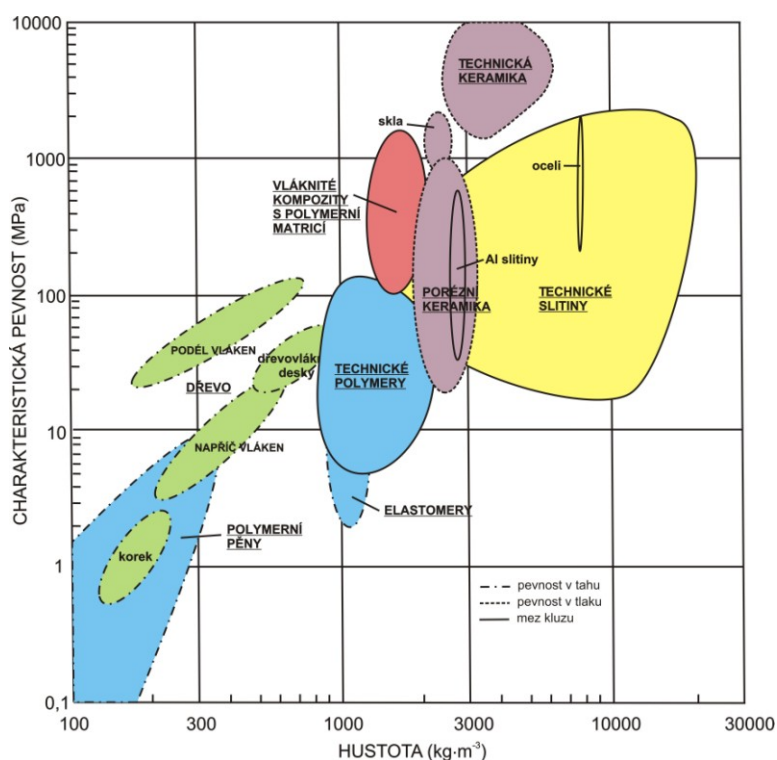
Pozn.: Známe-li E můžeme pro kovy s kubickou mřížkou vypočítat G podle vztahu $G=E/2(1+\mu)$, kde μ je bezrozměrné - Poissonovo číslo, vyjadřující poměr příčné kontrakce. Např. pro normální teplotu pro ocel a hořčíkové slitiny je $\mu=0,3$, pro litinu je $\mu=0,25$, pro hliník a jeho slitiny, bronz a mosaz je $\mu=0,35$,

Velmi často chceme, aby materiály a konstrukce z nich byly LEHKÉ a zároveň pevné, např. materiály pro letecký a automobilový průmysl. Hmotnost materiálu závisí na hustotě ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), která je definovaná jako hmotnost m (v kg) vztažená na objem materiálu V (v m^3).

$$\rho = m/V$$

rov. 4.2

Vztah mezi pevností a měrnou hmotností vyjadřuje specifická mez kluzu R_e/ρ , specifická pevnost R_m/ρ nebo specifický modul E/ρ . Tyto charakteristiky jsou důležité pro návrh materiálu. Závislost pevnostních charakteristik na hustotě základních skupin technických materiálů ukazuje obr. 4.1.



Obr. 4.1. Závislost pevnostních charakteristik na hustotě základních skupin technických materiálů.

Od většiny konstrukčních materiálů požadujeme, aby byly pevné a houževnaté. Kovové materiály jsou zatěžovány téměř výhradně v elastické oblasti. Chceme-li zvýšit pevnost kovových materiálů, znamená to, že chceme zvýšit jejich mez pružnosti (mez úměrnosti, mez kluzu), tj. napětí, do kterého se deformují pružně, tj. elasticky, vratně. Protože plastická deformace se uskutečňuje prostřednictvím pohybu dislokací, zvýšení meze pružnosti (kluzu) bude vycházet z podmínky, že musíme dislokacím zabránit nebo ztížit jejich pohyb, tj. postavit jim do cesty překážky.



Shrnutí pojmů 4.1

Slitiny kovů se dělí podle základního kovu, který je v ní obsažený hlavním podílem, na slitiny železa a neželezných kovů.

Doprovodné prvky se dostávají do oceli neúmyslně. Rozdělují se na škodlivé (nečistoty) a prospěšné.

Prvky přísadové (legující prvky, legury) se přidávají do slitin úmyslně za účelem zlepšení jejich vlastností.



Otázky 4.1

1. Jaké je základní rozdělení slitin kovů?
2. Vyjmenujete alespoň dva škodlivé prvky ve slitinách kovů?
3. Jakou funkci mají přísadové prvky?
4. Podle jakých dalších kritérií se rozdělují kovy?
5. Co je podstatou zpevnění materiálů?
6. Jakými způsobem dojde ke zpevnění kovů předchozí plastickou deformací?
7. Jak závisí zpevnění kovů na velikosti zrna?
8. Jaké mechanismy se uplatňují při interakci dislokace s částicemi při zpevnění kovů precipitáty?
9. Které zpevnění je účinnější intersticiálními nebo substitučními atomy?



Úlohy k řešení 4.1

1. Dokážete uvést (najít) využití některých skupin ocelí, např. konstrukčních ocelí, nástrojových ocelí, korozivzdorných ocelí, litin?
2. Dokážete uvést (najít) využití některých neželezných slitin, např. slitin Al, slitin Cu, slitin Ni?

4.2. Slitiny železa - oceli



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

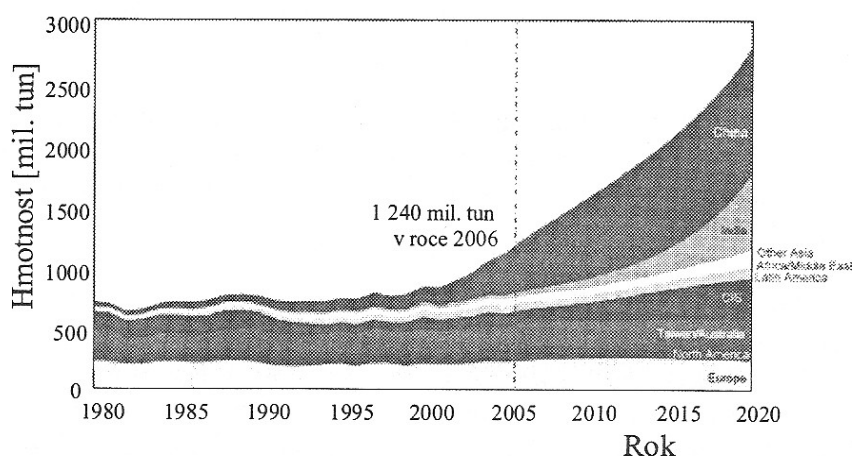
- vysvětlit, co jsou to oceli
- definovat na čem závisí vlastnosti ocelí
- umět zařadit oceli do skupin a znát jejich použití



Výklad

□ Železo a slitiny železa s uhlíkem

Slitiny železa představují nejvíce používaný konstrukční materiál ve strojírenství. Výroba oceli v posledních letech stále roste (obr. 4.2). Vzhledem k vysoké měrné hmotnosti představuje výroba oceli stále nejvyšší podíl celkové produkce materiálu. Vývoj slitin železa vede k novým typům ocelí, které konkurují ostatním konstrukčním materiálům jako plastům a hliníkovým slitinám. Vysoká měrná hmotnost slitin železa je kompenzována vysokými pevnostními vlastnostmi. Ze slitin na bázi železa se nejvíce rozvíjí výroba vysokolegovaných ocelí, a to především korozivzdorných ocelí, které se uplatňují nejen v potravinářském a chemickém průmyslu, ale stále více také ve stavebnictví. Významnou předností železa a jeho slitin je snadná recyklovatelnost a energetická nenáročnost v porovnání s výrobou slitin neželezných kovů.



Obr. 4.2. Celosvětová produkce oceli – prognóza.

□ Čisté železo

Čisté železo je měkký a tvárný kov s poměrně nízkou pevností. Jeho základní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.1.

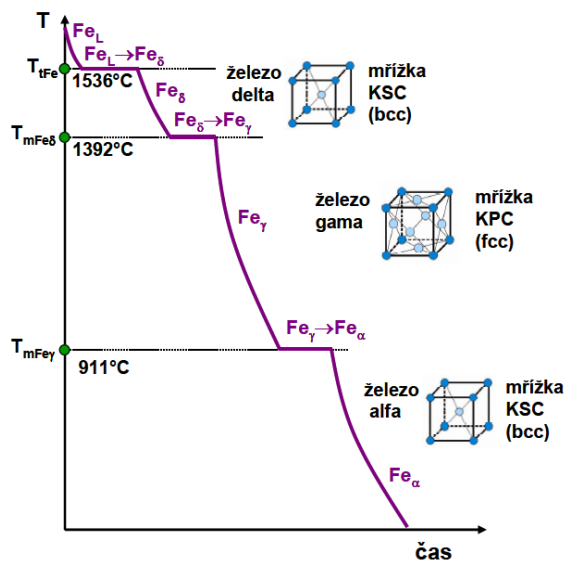
Tab. 4.1. Základní vlastnosti železa

Atomové číslo	26
Atomová hmotnost	55,847
Teplota tání	1536°C
Hustota	7,874 g/cm ³
Modul pružnosti v tahu	204 GPa
Mez pevnosti v tahu	180-250 MPa
Mez kluzu	80-140 MPa
Tažnost	50 %

Železo je prvek, u něhož se projevuje tzv. **alotropie**, tj. v pevném stavu se železo vyskytuje ve 3 rozdílných krystalových modifikacích:

- **železo delta (železo δ)** – je vysokoteplotní modifikace železa v pevném stavu. Má mřížku kubickou prostorově centrovanou (bcc) a je stabilní v teplotním intervalu 1536 - 1392°C.
- **železo gama (železo γ)** – je středně teplotní modifikace železa. Má mřížku kubickou plošně centrovanou (fcc) a je stabilní v teplotním intervalu 1392 - 911°C.
- **železo alfa (železo α)** – je nízkoteplotní modifikace železa. Má, stejně jako železo δ , mřížku kubickou prostorově centrovanou (bcc) a je stabilní pod teplotou 911°C.

Můžeme tedy říci, že železo má tři rozdílné krystalové modifikace, ale jen dva rozdílné typy krystalových mřížek. Jednotlivé krystalové modifikace a oblasti jejich stability jsou znázorněny na obr. 4.3.



Obr. 4.3. Krystalové modifikace čistého železa – křivka chladnutí, oblasti stability

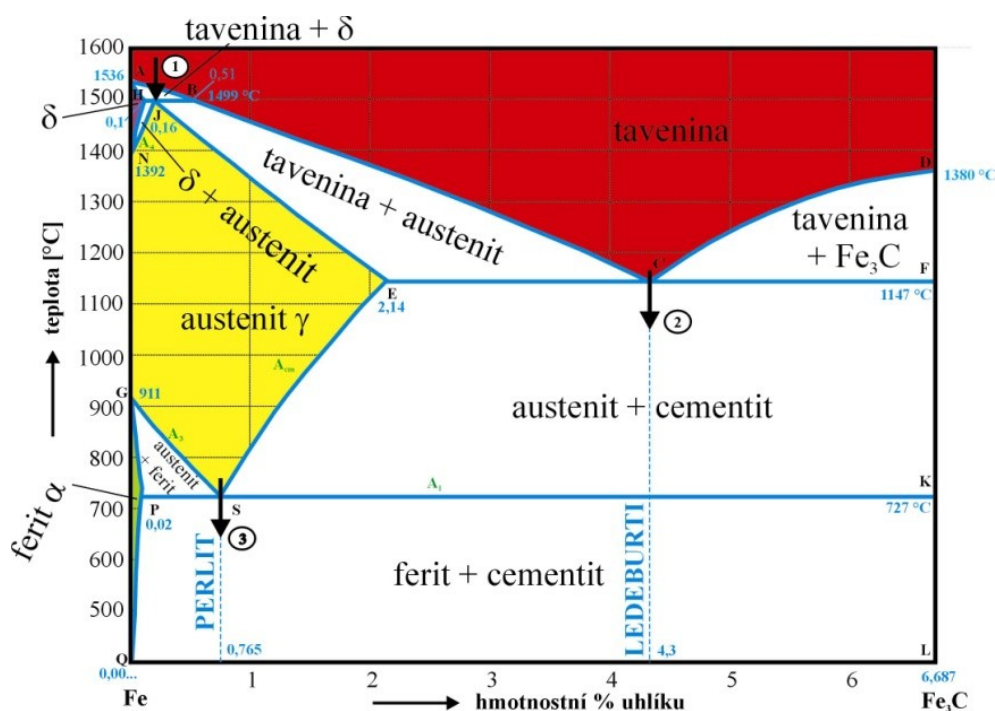
Na obr. 4.3 je zobrazena i křivka chladnutí čistého železa. Z ní je zřejmé, že fázové přeměny čistého železa v pevném stavu teoreticky probíhají, stejně jako tuhnutí, při konstantní teplotě a na křivce chladnutí se projeví existencí prodlevy.

□ Uhlík v železe

Uhlík se rozpouští v každé z modifikací železa, ale jen v poměrně malém množství. S ohledem na vztah mezi velikostí atomu železa a uhlíku vytváří uhlík v železe tzv. **intersticiální tuhý roztok**. To znamená, že atomy uhlíku jsou umístěny v dutinách krystalové mřížky jednotlivých modifikací železa. Rozpustnost uhlíku je rozdílná pro každou modifikaci železa.

- železo δ v sobě rozpustí max. 0,1 hm. % uhlíku, a to při teplotě 1499°C. Příslušný tuhý roztok se označuje jako **δ -ferit**.
- železo γ v sobě rozpustí max. 2,14 hm. % uhlíku, a to při teplotě 1147°C. Odpovídající tuhý roztok se nazývá **austenit** a označuje se γ .
- železo α v sobě rozpustí max. 0,02 hm. % uhlíku, a to při teplotě 727°C. Příslušný tuhý roztok se nazývá **ferit** a označuje se α .

Jednotlivé oblasti výskytu intersticiálních tuhých roztoků v rovnovážném diagramu metastabilní soustavy Fe – C jsou vyznačeny na obr. 4.4.



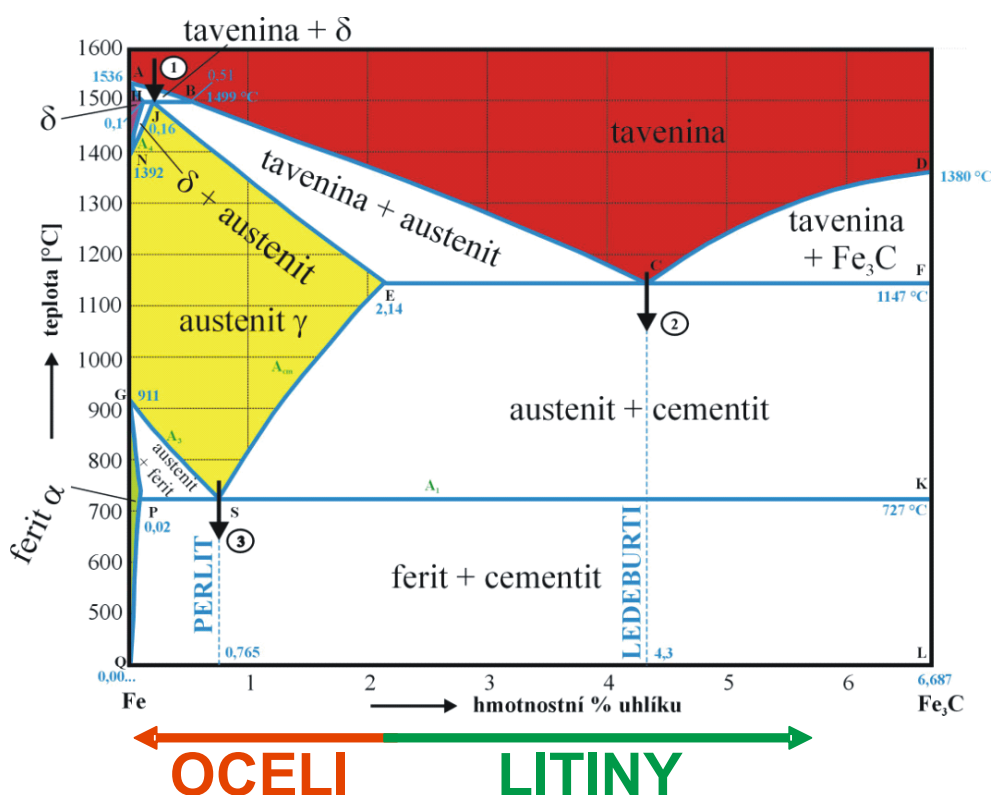
Obr. 4.4. Oblasti výskytu intersticiálních tuhých roztoků v rovnovážném diagramu metastabilní soustavy Fe – C.

Za povšimnutí stojí mnohem vyšší rozpustnost uhlíku v austenitu. To souvisí s typem krystalové mřížky. Austenit je tuhý roztok uhlíku v železe γ a má mřížku kubickou plošně centrovanou. Pro tento typ mřížky je charakteristická nízká difúzní schopnost atomu, tedy obtížná difúze, ale vyšší rozpustnost malých intersticiálních atomů, tj. atomů v dutinách mřížky. Tento významný rozdíl v rozpustnosti uhlíku ve dvou odlišných polymorfních formách železa má velký technický význam a to proto, že je na něm založeno celé tepelné zpracování ocelí.

A co se stane, pokud je v soustavě železo – uhlík více uhlíku, než je možné rozpustit v jednotlivých modifikacích železa? Uhlík nad mezí rozpustnosti může být přítomen jako karbid železa Fe_3C – **cementit**, nebo jako čistý uhlík, a to ve formě **grafitu**. Cementit má ortorombickou mřížku, je tvrdý a křehký, a maximální rozpustnost uhlíku v cementitu je asi 6,7 %. Naproti tomu grafit krystalizuje v hexagonální soustavě, je velmi měkký a křehký, obsahuje 100 % uhlíku. Pevnost, houževnatost a plastické vlastnosti závisí hlavně na způsobu vyloučení grafitu ve struktuře. Z termodynamického hlediska je soustava železo – uhlík s uhlíkem ve formě grafitu stabilnější než soustava železo – uhlík s uhlíkem ve formě karbidu železa (cementitu).

Slitiny železa a uhlíku se dělí na dvě základní skupiny, **oceli** a **litiny**, a to právě podle obsahu uhlíku. **Oceli** jsou slitiny železa s uhlíkem (a dalšími prvky), které obsahují méně než cca 2 hm. % uhlíku. **Litiny** jsou naopak slitiny železa s uhlíkem (a dalšími prvky), které

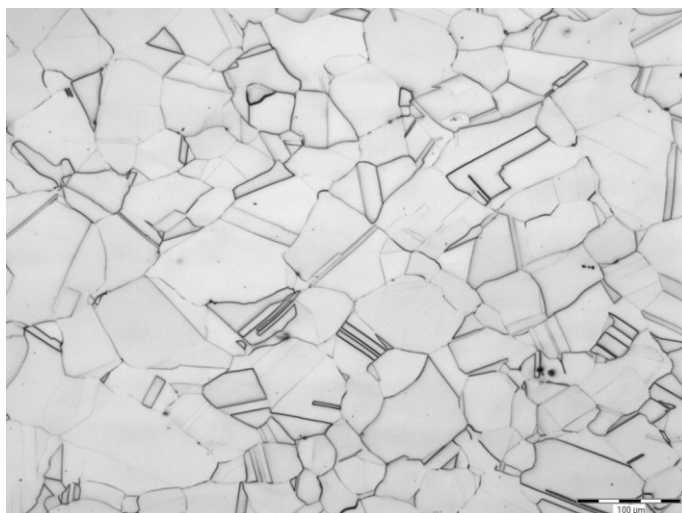
obsahují více než 2 hm. % uhlíku. Obsah uhlíku v litinách obvykle nepřesahuje 5 hm. %. Rozdělení slitin železa a uhlíku na oceli a litiny je uvedeno na obr. 4.5.



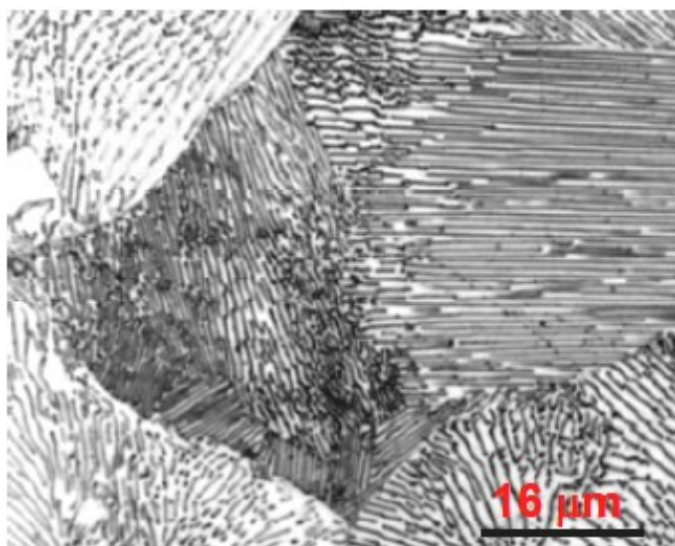
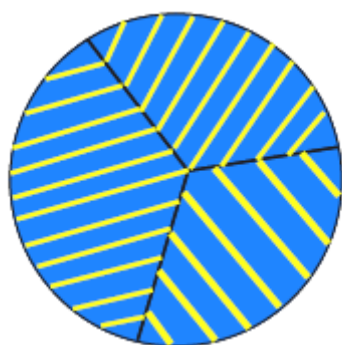
Obr. 4.5. Schematické rozdělení slitin železa a uhlíku v rovnovážném diagramu metastabilní soustavy Fe – C.

Pokud se v systému Fe-C vylučuje uhlík ve formě cementitu, litiny označujeme jako bílé. Slitiny, které obsahují uhlík ve formě grafitu, se nazývají grafitické (šedé) litiny.

Co se stane, když budeme ochlazovat austenit? Austenit, tedy intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe γ , existuje za zvýšených teplot a jeho maximální rozpustnost je 2,14 hm. % uhlíku při teplotě 1147°C (obr. 4.6). Které struktury vzniknou, závisí na podmínkách ochlazování, především na rychlosti ochlazování. Při pomalé rychlosti ochlazování (na vzduchu) dochází při teplotě 727°C k rozpadu austenitu na směs feritu a cementitu, které říkáme **perlit**. Perlit má charakteristickou lamelární strukturu a je přítomný ve struktuře konstrukčních i nástrojových ocelí (obr. 4.7). K rozpadu austenitu na perlit dochází difúzním mechanismem. Při zvýšené nebo vysoké rychlosti ochlazování (např. při ochlazování do vody nebo oleje) není už difúzní mechanismus možný nebo je omezený jen na malé intersticiální prvky jako je uhlík, a proto vznikají jiné strukturní složky – **bainit a martenzit**, které se vyznačují vyšší tvrdostí a pevností, ale také nižší houževnatostí.



Obr. 4.6. Struktura austenitu.



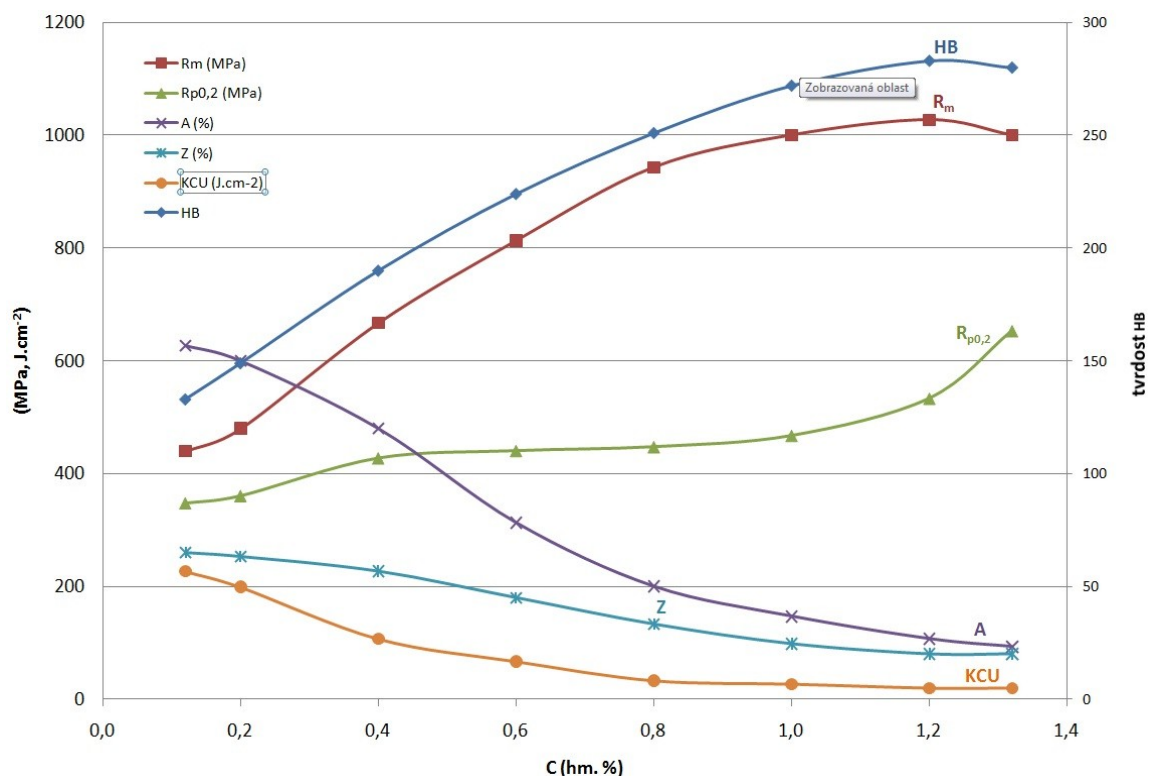
Obr. 4.7. Struktura perlitu. Jsou vidět hranice původních austenitických zrn a lamely cementitu (na náčrtu žluté, na snímku šedé), které se střídají s lamely feritu (na náčrtu modré, na snímku vpravo bílé).

Oceli mají stále široké uplatnění, protože jejich vlastnosti se dají měnit jednak chemickým složením, ale i způsobem zpracování jako je např. tepelné zpracování nebo tváření. Oceli mohou být měkké a tvárné, ale také pevné, tvrdé a relativně křehké. **Mez pevnosti se u ocelí pohybuje v rozmezí 350 – 2000 MPa.** V současné době je trend vyrábět oceli, které mají vyšší užité vlastnosti, které jsou zároveň pevné, ale taky houževnaté.

□ Vliv prvků na vlastnosti

Vlastnosti ocelí jsou ovlivněny množstvím uhlíku a přítomností ostatních prvků v oceli.

Uhlík nelze považovat v ocelích za legující prvek, protože je součástí binárního systému se železem. Uhlík má však podstatný vliv na pevnost, tvrdost a kalitelnost ocelí (*pozn. kalitelnost je schopnost oceli dosáhnout při dostatečně rychlém ochlazování z oblasti austenitu nerovnovážné struktury – bainitu nebo martenzitu*). S rostoucím obsahem uhlíku roste pevnost R_m a tvrdost HB , avšak plastické vlastnosti A , Z a houževnatost KCU klesají (obr. 4.8).



Obr. 4.8. Závislost mechanických vlastností na obsahu uhlíku.

Škodlivé doprovodné prvky (nečistoty) se snažíme snížit na minimum. Jejich množství v oceli závisí na kvalitě vstupních surovin a výrobním procesu. Podle množství nečistot se určuje jakost oceli. Nejběžnějšími nečistotami jsou síra, fosfor, kyslík, dusík a vodík.

Síra se dostává do oceli jednak z rud a také z paliva. V ocelích se vyskytuje v obsazích několik setin (obvykle nižší než 0,020 hm. %) až tisícín např. u ocelí používaných za snížených teplot. Síra tvoří se železem sulfidy FeS s nízkou teplotou tavení ($985^\circ C$), které se soustřeďují v trojbodech (na styku tří zrn) a následně podél obvodu austenitických zrn a zeslabují jejich soudržnost. To způsobuje problémy při tváření za tepla. Nepříznivý vliv síry se kompenzuje přidávkem manganu, který má k síře vyšší afinitu (lépe se s ní váže) a vytváří sulfidy MnS . Jejich teplota tavení je vyšší ($1620^\circ C$) a tvar je kulovitý, takže mnohem méně

ovlivňují mechanické vlastnosti oceli. Při tváření se však tyto sulfidy deformují ve směru řádků a jsou příčinou anizotropie vlastností. Síra zhoršuje také svařitelnost a snižuje korozní odolnost. Příznivě však působí síra na obrobitelnost, při obrábění se tvoří krátké třísky, a proto se u tzv. automatových ocelí zvyšuje obsah síry až na 0,2 – 0,3 hm. %. Protože síra zlepšuje i třecí vlastnosti, zvýšený obsah síry snižuje tření mezi nástrojem a obráběným předmětem.

Fosfor se do oceli dostává z použitých surovin a v běžných ocelích je nežádoucím prvkem. V ocelích se fosfor rozpouští v tuhém roztoku austenitu γ . Podobně jako síra fosfor segreguje na hranice zrn a vyvolává popouštěcí křehkost, snižuje vrubovou houževnatost, zvyšuje přechodovou teplotu, zhoršuje svařitelnost, zvyšuje sklon k lámavosti za studena. Obsah fosforu se může v oceli pohybovat až do 0,08 hm. %, s nižším obsahem než 0,05 hm. % se zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi. V grafitických litinách se vytváří při vysokém obsahu fosforu (15,6 hm. %) fosfid železa Fe_3P , který je tvrdý a nízkotavitelný. S vyšším obsahem fosforu roste zabíhavost litin, tvrdost, odolnost proti opotřebení a zvyšuje se součinitel tření.

Kyslík se dostává do oceli během výroby při zkujňování železa, ale následně se odstraňuje při desoxidaci přídavkem prvků, které mají vyšší afinitu ke kyslíku (Al, Si, Ca). Kyslík, který zůstane v oceli, je vázán na oxidy nebo křemičitany. Kyslík a síra jsou hlavními zdroji vměstků (nežádoucí sloučeniny doprovodných prvků) v oceli. Ty zhoršují vrubovou houževnatost a zvyšují přechodovou teplotu.

Dusík se dostává do oceli z pecní atmosféry. Maximální rozpustnost dusíku v oceli je 0,1 hm. % při teplotě 585°C, ale běžně ho oceli obsahují tisícinu až 0,02 hm. %. Dusík podporuje vznik mezikrystalové koroze pod napětím, kdy se na hranicích zrn vylučují stabilní nitridy železa Fe_4N . To vede ke snížení vrubové houževnatosti, zvýšení přechodové teploty, zvýšení meze kluzu a poklesu tvárnosti za studena. Tento jev se nazývá stárnutí oceli.

Vodík se do oceli dostává při výrobě z pecní atmosféry a vlhkosti vsázky, ale i při další výrobě (např. při moření v kyselinách nebo při svařování). Vodík se dostává do oceli v atomární formě a má ze všech prvků největší difúzní schopnost. Přebytný vodík se vylučuje v místech poruch, kde vznikají molekuly vodíku, které vyvolávají vysoké pnutí. To může vést až ke vzniku trhlin a porušení materiálu. Pro odstranění vodíku z oceli se používá žihání při teplotách 680 až 700°C, při kterém vodík oddifunduje z materiálu. Vyšší obsah vodíku, i když nezpůsobí přímo porušení materiálu, vede ke snížení tažnosti a kontrakce.

Další škodlivé prvky jako **cín**, **antimon** a **arsen** se vyskytují v oceli v tisícinách hm. %, segregují na hranice zrn a způsobují pokles vrubové houževnatosti.

Příznivé doprovodné prvky působí na zmírnění nebo odstranění negativního účinku nečistot. Mezi nejvýznamnější patří mangan a křemík.

Mangan je obsažen ve všech ocelích jako základní desoxidační a odsiřovací přísada v množství 0,1 až 0,8 hm. %. Je rozpustěný ve feritu a mírně zvyšuje jeho pevnost a

houževnatost. Mangan má vyšší afinitu ke kyslíku i k síře než Fe a vytváří méně škodlivé oxidy MnO a sulfidy MnS.

Křemík je stejně jako mangan desoxidačním prvkem. Jako desoxidační přísada nepřekračuje 0,5 hm. %. Křemík zvyšuje pevnost a tvrdost, zhoršuje však tvařitelnost, snižuje tepelnou a elektrickou vodivost. V litinách podporuje grafítizaci.

Slitinové prvky (legury) se do oceli přidávají úmyslně ke zlepšení požadovaných vlastností. Jejich obsah může být od několika setin procent (např. u bóru) do desítek procent (např. u chromu nebo niklu). Nejčastějšími legujícími prvky jsou Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, podle kterých se oceli obvykle nazývají (ocel manganová, chromová, chrom-niklová). Dalšími legujícími prvky jsou Co, Ti, Al, Cu, Nb, Zr, B, N, Be.

Prvky jako Mn, Si, Ni, Mo, V, W a Cr **zvyšují mechanické vlastnosti**, zejména pevnost a tvrdost při zachování vyhovující houževnatosti.

Prokalitelnost, tj. schopnost oceli dosáhnout zakalené struktury do určité hloubky, zvyšují legující prvky jako Cr, Mn, Mo, V, Ni a B.

K **dosažení jemnozrnné struktury** se oceli legují Al, Ti, Nb, Ta a V.

Tvrdost a odolnost proti opotřebení zvyšuje přísada karbidotvorných prvků Cr, Mo, V, W. Pokud jsou tyto karbidy vhodně rozloženy ve struktuře, zvyšují i žárupevnost, tedy odolnost za vysokých teplot.

Korozivzdornost zvyšuje přísada Cr, Ni, Mo, Si, Cu.

Ti, Nb a Ta vytvářejí stabilní karbidy a zabraňují mezikrystalové korozi u korozivzdorných ocelí legovaných Cr.

Cr, Si, Al vytvářejí stabilní oxidy a zvyšují **odolnost proti oxidaci** za vysokých teplot.

Legující prvky obvykle vytvářejí substituční tuhé roztoky. Do obsahu 2 hm. % zvyšují pevnost, aniž by snižovaly plastické vlastnosti nebo houževnatost. Při vyšších koncentracích přírůstek pevnostních vlastností klesá a roste pokles plastických vlastností a houževnatosti. Účinnější je kombinace více legujících prvků než vyšší obsah jednoho přísadového prvku.

❑ Rozdělení a značení ocelí (*značení ocelí uvádíme jen pro informaci*)

Oceli rozdělujeme podle způsobu zpracování na **oceli ke tváření** a **oceli na odlitky**, podle použití na **konstrukční a nástrojové**, podle chemického složení **obvyklých jakostí** (uhlíkové, nelegované) a **ušlechtilé** (legované).

Oceli k tváření se podle původní ČSN normy (ČSN 42 0002) rozdělovaly do 10 tříd podle chemického složení a s tímto označením ocelí se v praxi stále setkáváme. Značka oceli se skládá z pěti čísel a dalšího dvojčíslí, odděleného tečkou. Obecně označení oceli vypadá následovně:

Ocel 1X₁ X₂X₃X₄.X₅X₆.

Význam jednotlivých číslic je charakteristický pro danou třídu oceli.

X₁ spolu s 1 označují třídu oceli 10-19.

	tř. 10, 11, 12 jsou konstrukční uhlíkové oceli (nelegované),
	tř. 13, 14, 15 a 16 jsou konstrukční oceli nízko a středně legované,
	tř. 17 značí korozivzdorné oceli,
	tř. 18 oceli vyrobené práškovou metalurgií a
	tř. 19 jsou nástrojové oceli (uhlíkové a legované).
X ₂ a X ₃	u tř. 10 a 11 značí pevnost v desetinách MPa (min. 30), u automatových ocelí značí střední obsah C.
X ₂	u tř. 12 až 16 součet středních obsahů legujících prvků v celých % (u tř. 12 rovno nule).
X ₃	u tř. 12 až 16 střední obsah C v desetinách hm. %.
X ₄	blíže určené oceli (viz materiálové listy).
X ₅	konečný stav oceli daný posledním tepelným zpracováním (nežíhaný, žíhaný, zušlechtěný).
X ₆	stupeň konečného zpevnění tvářením za studena.

Příklad: Ocel 12 071.21 značí konstrukční uhlíkovou ocel třídy 12, obsah uhlíku je 0,7 hm. % (může se pohybovat v rozmezí 0,62 až 0,72 hm. %), rekrystalizačně žíhanou, za studena dovalcovanou. Podle materiálového listu o pevnosti $R_m = 570$ až 740 MPa a tažnosti min. 13 %.

Podle evropské normy (EN 10020) a nové české normy (ČSN EN 10020-94) jsou **oceli k tváření** definovány jako slitiny Fe o obsahu $C < 2$ hm. %, které mají obsah Fe větší než obsah kteréhokoliv jiného prvku obsaženého ve slitině. Podle chemického složení se dělí na **nelegované**, kde obsah žádného prvku nepřekročí mezní obsah prvků (tabulka 4.2), a **legované**, u kterých alespoň jeden prvek překročí min. obsah. Označení ocelí je buď podle jejich použití (např. S značí ocelové konstrukce, R kolejnice, E strojní součásti) nebo podle jejich chemického složení.

Tabulka 4.2: Mezní obsah prvků nelegovaných ocelí podle ČSN EN

Al	B	Bi	Co	Cr	Cu	La	Mn	Mo	Nb	Ni
0,1	0,0008	0,1	0,1	0,3	0,4	0,05	1,65	0,08	0,06	0,3
Pb	Se	Si	Te	Ti	V	W	Zr	Ostatní bez C, P, S, N		
0,4	0,1	0,5	0,1	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05		

Nelegované oceli rozdělujeme do tří hlavních skupin jakosti:

Nelegované oceli obvyklých jakostí nejsou určeny pro tepelné zpracování (kromě základních druhů žíhání), mají stanoveny minimální hodnoty $R_m < 690$ MPa, $R_e < 360$ MPa, $A_5 < 26$ % a předepsaný obsah Si a Mn.

Nelegované jakostní oceli nemají předepsané požadavky na stupeň čistoty (pokud se týká nekovových vměstků), ale jsou na ně kladeny vyšší nároky při namáhání. Nelegované jakostní oceli s obsahem $Mn < 1$ hm. % určené k zušlechťování (odpovídají podle ČSN tř. 12) se značí písmenem C, dvojčíslím označujícím 100x střední hodnoty obsahu C v hm. % a písmenem označujícím bližší vlastnosti nebo použití oceli

Pozn. Zušlechťování je režim tepelného zpracování.

Příklad:

C35E je nelegovaná ocel, střední obsah C = 0,35 hm. %, se stanoveným max. obsahem síry.

Nelegované jakostní oceli s obsahem $Mn > 1$ hm. %, nelegované automatové oceli a legované oceli se středním obsahem jednotlivých legujících prvků pod 5 hm. % (ne rychlořezné), jsou určené k zušlechťování (odpovídají podle ČSN tř. 13 až 16) a značí se dvojčíslím označujícím 100x střední hodnoty obsahu C v hm. %, chemickou značkou legujících prvků a násobkem jeho skutečného obsahu.

Příklad:

28Mn6 je nelegovaná ocel, střední obsah C = 0,28 hm. %, $Mn = 6/4 = 1,5$ hm. %.

Nelegované ušlechtilé oceli mají vyšší stupeň čistoty (obzvlášť pokud se týká nekovových vměstků), jsou určeny pro zušlechťování nebo povrchové kalení, mají přesně stanovené chemické složení a zvláštní podmínky výroby. Patří sem např. oceli s požadavky na nárazovou práci v zušlechťeném stavu, oceli s předepsaným nejvyšším obsahem fosforu nebo síry, oceli pro předpínací výztuž do betonu.

Legované oceli

Legované jakostní oceli jsou určeny pro podobné účely jako nelegované jakostní oceli. Jsou to např. svařitelné jemnozrnné oceli pro ocelové konstrukce vč. tlakových nádob a potrubí, oceli legované křemíkem se zvláštními požadavky na magnetické vlastnosti nebo oceli určené pro výrobu kolejnic a další.

Legované ušlechtilé oceli mají přesně stanovené chemické složení, zvláštní podmínky výroby a zkoušení. Dělí se na nerezavějící ($C \leq 1,2$ %, $Cr \geq 10,5$ %), rychlořezné oceli ($C \geq 0,60$ %, Cr 3-6 %, min. dva z následujících tří prvků Mo, W, V s celkovým obsahem ≥ 7 %) a ostatní legované ušlechtilé oceli. Legované oceli (kromě rychlořezných) s obsahem alespoň jednoho prvku nad 5 hm. se značí písmenem X, následující číslo odpovídá 100násobku obsahu C v hm. %. Další písmena označující jednotlivé legující prvky a čísla oddělená pomlčkou určují obsahy jednotlivých legujících prvků.

Příklad: X5CrNi18-10 značí legovanou ocel se středním obsahem C = 0,05 hm. %, Cr = 18 hm. %, Ni = 10 hm. %.

Kromě výše popsaného značení ocelí se používá také systém číselného značení (podle ČSN EN 10 027-2-95). Značku materiálu tvoří číslo, které je dáno jednou číslicí hlavní skupiny materiálu (ocel má číslo 1), za níž následuje tečka a další čtyřčíslí. První dvojčíslí označuje číslo skupiny oceli, druhé dvojčíslí pořadové číslo oceli. Existují převodní tabulky, které slouží k porovnání značek ocelí s původním značením podle ČSN.

Příklad: 1.4841 (ekvivalent ocel podle ČSN 17255)

**Další informace o jednotlivých skupinách ocelí můžete nejlépe čerpat z publikace: Mazancová, E.: Technické materiály I, Kovové materiály, učební text FMMI VŠB-TUO, 2012, k dispozici na www.person.vsb.cz
Rozsah vám bude sdělen během přednášek.**



Otázky 4.2

10. U železa se projevuje tzv. alotropie. Co to znamená?
28. Vyjmenujte alotropické modifikace železa.
29. V jakých formách se nachází uhlík v železe?
30. Jaká je maximální rozpustnost uhlíku v Fe_γ ?
31. Jaká je maximální rozpustnost uhlíku v Fe_α ?
32. Co je to cementit?
33. Jak se rozdělují slitiny železa a uhlíku?
34. Jaká strukturní součást vznikne při běžné rychlosti ochlazování austenitu?
35. Jaké meze pevnosti můžeme dosáhnout u ocelí?
36. Jaký vliv má uhlík na vlastnosti ocelí?
37. Jaké jsou nepříznivé účinky síry v oceli?
38. Které prvky zvyšují pevnost a tvrdost ocelí?
39. Které prvky zvyšují korozivzdornost ocelí?
40. Jak se rozdělují oceli podle způsobu zpracování?
41. Jak rozdělujeme oceli k tváření podle chemického složení?
42. Jaký typ ocelí se používá na výrobu kolejnic?
43. Z jaké oceli se vyrábí nerezavějící nádobí?
44. Čím se vyznačují oceli na výrobu plechů pro karosérie automobilů?
45. Jakým způsobem dochází ke zvýšení povrchové tvrdosti u nástrojů (např. sekyry)?

4.3. Slitiny neželezných kovů



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vysvětlit rozdělení neželezných kovů
- popsat základní vlastnosti hliníku
- klasifikovat hlavní skupiny slitin hliníku a jejich vlastnosti



Výklad

□ Neželezné kovy

Neželezné kovy je souhrnný název pro všechny čisté kovy kromě železa. Vyznačují se specifickými vlastnostmi jako vysoká elektrická a tepelná vodivost (měď, hliník), nízká měrná hmotnost (hliník, hořčík, titan), vysoká teplota tání (wolfram), odolnost proti korozi. Neželezné kovy rozdělujeme podle hustoty na **lehké** s hustotou $\rho < 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, do této skupiny patří Li, Mg, Be, Al, Ti, a **těžké** kovy s hustotou $\rho > 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Neželezné kovy se mohou dále dělit podle teploty tání na kovy s **nízkou teplotou tání** (do 600°C), např. Zn, Sn, Pb, **se střední teplotou tání** (Mn, Cr, Ni, Cu) a **vysokou teplotou tání** (vyšší než u Fe), to jsou např. Zr, V, Cr, Mo, W.

Slitiny lehkých kovů mají uplatnění v letectví a jiné dopravní technice, kde se požaduje nízká hmotnost konstrukčních částí. Poměr hustoty a pevnosti těchto slitin je však velmi příznivý. V technické praxi se využívá především slitin hliníku, hořčíku a titanu s přísadami berylia a lithia. Z hlediska objemu výroby je hliník mezi neželeznými kovy na prvním místě.

□ Hliník a jeho slitiny

Základní charakteristiky hliníku jsou uvedeny v následujícím přehledu:

Atomové číslo $Z = 13$; atomová hmotnost $M = 26,97$

Teplota tavení: 660°C

Krystalová struktura - kubická plošně centrovaná (fcc)

Parametr mřížky: $a = 0,4041 \text{ nm}$

Hustota ($+20^\circ\text{C}$): $\rho = 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Součinitel tepelné roztažnosti: $\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ($20\text{--}100^\circ\text{C}$)

Součinitel tepelné vodivosti: $\lambda = 217,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Elektrický odpor :

$\rho = 2,63 \mu\Omega.\text{cm}$

Elektrická vodivost hliníku činí 65% elektrické vodivosti mědi (standard).

Hlavní přednosti hliníku jsou následující:

- Vysoká elektrická vodivost (komerční Al 62% z vodivosti mědi, ale nižší hustota Al!);
- Vysoká tepelná vodivost;
- Dobrá korozní odolnost v některých prostředích;
- Nízká hustota (letectví, transport obecně - snížení "prázdné" hmotnosti).

Nedostatky hliníku:

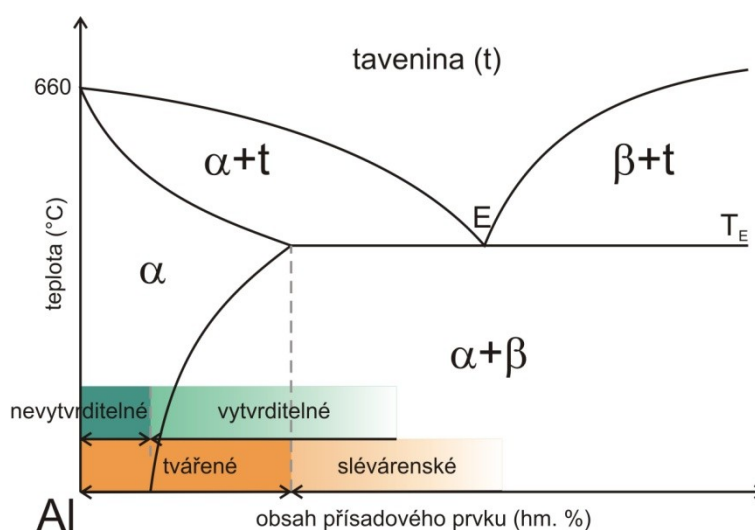
Nízká úroveň mechanických vlastností komerčně čistého hliníku ve vyžíhaném stavu - lze je však zvýšit různými mechanismy zpevnění, zejména zpevněním dislokačním a precipitačním.

Rozdělení slitin hliníku

Slitiny hliníku dělíme následovně:

- Slitiny k tváření nevytvrditelné (nedají se precipitačně zpevnit);
 vytvrditelné (precipitačním zpevněním)
- Slitiny slévárenské (k odlévání).

Rozdělení slitin hliníku je schematicky znázorněno v diagramu na obr. 4.9.



Obr. 4.9 . Rozdělení slitin hliníku.

Pozn. Vytvrzování je proces tepelného zpracování, které se skládá z rozpouštěcího žíhání a vytvrzování. Při rozpouštěcím žíhání ohříváme slitinu do oblasti homogenní fáze α , následuje rychlé ochlazení a precipitační vytvrzování (stárnutí). Při precipitačním vytvrzování se

vylučují velmi malé disperzní částice sekundární fáze v matrici. Přitom dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti některých slitin.

V následujícím přehledu je uvedeno označení metalurgického stavu hliníku a jeho slitin (podle Aluminium Association) – není třeba se učit.

F	dodaný stav		
O	stav žíhaný a rekrystalizovaný		
H	stav po deformaci za studena (zpevněný)		
H1X	jen deformace za studena (X - stupeň	deformace)	
	H12	stav 1/4 tvrdý	
	H14	stav 1/2 tvrdý	
	H16	stav 3/4 tvrdý	
	H18	stav 4/4 tvrdý	
	H19	stav zvláště (pružinově) tvrdý	
H2X	deformace za studena + žíhání na zotavení (X	2-9)	
H3X	deformace za studena + stabilizační žíhání (X	2-9)	
T	stav zpevněný kalením a stárnutím (precipitační vytvrzení)		
T1	kalení po tváření za tepla a přirozené stárnutí (za	normální teploty);	
T3	rozpouštěcí žíhání, kalení, deformace za studena,	přirozené stárnutí;	
T4	Jako T3, bez deformace za studena;		
T5	Jako T1, ale umělé stárnutí (za zvýšené teploty);		
T6	Jako T4, ale umělé stárnutí;		
T7	Jako T6, ale přestárnuté;		
T8	jako T3, ale stárnutí umělé;		
T9	jako T6 + deformace za studena.		

Následně budou uvedeny vybrané příklady hliníkových slitin.

Komerčně čistý hliník (Al > 99,0 %)

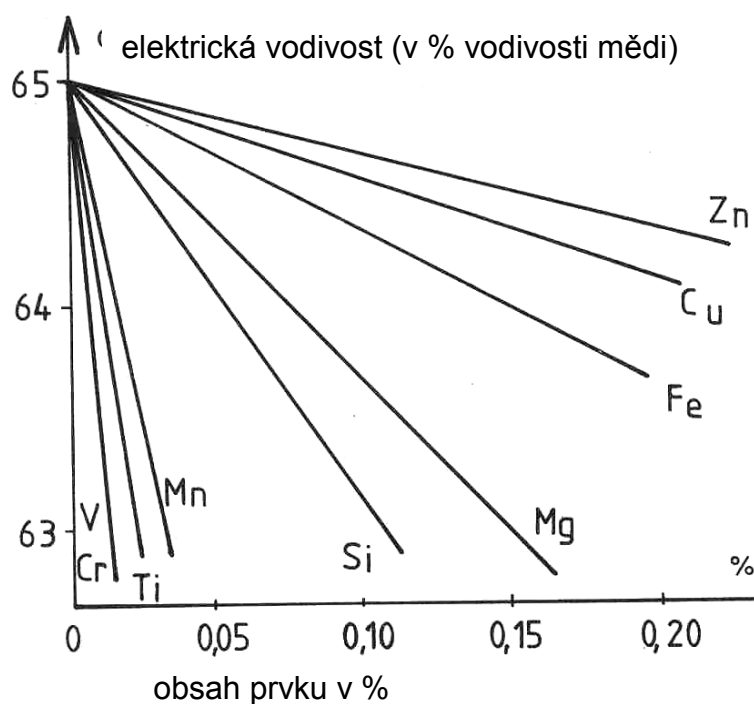
Podobně jako v případě ocelí i v případě hliníku má na jeho vlastnosti podstatný vliv charakter a obsah příměsí.

Vliv příměsí:

Hlavní příměsí (Fe + Si), lze odstranit elektrolytickou rafinací.

Nejvýznamnější je asi vliv přísad na elektrickou vodivost, který je znázorněn na obr. 4.10.

Nejvyšší pokles elektrické vodivosti hliníku vyvolávají prvky – V, Cr, Ti, Mn.



Obr. 4.10 Vliv příměsí na elektrickou vodivost hliníku

Vliv přísad na další vlastnosti -

- Ti (0,05 - 0,10%) a B (0,005 - ,01%) - zjemnění zrna při tuhnutí;
- Zr (<0,2%) brání růstu zrna při TZ;
- Si (0,5 - 0,8%) zvyšuje odolnost vůči tečení;
- Ni a Fe zvyšují úroveň mech. vlastností za vyšších teplot;
- Cu+Ni+Sn+Pb musí být <0,1%, aby byla zajištěna korozní odolnost;
- Cr + Mn zvyšují korozní odolnost.

Korozní odolnost hliníku je dána tvorbou oxidu Al_2O_3 na jeho povrchu. Hliník vykazuje dobrou odolnost v kyselinách - chlorovodíková, sírová, dusičná; ale nízkou odolnost v zásaditých prostředích.

V následující tabulce je uvedeno rozdělení tvářených slitin hliníku (podle Aluminium Association)

Slitina	Označení série	Poznámka
Al > 99%	1000	nevytvrditelné
Al-Cu; Al-Cu-Mg	2000	vytvrditelné

Al-Mn	3000	nevytvrditelné
Al-Si	4000	
Al-Mg	5000	nevytvrditelné
Al-Mg-Si	6000	vytvrditelné
Al-Zn-Mg; Al-Zn-Mg-Cu	7000	vytvrditelné
Al a jiné prvky	8000	

Tvářené slitiny nevytvrditelné

Série 1000 (Al > 99,0%)

V žíhaném stavu má jen nízkou úroveň mechanických vlastností, kterou lze zvýšit deformačním zpevněním.

S rostoucí čistotou klesá úroveň mech. vlastností, roste plasticita, klesá rekrytalizační teplota.

Hliník 99,9999% - rekryst. teplota -30°C.

Rekrytalizační teplotu zvyšují - Si, Mg, Cu, Mn, Fe, Cr (nejvíce).

Technický hliník - 99,0% - rekrytalizační teplota 300 - 400°C.

Mechanické vlastnosti série 1000 - příklady

Slitina Chem. sl.	Stav	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A (%)	Mez únavy pro 5.10 ⁸ c (MPa)
1060	O	28	70	40	-
Al > 99,6%	H14	90	110	12	-
	H18	125	130	6	-
1100	O	35	80	35	30
Fe+Si<1%	H14	90	130	9	50
	H18	130	150	6	60

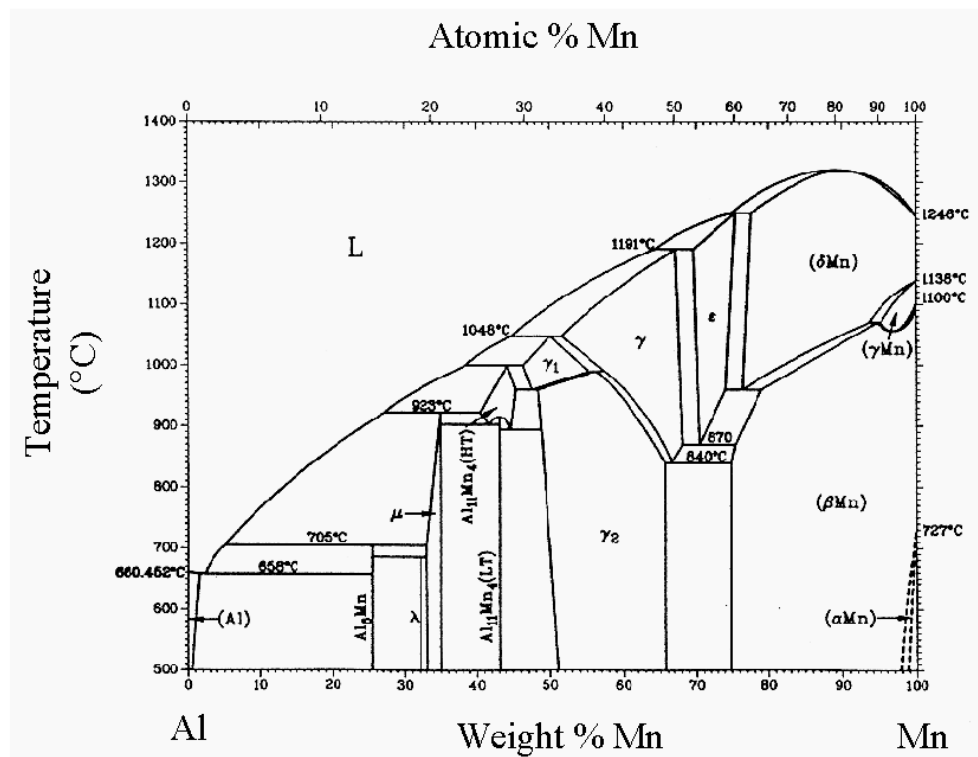
Použití slitin série 1000:

- Vodiče proudu - nutnost kontroly Ti, V, Cr - slitiny 1350, 1370;
- Obklady budov;
- Chemický, potravinářský průmysl;
- Kryogenní technika.
- Plátování na jiné slitiny Al s horší korozní odolností.

Série 3000 - slitiny Al - Mn

Jedná se o velmi používané slitiny hliníku, např. pro různé aplikace v automobilovém průmyslu, jako např. součásti klimatizačních systémů apod.

Obvyklý obsah Mn je menší než 1,5 %. Jistou informaci o chování těchto slitin nám podává binární diagram Al – Mn, který je na obr. 4.11.



Obr. 4.11 Binární diagram Al – Mn

Max. rozpustnost Mn je 1,8% při 659°C; existuje zde úzký interval tuhnutí a dochází jen k nevýraznému odmíšení.

V rovnovážném diagramu se vyskytuje intermetalická sloučenina Al_6Mn , ozn. β , která je zdrojem jen malého zpevnění, protože má výrazný sklon ke hrubnutí. Výhodou je, že zvyšuje rekrytalizační teplotu slitiny.

Jinak se ve slitinách Al – Mn uplatňuje zpevnění tuhého roztoku.

Často se přidává přísada Mg <1,2%, která znamená další zvýšení mechanických vlastností (substituční zpevnění).

Mech. vlastnosti slitin série 3000 - příklady

Slitina Chem. sl.	Stav	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Mez únavy pro $5 \cdot 10^8$ c (MPa)
3003 1,2Mn - 0,12Cu	O	40	110	30	45
	H14	145	155	8	62
	H18	185	200	4	70
3004 1,2Mn - 1,0Mg	O	70	180	22	65
	H14	200	245	9	110
	H18	250	285	4	115

Z tabulky je dobře patrné, že mechanické vlastnosti slitin se dají výrazně zvýšit deformačním zpevněním. Zároveň je vidět, že deformační zpevnění vyvolává pokles tažnosti, tzn. slitina tvářením za studena křehne.

Vlastnosti – použití slitin série 3000:

- Slitiny snadno tvařitelné za tepla i za studena - plechy, tyče, dráty, profily, trubky.
- Dobrá odolnost vůči atmosférické korozi;
- Snadná svařitelnost (ale!!! - problémy u za studena tvářených výrobků → rekrystalizace → pokles mech. vlastností);
- Nahrazují slitiny série 1000 tam, kde se žádají vyšší mechanické vlastnosti.

Tvářené slitiny vytvrditelné***Série 2000 - slitiny Al - Cu, resp. Al - Cu - Mg***

Slitiny hliníku s mědí, event. hořčíkem a dalšími prvky se nazývají duraly (dur al = tvrdý hliník).

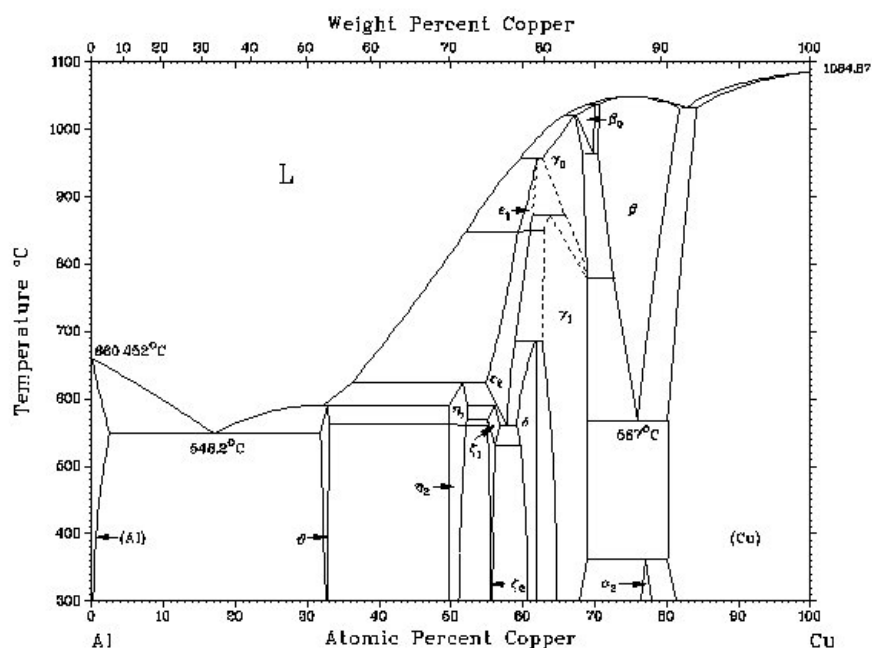
Obsah Cu - 2,5 - 6,3 %;

obsah Mg - 0,5 - 1,5 %.

V soustavě dochází k precipitačnímu vytvrzení, kdy vzniká fáze Θ - CuAl_2 , resp. CuMgAl_2 .

Základem k pochopení chování těchto slitin je binární diagram Al – Cu, který je uveden na obr. 4.12.

Assessed Al-Cu phase diagram.



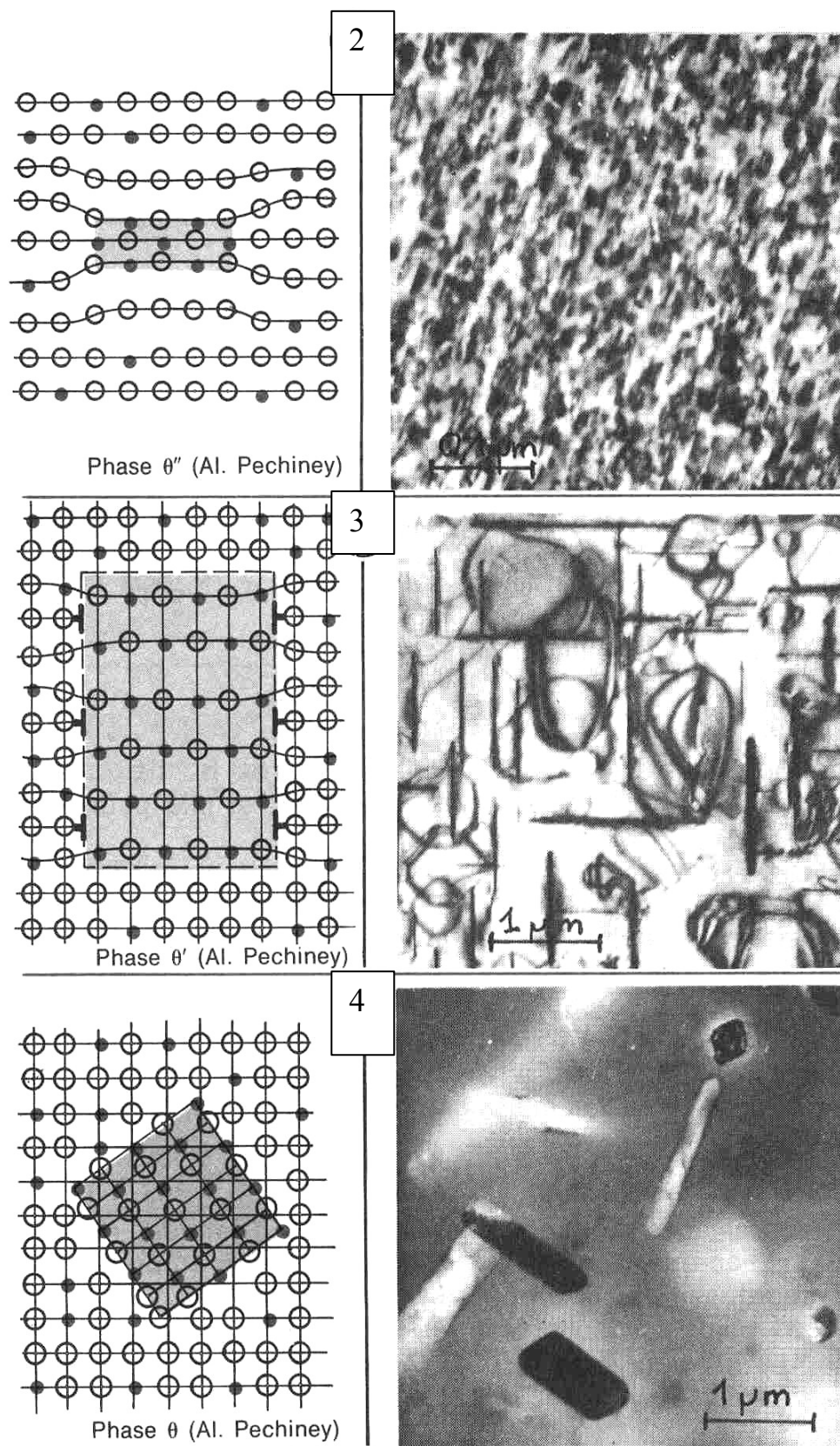
Obr. 4.12 Binární diagram soustavy Al – Cu

Sltiny Al-Cu, resp. Al-Cu-Mg se zpracovávají tzv. precipitačním vytvrzením, jehož smyslem je vytvoření velmi jemných precipitátů fáze Al_2Cu v matici hliníku. Princip tohoto zpracování byl vysvětlen u obr. 4.9. Závěrečnou etapou tohoto zpracování je tzv. stárnutí, které může probíhat buď za normální teploty, nebo, častěji, za zvýšených teplot.

Při stárnutí probíhají následující děje:

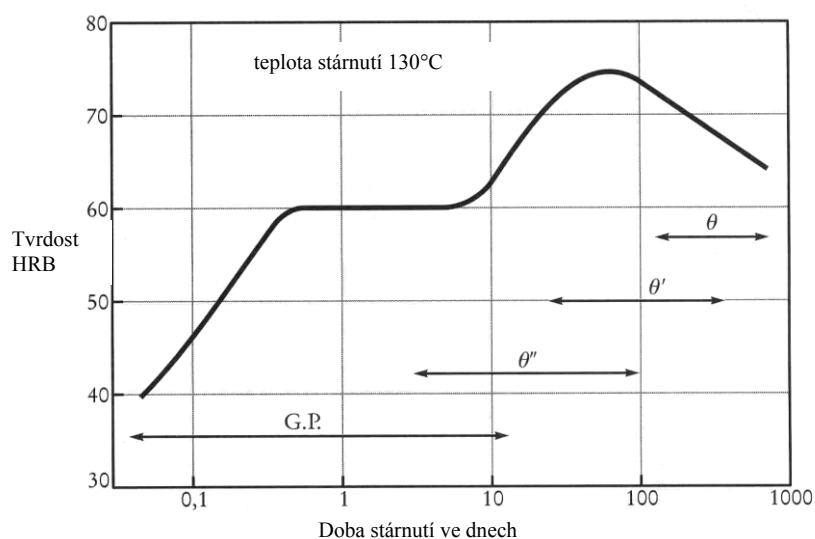
1. Vznik tzv. Guinier-Prestonových (GP) zón, což jsou monoatomární vrstvy Cu, rovnoběžné s rovinami $\{100\}$;
2. Vznik fáze Θ'' - několik atomárních vrstev uspořádané struktury Al - Cu, koherentní s maticí, existují do teploty max. 200°C , nevznikají z GP zón.
3. Vznik fáze Θ' - semikoherentní precipitáty CuAl_2 , tetragonální mřížka, existují do teplot 300°C , mohou vznikat přímo z přesyceného tuhého roztoku.
4. Vznik fáze Θ - nekoherentní precipitáty CuAl_2 , znamenají pokles pevnosti, tvrdosti, nárůst plastických vlastností.

Etapy stárnutí 2-3-4 jsou znázorněny na obr. 4.13.



Obr. 4.13 Etapy stárnutí 2-3-4 slitiny Al-Cu

Závislost tvrdosti na jednotlivých etapách stárnutí je uvedena na obr. 4.14.



Obr. 4.14 Závislost tvrdosti slitiny Al-4%Cu na době stárnutí při teplotě 130°C

Z obrázku je zřejmé, že nejvyššího vytvrzení je dosaženo při přítomnosti koherentních a částečně i semikoherentních precipitátů. Při zvětšení velikosti precipitátů již tvrdost a tím i pevnost klesá.

Mechanické vlastnosti slitin 2000- příklady

Slitina Chem. sl.	Stav	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	Mez únavy pro $5 \cdot 10^8$ c (MPa)
2014	O	100	200	20	90
4,4Cu - 0,5Mg - 0,8Mn - 0,8Si	T4	290	420	18	140
	T6	430	480	12	125
2017	T4	180	300	27	
4,4Cu - 0,6Mg dural					
2024	O	100	200	20	90
4,4Cu - 1,5Mg - 0,6Mn	T4	320	460	18	140
superdural	T6	390	475	10	125

Z tabulky je dobře patrné, že precipitačním zpevněním lze získat slitiny s poměrně velmi dobrými mechanickými vlastnostmi, což je zvláště cenné, vezmeme-li v úvahu nízkou hustotu hliníku. Uvážíme-li mez kluzu hliníkové slitiny cca 400 MPa, musela by mít ocel, aby bylo dosaženo stejné hmotnosti konstrukce, mez kluzu cca 1200 MPa, a to už by se jednalo o vysokopevnou ocel.

Vlastnosti – použití slitin třídy 2000:

- Vysoké mech. vlastnosti;
- zhoršená korozní odolnost (event. plátování hliníkem);
- obtížná svařitelnost.
- Automobilový, letecký průmysl, sportovní potřeby aj.
-

Slévárenské slitiny hliníku

Slitiny Al - Si, Al - Si - Mg, Al - Si - Cu

Nejběžnější jsou slitiny na bázi Al-Si s přibližně eutektickým složením (říká se jim silumíny), slitiny se v závislosti na obsahu dalších přísad dají zpevňovat precipitačním zpevněním. Slitiny Al-Si mají běžně tzv. destičkovité eutektikum, v němž útvary eutektika vyvolávají pokles houževnatosti. Proto se slévárenské slitiny hliníku často modifikují přídavkem sodíku, nebo stroncia, čímž se morfologie eutektika změní na tyčinkovitou, která má příznivější vliv na houževnatost a mechanické vlastnosti obecně.

Informace o dalších neželezných kovech a jejich slitinách můžete čerpat přednostně z publikace:

Losertová, M.: Progresivní materiály. Učební text FMMI VŠB-TUO, Ostrava 2012, ke stažení na www.person.vsb.cz

Potřebný rozsah vám bude sdělen během přednášek.



Shrnutí pojmů 4.3

Neželezné kovy rozdělujeme podle hustoty na **lehké** a **těžké** kovy, podle teploty tání na kovy s nízkou teplotou tání (do 600°C), se střední teplotou tání a vysokou teplotou tání.

Slitiny hliníku se podle způsobu zpracování dělí na **slitiny k tváření** a **k odlévání**, podle schopnosti zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním (vytvrzováním) se slitiny hliníku dělí na **vytvrditelné** a **nevytvrditelné**.



Otázky 4.3

46. Co je rozhodujícím kritériem pro dělení neželezných kovů na lehké a těžké?
47. Jak se dělí slitiny hliníku?
48. Co jsou to duraly? Jaké mají uplatnění?
49. Jak se nazývají slitiny hliníku určené k odlévání, ve kterých je hlavní legurou křemík?



Další zdroje

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 1. část. ČVUT Praha, 2001. 1. vyd. 207 s. ISBN 80-01-02424-5.

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 2. část. ČVUT Praha, 2002. 1. vyd. 214 s. ISBN 80-01-02568-3.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. 2. opr. a rozš. vydání. 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 2. opr. a rozš. vydání. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering. An Integrated Approach. Hoboken: Wiley, 2008. 3rd ed. 882 p. ISBN 978-0-470-12537-3.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Materials science and engineering : an introduction New York: Wiley, 2007. 7th ed. 721 p., ISBN 978-0-471-73696-7.



Klíč k řešení

- O 4.1. Slitiny kovů se dělí podle základního kovu, který je obsažen ve slitině hlavním podílem, na slitiny železa a neželezných kovů (např. slitiny Al. Slitiny Cu, slitiny Ni ad.).
- O 4.2. Síra, fosfor, dále vodík a kyslík.
- O 4.3. Prvky přísadové se přidávají do slitin úmyslně za účelem zlepšení jejich vlastností.
- O 4.4. Další možné dělení kovových materiálů závisí např. na jejich fyzikálních vlastnostech (např. podle hustoty na lehké a těžké), praktickém použití nebo způsobu výroby (tvářené slitiny, slitiny na odlitky a slinuté kovy), podle způsobu použití rozlišujeme (např. nástrojové oceli, korozivzdorné oceli a další).
- O 4.5. Zabránění nebo ztížení pohybu dislokací, tj. tím, že jim do cesty postavíme překážky.
- O 4.6. Plastickou deformací se v materiálu vytvářejí nové dislokace, které si při zatěžování překážejí. Tím se zvýší mez kluzu.
- O 4.7. Čím jemnější bude zrna, tím více hranic a tedy překážek pro pohyb dislokací v materiálu bude a tím větší bude de přirůstek zpevnění.
- O 4.8. Při interakci dislokace s částicemi se mohou uplatnit dva mechanismy – mechanismus obcházení a mechanismus protnutí částic dislokacemi.
- O 4.9. Zpevnění intersticiálními atomy je účinnější než zpevnění substitučními atomy.
- O 4.10. Železo se vyskytuje ve 3 rozdílných krystalových modifikacích.
- O 4.11. Železo delta ($\text{Fe}\delta$), železo gama ($\text{Fe}\gamma$), železo alfa ($\text{Fe}\alpha$).
- O 4.12. Ve formě intersticiálního tuhého roztoku (austenit, ferit, δ -ferit), ve formě karbidu (cementit), v čisté formě (grafit).
- O 4.13. 2,14 hm. % C.
- O 4.14. 0,02 hm. % C.
- O 4.15. Karbid železa Fe_3C . Maximální rozpustnost uhlíku v cementitu je asi 6,7 %.
- O 4.16. Oceli a litiny.
- O 4.17. Perlit
- O 4.18. Mez pevnosti u ocelí dosahuje 350 – 2000 MPa.
- O 4.19. Uhlík ovlivňuje- zvyšuje pevnost, tvrdost a kalitelnost ocelí.
- O 4.20. Síra tvoří se železem sulfidy FeS s nízkou teplotou tavení (985°C), které se soustřeďují přednostně v trojbodech (styku tří zrn) a posléze podél obvodu austenitických zrn a zeslabují jejich soudržnost.
- O 4.21. Mn, Si, Ni, Mo, V, W a Cr
- O 4.22. Korozivzdornost zvyšuje přísada Cr, Ni, Mo, Si, Cu.

- O 4.23. Na oceli ke tváření a na oceli na odlitky.
- O 4.24. Na legované a nelegované oceli.
- O 4.25. Na výrobu kolejnic se používá perlitická ocel s obsahem uhlíku 0,5 až 0,8 hm. % nelegovaná nebo legovaná Mn a Cr, popř. V.
- O 4.26. Vyrábí se z chrom-niklové oceli s obsahem chromu 18 až 20 % a Ni 8 až 11 %, nejčastěji se používá ocel s 18 % Cr a 10 % Ni.
- O 4.27. Obsahují velmi málo uhlíku (méně než 0,1 hm. % C), ale málo i všech dalších prvků – Mn, Si, Cr, P, S. Tažnost až 40 %.
- O 4.28. Nástroje se tepelně zpracovávají kalením a popouštění.
- O 4.29. Neželezné kovy se rozdělují na lehké a těžké kovy podle hustoty ($\rho = 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).
- O 4.30. Slitiny hliníku se podle způsobu zpracování dělí na slitiny k tváření a k odlévání, podle schopnosti zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním (vytvrzováním) na vytvrditelné a nevytvrditelné.
- O 4.31. Duraly jsou slitiny Al-Cu-Mg s asi 4 % Cu a s menšími přísadami Mn a Mg (AlCu4Mg). Dural je konstrukční materiál, který se využívá pro stavbu letadel a dopravních zařízení.
- O 4.32. Siluminy.

5. POLYMERY

5.1. Úvod – základní pojmy, proces polymerace, dělení polymerů



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- pojmenovat a vysvětlit základní pojmy z oblasti polymerů;
- popsat polymeraci etylénu a bakelitu;
- definovat základní rozdělení polymerů.

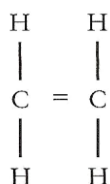


Výklad

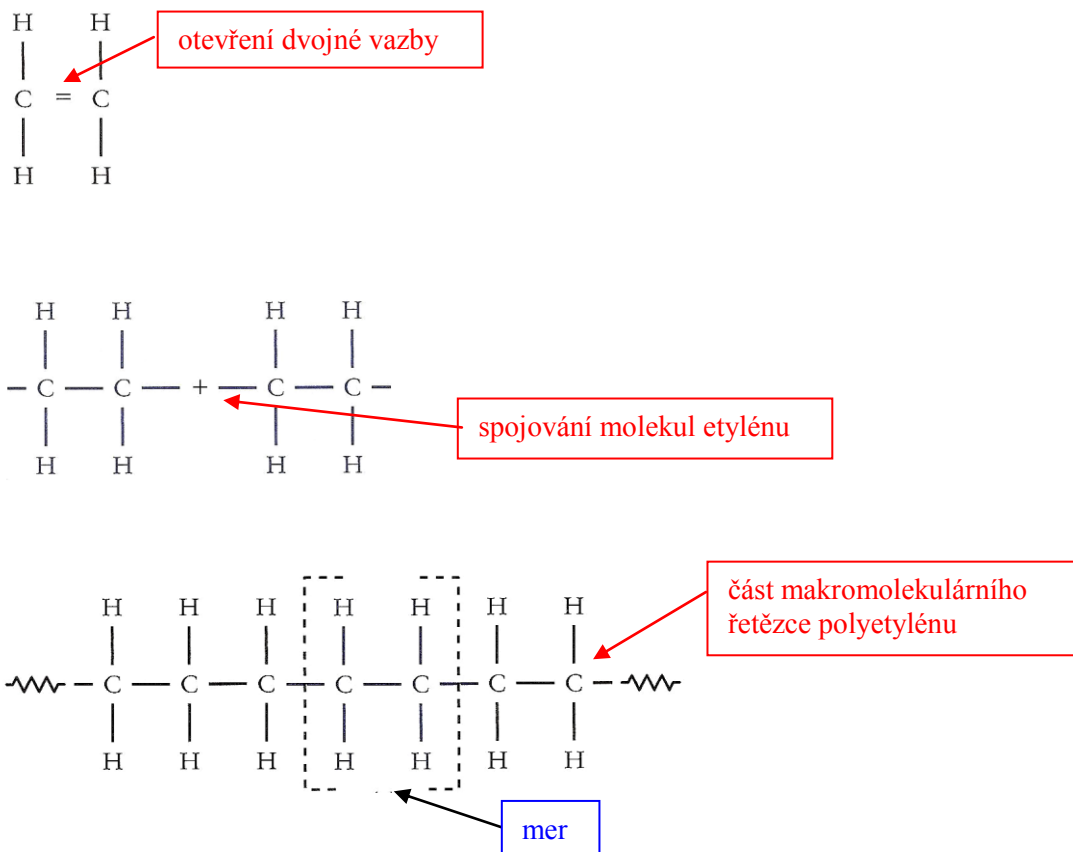
□ Úvod – základní pojmy, příklad vzniku polyethylénu

Jak už bylo uvedeno, polymery jsou látky – materiály, s nimiž se setkáváme na každém kroku, i v běžném životě. Polymerům se jinak říká také **makromolekulární látky**, protože se skládají z velkých, obřích molekul. **Polymery** vznikají zvláštním procesem – **polymerací** - z malých molekul organických látek – tzv. **monomerů**, které obvykle obsahují alespoň jednu dvojnou vazbu. Polymerací vzniká tzv. **makromolekulární řetězec**, který představuje základní součást polymerů. Vznik polymeru můžeme ukázat na příkladu jednoduchého polymeru, jímž je polyetylén.

Polyetylén vzniká polymerací etylénu. Etlén je v daném případě monomer. Etlén má vzorec C_2H_4 , mezi atomy uhlíku je dvojná vazba. Vzorec etylénu můžeme zapsat názorně také takto:



Za vhodných podmínek, nejčastěji za působení vysokého tlaku, zvýšené teploty a při použití chemických látek, tzv. iniciátorů, může dojít k otevření dvojně vazby mezi atomy uhlíku v etylénu. Tím vznikne v každé molekule etylénu nové vazebné místo a jednotlivé molekuly etylénu se mohou spojovat a vytvořit makromolekulární řetězec:



V posledním vzorci je vyznačen tzv. mer, který představuje molekulu monomeru, ale již zabudovanou do makromolekuly polymeru. V daném případě je mer $-\text{C}_2\text{H}_4-$, ale již bez dvojné vazby mezi atomy uhlíku. Uvedený druh polymerace se někdy nazývá **adiční polymerace** (adice je z latiny sčítání), protože jednotlivé molekuly monomeru se jakoby „sčítají“. Při vzniku polyetylénu vznikají většinou jednoduché řetězce, kterým se často, ale nepřesně říká **lineární řetězce**. Řetězce ve skutečnosti nejsou lineární, tedy přímkové, ale jsou různě zkroucené, zatočené....

Počet monomerů, které tvoří makromolekulu, se může měnit v širokém rozsahu. Z toho pak vyplývá i velký rozsah relativní molekulové hmotnosti makromolekul polymeru, která se pohybuje obvykle od 10^4 až po 10^6 , někdy je i vyšší. (*Pozn.: Relativní molekulová hmotnost je součet relativních atomových hmotností všech atomů v molekule, resp. v makromolekule.*)

□ Dělení polymerů

Polymery se dělí na tři základní skupiny, které se liší svou vnitřní stavbou i vlastnostmi. Jsou to:

- Termoplasty;
- Reaktoplasty;
- Elastomery.

Termoplasty jsou polymery, které jsou za běžných podmínek většinou spíše tvrdé a nepříliš houževnaté. Za zvýšených teplot se stávají plastickými a mohou se tvarovat (odtud název termoplasty). Tato změna vlastností v závislosti na teplotě je vratná. Mezi termoplasty patří např. již zmíněný polyetylén, dále např. polyvinylchlorid, známý pod zkratkou PVC, polypropylén, polymethylmetakrylát, známý jako plexisklo, a mnohé další.

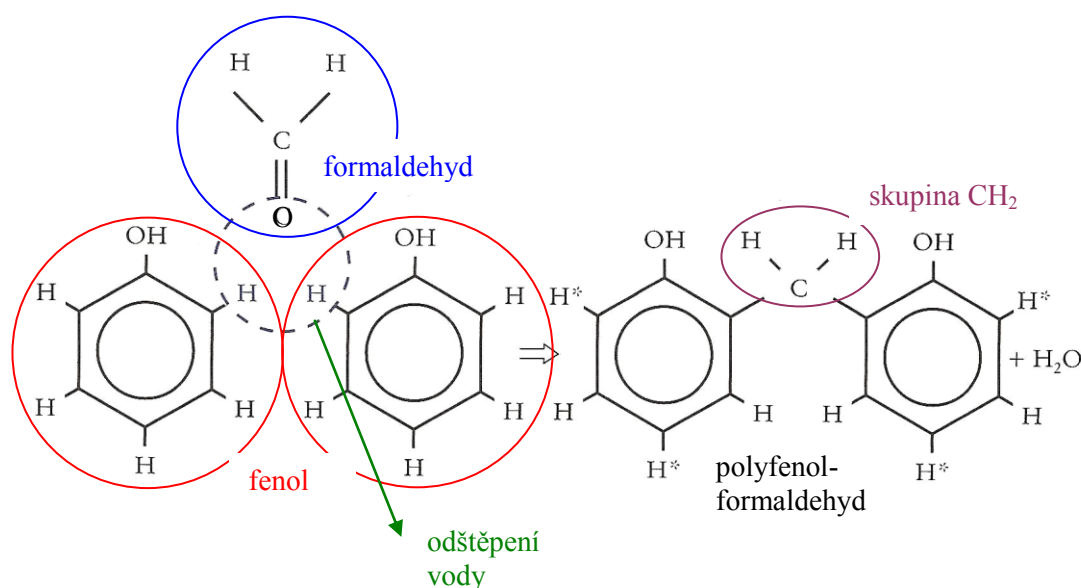
Reaktoplasty vznikají obvykle polymerací, která má charakter chemické reakce. Při svém vzniku mohou být tvarovány. Po proběhnutí reakci jsou již reaktoplasty tvrdé, křehké a netvarovatelné. Snad nejznámějším reaktoplastem je bakelit, což je polyfenolformaldehyd.

Elastomery jsou polymery, které mají schopnost vysoké elastické deformace, až několik set procent při působení nízkých napětí. Nejpočetnější skupinu elastomerů představují kaučuky, které vycházejí z přírodního kaučuku a z nichž se vyrábějí různé druhy pryží.

□ Kondenzační polymerace

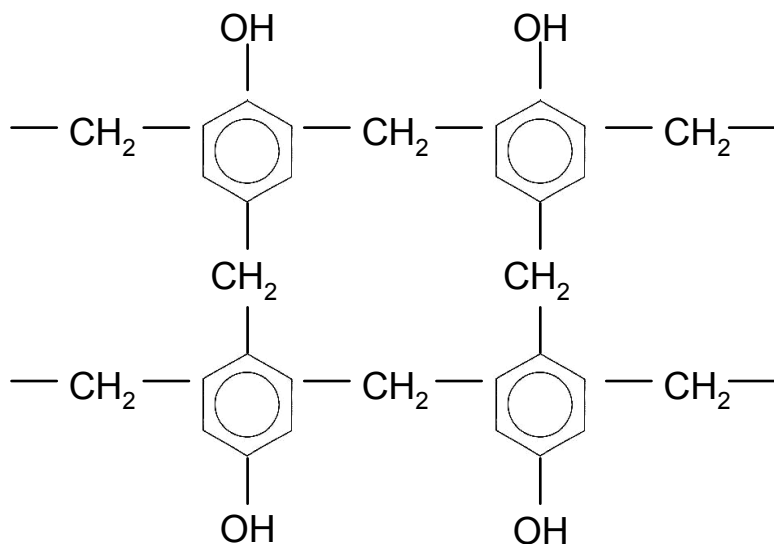
Na tomto místě popíšeme stručně ještě proces polymerace, kterým vzniká bakelit, tedy polyfenolformaldehyd. Proces polymerace se nazývá **polykondenzace** (někdy také **kondenzační polymerace**) a vzniká při něm meziprodukt, jímž je voda.

Vznik polyfenolformaldehydu si lze představit, pokud uvažujeme dvě molekuly fenolu a jednu molekulu formaldehydu. Fenol má vzorec C_6H_5OH (obsahuje tzv. benzenové jádro), formaldehyd má vzorec $HCOH$ a obsahuje dvojnou vazbu mezi atomy uhlíku a kyslíku (obr. 5.1). Při kondenzační polymeraci dochází k odštěpení molekuly vody H_2O . Jádrem řetězce polyfenolformaldehydu jsou tedy molekuly fenolu spojené skupinou CH_2 .



Obr. 5.1 Schéma vzniku polyfenolformaldehydu (bakelitu) kondenzační polymerací

Při vzniku polyfenolformaldehydu nevznikají jednoduché, lineární řetězce, ale řetězce, kterým se říká **prostorově zesítěné**. Na obr. 5.1 vpravo jsou hvězdičkou označeny atomy vodíku, ve kterých může dojít k navázání dalších částí řetězce. Možný charakter řetězce polyfenolformaldehydu je schematicky, ve dvourozměrném přiblížení, znázorněn na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Schematické znázornění zesítěného řetězce polyfenolformaldehydu (bakelitu)

Skutečnost, že polyfenolformaldehyd (bakelit) vytváří prostorově zesítěné řetězce, a nikoli jednoduché – lineární, je velmi důležitá pro jeho vlastnosti, což si ukážeme dále.



Shrnutí pojmů 5.1.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Monomer, polymer, mer, makromolekulární řetězec;**
- **Termoplast, reaktoplast, elastomer;**
- **Polymerace adiční, polymerace kondenzační;**
- **Polyetylén, polyfenolformaldehyd.**



Otázky 5.1.

1. Charakterizujte polymery.
2. Co to je polymerace?
3. Co to je monomer?

4. Charakterizujte jednoduše adiční polymeraci.
5. Jaká bývá relativní molekulová hmotnost makromolekul polymerů?
6. Charakterizujte jednoduše termoplasty.
7. Uveďte některé termoplasty, které znáte.
8. Charakterizujte jednoduše reaktoplasty.
9. Uveďte příklady reaktoplastů, které znáte.
10. Charakterizujte jednoduše elastomery.
11. Uveďte příklady elastomerů, které znáte.
12. Z jakých chemických sloučenin se připravuje bakelit?
13. Co je charakteristické pro kondenzační polymeraci?

5.2. Z historie polymerů



Čas ke studiu: 1 hodina i méně



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat některé důležité mezníky z historie polymerů.



Výklad

□ Základní mezníky v historii získání, zpracování a využití polymerů

Historie polymerů je velmi pestrá a bohatá a bylo by možné věnovat jí mnoho stran. To by ale nezapadalo do náplně našeho předmětu, a tak se omezíme jen na některé zvláště důležité mezníky. Jedním z prvních polymerů, s nímž se naši předkové setkali, byl **přírodní kaučuk**. Jedná se vlastně o tekutinu vytékající z kůry kaučukovníku – stromu, který má latinský název *Hevea Brasiliensis*. S ním se setkali už námořníci Kryštofa Kolumba na konci 15. století. Přírodní kaučuk byl přivezen do Evropy až v 18. století a zpočátku se používal na impregnaci látek, např. lodních plachet, pytlů na poštovní zásilky apod. Přírodní kaučuk ale neměl vlastnosti dnešních elastomerů. Nedeformoval se výrazně elasticky, naopak deformoval se plasticky, navíc se jeho vlastnosti poměrně výrazně měnily v závislosti na teplotě. Za chladu – v zimě – přírodní kaučuk tvrdl a křehl, za teplých letních dnů naopak měkl a stával se lepivým.

K rozšíření použití kaučuku došlo po objevu **vulkanizace** Američanem **Goodyearem** v roce 1839. Ten zjistil, že když se kaučuk zahřívá s určitým podílem síry a dalších látek, dojde u něho k výrazné změně vlastností a pak už je v zásadě tím materiálem schopným výrazné elastické deformace – tedy elastomerem. (*Pozn.: Později si vysvětlíme, že proces vulkanizace vlastně znamená částečné zesílení původně jednoduchých řetězců.*) Proces vulkanizace byl panu Goodyearovi patentován v roce 1844. Jméno Goodyear určitě znáte, dodnes je to významná značka pneumatik. V 19. století pak začala výroba pneumatik a základní složkou k jejich výrobě byl právě vulkanizovaný kaučuk.

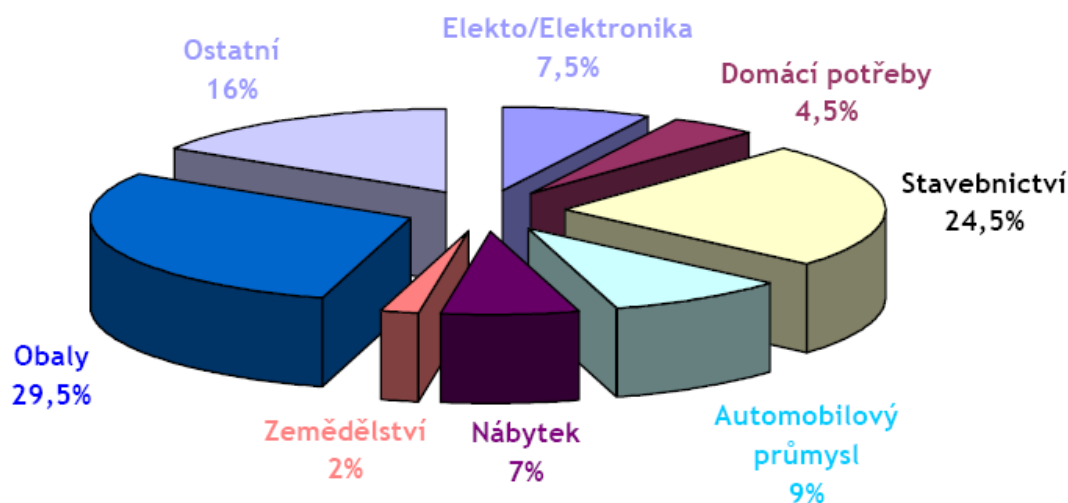
Dalším významným mezníkem je počátek výroby **celuloidu**. Ten bývá připisován jednak Angličanu Parkesovi, jednak bratřím Hayttům z USA. Říká se, že jedním z impulsů k jeho výrobě byla potřeba náhrady materiálu pro kulečnickové koule. Ty se do té doby vyráběly ze slonoviny, a jak jí začalo ubývat, hledal se materiál, který by ji nahradil. Angličan Parkes připravil celuloid z dusičnanového esteru celulózy (celulóza je přírodní polymer nacházející se v rostlinách). Uvádí se, že to bylo v roce 1865. Do jaké míry se celuloid využíval na

kulečnickové koule, nevím. Všichni ale víme, že celuloid se používal dlouhou dobu ve fotografickém a filmovém průmyslu jako nosný podklad pro filmy, na který se nanášely světlocitlivé vrstvy. Byl tedy po dlouhou dobu významným polymerem.

V roce 1907 vyrobil Belgičan, pan **Baekeland**, první čistě umělý polymer, a to **polyfenolformaldehyd**, který po panu Baekelandovi dostal komerční název **bakelit** a začal se poté intenzivně vyrábět a používat. Určitě si vzpomenete na bakelitové kliky u dveří, staré telefonní aparáty, skřínky a knoflíky radiopřijímačů o mnoho dalších výrobků....

Celé 20. století je pak už charakterizováno prudkým rozmachem výroby a použití nejrůznějších polymerů. Výčet jednotlivých mezníků by byl příliš dlouhý. Uvedme už jen jedno datum. V roce 1947 začala výroba **polytetrafluoretylenu**, který všichni známe pod obchodním označením **Teflon**.

V současné době se polymery využívají v celé řadě průmyslových odvětví. Nejvyšší podíl výroby polymerů nepřipadá na konstrukce, ale na obalovou techniku. Rozdělení světové spotřeby polymerů je podle odvětví uvedeno na obr. 5.3.



Obr. 5.3 Rozdělení světové spotřeby polymerů podle jednotlivých odvětví (údaj z roku 2005)



Shrnutí pojmů 5.2.

Po prostudování této části byste mohli mít základní představu o hlavních historických meznících v objevech, výrobě a využití polymerů:

- **15. stolení – objevení přírodního kaučuku Evropany v jižní Americe;**

- **konec 18. století – použití přírodního kaučuku pro impregnaci tkanin;**
- **1839 – pan Goodyear – vulkanizace kaučuku;**
- **1865 – pan Parkes (bratři Hyattové) – výroba celuloidu;**
- **1907 – pan Baekeland – výroba polyfenolformaldehydu - bakelitu;**
- **1947 – výroba polytetrafluoretylénu – Teflonu.**



Otázky 5.2.

Část 5.2 má informativní charakter, nebude předmětem zkoušení a neuvádíme zde ani otázky....

5.3. Vnitřní stavba polymerů



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

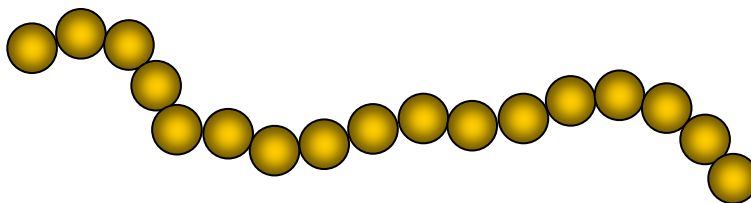
- popsat druhy řetězců v polymerech;
- definovat atomární strukturu řetězců včetně vazeb mezi atomy;
- vysvětlit, co znamená stereoizomerie polymerů a s čím souvisí;
- objasnit, co znamená amorfní a krystalický stav polymerů a na čem přednostně závisí.

□ Druhy řetězců v polymerech

Uvedli jsme, že při vzniku polymerů procesem polymerace vznikají makromolekulární řetězce. Ty mohou být různé v závislosti na druhu polymeru a podmínkách polymerace. Zjednodušeně se v polymerech rozlišují tyto druhy řetězců:

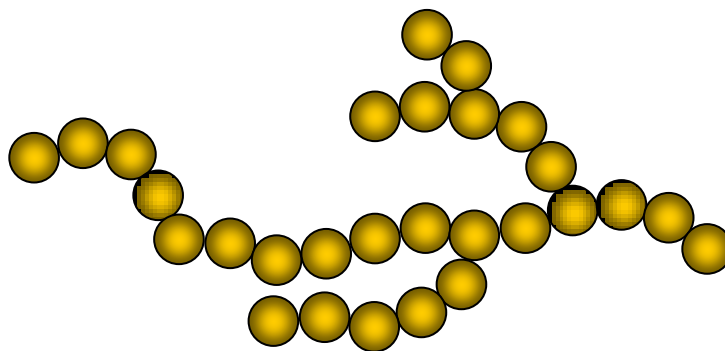
- Jednoduchý (lineární) řetězec;
- Rozvětvený řetězec;
- prostorově zesítený řetězec;
- Slabě (částečně) zesítený řetězec.

Jednoduchý řetězec je takový, který má jednu osu – „páteř“ řetězce. I když se pro něj často používá označení lineární řetězec (i v cizojazyčné literatuře), lineární – přímkový nebývá. Většinou je různě zprohýbaný, zkroucený. Schematický obrázek jednoduchého řetězce je na obr. 5.4. Kuličky zde nepředstavují jednotlivé atomy, ale skupiny atomů. V případě polyetylénu by kuličky představovaly skupinu CH_2 . Jednoduché řetězce jsou typické hlavně pro termoplasty.



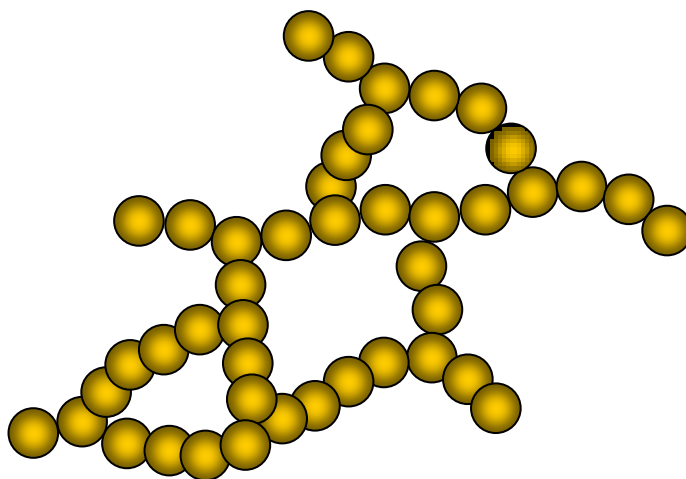
Obr. 5.4 Schematické znázornění jednoduchého řetězce v polymeru

Rozvětvený řetězec je takový, který se větví. Má tedy jednu hlavní „páteř“ (kmen), ze které vycházejí boční větve. I ty se mohou dále větvit. Příklad rozvětveného řetězce je uveden na obr. 5.5. Také rozvětvené řetězce jsou typické pro termoplasty. K tomu, aby mohly vzniknout, je třeba upravit podmínky polymerace.



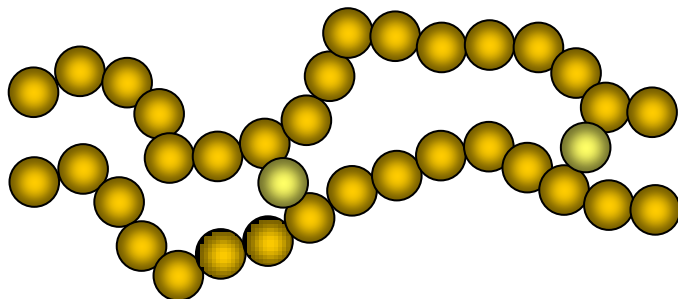
Obr. 5.5 Příklad rozvětveného řetězce v polymeru

Prostorově zesítěný řetězec vytváří prostorovou síť, jak už říká jeho název. Je typický hlavně pro reaktoplasty, např. polyfenolformaldehyd – bakelit. Zjednodušený příklad prostorově zesítěného řetězce je na obr. 5.6.



Obr. 5.6 Zjednodušený příklad prostorově zesítěného řetězce

Slabě (částečně) zesítěný řetězec se skládá většinou z jednoduchých řetězců, které jsou na nemnoha místech (cca 0,5 – 2%) příčně propojeny. Takovýto řetězec je typický pro elastomery. Příklad slabě zesítěného řetězce je uveden na obr. 5.7.

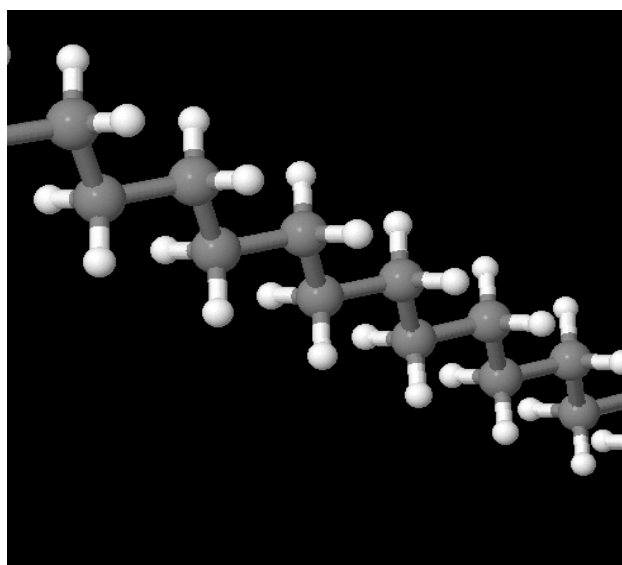


Obr. 5.7 Příklad slabě zesíťného řetězce

Druh řetězce ovlivňuje významně vlastnosti polymerů, jak uvedeme dále. Pokud jde o vazbu mezi atomy, existuje **mezi atomy v rámci jednoho řetězce** výhradně **vazba kovalentní**. Kovalentní vazba je také v místech zesíťení řetězců. Avšak **mezi různými řetězci** navzájem existují pouze **slabé molekulární vazby**.

□ Atomární struktura řetězce

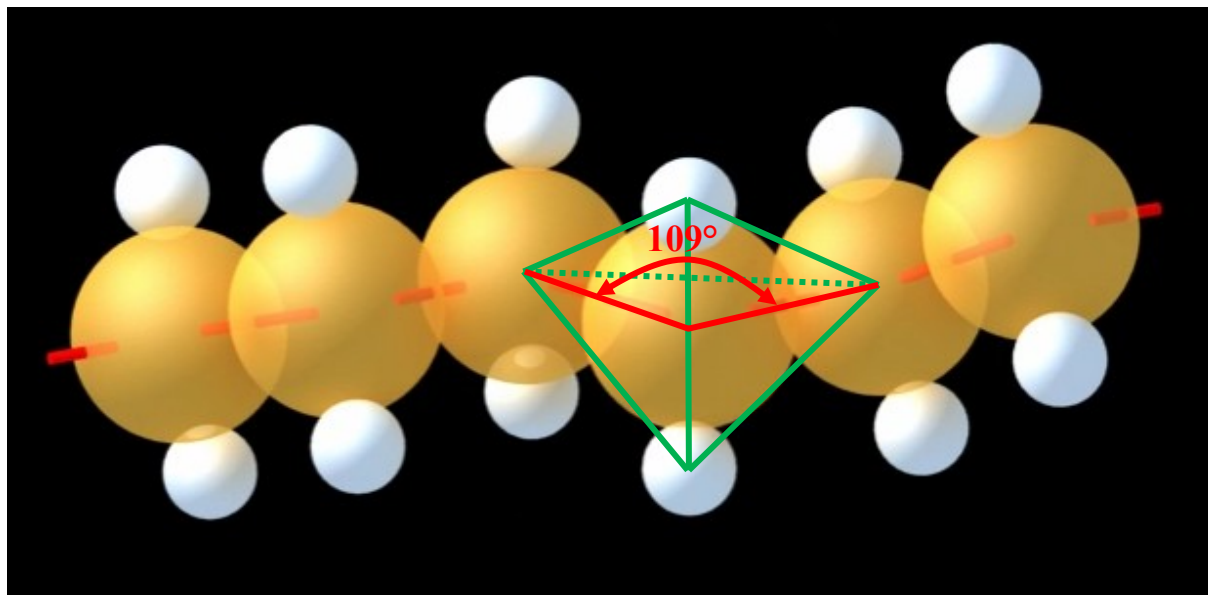
Na obr. 5.8 je zobrazena část řetězce polyetylénu se zcela pravidelným uspořádáním atomů. Šedé větší kuličky představují atomy uhlíku, bílé kuličky jsou atomy vodíku. Z obrázku je vidět, že struktura řetězce je vždy prostorová, trojrozměrná.



Obr. 5.8 Část atomární struktury v řetězci polyetylénu

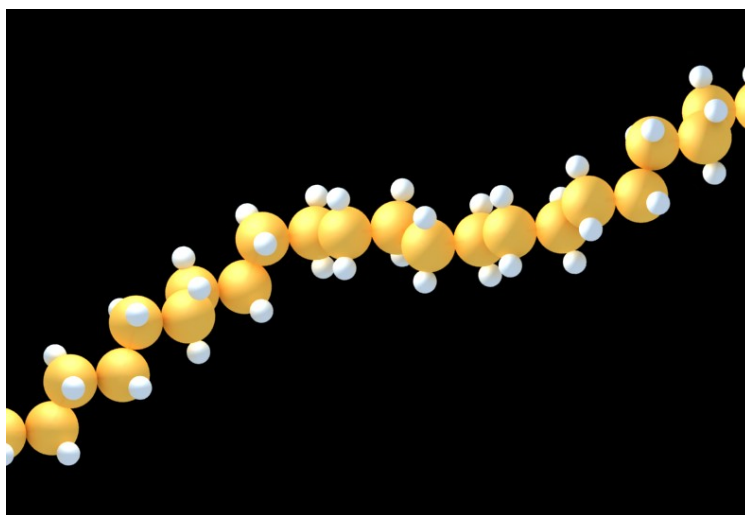
Jak už jsme uvedli, mezi atomy je v rámci jednoho řetězce vždy vazba kovalentní. Základem struktury řetězce je tedy (viz kap. 2.2) např. v případě polyetylénu tetraedr s atomem uhlíku ve středu tetraedru a dvěma atomy uhlíku a dvěma atomy vodíku ve vrcholech. Z podmínky

kovalentní vazby vyplývá, že mezi dvěma spojnicemi atomů uhlíku musí být vždy úhel cca $109,5^\circ$ (viz kap. 2.2). Situace je schematicky znázorněna na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Geometrické poměry v atomární struktuře řetězce polyetylénu

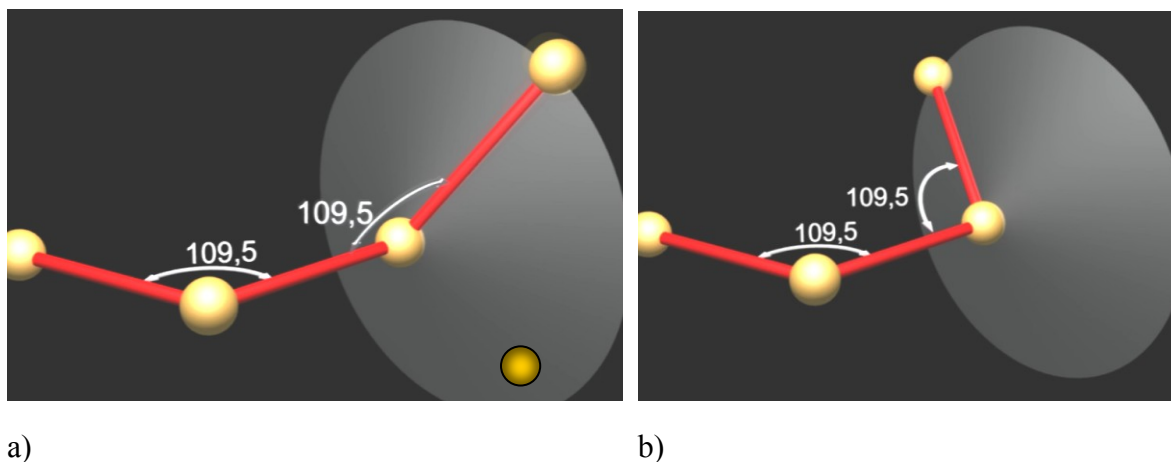
Ve skutečnosti není atomární struktura řetězců tak pravidelná, jak by se mohlo zdát z předchozích obrázků. Ani jednoduché řetězce nebývají napříměné, ale jsou různě zprohýbané, zkroucené. Příklad reálného tvaru řetězce polyetylénu je uveden na obr. 5.10. Na obr. 5.9, 5.10 jsou atomy uhlíku znázorněny žlutě a atomy vodíku jsou zobrazeny bíle.



Obr. 5.10 Příklad reálného tvaru řetězce polyetylénu

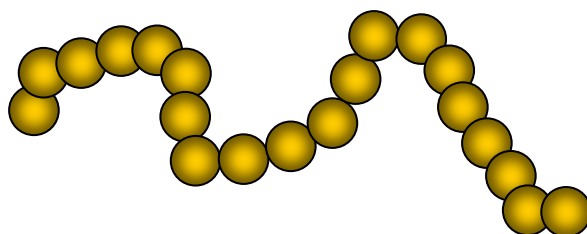
Při libovolném reálném (tedy možném) tvaru řetězce polymerů musí platit, že dvě spojnice sousedních atomů uhlíku svírají úhel $109,5^\circ$, který vyplývá z podmínky kovalentní vazby. Je

velice důležité, že tato podmínka ale neurčuje v případě jednoduchého řetězce polohu atomů v prostoru jednoznačně. To je znázorněno na obr. 5.11.

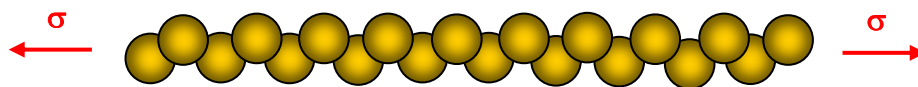


Obr. 5.11 Znázornění geometrického místa bodů pro atom uhlíku v jednoduchém řetězci polymeru

Z obr. 5.11 je zřejmé, že pokud je mezi dvěma sousedními spojnici atomů uhlíku v „páteři řetězce“ úhel 109,5°, pak pro další sousední atom bude tato podmínka splněna kdekoli na konci úsečky, která je povrchkou kuželové plochy, pro kterou platí – viz obr. 5.11, že doplňkový úhel do 180° k polovině vrcholového úhlu kužele je právě 109,5°. Jistě byste vypočetli, že vrcholový úhel kuželové plochy je $2 \cdot (180 - 109,5) = 141^\circ$. Znamená to, že řetězce, zvláště jednoduché, event. rozvětvené, se mohou za jistých podmínek v prostoru natáčet (napřimovat), zejména pod vlivem působení vnějšího napětí. Srovnání tvaru řetězce termoplastu ve výchozím stavu a za působení vnějšího napětí je uvedeno na obr. 5.12 a,b. Natáčení řetězců je velmi důležité pro vlastnosti polymerů a více si uvedeme v části věnované vlastnostem. Natáčení řetězců však není možné, jsou-li řetězce prostorově zesíťované, což je příklad reaktoplastů. V reaktoplastech jsou řetězce v zásadě nepohyblivé, což má zase vliv na jejich vlastnosti (deformovatelnost a tuhost).



Obr. 5.12a Řetězec termoplastu ve výchozím stavu

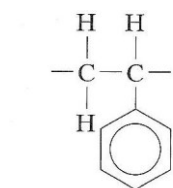


Obr. 5.12b Napřímený řetězec termoplastu při působení vnějšího napětí σ

□ Stereoizomerie polymerů

Při studiu struktury polymerů má velký význam také uspořádání bočních skupin (radikálů) v řetězcích, které se někdy označuje jako **stereoizomerie**. Boční radikály jsou skupiny atomů s vazbou na atom uhlíku, který je v páteři řetězce. Význam uspořádání bočních radikálů je tím větší, čím jsou tyto boční radikály složitější. Příkladem polymeru se složitějšími bočními radikály může být např. polystyren. U něho je bočním radikálem benzenové jádro.

Základní jednotkou (merem) v řetězci polystyrenu je skupina:



V závislosti na uspořádání bočních radikálů (někdy se označují písmenem R) se rozlišují tři druhy uspořádání:

- ataktické uspořádání;
- izotaktické uspořádání;
- syndiotaktické uspořádání.

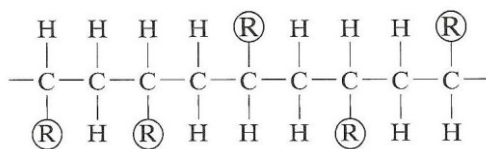
Ataktické uspořádání znamená statisticky náhodné pospojování molekul bez přednostní orientace bočních radikálů.

Izotaktické uspořádání znamená, že boční radikály jsou u všech molekul uspořádány shodně.

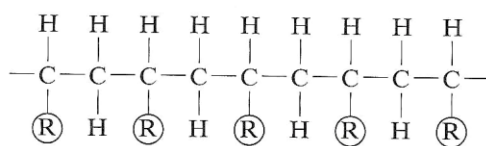
Syndiotaktické uspořádání znamená, že boční radikály jsou u jednotlivých molekul uspořádány střídavě (zrcadlově).

Uspořádání bočních radikálů lze do jisté míry ovlivnit průběhem polymerace a závisí na něm některé vlastnosti polymerů (viz dále).

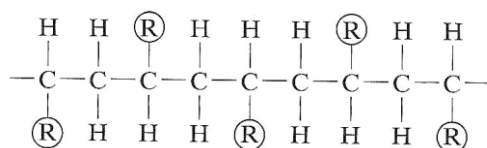
Všechny tři druhy uspořádání bočních radikálů jsou schematicky znázorněny na obr. 5.13 a,b,c. Na obr. 5.14a, b, c je pak trojrozměrný pohled na strukturu ataktického, izotaktického a syndiotaktického polystyrenu.



a) ataktické uspořádání

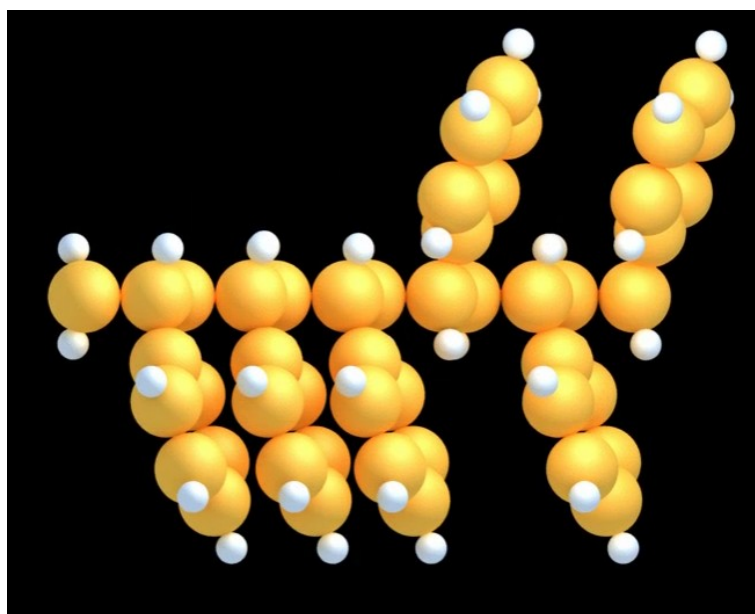


b) izotaktické uspořádání

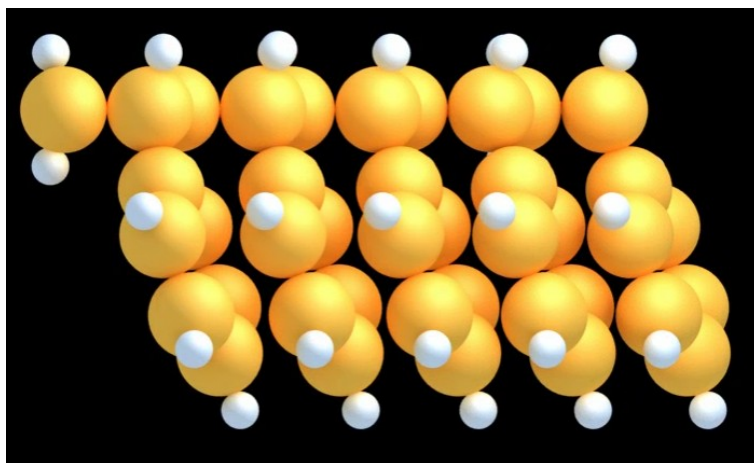


c) syndiotaktické uspořádání

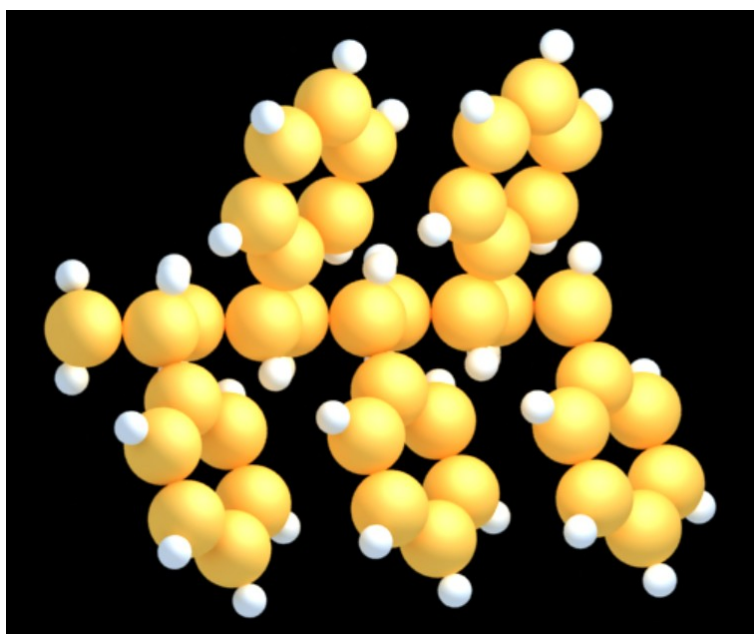
Obr. 5.13 Druhy uspořádání bočních radikálů v řetězcích polymerů



a) ataktické uspořádání



b) izotaktické uspořádání



c) syndiotaktické uspořádání

Obr. 5.14 Trojrozměrné zobrazení možných uspořádání bočních radikálů v polystyrenu

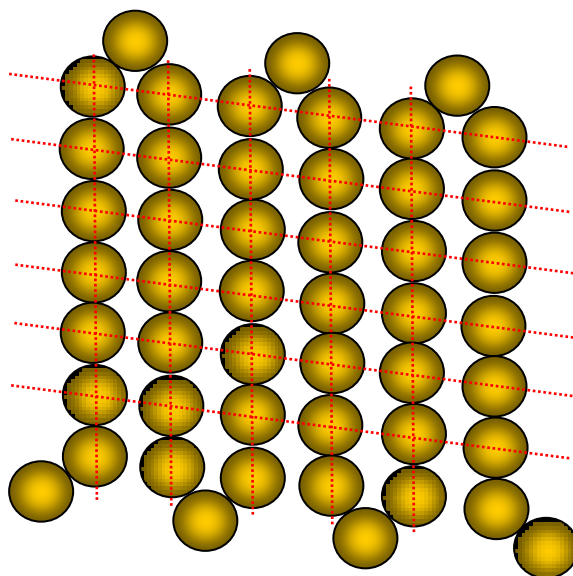
□ Amorfní a krystalický stav polymerů

Polymery jsou materiály, které jsou **přednostně ve stavu amorfním**. To znamená absenci uspořádání na dlouhou vzdálenost. Za určitých podmínek však mohou být některé druhy polymerů i **částečně krystalické**. S částečně krystalickým stavem se setkáváme především u některých termoplastů, méně u elastomerů. Reaktoplasty bývají výhradně amorfni.

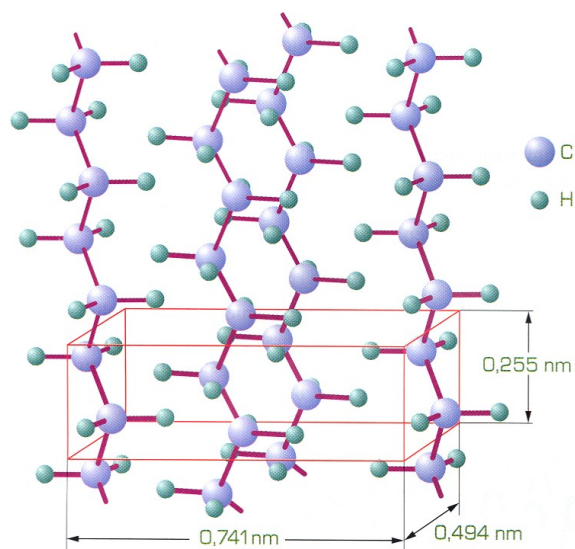
Existence částečně krystalického stavu je podporována jednoduchou strukturou polymeru, jednoduchým (lineárním) řetězcem bez výrazného větvení a zesítní. Existence krystalického stavu je dále podporována nižší rychlostí tuhnutí polymeru. Z hlediska stereoizomerie není krystalický stav možný, pokud je uspořádání bočních radikálů ataktické, tedy náhodné. Typickým polymerem, u něhož lze dosáhnout krystalického stavu až v 90 % objemu, je polyetylén. Podíl krystalického stavu v objemu polymeru se někdy označuje jako **stupeň krystalinity**.

Krystalický stav znamená i u polymerů existenci pravidelného, periodického uspořádání atomů. Krystalický stav vznikne tak, že při polymeraci a tuhnutí polymeru se jednoduchý řetězec zformuje do tvaru **meandru** a v něm lze tedy nalézt pravidelnost a periodicitu v uspořádání atomů. Krystalický stav polymerů je popsán v různém měřítku na obr. 5.15 – 5.18.

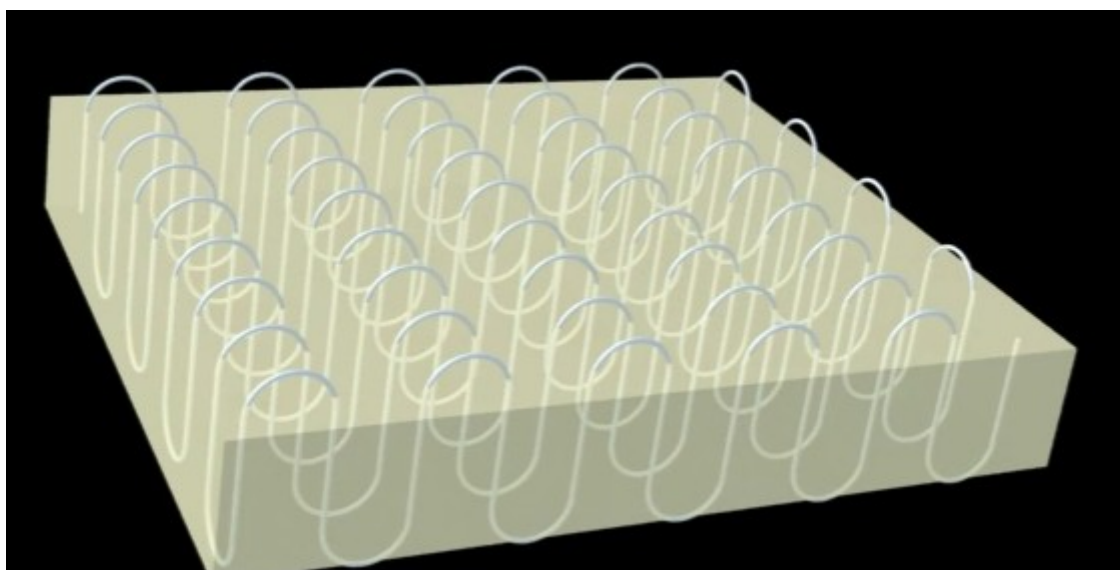
Jednotlivé kuličky na obr. 5.15 nepředstavují atomy, ale skupiny atomů, podobně jako na obr. 5.4 až 5.7. Na obr. 5.17 je vidět, že řetězec vytváří v krystalické oblasti meandr, který je trojrozměrný. Většina polymerů nemůže být plně krystalická a obsahuje vždy alespoň částečně amorfní podíl. To je zobrazeno na obr. 5.18.



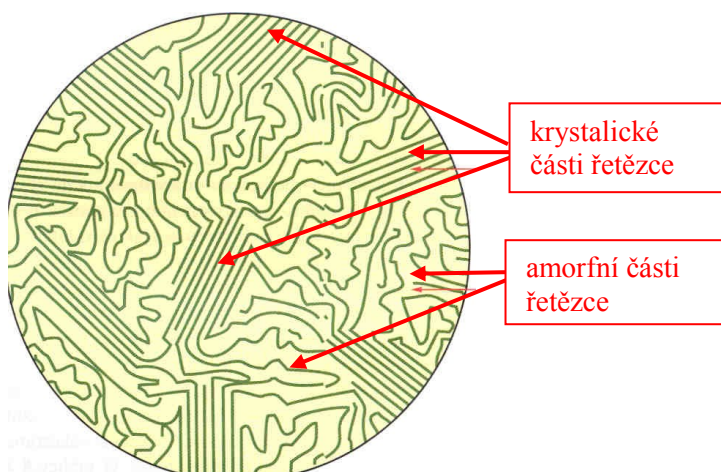
Obr. 5.15 Znárodnění řetězce ve tvaru meandru, který vytváří krystalický stav polymeru



Obr. 5.16 Zobrazení části meandru na atomární úrovni pro případ polyetylénu s vyznačením elementární buňky



Obr. 5.17 Trojrozměrný meandr představující krystalický stav polymeru



Obr. 5.18 Znáznornění krystalických a amorfních částí řetězců v polymeru

Stupeň krystalinity polymeru, tj. podíl objemu, který odpovídá krystalickému stavu, ovlivňuje vlastnosti polymeru, jak bude uvedeno dále. Zjednodušeně lze říci, že čím vyšší je stupeň krystalinity polymeru, tím vyšší je jeho tuhost a pevnost.



Shrnutí pojmů 5.3.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Jednoduchý (lineární) řetězec, rozvětvený řetězec, prostorově zesítěný řetězec, slabě (částečně) zesítěný řetězec;**
- **Stereoizomerie polymerů, boční radikály, ataktické uspořádání, izotaktické uspořádání, syndiotaktické uspořádání;**
- **Amorfni stav polymerů, částečně krystalický stav, meandr, stupeň krystalinity.**



Otázky 5.3.

14. Jaké druhy makromolekulárních řetězců se vyskytují v polymerech?
15. Popište jednoduchý (lineární) řetězec.
16. Bývá jednoduchý řetězec přímkový?
17. Popište rozvětvený řetězec.
18. Jak vypadá prostorově zesítěný řetězec?
19. Pro které druhy polymerů jsou charakteristické prostorově zesítené řetězce?
20. Charakterizujte slabě zesítěný řetězec.
21. Pro které druhy polymerů jsou charakteristické slabě zesítené řetězce?
22. Jaká je vazba mezi atomy v jednom řetězci?

23. Jaká je vazba mezi atomy různých řetězců, kromě míst zesítnění?
24. Co je základem atomární struktury polyetylénu?
25. Jaký je úhel mezi spojnicemi sousedních atomů uhlíku v „páteři“ makromolekulárního řetězce?
26. Mohou se řetězce za určitých podmínek v prostoru natáčet? Jaká podmínka musí být přitom splněna?
27. Mohou se v prostoru natáčet prostorově zesítněné řetězce? Vysvětlete.
28. Co popisuje stereoizomerie polymerů?
29. S jakým uspořádáním bočních radikálů se můžeme setkat u polymerů?
30. Co znamená ataktické uspořádání bočních radikálů?
31. Co znamená izotaktické uspořádání bočních radikálů?
32. Co znamená syndiotaktické uspořádání bočních radikálů?
33. Jsou polymery přednostně ve stavu krystalickém, nebo amorfním?
34. Čím je podporován částečně krystalický stav polymerů?
35. Může vzniknout krystalický stav v polymeru s ataktickým uspořádáním bočních radikálů?
36. U kterého typu polymerů se můžeme nejčastěji setkat s částečně krystalickým stavem?
37. Jaký útvar vytváří řetězec v krystalické části polymeru?
38. Může částečně krystalický stav vzniknout u rozvětvených polymerů?

5.4. Vlastnosti polymerů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat některé mechanické vlastnosti jednotlivých skupin polymerů a objasnit, na čem závisejí;
- popsat jednotlivé oblasti chování termoplastů a elastomerů v závislosti na teplotě;
- vysvětlit pojem teplota skelného přechodu a objasnit, na kterých parametrech zejména závisí;
- objasnit základní etapy při deformaci termoplastů v kaučukovité oblasti.

□ Mechanické vlastnosti

V kap. 2 jsme uvedli, že vlastnosti materiálů závisí velice významně na jejich vnitřní stavbě. Platí to i pro polymery. Proto jsme se také jejich vnitřní stavbě věnovali nejdříve. Teď tedy můžeme přikročit k popisu jejich hlavních vlastností. Zde se omezíme jen na vybrané vlastnosti mechanické, další vlastnosti pak doplníme v následujících částech.

Pokud jde o mechanické vlastnosti polymerů, nezačneme pevností, ale jinou charakteristikou, a to modulem pružnosti v tahu. O tom jste se dozvěděli již v kap. 3. **Modul pružnosti v tahu E**, vyjadřovaný nejčastěji v MPa, je důležitou materiálovou charakteristikou a informuje nás mj. o tuhosti materiálu. To vyplývá z následující rovnice, která vychází z Hookova zákona:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \text{rov. 5.1}$$

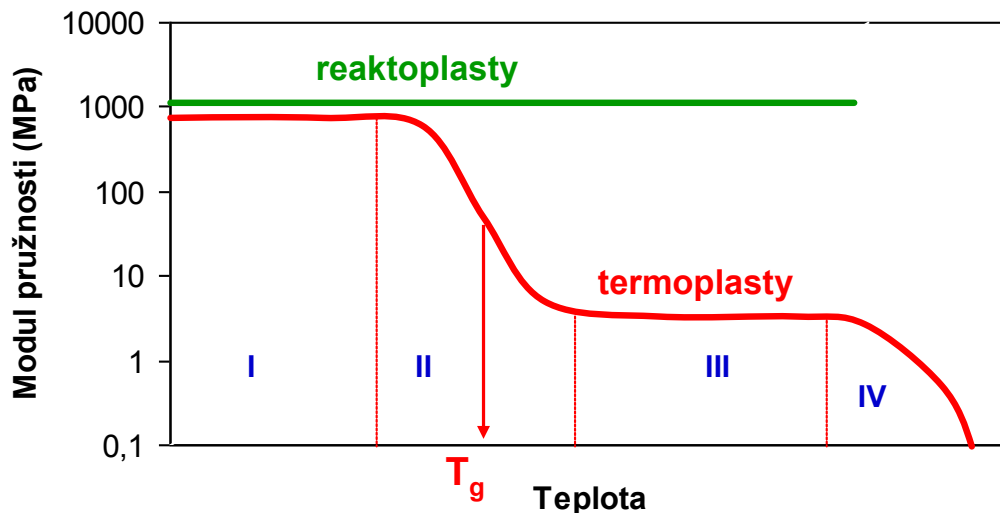
kde ε je pružná deformace materiálu (-);

σ je působící napětí (MPa);

E je modul pružnosti v tahu (MPa).

Z rovnice 5.1 vyplývá, že při stejném napětí je pružná deformace materiálu tím menší, čím vyšší je modul pružnosti materiálu. Mají-li materiály vysoký modul pružnosti, tzn. pod vlivem napětí se deformují jen málo, říkáme, že mají vysokou míru tuhosti. **Modul pružnosti** se tedy někdy označuje jako **míra tuhosti**. A jak jsou na tom s modulem pružnosti polymery? Úplně jinak než např. kovové materiály. Modul pružnosti polymerů je obecně nízký a dosahuje max. hodnot řádově 10^3 MPa. V některých případech však může modul pružnosti polymerů dosahovat jen hodnot v jednotkách MPa. *(Připomeňme, že u kovů se hodnoty*

modulu pružnosti v tahu pohybují ve statisících MPa.) Navíc, podle druhu polymeru může modul pružnosti záviset velmi významně na teplotě. Závislost modulu pružnosti na teplotě je schematicky znázorněna pro termoplasty a reaktoplasty na obr. 5.19.



Obr. 5.19 Teplotní závislost modulu pružnosti E pro termoplasty a reaktoplasty

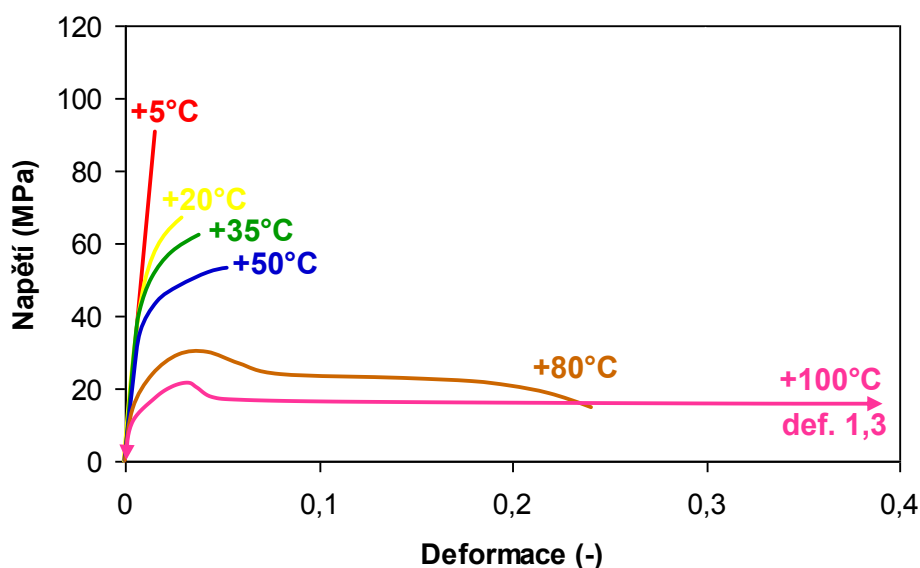
Z obr. 5.19 je vidět, že hodnota modulu pružnosti reaktoplastů, a tedy jejich tuhost, je v zásadě na teplotě nezávislá, konstantní a pohybuje se okolo 10^3 MPa. Vyplývá to z toho, že **reaktoplasty** jsou kvůli prostorovému zesílení řetězců v podstatě **nedeformovatelné** a tudíž **křehké**. V případě termoplastů je závislost modulu pružnosti na teplotě výrazná a lze v ní rozlišit čtyři rozdílné oblasti:

- oblast skelnou (I);
- oblast přechodovou (II);
- oblast kaučukovitou (III);
- oblast viskózního tečení (IV).

V oblasti I dosahuje modul pružnosti termoplastů hodnot cca 10^3 MPa a **termoplasty** jsou v této oblasti, podobně jako reaktoplasty, jen málo deformovatelné, křehké. Tato oblast se nazývá **skelná oblast** vzhledem k tomu, že sklo je ukázkový příklad křehkého materiálu. Neschopnost deformace termoplastů ve skelné oblasti má jinou příčinu než u reaktoplastů. V části 5.3 jsme uvedli, že termoplasty mají většinou jednoduché, nebo rozvětvené řetězce a že tyto řetězce se mohou v prostoru natáčet, deformovat. Jednotlivé řetězce se mohou také „posouvat“ jeden vůči druhému. K tomu je však zapotřebí určitá energie vibračního pohybu atomů. Tato energie je ve skelné oblasti ještě nízká (atomy jsou jakoby „zamrzlé“) a termoplasty se tak chovají jako obtížně deformovatelný a křehký materiál. V oblasti II modul pružnosti termoplastů postupně klesá a jejich schopnost deformace se zvyšuje. Oblast II se

nazývá **přechodová oblast**. V oblasti III jsou již termoplasty poměrně snadno deformovatelné, a to jak elasticky (vratně), tak plasticky (nevratně). Hodnota modulu pružnosti je nízká a pohybuje se v jednotkách MPa. Tato oblast se nazývá **kaučukovitá oblast**, protože chování materiálů se podobá chování kaučuku (pryží). Jednotlivé řetězce se mohou (zejména při působení vnějšího napětí) napřimovat, mohou se také navzájem posouvat atd. Při dalším zvýšení teploty se termoplasty dostávají do **oblasti viskózního tečení** (IV), kdy se chovají jako viskózní (špatně tekutá) kapalina. V oblasti viskózního tečení bývají termoplasty jen při výrobě, resp. recyklaci, avšak nikdy za provozu. V obr. 5.19 je vyznačena teplota T_g , které se říká **teplota skelného přechodu**. Nad touto teplotou se termoplasty chovají kaučukovitě – jsou schopny poměrně vysoké deformace a mají nízký modul pružnosti (v jednotkách MPa). Pod teplotou T_g se termoplasty chovají křehce, jsou jen obtížně deformovatelné a hodnota modulu pružnosti se pohybuje okolo 10^3 MPa. Teplota skelného přechodu leží pro většinu termoplastů nad pokojovou teplotou, velice zhruba v rozmezí $+60$ až $+120^\circ\text{C}$. Znamená to, že většinu termoplastů používáme ve skelné nebo přechodové oblasti. Na tomto místě můžeme uvést, že podobná závislost modulu pružnosti na teplotě, jakou mají termoplasty, platí i pro elastomery. Hlavní rozdíl je v tom, že teplota skelného přechodu elastomerů je mnohem nižší, a to pod bodem mrazu (velmi zhruba -50 až -120°C). Znamená to, že elastomery používáme převážně v kaučukovité oblasti.

Vykazují-li termoplasty zmíněnou silnou závislost modulu pružnosti na teplotě, bude jistě zajímavé dozvědět se, jak se v závislosti na teplotě mění jejich další mechanické vlastnosti, např. při tahové zkoušce. Na obr. 5.20 jsou znázorněny tahové diagramy napětí vs deformace získané při tahové zkoušce polymethylmetakrylátu (plexiskla) za různých teplot.



Obr. 5.20 Tahové diagramy napětí – deformace pro polymethylmetakrylát (plexisklo) zkoušený za různých teplot

Z obr. 5.20 je dobře vidět, že s rostoucí teplotou tahové zkoušky výrazně klesá lomové napětí (pevnost) a zvyšuje se lomová deformace. Až do teploty $+50^{\circ}\text{C}$ je celková lomová deformace nízká (cca 0,05, tj. 5%). Z toho vyplývá, že při teplotě $+50^{\circ}\text{C}$ se daný polymetylmetakrylát stále nachází ve skelné oblasti. Při teplotě zkoušení $+80^{\circ}\text{C}$ je už hodnota lomové deformace výrazně vyšší, a to cca 0,25, tj. 25%. Na skelnou oblast je to už deformace příliš vysoká, na čistě kaučukovitou oblast by to byla ještě deformace nízká. Teplota $+80^{\circ}\text{C}$ v daném případě zhruba odpovídá přechodové oblasti, tedy teplotě skelného přechodu. Při teplotě $+100^{\circ}\text{C}$ je lomová deformace 1,3, tj. 130%, což dobře odpovídá kaučukovité oblasti materiálu.

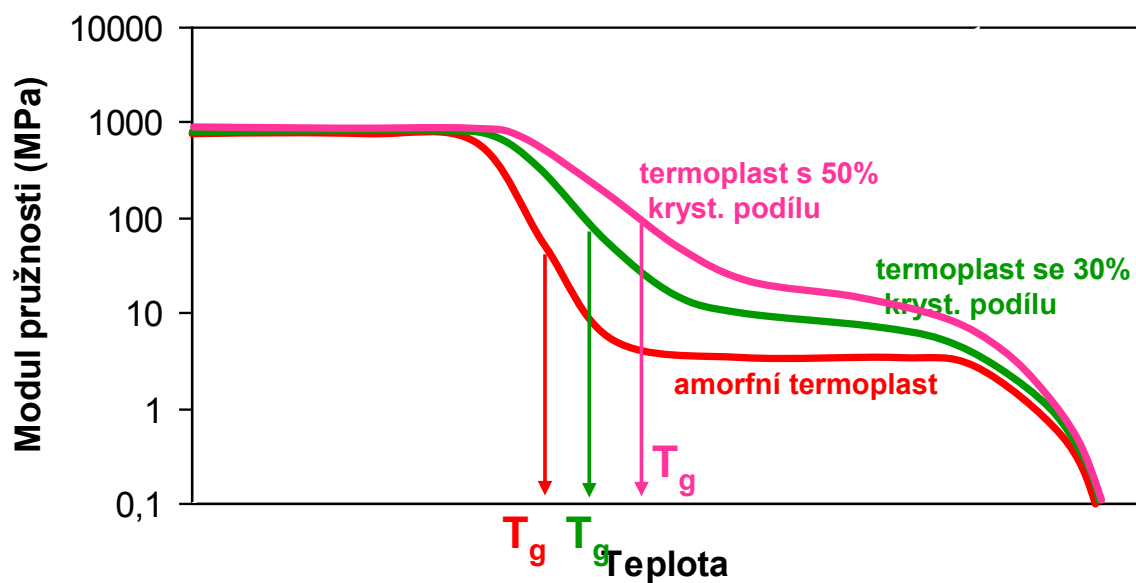
Zeptám se vás. Chtěli byste, aby z takového polymetylmetakrylátu (plexiskla) byly světlomety na vašem autě?? Já bych to asi nechtěl. Teploty $+80^{\circ}\text{C}$ se sice na povrchu auta často nedosáhne, ale pokud byste byli na dovolené autem někde na jihu Evropy, tak by se taková teplota nedala vyloučit. A mohlo by se stát, že při nechtěném kontaktu by se světlomety promáčkly.... Pro polymetylmetakrylát používaný na výrobu světlometů se většinou požaduje, aby teplota jeho skelného přechodu byla cca 110°C .

Teplotní závislost modulu pružnosti termoplastů uvedená na obr. 5.19 závisí výrazně na několika činitelích, které souvisejí s vnitřní stavbou. Těmito činiteli jsou:

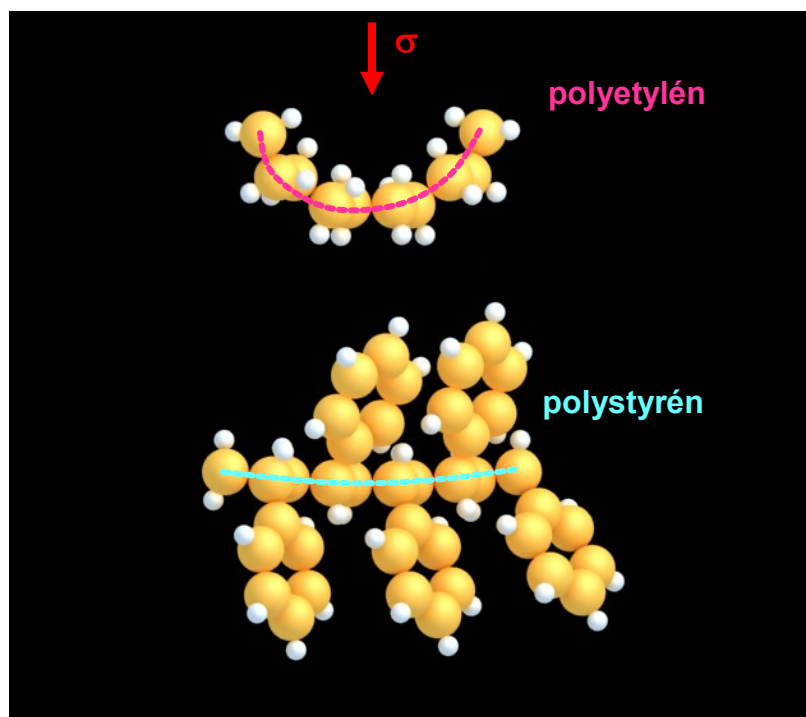
- **relativní molekulová hmotnost;**
- **míra rozvětvení řetězců;**
- **stupeň krystalinity;**
- **složitost bočních radikálů.**

Můžeme říci, že s rostoucí hodnotou těchto činitelů roste teplota skelného přechodu a zvyšuje se také modul pružnosti termoplastu v kaučukovité oblasti. Jako příklad je na obr. 5.21 uvedena teplotní závislost modulu pružnosti termoplastu pro rozdílné stupně krystalinity. Je zřejmé, že s rostoucím stupněm krystalinity stoupá teplota skelného přechodu T_g a také hodnota modulu pružnosti a tím i tuhost v kaučukovité oblasti.

Na obr. 5.22 je schematicky znázorněna deformace řetězce dvou rozdílných termoplastů – polyetylenu a polystyrénu - při působení shodného ohybového napětí. Z obrázku je zřejmé, že v případě polystyrénu, který má složitější boční radikály (benzenová jádra), dojde při působení shodného ohybového napětí k podstatně menšímu prohnutí řetězce. Je to potvrzením toho, že polystyrén má v kaučukovité oblasti mnohem větší tuhost než polyetylen.



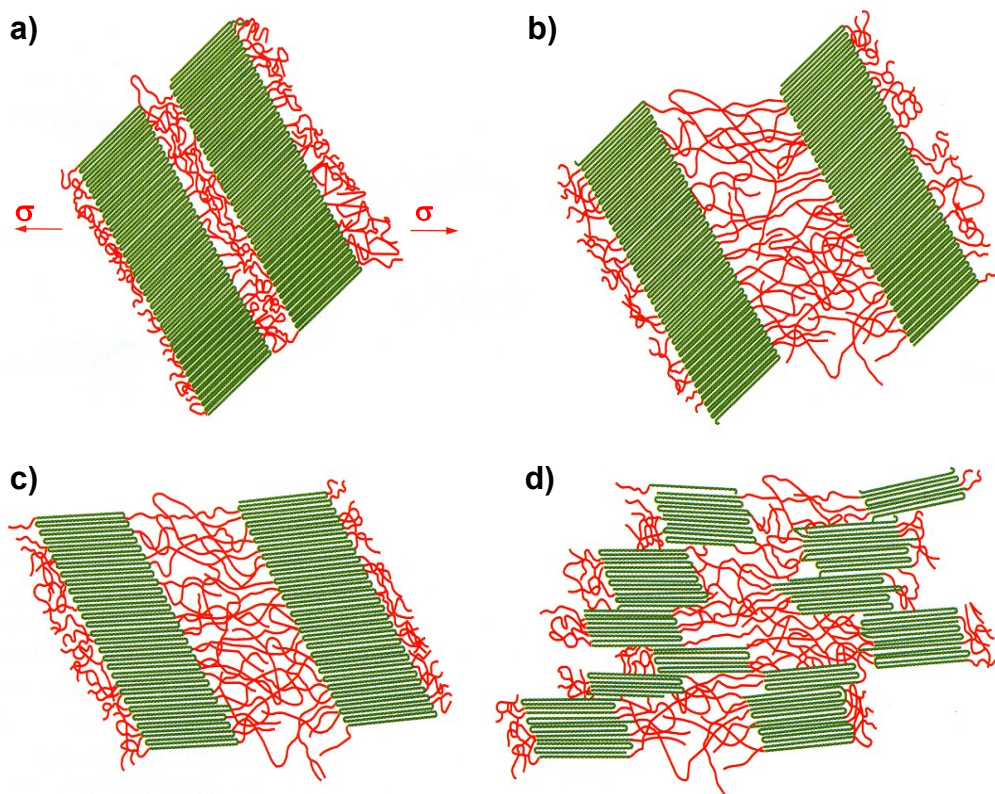
Obr. 5.21 Teplotní závislost modulu pružnosti pro termoplast s rozdílným stupněm krystalinity



Obr. 5.22 Srovnání deformace řetězců polyethylénu a polystyrénu při působení shodného ohybového napětí

Zkusme si ještě alespoň jednoduše ukázat, co se děje v částečně krystalickém polymeru – termoplastu při jeho zatěžování tahovým napětím nad teplotou skelného přechodu. Obecně platí, že části krystalické budou mít vyšší pevnost i tuhost oproti částem amorfním, mj.

jednoduše proto, že v krystalické části jsou atomy blíž u sebe a působí tam vyšší vazebné síly. Základní děje při deformaci částečně krystalického termoplastu nad teplotou skelného přechodu jsou uvedeny na obr. 5.23.



Obr. 5.23 Průběh deformace částečně krystalického termoplastu nad teplotou skelného přechodu

Výchozí stav je vyznačen na obr. 5.23a. Zeleně jsou znázorněny části krystalické, červeně pak části amorfni. V obrázku je vyznačen směr působícího napětí. Deformace začíná napřimováním řetězců v amorfni částech polymeru, kde působí nižší vazebné síly, zatímco krystalické části polymeru se makroskopicky ještě nedeformují (obr. 5.23b). Při zvyšování napětí pokračuje napřimování řetězců v amorfni částech polymeru a zároveň dochází k natáčení krystalických částí do směru působícího napětí (obr. 5.23c). Při dalším zvyšování napětí již může docházet k přetrhávání řetězců v amorfni částech a k postupnému oddělování (posuvu) krystalických částí termoplastu (obr. 5.23d). Tento proces vyústí v konečný lom.



Shrnutí pojmů 5.4.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **modul pružnosti – míra tuhosti;**
- **teplotní závislost modulu pružnosti – skelná oblast, přechodová oblast, kaučukovitá oblast, oblast viskózního tečení, teplota skelného přechodu.**



Otázky 5.4.

39. Jakých hodnot dosahuje řádově modul pružnosti reaktoplastů?
40. Které oblasti můžeme rozlišit v teplotní závislosti modulu pružnosti termoplastů?
41. Jaká je řádově hodnota modulu pružnosti termoplastů ve skelné oblasti?
42. Jak je definována teplota skelného přechodu?
43. Jaká je řádově hodnota modulu pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti?
44. Je vhodné, aby se termoplast dostal během provozu do oblasti viskózního tečení?
45. V jakém rozmezí se zhruba pohybuje teplota skelného přechodu termoplastů?
46. V jakém rozmezí se zhruba pohybuje teplota skelného přechodu elastomerů?
47. V jakém rozmezí se zhruba pohybuje teplota skelného přechodu reaktoplastů?
48. Vyjmenujte činitele, na nichž závisí teplotní závislost modulu pružnosti termoplastů.
49. Jak závisí modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti na složitosti bočních radikálů?
50. Jak závisí modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti na stupni krystalinity?
51. Jak závisí modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti na míře rozvětvení řetězců?

5.5. Charakteristiky hlavních skupin polymerů



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat tři hlavní skupiny polymerů;
- popsat významné vlastnosti v každé skupině polymerů a vyjmenovat hlavní představitele každé skupiny;
- vybrat některé představitele polymerů a popsat, k čemu se přednostně používají;
- charakterizovat proces vulkanizace kaučuku, resp. nežádoucí proces tvrdnutí kaučuku.

V předchozích částech jsme si uvedli základní charakteristiky vnitřní stavby polymerů a také alespoň některé jejich vlastnosti. V následující části si velmi stručně popíšeme nejvýznamnější představitele z každé skupiny polymerů, tedy z termoplastů, reaktoplastů a elastomerů.

□ Termoplasty

Termoplasty, jak už jsme uvedli, mají řetězce buď jednoduché (lineární), nebo rozvětvené. Mohou být částečně krystalické. Charakterizuje je obecně poměrně nízká hustota, vysoká korozní odolnost, u řady z nich pak nízký součinitel tření, s čímž souvisí poměrně vysoká odolnost vůči opotřebení. V následující tabulce 5.1 jsou uvedeny hlavní představitelé termoplastů a jejich vybrané charakteristiky, jako hustota ρ , modul pružnosti v tahu E při teplotě $+20^\circ\text{C}$, mez pevnosti v tahu R_m a teplota skelného přechodu T_g . Všechny hodnoty jsou přibližné, protože jak už bylo zmíněno, závisí vlastnosti polymerů na celé řadě činitelů, např. na relativní molekulové hmotnosti, stupni krystalinity, míře rozvětvení řetězců apod.

Tabulka 5.1 Hlavní představitelé termoplastů a jejich vybrané charakteristiky

Termoplast	Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Modul pružnosti E (MPa) při $+20^\circ\text{C}$	Mez pevnosti R_m (MPa)	Teplota skelného přechodu T_g ($^\circ\text{C}$)
Polyetylén s nízkou hustotou (LDPE)	910 - 930	150 - 240	7 - 17	0
Polyetylén s vysokou hustotou (HDPE)	950 - 980	550 - 1000	20 - 37	+30

Polypropylén (PP)	910	1200 - 1700	50 - 70	+80
Polyvinylchlorid (PVC)	1400	2400 - 3000	40 – 60	+80
Polystyrén (PS)	1100	3000 – 3300	35 – 68	+100
Polymethylmetakrylát (PMMA)	1200	3300	80 – 90	+110
Polykarbonát (PC)	1250	2200 – 2500	62 – 67	+150
Polyamid (PA)	1150	2000 – 3500	60 – 110	+70
Polytetrafluoretylen (PTFE)	1100	350	17 – 28	-

Alespoň pro některé z termoplastů v tab. 5.1 uvádíme chemický vzorec, jímž bývají nejčastěji charakterizovány (jedná se vlastně o vzorec jejich meru):

- polyetylén (to už znáte):

$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$$
- polypropylén:

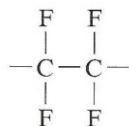
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$$
- polyvinylchlorid:

$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$$
- polystyrén:

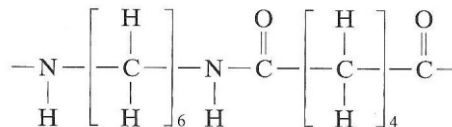
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$$
- polymethylmetakrylát:

$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{C}-\text{O}-\text{CH}_3 \\ || \\ \text{O} \end{array}$$

- polytetrafluoretylen:



- polyamid (nylon):



Tabulku 5.1 ani chemické vzorce se nemusíte učit z paměti. Ale mohli byste zkusit některé vlastnosti srovnat a vysvětlit. Pro níže uvedené polymery byste si mohli zapamatovat alespoň některé příklady použití.

V tabulce 5.1 najdete nejnižší hodnoty většiny charakteristik u polyetylenu. Proč tomu tak je? Je tomu tak proto, že **polyetylén** má nejjednodušší strukturu, v zásadě nemá boční radikály. Důležité je, že jeho vlastnosti (ale i vlastnosti všech dalších polymerů) mohou záviset na hustotě, která úzce souvisí s relativní molekulovou hmotností. Mimo uvedených polyetylenů s nízkou a vysokou hustotou se vyrábí i tzv. UHDPE. Přijďte na to, co ta zkratka znamená? Je to Ultra High Density PolyEthylen. A ten se používá např. v medicíně jako materiál pro kloubní jamky při náhradách kyčelních kloubů. Používá se mj. proto, že má nízký součinitel tření, a tedy relativně vysokou odolnost vůči opotřebení. Zmínka o tom byla už v kapitole 2. Běžný polyetylén se používá hlavně v **obalové technice**, ale také na různé trubky (např. vodovodní pro nízké tlaky), izolace v elektrotechnice apod.

Podobně nízké hodnoty základních charakteristik najdeme u **polytetrafluoretylenu**. Ten jistě znáte, ale možná pod méně vznešeným obchodním názvem – **Teflon**. Nízké mechanické charakteristiky také souvisejí s jednoduchou strukturou řetězce. Vyšší hustota souvisí s tím, že místo atomů vodíku obsahuje atomy fluoru, který je těžší. Teflon má velmi dobré **třecí vlastnosti**, a proto se často používá na výstelky ložisek apod. Má také **antiadhezní vlastnosti** (antiadhezní = nepřilnavý, zabraňující ulpívání) a jistě ho znáte z použití v domácnosti na pánvích, ale i žehlicích vrstvách apod.

U dalších termoplastů již najdeme vyšší hodnoty mechanických charakteristik. Mez pevnosti ale nepřekračuje 100 MPa. Teplota skelného přechodu se pohybuje (viz část 5.4) nad pokojovou teplotou, to znamená, že termoplasty obvykle používáme ve skelné, nebo přechodové oblasti.

Některé další termoplasty (polypropylen, polyvinylchlorid, polystyren) mají vyšší mechanické charakteristiky a také vyšší teplotu skelného přechodu. Souvisí to mj. se složitější chemickou strukturou, resp. s většími bočními radikály. U polypropylenu je bočním radikálem skupina —CH₃, u polystyrénu je to benzenové jádro. Mohli byste namítnout, že **polyvinylchlorid** nemá složitou strukturu. Ale u něj se uplatní jiný důležitý faktor. Řetězce polyvinylchloridu tvoří

tzv. **polární molekuly**, kdy v blízkosti atomů vodíku je slabý kladný náboj a v blízkosti atomu chlóru je slabý záporný náboj. Tak se u polyvinylchloridu mohou ve větší míře uplatnit slabé molekulární vazby. Polyvinylchlorid se používá mj. na výrobu **trub**, ale také na **izolace elektrických kabelů**. Jako většina polymerů je hořlavý, ale při hoření vzniká hustý dým, který další hoření znesnadňuje.

Polypropylen se používá např. na vodovodní trubky pro vyšší tlaky než polyetylén, odpadní trubky, ale často také na různé součásti **v automobilovém průmyslu**. V některých případech se již nejedná o polymer, ale o kompozitní materiál zpevněný vlákny. Jistě víte, že u většiny automobilů jsou dnes nárazníky vyrobeny z polymerů. Jedním z často používaných polymerů na výrobu nárazníků je právě polypropylén (VW Golf, Renault, Fiat Punto aj.).

Polymetylmetakrylát také jistě znáte, např. pod názvem **plexisklo**. Má velmi dobré optické vlastnosti, např. nejvyšší propustnost pro světelné záření ze všech polymerů. Vyrábějí se z něho mj. **okna do letadel**, ale také většina vnějších částí **světlometů u automobilů**. Polymetylmetakrylát má jedno specifické použití v úplně odlišném oboru – v medicíně. Látka založená na polymetylmetakrylátu je tzv. **kostní cement**, který se v minulosti často používal pro fixaci kovových částí v kostech.

Polyamidy se používají ponejvíce na **výrobu vláken**, ale také na výrobu různých součástek, např. drobných ozubených koleček pro spotřebiče apod.

□ Reaktoplasty

Reaktoplasty, na rozdíl od termoplastů, mají řetězce prostorově zesíťené. Bývají pouze amorfni. Existují jen ve skelném stavu, nepřecházejí do kaučukovitého stavu. Prostorové zesíťení řetězců totiž neumožňuje významnější deformaci materiálu. Jak jsme už uvedli, jsou hlavními představiteli reaktoplastů polyfenolformaldehyd (bakelit), a dále epoxidová a polyesterová pryskyřice. Základní charakteristiky těchto reaktoplastů jsou uvedeny v tab. 5.2.

Tabulka 5.2 Hlavní představitelé reaktoplastů a jejich vybrané charakteristiky

Reaktoplast	Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Modul pružnosti E (MPa) při +20°C	Mez pevnosti R_m (MPa)
Polyfenolformaldehyd	1300	8000	35 - 55
Epoxid	1200 - 1400	2100 - 5500	40 - 85
Polyester	1100 – 1400	1300 – 4500	45 - 85

Chemické vzorce reaktoplastů jsou s výjimkou polyfenolformaldehydu, jehož vzorec znáte, docela složité, tak je v rámci úvodního předmětu nebudeme uvádět.

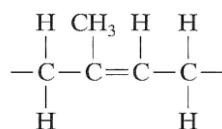
Reaktoplasty se v současnosti používají samostatně jen v omezené míře, např. **v elektrotechnice** pro své dobré **izolační vlastnosti** a **schopnost odolávat zvýšeným**

teplotám. Častěji se používají jako **výplň, tedy matrice** v různých typech **kompozitních (složených) materiálů**. Možná znáte jeden zvláštní příklad použití kompozitního materiálu na bázi bakelitu. Byla to karoserie osobního automobilu Trabant. Ta byla z kompozitu, jehož výplní byl reaktoplast – bakelit, který obsahoval jako „výztuž“ tkaninu vyrobenou z odpadní bavlny. Z dnešního pohledu na bezpečnost je použití takového materiálu naprosto nepochopitelné.... Nicméně, i v dnešních automobilech se můžeme setkat s materiály na bázi reaktoplastů (např. Mitsubishi). U termoplastů jsme se zmínili o tom, že nárazníky automobilů mohou být z polypropylénu. Dalším materiálem používaným na nárazníky automobilů jsou epoxidové, event. polyesterové pryskyřice, ale téměř vždy zpevněné, např. vlákny. Jedná se tedy již o kompozitní materiály.

□ Elastomery

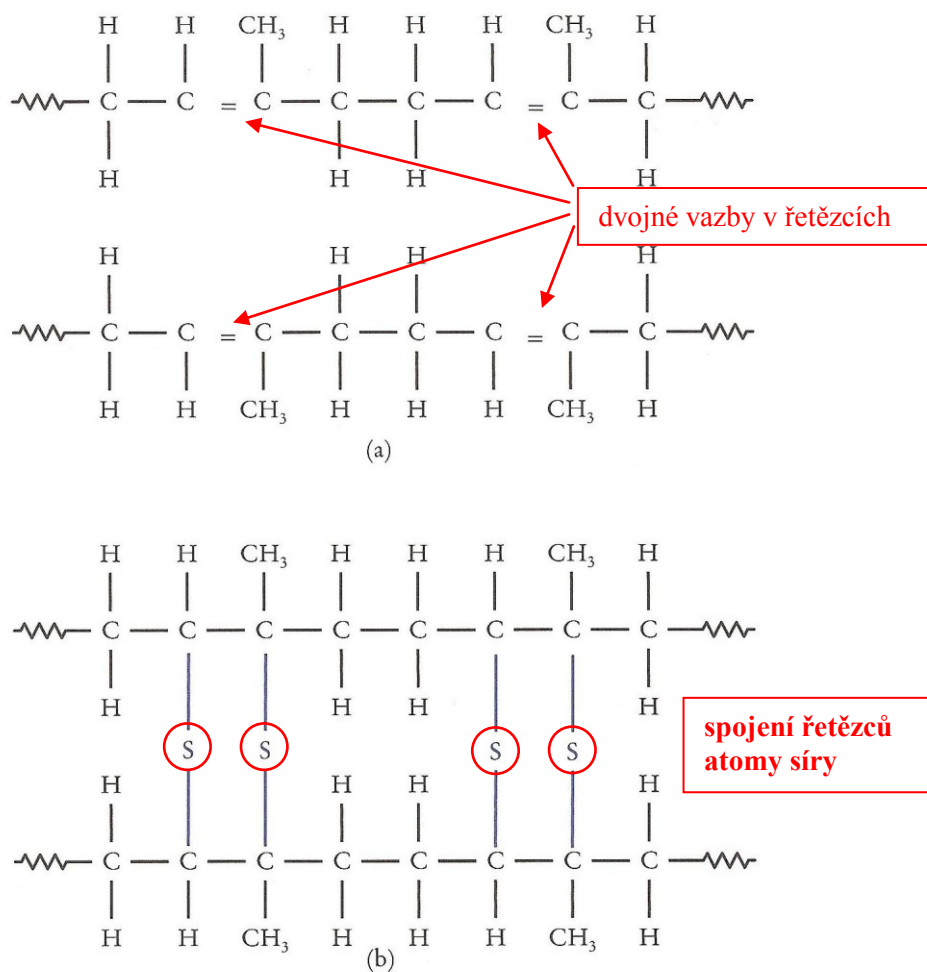
Elastomery jsme v předchozím výkladu trochu ošídili, tak to musíme napravit. Uvedli jsme, že jedním z prvních používaných elastomerů byl vulkanizovaný kaučuk. Elastomery mají slabě zesítené řetězce a jsou schopny zejména vysoké elastické deformace při působení nízkých napětí. Co se děje přesněji v polymeru při vulkanizaci, jsme ale dosud nepopsali.

Elastomery mají oproti termoplastům a reaktoplastům několik zvláštností. U elastomerů zůstávají v makromolekulárním řetězci dvojné vazby. To lze ukázat na příkladu polyizoprénu, který bývá zjednodušeně považován za základ přírodního kaučuku.



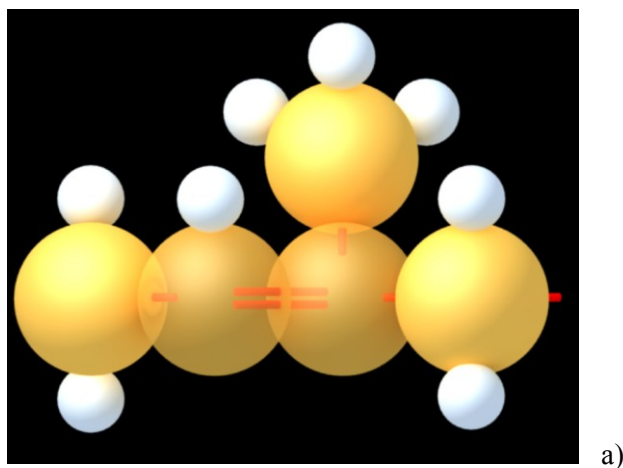
Chemický vzorec polyizoprénu je následující:

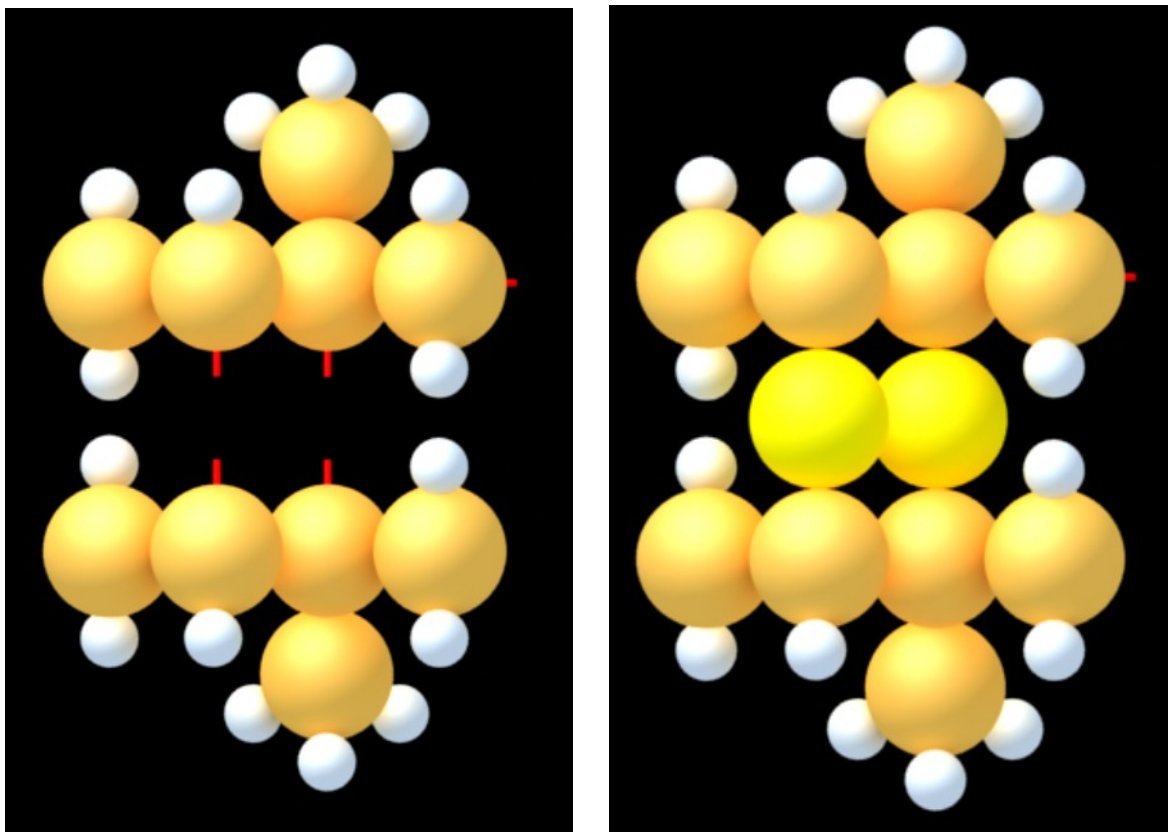
Za působení některých chemických látek, např. síry, a zvýšené teploty může dojít o otevření dvojné vazby a příčnému spojení řetězců atomy síry. A to je proces vulkanizace. K příčnému spojování řetězců dochází jen na malém počtu možných vazebných míst, a to cca na 0,5 až 2% vazebných míst. Proces vulkanizace je schematicky zachycen na obr. 5.24.



Obr. 5.24 Schematické znázornění procesu vulkanizace polyizoprénu

V horní části obr. 5.24 jsou vidět dva řetězce polyizoprénu s dvojnými vazbami v řetězcích. V dolní části obr. 5.24 je již vidět spojení řetězců prostřednictvím atomů síry. Na obr. 5.25 je proces vulkanizace polyizoprénu znázorněn pomocí trojrozměrného modelu jeho struktury.





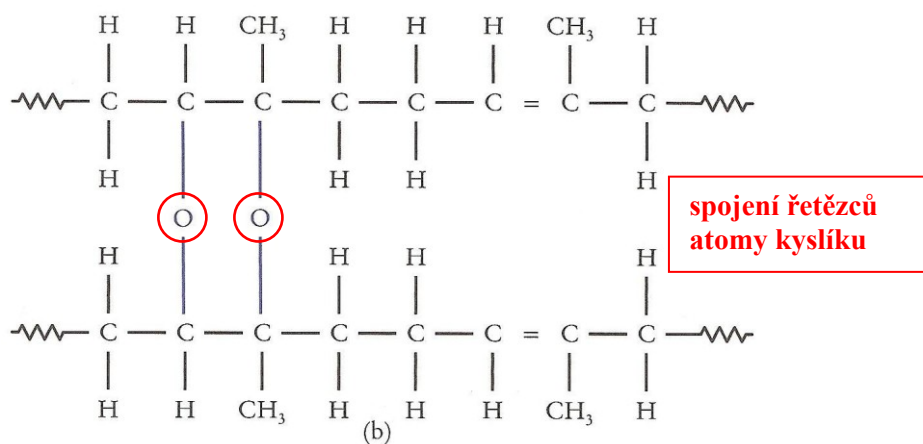
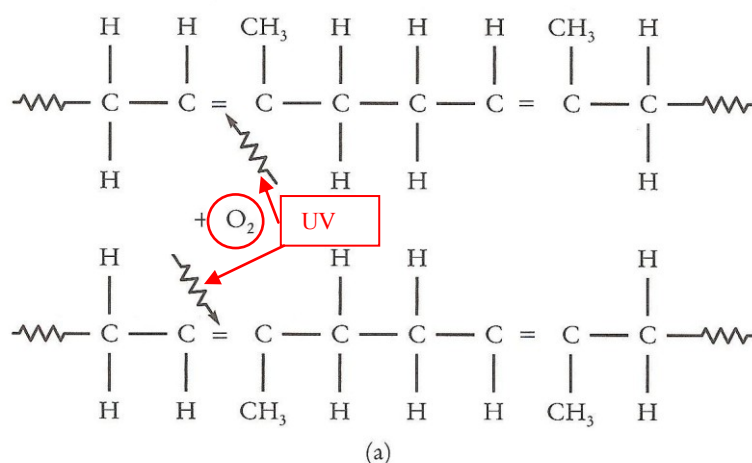
b)

c)

Obr. 5.25 Trojrozměrné znázornění procesu vulkanizace polyizoprénu

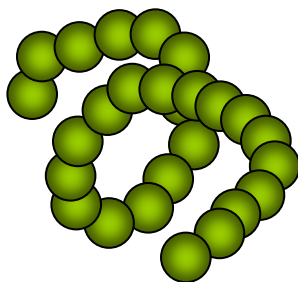
Na obr. 5.25a je část řetězce polyizoprénu s dvojnou vazbou. Na obr. 5.25b jsou znázorněny části dvou sousedních řetězců s již otevřenými dvojnými vazbami a na obr. 5.25c je již vidět spojení řetězců dvěma atomy síry.

Výše popsáný proces vulkanizace je proces žádoucí, protože jím elastomery získávají schopnost výrazné elastické deformace. Jak už to ale bývá, může se velmi podobně odehrávat proces nežádoucí. Elastomery mohou během doby ztrácet schopnost elastické deformace, mohou takzvaně tvrdnout. To souvisí s tím, že působením kyslíku, který se může ze vzduchu dostat do struktury elastomeru, a ultrafialového záření může dojít k dalšímu příčnému spojování řetězců. Pokud míra příčného zesítení přesáhne hodnotu cca 3 %, pak už výrazně klesá schopnost elastické deformace elastomerů. (Elastomery v průběhu tvrdnutí vlastně získávají prostorově zesítenou strukturu, kterou mají reaktoplasty). Proces tvrdnutí elastomerů je na příkladu polyizoprénu znázorněn na obr. 5.26.

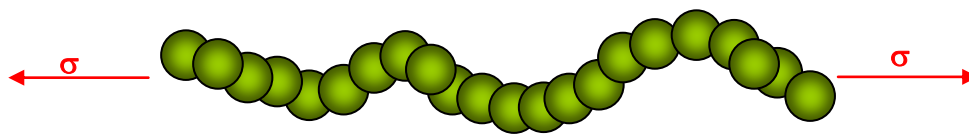


Obr. 5.26 Znázornění procesu tvrdnutí polyizoprénu

V elastomerech jsou řetězce bez působení vnějšího napětí výrazně zkroucené, smotané jakoby do klubíček. Někdy se používá termínu „cívky“ (angl. coils). To je pro ně přirozený stav. Za působení vnějšího napětí pak dochází k „rozmotávání klubíček“ řetězců, které se navenek projevuje jako výrazná elastická deformace. Charakter řetězce elastomeru ve stavu bez působení vnějšího napětí a při působení vnějšího napětí je znázorněn na obr. 5.27.



a) řetězec elastomeru bez působení napětí



b) řetězec elastomeru při působení vnějšího napětí

Obr. 5.27 Charakter řetězce elastomeru v závislosti na působení vnějšího napětí

Hlavní představitelé elastomerů a jejich základní charakteristiky jsou uvedeny v tab. 5.3.

Tabulka 5.3 Hlavní představitelé elastomerů a jejich vybrané charakteristiky

Elastomer	Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Modul pružnosti E (MPa) při $+20^\circ\text{C}$	Mez pevnosti R_m (MPa)	Tažnost (%)
Polyizoprén (IR)	900	2 – 100	20 - 35	400 - 900
Polybutadien (BR)	1500	4 – 100	5 – 25	300 - 700
Polychloroprén (CR)	950	10 - 200	15 - 25	300 - 700

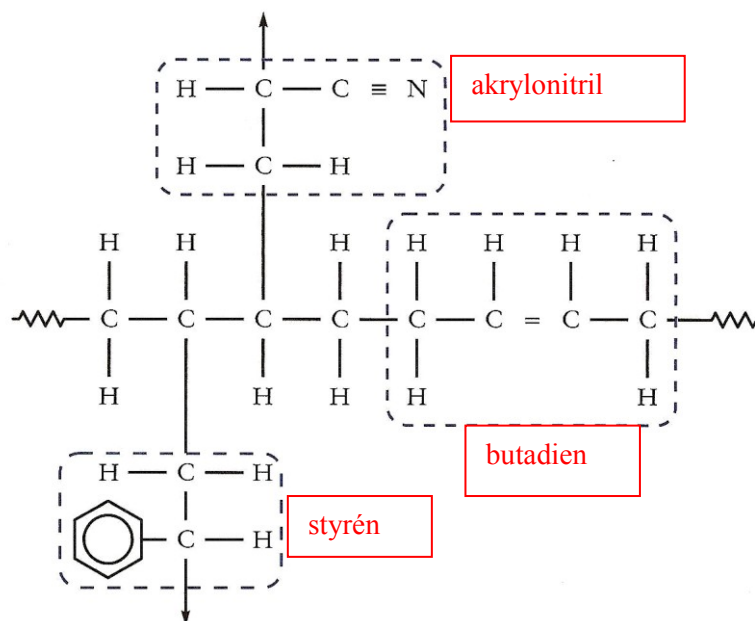
Polyizoprén představuje základ přírodního kaučuku, polybutadien a polychloroprén patří mezi syntetické kaučuky. Teplota skelného přechodu elastomerů je nižší než 0°C a pohybuje se v intervalu -120 až -50°C . Elastomery se tedy na rozdíl od termoplastů používají nad teplotou skelného přechodu. Pod teplotou skelného přechodu, např. při teplotě kapalného dusíku (-196°C), jsou i elastomery křehké, neschopné významnější deformace.

Elastomery se používají především na výrobu těsnění, hadic, jsou základem pro výrobu pneumatik apod.

□ Něco navíc - kopolymery

Vzhledem k tomu že jsme v úvodním předmětu o materiálech, nepouštíme se do žádných velkých detailů. Přesto bych vás rád seznámil ještě s jednou skupinou polymerů. Dosud jsme předpokládali, že do polymerace vstupuje většinou jen jeden monomer (výjimkou byly některé reaktoplasty). Velmi zajímavé materiály však lze získat, probíhá-li polymerace spojením různých monomerů, např. kombinací termoplastů a elastomerů. Polymerům, které obsahují více různých merů, se říká **kopolymery**. Už jsme uvedli, že termoplasty mají teplotu skelného přechodu nad pokojovou teplotou, naproti tomu elastomery mají teplotu skelného přechodu hluboko pod bodem mrazu. Jejich vzájemným spojením vznikají kopolymery s dobrou kombinací pevnosti a houževnatosti. V praxi se např. používá kopolymer na bázi metylmetakrylátu a butadienu, kdy butadien zvyšuje houževnatost kopolymery (a bohužel zhoršuje optické vlastnosti). Určitě znáte jeden kopolymer z automobilů. Na interiéry se používá kopolymer, který má zkratku ABS. Není to antiblokovací systém, ale zkratka pro

akrylonitrilbutadienstyren, tedy kopolymer získaný polymerací tří různých monomerů. Akrylonitril a styren vytvářejí samostatně termoplasty, butadien patří mezi elastomery. Jejich spojením se získá kopolymer s velmi dobrou kombinací pevnosti a houževnatosti. Akrylonitrilbutadienstyren vytváří rozvětvené řetězce, kdy v hlavní ose je butadien a akrylonitril a styren vytvářejí boční větve (takovému kopolymeru se říká – roubovaný kopolymer). Zobrazení struktury akrylonitrilbutadienstyrenu je na obr. 5.28.



Obr. 5.28 Struktura kopolymeru ABS - akrylonitrilbutadienstyrenu



Shrnutí pojmů 5.5.

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- termoplasty, reaktoplasty, elastomery;
- vlastnosti termoplastů, reaktoplastů;
- vulkanizace kaučuku, tvrdnutí elastomerů;
- polyizoprén, polybutadien, polychloroprén;
- kopolymery, ABS – akrylonitrilbutadienstyren.



Otázky 5.5.

52. Vyjmenujte alespoň 5 představitelů termoplastů.

53. U kterého termoplastu můžeme očekávat nejnižší hodnoty mechanických vlastností a proč?
54. Jaký je boční radikál polypropylenu?
55. Jaký je boční radikál polystyrenu?
56. Který termoplast je známý pod obchodním názvem Teflon?
57. Který z termoplastů vyniká svými třecími a antiadhezními vlastnostmi?
58. Z čeho vyplývají vyšší hodnoty mechanických vlastností u polypropylenu a polystyrenu?
59. Z čeho vyplývají vyšší hodnoty mechanických vlastností u polyvinylchloridu?
60. Který termoplast je znám pod názvem plexisklo?
61. Který termoplast je základem tzv. kostního cementu?
62. Vyjmenujte alespoň 3 představitele reaktoplastů.
63. Jaký je základní předpoklad pro možnost vulkanizace kaučuku (polyizoprénu)?
64. Jaký je asi podíl vazebných míst, ve kterých dochází při vulkanizaci kaučuku k příčnému spojení řetězců?
65. Vysvětlete stručně pojem tvrdnutí kaučuku.
66. Jaký je přirozený stav řetězců v elastomerech (bez působení vnějšího napětí)?
67. Vysvětlete pojem kopolymer.

	Klíč k řešení – odpovědi na otázky ke kapitole 5
O1	Polymery jsou makromolekulární látky, které vznikají procesem polymerace z malých molekul – monomerů.
O2	Polymerace je proces, kterým se z malých molekul – monomerů – vytvářejí makromolekulární řetězce.
O3	Monomery jsou jednoduché molekuly (např. uhlovodíků), jejichž řetězením po otevření dvojných vazeb vznikají makromolekulární řetězce.
O4	Adiční polymerace je takový druh vzniku makromolekulárního řetězce, kdy molekuly monomerů se po otevření dvojných vazeb prostě připojují k sobě navzájem.
O5	Relativní molekulová hmotnost makromolekul polymerů bývá nejčastěji v intervalu 10^4 až 10^6 .
O6	Termoplasty jsou polymery, které se za zvýšených teplot stávají plastickými, mohou se tvarovat.
O7	Známé termoplasty jsou např. polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid, polymetylmetakrylát, polykarbonát, polyamid aj.
O8	Reaktoplasty jsou polymery, které vznikají procesem polymerace, který má charakter chemické reakce. Během vzniku mohou být tvarovány. Po utuhnutí jsou většinou relativně tvrdé a křehké.
O9	Mezi reaktoplasty patří např. polyfenolformaldehyd, epoxidové, polyesterové pryskyřice aj.
O10	Elastomery jsou polymery, které mají schopnost vysoké elastické deformace (až několik set procent) při působení nízkých napětí.
O11	Mezi elastomery patří zejména různé kaučuky, např. izoprenový kaučuk, butadienový kaučuk, chloroprenový kaučuk aj.
O12	Bakelit se připravuje z fenolu a formaldehydu.
O13	Pro kondenzační polymeraci je charakteristické odštěpení molekul vody.
O14	V polymerech se vyskytují jednoduché (lineární) řetězce, rozvětvené řetězce, prostorově zesítené řetězce a slabě (částečně) zesítené řetězce.
O15	Jednoduchý (lineární) řetězec má právě jednu osu – páteř řetězce. Většinou bývá různě zprohýbaný, zkroucený. Je typický pro termoplasty.
O16	Jednoduchý řetězec nebývá přímkový. Většinou bývá různě zprohýbaný, zkroucený.
O17	Rozvětvený řetězec se větví podobně jako větve stromu. Je typický pro termoplasty.
O18	Prostorově zesítený řetězec vytváří prostorovou síť pospojovanou v různých místech a směrech.
O19	Prostorové zesítení je typické pro reaktoplasty.
O20	Slabě zesítený řetězec se skládá z jednoduchých řetězců, které jsou zesíteny v množství cca 0,5 – 1%.
O21	Slabě zesítené řetězce jsou typické pro elastomery.
O22	Mezi atomy v jednom řetězci je kovalentní vazba.
O23	Mezi atomy různých řetězců jsou jen slabé molekulární vazby.
O24	Základem atomární struktury polyetylénu je tetraedr s atomem uhlíku uprostřed. ve vrcholech tetraedru jsou dva atomy uhlíku a dva atomy vodíku.

O25	Mezi spojniciemi sousedních atomů v „páteři“ řetězce je úhel 109,5°.
O26	Řetězce se mohou v prostoru natáčet, zejména napřimovat při působení napětí. Musí platit, že mezi spojniciemi atomů uhlíku zůstane stále úhel 109,5°.
O27	Prostorově zesítné řetězce se v zásadě natáčet nemohou, protože by došlo k porušení úhlu, který vyžaduje existence kovalentní vazby.
O28	Stereoizomerie popisuje uspořádání bočních radikálů v řetězci polymerů.
O29	U polymerů se můžeme setkat s ataktickým, izotaktickým, nebo syndiotaktickým uspořádáním bočních radikálů.
O30	Ataktické uspořádání znamená statisticky náhodné uspořádání bočních radikálů.
O31	Izotaktické uspořádání znamená shodné uspořádání bočních radikálů.
O32	Syndiotaktické uspořádání znamená střídavé (zrcadlové) uspořádání bočních radikálů.
O33	Polymery jsou přednostně ve stavu amorfním.
O34	Částečně krystalický stav polymerů je podporován jednoduchou strukturou polymerů, jednoduchým řetězcem bez výrazného větvení a bez zesítnění, a také pravidelným (nejlépe izotaktickým) uspořádáním bočních řetězců.
O35	V polymeru s ataktickým uspořádáním řetězců krystalický stav v zásadě vzniknout nemůže, protože ataktické uspořádání je nepravidelné.
O36	S částečně krystalickým stavem se můžeme setkat hlavně u termoplastů. Typickým představitelem je polyetylen.
O37	V krystalické části polymeru vytváří řetězec trojrozměrný meandr.
O38	U rozvětvených polymerů může krystalický stav vzniknout, ale jen v omezené míře. Je to podmíněno schopností řetězce vytvořit trojrozměrný meandr.
O39	Modul pružnosti reaktoplastů dosahuje hodnot cca 10^3 MPa.
O40	V teplotní závislosti modulu pružnosti termoplastů můžeme rozlišit oblast skelnou, přechodovou, kaučukovitou a oblast viskózního tečení.
O41	Modul pružnosti termoplastů ve skelné oblasti dosahuje hodnot cca 10^3 MPa.
O42	Teplota skelného přechodu odděluje oblast skelnou a oblast kaučukovitou. Nejčastěji se vztahuje k poloze inflexního bodu v teplotní závislosti modulu pružnosti termoplastů.
O43	Hodnota modulu pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti je řádově jednotky MPa.
O44	Ne, během provozu se termoplast nesmí dostat do oblasti viskózního tečení, protože by u něho došlo ke ztrátě tvaru.
O45	Teplota skelného přechodu termoplastů se pohybuje v teplotním intervalu cca +60 až +120°C.
O46	Teplota skelného přechodu elastomerů se pohybuje v teplotním intervalu cca -50 až -120°C.
O47	Reaktoplasty nevykazují teplotu skelného přechodu.
O48	Teplotní závislost modulu pružnosti termoplastů závisí např. na relativní molekulové hmotnosti polymeru, na míře rozvětvení řetězců, na stupni krystalinity polymeru a na složitosti bočních radikálů.
O49	Modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti roste s rostoucí složitostí bočních radikálů.
O50	Modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti roste s rostoucím stupněm krystalinity.
O51	Modul pružnosti termoplastů v kaučukovité oblasti roste s rostoucí mírou rozvětvení řetězců.

O52	Představitelé termoplastů jsou např. polyetylén, polypropylén, polyvinylchlorid, polytetrafluoretylen, polyamid, polystyren, polymetylmetakrylát, polykarbonát aj.
O53	Nejnižší hodnoty mechanických vlastností můžeme očekávat u polyetylénu, protože má nejjednodušší strukturu řetězce.
O54	Bočním radikálem polypropylenu je skupina —CH_3 .
O55	Bočním radikálem polystyrenu je benzenové jádro – skupina $\text{—C}_6\text{H}_5$.
O56	Teflon je polytetrafluoretylen.
O57	Třecími a antiadhezními vlastnostmi vyniká polytetrafluoretylen – Teflon.
O58	Vyšší hodnoty mechanických vlastností polypropylenu a polystyrenu vyplývají (mimo jiné) ze složitější struktury bočních radikálů.
O59	Vyšší hodnoty mechanických vlastností polyvinylchloridu vyplývají z existence polárních makromolekul, kdy v blízkosti atomu chlóru je slabý záporný náboj a v blízkosti atomů vodíku je slabý kladný náboj. Z toho pak vyplývají vyšší vazebné síly mezi řetězci navzájem.
O60	Plexisklo je označení polymetylmetakrylátu.
O61	Základem kostního cementu je polymetylmetakrylát.
O62	Představitelé reaktoplastů jsou např. polyfenolformaldehyd (bakelit), epoxidové pryskyřice, polyesterové pryskyřice.
O63	Základním předpokladem pro možnost vulkanizace kaučuku je existence dvojných vazeb v řetězci kaučuku (polyizoprénu).
O64	Podíl vazebných míst, ve kterých dochází při vulkanizaci kaučuku k příčnému spojení řetězců, je cca 0,5 – 2,5%.
O65	Tvrdnutí kaučuku je důsledek postupného příčného zesílení řetězců působením kyslíku a UV záření.
O66	V přirozeném stavu jsou řetězce v elastomerech stočené do „klubíček“, „cívek“.
O67	Kopolymer je druh polymeru, který vzniká polymerací ne jednoho, ale dvou i více monomerů, např. ze skupiny termoplastů a elastomerů.



Další zdroje

Pluhař, J. a kol: *Nauka o materiálech*. SNTL, Praha, 1989, 549 s.

Ducháček, V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. VŠCHT Praha, 2006, 278s.

Skočovský, P., Bokůvka, O., Konečná, R., Tillová, E.: *Nauka o materiálu pro odbory strojnictví*. Žilinská univerzita, Žilina, 2001, 380 s.

Callister, W. D.: *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley&Sons, USA, 2005, 712 s.

Bailon, J. P., Dorlot, J. M.: *Des Matériaux*. Presses Int. Polytechnique, Canada, 2000, 736s.

6. KERAMICKÉ MATERIÁLY

6.1 Struktura a vlastnosti keramických materiálů



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat, co jsou keramické materiály,
- vysvětlit, na čem závisí vlastnosti keramických materiálů,
- charakterizovat oblasti použití keramických materiálů.



Výklad

❑ Co je to keramika

Slovo **keramika** pochází z latinského názvu *keramikos*, což znamená pálená hlína. Keramika je velmi starý materiál, známý už v době kamenné. Z keramiky je vyrobená soška Věstonické venuše, jejíž stáří se odhaduje na 29 - 25 tis. let př. n. l..

Pozn.: Nejprve se keramické výrobky jen sušily na slunci, avšak sušením se nezískala dostatečná pevnost. Teprve vypalováním na vysoké teploty (nad 900°C) a následným ochlazením došlo, v důsledku fázových transformací, k významnému nárůstu pevnosti.

Keramické materiály jsou anorganické nekovové látky, které se většinou vyrábí z práškových surovin a zpevňují tzv. žárovým slinováním. Keramické materiály se dělí na **porézní (tradiční) keramiku** a **technickou (konstrukční) keramiku**. Příklady použití keramických materiálů jsou uvedeny na obr. 6.1. Do skupiny tradiční keramiky řadíme stavební, zdravotnickou, užitkovou a uměleckou keramiku. Keramika konstrukční má využití jako řezná, metalurgická, elektrotechnická, kosmická nebo biokeramika. Samotnou skupinu keramiky tvoří **žáruvzdorné materiály**. Většinou se jedná o materiály na bázi žáruvzdorných oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , Cr_2O_3 , MgO , CaO ad., které jsou odolné při teplotě do 1500°C i vyšší.



Obr. 6.1. Příklady použití keramických materiálů.

Keramiku můžeme označit za vícesložkovou (polykomponentní) soustavu, ve které převládají iontové a kovalentní vazby mezi atomy. Struktura keramiky je převážně krystalická, často však obsahuje skelnou (amorfni) fázi a vzhledem k technologii výroby množství pórů. Mezi **základní vlastnosti** keramiky patří vysoká tvrdost a křehkost, žáruvzdornost, dobrá korozní odolnost. Působí také jako tepelné a elektrické izolanty.

Křehkost keramiky vyplývá z existence iontové nebo kovalentní vazby mezi atomy polykrystalické složky. Složitá vnitřní stavba keramických materiálů omezuje pohyb dislokací a zabraňuje tím plastické deformaci materiálu. Křehkost keramiky zvyšuje také množství pórů a nehomogenit u spékaných materiálů, i když u moderních materiálů dochází se zaváděním nových výrobních technologií ke snížení pórovitosti. Na pórovitosti významně závisí mechanické vlastnosti.

Modul pružnosti E keramiky je vyšší než u kovů, ale přítomnost pórů modul pružnosti výrazně redukuje. Modul pružnosti keramických materiálů v závislosti na pórovitosti P lze vyjádřit pomocí rovnice 6.1, kde E_0 vyjadřuje modul pružnosti keramiky při nulové pórovitosti:

$$E = E_0(1 - 1,9P + 0,9P^2)$$

rov. 6.1

Např. při pórovitosti $P = 0,05$ (5 %) klesne modul pružnosti o cca 10%.

Také **pevnost** keramických materiálů závisí na jejich pórovitosti podle rov. 6.2:

$$R_m = (R_m)_0 \cdot e^{-nP}, \quad \text{rov. 6.2}$$

kde $(R_m)_0$ je pevnost při nulové pórovitosti a n je konstanta.

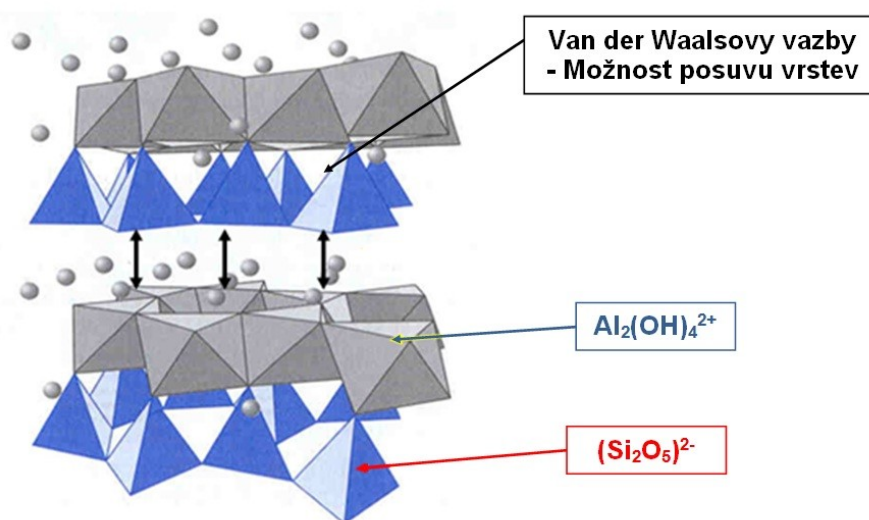
Při pórovitosti $P = 0,05$ (5 %) klesne pevnost na cca 78 % výchozí hodnoty, kterou by měl materiál bez pórů. Pevnost keramiky v tahu a v tlaku se výrazně liší. V tlaku je pevnost keramických materiálů (10 až 15) krát vyšší než v tahu.

Důležitou vlastností keramických materiálů je jejich **odolnost proti teplotnímu rázu**, na čemž závisí vhodnost použití v různých technických aplikacích. **Náchylnost keramiky k teplotním šokům** je mnohem vyšší než u kovů, vzhledem k tomu, že keramika nemá schopnost plastické deformace. Náhlá změna teploty může vést ke vzniku vnitřních pnutí, iniciaci trhliny a následně k lomu. Kromě okamžitého rozdílu teplot závisí především na koeficientu teplotní roztažnosti α , ale také na vodivosti a přenosu tepla. Největší odolnost proti teplotním rázům vykazuje Si_3N_4 a sialonová keramika.

Lomová houževnatost keramických materiálů je velmi nízká a dosahuje asi jen jedné desetiny až jedné dvacetiny hodnoty lomové houževnatosti kovů. Cílem zlepšení vlastností keramiky je tedy zvýšení její houževnatosti.

□ Porézní (tradiční) keramika

Porézní (tradiční) keramiku tvoří přírodní suroviny (jíly), které jsou pouze částečně upravené. Základní složka tradiční keramiky je **kaolín**, který se skládá z minerálu kaolinitu a dalších příměsí (viz obr. 6.2). Kaolinit představuje komplex $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ nebo $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, který má vrstvenou strukturu. Jednotlivé vrstvy kaolinitu jsou vázány slabými Van der Waalsovými silami. Příměšové složky jsou křemičitý písek (SiO_2) a živce (např. $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), které plní roli pojiva. V porézní keramice převládá skelná fáze, a jak vyplývá z názvu, vyznačuje se vysokou pórovitostí.



Obr. 6.2. Struktura kaolínu.

Mezi porézní keramiku patří **pálená hlína**, která se skládá z jílu a písku. Po vypálení při teplotě 950 – 1050°C, se používá jako cihly, střešní tašky aj. Pevnost v tlaku těchto materiálů se dosahuje asi 10 až 20 kPa při pórovitosti 15 – 30 %. Dalším příkladem použití tradiční keramiky je **kamenina**, ze které se vyrábějí dlaždice, trubky, sanitární keramika aj. Kamenina se vypaluje při teplotě 1100 – 1300°C. Povrch materiálu se glazuje. Pórovitost kameniny je 0,5 – 3 %. **Porcelán** je materiál na bázi kaolínu, křemene a živce o pórovitost 0 – 2%, Porcelán se zpracovává vypalováním při teplotě 1100 až 1400°C. Obvykle se na povrchu glazuje. Používá se jako porcelánové nádobí, chemické aparatury, elektrické izolátory.

□ Technická (konstrukční) keramika

Technická keramika se vyrábí výhradně ze syntetických prášků velmi jemné zrnitosti. Podle třídy chemických sloučenin se technická keramika dělí na

- oxidovou keramiku (na bázi oxidů Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 ad.),
- neoxidovou keramiku, kterou dále můžeme rozdělit na nitridovou (Si_3N_4 , AlN , BN), karbidovou (SiC , B_4C), boridovou atd.,
- směsnou (kompozitní) keramiku.

Hlavní přednosti konstrukční keramiky jsou:

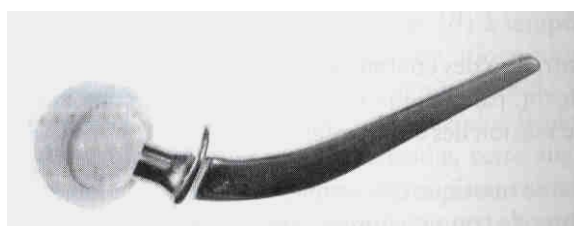
- vysoká tvrdost (s tím souvisí i vysoká odolnost proti opotřebení),
- vysoká korozní odolnost,
- žáruvzdornost.

Keramické materiály jsou elektricky nevodivé a mají tepelně-izolační schopnost. Vyrábí se většinou z prášků žárovým slinováním, což umožňuje vyrobit součástky různých tvarů s vysokou přesností, ale jen do určité velikosti.

□ Oxidová keramika

Oxidová keramika je složená z různých oxidů, z nichž nejširší uplatnění mají oxidy hliníku (Al_2O_3) a oxid zirkoničitý (ZrO_2). Vazba mezi atomy oxidické keramiky má převážně iontový charakter, který vyplývá z vysokého rozdílu elektronegativity kyslíku a kovu.

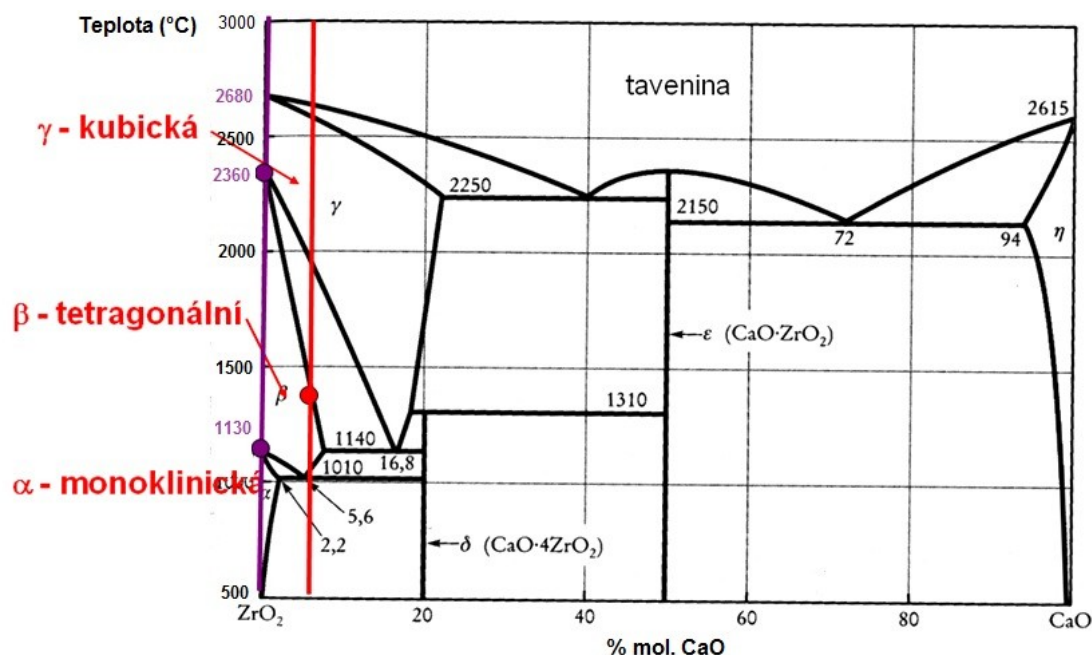
Oxid hliníku (slnutý Al_2O_3) se používá zejména na výrobu řezných nástrojů, ale i součástí implantátů (obr. 6.3). Vyznačuje se vysokou tvrdostí a dobrou chemickou stabilitou. Má vysokou teplotu tavení, 2050°C . Pevnost v ohybu R_{mo} 350 MPa je stabilní až do teploty cca 1200°C , ale pak prudce klesá. Lomová houževnatost oxidové keramiky na bázi Al_2O_3 je nízká ($3,5 - 4,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Přísadou ZrO_2 , Y_2O_3 nebo MgO ji lze zvýšit na $5,0 - 6,0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.



Obr. 6.3. Kloubní implantát (endoprotéza). Hlava kloubu je ze slnutého Al_2O_3 .

Oxid zirkonia (slnutý ZrO_2) se vyskytuje ve třech rozdílných krystalových modifikacích (obr. 6.4):

- γ je vysokoteplotní modifikace ZrO_2 . Má mřížku kubickou prostorově centrovanou (bcc) a je stabilní v teplotním intervalu 2680 až 2360°C .
- β je středněteplotní modifikace ZrO_2 . Má mřížku tetragonální a vyskytuje se v teplotním intervalu mezi 2360 a 1130°C .
- α je nízkoteplotní modifikace ZrO_2 . Má mřížku monoklinickou, která existuje pod teplotou 1130°C .

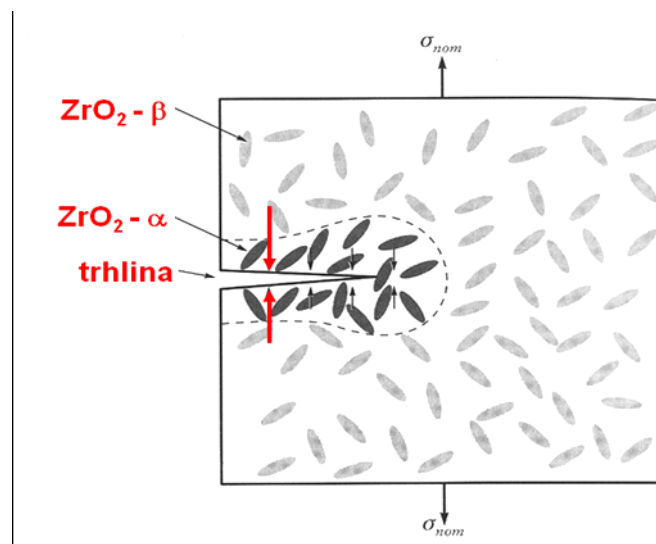


Obr. 6.4. Binární diagram $\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$. Oblasti výskytu jednotlivých modifikací.

Ke zhouževnatění konstrukční keramiky na bázi ZrO_2 se využívá napětově indukovaná martenzitická přeměna β fáze (tetragonální) na α fázi (monoklinickou). Přeměna β fáze na α fázi je spojena s nárůstem objemu asi o 3 %. V čistém ZrO_2 může tento nárůst objemu vést ke vzniku trhlin. Přidáním CaO nebo Y_2O_3 dojde k rozšíření oblasti kubické γ fáze v celém rozsahu teplot. Jedná se pak o tzv. **stabilizovaný ZrO_2** . Při nižším obsahu stabilizačních přísad (3-7 % CaO , Y_2O_3 , MgO) bude struktura oxidu zirkonia tvořena kubickou a tetragonální fází. Vznikne tak, že se ZrO_2 rychle ochladí z teploty slinování. Následuje ohřev a při dostatečné výdrži na vyšší teplotě dojde k precipitaci (vytlačení) jemných částic s tetragonální strukturou v kubické matici. Jedná se o tzv. **částečně stabilizovaný oxid zirkonia**, který má zvýšenou houževnatost.

Přeměna $\beta \rightarrow \alpha$ může proběhnout pod vlivem napětí (tzv. napětově indukovaná martenzitická transformace) a vznikající fáze a může nárůstem objemu přispět k uzavírání existujících trhlin. Proces uzavírání trhlin je vidět na obr. 6.5. Tahová napětí v okolí trhliny vyvolávají přeměnu $\beta \rightarrow \alpha$. Fáze α má vyšší měrný objem a vyvolá v okolí tlaková pnutí, která budou zavírat trhlinu, což je pro nás příznivé! Uvedená fázová transformace nastává např. při mechanickém opracování povrchu, kdy vznikají poměrně vysoká napětí. U běžné keramiky by došlo broušením ke vzniku trhlin na povrchu a tedy ke snížení pevnosti, naopak v částečně stabilizovaném ZrO_2 dojde při broušení k vyvolání fázové transformace, vzniku tlakových pnutí, uzavření trhlin a v konečném důsledku ke zvýšení pevnosti. Částečně stabilizovaný ZrO_2 , označuje se jako PSZ (Partially Stabilized Zirkonia), se používá pro extrémně namáhané součástky dieslových motorů (písty, vložky válců, sedla ventilů) a ve spotřebním průmyslu na výrobu nožů, pláště hodinek apod. Tetragonální polykrystalický oxid zinečnatý

(TZP – Tetragonal Zirkonia Polycrystals) má jednofázovou strukturu a je schopný transformace na monoklinický ZrO_2 v celém objemu. Tím se dosáhne pevnosti v ohybu 1000-2500 MPa a lomové houževnatosti $10\text{-}15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.



Obr. 6.5. Schéma uzavírání trhlin v částečně stabilizovaném ZrO_2 .

□ Neoxidová keramika

Mezi neoxidovou keramiku patří keramika na bázi nitridu a karbidu křemíku, ze kterých se vyrábějí součástky pracující při vysokých teplotách až do 1500°C a řezné nástroje. Tyto materiály vynikají pevností za vysokých teplot, žáruvzdorností a nízkou měrnou hmotností (odpovídající Al-slitinám). Jak už jsme si zmínili dříve, jejich jedinou nevýhodou je křehkost. **Nitrid křemíku (Si_3N_4)** je jeden z nejpevnějších konstrukčních keramických materiálů. Vyskytuje se ve dvou strukturních modifikacích:

- $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$,
- $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. Obě modifikace krystalizují v hexagonální mřížce a liší se defektním umístěním jednoho atomu kyslíku v modifikaci α , který nahrazuje dusík ve stechiometrickém vzorci modifikace β . Nitrid křemíku Si_3N_4 se leguje obvykle Y_2O_3 , MgO nebo Al_2O_3 , dále se přidává přísada SiO_2 . Při slinování dochází k transformaci $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ na $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

Další materiály, které vznikají na základě nitridu křemíku, jsou **sialony** ($\text{Si} - \text{Al} - \text{O} - \text{N}$), které mají vyšší houževnatost než Si_3N_4 (lomová houževnatost $K_{IC} = 6 - 7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) a vysokou pevnost za vysokých teplot (mez pevnosti v ohybu $R_{mo} = 700 - 800 \text{ MPa}$ při teplotě 1300°C).

Nitrid bóru (BN) – mimořádně pevný.

Karbidickou keramiku zastupují karbid wolframu (WC), karbid křemíku (SiC), karbid titanu (TiC) a karbid bóru (BC). Jedná se převážně o slinuté karbidy, které se používají hlavně na řezné nástroje. Vyznačují se mimořádnou tvrdostí a stálostí až do vysokých teplot.

Karbid křemíku (SiC) má dobrou odolnost vůči oxidaci, neboť na jeho povrchu vzniká ochranná vrstva SiO_2 . Karbid křemíku má nižší pevnost než Si_3N_4 . Je však tvrdší a má vysokou tepelnou vodivost, čehož se používá při konstrukci tepelných zařízení. Při vyšších teplotách ($1300 - 1500^\circ\text{C}$) má karbid křemíku SiC lepší vlastnosti než nitrid křemíku Si_3N_4 . Mechanické vlastnosti karbidu křemíku, zejména pevnost v ohybu, závisí na způsobu výroby. Nejvyšší pevnosti se dosahuje při lisování za tepla ($R_{mo} = 300 - 800 \text{ MPa}$). Naopak způsob výroby nemá významný vliv na lomovou houževnatost ($K_{IC} = 3,0 - 6,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Karbid wolframu (WC) a **karbid titanu (TiC)** jsou hlavními strukturními složkami slinutých karbidů o tvrdosti 2000 až 3000 HV (HV značí tvrdost podle Vickerse). Částice karbidů o velikosti několik μm spojuje natavená kobaltová složka, přičemž při procesu slinování dojde k vymizení pórovitosti a smrštění až o 15 %. Kobalt zvyšuje houževnatost slinutého WC, ale zároveň snižuje jeho tvrdost. Naopak titan, resp. TiC, tvrdost zvyšuje, proto se používá u nástrojů pro obrábění velmi tvrdých materiálů.

□ Směsná (kompozitní) keramika

Směsná keramika je složená z oxidové a neoxidové keramiky. Nejčastěji se používají typy $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, SiC-BN , $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$, SiC-SiC , AlN-BN , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$.

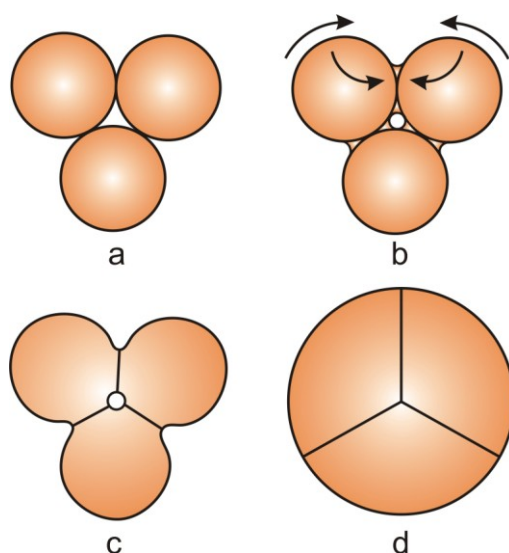
□ Metody výroby keramických materiálů

Většina keramických materiálů se vyrábí slinováním keramických práškových surovin. Výroba keramiky se skládá z:

- přípravy výchozí směsi,
- tvarování,
- tepelného zpracování,
- slinování.

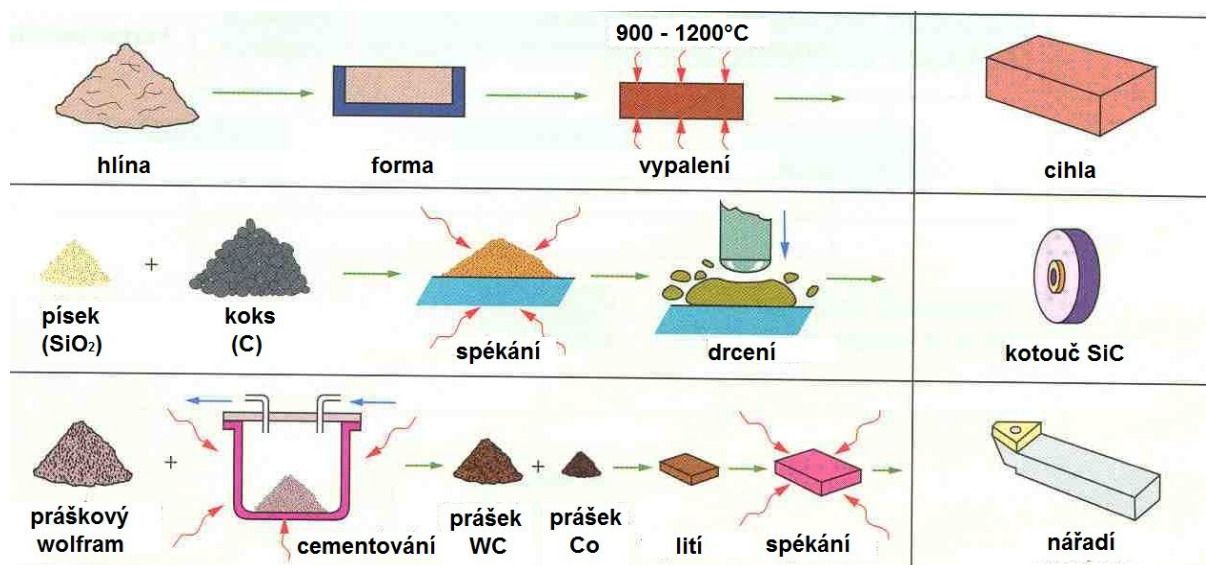
Kvalita výsledného produktu závisí především na mikrostruktuře materiálu. Optimální mikrostruktura má homogenní zrna s jasně definovanými hranicemi zrn, minimální obsah pórů a rovnoměrné rozložení všech přítomných fází. Platí, že čím jemnější je zrno, tím má výsledná keramika vlastnosti na vyšší úrovni. Velikost zrna u pokročilé konstrukční keramiky se pohybuje od několika nanometrů do 5 μm . U porézní keramiky bývá maximální velikost zrna několik milimetrů. Před samotnou výrobou konkrétních dílů se keramický prášek mísí s pojivem a dalšími přísadami za sucha nebo za mokra. Poté následuje **tvarování** většinou za studena metodami lisování, lití suspenzí, vytlačování nebo vstřikování. Nejčastěji užívanou metodou je **lisování** suchého keramického prášku. Při izostatickém lisování za studena nebo za tepla (HIP – Hot Isostatic Pressing) se využívá tlaku plynu (He, Ar) rovnoměrně

působícího ze všech stran na těleso. Lisování za tepla umožňuje vyrobit součástky s vysokou hustotou a výbornými mechanickými vlastnostmi. **Lití suspenzí** je vhodné pro tvarování dílů s tenkými stěnami i pro plné keramické díly. Provádí se do porézních forem, kde se nechá keramický díl částečně vyschnout, tak aby s ním bylo možné manipulovat, poté se z formy vyjme a vypálí se na požadované vlastnosti. Moderní metody využívají tlakového nebo vakuového lití. Jednoduché keramické díly stejného průřezu (např. trubky a profily) se vyrábějí **vytlačováním** plastické směsi keramického prášku a pojiva přes tvarovací nástroj. **Vstřikováním** pod tlakem do keramické formy se zpracovává keramická termoplastická suspenze, která se po ztuhnutí z formy vyjme, následuje tepelná extrakce termoplastického pojiva a slinování keramické součásti. Tato metoda se používá pro velkosériovou výrobu tvarově složitých součástí, jako jsou lopatky turbín, součásti palivových článků nebo také biokeramických protéz. Proces **tepelného zpracování** zahrnuje sušení, při kterém se odstraňují těkavé složky z plastického keramického dílu (pod teplotou 100°C) nebo organická pojiva (v rozsahu tepla 20 až 300°C). **Slinování** probíhá při vysokých teplotách pod bodem tání keramických částic (0,5 až 0,8 teploty tání). Při slinování se částice spojují do kompaktního pevného celku především difúzí v tuhém stavu., přičemž se keramický díl smršťuje a jeho pórovitost se snižuje. Postupně dochází také k růstu zrn až do určité rovnováhy, na které závisí mechanické vlastnosti keramického dílu. Jednotlivé fáze slinovacího procesu jsou zobrazeny na obr. 6.6. U porézní keramiky je posledním stupněm keramických technologií úprava povrchu nejčastěji glazováním. Technická keramika se někdy pokovuje nebo pokrývá plastem. Finální opracování povrchu broušením nebo leštěním je vzhledem k vysoké tvrdosti keramiky obtížné.



Obr. 6.6. Jednotlivé fáze slinovacího procesu: a) výchozí kulovitá zrna, b) tvorba krčků difúzním mechanismem, středy se přibližují, c) tvorba hranic a pórů, d) výsledná mikrostruktura.

Schematické shrnutí metod výroby některých druhů keramických materiálů, nám popisuje obr. 6.7.



Obr. 6.7. Schéma výroby keramických materiálů.

□ Příklady aplikace keramických materiálů

S výrobky z tradiční keramiky se setkáváme každý den. Jsou to porcelánové předměty, dlažice, sanitární keramiky (WC, umyvadla), kamenina (květináče), cihlářské výrobky ad. Z materiálového hlediska jsou pro technickou praxi progresivní výrobky z technické keramiky. Uvedeme si nyní různé aplikace technické keramiky.

Řezná keramika

Řeznou keramiku najdeme např. na špičkách soustružnických nožů, vrtáků a fréz, které se používají na obrábění kovů. Řezné destičkami musí mít velkou tvrdost a houževnatost. Dříve se řezné materiály vyráběly se ze slinutých karbidů TiC, WC a diamantu (obr. 6.8.). Dnes je nahrazují materiály na bázi ZrO_2 , Al_2O_3 a TiC. Pro obrábění žáruvzdorných materiálů se používá nitrid boru BN, tzv. borazon. Novou generaci řezné keramiky zastupují kompozity s keramickou maticí Si_3N_4 , Y_2O_3 a Al_2O_3 , vyztužené 30 % TiC.



Obr. 6.8. Řezná keramika ze slinutých karbidů.

Keramika v automobilovém průmyslu

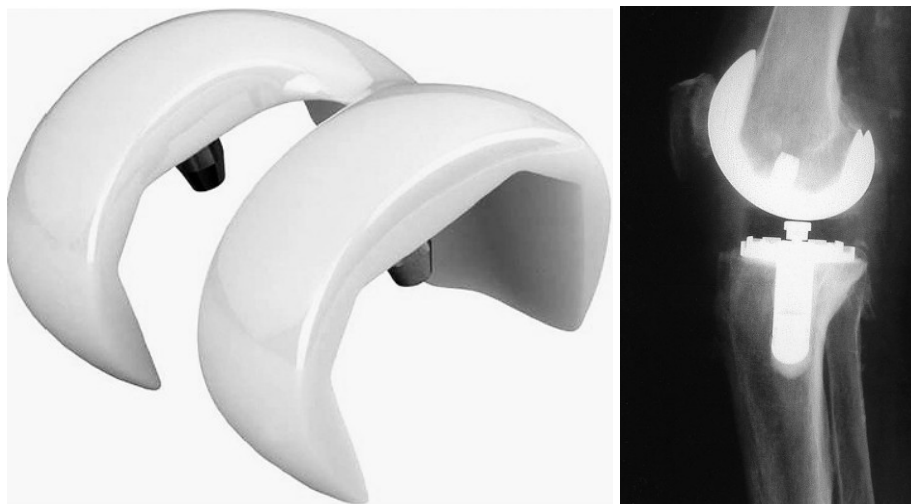
Keramika v automobilovém průmyslu se používá především na konstrukci spalovacích motorů, tj. pístů, ventilů, stěn válců nebo výfukových potrubí. Musí mít tedy vysokou tepelnou odolnost, nízkou tepelnou vodivost a roztažnost bez nutnosti chlazení. Motory s keramickými díly mají vyšší životnost motoru a snižují potřebu paliva. Pro výrobu těchto dílů se používá Al_2O_3 (korund), Si_3N_4 , SiC , částečně stabilizovaný ZrO_2 , perspektivně také sialony. Dalšími aplikacemi jsou izolátory v zapalovacích svíčkách a nosiče katalyzátorů spalování výfukových plynů.

Keramika v letectví

V letectví a kosmonautice se používají keramické spalovací trysky a turbíny. Slouží také ke konstrukci ochranných tepelných štítů raketoplánů, kde se využívá odolnosti keramiky proti teplotním šokům. Ochranné štíty raketoplánů se vyrábějí z vláknitých kompozitů na bázi Si a Al-B-Si.

Biokeramika

Biokeramické materiály mohou být dvojího druhu: biologicky inertní nebo biologicky aktivní. Biologicky inertní keramika při styku s lidskou tkání nevyvolává zánětlivé reakce. Jedná se o biokeramiku na bázi oxidů Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 a TiO_2 , ze kterých se vyrábějí zubní implantáty, klouby a kostní náhrady. Bioaktivní keramika na bázi hydroxyapatitu ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) a apatitu ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) se používá k rekonstrukci kostí. Porézní forma této keramiky umožňuje okolní kostní tkáni jimi prorůstat a tím ji scelovat. Perspektivně se začínají uplatňovat uhlíková vlákna např. při rekonstrukci měkkých tkání, jako jsou srdeční chlopně.

Obr. 6.9. Kloubní implantáty na bázi ZrO_2 .

Žáruvzdorné materiály

Žáruvzdorné materiály se používají pro vysokoteplotní aplikace, nejčastěji jako vyzdívky průmyslových pecí. Musí tedy odolávat vysokým teplotám, ale i agresivnímu chemickému prostředí. Oxidické žáruvzdorné materiály z chemického hlediska dělíme na kyselé a zásadité. Kyselé žáruvzdorný materiál, který obsahuje více než 93 hm. % SiO_2 se označuje dinas, zvyšováním obsahu Al_2O_3 na úkor SiO_2 získáme šamoty. Zásadité žáruvzdorné materiály jsou vyrobeny na bázi hořečnatých a hořečnato-vápenitých oxidů (MgO , CaO). Kromě vyzdívek se z žáruvzdorných materiálů vyrábějí formy používané v metalurgii, plsti, rohože nebo nátěrové hmoty.

Významné využití mají keramické materiály v **elektrotechnice** jako kondenzátory (BaTiO_3 , SrTiO_3), pouzdra na elektronické součástky (Al_2O_3 , BeO , SiO_2 , MgO), iontové vodiče (Al_2O_3 , ZrO_2), oscilátory (SiO_2) ad.



Shrnutí pojmů 6.1

Keramické materiály jsou anorganické nekovové látky, které se většinou vyrábí z práškových surovin a zpevňují tzv. **žárovým slinováním**.

Keramické materiály se dělí na **porézní (tradiční) keramiku** a **technickou (konstrukční) keramiku**.

Struktura keramiky je krystalická i amorfni a obsahuje množství pórů. Vazby mezi atomy jsou převážně iontové a kovalentní.

Základní vlastnosti keramiky jsou vysoká tvrdost a křehkost, žáruvzdornost, dobrá korozní odolnost, tepelná a elektrická nevodivost.

Základní složka porézní (tradiční) keramiky je **kaolín**.

Technická keramika se dělí na oxidovou keramiku, neoxidovou keramiku (nitridová, karbidová, boridová atd.) a směsnou keramiku.

Ke **zhouževnatění konstrukční keramiky** na bázi ZrO_2 se využívá napětově indukovaná martenzitická přeměna β fáze (tetragonální) na α fázi (monoklinickou).

Výroba keramiky se skládá z přípravy výchozí směsi, tvarování, tepelného zpracování, slinování, popř. finální úpravy povrchu.

Využití technické keramiky jako řezná keramika, v automobilovém průmyslu, v letectví, biokeramika, žáruvzdorné materiály, v elektrotechnice.



Otázky 6.1

1. Co jsou keramické materiály?
50. Z čeho a jakým způsobem se vyrábějí keramické materiály?
51. Jak se dělí keramické materiály?
52. Jaké vazby převládají v keramických materiálech?
53. Jaká je struktura keramických materiálů?
54. Jaké jsou základní vlastnosti keramických materiálů?
55. Co je základní složkou porézní keramiky?
56. Jak se dělí technická keramika?
57. Čím se vyznačuje technická keramika?
58. Jakým způsobem lze zvýšit lomovou houževnatost oxidové keramiky na bázi Al_2O_3 ?
59. V jakých krystalových modifikacích se vyskytuje oxid zirkonia?
60. Jakou strukturu má částečně stabilizovaný oxid zirkonia?
61. Které materiály můžeme zařadit mezi neoxidovou keramiku?
62. Jakým způsobem probíhá proces slinování?
63. Kde všude se uplatňuje technická keramika? Uveď příklady.

6.2 Sklo a skelné materiály



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

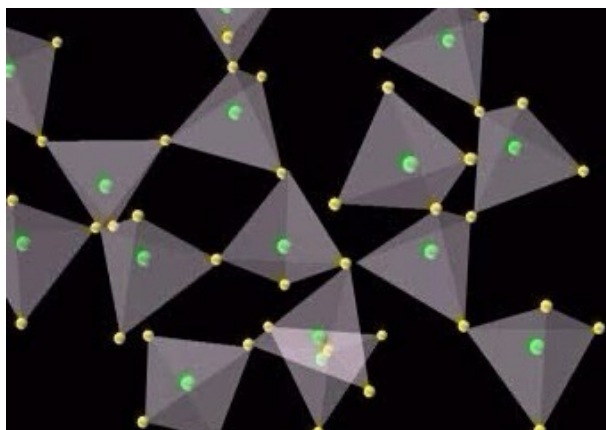
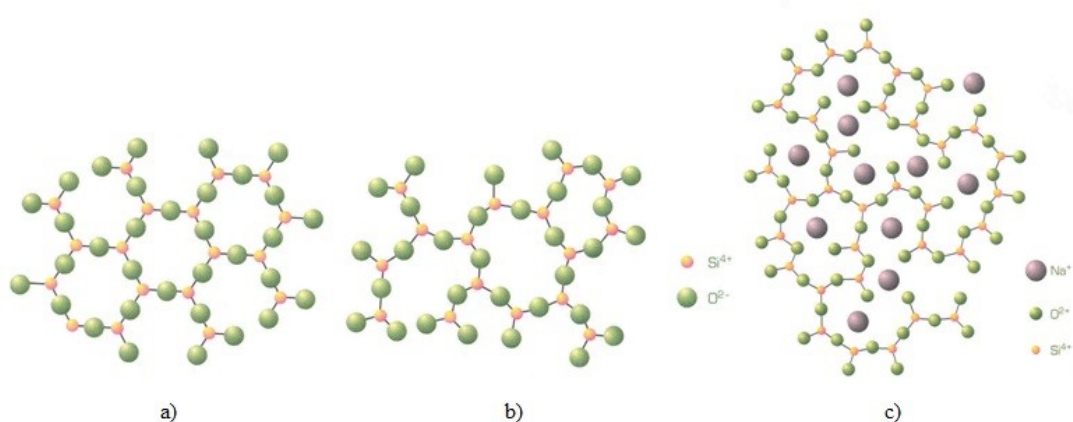
- charakterizovat sklo a skelně krystalické materiály,
- vysvětlit, na čem závisí vlastnosti skla,
- popsat použití skelných materiálů.



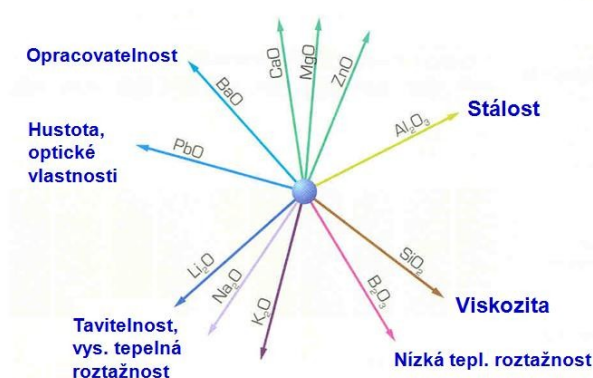
Výklad

□ Sklo

Sklo je amorfni materiál, jehož základ tvoří křemen SiO_2 . Amorfni materiály mají na rozdíl od krystalických materiálů pravidelné uspořádání atomů (iontů) pouze na krátkou vzdálenost a nepravidelné uspořádání atomů na dlouhou vzdálenost, v materiálu tedy nerozlišujeme zrna. Základní stavební jednotkou skel založených na oxidu křemičitém je tetraedr SiO_4^{4-} , v jehož vrcholech jsou umístěny atomy kyslíku a ve středu atom křemíku. V jednoduchých sklech na bázi SiO_2 jsou tetraedry spojeny vrcholy iontovými vazbami a tvoří nepravidelné síťoví (obr. 6.10 a obr. 6.11). Sklo z čistého SiO_2 má vysokou teplotu měknutí (okolo 1200°C), je pevné a stabilní, ale velmi těžko se zpracovává z důvodu vysoké viskozity. Kromě SiO_2 v obsahu od 50 do 100 % se do sklářských směsí přidávají další oxidy jako Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , B_2O_3 a jiné, které modifikují strukturu skla a zlepšují některé technologické, korozní i mechanické vlastnosti skel. Alkalické oxidy (Na_2O , K_2O) a oxidy alkalických zemin (CaO , MgO) se přidávají k oxidokřemičným sklům za účelem snížení jejich viskozity a zlepšení jejich zpracování a tvarování. Ionty Na^+ a K^+ zaplňují intersticiální polohy síťoví a podporují krystalizaci skel (obr. 6.11c). Některé oxidy nemohou tvořit skelné síťoví samy, ale mohou se připojit již k existujícímu síťoví, např. ve formě tetraedru AlO_4^{4-} . Tyto oxidy se nazývají přechodové. Přidávají se ke křemičným sklům, aby se získaly materiály se speciálními vlastnostmi. Např. aluminosilikátová skla jsou schopná vydržet vyšší teploty než běžná skla. Dalším sklotvorným oxidem je oxid boritý B_2O_3 , který je složkou borosilikátových nebo aluminosilikátových skel. Vliv modifikátorů na vlastnosti skel jsou shrnuty v obr. 6.12.

Obr. 6.10: Struktura skla na bázi SiO_2 .

Obr. 6.11. Vnitřní stavba skla. a) Pravidelné uspořádání, b) nepravidelné uspořádání, c) modifikovaná struktura skla.



Obr. 6.12. Vliv oxidů na modifikaci vlastností křemičitého skla.

□ Skelně krystalické materiály

Ze skelných hmot s amorfni strukturou lze řízenou krystalizací připravit polykrystalické hmoty se zbytkovou skelnou fází, tzv. skelně krystalické materiály. Toho se dá dosáhnout přísadou tzv. nukleátorů – oxidů kovů (TiO_2 , MoO_3 , WO_3 , V_2O_5) v rozmezí 1 – 4 % anebo

malou přísadou drahých kovů (Au, Ag, Pt) v množství 0,001 až 0,1 hm. %, které tvoří krystalizační zárodky ve skelné hmotě. Nejběžnější skelně krystalické materiály jsou $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ (Na_2O), $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Li}_2\text{O}$, $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$, $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$.

□ Vlastnosti skel a skelně krystalických materiálů

Vlastnosti skel a skelně krystalických materiálů jsou ve srovnání s technickou keramikou horší, kromě tepelné vodivosti a optických vlastností. Modul pružnosti sodného skla je asi 74 GPa, pevnost v ohybu R_{mo} se pohybuje v rozmezí 50 až 70 MPa, pevnost v tlaku dosahuje hodnoty okolo 1000 až 1200 MPa. Houževnatost skel s amorfni strukturou je velmi nízká, nižší než $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, nižší je rovněž odolnost proti teplotnímu rázu (u sodného skla).

Skelně krystalické materiály mají hodnoty modulu pružnosti, pevnosti v ohybu i houževnatosti vyšší než u skel s amorfni strukturou ($E = 140 \text{ GPa}$, $R_{mo} = 350 \text{ MPa}$, $K_{IC} = 1\text{--}2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Mají také mnohem vyšší odolnost proti teplotnímu rázu.

□ Druhy skel a jejich použití

Plochá a obalová skla patří mezi sodná skla na bázi $\text{SiO}_2\text{--CaO--Na}_2\text{O}$, která se modifikují oxidy MgO , CaO , K_2O , Al_2O_3 , barvicími oxidy (Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , CoO) nebo kalícími přísadami (CaF_2). Plochá a obalová skla se používají na výrobu spotřebních předmětů, obalového a tabulového skla. Plochá skla jsou většinou čirá, na zrcadlových je nanесena vrstvička Ag, Al nebo Cr. Obalová skla jsou většinou barvená, např. přísada Cr_2O_3 barví sklo do zelena, Fe_2O_3 do hněda. Přídavkem FeO nebo Ni, Se a Cu dostaneme termální sklo, které nepropouští infračervené záření. Tvrzené sklo v dopravních prostředcích se vyrábí ponořením sodného skla do taveniny Li_2O , přičemž na povrchu dojde k výměně kationtů větších kationtů Na^+ za menší kationty Li^+ . Při ochlazení se povrchová vrstva smrští, působí v ní tlaková pnutí, dojde k tzv. vytvrzení. Jiný způsob vytvrzení vychází z prudkého ochlazení zahřátých povrchových vrstev.

Křišťálová skla se skládají ze soustavy $\text{SiO}_2\text{--CaO(BaO)--K}_2\text{O}$ s přídavkem Na_2O a B_2O_3 . Toto sklo se označuje jako český křišťál. Soustava $\text{SiO}_2\text{--PbO--K}_2\text{O}$ s přídavkem Na_2O a ZnO je označuje jako olovnatý (anglický) křišťál. Křišťálová skla se používají především na výrobu uměleckých předmětů. Vyrábí se ručním foukáním a opracovávají se broušením, leštěním, rytím, malováním.

Optická skla se používají na výrobu čoček a brýlových skel. Optická skla musí mít vysokou kvalitu a vysokou optickou propustnost. Jsou charakterizována indexem lomu a disperzí. Optická skla se dělí na korunová (bezolovnatá), flintová (olovnatá) a speciální optická skla (fosforečnatá, lanthanoidová). Brýlová skla bývají opatřena ochrannou (SiO_2 , plasty) nebo antireflexní vrstvou (MgF_2).

Pozn. Index lomu n je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu a jiném prostředí (ve skle). Disperze je závislost indexu lomu na vlnové délce.

Skla tepelně a chemicky odolná. Nejvíce odolným sklem je křemenné sklo, tedy tavený SiO_2 . Měkne při teplotě 1280°C , má vysokou odolnost proti teplotním rázům, je výborným elektrickým izolantem a odolává koncentrovaným kyselinám. Jeho cena je však vysoká a proto se používá jen k výrobě speciálních zařízení v chemickém průmyslu a optických vláken. Tepelně a chemicky odolné je také vícesložkové sklo Simax, které se používá k výrobě chemického nádobí, varného skla a průmyslového dopravního potrubí. Je vyrobeno z oxidů $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}$. Má vysokou pevnost a nízkou tepelnou roztažnost.

Další druhy skel mají využití v medicíně (bioskla), chalkogenidová a halogenidová skla mají významné optické, elektrické a optoelektrické vlastnosti.

Skelně krystalické materiály se používají na výrobu elektrotechnických součástek. Ve zdravotnictví jako implantáty pro stimulaci srdce, ve strojnictví pro výrobu svářecích trysek. Sklo i skelně krystalické materiály mají široké uplatnění ve stavebnictví.

Na závěr této kapitoly si můžeme shrnout a porovnat mechanické vlastnosti různých typů keramických materiálů (tab. 6.1).

Tabulka 6.1. Mechanické vlastnosti keramických materiálů.

Materiál	Modul pružnosti E (GPa)	Pevnost v tlaku R_m (MPa)	Lomová houževnatost K_{IC} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)
Nitrid bóru (BN)	860	7000	
Karbid bóru (B_4C)	450	2900	
Karbid titanu (TiC)	350	2800	
Karbid křemíku (SiC)	410	2000	4,0
Karbid wolframu (WC)	600	5000	
Oxid hliníku (Al_2O_3)	392	3000	4,0
Křemen (SiO_2)	54	1200	
Oxid zirkonia (ZrO_2)	200	2000	4,0-12,0
Nitrid křemíku (Si_3N_4)	310	1200	4,0
Sialony (Si-Al-O-N)	300	2000	5,0
Křemenné sklo	74	1000 – 1200	<1,0
Skelně krystalické materiály	140		1,0 – 2,0
Kalená ocel*	210	1200	

* Není keramický materiál. Uvedeno pro srovnání.



Shrnutí pojmů 6.2

Sklo je amorfni materiál, jehož základ tvoří křemen SiO_2 .

Základní stavební jednotkou skel založených na oxidu křemičitém je **tetraedr SiO_4^{4-}** .

Modifikátory skla jsou oxidy jako Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , B_2O_3 a jiné, které modifikují strukturu skla a zlepšují některé technologické, korozní i mechanické vlastnosti skel.

Skelně krystalické materiály se připravují ze skelných hmot s amorfni strukturou řízenou krystalizací polykrystalické hmoty se zbytkovou skelnou fází.



Otázky 6.2

64. Jakou strukturu mají skla?
65. Co je základní stavební jednotkou skla?
66. Jakou funkci mají modifikátory skla?
67. Jak lze připravit skelně krystalické materiály?
68. Jaké hlavní složky obsahuje obalové sklo?



Další zdroje

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 1. část. ČVUT Praha, 2001. 1. vyd. 207 s. ISBN 80-01-02424-5.

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 2. část. ČVUT Praha, 2002. 1. vyd. 214 s. ISBN 80-01-02568-3.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. 2. opr. a rozš. vydání. 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 2. opr. a rozš. vydání. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Skočovský P., Bokůvka O., Konečná R., Tillová E.: Náuka o materiáli pre obory strojnícke. Žilinská univerzita v Žilině, 2001. 1. vyd. 381 s. ISBN 80-7100-831-1.

Strnadel B.: Nauka o materiálu. Konstrukční materiály a jejich degradační procesy. VŠB Ostrava, 1993. 1. vyd. 187 s. ISBN 80-7078-207-2.

Strnadel B.: Nauka o materiálu II. Degradaciční procesy a design konstrukčních materiálů. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.

Macek K., Janovec J., Jurči P., Zuna P.: Kovové materiály. ČVUT Praha, 2006. 1. vyd. 164 s. ISBN 80-01-03573-1.

Janovec J., Cejp J., Steidl J.: Perspektivní materiály. ČVUT Praha, 2008. 1. vyd. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.

Veles P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. ALFA Bratislava, 1989. 2. vyd.

408 s.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering. An Integrated approach. Hoboken: Wiley, 2008. 3rd ed. 882 p. INBN 978-0-470-12537-3.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Materials science and engineering: an introduction. New York: Wiley, 2007. 7th ed. 721 p., ISBN 978-0-471-73696-7.

Dobraňský L. A: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Gliwice: 2002. 1499 s. ISBN 83-204-2793-2.

Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D.: Úvod do studia materiálů. VŠCHT v Praze, 2005. 1. vyd. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.

<http://www.pramet.com/>

http://www.achot.cz/dwnld/0806_436_442.pdf



Klíč k řešení

- O 6.1. Keramické materiály jsou anorganické nekovové látky.
- O 6.2. Většinou se vyrábí z práškových surovin a zpevňují tzv. žárovým slinováním.
- O 6.3. Na porézní (tradiční) keramiku a technickou (konstrukční) keramiku.
- O 6.4. Převládají iontové a kovalentní vazby mezi atomy.
- O 6.5. Struktura keramiky je krystalická i amorfní a obsahuje množství pórů.
- O 6.6. Vysoká tvrdost a křehkost, žáruvzdornost, dobrá korozní odolnost, tepelná a elektrická nevodivost.
- O 6.7. Kaolín.
- O 6.8. Technická keramika se dělí na oxidovou keramiku, neoxidovou keramiku (nitridová, karbidová, boridová) a směsnou keramiku.
- O 6.9. Hlavní přednosti konstrukční keramiky jsou: vysoká tvrdost, vysoká korozní odolnost, žáruvzdornost. Hlavní nevýhodou je vysoká křehkost keramiky.
- O 6.10. Lomová houževnatost oxidové keramiky na bázi Al_2O_3 je možné zvýšit přísadou ZrO_2 , Y_2O_3 nebo MgO .
- O 6.11. γ je vysokoteplotní modifikace ZrO_2 (kubická), β je středněteplotní modifikace ZrO_2 (tetragonální) a α je nízkoteplotní modifikace ZrO_2 (monoklinická).
- O 6.12. Struktura částečně stabilizovaného oxidu zirkonia je tvořena kubickou maticí a tetragonálními precipitáty.
- O 6.13. Nitridy a karbidy křemíku (Si_3N_4 , SiC), sialony, WC, TiC.
- O 6.14. Slinování probíhá při teplotách pod bodem tání keramických částic mechanismem difúze v pevné fázi. Při procesu slinování se keramický díl smršťuje a jeho pórovitost se snižuje. Postupně dochází také k růstu zrn.
- O 6.15. Řezná keramika (slinuté karbidy), v automobilovém průmyslu (na konstrukci spalovacích motorů), v letectví a kosmonautice (spalovací trysky a turbíny, ochranných tepelných štítů)

raketoplánů), biokeramika (zubní implantáty, klouby a kostní náhrady), žáruvzdorné materiály (vyzdívky průmyslových pecí), v elektrotechnice (kondenzátory, pouzdra na elektronické součástky, iontové vodiče, oscilátory).

- O 6.16. Sklo je amorfni materiál
- O 6.17. Základní stavební jednotkou skel založených na oxidu křemičitém je tetraedr SiO_4^{4-} .
- O 6.18. Modifikují strukturu skla a zlepšují některé technologické, korozní i mechanické vlastnosti skel.
- O 6.19. Ze skelných hmot s amorfni strukturou řízenou krystalizací polykrystalické hmoty se zbytkovou skelnou fází.
- O 6.20. $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$.

7. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

7.1. Základní charakteristiky kompozitních materiálů



Čas ke studiu: 0,5 hodin



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- určit, co jsou kompozitní materiály
- rozdělit kompozity podle matrice a výztuže
- vysvětlit, na čem závisí vlastnosti kompozitů



Výklad

□ Co je to kompozitní materiál

Kompozity jsou materiály, které vznikly složením ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek. Spojitá základní hmota, kterou označujeme jako **matrice**, má funkci pojiva. Matrice má za úkol také přenášet zatížení do vyztužující fáze. Tvrdší a pevnější nespojitá složka se nazývá **výztuž**, která má funkci zpevňujícího plniva. Kompozity se používají tam, kde vlastnosti jednoho homogenního materiálu jsou nedostačující. Spojením dvou jednoduchých materiálů (např. kov-kov, kov-keramika) získáme materiál, který bude mít odlišné vlastnosti, než by měly jednotlivé materiály (složky).

Za kompozit tedy považujeme látku, která splňuje následující podmínky:

- byla vytvořena uměle mísením složek,
- skládá se nejméně ze dvou chemicky a fyzikálně odlišných složek, přičemž podíl výztuže musí být větší než 5 %,
- složky jsou z makroskopického hlediska rovnoměrně rozložené v celém objemu,
- výsledné vlastnosti kompozitů se odlišují od vlastností složek (matrice a výztuže).

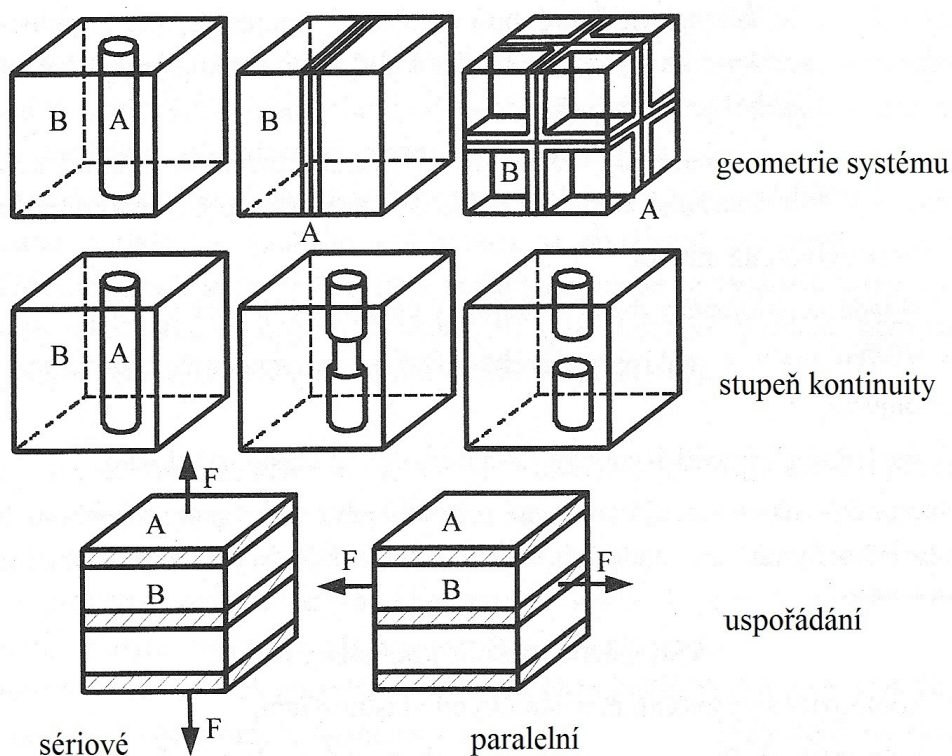
Tyto podmínky nesplňují např. složené přírodní materiály. Příkladem tohoto materiálu je dřevo; matici tvoří lignin vyztužený celulóзовými vlákny. Z kategorie kompozitů musíme vyloučit také plátované materiály a plasty obsahující malé množství tuhých barviv, oxidů nebo elastomerů (přidávaných pro zlepšení houževnatosti). První podmínku nesplňují slitiny kovů, u kterých během tuhnutí taveniny došlo k vyloučení tvrdší fáze, a proto je nemůžeme považovat za pravé kompozity. V následujícím textu však najdete spoustu příkladů materiálů, které mezi kompozity určitě patří.

□ Rozdělení kompozitních materiálů

Vlastnosti kompozitů tvořeného maticí (A) a výztuží (B) ovlivňují tyto parametry (obr. 7.1):

- **objemový podíl složek V_A a V_B ;**
- **geometrie systému (uspořádání výztuže);**
- **stupněm kontinuity (od spojitých po jednotlivé částice);**
- **upořádání fází vzhledem k působícímu napětí (paralelní a sériové).**

Kromě vlastností matrice a vlastností sekundární fáze (výztuže) jsou vlastnosti kompozitu výrazně ovlivňovány fázovým rozhraním mezi maticí a zpevňující fází. Charakter fázového rozhraní ovlivňuje soudržnost mezi vláknem a maticí a ovlivňuje tím mechanické vlastnosti kompozitu.



Obr. 7.1. Charakteristické parametry kompozitů

Kompozity se rozdělují **podle druhu matrice**, a to na kompozity s:

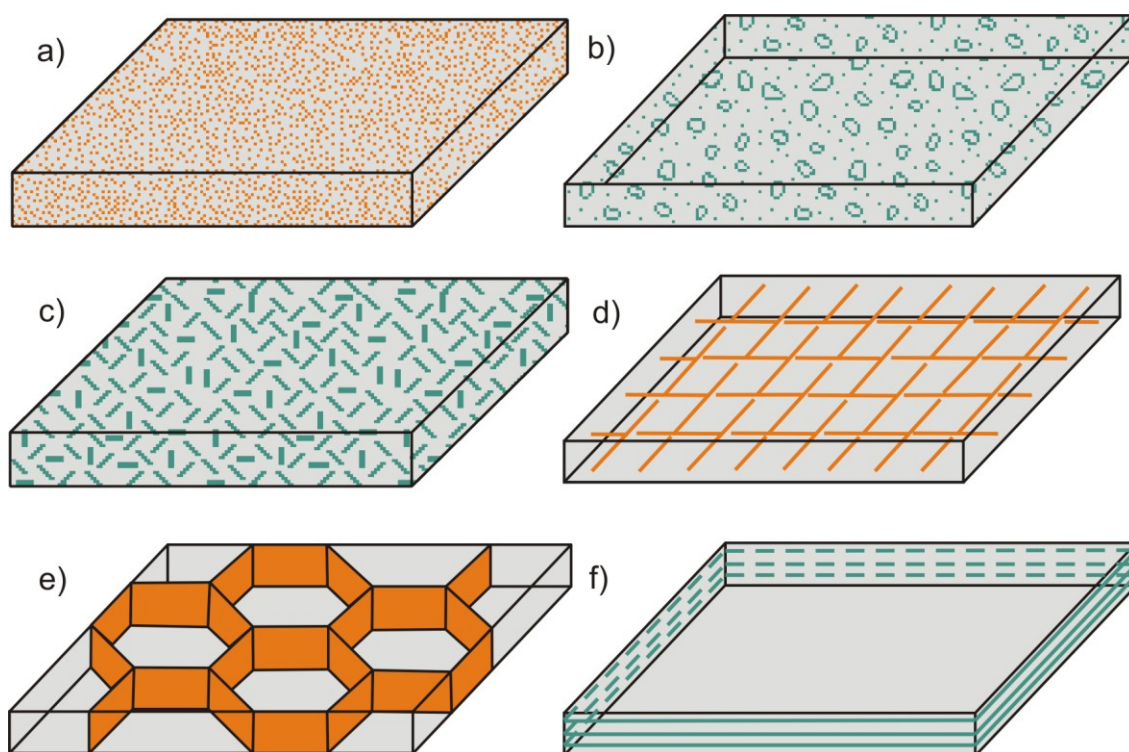
- **polymerní maticí,**
- **kovovou maticí,**
- **keramickou maticí,**
- **uhlíkovou maticí.**

Polymerní matici může tvořit termoplast (polypropylen – PP, polyamid – PA, polycarbonát – PC) reaktoplast (např. epoxidová pryskyřice) nebo elastomer (např. styren-butadien).

Z kovových matic mají největší význam lehké slitiny (hliníku, hořčíku a titanu), ale i slitiny železa, kobaltu a mědi. Jako keramická matrice nejčastěji slouží karbid nebo nitrid křemíku, oxidy křemíku a zirkonia. Uhlíkovou matici tvoří strukturně různě uspořádaný uhlík.

Podle geometrie, tedy uspořádání výztuže v matrici, můžeme kompozity rozdělit na:

- **částicové kompozity,**
- **vláknité kompozity,**
- **lamelární kompozity,**
- **popř. hybridní.**



Obr. 7.2. Příklady různého uspořádání výztuže v matrici.

a) disperzní částice, b) granule, c) krátká vlákna neorientovaná, d) dlouhá vlákna orientovaná, e) skelet, f) lamely.



Shrnutí pojmů 7.1

Kompozity jsou materiály, které vznikly složením ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek.

Matrice je spojitá základní hmota, která má funkci pojiva.

Výztuž je tvrdší a pevnější nespojitá složka kompozitů, která má funkci zpevňujícího plniva.

Vlastnosti kompozitů ovlivňují objemový podíl složek, uspořádání výztuže, stupeň kontinuity výztuže, upořádání fází vzhledem k působícímu napětí, fázové rozhraní mezi maticí a zpevňující fází.

Kompozity se rozdělují **podle druhu matrice** a **podle geometrie** (uspořádání výztuže v matici).



Otázky 7.1

1. Co jsou kompozitní materiály?
69. Jakou funkci plní matrice v kompozitních materiálech?
70. Jakou funkci má výztuž v kompozitních materiálech?
71. Čím jsou ovlivněny vlastnosti kompozitních materiálů?
72. Jak rozdělujeme kompozity podle druhu matrice?
73. Jak rozdělujeme kompozity podle geometrie výztuže?



Úlohy k řešení 7.1

7.2. Částicové kompozity



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- rozdělit částicové kompozity.
- vysvětlit základní vlastnosti částicových kompozitů.
- popsat hlavní oblasti využití částicových kompozitů.



Výklad

□ Částicové kompozity - úvod

Částicové kompozity se nejčastěji vyrábějí s polymerní, kovovou nebo keramickou maticí zpevněnou jemnými částicemi kovů, oxidů kovů nebo jiných typů konstrukční keramiky. Velikost částic je obvykle menší než 1 mm. Jako plnicí materiál se používají jemné práškové materiály (kuličkovité nebo hranaté), jemná vlákna, částice jehlicovitého tvaru atp. Mezi částicové kompozity lze zařadit také kovové materiály disperzně zpevněné při procesu zpracování. Disperzně zpevněné kompozity mají velikost částic mezi 0,01 až 0,1 μm (10 až 100 nm). My se však zaměříme pouze na částicové kompozity, které vznikly záměrným vnesením dispergovaných částí do matrice.

□ Částicové kompozity s polymerní maticí

Jaké jsou výhody částicových kompozitů s polymerní maticí? Polymery plněné jemnými částicemi minerálů, keramiky nebo kovů mají větší modul pružnosti v tahu, zvýší se jejich tuhost, tedy poměr modulu pružnosti E a měrné hmotnosti ρ . Přídavek plniva do polymerní matrice zajistí zvýšení tvarové stálosti za tepla, tepelné vodivosti, zmenšení smrštění při chladnutí z teplot zpracování a teplotní roztažnosti než jaké by měl samotný polymer. Houževnatost kompozitu je však ve srovnání s maticí nižší. Částice obecně zlepšují vlastnosti polymeru. Neslouží však jen jako plnivo, ale často nahrazují i dražší polymer, čímž snižují ve většině případů cenu finálního výrobku.

Typickým příkladem kompozitního materiálu na bázi polymerů jsou pryže. Jedná se o vulkanizovaný kaučuk vyplněný práškem sazí o střední velikosti zrn 5÷500 nm. Při objemovém podílu 15 – 20 % (tj. 40 – 50 % hmotnostního podílu) sazí (popř. SiO_2) se dosáhne až 10 násobného zvýšení pevnosti. Vysoké objemy plniva (nad 50 % hmotnostních dílů) však už nezvyšují ani pevnost ani tažnost pryží, ale podstatně zvyšují modul pružnosti.

Proto se pryže používají ve strojnictví především na výrobu pneumatik, těsnění nebo prvků zajišťujících pružné uložení strojů a strojních částí. U plněného přírodního kaučuku lze zvýšit odolnost proti opotřebení o 40 % zvětšením částic sazí z 10 nm na 40 nm, dojde však ke snížení pevnosti.

Dalším příkladem částicového kompozitu s polymerní matricí je polyetylen plněný 40 hm. % jílu, který se používá pro výrobu drenážních trubek. Modul pružnosti tohoto kompozitu je asi 2x vyšší než samotné matrice, mírně se zvyšuje i jeho pevnost. Tloušťka stěny drenážních trubek je pak tenčí než u klasických keramických trubek.

Na výrobu vnitřních částí automobilů nebo na krycí části klimatizačních zařízení se zase používají plněné termosety, které mají velmi dobrou schopnost tlumit zvuk.

□ Částicové kompozity s kovovou matricí

Částicové kompozity s kovovou matricí se nejčastěji vyrábějí technologií práškové metalurgie. Přítomnost velmi malých tvrdých částic o rozměrech menších než 0,1 mm v kovové matrici vede k významnému zvýšení tvrdosti, meze kluzu a pevnosti. Slinováním kovového prášku matrice a jemného prášku keramiky se připravují disperzní **cermety**, které vykazují zvýšenou odolnost proti creepovým mechanismům poškození a lze je použít za zvýšených a vysokých teplot. Nejčastěji používané keramické částice jsou karbidy křemíku SiC.

Příprava částicových kompozitů spočívá v:

- povrchové oxidaci mletého kovového prášku a následuje lisování a spékání;
- vnitřní oxidaci kovu ve zředěném tuhém roztoku;
- selektivní redukci mechanické směsi oxidů kovů matrice a dispergovaných částic a následovným lisování a spékáním;
- mechanickým smícháním kovového prášku matrice a prášku oxidu jiného kovu a následným tepelným a mechanickým zpracováním.

Důležitou podmínkou při návrhu částicových kompozitů je dodržení minimálního rozdílu koeficientů teplotní roztažnosti matrice a částic ($\Delta\alpha < 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Při nedodržení dané podmínky by mohlo za zvýšených teplot dojít ke vzniku vnitřních pnutí, která by výrazně snížila pevnost těchto materiálů.

Nejčastěji vyráběné částicové kompozity s kovovou matricí jsou systémy na bázi Al s částicemi Al_2O_3 v objemovém podílu do 10 %. Disperzně zpevněný hliník se označuje jako SAP („Sintered Aluminium Powder“). Princip zpevnění materiálu souvisí s účinným brzděním pohybu dislokací jemně dispergovanými částicemi Al_2O_3 . Systém Al- Al_2O_3 je možné použít v nukleárních reaktorech.

Částicové kompozity s Al nebo Ti matricí se používají na výrobu strojních součástí používaných za zvýšených teplot a svými pevnostními parametry se vyrovnají ocelím se

zaručenou mezí kluzu při zvýšených teplotách. Jejich výhodou je také zejména nižší měrná hmotnost a vysoká korozní odolnost.

Měď disperzně zpevněná částicemi SiC vykazuje výbornou elektrickou vodivost a odolnost proti opotřebení a využívá se proto na výrobu lamel vysokootáčkových elektromotorů.

Další příklady použití částicových kompozitů s kovovou maticí jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1. Příklady použití částicových kompozitů s kovovou maticí

Systém	Aplikace
Al-Al ₂ O ₃	možnost použití v nukleárních reaktorech
Al-SiC	písty a tyče do motorů automobilů
Cu-Al ₂ SiO ₅	letecké brzdy
Ni(W)-ThO ₂ (Y ₂ O ₃)	žáropevné slitiny (topné odpory, kontakty v elektrotechnice, povlaky palivových článků v jaderných reaktorech)



Shrnutí pojmů 7.2

Částicové kompozity se nejčastěji vyrábějí s polymerní, kovovou nebo keramickou maticí zpevněnou jemnými částicemi kovů, oxidů kovů nebo jiných typů konstrukční keramiky.



Otázky 7.2

7. Jaké jsou výhody částicových kompozitů s polymerní maticí?
74. Kolikrát se zvýší pevnost vulkanizovaného kaučuku při objemovém podílu 15 – 20 % sazí?
75. Jakou technologií se nejčastěji vyrábějí částicové kompozity s kovovou maticí?

7.3 Vláknité kompozity



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- charakterizovat rozdělení vláknitých kompozitů
- popsat vláknité kompozity s ohledem na charakter matrice
- popsat základní druhy vláken ve vláknitých kompozitech a charakterizovat jejich vlastnosti



Výklad

Vláknité kompozity – úvod

Vláknité kompozity jsou v současné době nejpoužívanějším druhem kompozitních materiálů a můžeme se s nimi setkat v celé řadě odvětví, např. v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, ale i ve sportu při výrobě různých sportovních náčiní apod. Podobně jako v případě částicových kompozitů můžeme i vláknité kompozity rozdělit podle druhu použité matrice a podle druhu výztuže – v tomto případě vláken.

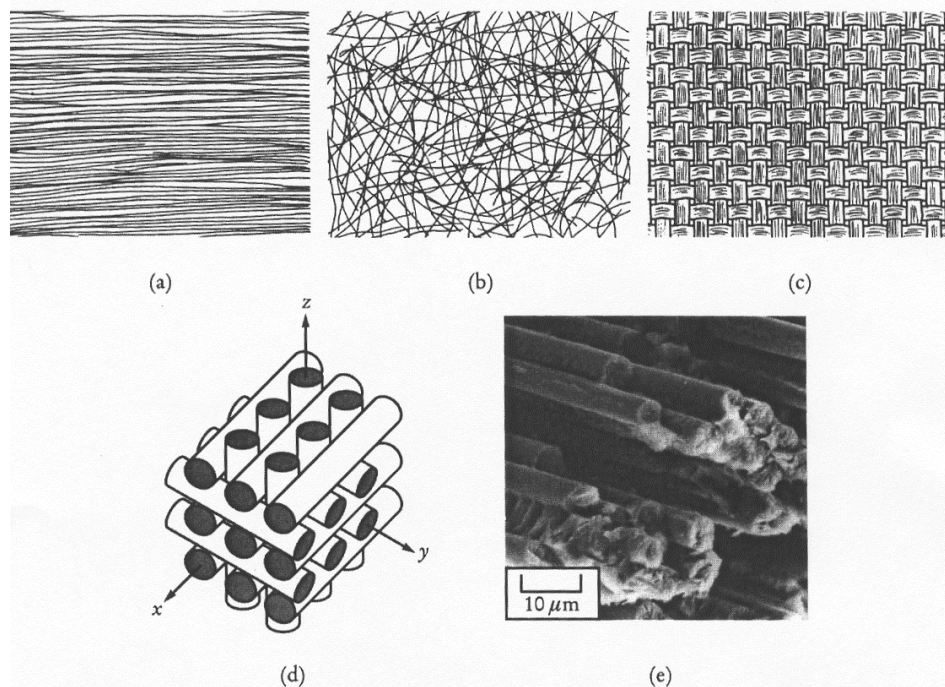
Matricí bývají v případě vláknitých kompozitů nejčastěji **polymery**, a to reaktoplasty – nejčastěji epoxidové a polyesterové pryskyřice, nebo termoplasty – např. polypropylén. Dalším druhem matrice mohou být **kovy**, nejčastěji lehké kovy, jako hliník, nebo hořčík. Třetí typ matrice vláknitých kompozitů představují **keramické materiály**, kam bývá řazena mj. i matrice uhlíková.

Vlákna, tj. výztuž vláknitých kompozitů tvoří nejčastěji:

- **skleněná vlákna;**
- **uhlíková vlákna;**
- **polymerní vlákna;**
- **kovová vlákna;**
- **keramická vlákna.**

Vlákna mají obvykle velmi malý průměr, a to velice zhruba mezi 3 – 15 μm . Než se pustíme do popisu jednotlivých druhů vláken, resp. vláknitých kompozitů, uvedeme alespoň základní společné informace. Úkolem vláken ve vláknitých kompozitech je zejména zvýšit pevnost

materiálu, event. další související vlastnosti, např. odolnost vůči únavě aj. Určitě vás napadne, že důležitým faktorem, který ovlivní vlastnosti, tedy i pevnost, bude **uspořádání vláken**. Některé druhy uspořádání vláken jsou znázorněny na obr. 7.3.



Obr. 7.3 Vybrané druhy uspořádání vláken ve vláknitých kompozitech (a-d) a pohled na lom uhlíkových vláken (e)

Na obr. 7.3a jsou jednosměrně uspořádaná, tj. rovnoběžná vlákna. Na obr. 7.3b jsou náhodně orientovaná vlákna v jedné rovině. Obr. 7.3c představuje tkaninu utkanou z vláken orientovaných ve dvou navzájem kolmých směrech. Na obr. 7.3d je trojrozměrné uspořádání vláken, kdy vlákna jsou orientována ve třech navzájem kolmých směrech. Uspořádání vláken má zásadní vliv na **izotropii**, resp. **anizotropii vlastností** (vzpomeňte si na kap. 3). Na obr. 7.3e je příklad lomové plochy uhlíkových vláken zobrazený elektronovým mikroskopem.

Druhým důležitým parametrem, který má velký vliv na vlastnosti vláknitých kompozitů (tedy i na jejich pevnost), je **délka vláken**. Hlavním důvodem pro přidání vláken do kompozitu je zvýšení pevnosti. Vlákna musí mít mnohem vyšší pevnost, než je pevnost matrice. Aby se vysoká pevnost vláken mohla využít, musí mít vlákna alespoň minimální délku. Pro efektivní využití vláknitého kompozitu je třeba, aby při mechanickém zatížení docházelo přednostně k lomu ve vláknech a aby nedocházelo k porušení smykem na rozhraní vlákno – matrice. Definuje se tzv. **kritická (nejmenší) délka vlákna l_c** , a to následovně:

$$l_c = \frac{R_{mv} \cdot d}{\tau_{v-m}}, \quad \text{rov. 7.1}$$

kde

R_{mv} je mez pevnosti vláken v tahu;

d je průměr vláken;

τ_{v-M} je smyková pevnost na rozhraní vlákno – matrice.

Kritická délka vlákna je podle rovnice 7.1 tím větší, čím větší je poměr mezi pevností vláken v tahu a smykovou pevností rozhraní vlákno – matrice. Dále závisí kritická délka vlákna přímo úměrně na průměru vláken. Z praktického hlediska se vlákna podle své délky dělí na:

- **vlákna dlouhá (spojitá);**
- **vlákna krátká (nespojité).**

U vláken dlouhých je délka min. 15x větší než kritická délka l_c a bývá min. v desítkách mm, ale i více. U krátkých vláken je délka v rozmezí $l_c - 15 \cdot l_c$ a pohybuje se obvykle v jednotkách mm. Vláknité kompozity s dlouhými vlákny mají lepší mechanické vlastnosti, ale jejich výroba je náročnější a dražší.

Vláknité kompozity s polymerní matricí

Vláknité kompozity s matricí tvořenou polymery představují nejobvyklejší druh vláknitých kompozitů. (Pozn: V angličtině se pro ně používá zkratka PMFC – Polymer-matrix fiber composites.) Hlavním důvodem je zejména nízká hustota, snadnost výroby, možnost tvarování a relativně nízká cena polymerů. Polymerní matrici tvoří obvykle **reaktoplasty** vzhledem k tomu, že jejich vlastnosti jsou jen málo ovlivněny teplotou (v rozsahu možného použití). Nejčastěji se používají **epoxidové a polyesterové pryskyřice**. Kromě reaktoplastů se jako matrice vláknitých kompozitů používají i některé **termoplasty**, zejména **polypropylen**.

Jako výztuž vláknitých polymerů s polymerní matricí se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková, nebo polymerní.

□ Skleněná vlákna

Skleněná vlákna se začala průmyslově vyrábět ve 30. letech 20. století. K výrobě vláken se nejčastěji používá **aluminoborosilikátové sklo** jen s malou přísadou alkalických oxidů (Na_2O , K_2O , CaO). Vlákna se vyrábějí protlačováním sklovité hmoty přes formu s otvory o průměru 1 – 2 mm. Následně se pak táhnou v těstovitém stavu na vlákna o průměru 5 – 15 μm . Vlákna se pak pokrývají speciálním povlakem, který má zabránit poškození jejich povrchu a zlepšit pevnost spojení mezi vláknem a polymerní matricí. Skleněná vlákna mají zhruba následující materiálové charakteristiky (tab. 7.2):

Tab. 7.2 Základní charakteristiky skleněných vláken

Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	cca 2500
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	70 - 80
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	2500 - 4500

Ted' byste se mohli zeptat: Jak to, že sklo, které má normálně velmi nízkou pevnost v tahu, má ve formě vláken pevnost vyšší než 2000 MPa? Jak je to možné?

Důvodů je několik. Jeden bude společný pro všechna tenká vlákna, druhý bude specifický a bude se týkat jen skla.

První důvod přesahuje svým charakterem rozsah tohoto předmětu, tak jej uvádíme jen informativně. Když jsme v předchozích kapitolách mluvili o pevnosti materiálů v tahu, uvažovali jsme o ní jako o materiálové charakteristice, která je v zásadě konstantní. Ve skutečnosti tomu tak není, zejména u materiálů, které se chovají převážně nebo zcela křehce. Pevnost materiálů v tahu významně závisí na jejich rozměrech. **Zjednodušeně platí: Čím je průřez materiálu menší, tím je jeho pevnost v tahu vyšší.** Křehké materiály jsou velmi citlivé na přítomnost vnitřních defektů, vad, zejména trhlin. Defekty, zejména trhliny se spolupodílí na nízké pevnosti v tahu těchto materiálů. Obyčejné tabulové sklo má mez pevnosti v tahu mnohem nižší než 100 MPa. Je to způsobeno mimo jiné tím, že může obsahovat vnitřní defekty (dutiny, bubliny apod.) o velikosti v desetinách mm, které snižují jeho pevnost v tahu. Pokud se podaří vyrobit materiál o průměru jen 5 – 15 μm , může obsahovat jen velmi malé vnitřní defekty, a v důsledku toho může mít mnohem vyšší pevnost v tahu.

Toto platí nejen pro sklo, ale v zásadě pro všechny materiály, zejména pak pro ty, které se chovají převážně křehce. **Mají-li materiály velmi malý průřez, řádově v mikrometrech, mohou obsahovat jen velmi malé defekty, a v důsledku toho budou mít mnohem vyšší pevnost, než materiály obvyklého průřezu.**

Druhý důvod je specifický a týká se skla jako amorfního materiálu. Sklo je velmi citlivé na přítomnost **povrchových vrubů**. Vrubu vyvolávají lokální koncentraci napětí (viz kapitola 3), a mohou tak způsobit vznik a růst trhlin. Sklo jako amorfní materiál neobsahuje žádné hranice zrn, na kterých by se trhliny mohly zastavit. Trhliny tedy mohou snadno růst, což má opět za následek nízkou pevnost. Aby měla skleněná vlákna vysokou pevnost, musí být vyrobena tak, aby **povrchové nerovnosti** byly **minimální** (v setinách μm !!). Navíc se povrch vláken chrání před poškozením speciálním povlakem.

Skleněná vlákna jsou nejlevnějším druhem vláken. Jejich hlavní použití je v automobilovém průmyslu, např. pro nárazníky automobilů, ale i další části. Kompozity s polymerní maticí

vyztužené skleněnými vlákny mohou být používány jen do teplot cca 250°C, a to vzhledem k charakteru matrice i vlastnostem skleněných vláken.

□ Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna představují v mnoha ohledech kvalitnější „výztuž“ kompozitů než vlákna skleněná zejména pro **vyšší modul pružnosti v tahu E (tj. pro vyšší tuhost)** a pro **nižší hustotu ρ** . Uhlíková vlákna se vyrábějí **pyrolýzou** (vysokoteplotním rozkladem bez přístupu vzduchu) některých polymerních vláken, zejména polyamidů, nebo polyakrylonitrilu. V průběhu pyrolýzy se uvolní atomy všech prvků (zejména kyslíku, vodíku, dusíku) a zůstanou jen atomy uhlíku. Ty vytvoří strukturu podobnou grafitu, přičemž osa vlákna odpovídá bazální rovině hexagonální mřížky grafitu. V bazální rovině existují mezi atomy uhlíku kovalentní vazby, a v důsledku toho mají uhlíková vlákna vysokou pevnost v tahu i modul pružnosti. **Mez pevnosti v tahu a modul pružnosti se vzájemně mění v závislosti na maximální teplotě při pyrolýze. S vyšší teplotou pyrolýzy roste modul pružnosti, ale klesá pevnost v tahu vláken.** Obvyklý průměr uhlíkových vláken je 5 – 10 μm .

Uhlíková vlákna mají zhruba následující materiálové charakteristiky (tab. 7.3):

Tab. 7.3 Základní charakteristiky uhlíkových vláken

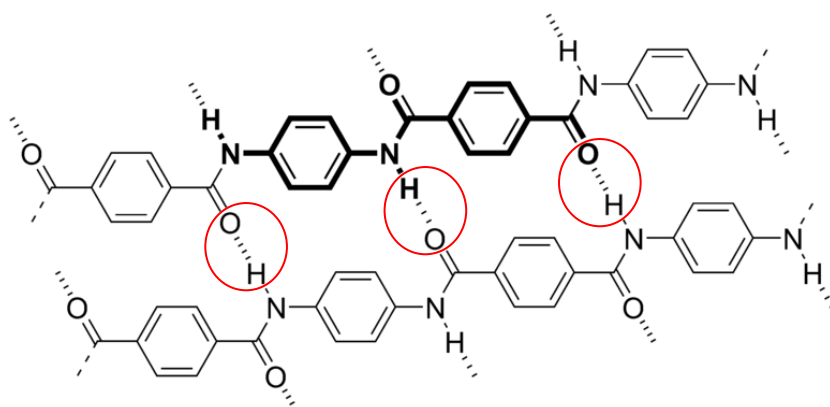
Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	cca 1800
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	180 - 400
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	1900 - 3500

Uhlíková vlákna se mohou, sama o sobě, používat za vysokých teplot ($>1000^\circ\text{C}$), ale v kompozitech s polymerní matricí je max. teplota použití dána vlastnostmi matrice.

Vláknité kompozity s polymerní matricí vyztužené uhlíkovými vlákny se často používají při výrobě sportovního náčiní, např. rybářských prutů, některých golfových holí. Dále se používají např. při výrobě malých tlakových lahví pro stlačené plyny, v leteckém průmyslu pro části helikoptér (např. části pláště, křídla!!) aj.

□ Polymerní vlákna

V kapitole 5 věnované polymerům jsme uvedli, že polymery mají obecně nízký modul pružnosti E (max. cca $10^3 - 10^4$ MPa) a také nízkou pevnost v tahu (max. cca 100 MPa). V 70. letech patentovala firma Du Pont nový druh polymeru, který patří do skupiny termoplastů, přesněji **aromatických polyamidů** a který dostal obchodní název **Kevlar**. Z chemického hlediska se jedná o **poly-parafenylen-tereftalamid** (nemusíte znát!!!). Jeho chemická struktura je znázorněna na obr. 7.4.



Obr. 7.4 Chemická struktura poly-parafenylen-tereftalamidu

Kevlar se vyrábí polykondenzací, vlákna mají průměr cca 5-15 μm . Kevlar se vyrábí různými postupy a v závislosti na způsobu výroby může dosahovat různé úrovně materiálových charakteristik. V následující tabulce 7.4 jsou uvedeny základní charakteristiky pro Kevlar 29 a Kevlar 49.

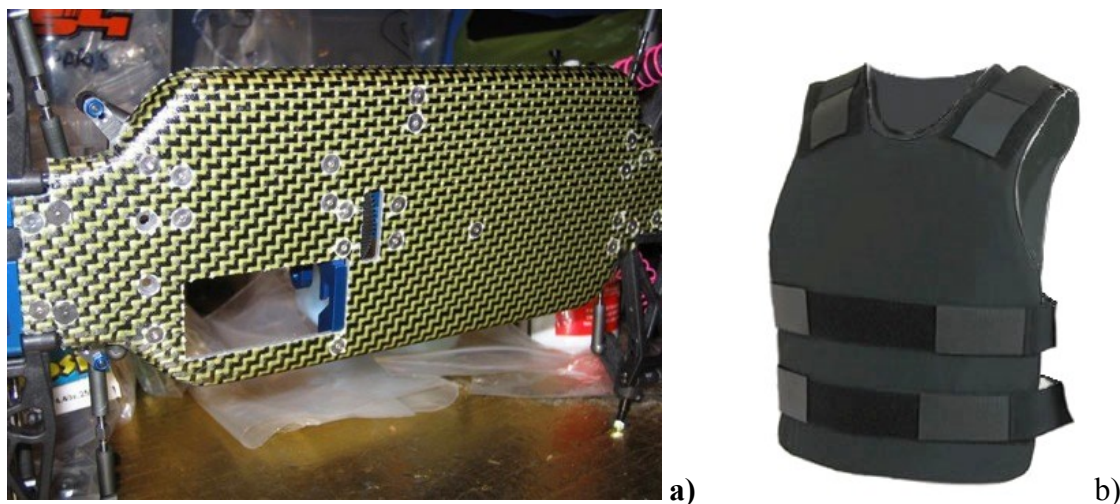
Tab. 7.4 Základní charakteristiky kevlarových vláken

	Kevlar 29	Kevlar 49
Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	cca 1450	cca 1450
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	cca 60	cca 130
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	cca 2700	cca 3600
Max. teplota použití ($^{\circ}\text{C}$)	cca +200	cca +200

Za vysokou pevnost a tuhost vděčí Kevlar mj. vysoké četnosti vodíkových můstků (viz kapitola 2) mezi jednotlivými řetězci a vysoké četnosti benzenových jader v řetězcích. Vodíkové můstky jsou v obr. 7.4 vyznačeny červeně.

Na rozdíl od skleněných, nebo uhlíkových vláken mají vlákna vyrobená z Kevlaru podstatně vyšší houževnatost.

Pro své vlastnosti se Kevlar používá např. pro neprůstřelné oděvy, a v kompozitních materiálech s polymerní matricí pro sportovní náčiní, části závodních automobilů, tlakové nádoby apod. (obr. 7.5).



Obr. 7.5 Příklad použití kompozitu s Kevlarovými vlákny a) –část závodního automobilu; resp. příklad použití Kevlaru b) – neprůstřelná vesta

□ Vlákenné kompozity s kovovou maticí

Vlákenné kompozity s kovovou maticí se používají zejména v leteckém a automobilovém průmyslu, ale také při konstrukci kosmických plavidel. (Pozn: V angličtině se pro ně používá zkratka MMFC – Metal-matrix fiber composites.)

Maticí bývá několik skupin kovových materiálů, a to zejména v závislosti na účelu použití, resp. **teplotě použití**. Jako **matrice vláknitých kompozitů s kovovou maticí** se používají zejména:

- **hliník, hořčík a jejich slitiny;**
- **titan a jeho slitiny;**
- **slitiny niklu.**

Výztuž ve formě vláken má zejména zvýšit pevnost kompozitních materiálů, jejich max. teplotu použití, a zvýšit také odolnost vůči únavovému poškození apod. V kompozitních materiálech s kovovou maticí se používají především následující druhy vláken:

- **uhlíková vlákna;**
- **kovová vlákna (především z bóru);**
- **keramická vlákna (karbid křemíku, oxid hlinitý).**

Uhlíková vlákna jsme popsali již u kompozitů s polymerní maticí. Nyní se tedy zaměříme na dosud neprobrané skupiny vláken.

□ Kovová vlákna

Jedním z nejslibnějších kovů pro výrobu vláken jako výztuže kompozitních materiálů je **bór**. Má to dva důvody – bór má **nízkou hustotu** a **vysoký modul pružnosti**. Bór se nedá snadno táhnout, a tak je výroba vláken složitá a drahá. Nejčastěji se bórová vlákna vyrábějí metodou **CVD**, což znamená **chemical vapour deposition**, česky **chemická depozice z plynné fáze**. Bórová vlákna se vyrábí redukcí z halogenidů bóru, např. z BCl_3 za vysokých teplot, cca 1100°C . Bór se vylučuje na tenkém vlákně z wolframu, které má průměr cca $10\text{--}15\ \mu\text{m}$. Krystaly bóru, které vznikají, jsou velmi malé a mají rozměry v jednotkách nanometrů. Průměr vlastního bórového vlákna je pak cca $100\text{--}200\ \mu\text{m}$. Bórová vlákna se mohou použít do teplot cca $+500^\circ\text{C}$. Pro vyšší teploty je třeba chránit je povlakem např. z karbidu křemíku. Jinak by hrozila difúze bóru do matrice, event. dokonce reakce bóru s některými prvky v kovové matici.

Výroba bórových vláken i kompozitů, které je obsahují, je velmi drahá, a tak zůstává omezena na některé aplikace v leteckém průmyslu a v částech kosmických lodí.

Základní vlastnosti bórových vláken jsou shrnuty v následující tabulce 7.5:

Tab. 7.5 Základní charakteristiky bórových vláken

Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	cca 2650
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	cca 400
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	3000 - 3700

□ Keramická vlákna

Jako keramická vlákna se používá zejména **karbidická a nitridická keramika**, v některých případech i **oxidická keramika**. Nejčastěji používanými materiály pro výrobu keramických vláken jsou **karbid křemíku** (SiC), **nitrid křemíku** (Si_3N_4) a **oxid hliníku** (Al_2O_3). Obecně se ale keramická vlákna používají jako výztuž vláknitých kompozitů poměrně málo, zejména kvůli náročné výrobě. Základní vlastnosti některých keramických vláken jsou uvedeny v následující tabulce 7.6.

Tab. 7.6 Základní charakteristiky keramických vláken

	karbid křemíku	nitrid křemíku	oxid hliníku
Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	3200	3200	4000
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	cca 480	350 - 380	cca 500
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	3000 - 3700	2500 - 3500	cca 2000

Mezi výhody keramických vláken patří zejména jejich chemická stabilita a zachování mechanických vlastností i za vysokých teplot.

□ Vlákňité kompozity s uhlíkovou maticí

Vlákňité kompozity s uhlíkovou maticí tvoří zvláštní skupinu vláknitých kompozitů. Maticí je uhlík a výztuži bývají výhradně uhlíková vlákna. **Uhlík je tedy základní složkou jak v případě matrice, tak v případě výztuže – vláken.** Proto se těmto kompozitům říká **kompozity uhlík – uhlík**, v angličtině **carbon – carbon composites**. Jedná se o relativně novou skupinu vláknitých kompozitů s velmi dobrými vlastnostmi, ale vysokou cenou. Používají se mj. v závodních automobilech Formule 1, v kosmických lodích, turbínových motorech apod. Mezi velké přednosti patří **stálost mechanických vlastností do velmi vysokých teplot** (až 2000°C), **nízký koeficient teplotní roztažnosti**, **poměrně vysoká tepelná vodivost**, **stálost vůči tepelným šokům** a **relativně vysoká houževnatost**. Významnou vlastností je také jejich **biokompatibilita** (slučitelnost s živými tkáněmi), pro kterou nacházejí uplatnění mj. i v medicíně.

Na obr. 7.6 je fotografie kyčelní endoprotézy vyrobené z kompozitu uhlík – uhlík.



Obr. 7.6 Kyčelní endoprotéza vyrobená z kompozitu uhlík – uhlík

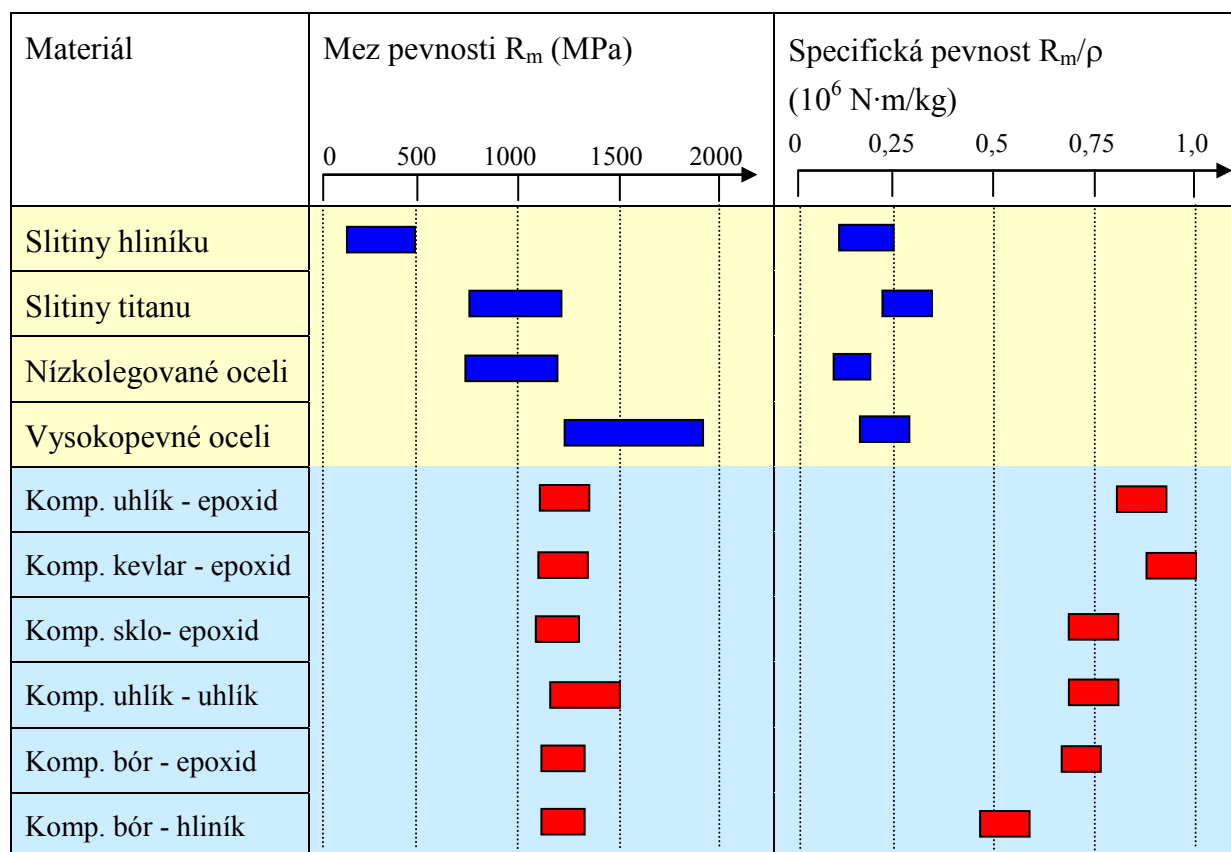
Příčinou vysoké ceny u tohoto typu vláknitých kompozitů je mj. složitost jejich výroby. Uhlíková vlákna vyrobená pyrolýzou a upravená do vhodného tvaru bývají např. impregnována kapalnými pryskyřicemi – reaktoplasty. Výrobek pak dostane potřebný tvar

(lisováním, apod.) a je podroben další pyrolýze, při níž dojde k rozkladu matrice, tj. uvolnění všech prvků s výjimkou uhlíku. Výsledkem je struktura obsahující uhlíková vlákna v uhlíkové matici.

□ Srovnání vlastností některých klasických materiálů a vláknitých kompozitů

Výklad by nebyl úplný, kdybychom se nepokusili o určité porovnání vlastností klasických (nekompozitních materiálů) a vybraných druhů vláknitých kompozitů. Vzhledem k tomu, že jednou z nejdůležitějších charakteristik materiálů je jejich pevnost, provedeme srovnání pro tuto charakteristiku. Nebudeme ale uvažovat jen mez pevnosti R_m (MPa), ale také tzv. **specifickou pevnost**, která je definována jako poměr meze pevnosti a hustoty materiálu, tj. R_m/ρ . Srovnání je zobrazeno v tab. 7.7.

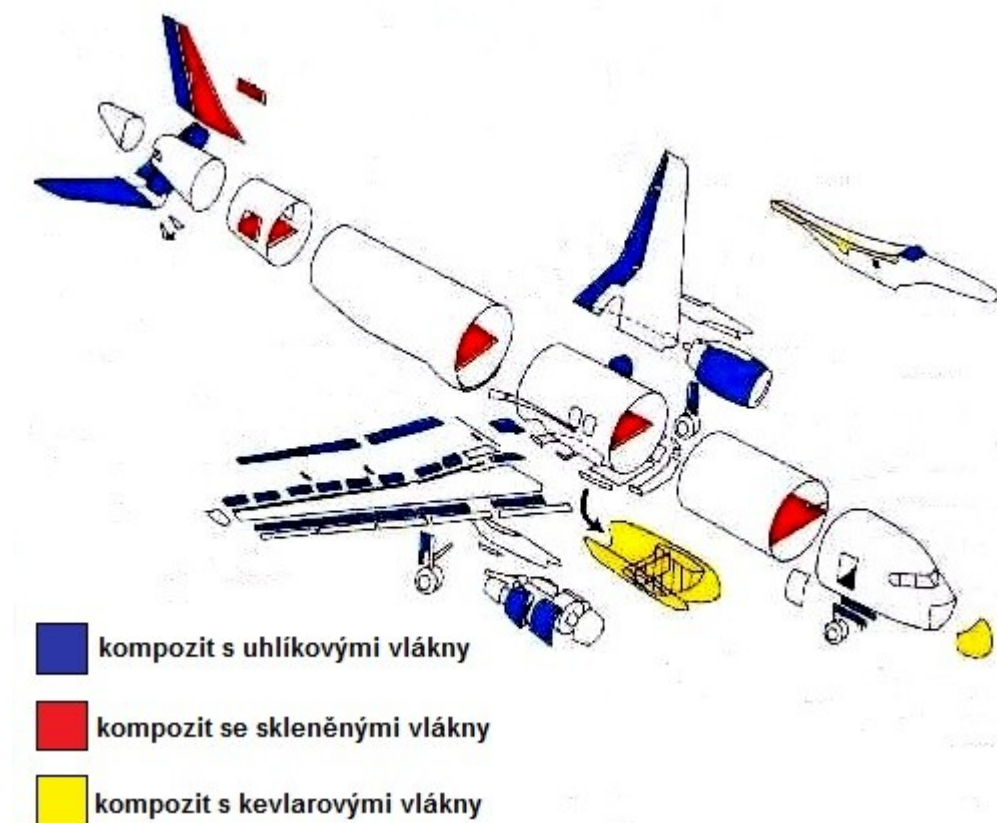
Tab. 7.7 Srovnání meze pevnosti R_m , specifické pevnosti R_m/ρ u vybraných nekompozitních a kompozitních materiálů.



Z tabulky 7.7 je zřejmé, že pokud jde o absolutní hodnoty meze pevnosti, jsou z uvedených materiálů nejlepší vysokopevné oceli a nikoli kompozity. Výhody kompozitních materiálů se naplno projeví tehdy, pokud nás kromě pevnosti (a dalších charakteristik) zajímá i hustota

materiálů. Při srovnání specifické pevnosti (pravá část tab. 7.7) jsou všechny uvedené druhy kompozitních materiálů lepší než klasické kovové materiály. To jen potvrzuje fakt, že kompozity se uplatní zejména v těch odvětvích, kde potřebujeme, aby konstrukce byly také lehké, tj. všude v dopravě (automobilovém, leteckém průmyslu, kosmonautice) apod.

Na obr. 7.7 jsou příklady použití vláknitých kompozitů s polymerní matricí v Boeingu 737.



Obr. 7.7 Příklady použití vláknitých kompozitů s polymerní matricí v Boeingu 737



Shrnutí pojmů 7.3

Po prostudování této části by vám měly být jasné následující pojmy:

- **Vláknité kompozity**
- **Vláknité kompozity s matricí polymerní;**
- **Vláknité kompozity s matricí kovovou;**
- **Vlákna – skleněná, uhlíková, polymerní, kovová, keramická;**
- **Vláknité kompozity uhlík - uhlík**

**Otázky 7.3**

76. Jak mohou být uspořádána vlákna ve vláknitých kompozitech?
77. Která důležitá charakteristika je ovlivněna způsobem uspořádání vláken ve vláknitých kompozitech?
78. Jak dělíme vlákna podle jejich délky?
79. Jakých délek dosahují obvykle dlouhá vlákna ve vláknitých kompozitech?
80. Jakých délek dosahují obvykle krátká vlákna ve vláknitých kompozitech?
81. Jakého druhu bývá nejčastěji matrice ve vláknitých kompozitech?
82. Které druhy vláken se nejčastěji používají ve vláknitých kompozitech s polymerní matricí?
83. Jak lze vysvětlit, že tenká skleněná vlákna mají vysokou pevnost v tahu, zatímco běžné sklo má jen nízkou pevnost v tahu?
84. Jaká je hlavní přednost uhlíkových vláken oproti vláknům skleněným?
85. S čím souvisí vysoká pevnost polymerního vlákna Kevlaru?
86. Které kovy, resp. slitiny se používají nejčastěji ve vláknitých kompozitech s kovovou matricí?
87. Který kov se nejčastěji používá k výrobě kovových vláken do vláknitých kompozitů?
88. Které keramické materiály se používají pro výrobu vláken do kompozitních materiálů?



Další zdroje

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 1. část. ČVUT Praha, 2001. 1. vyd. 207 s. ISBN 80-01-02424-5.

Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu. Kovy a kovové materiály. 2. část. ČVUT Praha, 2002. 1. vyd. 214 s. ISBN 80-01-02568-3.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu I. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2003. 2. opr. a rozš. vydání. 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. 2. opr. a rozš. vydání. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Skočovský P., Bokůvka O., Konečná R., Tillová E.: Náuka o materiáli pre obory strojnícke. Žilinská univerzita v Žilině, 2001. 1. vyd. 381 s. ISBN 80-7100-831-1.

Strnadel B.: Nauka o materiálu. Konstrukční materiály a jejich degradační procesy. VŠB Ostrava, 1993. 1. vyd. 187 s. ISBN 80-7078-207-2.

Strnadel B.: Nauka o materiálu II. Degradaciční procesy a design konstrukčních materiálů. VŠB Ostrava, 2008. 1. vyd. 280 s. ISBN 978-80-248-1842-9.

Macek K., Janovec J., Jurči P., Zuna P.: Kovové materiály. ČVUT Praha, 2006. 1. vyd. 164 s. ISBN 80-01-03573-1.

Janovec J., Cejp J., Steidl J.: Perspektivní materiály. ČVUT Praha, 2008. 1. vyd. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.

Veles P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov. ALFA Bratislava, 1989. 2. vyd. 408 s.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering. An Integrated approach. Hoboken: Wiley, 2008. 3rd ed. 882 p. ISBN 978-0-470-12537-3.

Callister W.D. jr., Rethwisch D. G.: Materials science and engineering : an introduction New York: Wiley, 2007. 7th ed. 721 p., ISBN 978-0-471-73696-7.

**Klíč k řešení**

- O 7.1. Kompozity jsou materiály, které vznikly složením ze dvou nebo více chemicky a fyzikálně odlišných složek.
- O 7.2. Matrice má funkci pojiva.
- O 7.3. Výztuž má funkci zpevňujícího plniva.
- O 7.4. Vlastnosti kompozitů ovlivňují objemový podíl složek, uspořádání výztuže, stupeň kontinuity výztuže, upořádání fází vzhledem k působícímu napětí, fázové rozhraní mezi maticí a zpevňující fází.
- O 7.5. Na kompozity s polymerní maticí, kovovou maticí, keramickou maticí, uhlíkovou maticí.
- O 7.6. Částicové kompozity, vláknité kompozity, lamelární kompozity, popř. hybridní.
- O 7.7. Větší modul pružnosti v tahu, vyšší tuhost, zvýšení tvarové stálosti za, tepelné vodivosti, zmenšení smrštění při chlazení z teplot zpracování a teplotní roztažnosti. Nižší houževnatost kompozitu ve srovnání s maticí.
- O 7.8. 10x.
- O 7.9. Technologii práškové metalurgie.
- O 7.10. Vlákná mohou být ve vláknitých kompozitech uspořádána jako jednosměrná (rovnoběžná); dále mohou vlákna vytvářet různé druhy dvourozměrného rovinného uspořádání a konečně mohou být vlákna uspořádána jako trojrozměrné síť.
- O 7.11. Způsoben uspořádání vláken je ovlivněna zejména anizotropie vlastností vláknitého kompozitu.
- O 7.12. Vlákná se podle své délky dělí na vlákna dlouhá a vlákna krátká.
- O 7.13. Dlouhá vlákna jsou delší než patnáctinásobek tzv. kritické délky, obvykle se jedná o délku v desítkách mm.
- O 7.14. Krátká vlákna mají délku v intervalu kritická délka vlákna až její patnáctinásobek, obvykle se jedná o délku v jednotkách mm.
- O 7.15. Matrice ve vláknitých kompozitech bývá nejčastěji na bázi polymerů.
- O 7.16. Ve vláknitých kompozitech s polymerní maticí se nejčastěji používají vlákna skleněná, uhlíková, aramidová.
- O 7.17. Vysokou pevnost v tahu tenkých skleněných vláken lze vysvětlit jednak tím, že mohou obsahovat jen velmi malé defekty, jednak tím, že mají mimořádně hladký povrch, a nedochází zde tedy ke koncentraci napětí.
- O 7.18. Uhlíková vlákna mají oproti skleněným vláknům vyšší modul pružnosti, tj. vyšší tuhost a dále mají nižší hustotu.
- O 7.19. Vysoká pevnost Kevlaru souvisí mj. s vysokou hustotou vodíkových můstků v jeho struktuře.
- O 7.20. Jako matrice se nejčastěji používají hliník a hořčík a jejich slitiny, dále titan, event nikl a jejich slitiny.

- O 7.21. Pro výrobu kovových vláken se nejčastěji používá bór.
- O 7.22. Z keramických materiálů se pro výrobu vláken používají nejčastěji karbid křemíku, nitrid křemíku a oxid hliníku.

