



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



ZÁKLADY PROGRESIVNÍCH KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Jaroslav Sojka, Petra Váňová

Ostrava 2012

Recenze: Prof. Ing. Ludmila Hyspecká, DrSc.
Ing. Kateřina Kostolányová, Ph.D.

Název: Základy progresivních konstrukčních materiálů
Autor: Jaroslav Sojka, Petra Váňová
Vydání: první, 2010
Počet stran: 194
Náklad: 20

Studijní materiály pro studijní předmět 636-0416, Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzděláváním pro konkurenceschopnost

Název: Personalizace výuky prostřednictvím e-learningu

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0339

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Jaroslav Sojka, Petra Váňová

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-2578-6

OBSAH

- 1. Úvod – materiály jako průvodci člověka v civilizačním vývoji**
- 2. Vnitřní stavba pevných látek**
 - 2.1. Úvod – Je vnitřní stavba důležitá?
 - 2.2. Vazby mezi atomy
 - 2.3. Krystalický stav pevných látek
 - 2.4. Poruchy krystalové stavby
 - 2.5. Difúze v pevných látkách
- 3. Základní vlastnosti konstrukčních materiálů**
 - 3.1. Užité vlastnosti
 - 3.2. Mechanické vlastnosti
 - 3.3. Technologické vlastnosti
 - 3.4. Chemické vlastnosti
- 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

Předmluva

Studijní opora k předmětu ***Základy progresivních konstrukčních materiálů*** 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 ***Základy progresivních konstrukčních materiálů*** 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 jsme se snažili o co největší srozumitelnost textu. Té není možné dosáhnout, alespoň podle našeho názoru, bez určitých zjednodušení, omezení a někdy i nepřesností. Pokud by někomu připadalo, že zjednodušení je příliš mnoho, předem se omlouváme. Ale naše pedagogické zkušenosti z výuky tohoto předmětu nás přivedly k výsledku, kterým je právě tento text.

I přes pečlivou kontrolu textu je téměř jisté, že jsme se v něm nevyhnuli chybám, překlepům apod., možná i chybám věcným. Budeme vám vděční, když nás na ně upozorníte, abychom je mohli opravit. Buď přímo, nebo mailem na adresu: jaroslav.sojka@vsb.cz , petra.vanova@vsb.cz .

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

Autoři

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. Pokud jsou k ní **multimédia – animace, videa** – podívejte se na ně (Seznam multimédií je vždy na konci podkapitol).
- 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 se podívejte na animace a videa a řekněte si, zda jim rozumíte. Znovu vyřešte řešené příklady, ale nejlépe tak, že se podíváte jen na zadání a příklad zkusíte vyřešit sami. Jen pokud vám to nepůjde, podívejte se na postup do studijní opory. Znovu si přečtete 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.

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.

1. ÚVOD – MATERIÁLY JAKO PRŮVODCI ČLOVĚKA V CIVILIZAČNÍM VÝVOJI



Čas ke studiu: 0,5 hodiny



Cíl Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

- kategorizovat, které materiály, resp. skupiny materiálů se používaly v různých historických obdobích;
- dostat chuť pustit se do podrobného studia všech dalších kapitol.



Výklad

□ Nejvýznamnější etapy v používání různých materiálů v civilizačním vývoji lidské společnosti

Tato úvodní kapitola nemá být opakování pasáží dějepisu. Chci vám v ní jen přiblížit, jak úzký je vztah mezi materiály, které používáme, které umíme vyrobit, a rozvojem naší civilizace. Materiály, které používáme k různým účelům, totiž vyjadřují do značné míry úroveň rozvoje naší civilizace. Bylo tomu tak po celou dobu vývoje lidské společnosti. Význam materiálů byl tak velký, že podle nejdůležitějších používaných materiálů byly pojmenovány důležité historické éry. Jistě si vzpomenete, že jste se učili o době kamenné, době bronzové, železné apod.

Jak to tedy bylo s využíváním různých druhů materiálu ve vývoji naší civilizace?

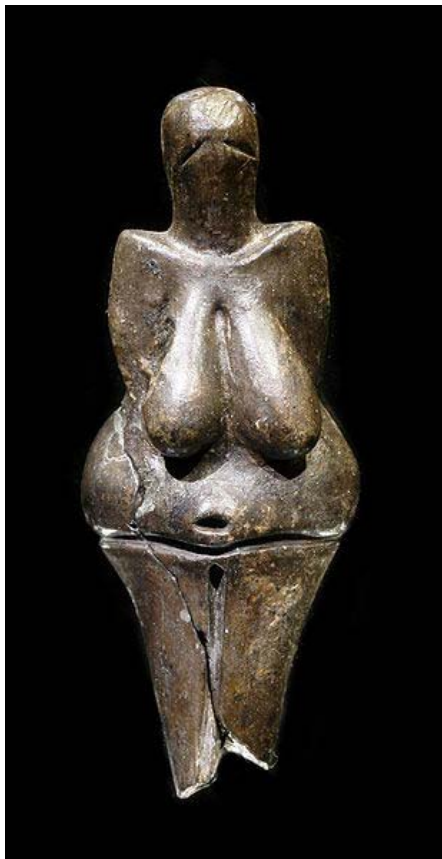
Velmi zjednodušeně můžeme napsat, že v době kamenné naši předkové používali (opracovávali, zpracovávali) především přírodní materiály – **kámen, dřevo, kosti** a další části zabitých zvířat, např. **kožešiny, kůže**. To ale nebylo všechno. Jakmile se naučili ovládnout a

využívat oheň, začala se rozvíjet i **keramická výroba**, což byly nejprve **předměty z pálené hlíny**.



Naši předkové využívali materiály samozřejmě především pro uspokojení základních potřeb – pro stavbu obydlí a pro zajištění obživy. Stavěli tedy různé příbytky, vyráběli zbraně k lovu zvířat, nádoby pro skladování zásob apod. Už v době kamenné si

ale naši předkové vyráběli i předměty umělecké. Jednou z unikátních ukázek keramiky nalezené na našem území a datované nejčastěji cca 28 tisíc let př. n. l. je Věstonická Venuše.



Na konci doby kamenné se naši předkové naučili vyrábět **první kovy** a výrobky z nich. Nejprve to byly kovy s nižší teplotou tavení, protože naši předkové neuměli dosáhnout vyšší teploty potřebné pro výrobu kovů s vyšší teplotou tavení. Proto **doba bronzová** předchází **dobu železnou**. Velmi přibližně můžeme napsat, že člověk se naučil vyrábět železo cca 1000 let př. n. l., i když v různých oblastech Evropy a Orientu to mohlo být dříve, ale i později. Výrobky z kovů byly rovněž zaměřeny především na uspokojení základních potřeb, zahrnovaly i předměty umělecké, ale zejména asi zbraně. Použití železných zbraní dávalo velkou převahu národům, které je začali vyrábět dříve. Takto se například vysvětluje dobytí Egypta Asyřany v 7. století př. n. l. Asyřané používali v té době zbraně železné a Egyptané stále ještě zbraně bronzové, které bohužel vůči železným zbraním nemohly obstát.

Do přibližně stejného období, v němž naši předkové začali vyrábět první kovy, spadá i počátek výroby **skla**, dalšího velmi důležitého keramického materiálu. Počátek výroby skla je datován v různých oblastech světa různě, ale velmi přibližně spadá počátek jeho výroby mezi roky 3000 až 1800 př. n. l.

Zvláštní postavení mezi materiály používanými našimi předky zastával **kámen**. Velmi dlouho byl považován mj. za **symbol stálosti, trvalosti, odolnosti**. Proto se často používal na stavbu náboženských objektů, nebo předmětů, které s náboženstvím souvisely. V židovsko-



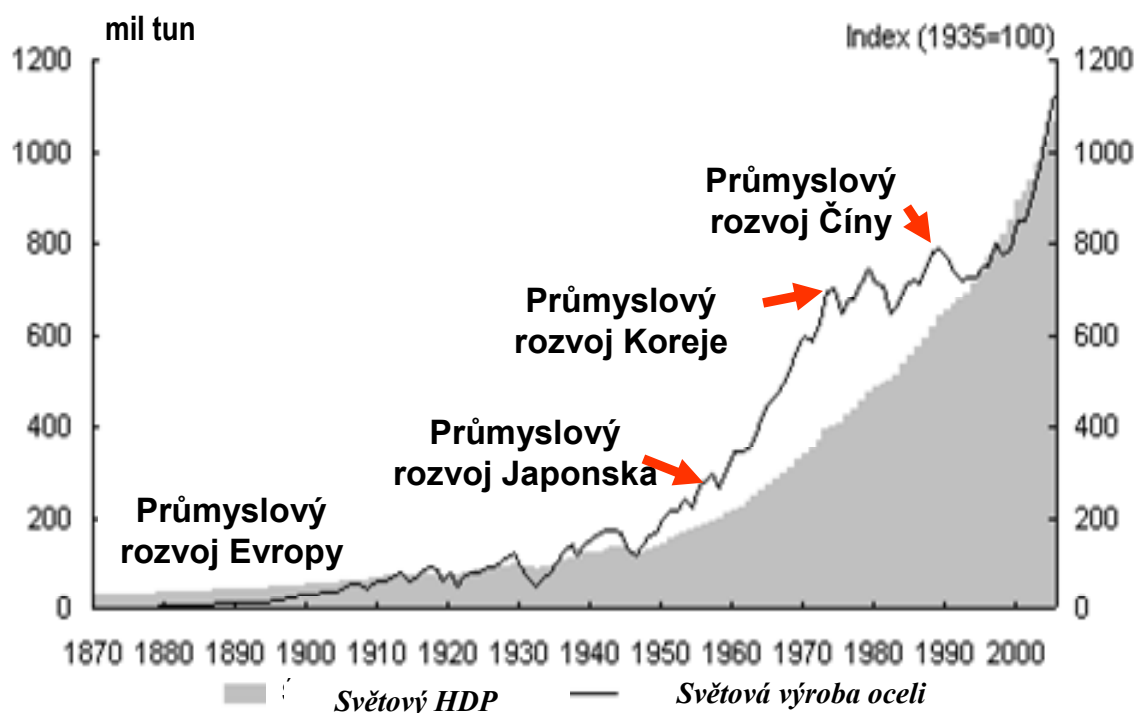
křesťanské tradici (Starý zákon) se uvádí, že Bůh dal Mojžíšovi Desatero přikázání na hoře Sinaj na kamenných deskách. V Novém zákoně používá Ježíš zvláštní příklad, když apoštola Petra přirovnává ke kameni, skále: „Ty jsi, Petr – Skála - a na té skále zbuduji svou církev a ani pekelné mocnosti ji nepřemohou.“ (Mt 16,18-19)

Bohužel, dnes už víme, že ani kámen není tak trvalý, jak by se mohlo zdát a že může být různými procesy, často souvisejícími s lidskou činností, poškozen nebo zničen.

Celé dlouhé období od počátku našeho letopočtu až do poloviny 18. století lze označit jako agrární - zemědělskou společnost, ve které hrála velmi důležitou roli také řemesla. Pokud jde o používané materiály, velké pokroky zaznamenány nebyly. Ve 14. století se v Evropě začala vyrábět litina, a to především na zbraně. Nejprve to byly dělové koule. (V Číně se litina začala vyrábět cca o tisíc let dříve.)



Rozvoj nových materiálů souvisí až s průmyslovou revolucí, která začala ve 2. polovině 18. století. Prvním důležitým mezníkem v průmyslové revoluci je vynález parního stroje, který je připisován Jamesi Wattovi a datován rokem 1765. Parní stroj znamenal významný zdroj energie, nutné pro celou řadu nových druhů výroby. Dalším důležitým mezníkem v průmyslové revoluci je zkonstruování parní lokomotivy a rozvoj železniční dopravy. Ten umožňoval dopravu velkého množství materiálu, mj. surovin na velké vzdálenosti a s tím souvisel rozvoj těžby uhlí a rud a ve 2. polovině 19. století pak rozvoj metalurgie oceli. Dalším velmi důležitým mezníkem v rozvoji nových materiálů bylo využití elektrické energie, které teprve v plné míře umožnilo energeticky náročnou výrobu. Materiálem, který se dostal do popředí ve druhé polovině 19. století, byla jednoznačně ocel. Rozvoj výroby oceli pokračoval i ve století 20. a ocel dostala právem přídomek „královna materiálů“. Přestože 20. století přineslo celou řadu nových druhů materiálů, přídomek „královna materiálů“ asi oceli právem patří až do současnosti. O významu výroby oceli svědčí mj. i to, jak souvisí množství vyrobené oceli ve světovém měřítku se světovým hrubým domácím produktem (HDP).

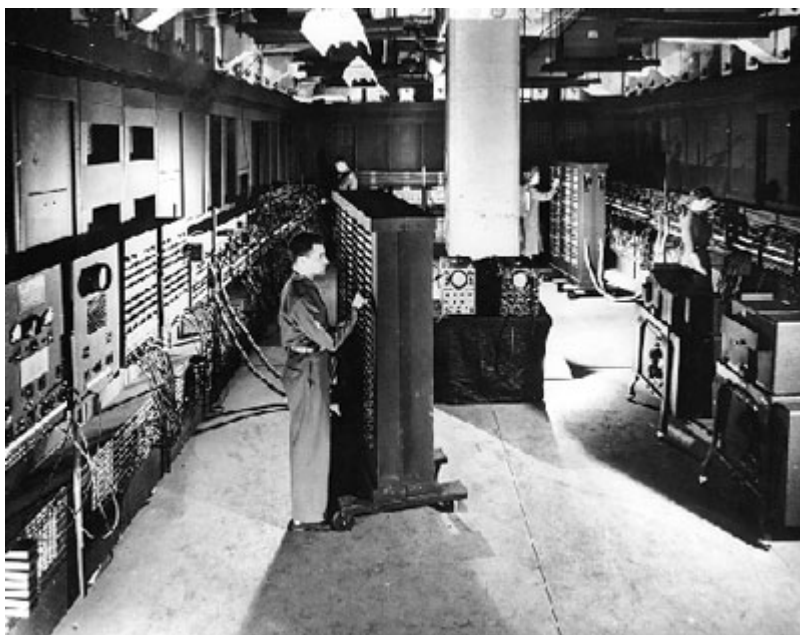


Z obrázku je dobře vidět, že rozvoj světové společnosti charakterizovaný světovým HDP souvisí úzce se světovou výrobou oceli. V té se však objevují určité odchylky, kdy výroba oceli převyšuje růst světového HDP. Tyto odchylky se dají přiřadit průmyslovému rozvoji některých zemí, ke kterému došlo ve 20. století a kdy se spotřeba oceli výrazně zvýšila. Je to např. průmyslový rozvoj Japonska, Koreje a Číny. Graf ale názorně ukazuje, jak úzce je spojen růst výroby oceli a růst celosvětového HDP.

20. století znamená bouřlivý rozvoj mnoha průmyslových odvětví, což přináší i výrobu a využití celé řady nových materiálů. Ve 20. století se rozvíjí výroba plastických hmot, zejména polymerů. Prvním polymerem uměle připraveným člověkem byl bakelit (1907). V následujících desetiletích se objevují stovky nových produktů organické chemie – polymerů, které nás dnes obklopují na každém kroku.

Ve 20. století dochází také k prudkému rozvoji elektrotechnického průmyslu a k rozvoji telekomunikací. S tím souvisí i výroba a použití nových materiálů, např. polovodičů, optických vláken, supravodičů apod.

V roce 1944 byl v USA postaven první počítač - ještě elektronkový. Z doby jeho vzniku určitě odvodíte, že měl primárně sloužit vojenským účelům. Jen pro zajímavost: Obsahoval asi 18000 elektronek, 70000 odporů, 10000 kondenzátorů, 1500 relé a další součástky. Mohl provést 5000 aritmetických operací za sekundu. Zabíral plochu 168 m², měl hmotnost asi 30 tun a příkon 150 kW. Údajně vždy několik hodin pracoval, pak se musel chladit. Každý den bylo třeba vyměnit několik set součástí.



Pokud jde o nové materiály ve výpočetní technice, řadu nových součástek by nebylo možné vyrobit bez zvládnutí výroby monokrystalického křemíku.

V řadě průmyslových odvětví se cca od poloviny 20. století začínají používat tzv. složené (kompozitní) materiály, které se skládají alespoň ze dvou různých složek, z nichž každá má různé vlastnosti. Typické jsou kombinace polymery –

keramika, polymery – kovy, kovy – keramika apod. Složené materiály mají řadu cenných vlastností, které bychom u jednodušších materiálů nemohli získat, a většinou jsou navíc lehké! Používají se např. v dopravě, ale i v medicíně.

Snad je z provedeného výčtu alespoň trochu zřejmé, jak silně je rozvoj naší civilizace spjat s vývojem, výrobou a využitím nových materiálů. A proč jsem to do úvodní kapitoly psal? Abyste dostali chuť pustit se do studia kapitol dalších....

Pozn.1: V úvodní kapitole nejsou obrázky číslovány, protože mají ilustrační charakter a jistě je správně identifikujete.

Pozn. 2: Úvodní kapitolu jsem napsal původně mnohem delší. Ale moji první „oponenti“-studenti z rodiny - mě přesvědčili, že když se to nebude zkoušet, mám text maximálně zkrátit. Tak jsem je poslechl. Byl bych ale rád, kdybyste si z této kapitoly odnesli alespoň to, že materiály jsou pro náš život velmi důležité a že stojí za to se jim věnovat.

2. VNITŘNÍ STAVBA PEVNÝCH LÁTEK

2.1. Úvod – Je vnitřní stavba důležitá?



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní rozdělení konstrukčních materiálů;
- popsat základní skupiny vlastností pevných látek;
- vysvětlit, na čem vlastnosti pevných látek přednostně závisejí;
- klasifikovat, co se rozumí pod pojmem struktura pevných látek.



Výklad

□ Dělení konstrukčních materiálů.

Konstrukční materiály, jimiž se budeme v tomto předmětu věnovat, se obvykle dělí na čtyři hlavní skupiny. Jsou to:

- Kovové materiály;
- Polymerní materiály (polymery);
- Keramické materiály;
- Složené materiály (kompozitní materiály - kompozity).

Kovové materiály snad není třeba podrobněji představovat. Setkáváme se s nimi denně, na každém kroku – v dopravě (automobily, železnice, letadla, mostní konstrukce aj.), ale i v domácnosti – např. rozvody ústředního topení, a mnohde jinde. Kovové materiály se mohou významně lišit svými vlastnostmi, což ovlivňuje oblast jejich využití.

Také polymery nás dnes doprovázejí na každém kroku. V domácnostech se s nimi setkáváme v řadě spotřebičů, v obalech, v částech elektroinstalace, rozvodů vody apod. Také automobily obsahují velké množství různých polymerních materiálů, a to zejména v interiéru, ale nejen tam. Polymery, jimž se budeme věnovat, jsou materiály vyrobené většinou uměle. Jejich průmyslová výroba začala na počátku 20. století. Polymery existují ale i v přírodě. Určitě znáte kaučuk nebo celulózu, což jsou příklady přírodních polymerů.

Keramické materiály jsou jedněmi z nejstarších materiálů vůbec. Postupem doby se vžilo jejich dělení na tradiční, neboli porézní keramiku, používanou často např. pro sanitární účely, a na keramiku konstrukční. V tomto předmětu budeme věnovat pozornost především

keramice konstrukční, založené na některých oxidických látkách, např. Al_2O_3 , ZrO_2 , karbidických látkách, např. SiC aj. Velký rozvoj výroby konstrukční keramiky nastal ve 20. století.

Složené, neboli kompozitní materiály je termín, který zní poměrně vznešeně. Jedná se o takové materiály, které se skládají z více **složek**, z nichž každá má dát kompozitnímu materiálu určitou specifickou vlastnost. Nejobvyklejší kompozity jsou tzv. částicové nebo vláknité kompozity, které obsahují částice, nebo vlákna, která mají většinou dodat materiálu zvýšenou pevnost. Také rozvoj kompozitních materiálů je datován zejména 20. stoletím. Kompozitní materiály, kterým budeme věnovat pozornost, jsou dílem člověka. Ten se však i zde nechal inspirovat matkou přírodou. Uveďme alespoň dva příklady. **Dřevo** je přírodním kompozitním materiálem, který se skládá z **ligninu**, který tvoří výplň dřeva, a z částečně krystalických vláken **celulózy**, která dává dřevu vyšší pevnost i houževnatost. Můžeme tedy říci, že dřevo je přírodním vláknitým kompozitním materiálem. Kompozitní materiály máme také v sobě. Jedním z příkladů mohou být naše **kosti**. Základní složkou kostí je zjednodušeně **hydroxyfosforečnan vápenatý**, který je jako minerál znám pod názvem hydroxyapatit. Kdyby však byly kosti tvořeny jen touto látkou, byly by křehké, a asi bychom měli často zlomeniny. V kostech se navíc vyskytují vlákna bílkoviny zvané **kolagen**, která dává kostem zvýšenou houževnatost, a tak nás chrání před zlomeninami. I na kost tedy můžeme nahlížet jako na přírodní vláknitý kompozit.

□ Vlastnosti pevných látek.

Uvažujeme-li o použití určitého materiálu např. v konstrukci, v nějakém výrobku, nebo jeho části, asi nás budou zajímat především jeho **vlastnosti**. O jeho vnitřní stavbu se možná tolik zajímat nebudeme. To snad mohou potvrdit ti z vás, kteří se s různými materiály setkáváte ve své profesi.

Mluvíme-li o vlastnostech pevných látek, pak souhrnně užíváme pojem **užitné vlastnosti**. Užitné vlastnosti představují soubor různých vlastností, které by měl materiál mít, aby mohl během svého používání dobře sloužit svému účelu. Užitné vlastnosti se nejčastěji dělí na tyto skupiny (nejedná se samozřejmě o jediné možné dělení):

- Fyzikální vlastnosti;
- mechanické vlastnosti;
- chemické vlastnosti;
- odolnost vůči degradaci během provozu.

Mezi **fyzikální vlastnosti** pevných látek mohou patřit, resp. být více či méně důležité, vlastnosti optické, elektrické, magnetické apod. Na tomto místě chci zdůraznit, že mimořádně důležitou fyzikální vlastností pevných látek je také jejich **hustota**, tj. hmotnost objemové

jednotky, označovaná nejčastěji písmenem ρ a vyjadřovaná v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. U řady konstrukcí, resp. jejich částí nám velmi záleží na tom, aby byly co možná nejlehčí, a z toho vyplývá velký význam hustoty jako fyzikální vlastnosti pevných látek.

Mechanické vlastnosti patří striktně vzato mezi vlastnosti fyzikální, protože mechanika tvoří jeden ze základních oddílů fyziky. Pro svůj prvořadý význam však bývají mechanické vlastnosti pevných látek vyčleňovány zvlášť. Mechanickým vlastnostem pevných látek bude věnována kapitola 3, proto se zde omezím jen na úvodní informaci. Mezi nejdůležitější mechanické vlastnosti pevných látek patří jejich **pevnost** a **houževnatost**.

Pevnost materiálů odpovídá z hlediska fyziky napětí a představuje zjednodušeně maximální napětí, které může materiál přenášet, aniž by v něm vznikaly defekty, nebo aniž by se porušil (zlomil, roztrhl apod.). Pevnost materiálů bývá nejčastěji vyjadřována v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tj. v MPa, vzhledem k tomu, že napětí je ve fyzice definováno jako podíl síly a plochy, na níž síla působí.

Houževnatost materiálů odpovídá z hlediska fyziky práci (energii) a velmi zjednodušeně představuje práci (energii), kterou je třeba vynaložit na porušení materiálu – na jeho rozlomení, přeražení, roztržení apod. Houževnatost se vyjadřuje nejčastěji v J nebo v $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ apod. (bude podrobněji vysvětleno v kap. 3). Pro většinu konstrukčních aplikací by bylo žádoucí, aby materiály byly zároveň pevné i houževnaté. Ale bohužel, až na určité výjimky, stojí pevnost a houževnatost materiálů v určitém protikladu. Ty materiály, které mají vysokou pevnost, většinou nebývají houževnaté, a naopak, materiály, které mají vysokou houževnatost, nebývají většinou pevné.

***Poznámka:** Jen pro připomenutí – protikladem houževnatosti je křehkost. Křehký materiál je tedy takový, který má nízkou houževnatost.*

Chemické vlastnosti tvoří další důležitou skupinu vlastností pevných látek. Můžeme mezi ně zahrnout např. vlastní chemické složení materiálů, jejich event. toxicitu, pro použití v medicíně např. biokompatibilitu apod.

Jako čtvrtá skupina užitných vlastností bývá někdy vyčleněna zvlášť jejich **odolnost vůči degradaci** různého druhu **během provozu**. Co to znamená? Určitě jste slyšeli, četli, viděli filmy o různých haváriích konstrukcí, mostů, lodí, letadel aj. během jejich provozu. V tuto chvíli uvedeme jen několik příkladů. Řada materiálů, zejména kovových se může porušit např. únavou. **Únava** materiálu je druh degradace, ke kterému dochází, pokud je materiál vystaven působení napětí, která jsou v čase proměnlivá, tzn. že se s časem zvyšují a snižují. To může vést po jisté době až k porušení materiálu, i když jsou působící napětí docela nízká. Jiný druh degradace představuje např. **koroze**, která znamená zjednodušeně degradaci materiálu vyvolanou chemickým, nebo elektrochemickým působením okolního prostředí. To jistě znáte i z vašeho nejbližšího okolí, ale v řadě průmyslových aplikací je koroze mimořádně

závažným problémem. Další druh degradace během provozu představuje např. **opotřebení** otěrem, ke kterému dochází při funkčním tření stýkajících se ploch. A abychom uvedli nějaký netypický příklad, můžeme se podívat na náhradu kyčelního kloubu. Provádí-li se náhrada kyčelního kloubu, pak je hlavička kloubu většinou z kovu (ze slitiny titanu) a kloubní jamka bývá velmi často z polymeru, a to z polyetylénu (zkratka PE) s velmi vysokou hustotou. Polyetylén se používá mj. proto, že má dobré třecí vlastnosti, ale při dlouhodobém kontaktu s hlavičkou dochází k jeho otěru, tj. k postupnému uvolňování drobných částic PE. Ty se pak mohou krevním oběhem dostat i do relativně vzdálených částí těla a mohou vyvolat některé nemoci. Vzhledem k původu se jim říká PE nemoc (tedy polyetylenová nemoc).

Kromě užitných vlastností bývají někdy definovány také **technologické vlastnosti** materiálů. Ty se nevztahují k období použití materiálů, ale k procesu jejich výroby. U kovových materiálů je např. důležitá jejich **svařitelnost**, tj. schopnost spojení různých dílů svařováním, nebo tzv. **tvařitelnost**, tj. schopnost přijmout změnu tvaru procesem tváření.

□ Na čem závisí vlastnosti pevných látek? – Význam vnitřní stavby.

Položme si otázku, na čem přednostně závisí vlastnosti pevných látek. Zjednodušeně můžeme říci, že vlastnosti závisí na:

- Druhu materiálu;
- chemickém složení;
- **vnitřní stavbě**.

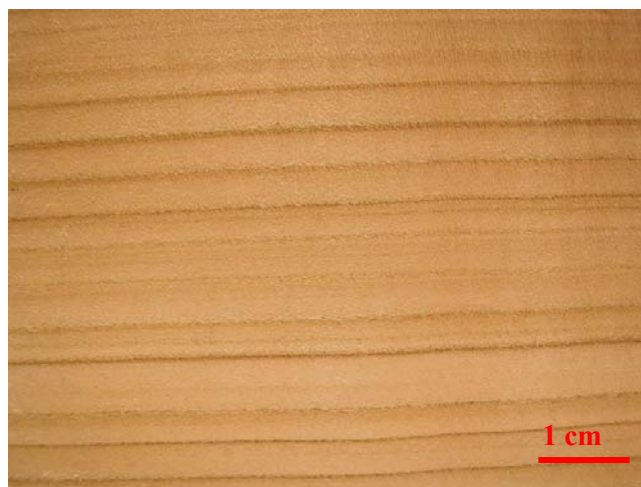
Druhem materiálu rozumíme to, zda se jedná o kov, polymer, keramiku nebo kompozit. Význam chemického složení je snad zřejmý. Pro nás je ale nejdůležitější to, že vlastnosti materiálů závisejí velmi silně na jejich vnitřní stavbě neboli struktuře. Studium vnitřní stavby pevných látek je tedy mimořádně důležité proto, že změnou vnitřní stavby lze velmi silně ovlivnit (změnit) užitné vlastnosti. A proto se vnitřní stavbě pevných látek věnujeme dříve než jejich vlastnostem.

Vnitřní stavbou, resp. strukturou pevných látek můžeme mít na mysli často rozdílné charakteristiky, a to v závislosti na měřítku. Někdy se vnitřní stavba, resp. struktura podle měřítka rozlišuje následovně:

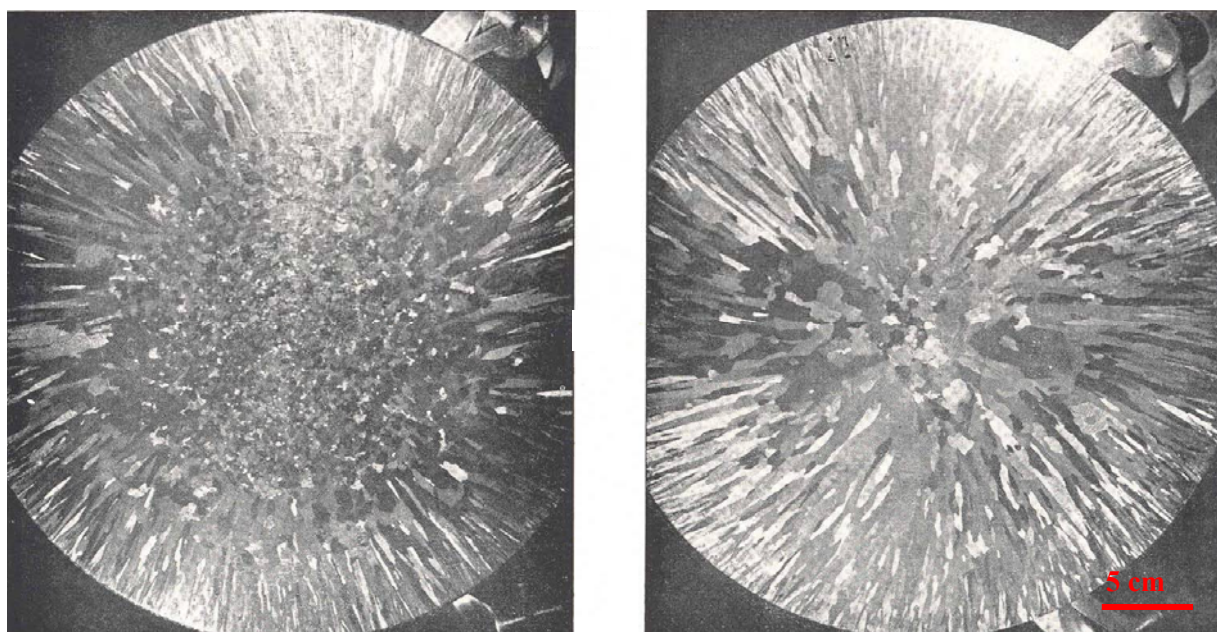
- Makrostruktura;
- mikrostruktura;
- submikrostruktura;
- struktura na atomární úrovni.

Makrostrukturou rozumíme ty části vnitřní stavby, které lze pozorovat pouhým okem, tzn. jejich rozměr je řádově v mm. U dřeva lze např. vidět soubory, resp. uspořádání vláken

celulózy (obr. 2.1). U kovových materiálů lze, většinou po jisté přípravě, rozlišit jednotlivé části svarových spojů, nebo makrostrukturu ingotů (obr. 2.2).



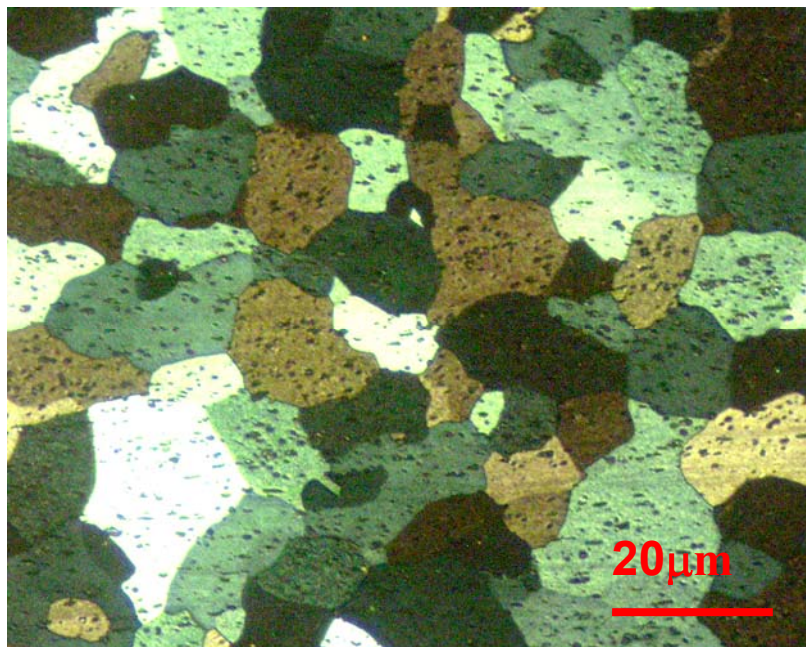
Obr. 2.1 Makrostruktura dřeva



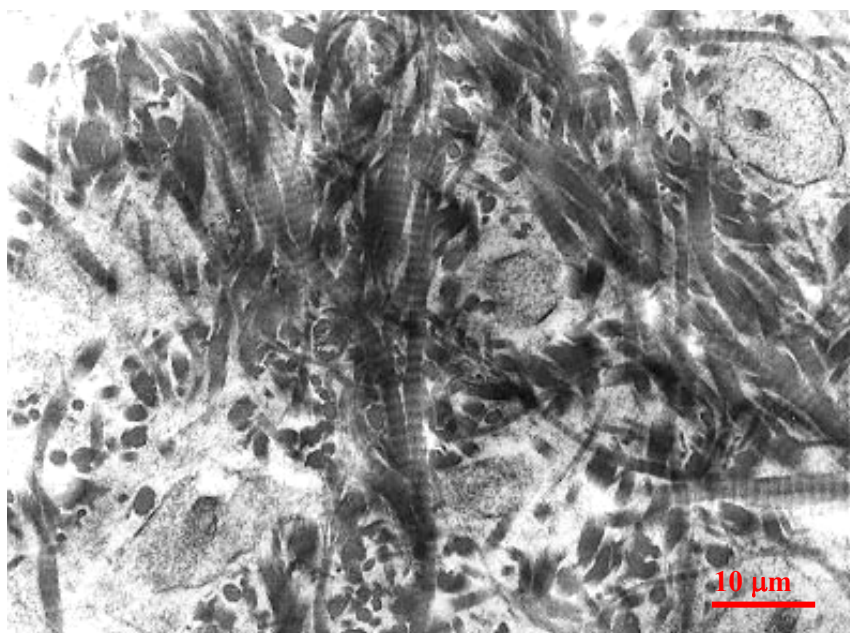
Obr. 2.2 Makrostruktura ingotů z oceli

Mikrostruktura představuje ty části vnitřní stavby, které mají rozměr v desítkách až stovkách μm . Může se jednat např. o jednotlivé krystalky (zrna) v polykrystalickém materiálu. Na obr. 2.3 je jako příklad uvedena mikrostruktura slitiny hliníku používané pro části klimatizace v osobních automobilech. Různě zbarvené polygonální útvary jsou jednotlivé krystalky, které slitinu tvoří. Na obr. 2.4 je pro zpestření uvedena mikrostruktura kosti, kde jsou vidět zejména vlákna bílkoviny – kolagenu. Mikrostruktura materiálů bývá

většinou pozorovatelná běžnými mikroskopy s čočkovými objektivy a okuláry na bázi skla, kdy zdrojem světelného záření je světlo běžné vlnové délky.



Obr. 2.3 Mikrostruktura hliníkové slitiny



Obr. 2.4 Mikrostruktura kosti

Submikrostruktura představuje ty části vnitřní stavby, které mají rozměr v desítkách až stovkách nm, a jsou tedy cca 1000x menší než části mikrostruktury. Může se jednat o různé drobné částice, nebo i poruchy vnitřní stavby, jak bude uvedeno dále. Submikrostruktura již není pozorovatelná běžnými mikroskopy, ale je zapotřebí použít speciálních mikroskopů, nejčastěji tzv. elektronových mikroskopů. Ty využívají jako zdroj záření svazek elektronů o kratší vlnové délce, než má běžné světlo. Tím dochází k podstatnému zvýšení jejich rozlišení a umožňují pozorování částí struktury právě o rozměrech v desítkách, resp. stovkách nm.

Struktura na atomární úrovni představuje zejména způsob uspořádání jednotlivých atomů, nebo iontů, event. molekul v materiálech. K jejímu pozorování jsou zapotřebí zvláštní mikroskopy, event. přístroje.



Shrnutí pojmů 2.1.

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

- **Užitné vlastnosti materiálů - fyzikální vlastnosti, mechanické vlastnosti, pevnost, houževnatost, chemické vlastnosti, odolnost vůči degradaci během provozu;**
- **technologické vlastnosti;**
- **makrostruktura, mikrostruktura, submikrostruktura, struktura na atomární úrovni.**



Otázky 2.1.

1. Co rozumíme pod pojmem užitné vlastnosti materiálů?
2. Které vlastnosti řadíme pod pojem užitné vlastnosti?
3. Jak lze jednoduše definovat pevnost konstrukčních materiálů?
4. Se kterou fyzikální veličinou lze spojit pevnost materiálů?
5. Jak lze jednoduše definovat houževnatost materiálů?
6. Co je protikladem houževnatosti?
7. Jmenujte alespoň jeden druh degradace konstrukčních materiálů během jejich provozu.
8. Na čem zejména závisí vlastnosti pevných látek?
9. Jak lze rozdělit strukturu pevných látek v závislosti na měřítku?
10. Co rozumíme mikrostrukturou pevných látek?
11. Jak velké součásti struktury řadíme pod pojem submikrostruktura?

2.2. Vazby mezi atomy



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat nejdůležitější typy vazeb mezi atomy;
- objasnit základní principy vazeb mezi atomy;
- vyjádřit hlavní rozdíly mezi vazbami mezi atomy a důsledky, které z toho vyplývají.



Výklad

□ Rozdělení vazeb mezi atomy.

Při posuzování vnitřní stavby pevných látek začneme na atomárním, nebo dokonce subatomárním měřítku. A to proto, abychom si vysvětlili, jaké síly (energie) drží materiály pohromadě, co je za tím, že atomy nebo jiné částice chtějí být „spolu“, blízko sebe. Vzhledem k tomu, že tyto partie se vyučují podrobněji v chemii a fyzice, omezíme se na zjednodušený výklad, který nám poslouží k pochopení chování základních skupin konstrukčních materiálů. Říká se a vyplývá to mj. z rozboru modelů atomů, že mezi atomy (nebo i ionty, resp. molekulami) působí vazebné energie. Tyto vazebné energie (nebo zjednodušeně vazby) se dělí na dvě hlavní skupiny, tzv. **silné (chemické) vazby** a **slabé vazby**, jimž se někdy říká také **molekulární** vzhledem k tomu, že se s nimi setkáváme častěji u molekul.

Silné chemické vazby zahrnují vazbu:

- kovalentní;
- iontovou;
- kovovou.

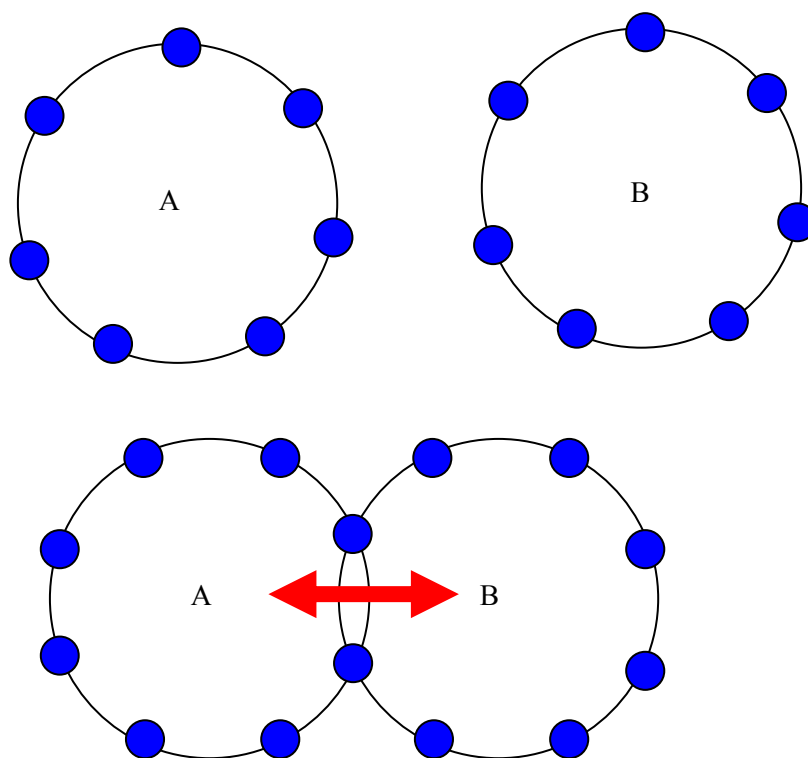
Všechny tři silné vazby vycházejí z elektronové struktury atomů, resp. zjednodušeně ze skutečnosti, že důležité vlastnosti prvků závisejí na tom, kolik elektronů ve slupce s nejvyšší hodnotou kvantového čísla je ve stavu s a p . Celkový počet elektronů ve stavu s a p je 8. Tyto elektrony se nazývají **valenční elektrony**, odpovídající konfigurace v zaplněném stavu se nazývá **elektronový oktet**. Jedná se o konfiguraci stabilní, tzn. že k uvolnění elektronu z existujícího oktetu je třeba dodat atomu nejvyšší energii. Má-li atom méně než polovinu valenčních elektronů, je pro něj výhodnější, aby je předal jinému prvku. Naopak, má-li atom

valenčních elektronů více než polovinu, je výhodnější, aby chybějící elektrony od atomu jiného prvku přijal, nebo aby část elektronů s jiným atomem (atomy) sdílel.

□ Silné chemické vazby

□ Kovalentní vazba

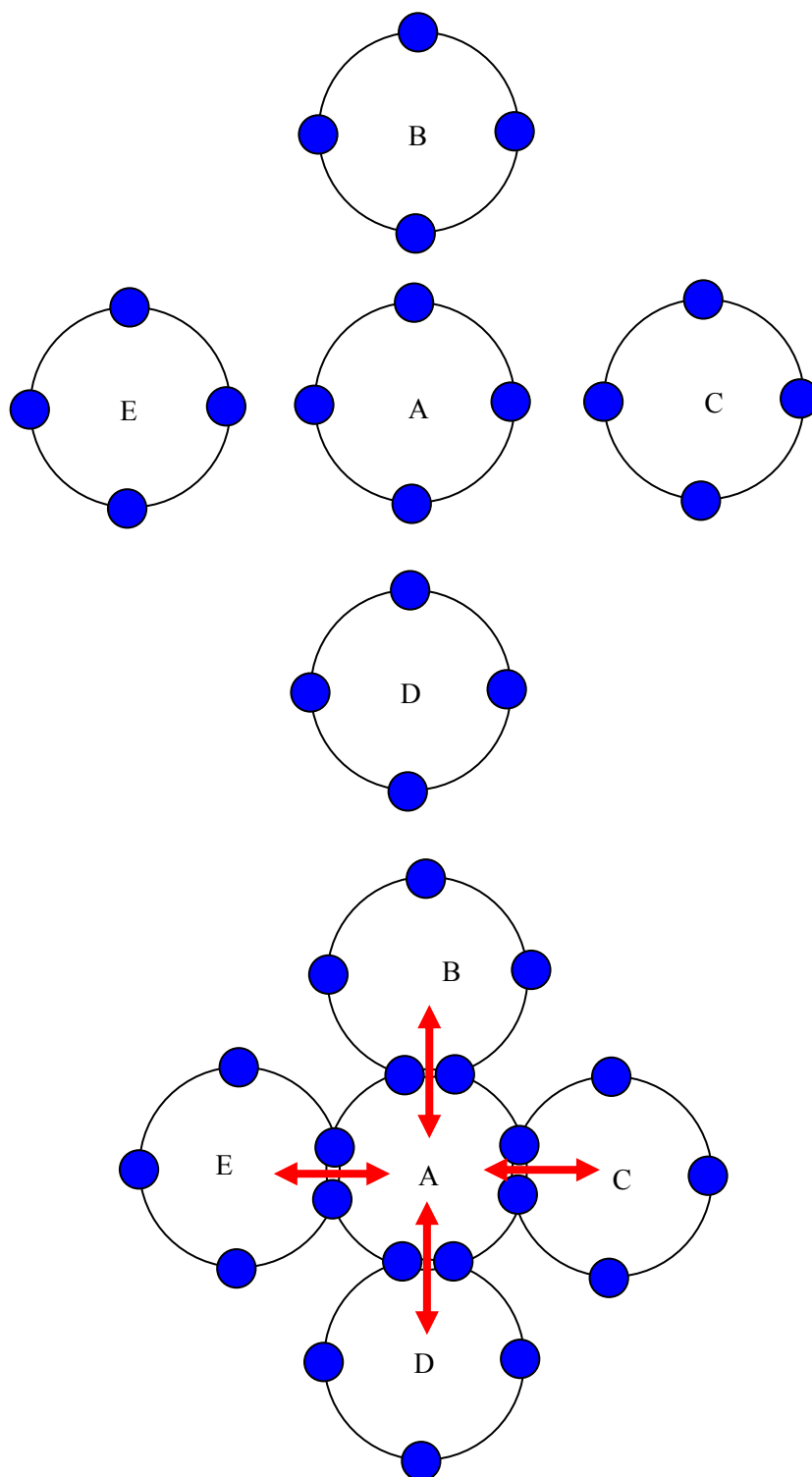
Kovalentní vazba znamená zjednodušeně sdílení valenčních elektronů. Začneme příkladem, který není typický pro pevné látky, ale objevuje se v řadě učebnic. Halogeny (chlór, fluor atd.) tvoří dvouatomové molekuly. Tyto prvky mají v poslední slupce 7 valenčních elektronů. Chlór s atomovým číslem 17 má těchto 7 valenčních elektronů ve slupce M. K vytvoření elektronového oktetu a tím i stabilní elektronové konfigurace mu schází právě 1 elektron. Kovalentní vazba vznikne tak, že dva atomy chlóru budou sdílet 1 valenční elektron. Tím dojde u obou atomů k vytvoření elektronového oktetu, který znamená stabilní konfiguraci. Situace je schematicky zobrazena na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schematické znázornění vzniku kovalentní vazby mezi atomy chlóru

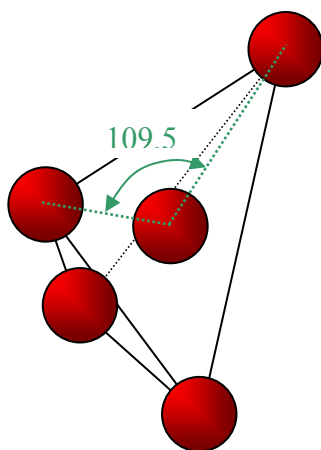
Jiným příkladem, tentokrát už z prostředí pevných látek, je kovalentní vazba mezi jednotlivými atomy uhlíku v případě diamantu (diamant je jednou ze dvou existujících

modifikací uhlíku, druhou modifikací uhlíku je grafit). Uhlík má atomové číslo 6 a obsahuje tedy ve slupce L celkem 4 valenční elektrony. V případě diamantu bude jeden atom uhlíku sdílet své valenční elektrony celkem se 4 sousedními atomy uhlíku. Tím dojde opět k vytvoření elektronového oktetu, tedy stabilní konfigurace, která znamená pevnou vazbu mezi atomy. Situace je schematicky dvourozměrně zobrazena na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Schematické znázornění vzniku kovalentní vazby mezi atomy uhlíku (diamant)

Ve skutečnosti neleží atomy v ploše, ale vytvářejí prostorový útvar, který si můžeme představit jako pravidelný čtyřstěn (tetraedr) s jedním atomem (A) ve středu čtyřstěnu a dalšími 4 atomy (B až E) ve vrcholech čtyřstěnu. Tato prostorová konfigurace atomů uhlíku (diamant) je znázorněna na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Prostorová konfigurace kovalentní vazby mezi atomy uhlíku (diamant)

Z geometrie pravidelného čtyřstěnu lze odvodit, že spojnice středového atomu s libovolnými dvěma atomy ve vrcholech budou svírat úhel asi $109,5^\circ$. To je základní podmínka kovalentní vazby mezi atomy prvků se čtyřmi valenčními elektrony. To souvisí také s tím, že kovalentní vazba má směrový charakter, který je dán rozložením elektronových orbitalů v prostoru.

Kovalentní vazba je typická zejména pro polymery a také pro některé keramické materiály. Jedná se o vazbu většinou velmi pevnou.

Poznámka: „Pevnost“ vazby se posuzuje podle tzv. **vazebné energie**, kterou je třeba vynaložit na rozštěpení vazby a oddálení vázaných atomů na nekonečnou vzdálenost. Vazebná energie se vyjadřuje v $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ nebo v eV .

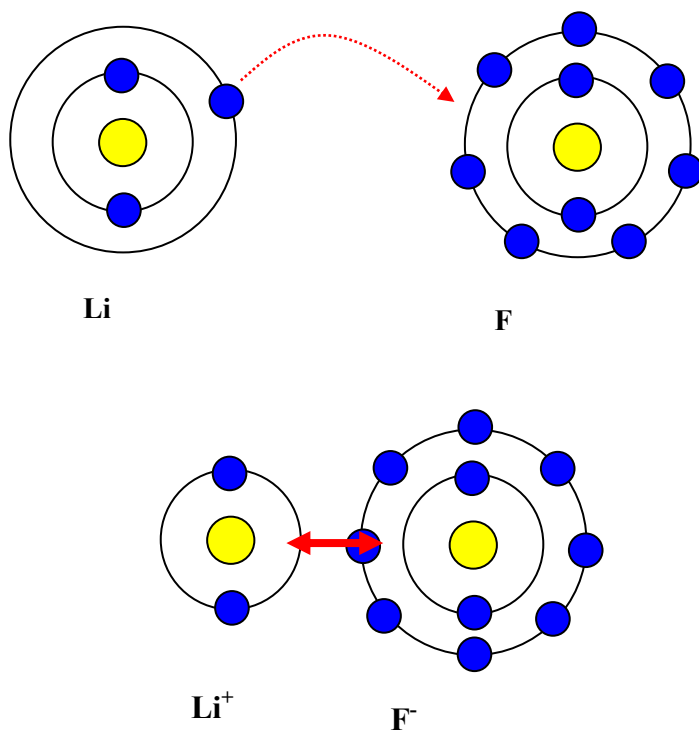
Vazebná energie kovalentní vazby bývá obvykle vysoká. V případě uhlíku (diamantu) je to např. cca $700 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, v případě křemíku cca $450 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

□ Iontová vazba

Iontová vazba znamená zjednodušeně nikoli sdílení valenčních elektronů, ale odevzdání valenčních elektronů atomem jednoho prvku a jejich přijetí atomem (atomy) jiného prvku. Iontová vazba vzniká mezi prvky, z nichž jeden je silně elektropozitivní (má tendenci odevzdat své valenční elektrony) a druhý je silně elektronegativní (má tendenci přijmout valenční elektrony). Dojde tak ke vzniku kladně a záporně nabitých iontů (kationtů a aniontů), přičemž se může vytvořit elektronový oktet, tj. stabilní konfigurace na vnější elektronové

slupce alespoň u jednoho z prvků. Vazebná energie vzniká na základě přitažlivých sil mezi kladně a záporně nabitými částicemi. Podobně jako kovalentní vazba je i iontová vazba velmi silná. Na rozdíl od vazby kovalentní však iontová vazba nemá (!) směrový charakter. V prostoru bývá kladně nabitý iont obklopen záporně nabitými ionty a naopak.

Příklad vzniku iontové vazby je na obr. 2.8 znázorněn na příkladu fluoridu lithia (LiF). Lithium má atomové číslo 3, fluor má atomové číslo 9. Vznik iontové vazby znamená, že lithium odevzdá svůj valenční elektron z podslupky **2s** fluoru a stane se kladně nabitým iontem. Fluor si přijetím valenčního elektronu lithia doplní počet elektronů v podslupce **2p** na 6, čímž dosáhne ve slupce L elektronového oktetu. Zároveň se fluor stane záporně nabitým iontem.



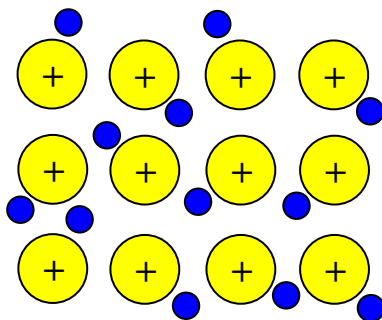
Obr. 2.8 Schematické znázornění vzniku iontové vazby u fluoridu lithia

Vazebná energie iontové vazby činí např. u chloridu sodného (NaCl) cca $640 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, u oxidu hořečnatého je to až $1000 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

□ Kovová vazba

Kovová vazba představuje třetí a poslední typ silné vazby, s níž se máme seznámit. V případě kovů nedochází ani ke sdílení valenčních elektronů, ani k jejich odevzdávání a současnému přijímání. Pokud jde o vazbu mezi atomy v kovech, lze si představit, že kov je tvořen **kladně**

nabitými ionty, okolo nichž je **mrak valenčních elektronů**. Jednotlivé atomy tedy odevzdají své valenční elektrony, ale nikoli proto, aby je jiné atomy přijaly. Valenční elektrony jsou zde takříkajíc ve „společném“ vlastnictví. Kladný náboj každého iontu je kompenzován záporným nábojem elektronu, který je v daném okamžiku v jeho blízkosti. Vzhledem k tomu že valenční elektrony „nepatří“ žádnému konkrétnímu atomu, mohou se v kovových materiálech pohybovat. Z toho vyplývá např. dobrá elektrická a tepelná vodivost většiny kovových materiálů. Vazebná energie kovové vazby vzniká jako výslednice odpuzivých sil mezi kladně nabitými ionty na straně jedné a přitažlivých sil mezi kladně nabitými ionty a záporně nabitými elektrony na straně druhé. Kovová vazba, resp. uspořádání kladně nabitých iontů a elektronů, je znázorněno na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Schematické znázornění konfigurace kladně nabitých iontů a valenčních elektronů v případě kovové vazby

Skutečnost, že v případě kovové vazby jednotlivé atomy ani nesdílejí valenční elektrony, ani si je navzájem nepředali, ovlivňuje silně některé vlastnosti kovových materiálů, jak uvedeme dále.

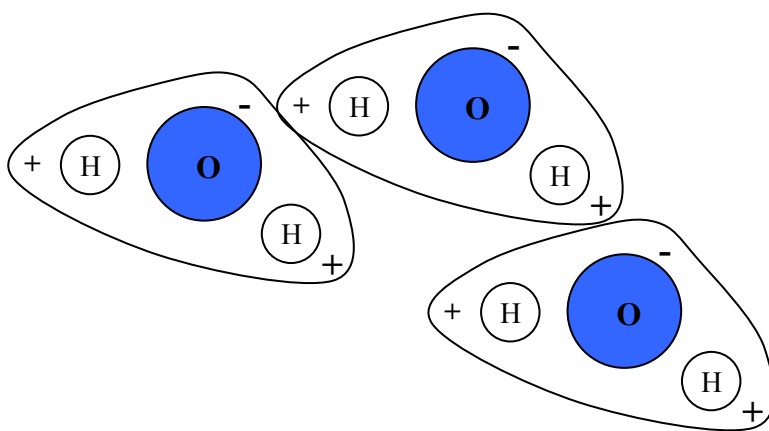
Vazebná energie kovové vazby je rovněž vysoká. V případě hliníku činí cca $320 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, v případě železa pak cca $400 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

□ Slabé (molekulární) vazby

Kromě výše uvedených silných chemických vazeb se u řady materiálů uplatňují i slabší vazby, které většinou působí mezi jednotlivými molekulami pevných látek. Jsou to tzv. van der Waalsovy vazby. Vazba mezi molekulami existuje na základě nerovnoměrně rozloženého elektrického náboje. Rozlišuje se, zda se jedná o molekuly polární, nebo nepolární. Polární molekuly jsou takové, u nichž lze v molekule určit kladněji nabitou část a záporněji nabitou část. V těchto případech dochází k přitažlivému působení mezi kladně nabitou částí molekuly jedné a záporně nabitou částí molekuly druhé. Nepolární molekuly jsou takové, které z dlouhodobého hlediska nevykazují kladněji nebo záporněji nabitou část. V krátkých

časových úsecích však dochází k fluktuaci elektrického náboje, což se projeví tím, že krátkodobě existují kladněji a záporněji nabitě části, což má za následek opět existenci slabé vazby.

Mezi slabé molekulární (polární) vazby se řadí i tzv. vodíkové můstky, které vznikají v pevných látkách, v nichž je vodík vázán kovalentně ke kyslíku, dusíku, resp. halogenům. V případě H_2O v pevném skupenství např. vzniká vazba mezi částí jedné molekuly v blízkosti atomu kyslíku (částečně záporný náboj) a částmi dalších molekul v blízkosti atomů vodíku (částečný kladný náboj). Situace je schematicky znázorněna na obr. 2.10.



Obr. 2.10 Schematické znázornění slabé molekulární vazby (vodíkového můstku) v případě H_2O

Vazebná energie slabých molekulárních vazeb je cca o řád nižší než v případě vazeb silných a dosahuje hodnot v desítkách resp. v jednotkách $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. V případě konstrukčních materiálů se se slabými molekulárními vazbami setkáváme především u polymerů, kde jsou jimi obvykle vázány jednotlivé polymerní řetězce mezi sebou.

**Shrnutí pojmů 2.2.**

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

- **Silná chemická vazba – kovalentní vazba, iontová vazba, kovová vazba; valenční elektrony, elektronový oktet;**
- **energie vazby;**
- **slabá molekulární vazba, polární molekula, nepolární molekula;**
- **vodíkový můstek.**

**Otázky 2.2.**

12. Které vazby řadíme mezi silné chemické vazby mezi atomy?
13. Vysvětlete pojem elektronový oktet.
14. Zkuste vystihnout jednou větou podstatu kovalentní vazby.
15. Zkuste vysvětlit jednou větou podstatu iontové vazby.
16. Jak lze charakterizovat vazebnou energii v případě kovové vazby?
17. Čím lze vysvětlit dobrou elektrickou vodivost většiny kovových materiálů?
18. Jakých hodnot v $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ dosahuje vazebná energie silných chemických vazeb?
19. Na základě čeho vznikají nejčastěji slabé molekulární vazby?
20. Vysvětlete, co znamená pojem polární molekula.
21. V důsledku čeho může vzniknout slabá molekulární vazba u nepolárních molekul?
22. Vysvětlete pojem vodíkový můstek.

**CD-ROM**

- Kovalentní vazba;
- Iontová vazba;
- Kovová vazba.

2.3. Krystalický stav pevných látek



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat základní charakteristiky krystalického a amorfního stavu pevných látek;
- vyjádřit hlavní zákonitosti vztahující se ke krystalickému stavu pevných látek;
- objasnit důležité rozdíly mezi mřížkou kubickou prostorově a plošně centrovanou.

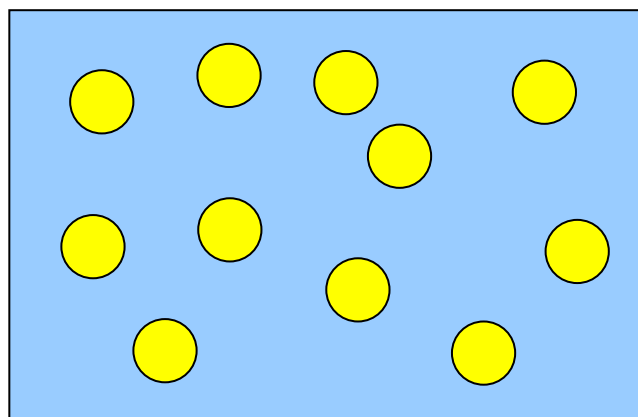


Výklad

□ Úvod – srovnání vnitřní stavby látek v závislosti na skupenství

Přestože je předmět zaměřen na materiály v pevném stavu, popíšeme na úvod velmi stručně, jak to vypadá s vnitřní stavbou na „atomární“ úrovni ve skupenství plynném a kapalném.

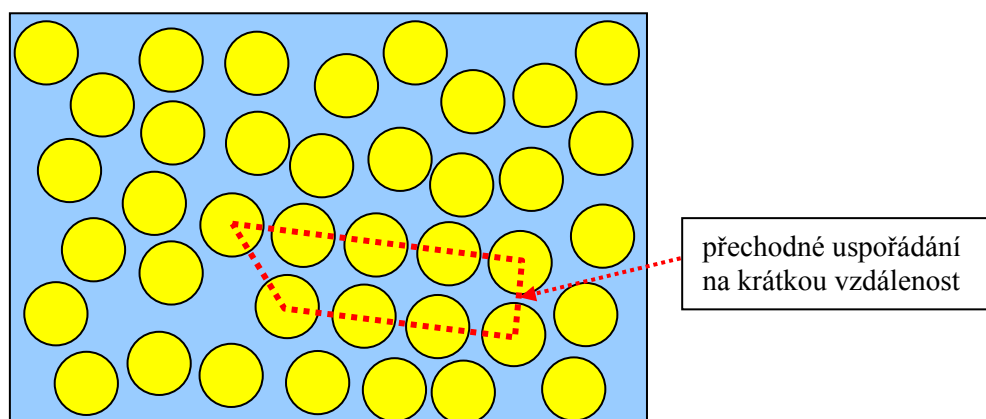
Ve **skupenství plynném** jsou elementární částice (atomy, molekuly) relativně daleko od sebe, vykonávají nepravidelný, chaotický pohyb a často dochází ke vzájemným srážkám částic. Vzhledem k velké vzdálenosti částic jsou plyny poměrně snadno stlačitelné. Schematicky je uspořádání částic v plynném stavu uvedeno na obr. 2.11.



Obr. 2.11 Schematické znázornění uspořádání elementárních částic v plynném skupenství

Ve **skupenství kapalném** jsou již elementární částice mnohem blíže k sobě a v tomto směru, pokud jde o vzdálenost elementárních částic, se blíží více skupenství pevnému než plynnému. I v kapalném stavu vykonávají elementární částice neuspořádaný, chaotický pohyb. Na

přechodnou dobu může v kapalině existovat jisté uspořádání částic (tj. pravidelnost jejich rozmístění), ale jen na krátkou vzdálenost (obvykle se uvádí, že to je na vzdálenost cca 1 nm, tj. cca 10 atomů). Toto uspořádání existuje jen po určitou dobu, pak je narušeno, ale může se vytvořit na jiném místě. Pravděpodobnost vzniku uspořádání na krátkou vzdálenost stoupá s poklesem teploty, tedy s tím, jak se blížíme teplotě tuhnutí příslušné kapaliny. Schématické zobrazení elementárních částic v kapalném skupenství je uvedeno na obr. 2.12.



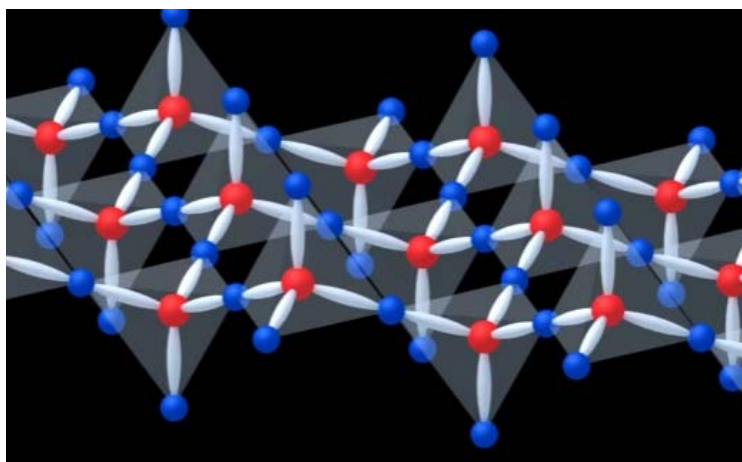
Obr. 2.12 Schématické znázornění uspořádání elementárních částic v kapalném skupenství

V pevném skupenství rozlišujeme dva základní stavy, pokud jde o uspořádání elementárních částic. Jedná se o stav krystalický a stav amorfní.

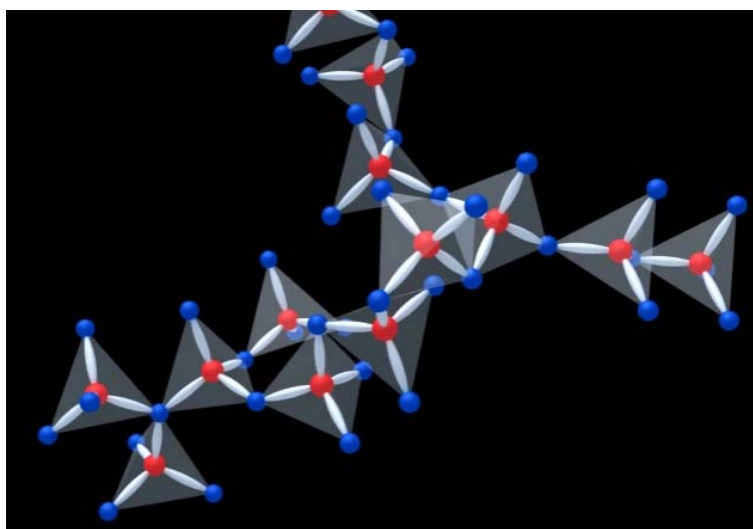
Stav krystalický je charakterizován **pravidelným, periodickým uspořádáním elementárních částic** (většinou atomů nebo iontů). Je pro něj charakteristické, že zde existuje uspořádání na dlouhou vzdálenost (vzdálenost až v μm , tj. desetitisíce i více atomů). S krystalickým stavem se setkáváme u většiny kovových materiálů a také u velké části konstrukční keramiky. Jen v omezené míře nacházíme krystalický stav u některých polymerů.

Stav amorfní je charakterizován nepravidelným uspořádáním elementárních částic, resp. absencí **uspořádání na dlouhou vzdálenost**, tedy toho uspořádání, které existuje ve stavu krystalickém. Přitom i v amorfním stavu může existovat **uspořádání na krátkou vzdálenost** (viz výše – pravidelnost v uspořádání na vzdálenost do cca 1 nm). Pro srovnání krystalického a amorfního stavu můžeme použít např. oxid křemíku SiO_2 . Ten je znám jako minerál křemen, který je krystalický. SiO_2 je ale také základní složkou skla, což je typický představitel materiálu amorfního. V obou případech je základní strukturní jednotkou tetraedr (čtyřstěn) SiO_4^{4-} s atomem křemíku uprostřed čtyřstěnu a atomy kyslíku v jeho vrcholech. Zatímco v případě křemene jsou tetraedry uspořádány pravidelně, takže vytvářejí krystalovou mříž, v případě skla jsou tyto tetraedry v prostoru uspořádány nepravidelně. Samy o sobě však tyto tetraedry představují uspořádání na krátkou vzdálenost, které tedy existuje i v amorfním

stavu. Srovnání krystalického stavu SiO_2 (křemen, modifikace cristobalit) a amorfního stavu (sklo) je uvedeno na obr. 2.13a,b.



a) křemen



b) sklo

Obr. 2.13 Srovnání struktury SiO_2 – krystalického křemene a amorfního skla

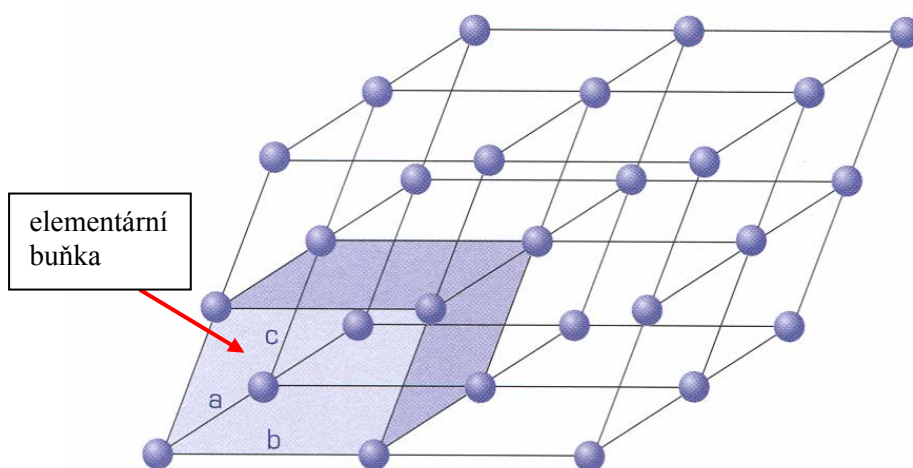
Amorfní stav je typický pro většinu polymerů a část keramických materiálů, např. již zmíněné sklo.

□ Základní charakteristiky krystalického stavu pevných látek

Krystalický stav je pro pevné látky častější, a proto se budeme v následující části věnovat některým jeho základním charakteristikám. Uvedeme jen to nejpodstatnější.

Jak jsme uvedli, je krystalický stav charakterizován pravidelným, periodickým uspořádáním atomů s tím, že uspořádání existuje na dlouhou vzdálenost. Pravidelné, periodické uspořádání atomů v krystalu znamená, že středy atomů (označujeme je jako **uzlové body**) lze proložit soustavu 3 navzájem různoběžných směrů – přímkou a takovou soustavu nazýváme **prostorovou nebo také krystalovou mřížkou**. Je velmi důležité uvědomit si, že ani v pevném skupenství nejsou atomy v krystalové mřížce v klidu. Vykonnávají vibrační pohyb okolo uzlových bodů, které představují rovnovážné polohy atomů. Intenzita vibračního pohybu atomů (frekvence i amplituda) roste s rostoucí teplotou. Uzlové body bývají v této souvislosti definovány jako body, ve kterých se atomy nacházejí s největší pravděpodobností.

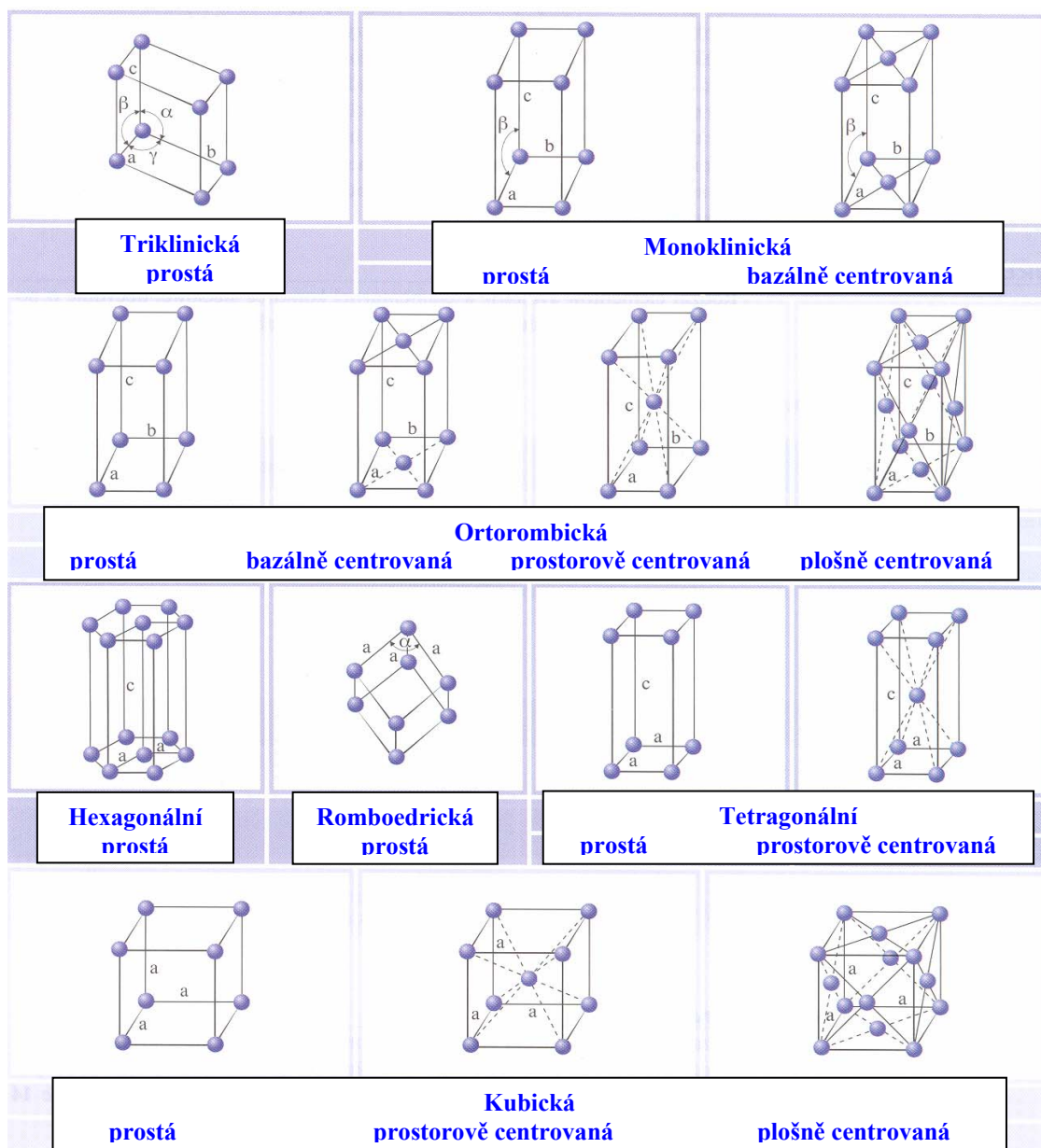
Prostorová (krystalová) mřížka již dobře popisuje krystal při vhodném výběru soustavy směrů. Příklad prostorové mřížky je zobrazen na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Příklad prostorové mřížky v obecném krystalu s vyznačením elementární buňky

Z mnoha důvodů je vhodné vybrat, resp. vymezit v krystalové mřížce základní „stavební“ jednotku, jakousi cihličku, jejímž opakováním lze celý krystal vystavět. Tato základní stavební jednotka krystalu se nazývá **elementární (základní) buňka**. V krystalové mřížce se elementární buňka volí podle jistých pravidel. Tím základním pravidlem je, že souměrnost neboli symetrie elementární buňky má odrážet co nejlépe souměrnost celého krystalu. Existují i další pravidla pro výběr elementární buňky, ale s těmi se jistě seznámíte v jiném předmětu.

Ve všech 7 existujících krystalových soustavách (od triklinické po kubickou) lze vytvořit celkem 14 rozdílných prostorových mřížek (říká se jim také Bravaisovy mřížky) a každé z nich přisoudit jednu elementární buňku. To je zobrazeno na obr. 2.15.



Obr. 2.15 Elementární buňky 14 prostorových (Bravaisových) mřížek

Z obr. 2.15 je vidět, že elementární buňky lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to na **elementární buňky prosté (primitivní)**, nebo **složené**. Elementární buňky prosté obsahují atomy jen ve vrcholech buňky. Elementární buňky složené obsahují kromě atomů ve vrcholech ještě další atomy, které mohou být umístěny následovně:

- ve středu dolní a horní podstavy – pak se jedná o mřížku **bazálně centrovanou**;
- ve středu elementární buňky – pak se jedná o mřížku **prostorově centrovanou**;
- ve středech všech stěn – pak se jedná o mřížku **plošně centrovanou**.

Z obr. 2.15 je dále zřejmé, že jen prosté (primitivní) buňky existují v soustavě triklinické, hexagonální a romboedrické. Ve zbývajících 4 krystalových soustavách (monoklinické, ortorombické, tetragonální a kubické) existují kromě mřížek prostých i mřížky složené.

V další části bude pozornost zaměřena na kubickou soustavu, a to na mřížku kubickou prostorově centrovanou a na mřížku kubickou plošně centrovanou. Důvod je prostý – jedná se o mřížky s vysokou symetrií, elementární buňkou je krychle, což je velmi jednoduché těleso, takže vše je jednodušší než ve většině jiných soustav. Než ale přistoupíme k popisu nejdůležitějších charakteristik těchto mřížek, seznámíme se ještě s důležitým pojmem, a to s **tuhými roztoky**.

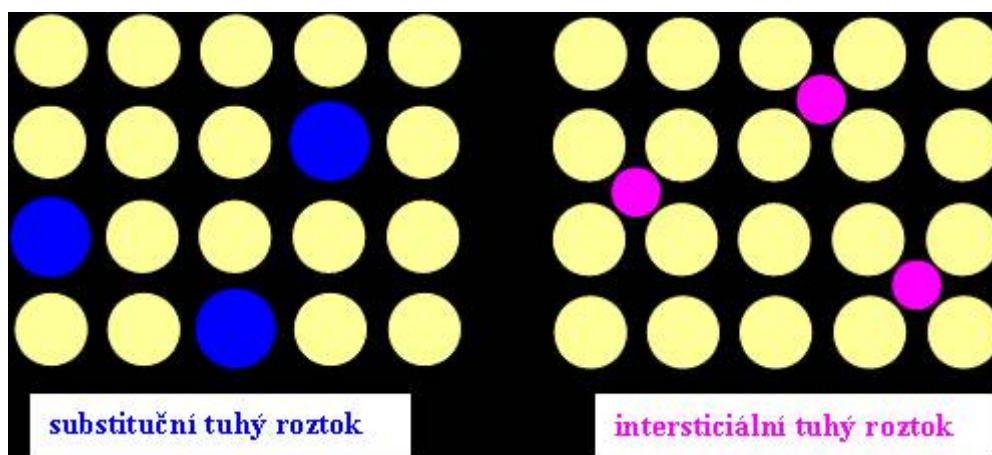
□ Tuhé roztoky

Termín **tuhé roztoky** může působit podivně, vidíte? S roztoky jste se spíše setkávali u látek ve skupenství kapalném. Tam bylo zřejmé, že roztok je směs dvou látek, a to rozpouštědla (v čem rozpouštíme) a rozpuštěné látky (co rozpouštíme). Roztok byl spojen s termínem **rozpustnost**. Ale rozpustnost existuje i ve skupenství pevném. Co znamená v krystalickém stavu? Znamená to, že v krystalové mřížce základního prvku (nebo základních prvků) lze umístit i prvky jiné, cizí. Pokud k tomu dojde, vznikají právě ty tuhé roztoky. Tuhé roztoky dělíme na dva základní druhy, podle toho, kde, resp. v jakých polohách se cizí, rozpuštěné atomy nacházejí.

Mají-li rozpuštěné atomy podobnou velikost jako vlastní atomy krystalové mříže, pak rozpuštěné atomy **nahrazují** v krystalové mříži atomy vlastní. Vyskytují se tedy v uzlových bodech krystalové mříže. Náhrada, nahrazení se latinsky řekne **substituce**. Tuhé roztoky, v nichž rozpuštěné atomy nahrazují v krystalové mříži vlastní atomy, se nazývají **substituční tuhé roztoky**.

Jsou-li atomy rozpuštěného prvku o hodně menší než atomy vlastní, asi se nebudou umísťovat v uzlových bodech krystalové mříže, protože by to znamenalo její distorzi (výraznou tvarovou změnu). Tyto malé atomy (může se jednat např. o atomy vodíku, uhlíku apod.) se spíše umístí v dutinách, které existují mezi vlastními atomy. Polohy, které odpovídají dutinám krystalové mříže, se nazývají **meziuzlové** neboli **intersticiální polohy** a odpovídající tuhé roztoky se nazývají **intersticiální tuhé roztoky**.

Příklad struktury substitučního a intersticiálního tuhého roztoku je uveden ve dvourozměrném zjednodušení na obr. 2.16.



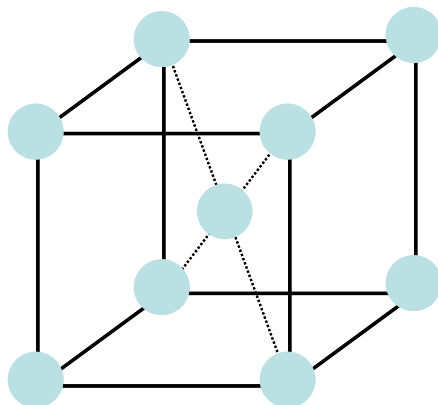
Obr. 2.16 Dvourozměrné znázornění substitučního a intersticiálního tuhého roztoku

A nyní se už můžeme pustit do popisu mřížky kubické prostorově a plošně centrované. Uvedeme některé základní charakteristiky obou těchto kubických mřížek, ale zejména se budeme snažit vysvětlit některé důležité rozdíly, které mezi nimi jsou a které se projevují změnou některých důležitých vlastností materiálů. Těmi rozdíly jsou např. rozpustnost pro malé, intersticiální atomy (atomy v dutinách mřížky) a difúzní schopnost atomů (difúze znamená pohyb atomů).

□ Mřížka kubická prostorově centrovaná

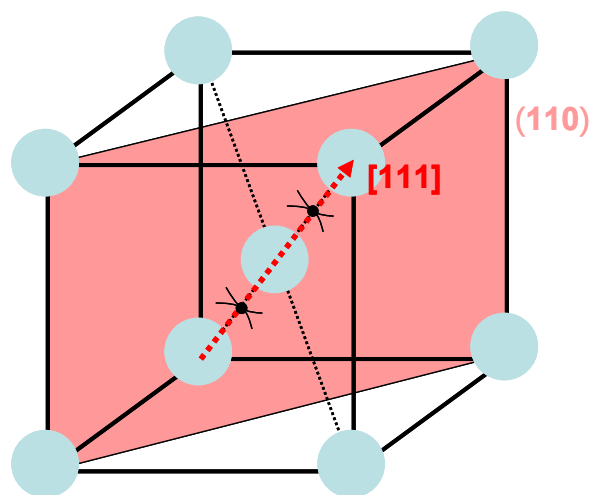
Pro označení této mřížky se někdy používá zkratka odvozená z latiny, a to **KSC**, což znamená **K**ubická **S**tereo**C**entrická. Často se používá také zkratka odvozená z angličtiny, a to **bcc**. To znamená **b**ody **c**entred **c**ubic (tělesně centrovaná kubická).

Jak vyplývá z předchozího výkladu, jedná se o mřížku, jejíž elementární buňka je složená. Elementární buňkou je samozřejmě krychle, atomy jsou jednak ve vrcholech krychle, jednak ve středu krychle, tedy v průsečíku tělesových úhlopříček. Příklad elementární buňky mřížky kubické prostorově centrované je uveden na obr. 2.17.



Obr. 2.17 Elementární buňka mřížky kubické prostorově centrované

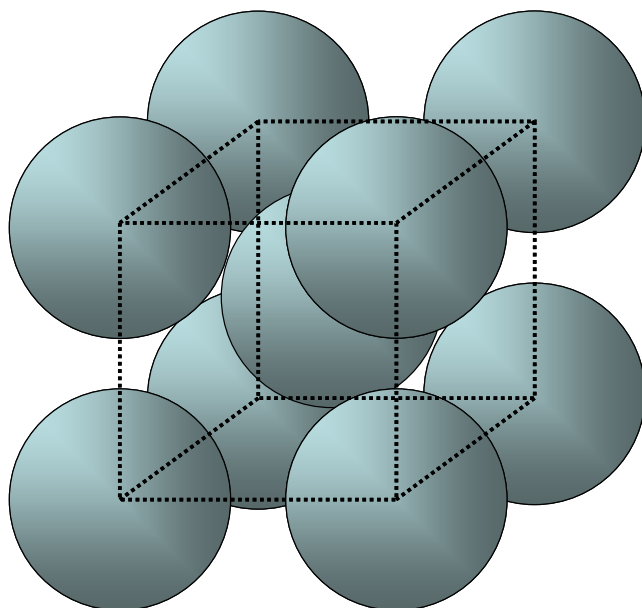
V každé krystalové mřížce lze definovat krystalografický směr nej hustěji obsazený atomy a také krystalografickou rovinu nej hustěji obsazenou atomy. V mřížce bcc (dovolím si používat anglickou zkratku) je nej hustěji obsazeným krystalografickým směrem směr $\langle 111 \rangle$ a nej hustěji obsazenou krystalografickou rovinou rovina $\{110\}$. V souvislosti s jednoduchými modely krystalové stavby se předpokládá, že atomy se právě navzájem dotýkají v nej hustěji obsazených krystalografických směrech. Příklady nej hustěji obsazených krystalografických směrů a rovin v bcc mřížce, jakož i dotyk atomů v nej hustěji obsazeném směru je znázorněn na obr. 2.18.



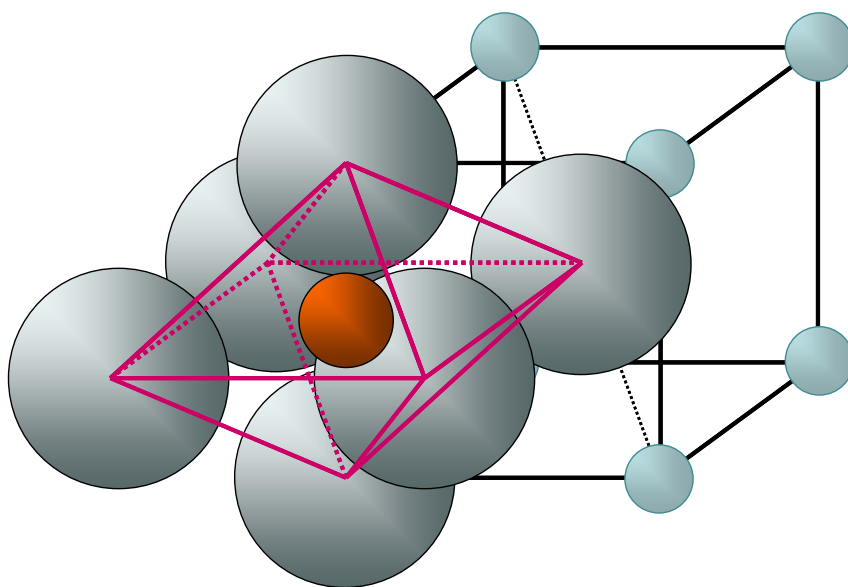
Obr. 2.18 Příklady nej hustěji obsazeného krystalografického směru a roviny a dotyk atomů v mřížce bcc

Uvedli jsme, že atomy se navzájem dotýkají v krystalografickém směru nej hustěji obsazeném atomy. Z toho ale vyplývá, že velikost atomů na obr. 2.17 a 2.18 je malá. Je to pravda, ale obvykle se elementární buňky pro přehlednost kreslí právě takto. Správný poměr velikosti atomů k velikosti elementární buňky je vidět z obr. 2.19.

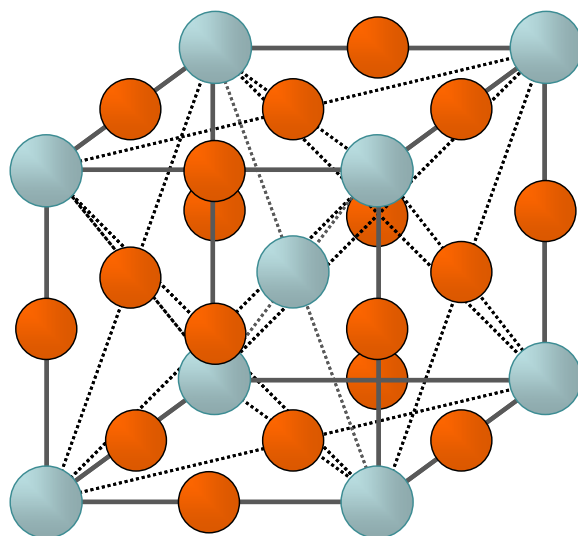
Při vysvětlení pojmu intersticiální tuhý roztok jsme se dotkli dutin v mřížce, tzv. meziuzlových poloh. To jsou ty dutiny, v nichž se mohou umístit malé atomy, např. vodíku, uhlíku apod. Kde leží? Vznešeně se definují dva druhy dutin podle tělesa, které se okolo nich dá vytvořit z nejbližších uzlových bodů. Jsou to dutiny oktaedrické, okolo nichž se dá vytvořit oktaedr (osmistěn), a dutiny tetraedrické, okolo nichž se dá vytvořit tetraedr (čtyřstěn). Příklad oktaedrické dutiny se správným poměrem velikosti atomů je na obr. 2.20. Na obr. 2.21 jsou uvedeny všechny oktaedrické dutiny, na obr. 2.22 pak některé tetraedrické dutiny v mřížce bcc. (všechny tetraedrické dutiny kvůli přehlednosti uvedeny nejsou – chybí v přední a zadní stěně).



Obr. 2.19 Znázornění správného poměru mezi velikostí atomů a velikostí elementární buňky v mřížce bcc

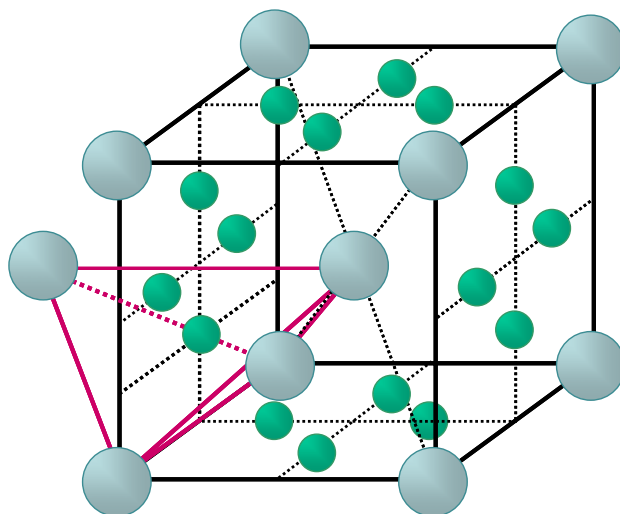


Obr. 2.20 Příklad oktaedrické dutiny v mřížce bcc



Obr. 2.21 Možné oktaedrické polohy v mřížce bcc

Z obr. 2.21 je vidět, že oktaedrické dutiny v mřížce bcc jsou jednak ve středech všech šesti stěn krychle, jednak ve středech všech hran.



Obr. 2.22 Vybrané tetraedrické polohy v mřížce bcc

Inu, je hezké vědět, kde všude jsou dutiny v mřížce bcc, ale to hlavní je zvážit, zda rozpustnost pro malé, intersticiální atomy bude velká, nebo malá. A odpověď je – rozpustnost pro malé, intersticiální atomy je v mřížce bcc nízká!!! Proč? Jak oktaedrické, tak tetraedrické dutiny jsou v mřížce bcc malé, takže ani tak malé atomy jako atomy vodíku, nebo uhlíku se do nich v zásadě nevejdou. Ony se tam ve skutečnosti vejdu, ale jen za cenu jisté deformace okolní mřížky. A ta si to „nechá líbit“ jen ve velmi omezeném rozsahu. Přesnou velikost dutin lze určit výpočtem. Jedná se o relativně jednoduché geometrické úlohy, ale v tomto úvodním předmětu si tyto výpočty odpustíme.

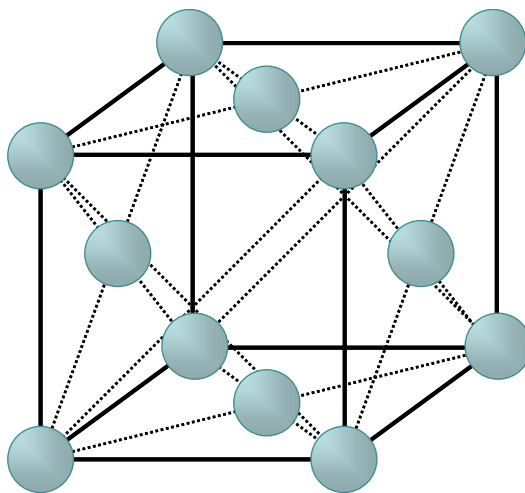
Můžeme však konstatovat, a to je důležité, že **v mřížce bcc existuje jen malá rozpustnost pro intersticiální atomy**, tedy atomy vodíku, uhlíku apod. (atomy prvků s nízkým atomovým číslem a tedy i malým poloměrem atomů).

Další důležitou charakteristikou každé krystalové mřížky je **míra zaplnění** mřížky (nebo elementární buňky) atomy. Je to vlastně poměr objemu atomů, které jsou v elementární buňce, k objemu vlastní elementární buňky. Odvození ponecháme na následující předmět Nauka o materiálu. V tuto chvíli si jen uvedeme, že míra zaplnění atomy činí u mřížky kubické prostorově centrované **0,68, tj. 68%**. To znamená, že z objemu elementární buňky připadá 68% na atomy a zbytek, tj. 32% je souhrnný podíl dutin. Tato hodnota ovlivňuje významně difúzní schopnost atomů, jak uvedeme později.

□ Mřížka kubická plošně centrovaná

Mřížka kubická plošně centrovaná má jiné prvky symetrie, než mřížka kubická prostorově centrovaná. Zjednodušeně lze říci, že její symetrie je vyšší. Pro označení mřížky kubické plošně centrované se používá zkratka **KPC (Kubická PlaniCentrická)**, nebo z angličtiny zkratka **fcc - face centred cubic** (plošně centrovaná kubická).

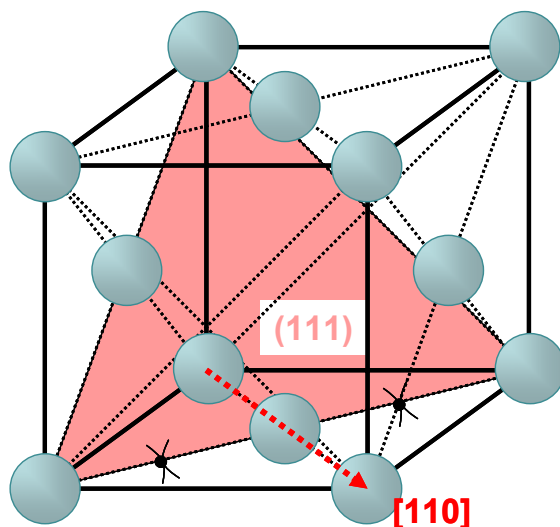
Opět se jedná o mřížku, jejíž elementární buňka je složená. Atomy jsou jednak ve vrcholech krychle, jednak ve středech všech šesti stěn. Příklad elementární buňky mřížky kubické plošně centrované je uveden na obr. 2.23.



Obr. 2.23 Elementární buňka mřížky kubické plošně centrované

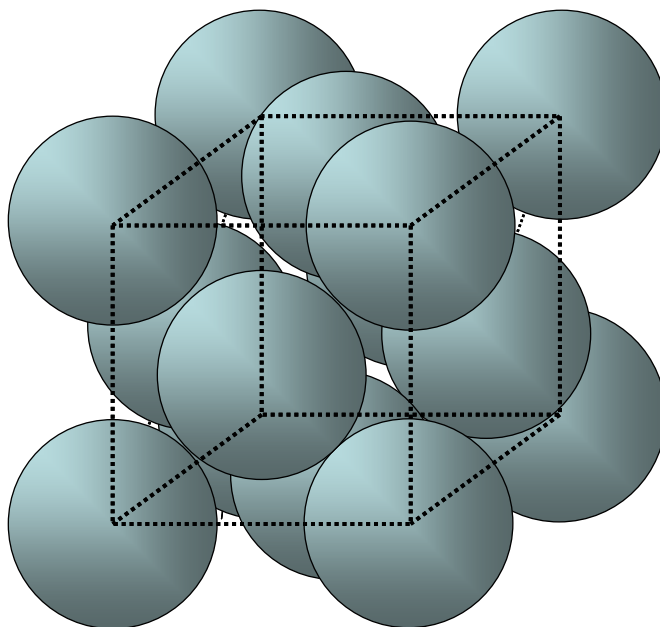
Nejhustěji obsazeným krystalografickým směrem je v mřížce fcc směr $\langle 110 \rangle$, nejhustěji obsazenou krystalografickou rovinou je rovina $\{111\}$. Zjednodušeně se předpokládá, že atomy se v mřížce fcc dotýkají ve směru $\langle 110 \rangle$. Příklady nejhustěji obsazených

krystalografických směrů a rovin v fcc mřížce, a také dotyk atomů v nejhustěji obsazeném směru je znázorněn na obr. 2.24.



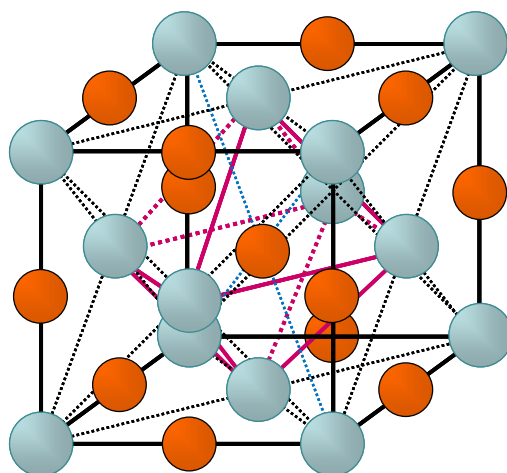
Obr. 2.24 Příklady nejhustěji obsazeného krystalografického směru a roviny a dotyk atomů v mřížce fcc

Na obr. 2.25 je znázornění elementární buňky mřížky fcc se správným poměrem mezi velikostí atomů a velikostí elementární buňky.

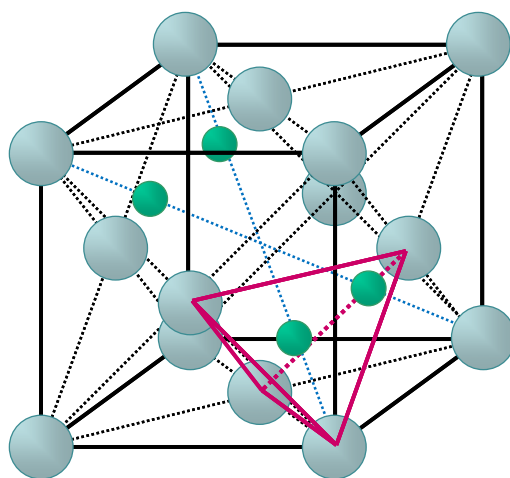


Obr. 2.25 Znázornění správného poměru mezi velikostí atomů a velikostí elementární buňky v mřížce fcc

Podobně jako u mřížky bcc, budeme i v případě mřížky fcc definovat možné dutiny v mřížce a pokusíme se zvážit, jaká bude v mřížce fcc rozpustnost pro malé intersticiální atomy. I v mřížce fcc existují oktaedrické a tetraedrické dutiny. Polohy oktaedrických dutin v mřížce fcc jsou uvedeny na obr. 2.26, příklady některých možných poloh tetraedrických dutin jsou na obr. 2.27 (chybí polohy v dalších stěnových úhlopříčkách kvůli přehlednosti obrázku).



Obr. 2.26 Možné polohy oktaedrických dutin v fcc mřížce



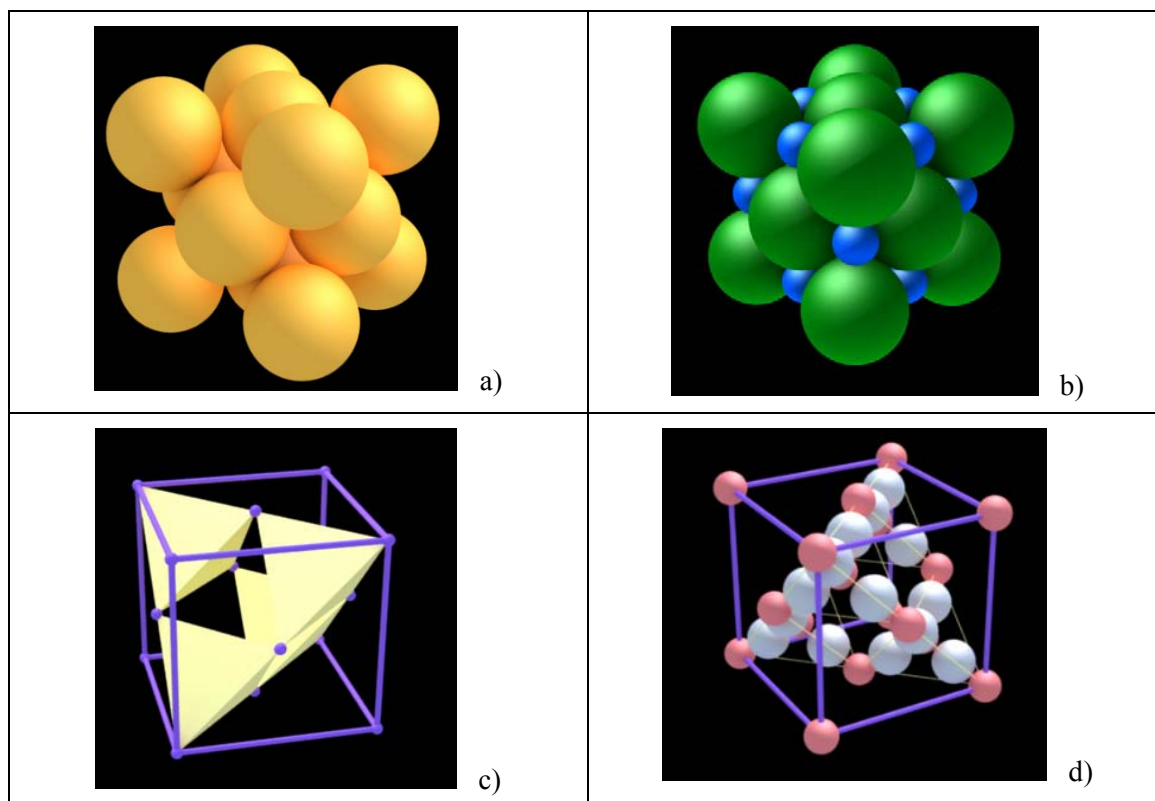
Obr. 2.27 Příklady možných poloh tetraedrických dutin v fcc mřížce

Dutiny tetraedrické jsou i v mřížce fcc (podobně jako v případě mřížky bcc) malé. Naproti tomu dutiny oktaedrické jsou v případě mřížky fcc relativně velké a tato jejich velikost má za následek mnohem vyšší rozpustnost malých intersticiálních atomů. **V mřížce fcc tedy existuje, ve srovnání s mřížkou bcc, mnohem vyšší rozpustnost pro intersticiální atomy,** a to díky větší velikosti oktaedrických dutin v mřížce fcc. To má velký praktický význam např. pro rozpustnost uhlíku v ocelích. Základní složkou ocelí je železo, což je prvek, který se

vyskytuje v několika rozdílných krystalových modifikacích, a může mít jak mřížku bcc, tak fcc.

Pokud jde o **míru zaplnění** mřížky atomy, činí tato v případě mřížky fcc **0,74, tj. 74%**. Případá tedy 74% z objemu elementární buňky fcc na objem atomů, a souhrnný podíl dutin je 26%. **Míra zaplnění mřížky fcc atomy je vyšší než v případě bcc, a to o 6%**. Zdálo by se, že rozdíl není příliš významný. Ale tento rozdíl ovlivňuje významně difúzní schopnost atomů. **V případě mřížky fcc je difúzní schopnost atomů mnohem nižší než u mřížky bcc**, protože v mřížce fcc je méně volného prostoru (více se dozvíte po probrání části věnované difúzi v pevném stavu).

Obsazování uzlových nebo meziuzlových poloh atomy v mřížce fcc není jednoznačné a závisí na druhu materiálu. To je ukázáno na obr. 2.28a-d pro případ mědi, chloridu sodného a cristobalitu, což je jedna z modifikací křemene SiO_2 . Všechny tři tyto materiály mají mřížku kubickou plošně centrovanou – fcc. V případě mědi je situace nejjednodušší – atomy mědi jsou pouze v uzlových bodech (obr. 2.28a). V případě chloridu sodného jsou atomy chloru v uzlových bodech a atomy sodíku (jsou menší) obsazují meziuzlové – oktaedrické dutiny (obr. 2.28b). V případě cristobalitu, modifikace křemene, je situace ještě složitější. Základní stavební jednotkou struktury cristobalitu jsou tetraedry SiO_4^{4-} , které jsou schematicky znázorněny na obr. 2.28c. Atomy křemíku a kyslíku obsazují jak uzlové, tak meziuzlové polohy (obr. 2.28d).



Obr. 2.28 Obsazování poloh v mřížce fcc pro Cu, NaCl a SiO_2 (cristobalit)



Shrnutí pojmů 2.3.

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

- **Krystalický stav, amorfni stav, uspořádání na dlouhou vzdálenost, uspořádání na krátkou vzdálenost;**
- **krystalová mřížka, uzlový bod, elementární buňka jednoduchá, elementární buňka složená;**
- **mřížka bazálně centrovaná, mřížka prostorově centrovaná, mřížka plošně centrovaná;**
- **tuhý roztok, substituční tuhý roztok, intersticiální tuhý roztok;**
- **mřížka kubická prostorově centrovaná, mřížka kubická plošně centrovaná, meziuzlová poloha, oktaedrická dutina, tetraedrická dutina, míra zaplnění mřížky atomy.**



Otázky 2.3.

23. Jak lze charakterizovat krystalický stav pevných látek?
24. Jak lze charakterizovat amorfni stav pevných látek?
25. Co jsou to uzlové body krystalové mříže?
26. Definujte jednoduše pojem elementární buňka.
27. Jaké znáte krystalové soustavy?
28. Charakterizujte elementární buňku jednoduchou.
29. Charakterizujte elementární buňku složenou.
30. Popište bazálně centrovanou elementární buňku.
31. Popište prostorově centrovanou elementární buňku.
32. Popište plošně centrovanou elementární buňku.
33. Charakterizujte pojem tuhý roztok.
34. Jaký je substituční tuhý roztok?
35. Jaký je intersticiální tuhý roztok?
36. Popište elementární buňku mřížky kubické prostorově centrované.
37. Jaké druhy dutin existují v mřížce kubické prostorově centrované?
38. Jaká je rozpustnost intersticiálních atomů v mřížce kubické prostorově centrované a proč?
39. Co znamená míra zaplnění mřížky atomy?
40. Jaká je míra zaplnění v mřížce kubické prostorově centrované?
41. Popište elementární buňku mřížky kubické plošně centrované.
42. Jaké druhy dutin existují v mřížce kubické plošně centrované?

43. Jaká je rozpustnost intersticiálních atomů v mřížce kubické plošně centrované a proč?

44. Jaká je míra zaplnění v mřížce kubické plošně centrované?



CD-ROM

- Plynné skupenství;
- Kapalné skupenství;
- Pevné skupenství;
- Krystalický stav SiO_2 ;
- Amorfní stav SiO_2 - sklo;
- Mřížka kubická prostorově centrovaná (KSC, bcc);
- Příklad oktaedrické dutiny v mřížce KSC (bcc);
- Možné oktaedrické polohy v mřížce KSC (bcc);
- Možné tetraedrické polohy v mřížce KSC (bcc);
- Mřížka kubická plošně centrovaná (KPC, fcc);
- Možné oktaedrické polohy v mřížce KPC (fcc);
- Možné tetraedrické v mřížce KSC (bcc);
- Mřížka KPC (fcc) – měď;
- Mřížka KPC (fcc) – chlorid sodný;
- Mřížka KPC (fcc) – křemen – modifikace cristobalit.

2.4. Poruchy krystalové stavby



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- rozlišit a popsat jednotlivé typy poruch krystalové mřížky;
- vysvětlit, že poruchy krystalové mřížky nemusí být jen „škodlivé“, ale mohou i zlepšovat některé vlastnosti materiálů.



Výklad

□ Úvod – nic není dokonalé, ani krystaly

V životě i v přírodě existuje jen máloco dokonalého. Výjimkou v tomto směru nejsou ani krystaly, resp. krystalické látky. I v nich, nebo přesněji v jejich vnitřní stavbě existují různé vady, poruchy, nedokonalosti. V některých případech mohou tyto poruchy zhoršit vlastnosti látek, jindy mohou být mimořádně užitečné, protože umožňují průběh celé řady dějů, které by bez přítomnosti těchto poruch neproběhly.

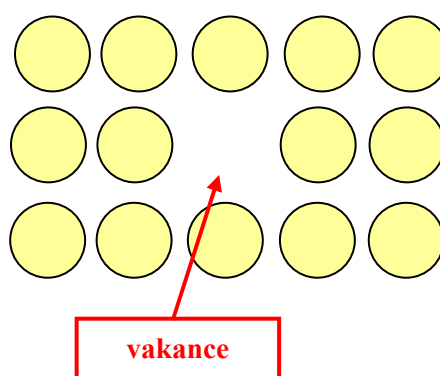
Poruchy krystalové mřížky se nejčastěji dělí podle své velikosti, a to na **poruchy bodové, čárové, plošné a prostorové**. V následujících částech stručně probereme nejdůležitější reprezentanty z každé skupiny.

□ Bodové poruchy

Bodové poruchy patří mezi nejmenší poruchy krystalové mřížky a jejich velikost odpovídá zjednodušeně velikosti atomů v krystalové mřížce. Nejdůležitějšími bodovými poruchami jsou tzv. **vakance** a **interstice**.

□ Vakance

Vakance představuje neobsazený uzlový bod v mřížce. V místě, kde očekáváme vzhledem k periodicitě uspořádání atom, ve skutečnosti žádný atom není. Situace je schématicky znázorněna na obr. 2.29.



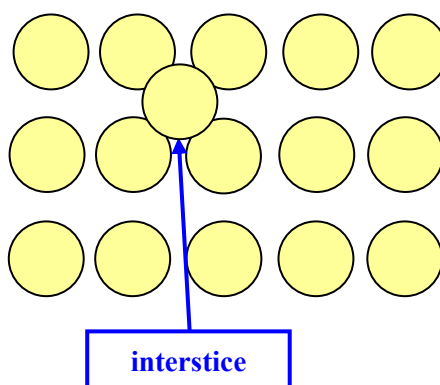
Obr. 2.29 Schématické znázornění vakance

Vakance jsou poruchy velice důležité, protože usnadňují difúzi atomů, tedy pohyb atomů krystalovou mřížkou.

Podíl vakancí v krystalové struktuře je obecně tím vyšší, čím vyšší je teplota. Nejvyšší podíl vakancí bývá těsně pod teplotou tuhnutí. Pro měď se např. uvádí, že podíl vakancí těsně pod teplotou tuhnutí je cca 10^{-4} , tzn. že každý desetitisící uzlový bod je neobsazený. S klesající teplotou pak podíl vakancí klesá. V případě mědi je podíl vakancí za normální teploty jen asi 10^{-15} .

□ Interstice

Interstice je druhým nejdůležitějším případem bodové poruchy krystalové mřížky. Je v zásadě protipólem vakance. **Interstice představuje atom v meziuzlové poloze (dutině mřížky).** Atom je tedy někde, kde bychom ho normálně neočekávali. Situace je schématicky, ve dvourozměrném přiblížení, zobrazena na obr. 2.30.



Obr. 2.30 Schématické znázornění interstice

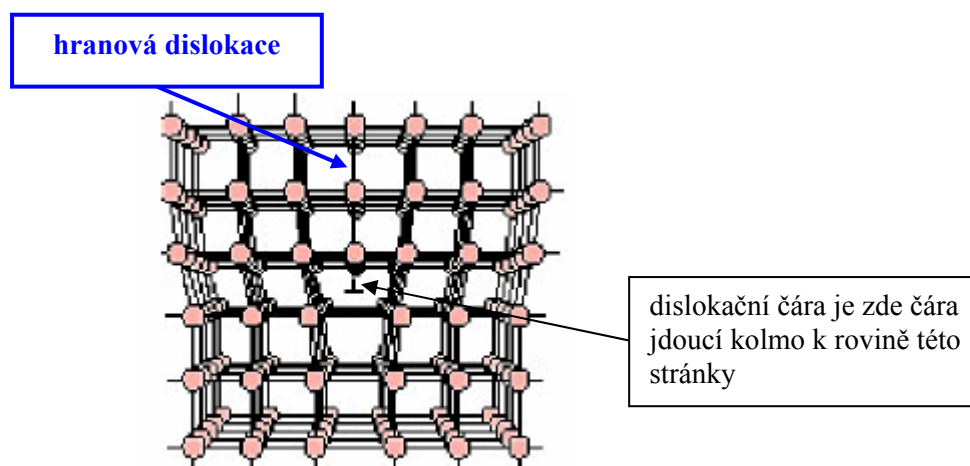
V meziuzlových polohách, tj. jako interstice se nejčastěji vyskytují atomy prvků s nízkým atomovým číslem, a tedy malým atomovým poloměrem (vodík, uhlík, dusík). Intersticemi mohou být ale i vlastní atomy krystalu. V tom případě však vedou v poměrně velké deformaci okolní mřížky (v dutinách pro ně není dost místa), takže se jedná o jev spíše výjimečný.

□ Čárové poruchy

Čárové poruchy představují druhou skupinu poruch krystalové mřížky. Nazývají se **dislokacemi**. Jedná se o poruchy polohy určité skupiny atomů. Je pro ně charakteristické to, že jejich přítomnost lze vztáhnout k určité myšlené čáře v krystalu a odtud mají označení čárové poruchy. Základními typy dislokací jsou **hranová** a **šroubová dislokace**, přičemž každá z nich je v zásadě odlišná.

□ Hranová dislokace

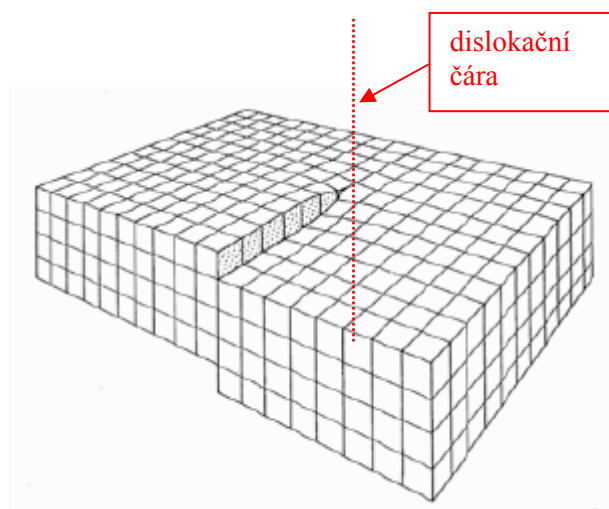
Hranová dislokace je čárová porucha, která představuje atomovou polorovinu navíc v krystalu. Schéma hranové dislokace je uvedeno na obr. 2.31.



Obr. 2.31 Schéma hranové dislokace

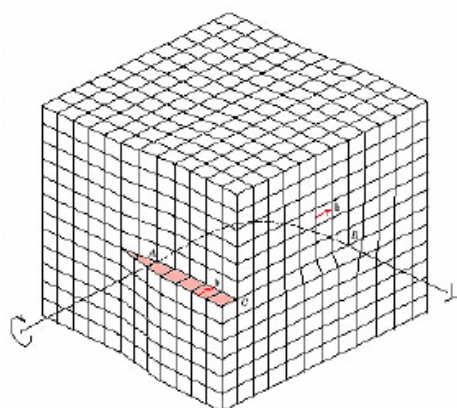
□ Šroubová dislokace

Šroubová dislokace je jiný typ čarové poruchy než hranová dislokace. Není spojena s přítomností atomové poloroviny navíc v krystalu. Znamená takovou poruchu polohy atomů, kdy atomy, které jsou v okolí určité přímky – dislokační čáry, jsou uspořádány ve šroubovici. Schematický příklad šroubové dislokace je na obr. 2.32.



Obr. 2.32 Schéma šroubové dislokace

Kromě dislokací, které jsou čistě hranové, nebo čistě šroubové, mohou existovat také dislokace smíšené, které představují určité spojení obou základních typů dislokací. Smíšená dislokace je na obr. 2.33.



Obr. 2.33 Příklad smíšené dislokace

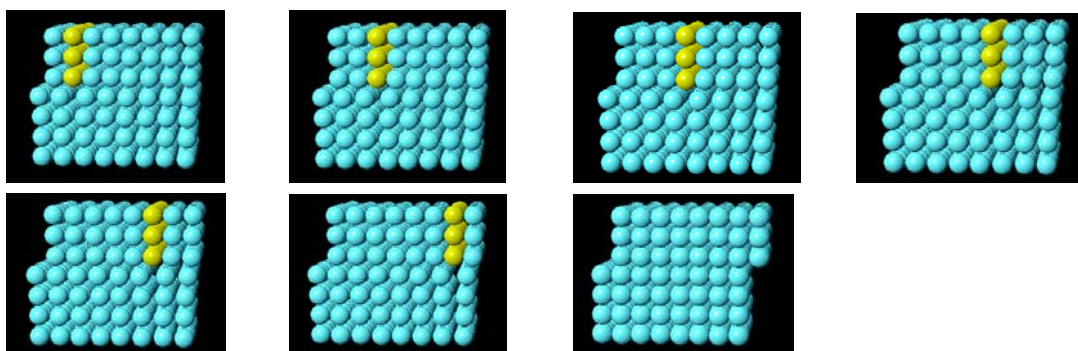
Na obr. 2.33 je na levé straně dislokace šroubová, na pravé straně dislokace hranová. Tyto dvě krajní varianty přecházejí v krystalu plynule jedna v druhou, tzn. v určitém bodě lze najít vždy určitou složku hranovou a určitou složku šroubovou.

Dislokace jsou obvykle přítomny v krystalických materiálech ve velkém množství. A je to dobře!!! Dislokacím, resp. jejich pohyblivostí, vděčíme např. za dobrou plasticitu - tvárnost a také houževnatost většiny kovových materiálů.

□ Pohyb dislokací

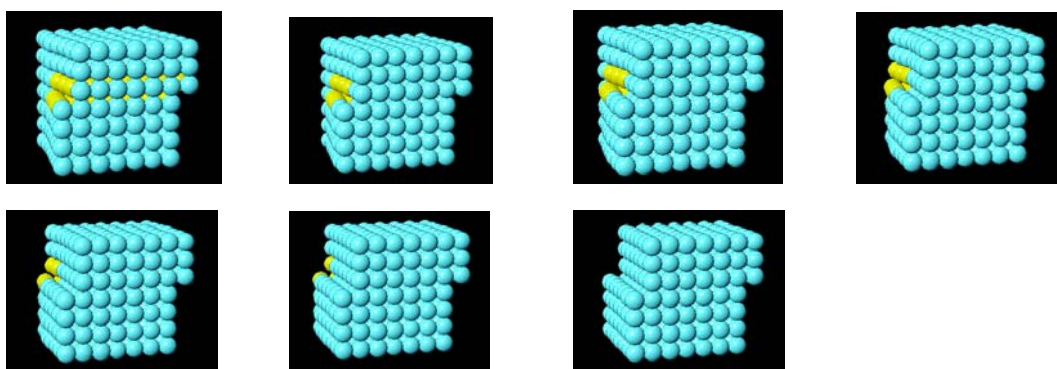
Dislokace se mohou, jak již bylo naznačeno, v některých krystalických materiálech pohybovat. To se děje hlavně pod vlivem napětí při plastické deformaci. Pod vlivem napětí mohou i nové dislokace vznikat.

Co znamená pohyb **hranové** dislokace, je znázorněno na sérii následujících obrázků (obr. 2.34).



Obr. 2.34 Znázornění pohybu hranové dislokace krystalem

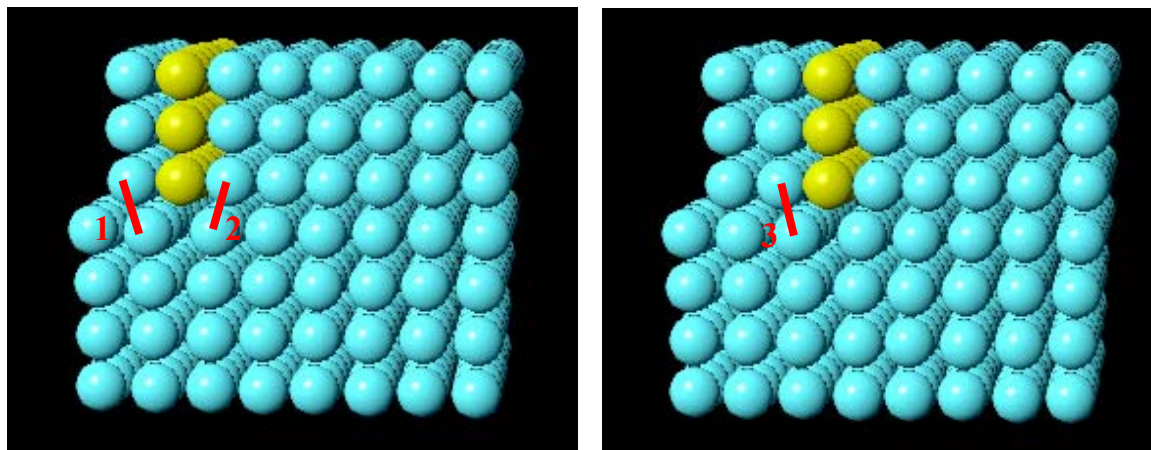
Podobně je na další sérii obrázků (obr. 2.35) znázorněn pohyb šroubové dislokace.



Obr. 2.35 Znázornění pohybu šroubové dislokace krystalem

Při pohybu dislokací dochází k zániku existujících a vzniku nových vazeb mezi atomy. Proto je pohyb dislokací možný v zásadě jen u krystalických materiálů, které mají kovovou vazbu. U materiálů s kovovou vazbou jsme totiž uvedli, že sousední atomy ani nesdílí své valenční elektrony, ani je jeden atom druhému neodevzdal. Z tohoto důvodu je u kovové vazby atomům vcelku jednoho, koho mají za souseda, a zánik, resp. vznik nových vazeb mezi atomy

může poměrně snadno proběhnout. Vznik a zánik vazeb mezi atomy při pohybu dislokace je znázorněn na obr. 2.36a,b.



a)

b)

Obr. 2.36 Vznik a zánik vazeb mezi atomy při pohybu hranové dislokace

Je-li hranová dislokace v poloze na obr. 2.36a, existují zde vazby mezi atomy označené jako 1 a 2. Při pohybu dislokace do polohy znázorněné na obr. 2.36b musí zaniknout vazba označená na obr. 2.356a jako 2, a naopak musí vzniknout nová vazba mezi atomy. Ta je na obr. 2.36b označena jako 3.

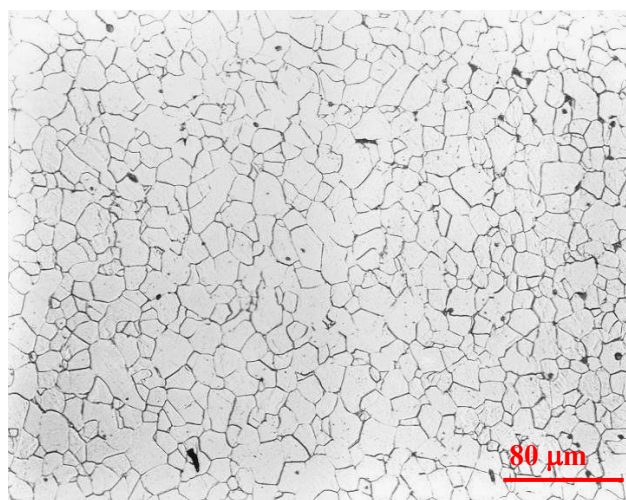
U materiálů s kovalentní, resp. iontovou vazbou také existují dislokace, ale jejich pohyb je vzhledem k povaze kovalentní a iontové vazby velmi obtížný. Obtížný pohyb dislokací může zjednodušeně vysvětlit nízkou houževnatost většiny keramických materiálů.

□ Plošné poruchy

Plošné poruchy jsou třetí skupinou poruch krystalové mřížky. Název tentokrát neklame a jedná se o takové nepravidelnosti v krystalové stavbě, které se projevují v určitých plochách. Nejvýznamnějším představitelem plošných poruch jsou **hranice krystalů, tj. zrn** v polykrystalických materiálech. Měli bychom vysvětlit, že krystalické materiály se mohou vyskytovat ve dvou formách, a to jako **monokrystaly**, nebo **polykrystaly**. O monokrystalech mluvíme tehdy, je-li makroskopický kus materiálu tvořen jen jedním krystalem. Není to příliš obvyklé, ale příklad lze najít např. u monokrystalů křemíku pro použití v elektrotechnice. Polykrystaly představují takový druh krystalických materiálů, kdy makroskopický kus materiálu je tvořen velkým počtem malých krystalů, které se vzájemně stýkají a kterým se někdy říká zrna. Zrna v polykrystalických materiálech mají obvykle velikost v mikrometrech, resp. desítkách mikrometrů. Většina konstrukčních materiálů jsou materiály polykrystalické.

□ Hranice zrn

V polykrystalických materiálech má každý jednotlivý krystal – každé zrn – svou krystalografickou orientaci. Orientace jednotlivých krystalů se většinou liší. V místě styku krystalů, tedy na jejich společné hranici, pak vzniká nepravidelnost uspořádání atomů – porucha, protože se tam vyskytují atomy, jejichž orientace nemusí odpovídat ani jednomu, ani druhému ze sousedních zrn. Hranice zrn jsou většinou viditelné při běžné strukturní analýze, kdy se na prohlíženém vzorku jeví jako čáry, které oddělují jednotlivá zrna. Příklad hranic zrn v oceli je na obr. 2.37.



Obr. 2.37 Hranice zrn v oceli

Přítomnost hranic zrn v krystalech má řadu pozitivních důsledků. Obecně platí, že čím menší, tedy jemnější zrna jsou v materiálu, tím lepší jsou jeho mechanické vlastnosti, a to jak pevnost, tak houževnatost. Hranice zrn také usnadňují difúzi, tedy pohyb atomů, i když to neplatí úplně obecně. Kromě hranic zrn existují i další plošné poruchy krystalové stavby, ale ty ponecháme na některé z dalších předmětů.

□ Prostorové poruchy

Prostorové poruchy představují poslední, čtvrtou skupinu poruch krystalové mřížky. Jedná se o trojrozměrné poruchy o rozměrech větších, než odpovídá velikosti atomů. Patří sem různé dutiny, póry v krystalech a řadíme sem i různé cizorodé částice.



Shrnutí pojmů 2.4.

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

- **bodové poruchy krystalové mřížky – vakance, interstice;**
- **čárové poruchy krystalové mřížky – hranová, šroubová dislokace;**
- **polykrystaly, monokrystaly;**
- **plošné poruchy krystalové mřížky – hranice zrn;**
- **prostorové poruchy krystalové mřížky.**



Otázky 2.4.

45. Jak se dělí poruchy krystalové mřížky?
46. Co to je vakance?
47. Charakterizujte interstici.
48. Kolik vakancí bývá přibližně v kovových materiálech těsně pod teplotou tuhnutí?
49. Který důležitý děj je usnadňován přítomností vakancí v krystalech?
50. Zkuste definovat stručně hranovou dislokaci.
51. Jakou poruchu krystalové mřížky představuje šroubová dislokace?
52. V čem vidíte hlavní význam dislokací?
53. Jsou dislokace poruchy spíše škodlivé nebo prospěšné (v kovových materiálech)?
54. Ve kterých typech materiálů jsou dislokace poměrně snadno pohyblivé?
55. Ve kterých typech materiálů jsou dislokace obtížně pohyblivé?
56. Která porucha je hlavním představitelem plošných poruch krystalové mřížky?
57. Charakterizujte stručně pojem polykrystalický materiál.
58. Jaká je obvyklá velikost krystalů (zrn) v polykrystalických materiálech?



CD-ROM

- Pohyb hranové dislokace.

2.5. Difúze v pevných látkách



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat, co znamená pojem difúze v pevných látkách;
- vysvětlit, jaké jsou mechanismy difúze substitučních a intersticiálních atomů;
- popsat, jak souvisí difúzní schopnost atomů s typem krystalové mřížky;
- objasnit, jak závisí difúzní schopnost atomů v pevném stavu na teplotě.



Výklad

□ Úvod – i v pevném stavu se atomy mohou pohybovat

Difúze je přenos – pohyb částic hmoty, nejčastěji atomů, z míst o větší koncentraci do míst o nižší koncentraci příslušného prvku. Difúze je dobře pochopitelná spíše v plynech nebo v kapalinách. K difúzi však dochází i v pevném stavu, i když to není tak dobře viditelné. Difúze je většinou studována ve fyzice a je to kapitola mimořádně zajímavá. V rámci úvodního předmětu o materiálech se omezíme jen na popis nejdůležitějších mechanismů difúze, tzn. ukážeme si, jakým způsobem se mohou pohybovat atomy v krystalech.

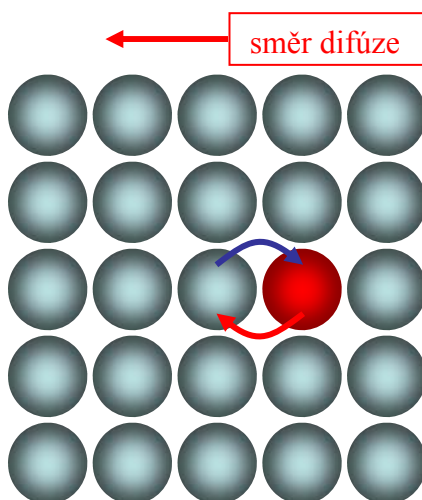
Při difúzi v pevných látkách se rozlišuje, zda dochází k pohybu substitučních nebo intersticiálních atomů. **Rozlišují se tedy mechanismy difúze substitučních atomů a mechanismy difúze intersticiálních atomů.**

□ Mechanizmy difúze substitučních atomů

Možné mechanismy difúze substitučních atomů jsou schématicky znázorněny na obr. 2.38. Difúze substitučních atomů se uskutečňuje elementárními přeskoky atomů z jedné uzlové polohy do druhé.

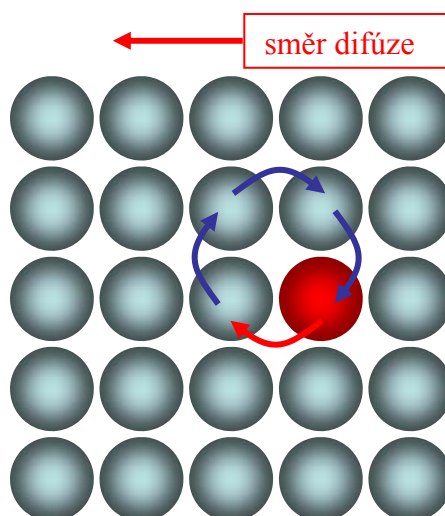
Představme si, že v krystalové mřížce jsou příměsové atomy (na obr. 2.38 je jen jeden z nich a je vyznačen červeně) a že existuje jistá hybná síla pro jejich pohyb, tj pro difúzi směrem zprava doleva. Elementární přeskok může proběhnout tzv. **přímou výměnou atomů**, kdy si příměsový atom vymění místo se svým sousedem a uskuteční tak elementární přeskok směrem doleva. Půjde mu to snadno? Inu, moc ne. V mřížce není mnoho volného prostoru, a

aby se dva atomy vyměnily, musí jim okolní atomy udělat trochu volného místa, musí jim takříkajíc uhnout. To je naštěstí možné, protože víme, že ani v pevných látkách nejsou atomy v uzlových bodech bez pohybu. Atomy kmitají kolem uzlových (rovnovážných) poloh a někdy může nastat příhodná situace, kdy okolní atomy jsou právě na „opačné straně“ a naše dva atomy, které se chtějí vyměnit, to mohou udělat. Přesto je přímá výměna atomů při difúzi energeticky náročná (je třeba dodat energii na to, aby atom mohl uskutečnit elementární přeskok), a je tedy málo pravděpodobná.



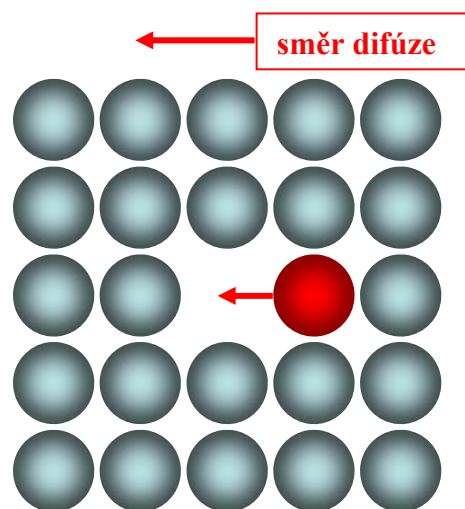
Obr. 2.38 Přímá výměna atomů při substituční difúzi

Energeticky méně náročná a tím i pravděpodobnější je taková situace, kdy se elementárního přeskoku účastní více atomů, např. 4. To je schematicky zobrazeno na obr. 2.39. Uvedenému mechanismu difúze se říká **cyklická výměna atomů**. Pokud se tedy 4 atomy, z nichž jeden je atom příměsový, který chce difundovat, jakoby navzájem „domluví“, je výměna atomů snadnější (nevyžaduje takové množství energie na svůj průběh).



Obr. 2.39 Cyklická výměna atomů při substituční difúzi

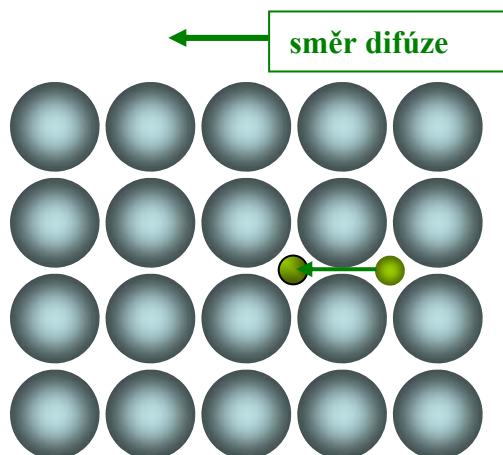
Difúze substitučních atomů je velmi usnadněna, pokud je sousední uzlový bod ve směru jejich pohybu neobsazen, tzn. je tam vakance. Pak si difundující atom vymění své místo s vakancí. Odpovídající mechanismus difúze se nazývá **vakanční difúzí** a je ze všech mechanismů substituční difúze nejméně energeticky náročný. Vakanční difúze se ale může uplatnit jen v té míře, která odpovídá koncentraci vakancí v materiálu. Vzhledem k obvyklému, tj. nízkému podílu vakancí v pevných látkách se vakanční mechanismus příliš neuplatní (viz část 2.4). Vakanční difúze je schematicky znázorněna na obr. 2.40.



Obr. 2.40 Vakanční difúze

□ Mechanizmy difúze intersticiálních atomů

V případě difúze atomů intersticiálních prvků, tedy těch, které jsou v meziuzlových polohách, je situace jednodušší. Při elementárním přeskočení se intersticiální atom přemístí z jedné meziuzlové polohy do druhé, a to ve směru difúze. Situace je znázorněna na obr. 2.41.



Obr. 2.41 Mechanismus difúze intersticiálních atomů

Difúze intersticiálních atomů je za stejné teploty vždy snazší než difúze substitučních atomů.

Na vysvětlení:

Chcete-li si představit, jak snadná nebo nesnadná je difúze v pevném stavu, můžete udělat následující pokus. Postavte se se svými kolegy (kamarády) tak, abyste vytvořili x-řadu a y-stup a abyste se jemně dotýkali svého souseda před vámi i za vámi, po pravici i po levici. A pak požádejte někoho, kdo není na okraji, ať se přemístí, ať difunduje.... Jak mu to půjde, bude záležet na něm a na jeho sousedech. Takto si můžete vyzkoušet všechny mechanismy difúze. A difúzi intersticiálních prvků si můžete představit jako pohyb malého dítěte, které postavíte do x-řady, y-stupu mezi dospělými. Bude-li dítě šikovné, bude se pohybovat mnohem snadněji než dospělí....

Jak už bylo uvedeno, může být difúze usnadněna přítomností vakancí. V některých případech může být difúze usnadněna i hranicemi zrn a může probíhat podél nich. Je to proto, že na hranicích zrn je většinou menší míra zaplnění atomy (hranice zrn jsou jakoby řidší ve srovnání s dokonalou krystalovou mřížkou).

□ Závislost difúze na teplotě

Difúze atomů závisí silně na teplotě a je usnadňována rostoucí teplotou. Difúzní schopnost atomů je vyjádřena tzv. **koeficientem difúze D** , který vyjadřuje množství látky (atomů), které projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém koncentračním gradientu. Koeficient difúze má jako fyzikální veličina zajímavý rozměr: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Koeficient difúze se vztahuje vždy k prvku, který difunduje, ale zároveň i k prvku, resp. krystalové mřížce, ve které difunduje.

Pro teplotní závislost koeficientu difúze platí následující rovnice:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad \text{rov. 2.1}$$

kde

D je koeficient difúze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

D_0 je tzv. frekvenční faktor (souvisí s vibrací atomů v krystalové mřížce, rozměr - $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

Q je aktivační energie difúze - většinou se udává v [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$];

R je univerzální plynová konstanta: $8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T je absolutní teplota [K].

Z rovnice (2.1) vyplývá, že koeficient difúze se exponenciálně zvyšuje s rostoucí teplotou. Potřebujeme-li tedy, aby v materiálu došlo k difúzi určitých prvků, je vhodné zahřát ho na co nejvyšší teplotu.

Poznámka: *Difundovat, tj. pohybovat se mřížkou mohou nejen příměsové atomy, ale i atomy základního prvku. Tento jev se nazývá **autodifúze** a uplatňuje se například, když dochází ke změně krystalové mřížky.*

❑ Závislost difúze na typu krystalové mřížky

Jak už bylo uvedeno při srovnání charakteristik mřížky kubické prostorově a plošně centrované, závisí difúzní schopnost atomů výrazně na typu krystalové mřížky, ve které difúze probíhá. V části 2.3 jsme uvedli, že difúze je snadnější v mřížce kubické prostorově centrované, a to proto, že má nižší míru zaplnění atomy, a to jen 68% oproti 74% u mřížky kubické plošně centrované. Zkusme si říci, jestli rozdíl 6% v míře zaplnění může znamenat velký rozdíl v difúzní schopnosti atomů. Možná se to nezdá, ale rozdíl je velký, až obrovský.

Jako příklad můžeme uvést difúzi vodíku za normální teploty dvěma ocelmi, z nichž jedna má mřížku kubickou prostorově centrovanou (bcc) a druhá má mřížku kubickou plošně centrovanou (fcc). Mějme z obou ocelí plech o tl. 1 mm, nechme vodík na jednom z povrchů plechu pronikat do oceli (jde to, ale nebudeme popisovat jak) a měřme, za jak dlouho se vodíku podaří urazit vzdálenost odpovídající tloušťce, tedy 1 mm. Možná byste neuhodli, jak velký je rozdíl v tomto čase. V případě oceli s mřížkou bcc bude vodíku stačit čas okolo 1 minuty, aby za normální teploty difundoval na vzdálenost 1 mm. Avšak v případě oceli s mřížkou fcc mu to bude trvat několik let!!!! A to všechno kvůli rozdílu 6% v míře zaplnění mřížky atomy!!! Tento rozdíl vyplývá, i když asi méně názorně, i z hodnot koeficientu difúze vodíku v oceli s mřížkou bcc a fcc. V případě oceli s mřížkou bcc je hodnota koeficientu difúze vodíku za normální teploty asi $10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. V případě oceli s mřížkou fcc je hodnota koeficientu difúze vodíku za normální teploty jen asi $10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, tj. cca o 8 řádů nižší.

Na vysvětlení:

Možná by bylo vhodné vysvětlit na tomto místě určitý paradox, který jsme zaznamenali při srovnání vlastností mřížky kubické prostorově a plošně centrované. Uvedli jsme, že v mřížce bcc je snadnější difúze díky menší míře zaplnění mřížky atomy, ale nízká rozpustnost intersticiálních atomů kvůli malým rozměrům dutin. Naproti tomu mřížku fcc lze charakterizovat obtížnou difúzí, ale vysokou rozpustností pro intersticiální atomy, a to díky větší velikosti oktaedrických dutin. Není v tom rozpor??? Není.

*Je třeba si uvědomit, že pro rozpustnost intersticiálních atomů a difúzi jsou důležité rozdílné charakteristiky. Pokud jde o **difúzi**, je důležitý **celkový podíl (objem) volného prostoru**, tedy dutin v mřížce. Ten je vyšší v mřížce bcc, a proto tam bude difúze snadnější. Naproti tomu*

v případě **rozpuštění malých intersticiálních atomů** není celkový objem dutin tak podstatný. Mnohem důležitější je **velikost jednotlivých dutin**, které by měly svou velikostí odpovídat velikosti intersticiálních atomů. A tato velikost jednotlivých dutin je vyšší v mřížce fcc. Proto v mřížce fcc existuje vyšší rozpustnost pro malé intersticiální atomy.



Shrnutí pojmů 2.5.

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

- **mechanizmy difúze v pevných látkách;**
- **substituční difúze – přímá výměna atomů, cyklická výměna atomů, vakanční difúze;**
- **intersticiální difúze;**
- **závislost difúze na teplotě;**
- **strukturní závislost difúze.**



Otázky 2.5.

59. Co znamená pojem difúze v pevných látkách?
60. Které jsou základní mechanizmy difúze substitučních atomů?
61. Srovnajte mechanizmy difúze substitučních atomů z hlediska jejich pravděpodobnosti a energetické náročnosti.
62. Charakterizujte, jak probíhá difúze intersticiálních atomů.
63. Jak závisí difúzní schopnost atomů na teplotě?
64. Závisí difúzní schopnost atomů na typu krystalové mřížky? Pokud ano, uveďte jak.
65. Které atomy difundují snadněji – substituční nebo intersticiální – a proč?



CD-ROM

- Substituční difúze – přímá výměna atomů;
- Substituční difúze – cyklická výměna atomů;
- Intersticiální difúze.

	Klíč k řešení – odpovědi na otázky ke kapitole 2
O1	Užitné vlastnosti představují soubor různých vlastností, které by měl materiál mít, aby mohl během svého používání dobře sloužit účelu, ke kterému byl vyroben.
O2	Pod pojem užitné vlastnosti řadíme vlastnosti fyzikální, mechanické, chemické, a někdy také odolnost vůči degradaci během provozu.
O3	Pevnost lze jednoduše definovat jako maximální napětí, kterým můžeme materiál zatížit, aniž by v něm vznikaly defekty, nebo aniž by se porušil.
O4	Pevnost materiálů lze spojit s napětím.
O5	Houževnatost lze definovat jako práci (energii) nutnou na porušení materiálu – jeho přetržení, rozlomení apod.
O6	Protikladem houževnatosti je křehkost.
O7	Mezi druhy degradace materiálů během provozu patří např. únava materiálů, koroze, opotřebení apod.
O8	Vlastnosti pevných látek závisí zejména na druhu materiálu, na jeho chemickém složení a na jeho vnitřní stavbě, tj. struktuře.
O9	Strukturu materiálů lze v závislosti na měřítku rozdělit na makrostrukturu, mikrostrukturu, submikrostrukturu a strukturu na atomární úrovni.
O10	Mikrostrukturou pevných látek rozumíme ty části vnitřní stavby, které mají velikost řádově v mikrometrech (jednotkách až stovkách mikrometrů).
O11	Pod pojem submikrostruktura řadíme součásti struktury, jejichž velikost se pohybuje v nanometrech.
O12	Mezi silné chemické vazby mezi atomy řadíme kovalentní, iontovou a kovovou vazbu.
O13	Elektronový oktet představuje 8 valenčních elektronů, které plně zaplňují stav s a p ve slupce s nejvyšší hodnotou kvantového čísla.
O14	Kovalentní vazba znamená sdílení jednoho nebo více valenčních elektronů alespoň dvěma atomy.
O15	Iontová vazba spočívá v odevzdání valenčních elektronů atomem jednoho prvku a jejich přijetí atomem jiného prvku.
O16	V případě kovové vazby vzniká vazebná energie jako výslednice odpuzivých sil mezi kladně nabitými ionty na straně jedné a přitažlivých sil mezi kladně nabitými ionty a záporně nabitými elektrony na straně druhé.
O17	Dobrou elektrickou vodivost většiny kovových materiálů lze vysvětlit dobrou pohyblivostí valenčních elektronů, které vytvářejí tzv. elektronový mrak.
O18	Vazebná energie silných chemických vazeb dosahuje obvykle hodnot ve stovkách $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.
O19	Slabé molekulární vazby vznikají nejčastěji na základě nerovnoměrně rozloženého elektrického náboje v molekulách.
O20	Polární molekula je taková molekula, v níž lze najít kladněji nabitou část a záporněji nabitou část.
O21	U nepolárních molekul může vzniknout slabá molekulární vazba v důsledku fluktuace elektrického náboje.
O22	Vodíkový můstek se řadí mezi slabé molekulární vazby. V blízkosti atomů vodíku má řada molekul slabý kladný náboj. tyto části jsou přitahovány záporněji nabitými částmi jiných molekul.
O23	Krystalický stav lze charakterizovat pravidelným periodickým uspořádáním elementárních částic (atomů, iontů).

O24	Amorfni stav pevných látek lze charakterizovat nepravidelným uspořádáním elementárních částic, resp. absencí uspořádání na dlouhou vzdálenost.
O25	Uzlové body představují rovnovážné polohy atomů, místa, kde se atomy vyskytují s největší pravděpodobností.
O26	Elementární buňka je základní jednotka krystalové stavby, jejímž postupným kladením ve třech různoběžných směrech lze krystal vystavět.
O27	Krystalových soustav je 7, a to. s. triklinická, monoklinická, ortorombická, hexagonální, trigonální (romboedrická), tetragonální, kubická.
O28	Elementární buňka prostá má atomy pouze ve vrcholech buňky.
O29	Elementární buňka složená má atomy ve vrcholech buňky, ale kromě toho ještě v dalších místech.
O30	Bazálně centrovaná elementární buňka obsahuje jednak atomy ve vrcholech, jednak atomy ve středu dolní a horní podstavy.
O31	Prostorově centrovaná elementární buňka obsahuje jednak atomy ve vrcholech, jednak atomy v průsečíku tělesových úhlopříček.
O32	Plošně centrovaná elementární buňka obsahuje jednak atomy ve vrcholech, jednak atomy ve středech všech stěn.
O33	Tuhý roztok obvykle znamená látku v pevném skupenství, kdy v krystalové mřížce této látky jsou umístěny (rozpuštěny) atomy cizích prvků.
O34	Substituční tuhy roztok je takový, v němž rozpuštěné atomy nahrazují v krystalové mřížce atomy vlastní.
O35	Intersticiální tuhy roztok je takový, v němž jsou rozpuštěné atomy o malém poloměru umístěny v dutinách krystalové mřížce základní látky.
O36	Elementární buňkou mřížky kubické prostorově centrovaná je krychle, atomy jsou jednak ve vrcholech krychle, jednak v průsečíku tělesových úhlopříček.
O37	V mřížce kubické prostorově centrované existují dutiny oktaedrické a dutiny tetraedrické.
O38	Rozpustnost intersticiálních atomů je v mřížce kubické prostorově centrované malá kvůli malým rozměrům oktaedrických i tetraedrických dutin.
O39	Míra zaplnění mřížky atomy je podílem objemu atomů připadajících na elementární buňku a objemu této elementární buňky.
O40	Míra zaplnění v mřížce kubické prostorově centrované je 0,68, tj. 68%.
O41	Elementární buňkou mřížky kubické plošně centrovaná je krychle, atomy jsou jednak ve vrcholech krychle, jednak ve středech všech šesti stěn.
O42	V mřížce kubické plošně centrované existují, stejně jako v mřížce kubické prostorově centrované, dutiny oktaedrické a dutiny tetraedrické.
O43	V mřížce kubické plošně centrované je relativně vysoká rozpustnost intersticiálních atomů díky větší velikosti oktaedrických dutin.
O44	Míra zaplnění v mřížce kubické plošně centrované je 0,74, tj. 74%.
O45	Poruchy krystalové mřížky se dělí na poruchy bodové, čárové, plošné a prostorové.
O46	Vakance je neobsazený uzlový bod v mřížce.
O47	Interstice je atom v meziuzlové poloze.
O48	Pod teplotou tuhnutí je podíl vakancí v materiálech cca 10^{-4} .
O49	Přítomností vakancí je usnadněna difúze.
O50	Hranová dislokace představuje atomovou polorovinu navíc v krystalu.
O51	Šroubová dislokace znamená uspořádání atomů v okolí dislokační čáry ve šroubovici.

O52	Dislokace umožňují plastickou deformaci zejména u kovových materiálů a závisí na nich také houževnatost materiálů.
O53	Dislokace jsou poruchy téměř jednoznačně prospěšné.
O54	Dislokace jsou snadno pohyblivé v kovových materiálech.
O55	Dislokace jsou obtížně pohyblivé v keramických materiálech.
O56	Hlavním představitelem plošných poruch jsou hranice zrn v polykrystalických materiálech.
O57	V polykrystalech je makroskopický kus materiálu tvořen velkým počtem malých krystalů (zrn).
O58	Obvyklá velikost zrn v polykrystalických materiálech jsou desítky mikrometrů.
O59	Difúze znamená pohyb částic hmoty (atomů) většinou z míst o větší koncentraci do míst o nižší koncentraci.
O60	Základní mechanismy difúze substitučních atomů jsou přímá výměna, cyklická výměna a vakanční difúze.
O61	Z hlediska pravděpodobnosti se nejvíce uplatní cyklická výměna, ale nejméně energeticky náročná je vakanční difúze.
O62	Difúze intersticiálních atomů probíhá elementárními přeskoky z jedné meziuzlové polohy do druhé ve směru difúze.
O63	Difúzní schopnost atomů roste exponenciálně s rostoucí teplotou.
O64	Ano, difúzní schopnost závisí na typu mřížky. Difúze je tím snazší, čím je menší míra zaplnění mřížky atomy.
O65	Snadněji difundují intersticiální atomy, protože jsou menší.



Další zdroje

- [1] Pluhař, J. a kol: *Nauka o materiálech*. SNTL, Praha, 1989, 549 s.
- [2] Skočovský, P., Bokůvka, O., Konečná, R., Tillová, E.: *Nauka o materiálu pro obory strojní*. Žilinská univerzita, Žilina, 2001, 380 s.
- [3] Callister, W. D.: *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley&Sons, USA, 2005, 712 s.
- [4] Bailon, J. P., Dorlot, J. M.: *Des Matériaux*. Presses Int. Polytechnique, Canada, 2000, 736s.

3. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

3.1. Užité vlastnosti



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- rozdělit užité vlastnosti
- zařadit vlastnosti materiálu do skupin
- vysvětlit pojem anizotropie a izotropie vlastností



Výklad

□ Rozdělení užitečných vlastností

Abychom vybrali vhodný materiál pro výrobu různých součástí nebo pro stavbu konstrukcí a zařízení je potřeba znát jeho vlastnosti. **Vlastnosti materiálu** jsou dány jeho vnitřní stavbou – strukturou materiálu, která závisí kromě chemického složení, vlastností atomů a molekul, také na technologii výroby a následném zpracování materiálu. Změnou technologie výroby nebo zpracování materiálu lze dosáhnout změny struktury a tím i jeho vlastností. Vlastnosti materiálu lze obvykle rozdělit do následujících čtyř skupin:

- fyzikální,
- mechanické,
- chemické,
- odolnost vůči degradaci během provozu.

Fyzikální vlastnosti materiálů zahrnují elektrické a magnetické vlastnosti, tepelné vlastnosti a optické vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou velmi důležité pro projektování a konstruktérskou praxi. Pro daný účel použití potřebujeme vědět, zda a do jaké míry je materiál pevný a tvárný. Dále nás bude zajímat, jak velká síla bude na součást působit, jestli bude zatěžována pomalu nebo rázově. Mechanické vlastnosti tedy zahrnují všechny vlastnosti, které popisují chování materiálu při působení vnějšího napětí, resp. síly. Znalost chemických vlastností materiálu je důležitá všude tam, kde je materiál vystaven působení chemického nebo elektrochemického prostředí, např. je vystaven koroznímu namáhání. Existují i další vlastnosti materiálů, které nelze jednoznačně zařadit do výše uvedených skupin, a většinou jsou dány kombinací předchozích vlastností. Mezi takové vlastnosti patří

např. odolnost proti opotřebení. Tuto skupinu vlastností můžeme nazvat **odolnost vůči degradačním procesům**.

Zvláštní skupinu vlastností tvoří **technologické vlastnosti**. Znalost technologických vlastností materiálů je důležitá pro vlastní technologii zpracování materiálu až po hotový výrobek. Jedná se například o vlastnosti jako tvařitelnost, svařitelnost, obrobitelnost, slévatelnost.

Krystalické látky mohou mít v různých krystalografických směrech významně odlišné vlastnosti, říkáme tomu **anizotropie vlastností** a je charakteristická především pro krystaly s jinou mřížkou než kubickou. Jestliže jsou vlastnosti materiálu ve všech směrech stejné, hovoříme o **izotropních vlastnostech** materiálu. Izotropní vlastnosti materiálu mají např. polykrystalické látky s kubickou mřížkou.

Pozn. Anizotropie mechanických vlastností lze pozorovat i u tvářených ocelí, které mají kubickou mřížku, ale vlivem tváření silně deformovanou, tj. s tzv. texturou.

Pro zjištění nejdůležitějších vlastností materiálu budeme potřebovat znát číselné hodnoty jeho vlastností, tzv. **materiálové charakteristiky**. Daná vlastnost může mít jednu nebo více charakteristik. My se v následujících kapitolách zaměříme na zjišťování mechanických vlastností materiálů, protože ty jsou z hlediska použití konstrukčních materiálů nejdůležitější.



Shrnutí pojmů 3.1

Vlastnosti materiálu lze obvykle rozdělit na **fyzikální, mechanické, chemické, odolnost vůči degradačním procesům a technologické**.

Anizotropie vlastností představuje významnou odlišnost vlastností krystalické látky v různých krystalografických směrech významně.

Izotropní vlastnosti jsou vlastnosti materiálu ve všech směrech stejné.

Materiálové charakteristiky jsou číselné hodnoty vlastností materiálu.



Otázky 3.1

1. Na čem závisí vlastnosti materiálů?
2. Co znamená anizotropie vlastností?
3. Jak se nazývají číselné hodnoty vlastností materiálu?



Úlohy k řešení 3.1

1. Na základě znalostí z jiných předmětů nebo ze střední školy vyjmenujte některé elektrické a magnetické vlastnosti.
2. Dovedli byste uvést příklad materiálu s anizotropními vlastnostmi?

3.2. Mechanické vlastnosti



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat mechanické vlastnosti
- popsat princip některých mechanických zkoušek
- stanovit mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce a další



Výklad

□ Mechanické vlastnosti – základní pojmy

Mechanické vlastnosti představují základní charakteristiky chování materiálů při mechanickém namáhání, vyjadřují jejich odolnost vůči deformaci a porušení. Základní mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů jsou **pružnost**, **pevnost**, **plasticita** a **houževnatost**, ale mechanických charakteristik je daleko více.

Pružnost je popsána následujícími charakteristikami – modulem pružnosti v tahu E , modulem pružnosti ve smyku G , koeficientem příčné deformace μ . **Modul pružnosti** většiny materiálů závisí na tuhosti vazby mezi atomy nebo ionty a na hustotě vazeb. Největší tuhost má kovalentní vazba (20 až 200 N/m), která má také nejsilnější vazebnou energii (viz kap. 2.2). Atomy uhlíku v diamantu jsou vázány kovalentní vazbou a jejich hustota je vysoká, proto má diamant vysoký modul pružnosti v tahu ($E = 1000$ GPa). V kovových materiálech jsou atomy vázány pomocí kovové vazby, její tuhost se pohybuje v rozmezí 15 až 100 N/m. Hustota vazby v kovových materiálech je také vysoká a je dána těsným uspořádáním atomů v mřížce. Kovové materiály mají tedy také vysoký modul pružnosti v tahu (od 100 GPa u Zn-slitin do 400 GPa u W-slitin). Polymery obsahují jak tuhé kovalentní vazby, tak slabé van der Waalsovy vazby (tuhost vazby je jen 0,5 až 2 N/m), které jsou příčinou nízkého modulu pružnosti polymerů (max. 10 GPa).

Pevnost vyjadřuje maximální napětí, kterým můžeme materiál zatížit, aniž by došlo ke vzniku defektů nebo jeho porušení. Pevnost polykrystalických materiálů závisí na několika faktorech. Těmi jsou velikosti vnitřního odporu při skluzové plastické deformaci (je dána hodnotou Peierls-Nabarrova (PN) napětí – viz. pozn.), počtem skluzových systémů a kohezní pevností hranic zrn. Kovy mají poměrně nízkou hodnotu PN napětí a minimálně 5 nezávislých skluzových systémů, proto u nich plastická deformace probíhá poměrně snadno. Naopak u keramických materiálů je hodnota PN napětí vysoká a počet nezávislých skluzových systémů nízký. Plastická deformace v nich probíhá obtížně. Keramické materiály mají malou kohezní

pevnost hranic zrn ve srovnání s kovy a proto je jejich pevnost v tahu nižší. Pevnost se vyjadřuje u různých materiálů různými charakteristikami. Např. u kompozitů a elastomerů mezi pevnosti v tahu, u konstrukční keramiky a skla mezi pevnosti v tlaku nebo ohybu nebo u kovů a plastů mezi kluzu.

Houževnatost je vlastnost, která se projeví při mechanickém zatěžování materiálu a je charakterizována jako odpor materiálu proti iniciaci a šíření trhlin. Přímo souvisí se schopností plastické deformace materiálu. Čím vyšší je schopnost materiálu plasticky se deformovat, tím více bude daný materiál odolávat šíření trhlin. Kovy a kompozitní materiály s kovovou maticí budou mít tedy mnohem vyšší houževnatost než konstrukční keramika nebo skla.

*Pozn. **Peierls-Nabarrovo napětí** (PN) je napětí potřebné ke skluzovému pohybu dislokace krystalem, který neobsahuje žádné poruchy.*

Skluzový systém souvisí v pohybu dislokací. Dislokace se může pohybovat dvojím způsobem: skluzem a šplháním. Skluz se uskutečňuje v určité skluzové rovině. U kovů jsou skluzovými rovinami obvykle nejhustěji obsazené krystalové roviny.

Kohezní pevnost hranic zrn je mírou soudržnosti hranic zrn.

Dále se budeme zabývat zkoušením materiálů a zjišťováním různých materiálových charakteristik. Většinou se omezíme jen na zkoušení kovových materiálů.

□ Zkoušení materiálů

Mechanické charakteristiky se určují experimentálně obvykle podle normy, která definuje podmínky zkoušení a **zkušební těleso**, tj. vzorek materiálu, na kterém požadované vlastnosti zjišťujeme. Výsledné hodnoty však nejsou pro daný materiál absolutní, ale jsou to veličiny, které závisí na konkrétních podmínkách zkoušení.

Materiály se deformují jak elasticky (pružně), tak plasticky (trvale). Znalost mechanických vlastností při podmínkách, které odpovídají elastické deformaci, je důležitá pro pevnostní výpočet součástí (konstrukční účely). Naopak znalost vlastností v oblasti plastických deformací je důležitá pro technologické účely, např. tváření, při kterých cíleně měníme tvar a rozměry materiálů a součástí.

Podle toho jakým způsobem materiálové charakteristiky zjišťujeme, dělíme **zkoušky** na **statické**, kam patří např. zkouška tahem a zkoušky tvrdosti, a na **zkoušky dynamické**, kam můžeme zařadit zkoušky rázové a zkoušky únavové. Při statických zkouškách se hodnotí chování materiálu při působení stálých nebo pomalu a spojitě měnících se sil. Zkušební těleso může být namáháno různými způsoby, např. tahem, tlakem, smykem, ohybem a krutem. Výsledky statických zkoušek nám ale neříkají, jak se bude materiál chovat, pokud ho zatížíme dynamicky. A to buď rázově, kdy zatížení roste skokem, nebo cyklicky, při opakované namáhání. Při dynamickém namáhání dochází často k porušení materiálu při zatížení nižším, než odpovídá statické pevnosti materiálu.

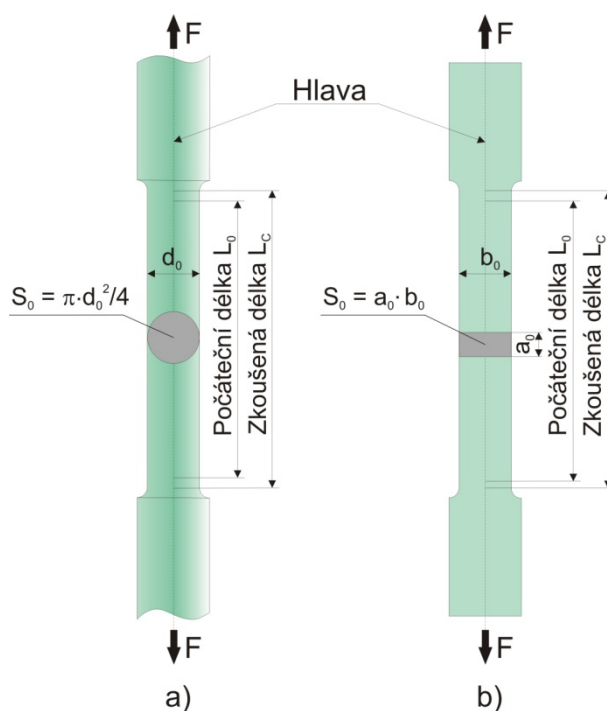
□ Zkouška pevnosti v tahu

Zkouška pevnosti v tahu patří k základním mechanickým zkouškám. Jedná se o statickou zkoušku, při které se zkušební těleso zatěžováním ve zkušebním stroji deformuje tahovou silou, předepsanou rychlostí, zpravidla až do porušení (přetržení). Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly F na prodloužení ΔL . 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 počáteční měřená délka L_0 (obr. 3.1). 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 vzdálenost (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 (Proč? Zkuste si dosadit do předchozích vztahů za S_0 plochu kruhu $S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}$ a dostanete: $L_0 = 5d_0$ pro „krátkou“ tyč, $L_0 = 10d_0$ pro „dlouhou“ tyč).



Obr. 3.1. 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 původní 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. 3.1).

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad \text{rov. 3.1}$$

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

$$\sigma = R = \frac{F}{S_0} \quad \text{rov. 3.2}$$

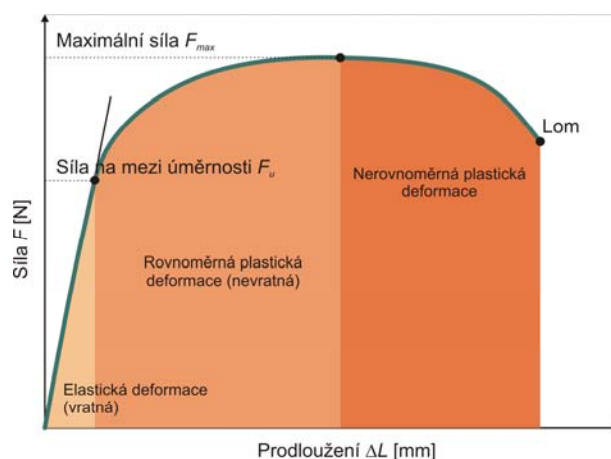
je označováno jako **smluvní napětí R** . Napětí se udává v jednotkách MPa (megapascal); $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$.

Jak už jsme si uvedli, výsledkem tahové zkoušky je pracovní (tahový) diagram (obr. 3.2). Popíšeme si nejprve diagram tahové zkoušky houževnatého kovového materiálu. 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

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad \text{rov. 3.3}$$

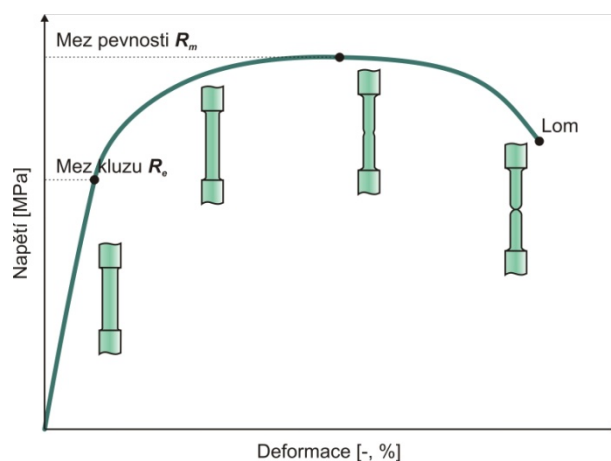
který označujeme jako **Hookův zákon**. Důležitá pro nás je konstanta E , což je **modul pružnosti v tahu** (jednotka GPa – gigapascal). Jedná se o materiálovou konstantu.

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

Obr. 3.2. Pracovní (tahový) diagram $F-\Delta L$.

Druhou oblast tvoří **oblast rovnoměrné plastické deformace**. Dislokace se po překročení elastické oblasti začnou pohybovat 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 na nulu. Až do tohoto okamžiku se měřená část zkušební tyče deformuje rovnoměrně, zužuje se po celé délce.

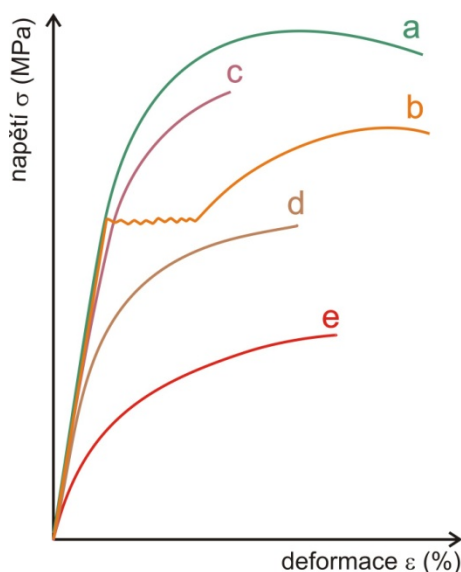
Třetí stádium tvoří **oblast nerovnoměrné plastické deformace**. Dochází zde k poklesu napětí a na tahové zkušební tyči se začíná vytvářet defekt – materiál se buď zcela nebo částečně poruší a často se vytvoří místní zúžení (zaškrcení), tzv. krček. Toto stádium končí přetržením zkušební tyče. Na obr. 3.3 je patrné, jak během zatěžování dochází k deformaci tahové zkušební tyče.



Obr. 3.3. 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

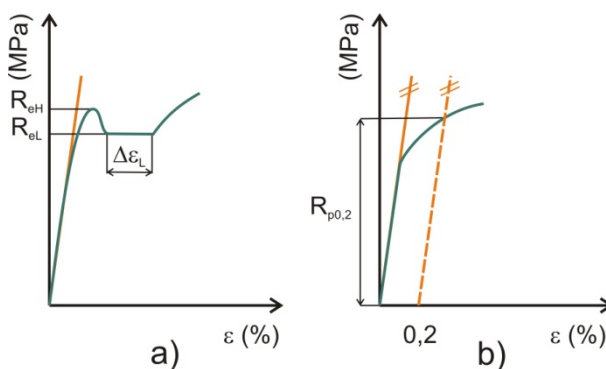
budou změřené síly vztahovat na plochu původního průřezu S_0 . Diagramy R - ε se pro různé materiály liší jak v pevnostních charakteristikách, tak v deformačních hodnotách (obr. 3.4).



Obr. 3.4. 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 pevnostní charakteristiky tedy můžeme z tahové zkoušky a pracovního diagramu odečíst? Mez úměrnosti se obtížně určuje, a proto stanovujeme smluvní hodnotu, tzv. mez kluzu. Základní charakteristiky tedy jsou mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce (zúžení).

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. 3.5), 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. 3.5a). Nevýraznou mez kluzu stanovujeme pro určitou plastickou (trvalou) deformaci (např. pro $\varepsilon = 0,2 \%$). Označujeme jí jako smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (obr. 3.6b).



Obr. 3.5. Stanovení meze kluzu z tahových diagramů

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

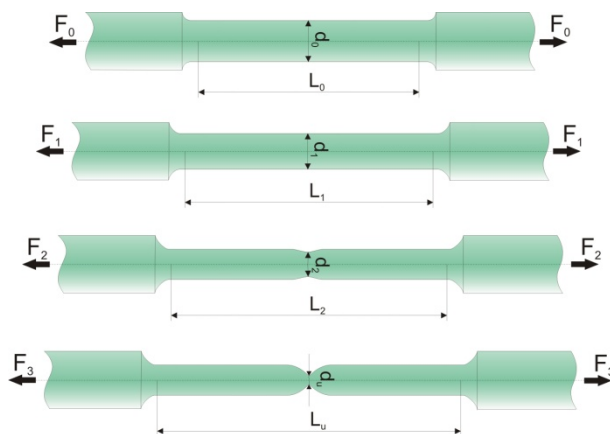
Mez pevnosti je také smluvní napětí a odpovídá maximálnímu zatížení při tahové zkoušce (obr. 3.3). Označujeme ji jako R_m .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \quad \text{rov. 3.4}$$

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. 3.5)

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100, \quad \text{rov. 3.5}$$

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. 3.6. Pro různé původní měřené délky získáme odlišné hodnoty tažnosti (např. $A_{10} < A_5$) a výsledné hodnoty nelze převádět.



Obr. 3.6. 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. 3.6):

$$Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100, \quad \text{rov. 3.6}$$

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

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

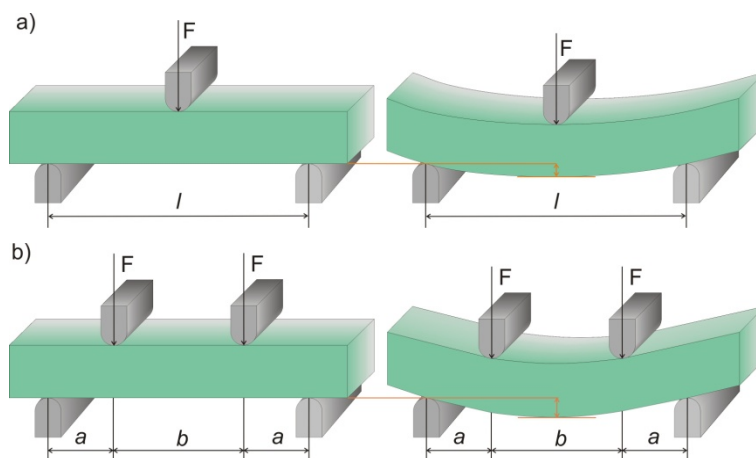
$$S_0 = \frac{\pi d_0^2}{4}.$$

Obdobně plocha tyče kruhové průřezu po přetržení S_u se vypočítá podle vztahu

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

□ Zkouška pevnosti v ohybu

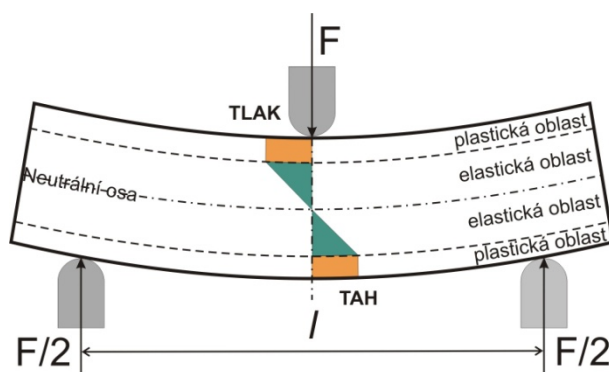
Zkouška pevnosti v ohybu je důležitá hlavně u křehkých materiálů, např. konstrukční keramiky, některých polymerů a litiny. Zkušební tyč obdelníkového nebo kruhového průřezu je podepřená na dvou oporách a uprostřed se zatěžuje od nulové hodnoty tříbodovým (uprostřed zkušební tyče) nebo čtyřbodovým ohybem (symetricky vzhledem ke středu tyče) – obr. 3.7.



Obr. 3.7. Zkouška pevnosti v ohybu.

a) třibodovým ohybem, b) čtyřbodovým ohybem.

Při zatěžování zkušebního tělesa se snímá závislost síly na průhybu tyče. Průhyb se měří jako změna polohy středu tyče vzhledem k nejbližším opěrám. Napětí po průřezu tyče se mění od maximálních tahových napětí (kladné hodnoty), přes nulovou hodnotu ve středu tyče, po maximální tlakové napětí (záporné hodnoty) – obr. 3.8.



Obr. 3.8. Průběh napětí po průřezu ohýbaného tělesa.

Pevnost v ohybu R_{mo} (v MPa) je maximální hodnota tahového napětí působící na povrchu tyče v okamžiku porušení a je dána vztahem:

$$R_{mo} = \frac{M_o^{max}}{W_o},$$

rov. 3.7

kde M_o je ohybový moment, který při síle F je roven $M_{o\max} = \frac{Fl}{4}$ pro tříbodový ohyb a

$M_{o\max} = Fa$ pro čtyřbodový ohyb (v $\text{N}\cdot\text{mm}^2$) při vzdálenosti opěr l nebo a (viz obr. 3.7),

W_o je modul průřezu (pro kruhový průřez $W_o = \frac{\pi d^3}{32}$, pro obdélníkový průřez $W_o = \frac{bh^3}{6}$) v mm^3 .

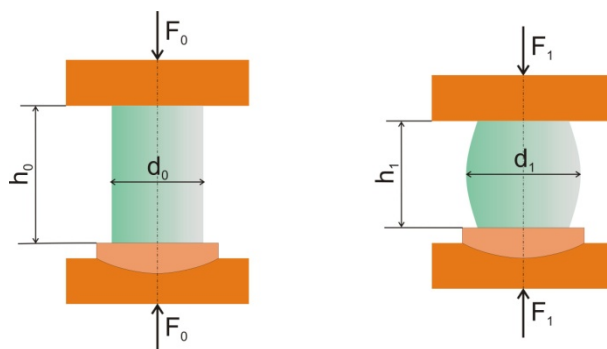
Pevnost v ohybu je výrazně závislá na kvalitě povrchu zkušebního tělesa. Ohybové zkoušky se používají pro stanovení mezních stavů materiálu, např. pro hodnocení houževnatosti keramiky.

□ Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku má význam pro hodnocení křehkých materiálů a materiálů namáhaných na tlak (např. stavební hmoty, ložiskové kovy, šedá litina). Zkušební tělesa tvoří válečky o průměru d_0 (obvykle 20 až 30 mm), stejné délky h_0 (obvykle $h_0 = 1 \div 3d_0$), které se postupně zatěžují, až se stlačí na stanovenou hodnotu nebo se u křehkých materiálů rozdrť. V průběhu zkoušky se zaznamenává tlaková síla v závislosti na velikosti stlačení výšky válečku. Mez pevnosti v tlaku R_{Pd} (v MPa) se stanovuje v případě rozdrčení materiálu jako poměr maximálního zatížení $F_{\max}$ k počátečnímu průřezu S_0 (rov. 3.8):

$$\sigma_{Pd} = \frac{F_{\max}}{S_0}$$

rov. 3.8



Obr. 3.9. Schéma zatěžování zkušebního tělesa ve tvaru válečku při zkoušce pevnosti v tlaku.

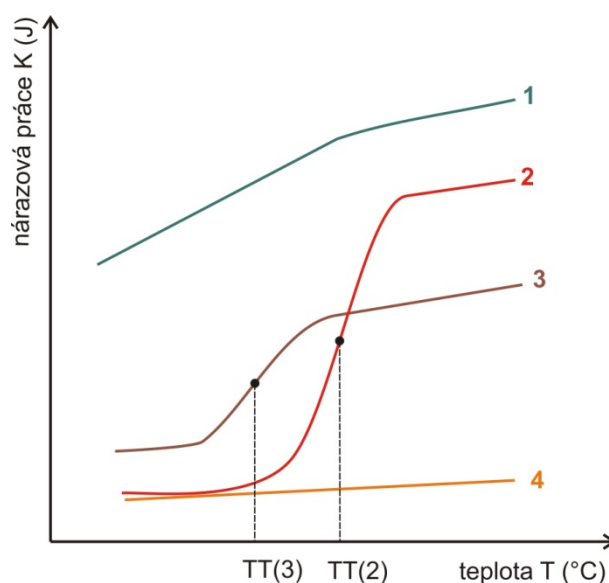
U křehkých materiálů, jako šedá litina, dochází na mezi pevnosti v tlaku k porušení prakticky bez deformace. U velmi houževnatých materiálů, jako je měkká ocel, k porušení vůbec nedojde, ale materiál se stále více deformuje. Zkouška tlakem u těchto materiálů má však význam pro hodnocení objemové tvařitelnosti. Pracovní diagram při zkoušce pevnosti v tlaku

je podobný jako při zkoušce tahem. Obdobně se dá také určit smluvní mez kluzu v tlaku $\sigma_{Kd0,2}$, popř. poměrné zkrácení nebo příčné rozšíření.

□ Zkouška rázem v ohybu

Některé konstrukční materiály jsou při zkoušce tahem houževnaté, ale jestliže zkušební těleso obsahuje vrub a zatěžování probíhá za snížené teploty vysokou rychlostí deformace, materiál se chová křehce. Mezi tyto materiály patří všechny kovy s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (bcc), nízkouhlíkové a nízkolegované oceli. Kovy s kubickou plošně centrovanou mřížkou (fcc) přechod z houževnatého stavu do křehkého nemají (obr. 3.10).

Pozn. U kovů s fcc mřížkou může však při snížené teplotě dojít při zatěžování k fázové přeměně a proto k neobvyklým změnám mechanických vlastností.

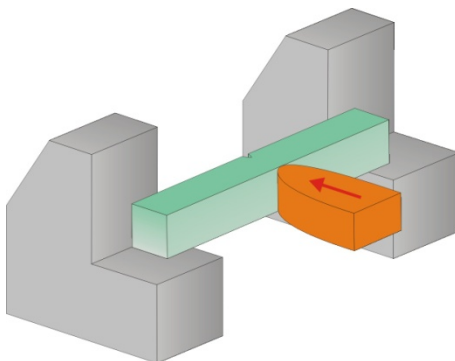


Obr. 3.10 Závislost vrubové houževnatosti na teplotě pro různé materiály
1 – s fcc mřížkou, 2, 3 – s bcc mřížkou, 4 – litiny.

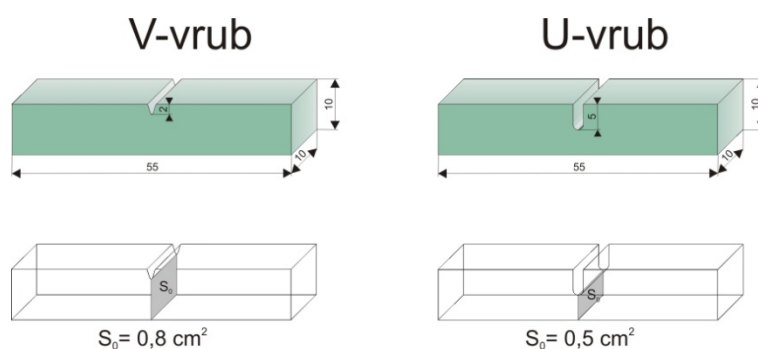
Zkouška rázem v ohybu patří mezi dynamické zkoušky. Je založena na zjištění, kolik energie se při úderu spotřebuje na zlomení zkušební tyče ohybem. Nejčastěji se používá **zkouška rázem v ohybu podle Charpyho**. Podstatou zkoušky je přeražení zkušební tyče opatřené jednostranným vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva. Zkušební tyč je umístěna na opěrách, vrubem na opačné straně, než na kterou dopadá kladivo (obr. 3.11). Výsledkem zkoušky je zjištění **nárazové práce K (J)**, která vyjadřuje energie spotřebovanou na deformaci tělesa a šíření lomu tělesem.

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 45°) nebo U vrubem o hloubce 5

mm (popř. 2 nebo 3 mm) – obr. 3.12. 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. 3.11. Umístění zkušební tyče na opěrách kyvadlového kladiva.



Obr. 3.12. 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 3.9:

$$KC = \frac{K}{S_0}, \quad \text{rov. 3.9}$$

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

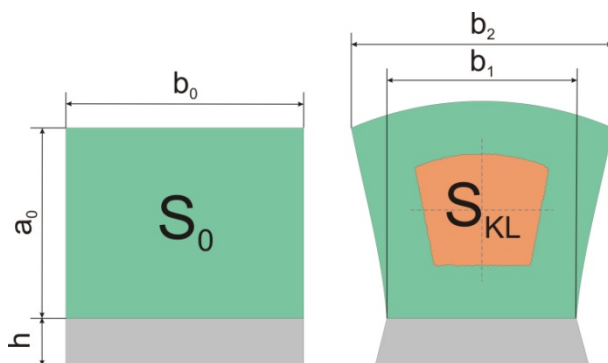
Vrubová houževnatost KC se uvádí v jednotkách $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$.

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

Podíl křehkého lomu se určí z poměru plochy křehkého lomu S_{KL} a plochy pod vrubem S_0 (rov. 3.15) – obr. 3.13.

$$P_{KL} = \frac{S_{KL}}{S_0} \cdot 100.$$

rov. 3.15

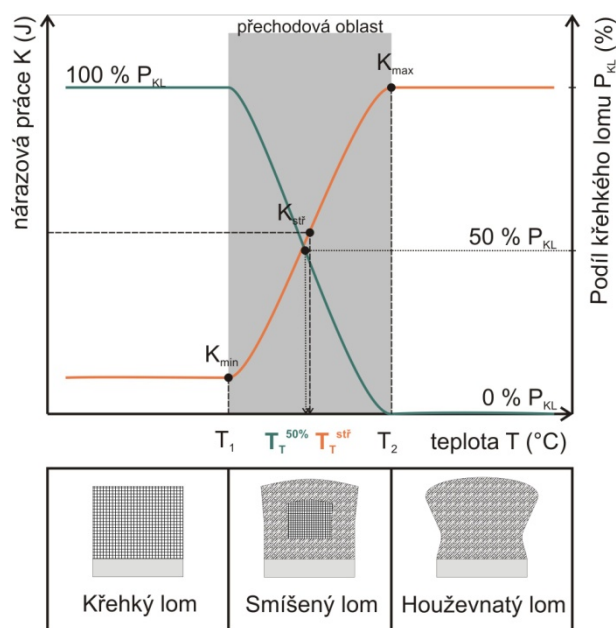


Obr. 3.13. Vyhodnocení podílu křehkého lomu P_{KL} .

□ 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 KC se vynesou v závislosti na teplotě T do grafu, získáme tzv. **přechodovou křivku** (obr. 3.14). 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. 3.14. 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 zcela jinak.



Shrnutí pojmů 3.2

Základní mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů jsou **pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost**.

Podle toho jakým způsobem materiálové charakteristiky zjišťujeme, dělíme **zkoušky** na **statické** a **dynamické**.

Výsledkem tahové zkoušky je **pracovní digram**. Pracovní diagram můžeme rozdělit na několik oblastí: na oblast elastické (pružné, vratné) deformace, rovnoměrné plastické deformace a nerovnoměrné plastické deformace.

Skutečné napětí σ vyjadřuje poměr síly F (N) vztažené na okamžitý průřez S .

Smluvní napětí R vyjadřuje poměr síly F (N) vztažené na počáteční průřez S_0 .

Mez kluzu je smluvní napětí. Odpovídá síle na mezi kluzu F_e (N), při které dochází k zastavení nebo dokonce poklesu zatěžující síly při postupující trvalé deformaci.

Označujeme ji jako R_e . Určíme-li ji jako smluvní hodnotu napětí pro 0,2 % trvalé deformace, označujeme ji jako $R_{p0,2}$.

Mez pevnosti je také smluvní napětí a odpovídá maximálnímu zatížení při tahové zkoušce (obr. 3.2). Označujeme ji jako R_m .

Tažnost je maximální poměrné plastické (trvalé) prodloužení ε_p . Označuje se A (%).

Kontrakce neboli zúžení vyjadřuje maximální poměrné zúžení po přetržení zkušební tyče v %. Označuje se Z .

Výsledkem zkoušky rázem v ohybu je zjištění **nárazové práce** K (J), která vyjadřuje energii spotřebovanou na deformaci tělesa a šíření lomu tělesem.

Přechodová teplota vyjadřuje přechod mezi křehkým a houževnatým chováním materiálu. U ocelí je důležitým měřítkem schopnosti materiálu odolávat rázovému zatížení a schopnosti materiálu ke tváření za studena za dané teploty.



Otázky 3.2

4. Jaké jsou základní mechanické vlastnosti konstrukčních materiálů?
5. Co vyjadřuje pevnost?
6. Které materiály vykazují vysokou pevnost?
7. Co je to houževnatost?
8. Který z materiálů má vyšší houževnatost kovy nebo keramika? Zdůvodněte svoji odpověď.
9. Jakým způsobem je zkušební těleso namáháno při statických zkouškách?
10. Které zkoušky patří ke statickým zkouškám?
11. Jakým způsobem je zkušební těleso namáháno při dynamických zkouškách?
12. Které zkoušky patří k dynamickým zkouškám?
13. Co je výsledkem tahové zkoušky?
14. Do jakých oblastí můžeme rozdělit tahový diagram?
15. Který zákon platí v oblasti elastické (vratné) deformace?
16. Kterou materiálovou charakteristiku můžeme odečíst z oblasti elastické (vratné) deformace?
17. Jaký je rozdíl mezi smluvním a skutečným napětím? Které napětí je vyšší?
18. Které materiálové charakteristiky můžeme odečíst z pracovního (tahového) diagramu?
19. Co vyjadřuje mez pevnosti R_m ?
20. Co je to tažnost?
21. Co je to kontrakce?
22. Co je výsledkem zkoušky rázem v ohybu?
23. Co vyjadřuje vrubová houževnatost?

24. Jakou materiálovou charakteristiku získáme ze závislosti nárazové práce, resp. vrubové houževnatosti na teplotě?



Úlohy k řešení 3.2

3. Z výsledků tahové zkoušky stanovte meze kluzu R_{eH} a R_{eL} , mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakci Z , jestliže tahová zkouška byla provedena na zkušební tyči kruhového průřezu o průměru $d_0 = 10$ mm (Jednalo se „krátkou“ zkušební tyč. Jaká byla tedy počáteční měřená délka L_0 ?). Po přetržení byly naměřené rozměry $d_u = 4,9$ mm a $L_u = 72,2$ mm. Horní mez kluzu R_{eH} odpovídala síle 27,5 kN, dolní mez kluzu R_{eL} odpovídala síle 19,7 kN, maximální zatížení $F_{max} = 29,1$ kN.
4. Zkouška rázem v ohybu byla provedena na standardní zkušební tyči s V vrubem. Nárazová práce byla naměřena 121 J. Jaká je vrubová houževnatost zkoušeného vzorku, jestliže ji vyjádříme v $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$?



CD-ROM

Videa:

Zkouška tahem za okolní teploty.

Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho.

Animace:

Tahová zkušební tyč – tvar, rozměry

Tahová zkušební tyč – zatěžování

Tahový diagram – tvar tyče

Tahový diagram – oblasti

Charpyho zkušební tyč

Charpyho kladivo

Zkouška pevnosti v ohybu

Zkouška pevnosti v tlaku

Stanovení tranzitní teploty

3.3. Technologické vlastnosti



Čas ke studiu: 0,5 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat technologické vlastnosti
- definovat technologické vlastnosti.
- popsat princip některých technologických zkoušek



Výklad

□ Technologické vlastnosti a zkoušky

Technologické vlastnosti nám určují vhodnost materiálu k určitým technologickým operacím a postupům. Nejdůležitější technologické vlastnosti jsou **tvařitelnost**, **svařitelnost**, **slévateľnost** a **obrobitelnost**.

Tvařitelnost je schopnost materiálu vytvořit požadovaný výrobek bez vad plastickou deformací za tepla nebo za studena.

Svařitelnost je schopnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných vlastností. Svařitelnost se hodnotí z hlediska technologického (závisí na zvolené technologii a parametrech svařování), metalurgického (závisí na složení, struktuře svařovaného materiálu, rozměrových změnách a pnutí vzniklých během svařování) a konstrukčního (závisí na tvarovém řešení svarového spoje).

Slévateľnost je schopnost vytvořit odlitek předepsaného tvaru a rozměrů bez vad a s odpovídajícími vlastnostmi. Představuje souhrn slévářenských vlastností jako jsou tavitelnost, tekutost, smršťování, odmišení, pohlcování plynů. Základní vlastnosti jsou zabíhavost a smrštění kovu.

Obrobitelnost popisuje způsob obrábění materiálu, práci, která se vynaloží na oddělení třísky a stupeň drsnosti, který se po obrobení dosáhne.

Technologické vlastnosti nelze vyjádřit pomocí fyzikálních veličin, ale zjišťují se pomocí technologických zkoušek. Charakteristickými technologickými zkouškami jsou zkoušky lámavosti, hlubokotažnosti, zabíhavosti, zkouška na stanovení stupně obrobitelnosti. Postup většiny technologických zkoušek je normovaný. My si uvedeme pro ilustraci dvě technologické zkoušky, a to zkoušku tvařitelnosti podle Erichsena a zkoušku drátů střídavým ohybem.

Princip **zkoušky tvařitelnosti podle Erichsena** spočívá ve vtlačování kulovitého razníku do plechu o tloušťce do 2 mm, přičemž se pozoruje povrch vzorku. V okamžiku, kdy se na

povrchu hloubeného plechu objeví trhlinka přes celou tloušťku plechu, se zkouška zastaví a odečte se prohloubení h , které představuje Erichsonovo číslo IE .

Zkouška drátů střídavým ohybem spočívá ve střídavém ohýbání drátu určitého průměru v úhlu 90° z výchozí polohy na obě strany. Za jeden ohyb se považuje ohyb o úhel 90° a zpět do výchozí polohy. Ohyb, při kterém došlo k porušení vzorku, se nepočítá. Pro drát určitého průměru jsou stanoveny poloměr čelistí, přes které se ohyb provádí, a vzdálenost unášече od válečkových čelistí.



Shrnutí pojmů 3.3

Technologické vlastnosti jsou **tvařitelnost**, **svařitelnost**, **slévatelnost** a **obrobitelnost**. Technologické vlastnosti není možné vyjádřit pomocí fyzikálních veličin, ale zjišťují se pomocí technologických zkoušek.



Otázky 3.3

25. K čemu potřebujeme znát technologické vlastnosti materiálů?
26. Jste schopni vyjmenovat některé technologické zkoušky?



CD-ROM

Videa:

Zkouška tvařitelnosti pole Erichsena.

Zkouška drátů střídavým ohybem.



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. Degradaci 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

Otázky

- O 3.1. Vlastnosti materiálu závisí na struktuře materiálu, chemickém složení, technologii výroby a zpracování materiálu.
- O 3.2. Anizotropie vlastností představuje významnou odlišnost vlastností krystalické látky v různých krystalografických směrech.
- O 3.3. Materiálové charakteristiky.
- O 3.4. Pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost.
- O 3.5. Pevnost vyjadřuje maximální napětí, kterým můžeme materiál zatížit, aniž by došlo ke vzniku defektů nebo jeho porušení.
- O 3.6. Materiály s kovalentní vazbou (např. diamant), kovové materiály.
- O 3.7. Houževnatost je charakterizována jako odpor materiálu proti iniciaci a šíření trhlin. Houževnatost představuje energii potřebnou na plastickou deformaci materiálu.
- O 3.8. Kovy; mají vyšší je schopnost plasticky se deformovat než keramika.
- O 3.9. Při statických zkouškách se hodnotí chování materiálu při působení stálých nebo pomalu a spojitě měnících se sil.
- O 3.10. Např. zkouška tahem a zkoušky tvrdosti.
- O 3.11. Buď rázově, kdy zatížení roste skokem, nebo cyklicky, při opakované namáhání.
- O 3.12. Zkoušky rázové (např. zkouška rázem v ohybu podle Charpyho) a zkoušky únavové.
- O 3.13. Pracovní (tahový) diagram.
- O 3.14. Pracovní diagram můžeme rozdělit na několik oblastí: na oblast elastické (pružné, vratné) deformace, rovnoměrné plastické deformace a nerovnoměrné plastické deformace.
- O 3.15. Hookův zákon.
- O 3.16. Modul pružnosti v tahu E (GPa).
- O 3.17. Smluvní napětí se vztahuje počátečnímu průřezu S_0 , skutečné napětí se vztahuje k okamžitému průřezu S pro dané zatížení. Skutečné napětí je větší.
- O 3.18. Mez kluzu R_e (MPa), mez pevnosti R_m (MPa), tažnost A (%), modul pružnosti v tahu E (GPa).
- O 3.19. Mez pevnosti R_m je smluvní napětí a odpovídá maximálnímu zatížení při tahové zkoušce.
- O 3.20. Tažnost je maximální poměrné plastické (trvalé) prodloužení ε_p . Označuje se A (%).
- O 3.21. Kontrakce neboli zúžení vyjadřuje maximální poměrné zúžení po přetržení

zkušební tyče v %. Označuje se Z .

- O 3.22. Výsledkem zkoušky rázem v ohybu je zjištění nárazové práce K (J), která vyjadřuje energie spotřebovanou na deformaci tělesa a šíření lomu tělesem.
- O 3.23. Vrubová houževnatost je nárazová práce vztažená na plochu pod vrubem. Označuje se KC ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$).
- O 3.24. Přechodovou, neboli tranzitní teplotu.
- O 3.25. Technologické vlastnosti nám určují vhodnost materiálu k určitým technologickým operacím a postupům, např. jak se materiál bude chovat při plastické deformaci za tepla nebo za studena, jak se bude svařovat, slévat či obrábět.
- O 3.26. Zkouška tvařitelnosti pole Erichsena, zkouška drátů střídavým ohybem.

Úlohy k řešení

- Ú 3.1. Elektrická vodivost [jednotka S (siemens)], elektrický odpor R [jednotka Ω (ohm)]. Intenzita magnetického pole H [jednotka $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$], magnetická indukce B [jednotka T (tesla)].
- Ú 3.2. Válcovaná ocel, dřevo, kompozitní materiál vyztužený podélnými vlákny.
- Ú 3.3. Horní mez kluzu $R_{eH} = 350$ MPa, dolní mez kluzu $R_{eL} = 251$ MPa, mez pevnosti $R_m = 370$ MPa, tažnost $A_5 = 44,4$ % a kontrakce $Z = 76$ %.
- Ú 3.4. Vrubová houževnatost $KC = \frac{K}{S_0}$, kde $K = 121$ J a $S_0 = 0,8$ cm². $KCV = 151$ J·cm⁻².

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).

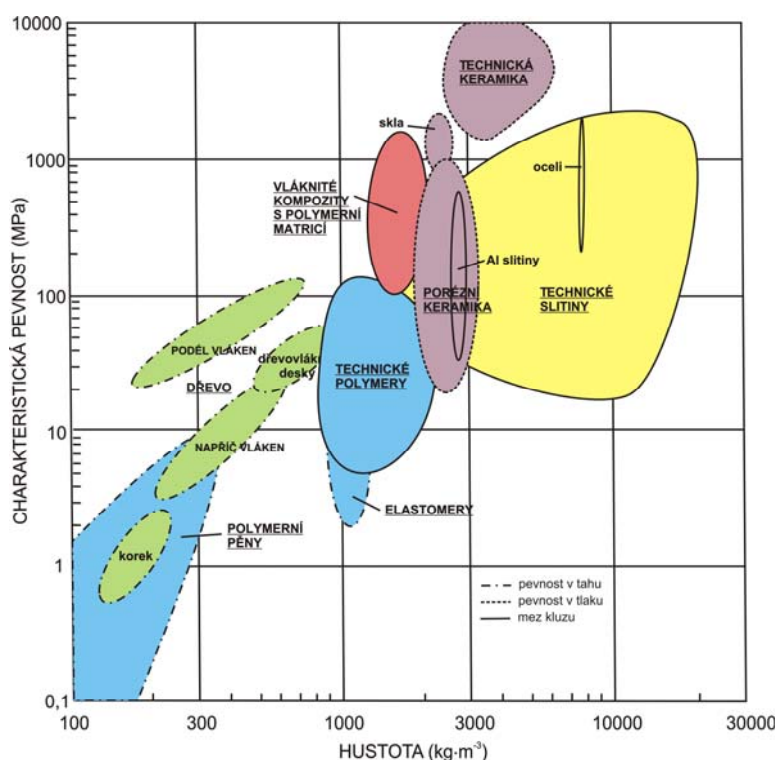
Pozn.: Známe-li E můžeme pro kovy s kubickou mřížkou vypočítat G podle vztahu $G=E/2(1+\mu)$, kde μ je bezrozměrné - Poissonovo číslo, vyjadřující poměr příčné kontrakce. Např. pro normální teplotu pro ocel a hořčíkové slitiny je $\mu=0,3$, pro litinu je $\mu=0,25$, pro hliník a jeho slitiny, bronz a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

plastickou deformací, zjemněním velikostí zrna, malými cizími částicemi – precipitáty, substitučními nebo intersticiálními atomy.

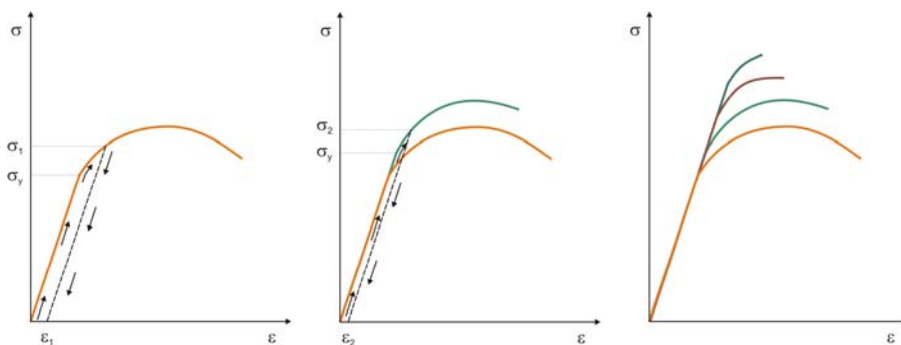
Zpevnění kovů předchozí plastickou deformací

Jak je možné zpevnit materiál předchozí plastickou deformací? Materiál má určitou původní mez kluzu R_{e0} . Tento materiál budeme plasticky deformovat nad mezí kluzu R_{e0} a následně ho odlehčíme. Při plastické deformaci se v materiálu vytvářejí nové dislokace (proces multiplikace) a jejich hustota vzrůstá z hodnoty, např. z 10^{12} m^{-2} na 10^{15} m^{-2} a zjednodušeně řečeno, dislokace si při zatěžování vzájemně překáží. Tím se zvýší mez kluzu. Novou mez kluzu označíme jako R_{e1} . Rozdíl mezi novou a původní mezí kluzu vyjadřuje přírůstek zpevnění ΔR_e ($\Delta\sigma$). Přírůstek zpevnění závisí na hustotě dislokací ρ a konstantě k , která zahrnuje modulu pružnosti ve smyku G a faktory, které charakterizují dislokace.

$$\Delta R = \Delta\sigma = k\sqrt{\rho}$$

rov. 4.3

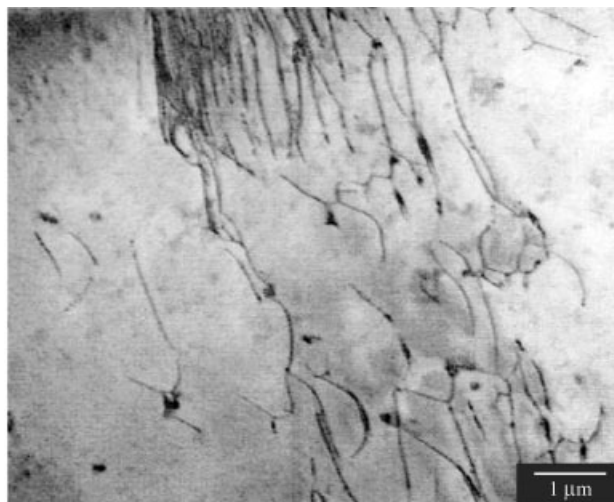
Se zvyšující se mezí kluzu R_e roste i mez pevnosti R_m , ale zároveň dochází k poklesu tažnosti A a kontrakce Z . Celý princip zpevnění kovů předchozí plastickou deformací při přerušované tahové zkoušce je schematicky znázorněn na obr. 4.2. Dalším příkladem zpevnění materiálu předchozí plastickou deformací je drát, který byl před tahovou zkouškou podroben několika ohybům. Vyšší pevnost vykazují i za studena válcované plechy a pásy, případně za studena tvarované výlisky strojních součástí.



Obr. 4.2. Zpevnění kovů předchozí plastickou deformací při přerušované tahové zkoušce.

Pohyb a multiplikace dislokací je ovlivněn i jinými překážkami, nejčastěji hranicemi zrn a legujícími prvky nebo příměsemi nečistot. U čistých kovů je účinek deformačního zpevnění mnohem menší než u slitin. Dislokační strukturu lze pozorovat pomocí transmisní elektronové mikroskopie (obr. 4.3).

Pozn. Multiplikace dislokací znamená zvyšování hustoty dislokací, tj. počtu dislokací na plochu (v m^{-2}).



Obr. 4.3. Dislokační struktura zobrazená pomocí transmisní elektronové mikroskopie.

Zpevnění kovů zjemněním velikostí zrna

Hranice zrn jsou dalšími překážkami pro pohyb dislokací. Čím jemnější bude zrna, tím více hranic a tedy překážek pro pohyb dislokací v materiálu bude. U hranic zrn dochází k nakupení dislokací a během pokračující plastické deformace množství nahromaděných dislokací roste. Přírůstek meze kluzu lze definovat pomocí vztahu

$$\Delta R_s = \Delta \sigma \approx \frac{k}{\sqrt{d}} \quad \text{rov. 4.4}$$

kde d je velikost zrna (v m) a k je konstanta (v $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), která je mírou napětí a odmocniny střední dráhy nutné k překonání odporu při průchodu dislokace k hranici zrna. Zpevnění kovů zjemněním velikostí zrna závisí na chemickém složení, struktuře a také technologickém zpracování materiálu.

Zpevnění kovů malými cizími částicemi – precipitáty

Precipitáty jsou částice sekundární (cizí, jiné) fáze v základní matici. Mohou to být karbidy, nitridy, ale i např. sloučeniny dvou kovů, tzv. intermetalické částice. Tento typ zpevnění je důležitý nejen u ocelí, ale rovněž u neželezných kovů, např. slitin hliníku (dural) a slitin mědi. Uplatňuje se i u některých kompozitních materiálů. Uvedeme si příklad tohoto typu zpevnění na slitině $\text{Al} + 4 \% \text{Cu}$ (duralu). Při rychlém ochlazení slitiny se mohou vyloučit – precipitovat částice Al_2Cu . Jsou-li malé částice (průměr cca 10 nm) a hodně blízko sebe (cca 20-30 nm), tvoří účinnou překážku pohybu dislokací.

Při interakci dislokace s částicemi se mohou uplatnit dva mechanismy – mechanismus obcházení a mechanismus protnutí částic dislokacemi. V prvním případě dojde k prohnutí dislokace, obejmutí precipitátu, uzavření dislokační smyčky okolo částic a dislokační čára dále pokračuje ve svém pohybu. Schéma mechanismu obcházení částic dislokacemi je

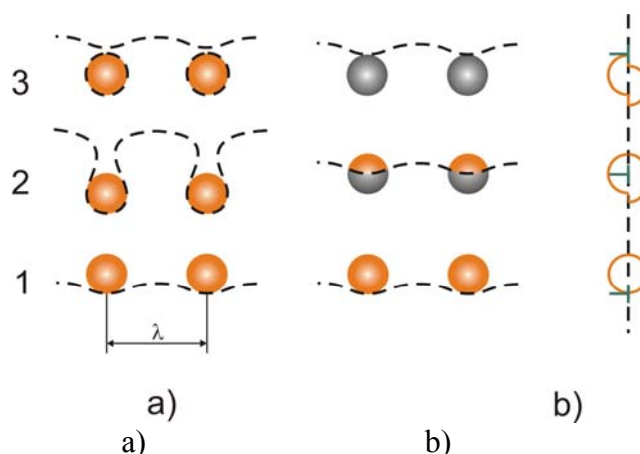
popsáno pomocí obr. 4.4a. Napětí potřebné pro protlačení dislokace přes částice precipitátu je nepřímo úměrné meziatomové vzdálenosti λ , přičemž se předpokládá, že vzdálenost λ je mnohem menší než střední velikost částic. Zvýšení meze kluzu je rovno

$$\Delta R_p = \Delta \sigma \approx \frac{1}{\lambda} \quad \text{rov. 4.5}$$

V druhém případě dislokace vniká do částice a prochází ji podle schématu na obr. 4.4b. Zvýšení meze kluzu je úměrné objemovému podílu částic f .

$$\Delta R_p = \Delta \sigma \approx \sqrt{f} \quad \text{rov. 4.6}$$

Uplatní se vždy ten mechanismus, který vyžaduje pro pohyb dislokací menší napětí.



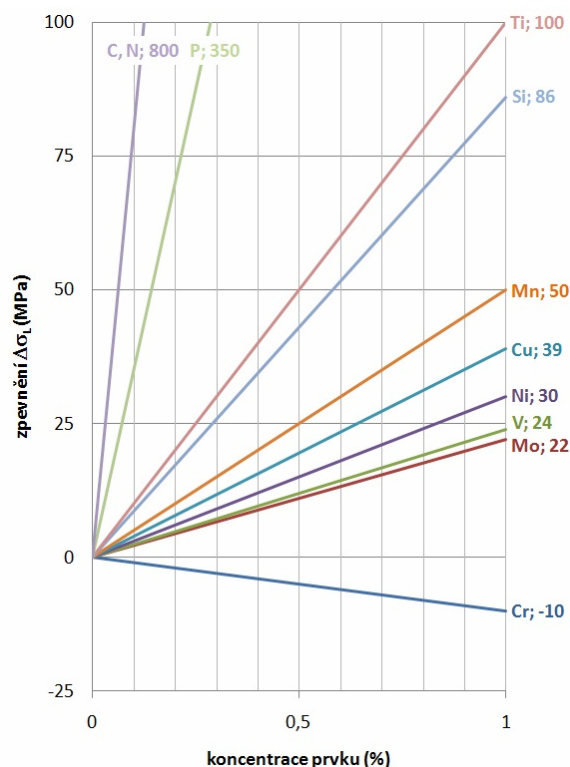
Obr. 4.4: Schéma mechanismu obcházení částic dislokacemi (a), protínání (b).

Zpevnění kovů substitučními nebo intersticiálními atomy

Substituční nebo intersticiální atomy v základní mřížce kovu mohou také tvořit překážku pro pohyb dislokací. Účinek zpevnění závisí na koncentraci legujícího prvku v tuhém roztoku c v hm. %

$$\Delta R_p = \Delta \sigma \approx \sqrt{c} \quad \text{rov. 4.5}$$

Napětí vyvolané v okolí cizích atomů mění modul pružnosti materiálu, pohyb dislokací se zpomaluje a plastická deformace se stává obtížnější. Zpevnění intersticiálními atomy je účinnější než zpevnění substitučními atomy. Zpevnění železa α vybranými substitučními a intersticiálními atomy je uvedeno na obr. 4.5.



Obr. 4.5. Zpevnění železa α vybranými substitučními a intersticiálními atomy.



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.

Zpevnění kovů předchází plastickou deformací

Zpevnění kovů zjemněním velikostí zrna

Zpevnění kovů malými cizími částicemi – precipitáty

Zpevnění kovů substitučními nebo intersticiálními atomy



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. Jakým 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?



CD-ROM

- Zpevnění kovů plastickou deformací.

4.2. Slitiny železa - oceli



Čas ke studiu: 3 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

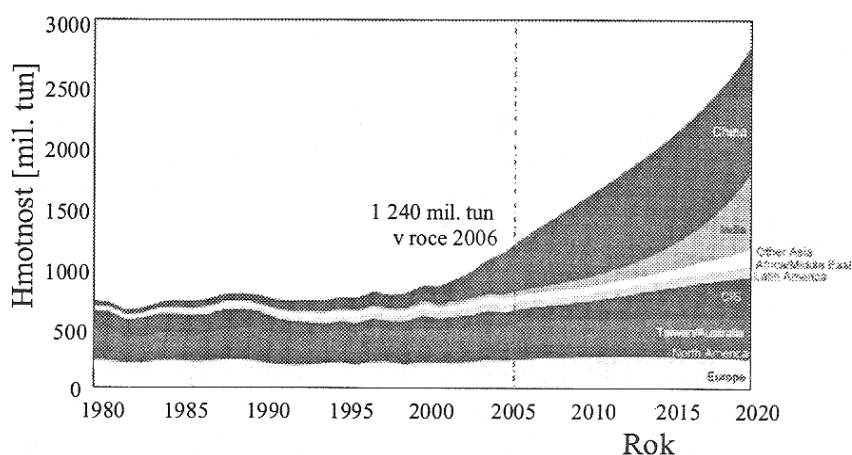
- vysvětlit, co jsou to oceli
- definovat na čem závisí vlastnosti ocelí
- umět zařadit oceli do skupin a znát jejich použití



Výklad

□ Železo a slitiny železa s uhlíkem

Slitiny železa představují nejvíce používaný konstrukční materiál ve strojírenství. Výroba oceli v posledních letech stále roste (obr. 4.6). 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. 4.6. 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.

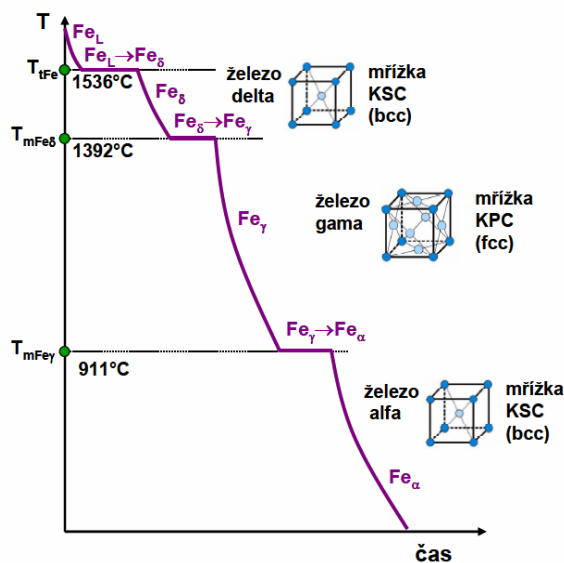
Tab. 4.1. Základní vlastnosti železa

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. 4.7.



Obr. 4.7. Krystalové modifikace čistého železa – křivka chladnutí, oblasti stability

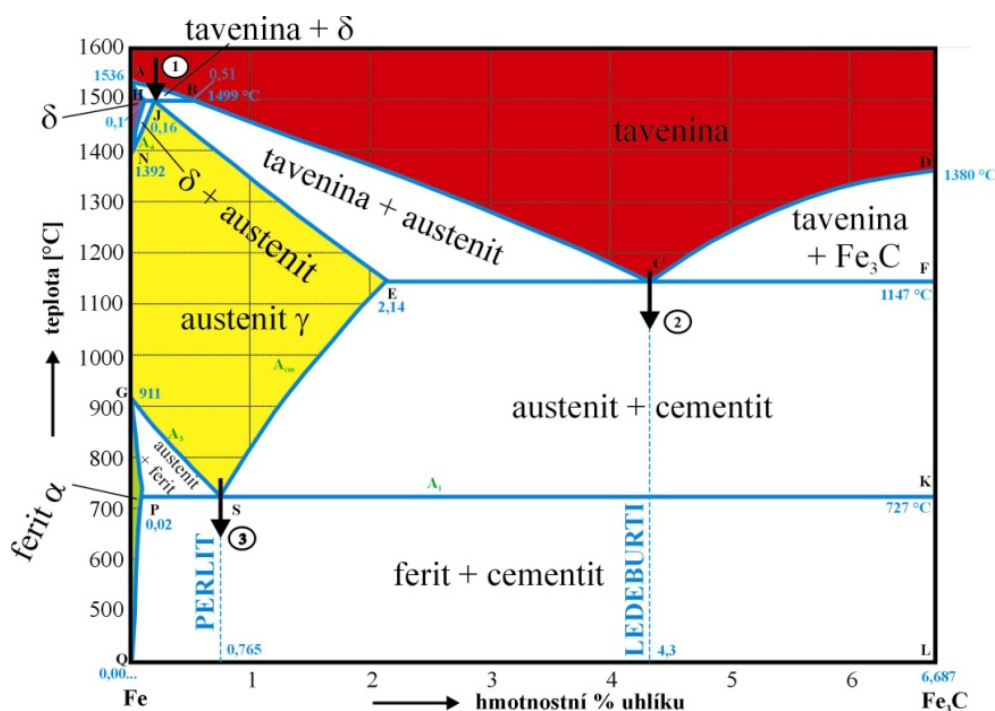
Na obr. 4.7 je zobrazena i křivka chladnutí čistého železa. Z ní je zřejmé, že fázové přeměny čistého železa v pevném stavu teoreticky probíhají, stejně jako tuhnutí, při konstantní teplotě a na křivce chladnutí se projeví existencí prodlevy.

□ 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** (viz kap. 2.3). 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. 4.8.



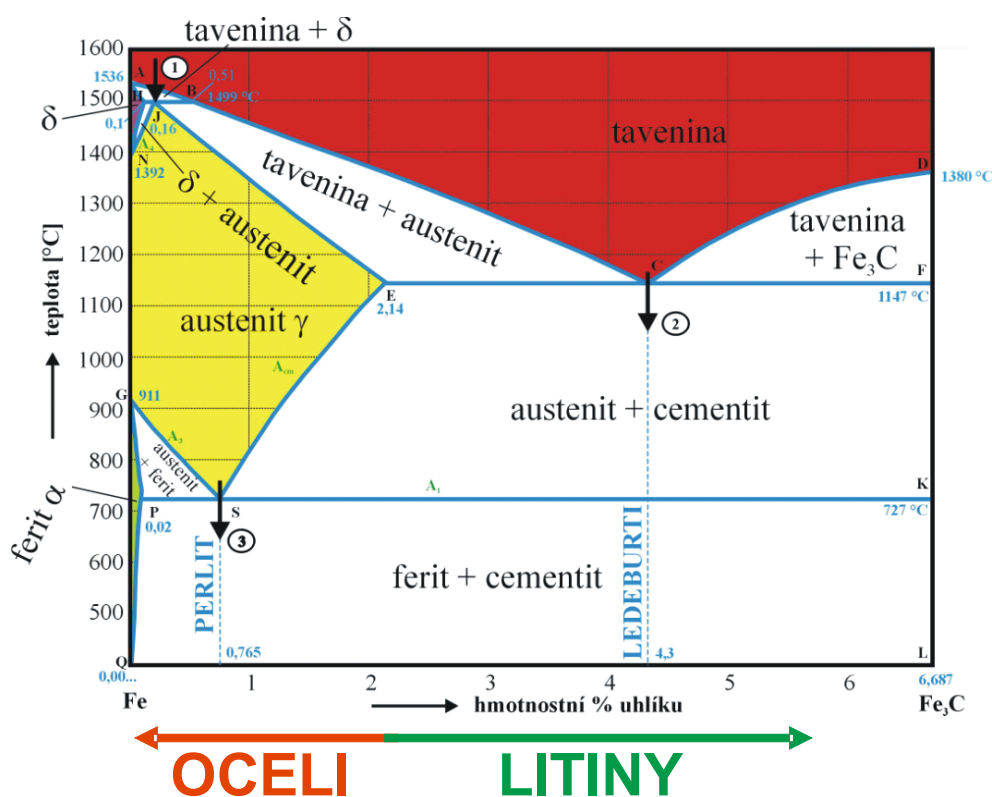
Obr. 4.8. Oblasti výskytu intersticiálních tuhých roztoků v rovnovážném diagramu metastabilní soustavy Fe – C.

Za povšimnutí stojí mnohem vyšší rozpustnost uhlíku v austenitu. To souvisí s typem krystalové mřížky, jak již bylo uvedeno v kap. 2.3. 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 (viz kap. 2.5). **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

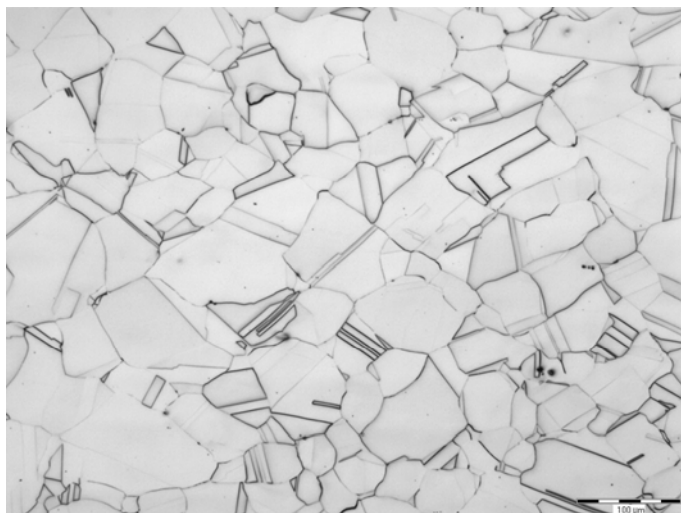
obsahují více než 2 hm. % uhlíku. Obsah uhlíku v litinách obvykle nepřesahuje 5 hm. %. Rozdělení slitin železa a uhlíku na oceli a litiny je uvedeno na obr. 4.9.



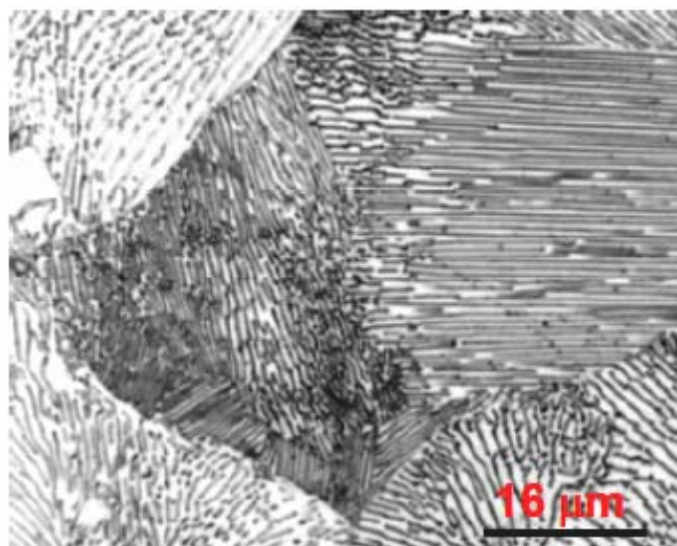
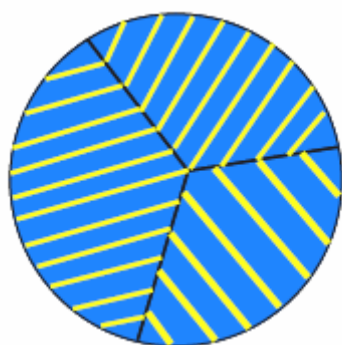
Obr. 4.9. Schematické rozdělení slitin železa a uhlíku v rovnovážném diagramu metastabilní soustavy Fe – C.

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. 4.10). 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. 4.11). 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. 4.10. Struktura austenitu.



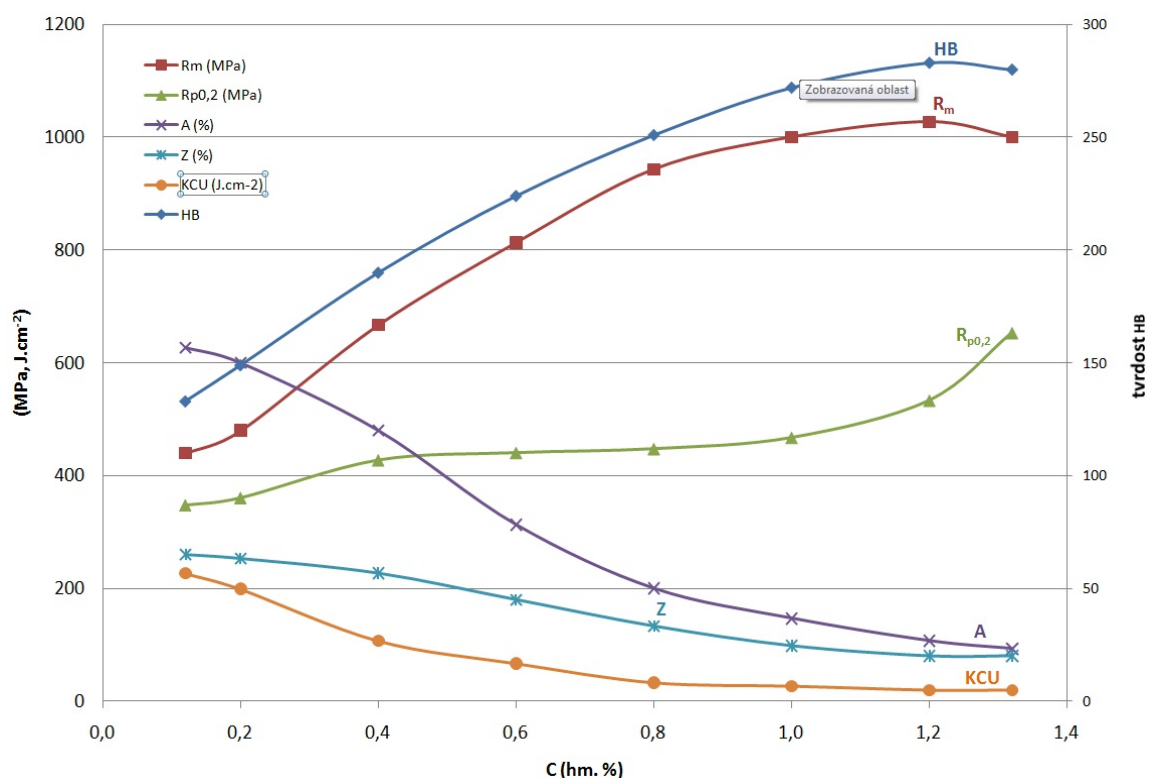
Obr. 4.11. Struktura perlitu. Jsou vidět hranice původních austenitických zrn a lamely cementitu (na náčrtu žluté, na snímku šedé), které se střídají s lamely feritu (na náčrtu modré, na snímku vpravo bílé).

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 ochlazení 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. 4.12).



Obr. 4.12. 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 rozpuštěný 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 kteréhokoli 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 zušlechťovaném 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)

□ Příklady použití ocelí

S výrobky z oceli se setkáváme denně ve svém okolí. Pro ilustraci si uvedeme alespoň čtyři příklady výrobků z různých typů ocelí, a to kolejnice, nádobí z nerezavějící oceli, plechy na výrobu karoserií automobilů a sekera.

Kolejnice

Jaké vlastnosti požadujeme pro správnou funkci kolejnic? Je to dostatečná pevnost a otěruvzdornost, tedy odolnost vůči opotřebení. Kolejnice musí mít i jistou houževnatost, a to i za nízkých teplot (v zimě), protože některé oceli za nízkých teplot křehnou. Kolejnice musí mít také velmi dobrou odolnost proti kontaktní únavě.

Na výrobu kolejnic se používá perlitická ocel s obsahem uhlíku 0,5 až 0,8 hm. % nelegovaná nebo legovaná Mn a Cr, popř. V. Pro všechny jakosti oceli je předepsaný maximální obsah vodíku (do 2,5 ppm v tavenině u výše pevných ocelí). Obsah síry je omezen na 0,008 až 0,025 hm. % a fosforu na 0,025 hm. %. Na životnost kolejí má vliv čistota oceli – množství oxidických vměstků, které zvyšují náchylnost ke kontaktní únavě. Minimální mez pevnosti R_m se pohybuje v rozmezí od 770 do 1080 MPa, tvrdost od 220 do 360 HB. Na výrobu kolejí se používají např. oceli jakosti 220, 260, 260Mn, 320Cr (čísllice udává min. tvrdost HB podle Brinella).

Vývoj nových materiálů vede k ocelím s nižším obsahem uhlíku a bainitickou strukturou, která má vyšší mez pevnosti a mírně zvýšenou tažnost. Oceli se legují Mn, Nb a V a dosahují pevnosti až 1400 MPa.

Nádobí z nerezavějící oceli

Co by měl splňovat materiál na výrobu nádobí? Nádobí by se mělo dát dobře vyrobit – tvářením za studena, mělo by být odolné proti korozi, hygienicky nezávadné a mělo by mít také pěkný vzhled.

Z čeho se tedy nerezavějící nádobí vyrábí? 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 (znáte z reklamy označení 18/10?). Obsah uhlíku je ale velmi malý (0,03 % C). Takto legovaná ocel bude mít jinou strukturu než běžná uhlíková ocel. Přídavek Ni způsobí, že se oblast austenitu rozšíří a bude existovat i za normální teploty. Vliv drahého niklu lze nahradit přídavkem austenitotvorného manganu.

Austenitické oceli jsou houževnaté s tažností až do 40 %. Mají ale nízkou mez kluzu R_e okolo 200 MPa a mez pevnosti R_m 550 až 650 MPa a jsou hůře obrobitelné. Pro zvýšení meze kluzu se austenitické oceli legují dusíkem. Austenitické oceli mají však velmi dobrou korozní odolnost v oxidačním prostředí a ve slabých organických kyselinách, kyselině chlorovodíkové a sírové. Austenitické oceli jsou nekalitelné a ve vyžíhaném stavu nemagnetické.

Vybrané značky austenitotvorných ocelí jsou X2CrNi18-10, X2CrNiMo17-12-2.

Plechý na výrobu karosérií automobilů

Jaké vlastnosti by měl mít materiál na výrobu karosérií automobilů? Za prvé by se měl dát lisovat na příslušný tvar, tj. dobře deformovat (tvářet). Při nárazu musí pohltit (akumulovat) velké množství energie.

Plechý na výrobu karosérií automobilů se vyrábějí z hlubokotažných ocelí k tváření za studena. Jsou určeny pro výrobu složitých velkoplošných výlisků. Obsahují velmi málo uhlíku (méně než 0,1 hm. % C), ale málo i všech dalších prvků – Mn, Si, Cr, P, S. Obvyklé mechanické vlastnosti jsou mez kluzu R_e 180 až 280 MPa, mez pevnosti $R_m = 270 - 420$ MPa, tažnost až 40 %. Dřívější označení těchto ocelí je FeP01 až FeP06.

Moderní typy ocelí na výrobu karosérií jsou oceli na hluboký tah s nízkým obsahem uhlíku, které se nazývají ULC oceli (Ultra Low Carbon). Vyznačují se nízkým obsahem fosforu a síry do 0,015 hm. %. Obsah křemíku je snížen pod 0,10 hm. %.

Ocelím na výrobu karosérií konkurují slitiny hliníku, jejich hlavní předností je nízká hmotnost. Proto byly vyvinuty nové typy ocelí se zvýšenou pevností a mezí kluzu při zachování technologických vlastností ocelového plechu pro tváření za studena. Tyto oceli jsou označovány jako IF oceli (interstitials free steels) s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků C a N (v tisícinách hm. %) a přidavkem silných karbidotvorných prvků Ti a Nb (0,01 až 0,03 hm. %). Vzhledem k velmi dobrým plastickým vlastnostem jsou tyto oceli používány jako pásy válcované za studena pro nejnáročnější díly automobilových karosérií.

Druhou vývojovou skupinu reprezentují vysokopevnostní oceli TRIP (Transformation Induced Plasticity). U tohoto druhu ocelí se vysoké hodnoty pevnosti dosahují transformací zbytkového austenitu na martenzit při tváření za studena, přičemž doprovodným jevem je zvýšení plasticity. Chemické složení těchto ocelí je založeno na poměrně vysokých obsazích Si a Mn (1 až 2 hm. %) při obsahu uhlíku 0,1 až 0,3 hm. %. Mez kluzu se pohybuje v rozmezí $R_e = 400$ až 700 MPa, mez pevnosti $R_m = 700$ až 1100 MPa, tažnost 20 až 30 %.

Sekyra

Sekyra se vyrobena z nelegované nástrojové oceli, od které požadujeme pevnost, tvrdost a odolnost vůči opotřebení.

Nelegované nástrojové oceli se používají pro výrobu ručního nářadí a nástrojů používaných v zemědělství. Obsahují nejčastěji 0,40 až 1,10 hm. % C a nízký obsah manganu a křemíku do 0,40 hm. %. Oceli se dále tepelně zpracovávají kalením, tj. rychlým ochlazením

z austenitizační teploty (770 až 830°C) do vody nebo do oleje za vzniku martenzitické struktury. Po kalení následuje popouštění na teploty 160 až 280°C. Dosažená tvrdost činí 52 až 60 HRC (přepočteno na mez pevnosti – až 2000 MPa). Tvrdé martenzitické struktury se požaduje obvykle jen na povrchu, jádro zůstává houževnaté s perlitickou strukturou. Příklady jakostí nelegovaných nástrojových ocelí jsou C45 W, C80 W a další.



Shrnutí pojmů 4.2

Čisté železo je měkký a tvárný kov s poměrně nízkou pevností.

Železo se vyskytuje ve 3 rozdílných krystalových modifikacích: železo δ , železo γ a železo α .

Uhlík v železe vytváří tzv. **intersticiální tuhý roztok (δ -ferit, austenit, ferit)**. Rozpustnost uhlíku je rozdílná pro každou modifikaci železa.

Uhlík nad mezí rozpustnosti může být přítomen jako karbid železa Fe_3C – **cementit**, nebo jako čistý uhlík, a to ve formě **grafitu**.

Slitiny železa a uhlíku se dělí na dvě základní skupiny, **oceli a litiny**.

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).



Otázky 4.2

10. U železa se projevuje tzv. alotropie. Co to znamená?
11. Vyjmenujte alotropické modifikace železa.
12. V jakých formách se nachází uhlík v železe?
13. Jaká je maximální rozpustnost uhlíku v Fe_γ ?
14. Jaká je maximální rozpustnost uhlíku v Fe_α ?
15. Co je to cementit?
16. Jak se rozdělují slitiny železa a uhlíku?
17. Jaká strukturní součást vznikne při běžné rychlosti ochlazování austenitu?
18. Jaké meze pevnosti můžeme dosáhnout u ocelí?
19. Jaký vliv má uhlík na vlastnosti ocelí?
20. Jaké jsou nepříznivé účinky síry v oceli?
21. Které prvky zvyšují pevnost a tvrdost ocelí?
22. Které prvky zvyšují korozivzdornost ocelí?

23. Jak se rozdělují oceli podle způsobu zpracování?
24. Jak rozdělujeme oceli k tváření podle chemického složení?
25. Jaký typ ocelí se používá na výrobu kolejnic?
26. Z jaké oceli se vyrábí nerezavějící nádobí?
27. Čím se vyznačují oceli na výrobu plechů pro karosérie automobilů?
28. Jakým způsobem dochází ke zvýšení povrchové tvrdosti u nástrojů (např. sekyry)?



Úlohy k řešení 4.2

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.

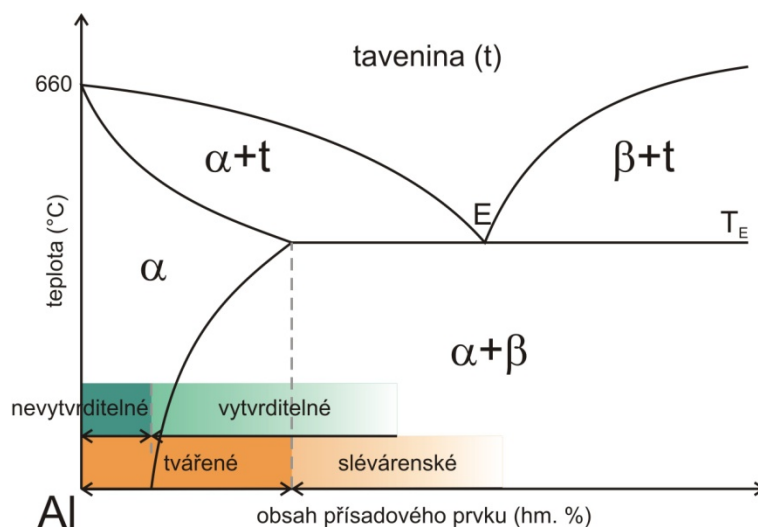
□ Hliník a jeho slitiny

Hliník je kov bílé barvy. Základní vlastnosti čistého hliníku jsou: atomové číslo $Z = 13$; atomová hmotnost $M = 26,97$, teplota tavení je 660°C . Hliník krystalizuje v kubické plošně centrované mřížce (fcc) s parametrem mřížky $a = 0,4041 \text{ nm}$. Významná je jeho nízká hustota $\rho_{20^\circ\text{C}} = 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, velmi dobrá elektrická i tepelná vodivost. Elektrická vodivost hliníku činí 65% elektrické vodivosti mědi (standard), elektrický odpor je $\rho = 2,63 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$. Součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 217,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Hliník se vyznačuje dobrou tvářitelností za tepla i za studena. Odolnost hliníku proti atmosférické korozi je dána vznikem tenkého povrchového oxidu Al_2O_3 . Odolává mořské vodě a slabším kyselinám (chlorovodíková, sírová, dusičná), není však odolný korozi v zásadách. Hliník má nízkou pevnost, kterou je možné zvýšit tvářením za studena, legováním a precipitačním zpevněním (vytvrzováním). Rozeznáváme

dva druhy hliníku, které se liší čistotou. Nejběžnější příměsemi hliníku jsou Fe a Si, kterou jsou obsaženy ve výchozích surovinách. Čistý hliník, který obsahuje více než 99,5 hm. % Al, se používá hlavně v elektrotechnice (elektrovedný materiál a materiál pro elektrické kondenzátory). Čistý hliník, který obsahuje více než 98 hm. % se používá pro nepříliš mechanicky namáhané konstrukční prvky a předměty denního použití (obaly). Používá se pro výrobu slitin. Pevnost hliníku v tahu je nízká, kolem 70 MPa, tvářením za studena lze zvýšit na 130 MPa.

Za účelem zlepšení užitných vlastností (pevnostních, odolnosti proti korozi, slévateľnosti ad.) se hliník leguje nejčastěji přísadou prvků Cu, Mg, Si, Mn, Zn a Li, které tvoří s hliníkem substituční tuhé roztoky. Vliv jednotlivých slitinových prvků lze popsat následovně: pevnost hliníku zvyšuje např. Cu, Mg, Mn, Si, Zn, Ni; odolnost proti korozi zlepšuje Mg, Mn, Si, Ni, naopak Cu, Zn a Fe snižují odolnost proti korozi; tvárnost zlepšuje Mn, Si (do 1 hm. %), naopak tvárnost snižuje Cu a Fe. Li a Mg zlepšují výtvrditelnost.

Slitiny hliníku s ostatními neželeznými kovy se podle způsobu zpracování dělí na slitiny k tváření a k odlévání (Al-Si, Al-Cu, Al-Mg). Podle schopnosti zvýšit tvrdost a pevnost tepelným zpracováním (výtvrzováním) se slitiny hliníku dělí na výtvrditelné (Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-(Cu-Mg), Al-Li) a nevýtvrditelné (Al-Mg, Al-Mn). Schéma rozdělení slitin hliníku je znázorněno na obr. 4.13.



Obr. 4.13 . Rozdělení slitin hliníku.

Pozn. Výtvrzování je proces tepelného zpracování, které se skládá z rozpouštěcího žíhání a výtvrzování. Při rozpouštěcím žíhání ohříváme slitinu do oblasti homogenní fáze α , následuje rychlé ochlazení a precipitační výtvrzování (stárnutí). Při precipitačním výtvrzování se vylučují velmi malé disperzní částice sekundární fáze v matici. Přitom dochází ke zvýšení pevnosti a tvrdosti některých slitin.

□ Slitiny hliníku určené k tváření

Slitiny určené k tváření mohou být vytvrditelné a nevytvrditelné. **Nevytvrditelné slitiny** obsahují menší množství přísad. Mají jednofázovou strukturu i při okolní teplotě. Jsou velmi dobře tvárné za studena i za tepla. Nejběžnějšími nevytvrditelnými slitinami hliníku jsou slitiny **Al-Mn** a **Al-Mg**. Jejich předností je dobrá svařitelnost, tvařitelnost, odolnost proti vibračnímu zatížení a dobrá lomová houževnatost. Pevnost slitiny Al-Mg se dá zvýšit deformačním zpevněním (tedy tvářením za studena) ze 140 MPa až na 420 MPa. Obdobné vlastnosti má i slitina Al-Mn. Je často používána jako pevnější náhrada čistého hliníku.

Slitiny Al-Cu-Mg představují základní skupinu vytvrditelných slitin určených k tváření, které se nazývají **duraly**. Jsou to slitiny obsahující asi 4 % Cu a menší přísady Mn a Mg (AlCu4Mg). Dural je tvárný za tepla i za studena, kromě toho ho lze obrábět. Má nižší odolnost proti korozi, proto se plátuje čistým Al nebo slitinou AlMn1. Po vytvrzení dosahuje pevnosti R_m až 400 MPa. Další zvýšení pevnosti (až na 500 MPa) lze získat přidávkou Mg a Mn, tzv. superural. Dural je konstrukční materiál, ze kterého se vyrábějí plechy, pásy, tyče, profily, které se využívají pro stavbu letadel a dopravních zařízení.

Slitiny Al-Cu-Ni obsahují navíc od duralů ještě přísadu 2 % Ni a zvýšený obsah Mg a Fe, někdy Si a Ti. Nikl brání poklesu tvrdosti při zvýšených teplotách (do 300°C), Mg a Si zvyšují pevnost a tvrdost po vytvrzení, Fe a Ti zjemňují zrna. Pevnost v tahu po vytvrzení se dosahuje až 400 MPa, tažnost 20 %. Tyto slitiny se používají na výrobu součástek, které pracují při teplotách 200 až 300°C, např. písty spalovacích motorů, rotory a lopatky kompresorů.

Slitiny Al-Mg-Si jsou vytvrditelné slitiny s nižší pevností, ale vyšší korozní odolností a houževnatostí než duraly. Používají se na výrobu středně mechanicky namáhaných konstrukcí dopravních prostředků a zařízení potravinářského průmyslu, od kterých se požaduje chemická odolnost. Základní pevnost slitin je 150 MPa, po vytvrzování 300 MPa a následujícím tváření až 400 MPa.

Slitiny Al-Li jsou nové slitiny pro letecký průmysl. Příklad Li snižuje hustotu hliníkových slitin na 543 kg·m⁻³. Do většiny Al-Li slitin se přidává Zr. Slitiny typu AlLiCuMgZr mají vysokou hodnotu modulu pružnosti, která umožňuje snížit hmotnost letadel o 7,5 % v porovnání s konstrukcemi z duralu.

□ Slitiny hliníku určené k odlévání

Slitiny určené k odlévání jsou charakteristické vyšším obsahem přísad. Tyto slitiny musí být především dobře slévateľné, ale zároveň musí mít dobré mechanické vlastnosti, odolnost proti korozi, musí být svařitelné a obrobiteľné. Hlavní legurou je křemík, který zvyšuje zabíhavost. Tyto slitiny se nazývají **siluminy**. Nejlepší slévářenské vlastnosti mají slitiny s eutektickým složením (s obsahem Si 10 až 13 hm. %). Siluminy Al-Si mají dobrou korozní odolnost, ale nižší pevnost. Používají se jako hliníkové pájky (např. AlSi5, AlSi12). K odlévání tvarových

odliték se používají pevnější speciální siluminy. Pro zlepšení pevnostních charakteristik se používají přídavky Mg a Cu, které zajišťují vytvrditelnost těchto slitin, i když se zhorší jejich slévateľnost. Ze speciálních siluminů jsou odlévány tvarově složité a tenkostěnné odlitky, např. skříně převodovek, písty a hlavy válců, disky kol, součásti pro letadla.



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

29. Co je rozhodujícím kritériem pro dělení neželezných kovů na lehké a těžké?
30. Jak se dělí slitiny hliníku?
31. Co jsou to duraly? Jaké mají uplatnění?
32. 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.

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 degrační procesy. VŠB Ostrava, 1993. 1. vyd. 187 s. ISBN 80-7078-207-2.

Strnadel B.: Nauka o materiálu II. Degradční 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 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.

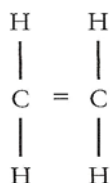


Výklad

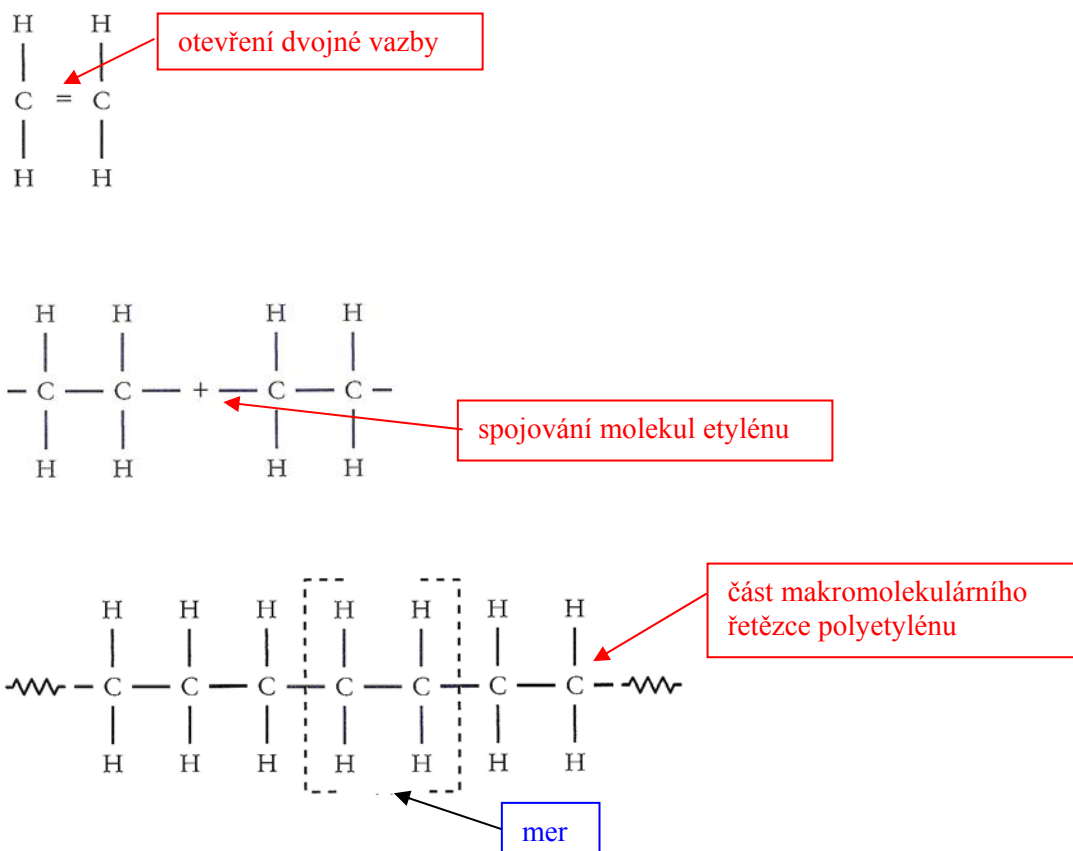
□ Úvod – základní pojmy, příklad vzniku polyetylénu

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. Etylén je v daném případě monomer. Etylén 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.

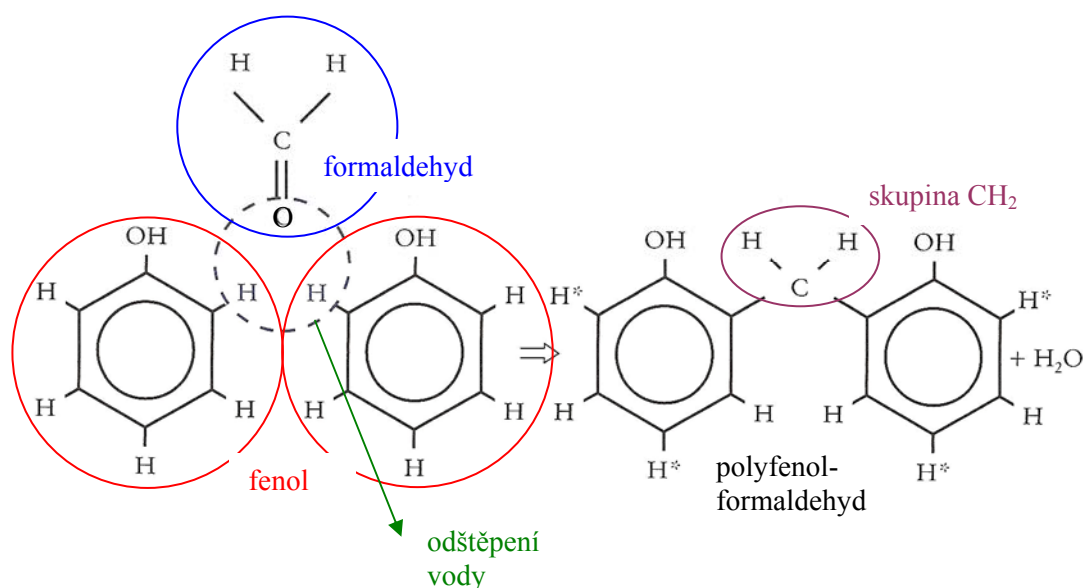
Reaktoplasty vznikají obvykle polymerací, která má charakter chemické reakce. Při svém vzniku mohou být tvarovány. Po proběhnutí reakci jsou již reaktoplasty tvrdé, křehké a netvarovatelné. Snad nejznámějším reaktoplastem je bakelit, což je polyfenolformaldehyd.

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

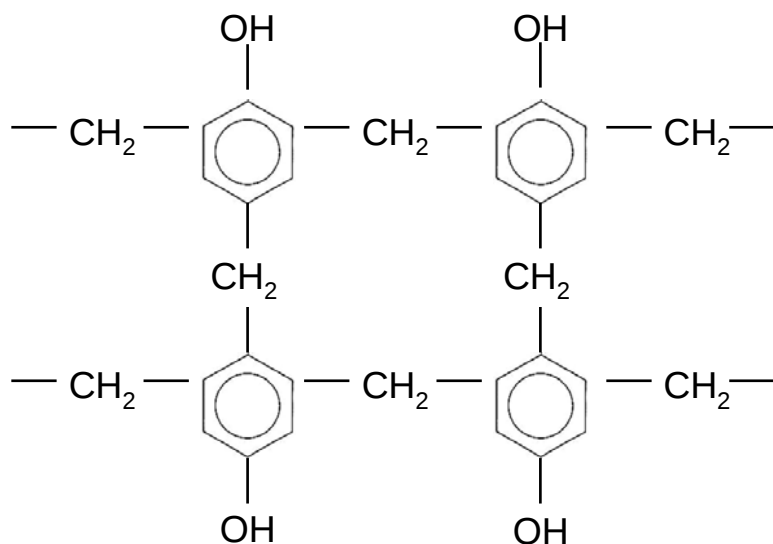
Na tomto místě popíšeme stručně ještě proces polymerace, kterým vzniká bakelit, tedy polyfenolformaldehyd. Proces polymerace se nazývá **polykondenzace** (někdy také **kondenzační polymerace**) a vzniká při něm meziprodukt, jímž je voda.

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?



CD-ROM

- Polymerace polyetylénu;
- Polymerace polyfenolformaldehydu (bakelitu).

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.

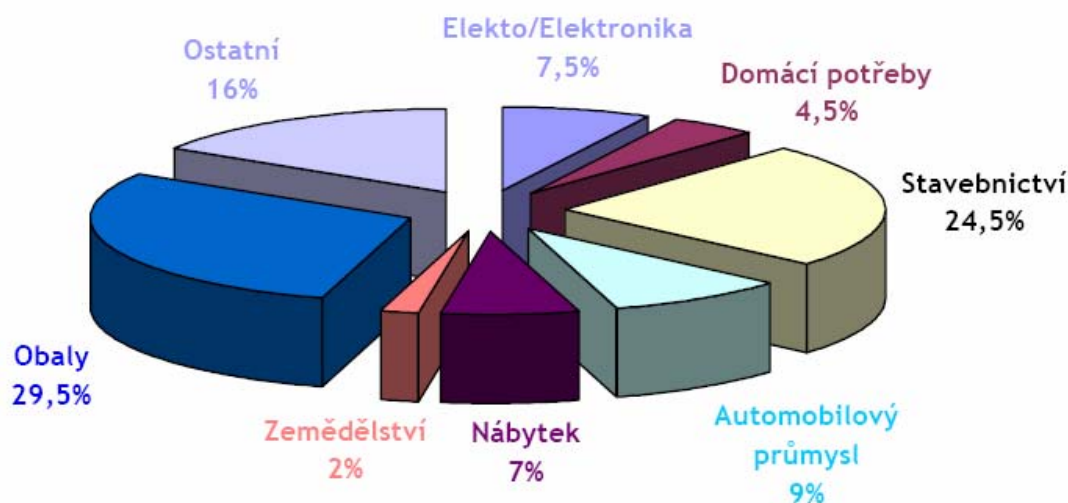
Dalším významným mezníkem je počátek výroby **celuloidu**. Ten bývá připisován jednak Angličanu Parkesovi, jednak bratřím Hayttům z USA. Říká se, že jedním z impulsů k jeho výrobě byla potřeba náhrady materiálu pro kulečnickové koule. Ty se do té doby vyráběly ze slonoviny, a jak jí začalo ubývat, hledal 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, skříňky 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

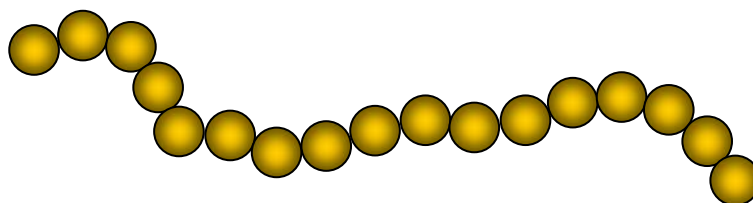
- popsat druhy řetězců v polymerech;
- definovat atomární strukturu řetězců včetně vazeb mezi atomy;
- vysvětlit, co znamená stereoizomerie polymerů a s čím souvisí;
- objasnit, co znamená amorfní a krystalický stav polymerů a na čem přednostně závisí.

□ 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:

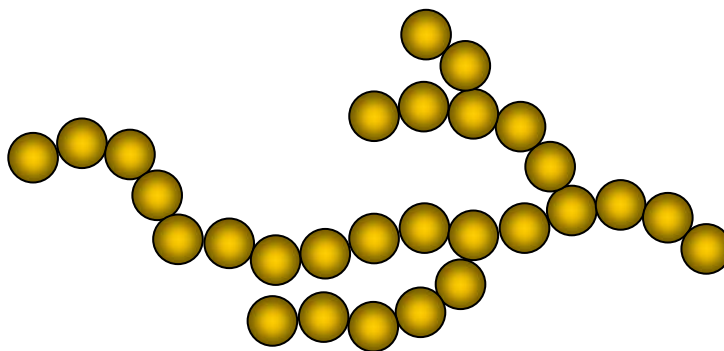
- Jednoduchý (lineární) řetězec;
- Rozvětvený řetězec;
- prostorově zesítený řetězec;
- Slabě (částečně) zesítený řetězec.

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.



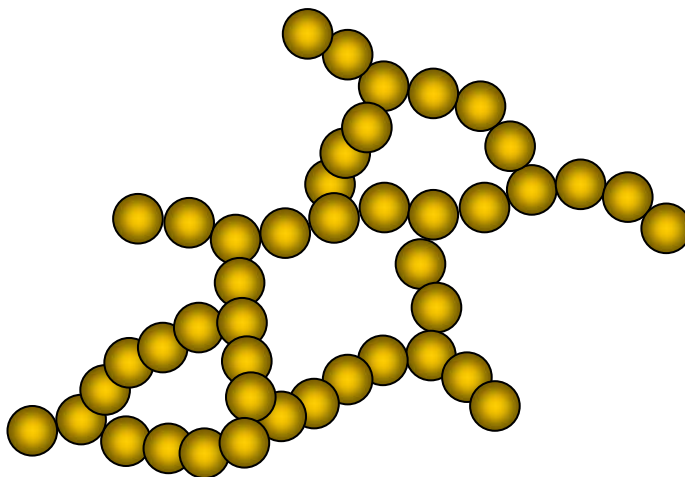
Obr. 5.4 Schematické znázornění jednoduchého řetězce v polymeru

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.



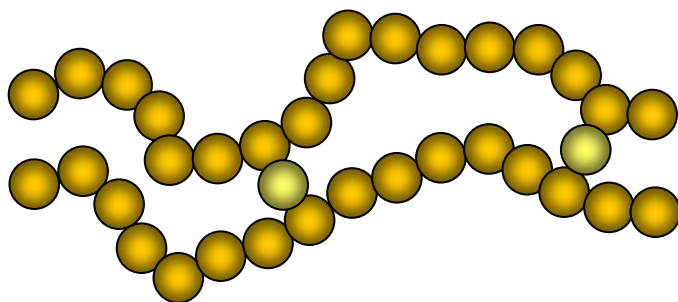
Obr. 5.5 Příklad rozvětveného řetězce v polymeru

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.

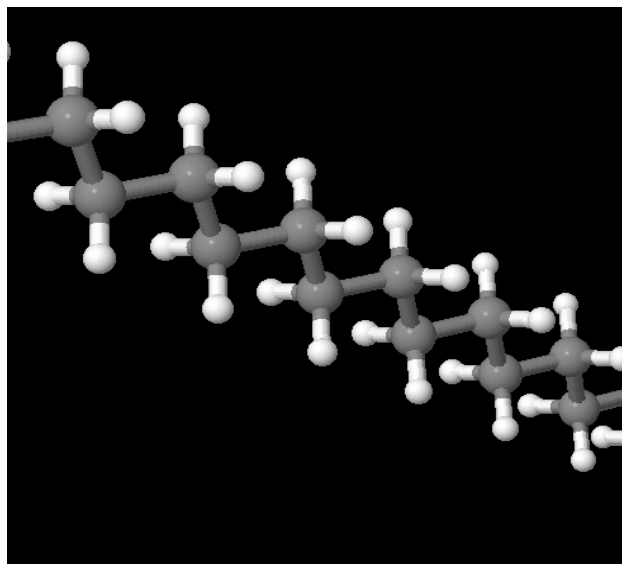


Obr. 5.7 Příklad slabě zesíťného řetězce

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**.

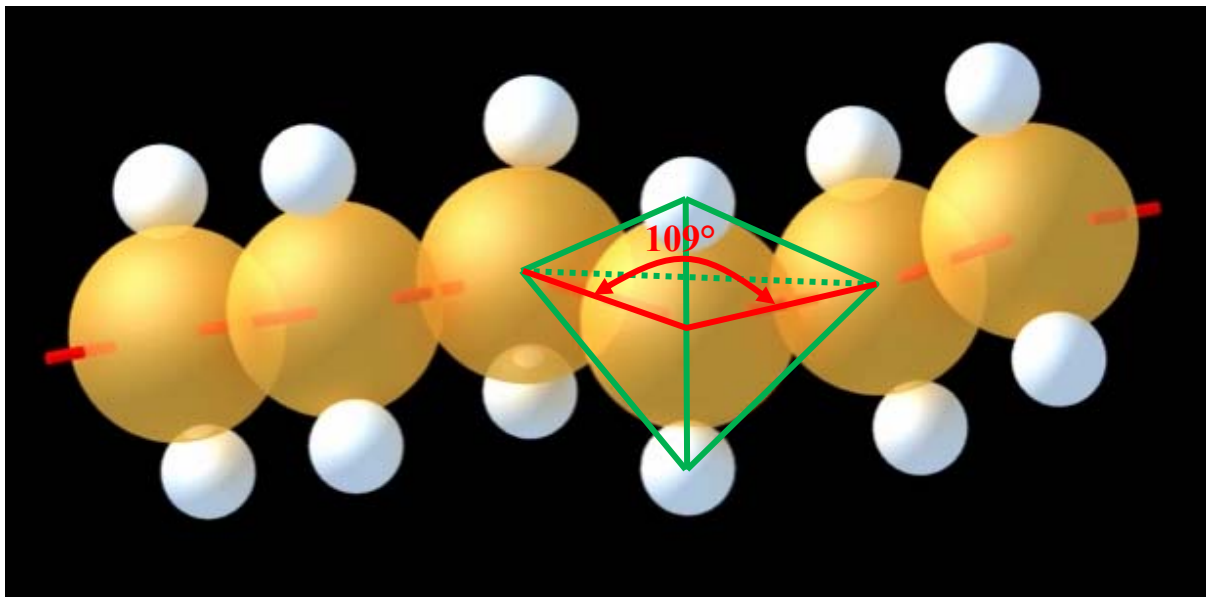
□ Atomární struktura řetězce

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.



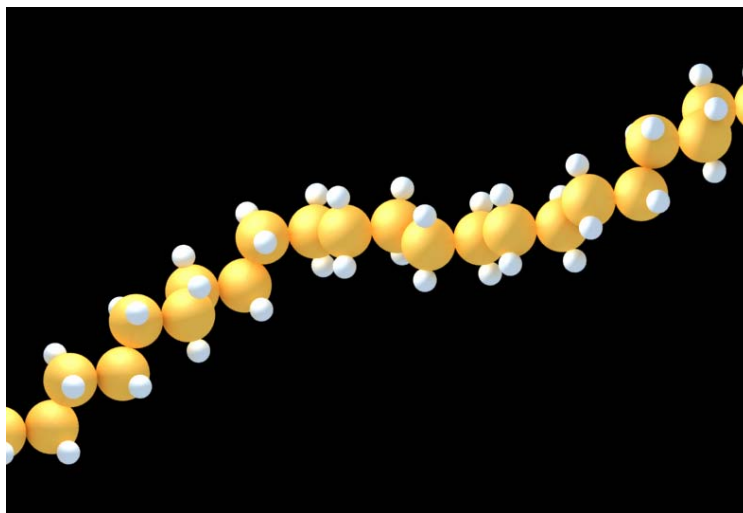
Obr. 5.8 Část atomární struktury v řetězci polyetylénu

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.



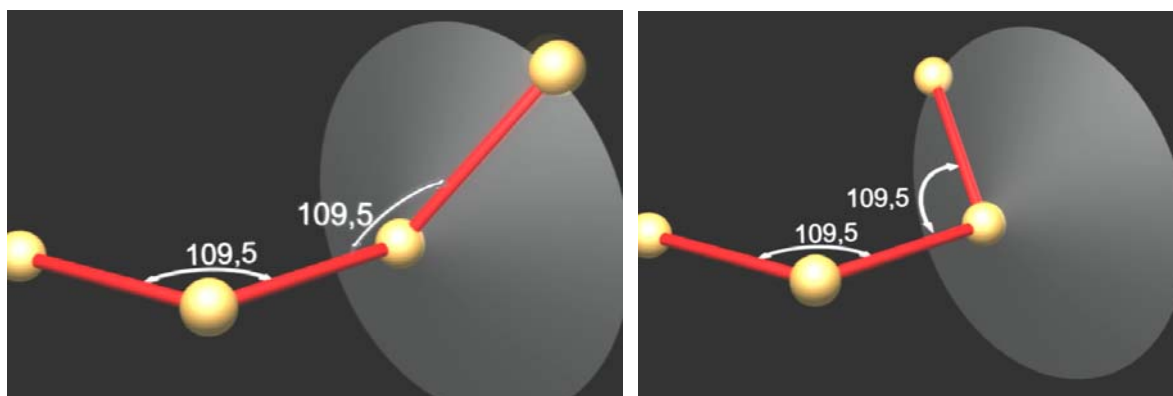
Obr. 5.9 Geometrické poměry v atomární struktuře řetězce polyetylénu

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.

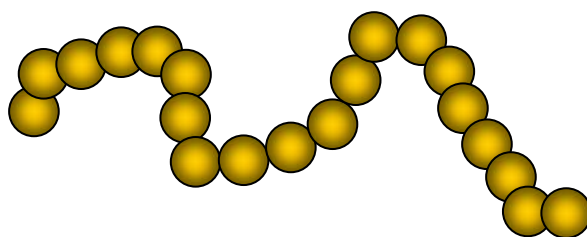


a)

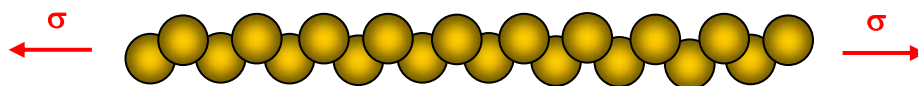
b)

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 spojnicemi atomů uhlíku v „páteři řetězce“ úhel $109,5^\circ$, pak pro další sousední atom bude tato podmínka splněna kdekoli na konci úsečky, která je površkou kuželové plochy, pro kterou platí – viz obr. 5.11, že doplňkový úhel do 180° k polovině vrcholového úhlu kužele je právě $109,5^\circ$. 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 zesítěné, 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

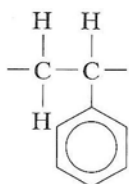


Obr. 5.12b Napřímený řetězec termoplastu při působení vnějšího napětí σ

□ 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.

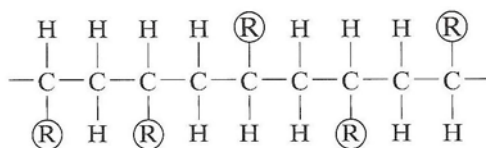
Ataktické uspořádání znamená statisticky náhodné pospojování molekul bez přednostní orientace bočních radikálů.

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

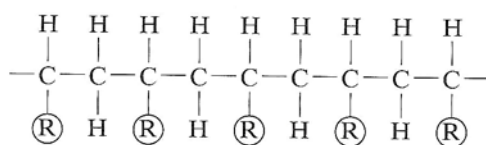
Syndiotaktické uspořádání znamená, že boční radikály jsou u jednotlivých molekul uspořádány střídavě (zrcadlově).

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

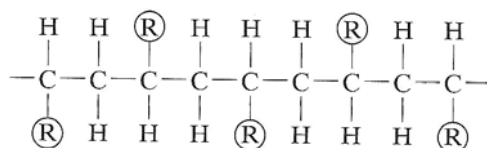
Všechny tři druhy uspořádání bočních radikálů jsou schematicky znázorněny na obr. 5.13 a,b,c. Na obr. 5.14a, b, c je pak trojrozměrný pohled na strukturu ataktického, izotaktického a syndiotaktického polystyrenu.



a) ataktické uspořádání

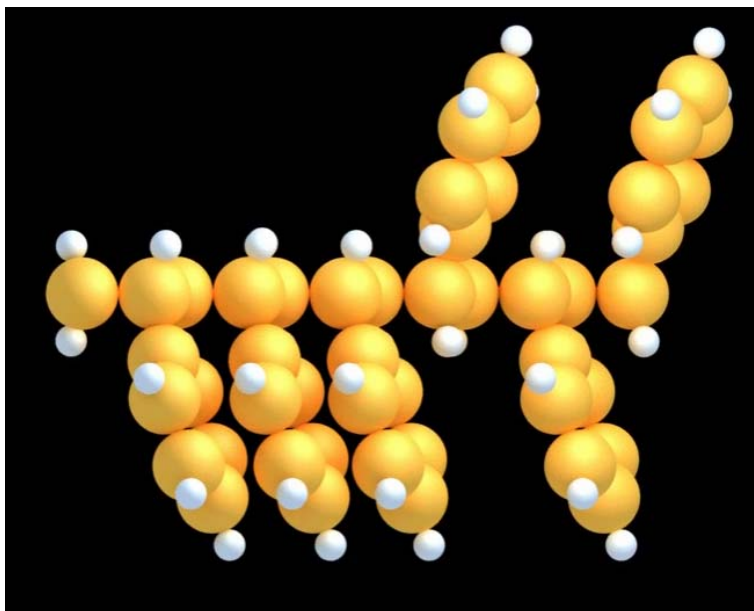


b) izotaktické uspořádání

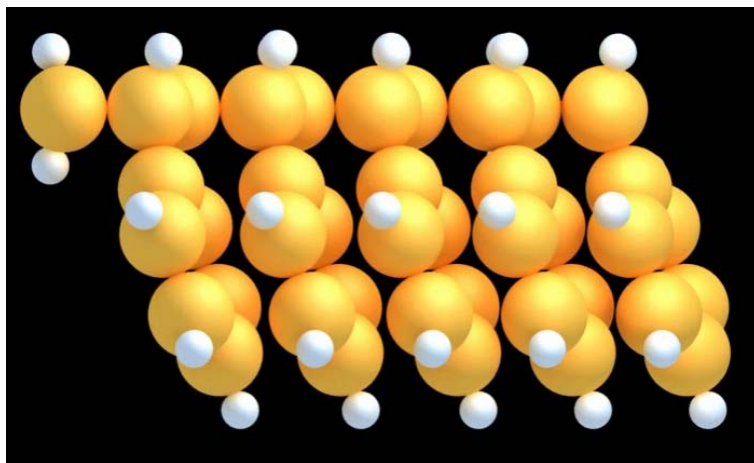


c) syndiotaktické uspořádání

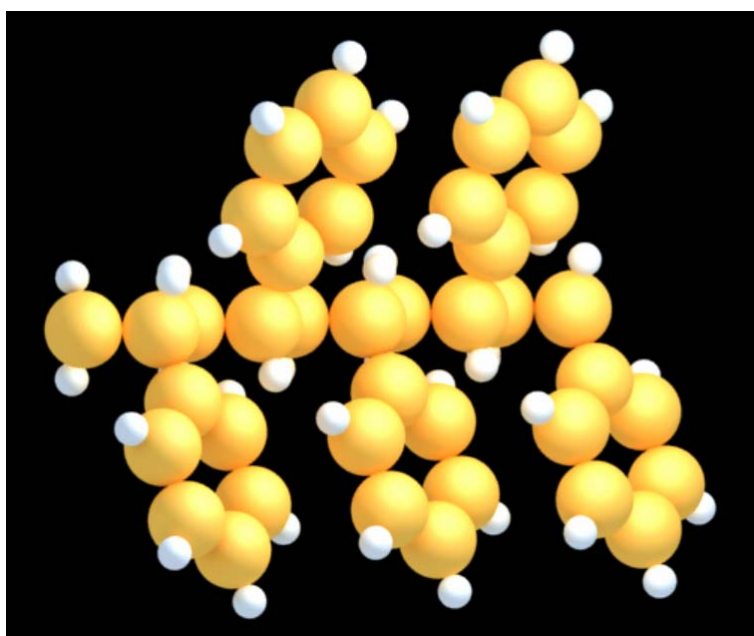
Obr. 5.13 Druhy uspořádání bočních radikálů v řetězcích polymerů



a) ataktické uspořádání



b) izotaktické uspořádání



c) syndiotaktické uspořádání

Obr. 5.14 Trojrozměrné zobrazení možných uspořádání bočních radikálů v polystyrenu

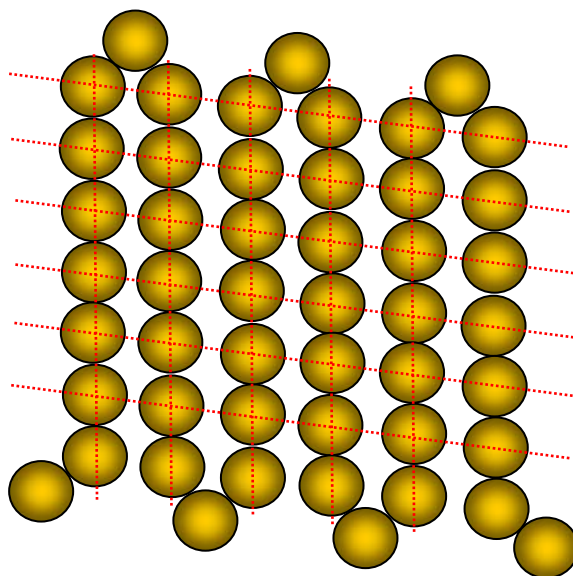
□ Amorfní a krystalický stav polymerů

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 amorfní.

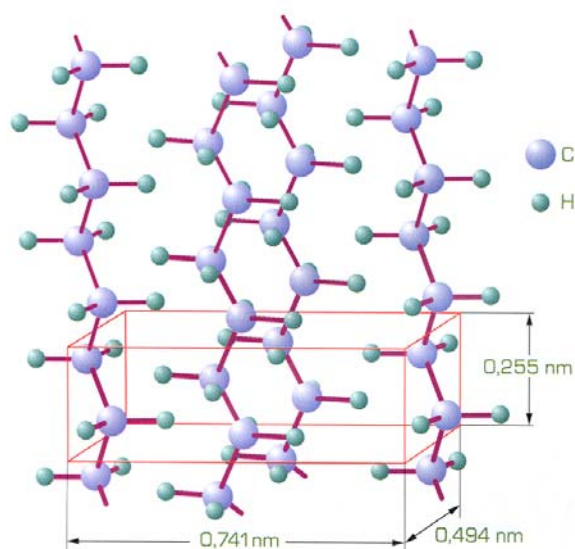
Existence částečně krystalického stavu je podporována jednoduchou strukturou polymeru, jednoduchým (lineárním) řetězcem bez výrazného větvení a zesíťení. Existence krystalického stavu je dále podporována nižší rychlostí tuhnutí polymeru. Z hlediska stereoizomerie není krystalický stav možný, pokud je 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.

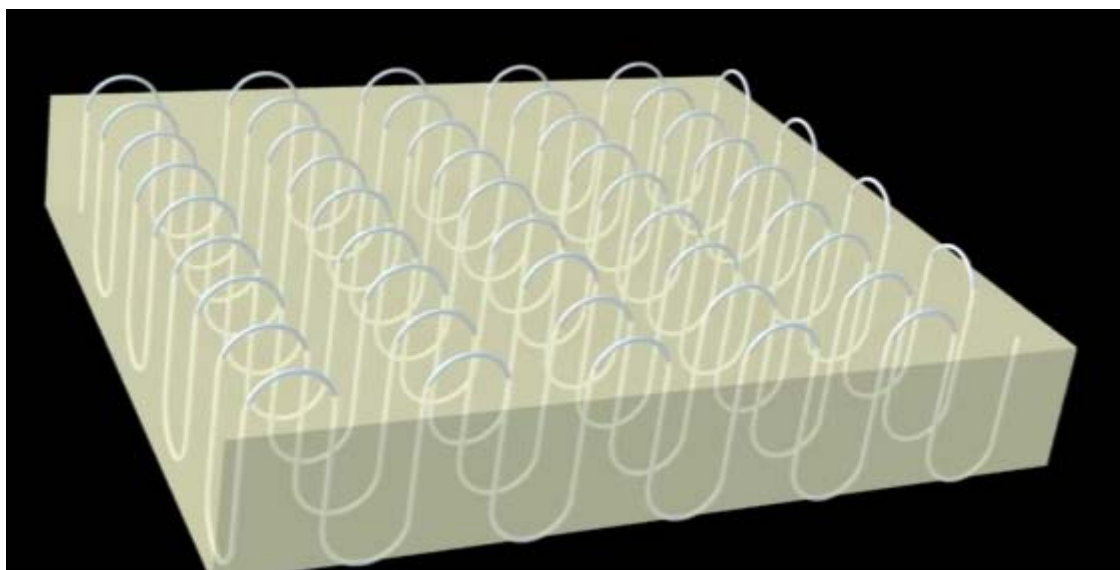
Jednotlivé kuličky na obr. 5.15 nepředstavují atomy, ale skupiny atomů, podobně jako na obr. 5.4 až 5.7. Na obr. 5.17 je vidět, že řetězec vytváří v krystalické oblasti meandr, který je trojrozměrný. Většina polymerů nemůže být plně krystalická a obsahuje vždy alespoň částečně amorfní podíl. To je zobrazeno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



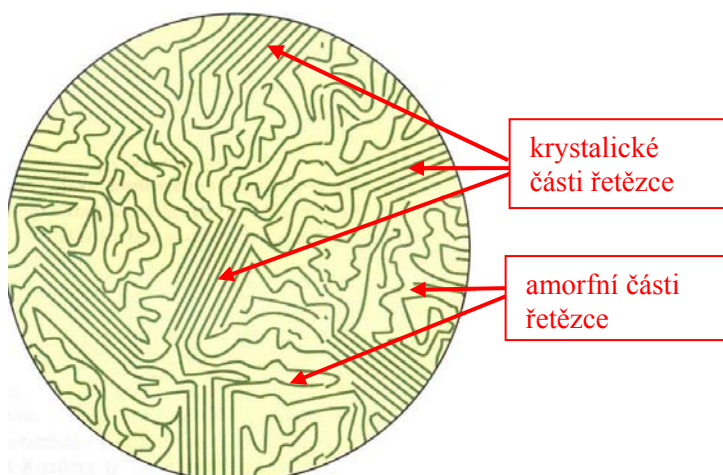
Obr. 5.15 Znárodnění řetězce ve tvaru meandru, který vytváří krystalický stav polymeru



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



Obr. 5.17 Trojrozměrný meandr představující krystalický stav polymeru



Obr. 5.18 Znázornění 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 zesítěné řetězce?
20. Charakterizujte slabě zesítěný řetězec.

21. Pro které druhy polymerů jsou charakteristické slabě zesítněné 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?



CD-ROM

- Polymerace polyetylénu;
- Úhel vazby mezi atomy v řetězci;
- Napřimování řetězců při působení vnějšího napětí;
- Polymerace polystyrénu – ataktický, izotaktický, syndiotaktický;
- Krystalický stav polymerů – vznik řetězce charakteru meandru.

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:

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

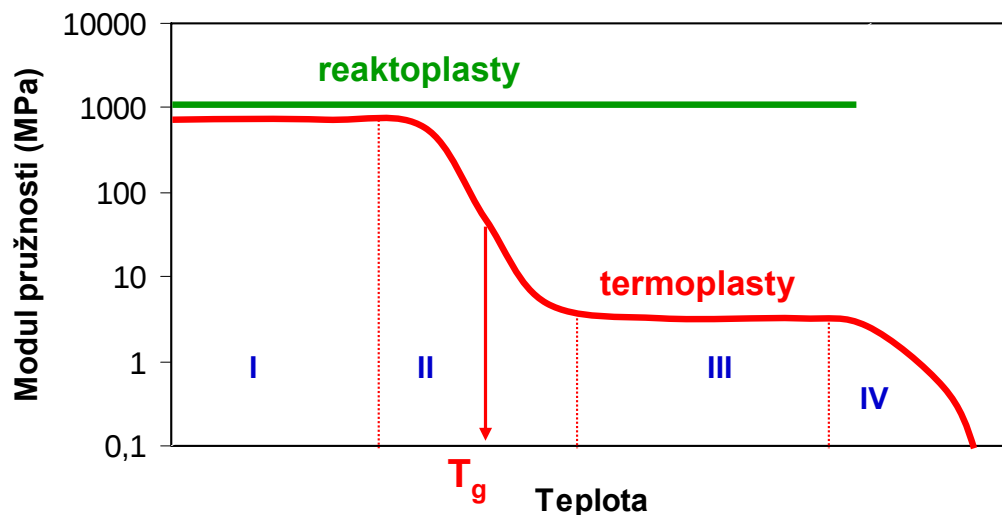
kde ε je pružná deformace materiálu (-);

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

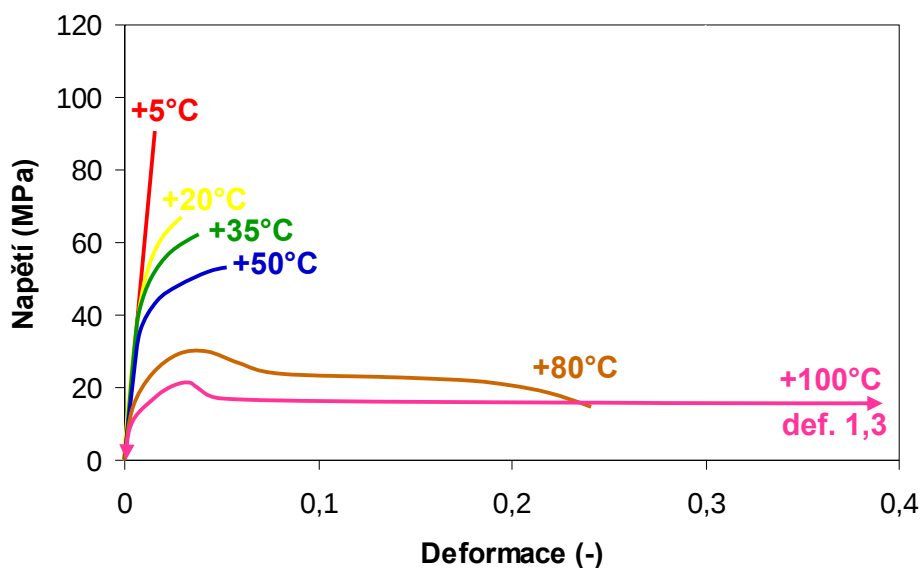
Z obr. 5.19 je vidět, že hodnota modulu pružnosti reaktoplastů, a tedy jejich tuhost, je v zásadě na teplotě nezávislá, konstantní a pohybuje se okolo 10^3 MPa. Vyplývá to z toho, že **reaktoplasty** jsou kvůli prostorovému zesílení řetězců v podstatě **nedeformovatelné** a tudíž **křehké**. V případě 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) zkušební 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.

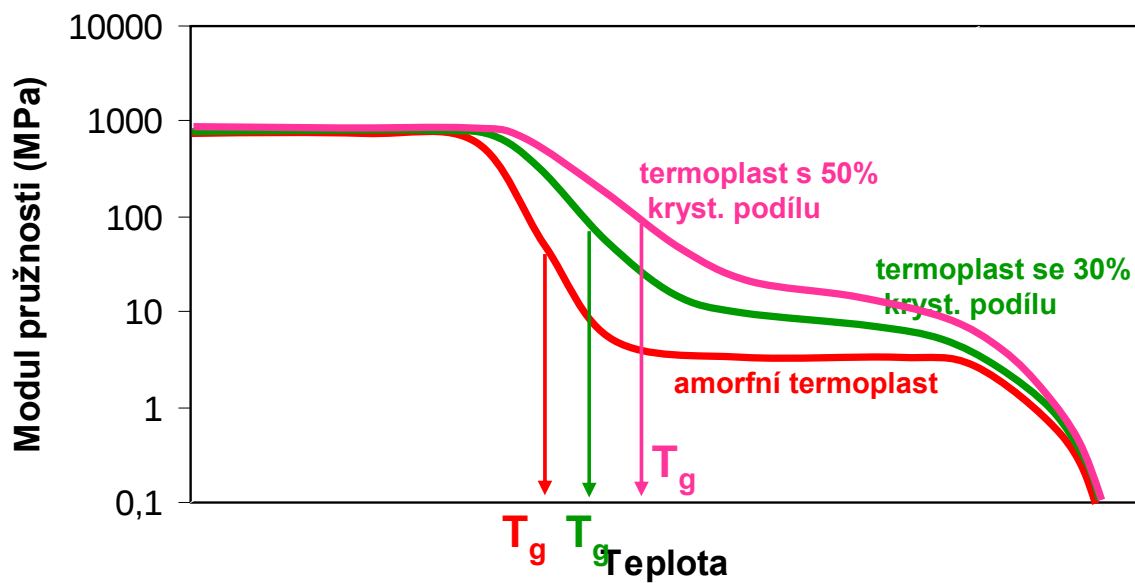
Zeptám se vás. Chtěli byste, aby z takového polymetylmetakrylátu (plexiskla) byly světlomety na vašem autě?? Já bych to asi nechtěl. Teploty $+80^{\circ}\text{C}$ se sice na povrchu auta často nedosáhne, ale pokud byste byli na dovolené autem někde na jihu Evropy, tak by se taková teplota nedala vyloučit. 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:

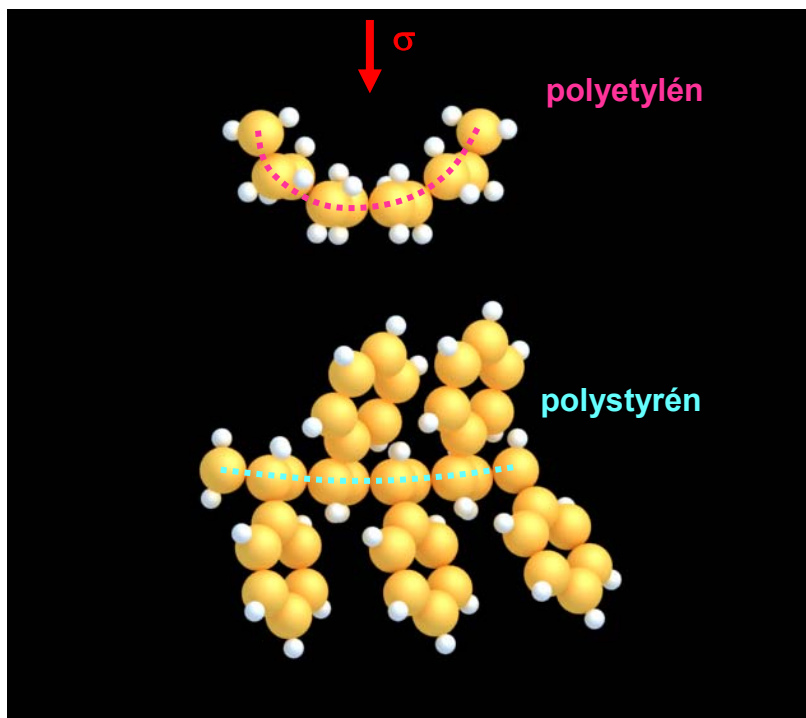
- **relativní molekulová hmotnost;**
- **míra rozvětvení řetězců;**
- **stupeň krystalinity;**
- **složitost bočních radikálů.**

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.



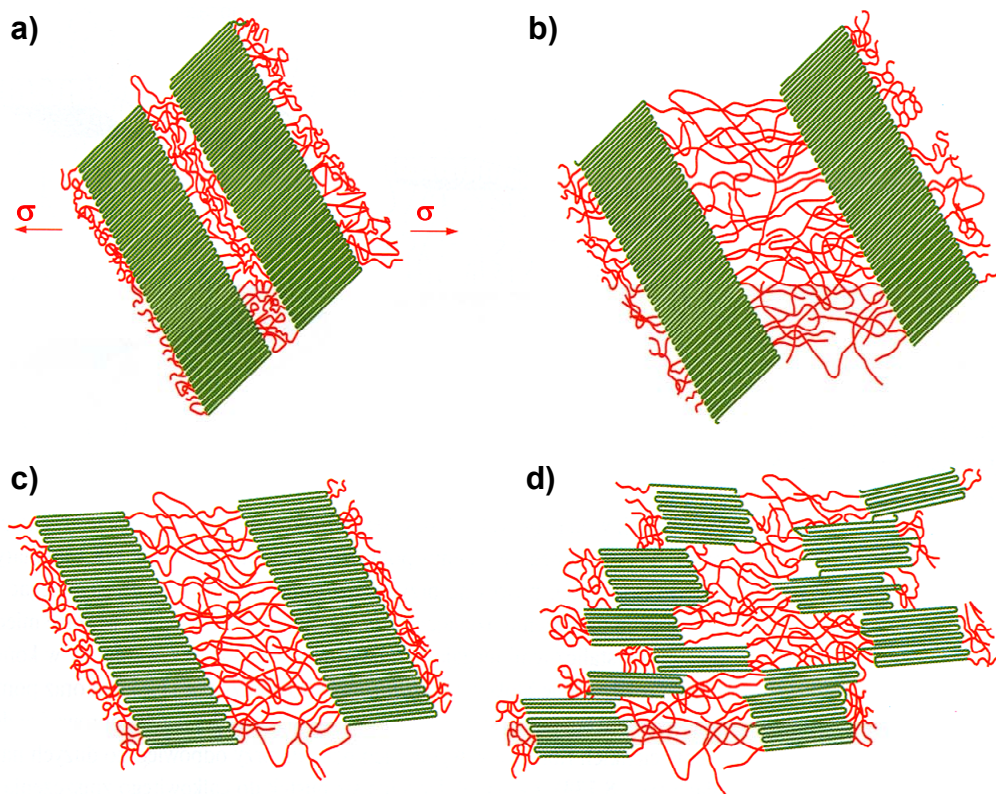
Obr. 5.21 Teplotní závislost modulu pružnosti pro termoplast s rozdílným stupněm krystalinity



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 blíže 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 amorfniích 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 amorfniích 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 amorfniích 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?



CD-ROM

- Mechanické vlastnosti polymethylmetakrylátu v závislosti na teplotě;
- Porovnání tuhosti řetězce polyetylenu a polystyrénu.

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:

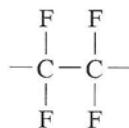
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$$
- polyvinylchlorid:

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

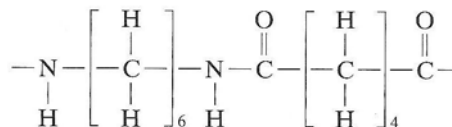
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ | \quad | \\ -\text{C}-\text{C}- \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$$
- polymethylmetakrylát:

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

- 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 zesítněné. Bývají pouze amorfni. Existují jen ve skelném stavu, nepřecházejí do kaučukovitého stavu. Prostorové zesítnění 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 $+20^\circ\text{C}$	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.

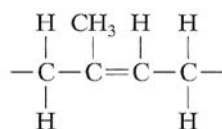
Reaktoplasty se v současnosti používají samostatně jen v omezené míře, např. **v elektrotechnice** pro své dobré **izolační vlastnosti** a **schopnost odolávat zvýšeným**

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

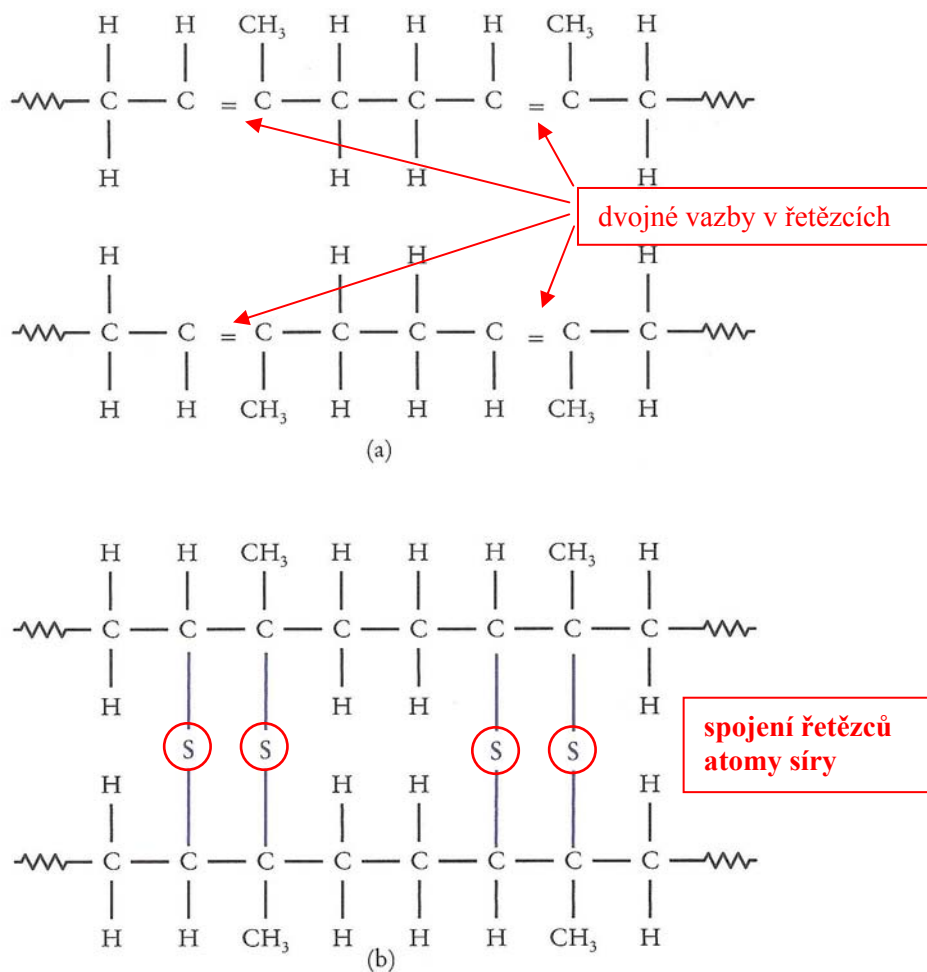
Elastomery jsme v předchozím výkladu trochu ošidili, tak to musíme napravit. Uvedli jsme, že jedním z prvních používaných elastomerů byl vulkanizovaný kaučuk. Elastomery mají slabě zesítené řetězce a jsou schopny zejména vysoké elastické deformace při působení nízkých napětí. Co se děje přesněji v polymeru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



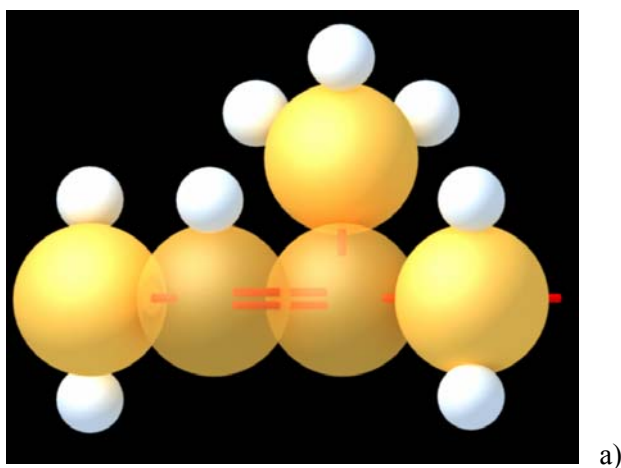
Chemický vzorec polyizoprénu je následující:

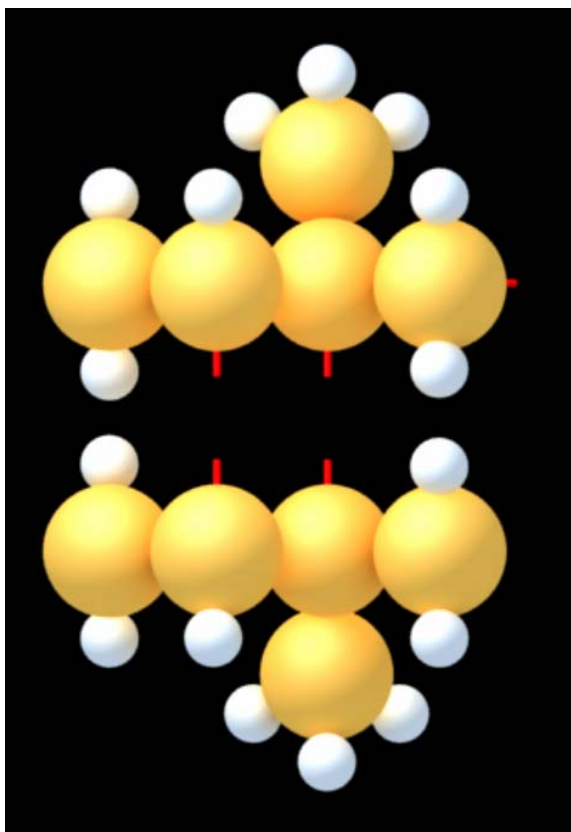
Za působení některých chemických látek, např. síry, a zvýšené teploty může dojít o otevření dvojné vazby a příčnému spojení řetězců atomy síry. A to je proces vulkanizace. K příčnému spojování řetězců dochází jen na malém počtu možných vazebných míst, a to cca na 0,5 až 2% vazebných míst. Proces vulkanizace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



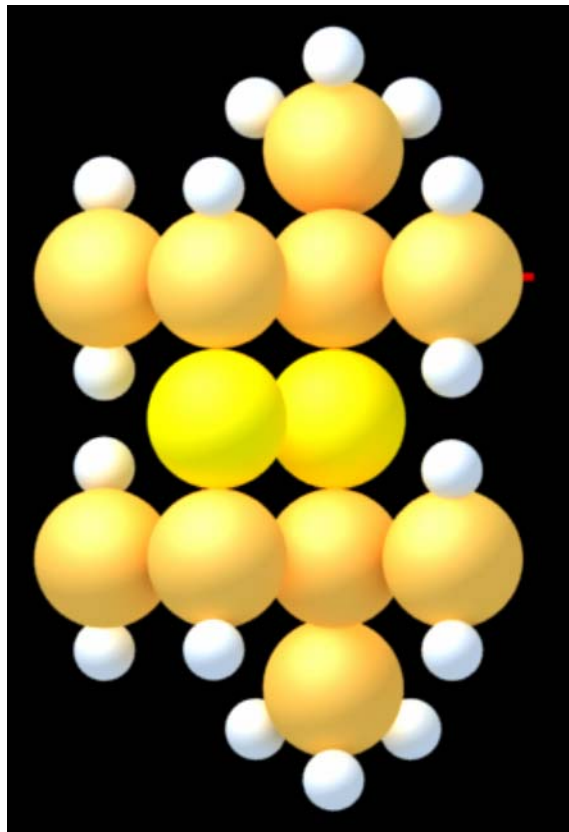
Obr. 5.24 Schematické znázornění procesu vulkanizace polyizoprénu

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)

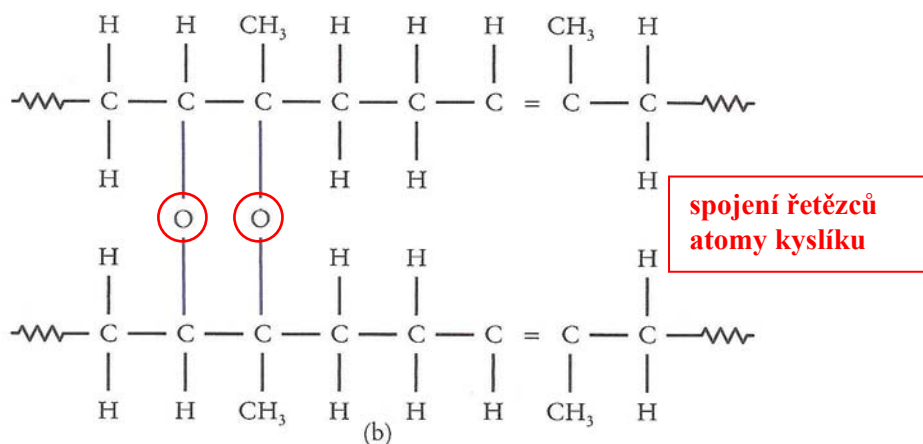
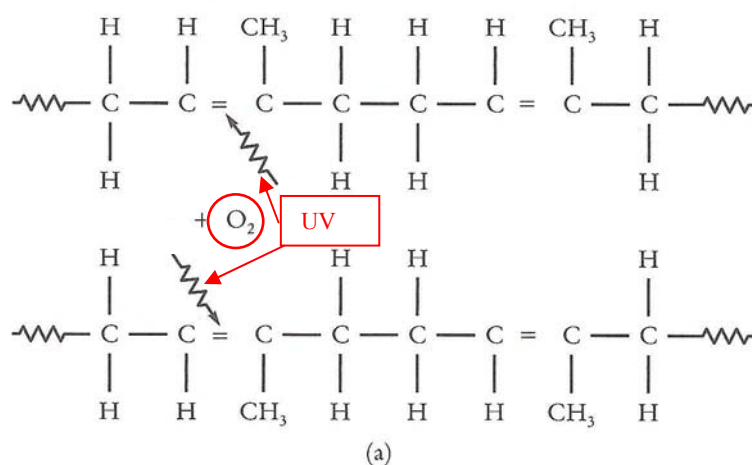


c)

Obr. 5.25 Trojrozměrné znázornění procesu vulkanizace polyizoprénu

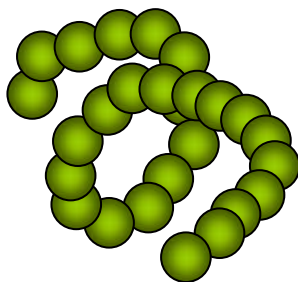
Na obr. 5.25a je část řetězce polyizoprénu s dvojnou vazbou. Na obr. 5.25b jsou znázorněny části dvou sousedních řetězců s již otevřenými dvojnými vazbami a na obr. 5.25c je již vidět spojení řetězců dvěma atomy síry.

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.

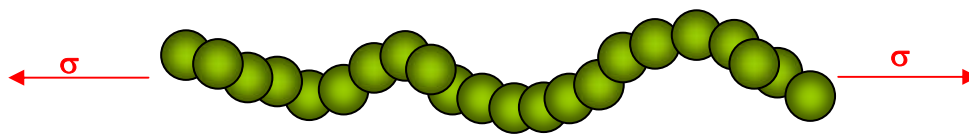


Obr. 5.26 Znázornění procesu tvrdnutí polyizoprénu

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°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

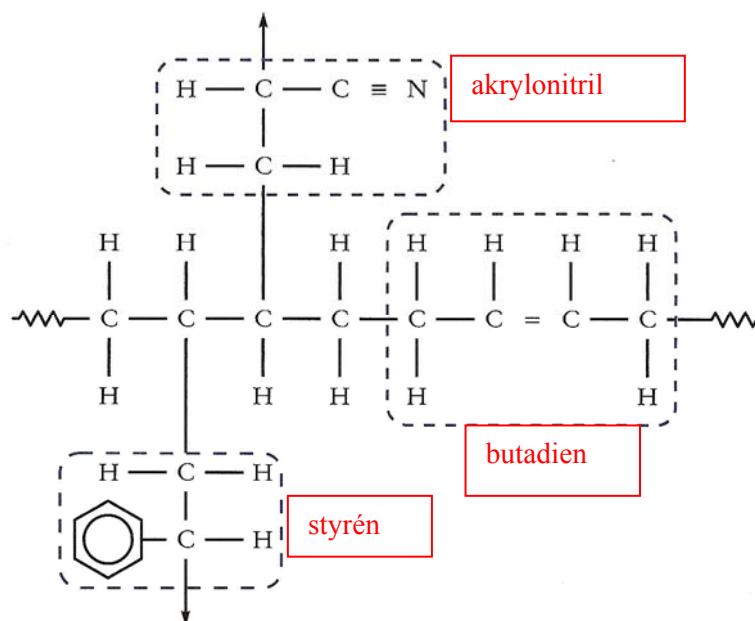
Polyizoprén představuje základ přírodního kaučuku, polybutadien a polychloroprén patří mezi syntetické kaučuky. Teplota skelného přechodu elastomerů je nižší než 0°C a pohybuje se v intervalu -120 až -50°C. Elastomery se tedy na rozdíl od termoplastů používají nad teplotou skelného přechodu. Pod teplotou 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 kopolymeru (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.

**CD-ROM**

- Vulkanizace kaučuku.

	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 spojnicemi sousedních atomů v „páteři“ řetězce je úhel $109,5^\circ$.
O26	Řetězce se mohou v prostoru natáčet, zejména napřimovat při působení napětí. Musí platit, že mezi spojnicemi atomů uhlíku zůstane stále úhel $109,5^\circ$.
O27	Prostorově zesítené 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 zesítení, 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 polyetylén.
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 $+120^\circ\text{C}$.
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 — C ₆ 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

- [1] Pluhař, J. a kol: *Nauka o materiálech*. SNTL, Praha, 1989, 549 s.
- [2] Ducháček, V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. VŠCHT Praha, 2006, 278s.
- [3] Skočovský, P., Bokůvka, O., Konečná, R., Tillová, E.: *Nauka o materiálu pre odbory strojnícke*. Žilinská univerzita, Žilina, 2001, 380 s.
- [4] Callister, W. D.: *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. John Wiley&Sons, USA, 2005, 712 s.
- [5] 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.

Keramikou 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.

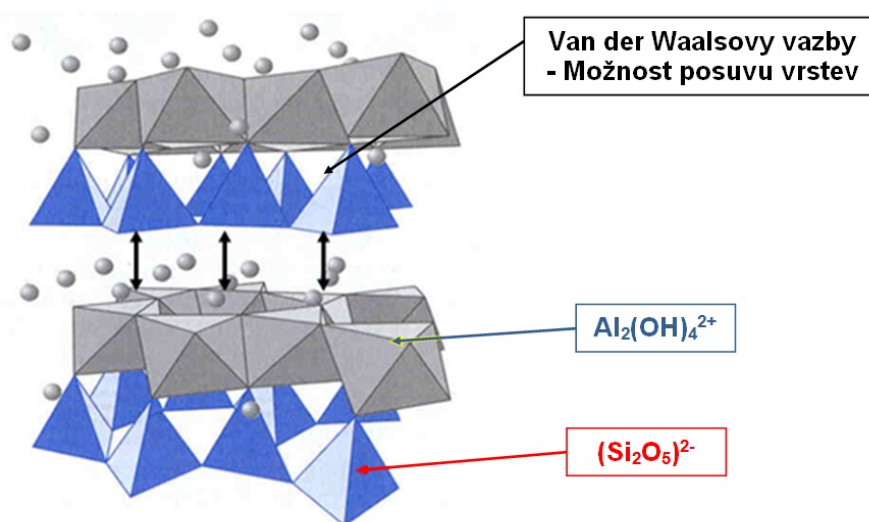
Při pórovitosti $P = 0,05$ (5 %) klesne pevnost na cca 78 % výchozí hodnoty, kterou by měl materiál bez pórů. Pevnost keramiky v tahu a v tlaku se výrazně liší. V tlaku je pevnost keramických materiálů (10 až 15) krát vyšší než v tahu.

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. Příměsové 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:

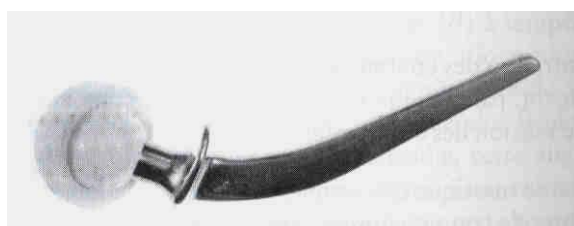
- vysoká tvrdost (s tím souvisí i vysoká odolnost proti opotřebení),
- vysoká korozní odolnost,
- žáruvzdornost.

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.

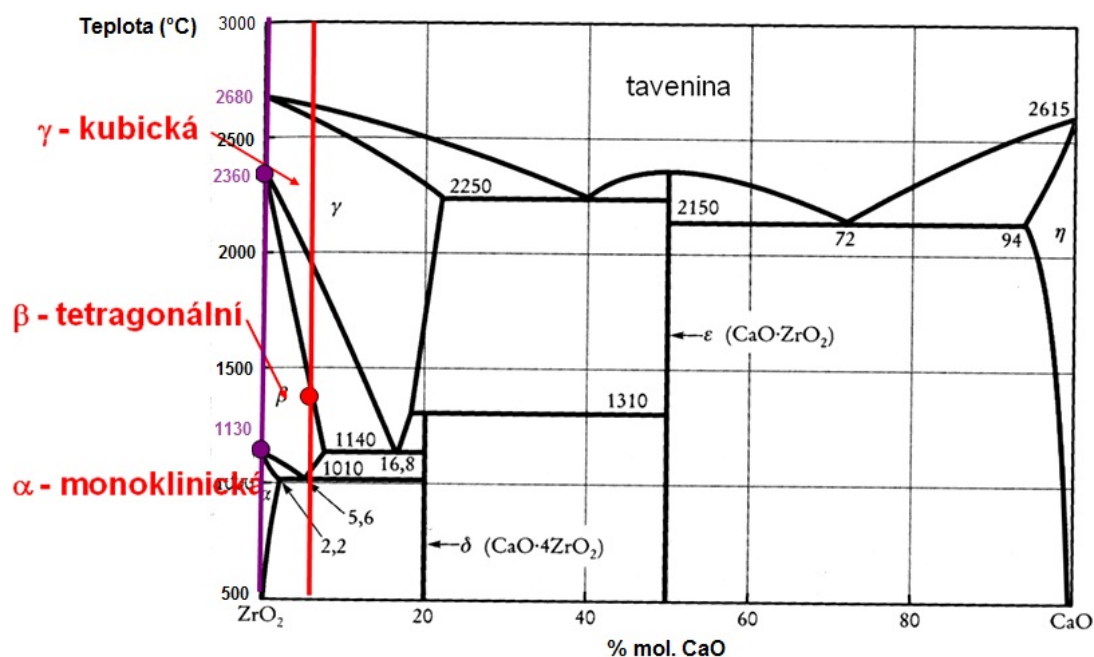
Oxid hliníku (slinutý Al_2O_3) se používá zejména na výrobu řezných nástrojů, ale i součástí implantátů (obr. 6.3). Vyznačuje se vysokou tvrdostí a dobrou chemickou stabilitou. Má vysokou teplotu tavení, 2050°C . Pevnost v ohybu R_{mo} 350 MPa je stabilní až do teploty cca 1200°C , ale pak prudce klesá. 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 slinutého Al_2O_3 .

Oxid zirkonia (slinutý 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 .

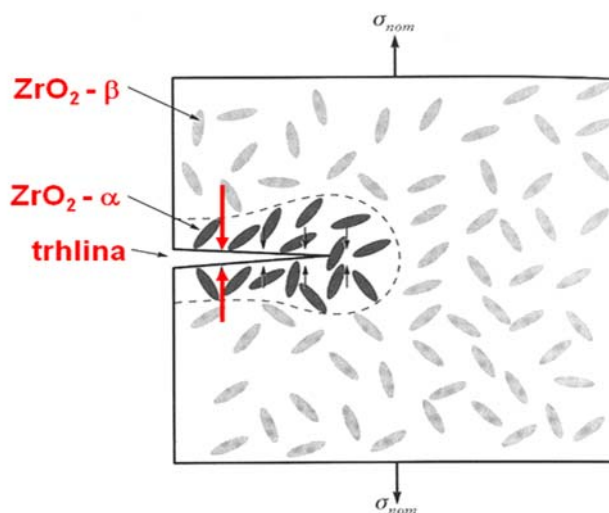


Obr. 6.4. Binární diagram ZrO₂ – CaO. Oblasti výskytu jednotlivých modifikací.

Ke zhouževnatění konstrukční keramiky na bázi ZrO₂ 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 ZrO₂ může tento nárůst objemu vést ke vzniku trhlin. Přidávkem CaO nebo Y₂O₃ dojde k rozšíření oblasti kubické γ fáze v celém rozsahu teplot. Jedná se pak o tzv. **stabilizovaný ZrO₂**. Při nižším obsahu stabilizačních přísad (3-7 % CaO, Y₂O₃, MgO) bude struktura oxidu zirkonia tvořena kubickou a tetragonální fází. Vznikne tak, že se ZrO₂ 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 β → α 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 vyvolají přeměnu β → α. Fáze α má vyšší měrný objem a vyvolá v okolí tlaková pnutí, která budou zavírat trhlínu, 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 ZrO₂ dojde při broušení k vyvolání fázové transformace, vzniku tlakových pnutí, uzavření trhlin a v konečném důsledku ke zvýšení pevnosti. Částečně stabilizovaný ZrO₂, označuje se jako PSZ (Partially Stabilized Zirkonia), se používá pro extrémně namáhané součástky dieselových 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 , $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiC}$.

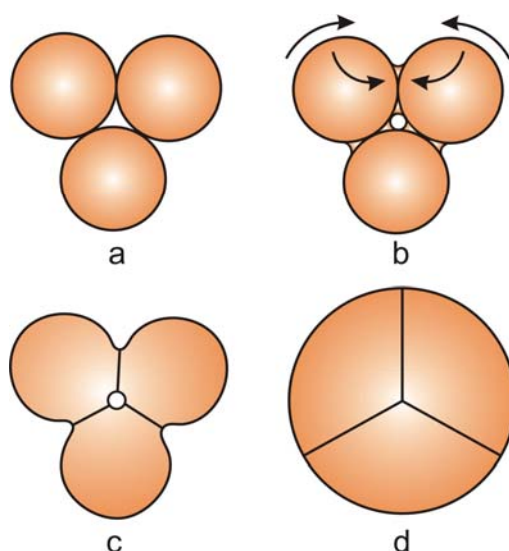
□ Metody výroby keramických materiálů

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

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

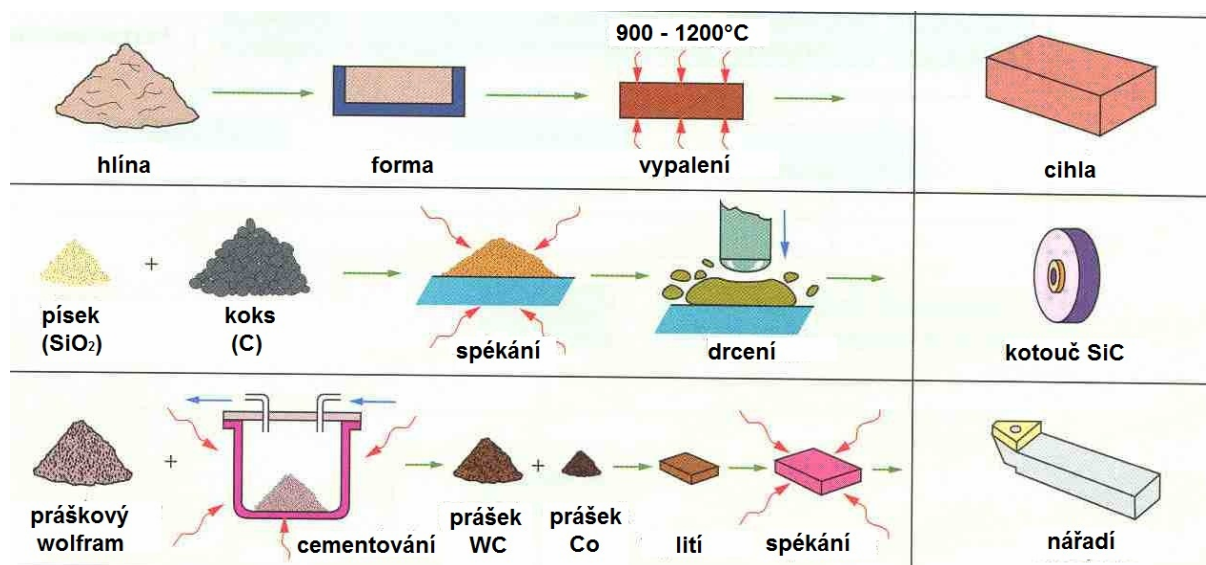
Kvalita výsledného produktu závisí především na mikrostruktuře materiálu. Optimální mikrostruktura má homogenní zrna s jasně definovanými hranicemi zrn, minimální obsah pórů a rovnoměrné rozložení všech přítomných fází. Platí, že čím jemnější je zrno, tím má výsledná keramika vlastnosti na vyšší úrovni. 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 teploty 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 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

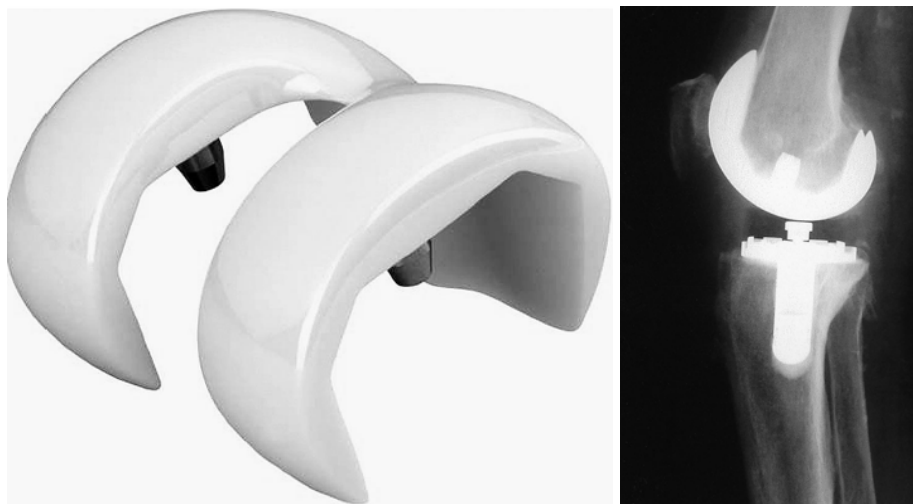
Keramika v automobilovém průmyslu se používá především na konstrukci spalovacích motorů, tj. pístů, ventilů, stěn válců nebo výfukových potrubí. Musí mít tedy vysokou tepelnou odolnost, nízkou tepelnou vodivost a roztažnost bez nutnosti chlazení. Motory s keramickými díly mají vyšší životnost motoru 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 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. Kyselý 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 **porézni (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 porézni (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?
2. Z čeho a jakým způsobem se vyrábějí keramické materiály?
3. Jak se dělí keramické materiály?
4. Jaké vazby převládají v keramických materiálech?
5. Jaká je struktura keramických materiálů?
6. Jaké jsou základní vlastnosti keramických materiálů?
7. Co je základní složkou porézní keramiky?
8. Jak se dělí technická keramika?
9. Čím se vyznačuje technická keramika?
10. Jakým způsobem lze zvýšit lomovou houževnatost oxidové keramiky na bázi Al_2O_3 ?
11. V jakých krystalových modifikacích se vyskytuje oxid zirkonia?
12. Jakou strukturu má částečně stabilizovaný oxid zirkonia?
13. Které materiály můžeme zařadit mezi neoxidovou keramiku?
14. Jakým způsobem probíhá proces slinování?
15. 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

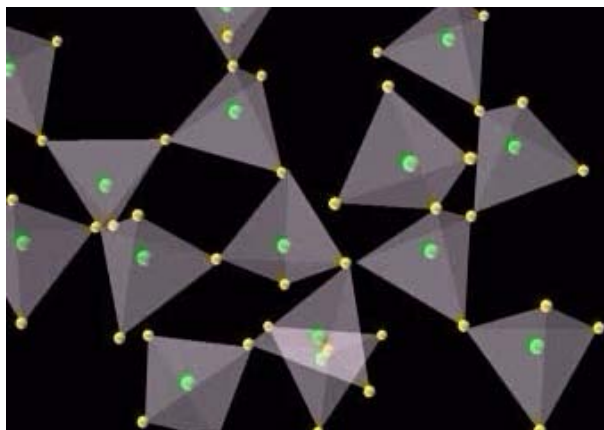
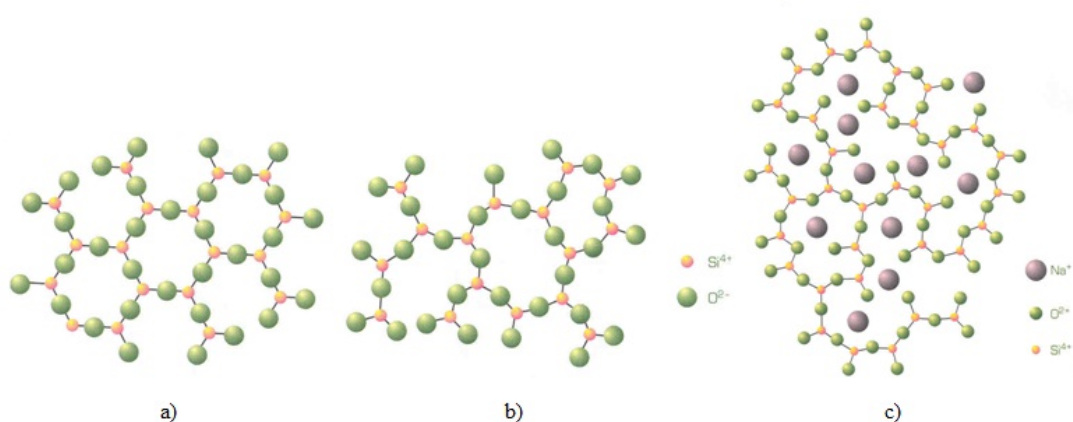
- charakterizovat sklo a skelně krystalické materiály,
- vysvětlit, na čem závisí vlastnosti skla,
- popsat použití skelných materiálů.



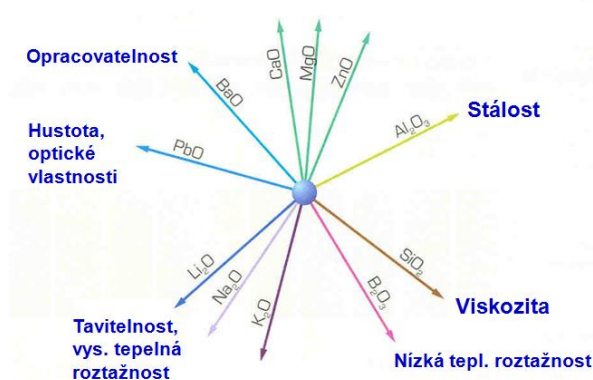
Výklad

□ 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 oxidokřemičitém 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 křemičitém 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 nanese 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

16. Jakou strukturu mají skla?
17. Co je základní stavební jednotkou skla?
18. Jakou funkci mají modifikátory skla?
19. Jak lze připravit skelně krystalické materiály?
20. 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 amorfni 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).

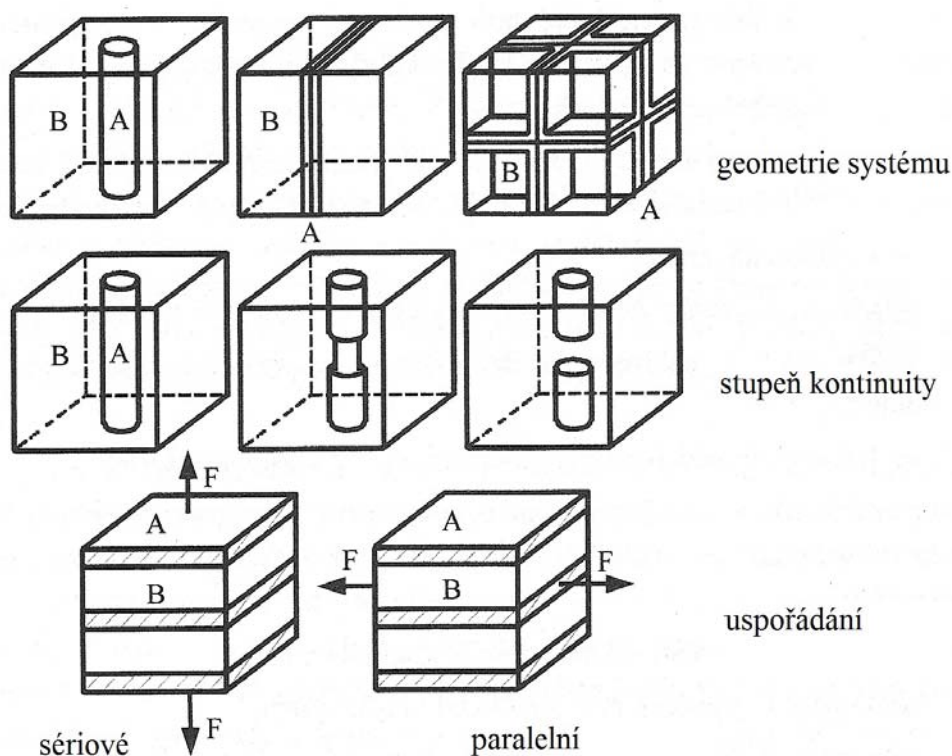
Tyto podmínky nesplňují např. složené přírodní materiály. Příkladem tohoto materiálu je dřevo; matici tvoří lignin vyztužený celulóзовými vlákny. Z kategorie kompozitů musíme vyloučit také plátované materiály a plasty obsahující malé množství tuhých barviv, oxidů nebo elastomerů (přidávaných pro zlepšení 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:

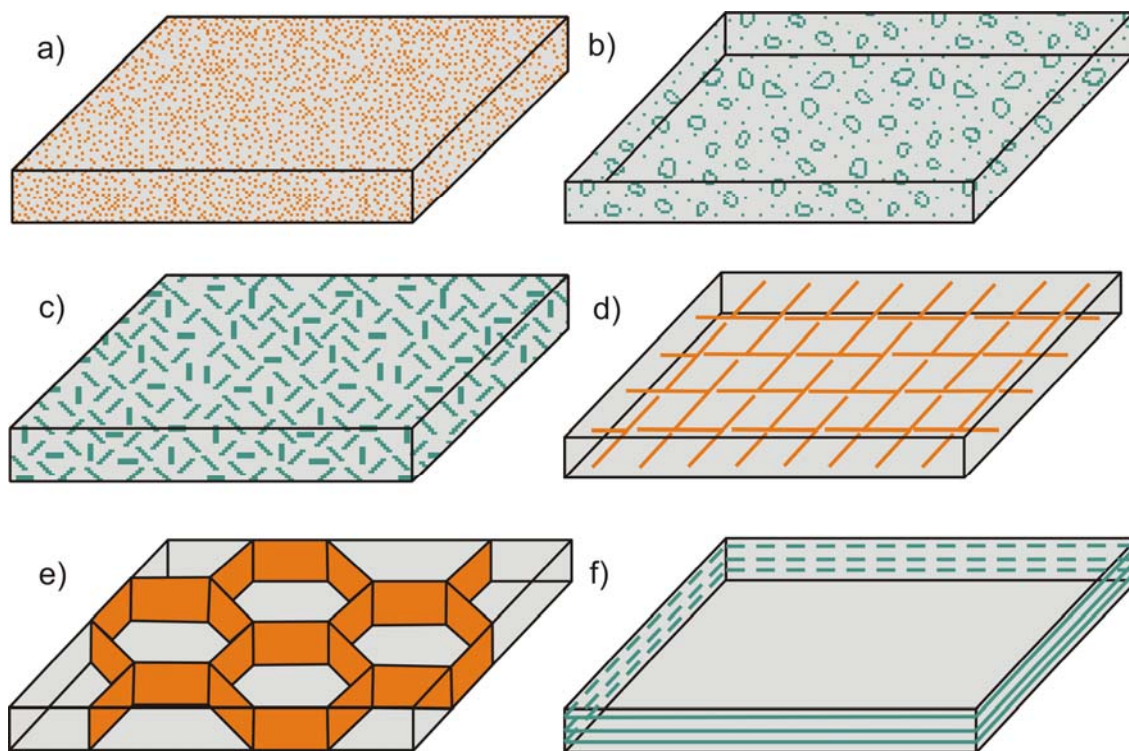
- **polymerní maticí,**
- **kovovou maticí,**
- **keramickou maticí,**
- **uhlíkovou maticí.**

Polymerní matici může tvořit termoplast (polypropylen – PP, polyamid – PA, polykarbonát – 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 matici, můžeme kompozity rozdělit na:

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



Obr. 7.2. Příklady různého uspořádání výztuže v matici.

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?
2. Jakou funkci plní matrice v kompozitních materiálech?
3. Jakou funkci má výztuž v kompozitních materiálech?
4. Čím jsou ovlivněny vlastnosti kompozitních materiálů?
5. Jak rozdělujeme kompozity podle druhu matrice?
6. 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 následným 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?
8. Kolikrát se zvýší pevnost vulkanizovaného kaučuku při objemovém podílu 15 – 20 % sazí?
9. 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.

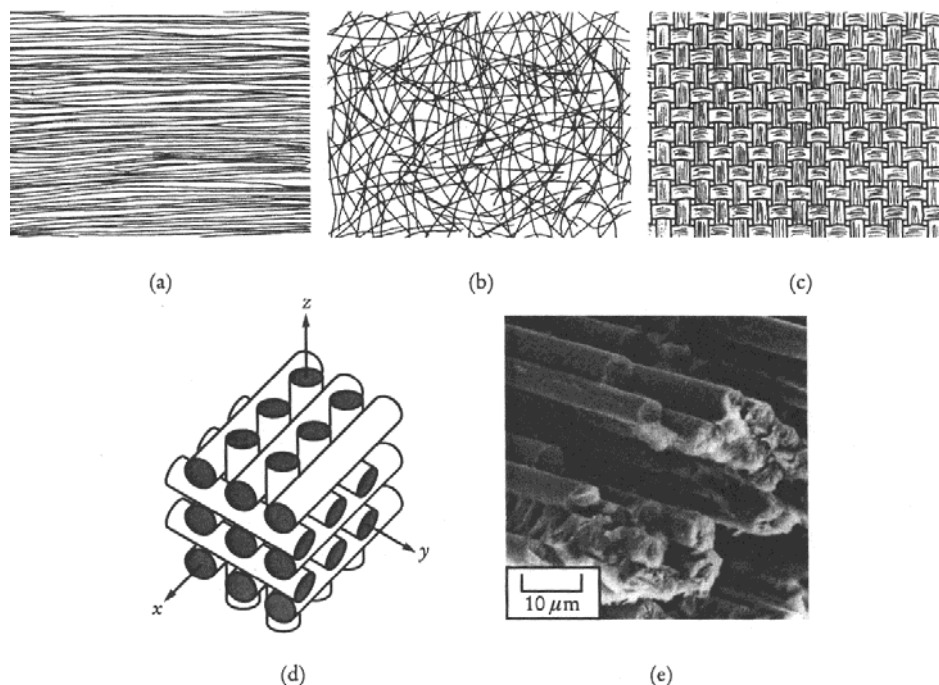
Matricí bývají v případě vláknitých kompozitů nejčastěji **polymery**, a to reaktoplasty – nejčastěji epoxidové a polyesterové pryskyřice, nebo termoplasty – např. polypropylén. Dalším druhem matrice mohou být **kovy**, nejčastěji lehké kovy, jako hliník, nebo hořčík. Třetí typ matrice vláknitých kompozitů 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 (kg·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

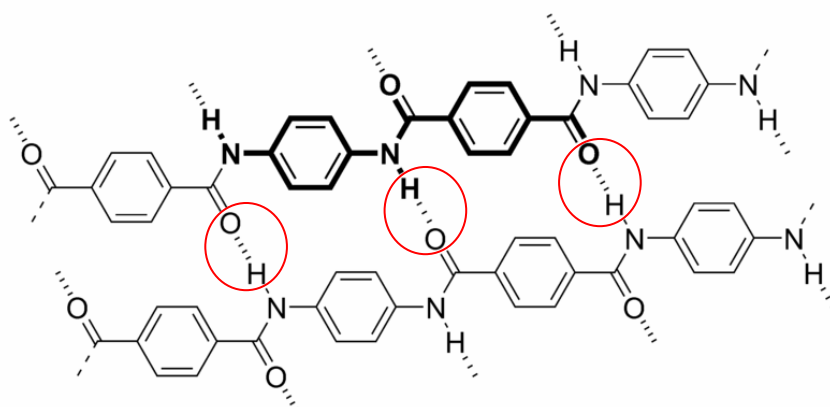
Hustota ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	cca 1800
Modul pružnosti v tahu E (GPa)	180 - 400
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	1900 - 3500

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.

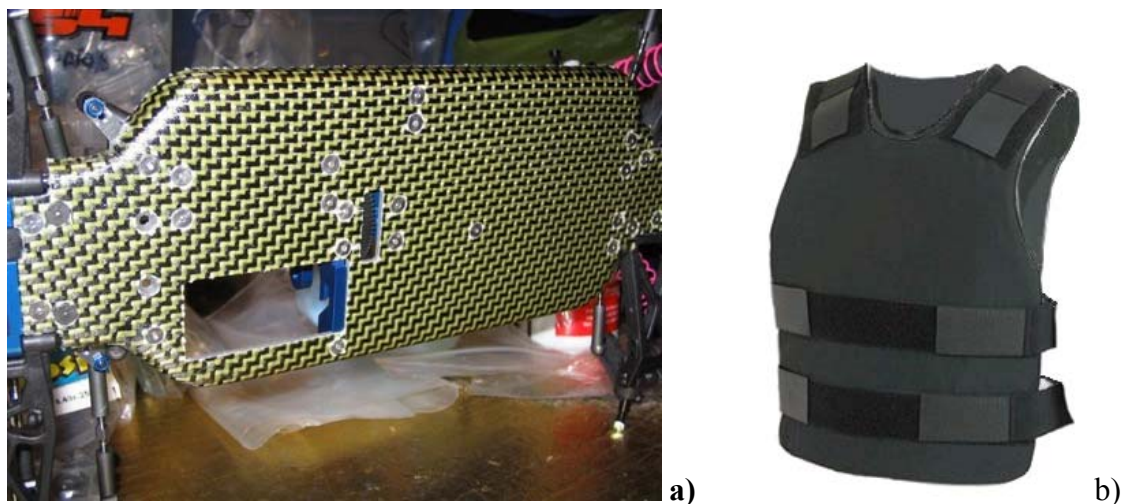
Tab. 7.4 Základní charakteristiky kevlarových vláken

	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 výztuží 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

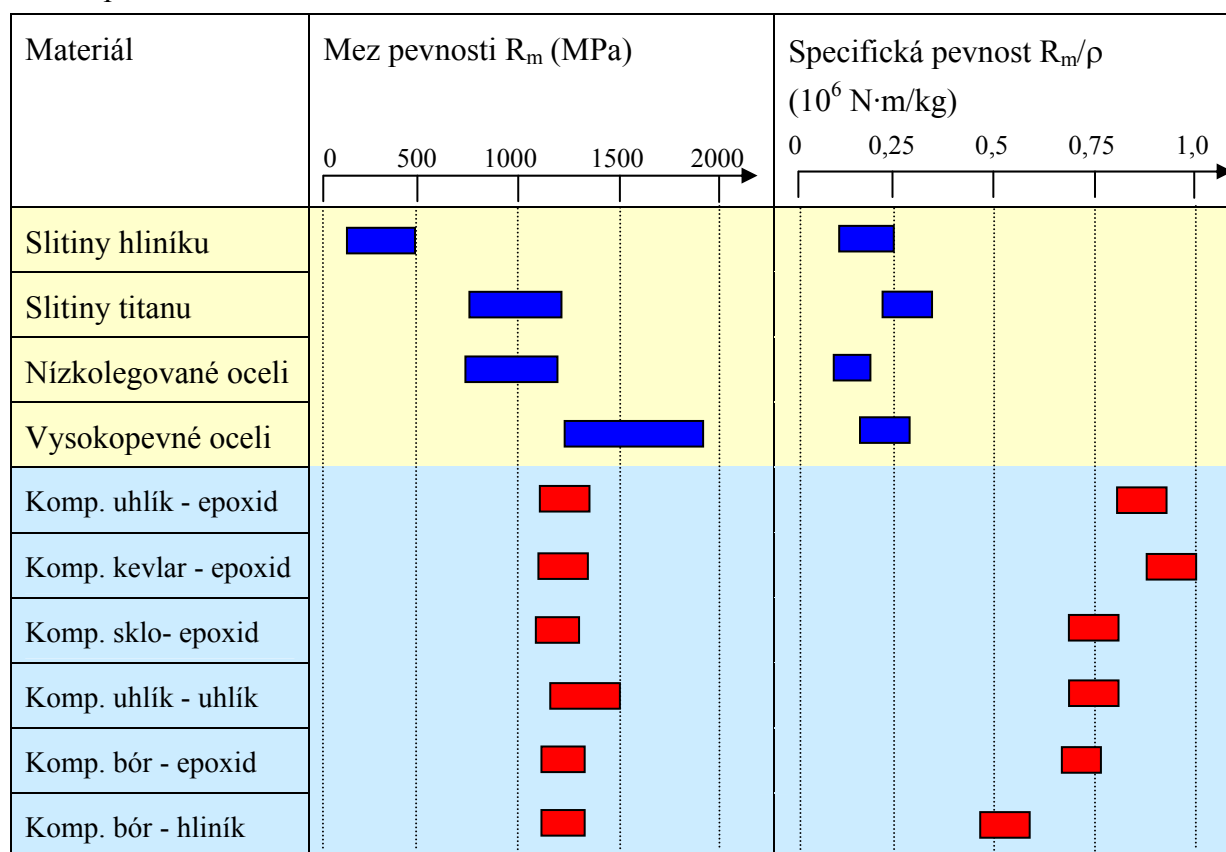
Příčinou vysoké ceny u tohoto typu vláknitých kompozitů je mj. složitost jejich výroby. Uhlíková vlákna vyrobená pyrolýzou a upravená do vhodného tvaru bývají např. impregnována kapalnými pryskyřicemi – reaktoplasty. Výrobek pak dostane potřebný tvar

(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.

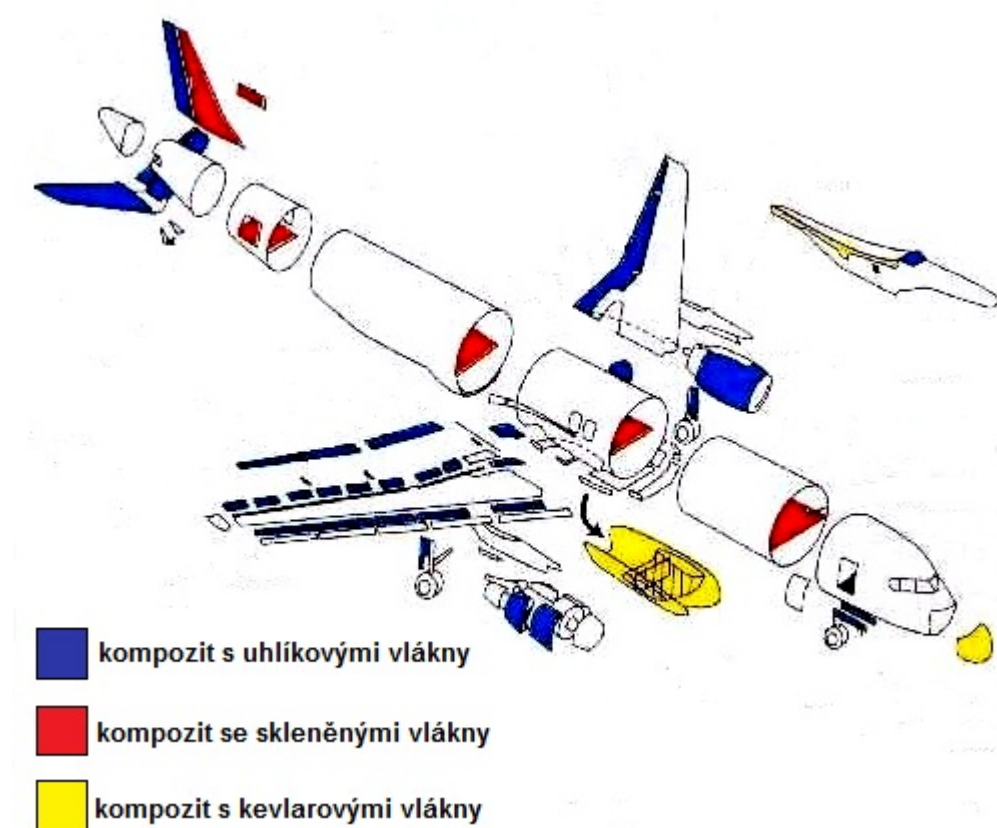
Tab. 7.7 Srovnání meze pevnosti R_m , specifické pevnosti R_m/ρ u vybraných nekompozitních a kompozitních materiálů.



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

10. Jak mohou být uspořádána vlákna ve vláknitých kompozitech?

11. Která důležitá charakteristika je ovlivněna způsobem uspořádání vláken ve vláknitých kompozitech?
12. Jak dělíme vlákna podle jejich délky?
13. Jakých délek dosahují obvykle dlouhá vlákna ve vláknitých kompozitech?
14. Jakých délek dosahují obvykle krátká vlákna ve vláknitých kompozitech?
15. Jakého druhu bývá nejčastěji matrice ve vláknitých kompozitech?
16. Které druhy vláken se nejčastěji používají ve vláknitých kompozitech s polymerní matricí?
17. Jak lze vysvětlit, že tenká skleněná vlákna mají vysokou pevnost v tahu, zatímco běžné sklo má jen nízkou pevnost v tahu?
18. Jaká je hlavní přednost uhlíkových vláken oproti vláknům skleněným?
19. S čím souvisí vysoká pevnost polymerního vlákna Kevlaru?
20. Které kovy, resp. slitiny se používají nejčastěji ve vláknitých kompozitech s kovovou matricí?
21. Který kov se nejčastěji používá k výrobě kovových vláken do vláknitých kompozitů?
22. 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 chladnutí 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. Vlákna 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 sítě.
- O 7.11. Způsoben uspořádání vláken je ovlivněna zejména anizotropie vlastností vláknitého kompozitu.
- O 7.12. Vlákna 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.