



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

SROVNÁNÍ VYBRANÝCH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU A KONSTRUKČNÍCH OCELÍ

COMPARISON OF SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS AND
STRUCTURAL STEELS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB BELHÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VLAŠIC

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Belháč

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Srovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí

v anglickém jazyce:

Comparison of selected mechanical properties of aluminum alloys and structural steels

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je podat přehled současného stavu poznání v oblasti mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí, doplněný vymezením trendů budoucího vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat:

1. Definici základních pojmů.
2. Přehled a rozbor existující literatury v dané oblasti.
3. Analýzu a zhodnocení získaných poznatků.
4. Vymezení trendů budoucího vývoje.
5. Souhrnnou bibliografii.

Forma bakalářské práce: průvodní zpráva.

Účel zadání: pro VaV a tvůrčí činnost ÚK

Typ BP: řešeršní

Seznam odborné literatury:

DOWLING, NORMAN, E. Mechanical behavior of materials. 2007, 912 s., ISBN 0-13-186312-6.
MICHNA, Š., LUKÁČ, I., OČENÁŠEK, V., KOŘENÝ, R., DRÁPALA, J., SCHNEIDER, H.,
MIŠKUFOVÁ, A. A KOL. Encyklopedie hliníku, Adin s.r.o., Prešov 2005, ISBN 80-89041-88-4.
PTÁČEK, L., et al. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002.
392 s. ISBN 80-7204-248-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vlašic

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 13.11.2008

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá popisem vybraných mechanických vlastností kovových materiálů a jejich srovnáním v rámci slitin hliníku a konstrukčních ocelí. Dále jsou zde přiblíženy zkoušky, kterými získáváme základní mechanické charakteristiky, a v návaznosti na ně zdůrazněny podstatné odlišnosti mezi slitinami hliníku a ocelmi. V dalších kapitolách jsou odděleně popsány mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí a slitin hliníku, jejich rozdělení a možnosti použití. V rámci tepelného zpracování je naznačena souvislost mezi strukturou, chemickým složením a jejich mechanickými vlastnostmi.

KLÍČOVÁ SLOVA

mechanické vlastnosti, zkoušky mechanických vlastností, slitiny hliníku, konstrukční oceli, tepelné zpracování

ABSTRACT

The subject of this bachelor's thesis is a description of selected mechanical properties of metal materials and their comparison within aluminium alloys and constructional steels. The most common mechanical tests to quantify the mechanical properties are described here. The mechanical properties of constructional steels and aluminium alloys are separately described in subsequent chapters as well as their division and possibilities of application. The connection between structure, chemical composition and mechanical properties depending on a heat-treating process is shown.

KEYWORDS

mechanical properties, basic tests of mechanical properties, aluminium alloys, constructional steels, heat-treating

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BELHÁČ, J. *Srovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vlašic.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Srovnání vybraných mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí* zpracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Vlašice.

V Brně dne 15. května 2009

podpis autora

OBSAH

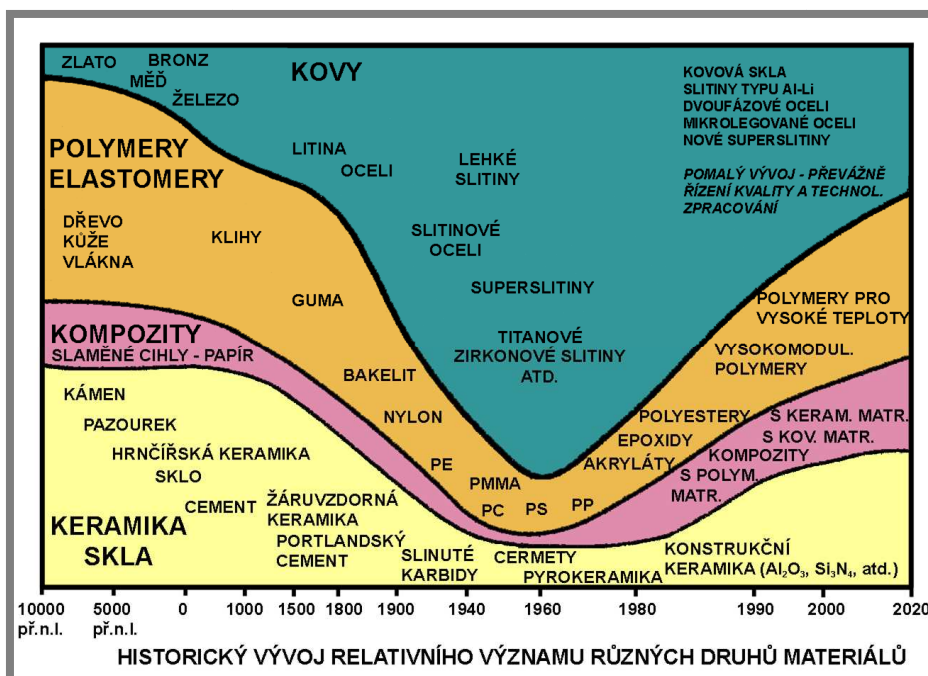
ÚVOD	12
1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ	13
1.1 Mechanické vlastnosti kovových materiálů a jejich určování	13
1.2 Mechanické charakteristiky	14
1.2.1 Zkoušky mechanických vlastností materiálu a jejich význam	14
1.2.2 Zkouška tahem	15
1.2.3 Mechanické charakteristiky určované tahovou zkouškou	18
1.2.4 Zkoušky tvrdosti a jejich rozdělení	21
1.2.5 Zkouška rázem v ohybu (ČSN EN 10045)	25
1.2.6 Lomová houževnatost a faktor intenzity napětí	28
1.2.7 Zkoušky únavy materiálu	29
1.2.8 Zkoušení mechanických vlastností za zvýšených teplot	33
1.2.9 Specifika a srovnání některých zkoušek mechanických vlastností	35
2 SLITINY HLINÍKU: PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI	37
2.1 Vymezení trendů budoucího vývoje, použití a rozdělení	37
2.2 Mechanické vlastnosti slitin hliníku	38
2.2.1 Mechanické vlastnosti tvářených slitin	38
2.2.2 Slitiny pro odlitky	39
2.2.3 Stárnutí slitin hliníku	39
2.3 Označování slitin hliníku	40
3 OCELI: PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI	42
3.1 Definice a rozdělení	42
3.1.1 Rozdělení do skupin jakosti	42
3.1.2 Rozdělení podle použití	43
3.2 Mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí	44
3.2.1 Faktory ovlivňující mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí	44
3.2.2 Změny mechanických vlastností v závislosti na čase a teplotě	46
3.3 Vymezení trendů budoucího vývoje	47
4 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ	48
5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	50
6 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	52
6.1 Seznam obrázků	52
6.2 Seznam tabulek	52

ÚVOD

Materiály používané v technické praxi získáváme zpracováváním nerostných surovin a přírodních látek rostlinného nebo živočišného původu. Z hlediska jejich uplatnění je lze obecně rozdělit na materiály konstrukční, sloužící k vlastní výrobě strojů, jejich součástí a stavbě konstrukcí, a materiály pomocné nebo také funkční, pomocí nichž se realizuje výroba, zpracování a doprava.

Mezi současné konstrukční materiály patří kovy a jejich slitiny, keramika a skla, polymery, elastomery, různé druhy dřeva. Důležitou skupinou jsou také jejich kombinace v podobě kompozitů.

Nejpoužívanější jsou stále kovy a slitiny kovů, přestože jejich význam v posledních desetiletích pomalu klesá na úkor ostatních zmiňovaných materiálů. Tato skutečnost je zapříčiněna dlouhodobou znalostí technologie jejich výroby a možností změny vlastností v závislosti na tepelném zpracování, dále také technologicky složitým a finančně náročným vývojem nových kompozitů, které by mohly kovy a jejich slitiny nahradit v některých tradičních aplikacích. Ve srovnání s ostatními konstrukčními materiály vynikají kovy svou houževnatostí, tvárností, dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Naopak největší nevýhodou je špatná odolnost vůči všem druhům korozního napadení. V závislosti na základním kovu, jehož podíl ve slitině je největší, se dělí kovové materiály na slitiny železa (oceli, litiny), hliníku, mědi, niklu apod. Dodnes bylo vyvinuto zhruba 20 000 slitin, z toho přibližně 60% představují slitiny železa, zbytek tvoří slitiny neželezných kovů, z nichž 25% slitiny mědi a 10% připadá na slitiny hliníku. Existují i jiné způsoby dělení, založené např. na fyzikálních vlastnostech, použití, způsobu výroby [4,6,8].



Obr. 1 Grafická interpretace vývoje významu jednotlivých skupin konstrukčních materiálů [8]

1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

1

Určujícím faktorem pro praktické použití daného konstrukčního materiálu jsou jeho vlastnosti. Ty mají zásadní vliv na životnost součásti a její schopnost plnit požadovanou funkci. Lze je definovat takto [8]:

*„**Vlastnosti** jsou projevy hmoty, které člověk pozoruje a zkoumá ze svého pohledu, tj. se zaměřením na užité vlastnosti.“*

Pro jejich porovnávání a hodnocení byla zavedena kvalitativní a kvantitativní kritéria. Těmito kritérii jsou nejčastěji různé fyzikální veličiny (elektrické, optické, magnetické, tepelné, chemické...). Vlastnosti jsou určovány experimentálně, číselnou hodnotu, která je kvantifikuje, označujeme obecně jako materiálovou charakteristiku. Jakoukoliv zkoumanou vlastnost můžeme zařadit do jedné z následujících kategorií: fyzikální vlastnosti, fyzikálně-chemické vlastnosti, technologické vlastnosti. Mechanické vlastnosti patří do kategorie fyzikálních vlastností, ale vzhledem k jejich komplexnosti a významu pro praxi, jsou často považovány za samostatnou kategorii [7].

1.1 Mechanické vlastnosti kovových materiálů a jejich určování

1.1

Mechanická vlastnost je odezva daného materiálu na vnější silové zatížení, charakterizovaná fyzikální veličinou, nejčastěji napětím a deformací. Při jejím určování se sice uplatňují zjednodušující předpoklady, ale tak, aby byla výsledná data použitelná a věrohodná. Mechanické vlastnosti závisí na mnoha faktorech, které zahrnují nejen vliv materiálu a tvaru zkušebního tělesa, ale také způsobu, jakým byly experimentálně zjištěny. Tyto faktory dělíme na interní a externí. Interní jsou tyto: chemické složení a chemická heterogenita, struktura a strukturní heterogenita, velikost a tvar tělesa, koncentrátoři napětí v podobě konstrukčních a technologických vrubů, stav povrchu konkrétní součásti. Mezi externí faktory řadíme teplotu, rychlost deformace, druh a časový průběh zatěžování, okolní prostředí [7].

Za základní mechanické vlastnosti považujeme pružnost, tvárnost, pevnost a houževnatost. Jejich definice jsou následující [8]:

*„**Pružnost (elasticita)** je schopnost materiálu deformovat se před porušením pružně. Pružná deformace je vratná, při odlehčení se rozměry tělesa vrátí na původní hodnoty. Při pružné deformaci neplatí zákon zachování objemu.“*

*„**Plasticita (tvárnost)** je schopnost materiálu deformovat se před porušením plasticky. Plastická deformace je deformace nevratná, při odlehčení se rozměry tělesa nevrátí na původní hodnoty. Při plastické deformaci platí zákon zachování objemu.“*

*„**Pevnost** je odolnost materiálu proti trvalému porušení soudružnosti částic.“*

*„**Houževnatost** je odolnost materiálu vůči vzniku deformace nebo porušení. Mírou houževnatosti je množství mechanické práce potřebné k vytvoření deformace nebo k porušení materiálu.“*

1.2 Mechanické charakteristiky

Určení konkrétní mechanické charakteristiky obnáší výrobu zkušební tělesa a zhodnocení vlivu silového působení na jeho chování. Tento proces je označován jako zkoušení mechanických vlastností a má mimořádný význam pro výrobce konstrukčních materiálů, technology a konstruktéry. Získané mechanické charakteristiky nelze pro konkrétní materiál považovat za konstantní, protože jejich hodnoty závisí stejně jako mechanické vlastnosti na podmínkách zkoušky.

1.2.1 Zkoušky mechanických vlastností materiálu a jejich význam

Výsledkem aplikace vnějších zátěžných sil na zkušební těleso může být jeho elastická deformace, která je dočasná a po odlehčení vymizí. Těleso se také může deformovat plasticky - nevratně, v krajním případě dochází k porušení soudržnosti materiálu v podobě trhliny a později lomu. Tímto způsobem probíhají mechanické zkoušky, které označujeme jako destruktivní. Pokud při zkoušení nedochází k trvalému poškození vzorku, změnám jeho chemického složení ani struktury, jedná se o zkoušky nedestruktivní. Výsledky mechanických zkoušek poskytují uživatelům i výrobcům materiálu určitou záruku jeho mechanických vlastností. Je tudíž žádoucí, aby byl pro určitou mechanickou zkoušku normalizován nejen její průběh, ale také tvar zkušební tělesa a kalibrace zkušebního zařízení. Těmito normami disponuje Český normalizační institut. Informace o konkrétní normě jsou dostupné na [www stránkách institutu](http://www.stránkách.institutu) [3,1].

Kromě mechanických zkoušek se v praxi uplatňují také zkoušky technologické, které slouží k posouzení, zda lze daný materiál podrobit určité technologické operaci, např. obrábění, kování, svařování, povrchovým úpravám atd. Mezi nejčastější patří zkoušky slévarenských vlastností – zabíhavosti a smrštění, zkoušky svařitelnosti, zkoušky tvářitelnosti za tepla a za studena [3].

Tab. 1 Přehled destruktivních zkoušek mechanických vlastností [8]

zatížení	krátkodobé	dlouhodobé
statické	<i>zkouška tahem</i>	<i>zkouška tečení</i>
	<i>zkouška tlakem</i>	
	<i>zkouška ohybem</i>	
	<i>zkouška krutem</i>	
	<i>zkouška stříhem</i>	
	<i>zkoušky tvrdosti</i>	
dynamické	<i>zkoušky tvrdosti</i>	<i>zkoušky vysokocyklové únavy</i>
	<i>zkouška rázem v ohybu</i> <i>zkoušky nízkocyklové únavy</i>	

Destruktivní a nedestruktivní zkoušení materiálu

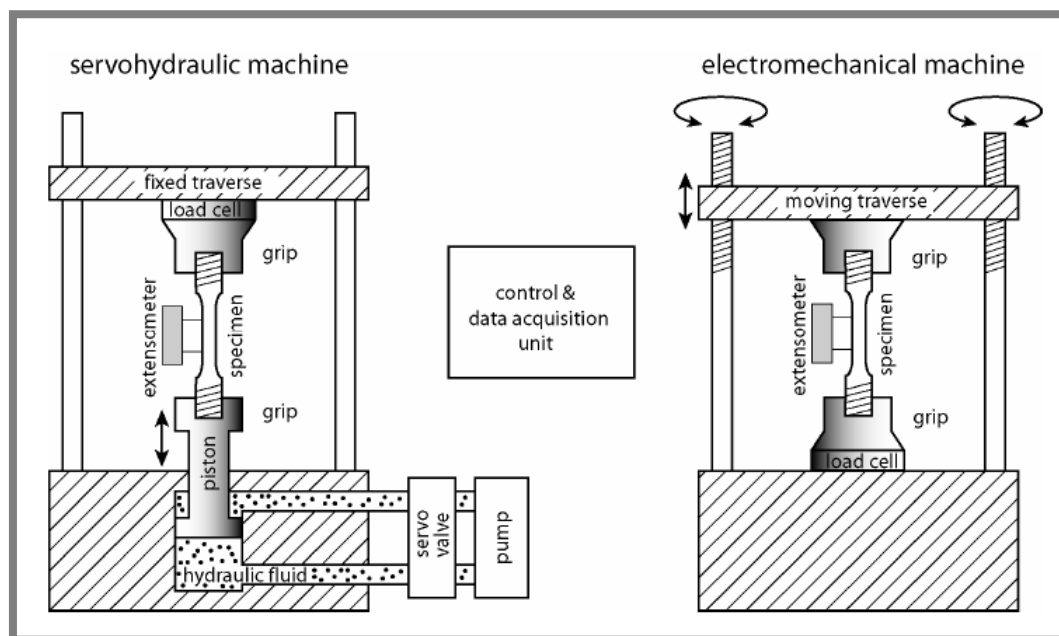
Destruktivní zkoušky je možné rozdělit podle rychlosti zatěžování tělesa na statické a dynamické a podle délky trvání na krátkodobé a dlouhodobé [7].

Nedestruktivní zkoušky mají nezastupitelné místo při kontrole kvality a řízení jakosti. Zahrnují dvě oblasti činnosti: zjišťování struktury materiálu a defektoskopii. První z nich pokrývá výrobu a přípravu metalografických vzorků, včetně optické a elektronové mikroskopie. Druhá se zabývá zjišťováním povrchových a vnějších vad součástí. Defektoskopické zkoušky jsou založeny na měření určité fyzikální veličiny, která se mění v závislosti na látkovém prostředí, což umožňuje stanovení velikosti, polohy a tvaru vady. Povrchové vady se detekují vizuálními metodami a penetračními zkouškami. Pro detekci vnitřních vad aplikujeme metody akustické, resp. ultrazvukové a radiologické. Jak povrchové, tak i vnitřní vady mohou být odhaleny magnetoindukčními a elektroinduktivními zkouškami [1,3].

1.2.2 Zkouška tahem

Tato zkouška je díky svému jednoduchému principu nejrozšířenější a nejuznávanější. V jejím průběhu je vzorek v podobě tyče s hladkým povrchem, obvykle kruhového nebo obdélníkového průřezu, namáhán jednoosou tahovou napjatostí až do přetržení. Okolní teplota se nejčastěji pohybuje v rozmezí 10 až 35°C, pokud není předepsána jiná konkrétní hodnota. Zkušební těleso je oběma konci pevně uchyceno upínacími hlavami k pohyblivému příčnicku na jedné straně a přes dynamometr k rámu na straně druhé. Pohyblivý příčník je uveden do pohybu pomocí vřeten poháněných motorem nebo hydraulicky. Důležitou součástí jsou zařízení na snímání deformace a síly během zatěžování zkušebního tělesa. Rychlost posunu příčnicku měříme v desetinách až jednotkách mm za minutu [3,7]. Všechny náležitosti určuje norma ČSN EN 10002, která má 5 částí [10].

1.2.2



Obr. 2 Schematicky znázorněný přístroj pro zkoušku tahem a způsoby jeho pohonu [18]

Zkušební tělesa

Podle průřezu dělíme zkušební tyče na ploché a válcové, dále z hlediska jejich geometrie na poměrné a nepoměrné. Rozhodujícím kritériem je následující vztah mezi počáteční měřenou délkou L_0 a plochou počátečního průřezu S_0 :

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0},$$

kde koeficientu k obvykle přiřazujeme hodnotu 5,65 pro L_0 větší než 20 mm. Pokud tyč splňuje tento předpis, hovoříme o tyči poměrné, v opačném případě, kdy je počáteční délka nezávislá na počátečním průřezu, se jedná o tyč nepoměrnou. Poměrné válcové tyče dále dělíme na krátké a dlouhé [8].

Tahový diagram a parametry určované tahovou zkouškou

Naměřená data představují závislost mezi působící silou a prodloužením vzorku, resp. mezi napětím a deformací. Jejich grafickým záznamem je tahový diagram, také někdy označovaný jako pracovní diagram. Na jeho vodorovné ose je poměrná délková deformace ε , na svislé ose napětí σ , resp. smluvní napětí R . Poměrná délková deformace je definována takto:

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} [-] \text{ nebo } \varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100 [\%],$$

kde L_0 je počáteční délka a L aktuální délka v určitém okamžiku během zatěžování [8]. Napětí se vypočítá ze vztahu:

$$R = \frac{F}{S_0} [\text{MPa}],$$

přičemž F je vnější síla působící na těleso. Tady bych rád zdůraznil, že jedná o napětí smluvní, vypočítané ze síly vztažené na počáteční nedeformovaný průřez S_0 . Všechny zbylé významné hodnoty napětí měřené během zkoušky tahem, tj. meze kluzu a mez pevnosti, jsou také smluvní, definované analogicky. Skutečné napětí je vzhledem ke zmenšujícímu se průřezu větší a pro popis jeho závislosti na skutečné deformaci používáme složitější empirické vztahy [3].

Deformace zkušební tělesa

U zatěžovaného tělesa se nejprve elasticky deformuje současně celý jeho objem, přičemž závislost deformace na napětí je lineární a materiál splňuje Hookův zákon pro ideální izotropní materiál: $\sigma = E \cdot \varepsilon$. Konstanta úměrnosti E se nazývá modul pružnosti v tahu nebo také Youngův modul. Závisí hlavně na materiálu, ale také na teplotě, u kovů se s rostoucí teplotou jeho hodnota snižuje [11].

Další důležitou charakteristikou je koeficient příčné kontrakce μ , označovaný též jako Poissonovo číslo. Je to poměr příčné a podélné deformace vzorku: $\mu = \frac{\psi}{\varepsilon} [-]$, příčná deformace tyče kruhového průřezu se vypočítá následovně:

$$\psi = \frac{D_0 - D}{D_0} [-],$$

kde D_0 je průměr počátečního průřezu a D průměr aktuálního průřezu v určitém okamžiku během zatěžování. Poissonova konstanta se u oceli pohybuje v rozmezí 0,27 – 0,30. Slitiny hliníku vykazují hodnotu 0,33 [8,12].

Kromě modulu pružnosti v tahu existuje také modul pružnosti ve smyku G . Tato konstanta vystupuje v analogii Hookova zákona pro smykové namáhání:

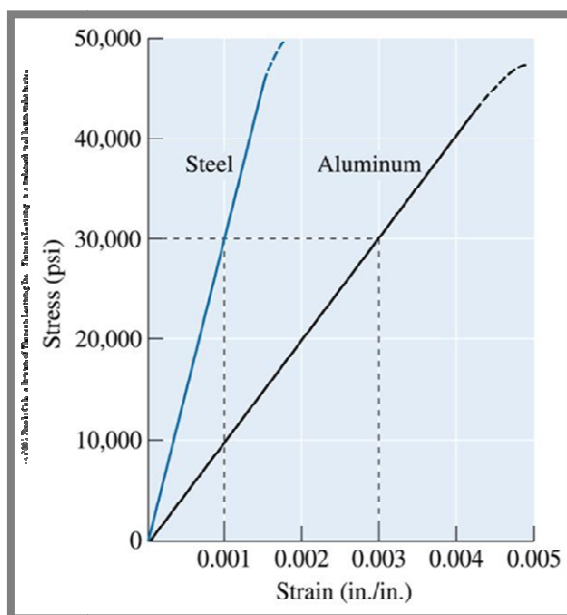
$[\text{MPa}]$, kde τ je smykové napětí a γ je úhlová deformace (přetvoření). Modul pružnosti ve smyku můžeme pro konkrétní materiál vyjádřit pomocí Youngova modulu a Poissonovy konstanty takto:

$$G = E / 2(1+\mu) [\text{MPa}].$$

Při dalším zatěžování tělesa se k elastické deformaci přidá deformace plastická. Materiál je v pružně-plastickém stavu a chová se „nelineárně“, Hookův zákon neplatí. Celková poměrná deformace je součtem plastické i elastické:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p.$$

Plastická deformace je podstatně rychlejší než elastická, což vede k tomu, že se křivka v tahového diagramu po dosažení meze kluzu odkloní od Hookovy přímky a dojde k jejímu zploštění, laicky řečeno, neroste tak rychle. Za tento průběh může zvyšující se hustota dislokací, která způsobuje snížení možnosti jejich pohybu v materiálu. Tomuto jevu říkáme deformační zpevňování. Jakmile dojde k vyčerpání možnosti pohybu dislokací, materiál ztrácí schopnost zpevňovat a na zkušebním tělese se lokalizuje kritické místo – krček, ve kterém dojde v důsledku růstu napětí k přetržení [8].



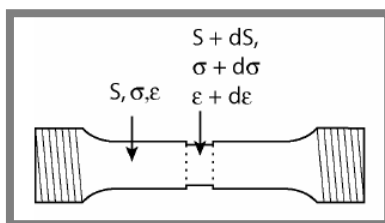
Obr. 3 Elastická deformace hliníku je při stejném zatížení přibližně třikrát větší než u oceli [9]

Princip plastické deformace kovu

Plastická deformace se v kovovém materiálu realizuje dvěma základními mechanismy. Skluzem dislokací a dvojčatěním, eventuálně jejich kombinací. Skluzem dislokací rozumíme pohyb jednorozměrných poruch krystalové struktury v takovém skluzovém systému mřížky, který je optimálně orientován vůči vnějšímu zatížení a je v něm dosaženo maximálního smykového napětí.

„Při dvojčatění se atomy v části krystalu přesunou o necelou meziatomovou vzdálenost, a to tak, že vznikne oblast mřížky souměrná podle roviny dvojčatění s neposunutou mřížkou [8].“

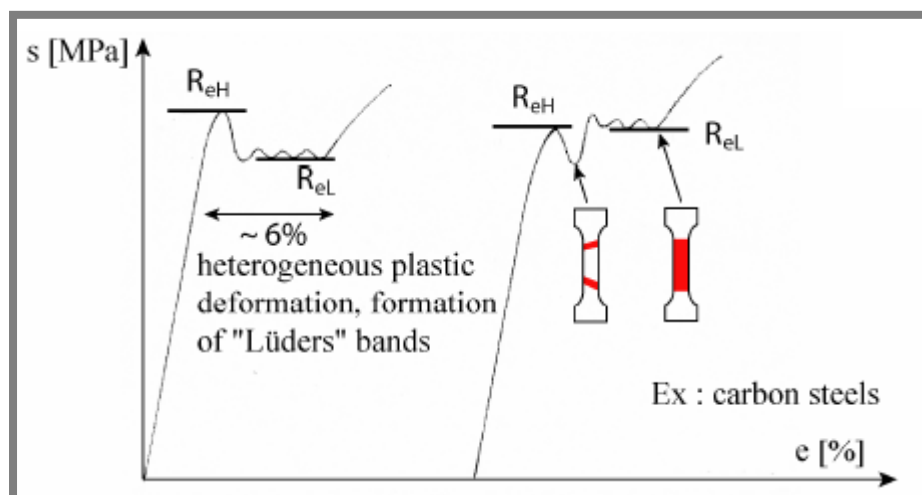
O tom, který z uvedených mechanismů bude převládat, rozhodují zejména rychlost deformace a teplota. Při relativně velkých rychlostech deformace a nízkých teplotách je dominantní dvojčatění. Šíření dislokací, a tudíž i chování materiálu, ovlivňuje i typ krystalové mřížky. Kovy s FCC mřížkou, jako např. hliník a jeho slitiny, se na rozdíl od kovů s BCC mřížkou vyznačují dobrými plastickými vlastnostmi jak ze tepla, tak i za studena. Kritické napětí potřebné pro posun dislokace v materiálu s BCC mřížkou, která se vyskytuje u α -modifikace železa je asi desetkrát větší ve srovnání s jeho γ -modifikací, která má FCC mřížku. Z uvedeného vyplývá, že BCC mřížka se vyznačuje vyšší pevností [3,8].



Obr. 4 Deformace zkušební tělesa [18]

1.2.3 Mechanické charakteristiky určované tahovou zkouškou

Napětí, při kterém se těleso začíná deformovat nevratně, nazýváme mezí kluzu. Její hodnota a vliv na tvar tahového diagramu závisí především na pohyblivosti dislokací. U některých materiálů, např. slitin, mohou být dislokace blokovány nejen jinými mřížkovými poruchami (substitučními, popř. intersticiálními atomy), ale také hranicemi zrn nebo precipitáty. Po jejich odtržení vzniká v diagramu nespojitost. Příslušné napětí označujeme jako tzv. výraznou mez kluzu a značíme R_e . V opačném případě, kdy dislokacím v pohybu během deformačního zpevňování brání pouze jejich zvyšující se množství, je obtížné takové napětí z diagramu určit, navíc závisí na citlivosti snímače. Proto se určuje smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, což je napětí, které odpovídá elastické poměrné deformaci $\varepsilon_e = 0,2 \%$. (Tuto hodnotu určuje česká norma, zahraniční normy uvádějí i jiné, např. 0,1% nebo 0,5%) Existují i materiály, u nichž dochází po dosažení meze kluzu k výraznému poklesu napětí v důsledku rozšíření deformace z malé oblasti na celý průřez zkušební tyče a jeho dočasněmu setrvání na přibližně konstantní hodnotě nebo kolísání kolem ní. Na povrchu tělesa se přitom vytváří skluzové pásy, které tvoří rozhraní mezi deformovanou a nedeformovanou oblastí, vzniká nehomogenní Lüdersova deformace. Toto chování je typické pro nízkouhlíkové oceli. Napětí, mezi kterými dochází k popsanému poklesu, označujeme jako horní mez kluzu R_{eH} a dolní mez kluzu R_{eL} .



Obr. 5 Tahový diagram nízkouhlíkové oceli s Lüdersovou deformací [17]

Maximální napětí dosažené během zkoušky tahem značíme R_m a nazývá se mez pevnosti v tahu. Při jeho dosažení není už plastická deformace po celé délce vzorku rovnoměrná, u tvárných materiálů vzniká krček. U smluvního tahového diagramu bývá obvykle toto napětí větší, než lomové napětí R_f , při kterém dojde k přetržení vzorku. Mez pevnosti v tahu je velice důležitá mechanická charakteristika, ze které se dají na základě empirických vztahů odhadovat hodnoty meze únavy, a existuje zde i spojitost mezi tvrdostí a mezí pevnosti v tahu, resp. mezí kluzu.

Meze kluzu a mez pevnosti spolu s modulem pružnosti v tahu představují pevnostní mechanické charakteristiky. Při zkoušce tahem zjišťujeme také deformační charakteristiky, a to tažnost A a kontrakci Z . Hodnoty pro výpočet deformačních charakteristik měříme na vzorcích před a po přetržení. Přehled výpočtových vztahů je v tabulce 2. Ve srovnání např. s nerezovou ocelí má čistý hliník vysokou tažnost a kontrakci, což demonstruje následující obrázek [6].



Obr. 6 Přetržený vzorek z hliníku a nerezavějící oceli [18]

Nejvyšší hodnoty R_m se u slitin hliníku nalézají kousek nad hranicí 700 MPa, zatímco některé oceli dosahují po mechanickém a tepelném zpracování hodnot přesahujících 3000 MPa [3], tedy zhruba čtyřikrát vyšších. Pokud ovšem bereme v úvahu měrné pevnostní charakteristiky, tj. poměr R_m/ρ , dostávají se mnohé hliníkové slitiny díky své nízké hustotě na úroveň ocelí, nebo je předčí [1].

Pro srovnání: např. slitina AlZnMgCu1,5 dosahuje meze pevnosti až 530 MPa, konstrukční ocel S420N přibližně stejné. S420N má o 42% vyšší tažnost. AlZnMgCu1,5 se vyznačuje dobrou obrobitelností, ale je nevhodná ke svařování, naopak ocel S420N je přímo určena pro svařované konstrukce [2,4].

Určení meze únavy ocelí a slitin hliníku pomocí hodnoty meze pevnosti

U ocelí přibližně platí [6]:

$\sigma_{co} = 0,5R_m$ pro namáhání ohybem,

$\sigma_c = 0,45R_m$ pro namáhání tahem,

$\tau_c = 0,29R_m$ pro namáhání na krut.

Meze únavy hliníkových slitin odhadujeme pomocí R_m následovně:

$\sigma_c = 0,40R_m$ pro slitiny, jejichž $R_m < 338$ MPa,

$\sigma_c = 131$ MPa pro slitiny s $R_m \geq 338$ MPa.

Tab. 2 Přehled mechanických charakteristik určených při zkoušce tahem [8]

pevnostní charakteristiky	
výrazná mez kluzu	$R_e = \frac{F_e}{S_0}$ [MPa]
horní mez kluzu	$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$ [MPa]
dolní mez kluzu	$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$ [MPa]
smluvní mez kluzu	$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0}$ [MPa]
mez pevnosti	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$ [MPa]
deformační charakteristiky	
tažnost	$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$ [%]
kontrakce	$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100$ [%]

Další mechanické vlastnosti určené tahovou zkouškou

Tahová houževnatost představuje celkovou práci, kterou je třeba během zkoušky tahem vykonat, aby došlo k přetržení zkušební tělesa. Obecně je definována vztahem:

$$w_u = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma \cdot d\varepsilon \text{ [J]},$$

kde ε_f je celková poměrná deformace v okamžiku lomu. Část této energie, představující práci spotřebovanou na elastickou deformaci, označujeme jako resilience w_e a v podstatě se jedná o schopnost materiálu absorbovat energii při elastické deformaci. Z matematického hlediska je číselná hodnota tahové houževnatosti, resp. resilience, rovna ploše pod křivkou diagramu [3].

1.2.4 Zkoušky tvrdosti a jejich rozdělení

1.2.4

Ve srovnání s ostatními mechanickými zkouškami jsou zkoušky tvrdosti levné, rychlé a snadno proveditelné, navíc při nich není třeba odebírat vzorek materiálu a vyrábět z něho zkušební těleso. Další výhodou je možnost odhadnout z naměřených hodnot tvrdosti další mechanické charakteristiky. Zkoušky tvrdosti lze zařadit mezi nedestruktivní metody zkoušení, protože na povrchu tělesa vzniká velmi malá, co do rozměrů zanedbatelná deformovaná oblast [3,7].

*„**Tvrlost** je mechanická vlastnost definovaná jako odpor, který klade materiál proti vnikání cizího tělesa.“*

Podstatou všech dynamicko-plastických a staticko-plastických metod jejího měření je vtlačování malého tělíska - indontoru do povrchu zkoušeného materiálu za určitých, předem stanovených podmínek. Tvrlost se pak určí z deformace, která takto vznikla na povrchu tělesa.

U dynamicko-elastických metod se povrch deformuje pouze elasticky. Kromě dělení z hlediska deformace povrchu na zkoušeném tělese se zkoušky tvrdosti dělí také podle rychlosti zatěžování na dynamické a statické [8].

Tab. 3 Rozdělení metod měření tvrdosti

staticko-plastické
<i>zkouška tvrdosti podle Brinella</i>
<i>zkouška tvrdosti podle Vickerse</i>
<i>zkouška tvrdosti podle Rockwella</i>
dynamicko-plastické
<i>Poldi kladívko</i>
<i>Baumannovo kladívko</i>
dynamicko-elastické
<i>Shoreho skleroskop</i>
<i>duroskop</i>

Další možné dělení podle jejich principu:

vtiskové (do této skupiny patří metody dynamicko-plastické a staticko-plastické),

kyvadlové a vrypové (Martensova metoda, v praxi se nepoužívají),

odrazové (dynamicko-elastické).

Dělení podle účelu měření:

metody pro určování makrotvrdosti (pomocí nich se měří tvrdost kovového materiálu jako celku),

metody pro určování mikrotvrdosti (umožňují měřit tvrdost jednotlivých strukturních složek materiálu a jeho tenkých povrchových vrstev).

Dosažitelné tvrdosti hliníkových slitin jsou ve srovnání s oceli relativně nízké a nepříjemným důsledkem této skutečnosti je snadné poškození (nejen) funkčních povrchů součástí [4].

Zkouška tvrdosti podle Brinella (ČSN EN ISO 6506)

Indentor má tvar kuličky, která po zatížení předepsanou silou vytvoří na zkoušeném povrchu tělesa vtisk. Norma určuje délku časového intervalu od počátku do plného zatížení a dobu, po kterou plné zatížení na kuličku (a na materiál) působí. Zkouška se musí provádět na hladkém, rovném povrchu bez okují a bez použití maziv. Zkušební zatížení stanovené normou je v rozmezí 9,807 – 29420 N a průměr vtisku d [mm] by se měl pohybovat mezi 0,24 – 0,6 D , kde D [mm] je průměr vtláčované kuličky. Pokud to rozměr tělesa dovoluje, volí se přednostně $D = 10$ mm.

Pro materiály s tvrdostí menší než 350 se používá kulička z kalené oceli, pro tvrdší kulička z vysokopevnostní oceli, nebo karbidu wolframu. V prvním případě je naměřená hodnota doprovázena značkou HBS, v tom druhém HBW. Hodnota tvrdosti se určí jako poměr zatěžující síly a plochy vtisku, neformálně ji lze proto považovat za určitou hodnotu napětí. Výpočet probíhá takto: výsledný průměr vtisku d se spočítá jako aritmetický průměr ze dvou dílčích průměrů d_1 a d_2 navzájem kolmých, poté se pomocí tabulek uvedených v normě určí v závislosti na materiálu hodnota poměru $\frac{0,102 \cdot F}{D^2}$ a známé hodnoty d , D , F se dosadí do vztahu:

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

nebo se výsledná tvrdost odečte pomocí hodnot d , D , F z tabulek [3,8]. Tato metoda se často používá pro měření tvrdosti slitin hliníku. Tvrdost čistého hliníku je relativně nízká, zhruba 15 HBS. Naopak vytvrditelné slitiny, např. AlZn5Mg3Cu (EN AW 7022), dosahují hodnot 170 HBS [1]. Žáropevné oceli s martenzitickou maticí (např. X12Cr13) mají po zakalení a popuštění tvrdost až 58 HRC, což odpovídá přibližně hodnotě 650 HB [4].

Zkouška tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507)

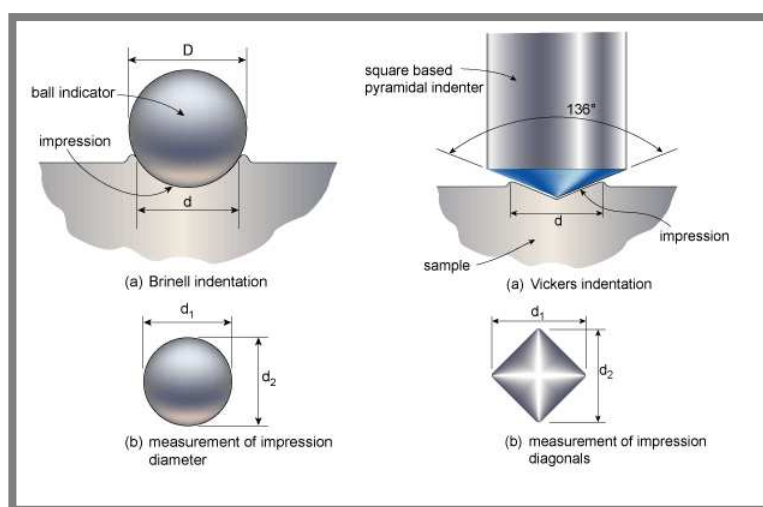
Jedná se o metodu měření tvrdosti, která je nejrozšířenější v Evropě. Vnikací těleso s diamantovým hrotem má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu. Jeho vrcholový úhel, který svírají protilehlé stěny, je 136°. Průběh zkoušky je analogický jako v předchozím případě. Tvrdost je určena poměrem zatěžující síly a plochy vtisku, jehož charakteristickým rozměrem je úhlopříčka d , určená jako aritmetický průměr obou skutečných úhlopříček d_1 a d_2 . V závislosti na velikosti zkušebního zatížení rozlišujeme 3 typy zkoušek:

- zkoušky pro měření tvrdosti v rozsahu HV 5 až HV 100, zkušební síla $F = 49,03$ až 980,7 N

- zkoušky pro měření tvrdosti v rozsahu HV 0,2 až HV 5, zkušební síla $F = 1,9614$ až $49,03$ N
- zkoušky pro měření mikrotvrdosti pro HV menší než 0,2 a zkušební sílu $F < 1,9614$ N

Z hodnot d , F vypočítáme výslednou tvrdost buď pomocí vztahu $= 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$, nebo odečtením z tabulek.

Při zkouškách podle Vickerse vzniká v tělese ve srovnání s Brinellovou metodou podstatně menší vtisk, takže při měření tvrdosti u výrazně strukturně heterogenního materiálu mohou naměřené hodnoty značně kolísat podle toho, do které strukturní složky jsme se s hrotem „trefili“. V tomto případě je vhodnější měřit tvrdost pomocí kuličky, která působí na větší plochu, a máme jistotu, že naměřená hodnota reprezentuje „průměrnou“ tvrdost povrchu [8].



Obr. 7 Tvary indentorů při zkoušce podle Brinella a Vickerse [13]

Zkouška tvrdosti podle Rockwella (ČSN EN ISO 6508)

Podstatou zkoušky je vtlačování indentoru ve podobě diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120° a poloměrem zaoblení hrotu $R = 0,2$ mm, nebo ocelové kuličky o průměrech $D = 1,5875$, nebo $3,175$ mm. Zkoušený povrch musí splňovat stejné požadavky jako u předchozích dvou metod, tj. musí být hladký, rovný, bez okují a maziva, ale princip měření je naprosto odlišný. Vnikací těleso se při kontaktu s povrchem nejprve zatíží předběžným zatížením F_0 , které se poté během 2 až 8 sekund zvýší o F_1 na koncovou hodnotu F . Po uplynutí normou stanovené doby, tj. 4 až 6 sekund, se zatížení opět sníží na F_0 . Na rozdíl od zkoušek podle Brinella a Vickerse se tvrdost určí z hloubky vtisku, který zůstane na povrchu po konečném odlehčení na předběžné zatížení F_0 . Nejedná se tedy o sílu vztaženou na plochu vtisku. Hodnoty tvrdosti přímo odečítáme na stupnici hloubkoměru, která je zabudována na zařízení (tvrdoměru). Existuje celkem 15 stupnic tvrdosti (A, B, C, D, E, F, G, H, K, 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T, 45 T), z nichž každá má stanoveny následující parametry: tvar a rozměry indentoru, velikosti celkového, předběžného a přídatného zatížení, symbol a rozsah tvrdostí, ve kterém se používá [7,8].

Určení tvrdosti pomocí Baumannova kladívka a Poldi kladívka

Ve výrobních procesech se častěji používají přenosná zařízení pro měření tvrdosti, a to Poldi kladívko, případně Baumannovo kladívko. Obě kladívka pracují na podobném principu, vyhodnocení tvrdosti je obdobné jako u zkoušky tvrdosti podle Brinella. V obou případech je indentorem kalená ocelová kulička o průměru $D = 10 \text{ mm}$. U Poldi kladívka je zatlačena do zkoušeného materiálu a zároveň do etalonu o předem známé tvrdosti. Z rozměrů vtisků se pomocí tabulek určí požadovaná tvrdost materiálu. Zátěžná síla je vyvozena ručně, úderem dílenského kladiva do Poldi kladívka. Přítomnost etalonu je zde velice důležitá, protože zajišťuje, aby naměřená hodnota tvrdosti nezáležela na síle úderu kladivem. U Baumannova kladívka se etalon nepoužívá, kulička je do materiálu zatlačena úderem razníku, který je do pohybu uveden pomocí pružiny. Naměřené hodnoty tvrdosti doprovází značka HB BAUMANN, resp. HB POLDI [7,8].

Měření tvrdosti dynamicko-elastickými metodami

Shoreho skleroskop a duroskop využívají přeměň mechanické energie. Zkušební těleso se pustí z počáteční výšky H na zkoušený materiál, jeho počáteční potenciální energie se začne měnit na kinetickou, po odrazu zpět na potenciální. Výška h , do které se těleso vrátí po odrazu je menší, protože se část celkové mechanické energie soustavy spotřebovala na elastickou deformaci zkoušeného povrchu a tření. Z úbytku energie, resp. z výšky odskoku h , určíme tvrdost materiálu pomocí tabulek, nebo ji odečteme přímo na stupnici, pokud je kalibrovaná v jednotkách tvrdosti HSh. Duroskop se liší pouze tím, že se zkušební těleso pouští na pevném rameni pod počátečním úhlem α na vertikálně orientovaný povrch zkoušeného tělesa, úhel jeho odskoku označujeme β [7].

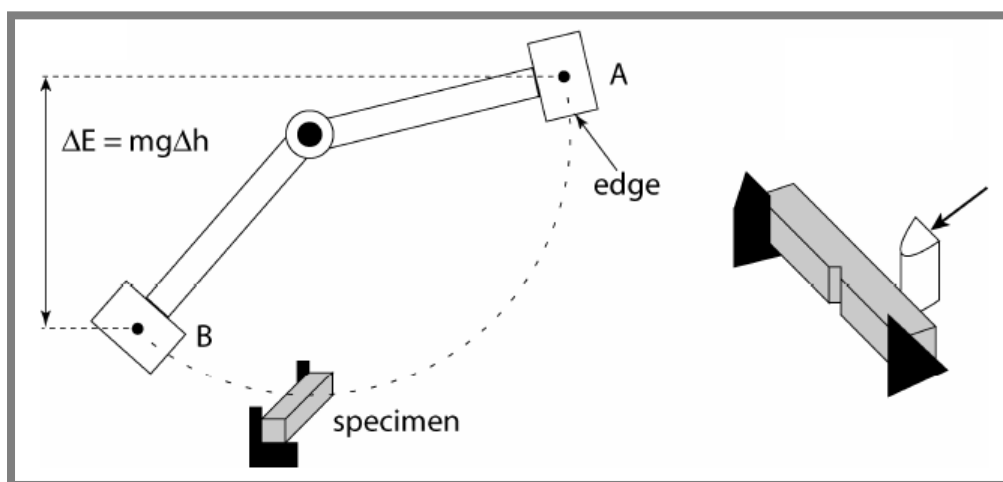
1.2.5 Zkouška rázem v ohybu (ČSN EN 10045)

Význam zkoušky rázem v ohybu, křehkolomové chování materiálů

Cílem zkoušky je v podstatě analyzovat náchylnost materiálu ke křehkému lomu. Tato vlastnost bezprostředně souvisí s houževnatostí, což je jedna ze základních mechanických vlastností. U materiálů s BCC mřížkou můžeme pozorovat následující jev: při tahové zkoušce, kde jsou namáhány jednoosou napjatostí, se chovají jako houževnaté, tj. mají relativně vysoké deformační a napětíové charakteristiky, ale v momentě, kdy jsou podrobeny napjatosti, která se blíží rovnoměrné tahové, dochází ke křehkému lomu. Trojosá tahová napjatost v tomto případě vede ke snížení smykového napětí, které je potřebné pro pohyb dislokací, což způsobí ztrátu plasticity. Tohoto stavu lze docílit nejen změnou napjatosti v tělese, ale také snížením teploty a zvýšením rychlosti zatěžování. Křehký lom je v praxi nežádoucí z následujících důvodů:

- Může k němu dojít u tělesa, které nemá na povrchu žádné viditelné trhliny nebo jiné vady.
- Porušování tělesa probíhá tak rychle, že nejsme schopni rozlišit okamžik iniciace trhliny a její následné šíření.
- Křehký lom nelze ovlivnit ani rychlou změnou vnějšího zatížení.

Základním problémem při navrhování stroje nebo konstrukce je tedy zajištění takových podmínek, při kterých nedojde ke křehkému lomu. Kromě vhodné volby materiálu toho docílíme také tím, že bude provozní teplota materiálu dostatečně vysoko nad tzv. tranzitní teplotou, pod kterou k němu dochází [1,11].



Obr. 8 Princip zkoušky rázem v ohybu, způsob přeražení vzorku (vlevo) [18]

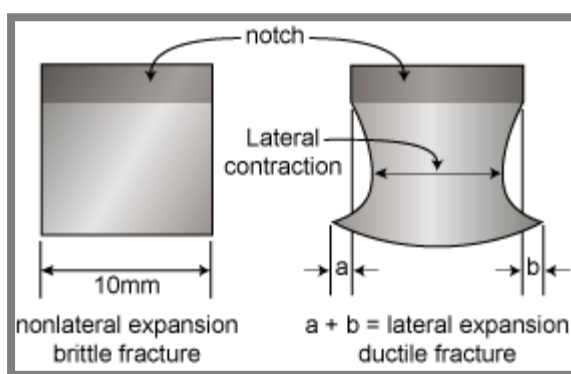
Podstata zkoušky a určované charakteristiky

Podmínky vzniku křehkého lomu do jisté míry simuluje zkouška rázem v ohybu, při které je zkušební těleso opatřeno vrubem a po eventuálním ohřátí, resp. ochlazení na požadovanou teplotu přeraženo nárazem kladiva na výkyvném rameni, tzv. beranem.

Vyhodnocuje se počáteční výška beranu h a výška h' , do které se vyhoupne po přeražení vzorku. Standardní rozměry zkušebního tělesa jsou 10x10x55mm, vrub ve tvaru písmene U nebo V je vždy umístěn uprostřed tak, aby se při nárazu kladiva rozevíral. Účelem zkoušky je určení celkové energie potřebné k přeražení vzorku,

která se označuje jako nárazová práce a značíme ji obecně K [J], v závislosti na typu vrubu na zkušebním tělese KU , popř. KV . Její výpočet, stejně jako v případě měření tvrdosti dynamicko-elastickými metodami, vychází ze zákona zachování mechanické energie. Rozdíl potenciálních energií kladiva před a po přeražení vzorku je roven nárazové práci: $K = Ep' - Ep = m.g.(h' - h)$ [J]. Potenciální energie kladiva je v každém okamžiku definovaná jeho hmotností a výškou od zvolené základní hladiny s nulovou potenciální energií [8].

Kromě velikosti nárazové práce se při zkoušce hodnotí také vzhled lomové plochy, který závisí na způsobu, jakým lom proběhl. Pokud se při nárazu kladiva těleso významně plasticky deformuje, označujeme jeho lom z hlediska energetického jako houževnatý, z hlediska vzhledu lomové plochy jako tvárný. V opačném případě, kdy přelomení předchází pouze nepatrná deformace je lom energeticky podstatně méně náročný - křehký, z hlediska lomové plochy štěpný [14].



Obr. 9 Deformace příčného průřezu pod vrubem při křehkém (vlevo) a tvárném lomu [18]

Zkouška rázem v ohybu se obvykle neprovádí pouze při jedné teplotě, ale opakuje se několikrát pro větší rozsah teplot. Z naměřených hodnot získáme přechodovou křivku, která vyjadřuje závislost nárazové práce na teplotě. Pomocí takto naměřených přechodových křivek určujeme tranzitní teploty, jejichž smyslem je vystihnout polohu přechodové (tranzitní) oblasti mezi křehkým a houževnatým lomem, jinými slovy určit, do jaké teploty je materiál použitelný, aniž bychom riskovali křehký lom. Při zkouškách se stanovují tranzitní teploty určené vzhledem lomové plochy nebo hodnotou nárazové práce. Nejvýznamnější jsou tyto: tranzitní teplota $t_{50\%}$, při které má přibližně 50% lomové plochy vzhled odpovídající porušení tvárným, resp. štěpným lomem, tranzitní teplota $t_{x[J]}$, určená pro konkrétní, normou stanovenou hodnotu nárazové práce x [J] (u ocelí je nejčastější teplota t_{27J} , kdy je pro přelomení vzorku potřeba nárazové práce o velikosti 27J), zvláštním případem je tranzitní teplota $t_{0,5}$ odpovídající průměrné hodnotě z nejvyšší a nejnižší nárazové práce na přechodové křivce, obvykle naměřené na zkušebním tělese s V-vrubem:

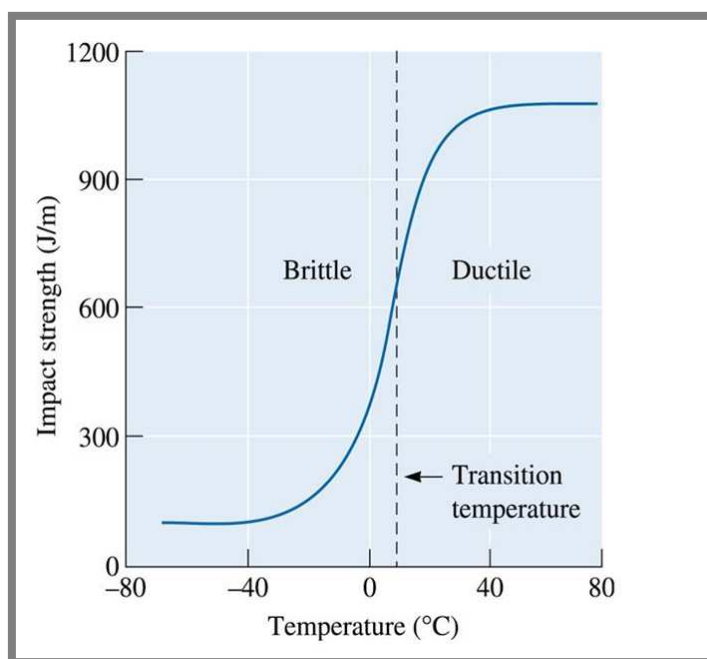
$$KV = \frac{(KV_{max} + KV_{min})}{2}.$$

V současnosti se používá také tzv. instrumentovaná zkouška rázem v ohybu (ČSN EN ISO 14556), při které je kladivo vybaveno měřícím zařízením pro snímání závislosti průhybu na síle a síly na čase [3].

Tranzitní chování ocelí a hliníkových slitin

Skutečnost, že se hodnota nárazové práce mění v závislosti na teplotě, označujeme jako tranzitní chování. Můžeme ho nalézt u většiny kovů, v jejichž struktuře se vyskytují fáze s BCC mřížkou, což jsou např. oceli s nízkým obsahem uhlíku. U hliníku a jeho slitin se podobné chování vyskytuje jen zřídka, nebo vůbec. V některých případech se dokonce může hodnota nárazové práce s klesající teplotou zvyšovat.

Použitelnost zkoušky rázem v ohybu je v případě slitin hliníku v podstatě omezena pouze na vysokopevné slitiny. Slitiny s nižší pevností, včetně čistého hliníku, se často při zkouškách ani nepodaří přelomit a pokud jsou naměřeny nějaké hodnoty, nejsou prakticky použitelné [2,3,8].



Obr. 10 Tranzitní křivka s vyznačenou tranzitní teplotou [9]

Nárazová práce versus vrubová houževnatost

Nárazová práce se v praxi často přepočítává na vrubovou houževnatost KC , a to následovně:

$$KC = \frac{K}{S_0} [\text{J}/\text{cm}^2],$$

kde S_0 je plocha příčného průřezu v místě vrubu. V závislosti na použitém typu vrubu se vrubová houževnatost označí KCV nebo KCU , vzorce pro výpočet jsou analogické: $KCV = KV/S_0 [\text{J}/\text{cm}^2]$, $KCU = KU/S_0 [\text{J}/\text{cm}^2]$. Ve starších normách jsou běžně uváděny tranzitní teploty právě v závislosti na vrubové houževnatosti. Současně platné normy používají pouze pojem nárazová práce, nebo absorbovaná energie. Přepočet nárazové práce na vrubovou houževnatost má význam v podstatě jen pro porovnávání. Materiálová charakteristika, která kvantifikuje odolnost materiálu proti vzniku lomu a šíření trhliny, je lomová houževnatost [3,8].

1.2.6 Lomová houževnatost a faktor intenzity napětí

Teorie zabývající se touto problematikou je dosti rozsáhlá a složitá, takže se omezím na nejdůležitější pojmy a vztahy. Na základě tzv. K-koncepce byly v rámci lineární elastické lomové mechaniky (LELM) za určitých zjednodušujících předpokladů odvozeny vztahy pro výpočet faktoru intenzity napětí, tzv. K-faktoru, který určuje rozměr zplastizované zóny v místě vrubu, resp. trhliny, tvar rozevření trhliny a množství uvolněné energie napjatosti při jejím šíření. Faktor intenzity napětí značíme K_I , K_{II} , K_{III} v závislosti na zatěžovacím módu, tj. způsobu zatěžování trhliny (I – rozevírací mód, II – smyk v rovině, III – smyk v prostoru). Vztahy pro výpočet K_I , což je z hlediska šíření trhliny nejnebezpečnější mód, lze obecně zapsat ve tvaru:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot \psi(a/b) \text{ [MPa} \cdot \text{m}^{1/2}\text{]},$$

kde a [m] je délka trhliny ve směru jejího šíření, b [m] je šířka tělesa ve směru šíření trhliny, $\psi(a/b)$ je polynomičká funkce závislá na poměru (a/b) a σ [MPa] je nominální napětí v místě trhliny. Faktor intenzity napětí dále závisí na typu napjatosti v kořeni trhliny, rychlosti zatěžování, teplotě a materiálu. Hodnota faktoru, při které dojde k nestabilnímu šíření trhliny se označuje jako lomová houževnatost, v tomto případě K_{IC} , a určuje se experimentálně. Za předpokladu, že $\psi(a/b) \approx 1$ platí:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a_c}.$$

Potom a_c je tzv. tranzitní délka trhliny, tj. délka, při které dojde k jejímu nestabilnímu šíření. Predikce chování trhliny v materiálu při daném zatěžování je z hlediska praktického použití založena na srovnání konkrétního faktoru intenzity napětí, vypočítaného na základě uvedených vztahů, a lomové houževnatosti, určené pro daný materiál experimentálně. Výpočet faktoru intenzity napětí není vždy jednoduchý, často musíme brát v úvahu kombinaci více zatěžovacích módů, vyhodnotit jejich nebezpečnost a až po dokončení výpočtu zpětně posoudit použitelnost LELM, resp. K-koncepce pro řešení daného problému. Pokud podmínky použitelnosti nejsou splněny, je nutné použít metody nelineární lomové mechaniky (COD koncepce, J-integrál) [11,14].

Vliv struktury na lomovou houževnatost

V souvislosti se strukturou materiálu lze obecně shrnout poznatky o odolnosti materiálu proti růstu trhliny následovně:

Velké koncentrace strukturních vad podstatně snižují napětí potřebné k šíření a iniciaci trhliny, u tvárných kovů se okolí čela trhliny výrazně plasticky deformuje, dochází ke snížení vrubového účinku (koncentrace napětí) a klesá hodnota faktoru intenzity napětí, naopak slitina s vyšší pevností a horšími deformačními charakteristikami má nižší lomovou houževnatost.

Při vyšších teplotách je lomová houževnatost obecně vyšší i v případě dynamického (rázového) zatěžování, zatímco při pokojových teplotách s rychlostí zatěžování klesá. Materiály s relativně malou velikostí zrna mají vyšší lomovou houževnatost [8,14].

1.2.7 Zkoušky únavy materiálu

Únavové poškození materiálu

Reálné strojní součásti jsou často podrobeny zatěžování, které je proměnné v čase. Jeho průběh bývá většinou nepravidelný, někdy úplně nahodilý. Proměnlivé namáhání představuje z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti součásti ve většině případů podstatně větší riziko, než statické namáhání. Opakované zatěžování materiálu vede ke kumulaci plastické deformace. Její příčinou je přemísťování dislokací, které způsobí jejich nerovnoměrné prostorové uspořádání ve struktuře. Místa s vyšší hustotou dislokací, jejichž pohyb je omezen, jsou zpevněná, naopak oblasti nízké hustoty dislokací se dál plasticky deformují. Na jejich rozhraní se tvoří únavové skluzové pásy. Vlivem plastické deformace se po sobě skluzové pásy posunují a vytváří tak na povrchu intruze a extruze. První mikrotrhliny vznikají obvykle v těchto místech, poté rostou a v důsledku stále nerovnoměrnějšího rozložení napětí a deformace dojde k šíření pouze jedné – magistralní trhliny. Po jejím rozšíření na určitou část průřezu dochází k únavovému lomu. Tento proces probíhá v zatěžovaném materiálu při napětích menších než mez pevnosti R_m , často dokonce i menších než mez kluzu R_e , což je příčinou toho, že opakovaně namáhaný materiál vydrží mnohem menší zatížení než ten, který je namáhaný pouze staticky [8,11].

Zkoušení únavových vlastností

Nejpřesnějším způsobem určení únavového chování je experiment na reálné součásti v podmínkách blízcích se těm provozním. Uskutečnění takových experimentů s sebou ovšem přináší vysoké finanční náklady. Zkoušení únavových vlastností materiálu proto probíhá na vhodně zvolených zkušebních vzorcích, kdy je reálný průběh zatěžování nahrazen idealizovaným cyklem se sinusovým průběhem, eventuálně souborem sinusových zátěžných cyklů s různými amplitudami. Průběh zatěžování je určen následujícími parametry: horní napětí σ_h , dolní napětí σ_n , amplituda napětí σ_a a střední napětí. Všechna se uvádí v MPa.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_n}{2}, \sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_n}{2}$$

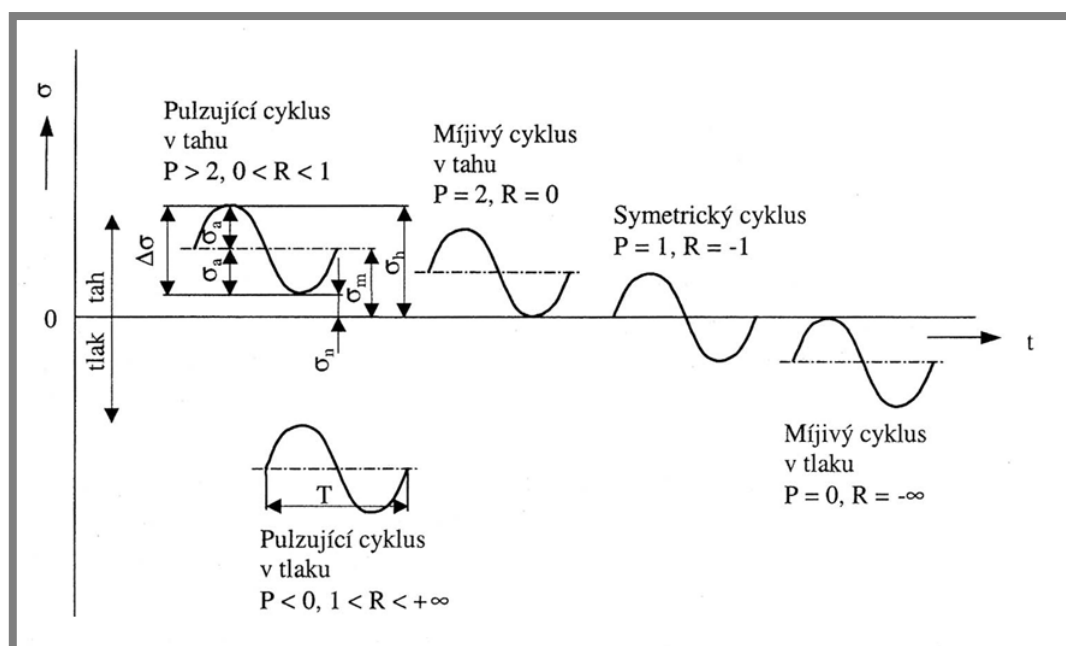
Pro určení polohy cyklu, tj. jestli se jeho střední napětí nachází v tahové nebo tlakové oblasti, používáme parametr asymetrie (napětíový poměr)

$$R = \frac{\sigma_n}{\sigma_h}$$

a parametr asymetrie (amplitudový poměr)

$$P = \frac{\sigma_h}{\sigma_a}.$$

Zvláštním případem je symetrický cyklus, jehož střední napětí je nulové, a platí tedy: $\sigma_h = |\sigma_n| = \sigma_a$. V ostatních případech, kdy $\sigma_m \neq 0$, označujeme cykly jako asymetrické [8,6,11].



Obr. 11 Poloha zátěžného cyklu v závislosti na parametrech asymetrie [8]

Wöhlerova křivka

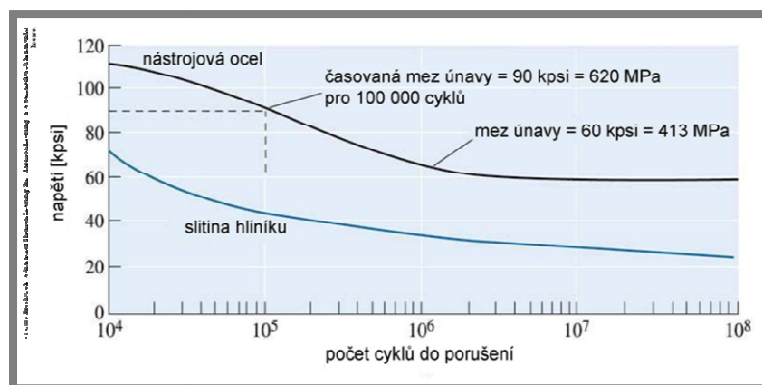
Základní mechanickou charakteristikou v oblasti únavových vlastností je Wöhlerova křivka (S-N křivka). Vyjadřuje závislost amplitudy napětí σ_a na počtu zátěžných cyklů (kmitů) N_C , při kterém dojde k únavovému lomu. K jejímu určení je nutné zkoušet desítky (standardně 8 - 12, pro přesnější výsledky 15 - 20), v ojedinělých případech i stovky vzorků stejného tvaru, rozměrů a jakosti povrchu. Zkouška probíhá tak, že se první vzorek zatíží napětím odpovídajícím mezi kluzu a zaznamená se počet cyklů, po kterém dojde při tomto zatížení k únavovému lomu. Potom se napětí postupně snižuje a zkouška se opakuje až do okamžiku, kdy více vzorků vydrží normou stanovený počet cyklů. Např. pro oceli a litiny je stanoven počet 10^7 , pro lehké kovy a jejich slitiny 10^8 . Snižováním amplitudy se počet cyklů do lomu zvyšuje až do chvíle, kdy dosáhneme meze únavy σ_c , tj. napětí, při kterém k lomu nedojde a součást teoreticky vydrží neomezený počet cyklů. Experimentálně bylo zjištěno, že vliv obvyklých frekvencí zatěžování na hodnotu meze únavy je zanedbatelný, ale jeho vliv na životnost součásti samozřejmě zanedbat nelze [8]. Tento popis stanovení meze únavy je svým způsobem dost zjednodušený, ve skutečnosti mají naměřené hodnoty velký rozptyl, do jisté míry je nutné užití statistických metod a aproximací, přesné postupy určuje norma.

Wöhlerova křivka má u ocelí charakteristický tvar, v závislosti na počtu cyklů do lomu na ní rozlišujeme tyto základní oblasti: oblast kvazistatického lomu ($N_C < 10^2$), oblast nízkocyklové únavy ($10^2 < N_C < 10^5$), oblast vysokocyklové únavy s omezenou životností ($10^5 < N_C < 10^7$) a oblast vysokocyklové únavy s neomezenou životností ($N_C \geq 10^7$). Zjednodušeně se rozsah cyklů, ve kterém křivka klesá označuje jako oblast časované pevnosti, vodorovná část, kde se křivka asymptoticky blíží

k mezi únavy je oblast trvalé pevnosti (některé zdroje uvádí i odlišná rozdělení, kde se jednotlivé oblasti mohou překrývat). Stejně jako u většiny ostatních zkoušek mechanických vlastností se jedná o smluvní hodnoty napětí, které neberou v úvahu změny příčného průřezu zkušební vzorku během zatěžování. Wöhlerova křivka je proto prakticky použitelná jen v oblasti vysokocyklové únavy s mikroplastickou deformací, protože pro oblasti nízkocyklové únavy a kvazistatického lomu je charakteristická makroplastická deformace a skutečné hodnoty napětí se od těch smluvních podstatně liší, navíc je určování hodnot z této části únavové křivky vzhledem k jejímu malému sklonu dost nepřesné. Pokud tedy potřebujeme hodnotit chování v oblasti nízkocyklového zatěžování, musíme použít jinou charakteristiku, a to Manson-Coffinovu křivku. Vyjadřuje závislost amplitudy elastické, plastické a celkové deformace na počtu cyklů [8,11].

Únavové vlastnosti slitin hliníku

U slitin hliníku je posuzování únavového chování odlišné, protože u nich dochází k lomu při konečném počtu cyklů nezávisle na amplitudě napětí a mez únavy, definovaná jako napětí, ke kterému se klesající únavová křivka asymptoticky blíží, tudíž neexistuje. V praxi se tento problém řeší určením smluvní nebo také časované meze únavy, která odpovídá určitému předem stanovenému počtu cyklů (smluvní životnosti). Její hodnoty se pohybují do 10^8 [2,11]. Po dosažení této meze je nutné součást zkontrolovat a zhodnotit možnosti jejího dalšího použití nebo ji vyměnit, viz obr. 12.



Obr. 12 Wöhlerova křivka slitiny hliníku se zvyšujícím se počtem cyklů klesá [9]

Cyklické zatěžování tělesa s apriorní trhlinou

V případě cyklického namáhání součásti s trhlinou se modeluje únavové chování na základě poznatků lomové mechaniky. Rychlost šíření trhliny, tj. přírůstek její délky během jednoho zátěžného cyklu, je funkcí rozkmitu faktoru intenzity napětí ΔK . Pomocí přímkové aproximace v podobě Paris-Erdoganova vztahu lze posoudit zbytkovou životnost součásti za předpokladu stabilního šíření trhliny. Zkoušky únavy těles s trhlinou se obvykle provádí při konstantním rozkmitu zatížení, ale rozkmit faktoru intenzity napětí se zvětšuje v závislosti na zvětšující se délce trhliny [11].

Faktory ovlivňující mez únavy

Mez únavy se nejčastěji určuje ze vzorků namáhaných ohybem za rotace. V případě jiného druhu zatěžování se hodnota meze únavy podstatně mění, to vystihují následující experimentálně ověřené vztahy:

$$\sigma_{oC} = 1,3 \cdot \sigma_C = 1,73 \cdot \tau_C, \sigma_C = 1,33 \cdot \tau_C,$$

kde σ_{oC} je mez únavy stanovená při namáhání ohybem, σ_C při namáhání tahem, resp. tlakem, a τ_C při namáhání krutem. Vztahy platí pro tvářené a lité oceli [8].

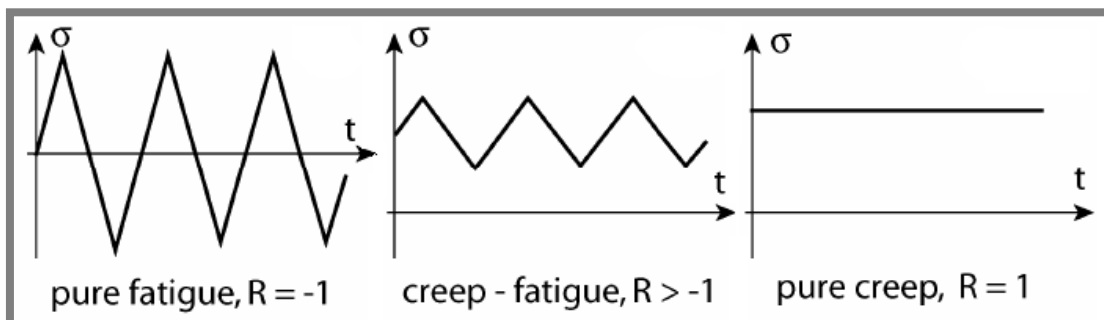
Abychom mohli aplikovat výsledky zkoušek únavy na skutečné součásti a jejich provozní podmínky, je třeba brát v úvahu nejen druh zatěžování, ale také vliv těchto zobecněných faktorů: technologie výroby povrchu a jeho následné úpravy, velikost skutečné součásti, geometrie povrchu a její vrubové účinky, materiál součásti, okolní podmínky. Zahrnutí těchto vlivů do praktických výpočtů je realizováno prostřednictvím odpovídajících korekčních součinitelů (Marinova rovnice, koncepce nominálních napětí pro neomezenou životnost PPII). Od ostatních zkoušek se ty únavové liší relativně rozsáhlými soubory naměřených hodnot a tím pádem jejich problematickým porovnáváním, což je přímý důsledek těchto faktorů [6,11].

Wöhlerova křivka a všechny charakteristiky, které z ní určujeme, se nejčastěji stanovují při nulovém středním napětí, tj. u symetrického cyklu. V případě posloupnosti symetrických cyklů s různými amplitudami napětí, lze celkovou životnost stanovit pomocí Palmgrenova-Minerova pravidla [6].

Zátěžné cykly s nenulovým středním napětím

Abychom získali úplnou představu o únavových vlastnostech, bylo by třeba stanovit Wöhlerovu křivku pro různá střední napětí. Jejich vliv na mez únavy názorně prezentuje Smithův nebo Haighův diagram. Oba umožňují pro zadané střední napětí stanovit maximální přípustnou velikost amplitudy tak, aby byla zaručena neomezená životnost součásti. V praxi se při navrhování strojních součástí zatěžovaných cykly s nenulovým středním napětím se uplatňují různá kritéria (Gerberovo, modifikované Goodmanovo, Soderbergovo a ASME-elliptic) únavového poškození, která vycházejí z Haighova diagramu [6,8].

V souvislosti s únavou materiálu bych zmínil ještě jev, kterému se říká cyklický creep. Je způsoben trvalým změkčováním materiálu, tj. zvětšováním plastické deformace při cyklickém zatěžování s konstantními parametry. Dochází k němu při výrazně nesymetrických zatěžovacích cyklech [11].



Obr. 13 Kombinace cyklického zatěžování a creepu (pure creep = pouze creep) [18]

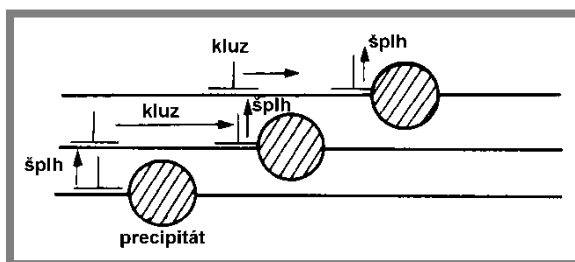
1.2.8 Zkoušení mechanických vlastností za zvýšených teplot - zkoušky creepu

1.2.8

Creep

Při konstantní teplotě nedochází k plastické deformaci kovu jen vlivem napětí vyvolaného vnějšími zátěžnými silami, ale také vlivem jiných mechanismů, které se ale při ostatních zkouškách mechanických vlastností obvykle neuplatní. Důsledkem těchto mechanismů je pomalé tečení materiálu označované jako creep. Pokud při pokojové teplotě ve struktuře kovu vyvoláme napětí menší než jeho mez kluzu, nedojde prakticky k žádné plastické deformaci, protože smyková složka napětí je příliš malá na to, aby vyvolala pohyb dislokací, které mohou být navíc zablokovány jinými strukturními vadami. Jediným způsobem jak docílit toho, aby materiálem začaly probíhat dislokace a plasticky se deformoval, je dodání energie. Tato energie je spjata s kmitáním atomů v uzlových polohách krystalové mřížky, jejím makroskopickým projevem je teplota materiálu. Takže zjednodušeně řečeno, pokud zvýšíme teplotu materiálu, klesne jeho mez kluzu a dojde k plastické deformaci. Při nízkých teplotách není tato „tepelná aktivace“ dislokací významná, protože probíhá příliš pomalu. Při teplotách vyšších než $0,4 T_m$, tj. teploty tavení, roste množství aktivovaných dislokací se zvyšující se teplotou exponenciálně.

Navíc se začínají uplatňovat další mechanismy zcela odlišného charakteru. Patří sem zejména šplh dislokací, při kterém atomy z jejich hranic doslova „oddifundují“ (vložená dislokační polorovina se jakoby posouvá kolmo na možný směr skluzu). Za teplot kolem $0,5 T_m$ se již naplno uplatňuje objemová difuze, dochází ke vzniku kavit a trhlin na hranicích zrn [1,3].



Obr. 14 Šplhání dislokací [18]

Mechanické charakteristiky určované při zkoušce

Cílem zkoušky creepu je stanovení odolnosti materiálu proti plastické deformaci, resp. lomu, při zatěžování napětím nižším, než je mez kluzu, a to za zvýšené teploty. Jedná se dlouhodobou zkoušku, při které je materiál po ohřátí na určitou teplotu staticky zatěžován. U ocelí a hliníkových slitin je zatěžování nejčastěji tahové. Pokud je zkoušené těleso upnuté takovým způsobem, že jeho celková deformace je konstantní, dochází k relaxaci. Tímto pojmem označujeme pokles napětí v materiálu v důsledku přeměny části elastické deformace na plastickou. V praxi se s takovým chováním součástí setkáme například u předepjatých šroubových spojů z oceli [6].

Creepovou zkouškou určujeme tyto mechanické charakteristiky:

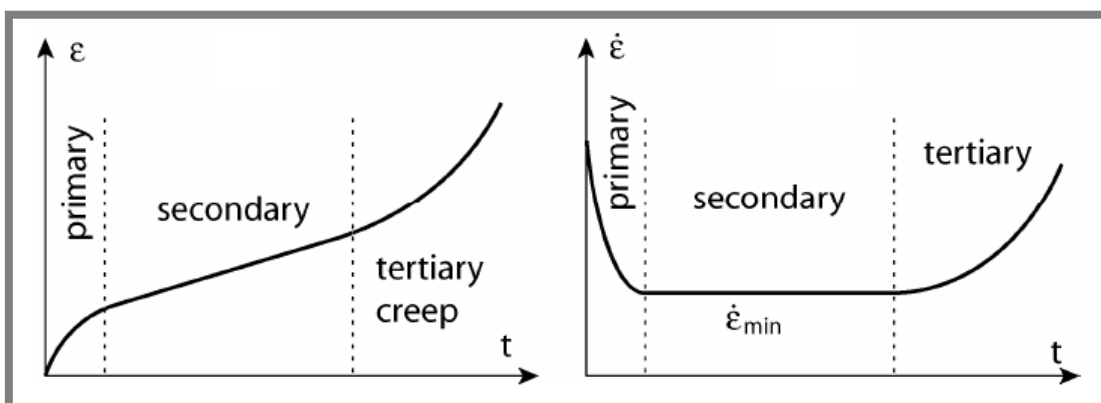
- Mez tečení R_T je napětí, které způsobí při dané teplotě po předem stanovené době celkovou deformaci určité velikosti (zapisujeme: $R_T \text{ čas [h]} / \text{deformace [\%]} / \text{teplota [°C]} = \text{napětí [MPa]}$).

- Mez pevnosti při tečení R_{mT} představuje napětí, které vyvolá při dané teplotě po předem stanovené době lom (zapisujeme: R_{mT} čas [h] / teplota [°C] = napětí [MPa]).
- Při relaxaci určujeme zbytkové napětí R_{RZ} . Je to napětí, které ve zkušebním tělese působí po určitém čase při předem stanovené teplotě zkoušky (zapisujeme: R_{RZ} čas [h] / teplota [°C] = napětí [MPa]). Všechna uvedená napětí jsou smluvní [8].

Hodnoty naměřené během zkoušky graficky prezentuje Creepová křivka určená pro konkrétní napětí a teplotu. Jedná se o závislost deformace (prodloužení zkušební tyče) na čase a rozlišujeme na ní tři úseky charakterizující jednotlivá stadia creepu. Nejdůležitější je sekundární stádium creepu, nebo také zkráceně ustálený creep. Určujeme z něj rychlost creepu, tj. rychlost celkové deformace, matematicky její časovou derivaci, která je dána poměrem $\Delta\varepsilon/\Delta t$. Z hlediska energetického je rychlost stacionárního creepu určena rovnicí:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A \cdot \sigma^m \cdot e^{\left(-\frac{Q}{kT}\right)},$$

kde A , m , Q jsou materiálové konstanty, T absolutní teplota a σ napětí. V závislosti na jeho hodnotě lze předpovídat chování reálných součástí (parametr Larsonův-Millerův, Sherbyův-Domův, Mansonův-Haferdův), což je v praxi velmi důležité, protože doba provozu skutečných zařízení se pohybuje řádově v desítkách let a podstatně tak převyšuje dobu trvání creepových zkoušek [3,8].

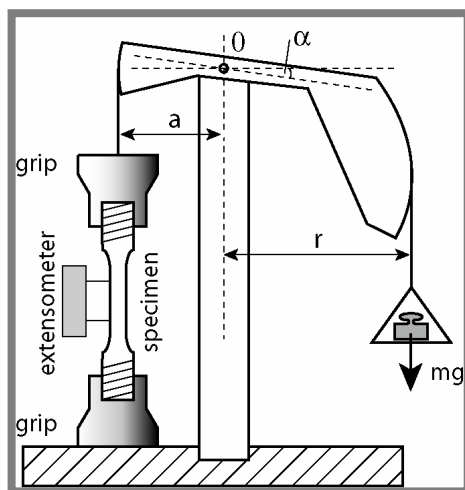


Obr. 15 Creepová křivka a časová závislost deformace (vpravo) [18]

Pojem creep lze tedy chápat jako označení zkoušky mechanické vlastnosti při konstantním zatížení a zároveň jev výše popsané časově a teplotně závislé plastické deformace pod mezí kluzu.

Pokud víme, že při provozních podmínkách konkrétní součástí může creep významně ovlivnit její funkčnost, je nutné respektovat určité zásady. Jednou z nich je použití materiálu s co nejvyšší teplotou tavení T_m (creep a jevy s ním spojené pak nastávají při vyšší teplotě). Z hlediska struktury je žádoucí omezení pohybu dislokací překážkami, které budou stabilní i při vysokých teplotách (substituční a precipitační zpevnění) [14].

U slitin hliníku je možné jak zpevnění tuhého roztoku (intersticiální, substituční atomy), tak i precipitační zpevnění, ale ve srovnání s konstrukčními oceli mají nízkou teplotu tavení, a proto je jejich použití limitováno teplotami do 300°C. Žárovzdorné a žárovevné oceli odolávají degradaci v důsledku creepu až do teplot 650°C. Pro doplnění: žárovzdornost je odolnost proti korozi a opalu za vysokých teplot, kdežto žárovevnost je kombinace žárovzdornosti a vysoké pevnosti, tvrdosti a houževnatosti ze vysokých teplot [4,8].



Obr. 16 Schema možného provedení přístroje ke zkoušení creepu [18]

Srovnání: hliníková slitina AlMg5 má mez pevnosti při tečení přibližně 100 MPa, pokud je vystavena 10^5 hodin teplotě 125°C. Austenitická žárovevná ocel 17 341 dosáhne za tuto dobu stejné pevnosti při teplotě 700°C [2,8].

1.2.9 Specifika a srovnání některých zkoušek mechanických vlastností

1.2.9

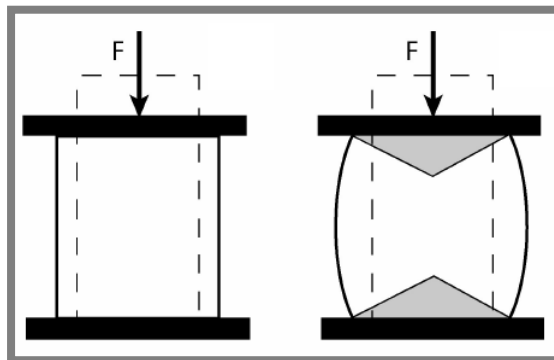
Tahová zkouška je relativně jednoduchá a snadno proveditelná, stejně tak jako interpretace naměřených dat a jejich přenos mezi zkušebními laboratořemi. Jediným vážným problémem je stanovení meze kluzu. Naměřená hodnota se může u různých laboratoří lišit i o desítky procent v závislosti na citlivosti použitého snímače. Proto se obecně preferují smluvní meze kluzu. Při zkoušce je z hlediska následného vyhodnocení dat nezbytné, aby byla ve vzorku vyvolána homogenní jednoosá tahová napjatost (ta je porušena v okamžiku vzniku krčku, který v podstatě brání velkým plastickým deformacím v celém objemu zkušebního tělesa) [14].

Zkoušku v tlaku aplikujeme, pokud zkoušíme materiál příliš křehký, drahý nebo v případě, že je výroba zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku obtížná a nákladná. Problémem je minimalizace tření mezi čelem deformovaného vzorku a plochou čelisti zkušebního stroje, které způsobuje „soudečkovatění“, viz obr. 17 [18].

Zkoušky ohybem vyvolávají v průřezu vzorku napětí tahová i tlaková. Výsledky mají velkou vypovídací hodnotu především u křehkých materiálů.

Zkouška krutem umožňuje dosáhnout podstatně větších plastických deformací (úhlových přetvoření) než zkouška tahem, kde se od určitého okamžiku deformuje pouze oblast s lokalizovaným krčkem.

Zkoušky tvrdosti jsou z hlediska proveditelnosti nejjednodušší a nejrychlejší, ale je nutné si uvědomit, že je zde odolnost materiálu proti vniku cizího tělesa charakterizována jako poměr síly a plochy vtisku (tj. napětím), popř. hloubkou vtisku (Rockwell), což z fyzikálního hlediska úplně nekoresponduje s definicí tvrdosti. Z praktického hlediska jsou nejdůležitější zkoušky únavy. Odhaduje se, že téměř k $\frac{3}{4}$ všech nehod v průmyslových aplikacích dojde v souvislosti s únavou materiálu [16].



Obr. 17 Zkouška tlakem, deformace vzorku [18]

2 SLITINY HLINÍKU: PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

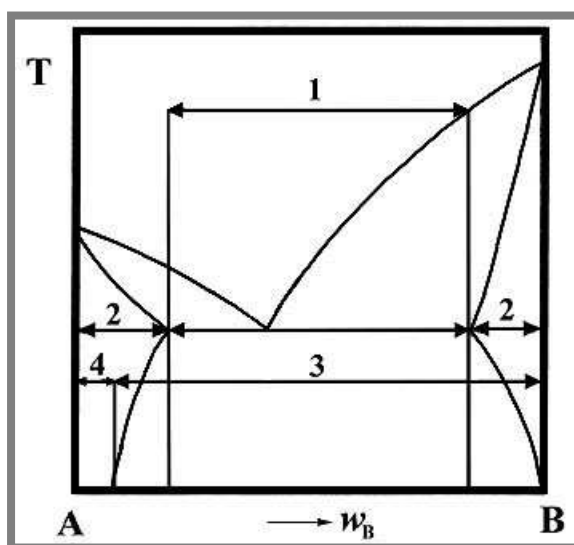
2

2.1 Vymezení trendů budoucího vývoje, použití a rozdělení

2.1

Slitiny hliníku patří spolu s ocelí k nejpoužívanějším kovovým konstrukčním materiálům. Jejich význam v průběhu několika posledních desetiletí výrazně vzrostl. Za zvyšující se spotřebou a výrobou hliníku i jeho slitin stojí především požadavky automobilového a leteckého průmyslu, ale své uplatnění dnes najdou prakticky ve všech ostatních odvětvích lidské činnosti, strojírenstvím počínaje, klenotnictvím a sportem konče. V horizontu dalších dvaceti let se odhaduje nárůst objemu výroby o 600% a poroste také význam hliníku získaného recyklací. Hliník a jeho slitiny vítězí v mnoha aplikacích díky jedinečnému spojení mechanických, fyzikálních, technologických i chemických vlastností. Za všechny bych jmenoval zejména dobrou schopnost plastické deformace za tepla i za studena, tepelnou a elektrickou vodivost, odolnost proti korozi na vzduchu, nízkou měrnou hmotnost. Výhodou je i relativně nenáročné zpracování odpadu. Naopak jejich největším handicapem je nízká tvrdost a z toho vyplývající snadné poškození povrchu součástí, dále obtížné třískové obrábění, nebezpečí elektrochemické koroze při kontaktu s většinou ostatních kovů a slitin. Další specifika týkající se mechanických vlastností jsem uvedl v předešlé kapitole [2,4].

Slitiny hliníku dělíme v závislosti na jejich chemickém složení, resp. polohy v binárním rovnovážném diagram (BRD) hliník-přísada, na tvářené a slévárenské. Slévárenské slitiny se dále dělí stejným způsobem na podeutektické, eutektické a nadeutektické. Praktičtější je dělení podle obsahů legujících prvků na tyto typy: Al-Cu, Al-Cu-Si, Al-Si, Al-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Sn. Další dělení tvářených slitin na vytvrditelné a nevytvrditelné je založeno na možnosti zvyšování jejich tvrdosti a pevnosti v závislosti na tepelném zpracování. Mezi vytvrditelné slitiny řadíme typy Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu. Naopak vytvrdit nelze slitiny typu Al-Mn a některé ze slitin Al-Mg [8].



Obr. 18 BRD hliník (A) – přísada (B), 1 – slévárenské slitiny, 2 – tvářené slitiny, 3 – vytvrditelné slitiny, 4 – nevytvrditelné slitiny [8]

2.2 Mechanické vlastnosti slitin hliníku

Dodržením přesného chemického složení a postupů tepelného zpracování lze docílit širokého spektra mechanických vlastností, což s sebou paradoxně přináší i řadu problémů v podobě obtížné orientace v mechanických charakteristikách, a tudíž i složitého procesu volby konkrétní slitiny. V současnosti se v oblasti výzkumu stále více objevují tendence, které směřují k vývoji univerzálních slitin. Představa, že by jedna taková univerzální slitina umožnila nahrazení více současných slitin hliníku v několika konkrétních oblastech jejich aplikace a pomohla tak snížit jejich velký počet, je ale zatím dost vzdálená realitě [2].

Vývoj zcela nových typů slitin představuje z hlediska materiálového inženýrství uzavřenou kapitolu. Nepředpokládá se ani významný posun v oblasti změn a úprav jejich chemického složení. Naopak lze očekávat zlepšování některých mechanických vlastností prostřednictvím nových způsobů tepelného zpracování. Zejména plasticity a lomové houževnatosti na úkor pevnosti, která není v praxi vždy rozhodující [4].

2.2.1 Mechanické vlastnosti tvářených slitin

Jak jsem již předeslal, mechanické charakteristiky hliníkových slitin závisí na jejich chemickém složení, tepelném a technologickém zpracování. Z rozmanitého chemického složení a různých způsobů zpracování vyplývá velký rozptyl mechanických charakteristik. Pokládám za nešťastné uvádět zde rozsáhlé soubory tabulek s jejich přehledy, takže se pokusím v následujícím textu vymezit „mantinely“, mezi kterými se pohybují, a naznačit tak možnosti použití pro případ, že by někomu tato práce měla posloužit jako vodítko při řešení nějakého konstrukčního problému týkajícího se této problematiky.

Zdaleka nejmenší meze pevnosti dosahují nevytvrditelné slitiny typu Al-Mg a Al-Mn. Pohybuje se v rozmezí 130 - 200 MPa, po deformačním zpevnění při tváření zastudena se u Al-Mg horní hranice posouvá k 420 MPa, u Al-Mn k 220 MPa, ale u obou výrazně klesá tažnost. S mezí pevnosti roste i mez kluzu, ovšem ne tak výrazně. Kromě tváření se docílí zpevnění také zvýšením obsahu legujících prvků. Slitiny Al-Mg s obsahem Mg menším jak 6 hm% jsou pro jakékoliv mechanické zatěžování naprosto nevhodné z důvodu koroze na hranicích zrn. Meze pevnosti vytvrditelných slitin mohou dosahovat hodnot srovnatelných s konstrukčními oceli. Nejnižší začínají kolem hodnoty 350 MPa. Běžně jich dosahují slitiny Al-Mg-Si používané už delší dobu v letectví a stavebnictví. Al-Cu-Mg (duraly) se svou pevností až 530 MPa drží přibližně uprostřed pomyslné tabulky a nejpevnějšími slitinami hliníku jsou slitiny typu Al-Zn-Mg-Cu. Tepelným zpracováním u nich lze docílit meze pevnosti v rozsahu 500 - 580 MPa (slitina V96 vyvinutá v Rusku s podobným složením dosahuje hodnoty 730 MPa [4]). S rostoucí pevností ale klesá jejich lomová houževnatost a všeobecně mají tendenci ke korozi za napětí.

Zvláštní pozici zauímají slitiny Al-Li. Jejich nízké tažnosti a křehkosti se zbavíme přidáním Cu, Mg, Zr a Mn a dostaneme slitinu s nízkou hmotností, vysokým modulem pružnosti kolem 80 GPa a mezí pevnosti 420 - 600 MPa. Slitiny Al-Cu-Li-Mg-Zr-Mn jsou spolu s Al-Zn-Mg-Cu největšími konkurenty již zmiňovaných duralů.

Pokud potřebujeme stále mechanické vlastnosti za zvýšených teplot, je vhodné použití duralů s obsahem Mg v rozmezí 2 až 2,5 hm%. Mohou být dlouhodobě

vystaveny pracovnímu prostředí s teplotami do 200°C. Ještě o něco vyšší teploty (do 300°C) snesou bez výrazných změn mechanických vlastností slitiny Al-Cu-Mg-Ni. Teploty kolem 300°C snášejí i slitiny Al-Cu-Bi-Pb, ale nejsou příliš vhodné pro dynamicky namáhané součásti. Pro velmi mechanicky a tepelně namáhané součásti se nejčastěji používají slitiny Al-Si-Ni-Mg, konkrétně AlSi12Ni1Mg, což je tvářená slévárenská slitina [2,4].

2.2.2 Slitiny pro odlitky

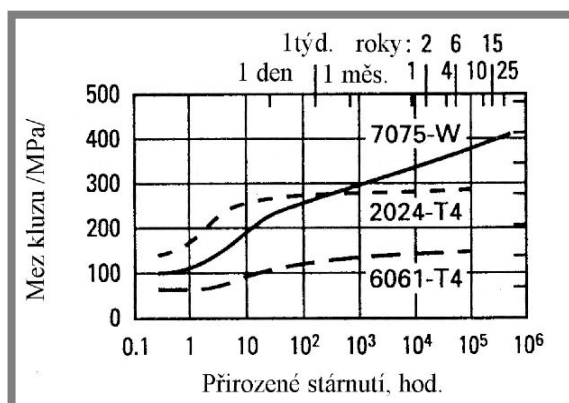
Hodnoty mechanických charakteristik těchto slitin jsou nižší, než ty u slitin tvářených, navíc jejich vlastnosti (nejen ty mechanické) do značné míry závisí na způsobu odlévání. Nejhorší pevnostní charakteristiky mají slitiny odlité do pískových forem, lepších dosáhneme litím do forem kovových a litím za zvýšeného tlaku [2].

Nejvyšší měrnou pevnost a houževnatost při zkoušce rázem v ohybu vykazují slitiny Al-Mg, což je předurčuje k použití pro odlitky s náhlými změnami průřezu (koncentrátory napětí) namáhané dynamicky, typy Al-Mg-Si rozšiřují možnost jejich uplatnění na součásti namáhané za vyšších teplot. Dlouhodobé zatěžování při teplotách v rozmezí 250 - 275°C je akceptovatelné u i vytvrzených slitin Al-Si-Mg a Al-Si-Cu, které patří mezi tzv. speciální siluminy. Pro dosažení lepších mechanických vlastností je třeba provést jejich modifikaci, protože nemodifikované siluminy jsou křehké, mají nízkou tažnost a pevnost [4].

Pro slitiny hliníku je charakteristický rychlý pokles pevnostních charakteristik (meze pevnosti R_m , meze kluzu $R_{p0,2}$) a tvrdosti v závislosti na zvyšující se teplotě. Naopak deformační charakteristiky (tažnost, kontrakce) s teplotou rostou. Tyto vlastnosti se mohou měnit i při konstantní teplotě, pokud je jí slitina vystavena dostatečně dlouho. Obecně se tento jev označuje jako přirozené, za zvýšených teplot jako umělé stárnutí [2].

2.2.3 Stárnutí slitin hliníku

Průběh tohoto procesu, ať už přirozený nebo umělý, je u jednotlivých slitin dost individuální a je ovlivněn nejen tepelným zpracováním, ale také způsobem tváření. Z konstrukčního hlediska je podstatná časová závislost hodnoty meze kluzu. Obecně lze říct pouze tolik, že při přirozeném stárnutí vytvrditelných slitin mez kluzu s časem pozvolna narůstá, ale při umělém závisí na konkrétní teplotě. Od teplot



Obr. 19 Přirozené stárnutí některých vytvrditelných slitin hliníku [2]

2.2.2

2.2.3

kolem cca 150°C zprvu roste, až dosáhne maxima, a pak klesá. Maximum může nastat v průběhu desítek minut, ale také za měsíc nebo rok. Při nižších teplotách (do 150°C) mez kluzu nejdříve povolná klesá a po dosažení minima začne růst.

Závěr z toho vyplývající je ten, že v případě použití jakékoliv slitiny je vždy nutné znát konkrétní závislosti jejích mechanických charakteristik na teplotě a podle toho posoudit, do jaké míry je vhodná pro dané pracovní podmínky. Tím, že není součástí vystavena dlouhodobě teplotám, při kterých dochází k výrazné změně pevnostních charakteristik, mnohdy zamezíme ztrátě schopnosti plnit požadovanou funkci.

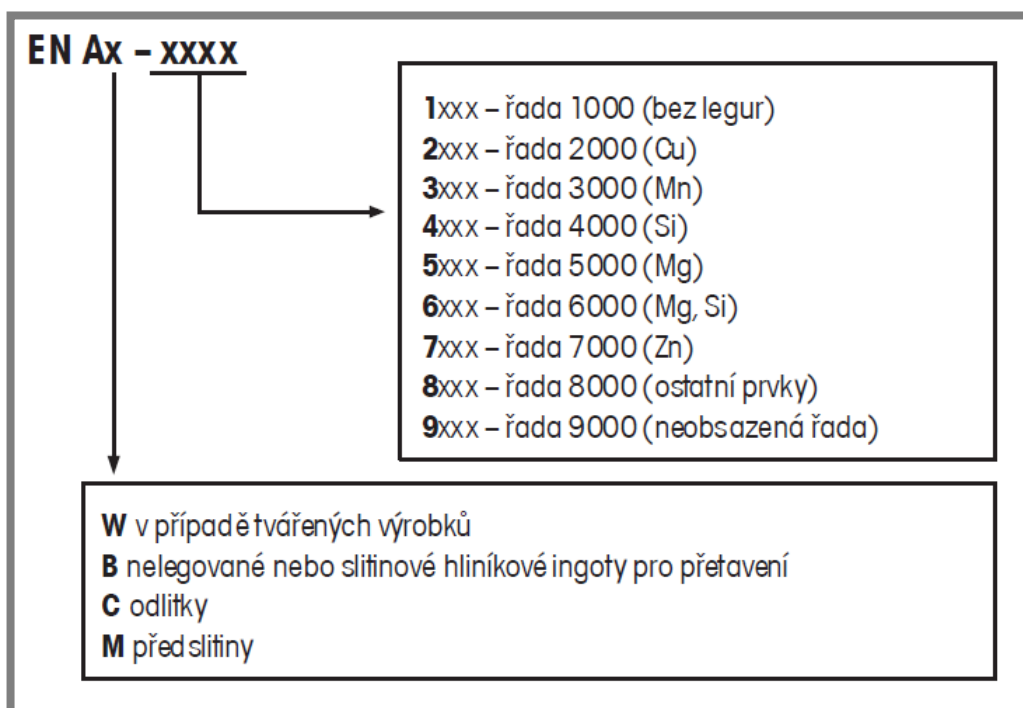
2.3 Označování slitin hliníku

Označování slitin hliníku pro tváření dle ČSN EN 573-1 až 3

Norma zahrnuje označování materiálu tvářených výrobků a ingotů určených ke tváření. Označení sestává z písmen EN AW a čtyřčíslí, kde první číslice charakterizuje zařazení dané slitiny do příslušné skupiny (řady) v závislosti na jejím chemickém složení, tj. podle hlavního slitinového prvku. Toto číselné označení se v praxi často doplní označením chemického složení sestávajícího z chemických značek prvků, např. následovně: EN AW-5052 [AlMg2.5]. Jedná se o slitinu řady 5000, jejímž hlavním slitinovým prvkem je hořčík. Místo číselného značení je rovněž možné použít přímo chemické značení takto: EN AW-Al Cu4PbMgMn [2].

Označování slitin hliníku na odlitky dle ČSN EN 1706

Označení se skládá z písmen EN AC a kombinace pěti číslic, které jako v případě slitin pro tváření označují chemické složení a v návaznosti na ně příslušnost do určité skupiny (řady) slitin. Číselné označení lze rovněž doplnit i chemickým složením: EN AC-21000 [AlCu4MgTi] [2].



Obr. 20 Přehled číselného označování slitin hliníku pro tváření [20]

Označování slitin hliníku podle norem ČSN

Označení každého typu slitiny (včetně čistého hliníku) má následující strukturu: zkratka ČSN, třída norem (42), skupina v rámci třídy norem (40 až 45), konkrétní číslo ve skupině norem (dvojčíslí). Běžné je označení pouze pomocí značky reprezentující chemické složení, např.: AlCu4Mg (= ČSN 42 4201) apod.

3 OCELI: PŘEHLED A ROZBOR EXISTUJÍCÍ LITERATURY V DANÉ OBLASTI

3.1 Definice a rozdělení

Oceli definujeme jako slitiny železa, uhlíku a jiných prvků, přičemž obsah uhlíku je menší než 2 hm% a hmotnostní podíl železa je větší, než jakéhokoliv jiného prvku. Většina ocelí je určena k tváření, na odlitky se spotřebuje pouze zanedbatelné množství.

Rozdělení na základě chemického složení, resp. hmotnostních podílů legujících prvků, na oceli legované a nelegované je jednoznačně definováno mezními obsahy jednotlivých legur stanovenými normou. Např. pokud je obsah Al ve struktuře větší než 0,1 hm%, považujeme danou ocel za legovanou. Ve všech případech však není zařazení tak jednoznačné. U některých kombinací legur se musí brát v úvahu 70% součtu jejich mezních obsahů, abychom rozhodli, zda označit ocel za legovanou nebo ne. Jednotlivé legující prvky a jejich obsahy (hmotnostní podíly) mají významný vliv na mechanické vlastnosti konkrétní oceli, což je důvod, proč se takovým rozdělením zabýváme. Normy stanovují i obsahy doprovodných prvků, ale tyto nemají s výše uvedeným rozdělením nic společného [8].

3.1.1 Rozdělení do skupin jakosti

Rozdělení do skupin podle jakostí do značné míry odráží způsob, jakým byla daná ocel vyrobena a jaké mechanické, technologické, fyzikální a chemické vlastnosti u ní tudíž může výrobce garantovat. Tyto informace jsou důležité nejen z hlediska jejich konečného použití, ale také pro další zpracování.

Tab. 4 Rozdělení slitin železa podle normy ČSN EN 10020 [4]

dělení podle	obsahu uhlíku	použití	chemického složení	skupin jakosti
slitiny železa	litiny			
	oceli	na odlitky k tváření	nelegované	obvyklých jakostí
			legované	jakostní ušlechtilé jakostní ušlechtilé

U nelegovaných ocelí obvyklých jakostí je stanovena pouze nejvyšší hodnota meze pevnosti ($R_m < 690$ MPa), meze kluzu ($R_e < 360$ MPa), tažnosti ($A < 26\%$) a nárazové práce ($KV \leq 27J$ při 20°C), dále jsou stanoveny maximální obsahy P, S a C. Tyto oceli nelze dále tepelně zpracovávat.

Pro nelegované jakostní oceli platí stejná omezení, navíc splňují dodatečné požadavky na mechanické a technologické vlastnosti zejména při vyšších teplotách. Obecně lze konstatovat, že při jejich výrobě jsou aplikovány přesnější postupy, ale norma u nich neupřesňuje chemické složení. Tepelné zpracování je možné, ale s rizikem nerovnoměrné odezvy oceli.

Nelegované ušlechtilé oceli splňují přísnější požadavky v oblasti technologických vlastností (prokalitelnost, dosažitelná tvrdost po povrchovém kalení) a mechanických vlastností (nárazová práce při nízkých teplotách), dokonce mají předepsanou elektrickou vodivost. Chemické složení je přesně stanoveno, stejně tak metalurgická čistota (obsahy nekovových vměstků a nečistot). Jsou určeny především pro tepelné zpracování (cementování, zušlechťování, povrchové kalení).

Mezi legované jakostní oceli patří např. oceli s požadavky na elektrické a magnetické vlastnosti, oceli pro složité tváření za studena nebo svařitelné konstrukční oceli. Většinou jsou určeny pro další tepelné zpracování (zušlechťování, povrchové kalení). Pro legované ušlechtilé oceli je charakteristické, že se u nich docílí požadovaných mechanických vlastností tepelným zpracováním a výrobními podmínkami, zejména dodržením přesného chemického složení. Do této skupiny patří rychlořezné, nerezavějící, žárovebné a žáruvzdorné, nástrojové a konstrukční oceli splňující předepsaná rozmezí obsahů tzv. určujících prvků (C, Mo, V, W, Cr...) [4,8].

Oceli lze dělit podle mnoha dalších hledisek: chemické složení, způsob výroby, struktura, technologické zpracování, použití. Přehledné rozdělení na základě nejen těchto hledisek je uvedeno v [5].

3.1.2 Rozdělení podle použití

3.1.2

Oceli dělíme podle možnosti jejich praktického použití na dvě velké skupiny: oceli nástrojové a konstrukční. V rámci konstrukčních ocelí pak podle ČSN EN 10020 rozlišujeme dalších jedenáct hlavních podskupin. Tyto jsou uvedeny v tabulce 5, kde v levém sloupci je počáteční písmeno vystupující v jejich označení.

Tab. 5 Rozdělení konstrukčních ocelí podle ČSN EN 10020 [8]

S	oceli pro ocelové konstrukce
P	oceli pro tlakové nádoby
I	oceli pro potrubí
E	oceli pro strojní součásti
B	oceli pro výstuž do betonu
Y	oceli pro předpínací výstuž do betonu
R	oceli na kolejnice
D	oceli na ploché výrobky válcované za studena
H	oceli na ploché výrobky tvářené za studena (kromě D)
T	oceli na obalové plechy a pásy
M	oceli na plechy a pásy pro elektroniku

Vzhledem k tomu, že jediným kritériem pro toto rozdělení je využití v praxi, zahrnují jednotlivé podskupiny jak legované, tak i nelegované oceli, a to ve všech stupních jakosti [4].

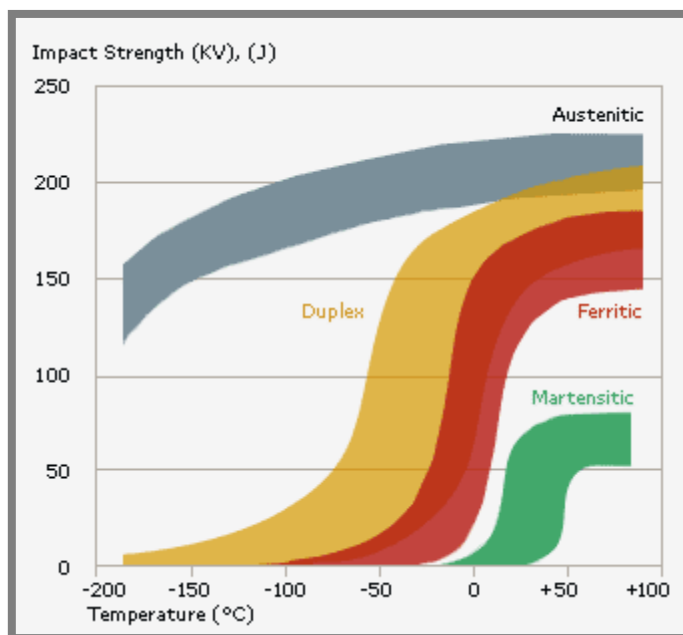
Stejně jako v případě slitin hliníku se pokusím o zobecnění nároků na konstrukční oceli a z toho vyplývající mechanické, eventuálně ostatní vlastnosti.

3.2 Mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí

S výjimkou těch hlubokotažných, požadujeme u konstrukčních ocelí relativně vysokou mez kluzu, protože ve většině případů použití je pro nás nejdůležitější zamezit nevratné deformaci konstrukce nebo její součásti z důvodu ztráty schopnosti plnit předpokládanou funkci. Znalost hodnoty meze pevnosti v tomto případě není směrodatná. Vyšší mez kluzu umožňuje zmenšit nosné průřezy, aniž by došlo ke snížení bezpečnosti konstrukce pod přijatelnou úroveň, a může tudíž vést k větší úspoře materiálu [8].

Dále u těchto ocelí vyžadujeme vyšší hodnoty deformačních charakteristik (tažnosti, kontrakce) a modulů pružnosti. V normách se nejčastěji objevují minimální zaručené hodnoty v závislosti na tepelném zpracování. Vzhledem k tomu, že u všech ocelí na rozdíl od většiny slitin hliníku pozorujeme tranzitní chování, je mimořádně důležitá znalost nejen tranzitních teplot, ale také hodnot nárazové práce při různých zkušebních teplotách, přičemž jejich rozsah může být značný (např. -200 až 20°C u ocelí pro tlakové nádoby [4]).

Ideální konstrukční oceli by měly mít také vysoké meze únavy a eventuálně dobré kluzné vlastnosti v kombinaci s odolností proti opotřebení. V případě, že je pro dané provozní podmínky rozhodující odolnost proti korozi nebo nízká hmotnost, je vhodné zvážit použití slitiny hliníku.



Obr. 21 Rozsahy tranzitních křivek nerezavějící konstrukčních ocelí [16]

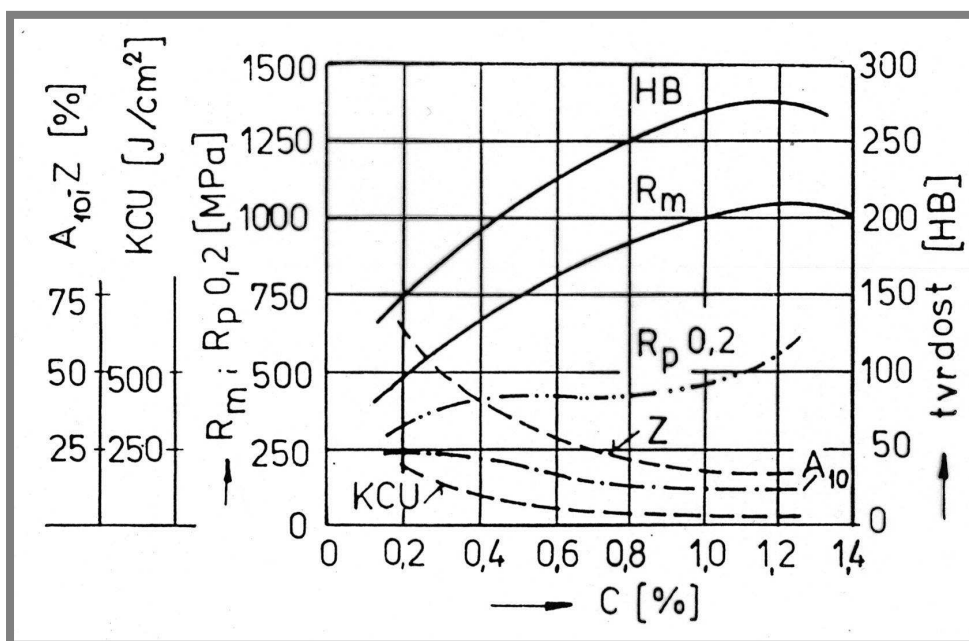
3.2.1 Faktory ovlivňující mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí

Shrnutí současných poznatků týkajících se souvislostí mezi chemickým složením, strukturou a vlastnostmi ocelí není jednoduché, a ani přímo nesouvisí s tématem této práce, což mně vedlo ke značnému zjednodušení některých problémů (tepelné

zpracování, strukturní a fázové přeměny) tak, aby byla patrná pouze jejich návaznost na mechanické vlastnosti bez jejich bližšího vysvětlení.

Významných změn vlastností ocelí docílíme jejich vhodným legováním. Nejčastěji používanými legurami jsou Mn, Si, Ni, Mo, V, W, Cr. Tyto prvky se rozpouštějí ve feritu, resp. v austenitu, a vytváří tak substituční a intersticiální roztoky. Mohou se rozpouštět také v cementitu nebo tvoří karbidy přímo s uhlíkem. Rozpustnost legujících prvků závisí především na teplotě během zpracování. V rámci mechanických vlastností dochází vlivem legování ke zvýšení tvrdosti a pevnostních charakteristik, a to bez výrazného poklesu houževnatosti. Legováním dosahujeme také např. korozivzdornosti, žáruvzdornosti nebo žáropevnosti. Nejúčinnější je legování více prvky najednou. Názorným příkladem jsou oceli určené ke svařování, u kterých se zvyšuje mez kluzu z 350 MPa až na 500 MPa komplexním legováním v kombinaci s bainitickou nebo martenzitickou přeměnou. Legující prvky mají vliv i na fyzikální a technologické vlastnosti (prokalitelnost) [4].

Mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí spolu s legujícími prvky ovlivňuje zásadním způsobem rovněž množství uhlíku. S jeho zvyšujícím se obsahem rostou pevnostní charakteristiky a tvrdost a klesají deformační charakteristiky a hodnota nárazové práce. Obsah uhlíku hraje důležitou roli z hlediska možností dalšího tepelného zpracování (povrchové kalení, zušlechťování, cementování) a na základě jeho obsahu lze posoudit i svařitelnost, což je pro konstrukční oceli také důležitá vlastnost. Nelegované oceli lze svařovat do obsahu uhlíku 0,22%, u legovaných ocelí musíme svařitelnosti posoudit pomocí tzv. uhlíkového ekvivalentu.



Obr. 22 Závislost mechanických charakteristik na obsahu uhlíku v oceli bez tepelného zpracování [8]

Tepelné zpracování

Vliv tepelného zpracování na mechanické vlastnosti demonstruje obr.č. 23. Jedná se o zušlechťování, tj. technologické operace martenzitického kalení

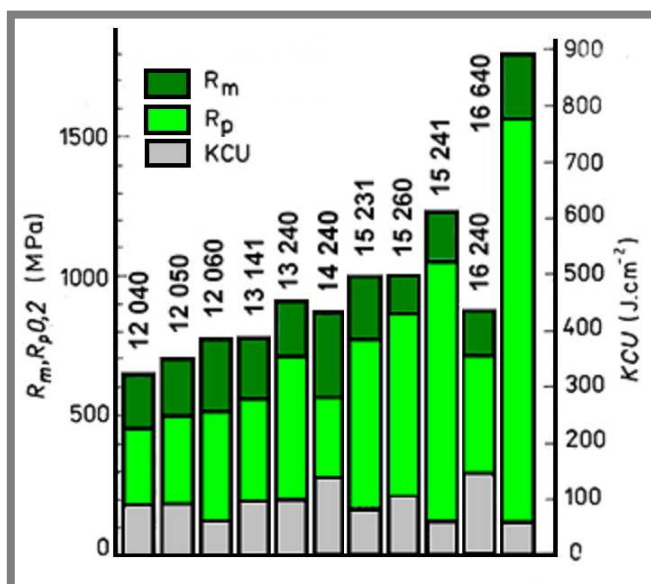
a vysokoteplotního popouštění. Zušlechťením dosáhneme relativně malého nárůstu meze pevnosti, ale dojde k výraznému zvýšení meze kluzu. Tento jev je spojen se strukturními změnami během zušlechťování. Výsledná struktura – sorbit – je tvořen feritickou maticí a drobnými částicemi cementitu, které do značné míry blokují pohyb dislokací, což se z makroskopického hlediska projeví zvýšenou mezí kluzu.

Grafickou interpretací tohoto procesu je zušlechťovací diagram. Tento způsob tepelného zpracování je v praxi natolik významný, že jsou normalizována zejména chemická složení ocelí určených k zušlechťování a dosažitelné hodnoty mechanických vlastností v závislosti na teplotě kalení a kalícím prostředí (ČSN EN 10083 – Oceli k zušlechťování).

Podobně jsou normalizovány i vlastnosti ocelí určených k cementaci a nitridaci (ČSN EN 10084 – Oceli k cementování, ČSN EN 10085 – Oceli k nitridaci). Norma stanovuje rovněž rozsahy dosažitelných tvrdostí na povrchu součásti nebo v určité hloubce pod ním. Po cementaci se některé z těchto ocelí kalí a nízkoteplotně popouští, čímž se dosáhne vysoké tvrdosti a ořezuvzdornosti povrchu při zachování houževnatosti jádra, tj. neovlivněné oblasti v součásti. Nutno dodat, že kromě chemicko-tepelného zpracování existují i jiné způsoby zpevnění povrchu, např. plastická deformace [4,8].

3.2.2 Změny mechanických vlastností v závislosti na čase a teplotě

Pro úplnost by bylo vhodné vysvětlit proces stárnutí oceli a jeho vliv na mechanické vlastnosti. Stárnutí materiálu se projevuje zejména vznikem výrazné meze kluzu, zvýšením meze pevnosti a tvrdosti doprovázené současným poklesem tažnosti a kontrakce. Tyto změny jsou způsobeny difundujícími atomy uhlíku a dusíku, které se seskupí kolem mřížkových poruch (vznikají tzv. Cottrellovy atmosféry) a po uplynutí určité doby tvoří koherentní přechodné precipitáty (karbidy a nitridy).



Obr. 23 Mechanické vlastností zušlechťovaných ocelí [8]

Přívlastek *přechodné* zde má své opodstatnění, protože pokud necháme ocel „stárnout“ delší dobu, precipitáty ztrácí svou koherenci a stávají se stabilními.

To se projeví naopak poklesem meze pevnosti a kluzu. Důležitou roli při tomto procesu hraje tedy čas a teplota. Stárnutí je největším problémem ocelí s obsahem C do 0,2%, obsahujících ve struktuře feritickou matici [4].

Deformační stárnutí je spojeno se změnou rozložení dislokací v důsledku deformace. Může k němu dojít po tváření za studena. Princip je tedy odlišný, ale výsledek v podstatě stejný, a to zvýšená pevnost a ztráta plasticity [8].

3.3 Vymezení trendů budoucího vývoje

3.3

Počátky výroby železa sahají do starověku. Rozvoj znalostí jeho zpracování s sebou přinesl významný posun ve vývoji lidské společnosti (zbraně, nástroje). Dnes se technologie zpracování slitin železa dostala na vědeckou úroveň. Přispělo k tomu nejen rozšiřování zkušeností a literárních databází, ale také aplikace nových poznatků a zdokonalování zkušební techniky.

Výroba slitin železa má tedy dlouhou tradici a to lze považovat ze jeden z hlavních důvodů, proč jsou nejpoužívanějším konstrukčním materiálem ve strojírenství a ještě dlouho jím budou. Kromě velkého spektra dosažitelných užitečných vlastností a rozsáhlých znalostí metalurgických procesů je jejich předností také snadná recyklace a z energetického hlediska relativně úsporná výroba. Pro srovnání: k vyrobení 1000 kg oceli se spotřebuje přibližně 20 GJ, kdežto výroba stejného množství hliníku je energeticky osmkrát náročnější [4].

4 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

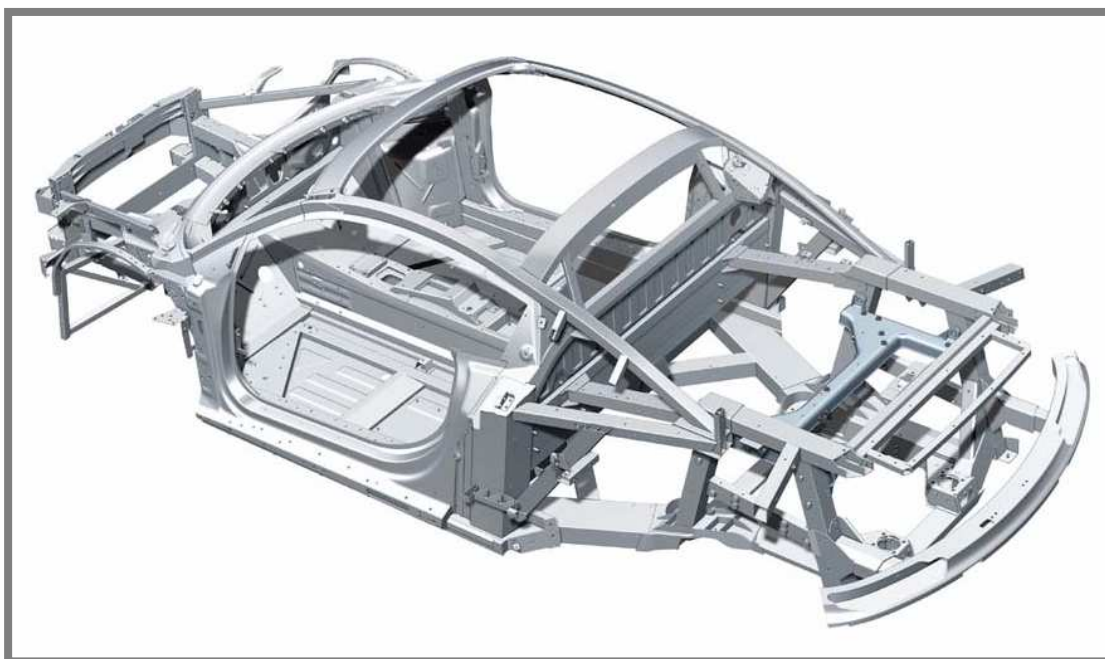
Na závěr konkrétní příklad z praxe. Mezi průkopníky při zavádění hliníkových slitin do automobilového průmyslu patří bezesporu firma Audi, která uvedla na trh počátkem devadesátých let minulého století automobil, jehož rám tvořily z velké části díly z hliníkových slitin. Dokázala tak, že hliník nemusí sloužit jen k výrobě ozdobných doplňků do interiéru...

Projekt dostal název Audi Space Frame (ASF) a s tímto označením karoserií, jejichž nosné části jsou tvořeny hliníkovými slitinami, se u produktů Audi setkáváme dodnes. Komponenty jsou vyráběny převážně protahováním a odléváním [21].

Bloky motorů, tlumiče, brzdové třmeny, součásti zavěšení kol. To jsou jen některé části automobilů, které se dnes již vyrábějí ze slitin hliníku, ale až koncepce ASF přinesla podstatné snížení hmotnosti. Uvádí se, že hliníková karoserie je v průměru až o 40% lehčí než ta samá, vyrobená ze slitin železa. Např. celá karoserie Audi R8 váží pouze 210 kg [22]. To ale není jediná výhoda. Výrobce ve výčtu předností uvádí také vysokou tuhost, vyšší bezpečnost, lepší jízdní vlastnosti a ovladatelnost. Energie absorbovaná rámem vozidla při nárazu do překážky vztažená na rychlost je podstatně větší, než u kterékoliv oceli. Jako materiál tlumících členů rámu jsou používány slitiny série 6000 a 7000 [23].

Z technologického hlediska je vhodné také zmínit, že vzhledem k dobré tvářitelnosti a slévarenským vlastnostem hliníkových slitin lze za jednu z předností rovněž považovat i možnost výroby složitých tvarů dílů karoserie z jednoho polotovaru. To s sebou samozřejmě přináší větší prostor pro kreativitu a design.

Představením prvních modelů s ASF nastartovala firma Audi dodnes přetrvávající trend, a to zvyšování podílu hliníku a jeho slitin na hmotnosti automobilu na úkor oceli a litiny. V současnosti jsou vkládány velké naděje do kompozitů na bázi hliníku.



Obr. 24 Audi Space Frame (ASF) [22]

Na tomto příkladu jsem chtěl ukázat, že slitiny hliníku mohou nahradit konstrukční oceli zejména všude tam, kde vysoká pevnost, tvrdost nebo odolnost vůči dynamickému zatěžování nerozhodují o funkci součásti. U automobilu to mohou být např. právě části rámu, karoserie nebo jejich deformační prvky. Naopak nevhodné by bylo použití slitiny hliníku pro výrobu klikové hřídele, ojnice nebo ozubených kol převodovky či diferenciálu. Ozubení vyrobené z oceli má po tepelném zpracování podstatně vyšší povrchovou tvrdost a únosnost v dotyku, kovaná ocelová ojnice nebo kliková hřídel zase vyšší pevnost a lepší únavové vlastnosti.

Nejvíce podobných příkladů bychom našli v letectví a kosmonautice, kde je hlavním důvodem použití slitiny hliníku nízká měrná hmotnost i za cenu horších pevnostních charakteristik ve srovnání s podstatně těžší ocelí. Při použití za vysokých teplot mohou slitiny hliníku žárovevným ocelím jen těžko konkurovat, ale při teplotách pod bodem mrazu mají výhodu v podobě absence tranzitního chování a vysokých pevností (AlZnMgCu1.5 má při -196°C $R_m = 700\text{ MPa}$ a $R_{p0,2} = 630\text{ MPa}$, při teplotě 370°C $R_m = 40\text{ MPa}$ a $R_{p0,2} = 30\text{ MPa}$) [2].

Shrnutí všech poznatků týkajících se mechanických vlastností materiálů a jejich zkoušení je věc dosti komplikovaná a co víc, přesahuje rámec mé práce. Byl jsem tudíž nucen z této problematiky vybrat pouze věci, které považuji za významné a jejichž vysvětlení je nezbytné pro vysvětlení pojmů v navazujícím textu.

Doufám, že jsem příliš nezklamal ty, co zde hledali pasáž, ve které by bylo přímé srovnání tabulkových hodnot mechanických vlastností slitin hliníku a konstrukčních ocelí okomentované několika odstavci textu. Byla to jedna z možných koncepcí, nakonec jsem se ale přiklonil k jiné, dle mého názoru smysluplnější a přehlednější. Vždyť samotný fakt, že je v jedné práci pojednáno o mechanických vlastnostech slitin hliníku a zároveň v jiné oddělené části o mechanických vlastnostech ocelí, může být chápán jako srovnání, aniž bych získané znalosti mezi sebou konfrontoval a činil tak text nepřehledným. Doufám, že budu moci získaných poznatků využít v budoucím studiu, např. při zpracovávání diplomové práce.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOPEC, Bernard, et al. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí : Nauka o materiálu IV*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2008. 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [2] MICHNA, Štefan, et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov : Adin, s.r.o., 2005. 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [3] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu I*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., c2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
- [4] PTÁČEK, Luděk, et al. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., c2002. 392 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [5] PŘIBIL, Erich. *Bohdan Bolzano, s.r.o. : Technická příručka* [online]. 1998-2004 , 31.12.2008 [cit. 2009-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/techprirI/tycovaocel/obecnacastI/tridenioceli/>>.
- [6] *E-learning VUT v Brně : Konstruování strojů - strojní součásti* [online]. [2009] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<https://www.vutbr.cz/elearning/?lang=0>>.
- [7] MOLLIKOVÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků* [online]. [2000] , 20.11.2006 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/Index.html>>.
- [8] *Ústav materiálových věd a inženýrství : Studijní opory BUM, 3SV* [online]. [2009] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/studijni%20opory.html>>.
- [9] Přednášky University of Delaware zpracované dle Askelanda a Phulého: http://www.ccm.udel.edu/Personnel/homepage/class_web/
- [10] *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví* [online]. c2009 , 1.1.2009 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://csnonline.unmz.cz/vyhledavani.aspx>>.
- [11] ONDRÁČEK, Emanuel, VRBKA, Jan, JANÍČEK, Přemysl. *Mechanika těles : Pružnost a pevnost II*. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 262 s. ISBN 80-214-2214-9.
- [12] *Wikipedia : Poisson's ratio values for different materials* [online]. [2000] , 2.3.2009 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Poisson%27s_ratio>.
- [13] *TWI Ltd : Hardness Testing Part 1* [online]. c2005 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://www.twi.co.uk/content/jk74.html>>.
- [14] *Ústav materiálových věd a inženýrství : Studijní opory 6MS* [online]. [2009] [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/vyukals.html>>.
- [15] *KEY to METALS Steel : Classification of Carbon and Low-Alloy Steels* [online]. c1999-2009 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://steel.keytometals.com/default.aspx?ID=CheckArticle&NM=62>>.
- [16] *Outokumpu : Steel properties* [online]. c2008 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <http://www.outokumpu.com/pages/Page____5520.aspx>.
- [17] MICHEL, Jean-Pierre, KRUML, Tomáš. *Úvod do teorie dislokací* [online]. 2008 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/WDD/skripta%20-%20dislokace.pdf>>.

- [18] MICHEL, Jean-Pierre, KRUML, Tomáš. *Mechanical Testing of Materials* [online]. 2005 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/WDD/skripta%20zkouseni%20materialu.pdf>>.
- [19] *The Welding Institute : Mechanical testing - notched bar or impact testing* [online]. c2007 [cit. 2009-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.twipprofessional.com/content/jk71.html>>.
- [20] MARTINEC, Jiří. Evropský systém značení hliníku a jeho slitin. [online]. 2005 [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <www.esab.cz>.
- [21] AUDI [online]. [2009] [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <http://www.audi.com/com/brand/en/tools/advice/glossary/audi_space_frame.browser.html>.
- [22] *Autokaleidoskop : Audi R8* [online]. 2007 [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <[http://autokaleidoskop.cz/Novinky/Audi-R8-\(V\)-vrchol-techniky/](http://autokaleidoskop.cz/Novinky/Audi-R8-(V)-vrchol-techniky/)>.
- [23] TIKAL, Bohuslav. Použití nových materiálů v konstrukci dopravních prostředků z pohledu impaktní odolnosti. *Dílčí zpráva o řešení projektu č. FT-TA/024 ke dni 31.12.2007* [online]. 2007 [cit. 2009-04-29]. Dostupný z WWW: <http://www.sntcz.cz/Content.Node/solutions_services/professional_services/38.pdf>.

6 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

6.1 Seznam obrázků

Obr. 1 Grafická interpretace vývoje významu jednotlivých skupin konstrukčních materiálů [8]	12
Obr. 2 Schematicky znázorněný přístroj pro zkoušku tahem a způsoby jeho pohonu [18]	15
Obr. 3 Elastická deformace hliníku je při stejném zatížení přibližně třikrát větší než u oceli [9]	17
Obr. 4 Deformace zkušebního tělesa [18]	18
Obr. 5 Tahový diagram nízkouhlíkové oceli s Lüdersovou deformací [17]	19
Obr. 6 Přetržený vzorek z hliníku a nerezavějící oceli [18]	19
Obr. 7 Tvary indentorů při zkoušce podle Brinella a Vickerse [13]	23
Obr. 8 Princip zkoušky rázem v ohybu, způsob přeražení vzorku (vlevo) [18]	25
Obr. 9 Deformace příčného průřezu pod vrubem při křehkém (vlevo) a tvárném lomu [18]	26
Obr. 10 Tranzitní křivka s vyznačenou tranzitní teplotou [9]	27
Obr. 11 Poloha zátěžného cyklu v závislosti na parametrech asymetrie [8]	30
Obr. 12 Wöhlerova křivka slitiny hliníku se zvyšujícím se počtem cyklů klesá [9]	31
Obr. 13 Kombinace cyklického zatěžování a creepu (pure creep = pouze creep) [18]	32
Obr. 14 Šplhání dislokací [18]	33
Obr. 15 Creepová křivka a časová závislost deformace (vpravo) [18]	34
Obr. 16 Schema možného provedení přístroje ke zkoušení creepu [18]	35
Obr. 17 Zkouška tlakem, deformace vzorku [18]	36
Obr. 18 BRD hliník (A) – přísada (B), 1 – slévárenské slitiny, 2 – tvářené slitiny, 3 – vytvrditelné slitiny, 4 – nevytvrditelné slitiny [8]	37
Obr. 19 Přirozené stárnutí některých vytvrditelných slitin hliníku [2]	39
Obr. 20 Přehled číselného označování slitin hliníku pro tvářený [20]	40
Obr. 21 Rozsahy tranzitních křivek nerezavějící konstrukčních ocelí [16]	44
Obr. 22 Závislost mechanických charakteristik na obsahu uhlíku v oceli bez tepelného zpracování [8]	45
Obr. 23 Mechanické vlastnosti zušlechťovaných ocelí [8]	46
Obr. 24 Audi Space Frame (ASF) [22]	48

6.2 Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled destruktivních zkoušek mechanických vlastností [8]	14
Tab. 2 Přehled mechanických charakteristik určených při zkoušce tahem [8]	20
Tab. 3 Rozdělení metod měření tvrdosti [8]	21
Tab. 4 Rozdělení slitin železa podle normy ČSN EN 10020 [4]	42
Tab. 5 Rozdělení konstrukčních ocelí podle ČSN EN 10020 [8]	43