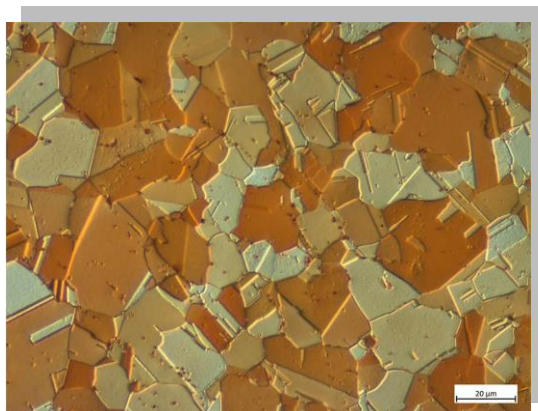


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH
STROJNÍCKA FAKULTA**



Strojnícka fakulta

ZÁKLADY MATERIÁLOVÉHO INŽINIERSTVA



prof. Ing. Janette BREZINOVÁ, PhD.

prof. Ing. Ján VIŇÁŠ, PhD.

doc. Ing. Dagmar DRAGANOVSKÁ, PhD.

doc. Ing. Anna GUZANOVÁ, PhD.

EDÍCIA ŠTUDIJNEJ LITERATÚRY

Košice 2020

Učebnica „Základy materiálového inžinierstva“ je určená pre študentov strojných fakúlt, ako aj pre študentov ďalších univerzít technického zamerania. Učebnica je vypracovaná v súlade s osnovami predmetov zameraných na oblasť technických materiálov na Strojníckej fakulte TU v Košiciach. Publikácia si kladie za cieľ oboznámiť študentov v koncentrovanej forme s teoretickými poznatkami a postupmi stanovenia materiálových charakteristík a využitia materiálov v strojárstve. Prezentyje základné poznatky z oblasti materiálového inžinierstva. Tematicky je zameraná na vnútornú stavbu kovových materiálov, sumarizuje základné metódy pre stanovenie mechanických vlastností materiálov. Pozornosť je venovaná zliatinám železa, ich kryštalizácii v metastabilnej a stabilnej sústave, podrobne sú opísané ocele a liatiny a ich využitie v technickej praxi. Prezentyje metódy tepelného spracovania, zameriava sa na rozdelenie a charakteristiku neželezných kovov a ich zliatin. Učebnica sumarizuje základné poznatky o polymérnych materiáloch a konštrukčnej keramike. Pri písaní učebnice boli využité aktuálne normy a postupy.

Učebnica bude zároveň slúžiť ako zdroj technických a vedeckých informácií pre vedecko – výskumných pracovníkov a širokú odbornú komunitu. Dovoľujeme si vyjadriť poďakovanie recenzentom publikácie, ktorí svojimi pripomienkami prispeli ku kvalite a odbornej úrovni predkladanej publikácie.

Táto publikácia vznikla rámci riešenia grantového projektu MŠVVaŠ SR KEGA č.001STU-4/2019 a projektov VEGA č.1/0497/20 a č.1/0154/19.

Recenzenti : **prof. Ing. Marián Buršák, PhD.**, Technická univerzita v Košiciach
doc. Dr. Ing. Peter Horňák, Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie,
Technická univerzita v Košiciach

© prof. Ing. Janette Brezinová, PhD.; prof. Ing. Ján Viňáš, PhD.; doc. Ing. Dagmar Draganovská, PhD. ; doc. Ing. Anna Guzanová, PhD.

ISBN: 978-80-553-3745-6

Obsah

1	VNÚTORNÁ STAVBA KOVOVÝCH MATERIÁLOV	7
1.1	Atómy a väzby v kovoch a zliatinách	7
1.2	Kryštalická stavba kovov a zliatin	9
1.2.1	Druhy kryštalografických mriežok	10
1.2.2	Poruchy stavby kryštálov	13
1.2.3	Štruktúra čistých kovov a zliatin	17
1.2.4	Vznik a pohyb dislokácií	19
1.2.5	Difúzia v kovoch a zliatinách	21
1.3	Plastická deformácia materiálov a jej mechanizmy	23
1.3.1	Plastická deformácia monokryštálov	24
1.3.2	Deformácia polykryštalického materiálu	26
1.3.3	Zotavenie a rekryštalizácia	27
2	ZÁKLADY SKÚŠOBNÍCTVA MATERIÁLOV	29
2.1	Hodnotenie mechanických vlastností materiálov	31
2.1.1	Statická skúška ťahom	31
2.1.2	Statická skúška tlakom	34
2.1.3	Statická skúška ohybom	35
2.1.4	Skúšky tvrdosti	36
2.1.5	Skúšky rázom v ohybe	41
2.2	Hodnotenie technologických vlastností materiálov	43
2.2.1	Skúška lámavosti	44
2.2.2	Skúška hĺbením podľa ERICHSENA	45
2.2.3	Skúška hĺbením podľa ENGELHARDTA	46
2.2.4	Skúška lámavosti plechov striedavým ohybom	48
2.3	Nedeštruktívne skúšanie materiálov	49
2.3.1	Vizuálna kontrola materiálov	51
2.3.2	Kapilárna metóda	53
2.3.3	Magnetická prášková metóda	56
2.3.4	Ultrazvuková defektoskopia	59
2.3.5	Prežarovacie metódy hodnotenia materiálov	66
2.3.7	Rozsah použitia defektoskopických metód	72
2.4	Štruktúrna analýza materiálov	73
2.4.1	Makroskopická analýza	73
2.4.2	Mikroskopická analýza	74
3	TECHNICKÉ ZLIATINY ŽELEZA	76
3.1	Sústava železo – uhlík	76
3.1.1	Metastabilný rovnovážny diagram Fe – Fe ₃ C	79
3.1.2	Význam rovnovážnych diagramov Fe – C	96
3.1.3	Sprievodné a zliatinové prvky v oceliach	96
3.1.3.1	Sprievodné prvky a inklúzie	97
3.1.3.2	Zliatinové prvky	99

3.2 Rozdelenie a označovanie technických zliatin Fe, materiálové normy.....	101
3.2.1 Ocele na tvárnenie	102
3.2.1.1. Rozdelenie oceli na tvárnenie	102
3.2.1.2 Systémy označovania ocelí.....	104
3.2.2 Ocele na odliatky	107
3.2.3 Liatiny	108
3.2.3.1 Systém skráteného označovania liatin	108
3.3 Ocele.....	110
3.3.1 Nelegované ocele obvyklých akostí	110
3.3.2 Ocele akostné a ušľachtilé.....	111
3.3.2.1 Ocele valcované za studena z hlbokoťažných ocelí k tvárneniu za studena	111
3.3.2.2 Mikrolegované ocele	112
3.3.2.3 Ocele pre oceľové konštrukcie	112
3.3.2.4 Ocele pre tlakové nádoby	114
3.3.3 Ocele pre výstuž do betónu	116
3.3.4 Ocele pre koľajnice	116
3.3.5 Automatové ocele	116
3.3.6 Ocele k cementovaniu	116
3.3.7 Ocele k nitridovaniu	117
3.3.8 Pružinové ocele	118
3.3.9 Ocele k zošľachťovaniu.....	119
3.3.10 Antikorózne a žiaruvzdorné ocele	119
3.3.10.1 Antikorózne ocele	119
3.3.10.2 Žiaruvzdorné ocele	123
3.3.11 Nástrojové ocele.....	124
3.3.11.1 Rozdelenie nástrojových ocelí.....	124
3.3.11.2 Nástrojové ocele nelegované (uhlíkové)	125
3.3.11.3 Legované nástrojové ocele pre prácu za studena.....	125
3.3.11.4 Legované nástrojové ocele pre prácu za tepla.....	126
3.3.11.5 Rýchlorezné ocele	127
3.3.11.6 Výroba nástrojových ocelí odlievaním	128
3.3.11.7 Výroba nástrojových ocelí práškovou metalurgiou	129
3.3.11.8 Požiadavky na nástrojové ocele	130
3.3.11.9 Tepelné spracovanie nástrojových ocelí na primárnu a sekundárnu tvrdosť	134
3.3.11.10 Tepelné spracovanie rýchlorezných ocelí	135
3.3.11.11 Mikroštruktúra nástrojových ocelí.....	138
3.3.11.12 Povrchová úpravy nástrojov.....	140
3.3.12 Ocele na valivé ložiská.....	140
3.3.13 Ocele na odliatky	142
3.3.14 Oteruvzdorné ocele.....	143
3.3.15 Ocele požívané v konštrukcii automobilov.....	143

3.3.15.1	Dvojfázové ocele	145
3.3.15.2	Ocele s transformačne indukovanou plasticitou	147
3.3.15.3	Viacfázové ocele.....	150
3.3.15.4	Martenzitické ocele.....	152
3.3.15.5	Feriticko-bainitické ocele	153
3.3.15.6	Ocele s dvojčatením indukovanou plasticitou	153
3.3.15.7	Za tepla tvárnené ocele	155
3.3.15.8	Ocele tepelne spracované po tvárnení.....	155
3.3.15.9	Špeciálne spracované ocele	156
3.3.15.10	Vývojové typy ocelí	156
3.3.15.11	Konvenčné oceľové plechy pre aut. priemysel	157
3.4	Liatiny.....	158
3.4.1	Biela liatina.....	160
3.4.2	Grafitické liatiny	160
3.4.2.1	Liatina s lupienkovým grafitom	160
3.4.2.2	Liatina s guľôčkovým grafitom	162
3.4.2.3	Liatina s vermikulárnym grafitom	163
3.4.2.4	Liatina s vločkovým grafitom	164
3.4.3	Tvrdená liatina	166
3.4.4	Legované druhy liatin.....	167
4	TEPELNÉ SPRACOVANIE OCELÍ.....	168
4.1	Fázové premeny pri tepelnom spracovaní	168
4.1.1	Austenitizácia	169
4.1.2	Izotermický rozpad austenitu	170
4.1.3	Anizotermický rozpad austenitu	175
4.2	Základné postupy tepelného spracovania	177
4.2.1	Žíhanie	179
4.2.2	Kalenie a popúšťanie.....	182
4.2.3	Chemicko-tepelné spracovanie.....	189
4.2.4	Termomechanické spracovanie	194
5	NEŽELEZNÉ KOVY A ICH ZLIATINY	196
5.1	Zliatiny ľahkých neželezných kovov	198
5.1.1	Hliník a jeho zliatiny	198
5.1.2	Horčík a jeho zliatiny	207
5.1.3	Titán a jeho zliatiny	209
5.2	Zliatiny ťažkých neželezných kovov	212
5.2.1	Meď a jej zliatiny.....	212
5.2.2	Nikel a jeho zliatiny	219
5.2.3	Kobalt a jeho zliatiny	221
5.3	Ľahkotaviteľné kovy a ich zliatiny	222
5.3.1	Ľahkotaviteľné kovy	223
5.3.2	Zliatiny ľahkotaviteľných kovov	224
5.4	Ťažkotaviteľné kovy a ich zliatiny	225

5.5	Drahé kovy a ich zliatiny	227
6	PLASTY A ICH VLASTNOSTI	228
6.1	Rozdelenie plastov	228
6.2	Štruktúra makromolekulových látok.....	232
6.3	Vlastnosti polymérov	234
6.4	Plastoméry.....	239
6.5	Duroméry	240
6.6	Elastoméry.....	242
7	KONŠTRUKČNÁ KERAMIKA A SKLO	243
7.1	Všeobecné poznatky	243
7.2	Druhy konštrukčnej keramiky	247
7.2.1	Oxidová keramika	247
7.2.2	Nitridová keramika	249
7.2.3	Keramika na báze karbidu kremíka	253
7.3	Sklo a porcelán.....	254
8	MEDZNÉ STAVY MATERIÁLOV	256
8.1	Trvalá deformácia	259
8.2	Typy lomov	260
8.3	Cyklické namáhanie materiálov.....	267
8.4	Tečenie	271
8.5	Opotrebenie	273
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	284

1 VNÚTORNÁ STAVBA KOVOVÝCH MATERIÁLOV

1.1 Atómy a väzby v kovoch a zliatinách

Výsledné vlastnosti kovov a zliatin sú určené mnohými faktormi, predovšetkým druhom a vlastnosťami atómov, ktoré ich vytvárajú, ich vzájomnou väzbou, ich priestorovým rozložením a usporiadaním, ako aj prítomnými poruchami kryštalickej stavby pevnej látky.

Základnou stavebnou časticou hmoty je **atóm**, ktorý sa skladá z kladne nabitého jadra, kde je sústredená prevažná časť hmotnosti atómu a z atómového obalu, ktorý je tvorený záporne nabitými časticami s veľmi malou hustotou – elektrónmi.

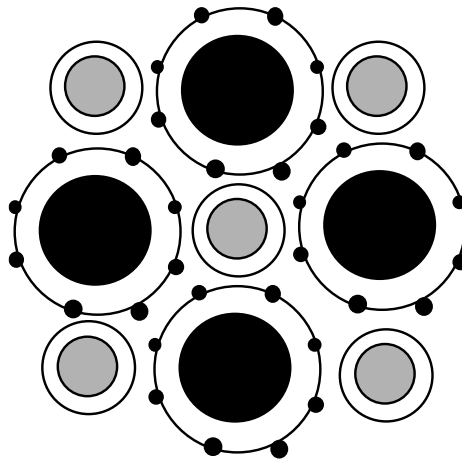
Kovové materiály sú najdôležitejšie a najpoužívanéjšie pevné látky v strojárstve, ale aj v iných odvetviach. Kov možno charakterizovať mnohými technicky užitočnými vlastnosťami ako je vysoká mechanická pevnosť, schopnosť plastického pretvorenia pri pôsobení vonkajších síl, vysoká elektrická a tepelná vodivosť, kovový lesk a pod. Tieto vlastnosti majú nielen čisté kovy, tvorené atómami jedného druhu, ale aj sústavy zložené z niekoľkých kovov, prípadne z kovov a nekovov, tzv. zliatiny kovov. Všetky kovy a ich zliatiny (s výnimkou ortuti) sú pri teplote okolia v kryštalickom stave, ktorý sa vyznačuje pravidelným priestorovým usporiadaním atómov v priestore. Prevažná väčšina technológií výroby kovov a zliatin využíva proces kryštalizácie z tavenín, ktorý je významne ovplyvňovaný okrem iného aj chemickým zložením tuhnucej taveniny. Vlastnosti kovových materiálov môžu podstatne ovplyvniť riadené fázové premeny v tuhom stave.

Kovy môžeme z hľadiska periodickej sústavy prvkov charakterizovať ako prvky s neúplne obsadenou vonkajšou sférou, t.j. ako prvky, ktoré sú schopné elektróny uvoľňovať, a teda tvoriť katióny.

Kovy je možné rozdeliť na tri skupiny: medzi **prechodové (tranzitívne) kovy T** patria prvky s nezaplnenou predposlednou sférou elektrónmi, pri čiastočnom obsadení vyššej sféry. Patria sem technicky najvýznamnejšie kovy (Fe, Mn, Cr, Ni, Co, V, Ti, Zr, Mo, W, Nb atď.). **Kovy skupiny A (alkalické kovy)** sú charakterizované veľkou chemickou afinitou pri tvorbe zlúčenín. Tvoria silné zásady, sú nestále na vlhkom vzduchu, majú nízku teplotu tavenia a nízku mechanickú pevnosť (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr). Ich atómom chýba mnoho elektrónov ku konfigurácii najbližšieho vzácneho plynu. **Kovy skupiny B** majú úplne obsadenú predposlednú sféru a majú niektoré vlastnosti nekovov. Tvoria teda prechod medzi kovmi a nekovmi (Mg, Al, Zn, Cd, Hg). Na rozdiel od skupiny A, ich atómom chýba málo elektrónov ku konfigurácii najbližšieho vzácneho plynu.

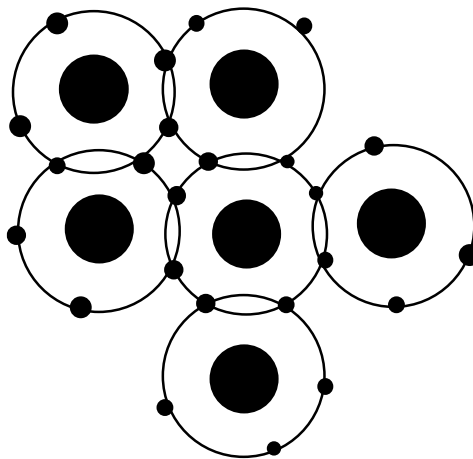
Priblížením napr. dvoch osamotených atómov do určitej vzdialenosti začnú tieto na seba pôsobiť - vzniká **väzba medzi atómami**. Medzi atómami rozličného druhu môžu vzniknúť štyri druhy väzieb:

1. **Iónová** väzba, obr.1.1, vzniká ako dôsledok elektrostatických síl medzi kationmi a aniónmi. Pri tejto najpevnejšej väzbe sa v oboch atónoch doplní sféra valenčných elektrónov. Kryštály s iónovou väzbou sa ľahko štiepia a rozkladajú.



Obr.1.1 Princíp iónovej väzby

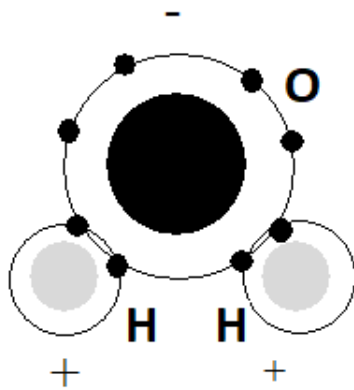
2. **Kovalentná** väzba, (obr.1.2) vzniká vytvorením dvojice (niekoľkých dvojíc) elektrónov, ktorá patrí obom (viacerým) atómom. Usporiadanie atómov je smerované v orientácii dvojice (niekoľkých dvojíc) elektrónov. Kryštály s kovalentnou väzbou sú veľmi tvrdé, slabo tepelne a elektricky vodivé.



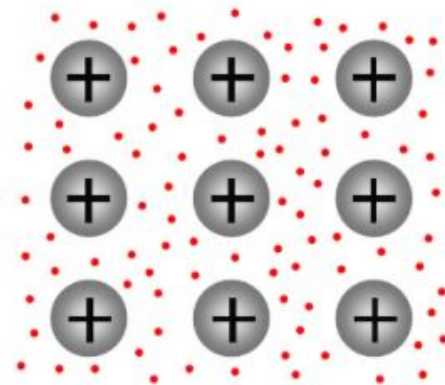
Obr.1.2 Princíp kovalentnej väzby – atóm uhlíka – 4 valenčné elektróny

3. **Molekulová väzba** (väzba Van der Waalsovými silami) (obr.1.3), vzniká ako dôsledok elektrických dipólov elektrónov v určitých polohách vzhľadom na jadro. Pôsobí na väčšie vzdialenosti ako je medziatómová vzdialenosť.
4. **Kovová** väzba, (obr.1.4), vzniká, keď atómy uvoľnia časť valenčných elektrónov do spoločného vlastníctva kladných iónov. Pevnú látku si potom predstavujeme ako súbor kationtov, ktoré sú držané spolu súborom valenčných elektrónov od jednotlivých atómov (elektrónový oblak, mračno). Väzba je typická pre prvky s menším ako polovičným

obsadením vonkajšej sféry elektrónmi, čo sú kovy. Elektróny pohyblivé na väčšie vzdialenosti sú podmienkou dobrej elektrickej vodivosti kovov. Kovová väzba umožňuje plasticnosť a húževnatosť kovov, ale aj vysokú elektrickú a tepelnú vodivosť.



Obr.1.3 Princíp molekulovej väzby
„molekula H_2O “



Obr.1.4 Princíp kovovej väzby

1.2 Kryštalická stavba kovov a zliatin

Kryštalická stavba je veľmi dôležitou vlastnosťou kovov a ich zliatin. Všetky kryštalické látky v tekutom alebo pevnom stave predstavujú systém, ktorý pozostáva z jednotlivých častíc - atómov. Pri prechode od jednotlivých atómov k pevnej kryštalickej látke sa odohrávajú procesy, ktoré zapríčiňujú vzájomný účinok častíc na seba v celom systéme, čím vznikne látka s úplne novými vlastnosťami a podstatou. Spomínané novovzniknuté vlastnosti u jednotlivých častíc neexistovali. Tieto zákonitosti sú využívané pri výrobe zliatin so špecifikovanými mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami.

Pri prechode kovovej látky z taveniny do pevného stavu sa neusporiadaný stav atómov v tavenine dostáva do pravidelného usporiadania v tuhom stave. V prípade, že tento prechod prebehne pomaly a za regulovaných podmienok, môže nastať také vnútorné usporiadanie atómov, ktoré sa prejaví pravidelnosťou vonkajšieho tvaru a tak vznikne kryštál.

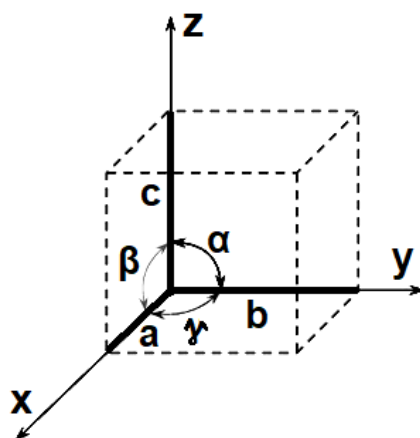
Kryštály sú typické rovinnými stenami. Medzi rovinnými stenami sa opakujú rovnaké uhly. Ak rast kryštálu prebieha v nerušenom prostredí, získava sa pravidelnosť vonkajších tvarov kryštálu u kovových látok. Tento jav sa u kovov dosahuje len ojedinele vzhľadom na ich kryštalizačnú schopnosť. Pri kryštalizácii získavame u kovov telesá s pravidelnou vnútornou stavbou, ktorá odpovedá danej kryštalografickej sústave, ktorá má nepravidelne vyvinutý vonkajší tvar.

Kovy a ich zliatiny sa ako kryštalické látky označujú vtedy, ak pôsobia ako pevné látky s tesným uložením a pravidelným usporiadaním základných častíc. Kryštalické látky sú zložené z geometrických útvarov, určených rozmermi a tvarom. Pri tvorbe tuhej látky sa atómy v

priestore ukladajú tak, aby ich energia bola čo najmenšia. Tomuto rozloženiu odpovedá presný poriadok v priestorovom rozložení častíc.

1.2.1 Druhy kryštalografických mriežok

Kovy a ich zliatiny sú kryštalické látky (pevné látky s tesným uložením a pravidelným usporiadaním základných stavebných častíc - atómov, iónov), ktoré sa skladajú zo základných geometrických útvarov, určených svojimi rozmermi, tvarom a tiež spôsobom priestorového obsadenia objemu týchto útvarov časticami. Geometrické útvary vytvárajú **priestorovú mriežku**, ktorá obsahuje súbor **uzlových bodov**. Najmenšia časť priestorovej mriežky, ktorá obsahuje najmenší možný počet uzlových bodov, sa nazýva **elementárna bunka**, (obr.1.5).



Obr.1.5 Znáznornenie priestorovej mriežky s uzlovými bodmi a elementárnej bunky, určenej parametrami a, b, c a uhlami α, β, γ

Všetky elementárne bunky, ktoré tvoria priestorovú mriežku sú úplne rovnaké geometrické útvary a každý uzlový bod má úplne identické okolie. Dĺžky hrán elementárnej bunky na jednotlivých osiach x, y, z sú tzv. **mriežkové parametre a, b, c** . Veľkosť parametrov je rádu 10^{-10} m.

Podľa veľkosti uhlov α, β, γ medzi osami x, y, z a veľkosti mriežkových parametrov a, b, c rozoznávame 7 kryštalografických sústav, pomocou ktorých opisujeme 14 geometricky možných priestorových mriežok (tab.1.1).

Keď geometrické útvary (elementárne bunky) v uzlových bodoch obsadia atómy (ióny) získame **štruktúrnú mriežku**. Priestorovej mriežke potom zodpovedá **kryštalová štruktúra** (štruktúrna kryštalografia). Uzlové body nemusia však byť obsadené len jediným druhom atómov alebo iónov (čistý kov), ale aj komplexom častíc (zliatiny, zlúčeniny), ktoré sú medzi sebou viazané určitým typom väzby. Takýto komplex častíc sa nazýva **motív** alebo **báza** štruktúry. To umožňuje vznik nesmierného množstva kryštalových štruktúr, či už pozorovaných v prírode alebo vyrobených umele.

Štruktúrna mriežka je teda charakterizovaná tvarom, rozmermi (parametre), rozmiestnením častíc a motívom. Vznik kryštálovej štruktúry, a teda i štruktúrnej mriežky, si môžeme predstaviť ako priestorové usporiadanie rovnakých gúľ (prípadne motívov). Podľa spôsobu ukladania vrstiev a podľa stiesnenosti gúľ v jednej vrstve sa získajú rôzne štruktúrne mriežky. Rozmer gúľ súvisí s rozmerom atómov (iónov), z ktorých uvažovaná látka pozostáva.

Tabuľka 1.1 Charakteristiky možných priestorových mriežok

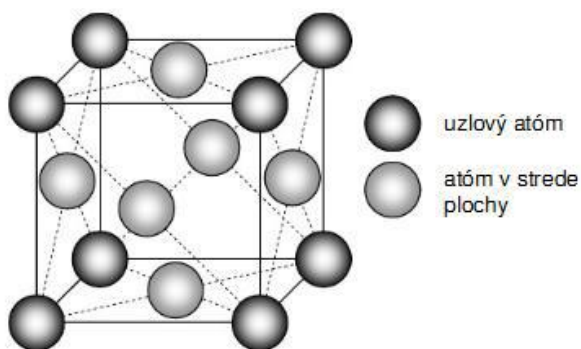
sústava	základné údaje sústavy	priestorová mriežka
triklinická	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	jednoduchá
monoklinická	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	jednoduchá
		bazálne centrovaná
ortorombická	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		bazálne centrovaná
		priestorovo centrovaná
		plošne centrovaná
hexagonálna	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	bazálne centrovaná
romboedrická	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	jednoduchá
tetragonálna	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		priestorovo centrovaná
kubická	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	jednoduchá
		priestorovo centrovaná
		plošne centrovaná

Typické kovové štruktúry

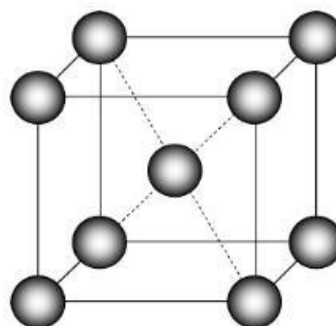
K technicky najvýznamnejším typom kryštálových mriežok radíme nasledovné typy kovových mriežok: kubická priestorovo (objemovo) centrovaná, kubická plošne centrovaná, hexagonálna mriežka s najtesnejším usporiadaním a tetragonálna mriežka.

Kubická plošne centrovaná mriežka na obr.1.6 má atómy vo rohoch kocky a v priesečníku plošných uhlopriečok. Rohové atómy patria každý jeden ôsmim mriežkam ($8 \cdot 1/8 = 1$), atómy uložené v priesečníku plošných uhlopriečok, patria vždy dvom mriežkam: $6 \cdot 1/2 = 3$, a teda jednej mriežke patria 4 atómy. Koordináčnité číslo (t.j. počet najbližších atómov, ktoré obklopujú každý uzlový bod mriežky, sú od neho rovnako vzdialené a pravidelne rozmiestnené) je 12.

Kubickú plošne centrovanú mriežku majú kovy Fe, Al, Cu, Ni, Ca, Sn, Ce, Co, Rh, Zr, Pd, Pt, Ag, Au, Pb. Tieto kovy sú vo všeobecnosti dobre tvárniteľné za tepla i za studena



Obr.1.6 Schéma kubickej plošne
centrovanej mriežky



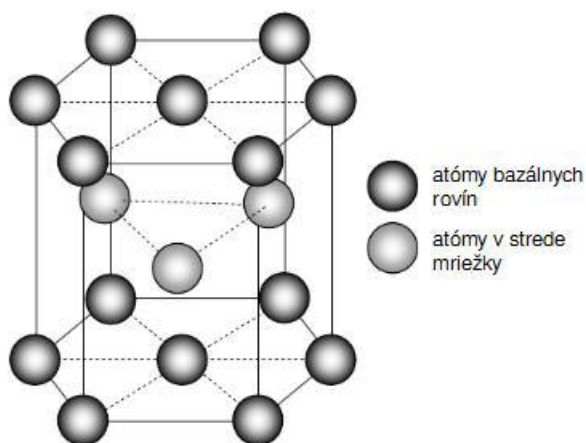
Obr.1.7 Schéma kubickej priestorovo
centrovanej mriežky

Kubická priestorovo (objemovo) centrovaná mriežka na obr.1.7, má 8 atómov v rohoch kocky, ktoré patria ôsmim mriežkam ($8 \times 1/8 = 1$) a atóm v priesečníku telesových uhlopriečok, ktorý patrí tejto mriežke. Jednej štruktúrnej mriežke patria teda 2 atómy. Koordináčné číslo je 8, lebo od každého vzťažného atómu je 8 atómov, ktoré sú najbližšie a súčasne rovnako vzdialené.

Kubickú priestorovo centrovanú mriežku majú napr.: Fe_α, Cr, Mo, W, Nb, V, Fe_δ a ďalšie prvky. Spoločným znakom tejto skupiny kovov je nízka tvárnosť za studena.

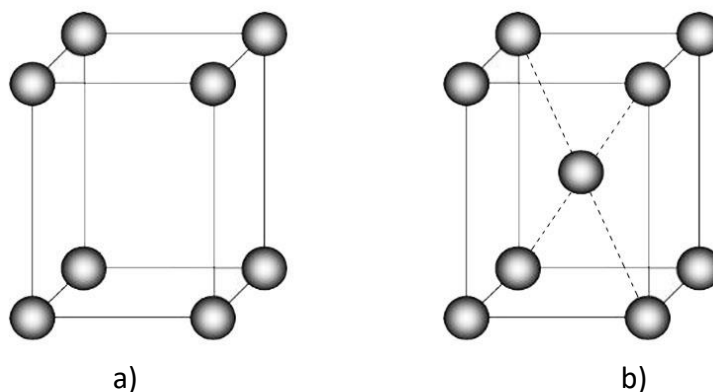
Hexagonálna tesne usporiadaná mriežka na obr.1.8, je tvorené šesťbokým hranolom. Mriežka má 12 atómov v rohoch hranola, z ktorých patrí každý 6-tim mriežkam, 2 atómy v základniach hranola, pričom každý patrí 2 mriežkam a ešte 3 atómy, umiestnené v priehlbínach základnej vrstvy atómov v polovici výšky hranola c, ktoré patria len tejto mriežke. Elementárnej mriežke H12 patria 2 atómy, $12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6/3 = 2$, nakoľko na obr.1.8 sú 3 elementárne bunky a výsledné číslo 6 je preto potrebné deliť číslom 3.

Teoretický pomer parametrov $c : a = 1,633$. Koordináčné číslo je rovnaké ako pre kubickú plošne centrovanú mriežku. Je to teda zasa najtesnejšie usporiadanie gúľ, líši sa však ukladáním gúľ na seba. V tejto sústave kryštalizuje napr.: Cd, Co_α, Mg, Ti, Zn, Zr atď. Vyznačujú sa nízkou tvárnosťou za studena aj za tepla.



Obr.1.8 Schéma hexagonálnej tesne usporiadanej mriežky

Tetragonálna mriežka patrí do pravouhlej sústavy s parametrami a , a , c . Je charakterizovaná nerovnosťou $c > a$, pričom pomer $c : a$ sa označuje ako stupeň tetragonality. Podľa rozloženia atómov v mriežke môžu byť tetragonálne mriežky jednoduché (obr.1.9a) alebo priestorovo centrovane (obr.1.9b). V tejto sústave kryštalizuje napr.: In, Mn, Sn, B.



Obr.1.9 Schéma tetragonálnej mriežky a) jednoduché, b) priestorovo centrovanej

1.2.2 Poruchy stavby kryštálov

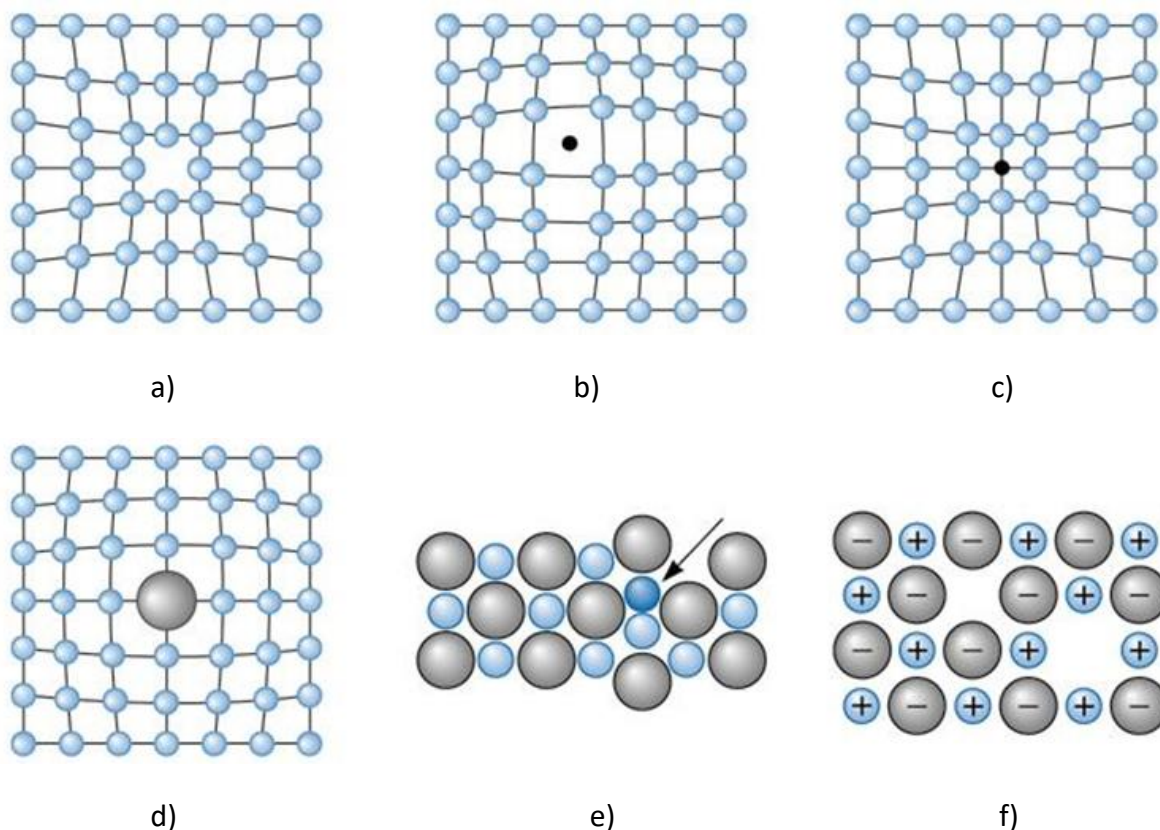
Dokonalú, geometricky presne vybudovanú kryštalovú štruktúru má iba ideálny kryštál, avšak skutočný - reálny kryštál má veľké množstvo rozličných nedokonalostí stavby, ktoré nazývame **mriežkové poruchy**. Tieto poruchy majú zásadný význam pri hodnotení a vysvetľovaní vlastností látok pri procesoch a premenách, ktoré prebiehajú v kryštalickej látke pri pôsobení rozličných vonkajších a vnútorných účinkov.

Okrem chemických porúch (chemická heterogenita) a elektrických porúch (narušovanie periodicity elektrického potenciálu) rozoznávame aj **mriežkové poruchy** (narušenie pravidelnosti usporiadania štruktúry). Medzi mriežkové poruchy patria bodové, čiarové, plošné a priestorové poruchy.

a) Bodové poruchy obmedzujú svoju pôsobnosť na malý, submikroskopický priestor. Môžu byť v termodynamickej rovnováhe v tuhej látke. Patria sem **vakancie** (prázdne miesta), čo sú vlastne neobsadené uzlové body mriežky (obr.1.10a); **interstície** (obr.1.10b), čo sú vlastne atómy v interstitických polohách (dutinách, medzerách) mriežky, **substitučné atómy** sú cudzie atómy v uzlových polohách mriežky (obr.1.10c a obr.1.10d), **Frenkelové páry (Frenkelove poruchy)** sú to vlastne vakancie a intersticiálneho atómu. Tieto typy poruchy vznikajú, napr. vplyvom žiarenia s vysokou energiou, ktorá vypudí atóm zo svojho uzlového bodu v mriežke na miesto medzi uhlovými bodmi mriežky (napr. pri jadrovom štiepení). (obr.1.10e) a **Schottkyho poruchy** na obr.1.10f sa vyskytujú v iónových kryštáloch jedná sa o tzv. kationovú vakanciu, ktorá je vyvážená aniónovou vakanciou a obe poruchy tvoria spoločný pár. V okolí Schottkyho poruchy bude dochádzať k lokálnym vysunutiam atómov

z mriežky, čo môže byť interpretované aj ako lokálna deformácia mriežky a znázorňuje sa pomocou deformačných sietí mriežkových čiar.

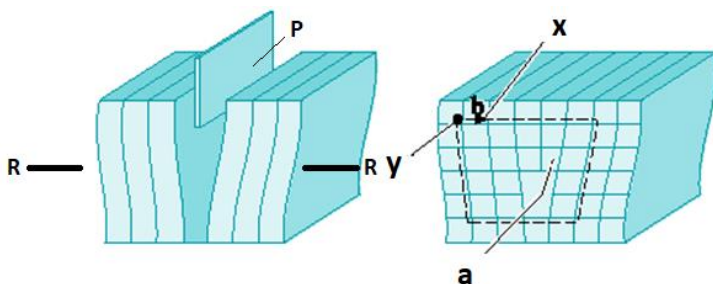
Hlavným zdrojom bodových porúch je ožiarenie kovu, napr. neutrónmi, ohrev vzorky na vysokú teplotu a plastická deformácia. Vakancie a interstície sú termodynamicky stabilné v kryštálovej mriežke, ich množstvo so vzrastom teploty vzrastá a naopak, bodové poruchy sa môžu pohybovať mriežkou (migrovať) bez privedenia vonkajšej energie. Existencia a migrácia týchto porúch má veľký technický význam, napr. pri difúzii, vzniku zárodkov pri fázových premenách v tuhom stave, pri kumulácii poškodenia pri únave a pod.



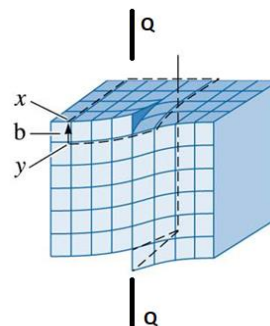
Obr.1.10 Bodové poruchy a) vakancie b) intersticiálny atóm c) malý substitučný atóm, d) veľký substitučný atóm, e) Frenkelova porucha f) Schottkyho porucha

b) Čiarové poruchy - dislokácie sú najvýznamnejšie štruktúrne poruchy mriežky, ktorých existencia, vznik a pohyb umožňuje vysvetliť mnoho javov a pochodov v pevných látkach. V tuhej látke sú termodynamicky nestabilné.

Ak vložíme do kryštalickej štruktúry polrovinu **a** (obr.1.11), potom nad rovinou R bude počet atómových rovín väčší ako pod ňou, a teda nad rovinou budú tlakové napätia a pod ňou zasa ťahové napätia. Vložením poloviny do mriežky vznikla pozitívna **hranová dislokácia**.



Obr.1.11 Zázornenie hranovej dislokácie
a – hrana vložená do mriežky, b – Burgersov
vektor, x, y – poloha vektora v rovinách



Obr.1.12 Schéma skrutkovej
dislokácie, b – Burgersov vektor
x, y – poloha vektora v rovinách

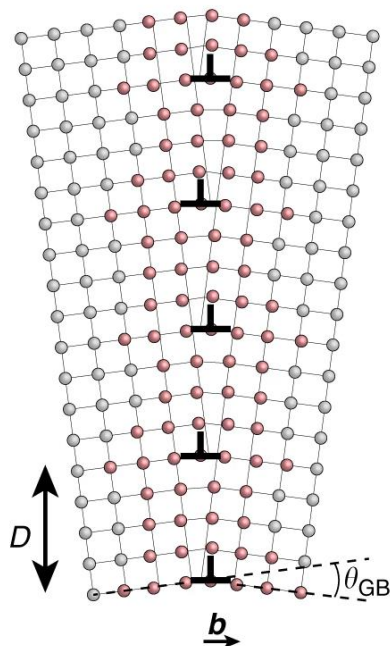
Ďalším druhom čiarovej poruchy je **skrutková dislokácia**. Jej vznik si môžeme predstaviť podľa obr.1.12. Kryštál narežeme v rovine Q a jednu narezanú časť proti druhej presunieme o určitú hodnotu. Kryštál si potom predstavujeme akoby pozostával z jedinej atómovej roviny tvaru skrutkovice. Vznik a množstvo dislokácií závisí od spôsobu výroby a spracovania materiálu (plastickou deformáciou). Hustota dislokácií udáva celkovú dĺžku dislokačných čiar v jednotke objemu kovu. Dislokácia vo svojom okolí vyvoláva mechanické napätie s ďalekým dosahom a významne zvyšuje vnútornú energiu materiálu. **Burgersov vektor** definuje smer a veľkosť dislokácie, ktorá vznikla deformáciou mriežky. Možno ho vyjadriť ako rozdiel dĺžky slučky opísanej okolo dislokácie a slučky v neporušenej mriežke tzv. **Burgersova slučka**. Pre hranovú dislokáciu je Burgersov vektor kolmý na dislokačnú čiaru; pre skrutkovú dislokáciu je s dislokačnou čiarou rovnobežný. (viď obrázok); pri zmiešanej dislokácii zvierá Burgersov vektor s dislokačnou čiarou uhol 0° až 90° . Tretím typom čiarovej poruchy je **zmiešaná dislokácia**, ktorá je kombináciou predošlých dvoch typov dislokácií. Niektoré jej časti majú hranový charakter a iné skrutkový. Dislokačné čiary sa nemôžu končiť vo vnútri dokonalého kryštálu, ale na jeho povrchu alebo pri iných defektoch vo vnútri, alebo tiež môžu vytvárať uzavreté okruhy.

c) Plošné poruchy majú väčšie priestorové pôsobenie ako dislokácie, patria sem:

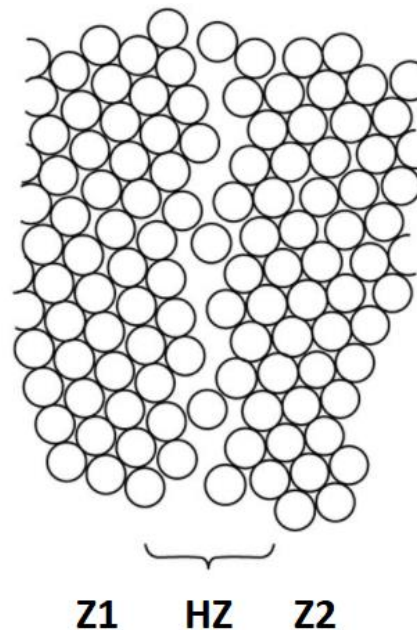
- **hranice subzrín** sú oblasti, ktoré oddeľujú jednotlivé dokonalé bloky kryštálu s rozmermi asi 10^{-6} m od seba v reálnom kryštáli, pričom stupeň dezorientácie blokov je malý - niekoľko oblúkových minút až stupňov. Hranice subzrín si predstavujeme ako dislokačné steny, t.j. dislokácie usporiadané nad sebou (obr.1.13).

- **hranice zrn** (obr.1.14) oddeľujú jednotlivé zrná polykryštalickej látky, pričom stupeň dezorientácie medzi zrnami je veľký. Sú to oblasti nie veľkej hrúbky (napr. pre hliník asi $4 \cdot 10^{-10}$ m), kde je výrazne porušená pravidelnosť kryštalickej stavby v dôsledku prítomnosti vysokej hustoty dislokácií i vysokej koncentrácie vakancií. Hranice zrn významne vplývajú na fyzikálne, mechanické i chemické vlastnosti materiálu. Chemické reakcie prebiehajú v týchto oblastiach rýchlejšie (oxidácia, korózia). Na hraniciach zrn intenzívnejšie prebieha difúzia, je

tu vyššia koncentrácia nečistôt a prvkov ktoré pozitívne vplyvajú na vznik zárodkov pri fázových premenách.



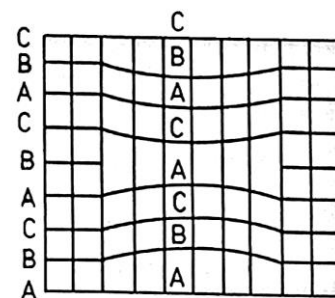
Obr.1.13 Dislokačný model hranice subzrn, b - Burgersov vektor, θ_{GB} – uhol dizorientácie mriežky, D – vzdialenosť dislokácií



Obr.1.14 Schéma usporiadania atómov v zrnách (Z1, Z2) a v mieste hranice zrn (HZ)

Chyby vrstvenia sú poruchy vo vrstvení atómových rovín na seba. Ak má kryštál uložené vrstvy (vytvorené guľovými útvarmi) v poradí ABCABCABC (obr.1.15) a v určitej oblasti chýba časť roviny B v štruktúre, v tomto mieste je iné usporiadanie rovín.

Vznik chýb vrstvenia si môžeme predstaviť zhromaždením vakancií do daného miesta (odobratie roviny), zhromaždením interstícií do daného miesta (pridanie roviny) a sklzom, napr. časti roviny B vzhľadom na ostatnú mriežku. Objavenie týchto porúch umožnilo vysvetliť mnoho experimentálnych pozorovaní, napr. pri tečení materiálu.



Obr.1.15 Schéma zvláštného prípadu chyby vrstvenia

d) Priestorové poruchy sú trojrozmerné (objemové) útvary, ktoré sa výrazne líšia či už zložením alebo usporiadaním atómov od základnej stavby kryštálu a výrazne narušujú periodicitu kryštalickej mriežky. Medzi priestorové poruchy patria napr. precipitáty, zhluky cudzích atómov, dutiny, zhluky nečistôt, nekovové súčiastky v kovovej hmote a pod.

1.2.3 Štruktúra čistých kovov a zliatin

Kryštalickú stavbu čistých kovov charakterizuje veľký počet (10^{28} až 10^{29} v 1 m^3) pravidelne priestorovo usporiadaných štruktúrnych mriežok, ktoré vytvárajú atómy jedného druhu. Rozmer „dokonale“ usporiadaných oblastí je rozličný. Pre monokryštály je tento rozmer radu až 10^{-2} m. Pre polykryštalické látky majú jednotlivé „dokonale“ usporiadané oblasti tvar priestorových mnohostenov, ktoré nazývame **zrná** (polyedrická štruktúra), s rozmermi radu 10^{-4} m. Jednotlivé zrná s rozdielnou kryštalografickou orientáciou sa stýkajú navzájom v plochách, ktoré nazývame **hranice zrn**.

Čisté kovy sa v technickej praxi používajú len zriedkavo. Prevažne sa uplatňujú zliatiny kovov, ktoré majú obyčajne vyššie technicky využiteľné vlastnosti.

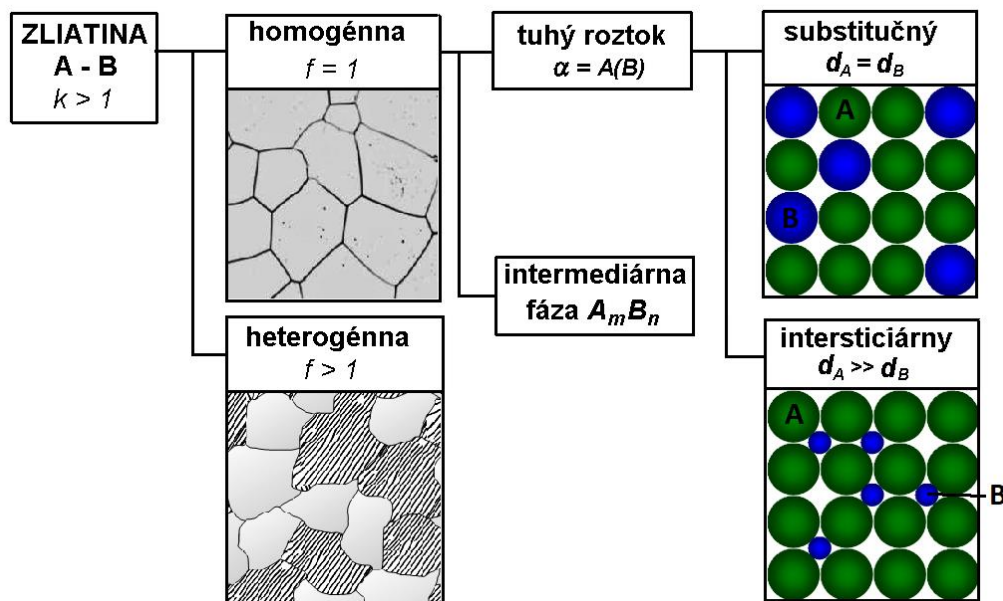
Určité vymedzené množstvo alebo objem daného kovu alebo zliatiny sa nazýva **sústava** (systém).

Zložky (komponenty) sú základné chemické časti sústavy, z ktorých v daných podmienkach môžu vznikáť jednotlivé fázy zliatiny.

Chemicky a fyzikálne homogénna časť zliatiny ohraničená rozhraním, na ktorom sa jej vlastnosti menia skokom, sa nazýva **fáza**. Táto môže byť tvorená jednou, dvoma alebo viac zložkami.

Pridávanie ďalšieho kovu alebo nekovu do pôvodného (základného) kovu má za následok výrazné zmeny vlastností týchto látok.

Zliatina je kovový materiál, skladajúci sa z dvoch alebo viacerých zložiek, v ktorej prevažujúcou zložkou je kov. Podľa štruktúry môžu byť zliatiny **homogénne** (jednofázové) alebo **heterogénne** (viacfázové) sústavy - obr.1.16. Jednofázové zliatiny majú štruktúru tuhého roztoku alebo intermediárnej fázy. Viacfázové zliatiny z hľadiska ich štruktúry nazývame **mechanické zmesi** a sú tvorené zmesou kryštálov čistých kovov, tuhých roztokov alebo intermediárnych fáz.



Obr.1.16 Druhy vnútornej stavby zliatin

Tuhý roztok je druh kryštalickej stavby zliatiny, ktorý má mriežku jednej zo zložiek a v nej sú umiestnené častice druhej zložky (resp. ďalších zložiek). Medzi časticami prevažuje kovová väzba. Označujú sa malými písmenami gréckej abecedy. Podľa umiestnenia častíc rozpúšťajúceho sa kovu (B) v mriežke základného kovu (A) rozoznávame dva základné typy tuhých roztokov, obr.1.16:

- **substitučný**, v ktorom sú častice rozpúšťajúcej sa zložky v uzlových polohách mriežky základnej zložky,
- **intersticiálne**, v ktorom sa častice rozpúšťajúcej zložky nachádzajú v medziuzlových polohách mriežky základnej zložky.

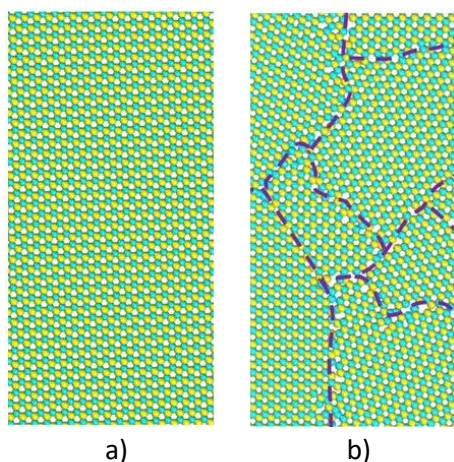
Priaznivé podmienky na vznik substitučného tuhého roztoku sú vtedy, ak zložky spĺňajú nasledovné podmienky:

- kryštalizujú v rovnakej kryštálovej mriežke,
- ich atómové priemery sú málo odlišné (max. 15 %),
- medzi obidvoma zložkami je určitá chemická afinita, nie však natoľko veľká, aby vznikla intermetalická zlúčenina.

Ak sú splnené všetky podmienky, vzniká substitučný tuhý roztok pri akomkoľvek obsahu rozpúšťanej zložky - **neohraničený tuhý roztok**. Ak niektorá z týchto podmienok je splnená len čiastočne, substitučný tuhý roztok vzniká iba do určitej koncentrácie - **ohraničený tuhý roztok**. Interstiticky sa rozpúšťajú prvky s výrazne menším atómovým priemerom ako má základná zložka. V oboch prípadoch tuhých roztokov je rozmiestnenie

atómov prídavného prvku v kryštálovej bunke náhodné. Takéto tuhé roztoky sú zároveň aj dobre tvárne. V špecifických prípadoch má tuhý roztok pravidelné usporiadanie častíc rozpúšťaného prvku a nazýva sa **usporiadaný tuhý roztok** (nadštruktúra, hyperštruktúra). Názov nadštruktúra vychádza z toho, že častice prídavného kovu tvoria vo vnútri tuhého roztoku zdanlivo vlastnú mriežku.

Intermediárne fázy, na rozdiel od tuhých roztokov, majú vlastný typ kryštalickej stavby (odlišný od zložiek). Medzi atómami sa zvyčajne uplatňuje vo veľkej miere kovalentná väzba. Z dôvodu odlišného druhu mediatómových väzieb a odlišného typu mriežky sa od zložiek, z ktorých vznikli, značne odlišujú mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami. Vznikajú pri určitom vzájomnom pomere (koncentracii) zložiek. Väčšinou ide o veľmi tvrdé a krehké fázy. Intermediárne fázy vznikajú pri určitom pomere zložiek, ktorý je možné vyjadriť stechiometrickým vzorcom (vo všeobecnosti A_mB_n).



Obr.1.17 Rozdiel v orientácii priestorových mriežok

a) monokryštál b) polykryštalická látka s polyedrickou štruktúrou

Existuje viacero druhov intermediárnych fáz, z ktorých najdôležitejšie sú chemické, interstitické a elektrónové zlúčeniny. Čisté kovy alebo zliatiny môžu mať istý makroobjem, vytvorený len jediným kryštálom (rovnaké ukladanie rovnako orientovaných štruktúrnych mriežok) - hovoríme, že máme monokryštál, obr.1.17a. Monokryštály vznikajú pri ideálnych podmienkach ochladzovania (veľmi malou rýchlosťou). Keď však makroobjem kovu alebo zliatiny je vytvorený väčším množstvom drobných kryštálov (zrná) s rozličnou kryštalografickou orientáciou, hovoríme, že máme polykryštalickú látku (obr.1.17b), ktorú charakterizuje dôležitá veličina, tzv. rozmer zrna. Reálne kovy a zliatiny sú polykryštalické. Zrná vznikajú v procese kryštalizácie kovov, pri reálnych

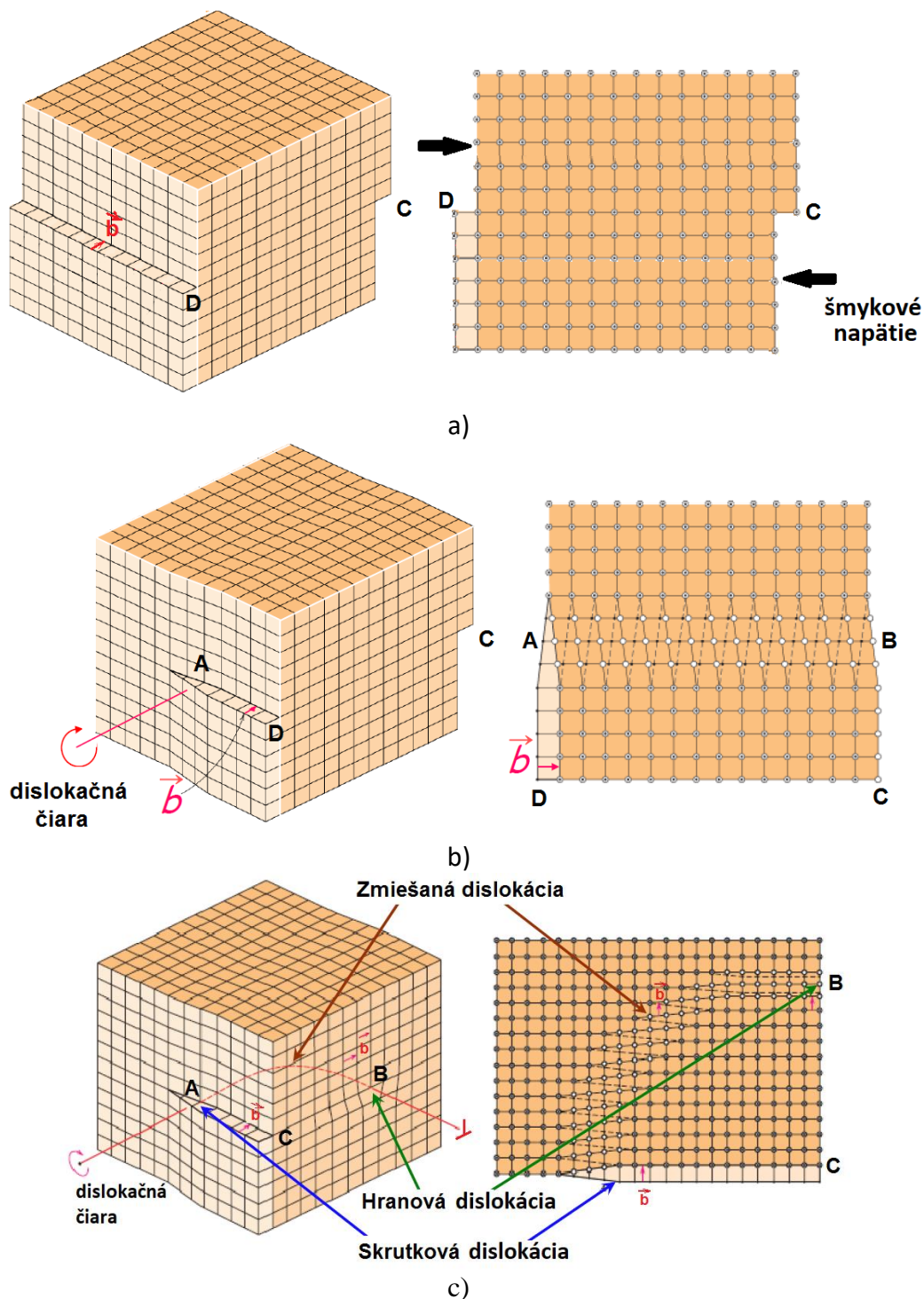
podmienkach ochladzovania.

1.2.4 Vznik a pohyb dislokácií

Reálne technické kovy sa používajú väčšinou ako zliatiny s inými kovmi aj nekovmi ako zmesi, chemické zlúčeniny a tuhé roztoky. Mriežkové poruchy vznikajú metalurgiou prípravy a technológiou spracovania kovov a zliatin.

V okolí každej dislokácie je mechanická napätosť. Voľné dislokácie v ideálnych kryštáloch sú ľahko pohyblivé, nakoľko stačí prekonať už prítomnú deformačnú elastickú energiu a pridať iba energiu na pohyb kryštálom. To znamená, že na pohyb dislokácie je potrebná elementárna sila - napätie na odpútanie sa dislokácie z elastického poľa a na vlastný pohyb. Všetko čo prekáža pohybu dislokácii zvyšuje napätie na pohyb. Voľné dislokácie sa v kryštáli pohybujú:

1) sklzom - pohyb dislokácie sklzom v kryštáli sa uskutočňuje v dislokačnej (sklzovej) rovine v smere Burgersovho vektora pri hranových a prevažne kolmo naň pri skrutkovej dislokácii obr.1.18. Burgersov vektor \mathbf{b} je uzatvárací vektor Burgersovej slučky, ktorý spája bod S, odkiaľ sme začali ukladať určitý počet vektorov okolo čiarovej poruchy a koncový bod F posledného vektora, obr.1.19. Pohyb dislokácií (rozhraní) je základom plastickej deformácie kovov.

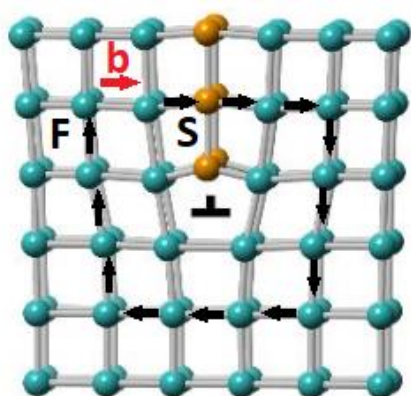


Obr.1.18 Sklz vyvolaný pohybom
a) hranovej dislokácie b) skrutkovej dislokácie c) zmiešaná

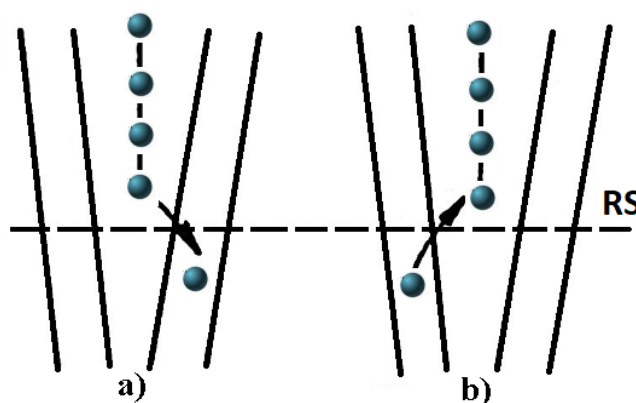
Pri pohybe dislokácie sklzom sa šíri kryštálom rovnaká konfigurácia, pričom porucha vystúpi na povrch kryštálu a zanechá tam stopu (b) - posun atómov o parameter mriežky, alebo jeho násobok.

2) difúziou - pohyb dislokácie difúziou v kryštáli sa uskutočňuje difúziou vakancií alebo medziuzlových atómov (interstícií).

Pohyb hranovej dislokácie difúziou je vlastne „lezenie“ nadbytočnej roviny **v** odpútaním (úbytok roviny) alebo pridávaním (rast roviny) vakancií, obr.1.20. Pohyb skrutkovej dislokácie difúziou je nemožný lebo táto sa môže pohybovať iba sklzom.



Obr.1.19 Burgersova slučka okolo čiarovej poruchy, Burgersov vektor



Obr.1.20 Difúzny pohyb hranovej dislokácie – šplh,
RS – rovina sklzu
a) intersticiálny atóm vzniká
b) intersticiálny atóm zaniká

1.2.5 Difúzia v kovoch a zliatinách

Častice (atómy, ióny) sa môžu za určitých podmienok, hlavne pri zvýšenej teplote, premiestňovať v látkach. Pohyb atómov v tuhom stave sa nazýva **difúzia**. Difúzia je jedným zo spôsobov prenosu hmoty, pri ktorom sa ich častice (atómy, ióny, molekuly) aj vakancie pohybujú vzhľadom k susedným časticiam.

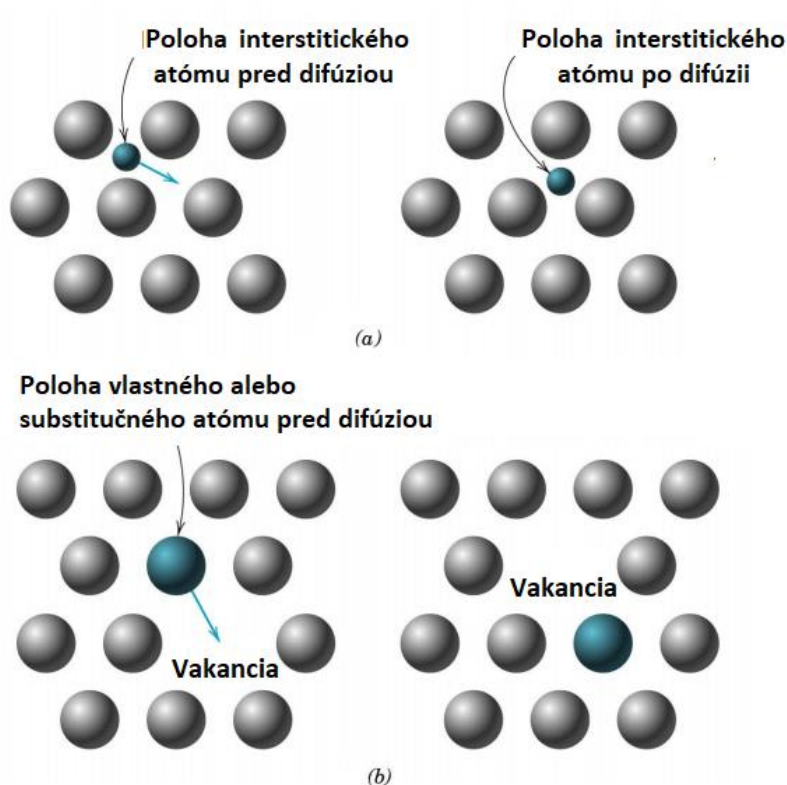
Pretože podstatou difúzie je tepelný pohyb častíc hmoty, je intenzita difúzie výrazne závislá od teploty. K difúzii dochádza v každom skupenstve, v tuhej fáze je však jediným spôsobom prenosu hmoty. Difúziou sa spravidla znižujú koncentračné rozdiely. Difúzia v jednodložkovej sústave alebo fáze sa nazýva **autodifúzia**.

Mechanizmy difúzie v kryštalických materiáloch môžeme rozdeliť na:

- individuálne, pri ktorých sa pohybuje (migruje) jedna častica alebo vakancia nezávisle na ostatných,
- skupinové, ktoré charakterizuje koordinovaný pohyb viacerých častíc.

K individuálnym mechanizmom patrí mechanizmus interstitický (obr.1.21a) a mechanizmus vakančný (obr.1.21b), pre ktoré je určujúci pomer veľkostí atómov difundujúceho a základného prvku. Iba malé atómy môžu difundovať voľnými priestormi v kryštálovej mriežke základného prvku, t.j. interstitickým mechanizmom (napr. v zliatinách železa prvky od vodíku až po kyslík). Interstitický mechanizmus má najmenšiu aktivačnú energiu.

Vakančným mechanizmom, pri ktorom atómy využívajú k svojmu premiestneniu blízke vakancie, difundujú atómy pri samodifúzii a atómy prídavného prvku tvoriace so základným prvkom substitučné tuhé roztoky. Aktivačná energia vakančného mechanizmu je vyššia ako u interstitického.

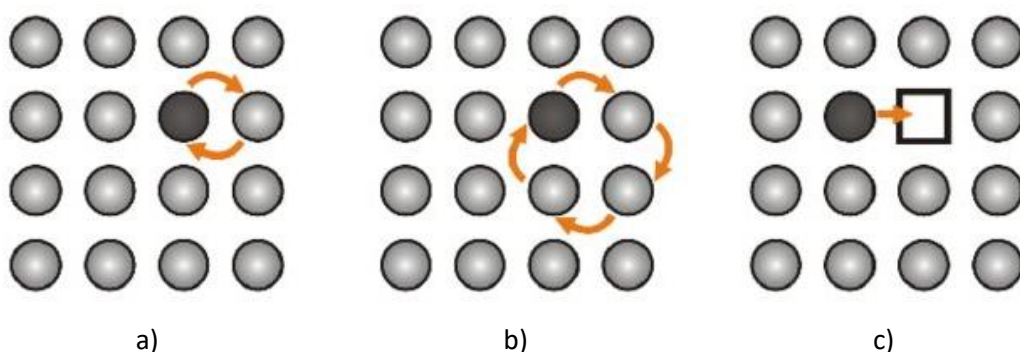


Obr.1.21 Individuálne mechanizmy difúzie v kryštalickej mriežke:

a) interstitický b) vakančný

Medzi skupinové mechanizmy patria mechanizmus *výmenný* (obr.1.22a), *kruhový* (obr.1.22b) a *nepriamy interstitický* (obr.1.22c). Pravdepodobnosť výskytu výmenného mechanizmu je malá, nakoľko je tento mimoriadne energeticky náročný. Naproti tomu je kruhový mechanizmus v porovnaní s vakančným náročnejší len asi o tretinu.

Difúziu pri polykryštalických kovoch a zliatinách uľahčujú hranice zŕn, pretože v týchto miestach je najviac porušené usporiadanie atómov. Väčšia hustota porúch urýchľuje difúzne pochody, preto v rovnakom materiáli pri rovnakej teplote prebieha difúzia rýchlejšie vtedy, ak je jemnozrnnejší. Difúziu urýchľujú aj povrchové javy, pretože na povrchu súčastok je väzba atómov slabšia.



Obr.1.22 Skupinové mechanizmy difúzie v kryštalickej mriežke
a) výmenný b) kruhový c) nepriamy interstitický

Technický význam difúzie spočíva ako v prospešných, tak aj v škodlivých zmenách koncentrácie a vo fázových či štruktúrnych premenách buď iba v povrchových vrstvách výrobkov alebo i v celom objeme. Prospešným príkladom koncentračných zmien je povrchové zvýšenie obsahu vybraných prvkov pri chemicko-tepelnom spracovaní konštrukčných ocelí, naproti tomu oduhličenie nástrojových ocelí pri ich spracovaní pri vysokých teplotách je škodlivé.

1.3 PLASTICKÁ DEFORMÁCIA MATERIÁLOV A JEJ MECHANIZMY

Veľmi dôležitou vlastnosťou materiálov je ich odpor proti pretvoreniu, t.j. proti pôsobeniu vonkajších síl. Materiál buď mení svoj tvar (deformuje sa) alebo pri dostatočnej veľkosti pôsobiacich síl sa poruší lomom. Proti vonkajším silám pôsobia vnútorné sily, ktoré bránia pretvoreniu. [1,4,7]

Pôsobenie vonkajších síl spôsobí v materiáli napätosť, ktorá sa prejaví určitým rozložením mechanického napätia (v závislosti od spôsobu zaťažovania, veľkosti a smeru pôsobiacej sily, tvaru a rozmerov zaťažovaného materiálu).

Napätie σ je definované ako sila F pôsobiaca na jednotku plochy S zaťažovaného prierezu materiálu v danom okamihu zaťažovania:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} = \text{MPa}] \quad (2.1)$$

Normálové napätie σ_α má smer kolmý k uvažovanej ploche, *tangenciálne (šmykové) napätie τ_α* pôsobí v uvažovanej ploche, pre ktoré platí, obr.1.23:

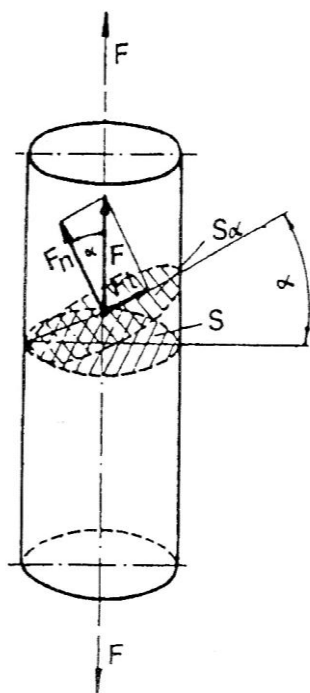
$$\sigma_\alpha = \frac{F_n}{S_\alpha} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2) \quad \alpha = \frac{F_t}{S_\alpha} \quad [\text{MPa}] \quad (2.3)$$

Napätia σ_α a τ_α predstavujú skutočné napätia v zaťažovanom priereze. V priebehu zaťažovania sa však veľkosť plochy prierezu mení a je obtiažne merateľná. Používa sa preto tzv. zmluvné napätie R vzťahované na počiatočný prierez telesa S_0 :

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2.4)$$

kde F je pôsobiaca sila a S_0 je pôvodný (nezaťažovaný) prierez.

Deformácia je zmena tvaru a rozmerov telesa pôsobením vonkajších síl. Deformácia môže byť pružná a plastická.

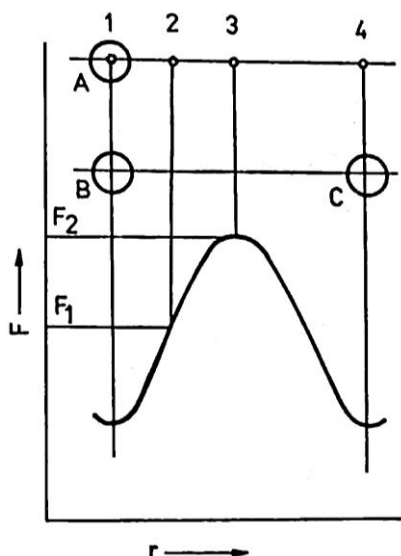


Obr.1.23 Teleso namáhané ťahovou silou

Pružná (elastická) deformácia nastáva vtedy, keď vonkajšie sily vyvolávajú len vychýlenie atómov mriežky z ich rovnovážnych polôh. Po odstránení vonkajších síl (keď napätie neprekročilo fyzikálnu medzu pružnosti R_E) sa môžu atómy vrátiť do svojich pôvodných polôh a teleso nadobudne pôvodný tvar. V tomto intervale napätí platí Hookov zákon – lineárna závislosť deformácie na napätí.

Trvalá (plastická) deformácia vyvoláva nevratné zmeny tvaru a teda atómy, ktoré boli vysunuté zo svojich rovnovážnych polôh viac ako o mriežkový parameter, sa nevrátia do pôvodných polôh - nevratná zmena tvaru telesa. Plastická deformácia je premiestňovanie atómov kryštálu na krátku vzdialenosť mechanizmom sklzu alebo dvojčatením, pri rešpektovaní vlastností kryštálovej štruktúry. Vlastnosti kryštálovej štruktúry určuje periodické alebo neperiodické usporiadanie atómov. Pri periodickom usporiadaní sú atómy rozmiestnené rovnovážne v priestorových mriežkach, ktoré určujú fyzikálne vlastnosti ideálnych kovov. Pri neperiodickom usporiadaní sú atómy rozmiestnené nerovnovážne pri poruchách, ktoré určujú fyzikálne vlastnosti reálnych kovov.

1.3.1 Plastická deformácia monokryštálov



Obr.1.24. Schéma modelu sklzu a závislosť sily potrebnej pre sklz od veľkosti vychýlenia atómu r

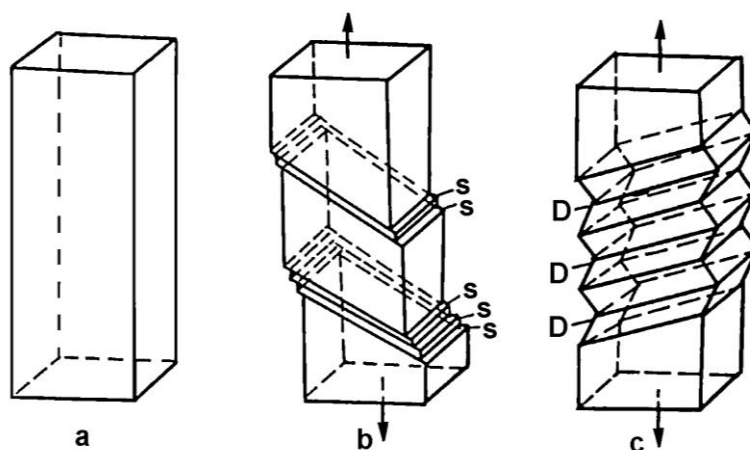
Zjednodušený princíp plastického pretvorenia materiálu presunutím (sklzm) jedného atómu vzhľadom k rovine tvorenej rovnakými atómami je znázornený na obr.1.24. Pri posuve atómu A z polohy 1 do polohy 2 je potrebné zvýšiť silu na hodnotu F_1 . Pri ďalšom vzdiaľovaní atómu A do polohy 3 sila musí rásť až na hodnotu F_2 . V tejto polohe je atóm A rovnako priťahovaný atómom B i atómom C, teda pri ďalšom posuve sa už znižuje potrebná sila až do polohy 4, kedy je atóm A v rovnovážnej polohe vzhľadom na atóm C, a teda s minimom potenciálnej energie. [1,3,4]

Prenesme úvahy na prípad sklzu jedného radu s n -atómami proti radu atómov s n -atómami. Zistili by sme, že rovnaký súčasný posuv celého radu

atómov bude vyžadovať n -krát vyššiu silu ako je F_2 . Táto úvaha nie je úplne presná, lebo sme zanedbali vzájomné pôsobenie atómov presúvaného radu a tiež ďalšie faktory. Z tohto modelu bolo určené, že najväčšie kritické šmykové napätie, potrebné na sklz radu atómov je $\tau_{krit} = G/2\pi$, kde G je modul pružnosti v šmyku.

Vysvetlenie rozporu podala až teória dislokácií, ktorá ukázala, že **plastická deformácia sa realizuje sklzom**, teda pohybom čiarových porúch - pohybom dislokácií. Rovina, v ktorej nastáva sklz sa nazýva sklzová rovina. Je to kryštalografická rovina najhustejšie obsadená atómami v kryštalickej mriežke. Smer sklzu je obvyčajne totožný s najhustejšie obsadeným smerom sústavy atómami. Z možných sklzových rovín a smerov sklzu v kryštalickej mriežke sa aktivujú tie, v ktorých sa dosiahne maximálne šmykové napätie. Počet aktívnych rovín sklzu v sústave závisí od typu kryštalickej mriežky materiálu, od teploty, chemického zloženia a predchádzajúceho stupňa deformácie. Pri vyšších teplotách sa aktivizujú i ďalšie sklzové roviny, čo vysvetľuje lepšiu tvárnosť materiálov za tepla.

Proces plastickej deformácie si teda predstavujeme ako hromadný pohyb v materiáli existujúcich i vznikajúcich dislokácií. Súbor sklzových rovín, kde sa realizoval sklz, vytvorí na povrchu kryštálu (kovu) charakteristické sklzové pásy (stupne), obr.1.25, ktoré sú viditeľné pri pozorovaní povrchu svetelným mikroskopom, obr.1.26. Niektoré materiály v určitých podmienkach (nízka teplota, veľká rýchlosť deformácie) môžu sa deformovať i tvorbou dvojčiat, prebieha **dvojčatenie**. Pri dvojčatení sa veľkou rýchlosťou preklopiť rady atómov v určitej oblasti o určitý uhol k smeru posuvu. Nová mriežka v zdvojenej časti kryštálu má vzhľadom na pôvodnú mriežku zrkadlovo súmernú orientáciu k určitej rovine, ktorú nazývame rovina dvojčatenia – D. Zmena tvaru monokryštálu pri deformácii sklzom a dvojčatením je rozdielna. Deformačné spevnenie pri dvojčatení je podstatne menšie ako pri deformácii sklzom.



Obr.1.25 Schéma deformácie monokryštálu: a – pred deformáciou, b – po deformácii sklzom, c – po deformácii dvojčatením (S – roviny sklzu, D – roviny dvojčatenia)

Plastická deformácia kryštálu začína vtedy, keď priložené vonkajšie sily vyvolajú napätie, ktoré uvedie do pohybu všetky dislokácie schopné pohybu (dislokácie nezachytené

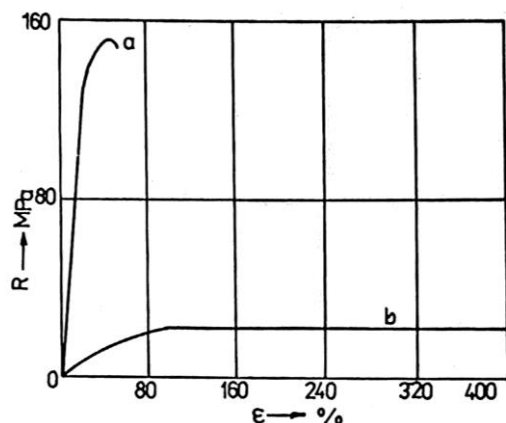
prekážkami alebo vzájomným prepletením) na vhodne orientovaných sklzových rovinách, kde bolo dosiahnuté $\tau_{krit.}$ Dislokácie prebehnú celým kryštálom a hromadia sa na jeho hraniciach pokiaľ sa nezachytia na prekážkach, alebo pokiaľ sa dislokácie, ktoré sa pohybovali po rôznych sklzových rovinách navzájom nezaplietli (nevytvorili zhuk). Na pokračovanie plastickej deformácie musíme potom vonkajšie napätie zvýšiť tak, aby sa dislokácie uvoľnili od prekážok, alebo aby sa uviedli do pohybu voľne dislokácie v iných, menej priaznivo orientovaných sklzových rovinách.

Počas plastickej deformácie sa však neuplatňujú len dislokácie prítomné v kryštáloch pred deformáciou, ale i dislokácie, ktoré vznikli počas deformácie z rôznych zdrojov dislokácií. Kov na pokračujúcu plastickú deformáciu teda vyžaduje zvyšovanie vonkajšieho napätia, materiál kladie väčší odpor proti pretváraniu, nastáva deformačné spevňovanie materiálu, pričom materiál postupne stráca možnosť plastickej deformácie - vyčerpávajú sa plastické vlastnosti materiálu a tento sa stáva krehkým.

1.3.2 Deformácia polykryštalického materiálu

Plastická deformácia polykryštalického materiálu je proces podstatne zložitejší ako deformácia monokryštálu. Rôzne orientácie zŕn a ich hranice výrazne vplývajú na proces sklzu. Niektoré zŕn polykryštalického materiálu majú veľmi výhodnú orientáciu vzhľadom k pôsobiacemu zaťaženiu, iné zasa veľmi nevýhodnú. Prvé sa budú deformovať i pri priložení malého zaťaženia, druhé až pri výrazne zvýšenom zaťažení.

Jednotlivé zŕn polykryštalickej látky nemôžu meniť svoj tvar ľubovoľne, ale len tak, ako im to susedné zŕn umožnia. Polykryštalické kovy s hexagonálnou mriežkou sa pred



Obr. 1.27 Závislosť veľkosti deformácie od napätia pre zinok: a – polykryštal, b - monokryštal

porušením lomom deformujú len málo (často len dvojčatením), pretože majú málo sklzových systémov. Kovy s kubickou plošne centrovanou mriežkou majú veľký počet sklzových rovin a smerov, čo vždy umožňuje nájsť vhodne orientované roviny, v ktorých sa realizuje sklz. Preto sú tieto kovy dobre tvarovateľné a tvárniteľné. Kovy s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou sú svojimi vlastnosťami medzi kovmi s hexagonálnou a kubickou plošne centrovanou mriežkou.

Hranica zŕn predstavuje výrazne nepravidelné usporiadanie atómov a vytvára neprekonateľné prekážky pre pohyb dislokácií. Potom polykryštalický kov kladie väčší odpor proti deformácii ako monokryštal, obr.1.27. Z obrázku vidíme, že deformácia pred porušením je pre polykryštalický materiál podstatne menšia ako pre monokryštal, pričom je

výrazný rozdiel i v pevnosti v prospech polykryštalického materiálu. Čím menší je rozmer zrna materiálu, tým má materiál lepšie komplex mechanických vlastností.

Charakter závislosti „napätie - deformácia“ závisí od predchádzajúceho tvárnenia, deformácie. Opakovaná deformácia (zaťaženie, odľahčenie a znovu zaťaženie) rovnakého druhu (ťah, ťah) zvyšuje odpor kovu proti deformácii (spevnenie), ale opakovaná deformácia nerovnakého druhu (ťah, tlak) odpor znižuje (zmäkčenie). Tento jav sa nazýva **Bauschingerov efekt**.

Plastickou deformáciou sa materiál spevňuje. Deformačné spevnenie sa prejaví vzrastom pevnosti, tvrdosti, medze klzu a znížením plastických vlastností materiálu. Mení sa tiež tvar zŕn ako aj iné vlastnosti materiálu, napr. elektrická vodivosť klesá, znižuje sa odolnosť proti korózii a pod. Keď tvárnenie prebieha stále v rovnakom smere (napr. valcovanie, preťahovanie), vzniká prednostná orientácia kryštalických mriežok v smere deformácie, vzniká **deformačná textúra**, obr.1.28a, ktorá má za následok výraznú anizotropiu vlastností materiálu – rôzne vlastnosti v rôznych smeroch vzhľadom na smer deformácie.

Pri tvárnení sa zvyšuje hustota mriežkových porúch, predovšetkým dislokácií, napr. z hodnoty 10^{12} m^{-2} na hodnoty asi 10^{16} m^{-2} , čo znamená okrem iného i významné zvýšenie voľnej entalpie sústavy.

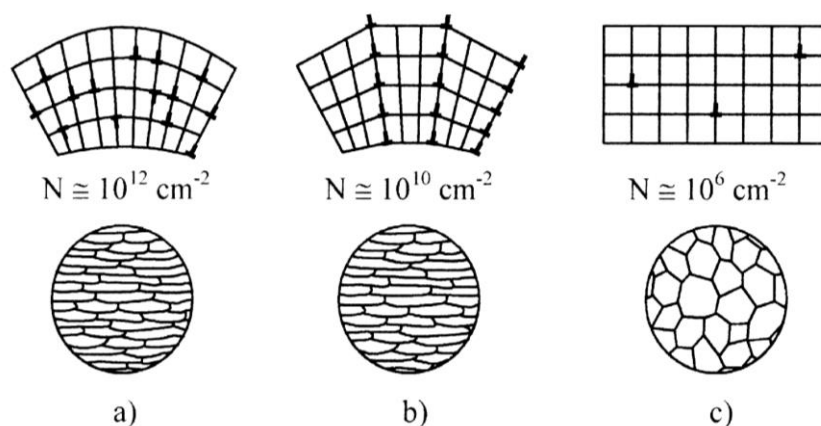
1.3.3 Zotavenie a rekryštalizácia

V priebehu plastickej deformácie sa zvýši voľná entalpia sústavy o vloženú deformačnú energiu. Kov je z termodynamického hľadiska menej stabilný. Ak deformačne spevnený kov žiame (ohrev na určitú teplotu a po určitý čas), dodávame sústave aktivačnú energiu. Postupne sa uvoľňuje uložená deformačná energia a znižuje sa voľná entalpia sústavy. Súbežne sa zmenia vlastnosti kovu. Pri ohreve na teploty $T < T_r$ (T_r - rekryštalizačná teplota) dochádza k zotaveniu mriežky, pri ohreve na teploty $T > T_r$ **prebieha** rekryštalizácia.

Zotavenie začína premiestňovaním a znižovaním počtu vakancií. S rastom teploty sa uvoľňujú a premiestňujú niektoré najmenej zachytené dislokácie. Dislokácie sa usporiadajú do pomerne pravidelných buniek, obr.1.28b. Zotavením sa dosiahne pôvodná hodnota elektrického odporu a znižujú sa štruktúrne napätia. Ďalšie vlastnosti, najmä mechanické, sa menia len málo. Deformačná textúra ostáva zachovaná.

Rekryštalizácia prebieha tak, že v energeticky najvýhodnejších miestach (miesta s najväčšou deformáciou) vznikajú aktívne rekryštalizačné zárodky nových zŕn bez znakov deformácie. Rekryštalizované zrná nahradia postupne deformovanú štruktúru v celom objeme materiálu. Rekryštalizácia sa od prekryštalizácie (zmeny modifikácie) odlišuje tým, že v jej priebehu vznikajú kryštály s nezmeneným typom mriežky. Veľkosť zrna po rekryštalizácii závisí od stupňa predchádzajúcej deformácie a od teploty rekryštalizácie. V kove, ktorý sa intenzívne tvárnil vzniká pri žíhaní veľké množstvo rekryštalizačných zárodkov a výsledkom je jemnozrnná štruktúra. Po malej deformácii nové zrná rastú iba z malého počtu zárodkov

a tým zrno výrazne rastie. Rekryštalizáciou sa získa nielen pôvodná (preddeformačná) štruktúra, obr.1.28c, ale aj pôvodné fyzikálne a mechanické vlastnosti.



Obr.1.28 Zmeny v usporiadaní dislokácií v mriežke, zmeny hustoty dislokácií N v mikroštruktúre pri žíhaní deformovaného materiálu: a – stav v deformovanom materiáli, b – stav po zotavení, c – stav po rekryštalizačnom žíhaní

Rekryštalizačná teplota T_r (v čistých kovoch je $T_r = (0,35 - 0,4) T_t$, kde T_t je teplota tavenia v K) je dôležitým kritériom na rozdelenie procesov tvárnenia (deformácie) z hľadiska teploty. Tvárnenie za studena sa uskutočňuje pri teplotách nižších ako je rekryštalizačná teplota, pričom nastáva spevňovanie a ďalšie zmeny vlastností. Tvárnenie za tepla prebieha pri vyšších teplotách ako rekryštalizačná teplota, preto ohrev na tvárniacu teplotu zabezpečuje bezprostrednú rekryštalizáciu po tvárnení a kov sa nespevňuje buď čiastočne alebo vôbec.

2 ZÁKLADY SKÚŠOBNÍCTVA MATERIÁLOV

Výber materiálu pre výrobu rôznych súčastí a zariadení je založený na znalosti mechanických, technologických, fyzikálnych i chemických vlastností materiálov. Pre vlastný výber materiálu však potrebujeme vyjadriť požadované vlastnosti číselne. Vyjadrenie vlastností materiálov číselnými hodnotami, materiálovými charakteristikami, je úlohou odboru nazývaného skúšanie materiálov. Materiálová charakteristika je teda číselná hodnota, ktorá kvantifikuje určitú vlastnosť a ktorá sa určuje experimentálne.

Vlastnosti materiálov sa najčastejšie rozdeľujú do týchto štyroch základných skupín:

- a) fyzikálne vlastnosti,
- b) chemické vlastnosti,
- c) mechanické vlastnosti,
- d) technologické vlastnosti.

Pre funkčné materiály sú dôležité predovšetkým ich fyzikálne (napr. merná hmotnosť, elektrická vodivosť) a chemické (napr. odolnosť voči korózii) vlastnosti. Pre materiály konštrukčné v prevádzke sú významné vlastnosti súvisiace s porušovaním povrchu súčiastok, t.j. ich odolnosť voči korózii a opotrebeniu. Zásadný význam pre aplikáciu konštrukčných materiálov majú ich mechanické vlastnosti (napr. pevnosť, tvrdosť). Vhodnosť použitia daného materiálu pre danú technológiu spracovania charakterizujú technologické vlastnosti (zvariteľnosť, tvárnosť, zlievateľnosť, obrobiteľnosť).

Fyzikálne vlastnosti materiálov sú priamym prejavom vnútornej stavby materiálu bez pôsobenia vonkajšieho mechanického namáhania. Medzi základné fyzikálne vlastnosti patrí:

- elektrická vodivosť (schopnosť viesť elektrický prúd – pohyb nosičov elektrického náboja),
- elektrická supravodivosť (pri teplote v blízkosti absolútnej nuly sa merný elektrický odpor znižuje skokom na veľmi nízku, takmer nulovú hodnotu),
- tepelná vodivosť (schopnosť prenášať tepelnú energiu),
- pružno-tepelné vlastnosti (teplotná rozťažnosť - zmena rozmerov s teplotou, merná tepelná kapacita - množstvo tepla potrebné na zohriatie jednotkového množstva hmoty o 1 K, teplota tavenia - realizuje sa pri nej reverzibilná zmena tuhého skupenstva na kvapalné, modul pružnosti - vyjadruje vzťah medzi napätím a deformáciou v oblasti pružných deformácií),
- magnetické vlastnosti (diamagnetizmus - látka je magnetická, iba ak sa nachádza v magnetickom poli magnetu, paramagnetizmus - materiál sa navonok javí ako nemagnetický, feromagnetizmus - materiál sa ľahko zmagnetizuje),
- hustota (hmotnosť objemovej jednotky homogénnej látky pri určitej teplote),
- akustické vlastnosti (šírenie zvukových vln v materiáli a vnútorné tlmenie materiálu),
- termoelektrické vlastnosti (schopnosť indukovať elektrické napätie pri rozdieli teplôt na jeho koncoch),

- optické vlastnosti (odrazivosť, index lomu pre transparentné materiály, priehľadnosť).

Chemické vlastnosti materiálov - medzi chemické vlastnosti možno zaradiť napríklad:

- hygroskopia (schopnosť materiálov pohlcovať vlhkosť),
- povrchová energia (rozdiel vnútornej potenciálnej energie stavebnej častice na povrchu a vo vnútri materiálu) a povrchové napätie (energia potrebná na vznik nového povrchu),
- korózna odolnosť (odolnosť materiálu v rôznych korózných prostrediach).

Mechanické vlastnosti materiálov sú určované pri pôsobení vonkajších síl a ich hodnoty súvisia s kryštálovou štruktúrou a poruchovosťou materiálov.

Medzi základné mechanické vlastnosti možno zaradiť:

- pevnosť - schopnosť materiálu zachovať si celistvosť pri pôsobení vonkajších síl,
- pružnosť - schopnosť materiálu elasticky sa deformovať,
- plasticita - schopnosť materiálu plasticky sa deformovať,
- húževnatosť - práca potrebná na porušenie materiálu, vyjadruje mieru odporu proti krehkému porušeniu materiálu.

Medzi odvodené vlastnosti patrí:

- tvrdosť - miera odporu materiálu proti vnikaniu telesa definovaného tvaru, ktorý sa vtláča do povrchu materiálu spravidla statickým zaťažením,
- pevnosť pri nízkych teplotách,
- odolnosť proti únave – schopnosť materiálu odolávať cyklickému namáhaniu,
- odolnosť proti tečeniu – schopnosť materiálu znášať zaťaženie pri vysokých teplotách.

Technologické vlastnosti materiálov určujú vhodnosť materiálu na určité technologické operácie a spresňujú technologické podmienky spracovania. V porovnaní s fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami sú rozdielne v tom, že sa nezisťujú ich hodnoty v presne definovaných základných veličinách, ale zvyčajne len porovnávacie hodnoty vhodných veličín. Podmienky technologických skúšok sa približujú reálnym podmienkam spracovania materiálu a výrobným technológiám.

Medzi základné technologické vlastnosti materiálov patria:

- zlievateľnosť - vhodnosť materiálu na výrobu tvarových súčiastok odlievaním,
- tváriteľnosť za tepla a za studena - schopnosť materiálu dosiahnuť veľkú plastickú deformáciu bez porušenia celistvosti nad a pod teplotou rekryštalizácie,
- zvariteľnosť - schopnosť materiálu vytvoriť za určitých technologických podmienok a konštrukčnom riešení zvarový spoj požadovanej kvality,
- spájkovateľnosť - určuje vhodnosť materiálu na spájkovanie,
- obrobiteľnosť - vhodnosť materiálu na trieskové obrábanie.

2.1 Hodnotenie mechanických vlastností materiálov

Mechanické vlastnosti materiálov hodnotíme pomocou **mechanických skúšok**, ktorými získavame pre skúšaný materiál charakteristiky (mechanické vlastnosti), ktoré sú podkladom pre pevnostný výpočet strojných súčastí a overenie ich vhodnosti k ďalšiemu spracovaniu. Tvar a rozmery skúšobných vzoriek, postup pri realizácii skúšky, požiadavky na skúšobné zariadenia ako aj ďalšie podmienky skúšok sú predpísané normami.

Skutočný materiál nie je dokonale homogénny (napr. anizotropia materiálu, textúra a pod.), výsledky skúšok preto výrazne závisia od miesta a spôsobu odberu skúšobných vzoriek. Vzorky z daného materiálu je preto potrebné odobrať tak, aby žiaducim spôsobom charakterizovali skúmané vlastnosti materiálu. Pri odbere vzoriek nie je dovolené ovplyvnenie skúšanej vlastnosti (napr. tepelným ovplyvnením pri odrezávaní vzorky a pod.). Miesta odberu definujú normy, v opačnom prípade je potrebné tieto miesta zreteľne vyznačiť.

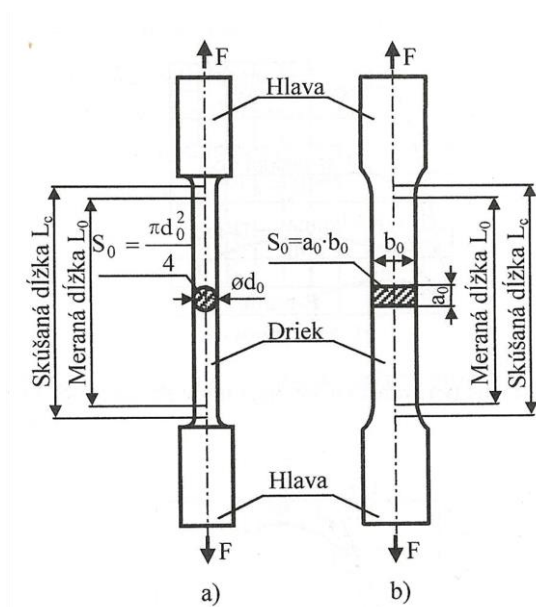
Mechanické skúšky rozdeľujeme:

1. podľa charakteru vonkajšej pôsobiacej sily na vzorky:
 - **statické skúšky** – určujú chovanie materiálu pri pôsobení kludných spojitých síl, zaťažovanie sa v priebehu skúšky pôsobí od nuly, zväčšuje sa pomaly, bez rázov. Získané výsledky statických skúšok sa bežne využívajú v technickej praxi, napr. na dimenzovanie, hodnotenie únosnosti, pevnostné výpočty súčiastok a konštrukcií, na výpočet tvárniacich síl pri valcovaní, kovaní, redukcii prierezu a pri ťahaní drôtov, plechov a pod.
 - **dynamické skúšky** – charakterizujú chovanie sa materiálu pri pôsobení rázového alebo cyklického zaťažovania.
2. podľa teploty počas zaťažovania vzoriek:
 - pri nízkych (kryogénnych) teplotách,
 - obvyklých teplotách (pri teplote miestnosti),
 - pri vysokých teplotách.

2.1.1 Statická skúška ťahom (STN EN ISO 6892-1)

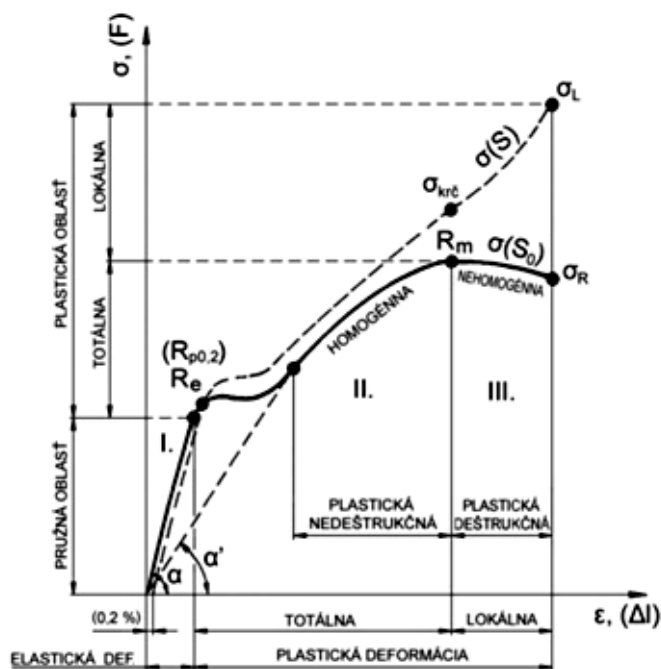
Patrí medzi najrozšírenejšie statické mechanické skúšky materiálov a to hlavne pre svoju jednoduchosť a množstvo výsledkov, ktoré poskytuje. Princíp skúšky spočíva v statickom zaťažovaní skúšobnej tyče predpísaných tvarov a rozmerov. Vzorka je upnutá do čelustí skúšobného stroja tak, aby sa os vzorky zhodovala s osou pôsobiacej sily, obr.2.1. Pre ťahovú skúšku sa používajú tzv. trhacie stroje, ktoré sú koncipované na mechanickom alebo hydraulickom princípe. Musia byť vybavené zariadením na meranie zaťažujúcej sily, na meranie deformácie a záznamovým zariadením závislosti deformácie od zaťažujúcej sily.

Sila F postupne plynulo vzrastá až do porušenia vzorky, pričom sa skúšobná tyč predlžuje. V prvej fáze sa tyč predlžuje pružne a predĺženie je priamo úmerné sile F . V ďalšej fáze sa tyč predlžuje plasticky – nevratne. V bode m sa na tyči prejaví výrazné zúženie priemeru tyče a vytvorí sa zúžené miesto tzv. krčok, ktorý sa predlžuje až dôjde k pretrhnutiu skúšobnej tyče. Celkové predĺženie tyče pri pretrhnutí sa potom rovná súčtu elastického predĺženia a plastického predĺženia.



Obr.2.1 Skúšobné tyče pre statickú skúšku ťahom: a – skúšobná tyč kruhového prierezu, b – plochá skúšobná tyč obdĺžnikového prierezu

Počas skúšky sa zaznamenáva závislosť predĺženia skúšobnej tyče od pôsobiaceho zaťaženia, tzv. ťahový diagram, ktorý je registrovaný skúšobným strojom. Pracovný diagram skúšky ťahom znázorňuje priebeh odporu skúšaného materiálu vyjadrený napätím R [MPa] proti jeho deformácii ϵ [%] a porušeniu, obr.2.2. Skúšobný stroj zaznamenáva pracovný diagram skúšky ťahom v súradniciach: zaťaženie F [N] – absolútne predĺženie meranej dĺžky Δl [mm]. Priebeh krivky F - Δl je totožný s priebehom krivky R - ϵ .



Obr.2.2 Pracovný diagram skúšky ťahom
 $\sigma(S_0)$ - konvenčná závislosť, $\sigma(S)$ - skutočná závislosť

Z ťahového diagramu je možné určiť materiálové charakteristiky ako napr.:

Medza klzu R_e – je napätie, pri ktorom sa materiál plasticke (trvalo) deformuje bez prírastku zaťaženia, ak materiál vykazuje klzový jav.

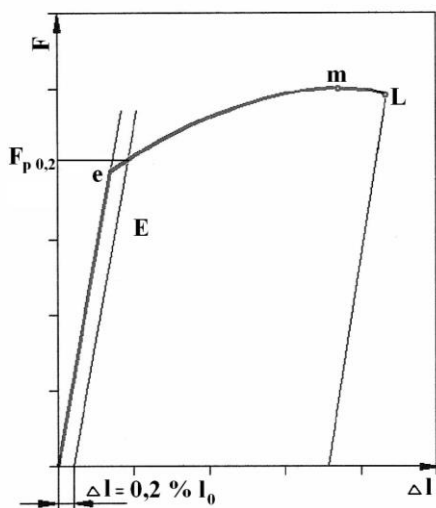
Dohovorená medza klzu $R_{p0,2}$ - napätie, pri ktorom plasticke deformácie dosiahne predpísanú hodnotu vyjadrenú v percentách začiatkovej meranej dĺžky. Vyjadruje sa symbolom doplneným indexom, ktorý označuje hodnotu plastickej deformácie napr. 0,2 % ($R_{p0,2}$). Stanovuje sa z ťahového diagramu pomocou priamky rovnobežnej s lineárnou časťou diagramu vo vzdialenosti, ktorá zodpovedá predpísanej hodnote plastickej deformácie. Priesečník, v ktorom priamka pretína krivku, udáva zaťaženie zodpovedajúce požadovanej dohovorenej medzi klzu, obr.2.3. Dohovorená medza klzu sa vypočíta ako pomer tohto zaťaženia k ploche začiatkového priečného prierezu skúšobnej tyče S_0 .

Pevnosť v ťahu R_m – je zmluvné napätie, zodpovedajúce najväčšiemu zaťaženiu F_m .

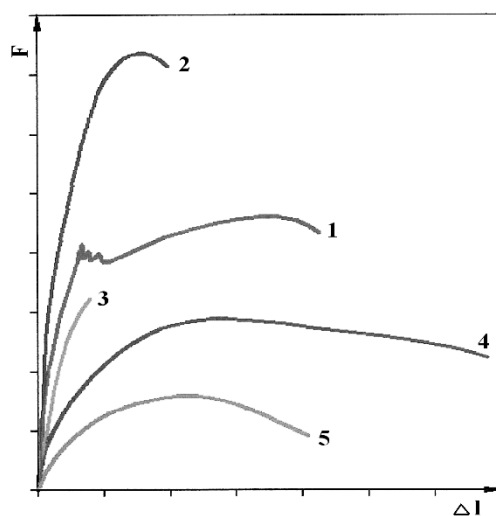
Ťažnosť A – je to trvalé predĺženie meranej dĺžky po roztrhnutí vyjadrené v percentách začiatkovej meranej dĺžky.

Zúženie Z – je to najväčšia zmena priečného prierezu po roztrhnutí skúšobnej tyče vyjadrená v percentách začiatkového priečného prierezu.

Každý materiál a jeho stav má charakteristický tvar diagramu skúšky ťahom. Základné typy ťahových diagramov pre rôzne materiály sú na obr.2.4.



Obr.2.3 Princíp výpočtu $R_{p0,2}$



Obr.2.4 Základné typy ťahových diagramov:

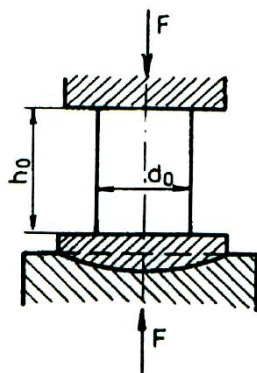
1-mäkká oceľ, 2-tvrdá oceľ, 3-sivá liatina,
4-tvárne materiály (Cu), 5-tvárne materiály (Al)

2.1.2 Statická skúška tlakom

Skúšobným telesom je spravidla valček. Skúšobné teleso sa položí medzi dve podložky, z ktorých jedna je uložená v sedle, obr.2.5. Sedlo zaisťuje zaťaženie v osi valčeka. Pri skúške sa zaznamenáva tlaková sila v závislosti od veľkosti stlačenia výšky valčeka.

Tlakovou skúškou sa hodnotí pevnosť v tlaku hlavne krehkých materiálov – liatina s lupienkovým grafitom, stavebné materiály a pod., t.j. materiálov, ktoré slúžia pre výrobu súčiastok a konštrukcií namáhaných v prevádzke tlakovým zaťažovaním.

Pre hodnotenie mechanických vlastností tvárných materiálov sa bežne používa skúška ťahom. Tlaková skúška u týchto materiálov má však veľký význam pre hodnotenie objemovej tvárnosti. Podobne ako u skúšky ťahom i v prípade tlakovej skúšky sa zisťuje závislosť skutočného napätia na skutočnej tlakovej deformácii.

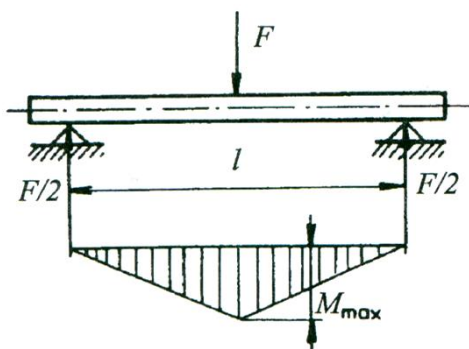


Obr.2.5 Schéma zaťažovania skúšobného telesa tvaru valčeka pri skúške tlakom

2.1.3 Statická skúška ohybom

Vykonáva sa prevažne na krehkých materiáloch, najmä pri sivej liatine, konštrukčnej keramike a pod., nakoľko pri húževnatých materiáloch porušenie skúšobnej vzorky nenastane.

Pri skúške sa skúšobná tyč obdĺžnikového alebo kruhového prierezu položí na dve opory, (spravidla valčeky), obr.2.6. Skúšobný stroj pracuje v režime tlakového zaťažovania. Hornú časť prípravku pre ohybovú skúšku tvorí jeden trň, ktorý pôsobí silou v prostriedku skúšobnej tyče – skúška trojbodovým ohybom, alebo dva trne umiestnené symetricky vzhľadom k stredu tyče - skúška štvorbodovým ohybom. Účelom skúšky je získať závislosť sila – priehyb tyče. Priehyb sa meria snímačom premiestnenie stredu tyče vzhľadom k najbližším oporám.



Obr.2.6 Schéma skúšky trojbodovým ohybom

Pri priehybe nie je napätie v priereze tyče konštantné, ale mení sa. Na povrchu vzorky proti zaťažovaciemu trŕňu pôsobí maximálne ťahové napätie. Smerom ku stredu tyče napätie klesá na nulovú hodnotu a ďalej nadobúda záporné hodnoty, t.j. je tlakové.

Skúšky ohybom tvárných materiálov využívajú väčšinou technológovia k odhaleniu existencie povrchových trhlín v okolí zvaru, k zisťovaniu medznej deformácie pri ohýbaní plechov a pod.

2.1.4 Skúšky tvrdosti

Tvrdosť ako jedna z mechanických vlastností má hlavne u kovových materiálov mimoriadnu dôležitosť. **Tvrdosť materiálu** je odpor proti deformácii jeho povrchu vyvolanej pôsobením geometricky definovaného telesa.

Podľa rýchlosti zaťaženia možno skúšky tvrdosti rozdeliť *na statické a dynamické*. Princípom týchto skúšok je posudzovanie tvrdosti materiálu podľa jeho odporu proti deformácii povrchu vyvolaného mechanickým účinkom tvrdšieho telesa (indentora) stanovených rozmerov.

Na meranie tvrdosti sa vyvinulo veľa skúšobných metód, ktoré podľa princípu je možné rozdeliť *na metódy vtlačacie, vrypové, odrazové a kyvadlové*.

Tvrdosť materiálu sa v technickej praxi meria najmä **vtlačacími skúškami**, u ktorých je merítkom tvrdosti veľkosť plastickej deformácie (metódy Brinell, Vickers, Knoop), alebo metódy, u ktorých je merítkom tvrdosti veľkosť elasticko-plastickej deformácie (metódy Rockwell). Vtláčacie telieska sú obvykle jednoduchého geometrického tvaru (guľa, kužeľ, ihlan) alebo tvaru, ktorý sa týmto tvarom približuje – napr. kužeľ s malým zaoblením vrcholu u niektorých metód Rockwell. Zvolením týchto tvarov sa sledovala jednoduchosť a reprodukovateľnosť ich výroby, optimálne využitie vlastností materiálu vtláčacieho telieska (napr. tvar vnikajúceho telieska Vickers rešpektuje tvar kryštálu diamantu a tak i jeho maximálnu tvrdosť. Voľbou tvaru kužeľa a ihlanu sa sledovala možnosť stanovovania tvrdosti nezávisle od veľkosti použitej sily (podobnosť vtlačkov).

Tvrdosť u vtlačacích metód je definovaná ako pomer medzi použitým zaťažením a plochou vtlačku (metódy Brinell, Vickers), alebo pomerom medzi použitým zaťažením a plochou priemetu vtlačku (Knoop). Pri metódach Rockwell je tvrdosť určovaná priamo z trvalej hĺbky vtlačku. K ďalším skúškam patrí dynamická skúška pomocou Poldi kladivka, skúšky mikrotvrdosti a dynamická Shoreho metóda, ktorá patrí medzi dynamicko – elastické skúšky. Jedná sa o skúšku odrazom skúšobného telesa (gulička, diamantový hrot) a zisťuje sa výška jeho odskoku od meranej plochy.

Skúška tvrdosti podľa Brinella (STN EN ISO 6506-1) - princíp skúšky spočíva vo vtláčaní guľôčky o priemere D do povrchu skúšaného materiálu pôsobením konštantnej sily F [N], čím vznikne vtlačok s plochou povrchu S [mm²], obr.2.7a. Tvrdosť sa definuje ako pomer F/S .

Označenie tvrdosti podľa Brinella:

Výsledok merania tvrdosti podľa Brinella sa označuje písmenami HBW (kde W označuje guľôčku zo spekaného karbidu), resp. HBS (kde S označuje guľôčku z kalenej ocele), nasleduje index, ktorý charakterizuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí: priemer guľôčky [mm], veľkosť skúšobného zaťaženia [kp], čas pôsobenia skúšobného zaťaženia [s], ak sa líši od stanoveného času (stanovený čas od začiatku zaťaženia do jeho plnej hodnoty nesmie byť menší ako 2 s a väčší ako 8 s, čas plného zaťaženia je potom od 10 do 15 s). Čas pôsobenia zaťaženia sa volí podľa druhu skúšaného materiálu.

Príklad: 350 HBW 5/750 je označenie pre tvrdosť podľa Brinella s hodnotou 350 stanovenou guľôčkou zo spekaného karbidu (W) s priemerom 5 mm pri skúšobnom zaťažení 7,355 kN a časom zaťaženia od 10 s do 15 s.

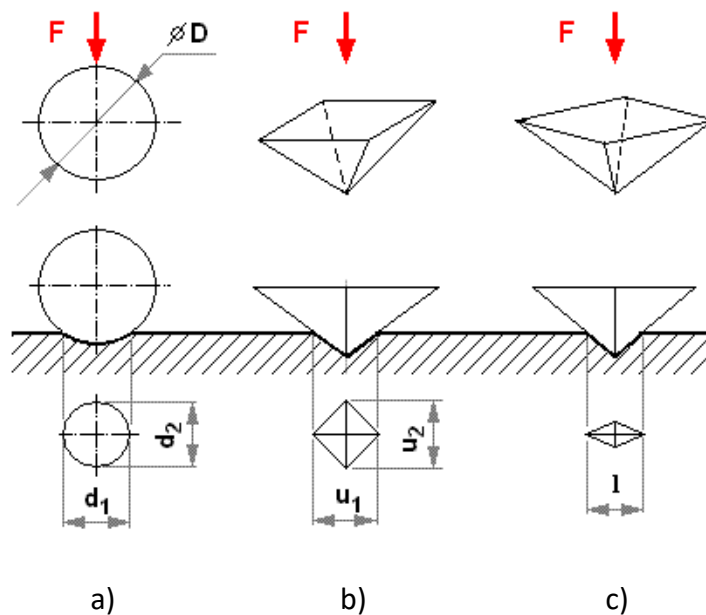
Skúška tvrdosti podľa Vickersa (STN EN ISO 6507-1) - do povrchu skúšaného materiálu sa vtláča indentor (štvorboký ihlan) z diamantu zaťažujúcou silou F . Po odľahčení sa zmerajú uhlopriečky u_1 a u_2 a vypočíta sa stredná hodnota u , obr.2.7b. Tvrdosť podľa Vickersa je daná podielom zaťažujúcej sily F a povrchu vtlačku A .

Označenie tvrdosti podľa Vickersa:

Výsledok merania tvrdosti podľa Vickersa sa označuje písmenami HV a indexom, ktorý charakterizuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí: veľkosť skúšobného zaťaženia [kp], čas pôsobenia skúšobného zaťaženia [s], ak sa líši od stanoveného času (stanovený čas od začiatku zaťaženia do jeho plnej hodnoty nesmie byť menší ako 2 s a väčší ako 8 s, čas plného zaťaženia je potom od 10 do 15 s).

Príklad: 185 HV 30 je označenie pre tvrdosť podľa Vickersa s hodnotou 185, stanovenou skúšobným zaťažením 294,2 N a časom zaťaženia od 10 s do 15 s.

Skúška tvrdosti podľa Knoop (STN EN ISO 4545) – metóda je určená pre meranie veľmi tenkých (napr. nitridovaných) vrstiev, nakoľko pri tejto metóde je pomer dĺžky uhlopriečky k hĺbke vtlačku 30 (napr. u metódy Vickers je 7). Metóda je založená na vtláčaní diamantového štvorbokého ihlanu do skúšaného materiálu definovanou silou. Vtlačok má tvar kosoštvorca a na rozdiel od metódy Vickers sa meria iba dlhšia uhlopriečka, obr.2.7c.

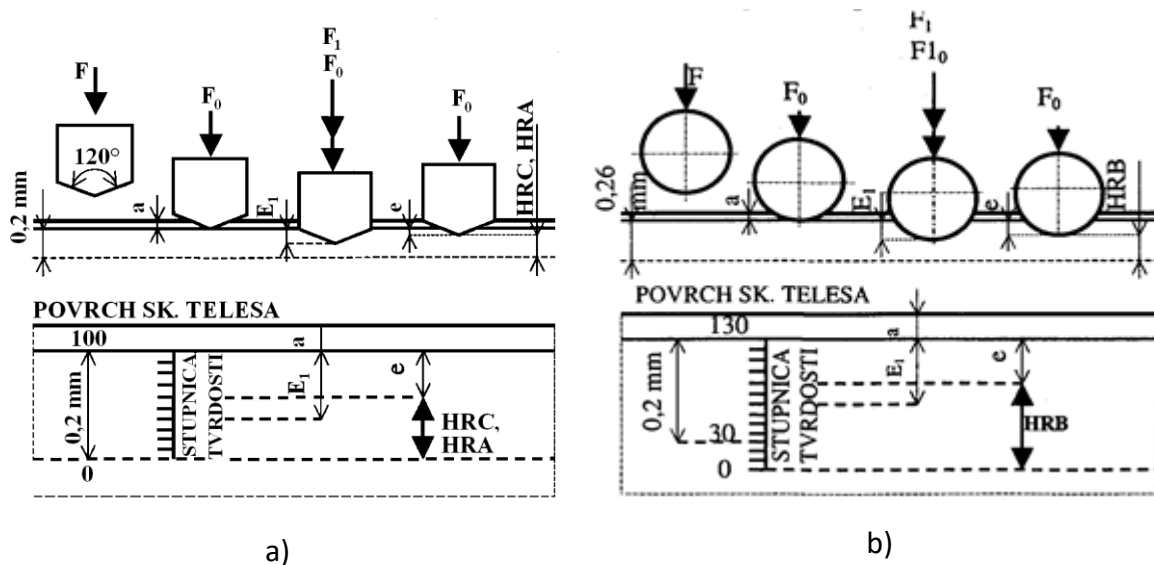


Obr.2.7 Skúška tvrdosti
a) Brinell, b) Vickers, c) Knoop

Porovnanie vtlačkov, vytvorených metódou Knoop a Vickers pri danej záťaži a materiáli:

- vtlačok Knoop má približne polovičnú hĺbku ako Vickers, čo túto metódu robí vhodnou pre meranie keramiky a krehkých materiálov,
- z rovnakého dôvodu je ale Knoop citlivejšia metóda na kvalitu prípravy povrchu pred meraním,
- hlavná diagonála u Knoopa je trikrát dlhšia ako pri metóde Vickers, čím sa minimalizuje chyba pri meraní dĺžky tejto diagonály, čo je veľmi dôležité pri meraní tvrdých materiálov s malými vtlačkami,
- z hľadiska tvaru vtlačku je Vickers vhodnejší pre malé kruhové plochy a Knoop je vhodnejší pre tenké vrstvy.

Skúška tvrdosti podľa Rockwella (STN EN ISO 6508-1) - princíp skúšky spočíva vo vtlačaní diamantového kužeľa, alebo ocelevej guľôčky do skúšaného materiálu a tvrdosť je vyjadrená rozdielom medzi zmluvnou hĺbkou a hĺbkou trvalého vtlačku. Pri Rockwellovej skúške je možné použiť stupnice A až K, najčastejšie sa používajú stupnice A, B a C, pričom pre stupnice A a C sa používa diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a pre stupnicu B kalená oceľová guľôčka s priemerom $D = 1,587 \text{ mm}$, obr.2.8. Tvrdosť podľa Rockwella sa označuje hodnotou tvrdosti a písmenami udávajúcimi označenie metódy a stupnice, napr. 28 HRC.



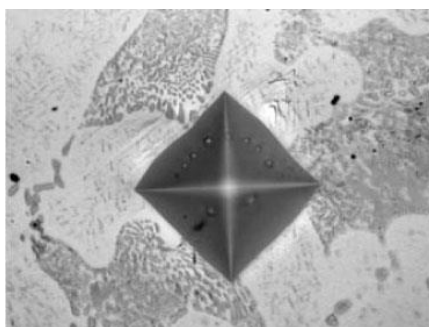
Obr.2.8 Princíp skúšky tvrdosti podľa Rockwella a - podľa stupnice HRC a HRA,
b – podľa stupnice HRB

Skúška tvrdosti komparačnou metódou - skúška tvrdosti pomocou *Poldi kladivka* je rýchla dynamická skúška na určenie tvrdosti podľa Brinella porovnávacou metódou. Súčasne do skúšaného materiálu a porovnávacej tyčinky (referenčného materiálu) so známou tvrdosťou dynamicky (rázom) vtláčame kalenú oceľovú guľôčku s priemerom $D = 10 \text{ mm}$. Guľôčka zanechá vtláčok v skúšanom materiáli a vtláčok v porovnávacej tyčinke. V tabuľkách, zostavených na základe veľkého počtu porovnávacích meraní pre dané materiály, nájdeme príslušnú tvrdosť skúšaného materiálu HB_M .

Skúška tvrdosti podľa Shoreho – patrí medzi dynamické skúšky a je najpoužívanejšou odrazovou skúškou. Tvrdosť meriame veľkosťou odrazu závažia s guľovito vybrúseným diamantovým hrotom, ktoré dopadá z určitej výšky na skúšaný materiál. Pri náraze sa malá časť kinetickej energie spotrebuje na nevratnú plastickú deformáciu povrchu skúšobného telesa a zostávajúca energia sa prejaví odrazom telesa. Z dosiahnutej výšky po odraze sa vypočíta hodnota tvrdosti, ktorá ale u dynamických metód skúšania tvrdosti nedosahuje presnosť metód statických.

Skúška mikrotvrdosti - je skúškou na určenie tvrdosti jednotlivých zložiek štruktúry materiálu (na metalografických výbrusoch) ako aj na stanovenie tvrdosti tenkých vrstiev povlakov, vytvorených rôznymi technológiami naprašovania (napr. povlaky nástrojov TiN).

Mikrotvrdosť je možné merať pomocou Vickersovej metódy alebo Knoopovej metódy. Ich výhodou je použitie veľmi malých zaťažení (od $0,0098 \text{ N}$ do $4,905 \text{ N}$). Mikrotvrdomery sú buď samostatné prístroje alebo tvoria súčasť metalografického mikroskopu. Nakoľko sú používané veľmi malé zaťaženia, vzniknuté vtláčky majú mikroskopickú veľkosť a je ich potrebné vyhodnotiť s použitím dostatočného zväčšenia. Vpich identora pri meraní mikrotvrdosti Vickersovou metódou je na obr.2.9.



Obr.2.9 Vpich identora pri meraní mikrotvrlosti Vickersovou metódou
zliatiny Ni-Cr-Mo-Ti

Pri porovnaní skúšok tvrdosti (Tab.2.1) možno konštatovať, že Brinellova metóda je vhodná pre hodnotenie tvrdosti mäkkých a stredne tvrdých materiálov s heterogénnou štruktúrou, napr. grafitické liatiny, mäkké ocele v pôvodnom stave, v žíhanom stave, neželezných kovov a ich zliatin.

Skúška tvrdosti Poldi kladivkom je iba orientačnou prevádzkovou skúškou bez porušenia skúšaného materiálu odberom vzorky a bez transportu materiálu do laboratória.

Vickersova metóda je považovaná za najpresnejšiu a najcitlivejšiu metódu a používa sa pri výskumných a vývojových prácach, pri kontrole výrobkov, ale vzhľadom na malú veľkosť vtláčku nie je vhodná pre meranie tvrdosti hrubozrnných materiálov a materiálov s nehomogénnou štruktúrou (napr. grafitické liatiny). Uplatňuje sa pri meraní tvrdosti zliatin tvárnených za studena, k meraniu tvrdosti cementovaných a nitridovaných vrstiev, je dobre použiteľná aj pre kalené ocele.

Rockwellova metóda je rýchla a jednoduchá (priamo sa odčíta hodnota tvrdosti na stupnici hĺbkomera) a využíva sa na bežnú a automatickú kontrolu tvrdosti po kalení, cementovaní, nitridovaní a pod. Skúškami mikrotvrlosti sa meria tvrdosť jednotlivých štruktúrnych zložiek. Shoreho metóda je pomerne málo presná a je určená na porovnávanie tvrdosti veľkých kalených predmetov, napr. valcov na valcovanie trate.

Tabuľka 2.1 Prehľad používaných rozsahov a vhodnosť jednotlivých metód

Metóda	Použitý rozsah	Vhodnosť použitia
HBS	do 450	Pre mäkké a stredne tvrdé materiály.
HBW	Do 650	Pre tvrdšie materiály.
HV	do 2000	Univerzálna metóda vhodná pre mäkké aj tvrdé materiály. Nevhodná pre hrubozrnné a heterogénne materiály.
HRC HRA	20 – 67	Pre meranie tvrdých materiálov, najmä ako kontrolná metóda pri tepelnom spracovaní.
HRB	25 – 100	Pre meranie mäkkých materiálov.
Poldi kladivko	do 400	Pre mäkké materiály. Orientačná prevádzková skúška vhodná pre meranie tvrdosti rozmerovo veľkých súčiastok priamo v prevádzke. Komparačná metóda.

2.1.5 Skúšky rázom v ohybe

Húževnatosť materiálu je vyjadrená ako jeho schopnosť pohlcovať mechanickú energiu do porušenia a závisí od teploty. Vzhľadom na to, že jav prechodu (tranzitné správanie) je z praktického hľadiska veľmi nepriaznivá vlastnosť materiálu, bolo potrebné nájsť vhodné skúšobné metódy a kritériá na jej posúdenie.

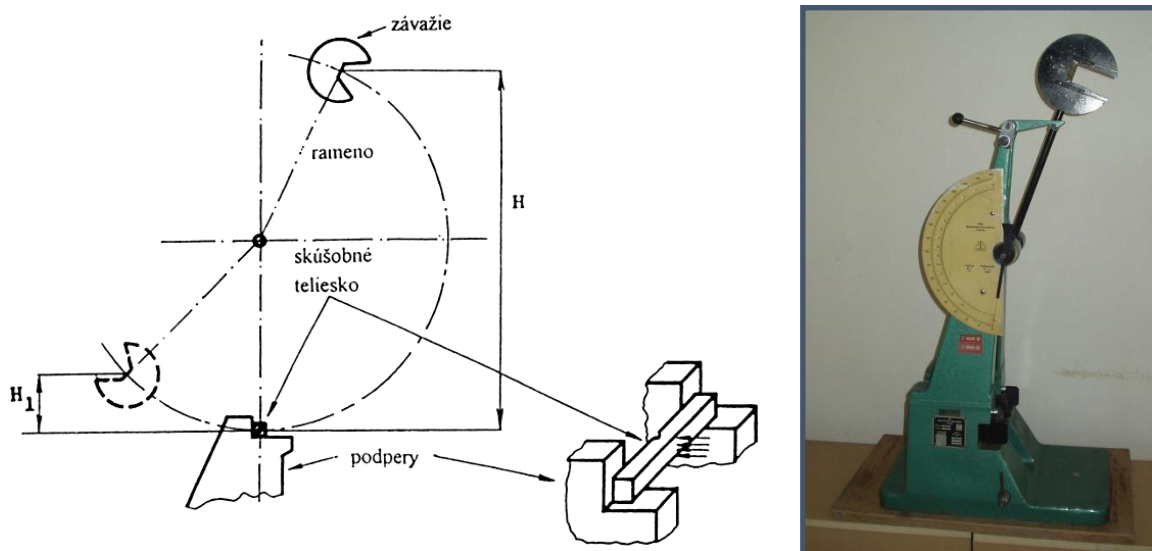
Najpoužívanějšími skúšobnými metódami **hodnotenia tranzitného správania materiálov** sú skúšky rázom v ohybe, skúšky teploty nulovej húževnatosti TNDT, skúšky veľkých telies na rázový ohyb DWTT, skúška teploty zastavenia trhliny TZT a tzv. ESSO skúška. Tieto skúšky, ktorými hodnotíme odolnosť voči vzniku nežiaduceho krehkého lomu, uskutočňujeme v podstate z týchto dôvodov:

- určenie pravdepodobnosti výskytu lomu daného materiálu, zaťažovaného za určitých podmienok,
- výber najvhodnejšieho materiálu z materiálov, ktoré sú k dispozícii pre určité použitie
- kontrola kvality pre výrobu materiálov a pri odovzdávaní,
- rozbor lomov, ktoré sa vyskytli v prevádzke,
- získanie dát, ktoré môžu byť priamo použité pre potreby konštrukcie (max. prevádzkové napätie, max. prípustná dĺžka trhliny, min. prevádzková teplota).

Skúška rázovej húževnatosti podľa Charpyho (STN EN ISO 148-1), je najpoužívanější skúšobná metóda hodnotenia tranzitného správania materiálov. Jej cieľom je zistiť hodnotu húževnatosti, ktorá je definovaná ako práca spotrebovaná na zlomenie skúšobného telieska s vrubom pri stanovených podmienkach skúšky. Pri skúške sa určuje rázová húževnatosť KCV [J.cm⁻²], ktorá je daná podielom absorbovanej energie pri zlomení skúšobnej tyče KV [J] a plochy priečného prierezu skúšobnej tyče S₀ pred skúškou v mieste vrubu [cm²]:

$$KCV = \frac{KV}{S_0} \quad [\text{J.cm}^{-2}]$$

Princíp skúšky spočíva v prerazení skúšobnej tyče s vrubom. Tyč predpísaných tvarov a rozmerov (obvykle 10 x 10 x 55 mm), ktorá je umiestnená na dvoch podperách skúšobného stroja (vrub je na odvrátenej strane úderu) sa prerazí jediným úderom kyvadlového kladiva. Údaje odčítané zo skúšobného kladiva (systém Charpy), obr.2.10, ako aj rozmery a tvar skúšobnej tyče pred a po skúške, sú podkladom na vyhodnotenie skúšky, t.j. podkladom na určenie rázovej húževnatosti KC a stanovenie charakteru lomovej plochy.



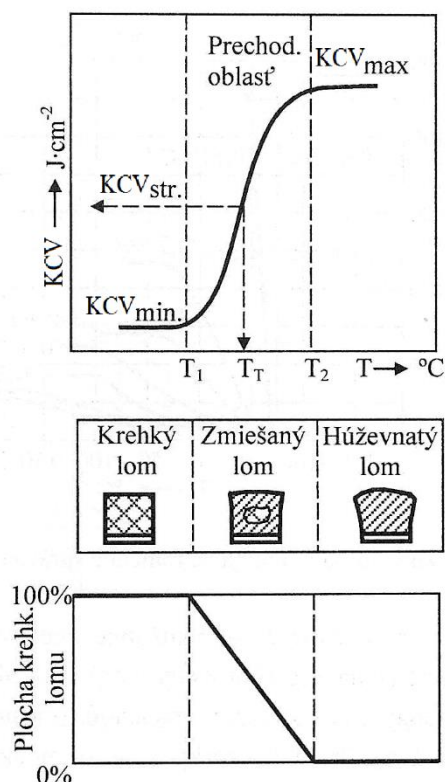
Obr.2.10 Schéma a vzhľad skúšobného kladiva

Rázová húževnatosť ako kritérium odolnosti proti krehkému lomu má praktický význam v podobe tranzitnej (prechodovej) krivky, ktorá vyjadruje závislosť vrubovej húževnatosti od teploty. Znižovaním skúšobnej teploty v určitom teplotnom intervale poklesne húževnatosť z maximálnej hodnoty KCV_{max} na minimálnu hodnotu. Tento interval sa nazýva prechodová oblasť a krivka, pri ktorej je tento pokles výrazný, prechodovou alebo tranzitnou krivkou, obr.2.11.

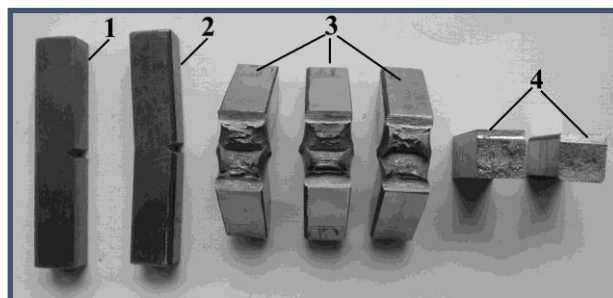
Pri nízkych teplotách vzniká krehký lom s veľmi malou húževnatosťou KCV_{min} a pri vyšších teplotách húževnatý lom s veľkou húževnatosťou. V strmej časti krivky sa vyskytujú zmiešané lomy s určitým podielom húževnatého aj krehkého lomu.

Konštrukčný materiál je potom charakteristický tranzitným správaním. Na strmej časti krivky sa nachádza charakteristický bod, ktorého súradnica na osi teplôt udáva tranzitnú teplotu TT. Tranzitná teplota TT sa potom stanoví ako teplota, pri ktorej hodnota rázovej húževnatosti zodpovedá jej strednej hodnote alebo KCV má stanovenú dohodnutú absolútnu hodnotu (napr. $KCV = 35 \text{ J.cm}^{-2}$), resp. ako teplota, pri ktorej podiel krehkého lomu $PKL = 50 \%$.

Okrem energetického hľadiska je možné pre stanovenie tranzitnej teploty použiť aj fraktografické hľadisko, založené na posudzovaní a vyhodnotení vzhľadu lomovej plochy skúšobnej tyče, obr.2.12.



Obr.2.11 Tranzitná krivka



Obr.2.12 Vzhľad skúšobnej vzorky pred a po skúške

Pre technickú prax, z hľadiska úžitkových vlastností, je dôležité, aby konštrukčný materiál bol zaťažovaný pri teplotách nad tranzitnou oblasťou. Tranzitná oblasť (jej poloha) je ovplyvňovaná množstvom metalurgických a vonkajších faktorov, ako sú technologické a tepelné spracovanie, chemické zloženie, veľkosť zrna, starnutie, ožiarenie neutrónmi, zváranie, teplota, rýchlosť zaťažovania, konštrukčné vruby, hrúbka telesa, vnútorné napätia.

2.2 Hodnotenie technologických vlastností materiálov

Konštrukčné materiály sa vo výrobnom procese spracúvajú rôznymi technologickými operáciami a postupmi (napr. tvárnením, zváraním, zlievaním, obrábaním a pod.). Musia mať preto zaručené aj technologické vlastnosti, ktoré podmieňujú úspešné vykonanie danej technologickej operácie, resp. postupu.

Medzi najdôležitejšie technologické vlastnosti patria:

- tvárnosť - schopnosť pretvorenia materiálu do daného stupňa a tvaru bez porušenia celistvosti počas pôsobenia vonkajších síl,
- zvariteľnosť - spôsobilosť materiálu vytvoriť zváraním pri určitých technologických podmienkach zvarové spoje požadovaných vlastností.

- zlievateľnosť - predstavuje súhrn zlievárenských vlastností, ako sú tavitelnosť, tekutosť, zabiehavosť, zmrašťovanie, odmiešavanie, pohlcovanie plynov,
- obrábateľnosť - ako ľahko a s akým výsledkom sa daný materiál obrába, resp. s akou intenzitou sa opotrebuje nástroj, akú prácu musíme vynaložiť na oddelenie triesky, aký stupeň drsnosti dosiahneme.

Technologické vlastnosti nie je možné vyjadriť v presne definovateľných fyzikálnych veličinách. Preto sa musia zisťovať technologickými skúškami, ktoré do určitej miery napodobňujú praktické podmienky, ktorým bude konštrukčný materiál pri spracovaní alebo používaní vystavený. Na vylúčenie subjektivity pri hodnotení výsledkov a na zabezpečenie reprodukovateľnosti výsledkov je postup väčšiny technologických skúšok normalizovaný.

Charakteristickými predstaviteľmi technologických skúšok sú skúšky lámavosti (na overenie tvárniteľnosti, zvárateľnosti), hlbokoťažnosti (na overenie tvárniteľnosti tenkých plechov - skúška hĺbením podľa Erichsena, skúška hĺbením podľa Engelhardta, skúšky zabiehavosti (na overenie zlievárenských vlastností) a skúška na stanovenie stupňa obrábateľnosti (na porovnaní obrábateľnosti v materiáloch).

Okrem vyššie uvedených skúšok sa používajú ďalšie technologické skúšky, napr. skúšky lámavosti za tepla, skúšky rúrok, skúšky drôtov atď.

2.2.1 Skúška lámavosti (STN EN ISO 7438)

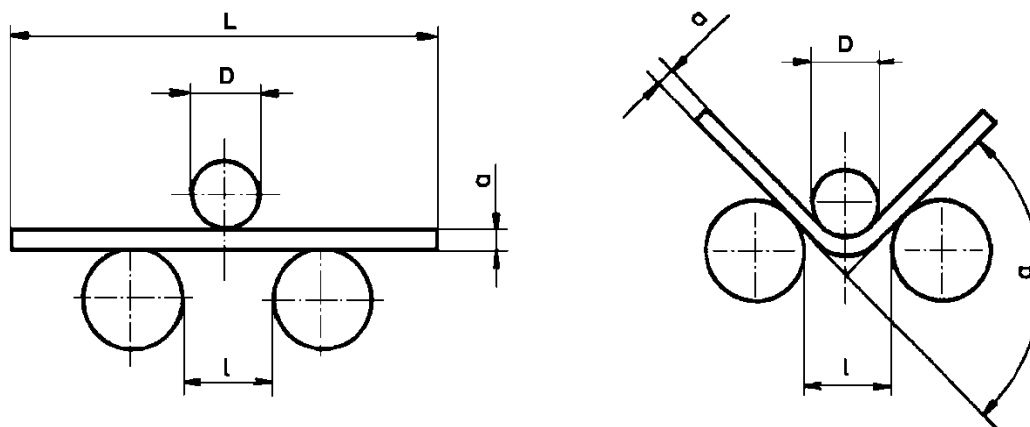
Cieľom skúšky je zistiť schopnosť kovových materiálov plasticky sa deformovať pri namáhaní statickým ohybom. Skúšobná tyč obdĺžnikového, kruhového, štvorcového alebo mnohouholníkového prierezu sa podrobí plastickej deformácii ohybom až do predpísaného uhlu. Neopracovaná plocha pri ohybe je na ťahanej strane. Všetky oblasti materiálu ovplyvnené strihaním alebo rezaním plameňom sa musia odstrániť. Hrany pravouhlých tyčí sa musia zaobliť. Dĺžka skúšobného telesa sa určuje podľa jeho hrúbky a použitého skúšobného zariadenia.

Skúška lámavosti sa robí na skúšobnom stroji alebo lise, ktorý je vybavený obvykle ohýbacím zariadením s dvoma podperami a trňom. Skúška lámavosti sa vykonáva pri teplote okolia jednou z nasledujúcich metód:

1. ohybom do predpísaného uhla pod zaťažením, obr.2.13,
2. ohybom do rovnobežnej polohy ramien pri ich stanovenej vzdialenosti pod zaťažením, s použitím vložky alebo bez vložky,
3. ohybom do dosiahnutia ramien na seba pod zaťažením.

Zaťažovanie v ohybe musí pôsobiť pomaly, aby bol možný voľný plastický tok materiálu. Ohyb do predpísaného uhla sa môže ukončiť pôsobením zaťaženia priamo na voľné konce skúšobného telesa.

Skúška sa vyhodnotí v súlade s požiadavkami na výrobok. Pokiaľ pri predpísanom uhle, ktorý sa meria v zaťaženom stave, nevznikli na ťahanej strane trhliny, materiál vyhovel. Protokol o skúške obsahuje odkaz na normu, metódu skúšania, tvar a rozmery skúšobnej tyče, údaje pre identifikáciu tyče (materiál, číslo tavby, smer osi telesa k výrobku) a samotný výsledok skúšky.



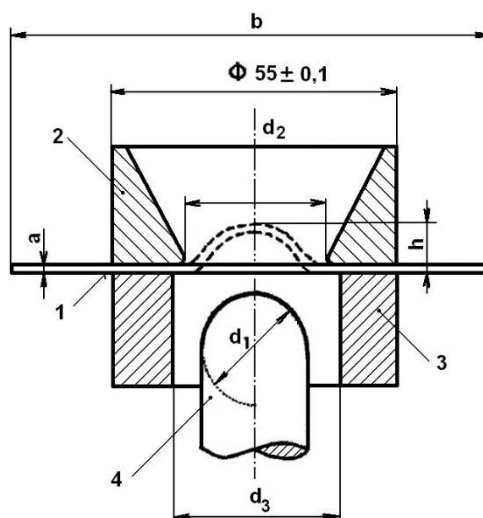
Obr.2.13 Skúška lámavosti trojbodovým ohybom
 α - uhol ohybu, l – vzdialenosť podpier, L – dĺžka skúšobnej tyče,
 D – priemer trňa, a – hrúbka plechu

Skúška lámavosti sa tiež využíva aj pri hodnotení zvarových spojov. Technické podmienky a rozmerové kritériá stanovuje STN EN ISO 5173. Cieľom skúšky je určiť ťažnosť a prítomnosť chýb na povrchu spoja alebo blízko neho. Skúška je ukončená, keď uhol ohybu α dosiahne hodnotu uvedenú v príslušnej norme na výrobok.

2.2.2 Skúška hĺbením podľa ERICHSENA (STN EN ISO 20482)

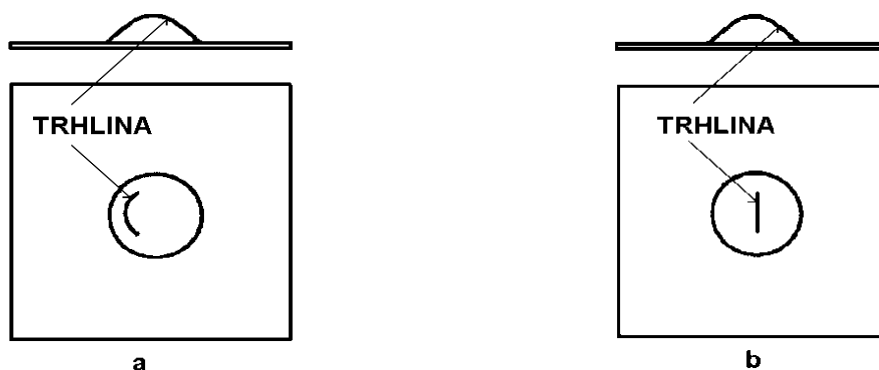
Skúška patrí k skúškam tenkých plechov do hrúbky 2 mm a používa sa na zistenie ich hlbokoťažnosti – vhodnosti k hlbokému ťahaniu, opätovnému ohýbaniu a pod.

Princíp skúšky, obr.2.14, spočíva v zatlačení ťažníka (4) s guľovým zakončením do skúšaného plechu (1), ktorý je stlačený medzi ťažnicou (2) a pridržiavačom (3) silou 10 kN. Vtláčanie ťažníka sa zastaví v okamihu vzniku trhliny po celej hrúbke plechu. Odčíta sa veľkosť prehĺbenia h , ktorá je charakteristikou materiálu pri Erichsenovej skúške a označuje sa IE.



Obr.2.14 Princíp skúšky podľa Erichsena

Ako doplňujúce kritérium sa môže použiť vzhľad povrchu skúšobnej vzorky v mieste prehĺbenia a tvar trhliny. Pre hlbokoťažné plechy je typický tvar trhliny vo vrstevniciach okrúhleho tvaru - obr.2.15.a, tvar trhliny vychádzajúci zo stredu je typický pre vláknité materiály nevhodné pre ťahanie – obr.2.15.b. Skúška je vyhovujúca ak prehĺbenie IE je väčšie alebo sa rovná predpísanému prehĺbeniu podľa materiálového listu.



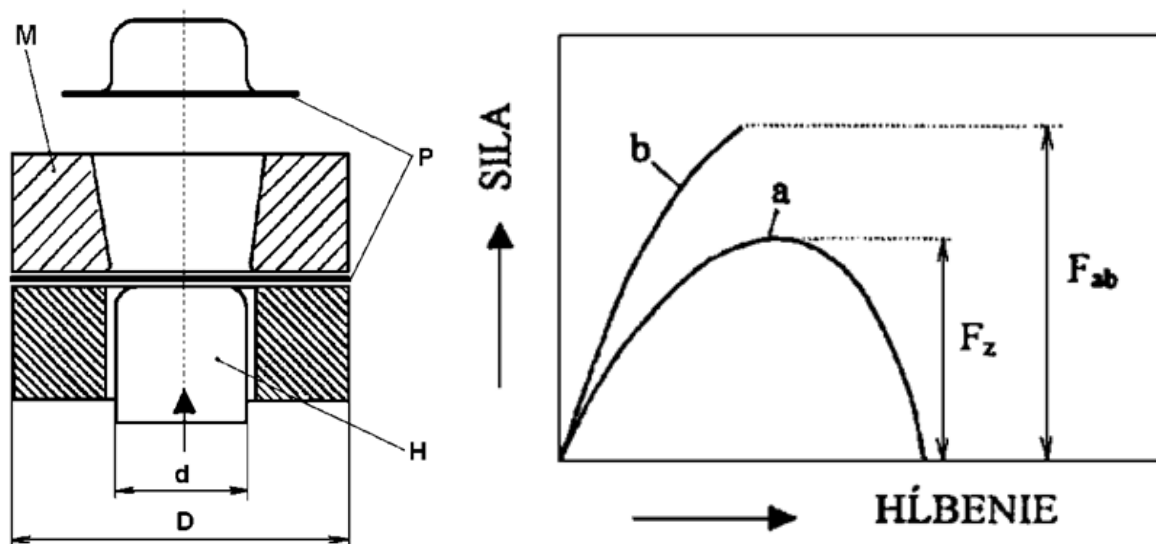
Obr.2.15 Tvar trhliny a vzhľad vzoriek po skúške hĺbením podľa Erichsena, plechu
a - vhodného pre hlboký ťah, b - nevhodného pre hlboký ťah

2.2.3 Skúška hĺbením podľa ENGELHARDTA

Tento typ skúšky patrí taktiež k skúškam hlbokoťažnosti tenkých plechov do hrúbky 2 mm. Princíp skúšky, obr.2.16, spočíva vo vtláčaní skúšaného plechu (P) vo forme kotúča s priemerom D do ťažnice M pomocou ťažníka H o priemere d . Pri vtláčaní ťažníka do skúšobnej vzorky rastie sila s hĺbkou výtlaku h (krivka a).

Po prekročení maximálnej sily (ťažná sila F_z) táto opäť klesá. Pri zväčšovaní pôvodného priemeru vzorky rastie aj veľkosť ťažnej sily F_z . Po prekročení kritického priemeru vzorky ťažná

sila dosiahne takú hodnotu, že sa prekročí medza pevnosti skúšaného materiálu na obvode výlisku a vzorka sa poruší, obr.2.17. Priebeh sily v tomto prípade znázorňuje krivka b. Sila, pri ktorej dochádza k porušeniu, tzv. prenosná sila F_{ab} pri rovnakých podmienkach (priemer výlisku, hrúbka plechu) má pre daný materiál vždy rovnakú hodnotu.



Obr.2.16 Princíp skúšky

Pre každý plech je teda možné porovnať dve sily, a to silu F_z na vytvorenie štandardného výlisku a silu potrebnú na porušenie výlisku F_{ab} . Hlbokoťažnosť sa potom vyjadrí:

$$T = \frac{F_{ab} - F_z}{F_{ab}} \cdot 100\%$$

Veľkosť sily F_{ab} je možné určiť aj použitím jednej vzorky tak, že po určení sily F_z sa zablokuje okraj výlisku pridržiavačom a pri ďalšom ťahaní sa vzorka poruší.



Obr.2.17 Vzhľad vzoriek po skúške hĺbením podľa Engelhardta

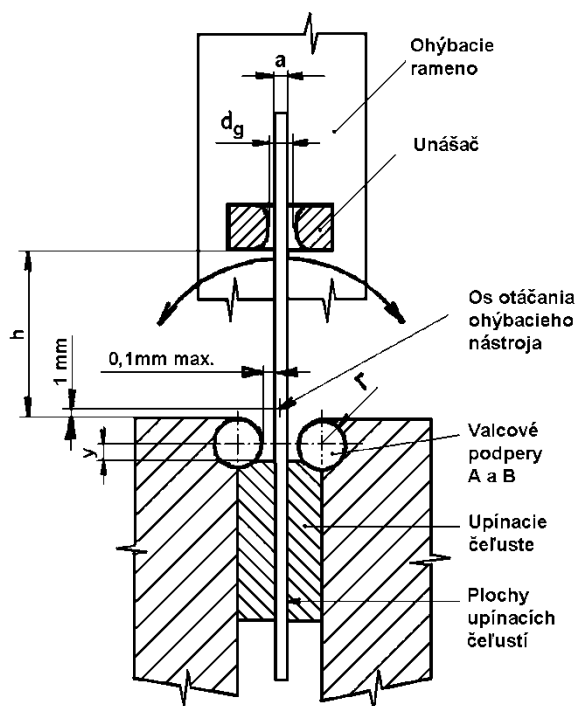
2.2.4 Skúška lámavosti plechov striedavým ohybom (STN EN ISO 7799)

Stanovuje schopnosť plechov a pásov s hrúbkou 3 mm a menej plasticky sa deformovať striedavým ohybom.

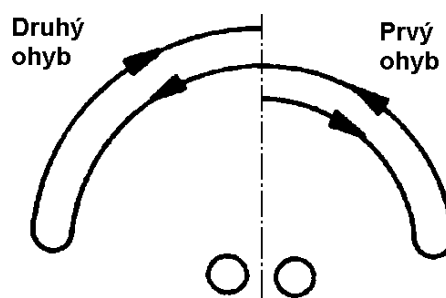
Podstata skúšky spočíva v opakovanom ohýbaní skúšobnej vzorky z východiskovej polohy na obe strany o 90° . Skúšobné zariadenie je schematicky znázornené na obr.2.18. Polomer valcových podper r závisí od hrúbky skúšobného telesa a pohybuje sa v rozmedzí 1-10 mm. Vzdialenosť h musí byť od 25 do 50 mm. Šírka skúšobného telesa je 20-25 mm. Pásky menšej šírky ako 20 mm môžu byť skúšané v pôvodnej šírke.

Skúšobné teleso sa ohýba striedavo vpravo a vľavo o 90° . Jeden ohyb je definovaný ako ohnutie voľného konca skúšobného telesa o 90° a jeho vrátenie do východiskovej polohy. Ďalší ohyb sa robí v opačnom smere, obr.2.19. Medzi jednotlivými ohybmi sa skúška neprerušuje. Rýchlosť ohýbania je rovnomerná a nesmie byť vyššia ako jeden ohyb za sekundu. Skúška je ukončená po dosiahnutí počtu ohybov stanovených v príslušných normách alebo do objavenia viditeľnej trhliny, prípadne až do úplného lomu.

Skúšobný protokol obsahuje údaje ako odkaz na normu, údaje pre identifikáciu skúšobného telesa, rozmery skúšobného telesa, podmienky pri skúške (r , h), spôsob ukončenia skúšky, samotný výsledok skúšky.



Obr.2.18 Princíp skúšky lámavosti plechov striedavým ohybom



Obr.2.19 Postup pri skúške plechov striedavým ohybom

2.3 Nedeštruktívne skúšanie materiálov

Význam skúšobníctva v strojárstve

V strojárskej výrobe je veľmi dôležitá kvalita, bezpečnosť spoľahlivosť a životnosť vyrábaných výrobkov. Pre ich zabezpečenie je nevyhnutné investovať do kontroly a testovania. Kontrolou a skúšaním je možné predísť nepodarkovosti výroby a tak zabrániť ekonomických škodám, dopadu na ekológiu a tiež ohrozeniu ľudských životov. Kontrola výrobkov sa realizuje vo všetkých odvetviach strojárskej výroby. Kontrolované sú vstupné suroviny a polotovary. Realizuje sa počas výroby ako tzv. medzioperačná kontrola a následne sú kontrolované hotové výrobky. V procesoch odlievania sa aplikuje napr. pri identifikácii, pórov, bublín, riedenín, stiahnutí, nezabehnutia, presadenia, zatečení, vybúlenia, výronkov, nárastov, zálupov, odmiešania odlievaných kovov, inklúzií z formovacích materiálov a grafitu, trhliny, štruktúrne a chemické nehomogenity, chyby akosti povrchov a pod. V technologických procesoch objemového a plošného tvárnenia sa realizuje kontrola za účelom odhaliť prítomnosť povrchových a vnútorných trhlín, zavalcovaných nekovových vtrúsenín, zaoxidovaných okovín na povrchu, prítomnosť korózných splodín, heterogenity v štruktúrach, zdvojenie stien resp. nežiadúce zmeny hrúbok po tvárnení a pod. U obrobkov je primárne sledovaná akosť obrobených povrchov, prítomnosť trhlín, negatívne zmeny štruktúr vplyvom vneseného tepla pri obrábaní a pod. V procesoch tepelného spracovania sú skúšky zamerané na prítomnosť vonkajších a vnútorných chýb spracovaných povrchov, najmä prítomnosť trhlín, heterogenitu štruktúr a výskyt nežiaducich napr. (oduhličených) povrchových vrstiev. Najpodrobnejšie sú chyby definované pre oblasť zvarovania. Ich členenie a označovanie definuje STN EN ISO 6520-1. Norma člení chyby do šiestich základných skupín a to trhliny, dutiny, vtrúseniny, studené spoje, tiež neprievary (chyby odtavovania a závaru u tavného zvarovania), chyby tvaru-rozmerov a iné typy chýb. Všeobecne je možné chyby rozčleniť na chyby povrchové, chyby vnútorné a tesne podpovrchové a vnútorné. Včasným zistením a opravením chyby možno zvýšiť spoľahlivosť a životnosť zariadenia a zároveň sa vyhnúť nečakaným haváriám. Kontrola kvality môže prebiehať pomocou nedeštruktívnych ale tiež aj deštruktívnych skúšok.

Odhaliť kritické miesta umožňuje **defektoskopia**. Jedná sa o vedný odbor, ktorý pomocou nedeštruktívnych metód skúma defekty v materiáloch a výrobkoch resp. predpovedá vznik možností materiálových porúch v prevádzke.

Defekt je definovaný ako porušenie materiálu alebo výrobku, ktorého povaha, tvar, rozmery a priestorová orientácia má negatívny vplyv na jeho funkčné vlastnosti. Prítomnosť defektov má zásadný vplyv na vlastnosti materiálov. Ich identifikácia a lokalizácia pomocou nedeštruktívnych skúšok umožňuje predchádzať často katastrofálnym následkom porušení z pohľadu veľkých hospodárskych strát, ohrození zdravia a životov ľudí. Metódu nedeštruktívneho hodnotenia je potrebné voliť s ohľadom na vlastnosti skúmaných materiálov ako sú: elektrická vodivosť, bezporéznosť povrchov, feromagnetizmus a iné. Pri

nedeštruktívnych skúškach (NDT - non destructive testing) sú využívané fyzikálne princípy, ktoré na skúmané materiály nevplyvajú mechanicky, ani tepelne.

Konštrukčné materiály používané pri stavbe strojov a zariadení nie sú takmer nikdy bez chýb, čo vyplýva zo zákonitosti tvorby štruktúry, nedokonalosti výroby (mechanického a tepelného spracovania), v nemalej miere vplyvu ľudského faktora a nedodržiavania stanovených technologických postupov a pod. To či bude na základe realizovaných skúšok kvality materiál, polotovarov alebo výrobkov vyradený závisí od konkrétnej klasifikácie identifikovaných chýb.

Chyby a ich členenie

Za chybu materiálu, odliatku, výkovku, zvaru, obrobku, čiže výrobku sa rozumie každá odchýlka rozmerov, tvaru, hmotnosti, vzhľadu, makroštruktúry, mikroštruktúry a mechanických alebo fyzikálnych vlastností od vlastností prepísaných technickými podmienkami, normami resp. dohodami medzi zmluvnými stranami, prípadne určenými zmluvnou vzorkou. Na základe technických noriem, alebo dohodnutých technických podmienok môžu byť chyby klasifikované ako:

Chyby prípustné – sú odchýlky, ktoré normy a technické podmienky dovoľujú bez toho, aby ich bolo potrebné odstrániť.

Chyby opraviteľné – sú odchýlky, ktoré je možné vhodným zásahom (pokiaľ to dovoľuje norma alebo výslovné nezakazuje, technické podmienky alebo dohoda medzi zmluvnými stranami) buď opraviť na prípustnú mieru alebo celkom odstrániť.

Chyby neprípustné – sú odchýlky od príslušných noriem, technických podmienok, prípadne zmluvného vzorku, ktoré nie je možné odstrániť opravou, pretože je podľa daných kritérií neprípustná.

Chyby odstrániteľné – sú odchýlky od stanovených podmienok, ktoré je možné odstrániť len po vzájomnej dohode so spotrebiteľom, len zvláštnymi úpravami, technickým postupom, napr. tepelným spracovaním a pod.

Identifikácia polohy chyby

Zjavná (vonkajšia – povrchová) chyba – je chyba identifikovateľná voľným okom resp. pomocou jednoduchých pomocných zariadení (lupa, boroskop, fibroskop a pod.) a meradiel prehliadkou povrchu výrobku (odliatku, zvaru, výkovku a pod.).

Skrytá (vnútorná – podpovrchová) chyba – je chyba, ktorú nie je možné identifikovať voľným okom, ale až po úprave povrchu obrábaním, pomocou vhodných prístrojov napr. mikroskop, vhodné určenou defektoskopiou, alebo laboratórnymi skúškami.

Podľa tvaru chyby členíme na:

Rovinné chyby: trhliny, studené spoje, neprevarené korene, zápaly a pod.

Priestorové chyby: bubliny, póry, vmestky a pod..

Osobitnú skupinu tvoria **chyby rovinné** - rovnobežné s povrchom konštrukčnej časti (dvojitosť plechu, odlúpnutie návaru...).

2.3.1 Vizuálna kontrola materiálov (VT)

Postupy vizuálnej kontroly (VT – Visual Testing) materiálov sú normalizované podľa STN EN 13018 a STN EN 13927. Je prvotnou a najjednoduchšou nedeštruktívnou skúškou, ktorou sa zisťujú zjavné povrchové chyby výrobkov ako sú trhliny, pórovitosť, odkryté stiahnutiny, zálupy, deformácie, neprievary, zápaly, kvaple, korózia a pod. Rozlišovacia schopnosť vizuálnej skúšky pre trhliny je 0,1 mm. Overuje sa splnenie podmienok stavu povrchu pre ďalšiu predpísanú nedeštruktívnu kontrolu.

Pred vizuálnou kontrolou musia byť hodnotené povrchy očistené od zvyškov trosky, masťnôt a oxidických zlúčenín mechanicky, chemicky alebo elektrochemicky. Osvetlenie kontrolovaného miesta musí byť dostatočné presahujúce 350 luxov, na odhalenie chýb je doporučené (cca 500 luxov).

Metódy vizuálnej kontroly

Podľa prístupnosti kontrolovaných miest a použitých kontrolných prostriedkov sa vizuálna kontrola rozlišuje na:

- a) **priamu** – kontrola okom alebo pomocou lupy (max. 7 násobným zv.) prípadne mikroskopu s 20 – 30 násobným zv. Na vykonanie priamej kontroly má byť dostatočný priestor na pozorovanie voľným okom zo vzdialenosti do 600 mm od pozorovaného povrchu a pod uhlom nie menším ako približne 30°. Pre priamo blízko pozorované objekty má byť vzdialenosť oka od povrchu max. 250 mm. Pri kontrole sa používajú posuvné meradlá, oceľové pravítka, mierky na zvary (obr.2.20 a .2.21), etalóny a pod.



Obr.2.20 Kontrola geometrie
kútového tavného zvaru



Obr.2.21 Kontrola prevýšenia V zvaru

- b) **nepriamu** – využíva dokonalejšie optické alebo optoelektronické prístroje a zariadenia ako endoskopy (pevné alebo vláknové), periskopy, boroskopy, fibroskopy. Pre dokumentáciu neprístupných miest sú používané televízne kamery a pod. (obr.2.22).



Obr.2.22 Nepriama vizuálna kontrola pomocou boroskopu

Pevné endoskopy (boroskopy) sú optické prístroje rúrkovitého tvaru s objektívom na jednom konci a okulárom na druhom. V trubici spolu s optickým systémom šošoviek a zrkadiel je vystavený svetelný zdroj na osvetlenie zorného poľa endoskopu. Vzhľadom na ich malé rozmery sú používané napr. na kontrolu, dutín potrubných systémov malých priemerov, mazacích kanálikov, spaľovacích komôr motorov a pod.

Podľa druhu optického systému sa endoskopy rozdeľujú na:

- **endoskopy priame** – zorný uhol je v smere pozdĺžne s osou endoskopu,
- **endoskopy šikmé** – zorný uhol je odklonený od pozdĺžnej osi prístrojov o 15 až 30°,
- **endoskopy pravouhlé** – zorný uhol je od pozdĺžnej osi odklonený o 45°,
- **endoskopy spätné** – zorný uhol je od pozdĺžnej osi prístroja odklonený o 60 až 70°.

Vláknové endoskopy (fibroskopy). Obraz je prenášaný pomocou ohybných svetelných vlákien – svetlovodov ktoré vyúsťujú do okuláru v ktorom je obraz pozorovaný. Vplyvom rastrovania obrazu a obmedzenej ostrosti systému obraz nie je tak kvalitný ako u pevných endoskopov. Ich výhodou je možnosť kontroly tenkých dutín (od cca 3,5 mm). Vzhľadom na možnosť osvetlenia pozorovaných objektov pomocou svetelných vlákien, je tento typ zariadenia vhodný aj pre kontrolu zariadení s vyšším rizikom výbuchu. Pozorovanie je možné realizovať

v reálnom čase avšak v súčasnosti sa kvôli dokumentácii a dokazovania prítomnosti chýb v materiáloch tieto zaznamenávajú pomocou kamier.

Vizuálnu kontrolu môže zabezpečovať iba certifikovaný personál. Rozsah vizuálnej kontroly sa má definovať pred jej vykonaním aplikačnou normou alebo dohodou medzi zmluvnými stranami.

2.3.2 Kapilárna metóda (PT)

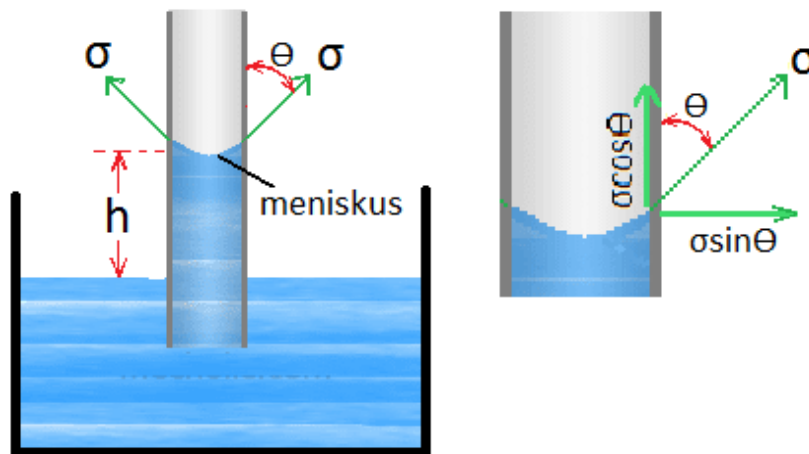
Kapilárne metódy (PT – Penetrant Testing) sa používajú na zisťovanie chýb - porúch, ktoré vyúsťujú na povrch kontrolovaného objektu. Všeobecné postupy skúšania definuje STN EN ISO 3452-1:2013. Zisťovanie vnútorných alebo uzavretých chýb týmito metódami nie je možné. Sú založené na využití kapilárnych javov, schopnosti kapilárne aktívnych kvapalín prenikať do necelistvostí a následne zviditeľniť miesta chýb vplyvom vztlínivosti. Vhodné sú pri detekcii plošných chýb typu jemných trhlín o šírke 10^{-2} až 10^{-5} mm, studených spojov, pórov, odkrytých riedenín, prípadne stiahnutí a netesností zvarových spojov. Úroveň prípustnosti chýb u zvarových spojov definuje STN EN ISO 23277: 2015. Penetračné metódy sú použiteľné pre kontrolu kovových a tiež nekovových materiálov, ako sú keramika, sklo a tiež niektoré druhy plastov. Nie je možné nimi skúšať pórovité materiály a materiály, ktoré by sa detekčnými prostriedkami narušovali.

Podstatou kapilárnych metód je použitie kvapaliny s nízkym povrchovým napätím, ktorá vnikne do necelistvostí a po odstránení jej prebytku z povrchu skúšaného predmetu vystupuje vplyvom kapilárnych síl, takže necelistvosť (chybu) zviditeľní. Ku kapilárnym vlastnostiam kvapalín patrí:

Povrchové napätie σ je sila pôsobiaca k jednotke dĺžky povrchu kvapaliny (N.m^{-1}). Vo všetkých smeroch a vo všetkých miestach povrchu je rovnako veľké. Pôsobením povrchového napätia sa kvapalina snaží zaujať čo najmenší povrch vzhľadom na objem, t.j. guľový tvar.

Okrajový uhol θ zvierá povrch kvapaliny so stenou pevného telesa. Veľkosť uhla ovplyvňuje tzv. adhézna konštanta, čo je rozdiel povrchového napätia steny tuhého telesa vzhľadom k vzduchu a vzhľadom ku kvapaline. Dobrá zmáčavosť povrchu je dosahovaná ak je adhézna konštanta kladná tak je okrajový uhol ostrý. Ak je konštanta záporná, je okrajový uhol tupý a kvapalina povrchy nezmáča.

Kapilárna elevácia h v kapiláre ponorenej kolmo do zmáčavej kvapaliny, stúpajú v dôsledku priľnavých (adhézných) síl molekuly kvapaliny nahor po stenách trubice, takže je kvapalinami vtáňovaná do určitej výšky (h), kde vytvára zakrivený konkávny povrch (meniskus). Toto zakrivenie vzniká tým, že proti povrchovým silám pôsobí gravitačná sila stĺpca zdvihnutej kvapaliny. Tento stav sa nazýva kapilárna elevácia. Pre detekciu necelistvostí materiálu má kapilárna elevácia dôležitosť v tom, že povrchová chyba sa správa ako kapilárna.



Obr.2.23 Kapilárna elevácia

Kapilárny tlak – pri zakrivení povrchu, ktoré nastane v kapiláre, je možné pozorovať v povrchovej vrstve zníženie kohézneho tlaku o tzv. tlak kapilárny, ktorého veľkosť je priamo úmerná povrchovému napätiu a nepriamo úmerná polomeru zakrivenia povrchu. Ide o tlak vyvolaný len vzájomným pôsobením molekúl. V prípade vydatého povrchu je smer kapilárneho tlaku do prostredia nad kvapalinou, povrchová vrstva sa snaží skrútiť a tým rozťahuje stĺpec kvapaliny. Preto kapilárny tlak výrazne ovplyvňuje penetráciu a vztlínanie detekčnej tekutiny z nečistostí.

Kinematická viskozita ν - je podielom dynamickej viskozity a hustoty kvapaliny. Ma primárny vplyv na rýchlosť prieniku penetrantu do nečistosti skúmaných materiálov a následnom vystupovaní z chýb na povrch. Je dôležitým faktorom pri voľbe druhu penetrantu vzhľadom na podmienky skúšania, ktoré sa môžu realizovať pri záporných teplotách ako aj pri teplotách nad 50 °C.

Penetrant musí mať vyššie povrchové napätie, malý okrajový uhol a nízku viskozitu. Tieto veličiny musia byť vo vzájomnom súlade.

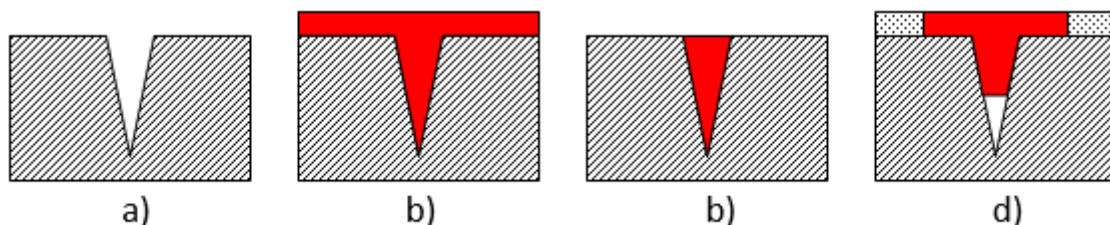
Realizácia kapilárnej skúšky spočíva :

- v príprave hodnoteného povrchu s cieľom očistiť a odmastiť skúmané povrchy po predchádzajúcich technologických operáciách. Mechanické čistenie zabezpečí odstránenie pevných nečistôt z povrchu (okuje, oxidické splodiny, strusku, tavivá a pod.). Pomocou chemických rozpúšťadiel (acetón, chlórované rozpúšťadla, technický benzín) sa odstránia tuky a oleje z povrchov. Silno znečistené povrchy je možné čistiť roztokmi kyselín a lúhov. Čistiace prostriedky sú používané prevažne vo forme aerosólov.
- v pokrytí kontrolovaného povrchu penetračnou kvapalinou nástrekom aerosólov, náterom, štetcom resp. ponorom. Penetrantom je napr. petrolej zafarbený organickým farbivom zväčša červenej farby (sudanová červená). Penetračný čas pre

zmáčanie povrchov a vniknutie penetrantu do povrchových chýb závisí od druhu hodnoteného materiálu, teploty, druhu kvapaliny, typu hodnotených chýb. Čas penetrácie býva v rozsahu 5 až 20 min.

- v odstránení nanesej penetračnej látky. Po výdrži (penetračnom čase) bude nasledovať odstránenie jej prebytku z kontrolovaného povrchu utretím suchou dobre nasiakavou látkou, prípadne rozpúšťadlom, čo ale zvyšuje nebezpečenstvo odstránenia penetrantu a povrchových chýb. Povrchy je možné opláchnuť vodou pri aplikácii emulgačných penetrantov. Emulgátory sa aplikujú v tenkej vrstve po uplynutí penetračného času na povrch pokrytý penetrantom. Po stanovenom čase pôsobenia sa zemulgovaná detekčná kvapalina opláčne vodou. Penetračná látka vo vnútri necelistvostí ostáva zachovaná.
- v nanesení vývojky na očistené povrchy. Na hodnotené povrchy sa nanesie farebná kontrastná látka - vývojka, ktorou je napr. jemnozrnná prášková forma uhličitanu vápenatého, uhličitanu horečnatého, oxidov kovov prípadne amorfných kovov v suchej forme alebo ako suspenzia prezentovaných zlúčenín v prchavej kvapaline ktorou je lieh, acetón a pod. Na vývojke vytvára buď farebnú alebo fluoreskujúcu indikáciu chyby podľa použitého penetrantu a vývojky. Indikácie sa pozorujú pri dobrom osvetlení (podobne ako pri VT) obvykle dva krát. Po nanesení vývojky pre identifikáciu veľkých chýb a po cca 15 až 20 minútach, kedy sú detegované aj jemné chyby.

Postup realizácie PT je na obr.2.24.

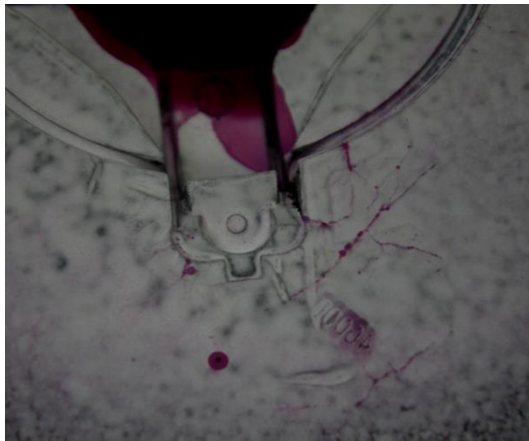


Obr.2.24 Schéma realizácie kapilárnej skúšky

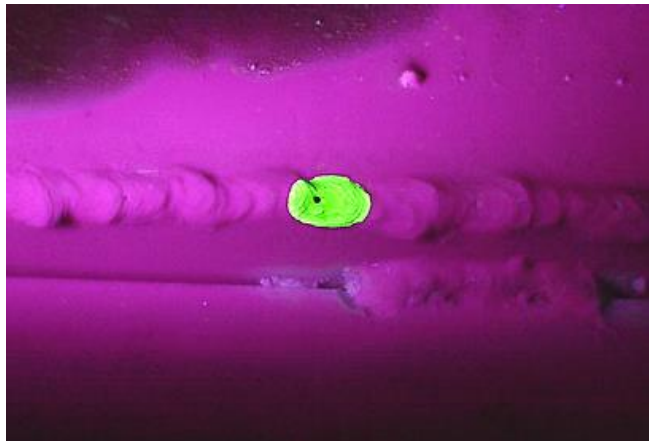
- a) príprava povrchu - jeho očistenie, b) nanesenie penetrantu, c) odstránenie nadbytku penetrantu z povrchu, d) nanesenie vývojky a indikácia chýb

Vzhľadom na druh použitého penetrantu je možné penetračnú skúšku realizovať:

- metódu farebnej indikácie (obr.2.25),
- metódu fluorescenčnej indikácie (obr.2.26).



Obr.2.25 Chyby zvýraznené farebnou penetračnou skúškou (trhliny, póry)



Obr.2.26 Chyba v povrchu tavného zvaru zviditeľnená fluorescenčnou indikáciou

Pri metóde fluorescenčnej indikácie penetrant (napr. fluorescenčný olej) obsahuje luminofor, ktorý po ožiarení ultrafialovým žiarením (s vlnovou dĺžkou 320 až 400 nm) fluoreskuje. Táto metóda sa prednostne uplatňuje pri kontrole náročných výrobkov z neželezných kovov.

Citlivosť a rýchlosť kapilárnych skúšok závisí od teploty prostredia v ktorom sa realizujú. Pri teplotách nad 50 °C a pod 4 °C je nevyhnutné použiť špeciálne kvapaliny. V súčasnosti sú indikačné schopnosti kapilárnych metód pri použití špeciálnych kvapalín v rozsahu teplôt od – 12 °C do 175 °C).

2.3.3 Magnetická prášková metóda (MT)

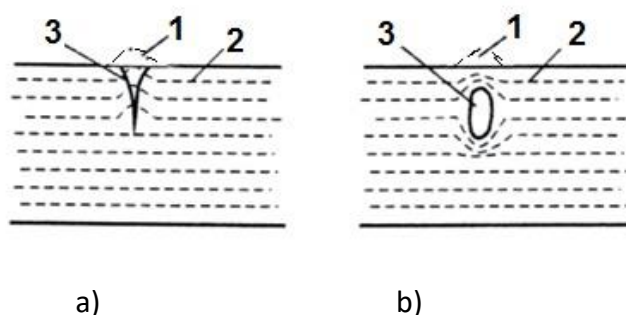
Magnetické metódy realizované podľa EN ISO 9934-1 sú vhodné pre detekciu **povrchových a podpovrchových chýb** vo **feromagnetických** materiáloch, ako sú napr. vlasové trhliny, preložky, trhliny, studené spoje vo zvaroch a póry. Metódy sú založené na indikácii rozptylového magnetického indukčného toku, ktorý v magnetovanom materiáli vzniká v mieste chyby ako dôsledok zvýšeného magnetického odporu. Chyby v skúšaných materiáloch deformujú magnetický tok. Siločiar sa vychýľujú od smeru najkratšej cesty od pólu k pólu. Ak sú chyby v blízkosti povrchu alebo ústia na povrch, vystupuje aj magnetický tok na povrch a vytvorí na povrchu magnetické póly. Veľkosť rozptylového toku závisí od veľkosti, polohy a orientácie chyby ku smeru magnetujúceho poľa. Maximálne hodnoty sa dosahujú pri chybách spojených s povrchom a orientovaným kolmo na smer magnetického poľa. Identifikovať je možné tiež chyby nachádzajúce sa tesne pod povrchom skúšaného materiálu. Preto sa vždy pri kontrole používajú dva základné spôsoby magnetovania – pozdĺžne a priečne, ich kombinácia umožňuje indikáciu všetkých chýb v jednej operácii.

Magnetické pole je možné v mieste defektu indikovať:

- magnetickou práškovou metódou,
- magnetografickým záznamom,

- indikáciou pomocou ferosondy.

Magnetická prášková metóda (obr.2.27) je najpoužívanejšou podľa spôsobu aplikácie magnetického prášku. Rozdeľuje sa na **polievaciu**, **naprašovaciu** a **magnetofluorescenčnú** metódu. Pri **polievacej metóde** sa skúšaný predmet polieva detekčnou kvapalinou (olejom alebo petrolejom) v ktorom je rozptýlený jemný magnetický prášok Fe resp. Fe_2O_3 a Fe_3O_4 zrnitosti 1 až 40 μm . V miestach vystupujúceho rozptylového toku sa feromagnetické čiastočky zachytia a zviditeľnia polohu, veľkosť a tvar povrchovej chyby. Pri **naprašovacej metóde** sa používa suchý magnetický detekčný prášok s veľkosťou zrna od 40 do 400 μm . Princíp zviditeľnenia defektov je rovnaký ako pri polievacej metóde.



Obr.2.27 Princíp magnetickej práškovej metódy

a – indikácia povrchových chýb (spoľahlivá), b – indikácia povrchových chýb (nespoľahlivá),
1 – feromagnetický prášok, 2 – siločiarly magnetického toku, 3 – chyba v materiáli

Magnetofluorescenčná metóda využíva detekčný magnetický prášok, ktorého čiastočky sú navyše pokryté **luminoform**. Skúšaný predmet sa vyhodnocuje pod ultrafialovým žiarením. Pri ožiarení ultrafialovými lúčmi (s vlnovou dĺžkou 320 až 400 nm) luminofor zachytený v mieste trhlín fluoreskuje a umožňuje objaviť aj jemné trhliny. Magnetoinдукtívne metódy umožňujú identifikáciu aj tenkých trhlín kalených súčiastok. V hodnotených súčiastkach môže ostať remanentný magnetizmus, ktorý môže byť nežiadúci.

Magnetografická metóda je bezdotyková a je určená predovšetkým na plynulú kontrolu súčiastok konštantného prierezu. Namiesto magnetického prášku sa používa **magnetofónová páska**. Rozptylové pole trhliny magnetizuje magnetickú vrstvu magnetofónovej pásky. Páska sa potom vyhodnocuje elektronicky, prípadne akusticky.

Indikácia pomocou ferosondy je veľmi dôležitá pri plynulej kontrole predmetov alebo súčiastok s konštantným priečnym prierezom (rúrky, tyče, laná alebo koľajnice). Rozptylové magnetické pole sa v mieste trhliny indukuje elektomagnetickou indukciou vyvolanou v snímačnej cievke obopínajúcej skúšaný predmet. Metóda je bezdotyková, veľmi citlivá umožňujúca detegovať chyby aj v hĺbke 20 mm pod povrchom. Napätie, ktoré sa v mieste trhlín indukuje do cievky, vyvoláva prúd merateľný citlivým galvanometrom. Tento prúd

môžeme zosilniť a ovládať ním signalizačné značkovacie, resp. aj triediace zariadenie, ktoré chybné miesta označí, prípadne celú súčiastku vyradí.

Magnetická prášková metóda pri kontrole zvarov sa realizuje v zmysle STN EN ISO 17638 (obr.2.28), pričom úrovne prípustnosti pri magnetickej práškovej metódy hodnotenia zvarových spojov definuje STN EN ISO 23278.



Obr.2.28 Magnetická prášková kontrola zvaru

K magnetoinduktívnym skúšobným metódam patrí aj **skúšanie vírivými prúdmi (ET)**

Metóda vírivých prúdov je založená na nepriamom sledovaní kvality skúšaného materiálu. Jedná sa o bezdotykový spôsob, ktorý je vhodný aj pre neferomagnetické materiály (obr. 3.10). Skúšané objekty ako napr. profily, rúry sú vystavené toku elektrického prúdu indukovaného striedavým magnetickým poľom, ktoré v nich indukuje vírivé prúdy. Intenzita týchto prúdov je najväčšia na povrchu súčiastok a závisí od ich elektrickej vodivosti. Vírivé prúdy vytvárajú vlastné magnetické pole, ktoré spätne pôsobí na budiace pole cievky. Obidve magnetické polia sa vektorovo skladajú. Výsledné magnetické pole závisí od elektrickej vodivosti povrchu, čiže jeho veľkosť sa vplyvom povrchových defektov bude meniť (zmenšovať). Tieto zmeny umožňujú detegovať aj veľmi jemné povrchové trhliny dlhé 0,1 až 0,4 mm.

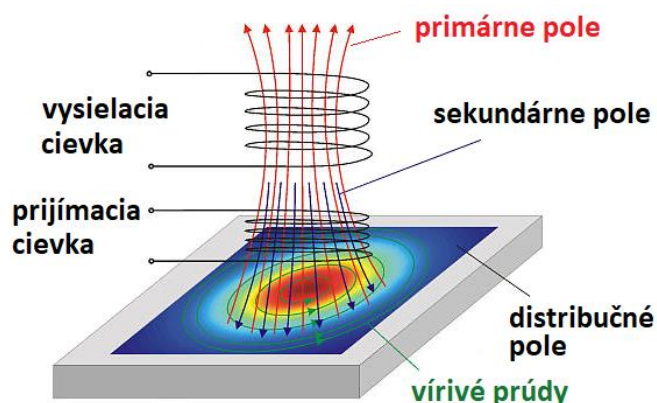
Vyhodnotenie sa vykonáva prostredníctvom napätia:

- **priamo v cievke**, ktorá budí elektromagnetické pole (cievkový systém má iba jedno vinutie a meria sa impedancia tohto vinutia čo do veľkosti a fázy),
- **alebo v druhej meracej cievke**. Cievkový systém má dve vinutia (budiace a meracie) a meria sa amplitúda a fáza napätia na meracom vinutí.

Cievkové systémy môžu byť:

- **priechodzie**, kde skúšaný výrobok prechádza dutinou cievky (tyče, rúrky),

- **príložné**, kde sa cievka prikladá na povrch hodnoteného výrobku (obr.2.29).



Obr.2.29 Skúšanie povrchov vírivými prúdmi

Zariadenia pre kontrolu vírivými prúdmi (ET) pracujú vo frekvenčných rozsahoch od 1 kHz do 1 MHz a môžu byť:

- jednofrekvenčné,
- viacfrekvenčné,
- impulzné.

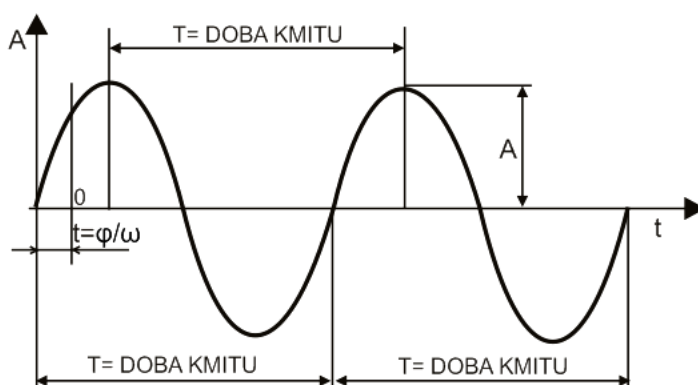
Prednosťou metódy je vysoká rýchlosť skúšania, najmä pri priechodnej metóde. Skúška vírivými prúdmi je závislá od tesného kontaktu medzi sondou a skúšaným povrchom. Netesnosti môžu spôsobovať falošné odozvy. Metódou vírivých prúdov môžeme stanoviť aj odchýlky v chemickom zložení alebo štruktúre materiálu napr. po tepelnom spracovaní a vzhľadom k väzbe mechanických vlastností na štruktúru je možné sledovať aj odchýlky vlastností. Zariadenie funguje na princípe merania zmien permeability, koercivity alebo remanencie.

2.3.4 Ultrazvuková defektoskopia (UT)

Ultrazvuk je mechanické kmitanie častíc prostredia s frekvenciou vyššou ako 20 kHz. V laboratórnych podmienkach do 30 kHz a v praxi do 15 kHz.

Vlnením nazývame pohyb, ktorý vznikol v pružnom prostredí pôsobením kmitajúceho telesa (obr.2.30). V defektoskopii sa na vytvorenie ultrazvukových vln používa piezoelektrický menič. Jeho základom je piezoelektrická doštička (piezo-kryštál) opatrená tenkými kovovými elektródami na ktoré privedieme striedavé elektrické napätie. Doštička bude periodicky meniť svoju hrúbku (resp. aj tvar). Bude vibrovať. Frekvencia platničky je totožná s frekvenciou vysokofrekvenčného napätia. Ak ide o dostatočne vysokú frekvenciu, bude zdrojom ultrazvuku. Ak takúto vibrujúcu doštičku pritlačíme k povrchu nejakej vrstvy, bude doštička vysilať do vrstvy ultrazvukové vlnenie. Najznámejšou piezoelektrickou látkou je kremeň.

Piezoelektrický jav vykazuje však aj turmalín, báriumtitanát a iné. Na povrch kremenného, resp. báriumtitanátového výbrusu sa nanášajú tenké elektródy a to buď pokovovaním vo vákuu, alebo nanosením koloidu striebra a následným vypálením.



Obr.2.30 Schéma kmitajúceho pohybu častíc

Charakteristickou veličinou vlnenia je **vlnová dĺžka „λ“** udávaná v [m], ktorá vyjadruje vzdialenosť, ktorú prebehne vlna v dobe jednej periódy a vypočíta sa podľa vzorca :

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (2.1)$$

kde: c – rýchlosť ultrazvuku,

f – frekvencia,

T – doba kmitu (perióda) v sekundách.

Podstatou ultrazvukovej defektoskopie je odraz ultrazvukových vĺn na rozhraní necelistvosti v kontrolovanom materiáli (dutiny, vtrúseniny, trhliny, studené spoje atď.).

Ak dopadne UZ vlna kolmo (Obr. 3.12) na rozhranie dvoch prostredí 1 a 2 s akustickými vlnovými odpormi $\rho_1 c_1$ a $\rho_2 c_2$, je súčiniteľ odrazu R určený ako pomer odrazeného akustického tlaku P_1 k tlaku dopadajúcemu P :

$$R = \frac{P_1}{P} = \frac{(1-m)}{(1+m)} \quad (2.2)$$

kde:

$$m = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \quad (2.3)$$

Časť dopadajúceho akustického tlaku P prechádza do prostredia 2 a súčiniteľ prechodu D je určený vzťahom:

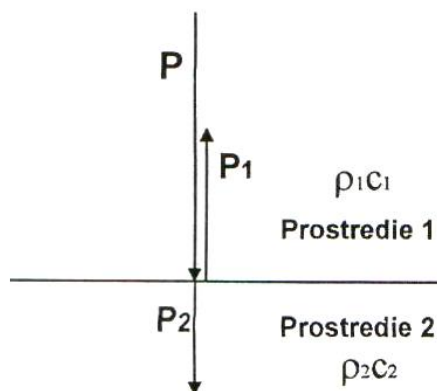
$$D = \frac{P_2}{P} = 1 + R \quad (2.4)$$

Akustické rozhranie tvorí nielen koncová plocha materiálu, ale aj rozhranie materiálov – chyba.

Pri šikmom dopade UZ vlny na rozhranie dvoch prostredí dochádza k jej odrazu, lomu, prípadne aj k transformácii, ak jedno z prostredí je schopné prenášať UZ priečne vlny. Ak dopadne pozdĺžna UZ vlna na rozhranie dvoch prostredí 1 a 2, v každom z nich môžu všeobecne vzniknúť dve zložky, t. j. pozdĺžna a priečna vlna. Vzájomný vzťah uhlov všetkých zložiek meraných od normály k rozhraniu a ich rýchlosť šírenia je daný Snellovým zákonom:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta}{c_{T2}} = \frac{\sin \chi}{c_{T1}} = \frac{\sin \delta}{c_{L2}} \quad (2.5)$$

kde c_{L1} , c_{T1} , c_{L2} , c_{T2} sú rýchlosti šírenia pozdĺžnej alebo priečnej vlny v prostredí 1 resp. 2.



Obr.2.31 Kolmý dopad na rozhranie dvoch rôznych materiálov

Ultrazvukové vlny šírené v prostredí môžu byť:

Pozdĺžne (longitudiálne) – častice kmitajúce po priamkovej dráhe v smere šírenia vlny. Pozdĺžne vlny sa môžu šíriť tuhým, kvapalným aj plyným prostredím. Rýchlosť šírenia pozdĺžnej vlny v neohraničenom prostredí sa označuje c_L a vyjadrí sa vzťahom:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (2.6)$$

kde: E – modul pružnosti,

ρ – hustota prostredia,

μ – Poissonove číslo.

Priečne (transverzálne) – tieto vlny sa môžu šíriť v takom prostredí, ktoré kladie odpor namáhaniu šmykom - iba v tuhom prostredí. Častice prostredia kmitajú po priamkovej dráhe, avšak kolmo na smer šírenia. Pri šírení priečných vĺn nevzniká zahusťovanie a zriedenie prostredia, ale častice sa navzájom iba posúvajú. Preto sa pri šírení priečnej vlny nemení objem prostredia. Rýchlosť šírenia priečnej vlny v neohraničenom prostredí sa označuje c_T a vyjadrí sa vzťahom:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} \quad (2.7)$$

kde: E – modul pružnosti,

ρ – hustota prostredia,

μ – Poissonove číslo (ocel' $\mu = 0,28$).

Povrchové (Rayleighove) – patria k priečnym vlnám, ktorých častice kmitajú okolo rovnovážnej polohy po eliptickej dráhe na povrchu tuhých látok. Pôsobí na nich sila kolmá na smer šírenia, ktorá prevyšuje silu pôsobiacu v smere šírenia. V hĺbke rovnajúcej sa dĺžke priečnej vlny povrchová vlna zaniká.

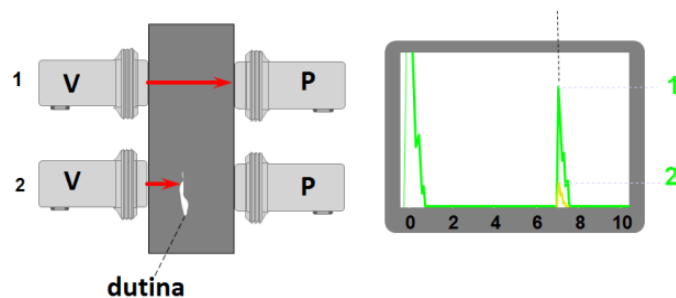
Doskové (Lambove) – používajú sa na skúšanie dosiek a drôtov. Vyskytujú sa ako vlny ohybové a dilatačné.

Vzhľadom na krátke vlnové dĺžky možno ultrazvuk vysielat', podobne ako svetlo, v ostro ohraničených zväzkoch, pričom preň platia zákony dopadu, odrazu, ohybu, lomu a absorpcie. Prechodom vlnenia prostredím dochádza k absorpcii vlnenia vnútorným trením (zmena energie na tepelnú), na rozhraní dvoch prostredí sa časť vlnenia odráža späť a časť preniká do druhého prostredia a mení svoj smer – láme sa, ak bol uhol dopadu iný než 90°. K odrazu a k lomu príde iba vtedy, ak má rozhranie väčší rozmer ako je vlnová dĺžka vlnenia, v opačnom prípade príde k ohybu. Odraz na rozhraní závisí na akustickom odpore oboch prostredí.

Rozhranie kov – vzduch odráža 100 % vlnenia, preto sa medzi vysielacou sondou a materiálom používa akustická **väzobná látka** – olej, vazelína, voda a pod.

Ultrazvuková defektoskopia má tri základné skúšobné metódy:

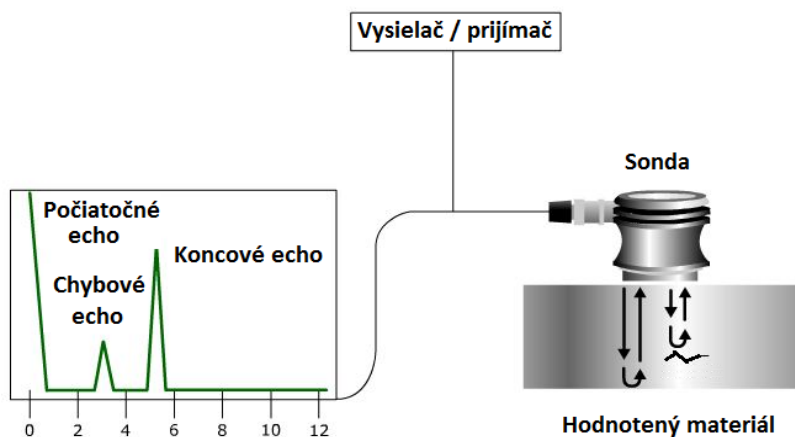
Prechodová metódu, ktorá je založená na princípe vysielania ultrazvukových vln z jednej strany kontrolovaného predmetu vysielacou sondou a zachytávania úbytku v dôsledku poruchy ultrazvukovej energie na druhej strane súsovo umiestnenou prijímacou sondou. Metóda sa dá použiť na kontrolu tých objektov, ktoré sú z oboch strán prístupné (obr.2.32). Chyba v materiáli vytvorí zmenu (pokles) akustického tlaku a vytvorí tzv. ultrazvukový tieň. Metóda sa aplikuje iba na súčiastkach s konštantnou hrúbkou. Skúšanie sa realizuje pomocou impulzných ultrazvukových defektoskopov.



Obr.2.32 Princíp prechodovej metódy

V – vysielacia sonda, P – prijímacia sonda, vpravo chybové echo

Odrázovú metódu, ktorá sa používa na kontrolu súčiastok prístupných len z jednej strany. Je najpoužívanejšou metódou pri ultrazvukovej defektoskopii (obr.2.33). Odrázová metóda umožňuje určiť hĺbku resp. vzdialenosť necelistvosti. Podľa výšky echa, veľkosť chyby. Umožňuje automatizáciu a mechanizáciu skúšania. Skúšaním z viacerých smerov je možné určiť charakter nehomogenity. Používajú sa dve alebo len jedna sonda (táto pracuje súčasne ako vysielateľ i prijímač). Vysielacia sonda vysiela krátke impulzy vlnenia, ktoré sa odrážajú od rozhraní a vracajú sa do prijímača.



Obr.2.33 Princíp odrazovej metódy

Časový priebeh impulzov sa zaznamenáva na obrazovke osciloskopu. Časová vzdialenosť medzi počiatočným a koncovým echom zodpovedá dvojnásobnej hrúbke materiálu. V prípade, že porucha sa vyskytuje tesne pod povrchom (bližšie než je časová šírka E_p), poruchové echo by sa dostalo do tzv. mŕtvej zóny a nedá sa zaregistrovať.

Rezonančnú metódu, ktorá sa využíva prevažne na meranie hrúbok materiálov od 0,1 do 100 mm pomocou ultrazvukových impulzov, ktorých frekvencia sa plynulo mení. Keď sa hrúbka predmetu rovná celému násobku $\lambda/2$ vznikne v predmete stojaté vlnenie, predmet sa dostáva do vlastnej rezonancie (základnej alebo vyššej harmonickej). Táto metóda bola nahradená odrazovou metódou.

Rozhranie **kov – vzduch** odráža 100 % vlnenia, preto sa medzi vysielacou sondou a materiálom používa akustická **väzobná látka** – olej, vazelína, voda a pod.

Drsnosť povrchu nemá byť väčšia než 10 % vlnovej dĺžky.

Kalibrácia defektoskopov sa realizuje podľa mierok (obr.2.34)



Obr.2.34 Kalibračné mierky pre kalibráciu defektoskopov

Podľa konštrukcie sa sondy delia na :

- priame (vysielajúce pozdĺžne vlny kolmé na povrch) (obr.2.35 a),
- uhlové (vysielajúce pozdĺžne vlny) (obr.2.35 b),
- jednoduché (obsahujú iba jeden menič, ktorý je vysielateľom aj prijímačom),
- dvojité.



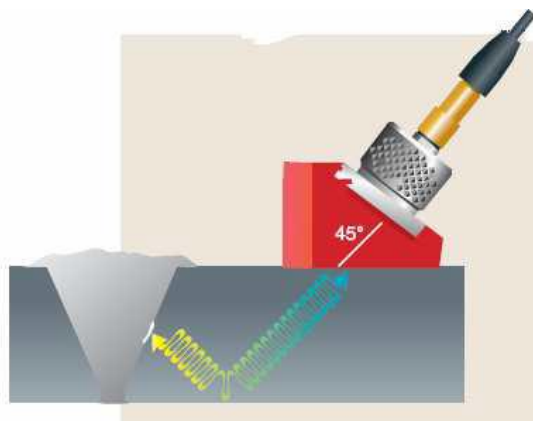
a)

b)

Obr.2.35 Sondy pre ultrazvukovú defektoskopiu

a) priame sondy, b) uhlové sondy

Princíp hodnotenia akosti zvarov pomocou uhlovej sondy je dokumentovaný na obr.2.36 a obr.2.37.



Obr.2.36 Aplikácia odrazovej metódy pri hodnotení zvarov



Obr.2.37 Kontrola tupého zvarového spoja

Skúšanie austenitických materiálov

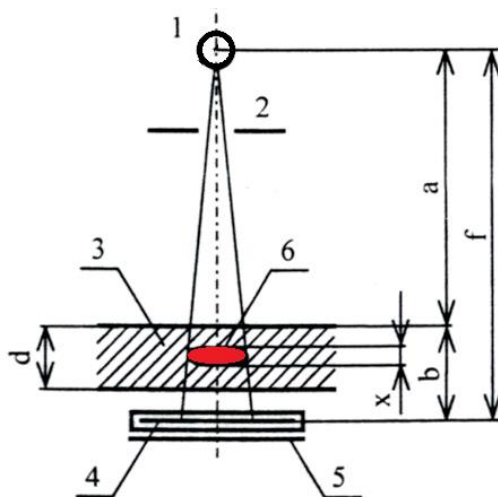
Ich skúšanie je komplikované z dôvodu veľkého rozptylu ultrazvuku v štruktúre austenitu. Metódy používané pri hodnotení feritických ocelí sa využiť nedajú, nakoľko dochádza k rozdielom v rozptyle ultrazvukových vln a lomu na hraniciach zŕn. Austenitické ocele výrazne vplývajú na útlm a rýchlosť šírenia vln. Pri hodnotení austenitických materiálov sa používajú pozdĺžne ultrazvukové vlny do 4 MHz vysielané dvojitémi uhlovými sondami s vyšším fokusačným účinkom ako u jednoduchých sond a používaný je uhol šírenia vln 45° . Veľkosť nehomogenity závisí na dosiahnutom pomere veľkosti chybového signálu a šumu vyvolaného štruktúrou.

Ultrazvuková defektoskopia poskytuje veľmi presnú, rýchlu a pomerne jednoduchú kontrolu materiálov bez obmedzenia kontrolovaných hrúbok. Aplikuje sa pri kontrole, odliatkov, výkovkov, zvarov, tepelne spracovaných materiálov a pod.

2.3.5 Prežarovacie metódy hodnotenia materiálov (RT)

Prežarovacie defektoskopické metódy realizované v zmysle STN EN 13068-3 využívajú fyzikálne vlastnosti ionizujúceho elektromagnetického žiarenia. Sú založené **na zoslabení intenzity elektromagnetického žiarenia** (s vhodnou vlnovou dĺžkou) **pri prechode skúšaným materiálom**. Elektromagnetické žiarenie (radiácia) je také šírenie, ktoré sa uskutočňuje nezávisle od hmotnosti prostredia. Radiácia sa šíri aj vo vákuu. Elektromagnetické žiarenie má z fyzikálneho hľadiska vlnový aj korpuskulárny charakter a jeho vlnové dĺžky λ má rozsah od 10^5 po 10^{-15} m, zahrňujúce všetky druhy žiarenia. Pomocou tohto žiarenia sa dajú zviditeľniť a dokumentačne zaznamenať vnútorné defekty v ich reálnej podobe.

Princíp prežarovacej metódy je na obr.2.38. Zo zdroja žiarenia (röntgen, betatrón, gama žiarič) sa cez clonu vysiela zväzok lúčov na skúšaný materiál alebo súčiastku, ktoré sú v určenej vzdialenosti od ohniska zdroja.



Obr.2.38 Princíp prežarovacej rádiografickej metódy

- 1 – zdroj žiarenia, 2 – filter, 3 – vzorka, 4 – film, 5 – olovená platňa, 6 – vnútorný defekt,
a – vzdialenosť vzorky od zdroja, x – veľkosť chyby, b – vzdialenosť filmu od vzorky,
d – hrúbka vzorky, f – ohnisková vzdialenosť,

Ohnisková vzdialenosť f je vzdialenosť filmu od ohniska zdroja. Film je umiestnený za skúšaným predmetom v kazete, ktorá ho chráni pred osvetlením. Po exponovaní a vyvolaní sa na filme objaví konkrétny obraz defektu. Citlivosť a ostrosť obrazu sa zvyšuje rôznymi zosilňovacími fóliami, ktoré môžu byť fluorescenčné alebo fluorometalické.

Zdrojom žiarenia môžu byť **röntgenové lampy** (mäkšie röntgenové žiarenie energie 5 až 500 keV podľa druhu röntgenové lampy a urýchľovacieho napätia), **betatróny** (príp. iné urýchľovače – dávajú tvrdé röntgenové žiarenie s energiou 0,5 až 35 MeV), **rádioizotopy** ^{60}Co , ^{126}Ir , ^{137}Cs , ^{170}Tm , prípadne ^{222}Ra alebo **zmes soli** ^{226}Ra a mezothória, ^{169}Yb , ^{75}Se (žiarenie γ s energiou desiatok až jednotiek MeV).

Pri vyhodnocovaní vnútorných chýb sa používa:

- **röntgenová defektoskopia**, využívajúca volfrámovú katódu, ktorá je zdrojom elektrónov, pričom ich urýchlenie sa vykonáva pripojením vysokého napätia (od 5 do 400 kV) medzi katódu a anódu. Na anóde je umiestnený terčik (obyčajne z volfrámu alebo platiny) zalisovaný do medenej anódy pre zabezpečenie dobrého odvodu vznikajúceho tepla. Zabrzdením urýchlených elektrónov na povrchu terčika anódy vzniká X žiarenie rôznych vlnových dĺžok ako superpozícia charakteristického žiarenia X (závislého na materiáli terčika) a brzdného žiarenia. Z týchto dôvodov má X žiarenie vznikajúce v röntgenovej lampe spojité spektrum energií podobne ako viditeľné spektrum. Röntgenovou defektoskopiou je možné kontrolovať oceleové plechy do hrúbky cca 75 mm.
- **gama defektoskopia** využíva žiarenie rádioaktívnych izotopov, ktoré vzniká pri rozpade ich jadier. Používané je ^{137}Cs , ^{175}Tm , ^{192}Ir , ^{60}Co a iné. Vlnové dĺžky žiarenia sú 10^{-11} m až 10^{-13} m. Výhodou je jednoduchosť obsluhy, mobilnosť a nezávislosť na elektrickej energii avšak intenzitu žiarenia nie je možné regulovať. Zariadenia pre gama defektoskópiu majú komoru žiariča - izotopu vyrobenú s vysokoabsorbčnými materiálmi (olova, zliatin volfrámu s uránom a pod. - izotopu (obr.2.39). Gama defektoskopiou je možné prežiariť oceleové výrobky do hrúbky cca. 150 mm.
- **betatrónová defektoskopia** využíva žiarenie vznikajúce v betatróne, čo je urýchľovač elektrónov emitovaných z katódy, ktoré sú účinkom premenného magnetického poľa elektromagnetov napájaných striedavým prúdom o frekvencii 500 Hz urýchľované na kruhovej dráhe konštantného polomeru. Pri dopade týchto elektrónov na anódu (podobne ako v röntgenovej lampe), vzniká žiarenie veľmi malej vlnovej dĺžky (vysokej energie). Betatrónová defektoskopia sa využíva na výrobky s vysokými prevádzkovými parametrami ako sú rotory turbín, parogenerátorov, hrubostenných tlakových nádob jadrových reaktorov a pod. Betatróny s energiou $49,7 \cdot 10^{-13}$ umožňujú prežiariť oceleové výrobky do hrúbky 500 a u lineárnych urýchľovačoch až do 600 mm pri krátkom čase expozície.
- **neutrónová defektoskopia** využíva pre vznik zväzkov termálnych (pomalých) neutrónov statické jadrové reaktory alebo izotopy (napr. ^{252}Cf) s možnosťou ľahkého prenosu. V porovnaní s RTG a gama žiarením je absorpcia neutrónov práve opačná (vodík spôsobuje vysokú absorpciu). Pre neutróny sú účinné prierezy látok obsahujúcich vodík ďaleko väčšie ako pre X a gama žiarenie. Dokonca väčšie ako pre olovo a iné ťažké kovy.



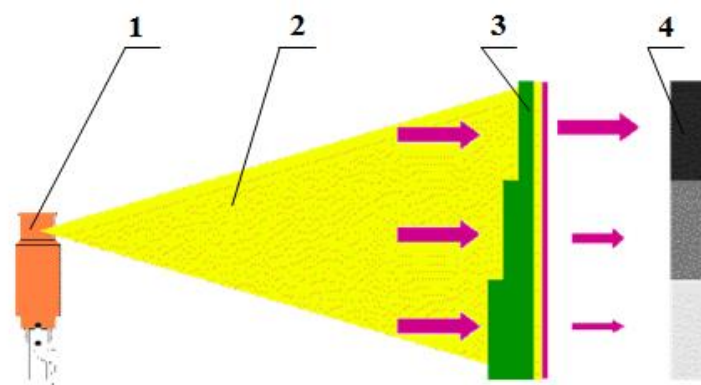
Obr.2.39 Gama defektoskop DUAL 120 (Se-75 + Ir-192)

Vo všetkých uvedených skupinách sa podľa spôsobu indikácie intenzity prechádzajúceho žiarenia cez skúšaný materiál používajú tri základné spôsoby prežarovania:

- **rádiografia** je snímkovácia prežarovacia metóda (Obr. 3.20). Je v praxi najpoužívanejšou metódou. Využíva fotochemické účinky elektromagnetického žiarenia, pričom na fotografickom filme s vrstvou Ag asi 14 gm^{-2} vzniká latentný obraz defektu (obr.2.40). Miesta s najmenšou absorpciou sú na filme najtmavšie. Výhodou metódy je trvalý záznam kontrolovaného materiálu na rádiograme. Podľa použitého zdroja žiarenia potom v praxi hovoríme o röntgenograme (pri použití röntgenového prístroja) alebo gamagramu (pri použití žiaričov) alebo o betatrónograme (pri použití betatrónu). Obor prežiariteľných hrúbok ionizujúcim žiarením je v súčasnosti pri oceli do 500 mm. Na veľkosť najmenej zistiteľnej chyby na rádiograme majú vplyv predovšetkým tieto faktory:
 - energia ionizujúceho žiarenia,
 - neostrosť zobrazenia chyby,
 - rozptýlené žiarenie,
 - zrnitosť detektora,
 - nevhodné pozorovacie podmienky pri vyhodnotení rádiogramu.

Rádiografia neumožňuje priebežnú kontrolu počas pohybu súčiastky.

Prechodom žiarenia cez materiál dochádza k zoslabeniu jeho intenzity z I_0 na I_d žiarenia absorpciou. Absorpcia je dej, pri ktorom sa celá energia fotónov alebo časť žiarenia odovzdá atómom absorbujúcej látky, pričom dochádza k transformácii energie fotónov a časti žiarenia na iné formy energie.



Obr.2.40 Rádiografická metóda

1 – zdroj žiarenia, 2 – žiarenie, 3 – hodnotený materiál, 4 – fotografický film

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu h_0} \quad (2.8)$$

kde: I_d – je hustota toku častíc ionizujúceho žiarenia, ktoré prešli hrúbkou materiálu h_0 skúšaného objektu,

I_0 – hustota toku častíc dopadajúcich na skúšaný objekt,

μ – lineárny súčiniteľ zoslabenia,

h_0 – hrúbka materiálu.

Súčiniteľ zoslabenia μ udáva celkové zoslabenie pozostávajúce zo zoslabenia fotoefektom τ , Comptonovým rozptylom σ , prípadne tvorbou tzv. párov γ . Celkový lineárny súčiniteľ zoslabenia bude:

$$\mu = \tau + \sigma + \gamma \quad (2.9)$$

Hodnota tohto súčiniteľa závisí od parametra žiarenia a od druhu prežarovaného materiálu v zmysle vzťahu:

$$\frac{\mu}{\rho} = C \cdot \lambda^3 Z^4 \quad (2.10)$$

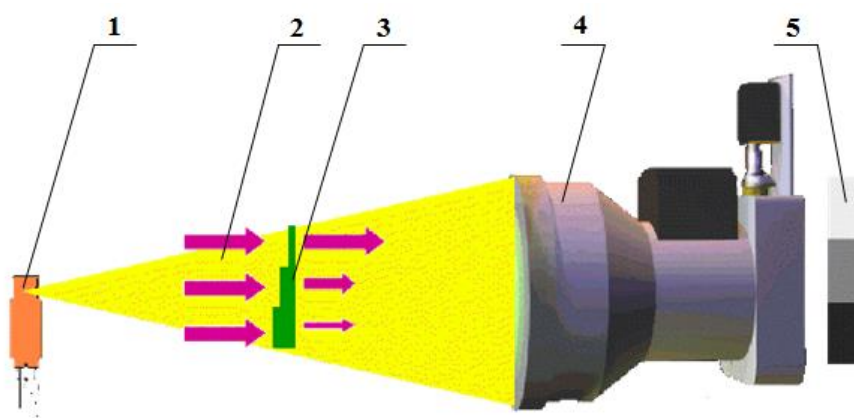
kde: C – konštanta vplyvu zmien absorpčného žiarenia na hranách,

λ – vlnová dĺžka,

Z – atómové číslo prežarovaného materiálu.

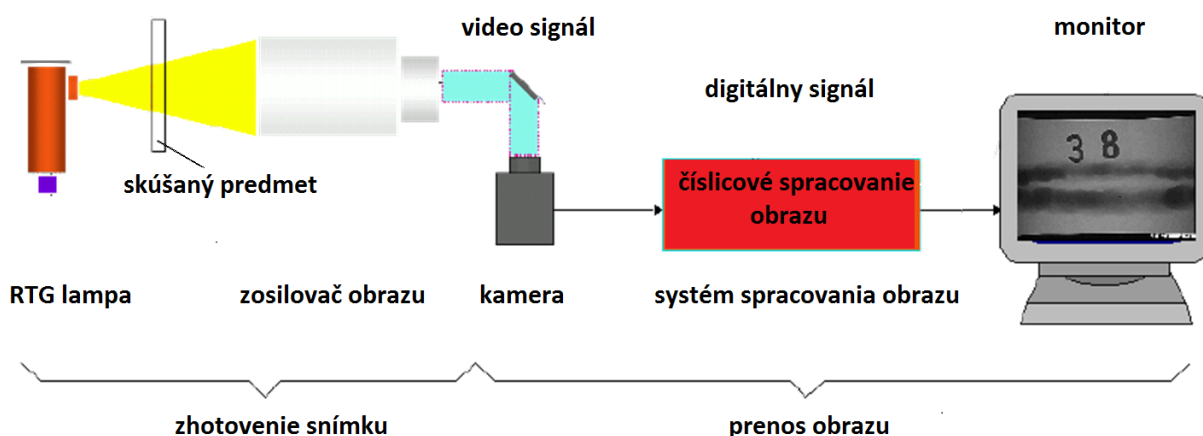
Citlivosť rádiografie je možné zvýšiť použitím zosilňovačov alebo zvýrazňujúcich fluorescenčných, kovových alebo fluorometalických fólií.

- **rádioskopia** je metódou prežarovacieho hodnotenia prítomnosti vnútorných chýb pri ktorej sa využívajú fluorescenčné účinky elektromagnetického žiarenia pomocou vizualizačných zariadení zachytené fluorescenčným štítom obr.2.41 resp. pomocou röntgentelevízneho systému obr.2.42. Pracuje so zväčšením, miesta s najmenšou absorpciou sú na filme najsvetlejšie. Umožňuje hodnotenie a zaznamenávanie výsledkov skúšok v reálnom čase a zmenu podmienok prežarovania. Využívaná je v sériovej výrobe napr. pri kontrole kvality zvarov špirálovo zváraných rúr, štúdiu dynamiky procesov liatia, tuhnutia a pod.



Obr.2.41 Rádioskopická metóda

Je potrebné malé ohnisko zdroja; 1 – zdroj žiarenia, 2 – žiarenie, 3 – materiál, 4 – optické zariadenie pre zväčšenie obrazu, 5 – film



Obr.2.42 Röntgentelevízny systém

- **radiometria** využíva meranie lokálnych zmien intenzity žiarenia. Intenzitou žiarenia sa indikujú defekty žiarenia a zaznamenávajú pomocou dozimetrických prístrojov

(plynových počítáčov, Geiger-Müllerovej trubice proporcionálnych počítáčov, scintilačných detektorov, polovodičových detektorov, gama kamery a pod.) Princíp identifikácie chýb materiálov je založený na meraní intenzity lúčov žiarenia, ktoré prešli skúmaným objektom a ich intenzitu je možné merať pomocou ionizačného prúdu v tzv. ionizačnej komôrke.

Z hľadiska interakcie ionizujúceho žiarenia s hmotou je možné rádiometrické metódy rozdeliť na:

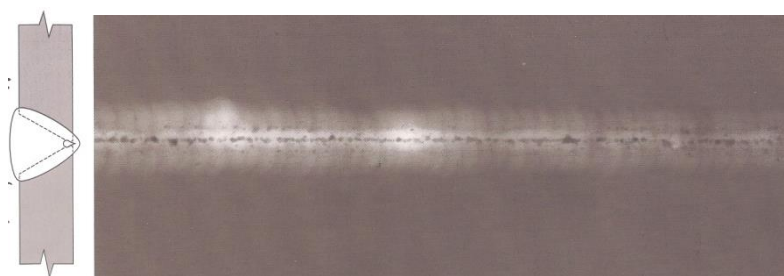
- **absorbčnú prechodovú metódu** (využívajúcu žiarenie gama, X beta a neutróny). Používaná je najmä na meranie hrúbok materiálov. Na rozdiel od rádiografických metód nie je potrebné uvažovať s rozptylovým faktorom vo vyjadrení zákona zoslabenia, lebo je volená „dobrá geometria“, alebo geometria úzkeho zväzku, ktorá zaručuje odstránenie rozptýlených častíc z meraného zväzku žiarenia.

- **rozptylovú metódu** (žiarenie gama, X beta a neutróny). Využíva rozptyl ionizujúceho žiarenia pri interakcii s materiálom naspäť do polroviny zdroja žiarenia (napr. pri žiarení gama ide o Comptonov rozptyl). Metóda je vhodná pre meranie hrúbok povrchových vrstiev (povlakov, návarov, žiarových nástrekov, plátovaných vrstiev, tepelne spracovaných vrstiev, náterov a pod.), hrúbok objektov prístupných len z jednej strany a detekciu podpovrchových objemových chýb.

- **moderačnú metódu** (využívajúcu neutróny). Metóda býva aplikovaná pri meraní vlhkosti, resp. na detekciu vodík obsahujúcich materiálov. Je založená na moderácii (znížení energie) neutrónov pri rozptyle na jadrách vodíka. Mierou zmeny vlhkosti je potom zmena energetického spektra zväzku neutrónov vysielaných do materiálu (zvýraznenie nízkoenergetických zložiek v spektre).

Rádiometrická metóda je vhodná pre kontrolu v sériovej výrobe, avšak druh a rozmer defektu sa dá stanoviť iba približne.

V praxi je najpoužívanejším spôsobom prežarovacích skúšok kontrola zvarových spojov pomocou je rádiografickej metódy. Výsledkom hodnotenia rádiogramu je stanovenie druhu, veľkosti, množstva, eventuálne polohy skrytých defektov. Pri kontrole zvarových spojov je vyhodnotenie rádiogramu spojené s pridelením klasifikačného stupňa (obr.2.43). Rádiogramy sú vyhodnocované podľa STN EN 25580. Kvalita zobrazenia sa hodnotí pomocou drôtenej alebo dierovej mierky v súlade s STN EN ISO 19232-1 alebo STN EN ISO 19232-2.



Obr.2.43 Rádiogram V zvaru s identifikovanými pórmí v koreni zvaru

Prežarovacími metódami je možné detegovať vnútorné chyby materiálov ako póry, plynové dutiny, červovité a pretiahnuté dutiny, kovové a nekovové inklúzie, trhliny v závislosti od ich výšky, vetvenia, šírky roztvorenia a jej orientácia vzhľadom na smer a techniku prežarovania. Obmedzene je možnosť identifikácie studeného spoja a neprevareného koreňa u zvarov. Identifikácie týchto chýb si vyžadujú dlhoročné skúsenosti a zručnosti certifikovaného personálu v rozsahu min. RT2. Skúšanie pomocou prežarovacích metód musí prebiehať v zmysle platných predpisov pri dodržaní prísnych predpisov BOZP, vzhľadom k rizikám spojených so žiarením.

2.3.7 Rozsah použitia defektoskopických metód

V tab.2.2 je spracovaný prehľad použiteľnosti jednotlivých defektoskopických metód pri hodnotení chýb zvarových spojov.

Tabuľka 2.2 Prehľad vybraných typov chýb a možnosti ich identifikácie

Defektoskopické skúšky	Dutiny					Inklúzie			Porušenie súvislosti			Defekty štruktúry		
	bubliny	stiahnutiny	mikrostiahnutiny	mikrobubliny	neprevarený koreň zvaru	troskovitosť	nekovové inklúzie	kovové inklúzie	povrchové trhliny	vnútorné trhliny	studené spoje	chemická nerovnorodosť	miestne hrubé zrnno	štruktúrne vruby
vizuálne	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-
kapilárne	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	+	-	-	-
ultrazvukové	●	+	●	●	●	●	●	-	-	●	●	-	+	+
prežarovacie	●	●	+	+	●	●	●	+	-	-	-	-	-	-
magnetické	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	●	-	-	-
indukčné	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	+	+	-	●

Indikácia chýb: ● spoľahlivá, + obmedzená, - neúčinná

Z prezentovaného prehľadu vyplýva, že neexistuje univerzálna nedeštruktívna defektoskopická metóda, ktorou by bolo možné odhaliť všetky typy chýb. Pri NDT kontrole sa akosť zvarových spojov hodnotí vždy kombináciou min. dvoch metód.

2.4 Štruktúrna analýza materiálov

Analýza štruktúry materiálov má veľký význam pri kontrole materiálov. Štruktúru materiálov, teda prejavy ich kryštalickej stavby, skúmame na vhodne pripravenom rovinnom reze alebo lomovej ploche. Metódy skúmania štruktúry kovových materiálov sa označujú pojmom metalografické metódy. Tieto metódy slúžia na komplexný popis štruktúry, t.j. na identifikovanie a definovanie všetkých jej fáz.

Rozdeľujeme ich na:

- makroskopickú analýzu
- mikroskopickú analýzu.

2.4.1 Makroskopická analýza

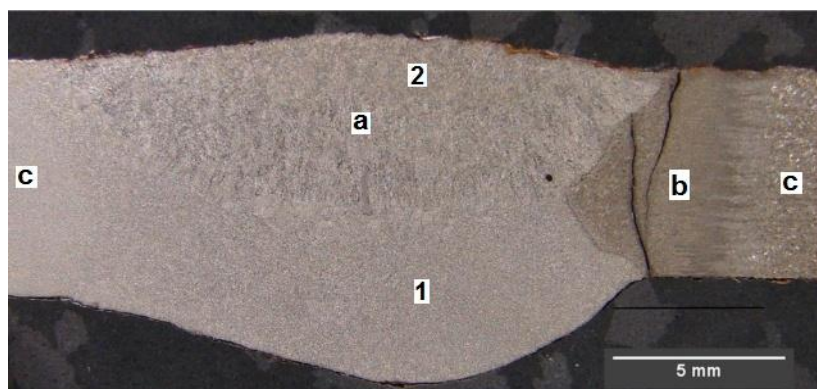
Ak prejavy vnútornej stavby kovov a zliatin sú viditeľné okom alebo lupou ide o makroštruktúru (pojem makroštruktúra zvyčajne zahŕňa aj štruktúru pozorovanú mikroskopicky pri zväčšeniach maximálne 50 x). Typické makroskopické pozorovania sa vykonávajú priamo na povrchu skúmaného materiálu (napr. na lomovej ploche), alebo sa z tohto materiálu vyhotoví rovinný výbrus, ktorý sa chemicky upravuje. Môžeme ich rozdeliť do týchto skupín:

- **Makrofraktografické rozbor**y, pri ktorých sa hodnotia lomové plochy. Zväčša sa skúmajú čerstvé lomy (ihneď po porušení). Najčastejšie sa určuje *charakter lomu* (krehký, húževnatý, únavový a pri zmiešaných lomoch stupeň kryštalickosti, t.j. pomer plochy s kryštalickými časticami k celkovej ploche lomu), pričom sa vychádza z charakteristických štruktúrnych znakov alebo z tvaru lomovej plochy (napr. tvar krátera po statickej skúške ťahom).
- **Kontrola celistvosti materiálu** na zisťovanie povrchových trhlín a vnútorných riedín a pórov. Kým v prvom prípade ide o vizuálnu kontrolu neupraveného povrchu, v druhom prípade zvyčajne treba zhotoviť výbrus a použiť leptanie (pôsobenie vhodne zvoleným chemickým činidlom na povrch skúšanej vzorky). Leptaním sa zafarbí pórovité miesta.
- **Kontrola chemickej nerovnomernosti**, čiže kontrola nerovnomerného rozloženia niektorých prvkov alebo štruktúrnych súčastí v makroskopickom meradle. Všetky tieto

skúšky sú založené na použití vhodného leptadla. Najmä pri kontrole liatej ocele možno vyvolať (zviditeľniť) dendritickú štruktúru.

- **Makroštruktúra zvarov a povrchovo tvrdených vrstiev** sa kontroluje opäť na vhodne leptaných výbrusoch. Makroskopické pozorovania umožňujú aj kontrolu rovnomernosti a hrúbky povrchovo kalených a chemicko-tepelne upravovaných vrstiev.

Na obr.2.44 je makroskopický pohľad na zvarový spoj, kde môžeme rozlíšiť tri oblasti: a - oblasť zvarového kovu, ktorá vzniká natavením prídavného a časti základného materiálu v procese zvarovania, b - tepelne ovplyvnenú oblasť základného materiálu, v ktorej dochádza v dôsledku tepla pri zvaraní ku zmenám štruktúry, c - oblasť základného materiálu, ktorá si zachováva svoju pôvodnú štruktúru počas zvarovania. Zvar bol vyhotovený ako dvojvrstvový, pozostáva z koreňovej húsenice 1 a z krycej húsenice 2, v ktorej môžeme pozorovať vysokú orientovanosť štruktúry. Z obrázku je vidieť, že v dôsledku namáhania došlo k porušeniu zvarového spoja. Lomová plocha prebieha cez tepelne ovplyvnenú oblasť.



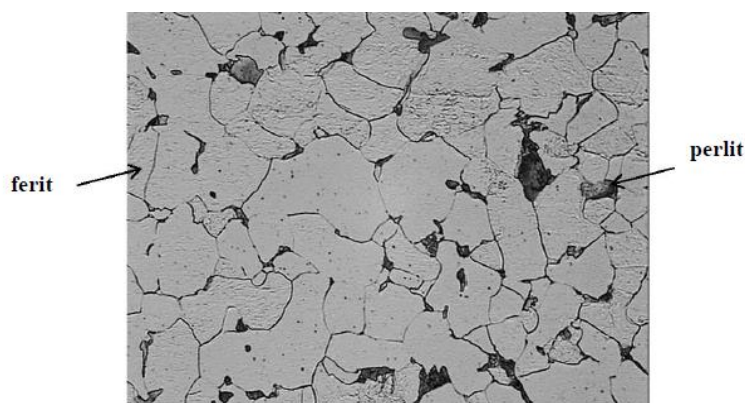
Obr.2.44 Makroštruktúra zvarového spoja

2.4.2 Mikroskopická analýza

Mikroštruktúru materiálov pozorujeme na vzorkách pomocou svetelného alebo elektrónového mikroskopu pri zväčšeniach väčších ako 50 - násobných. Príprava vzorky, ktorú nazývame **metalografický výbrus**, zahŕňa nasledujúce operácie:

- odber a úprava vzorky,
- brúsenie,
- leštenie vzorky a
- leptanie vzorky (vyvolanie štruktúry materiálu).

Metalografický výbrus sa pripravuje brúsením ručne alebo mechanicky na brúsnych papieroch (s rozličnou zrnitosťou) za mokra. Ďalšou operáciou je leštenie ručne alebo mechanicky, buď na rotujúcich textilných kotúčoch napustených vhodnými leštiacimi prostriedkami - mechanické leštenie, alebo anódovým rozpúšťaním vzorky - elektrolytické leštenie, resp. pôsobením vhodných činidiel, rozpúšťajúcich vystupujúce nerovnosti povrchu - chemické leštenie (používa sa na Cu, Pb, Al).



Obr.2.45 Feriticko – perlitická oceľ s obsahom uhlíka 0,06 % C (leptené Nitalom)

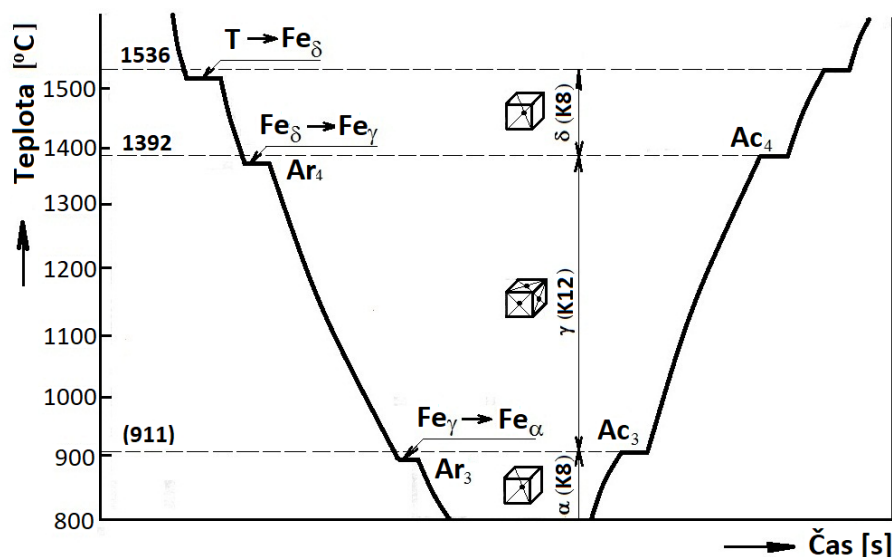
Vyvolanie štruktúry materiálu - leptanie, je dej, pri ktorom na povrchu výbrusu vzniká priestorový reliéf, a to buď rozpúšťaním materiálu v miestach s najnižšou väzbovou energiou iónov pôsobením vhodných chemikálií - chemické leptanie, alebo rozpúšťaním povrchových vrstiev v potenciálnom poli vo vhodnom elektrolyte - elektrolytické leptanie. Podstatou procesu je zviditeľnenie štruktúry a jej jednotlivých fáz. Na obr.2.45 je feriticko perlitická štruktúra ocele s obsahom uhlíka 0,06 % C v leptanom stave.

3 TECHNICKÉ ZLIATINY ŽELEZA

Zliatiny železa s uhlíkom sú najrozšírenejšími technickými zliatinami. V súčasnej dobe poznáme asi 20000 zliatin technických kovov. Z toho 12000 zliatin železa s legujúcimi prvkami ako C, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ta, Ti, Zr, a i. Zliatiny železa - ocele a liatiny, tvoria základné konštrukčné materiály strojárskoho priemyslu. Vyznačujú sa nielen výbornými mechanickými vlastnosťami, ale aj výhodnou cenou. Vo všetkých zliatinách je prítomný uhlík a jeho obsah výrazne mení ich štruktúru a vlastnosti. Základom štúdia týchto zliatin je preto diagram Fe – C v stabilnej alebo v metastabilnej forme.

3.1 Sústava železo - uhlík

Komponenty tejto sústavy tvorí čisté železo a uhlík. Čisté železo – technické má teplotu tavenia $1536 \pm 5^\circ\text{C}$. Má nízke mechanické vlastnosti, je mäkké, tvárne ($R_m = 180 - 220 \text{ MPa}$, $A = 50 \%$, $Z = 85 \%$, tvrdosť $HB = 60$). Železo v závislosti od teploty má dve alotropické modifikácie, ktoré sa na krivke ochladzovania prejavujú zádržnými čiarami. Pri ochladzovaní tavenina za konštantnej teploty kryštalizuje na Fe_δ s kubickou priestorovo centrovanou mriežkou - K8, obr.3.1. Kryštalické Fe_δ pri teplote A_4 prekonáva alotropickú premenu a dochádza ku prekryštalizácii Fe_δ na Fe_γ s mriežkou K12. Rozdiel teplôt transformácií Fe na krivke ohrevu a ochladzovania (A_c , A_r) sa nazýva teplotná hysterézia. Na krivke ohrevu (ochladzovania) železa sa objavuje pri teplote 768°C ďalšia zádržná čiara. Pri nej nedochádza k zmene modifikácie, ale ide o tzv. Curieho teplotu, pri ktorej Fe_α stráca pri ohreve feromagnetické vlastnosti a mení sa na paramagnetickú látku.



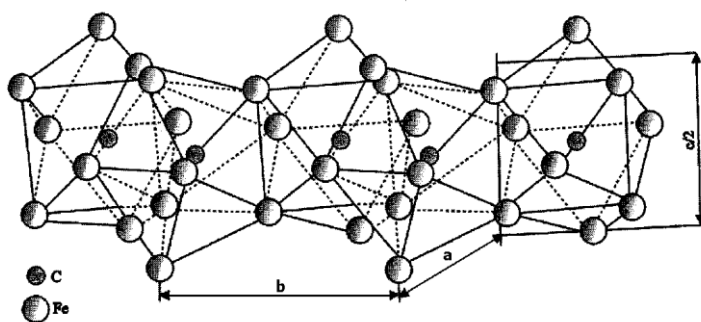
Obr.3.1 Krivka ohrevu a ochladzovania čistého železa, index c – ohrev, r - ochladzovanie

Na vlastnosti zliatin železa má najväčší vplyv uhlík. Ako zložka rovnovážnej sústavy Fe – C vystupuje buď ako chemická zlúčenina so železom Fe_3C nazývaná **cementit**, alebo ako voľný uhlík (C) nazývaný **grafit**.

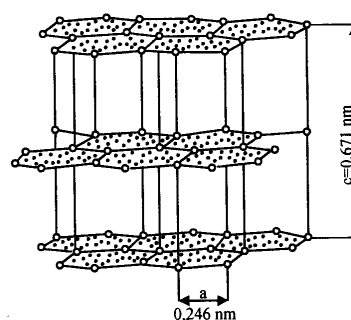
Cementit – Fe_3C je typická intermediárna fáza s obsahom 6,67 % C. Má zložitú kryštalickú mriežku (rhombická sústava) – obr.3.2. Je veľmi tvrdý (asi 800 HV) a krehký, netvárný. Z termodynamického hľadiska je cementit fázou metastabilnou a za vhodných podmienok sa rozpadá na železo a grafit:



Tento proces nazývame priama **grafitizácia**.



Obr.3.2 Kryštalická mriežka cementitu



Obr.3.3 Kryštalická mriežka grafitu

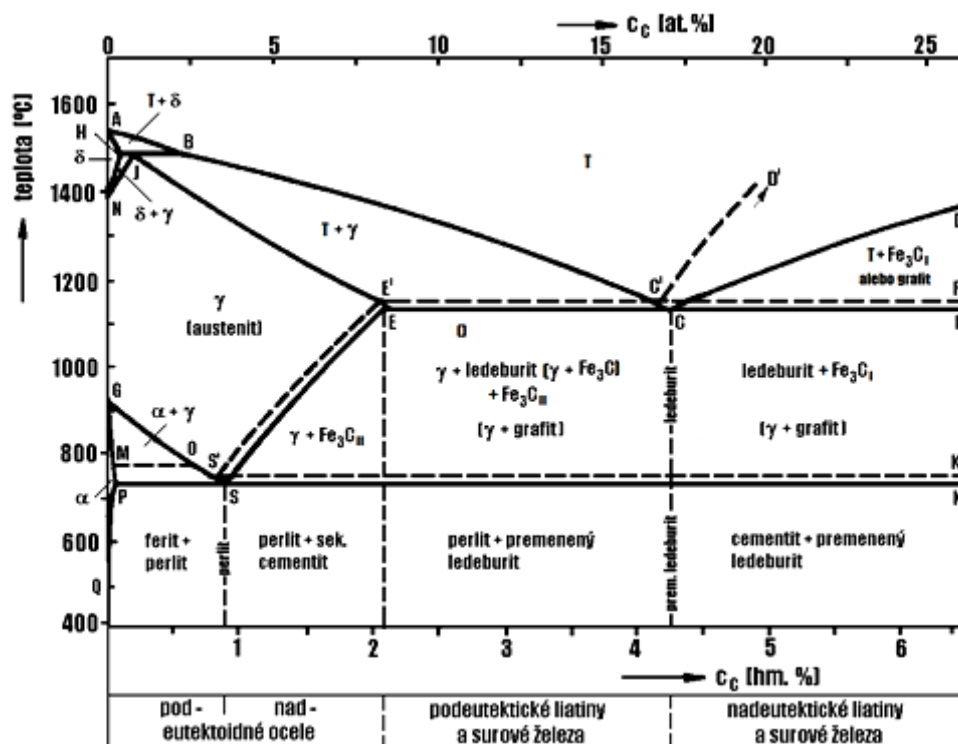
Grafit je elementárny uhlík a kryštalizuje v hexagonálnej sústave, obr.3.3. Je mäkký, pevnosť a tvárnosť v porovnaní so železom je nepatrná ($R_m = 10 - 20 \text{ MPa}$). Z termodynamického hľadiska je fázou stabilnou.

Uhlík tvorí so železom α aj γ interstitické tuhé roztoky s obmedzenou rozpustnosťou v tuhom stave, čím zvyšuje pevnostné vlastností železa. Ak zliatina obsahuje uhlík nad mieru jeho rozpustnosti v železe vytvára samostatné fázy – cementit alebo grafit. Vlastnosti zliatin železa budú silne ovplyvňované spôsobom vylúčenia, tvarom a množstvom častíc týchto fáz. Z uvedeného vyplýva, že rozoznávame dve sústavy železa s uhlíkom:

- **sústavu stabilnú, t.j. železo - grafit** (grafitické liatiny),
- **sústavu metastabilnú, t.j. železo – cementit** (oceľe, biele liatiny).

Podmienky vzniku stabilnej či metastabilnej rovnováhy závisia od troch faktorov:

1. Od obsahu uhlíka – zvyšovanie jeho obsahu (nad 2 %) podporuje vylučovanie grafitu. Pri nižších obsahoch nastane vždy metastabilná rovnováha (vylučovanie cementitu).
2. Od rýchlosti ochladzovania – pri vysokých obsahoch uhlíka vznikne stabilná rovnováha pri pomalom ochladzovaní (vylučovanie grafitu) a naopak, rýchle ochladzovanie podporuje metastabilnú rovnováhu.
3. Od obsahu ďalších prvkov – zvyšujúci obsah tzv. grafitotvorných prvkov (Si, P, a i.) podporuje vylučovanie grafitu, prvky ako mangán a siera podporujú tvorbu cementitu.

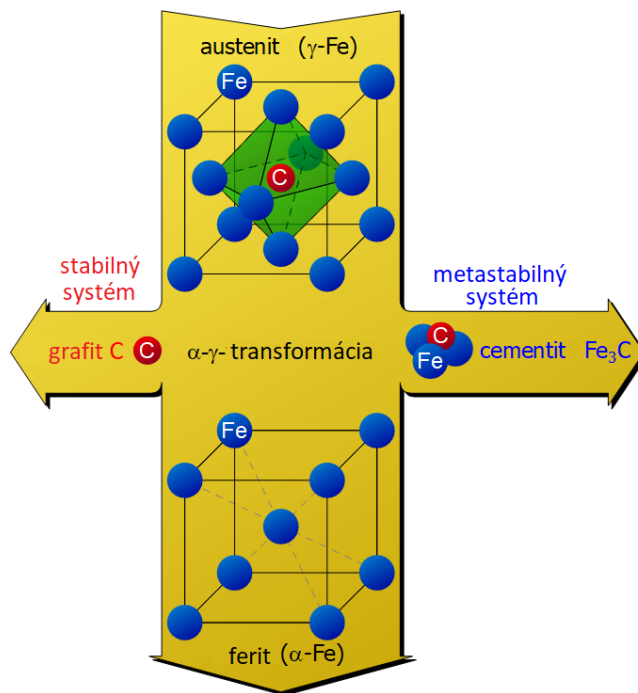


Obr.3.4 Rovnovážny diagram sústavy železo - uhlík

Obe sústavy sú uvedené na obr.3.4, na ktorom plné čiary platia pre metastabilnú sústavu a čiarkované pre stabilnú sústavu. Dôležité body metastabilnej sústavy sú vyznačené veľkými písmenami E, C, F atď., a stabilnej sústavy E', C' atď.

Proces kryštalizácie podľa stabilnej sústavy je totožný s procesom kryštalizácie podľa metastabilnej sústavy, iba namiesto cementitu Fe_3C sa vylučuje grafit. Eutektikum v stabilnej sústave je tvorené zmesou kryštálov tuhého roztoku γ a grafitu – **grafitové eutektikum**. Eutektoid je zase zmesou feritu a grafitu – **grafitový eutektoid**.

Počas premeny $\gamma \rightarrow \alpha$ sa uhlík, ktorý už nie je rozpustný v α -železe, môže v zásade vylúčiť z mriežky dvoma spôsobmi. Pri pomalom ochladení a relatívne vysokom obsahu uhlíka sa môže spojiť dostatočný počet atómov uhlíka, aby vytvorili svoju vlastnú hexagonálnu mriežkovú štruktúru. V tejto mriežkovej modifikácii sa uhlík nazýva aj **grafit**. Tvorba grafitu nie je podmienená iba relatívne nízkymi rýchlosťami chladenia, ale môže byť tiež špecificky podporená pridávaním kremíka. Vznik uhlíka vo forme grafitu sa tiež označuje ako **stabilný systém**, pretože uhlík v tejto forme sa už nemôže ďalej rozpadáť, a preto je stabilný v termodynamickom zmysle. Na obr.3.5 je stabilná a metastabilná precipitácia uhlíka a transformácia Fe_γ na Fe_α .



Obr.3.5 Stabilná a metastabilná precipitácia uhlíka

3.1.1 Metastabilný rovnovážny diagram Fe – Fe₃C

Metastabilný diagram Fe - Fe₃C (v rozsahu 0 – 6,67 %C) sa používa pri sledovaní kryštalizácie a prekryštalizácie uhlíkových ocelí a ledeburitických (bielych) liatin.

Uhlík sa rozpúšťa v obidvoch modifikáciách železa intersticiárne. V modifikácii Fe_α sú atómy uhlíka umiestnené v strede stien základných buniek kryštálovej mriežky, medzi atómami železa. Tento interstitický tuhý roztok uhlíka v Fe_α nazývame **ferit** a označujeme $\alpha = \text{Fe}_\alpha(\text{C})$. Vo vysokoteplotnej oblasti stability Fe_δ sa označuje ako **δ-ferit** ($\delta = \text{Fe}_\delta(\text{C})$). Maximálna rozpustnosť uhlíka v Fe_α je 0,02 % pri teplote 727°C a s klesajúcou teplotou klesá (čiara PQ, obr.3.4). Pri teplote okolia je len niekoľko tisícín % [18,19,20].

V modifikácii Fe_γ sú atómy uhlíka umiestnené v strede kocky. Uvedený priestor je podstatne väčší ako pri priestorovo centrovanej mriežke, a preto rozpustnosť uhlíka v Fe_γ je väčšia. Maximálna rozpustnosť uhlíka v Fe_γ je 2,14 % pri teplote 1147 °C. Interstitický tuhý roztok uhlíka v Fe_γ sa nazýva **austenit** ($\gamma = \text{Fe}_\gamma(\text{C})$).

V rovnovážnom diagrame Fe – Fe₃C sa vyskytujú tieto fázy [15]:

Tavenina T - neobmedzený tekutý roztok atómov Fe a C.

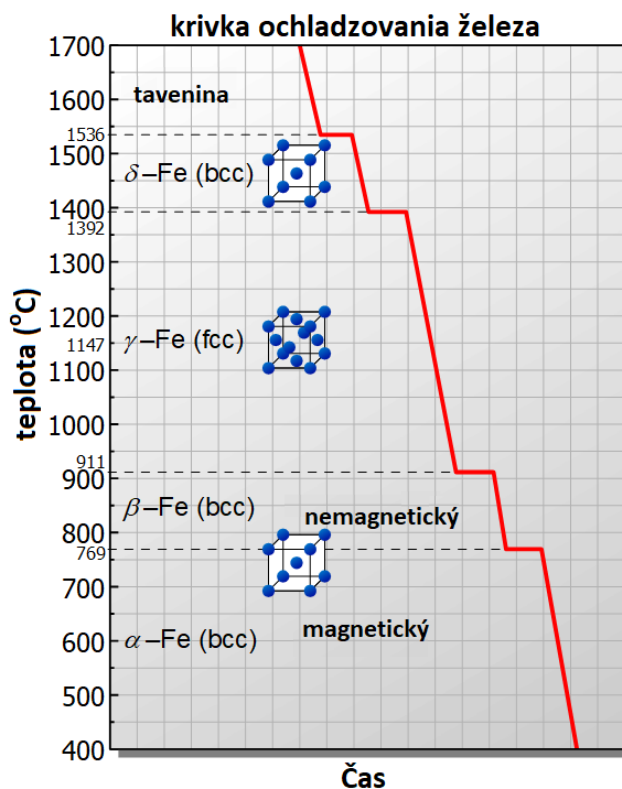
Ferit - α - interstitický tuhý roztok uhlíka v Fe_α.

Ferit - δ - tuhý roztok uhlíka v železe δ s kubickou objemovo centrovanou mriežkou.

Austenit - γ - interstitický tuhý roztok uhlíka v Fe_γ.

Cementit - Fe_3C - karbid železa.

Na obr.3.6 je uvedená krivka ochladzovania čistého železa a kryštalografické mriežky jednotlivých modifikácií železa.



Obr.3.6 Krivka ochladzovania čistého železa

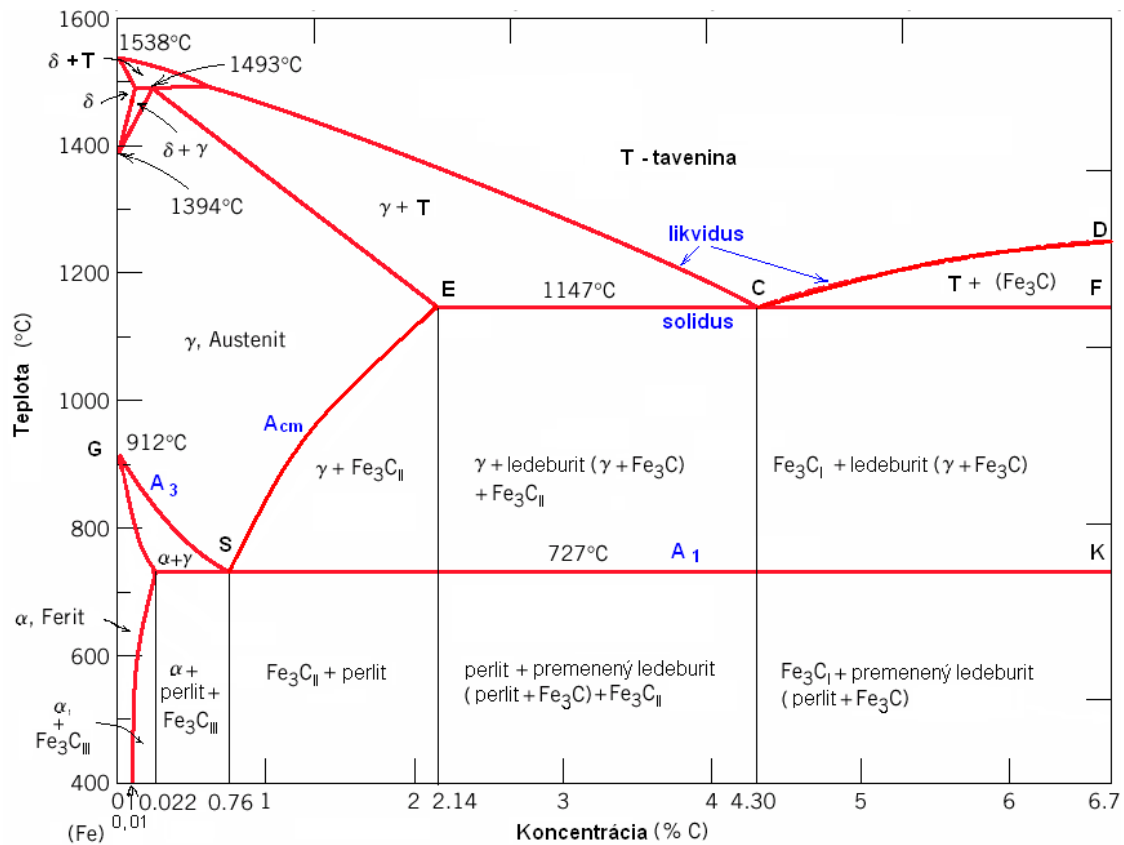
Ďalšie štruktúrne zložky sú:

Ledeburit L – je to eutektikum, ktoré sa skladá z dvoch fáz, austenitu a cementitu.

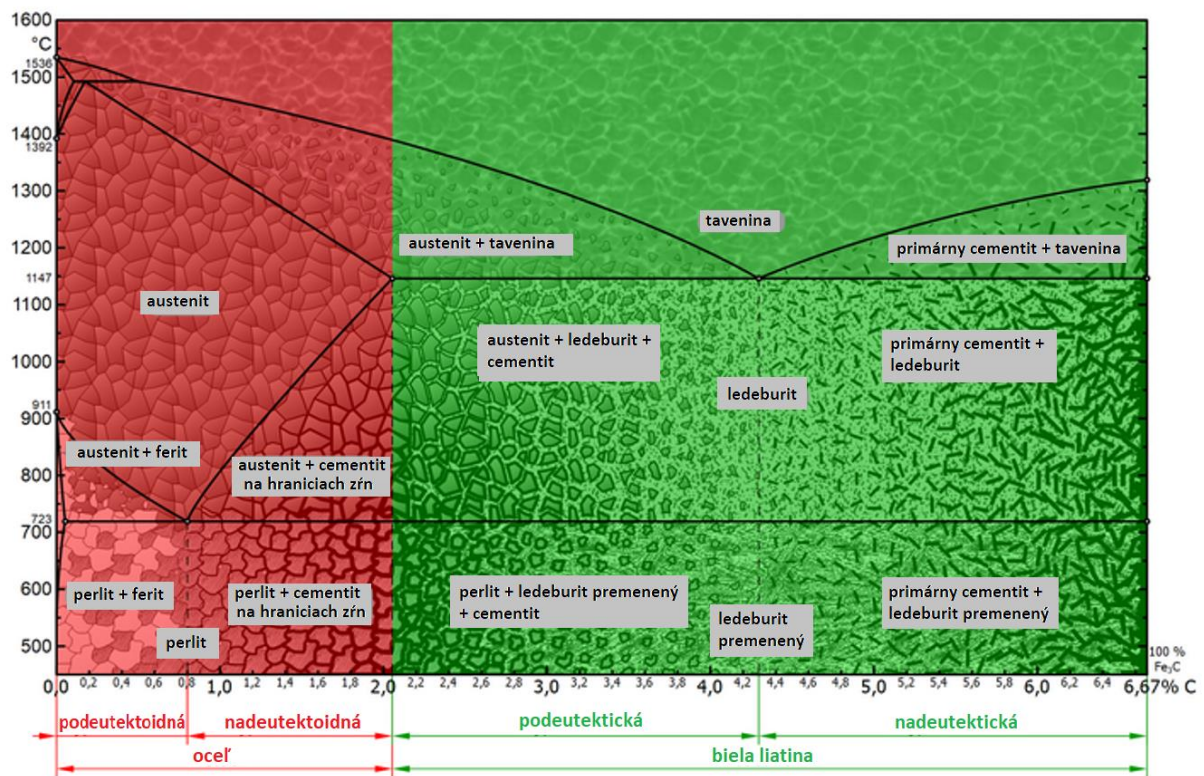
Perlit P – je to mechanická zmes striedavo vylúčeného feritu a cementitu.

Ledeburit premenený L_p – eutektikum – mechanická zmes perlitu a cementitu.

Na obr.3.7 je uvedený rovnovážny diagram Fe – Fe_3C . Z diagramu vyplýva, že počas ochladzovania sa znižuje rozpustnosť uhlíka v tuhých roztokoch. Po prekročení hranice rozpustnosti uhlíka v austenite (čiara ES) dochádza preto k rozpadu presýteného tuhého roztoku (segregácii) a nadbytočný uhlík sa vylučuje formou cementitu. Podobný proces nastáva pri nižších teplotách, kde dochádza k vylučovaniu cementitu ako segregátu z feritu. Klasifikácia ocelí a bielych liatin v metastabilnom diagrame Fe- Fe_3C je uvedená obr.3.8.



Obr.3.7 Metastabilný rovnovážny diagram Fe – Fe₃C

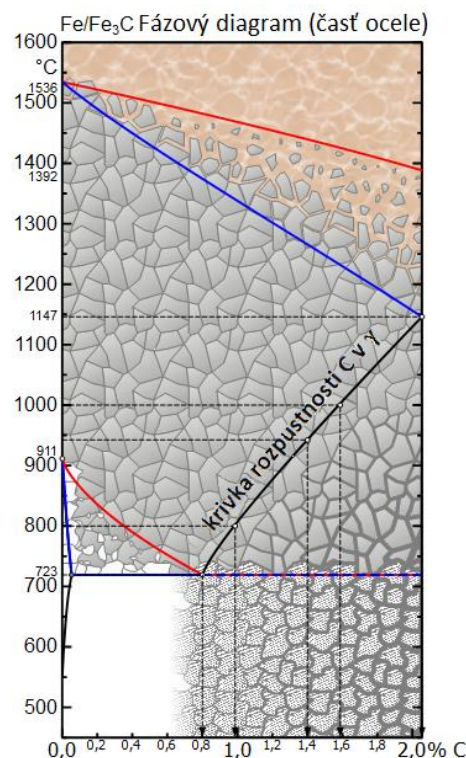


Obr.3.8 Klasifikácia ocelí a bielych liatin v metastabilnom diagrame Fe- Fe₃C

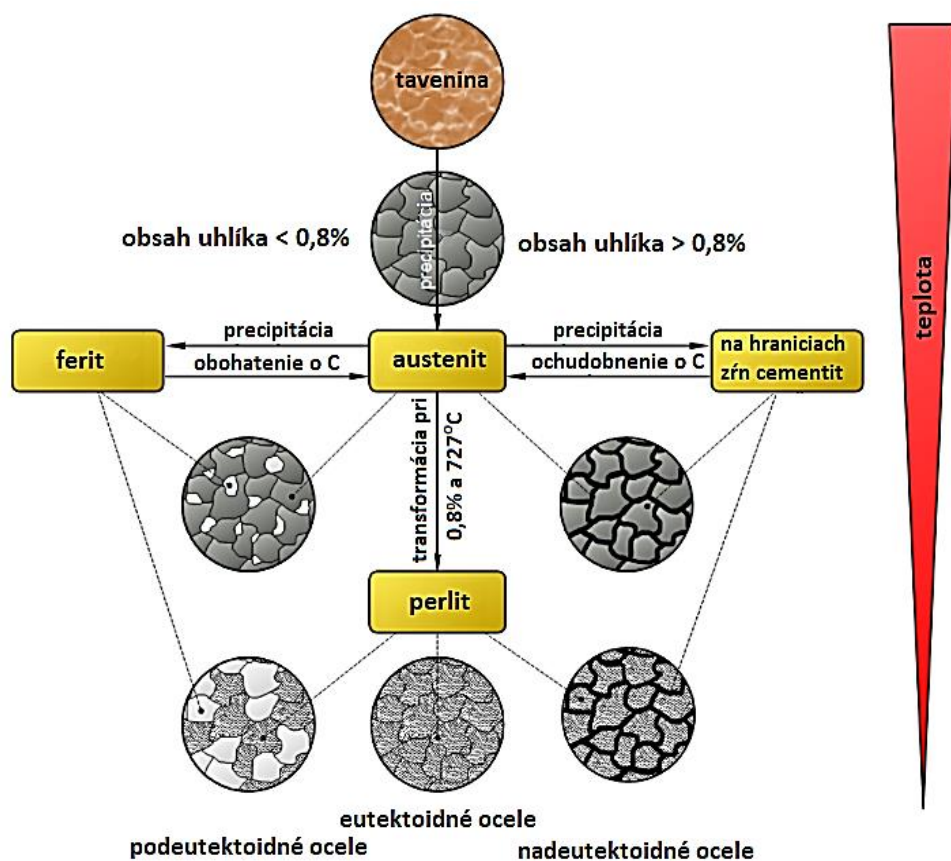
Podľa podmienok vzniku rozoznávame päť druhov cementitu a označujú sa ako Fe_3C_I až Fe_3C_V :

1. **primárny Fe_3C_I** – kryštalizuje priamo z taveniny v oblasti CDF a tvorí hrubé ihlicovité až doskovité útvary,
2. **sekundárny Fe_3C_{II}** – vylučuje sa z austenitu u nadeutektoidných ocelí a liatin v dôsledku znižovania sa rozpustnosti C v austenite s klesajúcou teplotou,
3. **terciálny $\text{Fe}_3\text{C}_{III}$** – vzniká v dôsledku znižovania sa rozpustnosti C vo ferite s klesajúcou teplotou,
4. **eutektický Fe_3C_{IV}** – súčasť eutektika – ledeburitu,
5. **eutektoidný Fe_3C_V** – súčasť eutektoidu – perlitu.

Maximálna možná rozpustnosť uhlíka v austenite je pri teplote 1147 °C a koncentrácii uhlíka 2,14 % (Obr.3.9). Každá druhá až tretia elementárna bunka je obsadená atómom uhlíka. Keď teplota klesá, rozpustnosť C klesá kontinuálne a bezprostredne pred rozpadom austenitu z K12 na K8 pri 723 °C je rozpustnosť C len 0,8%. Atómy uhlíka nachádzajú miesto iba v každej šiestej až siedmej jednotkovej bunke. Pomocou čiary znižujúcej sa rozpustnosti C v austenite je možné určiť príslušný maximálny obsah uhlíka pri konkrétnej teplote v austenite. Napríklad pri teplote 1 000 °C je maximálna rozpustnosť uhlíka okolo 1,6 %, zatiaľ čo rozpustnosť pri 940 °C je iba okolo 1,4% a pri 800 °C dokonca klesá na približne 1,0 %. Obr.3.10 schematicky znázorňuje vývoj mikroštruktúry v závislosti od obsahu uhlíka a teploty.



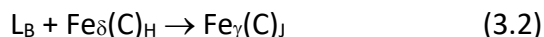
Obr.3.9 Medza rozpustnosti uhlíka v austenite



Obr.3.10 Prehľad tvorby mikroštruktúry ocelí

V metastabilnom systéme Fe – Fe₃C rozlišujeme tri základné reakcie:

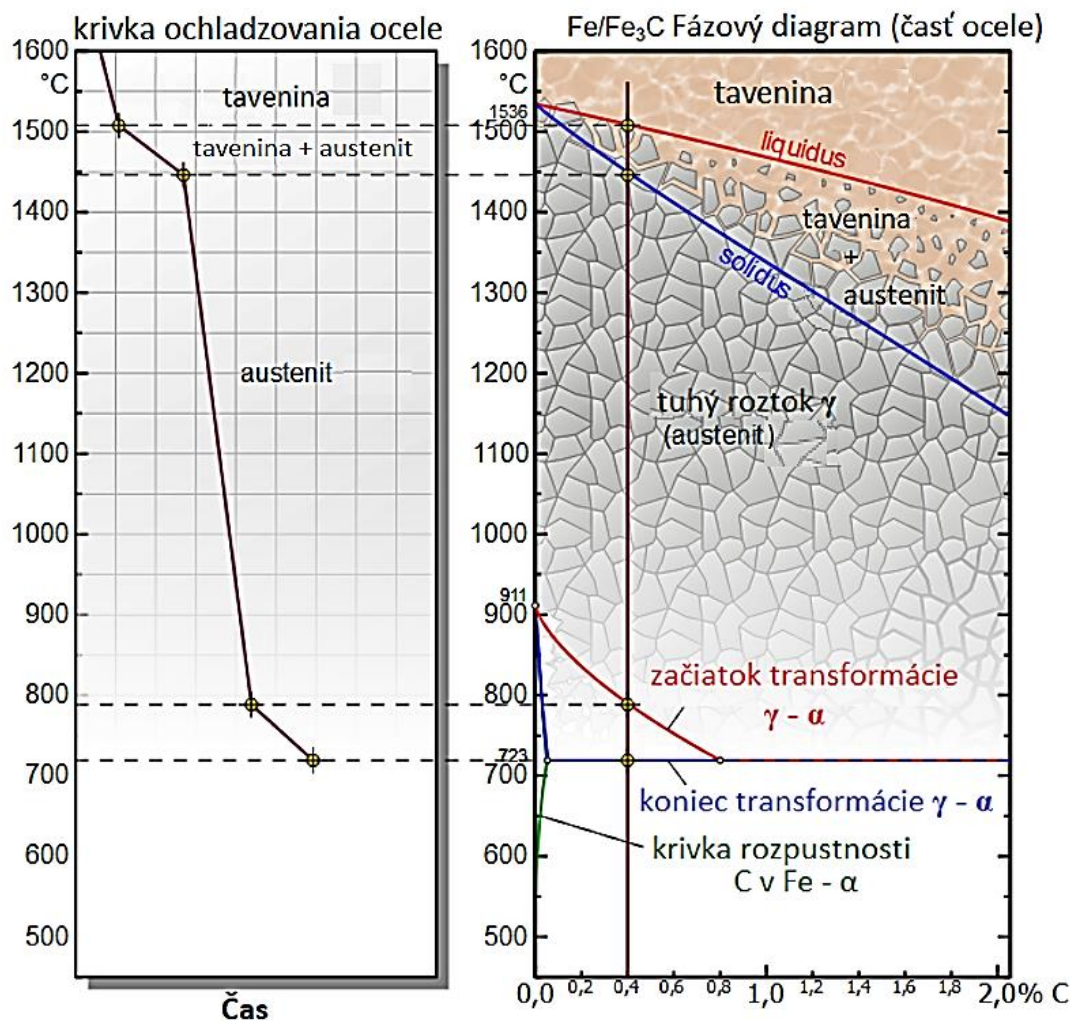
1. Peritektická reakcia – prebieha v zliatinách s obsahom uhlíka od 0,10 do 0,51 %. Pri teplote 1499°C dochádza k reakcii medzi primárne vylúčenými kryštálmi tuhého roztoku δ o zložení H a taveninou T o zložení B (obr.3.4) za vzniku nového tuhého roztoku (peritektika), ktorým je austenit γ podľa rovnice:



Túto peritektickú reakciu budeme v učebnici zanedbávať a ďalej uvádzané diagramy sô bez tejto premeny, zjednodušené.

Podeutektoidné fázové transformácie

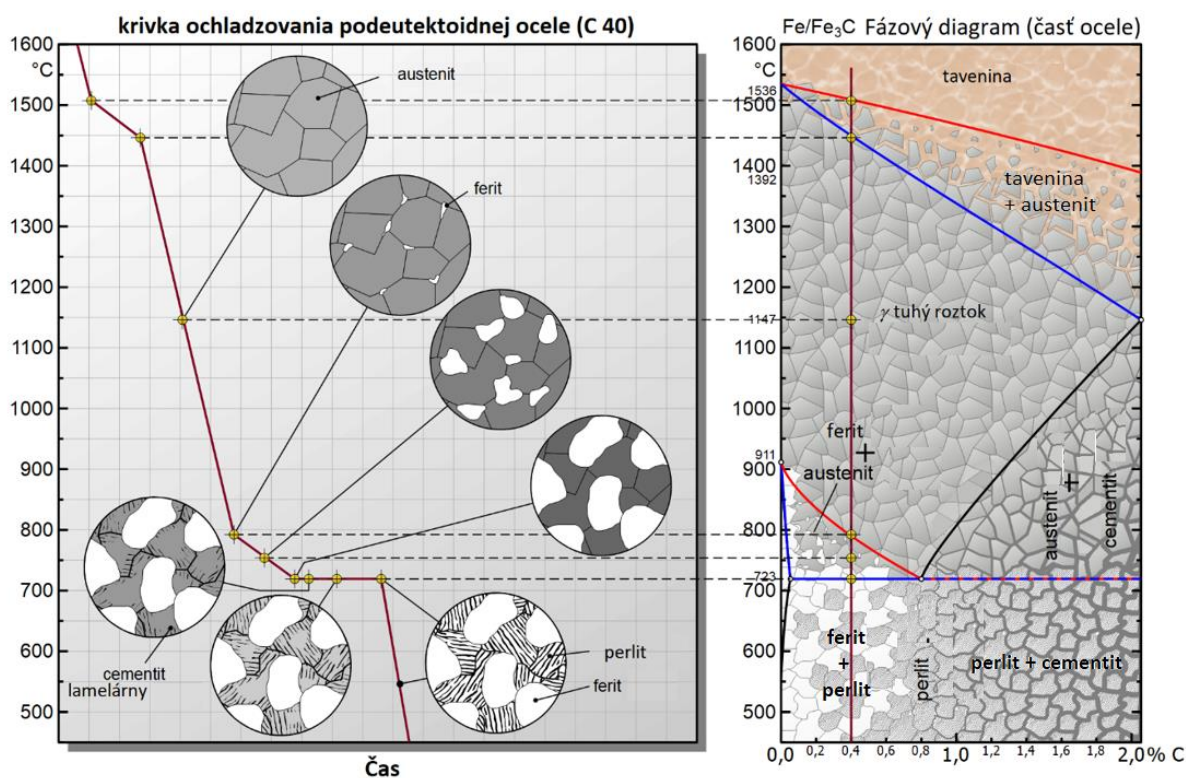
Podeutektoidná oceľ má obsah uhlíka nižší ako 0,8 %. Fázová transformácia podeutektoidnej ocele je uvedená na obr.3.11.



Obr.3.11 Krivka ochladzovania podeutektoidnej ocele

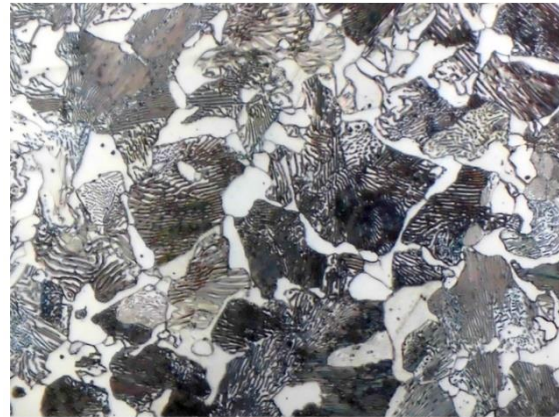
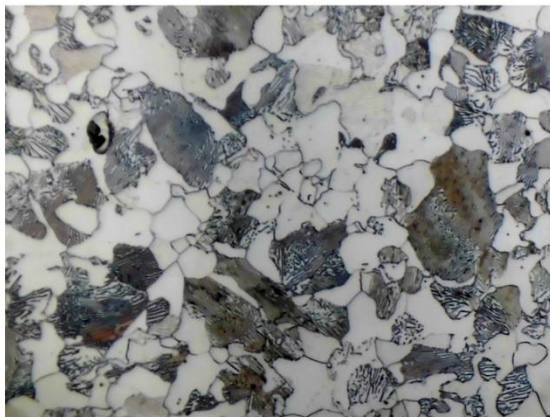
Ako príklad je možné podrobnejšie vysvetliť mikroštruktúrne transformácie podeutektoidnej ocele s obsahom uhlíka 0,4%, obr.3.12. Podeutektoidná oceľ začína tuhnúť ako každá iná oceľ, ako tuhý roztok. Uhlík je spočiatku úplne rozpustný v štruktúre austenitu. Podeutektoidná oceľ má príliš málo uhlíka na to, aby prekročila maximálnu hranicu rozpustnosti uhlíka v austenite. Pri najnižšej možnej teplote 723 °C - nad ktorou existuje austenit - je (minimálna) rozpustnosť uhlíka v austenite už 0,8 %. Rozpustnosť uhlíka je preto vždy vyššia ako obsah uhlíka v podeutektoidných oceliach. Všetok uhlík zostáva rozpustný v austenitickej mriežke podeutektoidných ocelí. Mikroštruktúrna transformácia podeutektoidnej ocele nie je teda určená limitom rozpustnosti, ako pri nadeutektoidných oceliach, ale skôr transformáciou γ - α . Začiatok mriežkovej transformácie je možné vidieť na červenej transformačnej čiare vo fázovom diagrame Fe-Fe₃C, ktorú každá podeutektoidná oceľ nakoniec pri ochladení pretne. U podeutektoidnej ocele s obsahom 0,4% uhlíka sa transformácia mriežky K12 austenitu na K8 feritu začína pri približne 800 °C (namiesto 911 °C, ako v prípade čistého železa). Transformácia začína na energeticky priaznivých hraniciach zŕn. Mriežková transformácia sa pri ďalšom ochladení šíri do okolitej austenitickej štruktúry. Táto premena už neprebíha pri konštantnej teplote ako v prípade čistého železa, ale v teplotnom

rozmedzí. Preto transformácia γ - α opäť obsahuje dvojfázovú oblasť v diagrame, v ktorej mikroštruktúra pozostáva z feritu a zvyšného austenitu. S ďalším ochladzovaním feritické zrná rastú, takže stále viac uhlíka difunduje do okolitých austenitických zrn. To vedie k obohateniu obsahu uhlíka v austenite. Príslušné koncentrácie je možné určiť po priblížení sa k fázovému rozhraniu a následnom nakreslení zvislej čiary na os koncentrácie. S ďalším ochladzovaním a tým zvyšovaním tvorby feritu sa uhlík v austenite hromadí čoraz viac. Pri 723 °C nakoniec vzrástol obsah uhlíka na 0,8 %. Austenit dosiahol eutektoidné zloženie a je úplne nasýtený, to znamená, že už nemôže absorbovať žiadny ďalší uhlík. Austenit sa teraz správa ako eutektoidná oceľ a nakoniec sa pri konštantnej teplote začína meniť na eutektoidný perlit. Zvyšný austenit tiež prechádza mriežkovou transformáciou na feritickú štruktúru nerozpustnú v uhlíku. Uhlík predtým rozpustený v austenitickej mriežke vytvára zlúčeninu cementitu karbidu železa, ktorá sa počas transformácie mriežky vylúči v lamelárnej forme zo zvyškového austenitu.



Obr.3.12 Fázová transformácia podeutektoidnej ocele

Na obr.3.12 je zobrazená fázová transformácia podeutektoidnej ocele s 0,45% uhlíka. Sú viditeľné feritické zrná (biele) a perlitické zrná (tmavé pruhy). Mikroštruktúra podeutektoidnej ocele je zobrazená na obr.3.13 a 3.14. Na porovnanie je uvedená mikroštruktúra podeutektoidnej ocele s 0,4 % C a mikroštruktúra s vyšším obsahom uhlíka 0,6 %. Vďaka vyššej koncentrácii uhlíka má tiež podstatne vyšší obsah perlitu v mikroštruktúre.



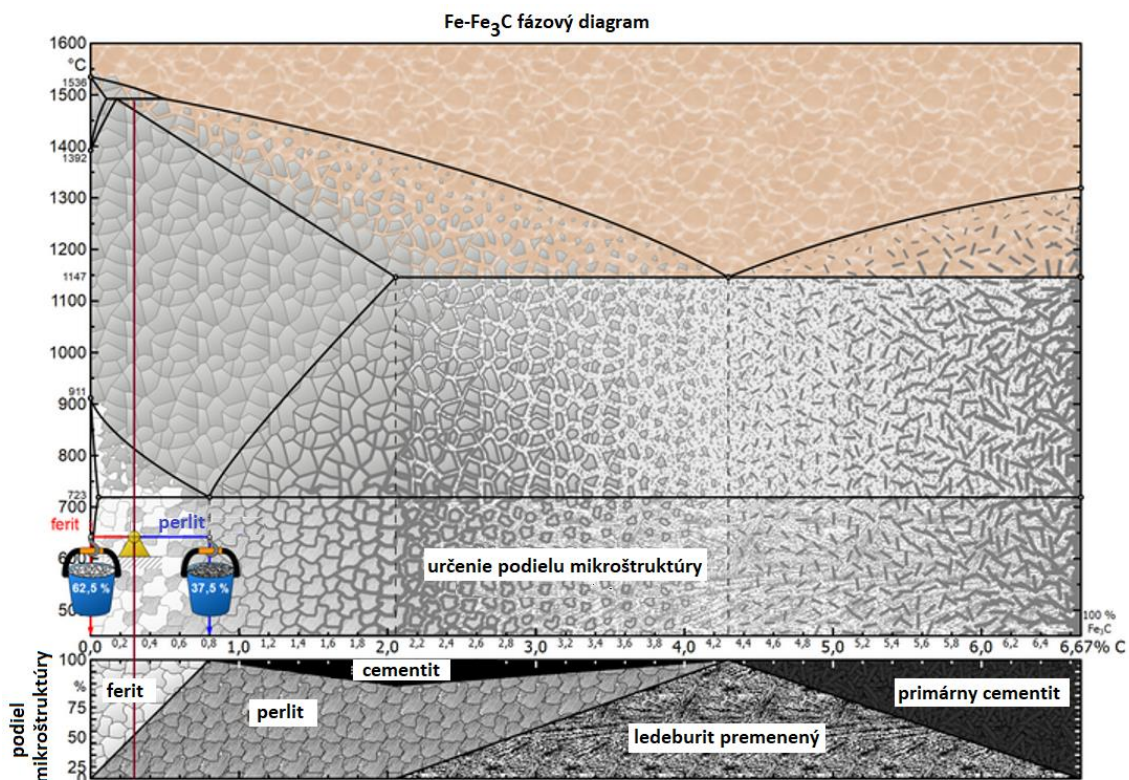
Obr.3.13 Mikroštruktúry podeutektoidných ocelí

a) koncentrácia uhlíka 0,45 %, b) koncentrácia uhlíka 0,6 %

U podeutektoidných ocelí pozostáva mikroštruktúra z feritických a perlitických zŕn pri izbovej teplote. Aby sa určili príslušné frakcie mikroštruktúry, ramená páky pri uplatnení pákového pravidla sa príslušne nakreslia od uvažovaného stavu do oblasti feritickej fázy (pri 0 % C) až po perlitickú hranicu (pri 0,8 % C). Pri oceli s napr. 0,3% C je obsah feritu 62,5% pri izbovej teplote a zodpovedajúci obsah perlitu je 37,5%:

$$f_{\text{erit}} = \frac{0,8 - 0,3}{0,8} \cdot 100\% = 62,5\%$$

$$p_{\text{erlit}} = \frac{0,3}{0,8} \cdot 100\% = 37,5\% \quad (3.3)$$

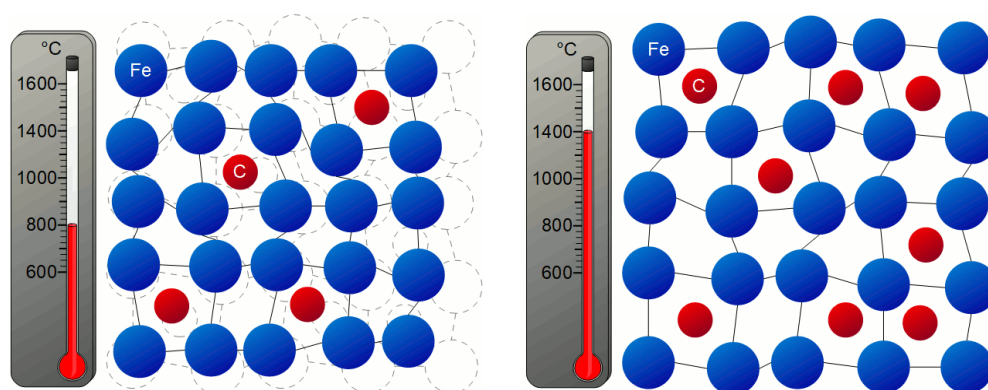


Obr.3.14 Stanovenie podielu mikroštruktúry podutektoidnej ocele

Pre podeutektoidnú oceľ sa stabilne zvyšuje podiel perlitu s vyšším obsahom uhlíka, až nakoniec dosiahne 100% pri 0,8% C. Aj keď je uhlík v tejto austenitickej štruktúre pomerne dobre rozpustný, jeho rozpustnosť nie je neobmedzená.

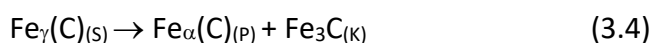
Atómy uhlíka sú príliš veľké na to, aby sa ľahko umiestnili do intersticiálnej polohy. Výsledkom je, že v blízkosti vložených atómov uhlíka dochádza k mriežkovým deformáciám. Ďalšie atómy C sa už nemôžu usadiť v mriežke. Rozpustnosť atómov C v austenite je teda obmedzená.

Maximálny počet atómov uhlíka, ktoré je možné rozpustiť v mriežke austenitu, závisí vo veľkej miere od teploty. Nižšia teplota znamená zníženú mriežkovú vibráciu atómov v mriežkových polohách. Vďaka tomu sa môže v mikroštruktúre austenitu rozpustiť menej atómov uhlíka. Naopak, vyššia teplota znamená vyššiu rozpustnosť C. Obr.3.15 zobrazuje rozpustnosť uhlíka v austenite, ktorá klesá so znižujúcou sa teplotou.



Obr.3.15 Pokles rozpustnosti C pri klesajúcej teplote

2. Eutektoidná reakcia – pri teplote 727°C a zložení 0,78 %C (bod S) sa austenit eutektoidného zloženia rozpadá na eutektoid (lamelárna mechanická zmes feritu o zložení bodu P a eutektoidného cementitu), ktorý nazývame perlit:

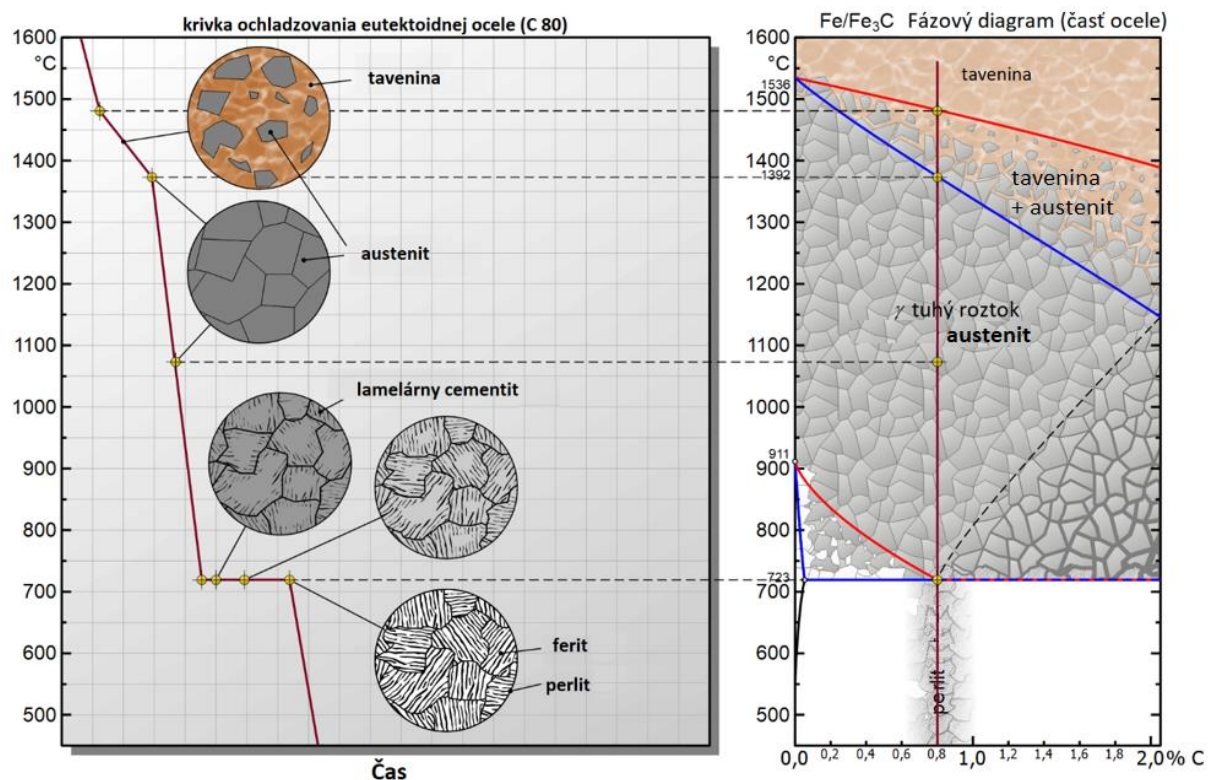


Čiara PSK je eutektoidná čiara a bod S je eutektoidný bod.

Zmeny v mikroštruktúre počas transformácie $\gamma \rightarrow \alpha$ je možné vysvetliť na eutektoidnej oceli s obsahom uhlíka 0,8%. Prebieha transformácia $\gamma \rightarrow \alpha$ pri teplote 723 °C. Mriežka K12 sa transformuje na mriežku K8 feritu pri konštantnej teplote (tepelná zadrž). Pretože stred mriežky feritu zaberá atóm železa, atómy uhlíka sa v nej už nemôžu rozpustiť. Počas tejto mriežkovej transformácie sa uhlík vylúči v metastabilnej forme ako karbid železa Fe_3C (cementit). Z dôvodu relatívne nízkej teploty 723 °C sú atómy pomalé a nemôžu preto prekonávať veľké vzdialenosti. Vylučujú sa priamo z mriežkovej štruktúry a ukladajú sa vedľa seba v lamelárnej štruktúre. Keď sa austenit úplne premení na ferit, uhlík sa (takmer) úplne oddelí od mriežky Fe. Z bývalých austenitických zŕn sa teraz stali feritické zrná s vloženými

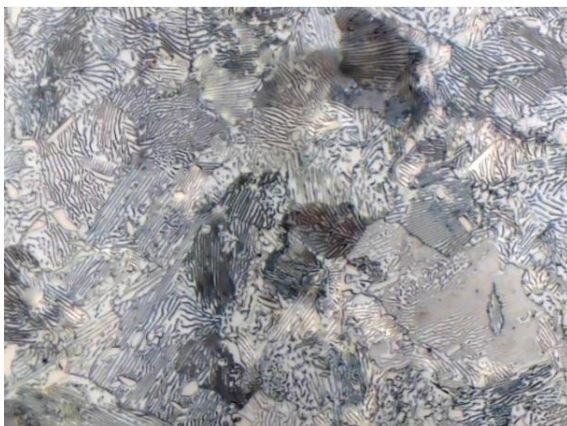
cementitickými lamelami. Táto lamelárna dvojfázová zmes feritu a cementitu sa nazýva *perlit* a to aj vďaka perleťovému lesku pod mikroskopom.

Počas transformácie $\gamma \rightarrow \alpha$ sa mení aj vonkajší tvar zŕn. Zatiaľ čo austenit má polyedrickú štruktúru zrna, perlitické zrná sú skôr zaoblené. Polyedrická forma austenitu je spôsobená zvýšenou tvorbou tzv. dvojitého zŕn. Vďaka svojej lamelárnej štruktúre je perlitická štruktúra veľmi podobná eutektickej štruktúre zliatin s navzájom nerozpustnými zložkami. Jediný rozdiel je v tom, že eutektikum sa tvorí z tekutého stavu, zatiaľ čo štruktúra perlitu sa tvorí z už stuhnutého stavu. Preto sa táto fázová zmes nenazýva eutektická, ale *eutektoidná*. V danom prípade má oceľ s obsahom uhlíka 0,8% čisto eutektoidnú štruktúru. Takáto oceľ sa nazýva aj eutektoidná oceľ alebo perlitická oceľ.

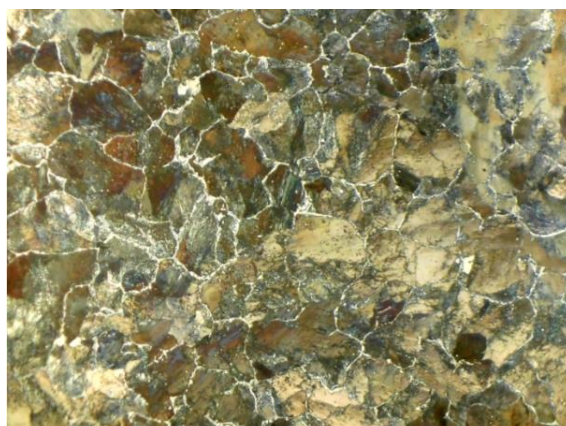


Obr.3.16 Fázová transformácia eutektoidnej ocele

Obr.3.17 a 3.18 zobrazujú perlitickú oceľ s 0,8% uhlíka. Viditeľné sú cementitické lamely (tmavé pruhy) vo feritických zrnách (svetlé oblasti medzi nimi).



Obr.3.17 Štruktúra eutektoidnej ocele (0,8 % C)



Obr.3.18 Mikroštruktúra nadeutektoidnej ocele (1 % C)

Nadeutektoidné fázové transformácie

Z dôvodu obmedzenej rozpustnosti C v Fe dochádza počas ochladzovania nadeutektoidných ocelí k mikroštruktúrnym zmenám. Na príklade ocele s 1,4% C sú podrobnejšie opísané fázové transformácie, ktoré sú uvedené nižšie. Najskôr nadeutektoidná oceľ tuhne ako tuhý roztok v teplotnom rozmedzí. Vďaka vysokým teplotám bezprostredne po stuhnutí je všetok uhlík spočiatku úplne rozpustný v austenitickej mikroštruktúre. Nakoniec sa rozpustnosť C začne kontinuálne znižovať od teploty 1147 °C podľa vyznačenej čiary, obr.3.19. Pri 1000 °C je maximálna rozpustnosť iba 1,6%. Pretože oceľ má nižší obsah uhlíka 1,4%, všetok uhlík je rozpustný v mriežke austenitu. Oceľ by mohla teoreticky rozpustiť ešte viac uhlíka, tento stav sa označuje ako presýtený stav. Maximálna rozpustnosť C so znižujúcou sa teplotou ďalej klesá. Pri teplote 940°C je možné všetok uhlík obsiahnutý v oceli úplne rozpustiť v mriežke austenitu. Pretože austenitická mriežka je úplne nasýtená uhlíkom, tento stav sa tiež označuje ako nasýtený stav.

Ak ochladzovanie pokračuje, obsah uhlíka v oceli je vyšší ako jeho maximálna rozpustnosť. Pri teplote 800 °C sa môže v austenitickej mriežke rozpustiť iba asi 1,0% C; oceľ však obsahuje 1,4% C. Pri prekročení limitu rozpustnosti sa mikroštruktúra zmení, dôjde k fázovej transformácii. Inak by v mriežke austenitu bolo viac uhlíka, ako by sa v ňom mohlo skutočne rozpustiť. Ak sa v mriežke rozpustí viac uhlíka ako dokáže skutočne absorbovať, z austenitickej mriežky sa vylúči „príliš veľa“ uhlíka. V metastabilnom systéme táto segregácia uhlíka prebieha vo forme cementitu. Tvorba Fe_3C cementitu na hraniciach zŕn je sprevádzaná zmenou energetického stavu. Ak dôjde k prekročeniu limitu rozpustnosti, môže sa v austenite ďalším ochladením rozpustiť čoraz menej uhlíka. Ako chladenie pokračuje, na hraniciach zŕn sa vylúči čoraz viac cementitu. To zaisťuje, že austenit je podľa svojej rozpustnosti vždy nasýtený uhlíkom. Preto pri prekročení limitu rozpustnosti zodpovedá koncentrácia uhlíka v austenite vždy maximálnej novej rozpustnosti. To si samozrejme vyžaduje, aby ochladzovanie bolo také pomalé, že uhlík má tiež čas na vylúčenie. Iba týmto spôsobom je možné vždy dosiahnuť termodynamický rovnovážny stav. Ak sa oceľ ďalej ochladzuje,

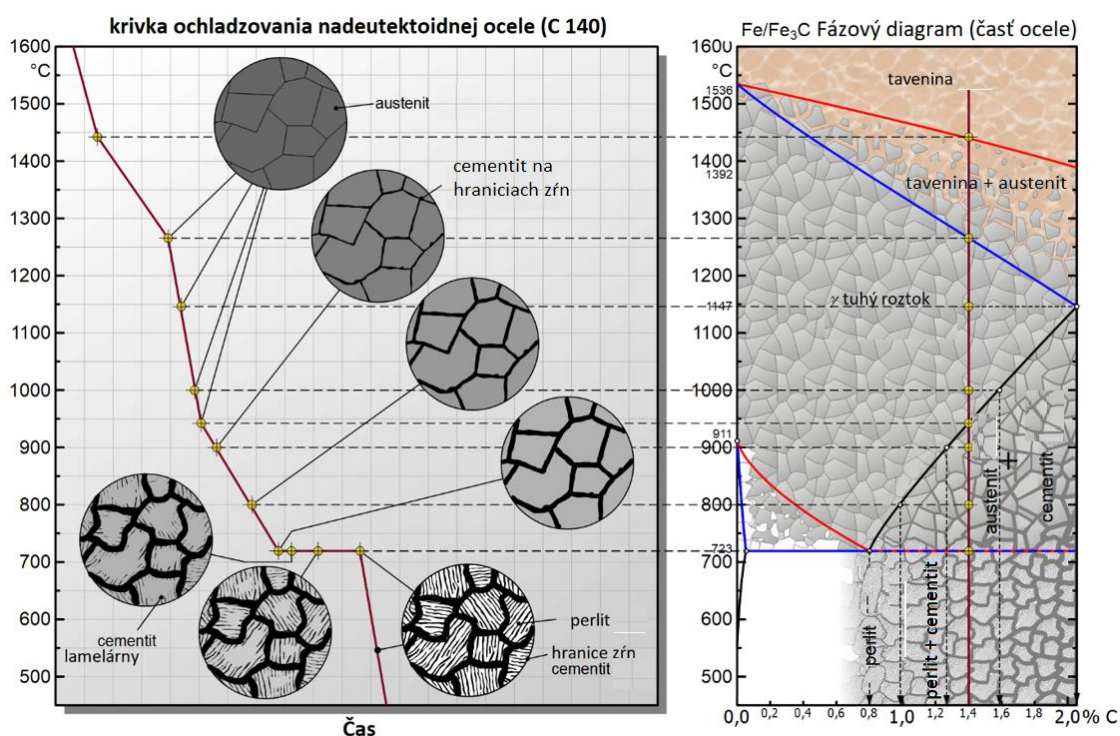
maximálna rozpustnosť a teda obsah uhlíka v austenite klesá čoraz viac, až kým pri 723 °C nedosiahne eutektoidné zloženie 0,8% C. Austenit sa potom v zásade správa ako eutektoidná oceľ, ktorá obsahuje presne 0,8% C. Pri konštantnej teplote 723 °C sa austenit začína rozpadáť na perlit, keď sa mriežka K12 austenitu transformuje do úplne nerozpustnej kubickej štruktúry feritu K8. Uhlík sa vylúči priamo z mriežkovej štruktúry vo forme cementitických lamiel.

Tvorba cementitu sa uskutočňuje prednostne na energeticky priaznivých miestach, ako sú hranice zŕn. Často sa používa aj termín *sekundárny cementit*. Cementit sa nevylúči v lamelárnej forme uprostred mriežkovej štruktúry, ako v prípade tvorby perlitu, pretože vylúčenie cementitu počas tvorby perlitu je spôsobené transformáciou mriežkovej štruktúry. Ak je však prekročený limit rozpustnosti C, mriežka austenitu sa zachová, to znamená, že k mriežkovej transformácii nedôjde. Mechanizmy tvorby cementitu a perlitu sú zásadne odlišné. Po tejto konečnej transformácii mikroštruktúry je proces ochladzovania konečne ukončený a mikroštruktúra nadeutektoidnej ocele pozostáva z perlitických zŕn (feritické zrná s lamelami cementitu) a cementitu, ktorý sa predtým vylúčil na hraniciach zŕn.

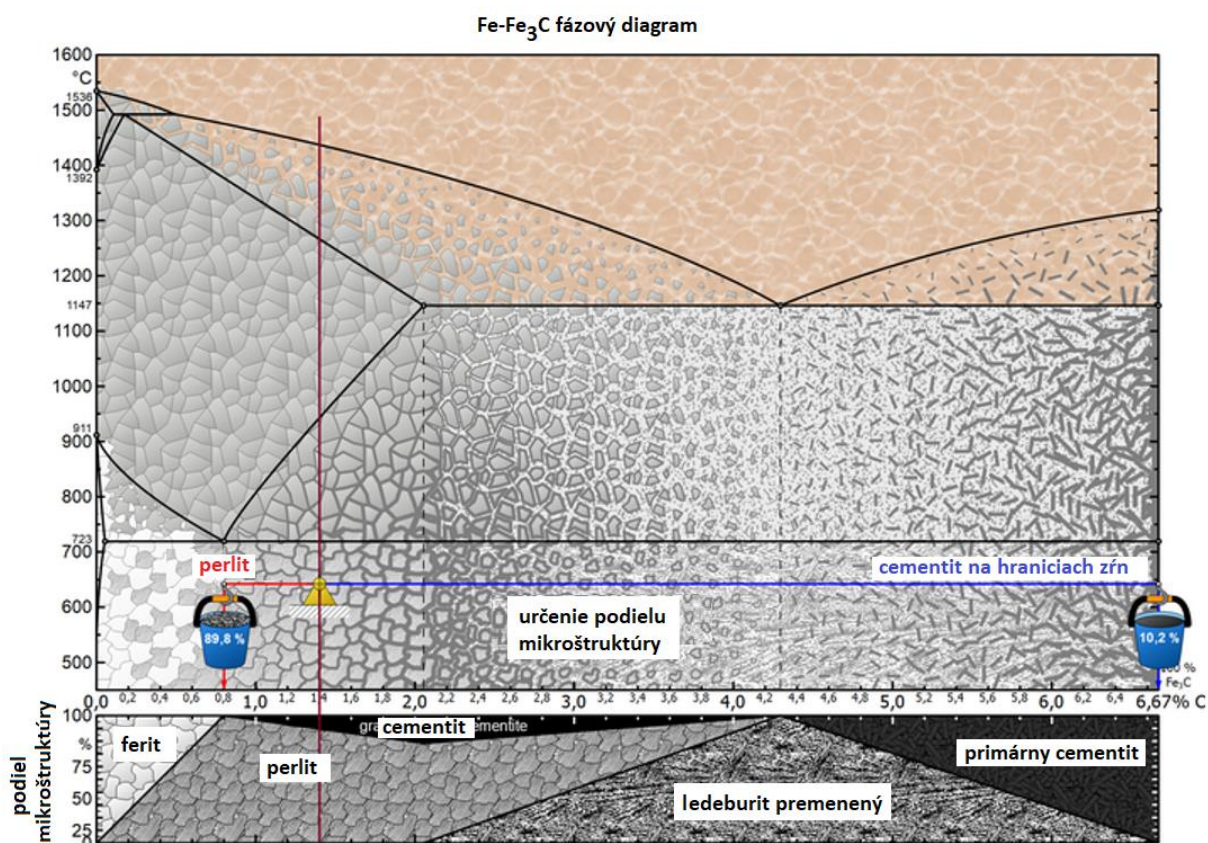
Zložky mikroštruktúry nadeutektoidných ocelí je možné určiť rovnakým spôsobom ako pre podeutektoidné ocele. Ramená páky sú priťahované k príslušným zložkám mikroštruktúry perlitu (s 0,8% C) a cementitu na hranici zŕn (s 6,67% C). V prípade ocele s 1,4% C pri izbovej teplote je podiel perlitu okolo 89,8% a frakcia cementitu na hranici zŕn 10,2%.

$$perlit = \frac{6,67 - 1,4}{6,67 - 0,8} \cdot 100\% = 89,8\%$$

$$cementit\ na\ hraniciach\ zŕn = \frac{1,4 - 0,8}{6,67 - 0,8} \cdot 100\% = 10,2\% \quad (3.5)$$



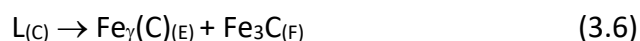
Obr.3.19 Fázová transformácia nadeutektoidnej ocele



Obr.3.20 Stanovenie mikroštruktúry nadeutektoidnej ocele

V prípade hypereutektoidnej ocele podiel perlitu neustále klesá so zvyšujúcim sa obsahom uhlíka na minimum 78,5% (pri 2,14% C). V súlade s tým sa frakcia cementitu na hranici zŕn zvyšuje na maximum 21,5%. Po tejto konečnej mikroštruktúrálnej transformácii je proces ochladzovania ukončený a mikroštruktúra nadeutektoidnej ocele pozostáva z perlitických zŕn (feritické zrná s lamelami cementitu) a cementitu na hraniciach zŕn. Pri izbovej teplote majú nadeutektoidné ocele perlitickú mikroštruktúru (feritové zrná s vloženými lamelami cementitu) s dodatočne vylúčeným cementitom na hraniciach zŕn.

3. Eutektická reakcia – pri teplote 1147°C tavenina eutektického zloženia (bod C - 4,3 %C) tuhne nonvariantne na mechanickú zmes austenitu zloženia bodu E (2,14 %C) a eutektického cementitu podľa rovnice:



Vznikajúca eutektická zmes austenitu a eutektického cementitu sa nazýva ledeburit. Eutektickou reakciou končí kryštalizácia zliatin s obsahom 2,14 až 6,67 %C. Pri eutektoidnej teplote 727°C sa austenit rozpadá na perlit a výsledná štruktúra je tvorená jemným perlitom a eutektickým cementitom a nazýva sa **premenený ledeburit**.

Perlit a ledeburit sú dôležité štruktúrne zložky zliatin železa. Základným morfológickým variantom perlitu je lamelárny perlit, ktorý sa skladá zo striedajúcich sa lamiel feritu

a cementitu – obr.3.21. Štruktúra premeneného ledeburitu je tvorená cementitickým základom so zrnami perlitu – obr.3.22.

Pre označenie kritických teplôt sa bežne používajú tieto symboly:

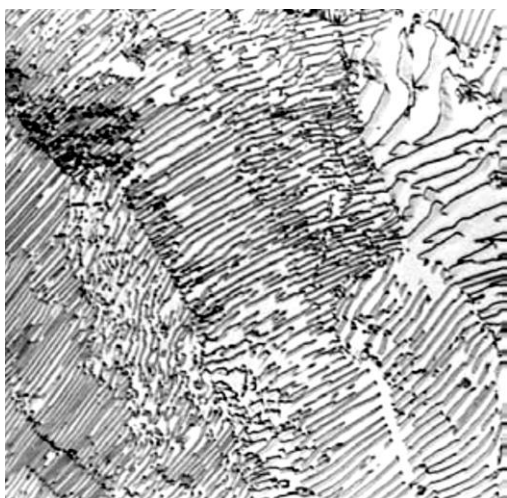
A_1 – eutektoidná teplota (Ac_1 - ohrev, Ar_1 - ochladzovanie)

A_3 – začiatok prekryštalizácie austenitu na ferit, čiara GS diagramu,

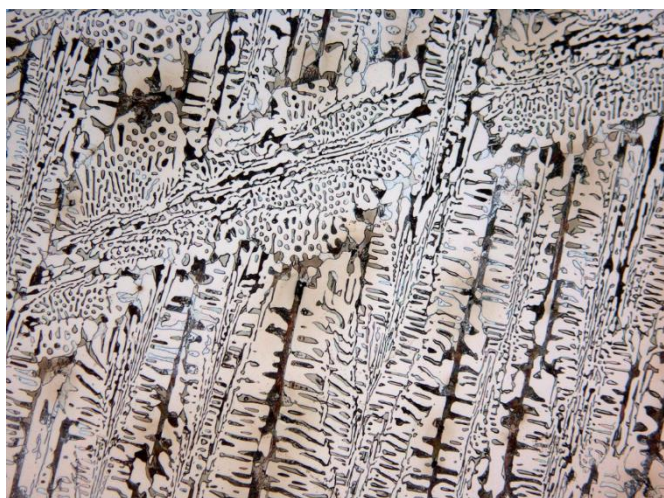
A_m – hranica rozpustnosti uhlíka v austenite, čiara SE rovnovážneho diagramu.

Rozdelenie zliatin železa s uhlíkom vychádza z rovnovážneho diagramu:

Ocele sú zliatiny železa s obsahom uhlíka do 2,14 % - bod E. Je to hraničná koncentrácia uhlíka v austenite do ktorej možno ohrevom zliatiny získať homogénny tvárny tuhý roztok. Nad touto hraničnou koncentráciou sa v štruktúre zliatin objavujú krehké a netvárne zložky eutektika (ledeburitu), ktoré sťažujú resp. znemožňujú ich tvárnenie. Zliatiny kryštalizujúce podľa metastabilnej sústavy, s obsahom uhlíka väčším ako 2,14 % nazývame **liatiny**.



Obr.3.21 Lamelárny perlit



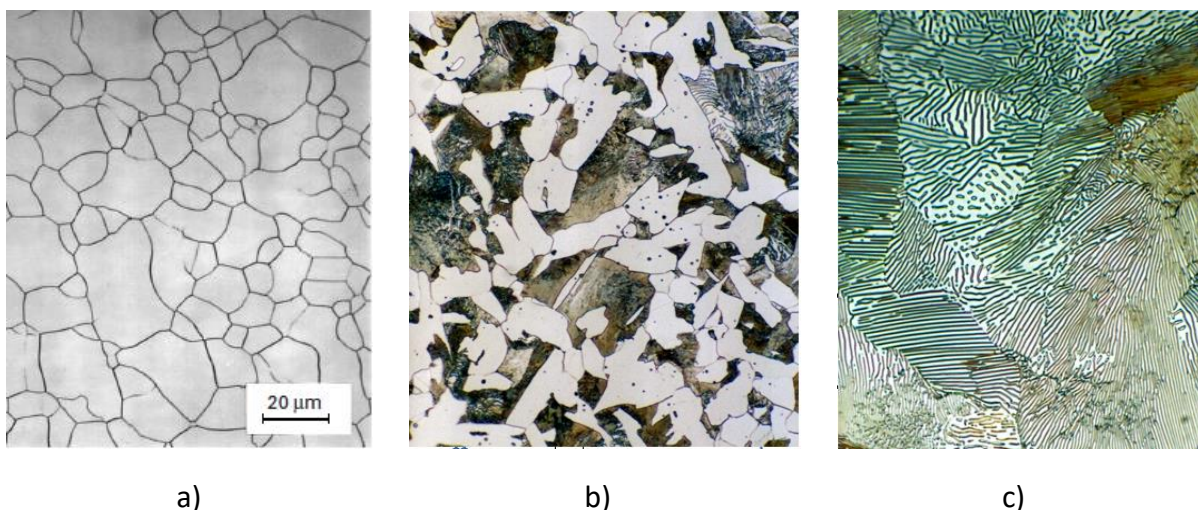
Obr.3.22 Premenený ledeburit

Štruktúru ocelí s obsahom uhlíka do 0,02 %, tvorí základná feritická hmota a terciárny cementit, vylúčený na hraniciach feritických zŕn (obr.3.23a). Tieto ocele nazývame **mäkké ocele**.

U **podeutektoidných ocelí** s obsahom uhlíka 0,02 – 0,78 % je výsledná štruktúra **feriticko-perlitická** – obr.3.23b. Podiel perlitu v štruktúre sa zvyšuje s obsahom uhlíka.

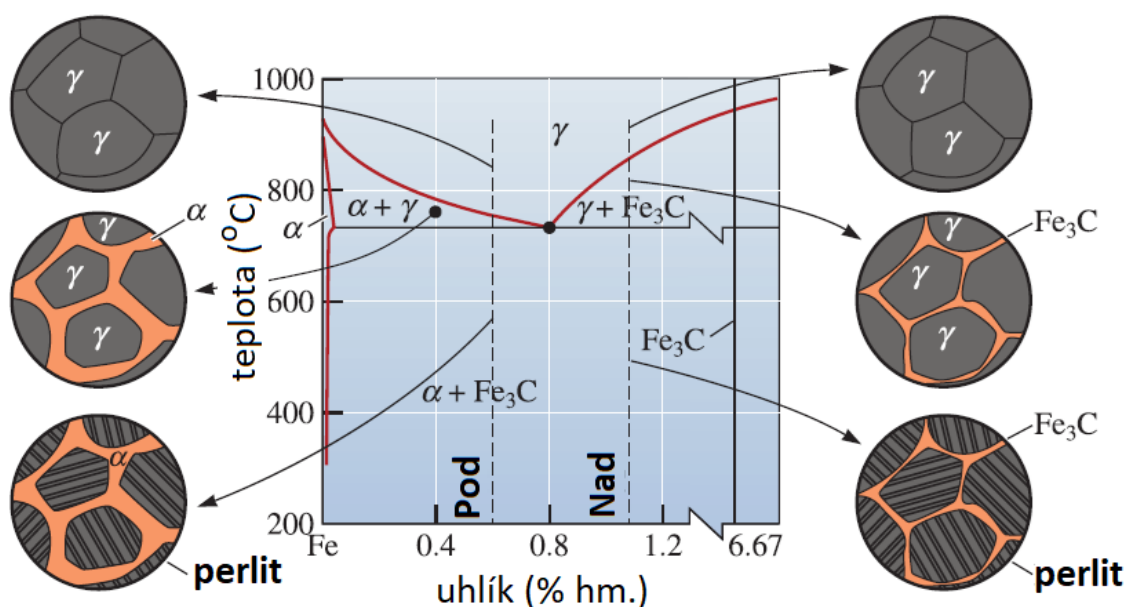
Eutektoidná ocel' má perlitickú štruktúru, pretože pri eutektoidnej teplote nastane eutektoidná reakcia v celom objeme zliatiny.

Pri **nadeutektoidných oceliach** ($0,78 \% < C < 2,14 \%$) je výsledná štruktúra **perliticko-cementitická** (obr.3.24c), pričom sekundárny cementit je vylúčený ako sieťovina po hraniciach pôvodných austenitických zŕn.



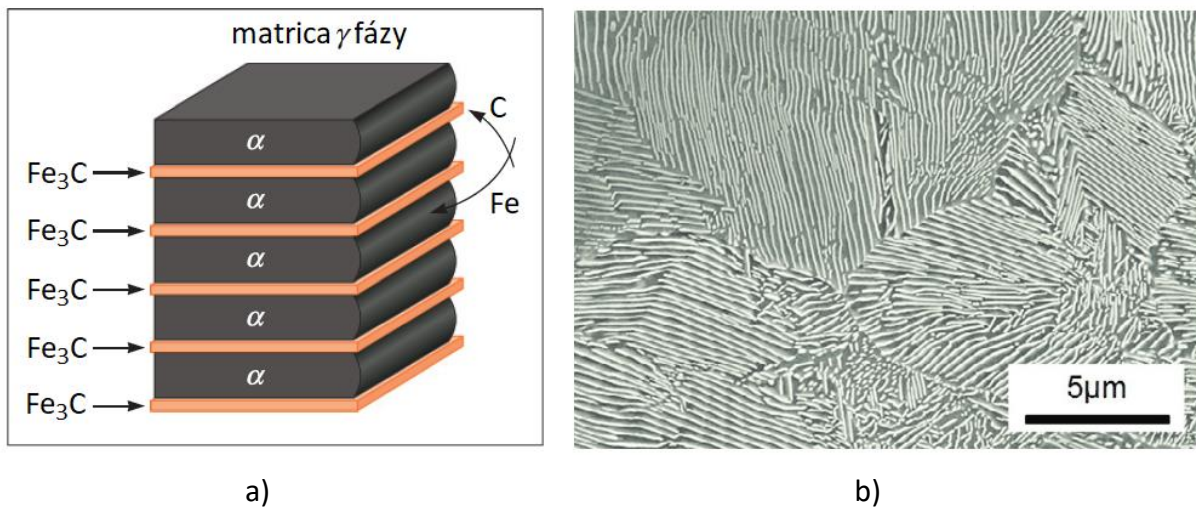
Obr.3.23 Mikroštruktúry ocelí: a) nízkouhlíková feritická oceľ (0,01 %C), b) nízkouhlíková feriticko-perlitická oceľ (0,3 %C), c) perliticko-cementitická oceľ (1,4 %C)

Na obr.3.24 je uvedená premena mikroštruktúry pod a nadeutektoidných ocelí v tuhom stave pri ochladzovaní pod 723°C . U podeutektoidných ocelí sa na hraniciach austenitických zŕn tvorí nízkouhlíkový ferit, zrná austenitu sa obohacujú o uhlík a pri ochladení pod 723°C sa austenitické zrná s eutektoidnou koncentráciou uhlíka rozpadnú na lamelárnu mechanickú zmes – perlit. U nadeutektoidných ocelí sa na hraniciach austenitických zŕn hromadí uhlík v dôsledku jeho znižujúcej sa rozpustnosti v austenite. Pri ochladení pod 723°C sa austenitické zrná s eutektoidnou koncentráciou uhlíka rozpadajú na perlit.

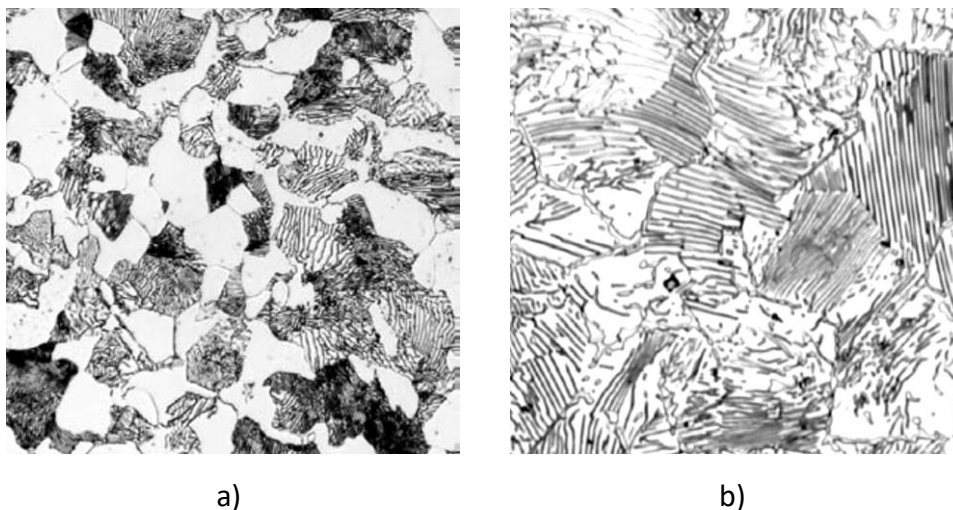


Obr.3.24 Vývoj mikroštruktúry podeutektoidných a nadeutektoidných ocelí počas ochladzovania v metastabilnom diagrame Fe-Fe₃C

Lamelárna zmes feritu a eutektoidného cementitu je uvedená na obr.3.25. Uhlík sa koncentruje v lamelách cementitu a o uhlík ochudobnené oblasti tvoria ferit.

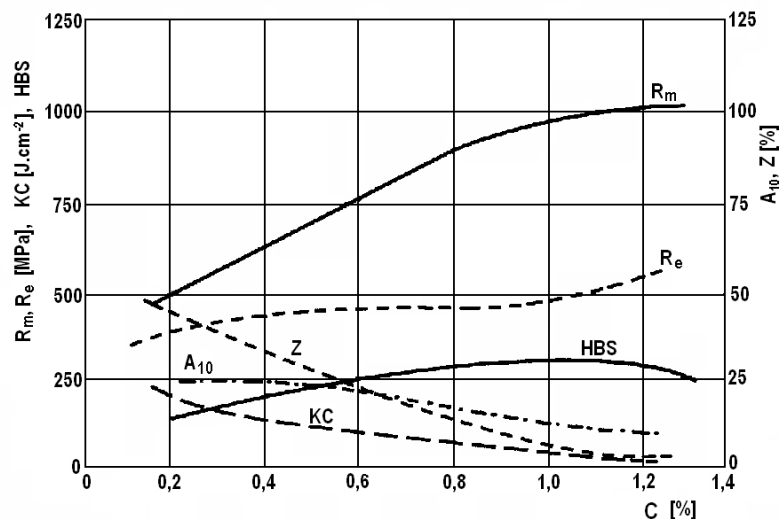


Obr.3.25 Rast a štruktúra perlitu: a) redistribúcia uhlíka a železa (vznik perlitickej kolónie); b) mikroštruktúra lamelárneho perlitu



Obr.3.26 a) Štruktúra poeutektoidnej ocele $\text{Fe}\alpha$ (biele plochy) a perlitu (0,45 %C),
b) štruktúra nadeutektoidnej ocele s primárnym Fe_3C a okolitý perlit (1,0 %C)

Mechanické vlastnosti ocelí závisia od obsahu uhlíka, obr.3.27. S rastúcim obsahom uhlíka dochádza k zvyšovaniu obsahu cementitu v štruktúre na úkor feritu, čo má za následok zvyšovanie pevnostných charakteristík a tvrdosti pri poklese plasticity a húževnatosti.

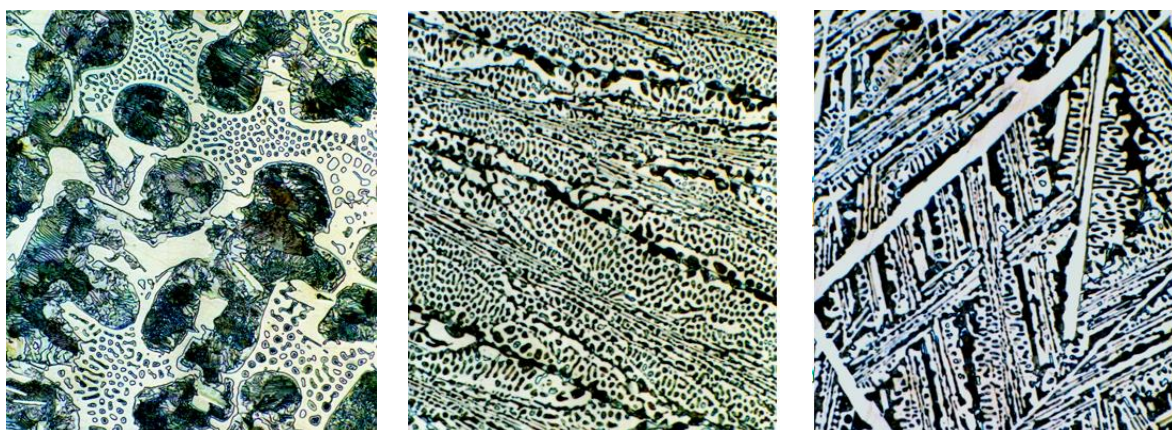


Obr.3.27 Vplyv obsahu uhlíka na mechanické vlastnosti uhlíkových ocelí

Kryštalizáciu bielych liatin charakterizuje eutektická reakcia a prítomnosť eutektika v ich štruktúre. Výsledná štruktúra **podeutektických bielych liatin** ($2,14 \% < C < 4,3 \%$) po ochladení sa skladá z perlitu, sekundárneho cementitu a ledeburitu – obr.3.28a.

Proces kryštalizácie **eutektickej bielej liatiny** začína eutektickou reakciou za vzniku ledeburitu. Pri eutektoidnej teplote sa ledeburitický austenit transformuje na perlit a výslednou štruktúrou je premenený ledeburit, obr.3.28b.

U **nadeutektických bielych liatin** ($4,3 \% < C < 6,67 \%$) začína kryštalizácia vylučovaním primárneho cementitu z taveniny, čím sa zvyšná tavenina ochudobňuje o uhlík a pri eutektickej teplote tuhne na ledeburit. Výsledná štruktúra je tvorená primárnym cementitom a premeneným ledeburitom, obr.3.28c.



Obr.3.28 Mikroštruktúry bielych liatin: a – podeutektická liatina (3 %C), b – eutektická liatina (4,3 %C), c – nadeutektická liatina (5 %C)

3.1.2 Význam rovnovážnych diagramov Fe - C

Rovnovážne diagramy stabilnej a metastabilnej sústavy dávajú veľmi cenné informácie pre rôzne technológie spracovania, výskum a vývoj ocelí a liatin.

Kryštalizácia ocelí a liatin - rovnovážne diagramy nám umožňujú sledovať vznik štruktúrnych zložiek pri danom zložení a určiť aj ich podiel.

Tavenie a odlievanie. Teplota tavenia sa určuje ako teplota asi o 100 až 200°C nad teplotou likvidus. Teplota odlievania sa volí 50 až 150°C nad teplotu likvidus. Ak je teplota vyššia vzniká nebezpečie zväčšenia obsahu plynov v tavenine, ak je nižšia je nebezpečie, že tavenina nevyplní dokonale formu. Podľa obsahu uhlíka v zliatine môžeme z diagramu Fe – C voliť teploty tavenia a odlievania. Napr. pre čisté železo by bola teplota odlievania 1600°C a pre zliatinu Fe – C s obsahom 4,3 %C len 1250°C.

Tvárnenie. Tvárnenie za tepla sa realizuje v oblasti tuhého roztoku γ (austenitu), pretože má mriežku K12 vyznačujúcou sa dobrou tvárniteľnosťou. Výška teploty tvárnenia je obmedzená na hodnotu 100 – 200 °C pod teplotou solidu, aby nedošlo k značnému zhrubnutiu zrna, prípadne k „spáleniu“ ocele. Tvárnenie sa musí dokončiť do teploty A_{r3} u podeutektoidných ocelí a A_{r1} u nadeutektoidných ocelí. U nadeutektoidných ocelí tvárnením medzi teplotou $A_{r_{cm}}$ a A_{r1} dosiahneme rozdrobenie sieťovania sekundárneho cementitu, čím zvýšime deformačné vlastnosti (ťažnosť, kontrakcia) tejto zliatiny.

Tepelné spracovanie. Najväčší význam má diagram Fe – C pre postupy pri tepelnom spracovaní, ktoré umožňuje meniť vlastnosti materiálov v širokom rozmedzí. Podľa kritických teplôt A_1 , A_3 , A_m sa určujú, žihacie, kaliace teploty, teploty fázových premen a iné. Diagram umožňuje určiť tiež výsledné štruktúry po tepelnom spracovaní.

Zváranie. Pri zváraní ocelí dochádza v mieste zvaru k ohrevu materiálu na rôzne teploty, od teploty tavenia až po teplotu okolia. Pri ohreve a ochladzovaní dochádza preto k fázovým premenám a podľa výšky dosiahnutej teploty k vzniku rôznych štruktúr s rôznymi vlastnosťami. Priradenie týchto teplôt do diagramu Fe – C umožňuje charakterizovať výsledné štruktúry vo zvarovom spoji.

Z uvedených príkladov, ale aj ďalších aplikácií ako je napr. voľba teplôt pre jednotlivé druhy chemicko–tepelného spracovania, termomechanického spracovania a pod. vyplýva, že rovnovážne diagramy Fe – C dávajú veľmi cenné informácie pre dosiahnutie optimálnych vlastností zliatin železa.

3.1.3 Sprievodné a zliatinové prvky v oceliach

Okrem uhlíka, ktorý má rozhodujúci vplyv na vlastnosti zliatin železa, uplatňujú sa často významnou mierou aj ďalšie prvky. Niektoré z nich sú prítomné v oceliach vždy a ich výskyt súvisí s použitými surovinami a výrobným pochodom. Nazývame ich sprievodné prvky. Ďalšie

prvky do ocele pridávame zámerne, aby sme upravili vlastnosti ocele v požadovanom smere. Tieto prvky nazývame prísadové resp. zliatinové (legujúce) prvky.

Prvky, ktoré sa najčastejšie nachádzajú v oceliach môžeme podľa predchádzajúcich kritérií rozdeliť nasledovne:

- **sprievodné prvky škodlivé:** S, O, P, N, H
- **sprievodné prvky prospešné:** Mn, Si, Cu, Al
- **prvky zliatinové (legúry):** Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Al, Ti, Nb, Cu, B, N

Z prehľadu je zrejmé, že niektoré prvky sprievodné, môžu v oceli vystupovať aj ako zliatinové. Výskyt zliatinových prvkov v oceli je tiež základným kritériom pre rozdelenie ocelí, podľa chemického zloženia.

Pod pojmom **uhlíková oceľ** rozumieme zliatinu železa s uhlíkom, sprievodnými prvkami a zliatinovými prvkami, pokiaľ ich obsah neprevyšuje dohovorenú hranicu, ktorú stanovuje norma EN.

Legované ocele sú tie, u ktorých obsah jednotlivých prvkov aspoň v jednom prípade prevyšuje dohovorenú hranicu.

Podľa štruktúry rozdeľujeme ocele na podeutektoidné, eutektoidné a nadeutektoidné, vzhľadom k eutektoidnému bodu na feritické, feriticko-perlitické, perlitické a perliticko-cementitické. V praxi sa najviac využívajú podeutektoidné ocele.

Vzhľadom na výrazný vplyv obsahu uhlíka na vlastnosti ocelí uhlíkové ocele rozdeľujeme častejšie na:

- nízkouhlíkové, s obsahom C do 0,25 %,
- stredne uhlíkové, C = 0,25 – 0,6 %,
- vysokouhlíkové, s obsahom C nad 0,6 %.

3.1.3.1 Sprievodné prvky a inklúzie

Sprievodné prvky škodlivé - v zásade sa snažíme znížiť ich obsah na minimum. Je to otázka predovšetkým ekonomická. Pre bežné použitie vyrábame ocele z lacnejších surovín a ekonomicky výhodnejšími postupmi a majú preto vyšší obsah nečistôt. Iné suroviny a výrobné pochody volíme pre akostné ocele.

S í r a - dostáva sa do ocele z rúd a paliva. So železom tvorí sulfid železnatý (FeS) a tento so Fe_γ vytvára eutektikum s nízkou teplotou tavenia (985°C), ktoré sa vylučuje ako tenká blana na hraniciach austenitických zŕn a spôsobuje krehkosť pri tvárnení za tepla. Hovoríme, že siera

spôsobuje krehkosť za červeného žiaru. FeS zhoršuje tvárnosť ocele aj pri teplote okolia, húževnatosť a zvariteľnosť.

K y s l í k - do ocele sa dostáva pri jej skujňovaní. Kyslík, ktorý ostane v oceli je viazaný na oxidy (FeO , MnO , Al_2O_3) alebo kremičitany (SiO_2). Jeho vplyv v hotovej oceli je jednoznačne škodlivý, pretože značne zhoršuje húževnatosť ocele.

F o s f o r - do ocele sa dostáva zo surovín. Fosfor zhoršuje najmä húževnatosť ocele, zvyšuje náchylnosť ku krehkému porušeniu, zväčšuje sklon na lámavosť za studena. Nepriaznivo pôsobí aj na zvariteľnosť ocelí a iné technologické vlastnosti.

D u s í k - vytvára so železom interstitický tuhý roztok. So znižujúcou teplotou sa jeho rozpustnosť znižuje a nadbytočný dusík sa pri pomalom ochladzovaní vylučuje ako nitrid Fe_4N . Pri rýchlejšom ochladzovaní vzniká nestabilný presýtený tuhý roztok dusíka v Fe_α . Ten sa za určitých podmienok (teplota, čas) rozpadá na stabilný nitrid Fe_4N . Nitridy sa prevažne vylučujú po hraniciach zŕn a v sklzových rovinách, čím sa značne znižuje húževnatosť, tvárnosť za studena a zvyšuje prechodová teplota a medza klzu. Tento jav nazývame starnutie ocele. Na starnutie sú náchylné najmä mäkké uhlíkové ocele pre výrobu plechov. Starnutie môžeme zabrániť znížením obsahu dusíka alebo jeho viazaním na nitridy stabilné pri vysokých teplotách (nitridy Al, Ti).

V o d í k - dostáva sa do ocele z pecnej atmosféry a vlhkosti vsádzky. Jeho rozpustnosť v tavenine je veľká. Pri tuhnutí sa zníži asi o 70 % a vodík uniká vo forme bublín. Pri ďalšom chladnutí sa rozpustnosť ďalej znižuje a prebytočný vodík sa vylučuje v miestach mikroskopických porúch v molekulárnej forme za vzniku napätí, ktoré môžu viesť k vzniku mikrotrhlín, nazývané vločky. Vločky zvyšujú náchylnosť ocele ku krehkému lomu.

Sprievodné prvky prospešné – majú eliminovať nepriaznivý vplyv nečistôt. Tu patrí:

M a n g á n - je obsiahnutý vo všetkých zliatinách železa ako základná dezoxidačná a odsírovacia prísada. Jeho obsah sa v uhlíkových oceliach pohybuje od 0,25 do 0,9 %. So železom tvorí substitučný tuhý roztok a malá časť sa rozpúšťa v cementite a zvyšuje jeho stabilitu. Pôsobí priaznivo na vlastnosti ocelí, zväčšuje medzu klzu aj pevnosti bez zníženia ich húževnatosti a zvariteľnosti.

K r e m í k – je dôležitou dezoxidačnou prísadou. V množstve v akom sa nachádza v uhlíkových oceliach (do 0,5 %) pôsobí na mechanické vlastnosti väčšinou priaznivo. Je rozpustený vo ferite.

M e d' - nie je bežnou prímiesou v oceliach. Dostáva sa do ocele z niektorých druhov rúd, alebo pri pretavovaní odpadu a nedá sa hutníckymi pochodmi odstrániť. Jeho obsah nebýva väčší ako 0,2 %. Nemá podstatný vplyv na mechanické vlastnosti, zlepšuje však odolnosť proti poveternostným vplyvom.

H l i n í k – je častým sprievodným prvkom, je veľmi účinná dezoxidačná prísada.

Inklúzie - len malá časť sprievodných prvkov býva rozpustená vo ferite (Mn, Si, P a pod.), alebo v cementite (Mn). Väčšinou sú v štruktúre ocele prítomné v samostatných štruktúrnych zložkách, ktoré sú produktmi odsírenia (sulfidy), dezoxidácie (oxidy, kremičitany, hlinitany), resp. stabilizácie proti starnutiu (nitridy). Všetky tieto nekovové nečistoty, ktoré sú v kove nerozpustné nazývame inklúzie (vtrúseniny).

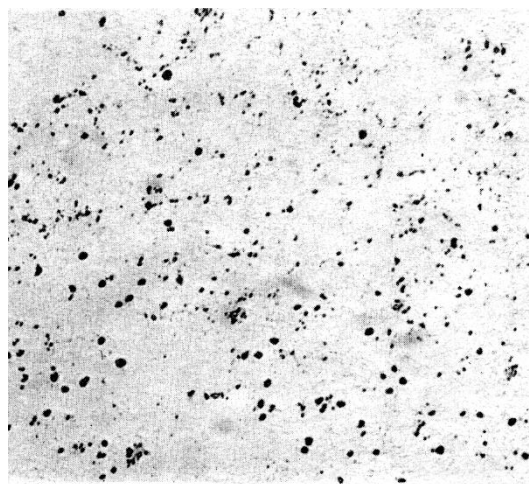
H l i n i t a n y - tvoria tvrdé ostrohranné útvary, ktoré sa pri tvárnení usporiadajú do riadkov a spôsobujú zníženie húževnatosti a medze únavy.

K r e m i č i t a n y a s u l f i d y – sú pri teplotách tvárnenia za tepla plastické a preťahujú sa v smere tvárnenia. Ich negatívny vplyv na vlastnosti ocele je obdobný ako pri hlinitanoch. Sulfidy sú najčastejšie inklúzie v oceliach (FeS, MnS), obr.3.29.

O x i d y a nitridy sú v oceli jemne rozptýlené a pokiaľ sa nevyskytujú vo veľkom množstve pôsobia na vlastnosti ocele priaznivo, pretože zjemňujú zrna a zlepšujú ťažnosť. Oxidy (FeO, MnO, SiO₂, Al₂O₃ atď.) sa vylučujú vo forme globúl, často veľmi jemných – obr.3.30.



Obr.3.29 Sulfidické inklúzie v tvárnenej oceli. Neleptaný stav



Obr.3.30 Mikroštruktúra množstva oxidických inklúzií. Neleptaný stav.

Kontrola mikročistoty (obsah inklúzií) je pri niektorých druhoch ocelí ako sú hlbokotažné ocele, ložiskové ocele a pod. veľmi dôležitá. Realizuje sa pomocou svetelnej mikroskopie porovnávaním neleptaných výbrusov s normovanými etalónmi.

3.1.3.2 Zliatinové prvky

Ocele, ktoré okrem železa, uhlíka a sprievodných prvkov obsahujú aj jeden alebo viac zliatinových prvkov nazývame **zliatinové (legované) ocele**. Pridávajú sa do ocele za účelom zlepšenia niektorých vlastností. Podľa celkového obsahu legujúcich (zliatinových) prvkov rozdeľujeme zliatinové ocele nasledovne:

- nízkolegované – s obsahom legúr do 2,5 %,
- stredne legované – od 2,5 do 5,0 % legúr,
- vyššie legované – od 5,0 do 10,0 % legúr,
- vysokolegované – nad 10 % legúr.

Medzi hlavné dôvody legovania zliatin železa patrí:

- zvýšenie mechanických vlastností, predovšetkým pevnosti a tvrdosti pri zachovaní vyhovujúcej húževnatosti (Mn, Si, Ni, Mo, V, W, Cr),
- zvýšenie prekaliteľnosti legovaním prvkami, ktoré znižujú kritickú rýchlosť rozpadu austenitu (Cr, Mn, Mo, V, Ni, B),
- zmenšenie sklonu ocele k rastu austenitického zrna za vyšších teplôt a dosiahnutím jemnozrnnej štruktúry vylúčením disperzných častíc karbidov alebo nitridov (Al, Ti, Nb, Ta, V),
- vytvorenie tvrdých a proti opotrebeniu odolných karbidov, prípadne karbidov stabilných za vysokých teplôt (Cr, Mo, W, V),
- zvýšenie žiarupevnosti ocelí tvorbou disperzných karbidov v štruktúre (Cr, Mo, W, V),
- dosiahnutie niektorých fyzikálnych vlastností - elektrických, magnetických (Si).

Stupeň legovania uvedených ocelí odpovedá nízkolegovaným oceliam. Pre náročnejšie prevádzkové podmienky sa používajú vysokolegované ocele alebo liatiny za účelom:

- zvýšenia korozivzdornosti v agresívnych prostrediach (Cr, Ni, Mo, Si, Cu),
- potlačenia interkryštalickej korózie v korozivzdorných oceliach (Ti, Nb, Ta),
- zvýšenia odolnosti proti oxidácii za vysokých teplôt vytvorením kompaktného filmu oxidov s dobrou príľnavosťou k povrchu ocele (Cr, Si, Al).

Posledné tri uvedené ciele sa dosahujú výrobou vysokolegovaných ocelí u ktorých obsah legujúcich prvkov je v rozmedzí 12 až 50 %.

Legujúce prvky pôsobia ďalej na vlastnosti ocele nasledovne:

a) Zmenou termodynamickej stability tuhých roztokov – podľa toho sa delia legujúce prvky na austenitotvorné a feritotvorné.

Austenitotvorné prvky rozširujú oblasť stability austenitu znižovaním teplôt A_3 , A_1 a zvyšovaním teploty A_4 . Prvky Ni, Mn, Co rozširujú oblasť austenitu neobmedzene. Ocele, ktoré majú austenitickú štruktúru sa nedajú kaliať ani prekryštalizačne žíhať. Ďalšie austenitotvorné prvky (N, C, Cu, B) otvárajú oblasť austenitu ohraničene.

Feritotvorné prvky rozširujú oblasť stability feritu zvyšovaním teploty A_3 a znižovaním A_4 . Prvky Cr, Si, Al, W, Mo, V, Ti nad určitou koncentráciou celkom uzatvárajú oblasť austenitu. Feritotvorné prvky Ta, Zr, B, S, O, Ca uzatvárajú oblasť austenitu čiastočne.

b) Legujúce prvky vplývajú na zmenu fyzikálnych vlastností a chemickej odolnosti. Pri obsahu chrómu nad 12 % sú ocele schopné pasivácie a odolávajú korózii. Korozivzdorné ocele

obsahujú obvykle 12 – 27 %Cr. Prísada Ni zvyšuje elektrochemickú ušľachtilosť zliatiny. Prvky, ktoré za vyšších teplôt vytvárajú súvislú vrstvu oxidov zlepšujú odolnosť proti oxidácii za vysokých teplôt a sú základom žiaruvzdorných zliatin.

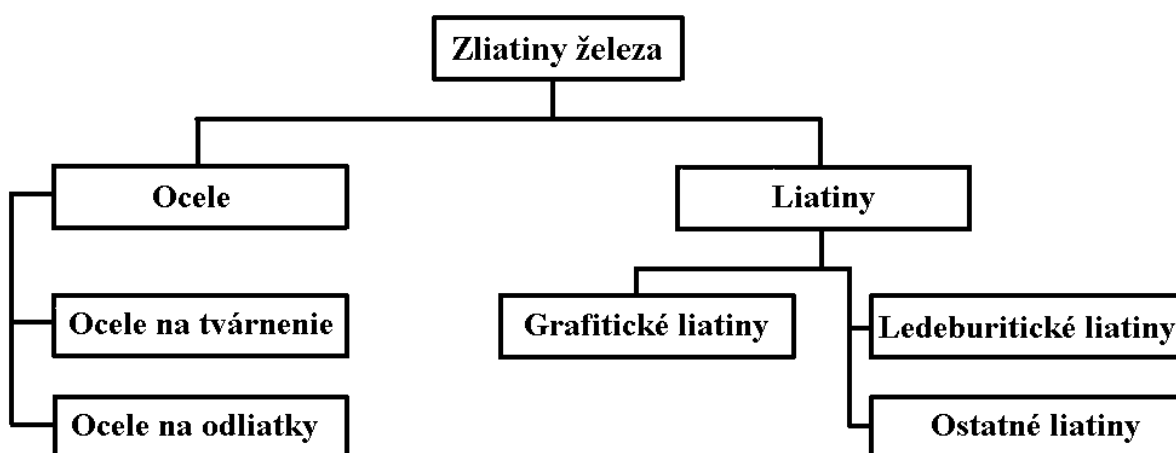
c) Legujúce prvky vplyvajú na mechanické vlastnosti. Substitučné prvky spevňujú ferit bez výraznejšieho poklesu húževnatosti. Interstiticky rozpustené prvky vytvárajú zhluky atómov na dislokáciách a prejavujú sa výraznou medzou klzu.

d) Legujúce prvky spôsobujú vznik nových fáz. Prvky, ako W, Mo, Ti tvoria pri vyšších koncentráciách v štruktúre intermetalické fázy, napr. Fe_2W , Fe_2Mo . Ich vznik sa môže využiť pri vytvrdzovaní ocelí. Veľmi dôležité fázy sú karbidy a nitridy (MC , M_2C , M_7C_3 , M_4C_3 , M_{23}C_6), ktoré výrazne ovplyvňujú vlastnosti ocelí. Karbidy zvyšujú tvrdosť ocelí, vplyv špeciálnych karbidov je výraznejší. Podobne reaguje dusík s nitridotvornými prvkami za vzniku nitridov o obecnom zložení MN , M_2N .

e) Legujúce prvky ovplyvňujú mechanizmus a kinetiku fázových premien. Všetky legujúce prvky okrem hliníku a kobaltu posúvajú krivku rozpadu austenitu k dlhším časom a zvyšujú prekaliteľnosť. Najviac v tomto smere pôsobí B, Cr, Mn, Si, Ni. Väčšina legujúcich prvkov znižuje teplotu začiatku martenzitickej premeny M_s a tiež zvyšuje obsah zvyškového austenitu. S rastúcim obsahom uhlíka sa legujúce prvky uplatňujú výraznejšie.

3.2 Rozdelenie a označovanie technických zliatin železa, materiálové normy

Technické zliatiny železa sa najobecnejšie delia podľa schémy na obr.3.31 na ocele a liatiny, alebo zliatiny železa určené k tvárneniu a zliatiny železa určené k výrobe odliatkov. Až na výnimky sa k tvárneniu používajú len ocele. Len malá časť ocelí (menej než 2 % svetovej produkcie) je určená k výrobe odliatkov. V celosvetovom meradle je podiel liatin na výrobe technických zliatin železa asi 10 %.



Obr.3.31 Schéma rozdelenia zliatin železa

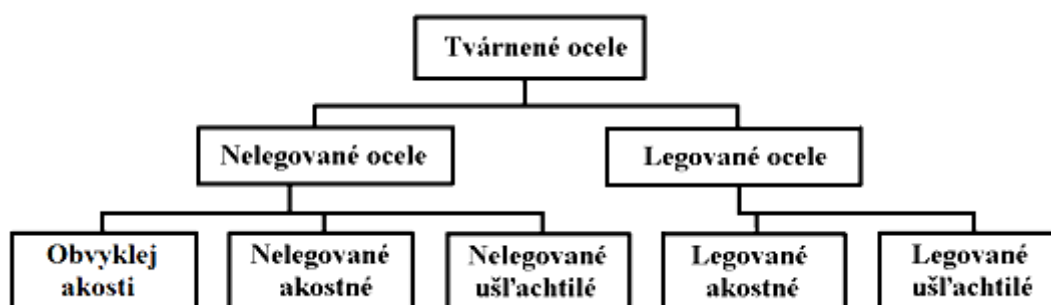
3.2.1 Ocele na tvárnenie

3.2.1.1. Rozdelenie ocelí na tvárnenie

Rozdelenie a označovanie ocelí sa v Európe zjednocuje na základe európskych noriem (EN) a postupne sa stanú normami celoeurópskymi. V SR sú vydávané ako STN EN. Rozdelenie ocelí je dané európskou normou EN 10020, v ktorej sa definuje:

- pojem ocele k tvárneniu,
- rozdelenie druhov ocelí podľa chemického zloženia,
- rozdelenie do hlavných skupín akosti na základe vlastností a účelu použitia.

Ako **ociele k tvárneniu** sú označované materiály, u ktorých hmotnostný podiel železa je väčší než ktoréhokoľvek iného prvku, obsahujú menej ako 2 %C a obsahujú ďalšie prvky. Schéma rozdelenia tvárnených ocelí je na obr.3.32.



Obr.3.32 Schéma rozdelenia ocelí na tvárnenie

Rozdelenie ocelí podľa chemického zloženia:

- *Nelegované ocele* - sú tie, u ktorých obsah jednotlivých prvkov v žiadnom prípade nedosahuje medzné hodnoty uvedené v tab.3.1.
- *Legované ocele* – sú tie, u ktorých obsah jednotlivých prvkov minimálne v jednom prípade dosahuje alebo prekračuje medzné hodnoty obsahu legujúcich prvkov uvedené v tab. 3.1.

Tabuľka 3.1 Medzné obsahy prvkov (hmotnostný podiel prvkov je uvedený v %)

Mn = 1,65	Si = 0,60	Cu = 0,40	Ni = 0,30
W = 0,30	Co = 0,30	Al = 0,30	V = 0,10
Mo = 0,08	Ti = 0,05	Bi = 0,10	Nb = 0,06
Zr = 0,05	Pb = 0,40	B = 0,008	Cr = 0,30

Ostatné prvky (okrem C, P, S, N) vždy 0,05

Rozdelenie ocelí podľa hlavných skupín akosti na základe vlastností a účelu použitia podľa STN EN 10020:

1. Nelegované ocele. Norma STN EN 10020 ich delí do troch hlavných skupín akosti:

a) **oceľ obvyklej vlastnosti**, ktoré nevyžadujú zvláštne opatrenia k výrobe:

- nie sú určené pre tepelné spracovanie (podľa EN 10020 nie je žiadny druh žihania považovaný za tepelné spracovanie),
- požiadavky na akosť sú v súlade s hodnotami medzných hodnôt pre tieto oceľe ($R_{m \min} \leq 690 \text{ MPa}$, $R_{e \min} \leq 360 \text{ MPa}$, $A_5 \min \leq 26 \%$),
- s výnimkou obsahu Mn a Si nie sú predpísané žiadne obsahy legujúcich prvkov,
- ďalšie zvláštne charakteristiky (hlboké ťahanie, profilovanie a pod.) nie sú predpísané

b) **nelegované akostné oceľ** – sú všetky nelegované oceľ, ktoré nie sú zahrnuté v skupinách ocelí obvyklých akostí a ušľachtilých ocelí. Nemajú predpísané žiadne požiadavky na stupeň čistoty z hľadiska nekovových inklúzií. Sú na ne kladené prísnejšie požiadavky (veľkosť zrna, tvárnosť, krehké porušenie a pod.)

c) **nelegované ušľachtilé oceľ** – oproti akostným vykazujú vyšší stupeň čistoty, najmä z hľadiska nekovových inklúzií. Sú určené pre zošľachtovanie alebo povrchové kalenie. Majú presne stanovené chemické zloženie a často zvláštne podmienky výroby. Tu patria:

- oceľ s požiadavkou na nárazovú prácu v zošľachtenom stave,
- oceľ s požiadavkami na hĺbku zakalenej vrstvy alebo povrchovú tvrdosť v zakalenom, povrchovo zakalenom, prípadne popustenom stave,
- oceľ s požiadavkou na obzvlášť nízky obsah nekovových inklúzií,
- oceľ s predpísaným najvyšším obsahom P a S (0,025 % v hotovom výrobku),
- oceľ s min. hodnotami nárazovej práce ($KV > 27 \text{ J}$ na pozdĺžnych vzorkách pri -50 °C),
- oceľ pre jadrové reaktory ($\text{Cu} \leq 0,10 \%$, $\text{Co} \leq 0,05 \%$, $\text{V} \leq 0,05 \%$),
- feriticko-perlitické oceľ s $\text{C} \geq 0,25 \%$ s prípustným obsahom jedného alebo viac mikrolegujúcich prvkov (V, Nb a pod.),
- oceľ pre predpínaciu výstuž do betónu.

2. Akostné skupiny legovaných ocelí

a) **legované akostné oceľ** – sú určené pre podobné použitie ako nelegované akostné oceľ na ktoré sú stanovené požiadavky napr. na húževnatosť, veľkosť zrna alebo tvárnosť. Nie sú všeobecne určené pre zošľachtovanie a povrchové kalenie. Tu patria:

- zvariteľné jemnozrnné oceľ pre oceľové konštrukcie, vrátane ocelí na tlakové nádoby a potrubia s medzou klzu $R_e \leq 360 \text{ MPa}$ a medzným obsahom legujúcich prvkov,

- legované ocele na koľajnice a banské výstuže,
- ocele pre valcované ploché výrobky, obsahujúce prvky zjemňujúce zrno (B, Nb, Ti, V, Zr),
- ocele legované len Cu (Atmofix),
- ocele legované Si, Si - Al, určené pre elektrotechniku.

b) **legované ušľachtilé ocele** – vlastnosti sú dosahované predpísaným chemickým zložením a zvláštnymi podmienkami spracovania. Zahrňujú legované konštrukčné ocele, legované ocele pre tlakové nádoby a zariadenia, ocele pre valivé ložiská, nástrojové ocele, rýchlorezné ocele, ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami – feritické Ni ocele.

Podľa obsahu legujúcich prvkov sa delia na nasledujúce podskupiny:

- korozivzdorné ocele s obsahom $Cr_{min} \geq 10,5 \%$ a max. obsahom uhlíka 1,2 %,
- rýchlorezné ocele s obsahom $C \geq 0,60 \%$ a $Cr = 3,0 - 6,0 \%$, okrem ďalších prvkov obsahujú min. dva z trojice Mo, W, V s celkovým obsahom nad 7 %,
- ostatné legované ušľachtilé ocele.

3.2.1.2 Systémy označovania ocelí

Pre označovanie ocelí sa používa systém skráteného označovania (EN 10027-1) a systém číselného označovania (EN 10027-1). Čísla a písmena značiek ocelí sú volené tak, aby vyjadrovali základné charakteristické znaky, ako napr. hlavné oblasti použitia, mechanické, fyzikálne vlastnosti alebo chemické zloženie. Ďalej sa označenie dopĺňa prídavnými symbolmi, charakterizujúcimi napr. vhodnosť použitia pre vysoké/nízke teploty, stav povrchu, stav spracovania a pod. Pre každú oceľ smie byť stanovená iba jedna značka. Symboly sa radia v značke za sebou bez medzier.

A. Systém skráteného označovania ocelí (EN 10027-1)

Na účely skráteného označovania ocelí sa používajú dve skupiny značiek:

- skupina 1 - značky ocelí vytvorené podľa ich použitia a mechanických alebo fyzikálnych vlastností,
- skupina 2 - značky ocelí vytvorené na základe ich chemického zloženia.

Stavba značiek vytvorených na základe použitia a mechanických a fyzikálnych vlastností:

Značka je vytvorená tromi skupinami značiek a číslíc najčastejšie podľa nasledujúcej schémy:

1. skup.	2. skup.	3.a skup.	3.b skup.
(G)X	nnn(n)	X(X)	X(n)

1. skupina znakov obsahuje veľké písmena. Pre ocele na odliatky sa pred značkou ocele dopĺňa písmeno G. Druhý symbol označuje použitie výrobku.
2. skupina označuje najčastejšie medzu klzu alebo pevnosť, prípadne tvrdosť a i.
- 3.a skupina znakov udáva ďalšie vlastnosti, napr. húževnatosť alebo chemické zloženie, spôsob výroby a tepelného spracovania, tvárniteľnosť a pod.
- 3.b skupina znakov súvisí najmä s použitím ocele.

Označovanie ocelí – skupina 1:

- a) Číslo, ktoré nasleduje za písmenom, označuje min. medzu klzu $R_{e\ min}$ [MPa]
S – ocele pre oceľové konštrukcie – všeobecné použitie,
 Príklad: S355J2W, $R_{e\ min} = 355$ MPa, J2 = KV > 27 J pri $T = -20\ ^\circ\text{C}$, W = odolnosť proti atmosférickej korózii,
P – ocele na tlakové nádoby, napr.: P265H, $R_{e\ min} = 265$ MPa, H – vysoké teploty,
L – ocele na potrubie, napr.: L360Q, $R_{e\ min} = 360$ MPa, Q = zošľachtené,
E – ocele na strojné súčiastky, napr.: E295C, $R_{e\ min} = 295$ MPa, C = tvárniteľné za studena,
- b) **B** – ocele pre výstuž do betónu, nasleduje číslo udávajúce charakteristickú medzu klzu (R_{eH} , R_{eL} , R_p), napr.: B500H, $R_{e\ min} = 500$ MPa, H = tyče,
- c) **Y** – ocele pre výstuž do betónu, napr.: Y1770C, $R_{m\ min} = 1770$ MPa, C = drôt ťahaný za studena,
- d) **R** – ocele pre koľajnice alebo vývalky podobného tvaru, napr.: R0900Mn, $R_{m\ min} = 900$ MPa, Mn - zvýšený obsah mangánu,
- e) **H** – ploché výrobky valcované za studena, napr.: H420M, $R_{e\ min} = 420$ MPa, M – termomechanicky spracované,
- f) **D** – ploché výrobky valcované za studena (okrem 2d), napr.: DC04EK, C04 – valcované za studena, EK – pre smaltovanie,
- g) **T** – tenké a pocínované plechy pre obalovú techniku, napr.: TH52, H52 – stredná hodnota predpísaného rozmedzia tvrdosti,
M – ocele pre elektrotechnické účely.

Skupina 2 - značky ocelí vytvorené na základe ich chemického zloženia:

Podľa uvedeného spôsobu sú ocele rozdelené do štyroch podskupín:

1. nelegované ocele s obsahom Mn < 1%,
2. nelegované ocele s obsahom Mn $\geq 1\%$,
3. legované ocele s obsahom aspoň 1 prvku nad 5 %,
4. rýchlorezné ocele.

Značka ocelí (okrem rýchlorezných) je vytvorená najčastejšie podľa nasledujúcej schémy:

1. skup.	2. skup.	3. skup.
(G)X	nnn	a....n-n

Ad.1. Základná značka pre nelegované ocele so stredným obsahom Mn < 1%. Značka sa skladá z týchto symbolov:

- a) písmena C,
- b) čísla - obsah „C“ x 100 (100x stredný obsah uhlíka)

c) písmeno, bližšie charakterizujúce danú oceľ:

E - predpísaný max. obsah síry, R - predpísaný rozsah pre obsah síry, D – pre ťahané drôty, C – pre tvárnenie za studena, S – pre pružiny, U – nástrojové, W – pre zváracie drôty, G – iné charakteristiky.

Príklad označenia: C25 – nelegovaná oceľ so stredným obsahom C = 0,25 %.

Ad.2. Nelegované ocele s obsahom Mn \geq 1 %, legované ocele s obsahom legúr do 5 %:

a) číslo C x 100

b) chemické značky legujúcich prvkov v klesajúcom poradí podľa obsahu,

c) nasledujú x-x čísla, oddelené pomlčkou, ktoré odpovedajú strednému obsahu prvkov vynásobenému nasledujúcim koeficientom, zaokrúhlené na celé číslo.

Cr, Co, Mn, Ni, Si, W x koeficient 4,

Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr x koeficient 10,

Cr, N, P, S x koeficient 100,

B x koeficient 1000.

Príklad: 10CrMo12-10 – oceľ so stredným obsahom C = 0,10 %, Cr = 3 %, Mo = 1 %.

Ad.3. Legované ocele s obsahom aspoň 1 prvku nad 5 %:

a) charakteristické písmeno X,

b) číslo - obsah „C“ x 100,

c) chemické značky pre legujúce prvky v klesajúcom poradí podľa obsahu,

d) nasledujú x-x čísla, oddelené pomlčkou, ktoré odpovedajú strednému obsahu príslušného prvku, zaokrúhlené na najbližšie vyššie číslo.

Príklad označenia: X5CrNi18-10 – oceľ s 0,05 %C, 18 %Cr, 10 %Ni.

Ad.4. Základné označenie rýchlorezných ocelí:

a) charakteristické písmeno HS,

b) obsahy legujúcich prvkov x-x čísla, udávajúce obsah legujúcich prvkov v poradí W, Mo, V, Co (stredný obsah zaokrúhlený na celé číslo).

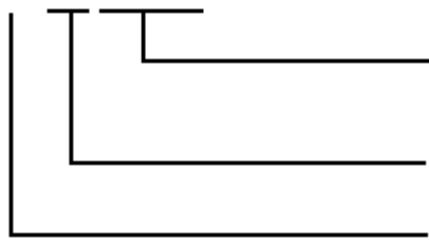
Príklad označenia: HS2-9-1-8 – rýchlorezná oceľ so stredným obsahom W = 2 %, Mo = 9,

V = 1 a Co = 8 %.

B. Systém číslovania ocelí

Norma STN 10027-2 zavádza systém číslovania na označenie tried ocelí (čísla ocelí). Zaoberá sa štruktúrou čísiel ocelí a organizáciou ich registrácie a pridelovaním. Tieto čísla sú doplnkové k názvom ocelí zavedeným v EN 10027-1. Je povinné pre ocele v EN. Čísla oceliam sa pridelujú na základe charakteristických vlastností ako je chemické zloženie, vlastnosti, vhodnosť pre ďalšie spracovanie a zvláštne použitie. Každé číslo ocele musí zodpovedať iba jednému typu ocele a naopak. Čísla ocele sa tvoria podľa schémy:

1 . XXXX(XX)



Poradové číslo. Číslice v zátvorke sú na možné budúce použitie

Číslo skupiny ocelí (EN 10027-2)

Číslo skupiny materiálov: 1 = oceľ

Príklady čísiel ocelí: (STN EN 10027-2)

Nelegované ocele:

- základné ocele: 1.00, 1.90
- akostné ocele: 1.01, 1.91 stavebné konštrukčné ocele s $R_m < 500$ MPa
1.03, 1.93 ocele s obsahom C $< 0,12\%$ alebo $R_m < 400$ MPa
1.06, 1.96 Ocele s obsahom C $\geq 0,55\%$ alebo $R_m \geq 700$ MPa
- ušľachtilé ocele: 1.10 ocele so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami
1.12 konštrukčné ocele, ocele pre tlakové nádoby s C $\geq 0,55\%$
1.15 nástrojové ocele

Legované ocele:

- akostné ocele: 1.08, 1.98 ocele so špeciálnymi fyzikálnymi vlastnosťami
- ušľachtilé ocele: 1.20 Cr nástrojová oceľ
1.23 Cr-Mo, Cr-Mo-V, Mo-V - nástrojové ocele
1.35 ocele na valivé ložiska
1.48 žiaruvzdorné ocele s Ni $\geq 2,5\%$
1.71 Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-B, Cr-Si-Mn konštrukčné ocele pre tlakové nádoby

Podrobné požiadavky na jednotlivé ocele skupiny ocelí sú uvedené v technických dodacích podmienkach. Všeobecne technické dodacie podmienky pre oceľ a oceľové výrobky uvádza norma EN 10021. Technické dodacie podmienky obvykle uvádzajú rozmery, hmotnosti a medzné odchýlky výrobkov, klasifikáciu ocelí a akostných stupňov vrátane označovania, technické požiadavky, kontrolu, skúšanie a označovanie výrobkov.

Technické požiadavky obvykle obsahujú spôsob výroby, chemické zloženie, mechanické vlastnosti, technologické vlastnosti, akosť povrchu a vnútornú akosť pre jednotlivé ocele alebo pre skupiny ocelí. Technické dodacie podmienky ďalej predpisujú spôsob kontroly a udávajú príslušné normy pre vykonávanie jednotlivých skúšok vrátane odberu vzoriek a záznamov o vykonaných skúškach.

3.2.2 Ocele na odliatky

Pre ocele na odliatky v súčasnej dobe neexistuje ekvivalent normy pre rozdelenie ocelí na tvárnenie, EN 10020. Podľa spôsobu použitia môžeme ocele na odliatky rozdeliť na:

- a) nelegované a legované ocele na odliatky pre všeobecné použitie,
- b) ocele pre odliatky tlakových nádob,
- c) korozivzdorné ocele pre všeobecné použitie,
- d) žiaruvzdorné ocele na odliatky pre všeobecné použitie,
- e) materiály pre odstredivo liate výrobky.

3.2.3 Liatiny

Liatiny možno rozdeliť použitím systému európskej normalizácie pre ich označovanie. Systém označovania liatin je uvedený v STN EN 1560. K označovaniu liatin sa používa jednak systém skráteného označovania, jednak systém číselného označovania.

3.2.3.1 Systém skráteného označovania liatin

Značka liatiny je tvorená písmenami a číslami usporiadanými do šiestich pozícií:

1. pozícia obsahuje znaky EN,
2. pozícia obsahuje znaky GJ (odliatok z liatiny),
3. pozícia uvádza označenie pre tvar grafitu veľkým písmenom podľa tab.3.2. Označenie sa pripája k symbolu na 2. pozícií bez medzery,

Tabuľka 3.2 Označenie tvaru grafitu

L	lupienkový	V	vermikulárny
S	guľôčkový	N	ledeburitické liatiny bez grafitu
M	vložkový (temperovaný)	Y	zvláštny tvar uvedený v príslušnej mat. norme

4. pozícia sa pripája len v prípade kedy je nutné označiť mikro alebo makroštruktúru. Inak sa vynecháva. K označeniu mikro a makroštruktúry sa používajú značky uvedené v tab.3.3.

Tabuľka 3.3 Označenie mikro a makroštruktúry

A	austenit	Q	štruktúra po zakalení
F	ferit	T	štruktúra po zošľachtení
P	perlit	B	neoduhličená štruktúra*
M	martenzit	W	oduhličená štruktúra*
L	ledeburit		

* Platí pre temperovanú liatinu

5. pozícia uvádza buď mechanické vlastnosti liatiny alebo jej chemické zloženie

Označenie podľa mechanických hodnôt

Mechanické hodnoty sa zisťujú buď na oddelene liatych alebo priliatych skúšobných vzorkách, alebo na vzorkách vyrezaných z odliatku. Spôsob výroby skúšobnej vzorky udáva písmeno uvedené v tab.3.4, ktoré nasleduje za číselným označením mechanických hodnôt.

Tabuľka 3.4 Označenie spôsobu výroby skúšobnej vzorky

S	oddelene liata skúšobná vzorka
U	priliata skúšobná vzorka
C	skúšobná vzorka vyrezaná z odliatku

Označenie pevnosti

Číslo udáva najmenšiu zaručenú pevnosť v MPa.

Príklad: EN GJL-150C – liatina s lupienkovým grafitom, s min. pevnosťou 150 MPa. Pevnosť bola stanovená na skúšobnej vzorke vyrobenej vyrezaním z odliatku.

Označenie ťažnosti

Pokiaľ sa udáva ťažnosť, pridáva sa za údaj minimálnej pevnosti ako minimálna hodnota v percentách, hneď za pomlčkou.

Príklad: EN GJS-350-22U – liatina s guľôčkovým grafitom, s min. pevnosťou 350 MPa a min. ťažnosťou 22 %. Mechanické hodnoty boli stanovené na priliatej vzorke

Označenie teploty pri skúške rázom v ohybe

Ak sa vyžaduje skúška rázom v ohybe, potom sa teplota skúšania označuje písmenami uvedenými v tab.3.5. Písmena sa uvádzajú po pomlčke za mechanickými vlastnosťami.

Tabuľka 3.5 Označenie teploty skúšky rázom v ohybe

RT	izbová teplota	LT	nízka teplota
----	----------------	----	---------------

Označenie tvrdosti

Pri označovaní tvrdosti liatiny sa používajú nasledujúce skratky:

- a) HB – tvrdosť podľa Brinella,
- b) HV – tvrdosť podľa Vickersa,
- c) HR – tvrdosť podľa Rockwella.

Príklad: EN GJL-HB155 – liatina s lamelárnym grafitom, tvrdosť 155 HB.

Označenie podľa chemického zloženia

Pokiaľ sa liatina označuje podľa chemického zloženia, potom musí 5. pozícia začínať písmenom X. Za znakom X nasledujú chemické značky podstatných legujúcich prvkov v poradí s klesajúcim obsahom. Nasledujúce čísla udávajú obsah legujúcich prvkov v percentách. Čísla sú oddelené pomlčkami. Obsah uhlíka sa udáva stonásobkom za písmenom X, ale nemusí byť vôbec udaný.

Príklad: EN-GJL-XNiMn13-7 – liatina s lupienkovým grafitom s 13 %Ni a 7 %Mn,

EN-GJN-X300CrNiSi9-5-2 – liatina s obsahom C = 3 %, Cr = 9 %, Ni = 5 %, Si = 2 %, grafit nie je vylúčený.

6. pozícia uvádza dodatočné požiadavky na odliatok – tab.3.6

Tabuľka 3.6 Dodatočné požiadavky na odliatok

D	tepelné nespracovaný odliatok
H	tepelné spracovaný odliatok
W	vhodný pre zváranie
Z	ďalšie požiadavky uvedené v objednávke

3.3 Ocele

Nižšie uvedené konštrukčné ocele sú usporiadané v súlade s normou STN EN 10020. Jednotlivé skupiny ocelí môžu preto obsahovať nelegované aj legované ocele používané na rovnaké účely. Každá značka môže byť ďalej uvedená v rôznych akostných stupňoch, ktoré udávajú napr. predpísanú hodnotu rázovej práce KV, spôsob dezoxidácie a pod. Akostné stupne jednotlivých značiek majú svoje označenie. Napríklad oceľ pre oceľové konštrukcie S235 je normovaná v šiestich akostných stupňoch S235JR, S235JRG1, S235JRG2, S235J0, S235J2G3, S235J2G4 (prvé tri označenia patria do skupiny nelegovaných ocelí obvyklej akosti). Mechanické vlastnosti sú uvádzané pre rôzne hrúbky výrobkov (ďalej najčastejšie pre hrúbku 16 mm).

3.3.1 Nelegované ocele obvyklej akosti

Sú určené k výrobe plochých výrobkov. Jedná sa najmä o plechy a pásy z mäkkých ocelí pre tvárnenie za studena, prípadne o ocele na strojné súčasti s nízkymi nárokmi na mechanické vlastnosti bez zaručenej húževnatosti a zvárateľnosti.

3.3.2 Ocele akostné a ušľachtilé

V tejto kapitole sú akostné ocele a nelegované ocele ušľachtilé rozdelené podľa účelu použitia v zmysle STN EN 10020.

3.3.2.1 Ocele valcované za studena z hlbokoťahných ocelí k tvárneniu za studena STN EN 10130

Tvoria samostatnú skupinu ocelí na pásy a plechy Vyrábajú sa tvárnením za studena alebo za tepla. Pre dobrú plastickú deformáciu sa u nich vyžaduje čo najnižšia medza klzu. Najakostnejšie ocele majú $R_e < 160$ MPa, pevnosť v ťahu 280 MPa a ťažnosť minimálne 45 %. Hlbokoťahné ocele majú obsah uhlíka pod 0,1 %, pretože uhlík zvyšuje medzu klzu (tab.3.7). Ich štruktúra je feritická s malým množstvom perlitu. Ocele sú vhodné na zváranie bežnými postupmi.

Ocele pre hlboký ťah s nízkym obsahom uhlíka sa nazývajú ULC (Ultra Low Carbon) ocele. Sú dodávané vo valcovanom stave bez tepelného spracovania. Majú znížený obsah fosforu a síry ($< 0,15$ %) a kremíku ($< 0,10$ %).

Boli vyvinuté nové typy ocelí pre tvárnenie za studena s veľmi malým obsahom intersticiálnych prvkov (C, N) a vysokou medzou klzu označované ako IF (interstitials free steels) ocele. Typické zloženie IF ocele: 0,0015 %C, 0,0025 %N, 0,006 %P, 0,005 %S, 0,12 %Mn, 0,030 %Al, 0,05 %Ti. Zvýšenie pevnosti a medze klzu pri zachovaní tvárnosti umožnilo znížiť hmotnosť oceľovej karosérie na úroveň rovnakej karosérie vyrobenej z hliníku.

Tabuľka 3.7 Mechanické vlastnosti a chemické zloženie vybraných značiek hlbokoťahných ocelí

Značka	R_e	R_m	A_{80}	r_{90}	n_{90}	Chemické zloženie tavby				
	[MPa]	[MPa]	min. [%]	min.	min.	max. [%]				
						C	P	S	Mn	Ti
FeP01	až 280	270-410	28	-	-	0,12	0,045	0,045	0,60	-
FeP03	až 240	270-370	34	1,3	-	0,10	0,035	0,035	0,45	-
FeP04	až 210	270-350	38	1,6	0,180	0,08	0,030	0,030	0,40	-
FeP05	až 180	270-330	40	1,9	0,200	0,06	0,025	0,025	0,35	-
FeP06	až 180	270-310	38	1,08	0,220	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

r_{90} – súčiniteľ normálovej anizotropie v smere 90° na smer valcovania

n_{90} – exponent deformačného spevnenia v smere 90° na smer valcovania

Pri oceliach vykazujúcich BH (bake hardening) efekt sa vytvrdzovací efekt prejavuje už pri teplotách 170°C. Ocele sa vyrábajú riadeným valcovaním, ktoré je vedené tak, aby uhlík a dusík zostali po valcovaní rozpustené v tuhom roztoku (vo ferite). Plech má za týchto podmienok veľmi dobrú tvárnosť za studena. Po lisovaní a následnom vypaľovaní laku karosérie dochádza pri teplote nad 170°C k precipitácii karbidov a nitridov Ti, prípadne Ti a Nb.

Počas vytvrdzovania sa zvýši medza klzu o 40 až 70 MPa. BH ocele sú tiež odolné proti starnutiu.

3.3.2.2 Mikrolegované ocele

Vývoj mikrolegovaných ocelí súvisí s rozvojom tepelne mechanického spracovania ocelí. Touto technológiou sa podarilo výrazne zvýšiť pevnostné vlastnosti ocelí pri zachovaní dobrých plastických vlastností a zvariteľnosti.

V mriežke čistého železa sa môžu dislokácie ľahko pohybovať, a preto má ferit nízku medzu klzu. Pri mikrolegovaných oceliach pridané prvky vedú k vylúčeniu novej fázy – precipitátov. Tieto brzdia pohyb dislokácií a spôsobujú precipitačné vytvrdenie, vedúce k zvýšeniu pevnosti a poklesu charakteristík plastičnosti. Zmenšenie ťažnosti a húževnatosti sa dá kompenzovať zmenšením veľkosti zrna, čo má za následok ďalšie zvýšenie pevnosti. Jemnozrnná štruktúra sa dá dosiahnuť tepelne mechanickým spracovaním. Tvárnenie začína v oblasti nad teplotou A_3 a je dokončené pod teplotou rekryštalizácie austenitu. Rekryštalizácia je brzdená precipitátmi mikrolegujúcich prvkov, uhlíku a dusíku. Čím je precipitát jemnejší, tým je pôsobenie na teplotu rekryštalizácie vyššie.

K mikrolegovaniu sa používajú prvky s vysokou afinitou k uhlíku a dusíku. Jedná sa predovšetkým o Ti, V, Nb, Zr (do obsahu 0,2 %). Tieto prvky tvoria nitridy, karbidy, alebo karbonitridy stabilné do vysokých teplôt (780 – 1250°C). Už malé množstvo titánu viaže dusík na TiN a spoľahlivo zabráni starnutiu ocele. Disperzne vylúčené zlúčeniny uhlíka a dusíka s vyššie uvedenými prvkami bránia tiež hrubnutiu austenitického zrna pri teplotách tvárnenia. Zmenšením feritického zrna z 10 na 5 μm sa u bežných ocelí mikrolegovaných niobom zvýši medza klzu o 70 MPa a prechodová teplota sa zníži o 40°C. U feritických ocelí s priemerom zrna 0,77 μm sa dosahuje pevnosti 760 MPa.

Ďalej uvádzané skupiny akostných ušľachtilých ocelí môžu byť vyrábané ako mikrolegované aj keď mikrolegujúce prvky v príslušných tabuľkách chemického zloženia nie sú uvádzané.

3.3.2.3 Ocele pre oceľové konštrukcie

Nelegované akostné ocele (STN EN 10025 + A1) sú určené pre výrobu plochých a dlhých výrobkov. Norma uvádza tri typy ocelí tejto skupiny a predpisuje u nich minimálne hodnoty R_e , R_m , A a KV. Sú určené pre tvárnenie za studena, prípadne aj za tepla. Na zváranie sú tieto ocele vhodné iba ak sú dodané v akostnom stupni JR, J0, J2 a K2. Zvariteľnosť vzrastá od akostného stupňa JR k stupni K2 a s klesajúcou hodnotou uhlíkového ekvivalentu:

$$C_E = C + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V})/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15 \quad (3.1)$$

Uhlíkový ekvivalent C_E sa udáva v hmotnostných percentách. Miesto značiek prvkov v rovnici 3.1 sa dosadzujú ich koncentrácie v hmotnostných percentách.

Prvky uvedené v rovnici 3.1 zvyšujú prekaliteľnosť. Pri rýchlostiach ochladzovania bežných pri zvaraní spôsobujú uvedené prvky od určitej koncentrácie vznik štruktúry nepopusteného martenzitu. Vznik martenzitickej štruktúry je pre zvarový spoj veľkým nebezpečím. Vybrané typy akostných nelegovaných ocelí sú uvedené v tab.3.8.

Zvariteľné jemnozrnné konštrukčné ocele (STN EN 10113-1 až 3) sú dodávané ako plechy, pásy alebo dlhé výrobky valcované za tepla. Sú určené pre vysoko namáhané zvarané konštrukcie, napr. mosty, vráta plavebných komôr, zásobníky, nádrže na vodu, výrobu profilov a pod. Výrobky sa dodávajú buď v stave normalizovanom (normalizačne valcovanom) alebo v stave termomechanicky valcovanom. Podľa pevnostných charakteristík sú normalizované štyri typy ocelí tejto skupiny (s $R_e = 275 - 460$ MPa) – tab.3.9. Vyšších pevnostných hodnôt sa dosahuje tepelným alebo termomechanickým spracovaním ($R_m = 360 - 720$ MPa). Ocele bývajú aj mikrolegované prvkami, ktoré tvoria stabilné nitridy (Nb, V, Al, Ti).

Tabuľka 3.8 Chemické zloženie [hm. %] a mechanické vlastnosti ocelí EN 10025

Označenie	C	Mn	Si	S	P	Cu	ReH [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
Neleg. akost S235JO EN 10025	max.	max.	-	max.	max.	-	min.	360	-
	0,17	1,40		0,040	0,040		235	510	
S275JO	max.	max.	-	max	max.	-	min.	430	min.
	0,20	1,50		0,040	0,040		275	580	14
S355JO	max.	max.	max.	max	max.	-	min.	510	-
	0,20	1,60	0,55	0,040	0,040		355	630	

Tabuľka 3.9 Chemické zloženie [hm. %] a mechanické vlastnosti ocelí normalizačne žíhaných

Označ.	C	Si	Mn	P	S	V	Ni	Cu	ReH [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
	max.	max.		max.	max.	max.	max.	max.			
S275N	0,18	0,40	0,50- 1,40	0,035	0,030	0,05	0,30	0,35	min. 275	375- 510	min. 24
S355N	0,20	0,50- 1,65	0,90	0,035	0,030	0,12	0,50	0,35	min. 355	470- 630	min. 22
S420N	0,20	0,60- 1,70	1,00	0,035	0,030	0,20	0,80	0,70	min. 420	520- 680	min. 19
S460N	0,20	0,60	1,00- 1,70	0,035	0,030	0,20	0,80	0,70	min. 460	550- 720	min. 17

Konštrukčné ocele odolné proti atmosférickej korózii (SN EN 10155) majú vo vhodných atmosférických podmienkach odolávať korózii bez povrchovej ochrany, a to na základe pridania určitého množstva mikrolegujúcich prvkov ako P, Cu, Cr, Ni, Mo, a iné (tab.3.10). Vplyvom týchto prvkov a poveternostných podmienok sa vytvára na povrchu základného materiálu ochranná vrstva oxidov. Ocele sú ukľudnené, prípadne s prísadou prvkov, ktoré

viažu dusík (Al, Nb, V, Ti). Ocele sa dodávajú ako ploché alebo dlhé výrobky, prípadné rúrky. Pre potreby zvarovania u týchto ocelí výrobca predpisuje C_E.

Tabuľka 3.10 Chemické zloženie [hm. %] ocelí EN 10155

Značka	Číslo mat.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
S235J2W	1.8958	0,13	0,40	0,20 - 0,60	max. 0,040	0,035	0,40 - 0,80	0,25 - 0,55
S355J2WP	1.8946	0,12	0,75	max. 1,00	0,06 - 0,15	0,035	0,33 - 1,25	0,25 - 0,55
S355J0W	1.8959	0,16	0,50	0,50 - 1,50	max. 0,040	0,040	0,40 - 0,80	0,25 - 0,55
S355J2G2W	1.8965	0,16	0,50	0,50 - 1,50	max. 0,035	0,035	0,40 - 0,80	0,25 - 0,55

3.3.2.4 Ocele pre tlakové nádoby STN EN 10028

Ocele sú určené pre výrobu plochých a dlhých výrobkov používaných pre konštrukciu tlakových nádob. Okrem skúšky na chemické zloženie a mechanické vlastnosti je predpísaná skúška vnútornej akosti. Delia sa na:

- zvariteľné nelegované a legované ocele pre vyššie teploty podľa STN EN 10028-2,
- normalizačne žíhané jemnozrnné konštrukčné ocele vhodné na zvarovanie podľa STN EN 10028 - 3,
- oceli legované Ni so zaručenými vlastnosťami pri nízkych teplotách podľa STN EN 10028 - 4.

Zvariteľné nelegované a legované ocele pre vyššie teploty. Sú vyrábané ako nelegované akostné alebo legované ušľachtilé. V skupine nelegovaných ocelí sú štyri akosti s medzou klzu od 235 do 355 MPa, tab.3.11.

Vyššia medza klzu sa dosahuje zvýšeným obsahom C, Si, Mn. Legované ocele obsahujú Cr a Mo. Celkom sú normalizované štyri akosti nelegovaných a štyri akosti legovaných ocelí. Nelegované značky sa používajú do 500 °C, legované až do 600 °C.

Tabuľka 3.11 Chemické zloženie [hm. %] vybraných ocelí na tlakové nádoby

Značka	C max.	Si	Mn	Cr	Mo max.	Nb max.	Ni max.	Ti max.	V max.
P235GH	0,10	0,16-0,35	0,40	max. 1,20	max. 0,30	0,08-0,010	0,30	0,03	0,02
P355GH	0,10	0,22-0,60	1,00	max. 1,70	max. 0,30	0,010 0,08	0,30	0,03	0,02
16Mo3	0,12	0,20-0,35	0,40	0,70-1,00	0,25-1,15	0,01-0,35	0,30	-	-
11CrMo9-10	0,08	0,15-0,50	0,40	0,08-2,00	0,90-2,50	max.1,10	-	-	-

Zvariteľné jemnozrnné ocele, normalizačne žíhané. Sú dodávané, pokiaľ to nie je inak dohodnuté v stave normalizačne žíhanom. Norma rozdeľuje ocele do štyroch rad označených poslednými dvoma písmenami na konci značky:

- základná rada (P ... N),

- b) žiarupevná rada (P ... NH),
- c) rada so zaručenou rázovou húževnatosťou pri nízkych teplotách (P ... NL1),
- d) zvláštna rada so zaručenou rázovou húževnatosťou pri nízkych teplotách (P ... NL2).

Chemické zloženie pre základnú radu ocelí je uvedené v tab.3.12.

Tabuľka 3.12 Chemické zloženie [hm. %] pre ocele základného radu

Značka	Číslo mat.	C max.	Si max.	Mn	Cu	Mo	N	Ni	Ti	V	Nb + Ti + V max.
P275N	1.0486	0,18	0,40	0,50-1,40	0,30	0,08	0,02	0,50	0,03	0,05	0,05
P355N	1.0562	0,20	0,50	0,90-1,70	0,30	0,08	0,02	0,50	0,03	0,10	0,12
P460N	1.8905	0,20	0,60	1,00-1,70	0,70	0,10	0,02	0,80	0,03	0,20	0,22

Medza pevnosti sa u nich pohybuje v rozmedzí 390 – 720 MPa. V norme sú ďalej uvedené pre jednotlivé rady ocelí minimálne hodnoty spotrebovanej energie KV pri rôznej skúšobnej teplote (od – 50 až po + 20°C), pre skúšku na pozdĺžnych a priečnych tyčiach, ako aj hodnoty medze klzu $R_{p0,2}$ pri zvýšených teplotách.

Ocele legované niklom so zaručenými vlastnosťami pri nízkych teplotách. Majú zaručenú hodnotu rázovej práce podľa obsahu niklu od –60 do –196°C. V tejto skupine je normalizované celkom 7 značiek.

Podľa obsahu Ni ich môžeme rozdeliť do štyroch skupín:

- 0,30 – 0,85 %Ni 11MnNi5-3, 13MnNi6-3
- 1,30 – 1,70 %Ni 15NiMn6
- 3,25 – 5,25 %Ni 12Ni14, 12Ni19
- 8,50 – 10,0 %Ni X8Ni9, X7Ni9

Ocele pre zvárané plynové fľaše, STN EN 10120 sa dodávajú ako plechy a pásy valcované za tepla o hrúbke do 5 mm. Oceľ je dodávaná v stave valcovanom za tepla normalizovaná alebo bez normalizácie. Chemické zloženie a mechanické hodnoty ocelí pre zvárané plynové fľaše sú uvedené v tab.3.13. Pre všetky ocele je limitovaný obsah S max. 0,015 %, P max. 0,025 %, N max. 0,009 %, Nb max. 0,050 % a Ti max. 0,03 %.

Tabuľka 3.13 Chemické zloženie a mechanické hodnoty ocelí pre zvárané plynové fľaše

Značka	Číslo mat.	C max. [%]	Si max. [%]	Mn min. [%]	ReH min. [MPa]	R _m min. [MPa]	A min. [%]	Teplota Normalizácie [°C]
P245NB	1.0111	0,16	0,25	0,30	245	360 – 450	34	900 – 940
P265NB	1.0423	0,19	0,25	0,40	265	410 – 500	32	890 – 930
P310NB	1.0437	0,20	0,50	0,70	310	460 – 550	28	890 – 930
P355NB	1.0557	0,20	0,50	0,70	355	510 – 620	24	880 – 920

3.3.3 Ocele pre výstuž do betónu STN EN 10080

Sú dodávané ako ocele akostné podľa STN EN 10080. Normované sú dve ocele B500A a B500B, ktoré majú rovnaké chemické zloženie charakterizované 0,22 %C; 0,050 %P; 0,050 %S; 0,012 %N. Predpísaný uhlíkový ekvivalent vypočítaný podľa rovnice 5.1 činí max. 0,50 %. Pokiaľ sú splnené vyššie uvedené podmienky, majú ocele zaručenú zvariteľnosť. Ocele majú predpísanú medzu únavy 180 MPa. Obe ocele sa líšia hodnotou pomeru R_m/R_e . Pre akosť B500A je predpísaný pomer $R_m/R_e = 1,05$, pre oceľ B500B je to 1,08, pri $R_m = 500$ MPa.

3.3.4 Ocele pre koľajnice

Na výrobu koľajníc sa používajú perlitické ocele nelegované, legované mangánom alebo chrómom (vanádom). U ocelí sa požaduje dobrá odolnosť proti kontaktnej únave. Pre všetky akosti je predpísaná maximálna hodnota obsahu vodíka. U ocelí s pevnosťou do 770 MPa je maximálny povolený obsah vodíka v tavenine 3 ppm, u ocelí s vyššou pevnosťou 2,5 ppm. Uvedené obsahy vodíka je možné získať iba vákuovaním ocele.

Na životnosť koľajníc má veľký vplyv čistota oceli. Prítomnosť oxidických inklúzií zvyšuje ich náchylnosť ku kontaktnej únave. Vývoj koľajníc vedie k materiálom s nižším obsahom uhlíka s bainitickou štruktúrou, ktoré majú vyššiu pevnosť pri mierne zvýšenej hodnote ťažnosti. Ocele sú legované Mn, Nb a V a dosahujú pevnosť až 1400 MPa. Posledný vývoj vedie k materiálom s veľmi nízkym obsahom uhlíka.

3.3.5 Automatové ocele STN EN 10087

Zvýšený obsah S a P až 0,2 % zlepšuje ich obrobitelnosť (lámavosť triesky). Používajú sa pre výrobu skrutiek a pod. sústružením na automatoch. Vzhľadom k vysokému obsahu S a P sa ich zváranie neodporúča. Automatové ocele sa rozdeľujú do 3 skupín. V prvej skupine sú ocele ktoré sa dodávajú v tepelne nespracovanom stave (napr. 11SMn30). V druhej skupine sú ocele určené pre cementovanie (10S20, 15SMN13) a v tretej skupine ocele k zošľachťovaniu. K viazaniu síry je v oceliach vyšší obsah Mn, ktorý je dôležitý najmä u značiek s nižším obsahom uhlíka. Uvedené akosti automatových ocelí môžu byť vyrábané s prísadou 0,20 až 0,35 %Pb.

3.3.6 Ocele k cementovaniu STN EN 10084

Vyznačujú sa relatívne nízkym obsahom uhlíka a sú určené k povrchovému nauhličovaniu alebo ku karbonitridácii s následným kalením. Po takom spracovaní sa tieto ocele vyznačujú tvrdou povrchovou vrstvou a húževnatým jadrom. Všetky ocele určené k cementovaniu musia byť dezoxidované. Sú dodávané v tepelne nespracovanom stave, to je v stave po valcovaní za tepla.

U ocelí je predpísaná veľkosť austenitického zrna od 5 do 8 (EN 10103) a čistota ocele. Celkom je normovaných 35 značiek ocelí. Podľa chemického zloženia ich môžeme rozdeliť do

šiestich nasledujúcich skupín: ocele nelegované ušľachtilé, Cr ocele, Cr-Mn, Cr-Mo, Cr-Ni a Cr-Ni-Mo ocele.

Nelegované ušľachtilé ocele sa vyznačujú obsahom uhlíka 0,07 až 0,13 % alebo 0,12 až 0,18 %. Nevýhodou nelegovaných ocelí je malá prekaliteľnosť.

Legujúce prvky ovplyvňujú obsah uhlíku v cementovanej vrstve, jej hrúbku a tvrdosť. Austenitotvorné prvky zvyšujú podiel zvyškového austenitu po kalení. Nikel a mangán zvyšujú húževnatosť jadra. V tab.3.14 sú vybraní predstavitelia jednotlivých skupín ocelí k cementovaniu.

Nelegované ocele sa používajú pre málo namáhané súčiastky s menšou hrúbkou steny, pretože ich prekaliteľnosť je malá. Chrómové a chrómmolybdénové ocele majú vyššiu prekaliteľnosť. Cementované vrstvy chrómových ocelí majú dobrú odolnosť proti opotrebeniu, sú však krehké. Ocele legované niklom majú najväčšiu pevnosť jadra, sú preto vhodné na najviac namáhané súčasti, napr. ozubené kolesa s tenkými zubmi. Pre dosiahnutie dobrej obrobitelnosti sa ocele žihajú na mätko (na feriticko-perlitickú štruktúru). Cementácia prebieha podľa EN 10084 pri teplotách 880 – 980°C.

Tabuľka 3.14 Vybrané ocele k cementovaniu z jednotlivých skupín [hm. %]

Značka	Číslo mat.	C	Mn	Cr	Mo	Ni
17Cr3	1.7016	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,70 – 1,00		
28Cr4	1.7030	0,24 – 0,31	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		
16MnCr5	1.7131	0,14 – 0,19	1,00 – 1,30	0,80 – 1,10		
20MnCr5	1.7147	0,17 – 0,22	1,10 – 1,40	1,00 – 1,30		
18CrMo4	1.7243	0,15 – 0,21	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20	0,15 – 0,25	
20MoCr3	1.7320	0,17 – 0,23	0,60 – 0,90	0,40 – 0,70	0,30 – 0,50	
16NiCr4	1.5714	0,13 – 0,19	0,70 – 1,00	0,60 – 1,70		0,80-1,10
10NiCr5-4	1.5805	0,07 – 0,12	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20		1,20-1,50
15NiCr13	1.5752	0,14 – 0,20	0,40 – 0,70	0,60 – 0,90		3,00- 3,50
20NiCrMo2-2	1.6523	0,17 – 0,23	0,65 – 0,95	0,35 – 0,70	0,15 – 0,25	0,40- 0,70
17NiCrMo6-4	1.6566	0,14 – 0,20	0,60 – 0,90	0,80 – 1,10	0,15 – 0,25	1,20- 1,50
18CrNiMo7-6	1.6587	0,15 – 0,21	0,50 – 0,90	1,50 – 1,80	0,25 – 0,35	1,40- 1,70
14NiCrMo13-4	1.6657	0,11 – 0,17	0,30 – 0,60	0,80 – 1,10	0,10 – 0,25	3,00- 3,50

3.3.7 Ocele k nitridovaniu STN EN 10084

K nitridovaniu sú vhodné ocele ktoré majú kontrolovaný obsah dvoch alebo viac nitridotvorných prvkov Al, Cr, V. Niekedy sú legované aj molybdénom. Sú dodávané v tepelne nespracovanom stave po valcovaní za tepla, prípadne v stave vyžíhanom na mätko, zošľachtenom, alebo podľa zvláštného režimu spracovania. Chemické zloženie vybraných značiek a mechanické hodnoty ocelí priemeru 16 až 40 mm určených pre nitridáciu sú uvedené v tab.3.15.

Tabuľka 3.15 Chemické zloženie a mechanické hodnoty ocelí určených pre nitridáciu

Značka	Chemické zloženie [hm. %]				R _m min. [MPa]	R _e min. [MPa]	A min. [%]	KV min. [J]
	C	Cr	Mo	V				
34CrAlNi7	0,30 - 0,37	1,50 - 1,80	0,15 - 0,25	-	900	680	10	30
41CrAlMo7	0,38 - 0,45	1,50 - 1,80	0,20 - 0,35	-	950	750	11	25
39CrMoV13-9	0,36 - 0,43	3,00 - 3,50	0,70 - 1,00	0,20	950	750	11	25
34CrAlMo5	0,30 - 0,37	1,00 - 1,30	0,15 - 0,25	-	800	600	14	35
23CrMo13-6	0,20 - 0,27	3,00 - 3,50	0,50 - 0,70	-	1000	800	10	25
31CrMo12	0,20 - 0,35	2,80 - 3,30	0,30 - 0,50	-	1030	835	10	25
31CrAlMo7-1	0,28 - 0,35	1,50 - 1,80	0,20 - 0,40	-	1030	835	10	25
31CrMoV9	0,27 - 0,34	2,30 - 2,70	0,15 - 0,25	0,15	1100	900	9	25
32CrMoV12-9	0,29 - 0,36	2,80 - 3,30	0,70 - 1,00	0,20	1150	950	11	30

Všetky majú predpísaný rovnaký režim pre zošľachťovanie. Kalia sa z teploty 870 až 930°C do vody alebo do oleja, popúšťajú sa pri teplote 580 až 700°C a nitridujú pri teplote 480 až 570°C.

Obsah uhlíka v nitridačných oceliach je vyšší než v oceliach cementačných a umožňuje dosiahnutie vyššej tvrdosti jadra. Nitridované vrstvy sú tvrdšie než cementované a pri mäkkom jadre by mohla byť nitridovaná vrstva pretlačená. Hliník a vanád tvoria veľmi jemné nitridy (AlN a VN), ktoré zvyšujú tvrdosť nitridovanej vrstvy. Prísada molybdénu má znížiť náchylnosť ocele k popúšťacej krehkosti.

3.3.8 Pružinové ocele STN EN 10132

Pružinové ocele sú dodávané ako ocele ukľudnené v stave vyžíhanom na mätko, valcovanom za studena, alebo zošľachtenom. Norma STN EN 10132 sa vzťahuje na dodávky pásov. U ocelí sa hodnotí veľkosť zrna a čistota podľa EN 10 132-1.

Podľa chemického zloženia je ich možné rozdeliť na tri skupiny:

- ušľachtilé nelegované ocele,
- ocele legované kremíkom,
- ocele legované chrómom, prípadne chrómom a vanádom, alebo niklom.

Ocele sú dodávané v akostiach pre cementáciu - EN 10132-2, pre zošľachťovanie - EN 10132-3 a pre zvláštne použitie - EN 10132-4. Ocele pre cementáciu sa dodávajú ako ušľachtilé nelegované (dve značky), ostatné sú určené pre cementáciu. Nízkolegované ocele odpovedajú Cr - Mn a Cr oceliam určených k cementácii (16MnCr5 a 17Cr3). Ocele pre zošľachťovanie predstavujú ušľachtilé nelegované ocele s odstupňovaným obsahom uhlíka od 0,17 do 0,65 %C.

Po zošľachtení tieto ocele dosahujú pevnosť R_m v rozmedzí 1050 až 2100 MPa pri tvrdosti 305 až 530 HV. Ocele sa kalia z teplôt 840 až 870°C. Ocele s vyšším obsahom uhlíka a legované ocele sa kalia do oleja, ostatné do vody.

U pružinových ocelí sa požaduje vysoká čistota a povrchová akosť. Povrch pružín sa často spevňuje guličkováním alebo tryskaním balotinou, čo vedie k vzniku tlakových pnutí v povrchovej vrstve a k zvýšeniu medze únavy.

3.3.9 Ocele k zošľachťovaniu STN EN 10083

Ocele sú určené predovšetkým k výrobe strojných súčastí, ktoré sa tepelne spracovávajú zošľachťovaním, prípadné sú používané v stave normalizovanom. Všetky ocele musia byť ukludnené a sú obrobiteľné v stave vyžíhanom na mätko. Chemické zloženie vybraných ocelí k zošľachťovaniu je uvedené v tab.3.16.

Tabuľka 3.16 Chemické zloženie vybraných ocelí k zošľachťovaniu [hm. %]

Značka	Číslo mat.	Chemické zloženie				
		C	Mn	Cr	Mo	Ni
C22E	1.1151	0,17 – 0,24	0,40 – 0,70	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40
C60E	1.1221	0,57 – 0,65	0,60 – 0,90	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40
38Cr2	1.7003	0,35 – 0,42	0,50 – 0,80	0,40 – 0,60	-	-
41Cr4	1.7035	0,38 – 0,45	0,60 – 0,90	0,90 – 1,20	-	-
50CrMo4	1.7228	0,46 – 0,54	0,50 – 0,80	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30	-
36NiCrMo16	1.6773	0,32 – 0,39	0,30 – 0,60	1,60 – 2,00	0,25 – 0,45	3,60 – 4,10

Norma tiež uvádza mechanické vlastnosti a odporučený postup tepelného spracovania. Minimálna pevnosť po zošľachťovaní sa pohybuje od 500 MPa u ocele C22E až po 1250 MPa u ocele 36NiCrMo16.

3.3.10 Antikorózne a žiaruvzdorné ocele

3.3.10.1 Antikorózne ocele STN EN 10088

Základným prvkom u vysokolegovaných antikorózných ocelí je chróm. Tieto ocele sú schopné pasivácie, ktorá dáva týmto oceliam odolnosť proti elektrochemickej korózii v oxidačných prostrediach. Podmienkou pasivácie je obsah chrómu v tuhom roztoku vyšší než 11,5 %. Obsah chrómu v tuhom roztoku závisí aj na obsahu uhlíka, ktorý tvorí s chrómom karbidy. Uhlík má vyššiu difúziu rýchlosť než chróm, a preto vznik karbidov môže byť spojený so vznikom heterogenity. Miesta ochudobnené o chróm majú nižšiu korozivzdornosť ako ostatná matrica. Precipitácia karbidu chrómu MC na hraniciach zŕn môže byť príčinou interkryštálovej korózie. Interkryštálická korózia sa vyskytuje najmä po zváraní v tepelne ovplyvnenej oblasti.

Ochrana proti interkryštálovej korózii spočíva buď v znížení obsahu uhlíka, alebo legovaním prvkami s vyššou afinitou k uhlíku ako chróm. Ide najčastejšie o Nb, Ta a Ti. Ocele,

v ktorých je uhlík viazaný na karbidy prvku s vysokou afinitou k uhlíku, sa nazývajú **stabilizované ocele**.

Pri obsahu Cr okolo 12 % sa uzatvára v binárnom diagrame Fe – Cr oblasť γ . Zliatiny s vyšším obsahom Cr preto pri ochladzovaní neprekryštalizujú a ich štruktúra je feritická s vylúčenými karbidmi. Ocele s obsahom Cr nižším ako 12 % sú samokaliteľné a austenit sa transformuje za obvyklých výrobných podmienok na martenzit. Austenitotvorné prvky Ni, C, N a Mn rozširujú oblasť γ a znižujú teplotu martenzitickej premeny. Ocele vysoko legované Cr a Ni môžu mať austenitickú štruktúru. Nikel prispieva ku zvýšeniu korozivzdornosti.

Norma EN 10088 rozdeľuje korozivzdorné ocele podľa štruktúry na:

- feritické, pre ktoré je charakteristický nízky obsah uhlíka a dusíka,
- martenzitické a vytvrditeľné,
- austenitické CrNi ocele
- austeniticko – feritické, nazývané tiež duplexné ocele,

Štruktúra korozivzdorných ocelí závisí od obsahu prvkov, ktoré zužujú oblasť γ (Cr, Si, W), a prvkov, ktoré rozširujú oblasť γ (Ni, C, N). V tab.3.17 sú vyznačené základné typy korozivzdorných ocelí v závislosti od obsahu chrómu a niklu.

a) Feritické ocele - obsahujú do 30 %Cr a do 0,08 %C. Feritické ocele s vyšším obsahom uhlíka sú pri izbovej teplote krehké a používajú sa ako ocele žiaruvzdorné. V norme je uvedených 20 feritických antikoročných ocelí. Chemické zloženie vybraných antikoročných ocelí je uvedené v tab.3.17. U všetkých značiek je obsah fosforu obmedzený na 0,040 % a síry na 0,015 %.

b) Feritické ocele s nízkym obsahom chrómu (prvé tri značky) majú štruktúru ferit plus austenit. Austenit pri chladnutí transformuje na martenzit a výsledná štruktúra môže byť feriticko-martenzitická. Vylúčený martenzit zvyšuje pevnosť a tvrdosť ocelí. Ak obsah C < 0,1 % je nutné pre dosiahnutie feritickej štruktúry legovať oceľ nad 17 %Cr. Feritické ocele pri ohreve nemenia štruktúru na austenitickú a preto nie sú kaliteľné.

Tabuľka 3.17 Chemické zloženie vybraných antikoročných feritických ocelí v [hm. %]

Značka	Číslo mat.	C max.	Si max.	Mn max.	N	Cr	Mo	Ni	Ti
X2CrNi12	1.4003	0,030	1,00	1,50	0,030	10,50-12,50		0,3-1,0	
X2CrTi2	1.4512	0,030	1,00	1,00		10,50-12,50		až 0,65	x(C+N)
X6Cr13	1.4000	0,080	1,00	1,00		12,00-14,00			
X2CrTi17	1.4520	0,025	0,50	0,50	0,015	16,00-18,00			
X2CrMoTi17-1	1.4513	0,025	1,00	1,00	0,015	16,00-18,00	1,0-1,5		0,3-0,6
X2CrMoTi18-2	1.4521	0,025	1,00	1,00	0,030	17,00-20,00	1,8-2,5		*
X2CrMoTi29-4	1.4592	0,025	1,00	1,00	0,045	28,00-30,00	3,5-4,5		*

* $T_i = 4 \times (C + N) + 0,15$ až 0,80

b) Martenzitické a vytvrditeľné chrómové a chrómniklové ocele

Najčastejšie vyrábané ocele obsahujú do 13 %Cr a do 0,25 %C. Používajú sa pre stavbu vodných strojov, v potravinárskom priemysle a v zdravotnej technike. Sú zvariteľné. Norma uvádza celkom 20 značiek martenzitických a vytvrditeľných ocelí. Vybrané značky sú uvedené v tab. 3.18.

Tabuľka 3.18 Chemické zloženie vybraných martenzitických a vytvrditeľných ocelí v [hm. %]

Značka	Číslo mat.	C	Si max.	Mn max.	Cr	Cu	Mo	Ni
X12Cr13	1.4006	0,08-0,15	1,00	1,50	11,50-13,50			≤ 0,75
X20Cr13	1.4021	0,16-0,25	1,00	1,50	12,00-14,00			
X70CrMo15	1.4109	0,65-0,75	0,70	1,00	14,00-16,00		0,40-0,80	
X39CrMo17-1	1.4122	0,33-0,45	1,00	1,50	15,50-17,50		0,80-1,30	≤ 1,00
X90CrMoV18	1.4112	0,85-0,95	1,00	1,00	17,00-19,00		0,90-1,30	**
X3CrNiMo13-4	1.4314	≤ 0,05	0,70	1,00	12,00-14,00		0,30-0,70	3,50-4,50
X3CrNiMo16-5-1	1.4418	≤ 0,06	0,70	1,50	15,00-17,00		0,80-1,50	4,00-6,00
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	≤ 0,07	0,70	1,50	15,00-17,00	3-5	≤ 0,60	3,00-5,00
X7CrNiAl17-7	1.4568	≤ 0,09	0,70	1,00	16,00-18,00	*		6,50-7,80
X8CrNiMoAl15-7-2	1.4532	≤ 0,10	0,70	1,20	14,00-16,00	*	2,00-3,00	6,50-7,80

*Al = 0,70 až 1,50

**V = 0,07 až 0,12

Aby mohli martenzitické ocele obsahovať viac než 11,5 %Cr kvôli korozivzdornosti, musia obsahovať prvky rozširujúce oblasť γ . Maximálny prípustný obsah feritu v týchto oceliach je 20 %. Znížený obsah uhlíku je preto nutné kompenzovať prísadou niklu. Nad 5 % Cr sú ocele samokaliteľné. Ocele sú korózne odolné aj v zakalenom stave. Popúšťaním na 450 až 550°C sa vylučujú z martenzitu karbidy a korózna odolnosť sa znižuje.

c) Martenzitické ocele bez niklu. Od X12Cr13 bez niklu sú odvodené varianty s rastúcim obsahom uhlíka až po obsahy 0,95 - 1,20 %. Značky s vyšším obsahom uhlíka majú aj zvýšený obsah chrómu až do 17 - 19 %. Ocele majú medzu klzu závislú od obsahu uhlíka. Značky s obsahom uhlíka do 0,25 % popustené na teploty nad 600°C majú medzu klzu okolo 400 MPa, Ocele sú zvariteľné len pre malé prierezy a nižšie obsahy uhlíka. Pri zváraní väčších hrúbok stien je nutný predohrev. Ocele s vyšším obsahom uhlíka majú po zakalení a popustení na 200 - 300°C pevnosť až 1600 MPa a tvrdosť až 58 HRC. Značky s vyšším obsahom uhlíka sa používajú aj ako nástrojové ocele a ocele na valivá ložiska.

d) Martenzitické ocele s niklom. Tieto ocele majú nízke obsahy uhlíka a štruktúru tvorenú nízkouhlíkovým martenzitom a disperzne vylúčeným sekundárnym austenitom, ktorý vzniká pri popúšťaní nízkouhlíkového martenzitu. Austenit zlepšuje plastické vlastnosti, medzu únavy aj zvariteľnosť bez zníženia pevnostných vlastností. Nikel sa pridáva do oceli, aby sa pri nízkom obsahu uhlíka rozšírila oblasť γ a v štruktúre sa nevyskytoval ferit δ . Uvedená štruktúra zaručuje pri medziach klzu nad 600 MPa vysokú húževnatosť ocelí až do nízkych teplôt. Ocele s obsahom 6 % Ni majú ešte pri teplote -190°C rázovú húževnatosť KCV cca 40 J.cm⁻². Ocele sú vzhľadom na nízky obsah uhlíka dobre zvariteľné a majú vysokú prekaliteľnosť aj pri

ochladzovaní na vzduchu. Od základnej značky chrómniklovej ocele X3CrNiMo13-4 sú odvodené varianty s vyšším obsahom Ni (6,5 až 7,8 %), prípadne aj chrómu. Ocele sú vhodné na stavbu vodných strojov. Ocele legované do 3 %Mo sa používajú pre zariadenia pracujúce v morskej vode. Tepelné spracovanie martenzitických ocelí pozostáva z kalenia na vzduchu a popúšťania.

e) Vytvrditeľné ocele. Sú naviac legované meďou alebo hliníkom (X5CrNiCuNb16-4, X7CrNiAl17-7, X5CrNiMoAl15-7-2). Po zakalení majú martenzitickú štruktúru. Pri vytvrdzovaní pri 400 až 500°C sa dosahuje precipitácia fáz Ni_3Nb a $\epsilon\text{-Cu}$. Tieto ocele dosahujú pevnosti 1300 až 1500 MPa a používajú sa na panciere v leteckom a kozmickom priemysle. Sú vhodné aj na nástroje používané pri lisovaní plastov a gumy. Ich dobrá korozivzdornosť a vynikajúce mechanické vlastnosti vedú k rozširovaniu týchto ocelí aj v iných oboroch strojárstva.

f) Austenitické Cr-Ni ocele a austenitické vytvrditeľné ocele. Obsahujú najčastejšie 18 - 20 %Cr a 8 - 11 %Ni. Cr je nutnou prísadou pre zaistenie pasivácie ocelí a ich odolnosti proti oxidácii. Ni stabilizuje austenit pri normálnej teplote a zvyšuje koróznou odolnosť v redukčných kyselinách. Pri vyššom obsahu C je nutné austenitické Cr-Ni ocele podrobiť rozpúšťaciemu žihaniu pri teplote cca 1050°C a z tejto teploty rýchle ochladiť (vo vode), čím sa potlačí precipitácia karbidu a získa sa austenitická štruktúra aj u ocelí s obsahom C 0,10 %. Ocele s vyšším obsahom C nie sú vhodné pre zváranie, pretože v TOO dochádza k vylučovaniu karbidu chrómu na hraniciach zŕn, ktoré spôsobuje interkryštalickú koróziu. Pre zaistenie zvariteľnosti sa austenitické ocele stabilizujú Nb, (Ta), alebo Ti. Austenitické ocele sú húževnaté s ťažnosťou až do 40 %. Majú ale nízku medzu klzu okolo 200 MPa pri pevnosti 550 až 650 MPa. Vyznačujú sa veľmi dobrou koróznou odolnosťou v oxidačnom prostredí, napr. v HNO_3 , v H_2SO_4 , HCl a organických kyselinách iba pri ich nízkych koncentráciách. Sú horšie obrobiteľné. Chemické zloženie vybraných austenitických ocelí je uvedené v tab.3.19.

Tabuľka 3.19 Chemické zloženie vybraných austenitických a vytvrditeľných ocelí v [hm. %]

Značka	Č. mat.	C	N	Cr	Cu	Mo	Ni
X10CrNi18-8	1.4310	≤ 0,15	≤ 0,11	16,00-19,00		0,080	6,0-9,5
X2CrNi18-7	1.4318	≤ 0,030	0,10-0,20	16,50-18,50			6,00-8,0
X2CrNi19-11	1.4306	≤ 0,030	≤ 0,11	18,00-20,00			10,0-12,0
X2CrNi18-10	1.4311	≤ 0,030	0,12-0,22	17,00-19,50			8,5-11,5
X6CrNi18-10	1.4350	≤ 0,080	≤ 0,15	17,00-19,00			9,0-12,0
X6CrNi18-12	1.4303	≤ 0,060	≤ 0,15	17,00-19,00			11,0-13,0
X1CrNi25-21	1.4335	≤ 0,020	≤ 0,11	24,00-26,00		0,20	20,0-22,0
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	≤ 0,030	≤ 0,11	16,50-18,50		2,50	10,0-13,0
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	≤ 0,030	≤ 0,11	17,00-19,00		3,50	12,0-15,0
X2CrMnNi17-7-5	1.4371	≤ 0,030	0,15-0,20	16,00-17,00			3,5-5,50
X3CrNiCu18-9-4	1.4567	≤ 0,040	≤ 0,11	17,00-19,00	4,0		8,5-10,5
X1CrNiMoCuN25-25-5	1.4537	≤ 0,020	0,17-0,25	24,00-26,00	2,0	5,70	24,0-26,0
X2CrNiN23-4	1.4362	≤ 0,030	0,05-0,20	22,00-24,00	0,6	0,60	3,5-5,5
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	≤ 0,030	0,15-0,30	24,00-26,00	2,5	4,00	5,55-7,5

Oceľ uvedená v tabuľke v prvom riadku predstavuje základný typ austenitickej Cr-Ni ocele. Austenitické ocele sa používajú v stave po rozpúšťacom žíhaní pri teplotách 950 až 1100°C a následným rýchlym ochladením do vody. Po tepelnom spracovaní sú mäkké a húževnaté. Pri tvárnení za studena sa rýchle spevňujú. Medza klzu u austenitických korozivzdorných ocelí je iba 175 až 250 MPa pri ťažnosti 40 až 50 %.

g) Austeniticko-feritické (duplexné ocele). Ako duplexné ocele sa označujú austeniticko-feritické ocele s obsahom 40 až 60 % feritu. Obsahujú 21 až 28 % Cr a 3,5 až 8,0 % Ni. Majú vyššiu medzu klzu ako austenitické ocele. Tepelné spracovanie duplexných ocelí je podobné ako u austenitických. Po rozpúšťacom žíhaní a rýchlom ochladení sa dosahuje medza klzu 420 až 530 MPa pri ťažnosti cca 20 %. Ocele sú dobre zvariteľné a majú vyhovujúcu odolnosť proti interkryštálovej korózii. Tieto ocele sa vyznačujú dobrou húževnatosťou a sú lepšie obrobiteľné ako austenitické ocele. Korózna odolnosť ocelí sa znižuje v prostrediach obsahujúce anióny Cl, I a Br.

3.3.10.2 Žiaruvzdorné ocele STN EN 10095

Žiaruvzdorné ocele majú vysokú odolnosť proti oxidácii a korózii a dlhodobé stále vlastnosti v horúcich plynch. Odolnosť proti oxidácii za vysokých teplôt získavajú ocele legovaním Cr, Si, Al a Ni. Pri obsahu chrómu nad 13 % sa na povrchu ocelí tvorí oxid Cr_2O_3 obsahujúci malé množstvo Fe a Ni. Nikel zlepšuje priľnavosť vrstvy oxidu chrómu, ktorá chráni povrch kovu pred ďalšou oxidáciou. Podobne ako chróm vytvárajú kremík a hliník oxidické vrstvy priľnavé k povrchu kovu v oxidačnom prostredí za vysokých teplôt. Ich zloženie je podobné ako u antikoročných ocelí, a ako bolo uvedené, niektoré antikoročné ocele sa používajú ako žiarupevné. Podľa štruktúry sa delia na feritické, austenitické a feriticko-austenitické ocele. Obsah uhlíka je pod 0,12 % a môžu byť aj zvariteľné. Ocele dosahujú tvrdosť cca 200 – 310 HBS. Chemické zloženie a mechanické hodnoty vybraných značiek žiaruvzdorných ocelí sú uvedené v tab.3.20.

Feritické ocele sa líšia predovšetkým obsahom chrómu. Celkom je normovaných 6 značiek feritických žiaruvzdorných ocelí. Austeniticko-feritické ocele sa líšia najmä obsahom chrómu a niklu. Značky s vysokým obsahom niklu sa nehodia do prostredia s obsahom plyných zlúčenín síry. Ocele majú až na výnimky obmedzený obsah dusíku do 0,11 %. Celkom norma uvádza 13 značiek austenitických ocelí a jednu značku austeniticko-feritickej ocele. Ako žiaruvzdorné ocele sa používajú aj niektoré antikoročné ocele uvedené v STN EN 10088-1. Norma ďalej uvádza 4 značky austenitických žiaruvzdorných zliatin na báze niklu s obsahom 14 až 25 % chrómu.

Tabuľka 3.20 Chemické zloženie vybraných žiaruvzdorných ocelí

Značka	Číslo mat.	Chemické zloženie [hm. %]				R _{p02} min.	R _m min.	A
		C max.	Si	Cr	Ni	[MPa]	[MPa]	[%]
Feritické žiaruvzdorné ocele								
X10CrAlSi7	1.4713	0,12	0,50-1,00	6,0-8,0		220	420	20
X18CrN28	1.4749	0,20	max.1,00	26,0-29,0		280	500	15
Austenitické žiaruvzdorné ocele								
X10CrNiTi18-10	1.4878	0,10	max.1,00	17,0-19,0	9-12	190	500	40
X15CrNiSi25-21	1.4841	0,20	1,50-2,50	24,0-26,0	19-22	230	550	30
X10NiCrAlTi32-21	1.4876	0,12	max.1,00	19,0-23,0	30-34	200	450	30
X25CrMnNiN25-9-7	1.4872	0,30	Mn 8-10	24,0-26,0	6-8	500	850	25
Austeniticko-feritické žiaruvzdorné ocele								
X15CrNiSi25-4	1.4821	0,20	0,50-1,00	24,5-26,5	3,5-5,5	400	600	16

3.3.11 Nástrojové ocele

Nástrojové ocele sa vyrábajú v elektrických oblúkových alebo indukčných peciach s menšou hmotnosťou tavby z triedených surovín. Do úvahy prichádzajú aj iné, špeciálne technologické postupy, ako napr. výroba vo vákuových peciach, elektrotroskové pretavovanie ocelí, technológie práškovej metalurgie, a pod. Týmito výrobnými postupmi sa dosahuje vysoká čistota ocelí (obsahujú veľmi málo vtúsenín) a rovnorodosť (homogenita) štruktúry. Použitým špeciálnym metalurgickým postupom a zvýšenému obsahu legúr potom zodpovedá aj cena týchto materiálov, ktorá podstatne prevyšuje cenu konštrukčných ocelí.

3.3.11.1. Rozdelenie nástrojových ocelí

Rozdelenie nástrojových ocelí podľa pracovnej teploty

Od pracovnej teploty ocele závisí aj množstvo legujúcich prvkov nasledovne:

- do 200 °C - nelegované (sumárny obsah legujúcich prvkov do 5 %);
- 250 až 300 °C - nízkolegované (sumárny obsah legujúcich prvkov 5 až 10 %);
- 400 až 600 °C - vysokolegované (sumárny obsah legujúcich prvkov nad 10 %);
- nad 600 °C - rýchlorezné.

Rozdelenie nástrojových ocelí podľa chemického zloženia podľa STN EN 10027-1

Nástrojové ocele obsahujú okrem uhlíka nasledujúce prvky:

- prospešné sprievodné prvky (z výroby): Mn, Si, Al
- legujúce prvky: Cr, W, Mo, V, Co, Ni
- nečistoty: P, S, Cu, O, N, H

Štruktúrne zložky nástrojových ocelí

- martenzit - žiaduca štruktúra - tvrdý, pevný, krehký
- zvyškový austenit - nežiaduca štruktúra (je mäkký), jeho množstvo závisí od obsahu uhlíka a legujúcich prvkov rozpustených v austenite po výdrži na kaliacej teplote.
- karbidy - žiaduca štruktúra, karbidy vyskytujúce sa v matrici nástrojových ocelí sú tvrdšie než základná matrica, takže zvyšujú odolnosť proti opotrebeniu. Ich vplyv je tým väčší, čím vyššia je ich tvrdosť a plocha povrchu.

3.3.11.2. Nástrojové ocele nelegované (uhlíkové)

Jednotlivé akosti sa líšia obsahom uhlíka, ktorý sa pohybuje od 0,4 do 1,5 %, tab.3.21. Majú nízky obsah Mn, pretože Mn zvyšuje podiel zvyškového austenitu a tým znižuje ich tvrdosť. Kalením sa dosiahne vysoká tvrdosť v povrchových vrstvách (2-3 mm), v jadre je nástroj nezakalený. Povrchová vrstva má teda martenzitickú štruktúru, jadro má jemnú perlitickú štruktúru. Húževnaté jadro je výhodné z hľadiska odolnosti nástroja voči rázom. Nelegované nástrojové ocele strácajú pri teplote 150°C tvrdosť, preto za nemôžu použiť na nástroje pre prácu za tepla.

Použitie: ručné náradie a nástroje na opracovanie dreva, závitníky, vrtáky, pílkys na kov, frézy a pod.

Tabuľka 3.21 Chemické zloženie a tepelné spracovanie nelegovaných nástrojových ocelí

mat.	č. ozn.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	HB*	Kal. teplota [°C]	Kal. médium	HRC**
C35U		0,30-0,40	Max. 0,3	0,30-0,60	170	810-840	Voda	50
C45W	1.1730	0,40-0,50	0,15-0,40	0,60-0,80	190			
C60W	1.1740	0,55-0,65	0,15-0,40	0,60-0,80	231	800-830	Olej	52
C70W	1.1620	0,65-0,74	0,10-0,30	0,10-0,35	183	790-820	Voda	57
C80W	1.1525	0,75-0,85	0,10-0,25	0,10-0,25	192	780-810	Voda	59
C85W	1.1830	0,80-0,90	0,25-0,40	0,50-0,70	222	800-830	Olej	57
C105U	1.1545	1,00-1,10	0,10-0,25	0,10-0,25	213	770-800	Voda	60
C125U	1.1563	1,20-1,35	max. 0,25	0,15-0,35	210	740-780	Voda	64

* po žíhaní na mätko, ** po kalení a popúšťaní

3.3.11.3. Nástrojové ocele legované pre prácu za studena

Legované ocele sa používajú na podobné účely ako nelegované. Majú vyššiu prekaliteľnosť, vyššiu tvrdosť (60 až 64 HRC) a nižší pokles tvrdosti s teplotou. Hlavné legujúce prvky sú Cr, W, Mo a V s celkovým obsahom 3 – 5%, tab. 3.22. Uvedené legúry zvyšujú stabilitu karbidickej fázy, obmedzujú pokles tvrdosti pri popúšťaní a zvyšujú tvrdosť a odolnosť nástrojov proti opotrebeniu.

Legované nástrojové ocele sa kalia do oleja. Kaliace teploty sú vyššie ako u nelegovaných ocelí. Výsledná tvrdosť závisí na teplote popúšťania, ktorá je zvyčajne 180°C.

Použitie: nástroje na strihanie, valcovanie za studena, výroba píl na železo a drevo, kovadlá, razidlá, nože, meradlá, formy na lisovanie plastov, kladivá, dierovacie nástroje, pneumatiké sekáče a dláta, frézy, výstružníky, nože na papier a pod.

Tabuľka 3.22 Chemické zloženie a údaje o tepelnom spracovaní legovaných nástrojových ocelí pre prácu za studena

mat.	č. ozn.	C [%]	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	V [%]	W [%]	HB*	Kal. tepl [°C]	Pop. tepl. [°C]	Kal. méd.	HRC **
X210CrW12	1.2436	2,0- 2,25	11- 12				0,60- 0,80	255	960	180	O	60
X155CrVMo12 1	1.2379	1,90- 2,20	11- 12	0,60- 0,80		0,90- 1,10		255	1030	180		59
145V3 3	1.2838	1,40- 1,50				3,00- 3,50		229	850	180	V	60
90MnCrV8	1.2842	0,85- 0,95	0,2- 0,5			0,05- 0,15		229	800	180	O	58
105WCr6	1.2419	1,00- 1,10	0,9- 1,1				1,00- 1,30	229	820	180	O	59
60WCrV7	1.2550	0,55- 0,65	0,9- 1,2			0,10- 0,20	1,80- 2,10	229	890	180	O	57
X45NiCrMo4	1.2767	0,40- 0,50	1,2- 1,5	0,15- 0,35	3,8- 4,3			262	850	180	O	52
40CrMnMoS	1.2312	0,35- 0,45	1,8- 2,0	0,15- 0,25				Dodáva sa v zošľachtenom stave s tvrdosťou cca 300HB				

* po žíhaní, ** po kalení a popúšťaní, O – olej, V - voda

3.3.11.4. Nástrojové ocele legované pre prácu za tepla

U nástrojov na prácu za tepla sa požaduje vysoká odolnosť proti deformácii, oteruvzdornosť, odolnosť proti erózii pri pracovnej teplote a odolnosť proti tepelnej únave, tab.3.23.

Použitie: zápustky, trne na dierovanie ocele pri výrobe bezšvových rúr, vstrekovacie formy, formy na liatie pod tlakom, pretlačovacie nástroje a pod.

Tabuľka 3.23 Chemické zloženie a údaje o tepelnom spracovaní legovaných nástrojových ocelí pre prácu za tepla

mat.	č. ozn.	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	HB	Kal. tepl. [°C]	Pop. tepl. [°C]	Kal. médium	HRC
55NiCrMoV6	1.2713	0,50- 0,60	0,1- 0,4	0,65- 0,95	0,6- 0,8	0,25- 0,35	0,07- 0,12	248	850	500	O	40
56NiCrMoV7	1.2714	0,50- 0,60	0,1- 0,4	0,65- 0,95	1,0- 1,2	0,45- 0,55	0,07- 0,12	248	850	500	O	44
X38CrMoV55	1.2343	0,36- 0,42	0,9- 1,2	0,30- 0,50	4,8- 5,5	1,10- 1,40	0,25- 0,50	229	1020	550	O(VZD)	50
X40CrMoV51	1.2344	0,37- 0,43	0,9- 1,2	0,30- 0,50	4,8- 5,5	1,20- 1,50	0,90- 1,10	229	1030	550	O(VZD)	51
X32CrMoV33	1.2365	0,28- 0,35	0,1- 0,4	0,15- 0,45	2,7- 3,2	2,60- 3,00	0,40- 0,70	229	1040	550	O(VZD)	41

3.3.11.5. Rýchlorezné ocele

Vyznačujú sa odolnosťou proti poklesu tvrdosti až do teplôt 550°C. Sú to ledeburitické ocele vysoko legované s obsahom uhlíka > 0,7%. Základný legujúci prvok u rýchlorezných ocelí je W, ktorý je možné čiastočne nahradiť polovičným množstvom Mo. Rýchlorezné ocele pre najvyššie výkony sa legujú Co do obsahu 12%, tab. 3.24

Kaliaca teplota je vysoká – 1200 až 1280°C. Ohrev na kaliacu teplotu je stupňovitý, s viacnásobným zastavením ohrevu na vyrovnanie teploty v celom priereze, pretože kvôli vysokému obsahu uhlíka a legúr majú nástrojové ocele zlé tepelnú vodivosť. Popúšťa sa na sekundárnu tvrdosť pri teplote okolo 560°C. Pri teplotách nad 150°C dochádza k miernemu poklesu tvrdosti čiastočným vylučovaním karbidov z martenzitu. Tým klesá tvrdosť martenzitu. Pri teplotách 450 až 550°C poklesne obsah uhlíka vo zvyškovom austenite v dôsledku precipitácie karbidov tak, že sa zvýši Ms, austenit sa transformuje na martenzit a tvrdosť vzrastie. Tento jav sa nazýva popúšťanie na sekundárnu tvrdosť. Pri transformácii sa premení len časť austenitu a popúšťanie sa opakuje. Pre dosiahnutie tvrdosti 60 až 66 HRC sa popúšťanie opakuje 3×.

Tabuľka 3.24 Chemické zloženie a tepelné spracovanie rýchlorezných nástrojových ocelí

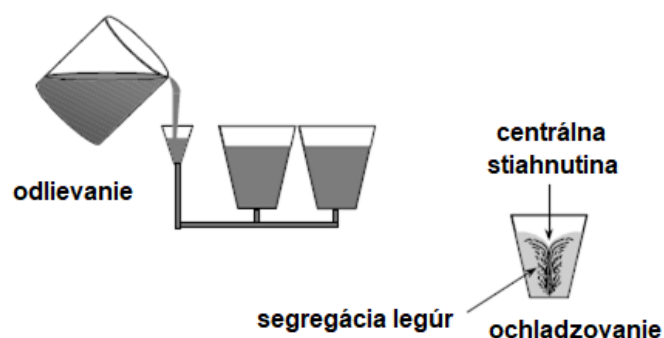
mat.	č. ozn.	C [%]	Co [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	W [%]	HB	Kal. tepl. [°C]	Pop. tepl. [°C]	Kal. médium	HRC
HS 6-5-2	1.3342	0,86- 0,94		3,8- 4,5	4,7- 5,2	1,7- 2,0	6,0- 6,7	240- 300	1210	560	O (VZD)	64
HS 6-5-2C	1.3342	0,95- 1,05		3,8- 4,5	4,7- 5,2	1,7- 2,0	6,0- 6,7	240- 300	1200	560	O (VZD)	65
HS 6-5-3	1.3344	1,17- 1,27		3,8- 4,5	4,7- 5,2	2,7- 3,2	6,0- 6,7	240- 300	1220	560	O (VZD)	65
HS 6-5-2-5	1.3343	0,88- 0,96	4,5- 5,0	3,8- 4,5	4,7- 5,2	1,7- 2,0	6,0- 6,7	240- 300	1220	560	O	64
HS 7-4-2-5	1.3246	1,05- 1,15	4,8- 5,2	3,8- 4,5	3,6- 4,0	1,7- 1,9	6,6- 7,1	240- 300	1200	540	O	66
HS 10-4-3-10	1.3207	1,20- 1,35	9,5- 10,5	3,8- 4,5	3,2- 3,9	3,0- 3,5	9,0- 10,0	240- 300	1230	560	O (VZD)	66
HS 12-1-4-5	1.3202	1,3- 1,45	4,5- 5,0	3,8- 4,5	0,7- 1,0	3,5- 4,0	11,5- 12,5	240- 300	1230	560	O	65
HS 18-1-2-5	1.3255	0,75- 0,83	4,5- 5,0	3,8- 4,5	0,5- 0,8	1,4- 1,7	17,5- 18,5	240- 300	1280	560	O	64
HS 3-2-2		0,95- 1,05		3,8- 4,6	2,20- 3,20	2,0- 2,7	2,4- 3,4	240- 300	1220	560	O	64

Rozdelenie nástrojových ocelí podľa spôsobu výroby:

- nástrojové ocele vyrobené odlievaním
- prášková metalurgia a následné tvárnenie

3.3.11.6 Výroba nástrojových ocelí odlievaním

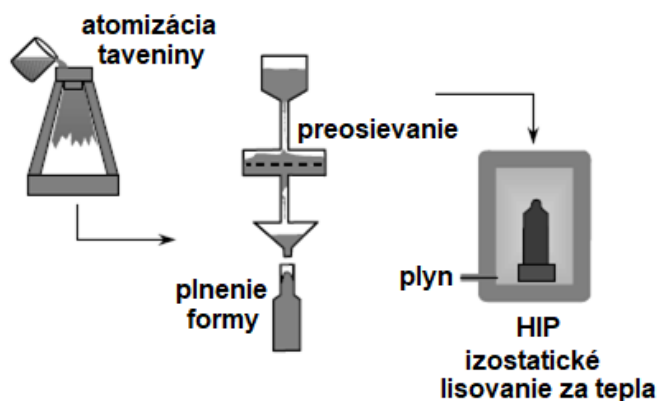
Proces výroby nástrojových ocelí odlievaním pozostáva z tavenia vstupných surovín, pridania potrebných prvkov a následného liatia do ingotov, obr.3.33. Nasleduje pomalé ochladzovanie ingotu. Najväčším problémom pri výrobe nástrojových ocelí odlievaním je segregácia jednotlivých prvkov počas chladnutia ingotu, spôsobená ich rozdielnymi teplotami tuhnutia. Legujúce prvky majú tendenciu koncentrovať sa v strede ingotu. Táto segregácia je tým výraznejšia, čím je vyšší obsah legúr. Okrem toho, že ingot je chemicky nerovnorodý, segregácia môže viesť k praskaniu materiálu. Z toho dôvodu sa týmto konvenčným spôsobom nedajú vyrábať vysokolegované nástrojové ocele.



Obr.3.33 Konvenčný metalurgický spôsob výroby nástrojových ocelí odlievaním

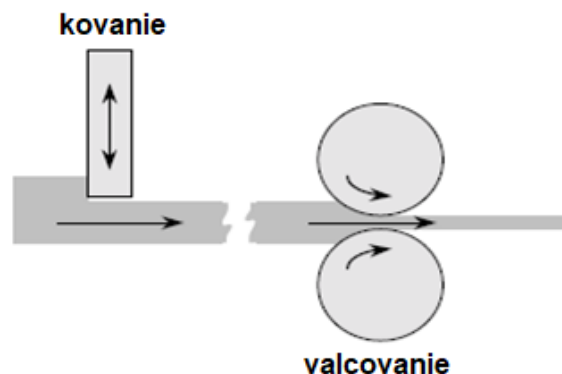
3.3.11.7 Výroba nástrojových ocelí práškovou metalurgiou

Je to technológia, ktorá eliminuje proces segregácie tým, že tavenina pripravená tavením vstupných surovín a pridaním legujúcich prvkov sa rozprašuje (atomizuje) v inertnom plyne na malé častice, čím vzniká jemný prášok. Rýchle ochladenie taveniny pri atomizácii bráni procesu segregácie, a tak každá častica prášku má predpísané chemické zloženie. Prášok sa následne preosieva, kompaktuje a predvylisok pokračuje na izostatické lisovanie za tepla, kde dochádza k ďalšej kompaktácii pri vysokej teplote a tlaku, obr.3.34. Výsledná merná hmotnosť ocele vyrobenej z prášku je potom na úrovni takmer 100% mernej hmotnosti kompaktného materiálu.



Obr.3.34 Výroba nástrojových ocelí práškovou metalurgiou

Po kompaktácii nasleduje ešte tvárnenie. Výlisok sa kuje a valcuje do platní a tyčí, aby materiál mal manipulovateľnú veľkosť a aby sa zlepšila kvalita ocele, obr.3.35. Redukciou pri valcovaní sa rozrušujú a redistribujú segregované prvky a získa sa homogénnejšia štruktúra. Čím je väčšia redukcia pri valcovaní, tým lepšia a homogénnejšia je výsledná štruktúra nástrojovej ocele.



Obr.3.35 Tvárniace procesy na dosiahnutie homogénnej štruktúry práškových nástrojových ocelí

3.3.11.8 Požiadavky na nástrojové ocele

Tvrdosť

Dosahuje sa kalením a popúšťaním pri nízkych teplotách (uhlíkové a pre prácu za studena). Nástrojové ocele pracujúce pri vyšších teplotách sa popúšťajú pri vyšších teplotách bez zníženia tvrdosti. Výsledná tvrdosť nástrojových ocelí je daná tvrdosťou popustenej martenzitickej matrice, tvrdosťou prítomných karbidických fáz a ich vytvrdzovacím účinkom. Tvrdosť uhlíkových NO závisí od obsahu uhlíka - vzrastá až po eutektoidné zloženie a dosahuje asi 67 HRC. U legovaných nástrojových ocelí možno dosiahnuť ešte o niečo vyššiu tvrdosť, a to predovšetkým v dôsledku nahradenia cementitu špeciálnymi karbidmi. Požadovaná tvrdosť pri vyšších teplotách sa dosahuje prísadou karbidotvorných prvkov, hlavne Cr, V, W a Mo, prípadne Ti, tab.3.25.

Tabuľka 3.25 Druhy karbidov v nástrojových oceliach

Karbidy	Tvrdosť [HV 0,1]	prvky (M)	Poznámka
M_3C	asi 950	Fe, Mn	Karbid cementitického typu, relatívne mäkký
$M_{23}C_6$	1000-1100	Cr	Pri ohreve na kaliacu teplotu sa úplne rozpustí, chróm prechádza do tuhého roztoku a zvyšuje prekaliteľnosť ocele
M_6C	1200-1300	W	Pri ohreve na kaliacu teplotu sa čiastočne rozpustí v austenite, čiastočne ostáva zachovaný a obmedzuje rast zrna austenitu.
M_7C_3	1600-1800	Cr	
M_2C	1700-1900	W, Mo	Precipitujú v štruktúre pri popúšťaní 500-600°C
MC (M_4C_3)	2200-3000	V	Jemné veľmi tvrdé karbidy, ktoré sa pri austenitizácii len čiastočne rozpustia a zabraňujú zhrubnutiu austenitického zrna. Ďalej precipitujú v štruktúre pri popúšťaní 500-600°C

Dokonalé využitie účinku týchto prvkov však vyžaduje príslušnú úpravu tepelného spracovania, predovšetkým ich prevedenie v čo najväčšom množstve do tuhého roztoku pri ohreve na kalicu teplotu. Tvrdosť je základnou požiadavkou najmä pri rezných nástrojoch.

Plastické vlastnosti a húževnatosť

Plastické vlastnosti a húževnatosť závisia predovšetkým od matrice a množstva, morfológie a veľkosti karbidov a od prítomnosti inklúzií, prípadne výrobných chýb. Nežiaduci vplyv na plasticitu a húževnatosť má najmä vylúčenie karbidov vo forme sieťovia u liatych ocelí a výrazná karbidická riadkovitosť u tvárnených ocelí. U mäkkších ocelí s pevnosťou < 1800 MPa sa ťažnosť zisťuje statickou skúškou v ťahu a húževnatosť skúškou rázom v ohybe. U ocelí s pevnosťou > 1800 MPa sa plastické vlastnosti posudzujú len statickou skúškou v ohybe z hodnoty pevnosti a priehybu. Pevnosť v ohybe u nástrojových ocelí lepšie vystihuje spôsob namáhania nástroja. Podobne ako tvrdosť, aj pevnosť v ohybe závisí predovšetkým od obsahu uhlíka (rastie s jeho zvyšujúcim sa obsahom) a spôsobe tepelného spracovania. Významne závisí aj na stave povrchu, pretože vysokopevné materiály sú citlivé na vruby.

Od húževnatosti závisí životnosť nástrojov pri dynamickom namáhaní. Je ovplyvňovaná hlavne chemickým zložením a tepelným spracovaním. Vysoká húževnatosť nástrojových ocelí sa dosahuje pri nižšom obsahu uhlíka a jemnejšom austenitickom zrne. Priaznivo húževnatosť nástrojových ocelí ovplyvňuje aj prísada Ni. Húževnatosť určuje odolnosť nástrojov voči mechanickým rázom (t.j. proti tvorbe trhlín a ich šíreniu), je dôležitá hlavne u materiálov na nástroje pre strihanie a tvárnenie. Zvýšenie húževnatosti sa dosiahne zjemnením zrna, rovnomerným rozložením jemných karbidov a minimalizovaním vnútorných napätí

Odolnosť proti opotrebeniu

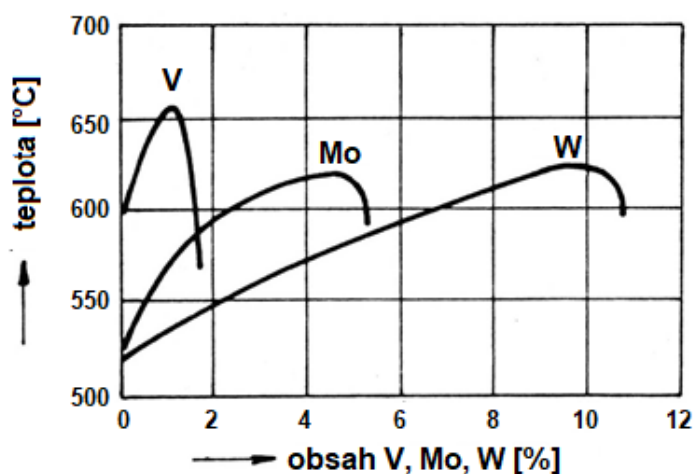
Je dôležitá hlavne pri tvárniacich nástrojoch, pretože ovplyvňuje ich životnosť. Odolnosť proti opotrebeniu úzko súvisí s tvrdosťou nástroja, ale je predovšetkým ovplyvnená množstvom, druhom, tvarom a rozložením karbidov. Závisí teda od obsahu uhlíka a obsahu karbidotvorných prvkov. Najúčinnnejšie sú V, ale aj Mo, W a Cr.

Veľkosť opotrebenia ovplyvňuje aj reznosť nástrojov (odolnosť proti otupeniu). Pri trení medzi nástrojom a materiálom obrobní sa funkčné časti nástroja nahrievajú, preto je nutné, aby oceľ bola odolná aj proti popúšťaniu.

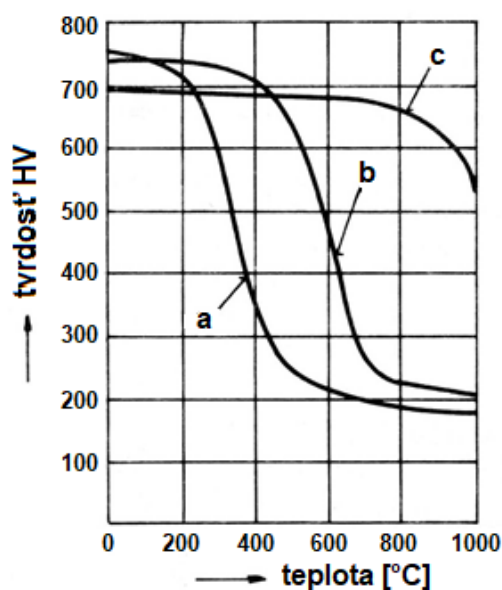
Odolnosť proti popúšťaniu

Táto vlastnosť je dôležitá najmä pre nástroje pracujúce pri teplotách nad 150 až 200 °C. Nástrojové ocele si musia zachovať mechanické vlastnosti (hlavne tvrdosť) aj pri práci za vyšších teplôt, aby sa neznížila odolnosť proti opotrebeniu a reznosť, teda životnosť nástroja. Jedná sa napr. o nástroje pre trieskové obrábanie kovov, pre tvárnenie ocelí za tepla, formy pre odlievanie kovov a pod. Odolnosť sa posudzuje podľa poklesu tvrdosti pri dlhodobom ohreve materiálu na vyššie teploty. Uhlíkové ocele strácajú tvrdosť pri teplotách od 200°C.

Zvýšenú odolnosť proti popúšťaniu možno dosiahnuť legovaním karbidotvornými prvkami (Cr, W, V, Mo, Ti) a prísadou Co, ktoré posúvajú jednotlivé deje, prebiehajúce pri popúšťaní zakalených ocelí k vyšším teplotám, obr.3.36 a 3.37.



Obr.3.36 Vplyv V, Mo a W na odolnosť nástrojových ocelí proti popúšťaniu

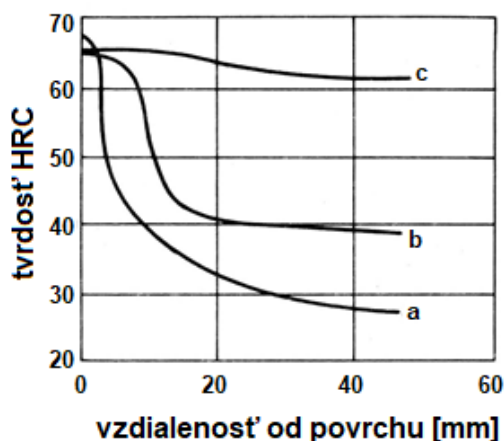


Obr.3.37 Tvrdosť nástrojových materiálov v závislosti od teploty:
a – nelegovaná oceľ, b – rýchlorezná oceľ, c – spekaný karbid

Prekaliteľnosť

V prípade rezných nástrojov nie je prekaliteľnosť rozhodujúca, vzhľadom na ich prierezy, avšak u celého radu ostatných nástrojov (napr. tvárniacich, akými sú veľké zápustky) je niekedy

výhodné, ak má pracovný povrch vysokú povrchovú tvrdosť, kým jadro zostáva húževnaté. Prekaliteľnosť závisí hlavne od chemického zloženia ocele, veľkosti nástroja a rýchlosti ochladzovania pri kalení. Nelegované nástrojové ocele majú malú prekaliteľnosť. Prekaliteľnosť zvyšujú takmer všetky legujúce prvky, najmä Mn, Cr, Mo, Ni, obr.3.38. U karbidotvorných prvkov je pre prekaliteľnosť dôležitý obsah legujúceho prvku rozpusteného pri kaliacej teplote v austenite. Prvok viazaný v karbide prekaliteľnosť nezvyšuje.



Obr.3.38 Krivky prekaliteľnosti nástrojových ocelí:

a – C105U (19 191), b – 90MnCrV8 (19 313), c – X210CrW12 (19 437)

Rozmerová stálosť

Je dôležitá u tvarovo presných obrábacích nástrojov a meradiel. Príčinou rozmerovej nestability nástrojov sú zvyškové napätia, ktoré vyvolávajú deformácie ako dôsledok štruktúrnych zmien (štruktúrne zvyškové napätia) alebo rozdielov teplôt medzi povrchom a jadrom nástroja pri tepelnom spracovaní (tepelné zvyškové napätia). Štruktúrne zvyškové napätia sú spojené so zväčšením objemu pri transformácii austenitu na martenzit alebo sú spojené so zmenšením objemu pri precipitácii karbidov. Sú úmerné obsahu uhlíka v oceli a možno ich ovplyvňovať legujúcimi prvkami, ktoré zväčšenie objemu znižujú (napr. Si, Mo) alebo aspoň nezväčšujú (Mn). Teplotné zvyškové napätia možno obmedziť rôznymi opatreniami, ako sú tvarové riešenie nástroja, spôsob jeho uloženia pri ohreve, postup pri ohreve a kalení atď.

Technologické vlastnosti

U tvarovo zložitých nástrojov je dôležitou požiadavkou dobrá obrábateľnosť. U foriem na lisovanie plastov je okrem toho uplatňovaná aj požiadavka na dobrú leštiteľnosť.

Reznosť

Je dôležitá u rezných nástrojov. Je ovplyvnená množstvom, zložením a rozložením karbidov v štruktúre.

Tepelná únava

Prejavuje sa u nástrojov, ktoré sú vystavené striedavým teplotám ako sieť trhliniek na povrchu. Trhlinky vznikajú v dôsledku tepelnej rozťažnosti materiálu striedaním tlakových napätí pri ohreve a ťahových napätí pri ochladzovaní povrchu nástroja. Odolnosť materiálu voči vzniku trhlín závisí najmä od medze klzu a húževnatosti ocelí. Odolnosť voči tepelnej únave zlepšuje Cr a Mo, ktoré majú pri vysokej pevnosti aj vysokú húževnatosť.

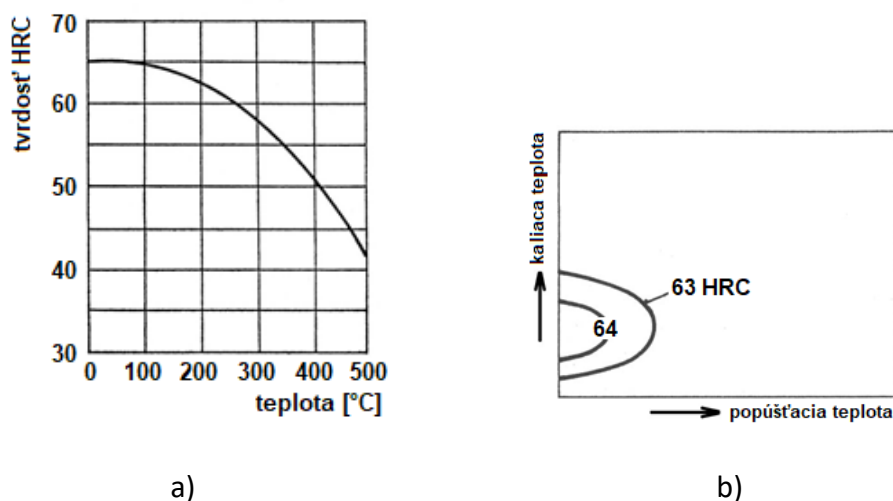
Špeciálne požiadavky

Ide o špecifické požiadavky pre jednotlivé druhy nástrojov. Jedná sa napr. o koróznú odolnosť (formy na lisovanie), veľkú tepelnú vodivosť a malú teplotnú rozťažnosť (zápustky a formy pre tlakové liatie). Čoraz častejšie sa kladú požiadavky aj na kvalitu aktívnych plôch nástrojov, preto sa nanášajú špeciálne vrstvy alebo povlaky, čím sa dosahuje zvýšenie ich trvanlivosti a životnosti.

3.3.11.9 Tepelné spracovanie nástrojových ocelí na primárnu a sekundárnu tvrdosť

Primárna tvrdosť

Cieľom nízкотеплотného popúšťania (do 200°C) je premena tetragonálneho martenzitu na kubický martenzit, premena zvyškového austenitu na kubický martenzit. Výsledná tvrdosť ocele po popúšťaní je odvodená od tvrdosti kubického martenzitu, obr.3.39.

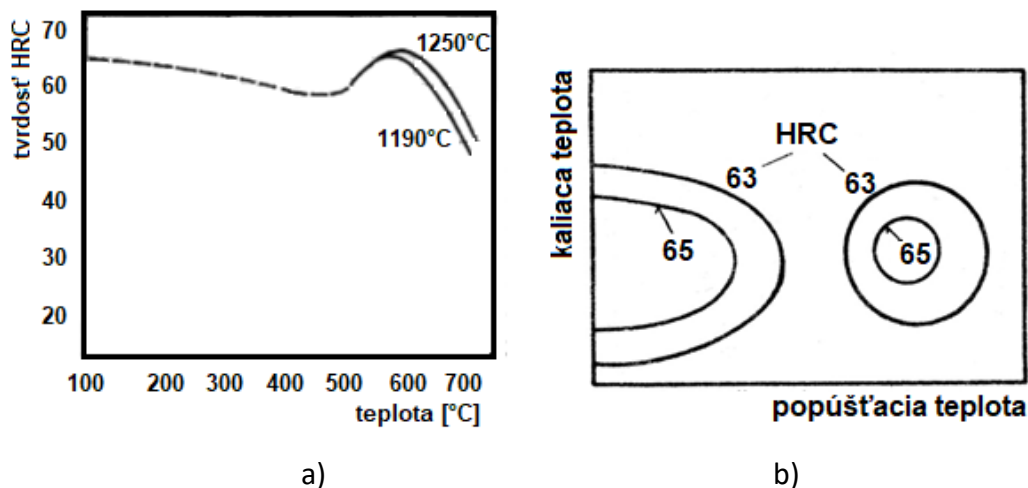


Obr.3.39 Nízкотеплотné popúšťanie nástrojových ocelí na primárnu tvrdosť: popúšťacia krivka a vrstevnicový diagram uhlíkovej nástrojovej ocele
a) Popúšťacia krivka (ocel' C105U) b) Vrstevnicový diagram

Sekundárna tvrdosť

Zvýšením popúšťacej teploty na 550 – 600°C dochádza:

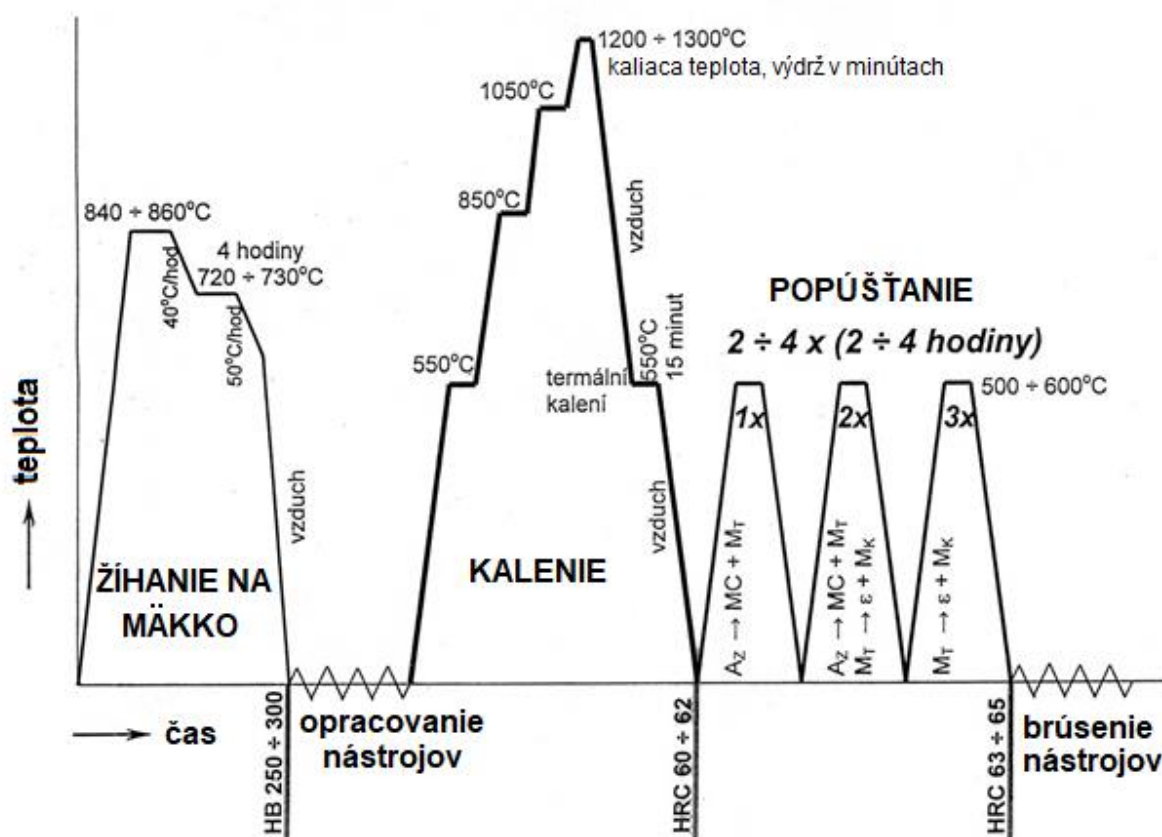
- k precipitácii jemnej disperzie častíc špeciálnych karbidov (W_2C , V_4C_3 , Mo_2C) – nárast tvrdosti ocele po popúšťaní
- pri ochladení z popúšťacej teploty k transformácii ochudobneného zvyškového austenitu na martenzit, čím dochádza opäť k zvýšeniu tvrdosti ocele po popúšťaní, obr.3.40.



Obr.3.40 Vysokoteplotné zušľachťovanie nástrojových ocelí na sekundárnu tvrdosť
Popúšťacia krivka a vrstevnicový diagram rýchloreznej ocele
a) Popúšťacia krivka (HS 6-5-2) b) Vrstevnicový diagram

3.3.11.10 Tepelné spracovanie rýchlorezných ocelí

Cieľom tepelného spracovania rýchlorezných ocelí je dosiahnuť čo najlepšie rezné vlastnosti a najvhodnejšie mechanické vlastnosti nástroja. Typický priebeh tepelného spracovania rýchloreznej ocele je uvedený na obr.3.41.

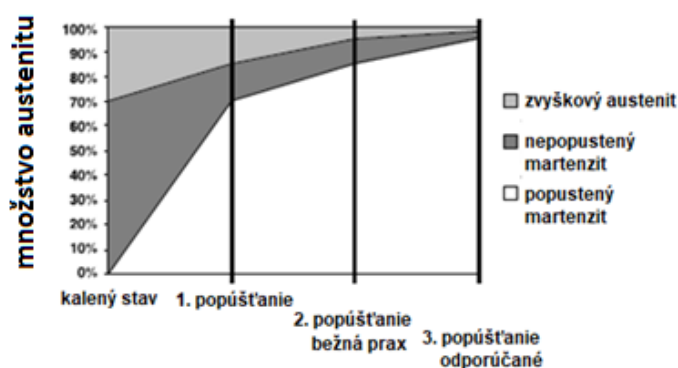


Obr.3.41 Technologický postup tepelného spracovania rýchloreznej ocele

1. Žíhanie na mätko - používa sa pre zlepšenie obrábateľnosti. Najjednoduchší spôsob žíhania na mätko spočíva v pomalom ohreve ocele na teplotu pod A_{c1} (podľa typu ocele je táto teplota daná v materiálových listoch) s výdržou 4 až 8 hodín a následným pomalým ochladením v peci do teploty asi 600 - 500 °C a ďalším pozvoľným chladnutím.
2. Žíhanie na zníženie vnútorných napätí - slúži na zníženie napätí vzniknutých pri obrábaní pred tepelným spracovaním. Spočíva v pomalom ohreve na teplotu 600 - 650 °C s 1-2 hodinovým zotrvaním na teplote a pomalom chladnutí v peci. V takomto stave má oceľ perliticko - ledeburitickú štruktúru.
3. Kalenie. Účelom kalenia je po rozpustení karbidov dosiahnutie ich nového, jemnejšieho vylúčenia, za súčasného dosiahnutia optimálnych rezných a mechanických vlastností. Možno ho realizovať ochladzovaním na vzduchu, pretože rýchlorezné ocele sú samokaliteľné (vdďaka vysokému obsahu legúr), a nie je potrebné používať intenzívne chladiace prostredia. Nástroje z rýchlorezných ocelí sa zohrievajú na kaliacu teplotu stupňovito, pretože veľká rýchlosť ohrevu vytvára termické napätia a spôsobuje ich praskanie. Ich kaliaca teplota je vyššia ako u bežných konštrukčných ocelí, pohybuje sa v rozmedzí 1200 - 1300 °C. Prvý stupeň ohrevu sa uskutočňuje na vzduchu, ďalšie už v solných kúpeľoch alebo vo vákuovej peci, a to nasledovne:
 - 1. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale 350 - 550 °C, s výdržou 1 - 2 hodiny. Teplota 550 °C je kritickou teplotou, pri ktorej nedochádza k oduhličeniu nástrojov, preto je

možné vykonať ho na vzduchu. Cieľom výdrže na teplote je vyrovnať teplotu jadra a povrchu nástroja, a tým zmenšiť tepelné pnutia;

- 2. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale 820 - 850 °C, s výdržou 1 - 2 hodiny. Jedná sa o ohrev nad teplotu A_{c1} , čo umožňuje vyrovnanie štruktúrnych pnutí, ktoré vznikajú zmenou mriežky, teda prekryštalizáciou. Uskutočňuje sa v solnom kúpeli alebo vo vákuu;
- 3. stupeň ohrevu je na teplotu 1050 °C v solnom kúpeli. Pri tejto teplote sa karbid $M_{23}C_6$ rozkladá na zložky, ktoré sa rozpúšťajú v austenite a uskutoční sa homogenizácia austenitu. Tento stupeň skracuje dobu zotrvania na kaliacej teplote, a teda znižuje aj nebezpečenstvo zhrubnutia zrna;
- 4. stupeň ohrevu je na teplotu v intervale 1200 - 1300 °C, s výdržou menej ako 5 minút, aby nezhrublo zrno a nenatavili sa tenké rezné hrany nástrojov. Dĺžka zotrvania závisí od teploty kalenia. S vyššou kaliacou teplotou sa skracuje doba výdrže. Voľba kaliacej teploty v predpísanom rozmedzí sa riadi predovšetkým tvarom a spôsobom namáhania nástroja pri používaní. Kaliaca teplota pri spodnej hranici kaliaceho rozmedzia dáva nástroju vyššiu húževnatosť, oteruvzdornosť, odolnosť proti tepelnej únave a menšie rozmerové zmeny. Je teda vhodná pre menšie a tvarovo komplikovanejšie nástroje. Kaliaca teplota pri hornej hranici kaliaceho rozmedzia zvyšuje prekaliteľnosť, odolnosť proti popúšťaniu a tvrdosť pri zvýšených teplotách, a tým zvyšuje aj životnosť nástrojov. Takáto teplota je vhodná pre väčšie nástroje a nástroje jednoduchých tvarov s minimálnymi rozdielmi v priereze. Po zakalení je štruktúra rýchloreznej ocele tvorená nerozpustenými karbidmi M_6C a MC (v množstve asi 5 - 10 %), vysokolegovaným zvyškovým austenitom (v množstve asi 40 - 70 %) a vysokolegovaným martenzitom (zvyšok do 100 %).



Obr.3.42 Vplyv viacnásobného popúšťania rýchloreznej ocele na podiel jednotlivých štruktúrnych zložiek vo výslednej mikroštruktúre

Obr.3.42 zobrazuje vplyv viacnásobného popúšťania rýchlorezných ocelí na podiel jednotlivých štruktúrnych zložiek vo výslednej mikroštruktúre.

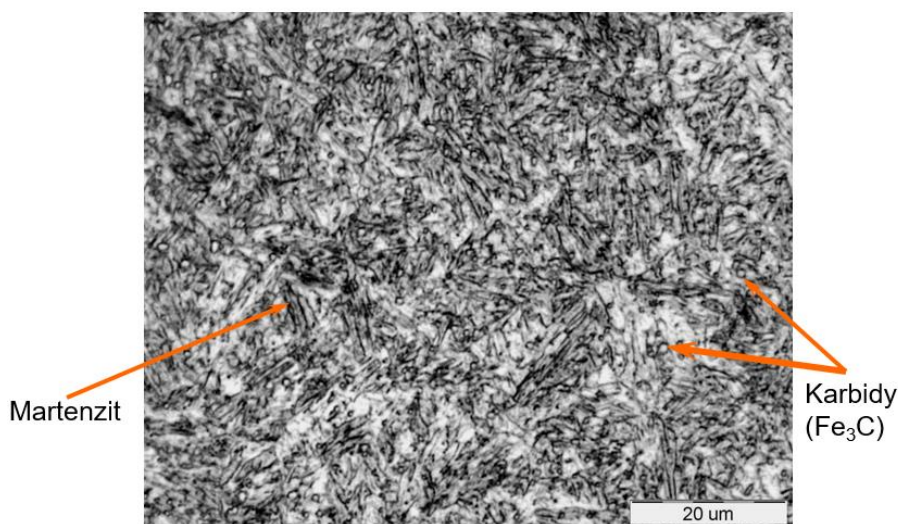
Štruktúra po kalení sa skladá z nepopusteného martenzitu a približne 30% zvyškového austenitu. Po kalení majú tieto štruktúrne zložky vysokú úroveň vnútorných napätí, ktoré sa

musia uvoľniť, inak sa nástroj poruší. Rýchlorezné a vysokolegované nástrojové ocele majú dobrú odolnosť voči popúšťaniu, preto sa popúšťajú pri vysokých teplotách.

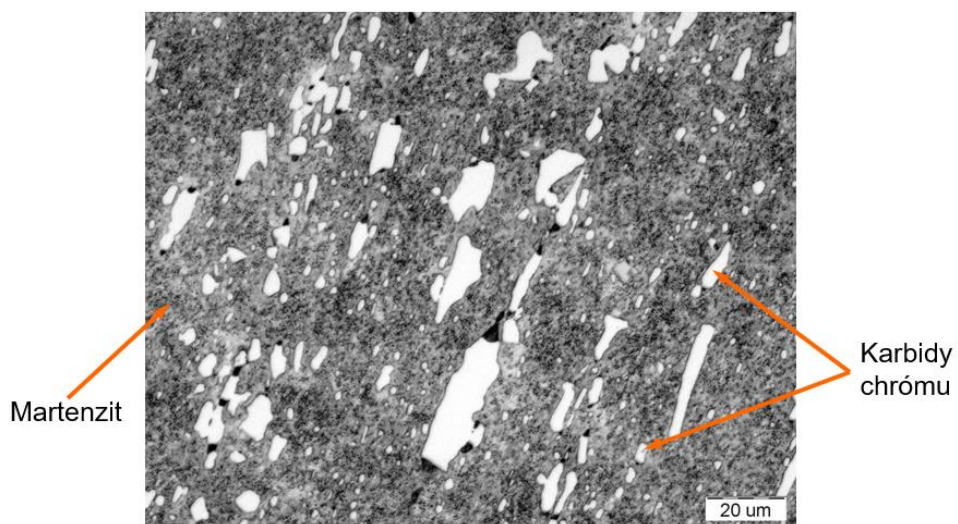
4. Popúšťanie pri teplote 540°C a viac vedie k popusteniu nepopusteného martenzitu, a pri ochladzovaní nástroja sa približne polovica zvyškového austenitu premení na nepopustený martenzit bez toho, aby tvrdosť nástroja poklesla pod 60 HRC. Vyššia teplota popúšťania je dostatočná na to, aby sa zvyškový austenit premenil na martenzit, čím sa znižuje potreba kryogénneho spracovania rýchlorezných a vysokolegovaných nástrojových ocelí. Štandardná prax tepelného spracovania rýchlorezných nástrojových ocelí vyžaduje najmenej dva popúšťacie cykly. Na to, aby sa obsah zvyškového austenitu a nepopusteného martenzitu dostal na úroveň prijateľnú pre operácie lisovania sa odporúčajú tri popúšťacie cykly. Po treťom, maximálne štvrtom popúšťaní je premenený takmer všetok zvyškový austenit, ktorý by sa mohol premieňať pri pracovnej teplote nástroja, hoci nejaké percento zvyškového austenitu v štruktúre stále zostáva. Nástroj je teda rozmerovo stabilný a pripravený na použitie. Doba výdrže na popúšťacej teplote je asi 1 hodina na každých 25 mm hrúbky, minimálne však 30 minút. Rozpad zvyškového austenitu prebieha počas ochladzovania z popúšťacej teploty a po každom popúšťaní sa musí nástroj ochladiť na teplotu okolia.

3.3.11.11 Mikroštruktúra nástrojových ocelí

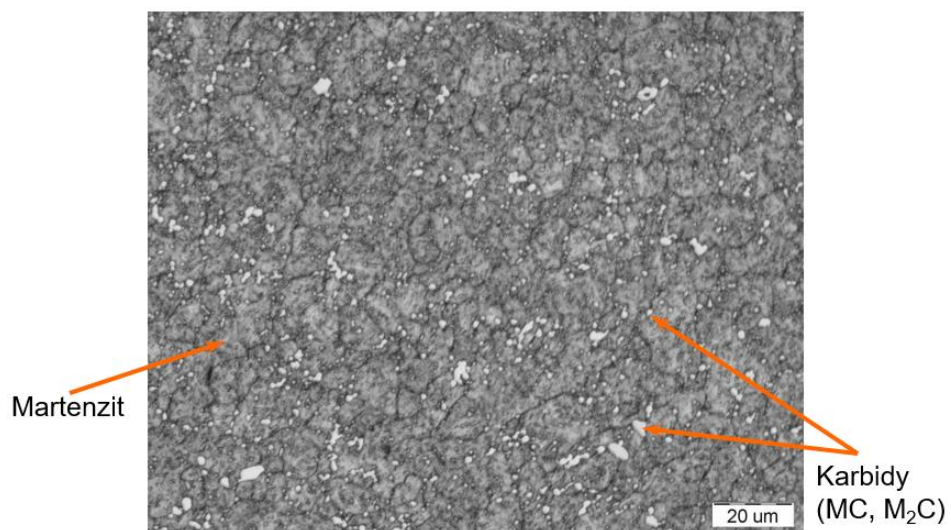
Na nasledujúcich obr.3.43 - 3.44 sú uvedené príklady mikroštruktúry niektorých nástrojových ocelí.



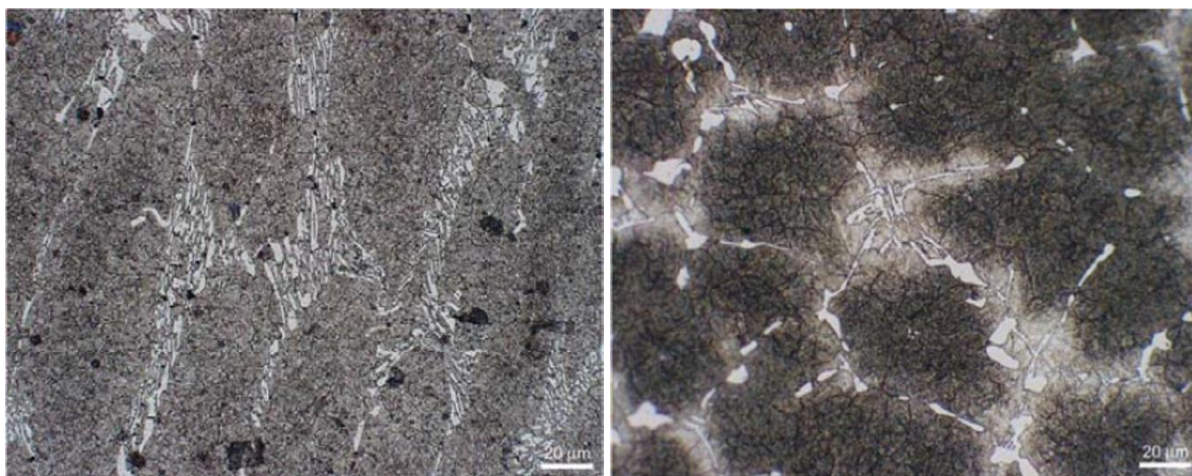
Obr.3.43 a) Mikroštruktúra nelegovanej ocele C105U (19 191), 850°C/voda/200°C



Obr.3.43 b) Mikroštruktúra legovanej ocele X210Cr12 (19 436), 980°C/olej/200°C, ukážka štruktúry nevhodne tvárnenej nástrojovej ocele – karbidická riadkovitosť



Obr.3.44 a) Mikroštruktúra rýchloreznej ocele HS 6-5-2 (19 830), 1200°C/olej/550°C



Obr.3.44 b) Mikroštruktúra liatej nástrojovej ocele 170WV6M3



Obr.3.44 c) Ocel' Vanadis 23 vyrobená metódou práškovej metalurgie

3.3.11.12 Povrchové úpravy nástrojov

Na zlepšenie úžitkových vlastností nástrojov, najmä rezných a lisovacích, existuje rad postupov povrchových úprav na zlepšenie ich vlastností.

Najdôležitejšie z nich sú:

- **Naprašovanie vrstvy nitridu titánu (TiN)** – podstatne zlepšuje životnosť nástrojov, najmä rezných
- **Nitridovanie** – zvyšuje tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu a zlepšujú sa klzné vlastnosti
- **Tvrde chrómovanie** - zvyšuje tvrdosť, odolnosť proti opotrebeniu, u rezných a lisovacích nástrojov je možné týmto postupom zvýšiť životnosť až trojnásobne
- **Fosfátovanie** – získaná vrstva je pórovitá, dobre zadržiava mazivo a tým zlepšuje odolnosť proti opotrebeniu

3.3.12 Ocele na valivé ložiská

Pri chode valivých ložísk vyvolávajú valivé telieska (guľôčky, valčeky a pod.) na krúžkoch ložiska tlakové a šmykové, časovo premenne napätia, ktoré môžu byť príčinou nukleácie únavovej trhliny. Trhlinu obvykle iniciuje inklúzia, karbid alebo materiálová chyba. Životnosť a spoľahlivosť ložísk závisí jednak na akosti matrice, jednak na veľkosti, distribúcii, morfológii, zložení a rozložení inklúzií a karbidov. Nevyhovujúce sú krehké, tvrdé a netvárne oxidy, prípadné karbidy. Z hľadiska náchylnosti ocelí k vzniku kontaktnej únavy (pittingu) sú nežiaduce najmä netvárne hliníky, oxid hlinitý a karbonitridy titanu. Vysoká čistota týchto

ocelí sa dosahuje dezoxidáciou vo vákuu, prípadné vákuovým pretavením, čím sa dosiahne jemnozrnná štruktúra a inklúzie malých rozmerov.

Podľa normy DIN 17 230 sa ložiskové ocele delia do nasledujúcich skupín:

- a) prekaliteľné ocele,
- b) cementačné ocele,
- c) zošľachtené ocele,
- d) antikorózne ocele,
- e) ocele zachovávajúce si tvrdosť za vyšších teplôt.

Ocele majú jemnú martenzitickú štruktúru vysokej tvrdosti. Nadeutektoidné ocele majú v martenzite vylúčené karbidy. Najbežnejšie sa používajú na ložiská ocele prvej skupiny uvedené v tab.3.26.

Tabuľka 3.26 Chemické zloženie [hm. %] ocelí na valivé ložiska

Značka	Číslo mat.	C	Mn	Cr	Mo max	Ni max	V max	W max
Prekaliteľné ocele na valivé ložiska								
100Cr6	1.3505	0,90-1,05	0,25-0,45	1,35-1,65		0,3		
100CrMn6	1.3520	0,90-1,05	1,00-1,20	1,40-1,65		0,3		
100CrMo7	1.3537	0,90-1,05	0,25-0,45	1,65-1,95	0,25	0,3		
100CrMnMo8	1.3539	0,90-1,05	0,80-1,00	1,80-2,05	-0,60	0,3		
Cementačné ocele								
19CrMn5	1.3523	0,17-0,22	1,10-1,40	1,00-1,30				
16CrNiMo6	1.3531	0,15-0,20	0,40-0,60	1,50-1,80	0,35	1,7		
17NiCrMo14	1.3533	0,15-0,20	0,40-0,70	1,30-1,60	0,25	3,75		
Zošľachtené ocele								
44CR2	1.3561	0,42-0,48	0,50-0,80	0,40-0,60				
43CrMo4	1.3563	0,40-0,46	0,60-0,90	0,90-1,20	0,30			
48OCrMo4	1.3565	0,46-0,52	0,50-0,80	0,90-1,20				
Antikorózne ocele								
X45Cr13	1.3541	0,42-0,50	max. 1,0	12,514,5		0,5		
X102CrMo17	1.3543	0,95-1,10	max. 1,0	16,0-18,0	0,75			
X89CrMoV18-1	1.3549	0,85-0,95	max. 1,0	17,0-19,0	1,30		0,10	
Ocele zachovávajúce si tvrdosť za vyšších teplôt								
X82WCrV6-5-5	1.3553	0,78-0,86	max. 0,40	3,80-4,50	5,20		2,0	6,7
X75WCrV18-4	1.3558	0,70-0,78	max. 0,40	3,80-4,50	0,60		1,2	18,5

Ocele sa pred spracovaním žihajú na mätko (na tvrdosť cca 210 HBS). Po spracovaní sa kalia do oleja a popúšťajú na tvrdosť 60 až 65 HRC. Značky legované molybdénom majú väčšiu prekaliteľnosť a používajú sa pre výrobu väčších ložísk.

Cementačné ocele majú vysokú povrchovú tvrdosť pri húževnatom jadre. Antikorózne ocele na valivé ložiská sa používajú do korózneho prostredia. Môžeme ich zaradiť medzi martenzitické korozivzdorné ocele. Poslednú skupinu ocelí v tabuľke možno zaradiť medzi rýchlorezné ocele, zachovávajúce si tvrdosť pri teplotách až do 550°C. Používajú sa napr. na uloženie rotoru plynových turbín.

3.3.13 Ocele na odliatky

Technické dodacie podmienky pre ocele na odliatky uvádza STN EN 1559-2. Pre väčšinu typov ocelí k tvárneniu existuje variant ocele na odliatky, ktorý sa označuje symbolom G.

Podľa použitia norma rozlišuje značky ocelí na odliatky pre:

- použitie za normálnej teploty a zvýšených teplôt,
- použitie za nízkych teplôt,
- značky austenitických a austeniticko-feritických ocelí.

Ocele pre použitie za normálnej teploty a zvýšených teplôt sa používajú v energetickom strojárstve do 400 až 550°C. Podľa stupňa legovania sa môžu deliť na nelegované, nízkolegované a vysokolegované. Výber legovaných ocelí je v tab.3.27.

Vysokolegované ocele sú kaliteľné na vzduchu. Martenzitická štruktúra získaná po kalení sa popúšťa na vysoké teploty. Ocele GX15CrMo5 a GX23CrMoV12-I sa používajú v petrochemickom priemysle.

Tabuľka 3.27 Chemické zloženie v [hm. %] a mechanické vlastnosti legovaných ocelí na odliatky

Značka	Číslo mat.	C max	Cr	Mo	Ni max	V	R _m MPa	A %	KV J
G20Mo5	1.5419	0,23		0,40-0,60			440-590	22	27
G17CrMo9-10	1.7379	0,20	2,00-2,50	0,90-1,20			590-740	18	40
G12CrMoV5-2	1.7720	0,15	0,30-0,50	0,40-0,60		0,3	510-660	17	27
G17CrMoV5-10	1.7706	0,20	1,20-1,50	0,90-1,10			590-780	15	27
GX15CrMo5	1.7365	0,19	4,00-6,00	0,45-0,65			630-760	16	
GX4CrNi13-4	1.4317	0,06	12,0-13,5	max. 0,70	5,0		760-960	15	50
GX4CrNiMo16-5-1	1.4405	0,06	15,0-17,0	0,70-1,50	6,0		760-960	15	60

Ocele na odliatky pre použitie za nízkych teplôt sa vyznačujú nízkym obsahom uhlíka. Tranzitnú teplotu znižuje mangán až do obsahu 1,60 %. Ešte významnejšie ju znižuje nikel. Nízkolegované mangánové ocele (G17Mn5, G20Mn5) sa používajú do teplôt -60°C, vysokolegované (G17NiCrMo13-6, GXCrNi13-4) do teplôt -80 až -120°C.

Ocele austenitické a austeniticko-feritické pre tlakové nádoby predstavujú najpoužívannejšie značky antikorózných ocelí na odliatky. Požadujú veľmi nízke obsahy uhlíka (max. 0,07 %,

najčastejšie 0,03 %). Výber týchto ocelí je v tab.3.28. Prvé tri značky predstavujú austenitické ocele, ďalšie ocele sú austeniticko-feritické (duplexné ocele). Uvedené materiály dosahujú pevnosť v rozmedzí 440 – 850 MPa, pri ťažnosti 20 – 30 %.

Tabuľka 3.28 Chemické zloženie v [hm. %] a mechanické vlastnosti austenitických a austeniticko-feritických ocelí na odliatky

Značka	Číslo mat.	C max	Cr	Mo	Ni	ostatné
GX2CrNi19-10	1.4308	0,07	18-20		8,0-11,0	
GX2CrNiMo19-11-2	1.4409	0,03	18-20	2,0-2,5	9,0-12,0	N: max. 0,20
GX5CrNiMo19-11-2	1.4408	0,07	18-20	2,0-2,5	9,0-12,0	
GX2CrNiMo28-20-2	1.4458	0,03	19-22	2,0-3,0	26-30,0	N: max.0,20, Cu: 2,0
GX2CrNiMoN2-5-3	1.4470	0,03	21-23	2,5-3,5	4,5,-6,5	N: 0,12-0,20
GX2CrNiMoN26-7-4	1.4469	0,03	25-27	6,0-8,0	6,0-8,0	N: 0,12-0,2, Cu: 1,3

3.3.14 Oteruvzdorné ocele

Oteruvzdorné ocele sú vyrábané často ako ocele na odliatky. U zložitejších tvarov nie je často iná možnosť vyrobiť dielec inak (obťažná obrobiteľnosť) ako odievaním.

Austenitické manganové ocele (Hadfieldová oceľ) sú určené pre vysoké merné tlaky. Obsahujú asi 1,2 až 1,5 %C a 12 až 15 %Mn. Variant s cca 18 %Mn je používaná pre najviac namáhané súčiastky. Majú austenitickú štruktúru, ktorá sa dosahuje ohrevom na teploty 980 až 1100°C a rýchlym ochladením vo vode. Dosahujú tvrdosť okolo 200 HBS, medzu klzu 400 MPa, pri pevnosti 800 - 900 MPa a ťažnosti 35 - 50 %. Oceľ v liatom stave alebo pomaly ochladzovaná je krehká.

Chrómové karbidické ocele majú základnú štruktúru tvorenú martenzitom, v ktorom sú uložené karbidy. Ocele obsahujú 1,1 až 1,6 %C a 12 až 28 %Cr. Pomer obsahu uhlíku k obsahu chrómu má obvykle hodnotu 10.

Oceľ o zložení 1,2 až 1,6 %C a 12 až 14 %Cr sa používa k výrobe mlecích gúľ a nástrojov. Na odlievanie telies a obežných kolies kalových a bagrovacích čerpadiel sa používa materiál s obsahom 2,5 až 3,0%C a 15 až 28 %Cr, Tento veľmi krehký materiál býva niekedy formálne zaradzovaný medzi ocele inokedy medzi legované latiny.

3.3.15 Ocele používané v konštrukcii automobilov

Automobilové ocele môžu byť rozdelené podľa rôznych hľadísk. Jedným z nich je metalurgické hľadisko, ktoré poskytuje niektoré informácie o procese výroby. Bežné akosti zahŕňajú:

- LSS - ocele s nízkou pevnosťou (ocеле bez interstícií a nízkouhlíkové ocele);

- HSS – vysokopevné ocele (uhlíkovo-mangánové ocele, ocele vytvrdzované pri vypaľovaní laku, vysokopevné nízkoalegované ocele),
- AHSS – progresívne vysokopevné ocele (dvojfázové ocele, ocele s transformačne indukovanou plasticitou, ocele s dvojčatením indukovanou plasticitou, feriticko-bainitické ocele, viacfázové a MARAGING ocele).

Ďalšie ocele s vyššou pevnosťou pre automobilový trh zahŕňajú ocele tvárnené za tepla, tvárnené a tepelne spracované ocele a ocele určené pre unikátne aplikácie so zlepšenou schopnosťou ohýbania a ohýbania s vypínaním.

Druhým hľadiskom, ktoré je dôležité pre dizajnérov dielcov je pevnosť ocele. Preto sa používa označenie HSS a AHSS na označenie všetkých ocelí s vyššou pevnosťou. Tento klasifikačný systém má problém ako sa vyrovnáť s neustálym vývojom mnohých nových akostí ocelí. Preto DP alebo TRIP ocele môžu mať pevnostné akosti, ktoré zasahujú do dvoch alebo viacerých pevnostných rozsahov.

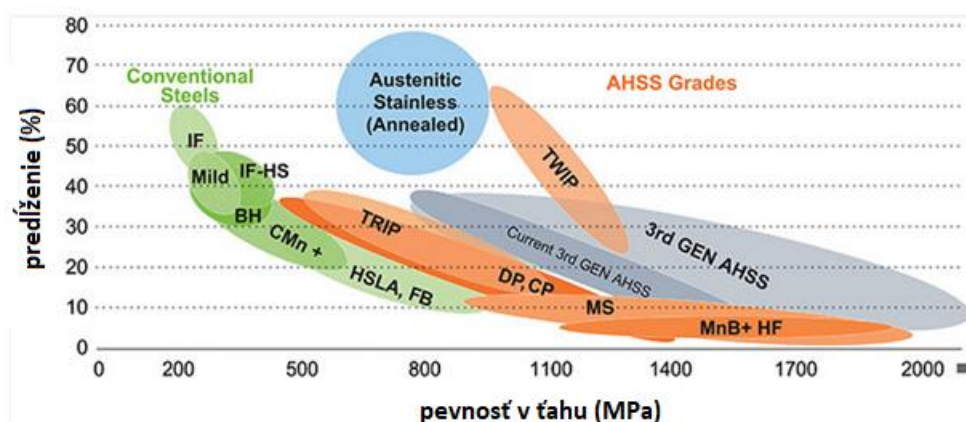
Tretie hľadisko zohľadňuje rôzne mechanické vlastnosti alebo parametre tvárnenia rôznych ocelí, ako sú celkové predĺženie, exponent deformačného spevnenia (n) alebo súčiniteľ rozširovania otvoru (λ). Obr.3.45 porovnáva celkové predĺženie - vlastnosť ocelí súvisiacu s tvárnosťou - s pevnosťou v ťahu pre súčasné typy ocele. Tieto vlastnosti sú dôležité pre lisovacie operácie a virtuálne analýzy tvárnenia.

Hlavný rozdiel medzi konvenčnými HSS a AHSS je ich mikroštruktúra. Konvenčné HSS sú jednofázové feritické ocele s potenciálom pre istý podiel perlitu v C-Mn oceliach. AHSS sú predovšetkým ocele s mikroštruktúrou obsahujúcou inú fázu ako ferit, perlit alebo cementit, napr. martenzit, bainit, austenit a/alebo zvyškový austenit v množstvách dostatočných na vznik jedinečných mechanických vlastností. Niektoré typy AHSS majú vyššiu schopnosť deformačného spevnenia, čo vedie k rovnováhe medzi pevnosťou a ťažnosťou, ktorá je lepšia ako u konvenčných ocelí. Ďalšie typy majú ultravysokú medzu klzu a pevnosť v ťahu a sú vytvrditeľné pri vypaľovaní laku.

Bežné vysokopevnostné ocele sa vyrábali pridaním legujúcich prvkov, ako sú Nb, Ti, V a / alebo P, do nízkouhlíkových alebo IF (bez interstícií) ocelí. Tieto ocele sa dajú vyrobiť za relatívne jednoduchých podmienok spracovania a vo veľkej miere sa používajú na znižovanie hmotnosti. Pretože sa však požiadavky na znižovanie hmotnosti stále zvyšujú, boli vyvinuté nové druhy vysokopevnostných ocelí. Tieto nové triedy ocelí obsahujú ocele DP (dvojfázové), TRIP (ocelé s transformačne indukovanou plasticitou), FB (feriticko-bainitické), CP (viacfázové) a TWIP (dvojčatením indukovanou plasticitou). Kritickou časťou pri výrobe ocelí je kontrola parametrov spracovania tak, aby bolo možné optimalizovať mikroštruktúru a získať rovnováhu medzi pevnosťou a tvárnosťou.

Keďže terminológia použitá na klasifikáciu oceľových výrobkov sa vo svete značne líši, tento dokument používa na definovanie ocelí formát WorldAutoSteel. Každá akosť ocele je

identifikovaná metalurgickým typom, minimálnou medzou klzu (v MPa) a minimálnou pevnosťou v ťahu (v MPa). Napríklad DP 500/800 je označenie dvojfázovej ocele s minimálnou medzou klzu 500 MPa a minimálnou pevnosťou v ťahu 800 MPa.

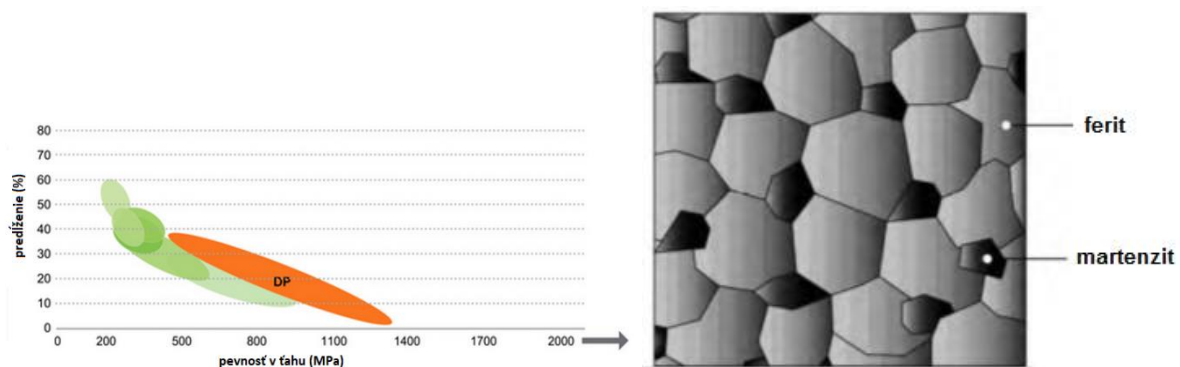


Obr.3.45 Diagram tváriteľnosti pre konvenčné a AHSS ocele

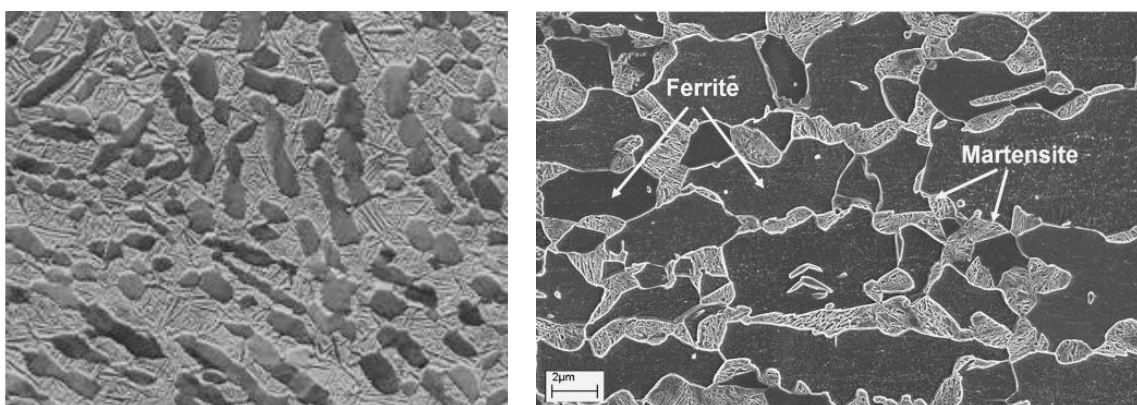
3.3.15.1 Dvojfázové (DP) ocele - Dual Phase Steels

DP ocele pozostávajú z feritickej matrice obsahujúcej tvrdú martenzitickú druhú fázu vo forme ostrovčekov. Zvyšovanie objemového podielu tvrdých sekundárnych fáz vo všeobecnosti zvyšuje pevnosť. DP (ferit a martenzit) ocele sa vyrábajú riadeným ochladzovaním z austenitickej fázy (u výrobkov valcovaných za tepla) alebo z dvojfázovej feriticko-austenitickej fázy (u kontinuálne žíhaných výrobkov valcovaných za studena a výrobkov pokovovaných ponorom) transformáciou časti austenitu na ferit predtým, než sa rýchlym ochladením transformuje zvyšok austenitu na martenzit. V dôsledku výrobného procesu môže byť v štruktúre prítomné malé množstvo ďalších fáz (bainit a zvyškový austenit). V závislosti od zloženia a spôsobu spracovania môžu mať ocele, od ktorých sa vyžaduje zvýšená odolnosť voči praskaniu na napnutej hrane (zvyčajne meraná pomocou schopnosti rozširovania otvorov) mikroštruktúru obsahujúcu významné množstvá bainitu.

Obr.3.46 schematicky znázorňuje mikroštruktúru DP ocele, ktorá obsahuje ferit a ostrovčeky martenzitu. Mäkká feritická fáza je vo všeobecnosti kontinuálna, čo dáva týmto oceliam vynikajúcu ťažnosť. Keď sa tieto ocele deformujú, deformácia sa koncentruje vo feritickej fáze s nižšou pevnosťou, ktorá obklopuje ostrovčeky martenzitu, čo spôsobuje vznik vysokého počiatočného koeficientu deformačného spevnenia (n), ktorou sa tieto ocele vyznačujú. Na obr.3.47 je mikroštruktúra DP ocele s viditeľnou feritickou a martenzitickou fázou.

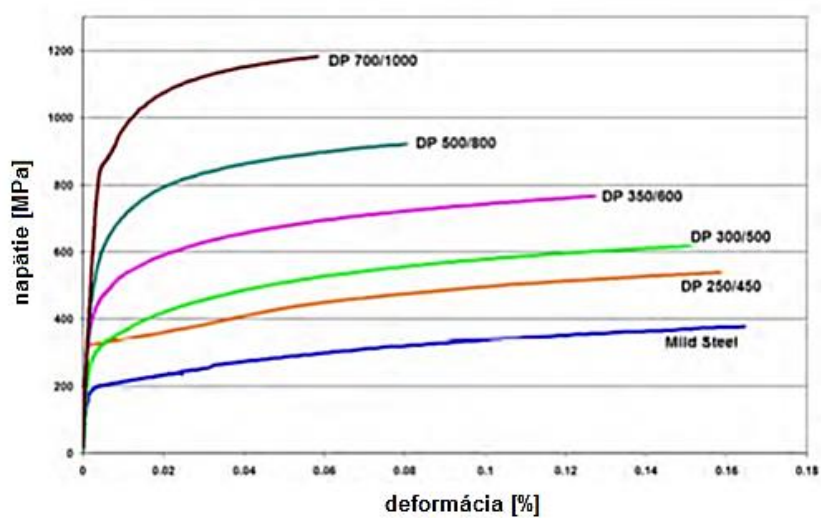


Obr.3.46 Schematické znázornenie mikroštruktúry DP ocelí a ich umiestnenie v diagrame tvárniteľnosti



Obr.3.47 Mikroštruktúra DP ocele

Obr.3.48 porovnáva ťahový diagram HSLA ocele a DP ocele s podobnou medzou klzu. DP oceľ vykazuje vyšší počiatočný koeficient deformačného spevnenia, vyššiu pevnosť v ťahu a vyšší pomer R_m/R_e než HSLA oceľ s podobnou medzou klzu.



Obr.3.48 Konvenčné ťahové diagramy rôznych typov DP ocelí (DP 250/450 a DP 500/800 hrúbka plechu 1 mm; ostatné akosti hrúbka plechu 1,8-2,00 mm)

DP a iné AHSS majú aj **BH (bake hardening) efekt**, ktorý je dôležitým benefitom v porovnaní s bežnými ocelami s vyššou pevnosťou. BH efekt je zvýšenie medze klzu spôsobené starnutím pri zvýšenej teplote (v peci pri vypaľovaní laku) po predbežnom spevnení tvárnením (vyvolaným deformačným spevnením v dôsledku deformácie počas lisovania alebo iného výrobného procesu). Rozsah BH efektu u AHSS závisí od dostatočnej deformácie, chemického zloženia a tepelného spracovania ocele.

U DP ocelí uhlík umožňuje tvorbu martenzitu pri praktických rýchlostiach ochladzovania zvýšením prekaliteľnosti ocele. Mn, Cr, Mo, V a Ni, pridávané jednotlivo alebo v kombinácii, tiež pomáhajú zvyšovať prekaliteľnosť. Uhlík prispieva k zvýšeniu tvrdosti martenzitu vo forme tuhého roztoku vo ferite, rovnako ako Si a P. Tieto prísady sú starostlivo vyvážené nielen na dosiahnutie jedinečných mechanických vlastností, ale aj na zachovanie všeobecne dobrej zvariteľnosti pri bodovom odporovom zváraní. Avšak bodové zváranie ocelí s vyššou pevnosťou (DP 700/1000 a viac) si môže vyžadovať úpravu zváracieho postupu.

3.3.15.2 Ocele s transformačne indukovanou plasticitou (TRIP) - TRansformation Induced Plasticity (TRIP) steels

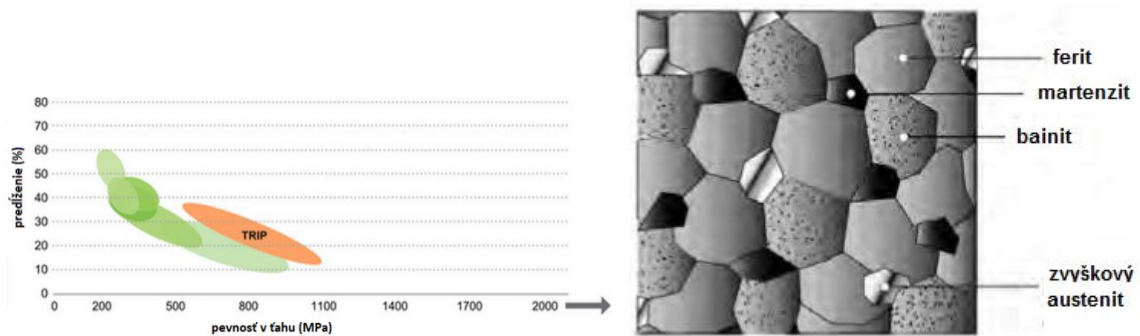
TRIP efekt je špecifický spôsob tvorby martenzitu vyvolaný tvárnením. Je potrebné rozlišovať tvorbu martenzitu vyvolaného napätím a tvorbu martenzitu vyvolanú deformáciou, pri ktorej nastáva TRIP efekt. Spôsobuje nárast tvrdosti a tvárniteľnosti pri plastickom namáhaní v procese výroby alebo použitia produktu. Intenzita TRIP efektu je možné ovplyvniť najmä lacnými legujúcimi prvkami ako je uhlík, mangán, hliník a kremík. Medza klzu materiálu je vyššia ako u porovnateľných ocelí, pretože prídavok kremíka umožňuje spevnenie tuhým roztokom. Ako náhle sa počas tvárnenia alebo deformácie dostaneme do oblasti plasticity, začne sa transformácia metastabilného na uhlík bohatého austenitu na martenzit. Vďaka tomu je oceľ TRIP spevnená výhradne plastickou deformáciou.

Mikroštruktúra ocelí TRIP

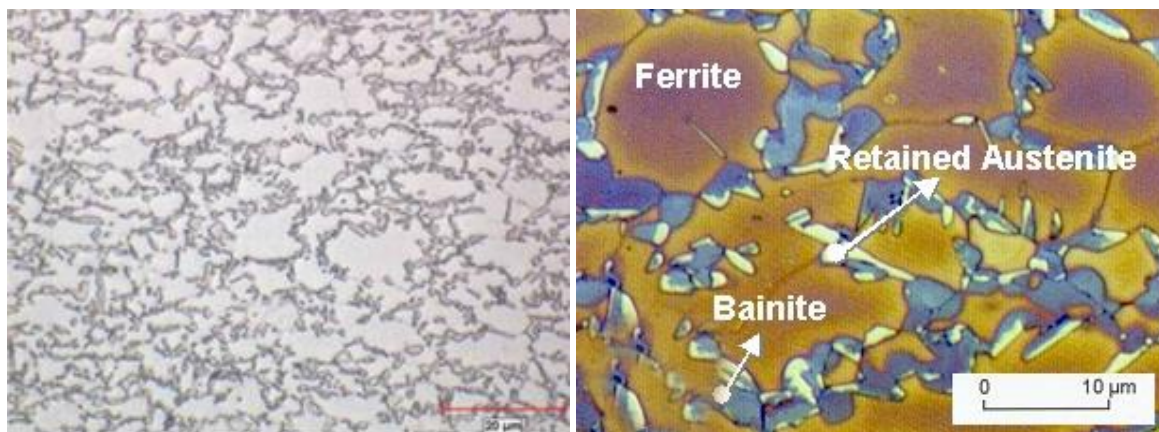
Mikroštruktúra TRIP ocelí obsahuje zvyškový austenit v matrici feritu, bainitu alebo martenzitu v závislosti na zložení zliatiny a predchádzajúcom spracovaní. Často sa tiež vyskytujú zmesi týchto zložiek matrice. Ocele TRIP sú zvyčajne podeutektoidné zliatiny uhlíka a železa často s 0,1 až 0,4 hm.% uhlíka. Ocele TRIP zvyčajne obsahujú 5 až 10 obj.% metastabilného zvyškového austenitu. Pri mechanickom zaťažení ocele TRIP najskôr prejdú konvenčnou dislokačnou plasticitou mäkkých feritických častí mikroštruktúr a s ďalším nárastom deformácie sa zvyškový austenit postupne sa transformuje na martenzit. TRIP efekt zlepšuje pevnosť, ťažnosť vďaka dobre rozptýlenej distribúcii veľkostí austenitických zŕn a s tým súvisiacemu ich deformačnému a fázovému transformačnému chovaniu.

Mikroštruktúra TRIP ocelí je tvorená zvyškovým austenitom zakotveným v primárnej matrici feritu. Okrem minimálne 5 obj.% zvyškového austenitu sú v mikroštruktúre prítomné

v rôznych množstvách tvrdé fázy ako je martenzit a bainit. TRIP ocele si zvyčajne vyžadujú izotermickú výdrž pri strednej teplote, pri ktorej vznikne určitý podiel bainitu. Vyšší obsah kremíka a uhlíka v oceliach TRIP tiež spôsobuje významný objemový podiel zvyškového austenitu v konečnej mikroštruktúre. Obr.3.49 schematicky znázorňuje mikroštruktúru TRIP ocele. Na obr.3.50 je mikroštruktúra ocele TRIP 690.

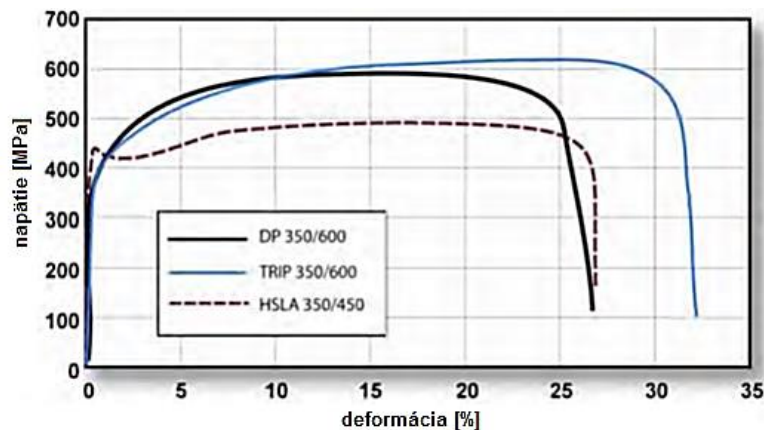


Obr.3.49 Schematické znázornenie mikroštruktúry TRIP ocelí a ich umiestnenie v diagrame tvárniteľnosti



Obr.3.50 Mikroštruktúra ocele TRIP 690

Pri deformácii dochádza k vysokému deformačnému spevneniu DP ocelí v dôsledku dispergovanej sekundárnej tvrdej fázy v mäkkom ferite. Avšak u TRIP ocelí sa zvyškový austenit so zvyšujúcou sa deformáciou progresívne transformuje na martenzit, čím sa zvyšuje rýchlosť spevnenia pri vyšších úrovniach deformácie. To je znázornené na obr.3.51, kde sa porovnáva konvenčný ťahový diagram HSLA, DP a TRIP ocelí s približne rovnakou medzou klzu.



Obr.3.51 Porovnanie ťahových diagramov ocelí TRIP 350/600, DP 350/600 a HSLA 350/450

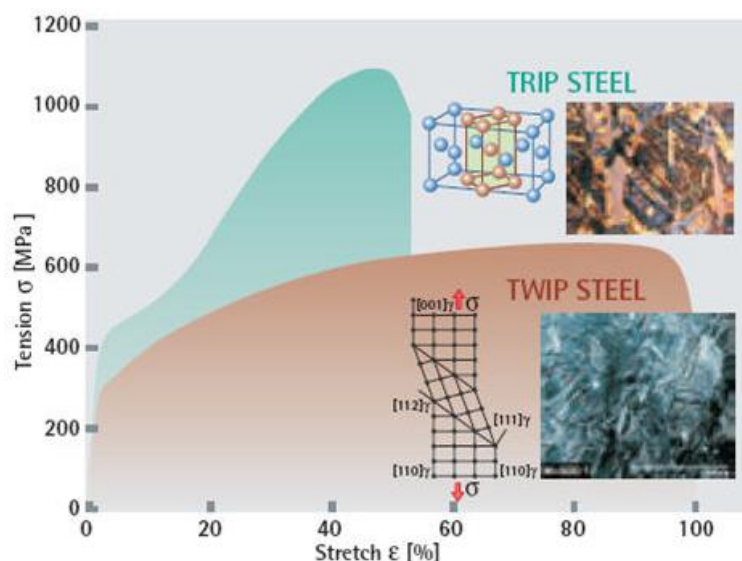
TRIP oceľ má nižšiu počiatočnú rýchlosť spevnenia ako DP oceľ, ale rýchlosť spevnenia pretrváva pri vyšších deformáciách, kde deformačné spevnenie DP ocelí začína klesať.

Rýchlosť deformačného spevnenia TRIP ocelí je podstatne vyššia ako u konvenčných HSS, čo zabezpečuje výraznejšiu tvárnosť. To je zvlášť užitočné, keď dizajnéri využívajú vysokú rýchlosť spevnenia (a zvýšený BH efekt), aby navrhli dielec využívajúci mechanické vlastnosti po tvárnení. Vysoká rýchlosť deformačného spevnenia TRIP ocelí pretrváva aj pri vyšších deformáciách, čo predstavuje miernu výhodu v porovnaní s DP oceľami v najťažších aplikáciách s vypínaním.

TRIP ocele obsahujú väčšie množstvá uhlíka ako DP ocele aby sa získal dostatočný obsah uhlíka na stabilizáciu zvyškového austenitu až pod teplotu okolia. Vyšší obsah kremíka a/alebo hliníka urýchľuje tvorbu feritu/bainitu. Tieto prvky pomáhajú udržiavať potrebný obsah uhlíka v zvyškovom austenite. Potlačenie precipitácie karbidu počas bainitickej transformácie sa zdá byť pre TRIP ocele rozhodujúce. Kremík a hliník sa používajú na zabránenie precipitácie karbidov v oblasti bainitu.

Úroveň deformácie, pri ktorej sa zvyškový austenit začína transformovať na martenzit, je kontrolovaná obsahom uhlíka. Pri nižších obsahoch uhlíka sa zvyškový austenit začína transformovať takmer okamžite pri deformácii, čo zvyšuje rýchlosť deformačného spevnenia a tvárnosť pri lisovaní. Pri vyšších obsahoch uhlíka je zvyškový austenit stabilnejší a začína sa transformovať len pri úrovniach deformácie vyšších než je deformácia pri tvárnení. Pri týchto obsahoch uhlíka zvyškový austenit zostáva v konečnom výrobku. Transformuje sa na martenzit počas následnej deformácie, napríklad pri náraze automobilu. TRIP ocele preto môžu byť navrhnuté alebo prispôbené tak, aby poskytovali vynikajúcu tvárnosť pri výrobe zložitých dielov z AHSS alebo vykazovali vysoké deformačné spevnenie pri náraze a vynikajúcu absorpciu energie nárazu. Požiadavky na ďalšie legovanie TRIP ocelí degraduje ich zvariteľnosť pri bodovom odporovom zváraní. To možno sčasti riešiť úpravou používaných zvaracích postupov (napríklad pulzné alebo tavné zváranie).

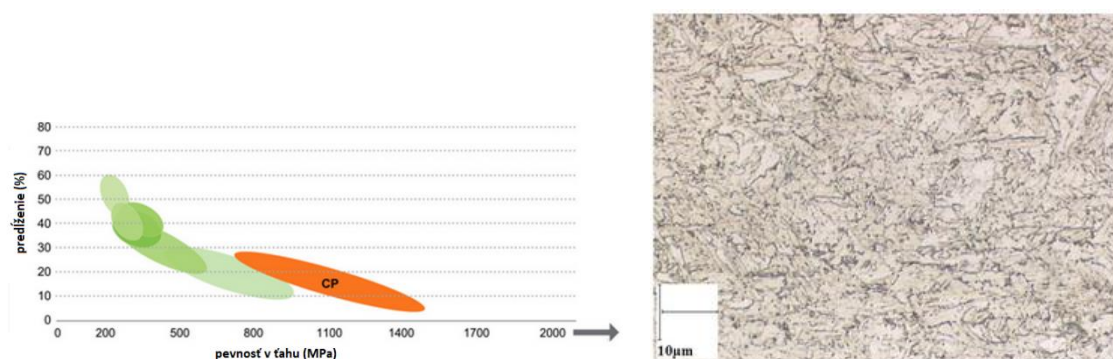
Na obr.3.52 sú ťahové diagramy TRIP a TWIP ocelí, kde TRIP ocele dosahujú vysoké napätie pri nízkej deformácii, TWIP ocele sa deformujú pri nízkom napätí, ale k porušeniu skúšobnej vzorky pri statickej skúške ťahom dôjde až po prekročení 90% deformácie.



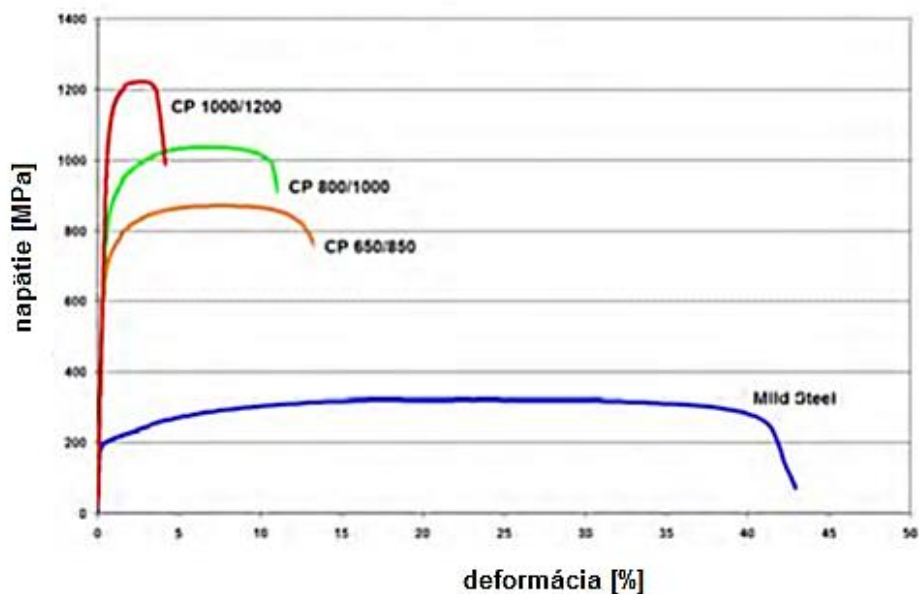
Obr.3.52 Priebeh diagramu pri statickej skúške ťahom pre TRIP a TWIP ocele

3.3.15.3 Viacfázové ocele (Complex Phase (CP) Steels)

CP ocele predstavujú prechod k oceliam s veľmi vysokou pevnosťou v ťahu. Mikroštruktúra CP ocelí obsahuje malé množstvo martenzitu, zvyškového austenitu a perlitu vo feritickej/bainitickej matici. Výrazné zjemnenie zrna je spôsobené spomalenou rekryštalizáciou alebo precipitáciou mikrolegujúcich prvkov ako je Ti alebo Nb. Obr.3.53 znázorňuje štruktúru zŕn za tepla valcovanej ocele CP 800/1000. V porovnaní s DP oceľami majú CP ocele výrazne vyššiu medzu klzu pri rovnakej pevnosti v ťahu 800 MPa a viac. CP ocele sa vyznačujú vysokou absorpciou energie, vysokou kapacitou reziduálnej deformácie a dobrou schopnosťou rozširovania otvorov. Konvenčné ťahové diagramy pre CP ocele sú uvedené na obr.3.54.



Obr.3.53 Mikroštruktúra za tepla valcovanej ocele CP 800/1000 a umiestnenie CP ocelí v diagrame tvárniteľnosti



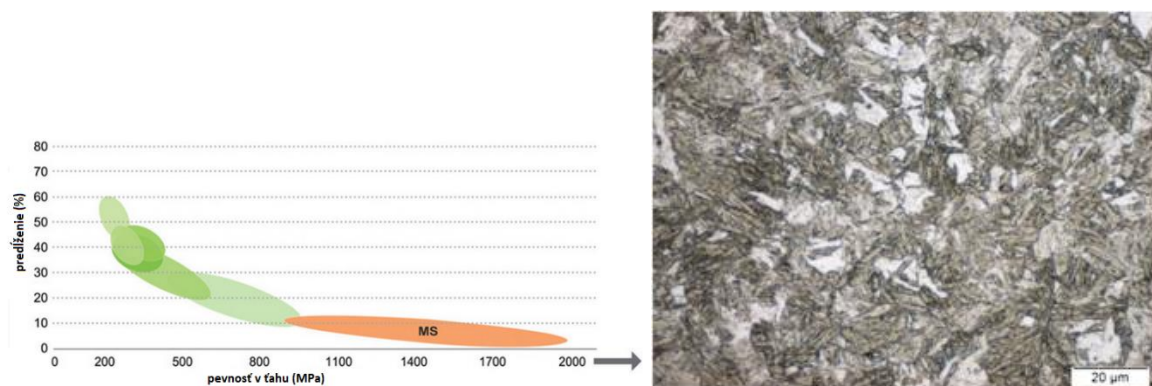
Obr.3.54 Konvenčné ťahové diagramy rôznych typov CP ocelí (hrúbka plechov: CP 650/850 1,5 mm; CP 800/1000 0,8 mm; CP 1000/1200 1,0 mm; nízkouhlíková oceľ 1,9 mm)

Viacfázové ocele sú súčasťou rodiny pokrokových vysokopevnostných ocelí (AHSS). Ocele so zložitou fázou získavajú svoju pevnosť vďaka extrémne jemnej zrnitosti a mikroštruktúre obsahujúcej malé množstvá martenzitu, perlitu a zvyškového austenitu zabudovaného do feriticko-bainitickej matrice. Vysoké zjemnenie zrna sa dosahuje mikro legujúcimi prvkami ako Nb, Ti alebo V alebo spomalenou rekryštalizáciou. Oceľ s komplexnou fázou sa vyrába ako valcovaná za tepla, tak aj za studena, ktorá môže byť kvôli ochrane proti korózii žiarovo pozinkovaná. Výrobky valcované za tepla sa vyrábajú vo väčších hrúbkach, ktoré sú potrebné na výrobu dielov konštrukčného typu. Chemické zloženie a mikroštruktúra CP ocelí je podobná ako u TRIP ocelí, s výnimkou pridania určitého množstva Nb, Ti alebo V. CP ocele majú vyššiu minimálnu medzu klzu v porovnaní s dvojfázovými oceľami so zhodnou pevnosťou v ťahu 800 MPa.

V porovnaní s DP oceľami majú CP ocele oveľa vyšší pomer medzi medzou klzu a pevnosťou v ťahu. CP ocele majú vysokú únavovú pevnosť, vysokú absorpciu energie, odolnosť proti opotrebovaniu a potenciál kalenia. Tepelné spracovanie za tepla valcovaných CP ocelí pri teplote 500 - 700 °C môže ďalej zvýšiť medzu klzu materiálu až o 100 MPa. Súčasná a vývojové CP ocele dosahujú pevnosť od 780 do 1470 MPa s celkovým predĺžením 5 - 30%. CP ocele majú vynikajúcu tvárnosť a sú vhodné na ťahanie, valcovanie, ohýbanie a rozširovanie otvorov. CP ocele vďaka svojej vysokej schopnosti absorbovať energiu počas kolízie sú obzvlášť vhodné na výrobu za studena tvarovaných dielov dôležitých pre nárazy automobilov pri súčasnom znížení hmotnosti. Využívajú sa na automobilové aplikácie v oblasti karosérie, podvozkov a podvozkových komponentov.

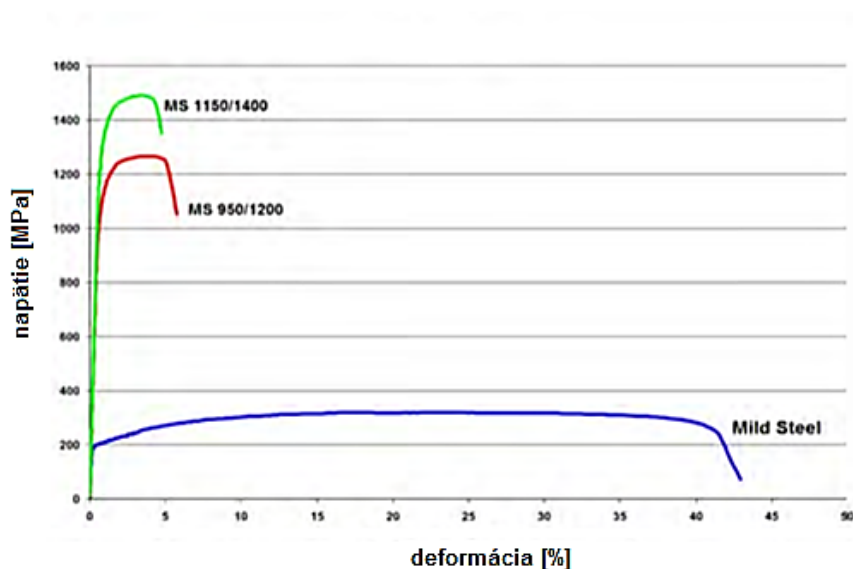
3.3.15.4 Martenzitické ocele (Martensitic (MS) Steel)

MS ocele vznikajú z austenitu, ktorý existuje počas valcovania za tepla alebo žihania, jeho takmer úplnou transformáciou na martenzit pri kalení na výstupe alebo v chladiacom úseku kontinuálnej žihacej linky. MS ocele sú charakterizované martenzitickou maticou obsahujúcou malé množstvá feritu a/alebo bainitu (obr.3.55).



Obr.3.55 Mikroštruktúra ocele MS 950/1200 a umiestnenie MS ocelí v diagrame tvárniteľnosti

V rámci skupiny viacfázových ocelí vykazujú MS ocele najvyššiu úroveň pevnosti v ťahu až 1700 MPa. Táto štruktúra môže tiež vzniknúť pri tepelnom spracovaní po tvárnení. MS ocele sa často popúšťajú po kalení kvôli zlepšeniu ťažnosti a majú primeranú tvárnitosť aj pri extrémne vysokých pevnostiach. Konvenčné ťahové diagramy pre MS ocele sú uvedené na obr.3.56.

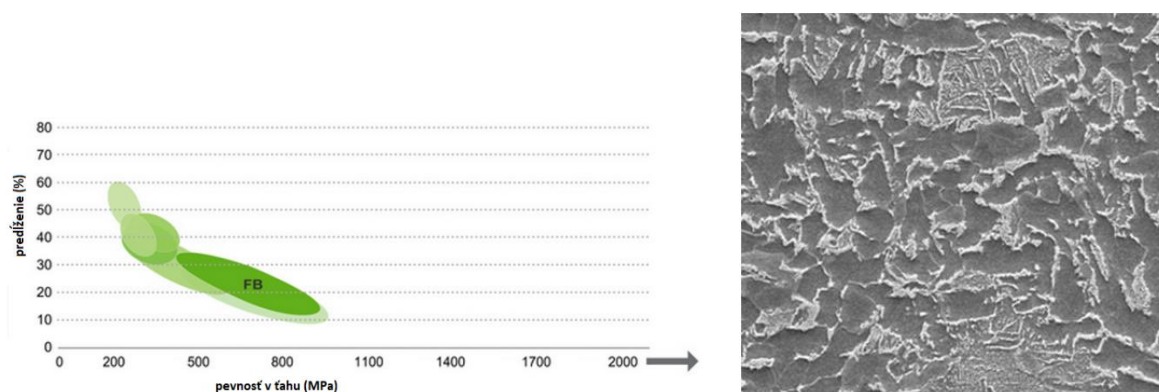


Obr.3.56 Konvenčné ťahové diagramy rôznych typov MS ocelí (hrúbka materiálov 1,8-2,00 mm)

Pridávanie uhlíka do MS ocelí zvyšuje prekaliteľnosť a spevňuje martenzit. Mn, Si, Cr, Mo, B, V a Ni sa tiež používajú v rôznych kombináciách na zvýšenie prekaliteľnosti. MS ocele sa vyrábajú z austenitickej fázy rýchlym ochladením, aby sa premenila väčšina austenitu na martenzit.

3.3.15.5 Feriticko-bainitické ocele (Ferritic-Bainitic (FB) Steel)

FB ocele sa niekedy používajú na zabezpečenie špecifických požiadaviek zákazníckych aplikácií, ktoré vyžadujú schopnosť vypínania a rozširovania otvorov. FB ocele majú mikroštruktúru jemného feritu a bainitu. Spevnenie sa dosahuje zjemňovaním zrna, ako aj sekundárnou fázou s bainitom. Obr.3.57 znázorňuje mikroštruktúru ocele FB 450/600.



Obr.3.57 Mikroštruktúra ocele FB 450/600 a umiestnenie FB ocelí v diagrame tvárniteľnosti

FB ocele sú dostupné ako polotovary valcované za tepla. Hlavnou výhodou ocelí FB oproti oceliam HSLA a DP je zlepšená tvárniteľnosť pri ohraňovaní meraná testom rozširovania otvorov (λ). V porovnaní s HSLA ocelami s rovnakou pevnosťou, aj FB ocele majú vyšší exponent deformačného spevnenia (n) a vyššie celkové predĺženie. Vďaka svojej dobrej zvariteľnosti sa FB ocele používajú pre prístrihy na mieru (tailored blank applications). Tieto ocele sa vyznačujú dobrou absorpciou nárazu a dobrými únavovými vlastnosťami.

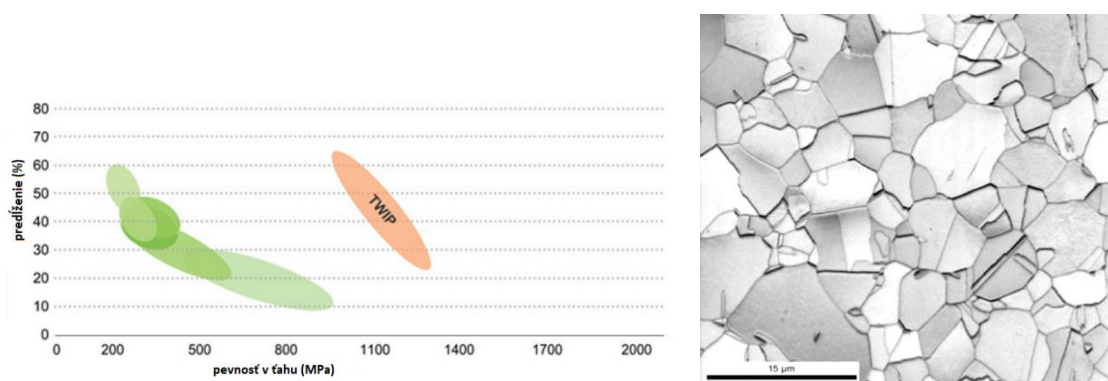
3.3.15.6 Ocele s dvojčatením indukovanou plasticitou (TWIP-Twinning-Induced Plasticity)

TWIP ocele majú vysoký obsah Mn (17-24%), vďaka ktorému je oceľ plne austenitická pri izbovej teplote. Veľký podiel deformácie je riadený tvorbou deformačných dvojčiat. Tento režim deformácie viedol k pomenovaniu tejto triedy ocelí. Dvojčatenie vedie k vysokej hodnote okamžitého deformačného spevnenia (n), keďže mikroštruktúra sa postupne zjemňuje. Výsledné hranice dvojčiat pôsobia ako hranice zŕn a spevňujú oceľ. Na obr.3.58 je žíhaná mikroštruktúra TWIP ocele.

Viacfázové ocele s dvojčatením indukovanou plasticitou (TWIP), ktoré obsahujú 17-20% mangánu, odvodzujú svoje výnimočné vlastnosti od špecifického mechanizmu spevnenia: twinningu. Ocele sú plne austenitické, nemagnetické, bez fázovej premeny. Tvorba

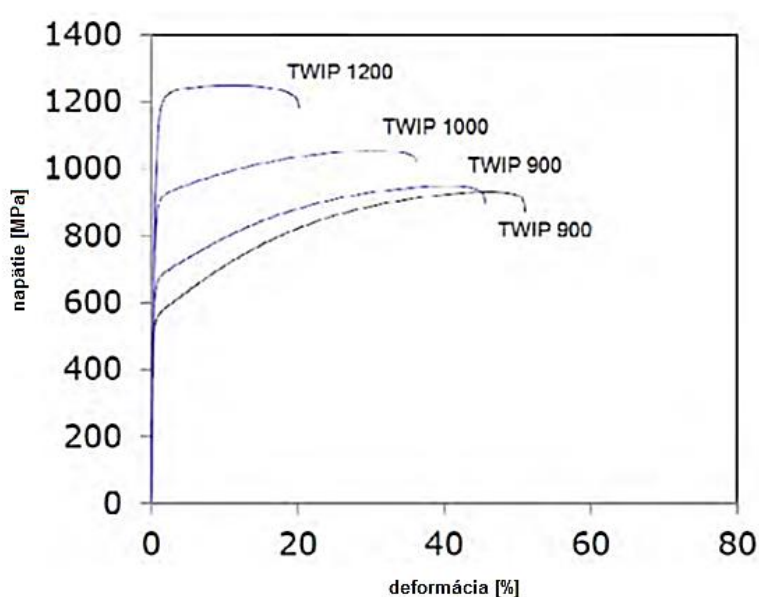
mechanických dvojčiat počas deformácie vedie k vysokému deformačnému spevneniu, ktoré bráni tvorbe zúženia a tým k udržaniu veľmi vysokej deformačnej kapacity.

Je známe, že vlastnosti ocelí sú určené ich kryštalickou štruktúrou na úrovni kryštalickej mriežky, čo je priestorové usporiadanie ich atómov. Pridanie legujúcich prvkov zvyšuje pravdepodobnosť vzniku určitých štruktúr, čo umožňuje zmenu vlastností ocele. Z termodynamických výpočtov sa dospelo k záveru, že na vývoj novej ľahkej konštrukčnej ocele by bola pravdepodobne vhodná kombinácia mangánu, kremíka a hliníka. Tieto prvky sú ľahšie ako železo a nútia kryštálovú mriežku do určitého usporiadania: železo môže kryštalizovať a prekryštalizovať v rôznych kryštálových mriežkach.



Obr.3.58 Mikroštruktúra TWIP ocele v žíhanom stave a umiestnenie TWIP ocelí v diagrame tvárniteľnosti

TWIP ocele majú extrémne vysokú pevnosť a súčasne extrémne vysokú ťažnosť. Hodnota n narastá až na hodnotu 0,4 pri deformácii približne 30% a potom ostáva konštantná až kým homogénna a celková deformácia nedosiahne hodnotu 50%. Pevnosť v ťahu presahuje 1000 MPa. Konvenčné ťahové diagramy pre TWIP ocele sú uvedené na obr.3.59.



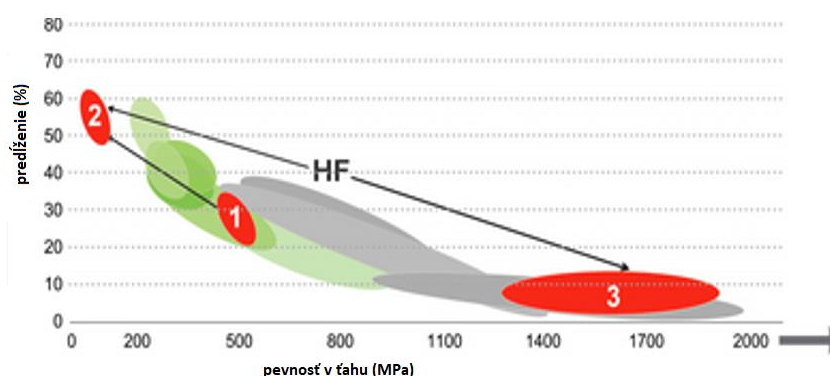
Obr.3.59 Konvenčné ťahové diagramy TWIP ocelí

3.3.15.7 Za tepla tvárnené ocele (Hot-Formed (HF) Steel)

Využívanie kaliteľných ocelí je sľubnou alternatívou pre výrobu súčiastok zložitých tvarov bez odpruženia. Ocele na tvárnenie za tepla na báze bóru (obsah B 0,001-0,005%) sa používali od roku 1990 pre konštrukciu karosérií. Pri tvárnení sa musí udržiavať minimálna teplota 850°C (austenitizácia), nasleduje ochladenie rýchlosťou viac ako 50°C/s na zabezpečenie požadovaných mechanických vlastností. V súčasnosti sa používajú dva typy tvárnenia za tepla s následným kalením:

- priame tvárnenie za tepla,
- nepriame tvárnenie za tepla.

Pri priamom tvárnení za tepla sa celá deformácia realizuje pri vysokej teplote v oblasti austenitu a po tvárnení nasleduje kalenie. Pri nepriamom procese sa dielec lisuje pri izbovej teplote na takmer finálny tvar, nasleduje ohrev a dolisovanie pri vysokej teplote a kalenie. Konečná mikroštruktúra HF ocele sa podobá na martenzit. Ťahový diagram po kalení sa podobá ťahovému diagramu martenzitickej (MS) ocele. Umiestnenie HF ocelí v diagrame tvárniteľnosti je na obr.3.60.



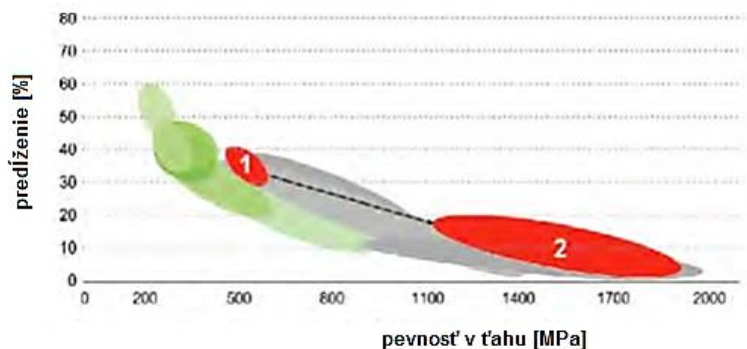
Obr.3.60 Umiestnenie HF ocelí v diagrame tvárniteľnosti

3.3.15.8 Ocele tepelne spracované po tvárnení (PFHT)

Tepelné spracovanie po tvárnení je všeobecnou metódou vývoja alternatívnych ocelí s vyššou pevnosťou. Hlavným problémom, ktorý bráni rozsiahlemu využívaniu HSS, je zmena geometrie dielov počas a po tepelnom spracovaní. Riešením môže byť upnutie dielca a následný ohrev (v peci alebo indukčne) a okamžité ochladenie. Okrem toho výlisok sa vytvorí pri nižšej pevnosti (oblasť 1) a potom sa pevnosť zvýši tepelným spracovaním (oblasť 2), obr.3.61.

Ďalším procesom je kalenie legovaných ocelí na vzduchu, ktoré majú veľmi dobrú tvárniteľnosť v mäkkom stave (hlbokotažné vlastnosti) a vysokú pevnosť po tepelnom spracovaní (kalenie na vzduchu). Okrem priameho použitia vo forme plechov sú vhodné na

výrobu zváraných rúr. Tieto rúry sú vynikajúce pre hydroforming. Treťou možnosťou je kalenie v zápustke. V tejto verzii nepriameho tvárnenia za tepla sa zrealizuje tvárnenie dielca pri izbovej teplote, nasleduje ohrev dielca na teplotu 850-900°C a potom nasleduje intenzívne ochladenie dielca v chladenej zápustke na martenzit.



Obr.3.61 Umiestnenie PFHT ocelí v diagrame tvárniteľnosti

3.3.15.9 Špeciálne spracované ocele

Mikroštruktúra DP, TRIP a iných AHSS obsahuje ostrovčeky alebo častice rôznych fáz. Jedným z príkladov sú martenzitické ostrovčeky. Pri tvárnení ocelí tieto častice spôsobujú lokalizáciu napätia pri ohraňovaní, pri ohýbaní s vypínaním s malými rádiusmi alebo iných deformačných režimoch, pri ktorých sa môže napätie lokalizovať a vytvoria sa napäťové špičky. Tieto ocele sa potom porušujú pri deformáciách nižších ako predpokladáme na základe vlastností. Oceliarske spoločnosti realizujú rozsiahly výskum zameraný na vývoj špecializovaných ocelí, ktoré minimalizujú negatívny vplyv týchto fáz alebo častíc.

3.3.15.10 Vývojové typy ocelí - Advanced High-Strength Steel (AHSS)

V reakcii na dopyt automobilového priemyslu pre ďalšie využitie možností AHSS, výskumné laboratória v oceliarskom priemysle a akademické inštitúcie naďalej hľadajú nové typy ocelí alebo modifikácie existujúcich typov. Cieľom primárneho výskumu je zlepšenie tvárniteľnosti pre daný rozsah pevnosti a zároveň zníženie nákladov a problémov so zvariteľnosťou spojených s oceľami s vysokým percentom austenitu. Ďalšími príkladmi týchto vyvíjaných sa ocelí sú ocele s ultrajemným (nano) zrnom, nízkou mernou hmotnosťou a vysokým Youngovým modulom pružnosti.

TPN - trojfázová oceľ s nanoprecipitáciou

Nová skupina vysoko výkonných ocelí na tvárnenie za studena sa skladá z feritickej matrice obsahujúcej bainit, zvyškového austenitu a nano-precipitátov. Počas tvárnenia sa zvyškový austenit mení do značnej miery na martenzit. Táto deformačne indukovaná transformácia má pozitívny vplyv na spevňovanie materiálu, a tvorí dobrú kombináciu vysokej tvárniteľnosti a vysokej pevnosti. Vďaka svojej vysokej odolnosti voči miestnemu stenčovaniu

je možné z týchto akostí vyrábať komponenty takého tvaru, ktorý by bolo veľmi obtiažne vyrobiť z iných vysokopevných ocelí z rovnakej pevnostnej triedy.

Pre automobilové aplikácie sa vyrábajú nasledujúce akosti nanoprecipitačných ocelí:
TPN 680/780: HR660Y760T-TP B-stĺpik, priečny nosník, pozdĺžne členy, výstuž bočných panelov
TPN 750/900: HR730Y880T-TP B-stĺpik, priečny nosník, pozdĺžne členy, nárazník, výstuž bočných panelov.

3.3.15.11 Konvenčné oceľové plechy pre automobilový priemysel

- *Nízkouhlíkové ocele*

Majú v podstate feritickú mikroštruktúru. Príkladom nízkouhlíkových ocelí sú ocele ťažnej akosti (DQ) a hliníkom upokojené akosti (AKDQ) a často slúžia ako referenčné materiály pre svoje široké použitie a veľký objem výroby v ostatných dekádach.

- *Ocele bez interstícií (IF) – s nízkou (LS) a vysokou (HS) pevnosťou*

IF ocele majú veľmi nízky obsah uhlíka, aby sa zabezpečila nízka medza klzu a vysoký exponent deformačného spevnenia (n). Tieto ocele majú vyššiu tvárnosť ako nízkouhlíkové ocele. IF-HS akosti využívajú kombináciu prvkov pre spevnenie tuhým roztokom, precipitáciu karbidov a/alebo nitridov a zjemnenie zrna. Ďalším bežným prídávaným prvkom na zvýšenie pevnosti je P (tiež spevňuje tuhým roztokom). Akosti IF ocelí s vyššou pevnosťou sa používajú na konštrukčné a uzatváracie aplikácie.

- *Ocele vytvrdzované pri vypaľovaní laku (BH)*

BH ocele majú základnú feritickú mikroštruktúru a sú spevňované tuhým roztokom. Unikátnou charakteristikou týchto ocelí je ich chemické zloženie a spracovanie, ktoré je navrhnuté tak, aby sa pri spracovaní ocele uhlík udržal v tuhom roztoku a neskôr, počas vypaľovania laku alebo počas niekoľkých týždňov pri izbovej teplote sa uhlík vylúči z tuého roztoku. Dochádza k nárastu medze klzu výlisku, čím vzrastá odolnosť proti preliačeniu bez zníženia tvárnosti. Typickou aplikáciou sú vonkajšie časti karosérie, kde sa vyžaduje zvýšená odolnosť voči preliačeniu.

- *Uhlíkovo-mangánové (CM) ocele*

Vysoká pevnosť CM ocelí sa dosahuje spevnením tuhým roztokom.

- *Mikrolegované (HSLA) ocele*

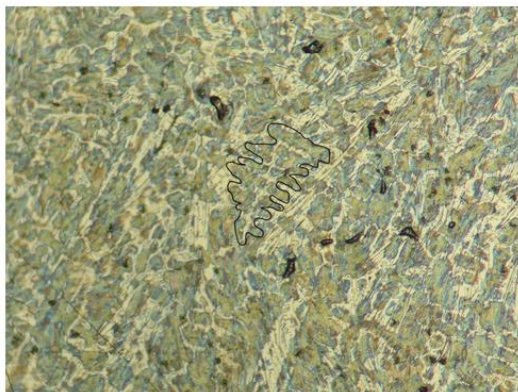
Pevnosť HSLA ocelí narastá primárne pôsobením mikrolegujúcich prvkov prispievajúcich k jemnej precipitácii karbidov, substitučným a intersticiálnym spevnením a zjemnením zrna. Používajú sa na mnohé vonkajšie i vnútorné diely karosérie, kde je potrebná vysoká pevnosť na zvýšenie prevádzkovej únosnosti.

3.4 LIATINY

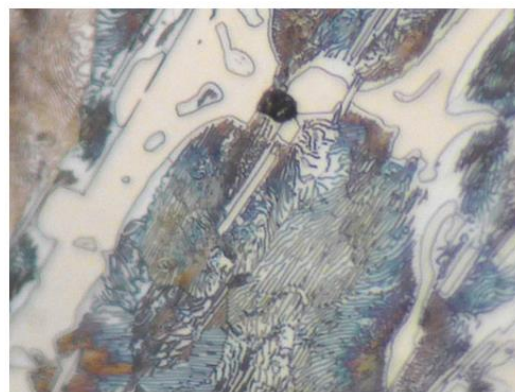
Liatiny sú zliatiny železa s uhlíkom, kremíkom, mangánom a ďalšími prvkami, v ktorých obsah uhlíka je minimálne 2,14 %C. Liatina sa vyrába roztavením surovín (surové železo, liatinové zlomky, liatinový vratný materiál, prípadne oceľový odpad a ďalšie prísady) v kuplovej peci alebo elektrickej indukčnej, prípadne oblúčkovej peci.

Z rovnovážneho diagramu železo-uhlík (kap. 3.1) vyplýva, že podľa chemického zloženia a podmienok tuhnutia vzniká v liatinách buď cementitické eutektikum - ledeburit, alebo grafitové eutektikum. Podľa vylúčeného typu eutektika rozlišujeme: bielo tuhnúce liatiny (biela liatina, temperovaná liatina a tvrdená liatina), ktoré majú aj biely lom; druhou skupinou sú grafitické liatiny (s lupienkovým, guľôčkovým alebo červíkovitým grafitom), ktoré majú sivý lom. Pre určité účely použitia sa vyrábajú aj legované druhy liatin.

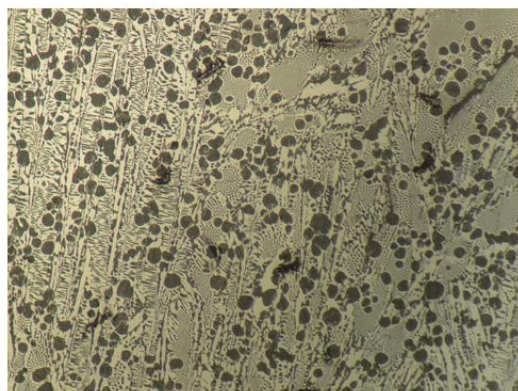
Grafitické liatiny (najmä liatina s lupienkovým grafitom) patria do skupiny najstarších konštrukčných materiálov. Neobsahujú voľný cementit a majú všetok uhlík alebo jeho prevažnú časť vylúčenú ako grafit. Tieto zliatiny majú v porovnaní s oceľou mnohé prednosti: o cca 8 % nižšiumernú hmotnosť, lepšiu obrobiteľnosť a trecie vlastnosti, schopnosť tlmíť chvenie, menšiu citlivosť na vruby a i. U liatin s výhodnejšími tvarmi grafitu (guľôčkový, vločkový) sa dajú dosiahnuť mechanické vlastností porovnateľné s oceľou a pritom zachovať ich špecifické vlastnosti. Štruktúru, obr.3.62 – 3.63, ako aj mechanické vlastnosti môžeme u týchto liatin ovplyvňovať rovnako ako u ocelí voľbou vhodného tepelného spracovania.



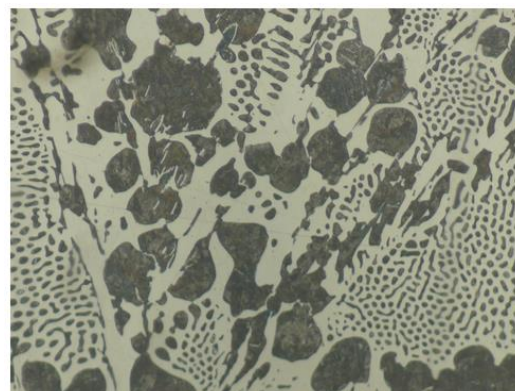
a)



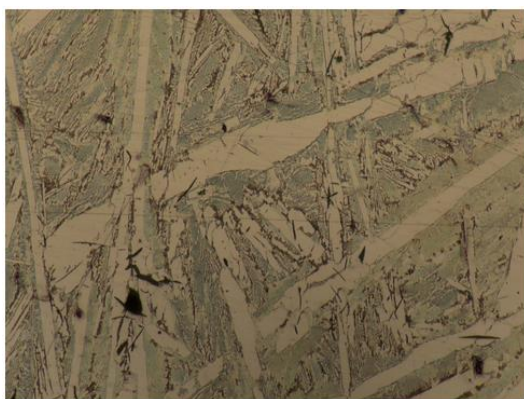
b)



c)



d)



e)

Obr.3.62

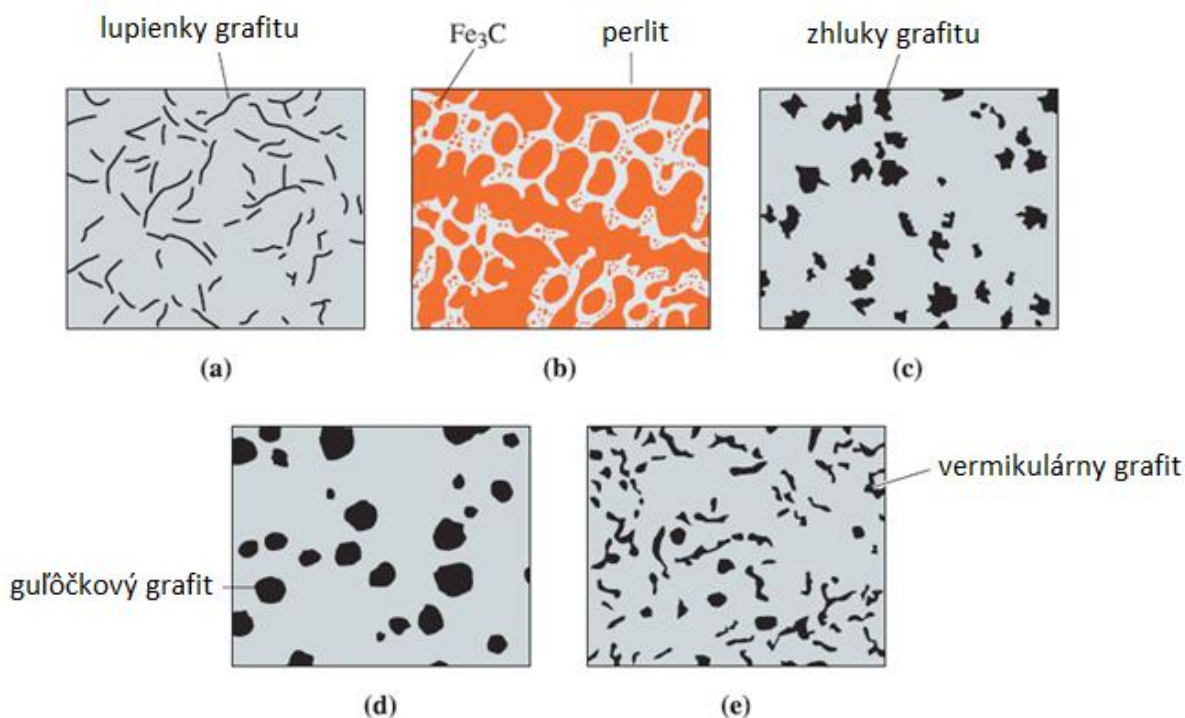
a-b) Mikroštruktúra podeutektickej bielej liatiny (2,7% C);

c-d) Mikroštruktúra podeutektickej bielej liatiny (3,85% C);

e) Mikroštruktúra nadeutektickej bielej liatiny (5,5%)

Rozhodujúci vplyv na vylučovanie grafitu má obsah uhlíka a kremíka. Pri obsahu 3 %C a 4 %Si sa všetok C vylúči vo forme grafitu a výsledná štruktúra bude feriticko – grafitická. Pri obsahu 3 %C a 2 %Si sa časť uhlíka rozpusteného v austenite, vylúči pri eutektoidnej reakcii vo forme cementitu (ako súčasť perlitu) a výsledná štruktúra bude tvorená perlitom a grafitom.

Druhým faktorom, ktorý výrazne ovplyvňuje štruktúru liatin, je rýchlosť ochladzovania, ktorá rozhoduje o difúzných podmienkach. So zvyšujúcou rýchlosťou ochladzovania sa potláčajú difúzne procesy. To znamená že pri obsahu 3 %C a 3 %Si môže vzniknúť v závislosti od rýchlosti ochladzovania rôzna matica grafitickej liatiny a to od feriticko – grafitickej až po ledeburitickú liatinu.



Obr.3.63 Schematické znázornenie piatich typov liatiny: a) sivá liatina (lupienkový grafit), b) biela liatina (perlit a eutektický cementit), c) temperovaná liatina d) tvárna liatina (guľôčkový grafit, e) vermikulárne grafit

3.4.1 Biela liatina

Biela liatina odpovedá svojou štruktúrou metastabilnej rovnováhy sústavy Fe - Fe₃C.

Je tvorená zmesou eutektického a sekundárneho cementitu a perlitu (obr.3.50) a má preto biely lom. Vznik tejto štruktúrnej zmesi je podporovaný zvýšeným obsahom karbidotvorných prvkov v liatine (Mn, Cr) a vyššou rýchlosťou tuhnutia. Tvrdosť bielej liatiny ovplyvňuje najmä obsah cementitu v štruktúre a pohybuje sa medzi 350 až 500 HBS. Dá sa zvýšiť martenzitickým kalením. Vyrábajú sa z nej tvarovo jednoduché odliatky s vysokou odolnosťou proti opotrebeniu (lopatky pieskometov, mlecie platne, gule a pod.). Podeutektická biela liatina je východiskom pri výrobe temperovanej liatiny.

3.4.2 Grafitické liatiny

Štruktúra grafitických liatin je tvorená grafitom a základnou kovovou hmotou (matricou). Na vlastnosti liatin má rozhodujúci vplyv tvar, veľkosť, obsah a spôsob rozloženia grafitu a druh matrice (perlit, ferit, cementit, prípadné ďalšie produkty transformácie austenitu) a fosfidické eutektikum – *steadit*.

Základné tvary grafitu v grafitických liatinách podľa normy STN EN 1560 sú lupienkový, guľôčkový, pavúčkovitý a červíkovitý. Grafitové častice oslabujú štruktúru a porušujú kontinuitu základnej kovovej hmoty. Pri namáhaní odliatku dochádza k vzniku miestnych koncentrácií napätí v oblasti grafitu a jeho hodnoty môžu 10 až 20 x prevýšiť menovité napätia. Najsilnejší vrubový účinok má v štruktúre vylúčenie grafitu v tvare hrubých lupienkov. Priaznivejšími tvarmi z hľadiska koncentrácií napätí a porušovania celistvosti matrice liatin sú guľôčky v liatine s guľôčkovým grafitom alebo vločky grafitu v temperovaných liatinách.

Výslednú štruktúru matrice liatin po odliati tvorí perlit, ferit alebo ich zmes a ďalšie štruktúrne zložky (*steadit*, inklúzie). Perlit je najčastejšie lamelárny a s jeho rastúcim množstvom sa zvyšuje tvrdosť, pevnosť a odolnosť proti opotrebeniu, avšak klesá húževnatosť a plasticita. Naopak vyšší podiel feritu v štruktúre najmä u liatin s guľôčkovým grafitom vedie k zvýšeniu ťažnosti a húževnatosti.

3.4.2.1 Liatina s lupienkovým grafitom STN EN 1561

Podľa normy je táto liatina definovaná ako zliatina železa a uhlíka na odliatky, v ktorej je voľný uhlík prítomný ako grafit prevažne v tvare lamelárnych častíc - lupienkov. Je to pomerne lacný konštrukčný materiál s dobrými zlievarenskými vlastnosťami. Pretože lupienky grafitu vytvárajú v základnej kovovej hmote liatiny veľké množstvo vrubov, znižujú mechanické vlastnosti. Deformačné charakteristiky sú minimálne, ťažnosť týchto liatin je menšia ako 1 %.

Podľa štruktúry základnej kovovej hmoty môžeme liatiny s lupienkovým grafitom (sivé liatiny) rozdeliť na:

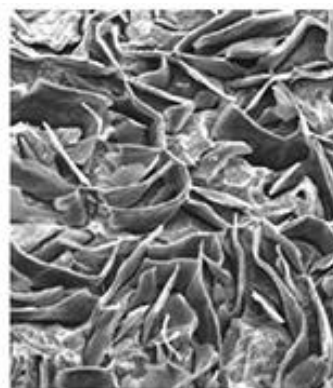
➤ **Perlitické liatiny** – v základnej perlitickej hmote sú uložené lupienky grafitu, obr.3.64. Vzniká ak je obsah grafitických prísad v súlade s rýchlosťou ochladzovania. Je to dobrý konštrukčný materiál, preto väčšina odliatkov sa zhotovuje z tejto liatiny.

➤ **Perliticko-feritické** – väčšina základu je tvorená perlitom, ferit je hlavne vo forme ostrovčekov, grafit je uložený aj v perlite aj vo ferite (obr.3.65). Je to liatina mäkkšia, menej pevná ako perlitická. Prítomnosť feritu v liatine znižuje pnúť a znižuje tak nebezpečie praskania, čo je potrebná napr. u valcov, kokíl.

➤ **Feritické** – všetok uhlík je vylúčený vo forme hrubých lupienkov grafitu. Vzniká pri pomalom ochladzovaní alebo vysokom obsahu grafitizačných prísad (hlavne Si). Liatiny tohto druhu sú mäkké, málo pevné a preto málo používané. Majú však najlepšie tlmiace vlastnosti. Liatiny s lupienkovým grafitom sú v prevažnej miere podeutektické zliatiny o základnom chemickom zložení: 2,8 až 3,6 %C, 1,7 až 2,4 %Si, 0,5 až 1,0 %Mn, 0,2 až 0,5 %P, max. 0,15 %S a prípadne s ďalšími legujúcimi prvkami (Cr, Cu, Mo, Ni, a iné).



a)



b)

Obr.3.64 Mikroštruktúra perlitickej liatiny s lupienkovým grafitom

Obr.3.65 Mikroštruktúra perliticko feritickej liatiny s lupienkovým grafitom

V tabuľke 3.29 sú uvedené vlastnosti liatin s lupienkovým grafitom. Príklady použitia liatin s lupienkovým grafitom sú uvedené v tab.3.30.

Tabuľka 3.29 Mechanické vlastnosti liatin s lupienkovým grafitom

značkou podľa STN EN	Označenie liatiny		R _m [MPa]	Tvrdosť HBS 30		Štruktúra matrice
	číselne podľa STN			min.	max.	
EN-GJL-100	EN-JL1010	42 2410	100 - 200			ferit + (perlit)
EN-GJL-HB155	EN-JL2010				155	
EN-GJL-150	EN-JL1020	42 2415	150 - 250			ferit + (perlit)
EN-GJL-HB175	EN-JL2020			100	175	
EN-GJL-200	EN-JL1030	42 2420	200 - 300			perlit + ferit
EN-GJL-HB195	EN-JL2030			120	195	
EN-GJL-250	EN-JL1040	42 2425	250 - 350			perlit + (ferit)

EN-GJL-HB215	EN-JL2040		145	215	
EN-GJL-300	EN-JL1050	42 2430	300 - 400		perlit
EN-GJL-HB235	EN-JL2050		165	235	
EN-GJL-350	EN-JL1060	42 2435	300 - 400		perlit
EN-GJL-HB255	EN-JL2060		185	255	

Tabuľka 3.30 Príklady použitia liatin s lupienkovým grafitom

Označenie liatiny	Hrúbka steny [mm]	Použitie odliatku
EN-GJL-100 42 2410	4 – 15	časti pecí, skrine rozvádzačov, sanitárne a smaltované výrobky
EN-GJL-150 42 2415	5 – 30	na vodovodné tvarovky, smaltované výrobky, súčasti textilných a poľnohospodárskych strojov, časti motorov, veká, remenice
EN-GJL-200 42 2420	8 – 45	na strojné odliatky, armatúry, časti motorov, turbín, piestových strojov, valce kompresorov a motorov
EN-GJL-250 42 2425	15 – 70	valce motorov, súčasti turbín, ozubené kolesa, značne namáhané strojné súčiastky, stojany obrábacích strojov
EN-GJL-300 42 2430	25 – 100	značne namáhané strojné odliatky, stojany ťažkých obrábacích strojov, špeciálne odliatky, armatúry
EN-GJL-350 42 2435	40 – 150 a viac	ťažké, vysoko namáhané odliatky jednoduchých tvarov, stojany ťažkých obrábacích strojov, telesá čerpadiel

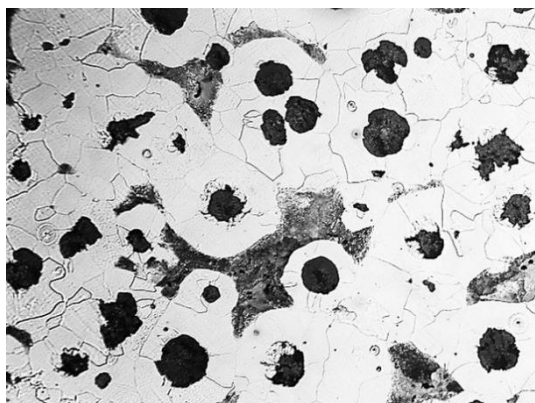
3.4.2.2 Liatina s guľôčkovým grafitom STN EN 1563

Liatina s guľôčkovým grafitom (tvárna liatina) má uhlík prítomný prevažne v tvare častíc guľôčkového (globulárneho) grafitu. V porovnaní s liatinou s lupienkovým grafitom má výrazne lepšie mechanické vlastnosti, podstatne vyššiu pevnosť, ale tiež aj vysokú ťažnosť a húževnatosť. Chemické zloženie liatin s guľôčkovým grafitom odpovedá väčšinou eutektickej koncentrácií a pohybuje sa v týchto hodnotách: 3,2 až 4,0 %C, 1,8 až 3,0 %Si, 0,2 až 0,8 %Mn, max. 0,1 %P, max. 0,05 %S, 0,04 až 0,08 %Mg. Guľôčkový tvar sa dosahuje pridaním takej látky do tekutého kovu pred odliatím, ktorá ovplyvňuje rast zárodkov grafitu. Táto technologická operácia sa nazýva modifikovanie. Ako modifikátor sa používa horčík, v súčasnosti najčastejšie vo forme zliatin Fe-Si-Mg (3-10 %Mg).

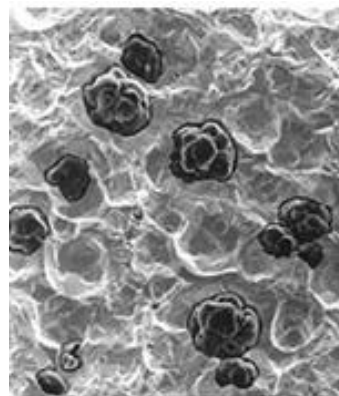
Liatina s feritickou matricou (obr.3.66) sa vyznačuje relatívne vysokými deformačnými charakteristikami (ťažnosť až 25 %), húževnatosťou a dobrou obrobitelnosťou. Feritická štruktúra sa docieľuje zvýšeným obsahom kremíka, pri nízkom obsahu mangánu (pod 0,4 %). Vyššie pevnosti dosahujú liatiny s perlitickou matricou (obr.3.67). Tvorbu perlitu podporujú prísady Mn (nad 0,4 %) a najmä Cu.

Liatina s guľôčkovým grafitom je vysoko akostný materiál, ktorý spája prednosti ocele na odliatky s prednosťami liatiny s lupienkovým grafitom. Hodnoty medze klzu a ťažnosti spojené s vysokou pevnosťou v ťahu sú porovnateľné s oceľou, tab.3.31. Zachováva si v značnej miere mnohé vlastnosti liatiny s lupienkovým grafitom - väčšiu schopnosť útlmu,

menšiu vrubovú citlivosť, lepšiu zlievateľnosť, trecie vlastnosti a mimoriadne dobrú obrobiteľnosť.



Obr 3.66 Mikroštruktúra feritickej liatiny s guľôčkovým grafitom



Obr.3.67 Mikroštruktúra tvárnej liatiny

Tabuľka 3.31 Mechanické vlastnosti liatin s grafitom guľôčkovým

Označenie liatiny			R_m	$R_{p0,2}$	Ťažnosť	Štruktúra
značkou	číselne		(min.)	(min.)	(min.)	matrice
podľa STN EN		podľa STN	[MPa]	[MPa]	[%]	
EN-GJS-350-22	EN-JS1010		350	220	22	ferit
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	42 2314	400	240	18	ferit
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	42 2303	400	250	18	ferit
EN-GJS-450-10	EN-JS1040		450	310	10	F +P
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	42 2305	500	320	7	F +P
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	42 2306	600	370	3	F +P
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	42 2307	700	420	2	perlit
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	42 2308	800	480	2	perlit
EN-GJS-900-2	EN-JS1090		900	600	2	perlit

LT – liatina na odliatky pracujúca pri nižších teplotách

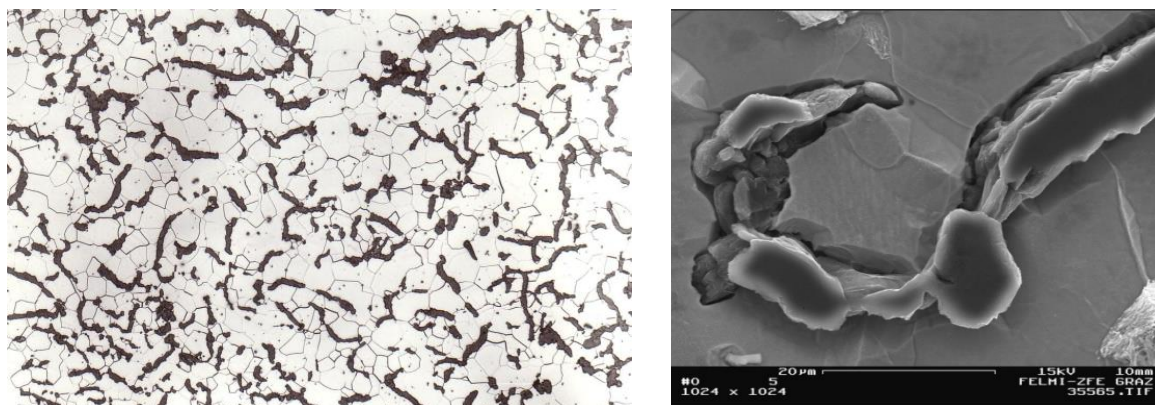
Príklady použitia týchto liatin: prevodové a ložiskové skrine, súčiastky cestných vozidiel a poľnohospodárskych strojov, telesa armatúr, súčiastky namáhané mechanický a oterom ako sú kľukové a vačkové hriadele, ozubené kolesa, valce, piesty, piestne krúžky, brzdové bubny, obežné a rozvádzacie kolesa čerpadiel a pod.

3.4.2.3 Liatina s červíkovitým (vermikulárnym) grafitom

Liatina s vermikulárnym grafitom má červíkovitú podobu grafitu, obr.3.68. Tavenina sa spracuje buď modifikačnou prísadou, vyvolávajúcou vznik guľôčkového grafitu, iba v takom množstve, ktoré nie je dostatočné pre jeho úplné vytvorenie, alebo sa do liatiny pridá počas modifikácie horčíkom prvok, ktorý bráni vzniku guľôčkového grafitu, napr. titan. Najjednoduchšou metódou je pridanie kovu vzácnych zemín (v podobe zmesného kovu).

Liatina s vermikulárnym grafitom má lepšie pevnostné vlastnosti a mierne vyššiu tepelnú vodivosť v porovnaní s liatinami s lupienkovým grafitom. Preto sú liatiny s červikovitým tvarom grafitu vhodné pre tepelne namáhané odliatky, ako sú oceliarské kokily, bloky valcov, hlavy valcov a časti brzd vozidiel.

Nelegovaná liatina s vermikulárnym grafitom má v liatom stave prevažne feritickú základnú štruktúru s nasledujúcimi mechanickými vlastnosťami; pevnosť $R_m = 320 - 380$ MPa, medza klzu $R_{p0.2} = 260$ do 300 MPa, ťažnosť od 3 do 8% a tvrdosť $135 - 170$ HBS. Liatina s prevažne perlitickou maticou má pevnosť minimálne 400 MPa, pri ťažnosti $1 - 2\%$ a tvrdosť 190 až 280 HBS.



Obr.3.68 Feriticko-perlitická liatina s červikovitým grafitom

3.4.2.4 Liatina s vločkovým grafitom – temperovaná liatina STN EN 1562

Liatina s vločkovým grafitom sa získava z bielej liatiny. Celý uhlík je viazaný vo forme karbidu železa Fe_3C . Svoje charakteristické vlastnosti (dobrú húževnatosť a obrobiteľnosť) získava následným tepelným spracovaním - temperovaním. To vedie k vylúčeniu temperovaného uhlíka v tvare vločiek, ktorý má kompaktnejší tvar a v základnej kovovej hmote menší vrubový účinok. Z tohto dôvodu sa temperovaná liatina používa prevažne na konštrukčné súčasti, ktoré sú vystavené dynamickému namáhaniu (vibračnému alebo rázovému zaťaženiu) a musia odolávať veľkým silám.

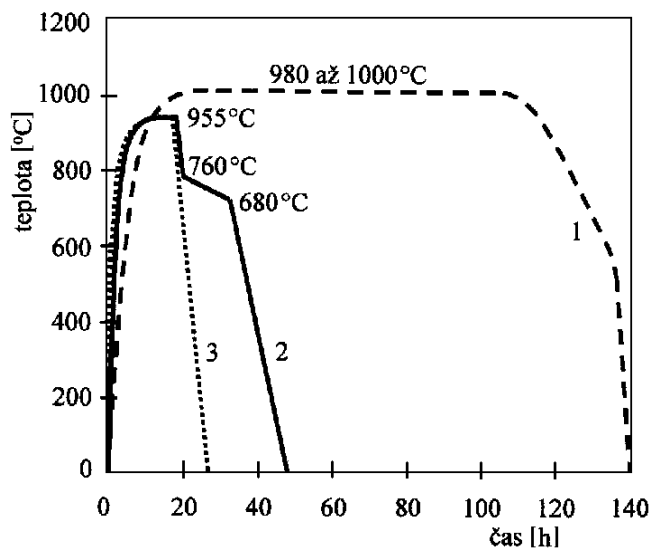
Diagramy temperovania sú zobrazené na obr.3.69.

Temperovanie spočíva v žíhaní (dlhotrvajúci ohrev pri teplotách $950 - 1050^{\circ}C$ po dobu cca 100 hodín) odliatkov z bielej liatiny za účelom rozloženia eutektických karbidov v ledeburite na voľný temperovaný grafit. Rozlišujeme v podstate dva postupy a to temperovanie v oduhličujúcom a neoduhličujúcom prostredí, ktorými vznikajú určité rozdiely vo výslednej štruktúre. Oba druhy liatin sa líšia hlavne svojím chemickým zložením, v prvom rade rozdielnym obsahom uhlíka a kremíka:

1. *Temperovaná liatina s bielym lomom* má nasledujúce orientačné zloženie: 3,0 - 3,4 %C, 0,8 - 0,4 %Si, 0,40 - 0,60 %Mn, max. 0,1 %P a 0,12 - 0,25 %S (obr.3.70 a).

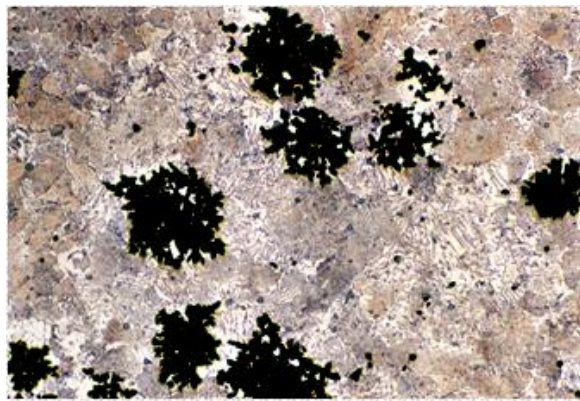
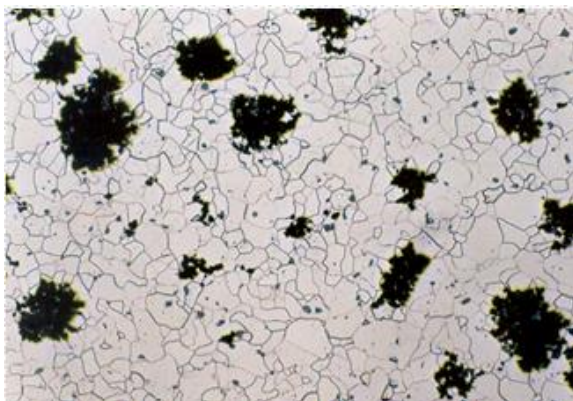
Temperovací proces prebieha v peci s oduhličujúcou automaticky riadenou oxidačnou atmosférou pri teplote 1050°C. Pritom prebieha proces grafitizácie a oduhličovanie povrchu odliatku. Ochladením liatiny po temperovaní na miestach, kde je austenit ochudobnený o uhlík, nastáva jeho prekryštalizácia na ferit. Vo vnútorných menej oduhličovaných vrstvách vzniká zmes feritu a perlitu. Vnútro odliatku po ochladení bude tvoriť perlit a grafit, ktorý má pavúčkovitý tvar. Temperovanie na biely lom je zastarané pre zdĺhavosť a nákladnosť. Využíva sa najčastejšie pri tenkostenných odliatkoch s hrúbkou steny do 6 mm.

Temperovaná liatina s čiernym lomom obsahuje asi 2,3 - 2,6 %C, 1,2 - 1,5 %Si, 0,40 - 0,50 %Mn, max. 0,1 %P a 0,10 až 0,15 %S. Tepelné spracovanie temperovanej liatiny s čiernym



Obr.3.69 Diagramy temperovania
Temperovaná liatina: 1- s bielym lomom, 2 – s čiernym lomom, 3 – temperovaná perlitická

lomom je dvojstupňové (obr.3.70 b); v prvom tzv. grafitizačnom stupni sa pri teplotách cca 950°C rozpadá ledeburitický cementit podľa rovnice $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$. Pritom sa všetok uhlík vylučuje v tvare temperovaného grafitu. Tento proces prebieha v neutrálnej atmosfére pece. V nasledujúcom druhom stupni sa žíhaním získa požadovaná štruktúra základnej kovovej hmoty, a tak získame odpovedajúci druh liatiny. Druhým stupňom žíhania môžeme získať feritickú alebo perlitickú štruktúru, ale tiež štruktúru zošľachteného stavu.



Obr.3.70 Temperovaná liatina s a) bielym a b) čiernym lomom

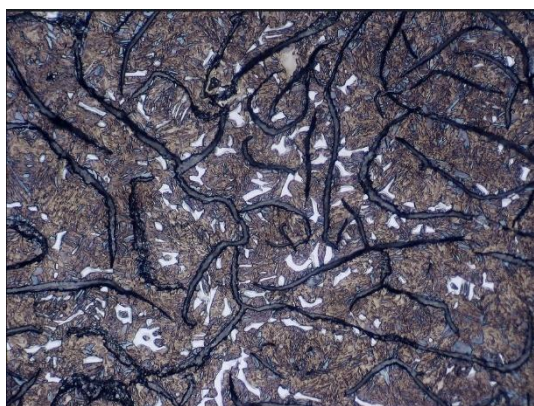
Zošľachťovaním je možné získať temperované liatiny s vysokými pevnostnými parametrami. Z nízkolegovaných zošľachtených temperovaných liatin so sorbitickou štruktúrou sa vyrábajú aj dynamicky namáhané strojné súčiastky (napr. ojnice spaľovacích motorov). Príklady použitia niektorých druhov temperovaných liatin s bielym aj čiernym lomom sú uvedené v tab.3.32.

Tabuľka 3.32 Príklady použitia niektorých druhov temperovaných liatin

Označenie liatiny	Hrúbka steny odliatku [mm]	Použitie odliatkov
EN-GJMW-350-4 (STN 42 2536)	3 – 30	na odliatky pre nápravy, tkáčske stavy, kompresory, odliatky prstov žacích strojov, strmene, kľúče k zámkom a pod.
EN-GJMW-450-5 (STN 42 2540)	3 – 30	na odliatky pre motocykle a automobily, pre statický namáhané odliatky
– (STN 42 2532)	3 – 30	na odliatky pre textilné, poľnohospodárske a obrábacie stroje, zdviháky, Ewartové reťaze, vagóny, traktory, armatúry
EN-GJMW-450-6 (STN 42 2545)	3 – 30	na odliatky úpiniek, konzoly Dieselových motorov, odliatky prevodových skriň poľnohospodárskych strojov
EN-GJMW-550-4 (STN 42 2555)	3 – 30	odliatky piestov Dieselových motorov, vahadiel, kľukových hriadeľov

3.4.3 Tvrdená liatina

Tvrdená liatina je druhom liateho materiálu, u ktorého je plne zvládnutý proces kryštalizácie za zvláštnych podmienok ochladzovania (obr.3.71). Cieľom je dosiahnuť na povrchu odliatku takú rýchlosť ochladzovania, aby bola plne potlačená tvorba grafitového eutektika a vytvorila sa za veľkého podchladenia vrstva bielej liatiny s metastabilným ledeburitom.



Obr.3.71 Mikrostruktúra tvrdenej liatiny

Rýchle ochladzovanie vonkajších plôch odliatku sa dosahuje odievaním do kovových foriem - kokíl alebo sa do liacej formy vložia kovové chladítka. Povrchová tvrdená vrstva, tvorená cementitom a perlitom, má vysokú tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu. Jadro je mäkkšie a zvlášť u liatin s guľôčkovým grafitom i húževnatejšie. Tieto druhy liatin sa používajú hlavne na výrobu liatych hladkých aj profilovaných valcov pre valcovacie stolice, prievlakových dosiek, na vačkové hriadele s tvrdenou povrchovou časťou vačiek a čapov, na zdvihátko ventilov spaľovacích motorov a pod.

3.4.4 Legované druhy liatin

Legujúce prvky sa pridávajú za účelom zlepšenia mechanických vlastností liatin, t.j. získania optimálnej kombinácie pevnosti a húževnatosti, bez použitia tepelného spracovania. Druhým cieľom legovania je dosiahnutie výhodnejších technologických, chemických a fyzikálnych vlastností. Pridávaním legujúcich prvkov sa zlepšujú nasledujúce vlastnosti liatin:

- a) *mechanicko-technologické vlastnosti* ako pevnosť, tvrdosť, húževnatosť, odolnosť proti opotrebeniu, prekaliteľnosť, obrobiteľnosť, za použitia prísad Cr, Mo, Ni, Cu,
- b) *vlastnosti za zvýšených teplôt*, t.j. medza pevnosti pri tečení, žiaruvzdornosť, objemová stálosť, štruktúrna odolnosť (Si, Al, Mo, Cr, Ni),
- c) *korozivzdornosť* v neutrálnom, kyslom, alebo zásaditom prostredí (Cr, Si, Ni, Cu).

Podľa dominantnej prísady delíme legované liatiny do štyroch základných skupín:

➤ **Liatiny legované hliníkom.** Rozsah legovania sa pohybuje od 1 do 30 %Al. Podľa zloženia má materiál veľmi rozdielne vlastnosti. Prakticky sa používajú len liatiny s relatívne nízkym alebo veľmi vysokým obsahom Al (1 až 9 %Al alebo 20 až 25 %Al), pretože druhy obsahujúce Al v rozmedzí 10 až 16 % sú veľmi krehké. Liatiny s 2 %Al sa používajú na odliatky výfukov a výfukových vedení dieselmotorov, so 4 %Al a 1 %Cr napr. na rošty koksárenských ohnísk a liatina so 4 %Al a 2 %Cr na zariadenia pre rafináciu síry. Vysokolegované liatiny s 22 %Al a 2 %B sa používajú na žiaruvzdorné odliatky s vysokou pevnosťou za tepla (350 MPa pri teplote 760°C).

➤ **Liatiny legované kremíkom.** Bežne sa používajú liatiny s lupienkovým aj guľôčkovým grafitom s obsahom kremíku do 20 %. Liatiny so 4 až 7 %Si sú žiaruvzdorné až do teploty 850°C. Pre zvýšenie žiaruvzdornosti sa ďalej legujú prísadou chrómu. Používajú sa napr. na rošty, výstelky a veka pecí, cementačné nádoby a pod.

➤ **Liatiny legované chrómom.** Obsah chrómu sa v liatinách pohybuje od 8 do 35 %. Liatina legovaná chrómom je materiál s vysokou odolnosťou proti korózii, opotrebeniu a žiaruvzdornosťou až do vysokých teplôt. Vysoká korozivzdornosť tohto materiálu je založená na pasivačnom účinku prísady chrómu - minimálne 12 až 14 %. Žiaruvzdornosť sa progresívne zvyšuje s rastúcim obsahom chrómu. Zatiaľ čo u nelegovanej bielej liatiny sa hranica vzniku okovín pohybuje medzi 600 a 700°C, u liatin s 30 %Cr nedochádza k ich vzniku ani pri teplotách nad 1200°C.

➤ **Liatiny legované niklom.** Prísada niklu v liatinách zlepšuje pevnosť, zvyšuje odolnosť proti korózii, žiaruvzdornosť aj odolnosť proti opotrebeniu. Podľa obsahu niklu rozlišujeme dve skupiny týchto liatin; biele liatiny s obsahom niklu do 6 % známe ako „Ni-hard“, druhá skupina zahŕňa grafitické liatiny s obsahom Ni 13 až 35 % s austenitickou základnou kovovou hmotou (označenie „Ni-resist“). Niklové liatiny s austenitickou základnou kovovou hmotou vykazujú korozivzdornosť predovšetkým voči zásadám, zriedeným kyselinám, morskej vode a soľným roztokom, vyznačujú sa vyššou odolnosťou proti erózii, žiaruvzdornosťou a odolnosťou proti tepelným rázom.

4 TEPELNÉ SPRACOVANIE OCELÍ

Vlastnosti ocele závisia nielen od jej chemického zloženia, ale predovšetkým od štruktúry, t.j. od fázového zloženia a od tvaru, veľkosti a rozloženia jednotlivých fáz. Požadovanú štruktúru ocele získame tepelným spracovaním.

Tepelné spracovanie zahŕňa technologické postupy, pri ktorých sa riadeným tepelným režimom dosahujú štruktúrne zmeny, výsledkom ktorých je zmena vlastností v požadovanom smere. Tepelné spracovanie sa realizuje v troch operáciách:

- ohrevom určitou rýchlosťou na stanovenú teplotu,
- zotrvanie (výdrž) na tejto teplote,
- ochladzovanie definovanou rýchlosťou.

Teoretická podstata tepelného spracovania teda spočíva vo fázových a štruktúrnych premenách v tuhom stave. Pri ich štúdiu vychádzame z rovnovážneho diagramu Fe-C. Štruktúrne zmeny zodpovedajú zákonitostiam IRA a ARA diagramu príslušnej ocele a rýchlosti ochladzovania. Základné fázové premeny, ktoré sa uplatňujú pri tepelnom spracovaní sú: austenitizácia, perlitická, bainitická a martenzitická premena a premeny pri popúšťaní.

Medzi základné procesy tepelného spracovania kovových materiálov je možné zaradiť:

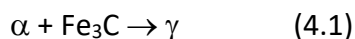
- **termické procesy** pri ktorých k zmenám vlastností materiálov dochádza zmenami teplôt. K termickým procesom spracovania ocelí patrí **žíhanie, kalenie a popúšťanie**. U hliníkových zliatin **vytvrdzovanie**.
- **chemicko-tepelné procesy** pri ktorých okrem zvýšených teplôt na povrchy pôsobí prostredie pri ktorom dochádza k zmenám v povrchových vrstvách.
- **termomechanické procesy** pri ktorých dochádza k zmenám štruktúry a vlastností materiálov kombináciou tepelného spracovania a plastickej deformácie.

4.1 Fázové premeny pri tepelnom spracovaní

Tepelné spracovanie zahŕňa technologické postupy, pri ktorých sa riadeným tepelným režimom dosahujú štruktúrne zmeny, výsledkom ktorých je zmena vlastností v požadovanom smere. Teoretická podstata tepelného spracovania teda spočíva vo fázových a štruktúrnych premenách v tuhom stave. Pri ich štúdiu vychádzame z rovnovážneho diagramu Fe-C. Štruktúrne zmeny zodpovedajú zákonitostiam IRA a ARA diagramu príslušnej ocele a rýchlosti ochladzovania. Základné fázové premeny, ktoré sa uplatňujú pri tepelnom spracovaní sú: austenitizácia, perlitická, bainitická a martenzitická premena a premeny pri popúšťaní.

4.1.1 Austenitizácia

Základným krokom pri tepelnom spracovaní s prekryštalizáciou je austenitizácia - premena heterogénnej feriticko-karbidickej štruktúry na homogénny austenit, ktorá nastáva pri ohreve ocele nad prekryštalizačné teploty (A_{c1} , A_{c3} , A_{cm}) a výdrži na týchto teplotách, podľa schémy:

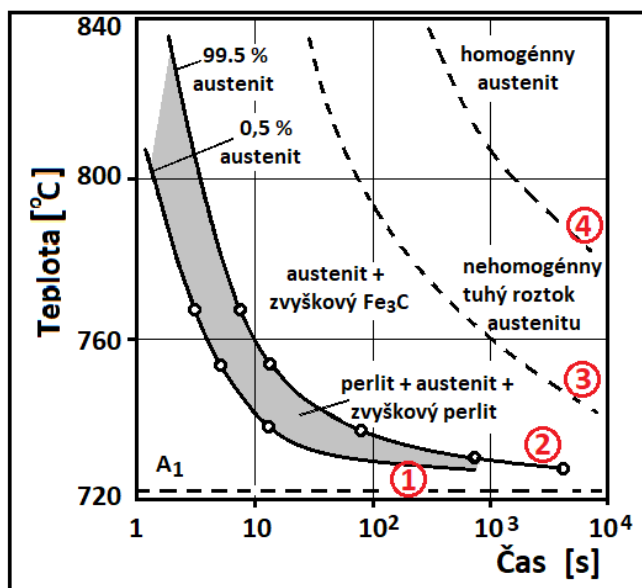


Austenit je pre rad postupov tepelného spracovania ocelí východiskovou štruktúrou; celý proces sa v týchto prípadoch zakladá na rozpade austenitu pri nasledujúcom ochladzovaní za určitých definovaných podmienok. Austenitizácia je difúzna premena. Pri eutektoidnej oceli môžeme priebeh austenitizácie rozdeliť na tieto čiastkové pochody:

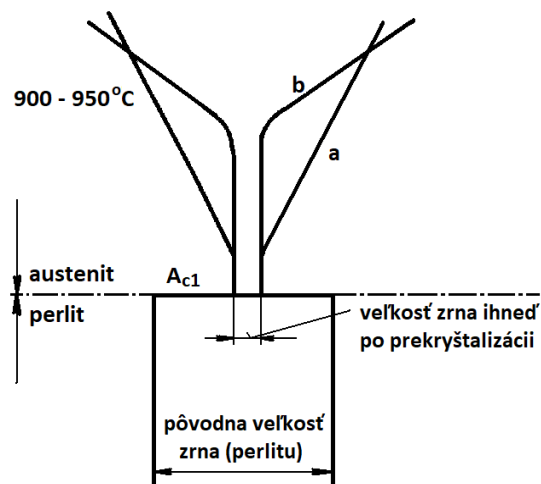
- vznik a rast zárodkov austenitu v perlitickom ferite,
- rozpúšťanie cementitu (u legovaných ocelí aj ostatných karbidov),
- homogenizácia austenitu (difúzne zrovnomenenie chemického zloženia austenitického zrna),
- rast austenitického zrna.

Premena má difúzny charakter a prebieha tvorbou zárodkov austenitu a ich ďalším rastom. Kinetiku austenitizácie vyjadrujú austenitizačné diagramy - obr.4.1. Pri všetkých oceliach však požadujeme po austenitizácii homogénny austenit. To vyžaduje správnu voľbu austenitizačnej teploty a doby výdrže na tejto teplote.

Po prekryštalizácii pri ohreve nad kritické teploty je vznikajúce austenitické zrno malé. Rast austenitického zrna je nežiadúci jav, ktorý je dôsledkom príliš vysokej austenitizačnej teploty, alebo príliš dlhej výdrže na austenitizačnej teplote. Poznáme ocele dedične hrubozrnné, ktoré sú náchylné na rast zrna aj pri obvyklých teplotách austenitizácie – krivka a, obr.4.2 a ocele dedične jemnozrnné (dezoxidované Al, Ti, V), pri ktorých je do teplôt cca. 1000°C náchylnosť na rast zrna veľmi malá – krivka b. Prílišné zhrubnutie zrna považujeme za štruktúrnu chybu a nazývame ho prehriatie. Následkom prehriatia austenitu je, že aj štruktúry po rozpade austenitu sú hrubé a z tohto dôvodu nemajú dobré predovšetkým krehkolomové vlastnosti. Vo všetkých postupoch tepelného spracovania, využívajúcich austenitizáciu nasleduje po nej ochladzovanie, pri ktorom nastáva premena austenitu na iné fázy. Premeny austenitu pri tepelnom spracovaní sa môžu uskutočňovať pri konštantnej teplote, vtedy hovoríme o izotermickom rozpade austenitu, alebo pri plynulom ochladzovaní, t.j. pri anizotermickom rozpade austenitu.



Obr.4.1 Austenitizačný diagram eutektoidnej uhlíkovej ocele, 1 – krivka začiatku vylučovania perlitu, 2 – krivka konca vylučovania perlitu, 3 – krivka konca vylučovania karbidov, 4 – krivka konca vylučovania gradientov koncentrácie uhlíka



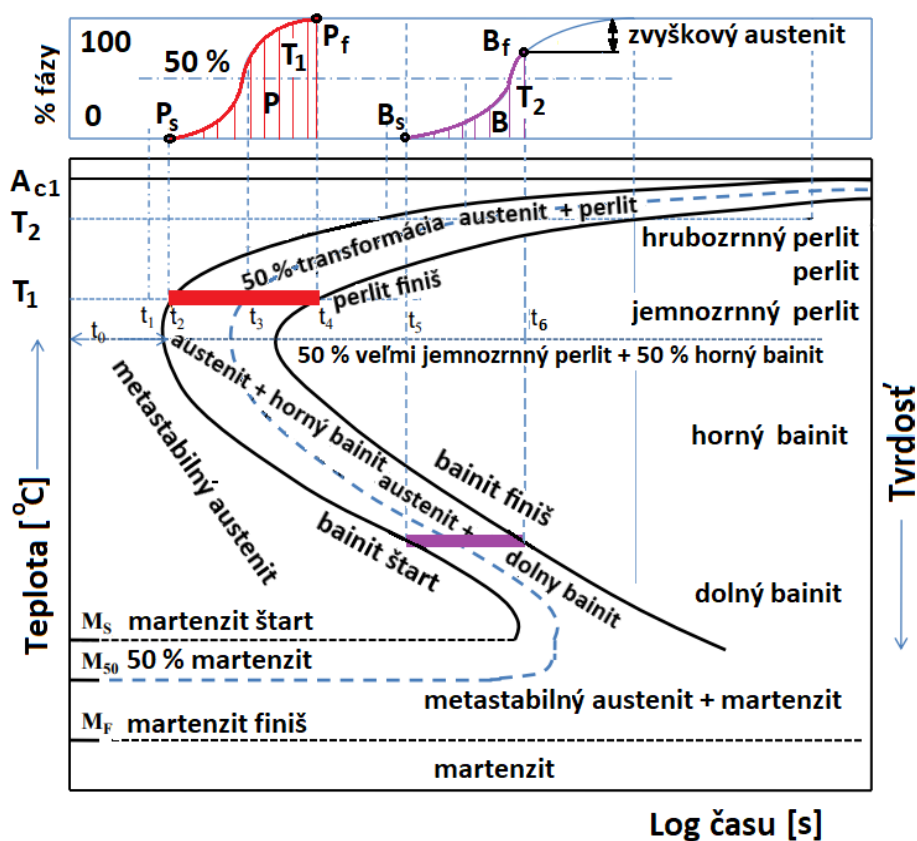
Obr.4.2 Schéma rastu zrna austenitu eutektoidnej ocele

4.1.2 Izotermický rozpad austenitu

Diagramy IRA (izotermického rozpadu austenitu) graficky znázorňujú procesy pri rozpade austenitu pre oceľ určitého chemického zloženia. Konštruujú sa na základe kinetických kriviek perlitickej a bainitickej premeny, (obr.4.3). Transformačné diagramy sa využívajú predovšetkým v procesoch tepelného spracovania ocelí. V menšom rozsahu sa používajú pri tepelnom spracovaní liatin. Údaje z diagramov IRA (izotermického rozpadu austenitu, t.j. rozpadu austenitu pri konštantnej teplote) nachádzajú využitie pri izotermických spôsoboch tepelného spracovania, ako sú izotermické žihanie a izotermické zošľachťovanie (t.j. bainitické kalenie).

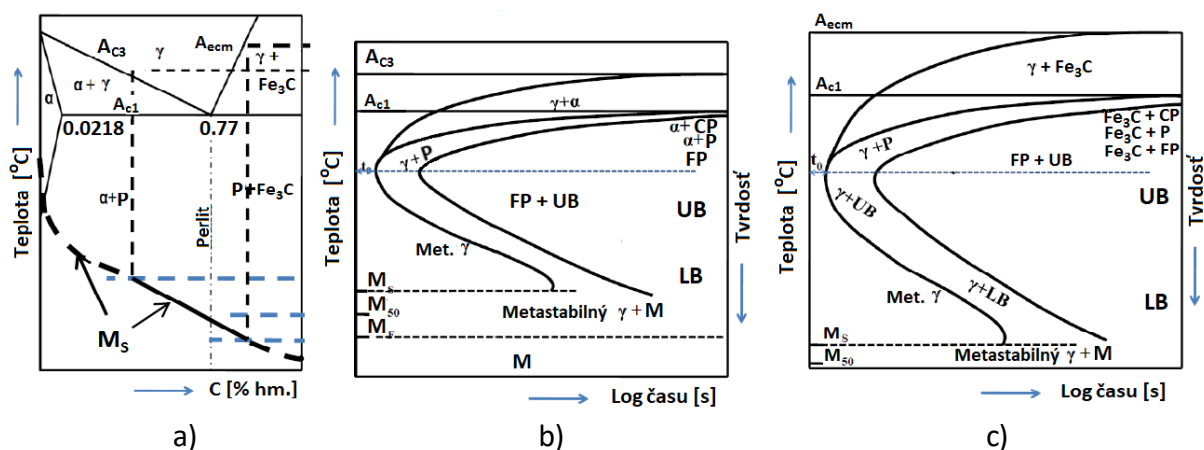
Častejšie sa však používajú diagramy ARA (anizotermického rozpadu austenitu), ktoré informujú o zmenách austenitu pri plynulom ochladzovaní. Tieto diagramy poskytujú informácie o vplyve rýchlosti ochladzovania z teploty austenitizácie (rýchlosť ochladzovania závisí od veľkosti ochladzovaného predmetu a druhu ochladzujúceho prostredia) na výslednú štruktúru a tvrdosť použitej ocele.

Každá oceľ má svoj špecifický diagram IRA alebo ARA. Pomocou týchto diagramov možno napríklad predpovedať, aké vlastnosti (t.j. štruktúru a tvrdosť) bude mať predmet s daným rozmerom po kalení do vody, oleja alebo po ochladení na vzduchu.



Obr.4.3 Kinetické krivky rozpadu austenitu eutektoidnej ocele a IRA diagram eutektoidnej ocele; P - perlitická premena pri T_1 , B - bainitická premena pri T_2 ,

Pre konštrukciu diagramu IRA sú dôležité časové údaje o začiatku (P_s , B_s – perlit, bainit štart) a ukončení (P_f , B_f – perlit, bainit finiš) perlitickej a bainitickej premeny. Diagram IRA pre podeutektoidnú a nadeutektoidnú oceľ je na obr 4.4.



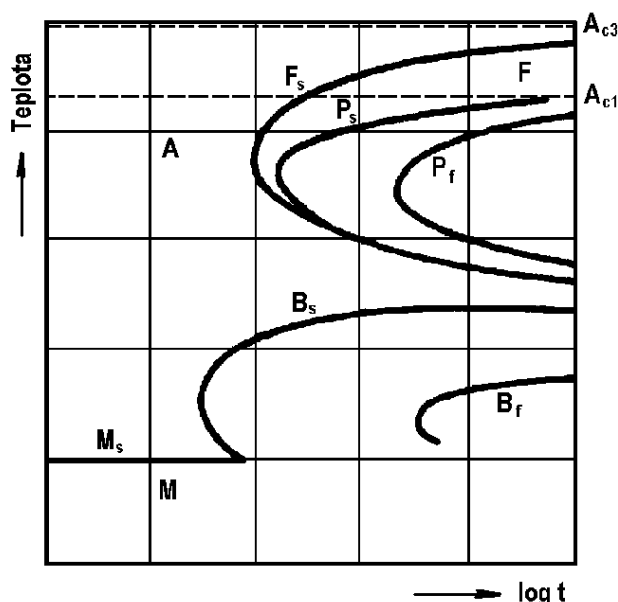
Obr.4.4 IRA diagramy ocelí

a) zjednodušený diagram Fe-Fe₃C, b) IRA diagram podeutektoidnej ocele, c) IRA diagram nadeutektoidnej ocele (P – perlit, γ – austenit, α – ferit, UB – horný bainit, LB – dolný bainit, FP – jemnozrnný perlit, CP – hrubozrnný perlit, M – martenzit, M_s – martenzit štart, M_f – martenzit finiš, Met. – metastabilný)

Najväčší vplyv na polohu a tvar diagramov má chemické zloženie austenitu. Takmer všetky prísadové prvky (okrem Co a Al) spomaľujú rozpad austenitu a posúvajú krivky doprava. Karbidotvorné prvky (Cr, Mo, V, W) okrem toho oddeľujú perlitický a bainitický stupeň premeny, čím výrazne menia tvar diagramu, ktorý má miesto jedného dva oblúky - obr.4.5. Izotermický rozpad austenitu je proces, pri ktorom sa rozpadá homogénny austenit pri konštantnej teplote, nižšej ako A_1 . Priebeh rozpadu austenitu bude závisieť od teploty rozpadu, ktorá ovplyvňuje difúzne pochody prvkov:

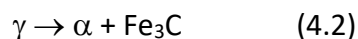
- samodifúziu železa, potrebnú na premenu kryštalickej mriežky železa,
- difúziu uhlíka, potrebnú na zmeny koncentrácie uhlíka medzi reagujúcimi fázami.

V závislosti na teplote rozpadu austenitu môžu nastať nasledujúce typy premeny: perlitickú, bainitickú a martenzitickú.

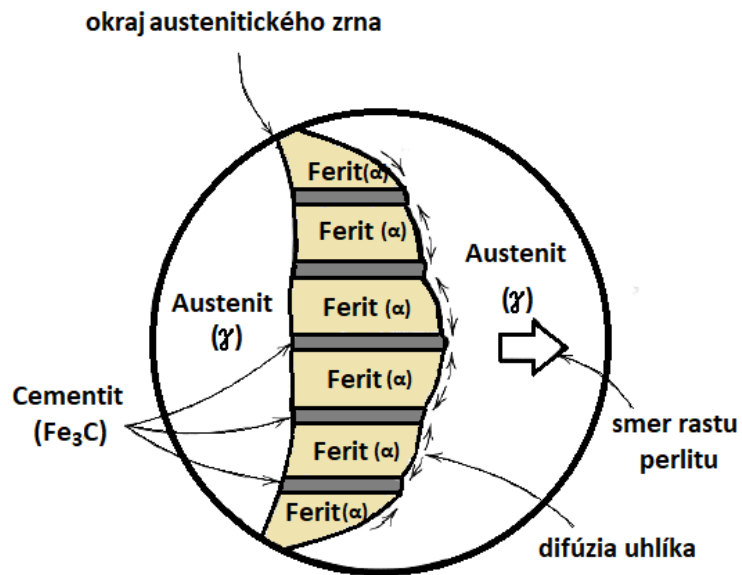


Obr.4.5 Vplyv legujúcich prvkov na zmeny kriviek v IRA diagrame eutektoidnej ocele

Perlitická premena je fázovou premenou difúznou. Prebieha pri malom podchladení austenitu v intervale teplôt A_1 až 500°C , podľa schémy:

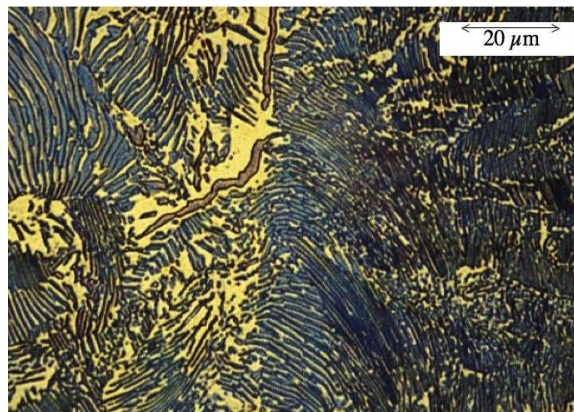


Perlit je dvojfázová zmes feritu a cementitu. Vznik perlitu je iniciovaný vznikom zárodok cementitu alebo feritu na hranici austenitického zrna. Pri raste cementitickej lamely, obr.4.6 sa okolitý austenit ochudobní o uhlík, a tým sa vytvoria podmienky na vznik dvoch lamiel feritu. Útvár pozostávajúci z jednosmerne usporiadaných lamiel feritu a cementitu nazývame perlitická kolónia. Zrno perlitu potom tvorí súbor rôzne orientovaných kolónií (obr.4.7).



Obr.4.6 Schéma vzniku perlitickej kolónie

S klesajúcou teplotou rozpadu austenitu na perlit sa výsledná štruktúra zjemňuje. Jemnozrnný perlit má vyššiu tvrdosť a pevnosť ako hrubozrnný perlit.



Obr.4.7 Perlitická mikroštruktúra

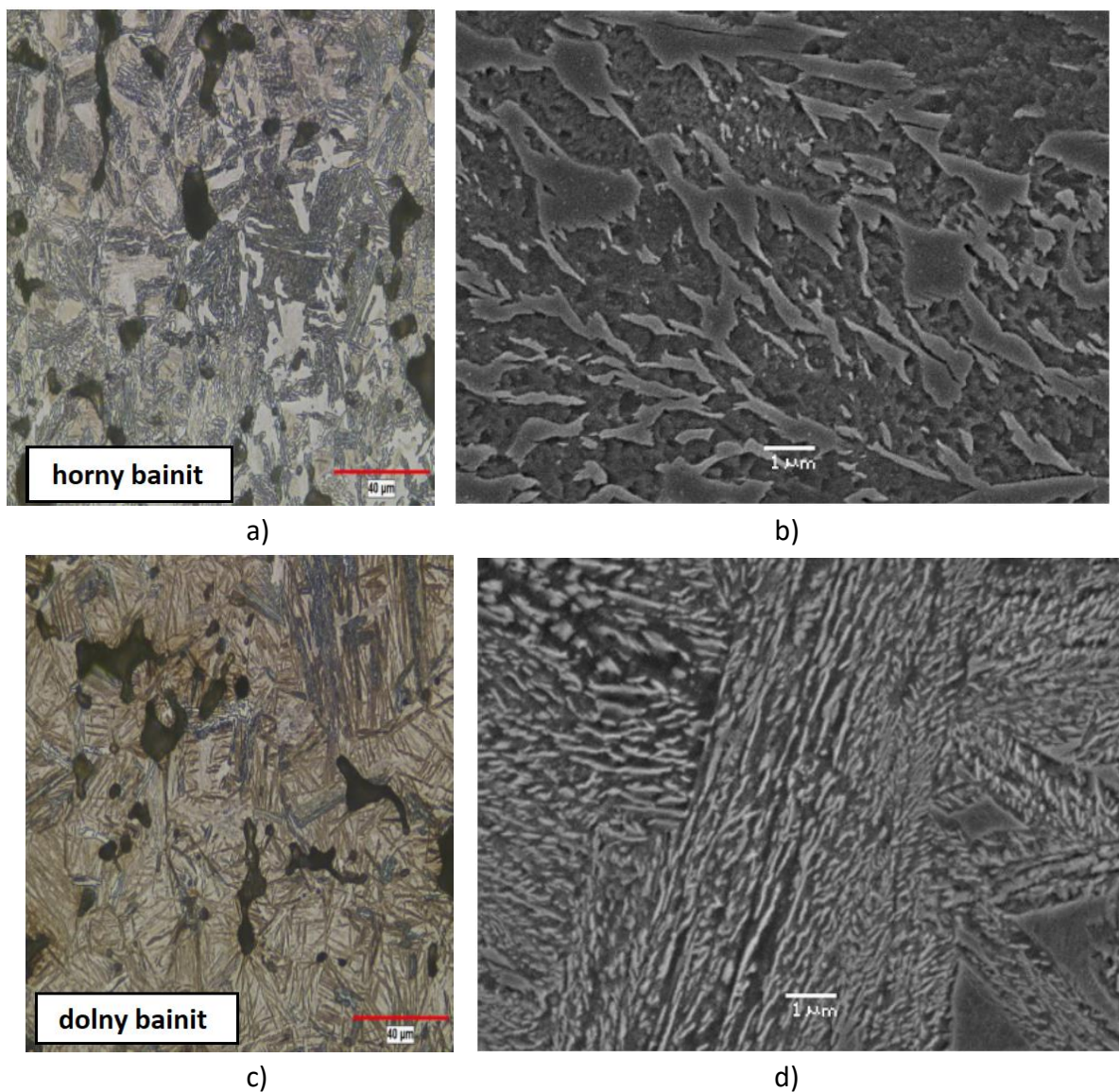
Bainitická premena prebieha pri stredne veľkom podchladení, pri teplotách asi pod 500°C až po teplotu začiatku martenzitickej premeny podľa rovnice:



Charakterizuje ju bezdifúzna transformácia mriežok $\text{Fe}_\gamma \leftrightarrow \text{Fe}_\alpha$ pri súčasne prebiehajúcej difúzii uhlíka. Vzhľadom na obmedzenú difúziu atómov uhlíka vznikajúci tuhý roztok α je presýtený uhlíkom ($\alpha_{\text{pres.}}$). Výsledkom premeny je nelamelárna zmes $\alpha_{\text{pres.}} + \text{Fe}_3\text{C}$ nazývaná bainit. Konkrétny mechanizmus tvorby bainitu i jeho morfológia sa výrazne menia s teplotou bainitickej premeny. Bainit vznikajúci pri vyšších teplotách (nad cca 350 °C) nazývame horný, a bainit tvorený pri nižších teplotách (cca pod 350 °C) nazývame dolný.

Štruktúru horného bainitu ktorá je na obr.4.8 a - b, tvoria zväzky hrubších ihlíc bainitického feritu s pozdĺžne usporiadanými časticami cementitu, ktoré sú vylúčené na povrchu ihlíc. Má vyššiu hustotu dislokácií a nízku rázovú aj lomovú húževnatosť. Táto závisí od veľkosti pôvodných austenitických zŕn. Dolný bainit (obr.4.8 c - d), vznikajúci pri nižších teplotách (podľa krivky 2, obr.4.3) a väčších podchladení austenitu, je tvorený tenkými doskami bainitického feritu. Jeho húževnatosť je zvyčajne vyššia ako u horného bainitu.

Pre bainitickú premenu (rovnako ako pre všetky šmykové premeny) je typické, že nie je celkom ukončená. V štruktúre zostáva určitý podiel zvyškového austenitu (viď obr.4.3). Bainit je tvrdá, pevná a pritom vysoko húževnatá štruktúra.

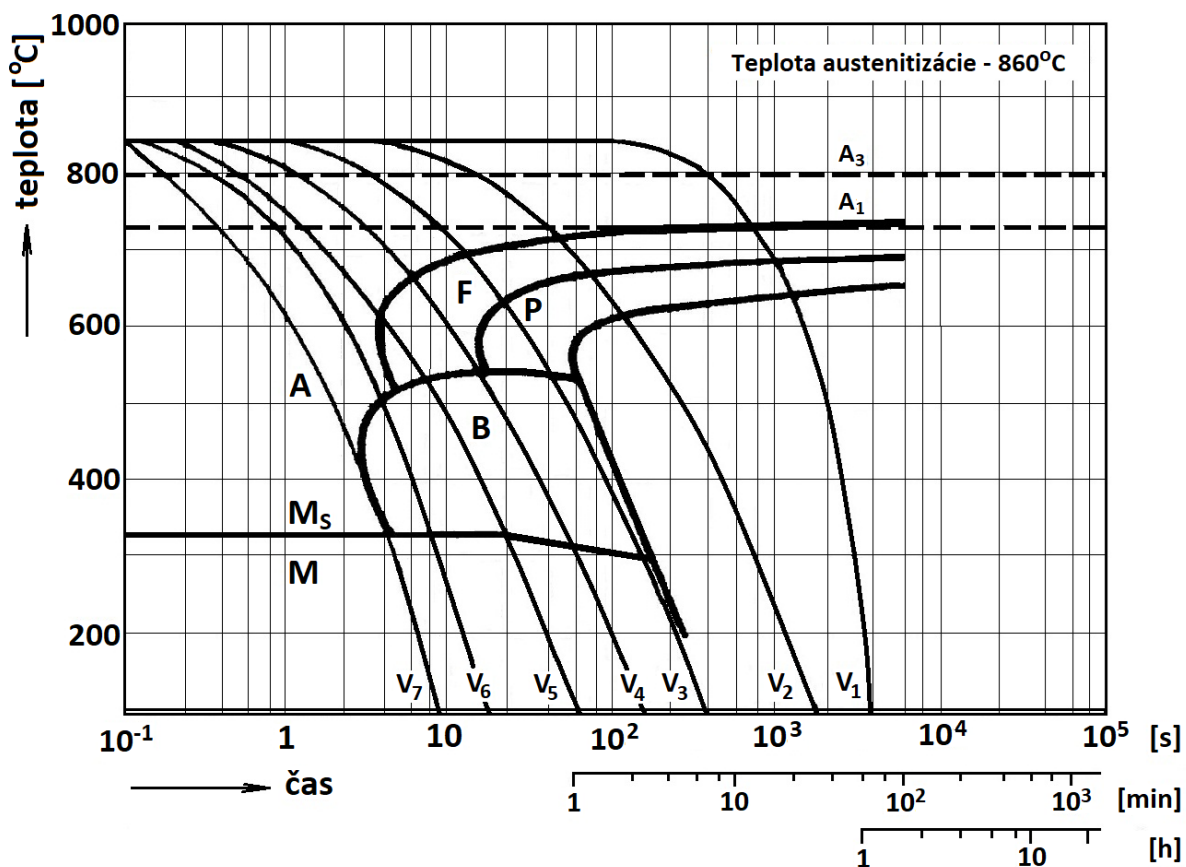


Obr.4.8 Mikroštruktúra bainitu

- a) Mikroštruktúra horného bainitu pozorovaná na svetelnom mikroskope,
- b) Mikroštruktúra horného bainitu, SEM
- c) Mikroštruktúra dolného bainitu pozorovaná na svetelnom mikroskope,
- d) Mikroštruktúra dolného bainitu, SEM

4.1.3 Anizotermický rozpad austenitu

V technickej praxi sa častejšie stretávame s takými postupmi tepelného spracovania, kedy po ohreve na predpísanú teplotu nasleduje plynulé ochladzovanie. Rozpad austenitu pri plynulom ochladzovaní môžeme sledovať v diagramoch anizotermického rozpadu austenitu – ARA diagramy. Výsledná štruktúra ocele môže byť tvorená zmesou produktov rozpadu a závisí od rýchlosti ochladzovania. Na obr.4.9 je ARA diagram podeutektoidnej nízkolegovanej ocele s rôznymi rýchlosťami ochladzovania vzoriek, od v_1 po v_7 .



Obr.4.9 Diagram ARA podeutektoidnej nízkolegovanej ocele 37MnSi5

Pri pomalom rýchlosti v_1 a v_2 sa austenit transformuje na ferit a perlit. Po ochladzovaní rýchlosťou v_2 bude v štruktúre viac perlitu ako pri rýchlosti v_1 . Rastúca rýchlosť ochladzovania má na priebeh rozpadu austenitu analogický vplyv ako znižujúca sa teplota izotermického rozpadu austenitu, pretože dochádza k zhoršeniu podmienok pre difúziu (zníženie teploty a skrátenie času na difúzne pochody). Vyššie rýchlosti ochladzovania majú za následok zjemnenie štruktúry a zvýšenie tvrdosti ocele. Pri rýchlostiach v_3 až v_6 sa časť austenitu zachová i pri teplotách, kedy už prebieha bainitická a martenzitická premena.

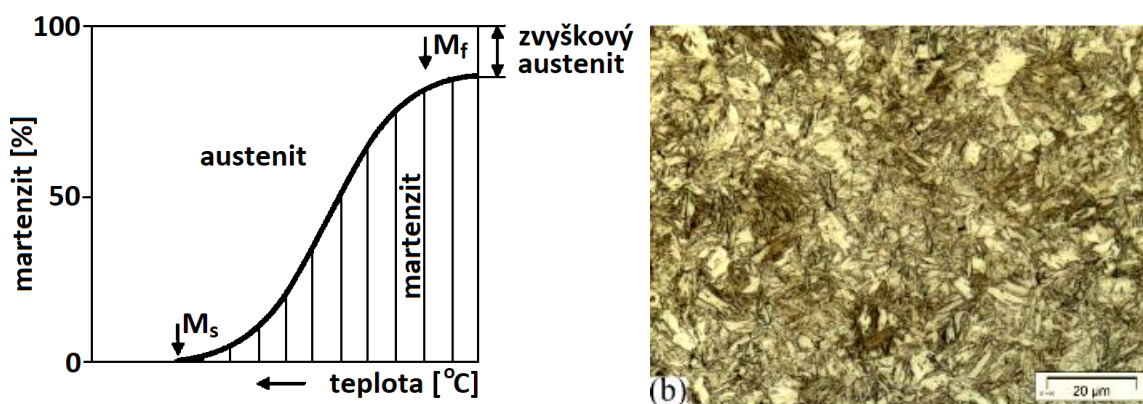
Rýchlosť v_3 sa nazýva dolná kritická rýchlosť ochladzovania. Je to najmenšia rýchlosť ochladzovania austenitu ktorá spôsobí martenzitickú premenu aspoň v časti objemu. Štruktúru bude tvoriť zmes malého množstva feritu, bainit, martenzit a zvyškový austenit. Po ochladzovaní rýchlosťou v_4 a v_5 bude v štruktúre malý podiel perlitu, ďalej bainit, martenzit a

zvyškový austenit. Zvyškový austenit je sprievodným znakom bainitickej a martenzitickej premeny.

Pri rýchlosti ochladzovania v_6 začína rozpad austenitu priamo bainitickou a pokračuje martenzitickou premenou. Výsledná štruktúra bude bainit, martenzit a zvyškový austenit. S rastúcou rýchlosťou ochladzovania sa zvyšuje podiel martenzitu vo výslednej štruktúre.

Rýchlosť v_7 nazývame hornou kritickou rýchlosťou ochladzovania. Je definovaná ako najmenšia rýchlosť, ktorá spôsobuje martenzitickú premenu v celom objeme. Postup tepelného spracovania ktorý spočíva v rozpade homogénneho austenitu martenzitickou transformáciou sa nazýva **kalenie**.

Martenzitická premena sa uskutočňuje pri ochladzovaní dostatočne veľkou rýchlosťou, ktorá zamedzí difúzii atómov železa aj uhlíka. Hlavným znakom martenzitickej premeny je teda jej bezdifúznosť. Premena začína pri teplote M_s a končí pri teplote M_f (obr.4.10). Podobne ako bainitická premena neprebehne transformácia na martenzit úplne v celom objeme a vždy zostáva určité množstvo zvyškového austenitu. Hodnota teplôt M_s a M_f závisí od chemického zloženia austenitu. So zvyšovaním obsahu uhlíka a legujúcich prvkov (Mn, Cr, Ni) klesá teplota M_s aj M_f . Pri asi 0,6 % C, je teplota M_f pod teplotou okolia a zníženie množstva zvyškového austenitu je možné len dodatočne, ďalším podchladením tzv. zmrazovaním.



Obr.4.10 Krivka priebehu martenzitickej premeny, Obr.4.11 Martenzitická mikroštruktúra M_s , M_f – teploty začiatku a konca tvorby martenzitu.

Produktom tejto bezdifúznej premeny je silne presýtený tuhý roztok uhlíka v železe α , nazývaný martenzit, obr.4.11. Pri premene dôjde k zmene mriežky K12 na K8, avšak bez prerozdelenia obsahu uhlíka. Všetok uhlík rozpustený v austenite zostane v mriežke K8 v pôvodných polohách. Napr. pri eutektoidnej oceli tak v mriežke zostane rozpustených cca 0,8 %C, namiesto rovnovážnych 0,02 %C. Vplyvom presýtenia uhlíkom dochádza k deformácii kubickej priestorovo centrovanej mriežky a martenzit má tetragonálnu mriežku priestorovo centrovanú s parametrami a , c . Stupeň tetragonality daný pomerom c/a závisí na obsahu uhlíka. So zvyšovaním jeho obsahu stupeň rastie a naopak. Martenzit je tvrdá a

krhká štruktúrna zložka. Tepelné spracovanie, pri ktorom sa úmyselne vyvolá martenzitická premena, sa označuje kalenie.

Pri legovaných oceliach vplýva rastúci obsah prísad (podobne aj uhlíka) na diagramy ARA analogicky ako na diagramy IRA:

1. posúva krivky rozpadu k nižším rýchlostiam, teda znižuje hornú kritickú rýchlosť ochladzovania,
2. znižuje teploty martenzitickej premeny.

4.2 ZÁKLADNÉ POSTUPY TEPELNÉHO SPRACOVANIA

Z technologického hľadiska pozostáva každé tepelné spracovanie z ohrevu na teplotu tepelného spracovania, výdrže na tejto teplote a ochladenia na teplotu okolia. Druh tepelného spracovania závisí od výšky teploty ohrevu a od rýchlosti ochladzovania (obr.4.12). Technologické postupy tepelného spracovania kovov, používané v technickej praxi, môžeme rozdeliť do štyroch základných skupín:

1. **Žihanie** - postupy, pri ktorých získavame v porovnaní s východiskovým stavom rovnovážnejšie štruktúry.
2. **Kalenie a popúšťanie** - postupy, pri ktorých vytvárame štruktúry s určitým stupňom nerovnovážnosti. V hliníkových zliatinách sa používa postup, nazývaný **vytvrdzovanie**.
3. **Chemicko-tepelné spracovanie** - postupy, pri ktorých dochádza k štruktúrnym zmenám v dôsledku zmeny chemického zloženia povrchových vrstiev materiálu.
4. **Termomechanické spracovanie** - postupy, pri ktorých sa dosahuje požadovaná zmena vlastností kombináciou intenzívneho tvárnenia a tepelného spracovania.

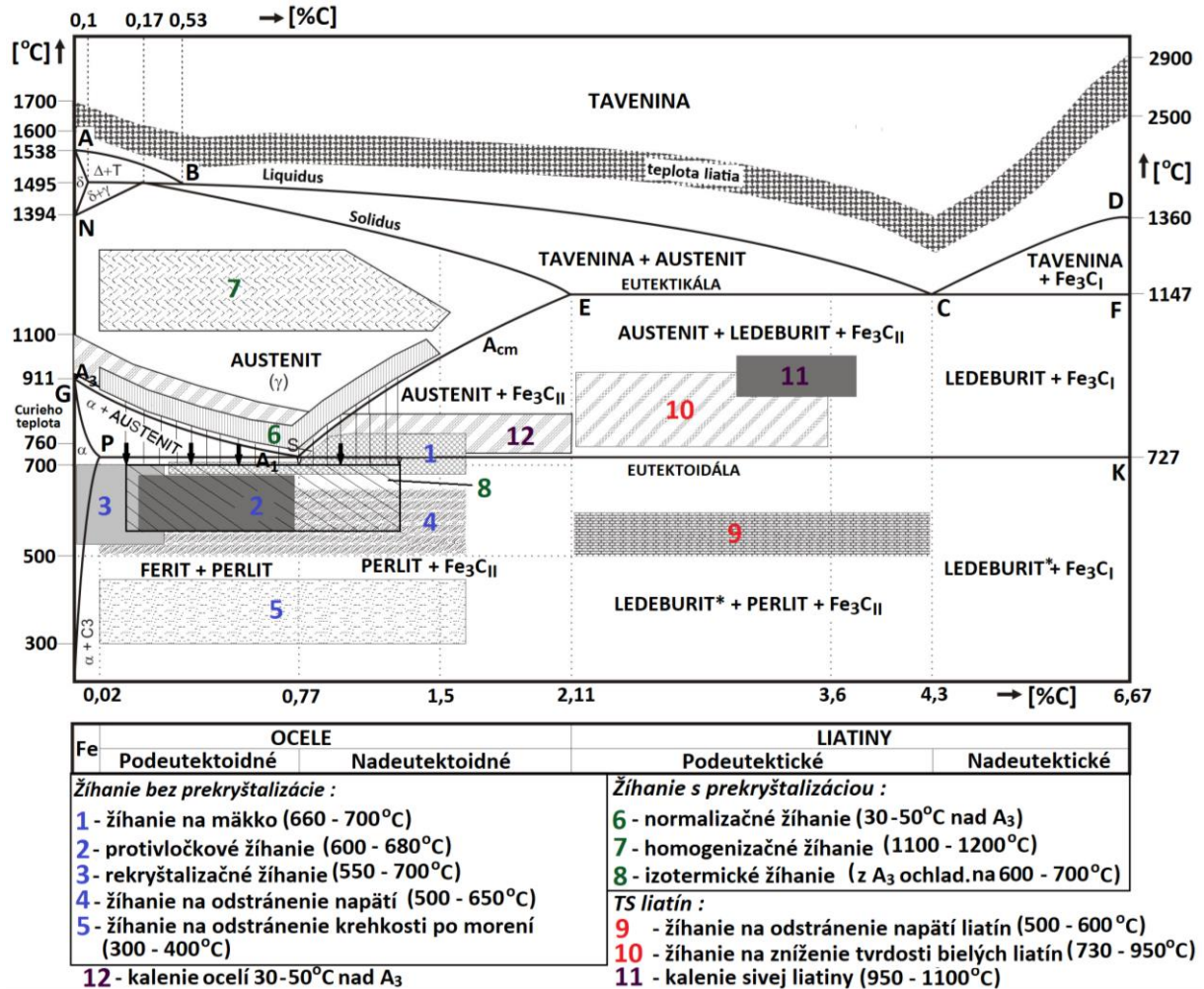
Ohrev a doba zotrvania na teplote pri tepelnom spracovaní sú dôležité nielen z technologického, ale aj z ekonomického hľadiska. So zvyšovaním rýchlosti ohrevu sa zvyšujú tepelné napätia. Teplotný spád po priereze súčiastky spôsobuje, že aj fázové premeny budú pri ohreve prebiehať postupne smerom od povrchu a spôsobia vznik štruktúrnych napätí. Termické a štruktúrne napätia môžu spôsobiť zmenu tvaru, bortenie, praskanie a dokonca aj porušenie výrobku.

Rýchlosť ohrevu a teplotný spád výrazne ovplyvňuje teplotnú vodivosť materiálu. Všetky prísadové prvky rozpustené v základnej matici teplotnú vodivosť zhoršujú. V oceliach najvýraznejšie v tomto smere pôsobí uhlík a ďalej prvky v poradí Si, V, Cr, Mn, Ni, Mo, V.

Ohrev predmetov pri tepelnom spracovaní je možné robiť nasledovne:

- súčasný ohrev vsádzky a pece,

- ohrev v peci udržiavanej nepretržite na teplote ohrevu,
- intenzívny ohrev v peci, ktorá má podstatne vyššiu teplotu ako je teplota ohrevu,
- stupňovitý ohrev v dvoch a viacerých prostrediach.



Obr.4.12 Základné druhy tepelného spracovania ocelí a liatin

Každý z týchto spôsobov sa vyznačuje určitým vplyvom na rozdiel teplôt medzi teplotou pece, teplotou povrchu a jadra ohrievaných povrchov. Stupňovitý ohrev umožňuje znížiť napätia pri ohreve, obmedziť bortenie a praskanie na minimum. Rýchlorezné ocele sa ohrievajú na kaliacu teplotu v troch až v štyroch stupňoch. Voľba spôsobu ohrevu závisí od akosti materiálu, tvaru a rozmeru súčastí, výšky požadovanej teploty a pod. Všeobecne platí, že čím je oceľ viac legovaná a súčiastka má zložitejší tvar a väčšie rozmery, tým má byť rýchlosť ohrevu miernejšia. Po dosiahnutí predpísanej teploty na povrchu súčastí nasleduje zotrvanie na teplote ohrevu. Cieľom je vyrovnanie teploty po priereze ohrievaných predmetov a priebeh predpokladaných difúzných procesov (rozpúšťanie karbidov, intermetalických fáz, homogenizácia chemického zloženia tuhého roztoku, zníženie vnútorných napätí a pod.). Čas zotrvania na teplote sa volí podľa účelu tepelného spracovania. Ohrev súčiastok pri tepelnom spracovaní sa realizuje v peciach s plynou

atmosférou, v prostrediach roztopených solí (NaCl , KCl , BaCl_2), alebo roztavených kovov (Pb , Al). Pri ohreve vo vzdušných atmosférach dochádza k oxidácii, oduhličeniu alebo nauhličeniu povrchu. Tomu sa dá zabrániť použitím ochranných zábalov (vypálený koks, liatinové triesky, ochranné nátery a pod.), alebo ohrevom vo vákuových peciach.

4.2.1 Žihanie

Spoločným znakom všetkých postupov žihania je malá rýchlosť ochladzovania, ktorá umožňuje vznik štruktúr blízkyh rovnovážnym.

Ohrev súčiastok pri tepelnom spracovaní sa realizuje v peciach s plynnou atmosférou, v roztopených soliach alebo roztavených kovoch. Najčastejšie sa ohrev vykonáva v peciach s prirodzenou atmosférou (obr.4.13), poklopových peciach (obr.4.14) resp. indukčných (obr.4.15).



Obr.4.13 Pojazdová žihacia pec

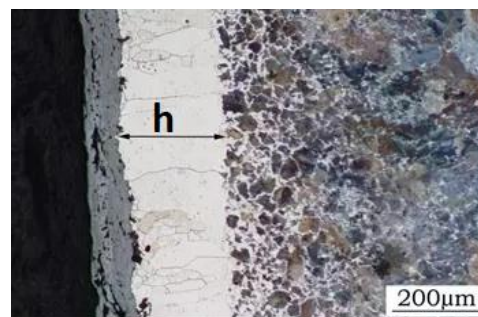


Obr.4.14 Poklopová žihacia pec

Pri zvýšených teplotách dochádza však k oxidácii spojenej s tvorbou oxidov železa, prípadne legujúcich prvkov, alebo k oduhličovaniu (obr.4.16), t.j. zníženiu obsahu uhlíka na povrchu oceľových súčiastok. To je možné obmedziť nahradením prirodzenej atmosféry pece umelou ochrannou atmosférou.



Obr.4.15 Indukčné žihanie hriadeľa



Obr.4.16 Oduhličená povrchová vrstva „h“

Výška žihacej teploty a doba výdrže závisia predovšetkým od chemického zloženia ocele a od druhu žihania a sú preto rozhodujúcimi technologickými parametrami. Rýchlosť

ochladzovania zo žihacej teploty býva obvykle pomalá, napr. v peci (výnimkou je normalizačné žihanie). Obvyklé teploty žihania ocelí vyplývajú z obr. 2.17. Podľa výšky žihacej teploty je možné všetky postupy žihania ocelí rozdeliť na žihanie s prekryštalizáciou a bez prekryštalizácie.

Žihanie bez prekryštalizácie - je charakteristické teplotami žihania nižšími ako teplota A_1 . Do tejto skupiny postupov zaraďujeme:

➤ **Žihanie na mätko (sferoidizačné žihanie)** sa robí najčastejšie pri teplotách tesne pod A_1 . Doba izotermickej výdrže býva obyčajne niekoľko hodín. Cieľom žihania je zníženie tvrdosti a tiež pevnosti za účelom zlepšenia obrobitelnosti res. tvárnosti. U eutektoidných ocelí sa zmena vlastností sa dosiahne sferoidizáciou lamelárneho perlitu na perlit globulárny. Pri nadeutektoidných oceliach sa žiha na mätko cyklovaním teploty okolo A_1 . Pri podeutektoidných oceliach sa teplota žihania pohybuje v rozmedzí 660 až 700 °C (pod A_1) s výdržou 4 až 8 hod. s nasledujúcim pomalým ochladzovaním v peci. S rastúcim obsahom uhlíka sa budú karbidy rozpúšťať pomalšie a karbidy vylúčené po hraniciach zŕn nie je možné pri týchto teplotách (pod A_1) rozpustiť. Z toho dôvodu sa pri nadeutektoidných, resp. nástrojových oceliach volí teplota žihania nad teplotou A_1 s výdržou 6 až 12 hod. s veľmi pomalým ochladzovaním najprv v peci (do teploty 600 °C rýchlosťou 10 až 15 °C/hod.) a potom na vzduchu.

➤ **Žihanie na odstránenie napätí (relaxačné žihanie)** má za cieľ znížiť hladinu vnútorných napätí, ktoré vznikajú v súčiastkach pri predchádzajúcom technologickom spracovaní (napr. po tvárnení za studena, zváraní, kalení). Podstata zníženia vnútorných napätí spočíva v premene pružnej deformácie na plastickú. Najväčší efekt zníženia vnútorných napätí je pri vyšších teplotách (500 až 650°C), pri ktorých majú ocele nízku hodnotu medze klzu a medze tečenia. Výdrž na teplote ohrevu je 1 – 2 hodiny a pomalé ochladzovanie v peci až do teplôt 150 – 400°C, podľa tvárnosti ocele, veľkosti a tvaru predmetu. Pokles vnútorných napätí prebieha formou relaxácie, keď sa vnútorné napätia znižia mikroplastickými deformáciami. Výdrž na teplote závisí od požadovaného stupňa zníženia vnútorných napätí. Čím je teplota ohrevu vyššia, tým kratšia bude výdrž na teplote. Ochladzovacia rýchlosť je približne 50 °C za hod. Ochladzovanie musí byť veľmi pomalé, aby sa zabránilo vzniku nových napätí v štruktúre.

➤ **Rekryštalizačné žihanie** sa využíva na obnovenie tvárnosti ocele po predchádzajúcom spevnení tvárnením za studena alebo pri nedostatočných teplotách tvárnenia za tepla. Zrná v smere tvárnenia sa predlžujú, narastá pevnosť a tvrdosť, klesá ťažnosť. Podstatou žihania je zníženie hustoty dislokácií, nukleácia a rast nových rovnoosých zŕn v pôvodnej deformovanej štruktúre materiálu. Rekryštalizačná teplota býva v rozsahu 550 až 700 °C, s výdržou 1 - 5 hodín. Teplota nesmie prekročiť teplotu nad A_1 , inak nastáva prekryštalizácia. Pokiaľ je cieľom získať jemnejšie zrno, volí sa nižšia teplota žihania (550 °C). Ak sa požaduje hrubozrnnejšia štruktúra (napr. pre ocele na transformátorové plechy), volí sa vyššia teplota žihania (cca. 700 °C). Ohrev aj chladenie sa uskutočňuje v ochrannnej atmosfére inertných

plynov, aby nenastala oxidácia povrchu súčiastok. Používa sa najmä ako medzioperačné žihanie, pri spracovaní niektorých nízkouhlíkových ocelí tvárnením za studena.

➤ **Protivločkové žihanie** sa aplikuje za účelom zníženia obsahu vodíka, ktorý spôsobuje vznik vnútorných trhlín v tvare vločiek. S klesajúcou teplotou vyvolá difundujúci vodík v štruktúre vznik napätí, ktoré môžu iniciovať vzniku trhlín. V niektorých prípadoch môžu tieto napätia spôsobiť miestne porušenie súdržnosti ocele. Teplota žihania sa pohybuje v rozmedzí 600 až 680°C s výdržou na teplote niekoľko desiatok hodín. Pri objemných výkovkoch môže byť celkový čas žihania až niekoľko dní. Ochladzovanie prebieha v peci (do 150 °C) a musí byť veľmi pomalé (~ 5 °C /hod.), aby vodík stačil difundovať na povrch.

➤ **Žihanie na odstránenie krehkosti po morení** sa používa na odstránenie vodíka, ktorý difundoval do povrchových vrstiev pri morení v kyselinách (odstraňovanie oxidických vrstiev z povrchu ocele). Nakoľko pri morení v kyselinách sa uvoľňuje vodík v atomárnom stave, sú postačujúce nižšie teploty žihania 200 až 300°C. Počas výdrže 4 až 10 hod. sa vodík uvoľní a tým sa odstráni vodíková krehkosť ocele

Žihanie s prekryštalizáciou - je charakteristické teplotami žihania vyššími než sú prekryštalizačné teploty A_1 , A_3 a A_{cm} .

➤ **Homogenizačné (difúzne) žihanie** má za cieľ odstrániť chemickú nehomogenitu odliatkov a výkovkov. Vyrovnanie chemického zloženia v priereze výrobkov sa uskutočňuje difúziou pri vysokých teplotách (200 až 300°C nad teplotou A_{c3} , t.j. 1100 až 1200°C). Doby izotermickej výdrže dosahujú až 20 hodín, preto je tento spôsob žihania ekonomicky náročný a robí sa len u kvalitných legovaných ocelí. Čas žihania sa volí podľa veľkosti odliatku a druhu ocele, zvyčajne býva v rozmedzí 8 až 18 hodín, v niektorých prípadoch môže dosiahnuť až niekoľko desiatok hodín. Pri vysokých teplotách sa zvyčajne na povrchu tvoria okuje a dochádza k oduhličeniu podpovrchových vrstiev. Zároveň hrozí nebezpečenstvo zhrubnutia zrna, preto zvyčajne po homogenizačnom žíhaní nasleduje normalizačné žihanie, ktorým docielime zjemnenie štruktúry.

➤ **Normalizačné žihanie** je najrozšírenejším druhom žihania s prekryštalizáciou. Jeho cieľom je zjemnenie a zrovnomenenie štruktúry. Spočíva v ohreve 30 – 50°C nad prekryštalizačné teploty A_3 u podeutektoidných ocelí alebo A_{cm} u nadeutektoidných ocelí, z izotermickej výdrže na týchto teplotách (1 – 4 hod.) a v nasledujúcom ochladení na vzduchu. Je základným druhom tepelného spracovania nízkouhlíkových ocelí obvyklých akostí. Štruktúra po normalizačnom žíhaní je jemnejšia s rovnomerne rozloženými zrnami a vyššou medzou pevnosti a súčasne dobrými plastickými vlastnosťami. Tento spôsob žihania je vhodný najmä pre uhlíkové a nízkolegované ocele. Pri podeutektoidných oceliach býva teplota žihania 30 až 50°C nad A_3 s výdržou na teplote 1 až 4 hod. (~ 1 hod. na 25 mm hrúbky) s voľným ochladzovaním na vzduchu. Pri oceliach s obsahom uhlíka vyšším ako 0,3 % prebieha ochladzovanie v peci, aby sa zabránilo vzniku štruktúry s vysokou tvrdosťou (vznik bainiticko-martenzitickej štruktúry). Pri nadeutektoidných oceliach sa normalizačné žihanie

používa veľmi zriedka. Ide o prípady, keď sa nevhodným spôsobom ochladzovania (napr. pomalým ochladzovaním z tvárniacej teploty) vylúčil cementit po hraniciach zŕn a vytvoril tzv. karbidické sieťovanie, čo vedie k zhoršeniu vlastností ocele pri dynamickom namáhaní. Normalizačná teplota je pri týchto oceliach $\sim 30^\circ\text{C}$ nad A_{cm} s ďalším rýchlym ochladením na 700°C . Ďalšie ochladzovanie už musí byť pomalé, aby sa austenit stihol premeniť na perlit a nenastalo zakalenie štruktúry, čo by viedlo k vzniku napätí a trhlín.

➤ **Izotermické žihanie.** Niektoré zliatinové ocele majú i po dlhodobom žíhaní na mätko príliš vysokú tvrdosť a ťažko sa obrábajú. V takom prípade môžeme použiť izotermické žihanie, ktoré pozostáva z krátkodobej austenitizácie a z nasledujúceho rýchleho ochladenia do perlitickej oblasti ($600 - 700^\circ\text{C}$) a izotermického rozpadu austenitu na globulárny perlit. Teploty austenitizácie pri sa volia tesne nad Ac_3 , (pri podeutektoidných oceliach) alebo nad Ac_1 (pri eutektoidných a nadeutektoidných oceliach). Ochladzovanie prebieha na vzduchu, čím sa dosiahne, že štruktúra ocele bude obsahovať jemnozrnný globulárny perlit s dobrými mechanickými vlastnosťami.

4.2.2 Kalenie a popúšťanie

Kalenie je ohrev ocele tesne nad prekryštalizačné teploty, výdrž na týchto teplotách (za účelom homogenizácie austenitu) a ochladenie hornou kritickou (alebo väčšou) ochladzovacou rýchlosťou. Štruktúru v takomto prípade tvorí martenzit a zvyškový austenit v celom objeme súčasti. Za zakalenú považujeme oceľ vtedy, ak má v štruktúre aspoň 50 % martenzitu. Vhodnosť ocelí na kalenie sa posudzuje pomocou pojmov kaliteľnosť a prekaliteľnosť.

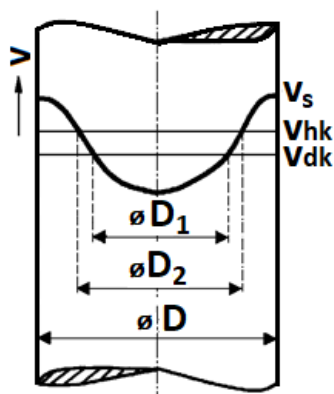
Kaliteľnosť je schopnosť ocele kalením dosiahnuť martenzitickú štruktúru s vysokou tvrdosťou. Kaliteľnosť závisí predovšetkým od obsahu uhlíka. So zvyšujúcim sa obsahom uhlíka sa tvrdosť po zakalení zvyšuje. Za dobre kaliteľné považujeme ocele s obsahom nad 0,35 %C. Ocele do 0,2 %C sú nekaliteľné (platí pre uhlíkové ocele). Vplyvom legujúcich prvkov sa táto spodná hranica obsahu uhlíka znižuje.

Prekaliteľnosť je schopnosť ocele zakalením dosiahnuť martenzitickú štruktúru do určitej hĺbky pod povrchom. Martenzitická štruktúra vznikne pri kalení iba v tých miestach prierezu, v ktorých je hodnota skutočnej rýchlosti ochladzovania (v_s) vyššia ako kritická rýchlosť ochladzovania (v_{hk}). Napr. pri kalení telesa tvaru valca o priemere D (obr.4.17) bude zakalená len vrstva pod povrchom vo vzdialenosti od $D/2$ až po $D_2/2$, kde platí, že $v_s > v_{hk}$.

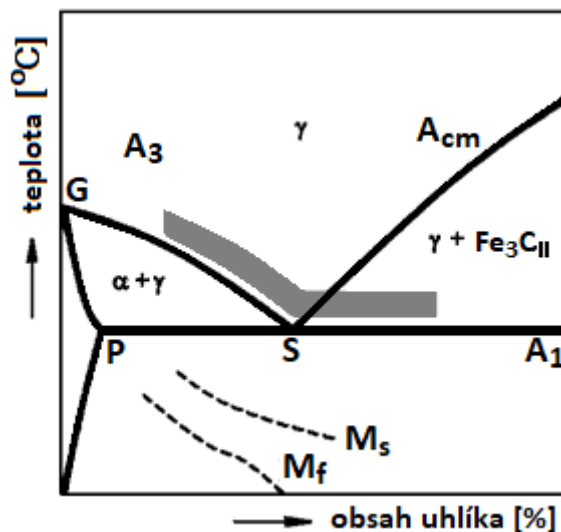
Prekaliteľnosť závisí od použitého ochladzovacieho prostredia a od chemického zloženia materiálu. S rastúcim obsahom uhlíka a legujúcich prvkov sa preto zväčšuje prekaliteľnosť.

Kaliace teploty pri podeutektoidných oceliach sa volia len $30 - 50^\circ\text{C}$ nad A_3 , aby nedošlo k nežiadúcemu rastu austenitického zrna (obr.4.18). U nadeutektoidných ocelí je správna kaliaca teplota $30 - 50^\circ\text{C}$ nad A_1 , pretože zvýšením teploty nad A_3 by sa v austenite zväčšil obsah uhlíka rozpustením sekundárneho cementitu. Po kalení z teploty nad A_1 , je štruktúra

tvorená okrem martenzitu (a malého podielu zvyškového austenitu) sekundárnym cementitom, ktorý je na rozdiel od zvyškového austenitu tvrdý.



Obr.4.17 Rýchlosť ochladzovania pri kalení valcového telesa



Obr.4.18 Kľúčové teploty uhlíkových ocelí

Kaliace prostredia slúžia na rýchle ochladenie súčiastok po ohreve. Požadujeme od nich aby ich ochladzovacia schopnosť pre daný materiál bola taká, aby $v_s > v_k$.

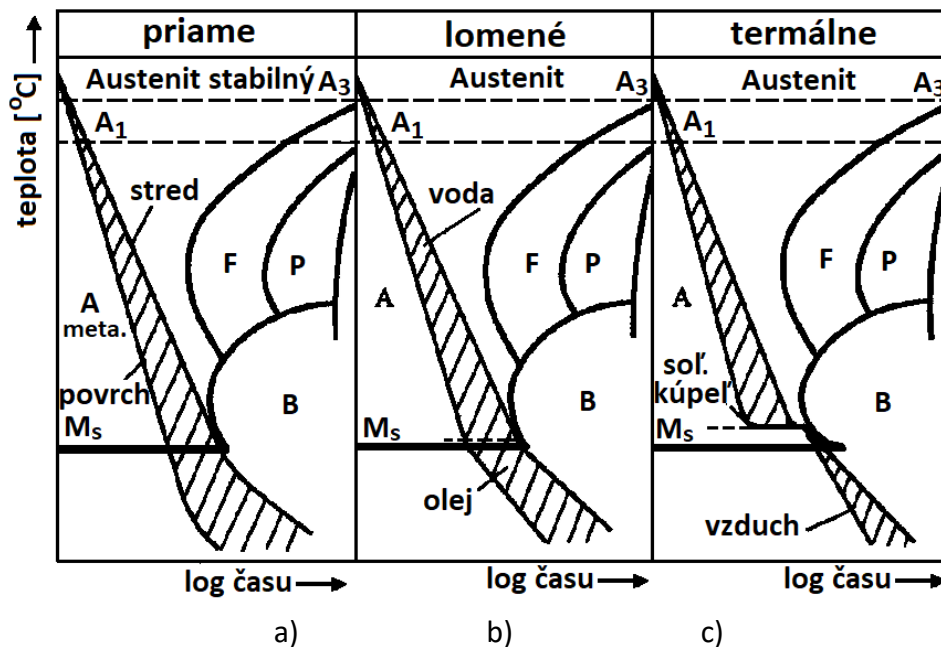
Ako kaliace prostredia sa používajú voda, vodné roztoky zásad, oleje, roztavené soli a kovy, vzduch, kovové dosky a pod. Ideálne kaliace prostredie by malo ochladzovať intenzívne v teplotnej oblasti minimálnej stability podchladeného austenitu a pomaly v oblasti teplôt martenzitickej premeny. Prvú požiadavku spĺňajú napr. voda a vodné roztoky. Tým umožňujú kaliť materiály s malou prekaliteľnosťou, ale práve tieto ochladzovacie prostredia nespĺňajú druhú podmienku. Následkom vysokej ochladzovacej schopnosti počas martenzitickej premeny vzniká vysoká hladina vnútorných napätí, ktoré výrazne zvyšujú riziko vzniku kľacich trhlín.

Druhy kalenia sú schematicky znázornené v diagramoch ARA na obr.4.19.

- **Priame kalenie.** Je najčastejšie používaným typom kalenia. Ochladzuje sa z teploty austenitizácie. Pri uhlíkových oceliach sa najčastejšie kalí do vody, pri zliatinových oceliach alebo pri drobných súčiastkach z uhlíkových ocelí do oleja. Pri tomto postupe kalenia vznikajú najväčšie vnútorné napätia, a teda i najväčšie nebezpečie vzniku kľacich trhlín.
- **Lomené (prerušované) kalenie.** Austenitizované súčiastky sa ochladzujú v dvoch prostrediach. Vo vode sa ochladzujú na teplotu až tesne nad teplotu M_s príslušnej ocele a potom sa súčiastky preložia do oleja aby sa martenzitická premena uskutočnila v priebehu pomalšieho ochladzovania. Lomené kalenie sa používa najmä pre súčiastky zložitého tvaru resp. rozmerné súčiastky, kde je vzhľadom na ich rozmery a ich veľkú prekaliteľnosť zvýšiť rýchlosť ochladzovania v intervale perlitickej

premeny, ale martenzitická premena musí prebehnúť pri veľmi pomalom ochladzovaní (napr. rozmerné zápustky). V procese kalenia je dôležitým faktorom realizovať presun medzi kaliacimi médiami v správnom okamihu.

- **Termálne kalenie.** Po austenitizácii sa súčiastky ochladia nadkritickou rýchlosťou na teplotu aspoň o 20°C vyššiu ako je teplota M_s príslušnej ocele, pri ktorej zotrúvajú po dobu potrebnú na vyrovnanie teplôt v ich priereze. Nasleduje ochladenie predmetu do oblasti martenzitickej premeny obyčajne na vzduchu. Prostredie v ktorom dochádza k vyrovnaniu teplôt v priereze súčiastok sa najčastejšie tvorí roztavenými soľami. Použitie termálneho kalenia znamená podstatné zníženie tepelných i štrukturálnych kaliacich napätí a teda aj minimálne deformácie súčiastok. Termálne kalenie sa realizuje u ocelí s vyšším obsahom zliatinových prvkov, najmä nástrojových ocelí.

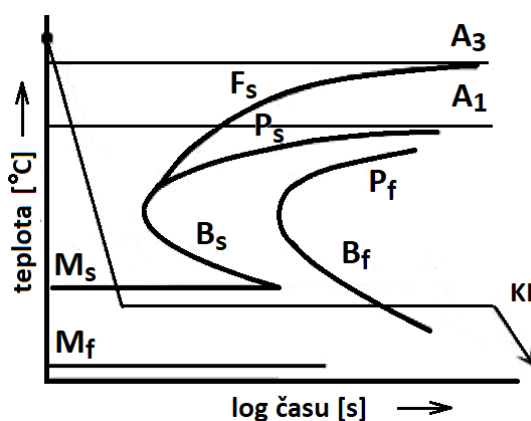


Obr.4.19 IRA diagramy vybraných druhov kalenia
a) priame kalenie, b) lomené kalenie c) termálne kalenie

- **Hysterézne kalenie** je spôsob kalenia, ktorý má znížiť napätie po kalení. V procese sa používa vyššia austenitizačná teplota, čo má za následok väčšiu homogenizáciu austenitu a zároveň zhrubnutie austenitických zŕn, čo spôsobí zníženie kritickej ochladzovacej rýchlosti a zvýšenie prekaliteľnosti. Použité teploty ohrevu sú vyššie ako pri priamom kalení. Ohrev na 980°C a následný pokles pri kalení nadeutektoidných ocelí na teplotu pri ktorej nastáva spomalenie chladnutia a to v intervale 800°C - 750°C a až následne a až pod týmto intervalom sa súčiastka kalí do vody alebo do oleja. Podobný postup je aj u padeutektoidných ocelí až na interval

spomalenia chladnutia, ktorý je medzi 670 °C až 620°C s následným rýchlim ochladením v oleji resp. vo vode.

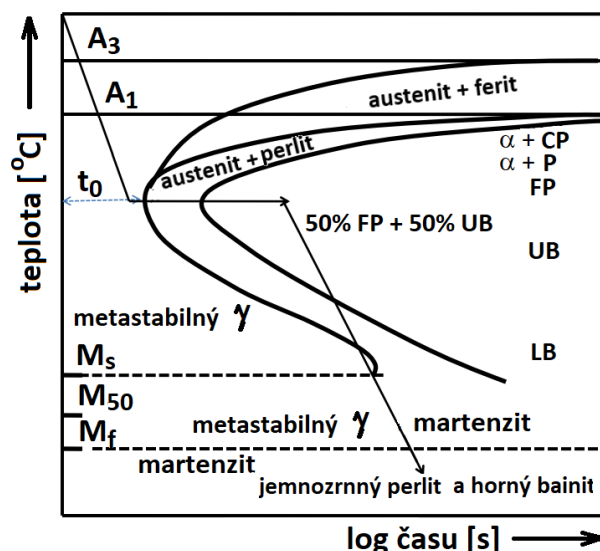
- **Kalenie izotermické** sa používa pri oceliach s nižším obsahom uhlíka. Teplotu izotermickej premeny možno znížiť tesne pod M_s (obr.4.20). Výslednú štruktúru už teda nebude tvoriť čistý bainit, ale zmes bainitu, martenzitu a zvyškového austenitu. Cieľom izotermického kalenia je získať mechanické vlastnosti súčiastky priamo po kalení, bez nutnosti následného popúšťania. Oproti kalenej a popustenej súčiastke má súčiastka po izotermickom kalení vyššiu húževnatosť a medzu únavy. Redukované sú tiež vnútorné napätia. V procese kalenia sa realizuje ohrev na kaliacu teplotu a zotrvanie v soľnom kúpeli, resp. kúpeľoch z roztavených kovov na teplote zodpovedajúcej vzniku bainitickej štruktúry. Ochladenie na teplotu rozpadu austenitu musí byť rýchle aby nedošlo k perlitickej premene. Používa sa pri výrobe píl, lopát, náradia a pod.



Obr.4.20 Pribeh izotermického kalenia (KI)

- **Patentovanie** sa používa ako medzioperačné spracovanie drôtov s vyšším obsahom uhlíka pri ťahaní za studena. Je to najstarší spôsob izotermického kalenia, vykonávaný už pred objavením podstaty izotermického rozpadu austenitu (obr.4.21). Zaustenitizovaný drôt prechádza oloveným kúpeľom s teplotou 400 až 550 °C a následne chladne na vzduchu. Výsledná štruktúra je pevná, húževnatá, tvorená zmesou jemného perlitu a bainitu. Požadovanou výslednou štruktúrou je bainit, ktorý vzniká pri vyšších teplotách alebo veľmi jemný lamelárny perlit. Takáto štruktúra umožňuje výrazné redukcie prierezu pri ďalšom tvárnení. Patentovanie je kontinuálne a je zaradené priamo do linky drôtoťahu.

Vlastnosti ocele sa po kalení výrazne menia. Okrem tvrdosti sa výrazne zvyšuje aj pevnosť, klesá však ťažnosť a húževnatosť. Pre konštrukčné použitie sú však ocele v stave kalenom nevhodné pre svoju krehkosť, preto po kalení na martenzit prakticky vždy nasleduje popúšťanie, ktoré má prebehnúť ihneď po kalení.



Obr.4.21 Patentovanie nadeutektoidnej ocele

γ - austenit, α – ferit, CP – hrubozrnný perlit, P – perlit, FP – jemnozrnný perlit, UB – horný bainit, LB – dolný bainit, M - martenzit, M_s – teplota martenzit štart, M_{50} – teplota pri obsahu 50% martenzitu v štruktúre, M_f – teplota martenzit finiš, t_0 – minimálna inkubačná doba

Popúšťanie

Popúšťanie je podľa STN EN ISO 4885 klasifikované ako ohrev zakalenej ocele na popúšťacie teploty pod A_1 , výdrž na tejto teplote 30 minút až 10 hodín a následné pomalé ochladenie. Ohrev na popúšťaciu teplotu musí byť rovnomerný, aby nevznikli nové vnútorné napätia. Vznikajú pri ňom štruktúry bližšie rovnovážnemu stavu. Tento rozpad je spojený so zmenami mechanických a fyzikálnych vlastností.

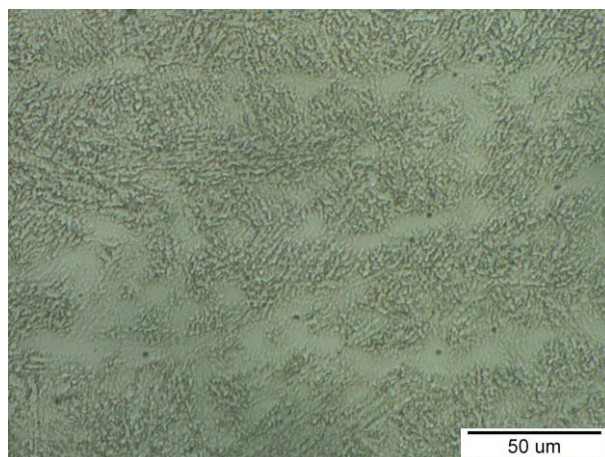
Procesy popúšťania rozdeľujeme z technologického hľadiska na nízko-teplotné popúšťanie do teploty cca. 350°C, pri ktorom sa podstatne zníži krehkosť ocele, ale ocel si ešte zachováva vysokú tvrdosť a na vysoko-teplotné popúšťanie, t.j. pri teplotách zvyčajne nad 350°C. Premeny, ku ktorým dochádza pri popúšťaní uhlíkových ocelí zakalených na martenzit, môžeme rozdeliť do štyroch etáp:

1. Vylučovanie hexagonálnych ϵ -karbidov z martenzitu. Martenzit má najväčší merný objem zo všetkých štruktúr, ktoré sa môžu vyskytovať v oceli. V prvom štádiu popúšťania dochádza k zmenšovaniu objemu martenzitu, ktoré začína už pri teplotách okolo 20°C. Po prvej etape popúšťania tvorí štruktúru kubický martenzit, nestabilné ϵ -karbidy a zvyškový austenit. Tieto premeny prebiehajú zvyčajne v rozmedzí teplôt 100-200°C. Výsledkom prvej etapy popúšťania je mierne zníženie tvrdosti ocele a zmenšenie jej merného objemu.

2. V druhom štádiu (200 – 300°C) dochádza k rozpadu zvyškového austenitu na ferit a karbidy. Táto reakcia je podstate pokračovaním procesov I. etapy tým, že sa znížia napätia, spôsobujúce existenciu zvyškového austenitu. Premeny sa ďalej prejavujú zvýšením merného objemu ocele. Rozpadom zvyškového austenitu sa čiastočne zvyšuje tvrdosť ocele alebo sa aspoň spomaľuje pokles tvrdosti pri intenzívnejšom rozpade martenzitu.

3. Vznik feriticko-karbidickej zmesi. V treťom štádiu popúšťania (nad 300°C) sa metastabilný ϵ -karbid transformuje na cementit a nízkouhlíkový martenzit sa mení na rovnovážny ferit. Výslednou štruktúrou je húževnatá, jemná feriticko-cementitická zmes - sorbit ($F + Fe_3C$) - obr.4.22.

4. Štvrté štádium popúšťania (nad asi 500°C) zahŕňa v prípade uhlíkových ocelí **hrubnutie častíc cementitu a sferoidizáciu a hrubnutie feritických zŕn**. Hrubá sorbitická štruktúra vznikajúca pri najvyšších popúšťacích teplotách (pod A_1) sa nazýva zrnitý perlit. Jeho tvrdosť je nižšia ako tvrdosť lamelárneho perlitu.



Obr.4.22 Sorbitická mikroštruktúra ocele 41CrMo4 EN 10083-1-91

Nízkoteplotné popúšťanie sa aplikuje na nástroje, ktoré okrem vysokej pevnosti musia odolávať dynamickým rázom (napr. zápustky pre kovanie, valce kontinuálneho odlievania ocele a teplej valcovne a pod.) Pre zachovanie vysokej tvrdosti nástrojov sa pri popúšťaní používajú teploty do 150 °C. Vysokoteplotné popúšťanie sa aplikuje pre vysokonamáhané súčiastky ako napr. kľukové hriadele, pružiny, torzne tyče a pod.

Popúšťacia krehkosť sa prejaví poklesom húževnatosti, ale najmä poklesom prechodovej teploty. Rozoznávame dva druhy popúšťacej krehkosti. Prvou z nich je nevratná (nízkoteplotná) popúšťacia krehkosť, ktorá znižuje húževnatosť ocele pri popúšťaní ocele v teplotnej oblasti 300÷350 °C. Za príčinu jej vzniku sa považuje precipitácia cementitu po hraniciach pôvodných austenitických zŕn - vytvorenie cementitického sieťovania. K zabráneniu jej tvorby možno čiastočne predísť len tepelno-mechanickým spracovaním ocele. Druhou z nich je vratná (vysokoteplotná) popúšťacia krehkosť, ktorá sa najintenzívnejšie rozvíja pri teplotách 500÷550 °C, alebo priamo pri popúšťaní v tomto kritickom teplotnom intervale, alebo pri pomalom ochladzovaní z vyšších popúšťacích teplôt. Prejavuje sa najmä zvýšením prechodovej teploty. Príčinou rozvoja vratnej popúšťacej krehkosti je segregácia niektorých prvkov (P, Sn) po hraniciach pôvodných austenitických zŕn. Možno ju odstrániť novým popúšťaním ocele, pričom v oblasti teplôt vysokoteplotnej popúšťacej krehkosti sa prejde zrýchlene.

Zošľachťovanie je najdôležitejším postupom tepelného spracovania konštrukčných ušľachtilých ocelí. Skladá sa z **kalenia** na martenzit **a** nasledujúceho **popúšťania**. Výslednou štruktúrou po zošľachťovaní je sorbit. Sorbitická štruktúra je charakteristická veľmi výhodnou kombináciou pevnostných a tvárných vlastností, pričom vzájomné relácie medzi pevnostnými a tvárnymi charakteristikami je možné regulovať voľbou vhodnej teploty popúšťania. V porovnaní s východiskovým stavom sa zošľachťovaním mení predovšetkým pomer R_e/R_m , ktorý je pred kalením cca. 0,50 a po zošľachťovaní až 0,9.

Kalenie a nízkoteplotné popúšťanie je typickým cyklom tepelného spracovania nástrojov a ďalších súčiastok (valivé ložiská), kde je požadovaná vysoká tvrdosť.

Povrchové kalenie sa realizuje u súčiastok, ktoré majú byť odolné proti dynamickému namáhaniu, pri súčasnej odolnosti na oter. Tieto požiadavky sú splnené húževnatým jadrom a tvrdým povrchom súčiastky. Tvrdý povrch a súčasne húževnaté jadro je možné dosiahnuť povrchovým kalením alebo chemicko-teplným spracovaním.

Povrchové kalenie spočíva v ohreve súčiastky a nasledujúcom ochladení takým spôsobom, aby martenzitická štruktúra vznikla len v určitej vrstve na povrchu súčiastky. Podľa spôsobu ohrevu je možné povrchové kalenie rozdeliť na povrchové kalenie plameňom, indukčné a laserom.

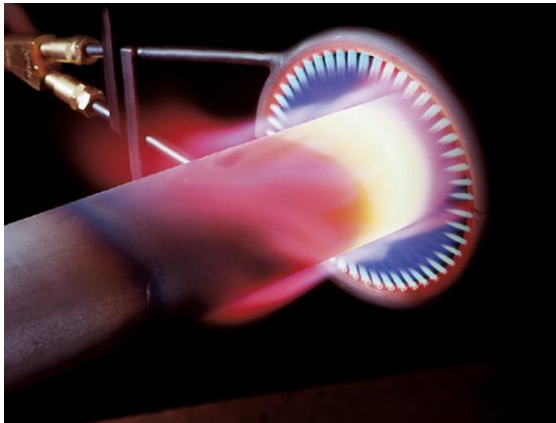
Povrchové kalenie plameňom - ohrev súčiastky sa robí plameňom, vzniknutým spaľovaním acetylénu, svietiplynu, propánu a pod., v horákoch rôznych konštrukcií (obr.4.23). Hrúbka zakalenej vrstvy sa dá regulovať v širokých medziach napr. dobou ohrevu, vzdialenosťou horáku od povrchu súčiastky, pomerom kyslíka a spaľovaného plynu a pod.

Povrchové kalenie indukčné - povrch súčiastok sa ohrieva indukovanými prúdmi strednej a vysokej frekvencie. Súčiastka sa vkladá do induktora, čo je vlastne medená rúrka v tvare jedného alebo niekoľkých závitov, zvnútra chladená vodou (obr.4.24). Induktor je napájaný vysokofrekvenčným prúdom ($f = 1 - 1000$ kHz), ktorý na povrchu telesa indukuje vírivé prúdy. Vzniká tým Joulovo teplo ktoré ohrieva tenkú povrchovú vrstvu. Tento spôsob povrchového kalenia sa používa najmä pri sériovej výrobe.

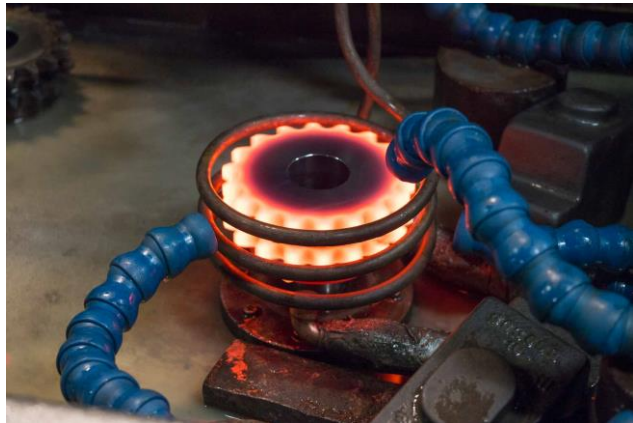
Povrchové kalenie laserom – používa sa u ocelí a zliatin s obsahom $C = 0,15 - 0,5$ %. Na povrchu vzniká jemnozrnná štruktúra s vysokou tvrdosťou hrúbky $0,2 - 1,2$ mm. Používa sa pre značne namáhané súčiastky, napr. boky ozubených kolies, kľukové a vačkové hriadele, steny valcov motorov, hrany foriem pre vstrekovanie plastov a rezné hrany nástrojov (obr.4.25 a 4.26). Umožňuje zvýšenie životnosti súčastí o desiatky percent.

Uvedenými spôsobmi spracovania vznikne martenzitická štruktúra s vysokou tvrdosťou iba v povrchovej vrstve, ktorá bola austenitizovaná. Pod touto vrstvou je zmesná štruktúra, tvorená feritom a martenzitom. Východisková štruktúra jadra súčiastky ostáva pri povrchovom kalení zachovaná. Hrúbka zakalenej vrstvy sa volí na základe veľkosti súčiastky, veľkosti a druhu namáhania a dosahuje cca $1 - 6$ mm. Deformácie, vzniknuté kalením, sú

malé. Používa sa napr. pre ozubené kolesá väčších rozmerov, súčasti motorových vozidiel, obrábacích strojov, hriadele, nástroje a pod.



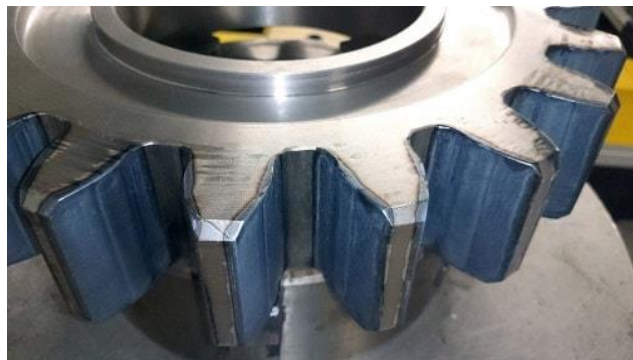
Obr.4.23 Povrchové kalenie plameňom



Obr.4.24 Indukčné kalenie zubov bagra



Obr.4.25 Povrchové kalenie hriadeľa laserom



Obr.4.26 Laserom kalený povrch ozubenia

4.2.3 Chemicko-tepelné spracovanie

Týmto spôsobom spracovania môžeme dosiahnuť povrchovú tvrdosť pri súčasnom zachovaní húževnatého jadra u súčiastok podobne ako pri povrchovom kalení. Rozdiel medzi týmito dvomi spôsobmi spočíva v tom, že pri chemicko-tepelnom spracovaní je získanie povrchovej tvrdosti spojené so zmenami chemického zloženia povrchu. Okrem povrchovej tvrdosti môžeme získať aj iné priaznivé vlastnosti povrchu ako napr. zvýšenie medze únavy, korozivzdornosti, žiaruvzdornosti a pod.

Zmeny chemického zloženia povrchu sa dosahujú jeho difúznym nasýtením niektorými prvkami. Ak ide o sýtenie povrchovej vrstvy uhlíkom, hovoríme o cementovaní, dusíkom o nitrídaní. Kombináciou obidvoch spôsobov dostávame tzv. karbonitridovanie a nitrocementovanie. Z ďalších prvkov to môžu byť kovy napr. chróm, potom dostávame tzv. chrómovanie, alebo kremík - kremíkovanie. Z nekovových prvkov sa ďalej používa síra pri sulfonitridovaní a síra v kombinácii s dusíkom pri sulfonitridovaní.

Cementovanie - je najrozšírenejší a doposiaľ najúčinnnejší spôsob chemicko-tepelného spracovania vysokonamáhaných strojných súčastí, ako sú ozubené kolesá, čapy, hriadele a pod. Na cementovanie sa používajú uhlíkové aj legované ocele s obsahom 0,1 - 0,25 %C. Počas cementovania obsah uhlíka na povrchu stúpne na 0,8 - 1,4 %. Sýtenie sa robí pri teplotách nad A_{c3} , t.j. medzi 850 - 950°C. Po cementovaní nasleduje kalenie, čím sa na povrchu vytvorí martenzit a v jadre vzhľadom na nízky obsah uhlíka vzniká húževnatá feriticko-perlitická štruktúra. Hrúbka cementačnej vrstvy sa pohybuje do 2 mm.

Samotný cementačný proces sa môže uskutočňovať buď v prostredí pevnom (zmes dreveného uhlia a uhličitanu bárnateho), alebo v kvapalnom prostredí (taveniny solí, ktorých funkčnou zložkou sú alkalické kyanidy). Najmodernejším spôsobom cementovania je cementovanie v plynnom prostredí. U nás je najviac používaný spôsob prípravy cementačnej atmosféry krakovaním kvapalných uhľovodíkov priamo v priestore pece. Pri tomto spôsobe sa do priestoru pece privádza vhodná kvapalina, ktorá kvapká na rozžeravenú niklovú doštičku, na ktorej sa rozkladá za vzniku cementačnej atmosféry. Tento systém známy pod menom "Monocarb", používa napr. cementačnú kvapalinu, ktorá sa skladá zo 40 % terpentínového oleja, 30 %, acetónu, 30 % bezvodého etylalkoholu. Rýchlosť cementovania v plynnom prostredí je asi 0,1 mm/hod. Po kalení nasleduje u cementovaných ocelí nízkoteplotné popúšťanie pri teplotách 160 - 180°C.

Nitridácia - je princíp povrchového vytvrdzovania ocelí, pri ktorom sa povrch ocele nasycuje dusíkom za tvorby nitridov železa a legujúcich prvkov prítomných v oceli. Tvrdá vrstva na povrchu vzniká už v priebehu nitridovania. Po nitridovaní teda už nenasleduje tepelné spracovanie. Nitridovanie sa uskutočňuje obyčajne na oceliach zošľachtených na vysokú pevnosť, pričom teplota nitridovania nemá prekročiť teplotu popúšťania, aby nedošlo k zníženiu pevnostných vlastností jadra. Teplota nitridovania sa pohybuje okolo 500°C. Rýchlosť nitridovania je asi 10x menšia ako rýchlosť cementovania. Maximálne hrúbky bývajú v rozmedzí 0,1- 0,5 mm, čo možno dosiahnuť za dobu 12 - 50 hodín.

Nasycovanie povrchu ocele sa uskutočňuje atomárnym dusíkom, ktorý vzniká disociáciou čpavku podľa rovnice:



Kvalitná nitridačná vrstva sa vyznačuje okrem vysokej tvrdosti, odolnosťou proti opotrebeniu, korózii a aj zvýšenou medzou únavy.

Nitrocementovanie je postup chemicko-tepelného spracovania v prostrediach obsahujúcich okrem aktívneho uhlíka aj dusík. Realizuje sa dvoma základnými postupmi:

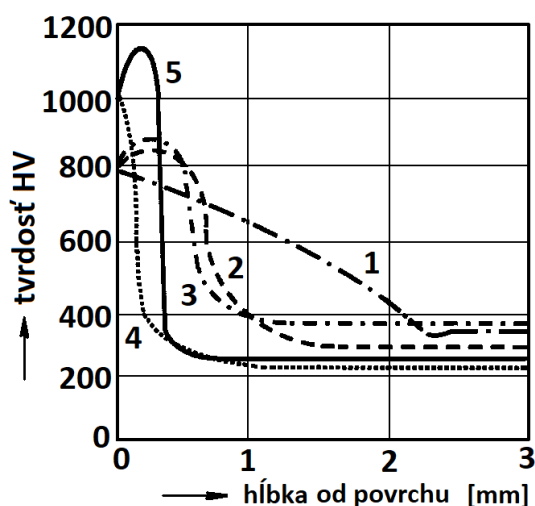
- nasycovaním povrchu súčiastky v kyanidových soľných kúpeľoch,
- nasycovaním povrchu súčiastky v plynných atmosférach.

V oboch prípadoch sa používajú nízkouhlíkové ocele, pretože rozhodujúcim pochodom na povrchu súčiastky je nasycovanie uhlíkom a požadované vlastnosti povrchu a jadra súčiastky sa dosahujú po nasledujúcom tepelnom spracovaní. Nitrocementačné teploty

sú nižšie ako cementačné (820 – 880 °C), pretože vplyvom dusíka dochádza k rýchlejšiemu rastu nasýtenej vrstvy. Je tu preto menšie nebezpečie rastu austenitického zrna a môžu sa zvyčajne použiť jednoduchšie postupy konečného tepelného spracovania. Nitrocementovanie v kyanidových kúpeľoch je nevýhodné z hľadiska bezpečnosti práce (kyanidy sú jedovaté).

Karbonitridovanie - na rozdiel od nitrocementovania prevažuje vo vrstve dusík. Vytvára sa tvrdá vrstva karbonitridov bez nasledujúceho kalenia, podobne ako pri nitridovaní. Robí sa v atmosfére čiastočne disociovaného amoniaku s prídavkom uhľovodíkov pri 570 až 620°C. Na povrchu súčastí sa vytvorí vrstva karbonitridu s hrúbkou asi 40 µm. Pod ňou je do hĺbky cca. 1 mm ferit obohatený dusíkom. Ochladením do oleja (priamo z karbonitridačnej teploty) vznikne presýtený tuhý roztok, ktorý sa samovoľne vytvrdí vylúčením jemných častíc nitridu železa. Povrchová vrstva má tvrdosť až 1000 HV a je odolná proti zadieraniu, opotrebeniu a zvyšuje medzu únavy až o 100 %.

Väčšina postupov chemicko-tepelného spracovania má podobný účinok, t.j. vytvorenie tvrdej, oteruvzdornej povrchovej vrstvy. Tieto vrstvy nie sú rovnako hrubé a nemajú rovnakú tvrdosť (obr.4.27). Najtvrdšie, najrovnomernejšie, ale aj najtenšie sú nitridačné a karbonitridačné vrstvy. Sú vhodné vtedy, ak je súčiastka namáhaná na oter, ale nie sú vhodné pri príliš veľkých merných tlakoch (nebezpečie prelamovania vrstvy).



Obr.4.27 Priebeh tvrdosti v rôznych vrstvách: 1– povrchové kalenie, 2 – cementovanie, 3 – nitrocementovanie, 4 – karbonitridovanie, 5 – nitridovanie

Cementované a nitrocementované vrstvy sú menej tvrdé, ale podstatne hrubšie. Dobré odolávajú opotrebeniu a znášajú stredné merné tlaky. Najhrubšie, ale pomerne nerovnomerné sú povrchovo kalené vrstvy. Z ekonomického hľadiska je najvýhodnejší spôsob povrchové kalenie, najnáročnejšie je nitridovanie.

Zariadenia na tepelné spracovanie a chemicko-tepelné spracovanie sa delia podľa:

1) zdrojov tepla:

- a) elektrické odporové pece
- b) palivové pece
 - na plyné palivo (obvykle zemný plyn, CH₄, propán)
 - na kvapalné palivo (mazut, nafta, oleje, benzín, alkohol)
 - na tuhé palivo (uhlie, drevo, koks) - minimálne využitie

2) prostredia, pôsobiaceho na vsádzku:

- a) vzduchové pece
 - oxidačné prostredie
- b) vákuové pece
 - neutrálne vákuum
 - aktívne vákuum
- c) pece s riadenými atmosférami
 - neutrálne plyny alebo zmesi plynov
 - aktívne zmesi plynov
- d) roztavené soľné kúpele
 - neutrálne
 - aktívne
- e) fluidné pece
 - neutrálna fluidná vrstva
 - aktívna fluidná vrstva

3) hlavných konštrukčných znakov:

- a) komorové pece
- b) šachtové pece
- c) zvonové (poklopové) pece
- d) priebežné pece
- e) kúpeľové (téglikové) pece
- f) vozové pece
- g) karuselové pece
- h) štrbinové pece
- i) viacúčelové pece
- j) pece s rotujúcou retortou (bubnové pece)

4) toku materiálu:

- a) statické zariadenia
 - komorová pec (zväčša klasická atmosféra, pričom vznikajú okuje a sú potrebné veľké prídavky)
 - vozové pece - sú určené pre veľkorozmerné súčiastky
 - muflové pece (mufla = plynotesná nádoba, pričom články nie sú v styku s prostredím pece)
 - šachtové pece - súčiastky sa nedeformujú, špeciálnou šachtovou pecou je prípad hĺbinnej pece
 - zvonové (poklopové, elevátorové) pece
- b) priebežné zariadenia
 - krokové pece
 - vozíkové pece
 - narážacie pece (vsádzka je umiestnená na roštach, ktoré sa posúvajú)

- pásové pece (je určená pre malorozmerné súčiastky - nože, príbory ...)
- valčekové pece
- závitovkové pece (používajú sa na výrobu pružín)
- rotačné (bubnové) pece - vsádzka sa vo vnútri bubna premiešava

Pece môžu byť z konštrukčného hľadiska:

a) statické zariadenia

Solné pece - používali sa na tepelné spracovanie rýchlorezných ocelí. Tieto pece sú ekologicky závadné a z tohto dôvodu sa v súčasnosti už nepoužívajú. Zväčša sa jednalo o roztavené soli (chloridové – BaCl_2 , dusičnanové – NaNO_3 , kyanidové). Súčiastky sa ohrievali priamym ohrevom - prechodom elektrického prúdu cez soľ.

Viacúčelové pece - v jednej komore je možné vykonávať viac úkonov, pričom sa používajú riadené atmosféry.

Vákuové pece - vákuum slúži ako ochranný prostriedok pred povrchovou oxidáciou súčiastok. Pri vysokom vákuu hrozí nebezpečenstvo odparovania niektorých prvkov zo zohrievaného materiálu. Pri ochladzovaní sa používa pretlak inertného plynu (N_2) - 0,6 MPa.

b) priebežné zariadenia

Linky - využíva sa riadená atmosféra vyrobená spaľovaním CH_4 . Spaľovanie môže byť dokonalé, alebo nedokonalé.

5) podľa pracovnej teploty:

- nízkoteplotné (žíhacie, popúšťacie, nitrídačné, vytvrdzovacie)
- vysokoteplotné (kaliace, cementačné, žíhacie)

6) podľa použitej atmosféry:

- bez ochrannej atmosféry (vzduchové)
- riadená atmosféra (exo-, endo-, nitrídačná atmosféra)
- inertná atmosféra (N_2 , Ar)
- vákuové

7) podľa technológie tepelného spracovania:

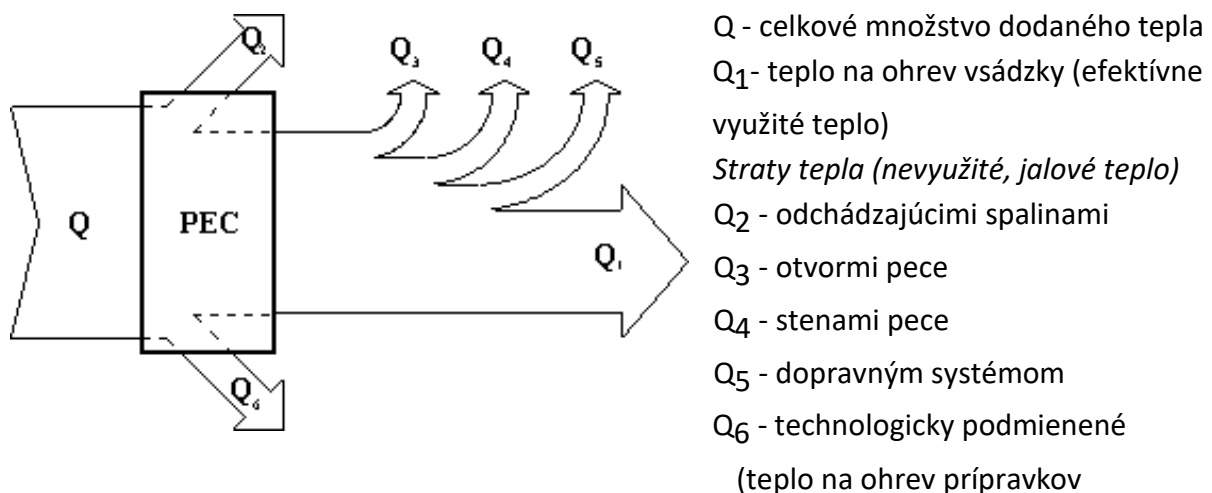
- žíhacie
- kaliace
- popúšťacie
- cementačné

- nitridačné
- kombinované (viacúčelové)
- špeciálne zariadenia (laser, indukčný ohrev, plazma, elektrónový a iónový lúč)

8) podľa stupňa automatizácie a regulácie (sleduje sa teplota, tlak, uhlíkový potenciál, čas, rýchlosť pohybu vsádzky):

- bez regulácie
- s reguláciou na konštantnú hodnotu
- s reguláciou na premenlivú hodnotu - programovanie

Energetická bilancia viacúčelového pecného agregátu s riadenou atmosférou (Obr.4.28)



Obr.4.28 Energetická bilancia pece roštov)

Energetická účinnosť procesu

$$\eta = \frac{Q_1}{Q} \cdot 100 \quad (\%)$$

Pre viacúčelovú komorovú pec s riadenou atmosférou platí

$$\eta = 15$$

- ak hmotnosť prípravkov a roštov = hmotnosti vsádzky.

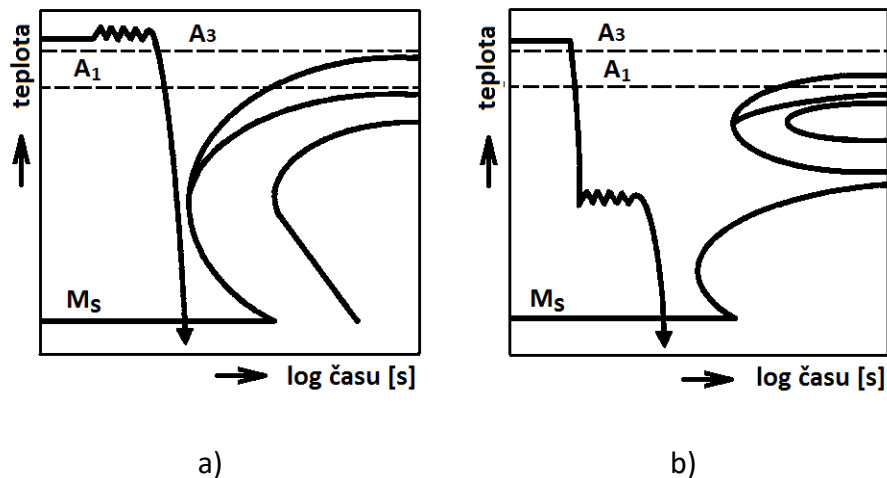
4.2.4 Termomechanické spracovanie - TMS

Využíva priaznivý vplyv mechanického spracovania plastickou deformáciou za tepla (jemnozrnná štruktúra, množstvo porúch) a následného tepelného spracovania. Spôsoby TMS sa najčastejšie rozdeľujú podľa teploty tvárnenia na:

- **Vysokoteplotné termomechanické spracovanie (VTMS)** – oceľ sa tvárni nad A₃ (max. 1000 °C). Stupeň deformácie dosahuje 40 – 90 %. V silne deformovaných zrnách

prebieha zotavovanie a rekryštalizácia. Skôr než dôjde k rastu zŕn sa oceľ podchladí pod T_{rekr} austenitu a zakalí s následným popúšťaním (obr.4.29a). Vznikne tým veľmi jemný martenzit. U nízkolegovaných ocelí sa dá dosiahnuť pevnosť až 2500 MPa.

- **Nízkoteplotné termomechanické spracovanie (NTMS)** – používa sa u stredne a vysokolegovaných oceliach. Po austenitizácii nastáva rýchle ochladenie do oblasti vysokej stability austenitu (500 – 600 °C) a tvárnenie pri tejto teplote. Nasleduje kalenie a nízkoteplotné popúšťanie (obr.4.29b). Vysoká hustota porúch a rozdrobenie zŕn vedie k vzniku extrémne jemného martenzitu s pevnosťou až 3000 MPa pri pomerne dobrej húževnatosti.



Obr.4.29 Spôsoby termomechanického spracovania:

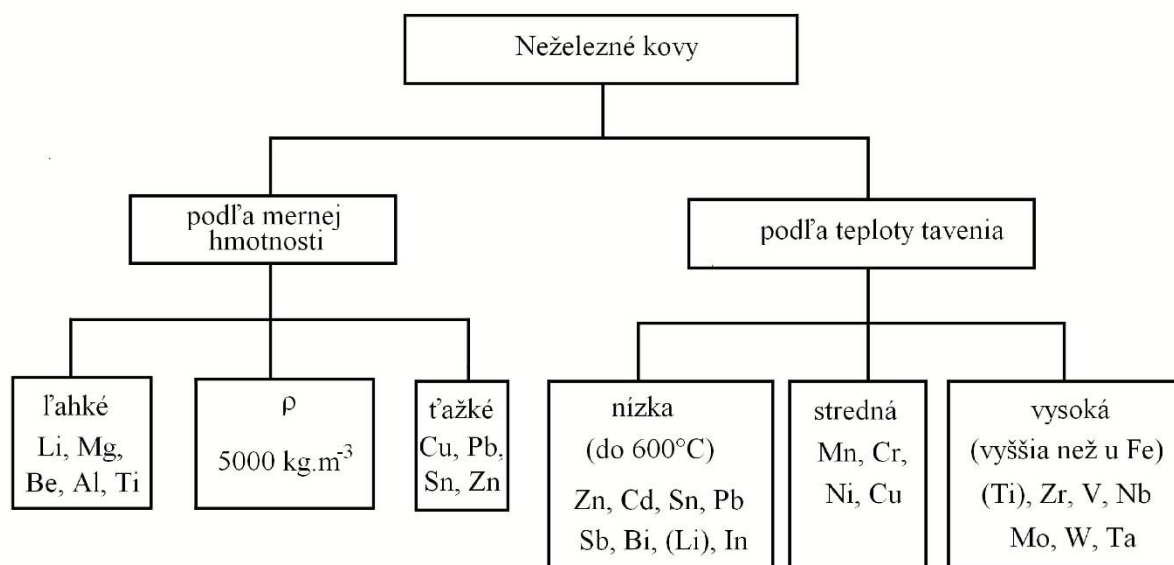
- a) Vysokoteplotné termomechanické spracovanie (VTMS), b) – Nízkoteplotné termomechanické spracovanie (NTMS)

5 NEŽELEZNÉ KOVY A ICH ZLIATINY

Neželezné kovy sú všetky čisté kovy, okrem železa. Svoj technický význam získali vďaka špecifickým vlastnostiam, ku ktorým patria vysoká elektrická a tepelná vodivosť (meď, hliník), malá merná hmotnosť (hliník, horčík, titán), vysoká teplota tavenia (volfrám), špeciálne fyzikálne vlastnosti, odolnosť proti korózii a pod.

Neželezné kovy a ich zliatiny sa využívajú tam, kde ich náhrada dostupnejšími materiálmi nie je možná.

Neželezné kovy rozdeľujeme podľa mernej hmotnosti na ľahké kovy a ťažké kovy, obr.5.1. Hranicou medzi nimi je merná hmotnosť 5000 kg.m^{-3} .



Obr.5.1 Rozdelenie neželezných kovov

Ako konštrukčný materiál pri výrobe leteckej a dopravnej techniky alebo iných konštrukčných častí, pri ktorých sa požaduje nízka merná hmotnosť, sa významne uplatňujú zliatiny ľahkých neželezných kovov, Tab.5.1.

Medzi významné konštrukčné materiály patria predovšetkým zliatiny hliníka, horčíka a titánu. Hliník a jeho zliatiny sčasti nahrádzajú niektoré neželezné kovy, ocele a drevo. Titán a jeho zliatiny, ktorých spotrebu zabezpečujeme predovšetkým dovozom, sa používajú hlavne v letectve, ale postupne našli uplatnenie aj v ostatných priemyselných odvetviach. Zliatinám horčíka sa v poslednej dobe v oblasti výskumu venuje veľká pozornosť a ich uplatnenie sa výrazne zväčšuje. Medzi najprogresívnejšie prísadové kovy v súčasnosti patrí berýlium a vôbec najľahší kov – lítium.

Tabuľka 5.1 Ľahké neželezné kovy

Kov	Merná hmotnosť [g.cm ⁻³]	T _m [°C]	Poznámka
Titán	4,50	1667	veľmi vysoká medza tečenia
Ytrium	4,47	1510	dobrá pevnosť aj plasticosť, deficitné
Bárium	3,50	729	
Scandium	2,99	1538	deficitné
Hliník	2,70	660	
Stroncium	2,60	770	reaktívne na vzduchu aj vo vode
Cézium	1,87	28,5	neodoláva tečeniu, nízka T _m , veľmi reaktívne na vzduchu aj vo vode
Berýlium	1,85	1287	ťažko obrobiteľné, veľmi jedovaté
Horčík	1,74	649	
Vápnik	1,54	839	málo odolné tečeniu, nízka teplota tavenia, vysoká reaktívnosť na vzduchu aj vo vode
Rubídium	1,53	39	
Sodík	0,97	98	
Draslík	0,86	63	
Lítium	0,53	181	

Ostatné neželezné kovy patria podľa kritéria mernej hmotnosti medzi ťažké neželezné kovy. Ide o skupinu prvkov, ktorá sa často delí na podskupiny podľa rôznych kritérií. V Tab.5.2 sú rozdelené vybrané kovy podľa teploty tavenia – na ľahkotaviteľné, so strednou teplotou tavenia a ťažkotaviteľné). Ako konštrukčné materiály sa uplatňujú predovšetkým zliatiny Cu, Ni, Co a ľahkotaviteľných kovov Sn, Zn a Pb.

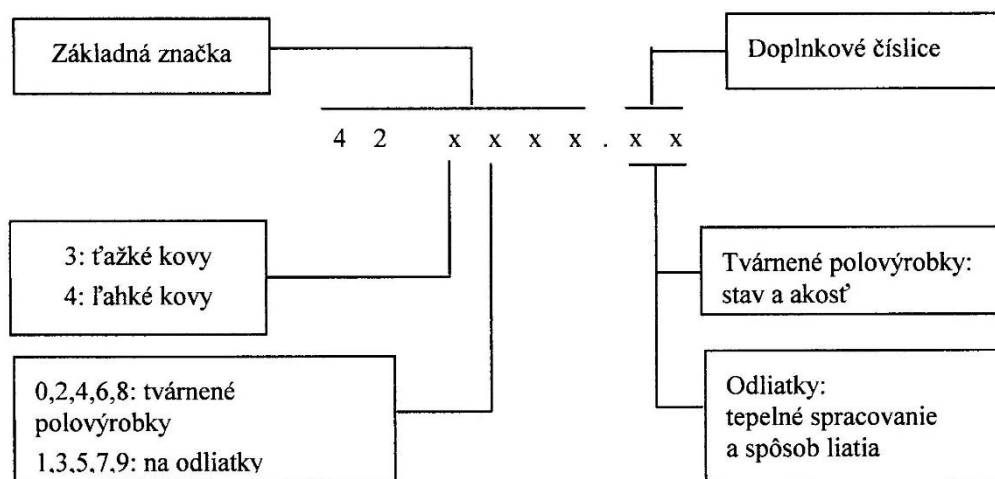
Tabuľka 5.2 Vybrané ťažké neželezné kovy

Kov	Merná hmotnosť [g.cm ⁻³]	T _m [°C]	Elektrická vodivosť [m/(Ω.mm ²)]
Cín	7,3	231,9	8,7
Olovo	11,34	327,4	4,9
Zinok	7,13	419,5	17,0
Striebro	10,49	960	61,0
Meď	8,93	1083	59,7
Nikel	8,90	1455	11,5
Kobalt	8,86	1493	16,1
Volfrám	19,32	3395	18,3

Označovanie neželezných kovov a zliatin podľa STN

Neželezné kovy a ich zliatiny sú označované základným šesťmiestnym číselným znakom príslušného materiálového listu podľa STN, obr.5.2.

Hutnícke označenie zliatin je vytvorené z chemických značiek prvkov, z ktorých sa zliatina skladá a z čísel, určujúcich strednú hodnotu ich obsahu. Na prvom mieste je základný kov, ktorého obsah sa obvykle neudáva, za ním nasledujú legujúce prvky podľa obsahu. Napr. obchodný názov superdural – AlCu4Mg1 (k základnému kovu sú prilegované 4 %Cu a 1 %Mg).



Obr.5.2 Číselné označenie neželezných kovov

5.1. Zliatiny ľahkých neželezných kovov

Ľahké kovy a najmä ich zliatiny tvoria významnú skupinu konštrukčných materiálov pre veľmi priaznivý pomer ich pevnosti ku hustote. Najviac sa v technickej praxi uplatňuje Al, Mg, Ti a ich zliatiny.

5.1.1 Hliník a jeho zliatiny

Hliník (Al) je nepolymorfny kov s kubickou plošne centrovanou mriežkou. Vyznačuje sa nízkou mernou hmotnosťou (2700 kg.m^{-3}), veľmi dobrou elektrickou (38 MS.m^{-1}) a tepelnou vodivosťou ($209 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), dobrou tvárnosťou za tepla aj za studena, odolnosťou proti atmosférickej korózii. Má však nízku pevnosť za studena. Je to kov bielej farby, je tretím najrozšírenejším prvkom v prístupnej časti zemského povrchu po kyslíku a kremíku. Teplota tavenia je $660,1^\circ\text{C}$. Jednotlivé druhy hliníka rozlišujeme podľa jeho čistoty, ktorá sa rovnako ako u ostatných technicky čistých kovov vyjadruje číselne minimálnym obsahom daného kovu v hmotnostných percentách (napr. Al 99,5). Mechanické vlastnosti hliníka sú zhrnuté v Tab.5.3.

Najbežnejšími prísadami v hliníku sú Fe a Si, ktoré sú obsiahnuté vo východiskových surovinách a veľmi ťažko sa odstraňujú. Už od 0,05 %Fe sa na hraniciach zŕn hliníka objavuje eutektikum ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$), ktoré zhoršuje tvárnosť a odolnosť hliníka proti korózii. Rozpustnosť kremíka v tuhom roztoku α je v porovnaní so železom rádovo väčšia, ale ihlicovitý segregát na kremík bohatej fázy β ovplyvňuje vlastnosti hliníka podobne ako eutektikum ($\alpha + \text{Al}_3\text{Fe}$).

Odolnosť hliníka proti korózii je významne ovplyvnená jeho pasiváciou. Ochranná vrstva Al_2O_3 o hrúbke asi $0,1\text{ }\mu\text{m}$, vznikajúca pri teplote okolia, zabezpečuje stálosť hliníka na vzduchu a v morskej vode. So zvyšujúcou čistotou hliníka stúpa aj jeho odolnosť proti korózii. Neodoláva hydroxidom (NaOH , KOH) a halovým kyselinám (HCl , HF).

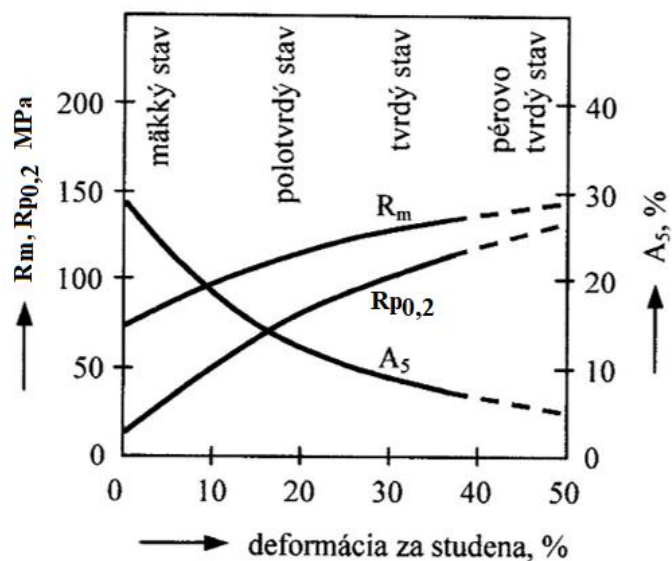
Tabuľka 5.3 Mechanické vlastnosti technicky čistého hliníka v žíhanom stave pri teplote 20°C

Druh (čistota) Al		Al 99,99	Al 99,5
medza klzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	15	50
pevnosť	R_m [MPa]	50	90
ťažnosť	A_5 [%]	45	30
kontrakcia	Z [%]	90	70
modul pružnosti v ťahu	E [MPa]	$7,1 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^4$
tvrdosť	HB	15	20

Malú pevnosť technicky čistého hliníka zvyšujeme tvárnením za studena. Dosiahnuté deformačné spevnenie pri danom stupni tvárnenia je nepriamo úmerné čistote hliníka, obr.5.3. Rekryštalizačná teplota Al 99,5 po stredných stupňoch tvárnenia je asi 150°C . Prakticky používané teploty rekryštalizačného žíhania sú 300 až 400°C . Tvárnenie za tepla prebieha v rozmedzí 500 až 350°C . Veľké množstvo technicky čistého hliníka sa v súčasnosti používa na výrobu tenkých plechov a fólií pre obalovú techniku.

V súčasnosti sú tendencie nahrádzať technicky čistý hliník jeho vysokoplastickými zliatinami s nízkym obsahom prísad ($0,6 - 1,3\text{ }\%\text{Fe}$, $0,3 - 1\text{ }\%\text{Si}$,; do $1,5\text{ }\%\text{Mn}$, do $0,8\text{ }\%\text{Mg}$ a do $0,3\text{ }\%\text{Cu}$), z ktorých vyrobené fólie majú väčšiu tuhosť. To umožňuje zmenšiť hrúbku fólií pod $10\text{ }\mu\text{m}$ a v dôsledku toho ušetriť materiál. Mn v týchto zliatinách spôsobuje zvýšenie plasticity zliatiny.

Za účelom zlepšenia mechanických vlastností, hlavne pevnostných, odolnosti proti korózii, zlievateľnosti, lisovateľnosti a pod. sa hliník leguje. Hlavnými prísadami v hliníkových zliatinách sú Cu, Mg, Si, Mn a Zn, v nových typoch zliatin aj Li.

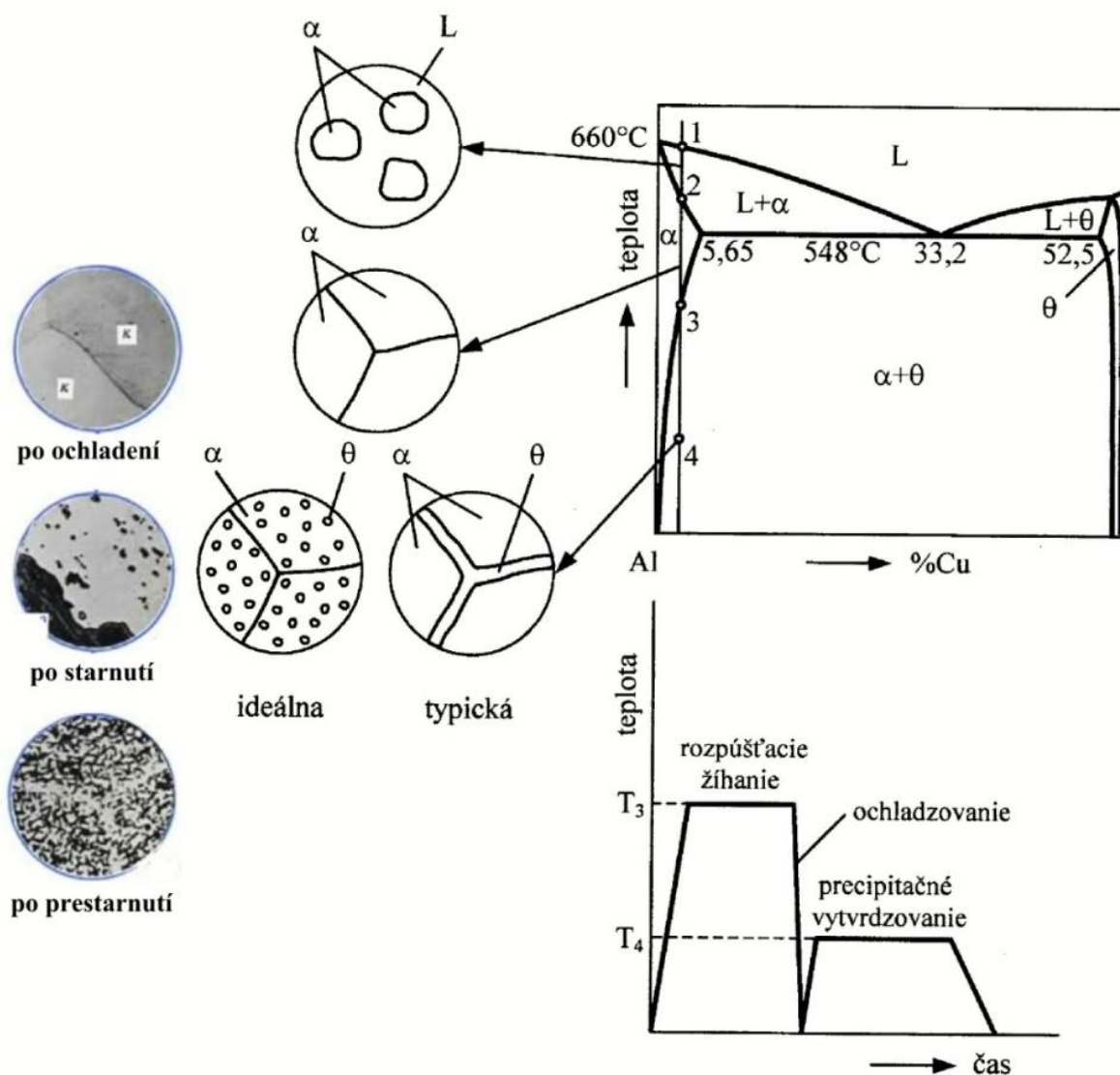


Obr.5.3 Vplyv tvárnenia za studena na mechanické vlastnosti Al (Al 99,5)

Vytvrdzovanie zliatin hliníka predstavuje zmenu rozpustnosti prísady v základnom kove a tým možnosť vytvorenia presýteného tuhého roztoku, ktorého ďalšia premena vedie k zmene vlastností. Vytvrdzovanie sa skladá z nasledujúcich technologických operácií:

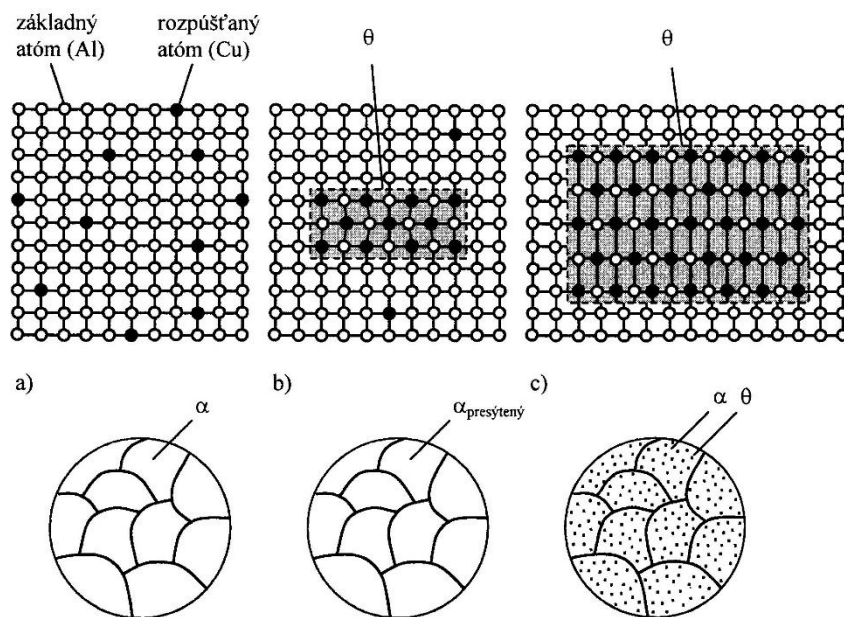
1. Rozpúšťacie žíhanie – ohrev zliatiny na teplotu, pri ktorej sa v štruktúre rozpúšťa prítomná fáza.
2. Ochladenie zliatiny – obyčajne do vody s teplotou 20°.
3. Starnutie – rozpad presýteného tuhého roztoku:
 - prirodzené do 100°C,
 - umelé od 150 do 210°C.

Schéma vytvrdzovania je uvedená na obr.5.4. V bode 3 pri pomalom ochladzovaní vyznačenej zliatiny je prekročená hranica rozpustnosti Cu v tuhom roztoku α a nadbytočná Cu sa vylučuje ako intermediárna fáza Al_2Cu (θ) na hraniciach zŕn tuhého roztoku α (segregácia), čo zhoršuje mechanické vlastnosti zliatiny. Pri tepelnom spracovaní sa pri ohreve zliatiny do oblasti α (rozpúšťacie žíhanie pri teplote cca 500°C) dosiahne homogénny tuhý roztok α . Rýchlym ochladením sa potlačí segregácia a získame presýtený tuhý roztok α . Ten nie je stabilný a v závislosti od vonkajších podmienok nastáva prirodzené starnutie (samovoľný rozpad presýteného tuhého roztoku pri normálnej teplote) alebo umelé starnutie, t.j. riadený proces rozpadu presýteného tuhého roztoku, pri ktorom materiál zohrejeme na teplotu nižšiu ako je hranica rozpustnosti (bod 3). V zliatine Al-Cu bude prebiehať precipitácia Al_2Cu formou vylučovania jemných rozptýlených častočiek vo vnútri zŕn.



Obr.5. 4 Fázový diagram Al-Cu a schéma vytvrdzovania

Procesy, prebiehajúce pri starnutí (v závislosti od teploty) je možné rozdeliť na tri etapy, Obr.5.5. V prvej etape starnutia vzniknú Guinierove-Prestonove zóny (GPZ), ktoré sú oblasťami zvýšenej koncentrácie medi v tuhom roztoku. Atómové priemery hliníka a medi sú rozdielne (pri medi sú menšie), preto miesta bohatšie na meď (GPZ) majú iný mriežkový parameter ako miesta chudobnejšie na meď. Nakoľko sú GPZ koherentné s tuhým roztokom (nie sú oddelené medzifázovou hranicou), ich existencia sa spája so vznikom mriežkových napätí, ktoré zvyšujú tvrdosť a pevnosť materiálu. Táto prvá etapa je jedinou a konečnou etapou starnutia pri teplotách do 100°C a prejavuje sa maximálnym efektom vytvrdenia. V druhej etape nastáva preskupenie iónov v týchto zónach a koncentrácia medi v zónach dosahuje približne stechiometrický pomer Al_2Cu . Vzniká prechodový precipitát θ' . V tretej etape sa úplne preskupujú atómy na mriežku rovnovážneho precipitátu (fáza θ). V druhej a tretej etape sa postupne stráca koherencia a vytvrdenie napäťovými poľami sa mení na typické precipitačné vytvrdzenie, ktorého efekt je o niečo nižší.



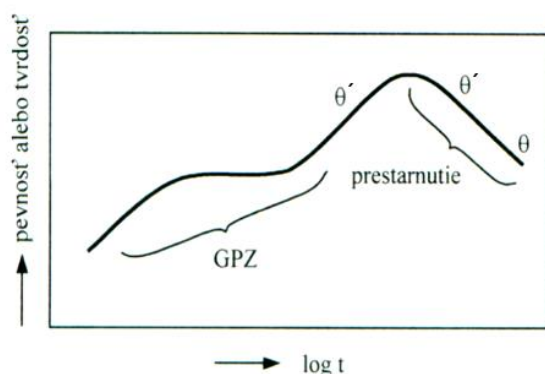
Obr.5.5 Schéma štádií starnutia a mikroštruktúr: a) presýtený tuhý roztok α , b) prechodový semikoherentný precipitát θ' , c) rovnovážny nekoherentný precipitát θ

Charakteristická krivka, vyjadrujúca zmeny tvrdosti a pevnosti v priebehu precipitačného vytvrdzovania pri konštantnej teplote, je na Obr.5.6. S rastúcim časom pevnosť a tvrdosť rastie, dosiahne maximum a potom klesá, pričom sa tento pokles označuje ako prestarnutie. Pri ďalšom zvyšovaní teploty sa znižuje výsledná tvrdosť a pevnosť koaguláciou rovnovážneho precipitátu. V zásade platí, že čím vyššia je teplota starnutia, tým je síce menší efekt vytvrdenia (nárast pevnosti a tvrdosti), ale zliatiny sú tvárnejšie a húževnatejšie.

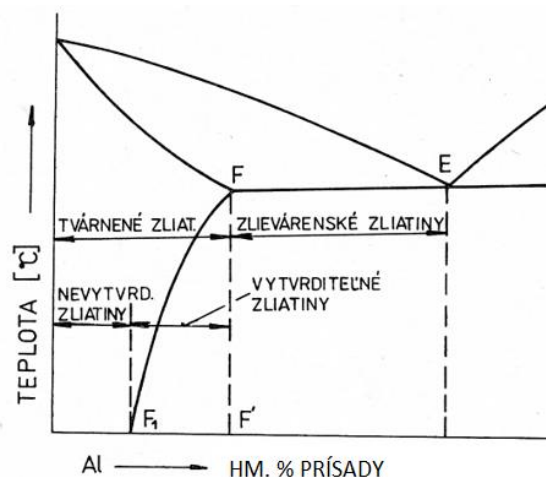
Rozdelenie zliatin hliníka

Zliatiny prevyšujú aspoň jednu významnou a využívanou vlastnosťou čistý hliník a je ich možné roztriediť z dvoch hľadísk:

1. z hľadiska možnosti zvýšenia ich pevnostných vlastností cestou tepelného spracovania vytvrdzovaním ich delíme:
 - a) nevytvrditeľné,
 - b) vytvrditeľné,
2. z hľadiska technológie spracovania ich delíme na (Obr.5.7):
 - a) zliatiny určené na tvárnenie,
 - b) zlievarenské zliatiny s obsahom eutektika v štruktúre.



Obr.5.6 Schéma závislosti pevnosti a tvrdosti na čase pri precipitačnom vytvrdzovaní pri konštantnej teplote



Obr.5.7 Schéma rozdelenia zliatin hliníka

A. Zliatiny hliníka na tvárnenie

Zliatiny nízkopevnostné s dobrou odolnosťou proti korózii

K týmto zliatinám patria dvojzložkové zliatiny Al-Mn a Al-Mg. Rozpustnosť mangánu vo fáze α je malá, takže zliatiny Al-Mn by sa vytvrdzovali málo efektívne. Používajú sa zliatiny do 1,5 %Mn, lebo už od 2 %Mn vznikajú pri kryštalizácii primárne kryštály fázy Al_6Mn , ktoré zhoršujú mechanické vlastnosti. Tieto zliatiny sú náchylné k hrubozrnnej a stĺpkovitej kryštalizácii, ktorá sa potláča mikroprísadami Ti, B alebo Zr. Zliatiny majú dobrú odolnosť proti korózii, dobrú zvariteľnosť a je možné ich spevniť tvárnením za studena až na $R_m = 200$ MPa pri $A_{10} = 5$ %.

Rozpustnosť horčíka vo fáze α je síce podstatne vyššia ako mangánu, napriek tomu sa zliatiny Al-Mg nevytvrdzujú, pretože malé zvýšenie pevnosti by bolo sprevádzané veľkým znížením ťažnosti. Používajú sa zliatiny do 5 %Mg, lebo s rastúcim obsahom horčíka rastie aj podiel fázy β (Al_3Mg_2), ktorá zhoršuje tvárnosť a odolnosť proti korózii.

Zliatiny Al-Mg-Si. Sú to vytvrditeľné zliatiny pre tvárnenie, v porovnaní so zliatinami Al-Cu-Mg majú nižšiu pevnosť, vyššiu koróznú odolnosť a vyššiu húževnatosť. Priemyselné zliatiny je možné rozdeliť do dvoch skupín:

- Zliatiny s prebytkom Mg. V dôsledku väčšieho množstva Mg sa zvyšuje odolnosť proti korózii, zvyšujú sa pevnostné vlastnosti a zhoršuje sa tvárnosť.
- Zliatiny s prebytkom Si. V dôsledku prebytku Si sa zvyšujú pevnostné vlastnosti zliatin, bez zníženia schopnosti k tvárneniu a bez zhoršenia zvariteľnosti. Čiastočne sa znižuje odolnosť týchto zliatin proti interkryštalickej korózii.

Príkladmi zliatin Al-Mg-Si, ktoré sa nazývajú aj avialy sú zliatiny definované v STN 42 4400-1. V stave vytvrdenom za tepla (520 až 535°C/voda/160°C, 5 h) sa avialy bežne spevňujú tvárnením za studena na $R_m = 400$ MPa. Naopak zmäkčenie zliatiny je možné dosiahnuť žíhaním (340 až 370°C) a pomalým ochladením (max. 100°C.h⁻¹).

Zliatiny s vyššou a vysokou pevnosťou ale nízkou odolnosťou proti korózii

Zliatiny Al-Zn(-Cu-Mg) predstavujú najviac používané materiály tejto podskupiny. Sú to hlavne *duraly* AlCu4Mg, AlCu4Mg1 a AlCu4Mg1Mn, ktoré dosahujú značné pevnosti po vytvrdení tepelným spracovaním (R_m až 530 MPa). Bolo zistené, že binárne zliatiny sú veľmi náchylné k vzniku trhlín v prítomnosti už veľmi malého množstva Pb alebo Sb (0,005 až 0,001). V dôsledku uvedeného nenašli tieto binárne zlúčeniny širšie uplatnenie. Avšak legovaním je možné ich vlastnosti zlepšiť. Hlavným výrobkom sú výlisky a plechy, povrchovo chránené proti korózii tenkou vrstvou hliníka (plátované duraly). Najrozšírenejšie sú tieto dva typy zliatin:

➤ **Zliatiny Al-Zn-Mg.** Všetky priemyselné zliatiny tohto typu obsahujú väčšie množstvo Zn ako Mg. Od pomeru Zn : Mg závisí, aká fáza obsahujúca Zn bude prítomná v štruktúre. Vďaka vysokej rozpustnosti Zn v Al majú veľké teplotné rozmedzie, v ktorom sú homogénne. Vytvrdzovať sa môžu za tepla i za studena. Pri vyššom pomere (Zn/Mg) sú tieto zliatiny veľmi dobre lisovateľné za tepla, ale horšie zvariteľné.

➤ **Zliatiny Al-Zn-Mg-Cu** spĺňajú podmienku pre vysokopevné zliatiny, $R_m > (E/150)$, kde E je modul pružnosti v ťahu. Vo vytvrdenom stave sa u zliatin Al-Zn-Mg-Cu dosahuje $R_m = 500$ až 600 MPa pri $A_5 = 15$ až 5 %. Vytvrdzujú sa za tepla. Vo vytvrdenom stave sú tieto zliatiny náchylné k medzikryštálovej korózii a koróznemu praskaniu, preto sa často plátujú.

➤ **Zliatiny Al-Li.** Sú to nové zliatiny pre letecký priemysel. Významnou prednosťou lítia ako prísady do Al-zliatin je jeho nízka merná hmotnosť (534 kg.m^{-3}). Maximálna rozpustnosť lítia v hliníku je 6,5 % pri 601°C a s klesajúcou teplotou sa znižuje. To dáva možnosť využiť vytvrdzovanie založené na precipitácii. Do väčšiny Al-Li zliatin sa pridáva Zr, čím sa zvyšuje pevnosť a húževnatosť. Zvlášť užitočnou vlastnosťou zliatin AlLiCuMgZr je vysoká hodnota ich modulu pružnosti, ktorá umožňuje znížiť hmotnosť lietadla o cca 7,5 % v porovnaní s konštrukciami z duralu.

A. Zliatiny hliníka na odlievanie

Sú určené pre výrobu tvarových odliatkov liatím do piesku, kovových foriem alebo tlakovým odlievaním. Mechanické hodnoty u odliatkov nedosahujú hodnoty výrobkov tvárnených a značne závisia od spôsobu odlievania. Najväčšia pevnosť v ťahu býva asi 250 MPa. Pri liatí do piesku vzniká hrubá štruktúra s najnižšími pevnostnými charakteristikami. Jemná štruktúra s lepšími vlastnosťami sa tvorí pri liatí do kovových foriem alebo pri tlakovom liatí.

➤ **Silumíny.** Najdôležitejšou skupinou zliatin hliníka na odliatky sú zliatiny, obsahujúce ako hlavnú prísadu Si, nazývané silumíny. Majú nízku mernú hmotnosť (2650 kg.m^{-3}), dobrú odolnosť proti korózii, malý sklon k zadieraniu, dobrú zabiehavosť pri odlievaní, malú zmraživosť (0,5 %) a nie sú náchylné na praskanie. Ich obrobiteľnosť je horšia ako u iných zliatin hliníka. Z hľadiska možnosti spevňovania tepelným spracovaním je možné rozdeliť silumíny na nevytvrditeľné a vytvrditeľné.

Nevytvrditeľné silumíny obsahujú 5 až 20 %Si a ďalšie prísady, z ktorých najbežnejší je Mn, ktorý eliminuje nepriaznivý vplyv prímiesi Fe na ťažnosť, húževnatosť a zlievarenské vlastnosti silumínov. Prísadou Cu je možné zvýšiť medzu únavy, aj keď sa mierne zhorší odolnosť proti korózii. Najlepšie zlievarenské vlastnosti majú eutektické silumíny, obsahujúce 10 až 13 %Si.

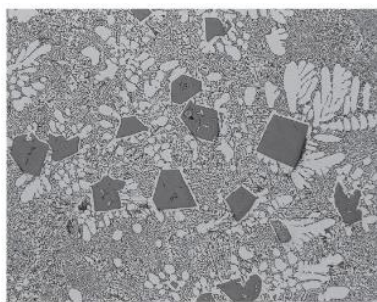
Vytvrditeľné silumíny musia okrem Si obsahovať prísadu Mg alebo Cu. Vytvrditeľnosť je potom zabezpečená vylučovaním fázy Mg_2Si alebo Al_2Cu . Väčší význam je možné pripísať vytvrditeľným silumínom typu Al-Mg-Si, ktoré dosahujú pevnosť v ťahu okolo 200 MPa. Pevnostné vlastnosti silumínov Al-Mg-Si je možné pozitívne ovplyvniť očkovaním (napr. Ti, B), ktorým sa dosiahne zjemnenie zrna. Pri súčasnom špičkovom silumíne $AlSi7Mg0,6$ je možné dosiahnuť po očkovaní, modifikovaní a vytvrdení pevnosť v ťahu približujúcu sa hodnote 300 MPa.

Modifikácia silumínov. Pevnosť a súčasne i tvárnosť silumínov je možné zvýšiť zjemnením kryštálov kremíka v eutektiku, a to dvoma spôsobmi:

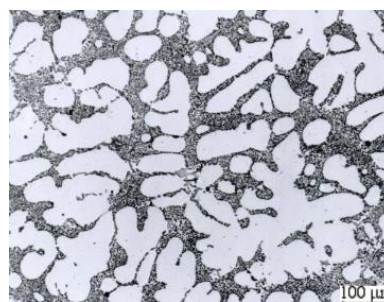
- 1) podchladením taveniny zvýšenou rýchlosťou ochladzovania a následne vyššou rýchlosťou eutektickej premeny s tvorbou normálneho eutektika,
- 2) modifikáciou malým množstvom alkalických kovov (sodíka, lítia, stroncia).

Prvý spôsob dáva dobré výsledky, je však použiteľný len pre odliatky tenkostenné, odlievané do kovových foriem alebo tlakovo. Druhý spôsob je univerzálnejší. V praxi sa široko používa modifikovanie silumínov sodíkom.

Štruktúra silumínov je tvorená tuhý roztokom Si v Al a eutektikom ($\alpha + Si$). Kremík v eutektiku je prítomný vo forme ihlíc a je krehký, obr.5.8. Z tohto dôvodu sa používa modifikovanie - očkovanie silumínu prísadou Na alebo Sr tesne pred odlievaním. Kremík v modifikovanom silumíne má jemnú globulitickú formu, obr.5.9. Modifikovaním sa zvyšuje pevnosť aj ťažnosť silumínu ($R_m = 300MPa$).



Obr.5.8 Štruktúra silumínu



Obr.5.9 Štruktúra modifikovaného silumínu

➤ **Ďalšie zlievarenské zliatiny hliníka.** Sú to zliatiny na báze **Al-Mg** (napr. STN 42 4515 a STN 42 4568) a **Al-Cu** (napr. STN 42 4315 a STN 42 4361).

Zliatiny Al-Mg s rozličným obsahom Mg (3 - 11 %) majú dobré mechanické vlastnosti, vysokú koróznú odolnosť, dobrú lešiteľnosť a veľmi nízku mernú hmotnosť. Nevýhodou je sklon k oxidácii, ktorou sa zhoršujú vlastnosti. Túto nevýhodu možno znížiť prísadou 0,005 – 0,02 %Be. Zlievarenské vlastnosti zliatin nie sú veľmi dobré. Z dôvodu širokého intervalu tuhnutia sú tieto zliatiny náchylné na tvorbu mikropórov. Zliatiny Al-Mg sa tepelne

spracovávajú najmä pri obsahu Mg väčšom ako 8 %. Kaliača teplota má dosahovať hodnotu asi 450°C, aby sa za krátky čas dosiahla homogenizácia štruktúry. Aby sa zabránilo vzniku prasklín, ochladzovanie sa uskutočňuje v teplej vode alebo v oleji. Nevýhodou zliatin Al-Mg je, že už pri málo zvýšených teplotách starnú. Starnutím sa zvyšuje pevnosť, ale znižuje húževnatosť.

Zliatiny Al-Cu sa používajú na výrobu hláv valcov spaľovacích motorov, prípadne na výrobu odliatkov ďalších zariadení, pracujúcich pri zvýšených teplotách. Ich zlievarenské vlastnosti sú pomerne zlé. Vzhľadom na veľký interval tuhnutia majú nevyhovujúcu zabiehavosť a sklon k tvorbe trhlín. Ako ďalšie prísady sa používajú kremík (do 6 %) a zinok (do 2,5 %), prípadne Ni, Mg. Obsah Cu sa pohybuje v rozmedzí 3 až 8,5 %. V podstate bývajú zliatiny Al-Cu dvojaké, a to s nízkym obsahom Cu, ktoré neobsahujú eutektikum a zliatiny s vyšším obsahom medi s eutektikom v štruktúre.

Označovanie tvárnených druhov hliníka, jeho zliatin a stavov týchto technických materiálov

Označovanie neželezných kovov, vrátane zliatin hliníka je doteraz obsiahnuté v STN 42 0055. Podľa tejto normy je každý neželezný kov označený základným šesťmiestnym číslom a jeho stav doplnkovým dvojmiestnym číslom, oddeleným od základného čísla desatinnou bodkou. Európske označovanie druhu tvárneného hliníka a jeho zliatin obsahuje norma STN EN 573-1 (triediaci znak 42 1401), ktorá používa základné štvormiestne číslo. Prvá číslica udáva skupinu materiálov podľa hlavného prísadového prvku :

- 1 xxx (rada 1000) ... hliník min. 99,00 %
- 2 xxx (rada 2000) ... meď
- 3 xxx (rada 3000) ... mangán
- 4 xxx (rada 4000) ... kremík
- 5 xxx (rada 5000) ... horčík
- 6 xxx (rada 6000) ... horčík a kremík
- 7 xxx (rada 7000) ... zinok
- 8 xxx (rada 8000) ... ostatné prvky
- 9 xxx (rada 9000) ... neobsadené

Základnému číselnému označeniu predchádzajú písmená a spojovacie čísla EN AW-xxxx. Za poslednou číslicou môže ešte nasledovať veľké písmeno (A, B, ...) označujúce uznaný národný variant materiálu. Teda napr.: EN AW-1050 pre hliník 99,5 a EN AW-2014A pre zliatinu AlCu4SiMg

Ďalej sa v hranatej zátvorke uvádza označenie chemického zloženia podľa týchto pravidiel :

- a. na prvom mieste je chemická značka hliníka a medzera, za ktorými nasledujú chemické značky zliatinových prvkov a číslice charakterizujúce ich obsah v poradí podľa klesajúceho obsahu;
- b. uvádzajú sa najviac 4 zliatinové prvky vo vyššie uvedenom poradí, pri rovnakom obsahu v abecednom poradí;

- c. obsah prvkov je charakterizovaný hmotnostnými percentami s rôznou presnosťou na jedno či dve desatinné miesta u technicky čistého hliníka zaokrúhlene na celé číslo, v prípade nutnosti na 5/10 menovitej hodnoty hlavného prísadového prvku, ak je jeho obsah > 1 % alebo na 1/10 pri obsahu < 1 %; napr.:
EN AW-1050 [Al 99,5] EN AW-1199 [Al 99,99]
EN AW-2014A [Al Cu4SiMg(A)] EN AW-6063 [Al Mg0,7Si]
a podobne sa postupuje pri ďalších prísadových prvkoch, ak je to nutné na rozlíšenie rôznych druhov zliatin (požaduje sa ak je to možné čo najjednoduchšie označenie);
- d. hliník a jeho zliatiny určené na zvláštne použitie (menovité účely) vyžadujúce špecifické chemické zloženie sa označí písmenom pred chemickým zložením. Napr. hliník pre elektrotechniku EN AW-5305 [Al 99,5]
- e. u zliatin vyrábaných z veľmi čistého hliníka sa jeho obsah vyznačí na dve desatinné miesta, napr.: EN AW-5305 [Al 99,85Mg1]

Európske označenie stavu tvárneného hliníka a jeho zliatin obsahuje norma STN EN 515 (triediaci znak 42 0053). Označenie rôznych stavov je založené na poradí základných spôsobov spracovania, ktoré sa používajú na dosiahnutie určitého stavu výrobku.

Na označenie základných stavov sa používajú veľké písmená a na podrobnejšie označenie konkrétnych variantov základných stavov sa používa jedna až päť číslic. Označenie stavu je od označenia druhu materiálu oddelené pomlčkou, napr. :

EN AW-1050 [Al 99,5(A)] - H16

Rozlišuje sa nasledujúcich päť základných stavov:

- F – stav tvárnený z výroby, jeho dosiahnutie nebolo riadené podmienkami spracovania s ohľadom na mechanické vlastnosti, ktoré sa preto ani nešpecifikujú;
- O – stav žíhaný (mäkký) s nízkou pevnosťou;
- H – stav deformačne spevnený u výrobkov tvárnených za studena po žíhaní alebo tvárnení za tepla; za písmenom H nasledujú vždy najmenej dve číslice, z ktorých prvá vyjadruje spôsob spracovania a druhá vyjadruje stupeň deformačného spevnenia;
- W – nestabilný stav po rozpúšťacom žíhaní u zliatin, ktoré prirodzene starnú (samovoľné starnutie pri normálnej teplote);
- T – stav tepelne-mechanicky spracovaný spravidla vytvrdený; prvé číslice rozlišujú poradie základných etáp spracovania (rozpúšťacie žíhanie, starnutie a tvárnenie za studena), ďalšie číslice vyjadrujú varianty základných etáp, ktorými sa dosahujú určité mechanické, technologické a korózne vlastnosti alebo ich optimalizácia.

5.1.2 Horčík a jeho zliatiny

Horčík (Mg) má najnižšiu mernú hmotnosť 1740 kg.m^{-3} z technicky významných kovov. Je to nepolymorfný kov, kryštalizuje v hexagonálnej tesne usporiadanej mriežke (H12), teplota tavenia je 650°C . Má nízke mechanické vlastnosti (pevnosť, ťažnosť, KC). Pevnosť technicky čistého horčíka v ťahu je max. 110 MPa v liatom stave. Relatívne zlá tvárnosť horčíka vyplýva z typu kryštalickej mriežky a zlepšuje sa až pri zvýšených teplotách nad 225°C , preto sa tvárni

väčšinou za tepla, pri teplote 300 - 400 °C. Deformáciou možno pevnosť horčíka zvýšiť na 160 - 220 MPa. Horčík a jeho zliatiny zle odolávajú korózii, pri vyšších teplotách prudko oxiduje. Ako konštrukčný materiál je čistý horčík nevhodný.

Zliatiny horčíka sú väčšinou ternárne, ako hlavné legúry sa používajú hliník, zinok, mangán, kremík a tórium alebo prvky vzácnych zemín. Používajú sa aj dve binárne zliatiny Mg-Al a Mg-Zn. Hliník zvyšuje podstatne pevnosť, tvrdosť a zlepšuje zlievateľnosť, zliatiny Mg-Al majú podstatne menšiu zmrašťivosť ako čistý horčík. Zinok zvyšuje pevnosť a tvrdosť a pri obsahu do 5 % tiež húževnatosť. Mangán (okolo 1 %) zlepšuje odolnosť proti korózii a zvariteľnosť. Prísada mangánu zvyšuje najmä medzu klzu zliatiny a náchylnosť zliatiny na koróziu v morskej vode. Kremík v malom množstve (do 2%) zvyšuje tvrdosť a zlepšuje obrobiteľnosť, zhoršuje však odolnosť proti korózii a podstatne znižuje tvárnosť. Väčšina zliatin horčíka obsahuje mangán, ktorý zlepšuje odolnosť proti korózii. Pre vyššie teploty (do 380°C) sa používajú zliatiny horčíka s tóriom a s prvkami vzácnych zemín.

Zliatiny horčíka delíme na zliatiny na tvárnenie a odlievanie.

Zliatiny horčíka na tvárnenie. Zliatiny horčíka sú podobne ako čistý horčík za studena zle tvárne, pretože aj tuhý roztok prísad v horčíku má zvyčajne hexagonálnu mriežku. Preto sa spracováva pri teplotách nad 200 až 250°C, najčastejšie v rozmedzí 300 až 400°C. Chemické zloženie zliatin na tvárnenie sa od zliatin na odliatky podstatne nelíši. Zliatiny na tvárnenie majú však jemnejšie zrno, sú homogénnejšie a majú preto lepšie mechanické vlastnosti.

Zliatiny Mg-Al-Zn sú najčastejšie používanou skupinou zliatin horčíka a obvykle obsahujú 3-9 %Al, 0,2 až 1,5 %Zn a 0,15 až 0,5 %Mn. Zliatiny tejto skupiny majú sklon ku korózii pod napätím, a to tým väčší, čím väčší je obsah hliníka. Zliatina s malým množstvom prísady hliníka sa používa na plechy a pásy. K najviac používaným zliatinám patrí Mg-Al4-Zn. Na rozdiel od ostatných zliatin tejto sústavy sa dobre zvara. Nevytvrdzuje sa, používa sa v stave žíhanom, v stave po tvárnení za tepla, alebo v stave spevnenom tvárnením za studena. Tvrdšia zliatina Mg-Al6 sa používa na profily, výlisky a plechy. Výkovky veľmi namáhané (vrtuľové listy) sa zhotovujú zo zliatin Mg-Al19. Pre vytvrdzovanie sú vhodné zliatiny s vyšším obsahom hliníka (nad 6 %). Zliatiny na báze Mg-Al sú použiteľné tiež pri zvýšených teplotách.

Zliatina Mg-Zn-Zr obsahuje 2-6 %Zn a 0,7 %Zr a používa sa najmä v leteckom priemysle (vrtule, podvozky). Majú vysoké mechanické vlastnosti v dôsledku spevňujúceho vplyvu zinku a očkujúceho účinku zirkónu. Zirkón zvyšuje pevnosť, tvárnosť a odolnosť horčíkových zliatin proti korózii. Väčšina zliatin tejto skupiny sa používa v stave žíhanom alebo v stave po tvárnení za tepla, pretože spevnenie dosiahnuteľné vytvrdzovaním je pomerne malé.

Zliatiny na báze Mg-Mn a Mg-Mn-Al použiteľné do teploty 200°C majú dobrú odolnosť proti korózii, tvárnosť za tepla a zvariteľnosť. Na výrobu nádrží na benzín sa používa dobre zvariteľná zliatina Mg-Mn (1,2 až 1,5 %) s pevnosťou do 250 MPa. Zliatiny sústavy Mg-Mn sa nevytvrdzujú, preto sú ich pevnostné vlastnosti pomerne nízke.

Zliatiny Mg-Mn s prísadou tória (2 až 3 %) majú za vyšších teplôt vysoké pevnostné charakteristiky. Umelo sa vytvrdzujú po tvárnení za studena. Horčíkové zliatiny s Th patria k zliatinám často používaným v leteckej a raketovej technike.

Zliatiny Mg-Li predstavujú nový typ ultraľahkých zliatin. Legovanie horčíka lítiom umožňuje vyrábať zliatiny s mernou hmotnosťou 1300 - 1700 kg.m⁻³. V súčasnosti sú predmetom skúmania polykomponentné zliatiny MgLi7Al14 s prísadou niekoľko percent kadmia, zinku alebo striebra. Tieto zliatiny sa môžu spevňovať vytvrdzovaním a získavajú sa vlastnosti, ktoré dávajú dobré prognózy pre ich použitie v technike.

Zliatiny horčíka na odliatky. Chemické zloženie mnohých zliatin horčíka na odliatky je blízke zloženiu zliatin na tvárnenie. Mechanické vlastnosti odliatkov sú však nižšie. Podstatne sa zlepšujú zjemnením zrna, ktoré sa dosahuje u jednotlivých zliatin rôznymi spôsobmi – prehriatím taveniny pred odliatím, pridaním malého množstva (do 1 % hmotnosti taveniny) zvláštnych očkovadiel bez prehriatia taveniny (krieda, magnezit, práškový bezvodý chlorid železitý), alebo prísadou zirkónu.

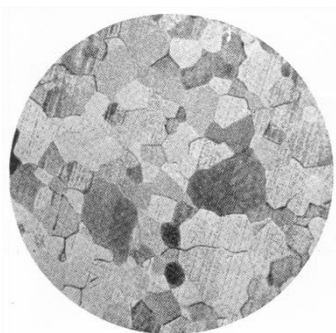
Zliatiny Mg-Al-Zn obsahujú do 12 %Al, do 3 %Zn a do 0,5 %Mn. Sú to najpoužívanejšie zlievarenské zliatiny horčíka, známe pod názvom elektrón, použiteľné až do teploty 150°C. Všetky obsahujú prísadu mangánu, zlepšujúcu odolnosť proti korózii. Najčastejšie používaná zlievarenská zliatina, vhodná pre liatie do piesku aj do kokíl, má zloženie 9 %Al, 2 %Zn a 0,2 %Mn. Po vytvrdnutí dosahuje pevnosť v ťahu 270 MPa, ťažnosť 3 %.

Zliatiny Mg-Mn majú dobrú odolnosť proti korózii, sú dobre obrobitelné aj zvariteľné, avšak zle zlievateľné. Obsahujú 1 až 2,5 %Mn, nevytvrdzujú sa, majú preto pomerne nízke mechanické vlastnosti (R_m 80-110 MPa, ťažnosť 2-5 %).

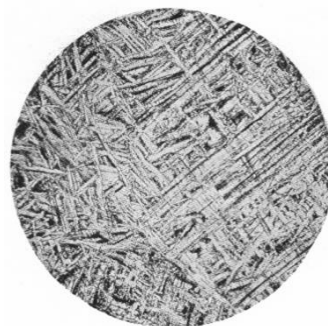
Zliatiny Mg-Zn-Zr. Prísada zirkóniu (0,4 až 1 %) zjemňuje zrno zlievarenských zliatin a zlepšuje ich mechanické vlastnosti. Prísadou kovov vzácnych zemín (napr. céru) k základnej zliatine Mg-Zn-Zr sa zlepšia mechanické vlastnosti a zliatiny je možné použiť až do teploty 200 až 250°C.

5.1.3 Titán a jeho zliatiny

Titán (Ti) je polymorfný kov bielej farby, ktorý patrí medzi ľahké, ale pevné kovy. Merná hmotnosť čistého titánu je 4500 kg.m⁻³. Titán sa vyskytuje v dvoch alotropických modifikáciách. Do teploty 882°C je *stabilná α-fáza*, ktorá kryštalizuje v hexagonálnej tesne usporiadanej mriežke (H12). Nad touto teplotou až po teplotu tavenia (1668°C) je *stabilná β-fáza*, ktorá má mriežku kubickú, priestorovo centrovanú. Čistý titán je tvárny a pomerne mäkký, v žíhanom stave má pevnosť 240-550 MPa a ťažnosť 15-22 %. Pevnosť titánu ovplyvňuje jeho čistota, najmä obsah kyslíka a dusíka. Tvárnením za studena je možné jeho pevnosť zvýšiť až na 800 MPa. Dobré tvárny je titán pri teplotách 880 až 980°C, t.j. v oblasti modifikácie β. Pri vyšších teplotách už dochádza k intenzívnej oxidácii titánu. Na obr.5.10 a obr.5.11 sú uvedené mikroštruktúry titánu vo vyžíhanom a liatom stave.



Obr.5.10 Mikroštruktúra technického titánu vo vyžíhanom stave, zrná fázy α



Obr.5.11 Mikroštruktúra liateho titánu, ihlicovitá fáza α

Titán má vysokú afinitu ku kyslíku. Oxid titánu TiO_2 rýchlo vzniká na povrchu kovu aj pri teplote miestnosti, pevne lipne na povrchu, pasivuje ho a chráni pred koróziou v oxidačných prostrediach. Čistý titán má pomerne nízku tepelnú vodivosť ako aj koeficient teplotnej rozťažnosti, čo prispieva k jeho dobrej zvariteľnosti. Nedostatkom je jeho zlá obrobiteľnosť, porovnateľná s obrobiteľnosťou nehrdzavejúcich austenitických ocelí.

Štruktúra a tepelné spracovanie zliatin titánu. Prísadové prvky sa v oboch modifikáciách rozpúšťajú úplne alebo čiastočne a tvoria substitučné tuhé roztoky α a β s mriežkou odpovedajúcou modifikácii. Niektoré prvky sa s titánom zlučujú a tvoria intermetalické zlúčeniny. Podobne ako v oceliach môžu v zliatinách titánu existovať pri nerovnovážnych podmienkach fázových premien metastabilné fázy martenzitického typu. Prísadové prvky v titánových zliatinách delíme podľa rozpustnosti prvkov v jednotlivých modifikáciách a podľa ich vplyvu na stabilitu fáz na:

- prvky rozširujúce oblasť α – Al, O, N, C, praktický význam má len Al, ostatné nekovové prvky sú nečistotami,
- čiastočne rozširujúce oblasť β – Mn, Fe, Cr, Si, Cu,
- úplne rozširujúce oblasť β – Mo, Nb, Ta, V, znižujú teplotu fázovej premeny $\alpha \leftrightarrow \beta$ a fáza β sa tak stáva stabilnou aj pri normálnej teplote.

Hlavnou nečistotou v titáne je kyslík. Jeho prítomnosť zvyšuje pevnosť, ale znižuje ťažnosť.

Zliatiny titánu podľa rovnovážnej štruktúry rozdeľujeme na:

Homogénne zliatiny s α fázou – obsahujú hlavne Al, Zr a Sn. Majú dobré zlievarenské vlastnosti, vysokú húževnatosť pri nízkych teplotách, sú dobré zvariteľné. Napr. TiAl5Sn2,5 s $R_m = 825 \text{ MPa}$, $A = 10\%$. Sú to zliatiny s vynikajúcou zvariteľnosťou, dostatočnou pevnosťou a odolnosťou voči krehkému porušeniu i za veľmi nízkych teplôt, avšak s horšou kujnosťou. Na rozdiel od β zliatin nemôžu byť spevnené tepelným spracovaním, z dôvodu vysokej stability α štruktúry. Vyznačujú sa menšou koróznou odolnosťou, avšak vyššou pevnosťou ako čistý titan. Najvýznamnejším zástupcom tejto skupiny je zliatina Ti-5Al-2,5Sn. Používajú sa na

časti poťahov lietadiel, nádrže, konštrukciu rakiet, lopatky kompresorov, časti statorov plynových turbín a i.

Zliatiny typu pseudo α - označované sú tiež ako super α , obsahujú malé množstvo β stabilizátorov (napr. vanád alebo molybdén). Obsah fázy β v pseudo α zliatinách nemôže prekročiť 6 hm. %. Vykazujú o 15 až 20 % vyššiu pevnosť ako α zliatiny, lepšiu tvárnosť a pomerne vysokú ťažnosť. Patria tu zliatiny Ti-8Al-1Mo-1V alebo Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo využívané v leteectve.

Heterogénne zliatiny ($\alpha + \beta$) - obsahujú stabilizátory α fázy (Al) a stabilizátory β fázy (V, Mo, Fe, Cr, Mn). Požadované vlastnosti týchto zliatin je možné dosiahnuť tepelným spracovaním, ktorým je možné meniť pomer oboch fáz, ich veľkosť a distribúciu. Obsah fázy β pri izbovej teplote je podľa typu a obsahu legovacích prvkov od 10 až do 50 %. Dvojfázové zliatiny sa vyznačujú širokou škálou štruktúr a sú tvorené rovnoosými zrnami alebo lamelami oboch tuhých roztokov prípadne ich zmesou. Oproti ostatným titanovým zliatinám je ich veľkou prednosťou dobrá tvárnosť za studena a taktiež lepšia odolnosť proti únavovému porušovaniu. Zliatiny sa vyznačujú zvýšenou pevnosťou pri normálnej teplote, ktorá ale s rastúcou teplotou klesá. Hlavnou nevýhodou dvojfázových zliatin je ich zvariteľnosť a horšia odolnosť proti tečeniu ako u zliatin s jednofázovou štruktúrou.

TiAl6V4 – má $R_m = 990$ MPa, po tepelnom spracovaní až 1250 MPa.

TiAl7Mo4 – má podobné vlastnosti ako TiAl6V4.

Použitie: letecký priemysel, stavba rakiet, kozmický priemysel, potravinársky a chemický priemysel, elektrotechnika.

Zliatiny typu pseudo β - Zvyšovaním obsahu β stabilizujúcich prvkov spolu s obsahom Al do 3 % vznikne zliatina metastabilná alebo pseudo β zliatina. Zliatiny tohto typu využívajú precipitáciu fázy α pre vytvrdzovanie zliatin. Jednou zo základných pseudo β zliatin je Ti-10V-2Fe-3Al.

Homogénne zliatiny s β fázou - obsahujú stabilizátory β fázy Mo, V, Ta, Nb, sú vytvrditeľné a dosahujú vysokú pevnosť pri teplote okolia ale len do 350 °C. V porovnaní s $\alpha + \beta$ zliatinami vykazujú výrazne lepšiu obrobiteľnosť, tvárnosť za normálnych teplôt a únavovú odolnosť. Ďalšiu výhodu predstavuje vysoká pevnosť až do teploty 500°C. Zliatiny typu β obsahujúce molybdén disponujú navyše vyššou koróznou odolnosťou. Obtiažne sa vyrábajú, pre drahé legúry majú malé praktické uplatnenie. Nárast spotreby týchto zliatin je spojený s ich lomovou húževnatosťou, ktorá vyhovuje zvýšeným požiadavkám pri vesmírnych konštrukciách. Používanými β zliatinami titanu sú Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn a Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr.

Aplikácie titánových zliatin v biomedicíne

Titán a jeho zliatiny sú považované za najatraktívnejšie kovové materiály pre biomedicínske účely a tvoria podstatnú časť materiálov využívaných pri konštrukcii dentálnych a ortopedických implantátov.

Hlavným dôvodom zvýšeného využívania titánu ako biomateriálu je jeho vynikajúca biokompatibilita. Ide o schopnosť vzájomnej znášanlivosti látok predovšetkým materiálov v biologickom prostredí. Biokompatibilita titánu je výsledkom pasívnej vrstvy TiO_2 o hrúbke 2 – 5 μm , ktorá chráni materiál pred koróziou a zaručuje jeho bioinertnosť. Výhodou tejto vrstvy je, že v prípade porušenia alebo po prevedenom opracovaní materiálu je schopná sa sama jednoducho obnoviť.

5.2. Zliatiny ťažkých neželezných kovov

Patria sem najmä meď, nikel, kobalt a ich zliatiny.

5.2.1 Meď a jej zliatiny

Meď (Cu) je nepolymorfný kov červenkastej farby s kubickou plošne centrovanou mriežkou. Teplotu tavenia má 1083°C a mernú hmotnosť $8900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, teda asi trikrát väčšiu ako hliník. Tepelná a elektrická vodivosť medi je o niečo nižšia ako striebra, ale asi 1,5 – krát vyššia ako u hliníka. Elektrická vodivosť čistej medi sa zvyčajne berie ako základ na porovnanie vodivosti iných kovov a zliatin. Legovanie znižuje vodivosť medi.

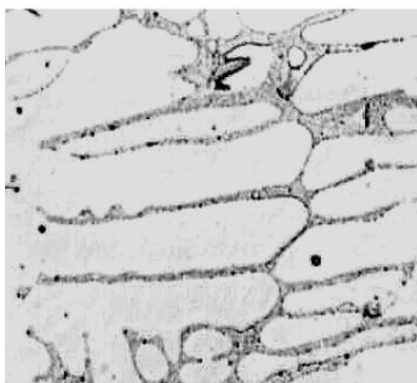
Mechanické vlastnosti medi závisia od jej stavu a sú dané jej kryštalografickou mriežkou (K12). Pri normálnej teplote i pri znížených teplotách má meď vysokú tvárnosť a húževnatosť. So zvyšujúcou sa teplotou sa jej pevnostné vlastnosti trvalo znižujú a v okolí 500°C sa objavuje u technickej medi tiež pokles plastických vlastností. Preto je vhodné meď tvárniť za studena alebo pri teplotách 800 - 900°C . Tvárnením za studena sa pevnostné vlastnosti zvyšujú a ťažnosť klesá. V liatom stave má pevnosť 160 MPa, valcovaná za tepla 220 MPa. Meď je ťažná a deformáciou za studena ju možno spevňovať takmer až na úroveň pevnosti mäkkej ocele.

Meď je odolná proti oxidácii, reaguje však so sírou a sírnymi zlúčeninami za vzniku sulfidu medi. Hlavnou nečistotou v medi je kyslík. Bezokyslíkatá meď sa získa dezoxidáciou fosforom, lítiom alebo bórom. Okrem kyslíka hlavnými nečistotami v medi sú fosfor a železo. Čistá meď je ťažko zlievateľná. Má veľkú zmrastivosť (1,5 %) a pri vysokých teplotách rozpúšťa veľké množstvo plynov, ktoré sa pri tuhnutí uvoľňujú a spôsobujú naplynenie a pórovitosť odliatkov. Zlievateľnosť je možné zlepšiť prísadou niektorých prvkov ako Zn, Sn, Si, Ni, Cd, Be a pod. V zliatinách medi sa využíva 14 legujúcich prvkov, väčšinou v oblasti rozpustnosti tuhého roztoku. Väčšina komerčných zliatin je teda monofázových. Niektoré zliatiny sa dajú precipitačne spevňovať. Niektoré vykazujú aj alotropickú premenu a dajú sa tepelne spracovať.

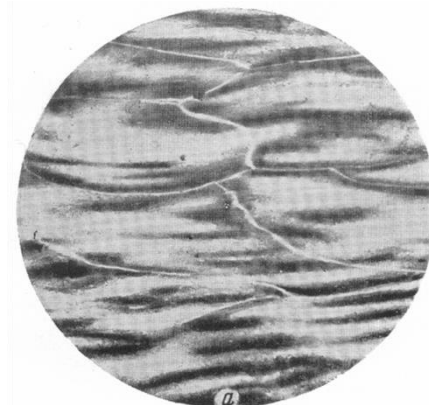
Meď a jej zliatiny môžeme rozdeliť do troch skupín:

- meď a vysokomedné zliatiny,
- mosadze (Cu-Zn, prípadne ďalšie prvky),
- bronzы (Cu + iný prvok ako Zn).

Tieto skupiny ešte môžeme ďalej deliť na tvárnené a liate. Mikroštruktúra liatej a tvárnenej medi je znázornená na obr.5.12 a obr.5.13.



Obr.5.12 Mikroštruktúra liatej medi



Obr.5.13 Mikroštruktúra tvárnenej medi,
stupeň deformácie 20%

Mosadze.

Sú to zliatiny *medi a zinku*, v ktorých je popri týchto základných kovoch vždy určité množstvo nečistôt a často tiež určitý obsah ďalších prísad, ktoré ich vlastnosti (podľa spôsobu použitia) ešte zlepšujú. Podľa spôsobu spracovania rozlišujeme mosadze tvárnené a zlievarenské. Zvláštnu skupinu tvoria tvrdé pájky. Pre technickú prax majú význam zliatiny s maximálne 50 %Zn, pretože zliatiny s vyššou koncentráciou zinku už nemajú priaznivé mechanické vlastnosti (sú veľmi krehké).

Meď a zinok sú v tekutom stave dokonale rozpustné, v stave tuhom je ich rozpustnosť obmedzená (meď má mriežku K12, zinok H12). V zliatinách s vyššou koncentráciou Zn sa však pri normálnej teplote zachová tuhý roztok α , preto majú zliatiny až do koncentrácie 39 %Zn výslednú štruktúru homogénnu, pozostávajúcu len z kryštálov tuhého roztoku α . Používané technické mosadze obsahujú popri Cu a Zn niektoré ďalšie prísady (buď nečistoty alebo prvky zámerne pridávané). Ich vplyv je podobný ako v čistej medi. Napr. bizmut a síra zhoršujú predovšetkým tvárnosť za tepla. Podobne pôsobí olovo, ktoré však zlepšuje obrábateľnosť, u heterogénnych mosadzí sa používa prísada Pb v množstve 1 až 3 %.

Základom tepelného spracovania mosadzí je rekryštalizačné žiňanie, ktorým je možné v kombinácii s tvárnením meniť zrnitosť štruktúry a ovplyvňovať stupeň spevnenia, dosiahnutý plastickou deformáciou.

Mosadze na tvárnenie. Tvárnené mosadze tvoria prevažnú časť mosadzných výrobkov. Dodávajú sa ako plechy, pásy, tyče, rúrky, drôty a pod., v stave mäkkom (vyžíhanom) alebo po určitom stupni tvárnenia za studena (stav polotvrdý, tvrdý atď.)

Tombaky sú mosadze s obsahom medi nad 80 % (Ms96, Ms90, Ms85, Ms80). Chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami sa blížia čistej medi, ale majú výhodnejšie mechanické vlastnosti.

Hlbokotažné mosadze majú približne 70 %Cu (Ms70, Ms68) a pre zaručenie vysokej ťažnosti je potrebné udržať obsah nečistôt na nízkej hodnote. Zliatiny Cu-Zn majú v okolí koncentrácie 32 %Zn najväčšiu ťažnosť pri dobrej pevnosti, a preto sa zliatiny tohto druhu používajú aj na hlboké ťahanie; používajú sa napr. na výrobu nábojníc, hudobných nástrojov, v potravinárskom priemysle a pod.

Mosadz s vyšším obsahom zinku (Ms63) je pre svoj malý obsah medi pomerne lacná. Je to heterogénna zliatina s nižšou ťažnosťou, ktorá je ešte za studena dobre tvárna. Používa sa na najrôznejšie, menej namáhané výrobky.

Automatové mosadze sú mosadze s obsahom medi približne 60 % a s prísadou olova 1 až 3 %, ktoré zlepšuje obrábateľnosť. Olovo nie je v mosadzi rozpustné a má byť v štruktúre jemne rozptýlené. Menšie dielce karburátorov a bezšvíkové rúrky sa vyrábajú z Ms60Pb (STN 42 3221). Zliatiny Ms59Pb (STN 42 3222) a Ms58Pb (STN 42 3223) sa dajú za tepla dobre kovať a lisovať. Za studena sú menej tvárne, ale dobre sa razia, a preto sa používajú na razenie rôznych súčiastok pre hodinárstvo a súčiastok pre rôzne menšie prístroje, predovšetkým v elektrotechnike. Z Ms58Pb sa vyrábajú skrutky a iné hromadne sústružené súčiastky.

Mosadze na odliatky sú heterogénne zliatiny s obsahom 58 až 63 %Cu, často s prísadou olova (1 až 3 %) pre zlepšenie obrábateľnosti (Ms63Pb). Mosadze na odlievanie majú dobrú zabiehavosť a malý sklon k odmiešavaniu, dosť sa však zmrašťujú. V porovnaní so zliatinami na tvárnenie majú zlievárenské mosadze v dôsledku hrubšej a menej rovnomernej štruktúry horšie mechanické vlastnosti. Odliatky z Ms60 a Ms58 sa používajú predovšetkým na menej namáhané odliatky, ako sú napr. súčasti čerpadiel, plynové a vodovodné armatúry, stavebné a nábytkové kovanie a pod.

Špeciálne mosadze. Sú to zliatiny medi, zinku a jednej alebo viacerých prísad (Al, Sn, Ni, Mn, Fe, Si) a obvykle sa nazývajú podľa tretej zložky (napr. kremíková mosadz je zliatina Cu-Zn-Si). Prísada ďalších prvkov umožňuje zvyšovať mechanické vlastnosti, ale tiež odolnosť proti korózii, zlievateľnosť, obrábateľnosť. Zmena vlastností závisí od druhu pridávaného prvku a od jeho vplyvu na štruktúru. Podľa spôsobu výroby sa špeciálne mosadze delia na *tvárnené* a *zlievárenské*.

Hliníkové mosadze majú vyšší obsah medi 69 až 79 %. Prísada hliníka v mosadziach určených na tvárnenie nepresahuje 3 až 3,5 % (štruktúra je homogénna). Mosadz Ms70Al (0,6 až 1,6 %Al) s prísadou Sn a Mn je dobre odolná voči korózii a používa sa na výrobu kondenzátorových rúrok. Mosadz Ms77Al (1,7 až 2,5 %Al), ktorej použitie je rovnaké, má vzhľadom na vyšší obsah Al zvýšenú odolnosť proti korózii v morskej vode. Zliatiny na odliatky sú heterogénne, majú nižší obsah Cu a vyšší obsah Al (do 7 %), čím je daná dobrá odolnosť proti korózii aj v morskej vode.

Kremíkové mosadze obsahujú max. 5 %Si pri vysokom obsahu medi 79 až 81 %. Spracovávajú sa tvárnením (max. 4 %Si) a odlievaním (dobrá zabiehavosť). Majú veľmi dobrú odolnosť proti korózii a dobré mechanické vlastnosti aj pri nízkych teplotách. Prísada olova (3 až 3,5 %)

pôsobí priaznivo na trecie vlastnosti, takže tieto mosadze sú vhodné na liatie ložísk a puzdier (Ms80Si3Pb3).

Mangánové mosadze pre tvárnenie obsahujú 3 až 4 %Mn a na odliatky 4 až 5 %Mn. Majú vysokú pevnosť, veľkú húževnatosť a dobrú odolnosť proti korózii a používajú sa obvykle ako heterogénne. Na tvárnenie sú určené mosadz Ms58Mn (tzv. duokov) a mosadz Ms57AlMn (trikov), ktoré majú pomerne vysokú pevnosť (v polotvrdom stave 400 až 500 MPa) pri veľkej húževnatosti a odolávajú dobre korózii.

Cínové mosadze sú prevažne heterogénne zliatiny s obsahom cínu do 2,5 %. Cín pôsobí priaznivo na mechanické vlastnosti a odolnosť proti korózii. Niektoré zliatiny, ako Ms60Sn, majú dobré akustické vlastnosti a používajú sa na výrobu zvukových nástrojov. Zliatina Ms62Sn sa používa na výrobu pásov, plechov a profilov využívaných pri stavbe námorných lodí.

Niklové mosadze obsahujú 8 až 20 %Ni, ktorý sa dokonale rozpúšťa v homogénnych mosadziach. Homogénne zliatiny majú vysokú tvárnosť za studena a sú vhodné na hlboké ťahanie. Heterogénne zliatiny sú veľmi dobre tvárne za tepla. Niklové mosadze majú dobré mechanické vlastnosti, odolnosť proti korózii a sú dobre leštiteľné. Zliatiny s obsahom medi okolo 60 % a niklu 14 až 18 % (napr. Ms65Ni14) patria k najstarším zliatinám (na úžitkové a ozdobné predmety) a sú známe pod rôznymi obchodnými názvami ako pakfong, alpaka, argentan a pod.

Tvrde spájky sú buď jednoduché alebo špeciálne mosadze s teplotou tavenia nad 600°C. Používajú sa na spájkovanie kovov a zliatin s vyššou teplotou tavenia, ako sú meď a jej zliatiny, ocele, liatiny a pod. Ak ide o binárne zliatiny Cu-Zn, označujú sa ako mosadzné spájky, s prísadou ďalšieho kovu (Ag alebo Ni) ako strieborné spájky alebo niklové spájky.

Bronzy.

Sú to zliatiny medi s ďalšími prvkami okrem zinku a obvykle sa nazývajú podľa hlavnej prísady, a to *cínové bronzy*, *hliníkové bronzy* a pod.

Cínové bronzy sú zliatiny medi s cínom, kde množstvo oboch kovov je najmenej 99,3 %. Pre technickú prax majú význam len zliatiny do obsahu 20 %Sn. Cínové bronzy s vyšším obsahom Sn sú vplyvom prítomnosti intermediárnych fáz veľmi krehké. V tekutom stave sú Cu a Sn dokonale rozpustné, v tuhom stave je ich rozpustnosť obmedzená. Prísada cínu má na vlastnosti bronzu podobný vplyv ako zinok v mosadziach. Na tvárnenie sa používajú cínové bronzy do obsahu asi 9 %Sn (nad 5 % tieto zliatiny možno ľahko zohriať do jednofázového stavu). Používajú sa tam, kde z hľadiska pevnosti alebo odolnosti proti korózii nepostačuje mosadz. Na odliatky sa používajú bronzy s vyšším obsahom Sn do 20%. Využívajú sa omnoho častejšie než bronzy tvárnené. Odliatky z cínových bronzov majú dobrú pevnosť a húževnatosť, vysokú odolnosť proti korózii a využívajú sa ich výborné trecie vlastnosti. Cínové

bronzy majú malú zmršťivosť (1 %), ale horšiu zabiehavosť a väčší sklon k tvorbe mikrostiahnutí.

Cínové bronzy na tvárnenie. Bronz CuSn1 (STN 42 3011) obsahuje 0,8 až 2 %Sn a má v mäkkom stave pevnosť v ťahu 250 MPa, ťažnosť 33 %. Má dobrú odolnosť proti korózii a elektrickú vodivosť, používa sa v elektrotechnike. Bronz CuSn3 (STN 42 3012) s 2,5 až 4 %Sn má v mäkkom stave pevnosť v ťahu 280 MPa a ťažnosť 40 %. Používa sa na výrobu zariadení v chemickom priemysle a elektrotechnike. Bronz CuSn12 (STN 42 3016) s pevnosťou v ťahu 350 MPa a ťažnosťou 40 % (v mäkkom stave) sa používa obzvlášť tam, kde je požadovaná zvýšená odolnosť proti korózii, pri dobrej pevnosti a húževnatosti, napr. na pružiny pre korózne prostredia. Bronz CuSn8 (STN 42 3018) má zo skupiny tvárnených cínových bronzov najvyššiu pevnosť (380 MPa) a ťažnosť (40 %). Je vhodný na výrobu ložiskových puzdier a v tvrdom stave na pružiny, ktoré nepodliehajú únave pri korózii.

Cínové bronzy na odliatky. Bronz CuSn1 (STN 42 3111) s nízkym obsahom cínu má dostatočnú elektrickú vodivosť a používa sa predovšetkým na výrobu odliatkov pre elektrotechnické účely. Bronzy CuSn5 a CuSn10 (STN 42 3115 a 42 3119) majú pevnosť v ťahu 180 a 220 MPa, ťažnosť 15 % a dobrú odolnosť proti korózii. Používajú sa na namáhané súčasti turbín, kompresorov, na výrobu armatúr a obežných kolies čerpadiel. Bronz CuSn12 (STN 42 3123) sa používa na súčasti, ktoré sú vystavené vysokému mechanickému namáhaniu pri súčasnom trecom namáhaní. Bronzy CuSn10 a CuSn12 sa používajú ako ložiskové bronzy. Používanie bronzov s vyšším obsahom Sn 14 až 16 % (vysoká cena) sa nahrádza cínovými bronzami s približne 6 %Sn (dobré klzné vlastnosti).

Cínovo-olovené a olovené bronzy sú zliatiny medi, pri ktorých sa Sn čiastočne alebo celkovo nahrádza Pb. Olovo ako prísada k medi zlepšuje klzné vlastnosti zliatin bez negatívneho vplyvu na ich tepelnú vodivosť. Sústava Cu-Pb sa vyznačuje len čiastočnou rozpustnosťou oboch kovov v tekutom a prakticky úplnou nerozpustnosťou v tuhom stave. Výsledná štruktúra zliatin pozostáva po stuhnutí z kryštálov medi a olova. Pri rýchlom ochladzovaní zliatiny sú obe zložky rovnomerne rozložené a zliatiny majú veľmi dobré klzné vlastnosti. Olovené bronzy sú preto zvlášť vhodné na vylievanie oceľových panví klzných ložísk. Znášajú vysoké merné tlaky, pomerne veľké obvodové rýchlosti a je ich možné použiť aj pri zvýšených teplotách (asi 300°C).

Hliníkové bronzy sú zliatiny medi, kde je hlavnou prísadou hliník. Pre technickú prax majú význam zliatiny s obsahom do 12 %Al. Štruktúra homogénnych zliatin je tvorená kryštálmi tuhého roztoku (substitučný tuhý roztok hliníka v medi) s mriežkou K12. Horná hranica obsahu Al v zliatinách s homogénnou štruktúrou závisí od rýchlosti ochladzovania a pohybuje sa v intervale 7,5 až 8,5 %Al. Heterogénne zliatiny sa častejšie využívajú, pretože je u nich možné získať veľmi dobré mechanické vlastnosti tepelným spracovaním. Zliatiny s obsahom 10 až 12 %Al je možné tepelne spracovávať podobne ako ocele.

Kremíkové bronzy. Kremíkové bronzy (0,9 až 3,5 %) majú dobrú tvárnosť za tepla aj za studena a používajú sa tiež na výrobu odliatkov. Odolávajú účinkom kyseliny sírovej, soľnej a niektorým zásadám.

Berýliové bronzy. Berýlium je v medi obmedzene rozpustné (max. 2,7 %) a v tuhom stave sa jeho rozpustnosť výrazne znižuje (0,2 % pre teplotu okolia). Vyrábajú sa zliatiny s vyšším obsahom Be a ďalšími prísadovými prvkami (Ni, Co, Mn, Ti). Co (0,2 až 0,3 %) zvyšuje žiarupevnosť, Ni zlepšuje húževnatosť a Ti zjemňuje zrna. Najväčší význam majú zliatiny s približne 2 %Be, kedy sa dosahujú najvyššie mechanické vlastnosti precipitačným vytvrdzovaním. Použitie berýliových bronzov je dané predovšetkým ich vysokou pevnosťou, tvrdosťou a odolnosťou proti korózii, ktorú tieto zliatiny nestrácajú ani vo vytvrdenom stave. Berýliové bronzy sú drahé a v normách STN nie sú zaradené.

Niklové bronzy. Med' a nikel sú vzájomne dokonale rozpustné v tekutom aj v tuhom stave. Binárne zliatiny Cu-Ni s nízkym obsahom Ni (do 10 %) sa vyrábajú s minimálnym obsahom prímies a používajú sa len obmedzene. Širšie uplatnenie majú komplexné ternárne zliatiny a viaczložkové, ktoré sú vytvrditeľné. Niklové bronzy majú dobrú pevnosť pri normálnej aj zvýšenej teplote, dobrú medzu únavy, sú odolné voči korózii aj pod napätím, odolávajú opotrebeniu, majú vysoký elektrický odpor. Nahrádzajú ich iné lacnejšie zliatiny medi.

Označovanie druhov medi, jej zliatin a stavov týchto technických materiálov

Označovanie medi a jej zliatin, rovnako ako ostatných neželezných kovov, sa doteraz riadi STN 42 0055. Podľa tejto normy sa každý materiál označuje základným šesťmiestnym číslom a jeho stav doplnkovým číslom za oddeľujúcou bodkou.

Európske alfanumerické označovanie tvárnených i odlievaných druhov medi a jej zliatin obsahuje norma STN EN 1412 (triediaci znak 42 1308), ktorá je založená na norme ISO/TR 7003 a je alternatívou k sústave označovania materiálov podľa ISO 1190-1.

Každý druh materiálu sa označuje šiestimi znakmi (veľkými písmenami a číslicami) podľa nasledujúcich pravidiel:

- a. prvý znak je písmeno "C" označujúce skupinu medi a jej zliatin
- b. druhý znak je písmeno bližšie určujúce materiály pre skupinu polotovarov a výrobkov
B – ingoty na pretavenie na liate výrobky
C – liate výrobky
M – predzliatiny
R – rafinovaná netvárnená med'
S – prídavné materiály
W – tvárnené polovýrobky
X – nenormalizované materiály
- c. tretí, štvrtý a piaty znak sú číslice 001 až 799 pre normalizované druhy medi a jej zliatin
- d. šiesty znak je písmeno označujúce skupinu materiálov podľa ich chemického zloženia takto:

- A alebo B – technicky čistá meď
- C alebo D – nízkolegované zliatiny medi (do 5 % iných prvkov)
- E alebo F – vysokolegované zliatiny medi (5 % a viac iných prvkov)
- G - zliatiny meď-hliník
- H - zliatiny meď-nikel
- J - zliatiny meď-nikel-zinok
- K - zliatiny meď-cín
- L alebo M – zliatiny meď-zinok (binárne mosadze)
- N alebo P – zliatiny meď-zinok-olovo
- R alebo S – zliatiny meď-zinok (komplexné mosadze)

Spôsob alternatívneho označovania druhov medi alebo jej zliatin je zrejmý z nasledujúcich dvoch prípadov:

- CW 004 A (podľa STN EN 1412) alebo Cu-DHP (podľa ISO 1190-1)
- CW 722 R (podľa STN EN 1412) alebo CuZn40Mn1Pb1FeSn (podľa ISO 1190-1)

Európske označovanie stavov medi a jej zliatin je uvedené v norme STN EN 1173 (triediaci znak 42 1309). Označovanie stavov je založené na vyjadrení záväzných požadaviek na vlastnosti polovýrobkov a výrobkov a neberie do úvahy ani tepelné spracovanie ani spôsob výroby a stavy polovýrobkov a výrobkov sa podľa tejto normy vyjadrujú iba jednou z vlastností, napr. pevnosťou alebo tvrdosťou alebo veľkosťou zrna, a pod. Toto označovanie je vhodné pre tvárnené alebo liate výrobky, nie je vhodné pre predliatky (ingoty). Neumožňuje jednoznačne priradiť k sebe stavy výrobkov vyjadrené touto normou a doplnkovým dvojčíslím v STN 42 0055.

Každý stav polovýrobku alebo výrobku sa označuje štyrmi až šiestimi znakmi (veľkými písmenami a číslicami) podľa nasledujúcej schémy:

- a. Prvým znakom je písmeno označujúce záväznú vlastnosť:
 - A – ťažnosť
 - B – medza pružnosti v ohybe
 - D – bez špecifikovanej vlastnosti, v ťahanom stave
 - G – veľkosť zrna
 - H – tvrdosť podľa Brinella alebo Vickersa
 - M – bez špecifikovanej vlastnosti, z výroby
 - R – pevnosť v ťahu
 - Y – dohovorená medza klzu
- b. Druhý, tretí a štvrtý znak sú číslice udávajúce minimálnu hodnotu záväznej vlastnosti, označenie D a M podľa bodu a) nie sú nasledované číslicami; v prípade nízkej hodnoty vyjadrenej jednou číslicou na štvrtom mieste nuly (napr. ťažnosť 3 % sa označí A 003); hodnoty vlastností sa uvádzajú v týchto jednotkách: A [%], B, R, Y [MPa]; G [μm] a H [MPa].
- c. Piaty, prípadne šiesty znak sa pridáva v prípade vysokých hodnôt (väčších ako 999) alebo ak je vhodné žíhanie na zníženie zvyškových napätí, napr. pevnosť v ťahu 1050 MPa sa označí R1050 alebo uvedené dodatočné žíhanie R460S.

V európskych normách polovýrobkov a výrobkov z medi a jej zliatin sa postupne uvádza druh materiálu, potom stav výrobku a nakoniec ďalšie doplnenie podľa príslušných noriem výrobkov, ako ukazujú nasledujúce dva príklady:

- drôt EN 12166-CW024A-R330-... alebo drôt EN 12166-Cu-DHP-R330-...
- výkovok EN 12420-CW722R-H085-... alebo výkovok EN 12420-CuZn40Mn1Pb1FeSn-H085-...

Návrhy európskych noriem výrobkov väčšinou predpisujú stavy H, R, M, t.j. predpisujú minimálnu tvrdosť, minimálnu pevnosť v ťahu alebo nepredpisujú žiadnu vlastnosť (viď bod a).

5.2.2 Nikel a jeho zliatiny

Nikel (Ni) je kov bielej farby s kubickou plošne centrovanou mriežkou (K12), bez alotropickej premeny až po teplotu tavenia (1453°C). Nikel patrí spolu so železom a kobaltom do skupiny feromagnetických kovov. Curieho teplota čistého niklu je 357°C, pričom polohu Curieho bodu ovplyvňuje čistota niklu (Fe, Co teplotu zvyšujú, ostatné prísady znižujú). Mechanické vlastnosti niklu sú závislé od čistoty, spracovania a teploty. Merná hmotnosť niklu je 8900 kg.m⁻³. Čistý nikel je tvárny, má medzu klzu 150 MPa, pevnosť v ťahu 400 až 450 MPa (v mäkkom stave), ťažnosť 30 až 40 % a tvrdosť 80 HB.

Tvárnenním za studena sa pevnosť v ťahu zvyšuje až na 1100 MPa, ale znižuje sa ťažnosť na 2 %, tvrdosť je 220 HB. Do teploty 400°C sa pevnostné vlastnosti niklu takmer nemenia, pri vyšších teplotách rýchlo klesá R_m. Čistý nikel je dobre zvariteľný väčšinou bežne používaných zvaracích metód. Nikel dobre odoláva korózii v rôznych prostrediach. Z ekonomického hľadiska je deficitným prvkom. Približne 15 % svetovej produkcie niklu sa používa na tvárnené alebo odlievané súčasti, určené predovšetkým pre silne korózne prostredie. Typické je použitie čistého niklu v potravinárskom a chemickom priemysle a v elektrotechnike. Najväčšia časť niklu (asi 60 %) sa spotrebuje ako prísada v legovaných oceliach a zvyšok tvoria rôzne niklové zliatiny.

Zliatiny niklu sú všeobecne pevnejšie, tvrdšie a húževnatejšie než väčšina zliatin neželezných kovov a než celý rad ocelí. Ich cena je však pomerne vysoká, porovnateľná s cenou akostných nehrdzavejúcich ocelí, ale sú lacnejšie než titánové zliatiny. Použitie týchto zliatin je ekonomicky výhodné, ak sú využité ich vysoké mechanické vlastnosti, predovšetkým pri zvýšených teplotách, alebo vlastnosti chemické, ktoré sú v rade zliatin výhodnejšie než pri čistom nikle, ako aj špeciálne fyzikálne vlastnosti.

Konštrukčné zliatiny možno rozdeliť do troch skupín:

- zliatiny pre prácu v bežných podmienkach,
- antikorózne zliatiny,
- žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny.

Konštrukčné zliatiny niklu pre prácu v bežných podmienkach. Pre bežné pracovné podmienky sa niklové zliatiny používajú predovšetkým v štátoch, v ktorých nikel nie je vyslovene deficitným kovom. U nás sa používajú len vo veľmi malej miere.

Nevytvrdiviteľné konštrukčné zliatiny sa spevňujú tvárnením za studena. Do tejto skupiny patria najmä zliatiny s prísadou Mn, Si a Mo. *Zliatiny Ni-Mn* (2 až 5 %Mn) majú zvýšenú odolnosť pri zvýšených teplotách v oxidačnom alebo redukčnom prostredí, ktoré obsahuje zlúčeniny síry. *Zlievárenské zliatiny Ni-Si* majú vyšší obsah kremíka (9 %Si) a ďalšie prísady ako Cu, Fe, Cr, Co a Mn. Majú rovnako ako *zliatiny Ni-Mo* (až 32 %Mo + ďalšie prísady) vysokú odolnosť v prostrediach viacerých kyselín.

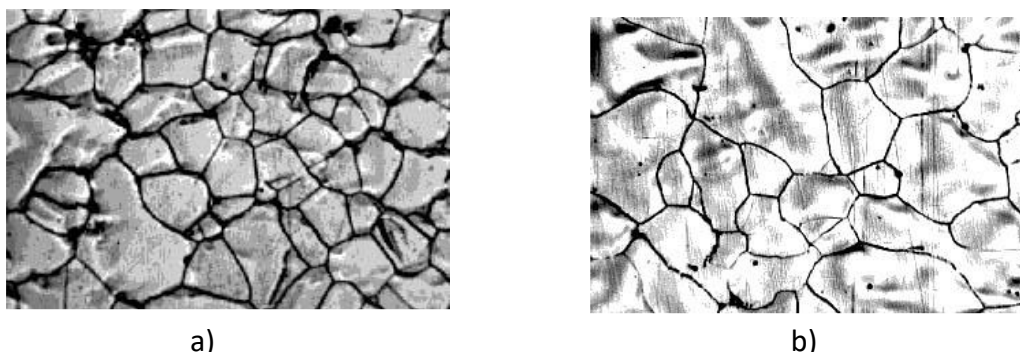
Vytvrdiviteľné konštrukčné zliatiny sa spevňujú precipitačným vytvrdzovaním. V *zliatinách Ni-Be* (cca 2 %Be) sa dosahuje po vytvrdení pevnosť až 1800 MPa pri dostatočnej ťažnosti a bez zníženia koróznej odolnosti. *Zliatiny Ni-Al* so 4,5 %Al majú po precipitačnom vytvrdzovaní pri 590°C pevnosť až 1350 MPa pri ťažnosti 7 % a tvrdosti 380 HB.

Zliatiny Ni-Cu patria k najrozšírenejším zliatinám niklu a sú známe pod obchodným označením *monely*. Pôvodne sa vyrábali priamo z rúd obsahujúcich oba prvky v pomere asi 2 : 1 (Kanada). Súčasné monely obsahujú 29 až 32 %Cu, prípadne niektorých ďalších kovov ako Si, Mn, Fe, Al. Jednoduché zliatiny sa spevňujú tvárnením za studena, zliatiny s prísadou Al sú vytvrdiviteľné a vôbec najväčšie pevnosti sa dosahujú kombináciou deformácie a vytvrdzovania. Jednoduché monely sa uplatňujú tam, kde sa požaduje súčasne vysoká pevnosť aj korózna odolnosť. Vyrábajú sa z nich ventily, čerpadlá, propelery, námorné komponenty, chemické zariadenia a tepelné výmenníky. Komplexné monely sú vhodné aj na použitie pri vyšších teplotách.

Antikorózne zliatiny niklu. Pre najťažšie korózne podmienky, pre ktoré iné materiály nevyhovujú koróznou odolnosťou (oceľ), mechanickými vlastnosťami (olovo, nekovové materiály) alebo extrémne vysokou cenou (tantal, titán) sa používajú antikorózne zliatiny niklu. Aj tieto materiály sú však veľmi drahé a surovinovo náročné. Majú vysokú pevnosť, ale väčšina z nich má len obmedzenú schopnosť deformácie za studena. S rôznymi obmenami chemického zloženia sa vyrábajú vo viacerých štátoch pod rôznymi názvami, najrozšírenejšie názvy podľa pôvodných výrobcov sú Haynes Co. a International Nickel Co. Pre redukčné pôsobiace prostredia boli vyvinuté *zliatiny Ni-Mo*.

Východiskovým vývojovým typom bola zliatina NiMo20Fe20 označená ako *Hastelloy A*, z ktorej vznikol znížením obsahu Fe pod 10 % a zvýšením obsahu molybdénu na 30 % zlepšený typ *Hastelloy B*. Je určený pre neoxidujúce prostredia. Používa sa napr. na nádrže pre morenie v HCl alebo H₂SO₄. Pre oxidačné prostredia boli vyvinuté zliatiny Ni-Mo-Cr. Je v nich znížený obsah Mo (zabezpečuje odolnosť v redukčnom prostredí) a doplnená prísada Cr, ktorá zabezpečuje pasivačnú schopnosť zliatiny. Typickým predstaviteľom je zliatina NiMo18Cr16, označovaná ako *Hastelloy C*. Má nižšiu koróznou odolnosť v kyseline chlorovodíkovej, je však univerzálnejšia a použiteľná v redukčnom aj oxidačnom prostredí. Žiadny z uvedených typov zliatin neodoláva kyseline sírovej v celom rozsahu koncentrácií a teplôt (až do varu). Pre tento účel slúžia *zliatiny Ni-Si-Cu*. Konkrétne *Hastelloy D* je zliatina NiSi10Cu4 a jej korózna odolnosť sa zakladá na ochrannom pôsobení sulfátového filmu na povrchu zliatiny, obr.5.14. Tento sulfátový film vzniká účinkom kyseliny sírovej. *Inconel* sú antikorózne zliatiny *Ni-Cr* (min.

72 %Ni, 15 %Cr, 8 %Fe). Uplatňujú sa hlavne pri súčiastiach namáhaných za tepla, v prostrediach, ktoré obsahujú voľné halové prvky.



Obr.5.14 Mikroštruktúra Hastelloy D a) po odliatí, b) po homogenizačnom žíhaní

Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny niklu. Žiaruvzdorné a žiarupevné zliatiny niklu sú vysokopevné konštrukčné materiály používané tam, kde nepostačujú svojimi vlastnosťami špičkové žiarupevné ocele. Sú určené pre prevádzkové teploty nad 750°C. Je vyvinutý celý rad typov (pre rôzne namáhania a prevádzkové teploty). Vývoj týchto zliatin bol motivovaný predovšetkým vývojom spaľovacích turbín a potrebou pracovať so stále vyššími vstupnými teplotami spalín (najmä pri najexponovanejších súčiastiach, ako sú obežné lopatky). Tieto zliatiny dostali označenie *Nimonic*. Pre najvyššie tepelno-pevnostné podmienky sa dnes ako konštrukčné materiály používajú komplexne legované vytvrditeľné zliatiny niklu, označované pre svoje vlastnosti *superzliatiny*.

5.2.3 Kobalt a jeho zliatiny

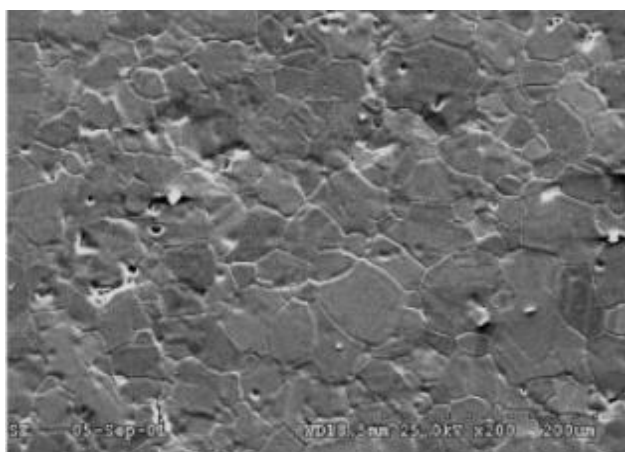
Kobalt (Co) je polymorfný kov s mernou hmotnosťou 8900 kg.m⁻³ a s teplotou tavenia 1495°C. Kryštalizuje v dvoch alotropických modifikáciách: nízkoteplotnej α s mriežkou H12 a vysokoteplotnej β s mriežkou K12. Teplota alotropickej premeny je 417°C. Kobalt je prvkom feromagnetickým a teplota Curieho bodu je 1120°C. Čistý kobalt sa takmer nepoužíva. Je v celosvetovom meradle kovom veľmi deficitným. Kobaltové zliatiny majú veľmi dobrú koróznú odolnosť a vysokoteplotné creepové vlastnosti. Zliatiny kobaltu našli uplatnenie ako materiály magneticky tvrdé. Ako konštrukčné a nástrojové materiály sa používajú najmä zliatiny odolné proti opotrebeniu (pre technické aplikácie i medicínske účely) a zliatiny žiarupevné a žiaruvzdorné (superzliatiny).

Stelity sú polykomponentné liate zliatiny, vyznačujúce sa vysokou odolnosťou proti opotrebeniu a korózii aj pri vyšších teplotách. Vyznačujú sa vysokou tvrdosťou pri normálnej teplote (600 HBW = 59 až 68 HRC) i pri teplotách nad 600°C (pri teplote 900°C až 200 HBW) a sú označované ako *zliatiny s vysokou tvrdosťou*. Pri teplote nad 600°C majú vyššiu tvrdosť než rýchlorezné ocele a ich opotrebenie pri vyšších teplotách je menšie než pri rýchlorezných oceliach. Konvenčné stelity typu Co-Cr-W-C obsahujú vždy okolo 30 %Cr, od 4 do 17 %W a od

1 do 3,7 %C. V štruktúre majú karbidy M_7C_3 a v malom množstve M_6C_3 , bázu tvorí tuhý roztok chrómu a volfrámu v kobalte.

Stelity charakterizuje veľmi dobrá odolnosť proti oxidácii a korózii, sú najviac odolné proti pôsobeniu kyseliny sírovej, fosforečnej a organických kyselín, ale ich odolnosť je ohraničená pri pôsobení kyseliny soľnej a dusičnej, najmä pri zvýšených teplotách. Všetky stelity sú zvariteľné a používajú sa k naváraní tvrdých, proti korózii odolných vrstiev (napr. na hlavy ventilov spaľovacích motorov). Sú ťažko obrobiteľné, ale brúsením je možné dosiahnuť vysokú hladkosť povrchu. Stelity sa predovšetkým používajú na nemazané časti strojov, ktoré vyžadujú odolnosť proti opotrebeniu pri zvýšených teplotách.

Implantáty na báze kobaltu. V päťdesiatych rokoch sa na stomatologické odliatky začala používať zliatina kobaltu, nazývaná *Vitalium* (65 %Co, 27 %Cr, 6 %Mo a 2 %Ni). Táto zliatina neskôr (po nevelkej modifikácii chemického zloženia) našla použitie na výrobu implantátov, predovšetkým v odlievaní endoprotéz na trvalé zastupovanie opotrebovaných častí ľudského organizmu. V súčasnosti sú bedrové endoprotézy vo viacerých krajinách vyrábané zo zliatin kobaltu Co-Cr-Mo. Mikroštruktúra zliatiny kobaltu je uvedená na obr.5.15.



Obr.5.15 Mikroštruktúra zliatiny kobaltu Co-Cr-Mo (SEM)

Kobaltové superzliatiny. Superzliatiny sa v podstate nelíšia svojim chemickým zložením od stelitov, rozdiel je v ich použití. Prototypom superzliatin bola opäť zliatina Vitalium (v danom prípade obsahujúca 0,4 %C, 30 %Cr, 5 %Mo, 2 %Ni). Superzliatiny sa odlišujú od zliatiny Vitalium predovšetkým náhradou molybdénu volfrámom a eventuálnym prídavkom bóru, tantalu a zirkónu. Vyšší obsah niklu vyplýva výlučne zo snahy ušetriť kobalt. Pre svoju odolnosť proti korózii a dobré zlievárenské vlastnosti sa rozšírila oblasť jej použitia najskôr na lopatky plynových turbín a s ohľadom na vynikajúcu žiarupevnosť a žiaruvzdornosť sa v súčasnosti používa na výrobu vysoko zaťažených prvkov v kozmickom priemysle, v leteckom priemysle - v prúdových motoroch na lopatky turbín a radiace lopatky, spaľovacie komory atď.

5.3. Ľahkotaviteľné kovy a ich zliatiny

Medzi ľahkotaviteľné kovy zaraďujeme kovy s teplotou tavenia do 600°C, t.j. Ga, In, Sn, Pb, Bi, Sb, Zn a Cd, ktoré majú ako konštrukčný materiál menší alebo väčší význam v

technicky čistej forme alebo ako základ zliatin. Väčšina ľahkotaviteľných kovov sa používa na pokovovanie.

5.3.1 Ľahkotaviteľné kovy

Indium (In) je veľmi tvárny, mäkký kov s teplotou tavenia 156,4°C. Patrí medzi stopové kovy, napriek svojej vysokej cene nadobúda stále väčší technický význam. V strojárstve sa používa indium ako prísada k iným ľahkotaviteľným kovom. V týchto zliatinách potom zvyšuje pevnosť a antikoročné vlastnosti. V leteckom a automobilovom priemysle sa používa galvanicky nanesená vrstva india ako ložiskový kov. Pokovovanie indiom zvyšuje odolnosť ložísk leteckých a naftových motorov proti korózii a opotrebeniu.

Cín (Sn) je deficitný a patrí k najdrahším technickým kovom. Má teplotu tavenia 232°C. Podstatná časť svetovej výroby cínu sa spotrebuje vo výrobe pocínovaných plechov, ktoré sa používajú na výrobu konzerv. Cínový povlak dobre odoláva koróznym účinkom potravín, pričom nemá negatívny vplyv na ich kvalitu (t.j. na zdravotnú bezchybnosť, chuť, vzhľad a pod.). Je ho možné vyvalcovať na fólie o hrúbke menšej ako 0,1 mm (tzv. staniol), ktoré sa skôr používali ako obalový materiál na potravinárske výrobky. Veľká časť výroby cínu sa ďalej spotrebuje na výrobu zliatin, a to najmä cínových bronzov, kompozícií a mäkkých spájok.

Zinok (Zn) má teplotu tavenia 419°C. Má dobré zlievárenské vlastnosti a odoláva atmosférickej korózii. Používa sa hlavne na povrchovú ochranu (až 1/3 výroby je určená na pozinkovanie, metalizáciu) plechov, drôtov a pásov; časť na výrobu mosadzí a zliatin na báze zinku a časť sa využíva v grafickom priemysle (ofsetové tabule). Zinkové zliatiny na výrobu odliatkov pod tlakom sú ternárne zliatiny typu Zn-Al-Cu. Obsah hliníka je okolo 4%, prísada medi je v jednotlivých druhoch odstupňovaná. Sú to normované zliatiny s 0,5; 1 a 3 %Cu. Prísada medi zvyšuje pevnosť odliatkov, pôsobí však nepriaznivo na stálosť rozmerov.

Bizmut (Bi), antimón (Sb) a kadmium (Cd) sa používajú predovšetkým ako prísadové prvky na výrobu zliatin. Čistý bizmut (teplota tavenia 271°C) sa používa pri výrobe atómovej energie ako chladiace médium a zliatiny Bi-V, Bi-Tn sa používajú ako palivo pre atómové reaktory. Antimón (teplota tavenia 631°C) slúži na výrobu zliatin s nízkou teplotou tavenia a časť sa využíva na pokovovanie medi a mosadzí. Čisté kadmium (teplota tavenia 321°C) sa používa v atómových reaktoroch na reguláciu jadrových reakcií. Zliatiny kadmia majú technické využitie predovšetkým ako spájky, kompozície a nízkotaviteľné zliatiny.

Olovo (Pb) má teplotu tavenia 327,4°C, je dobre tvárne, dobre zlievateľné, zvárateľné a obrábateľné, nedá sa však pilovať, nakoľko maže. Na vzduchu sa pokrýva oxidickou vrstvou, chrániacou pred ďalšou oxidáciou. Je mimoriadne odolné proti účinkom kyseliny sírovej, ľahko ho však narušuje riedená kyselina dusičná a organické kyseliny. Olovo je jedovaté, preto pri jeho výrobe a spracovaní musia byť dodržiavané prísne bezpečnostné opatrenia. Dodáva sa v rôznych stupňoch čistoty, a to buď ako tzv. mäkké olovo, alebo ako olovo tvrdé.

Mäkké olovo je vlastne technicky čisté olovo (od 99,5 %Pb vyššie). Je určené na výrobu zliatin olova, na výrobu striel, brokov, kaliacich kúpeľov, tesnení vodovodných a kanalizačných rúr, v chemickom priemysle na kyselinovzdorné vyloženia a pod.

Tvrdé olovo je zaužívané označenie pre zliatiny Pb-Sb. Napr. káblové plášte sa lisujú z tvrdého olova, zliatiny PbSb0,5. Na výrobu akumulátorových dosiek sa používa PbSb5,5 a PbSb7,5. Pomerne veľké množstvo tvrdého olova sa spotrebuje vo forme rôznych tvárnených polotovarov v strojárstve (tesnenia) a chemickom priemysle. Zo zliatin olova (okrem už uvedených) sú najdôležitejšie kompozície a mäkké spájky.

5.3.2 Zliatiny ľahkotaviteľných kovov

Podľa účelu použitia a najvýznamnejších vlastností ich môžeme rozdeliť do troch významných skupín:

- kompozície,
- mäkké spájky,
- ľahkotaviteľné zliatiny.

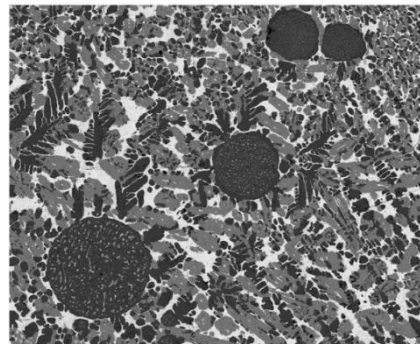
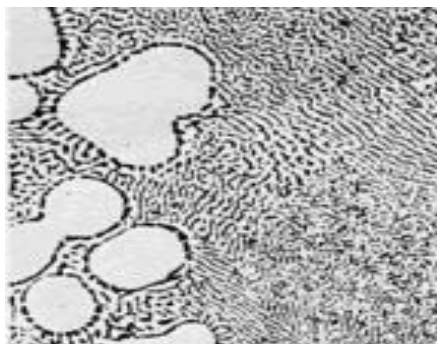
Kompozície sú zliatiny určené na vylievanie ložiskových panví. Ložiskové kovy sa všeobecne volia podľa merných tlakov a klznej rýchlosti. Pre malé rýchlosti (do 5 m.s^{-1}) a malé merné tlaky (do 0,5 MPa) vyhovujú dobre mazané liatinové panvy. Pre najväčšie merné tlaky a rýchlosti do 10 m.s^{-1} nachádzajú uplatnenie olovené bronzy. Kompozície sa osvedčujú ako vhodný materiál pre výstelky klzných ložísk pre malé rýchlosti a stredné merné tlaky (do 12 MPa). Zaujímajú teda dôležité miesto najmä ako ložiskový kov pre rôzne dopravné prostriedky.

Olovené kompozície obsahujú Pb, Sn, Sb a Cu. Mäkký základ tvoria olovo a cín, tvrdou fázou sú kubické kryštály antimónu. Oloveným kompozíciami s prísadou cínu sa niekedy dáva prednosť pred cínovými kompozíciami a používajú sa na výstelky ložísk strojov, s prísadou Ni a As sa používajú na namáhané ložiská a ložiskové panvy, napr. železničných vozidiel.

Kadmiové kompozície sa využívajú v dvoch typoch. Jednak ako zliatiny kadmia s malou prísadou niklu, jednak v podobe zliatin s kombinovanou prísadou medi a striebra. Využívajú sa v leteckých a automobilových motoroch. Majú vyššiu teplotu tavenia, vyššiu pevnosť a tvrdosť ako kompozície cínové. Zároveň majú vyššiu odolnosť proti opotrebeniu a lepšiu tepelnú vodivosť. Majú však značnú tepelnú rozťažnosť a ľahko oxidujú v tekutom stave.

Mäkké spájky, používané v technickej praxi, sú prevažne binárne zliatiny Pb - Sn. Používa sa celý rad spájk s odstupňovaným obsahom cínu. Podeutektické zliatiny (s vyšším obsahom Sn) sa vyznačujú nižšou pevnosťou a výhodnou cenou v porovnaní s cenou cínu. Používajú sa ako spájky tam, kde by bol vysoký obsah olova nevýhodou zo zdravotného hľadiska, napr. na spájkovanie lekárskeho prístrojov a v potravinárskom priemysle. Používajú sa na mäkké spájkovanie ocele, zinku, medi, pocínovaných, pozinkovaných a poolovených plechov.

Kadmiové spájky vyžadujú vyššiu pracovnú teplotu a práca s nimi je preto pomalšia. Mikroštruktúra vybraných spájk je na obr.5.16 a obr.5.17.



Obr.5.16 Mikroštruktúra zliatiny Sn30Pb

Obr.5.17 Mikroštruktúra zliatiny BiZnSb

Ľahkotaviteľné zliatiny sa používajú ako spájky s extrémne nízkou teplotou tavenia (spájkovanie tavných poistiek), na tavné poistky na ochranu proti nadmernému ohrevu a na iné podobné účely. Tieto zliatiny obsahujú okrem bežných ľahkotaviteľných kovov (Sn, Pb) aj bizmut, antimón alebo kadmium. Najznámejšou zlatinou tohto typu je tzv. Woodov kov, ktorý obsahuje bizmut, olovo, cín a kadmium v pomere 4:2:1:1. Používa sa na výrobu tavných poistiek, na spájky na špeciálne účely a pod.

5.4. Ťažkotaviteľné kovy a ich zliatiny

Ťažkotaviteľné kovy sú kovy s teplotou tavenia vyššou ako má železo, ale zároveň sa tieto kovy ťažko tavia vzhľadom na vysokú afinitu ku kyslíku. Patria sem Cr, V, Zr, Mo, W, Ta, Nb, Hg, Re a niekedy sa sem radí aj titán. Ťažkotaviteľné kovy tvoria zliatiny, v ktorých vždy prevláda základný kov s C, N, B a Si tvoria zlúčeniny a medzi sebou tvoria tuhé roztoky.

Chrómovanie (Cr) sa taví pri teplote 1 865°C. Je vysoko odolný proti korózii vďaka pasivačnej schopnosti. Svoj lesk nestráca na vzduchu ani vo vode. Odoláva roztokom niektorých kyselín a alkalickým roztokom. Najväčšie množstvo Cr sa spotrebuje pri legovaní vysokolegovaných antikoročných, žiaruvzdorných a žiarupevných ocelí. Zlepšuje odolnosť proti korózii, zvyšuje prekaliteľnosť a zlepšuje vlastnosti cementačných vrstiev. Čistý Cr sa používa na galvanické pokovovanie s cieľom buď zlepšiť vzhľad výrobkov (lesklé chrómovanie), pohlcovať tepelné žiarenia (čierne chrómovanie), alebo zvýšiť povrchovú tvrdosť súčiastok (tvrdé chrómovanie).

Zirkónium (Zr) je polymorfný kov podobný titánu, ktorý je základom radu zliatin a dôležitou prísadou v iných zlatinách. Teplota tavenia je 1852°C. V technickej praxi sa využívajú tie zliatiny, ktoré si popri výhodných mechanických vlastnostiach pri normálnej a zvýšenej teplote zachovávajú vynikajúcu koróznú odolnosť Zr, ktorá sa ešte zvyšuje prísadou cínu. Tieto sa potom využívajú predovšetkým v konštrukciách jadrových reaktorov a majú obchodné označenie *Zircaloy* ($\approx 1,4\% \text{ Sn}$), obr.5.18. Používajú sa ako povlaky palivových článkov vodou chladených reaktorov.



Obr.5.18 Mikroštruktúra zliatiny Zircaloy

Niób (Nb) s teplotou tavenia 2470°C má vysokú odolnosť proti kyselinám a pre dobré creepové vlastnosti nachádza použitie pri stavbe jadrových reaktorov. Zliatiny nióbu majú vynikajúcu žiaruvzdornosť a žiarupevnosť pri extrémne vysokých teplotách. Dôležité postavenie má Nb v supravodivých zliatinách, vo forme intermetalických zlúčenín. Veľký význam má niób ako prísada v oceliach. Zvyšuje medzu tečenia žiaruvzdorných a žiarupevných ocelí, v austenitických oceliach pôsobí stabilizačne a zvyšuje ich odolnosť proti medzikryštalickej korózii. Materiály legované nióбом sa považujú pri konštrukcii rakiet, nadzvukových lietadiel, turbín a vysokotlakých kotlov.

Tantal (Ta) je nepolymorfny kov s veľmi dobrou chemickou stálosťou a teplotou tavenia 2996°C . Veľmi čistý tantal sa pri tvárnení takmer nespevňuje. Uplatňuje sa pri konštrukcii chemických zariadení, na výrobu trysiek pre umelé vlákna, vo farmaceutickom priemysle, v chirurgii a tiež ako elektroodporový materiál pre vysoké teploty. Časť sa spotrebuje ako prísada ocelí a pri výrobe spekaných karbidov.

Molybdén (Mo) má teplotu tavenia 2620°C a vlastnosťami sa podobá volfrámu. Jeho pevnosť výrazne narastá tvárnením za studena a dosahuje až 2500 MPa pri ťažnosti 2 až 5 %, pri vysokej čistote je dobre tvárny. Má dobré mechanické vlastnosti aj pri vysokých teplotách, avšak bez účinnej povrchovej ochrany ho nemožno ako žiarupevný materiál použiť. Zliatiny Mo s Ti (do 1,2 %) a Zr (do 0,3 %) sú určené pre použitie pri vysokých teplotách, využívajú sa v konštrukcii nadzvukových lietadiel a rakiet, na súčasti krátkodobo zaťažované pri vysokých teplotách. Najviac molybdénu sa však spotrebuje pri výrobe zliatinových ocelí. Je prítomný tiež vo výrobkoch práškovej metalurgie (spekané karbidy, kontakty) a v magneticky mäkkých zliatinách typu permaloy.

Volfrám (W) má vôbec najvyššiu teplotu tavenia ($3530 - 3410^{\circ}\text{C}$). Na vzduchu je stály, s kyselinami väčšinou nereaguje. Najčastejšie sa vyrába metódou práškovej metalurgie. Mechanické vlastnosti W závisia od stupňa tvárnenia, pri tenkých drôtoch (0,02 mm) sa dosahuje pevnosť až 4200 MPa . Volfrám sa používa na vlákna žiaroviek, vo vysielacích elektrónkach (žeravé katódy, konštrukčné časti), v oblúkových lampách (elektródy), na výrobu

zváracích elektród, topné odpory pre najvyššie teploty a v zliatinách s Cu alebo Ag kontakty s dobrou odolnosťou proti oteru. Veľká časť volfrámu sa v podobe karbidov (WC) spotrebuje na výrobu rezných materiálov (tvrdokovy). Najviac volfrámu sa však uplatňuje ako prísada pri výrobe legovaných nástrojových ocelí a iných zliatin.

5.5. Drahé kovy a ich zliatiny

Drahé kovy a ich zliatiny sú charakterizované predovšetkým svojou malou afinitou ku kyslíku. Sú to Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ru, Ir, Os.

Striebro (Ag) má zo všetkých kovov najvyššiu elektrickú vodivosť, vysokú chemickú odolnosť a teplotu tavenia 962°C. Na vzduchu je úplne stále, odoláva aj slabším oxidačným prostrediam a väčšine soľných roztokov. Hlavnými odbormi využitia striebra je elektrotechnika a optika. Využíva sa jeho výborná tepelná a elektrická vodivosť, prípadne vysoká odrazivosť lúčov všetkých farieb. V elektrotechnike sa striebro používa najmä na kontakty, ktoré sa vyznačujú vysokou životnosťou (zliatiny s 5-20 %Cr). Zliatiny Ag s Cu, Zn, Cd, Sn, Pd a Pt nachádzajú použitie v klenotníctve a v priemyselnej praxi. Strieborné spájky (pre tvrdé spájkovanie) majú dobrú vodivosť, nízku teplotu tavenia a dávajú pevný, húževnatý a aj chemicky odolný spoj s dobrou vodivosťou.

Zlato (Au) má teplotu tavenia 1063°C, v prírode sa nachádza takmer výlučne v kovovej forme, a to buď ako rýdze alebo ako prímes striebra. Čistota (rýdzosť) zlata sa udáva buď v promile alebo v karátoch. Čisté zlato zodpovedá rýdzosti 24 karátov. Nízka tvrdosť rýdzeho zlata je príčinou jeho rýchleho opotrebenia. Leguje sa preto Cu, Ag, Ni, Pd a v menšej miere aj Zr. Tieto zliatiny nachádzajú uplatnenie v klenotníctve, mincovníctve, zubnom lekárstve a v elektrotechnike na kontakty.

Platina (Pt) má teplotu tavenia 1774°C, je významná predovšetkým svojou vynikajúcou chemickou stálosťou, odolnosťou proti oxidácii aj pri vysokých teplotách. Používa sa na výrobu termočlánkov a ako odporový materiál pre laboratórne elektrické pece.

Paládium (Pd) má teplotu tavenia 1554°C, najväčšie využitie má v elektrotechnike pri výrobe katalyzátorov pre chemický priemysel a automobily. Paládiové spájky (Pd-Ag-Mn, Pd-Mn, Pd-Cu-Ag) majú dobrú pevnosť pri zvýšených teplotách a odolávajú oxidácii, používajú sa pri spájkovaní žiarupevných superzliatin v konštrukcii plynových turbín, nadzvukových lietadiel a rakiet.

6 PLASTY A ICH VLASTNOSTI

6.1 Rozdelenie plastov

Plasty podľa normy STN 640001 sú materiály, ktorých podstatu tvoria makromolekulové látky, ktoré možno formovať teplom alebo tlakom, prípadne oboma činiteľmi súčasne. Na systematické rozdelenie plastov sa používajú rôzne kritéria, ale najčastejšie sa rozdeľujú podľa pôvodu a správania sa za tepla.

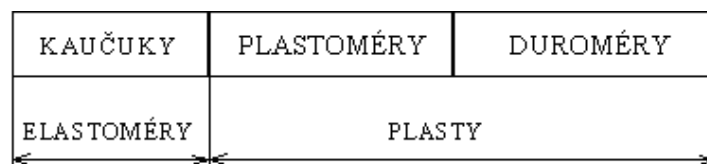
Podľa pôvodu a spôsobu výroby plasty rozdeľujeme na:

1. *Plasty z prírodných makromolekulových látok*, pri ktorých východiskovou surovinou sú najčastejšie celulóza (buničina) alebo iné bielkovinové látky. Známe výrobky z týchto látok sú napr. vulkanofíber, celuloid, celofán a pod.
2. *Syntetické plasty*, vyrobené syntézou nízkomolekulových organických zlúčenín. Východiskovou surovinou je ropa, zemný plyn, čierne uhlie a iné.

Podľa správania sa za tepla plasty rozdeľujeme na:

1. *Plastoméry* (termoplasty), ktoré sa účinkom tepla stávajú plastické, tvarovateľné a po ochladení opäť stvrdnú, nadobúdajú želateľný tvar. Ohrev, tvarovanie a ochladenie možno pri nich opakovať bez zmeny vlastností materiálu. K plastomérom patrí: polyetylén, polypropylén, PVC, polyamidy a pod.
2. *Duroméry* (reaktoplasty, termosety), ktoré sa teplom chemicky menia. Po ohriatí sú prechodne tvarovateľné, kedy ich možno rôznymi spôsobmi spracovávať a tvarovať a po ďalšom vytvrdení svoju plastickosť strácajú. Ďalším ohriatím svoj tvar nemenia a nedajú sa formovať, nedajú sa topiť a sú nerozpustné. K duromérom patria: polyesterové, epoxidové, fenolformaldehydové živice a iné.
3. *Elastoméry* (kaučuky, guma) tvoria samostatnú skupinu polymérov, ktoré sa vyznačujú mimoriadnou pružnosťou a malou tuhosťou. Do tejto skupiny polymérov patria: prírodný kaučuk, syntetické kaučuky, guma a pod.

Pri správnom zaradení jednotlivých polymérových materiálov do pojmových kategórií možno vytvoriť schému podľa obr.6.1.



Obr.6.1 Schéma rozdelenia polymérov

Podľa spôsobu výroby plasty rozdeľujeme na:

1. *polymerizáty* - riadiacou reakciou je polymerizácia (napr. PE, PP, PVC, PS a pod.),
2. *polykondenzáty* - riadiacou reakciou je polykondenzácia (napr. polyesterové živice, fenolformaldehydové živice, PC, PA a iné),
3. *polyadukty* - riadiacou reakciou je polyadícia (napr. EP, UP a iné).

Podľa molekulárnej štruktúry plasty rozdeľujeme na:

1. *lineárne*,
2. *rozvetvené a*
3. *sieťované* (blokové kopolyméry, štepené kopolyméry).

Podľa nadmolekulárnej štruktúry (morfológie) plasty rozdeľujeme na:

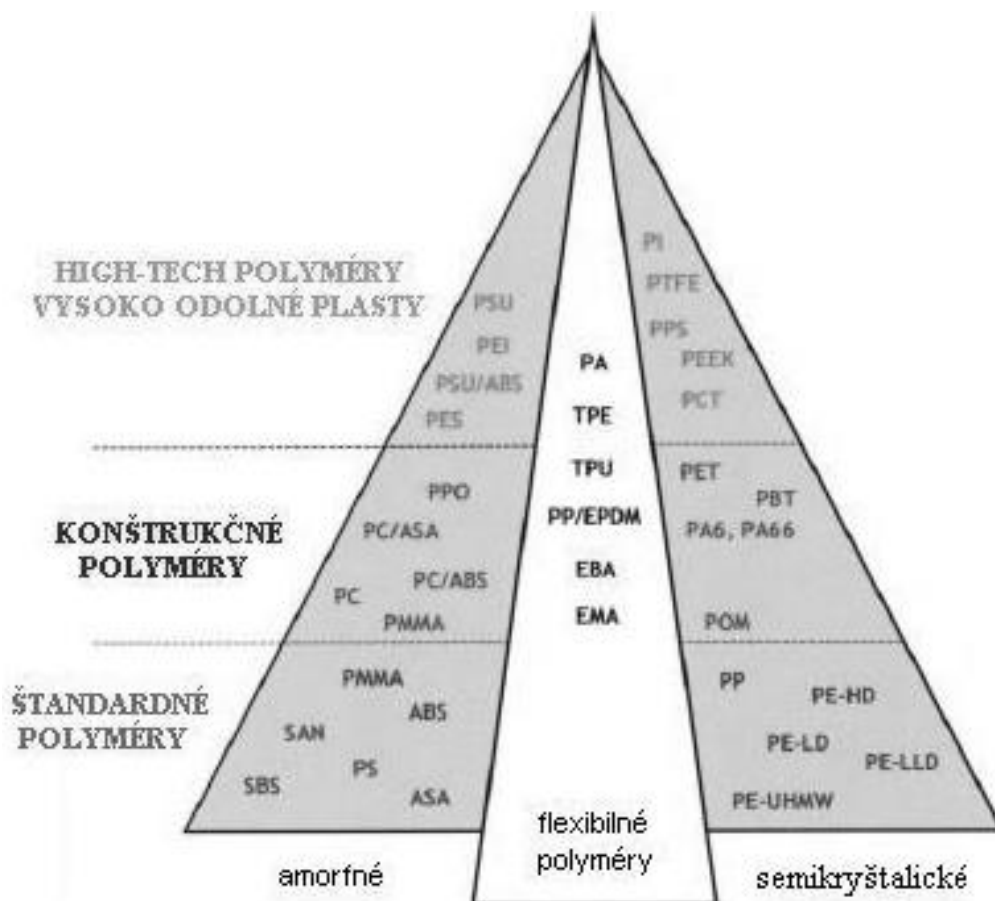
1. *amorfné* (napr. PS, ABS, PMMA, PC a iné) a
2. *semikryštalické* (napr. PE, PP, PA, POM a iné).

Podľa použitia plasty rozdeľujeme na (obr.6.2):

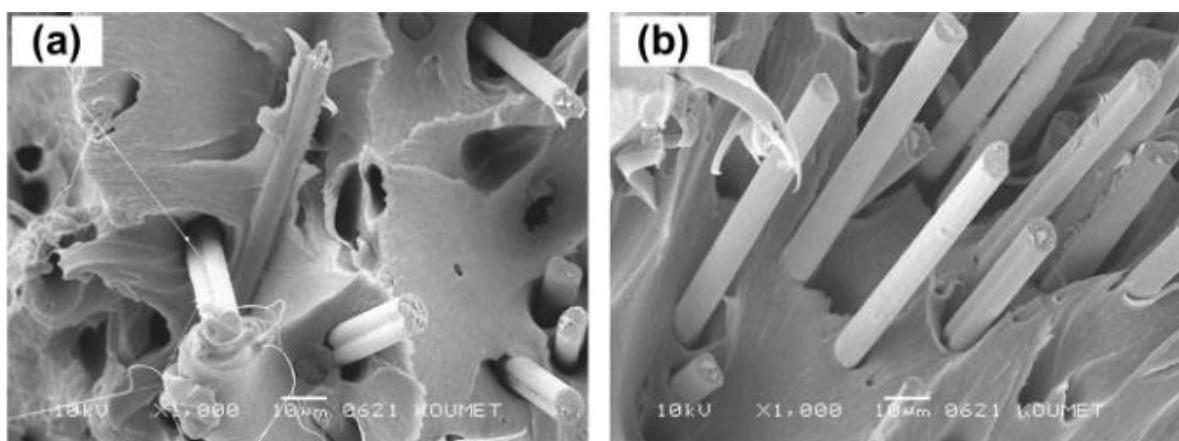
1. *štandardné polyméry* (sú určené na bežné aplikácie),
2. *konštrukčné polyméry* (očakávame u nich istú úžitkovú úroveň vlastností, najmä mechanických – advanced plastics) a
3. *high-tech polyméry*.

Podľa chemického zloženia plasty rozdeľujeme podľa chemických prvkov, z ktorých sú monoméry zložené a ako sú tieto prvky medzi sebou viazané. Vyjadruje sa chemickým vzorcom. Z chemických vzorcov východných monomérov je zrejmé, že polyméry sú tvorené len z niekoľkých chemických prvkov: uhlík – C, vodík – H, kyslík – O, niekedy dusík – N, chlór – Cl, fluór – F alebo síra – S. Zvláštnu skupinu tvoria silikóny, v štruktúre ktorých dominuje kremík – Si.

Plasty sú zvyčajne viaczložkové konštrukčné a technické materiály. Okrem polymérov obsahujú stabilizátory, farbivá (pigmenty), plnivá a zvláčňovadlá (mazadlá). Všetky zložky plastov sú dokonale homogenizované. Prídavné látky sa označujú ako *prísady* a spolu s polymérom tvoria vlastné plasty. Vo vystužených plastoch sú navyše prítomné bežné alebo sklenené vlákna (obr.6.3) a textílie, kovové výstuže, výstuže z uhlíkových, bórových a syntetických vlákien a pod.



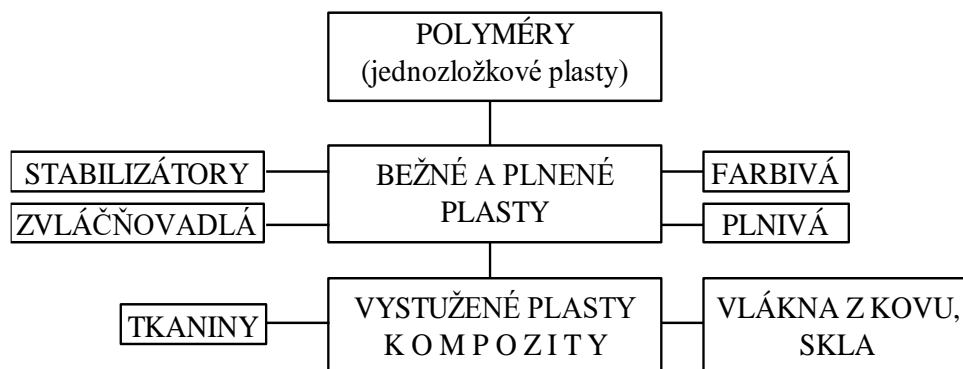
Obr.6.2 Rozdelenie polymérov podľa aplikácie a nadmolekulárnej štruktúry



Obr.6.3 Mikroštruktúra lomových plôch kompozitného materiálu PA6/CF plneného sklenými vláknami

Čisté polyméry, čiže jednozložkové plasty sa ako technické materiály požívajú v obmedzenom rozsahu, ale nie zanedbateľne. Bežne sa používajú napr. polytetrafluóretylén (teflón) na tesnenia a klzné ložiská, polyetylén na obalové fólie, polymetylmetakrylát

(plexisklo) ako organické sklo. Všeobecné členenie plastov a vzájomnú väzbu jednotlivých zložiek znázorňuje schéma na obr.6.4



Obr.6.4 Schéma členenia plastov a prídavných látok

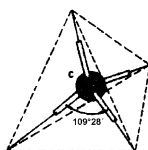
Základné pojmy a definície

Polyméry sú makromolekulové látky a to organické alebo anorganické zlúčeniny, vybudované zo stoviek až miliónov atómov spojených navzájom chemickými väzbami. Vyznačujú sa vysokými relatívnymi molekulovými hmotnosťami. Tieto môžu mať hodnoty od niekoľko sto do 20 000 - vtedy hovoríme o polyméroch s nízkou molekulovou hmotnosťou, alebo od 20 000 do niekoľko miliónov - vtedy ide o vysokomolekulové polyméry.

Základom štruktúry všetkých organických (nízko aj vysokomolekulových) zlúčenín je atóm uhlíka. V dôsledku svojej atómovej stavby je schopný tvoriť 4 kovalentné väzby, ktoré zvierajú v priestore uhol $109,5^\circ$, obr.6.5.

Atómy uhlíka môžu byť medzi sebou viazané jednoduchou väzbou (nasýtené uhľovodíky), alebo násobnou dvojnou či trojnou väzbou (nenasýtené uhľovodíky). V najjednoduchších organických zlúčeninách sa na nevyužité väzby viažu atómy vodíka H, preto sa tieto zlúčeniny nazývajú uhľovodíky alebo karbohydráty. Každý typ väzby má rôznu pevnosť, opísanú tzv. disociačnou energiou (energia potrebná na rozštiepenie väzby) a rôznu dĺžku (vzdialenosťou zapojených atómov).

Zoskupenie atómov v makromolekule má svoje stavebné zákonitosti. Podľa nich je väčšina prírodných a syntetických polymérov vybudovaná tak, že sa v ich reťazcoch pravidelne opakuje určitá stavebná alebo štruktúrna jednotka.



Obr.6.5 Tetraedrický uhol medzi väzbami atómov C

Stavebná jednotka - mér je časť molekuly zodpovedajúca nízkomolekulovej látke, z ktorej molekula vznikla, alebo mohla vzniknúť. Je v priamom vzťahu k východiskovej surovine - monoméru, ktorý sa použil na syntézu polyméru.

Štruktúrna jednotka (konštitučná jednotka) je najmenšie zoskupenie atómov v molekule, ktoré sa v nej periodicky opakuje.

Výstavbové reakcie makromolekulových látok

Chemické reakcie, vedúce ku vzniku makromolekúl nazývame *výstavbovými polyreakciami*. Pri polyreakciách vznikajú reťazce rôznej dĺžky. Na základe mechanizmu narastania makromolekulového reťazca možno výstavbové polyreakcie rozdeliť na reakcie prebiehajúce reťazovým alebo stupňovitým mechanizmom. K polyreakciám s reťazovým mechanizmom výstavby patrí polymerizácia a so stupňovitým mechanizmom polyadícia a polykondenzácia.

Polymerizácia

Je najvýznamnejšia polyreakcia, pri ktorej sa spájajú nenasýtené nízkomolekulové látky, alebo vhodné cyklické zlúčeniny do makromolekuly. Pri polymerizácii sa jednotlivé molekuly spájajú bez zvyšku na makromolekuly a nevzniká pritom žiadny vedľajší produkt. Polymerizáciu sa pripravujú napríklad PE, PP, PVC a iné.

Polykondenzácia

Je polyreakcia, pri ktorej reagujú dve rôzne organické zlúčeniny za vzniku požadovanej látky a odštiepenia nízkomolekulárneho kondenzátu, najčastejšie vody. Polykondenzáciou sa pripravujú napríklad fenolové a krezolové živice, aminoplasty a iné.

Polyadícia

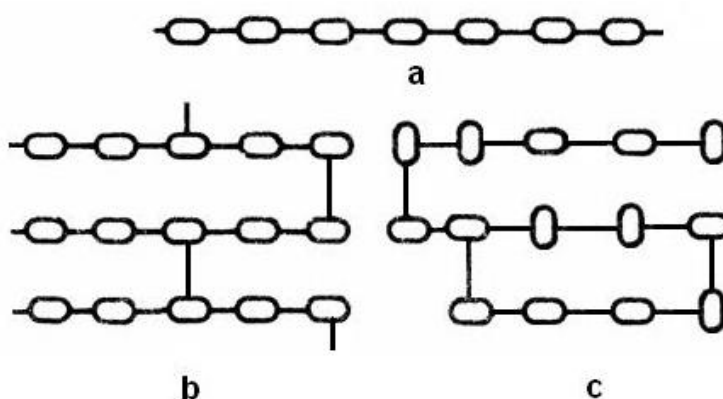
Je stupňovitá polyreakcia, pri ktorej postupnou adíciou vhodných monomérnych jednotiek vzniká vysokomolekulová látka a pritom sa neuvoľňuje nízkomolekulová zlúčenina. Zloženie konečného produktu pri polyadícii sa nelíši od zloženia východiskovej zmesi. Na rozdiel od polymerizácie je štruktúra základného článku odlišná od štruktúry východiskového komponentu. Polyadíciou sa pripravujú napríklad polyuretánové, polymočovinové a epoxidové živice.

6.2 Štruktúra makromolekulových látok

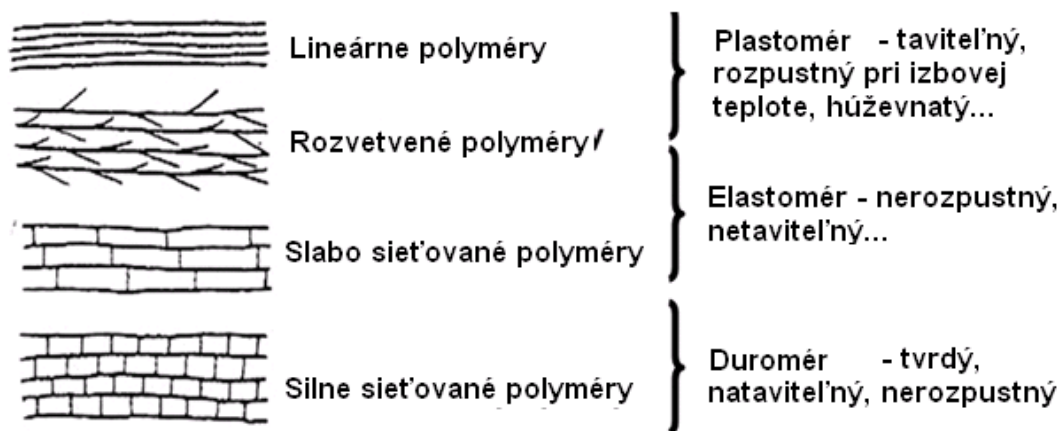
Veľkosť makromolekúl (molekulová hmotnosť) pri bežných polyméroch nie je konštantná (obsahujú makromolekuly s rôznym počtom monomérnych jednotiek, čiže s rôznym polymerizačným stupňom). Súbor molekúl daného polyméru má v závislosti od podmienok polymerizácie priemernú molekulovú hmotnosť a charakteristické pomerné zastúpenie makromolekúl s rôznou molekulovou hmotnosťou, ktoré graficky vyjadruje distribučná krivka.

Pre molekulárne látky je charakteristická polydisperzia. Polydisperzia ovplyvňuje viaceré vlastnosti polymérov. Napríklad zväčšujúca sa priemerná molekulová hmotnosť priaznivo vplýva na mechanické vlastnosti.

Makrogeometrický vzhľad makromolekúl môže byť **lineárny**, **rozvetvený** alebo **priestorovo zosietený**, obr.6.6 a obr.6.7. Lineárna makromolekula je tvorená dlhými reťazcami bez výraznej orientácie. Sieťované makromolekuly sú tvorené lineárnymi reťazcami, ktoré sú na rôznych miestach spojené priečnymi väzbami. Priestorová makromolekula vzniká z monomérov narastaním do rôznych smerov v priestore, je charakteristická značnou veľkosťou makromolekúl. Rozvetvenú makromolekulu charakterizuje to, že z jej hlavného reťazca odbočujú bočné reťazce (vetvy) rôznej dĺžky, ktorých počet môže byť rôzny. Zosietená makromolekula vzniká spojením niekoľkých lineárnych reťazcov priečnymi väzbami. Pri vysokom stupni zosietenia sú prakticky všetky makromolekuly pospájané tak, že vznikne jediná obrovská priestorová (trojrozmerná) zosietená makromolekula.

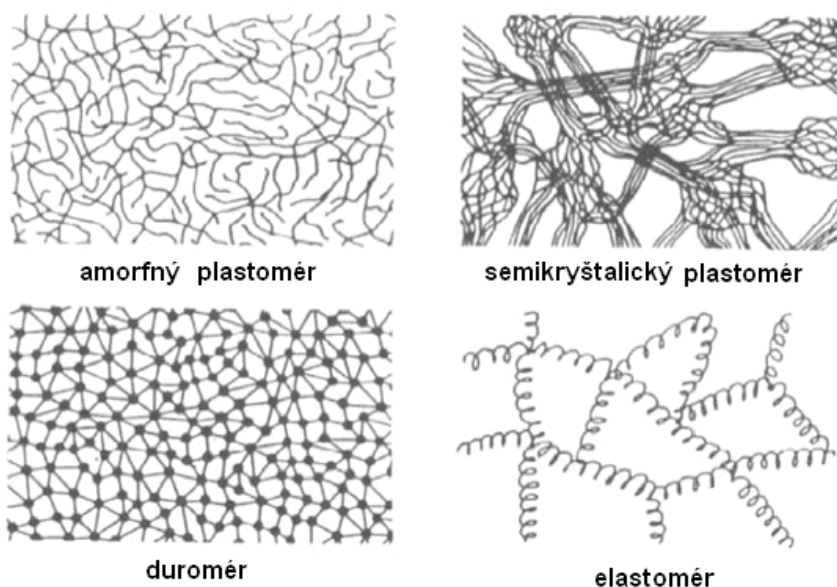


Obr.6.6 Schematické usporiadanie makromolekúl, a – lineárna makromolekula, b – sieťovaná makromolekula, c – priestorovo usporiadaná makromolekula



Obr.6.7 Tvar makromolekúl pre rôzne typy plastov

Plasty, ktoré nevykazujú štruktúrne usporiadanie medzi reťazcami makromolekúl sa nazývajú **amorfné polyméry**. Jednotlivé makromolekuly v ich štruktúre sú navzájom prepletené ako napríklad špagety na tanieri. Amorfné sú väčšinou polyméry s makromolekulami nepravidelného tvaru s objemnými substituentami, ktoré sa ani vplyvom medzimolekulových príťažlivých síl nemôžu usporiadať (ataktický polystyrén, PVC). Niektoré polyméry sú celkom amorfné za všetkých podmienok, iné sú čiastočne kryštalické. Na rozdiel od kovov a nízkomolekulových látok nie je možné pripraviť úplne **kryštalický polymér**. Je to možné vysvetliť a dokázať širokým intervalom teploty topenia, nižšími hodnotami mernej hmotnosti, aké by mal mať celkom kryštalický polymér. Kryštalický stav lineárnych polymérov má veľký praktický význam pre ich vlastnosti a preto schopnosť kryštalizácie môže byť kritériom na ich rozdelenie. Podľa toho sa polyméry delia na samovoľne kryštalizujúce a na samovoľne nekryštalizujúce. Veľká dĺžka makromolekúl v kryštalizujúcom polyméri zabraňuje dosiahnuť vysoký stupeň kryštalizácie, preto v polyméroch nikdy nemôže byť 100 % kryštalickej fázy. Podiel kryštalickej fázy sa vyjadruje kryštalinitou v percentách. Usporiadanie makromolekulárnych reťazcov v jednotlivých typoch polymérov je na obr.6.8.



Obr.6.8 Nadmolekulárna štruktúra polymérov

6.3 Vlastnosti polymérov

Mechanické vlastnosti plastov

Vyplyvajú z vnútornej stavby plastov, najmä druhu, veľkosti a tvaru makromolekúl, stupňa pohyblivosti reťazcov makromolekúl. Pri použití akéhokoľvek materiálu je rozhodujúce, ako reaguje na pôsobenie vonkajšej zaťažujúcej sily v širokom rozsahu podmienok, napr. pri rôznej teplote, pri rôznej dobe namáhania a pod. Kovové materiály sa

deformujú čisto elasticky (v zmysle platnosti Hookovho zákona) do medze úmernosti, pričom veľkosť vzniknutej deformácie je prakticky časovo nemenná. Naproti tomu deformácie plastov, vznikajúce už pri malých napätiach významne závisia od času. Príčinou sú súčasne prebiehajúce elastické aj viskózne deformačné pochody, ktoré sa podľa štruktúrneho usporiadania plastu a teploty prejavujú rôzne. Pri nízkych teplotách a krátkych časoch sa plasty správajú ako látky elastické, pri dlhých časoch pôsobenia zaťažujúcej sily ako látky viskózne.

Z vyššie uvedeného vyplýva, že mechanické správanie sa plastov má jednu zvláštnosť, ktorú nemajú kovové materiály, že závisí od času namáhania. Pre správanie sa plastov, pri pôsobení vonkajšej zaťažujúcej sily, existuje ekvivalencia čas - teplota. Dlhé časy namáhania pôsobia podobne ako vyššie teploty a naopak.

Termomechanická krivka

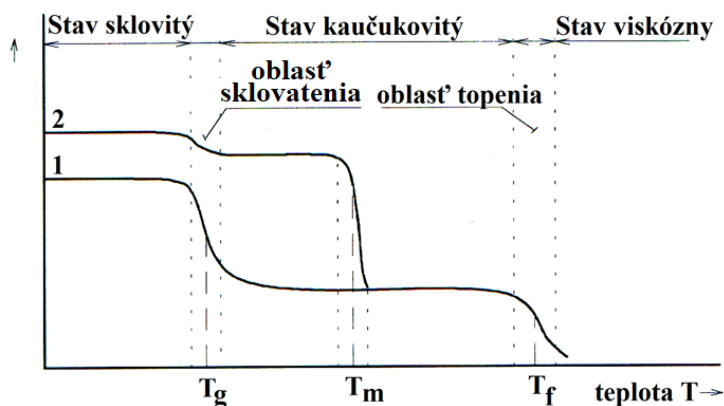
Plasty, v závislosti od teploty, sa môžu vyskytovať v troch fyzikálnych stavoch:

- 1) **sklovitý (krehký, tvrdý)** - stav makromolekulovej látky pod teplotou sklovitého prechodu;
- 2) **kaučukovitý (elastický, pružný)** - stav, v ktorom sa polymérna hmota ľahko deformuje už malým napätím; táto deformácia je do značnej miery vratná;
- 3) **viskózne tekutý (husto tekutý, plastický)** - stav, kedy začína samovoľný viskózný tok.

Medzi týmito stavmi existujú prechodové teploty, pri ktorých sa podstatne menia fyzikálne aj mechanické vlastnosti plastov. Pokiaľ kovové materiály majú prechodovú teplotu len jednu, plasty majú *tri prechodové teploty*, ktoré vymedzujú oblasť použiteľnosti konkrétneho plastu, obr.6.9:

- **T_g - teplota sklovitého prechodu** - teplota medzi kaučukovitým a sklovitým stavom; charakterizuje amorfné polyméry;
- **T_m - teplota topenia kryštálov** - teplota, pri ktorej kryštalické objemy polyméru, pri stúpajúcej teplote, prechádzajú do amorfného stavu;
- **T_f - teplota vzniku viskózneho toku** - začiatok samovoľného viskózneho toku - začiatok tečenia materiálu.

Pri plastoch, v porovnaní s kovovými materiálmi, nachádzame medzi stavom sklovitým a viskózne tekutým nový stav - kaučukovitý, kedy sa plasty ľahko deformujú už malým zaťažením. V kaučukovitej oblasti sa mení trvalá deformácia so stúpajúcou teplotou len málo. V blízkosti teploty T_f však ohrev vedie k výraznejšiemu rastu deformácie, pretože sa začína uplatňovať nevratná deformácia - začína viskózný tok. Pri vyšších teplotách polymér tečie podobne ako viskózna (hustá) kvapalina.



Obr.6.9 Termomechanická krivka lineárnych polymérov
1 – polymér s nižším stupňom sieťovania,
2 – polymér s vyšším stupňom sieťovania

Aj termomechanické krivky amorfných a kryštalických polymérov sa navzájom líšia:

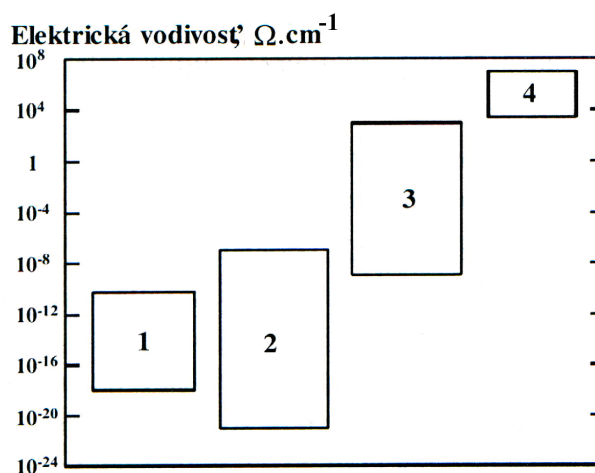
- **amorfné polyméry** charakterizujú dve prechodové teploty T_g a T_f , ktoré teplotne vymedzujú kaučukovitý stav;
- **kryštalické polyméry** majú v porovnaní s amorfnými užší teplotný interval kaučukovitého stavu, resp. vôbec nemajú oblasť kaučukovitého stavu.

Kaučukovitý stav je teda vymedzený pri kryštalických polyméroch intervalom teplôt $T_m - T_f$. Ak je bod tavenia kryštálov nad teplotou T_f , potom polymér prechádza z tuhého stavu priamo do stavu viskózne-tekutého - do "taveniny".

Fyzikálne vlastnosti plastov

K významným fyzikálnym vlastnostiam polymérov z hľadiska spracovateľských a aplikačných vlastností výrobkov patria:

- **tepelné vlastnosti** (tepelná kapacita, tepelná vodivosť a iné);
- **elektrické vlastnosti** (elektrická vodivosť, obr.6.10, elektrická pevnosť, dielektrické vlastnosti a iné);
- **optické vlastnosti**;
- **magnetické vlastnosti**.



Obr.6.10 Rozdelenie technických materiálov do skupín podľa elektrickej vodivosti,
 1 – polymérne materiály, 2 – keramické materiály,
 3 – polovodičové materiály, 4 – kovové materiály

Tepelné vlastnosti plastov

Pre použitie plastov ako konštrukčného materiálu sú najvýznamnejšie nasledovné tepelné vlastnosti:

- **teplotná rozťažnosť,**
- **tepelná vodivosť,**
- **horľavosť.**

Koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti plastov je väčší než u kovov (napr. polyetylén má až 18 x väčší koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti ako oceľ obvyklých akostí), čo treba zohľadniť najmä pri zostavovaní rozvodových systémov chladených alebo ohriatych médií.

Plastoméry a duroméry bez plnív majú porovnateľnú tepelnú vodivosť, tepelná vodivosť plastov je v porovnaní s kovmi približne o tri až štyri rády nižšia. Táto skutočnosť je na jednej strane veľkou prednosťou plastov. Plasty ako ľahčený polystyrén, resp. polyuretán sú výbornými tepelnými izolátormi napr. rozvodových systémov chladených alebo ohriatych médií, nesmie sa ale zanedbať v technológiách spracovania plastov (ohrev a ochladzovanie výrobkov z plastov).

Horľavosť plastov je podľa STN 64 0755 schopnosť plastov zapáliť sa pomocou plameňa a ďalej horieť, pričom ale podľa STN 73 0760 nemožno ani jeden druh plastu považovať za nehorľavý.

Z hľadiska horľavosti rozlišujeme plasty:

- **horľavé** - trvalo horia nielen v plameni, ale aj po vybratí z neho,
- **samozhášavé** - horia len v plameni, mimo neho po krátkom čase zhasínajú,
- **ťažkohorľavé** - v plameni nehoria, ale uhoľnatejú alebo rozkladajú sa. Ich plynné splodiny sú tiež nehorľavé.

Odolnosť proti horeniu je z dôvodu bezpečnosti vždy treba posúdiť, najmä v elektrotechnike, stavebníctve, pri prevádzke za vysokých teplôt (letecké a raketové motory) a pod. V konkrétnych prípadoch však sklon ku vznieteniu a spôsob horenia nezávisia iba od vlastností plastu, ale aj od tvaru výrobku, hrúbky jeho steny, prístupu vzduchu, odvodu tepla a pod. Horľavosť sa dá znížiť prísadou retardéru horenia.

Elektrické vlastnosti plastov

Plasty sú elektricky nevodivé materiály - izolanty. Ich izolačný odpor priamo závisí od elektrostatického náboja - čím je izolačný odpor väčší, tým ľahšie sa plasty nabíjajú. Podľa schopnosti polarizácie možno plasty rozdeliť do dvoch skupín:

- **polárne** (PA, PVC, PMMA a iné);
- **nepolarizovateľné - nepolárne** (PE, PP, PTFE, PS a iné).

Optické vlastnosti plastov

Väčšina plastov, pokiaľ neobsahuje rôzne prísady, dobre prepúšťa svetlo. Na priepustnosť svetla má vplyv hrúbka predmetov a vnútorná stavba plastov. Niektoré plasty pod napätím vykazujú dvojlom, čo sa využíva vo fotoelasticimetrii. Znehodnotenie sa prejavuje zmenou farby, stratou lesku, vznikom trhliniek, zhoršením mechanických a elektrických vlastností a iné.

Magnetické vlastnosti plastov

Organické magnetiká (magnetopolyméry) sú materiály pozostávajúce z magnetického plniva v polymérnej matici, ktoré sa vyznačujú feromagnetickými vlastnosťami. Delíme ich na:

- **kompaktné organické magnetiká - organické polyméry**, v ktorých pomocou vhodných prímiesí možno narušiť vykompenzovanie spinových magnetických momentov v molekulách polymérov a súčasne dosiahnuť magneticky usporiadaný stav. Označujeme ich ako prirodzené organické magnetiká. Sú v štádiu teoretického a experimentálneho skúmania;
- **kompozitné organické magnetiká** - pozostávajú z dvoch základných zložiek; z magnetického prášku - plniva (Alnico, SnCO₅, Sr ferit, Ba ferit) zapracovaného do nemagnetickej polymérnej matrice (polyvinylchlorid, kaučuk, polyamidy, polyetylén,

polypropylén, polystyrén, fenolové a polyesterové živice). Označujeme ich ako *nevlastné (nepravé) organické magnetiká*.

Chemické vlastnosti plastov

Vplyv chemikálií na plasty sa prejaví väčšinou zmenou hmotnosti (prírastkom, resp. úbytkom počas napučievania, resp. rozpúšťania), poklesom pevnostných charakteristík (pevnosti, modulu pružnosti, ťažnosti), zmenou farby a pod.

6.4 Plastoméry

Plastoméry sú polymérne materiály, ktoré pôsobením tepla zmäknú, chemicky sa pri tomto prechode nemenia, a po ochladení znova stvrdnú, resp. nadobudnú požadovaný tvar. Aj keď sa odhaduje, že denne vedci vytvoria 1 až 5 nových plastomérov, mnohé z nich nemožno prakticky využiť vzhľadom na ich vlastnosti, veľmi náročnú technológiu výroby alebo vysokú cenu. Medzi najpoužívanejšie plastoméry v praxi patrí **polyvinylchlorid** (PVC, amorfný plastomér), **polyetylén** (PE, kryštalický plastomér), **polypropylén** (PP, kryštalický plastomér), **polyamid** (PA, lineárny kryštalický plastomér), **polymetylmetakrylát** (PMMA, lineárny amorfný plastomér), **polystyrén** (PS, plastomér sklovitého charakteru), **polytetrafluóretylén** (PTFE, lineárny vysokokryštalický plastomér), **polykarbonát** (PC, lineárny plastomér), **polyuretán** (PU, lineárny až sieťovaný plastomér).

Polyvinylchlorid – PVC, novodur, igelit, novoplast. Merná hmotnosť $\gamma = 1400 \text{ kg.m}^{-3}$, $R_m = 50 \text{ MPa}$, odolný proti chemikáliám, málo odolný proti pôsobeniu svetla a tepla, použiteľný do 60°C .

Použitie: nádrže potrubia, ventily, čerpadlá, izolačný materiál – vodiče, káble, obalový materiál, hračky, umelá koža.

Polyetylén – pevná biela priesvitná látka, odolná proti chemikáliám, vode, alkáliám. Pôsobením svetla a kyslíka sa znehodnocuje, preto sa pigmentuje sadzami čím sa jeho životnosť zvýši až na 30 rokov. Má výborné elektroizolačné vlastnosti. Vlastnosti závisia od molekulovej stavby a prípravy. Vysokohustotný PE má $M_r = 18 - 30000$, $\gamma = 920 \text{ kg.m}^{-3}$, obsahuje 50 – 60 % kryštalickej fázy, $R_m = 10 \text{ MPa}$, je použiteľný do 90°C , $Z = 80 - 100\%$. Nízkohustotný PE má $M_r = 500000 - 1000\ 000$, $\gamma = 940 \text{ kg.m}^{-3}$, obsahuje až 90% kryštalickej fázy, $R_m = 18 - 29 \text{ MPa}$, je použiteľný do 110°C , $Z = 20\%$.

Použitie: fólie, rúry, textilné vlákna, hračky, vaničky, vedrá, nádoby, fľaše na chemikálie, elektroizolačná hmota a i. (BRALEN)

Polypropylén má podobné vlastnosti ako PE, $\gamma = 900 \text{ kg.m}^{-3}$, $R_m = 30-35 \text{ MPa}$.

Polystyrén - priesačná, tvrdá, pomerne krehká hmota. $R_m = 45-60 \text{ MPa}$, má vynikajúce elektroizolačné vlastnosti, priesačný (prepúšťa 90% svetla). Odolný vode, kyselinám, rozpúšťadlám. Použitie: súčiastky strojov, hrebene, misky, fľaše, elektroizolačné fólie a laky, penový PP sa používa ako tepelná a zvuková izolácia s $\gamma = 20 - 50 \text{ kg.m}^{-3}$.

Polymetylmetakrylát - organické sklo. Má výborné optické, elektroizolačné a mechanické vlastnosti. $R_m = 50-70 \text{ MPa}$. Má mimoriadnu odolnosť proti slnečnému žiareniu a poveternostným vplyvom. Prepúšťa 99 % svetla, $\gamma = 1180 \text{ kg.m}^{-3}$. Má široké využitie. Vyrábajú sa z neho dosky odolné proti rozbitiu, zasklievanie hál a budov, kabín lietadiel a automobilov, kryty na koncové svetlá automobilov, misy, podnosy, zubné protézy, dentacryl, fólie na medzivrstvy pri výrobe nerozbitných skiel a i. Je však pomerne drahý.

Polytetrafluóretylén - biela hmota, $\gamma = 2200 \text{ kg.m}^{-3}$, $R_m = 15-30 \text{ MPa}$. Použiteľný do 260°C . Má vynikajúcu odolnosť proti H_2SO_4 , HCl , HNO_3 , lúhom a organickým rozpúšťadlám. Má výborné elektroizolačné vlastnosti. Spracováva sa metódami práškovej metalurgie – tyče, drôty, rúry, dosky, tesnenia, povlaky. Impregnácia povrchov v raketovej a vysokofrekvenčnej technike, kuchynské nádoby (TEFLON) a pod. V chemickom priemysle sa používa na tesnenia, sedlá ventilov, obklady nádrží a pod.

Polyamidy - Sú tvrdé a húževnaté, s vysokým stupňom kryštalinity, odolné proti rozpúšťadlám. Sú to ľahko spracovateľné a húževnaté polyméry. $R_m = 60-70 \text{ MPa}$, orientovaním štruktúry ťahaním dosahujú pevnosť až 500 MPa . Sú použiteľné od -50 do $+100^\circ\text{C}$. Sú hygroskopické (8-12 % vody), čo znižuje ich pevnosť a dielektrické vlastnosti. Použitie: nehučné a samomazné ložiská, ozubené kolesá, tesnenia, kryty prístrojov, prilby, hrebene, misky, košíky, vlákna pre textilný priemysel (SILON, NYLON, PERLON).

Polyuretany - majú rozmanité vlastnosti podľa surovín a podmienok výroby. Používajú sa na výrobu vlákien, fólií, tesnení, klinových remeňov, ozubených kolies, spojok, ložísk, ľahčených hmôt (molitan).

6.5 Duroméry

Duroméry sú polymérne materiály, ktoré v procese vytvrdzovania pôsobením rôznych vplyvov ako teplo, vytvrdzovadlá, iniciátory, ožiarenie a iné prechádzajú do zosieťovaného stavu a vytvárajú tak nerozpustnú a netaviteľnú hmotu [51]. Duroméry sú v porovnaní s plastomérmi historicky staršími typmi polymérnych materiálov; výhodu majú v tom, že sú tepelne aj chemicky odolnejšie. Nové možnosti spracovania duromérov vytvárajú predpoklady pre rozšírenie ich výroby a aplikácie.

Podľa chemickej štruktúry, resp. podľa východiskových surovín ich rozdeľujeme do nasledovných skupín:

- **fenoplasty,**
- **aminoplasty** (*močovinové, melamínové, anilínové a modifikované*),
- **nenasýtené polyesterové živice,**
- **epoxidové živice,**
- **ostatné duromérne hmoty** (*napr. zosieťované polyuretany, silikónové živice a iné*).

Fenoplasty (PF, lineárny plastomér) reprezentujú fenolformaldehydové živice, ktoré sú vždy plnené rôznymi plnivami. Podľa druhu plnív, ich vzájomného pomeru a reakčných podmienok môžu vzniknúť tri druhy živíc - **novolaky, rezoly a rezity**. Sú tvrdé a krehké, rázovú húževnatosť majú veľmi nízku. Bežne sa využívajú vo forme lejacích technických živíc, lisovacích hmôt, vrstvených hmôt, ľahčených hmôt a iné. Teplotná rozťažnosť fenoplastov je vo všeobecnosti nízka, elektroizolačné vlastnosti sú dobré. Chemická odolnosť fenoplastov závisí od druhu plniva, všeobecne však nie sú vhodné pre styk s potravinami. Fenoplasty sa zvyčajne plnia drevitou múčkou (bakelit) - na výrobu elektroizolačných súčiastok, krytov, rukovätí a pod; textilným resp. celulóзовým plnivom, grafitom - na elektroizolačné výrobky so zníženou navíhavosťou; azbestom - kryty a svorkovnice pre zvýšené teploty a vyššou odolnosťou proti horeniu prípadne s rôznymi plnivami pre zlepšenie elektrických vlastností - izolačné telesá, súčiastky v elektronike a iné.

Aminoplasty predstavujú polykondenzačné hmoty podobné fenoplastom. Ako základné suroviny sa používajú aminozlúčeniny, aldehydovú zložku tvorí najčastejšie formaldehyd. Vo všeobecnosti majú aminoplasty lepšie elektrotechnické vlastnosti ako fenoplasty, sú nekorózne, bez chuti a zápachu, majú menšie zmraštenie a možno ich ľahko prifarbiť aj na svetlé odtiene. Na druhej strane sú drahšie a majú menšiu chemickú odolnosť. Používajú sa ako *lisovacie a technické živice, vrstvené hmoty*.

Nenasýtené polyester. Polyesterové živice, nazývané glyptály, sa používajú v priemysle náterových hmôt pod názvom alkydové živice. Vhodnou skladbou zložiek možno dosiahnuť veľmi široký sortiment hmôt od veľmi tvrdých až po kaučukovité, vysoko i málo odolné (chemicky aj tepelne), s veľkou alebo malou viskozitou, mechanickými vlastnosťami a pod. Podľa vlastností sa polyesterové živice zvyčajne rozdeľujú na štandardné, elastické, samozhášavé a odolné proti alkáliám. Podľa použitia sa polyesterové živice rozdeľujú na *lakárske, lejacie, laminačné, lepiace a špeciálny druh živíc pre premixy*. Tepelná odolnosť polyesterových živíc je v porovnaní s ostatnými duromérmi pomerne nízka, majú pomerne dobrú chemickú odolnosť, dobrú odolnosť proti starnutiu a korózii. Veľkou nepríjemnosťou je ich horľavosť, možnosť vzniku kožných ochorení a nevyhnutnosť dokonalého vetrania pracovísk.

Epoxidové živice. V pôvodnom stave nemožno epoxidové živice použiť, a preto sa používajú vo vytvrdenom stave, ktorý ovplyvňuje ich *štruktúru a odolnosť*. Výroba epoxidových živíc

využíva široké možnosti výberu základných zložiek a tým aj veľký sortiment, ktorý sa rozdeľuje na lepidlá, náterové živice, lejacie živice, laminačné živice, tuhé živice a lisovacie hmoty. Epoxidové živice majú vynikajúcu adhéziu ku kovom, a preto sa používajú ako lepidlá kovov. Najvýznamnejšie uplatnenie však nachádzajú dnes ako matrica kompozitných materiálov, predovšetkým v kombinácii s uhlíkovými vláknami.

6.6 Elastoméry

Kaučuky a gumy (*polyméry amorfné alebo s obmedzenými priečnymi väzbami*) reprezentujú rozsiahlu skupinu technických polymérnych materiálov, ktoré sa pre vynikajúcu pružnosť označujú aj ako elastoméry. Kaučuk je jednou zo základných komponentov pre výrobu gumy, avšak ako kaučuk, tak aj guma sa používajú vo forme prírodnej aj syntetickej. Hlavný rozdiel medzi prírodným a syntetickým kaučukom je v technológií ich výroby. U prírodného kaučuku je výrobný proces uskutočňovaný prírodou vo vnútri stromu, pričom kaučukovník je pestovaný minimálne 6 rokov, pokiaľ začne produkovať kaučuk [51].

Prírodný kaučuk (*skratka NR*) je nezosietený ale sieťovateľný (= vulkanizovateľný) amorfný polymér izoprénu s vysokoelastickými vlastnosťami pri normálnej teplote a za určitých podmienok aj nad touto teplotou. Získava sa zo šťavy kaučukovníkových stromov tropického pásma - latexu a obsahuje približne 60 - 65 % vody, 30 - 35 % kaučuku, 2,5 % bielkovín, 1-1,5 % soli a 1,0 % živice. Chemická analýza potvrdila, že prírodný kaučuk je uhlíkovodík.

7 KONŠTRUKČNÁ KERAMIKA A SKLO

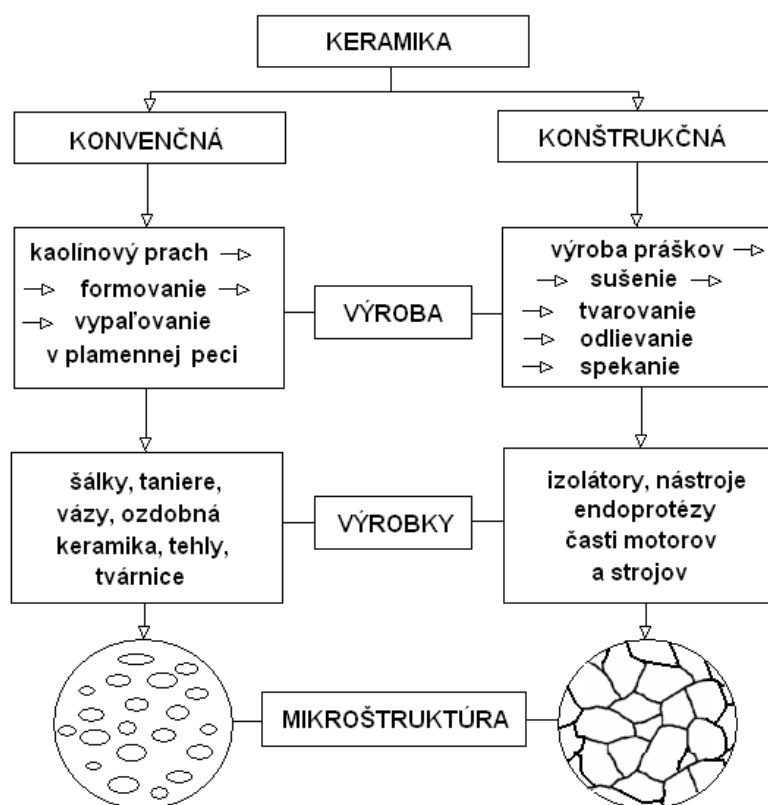
7.1 Všeobecné poznatky

Pod názvom keramické materiály rozumieme tuhé materiály, ktoré sa získavajú tvarovaním a spekaním prírodných hlín alebo umelo vyrobených práškov oxidov, resp. nekovových zlúčenín s vysokým bodom tavenia. Názov keramika vznikol z gréckeho „kerramos“, čo znamená hlina. Bol to názov pre výrobky z pálenej hlíny, ktoré sa pripravovali za studena pridaním vody, tvárnením alebo odlieváním, za ktorým nasledovalo vypaľovanie v peci. Výrobky z keramiky boli známe už 5 000 rokov pred n.l. ako stavebný materiál a s rozvojom techniky sa menilo aj ich použitie. Keramické materiály neodolávajú dynamickému namáhaniu ako kovové zliatiny, ale ich korózna odolnosť a odolnosť proti opotrebeniu je bezkonkurenčná.

Klasická keramika, z ktorej najväčší technický význam má technický porcelán, je zložená z kryštalických silikátov a pomerne veľkého podielu sklených (amorfných) fáz. Sortiment keramických materiálov sa v období rokov tesne pred a po II. svetovej vojne podstatne rozšíril z pôvodne ohraňovaného počtu druhov klasickej keramiky na mnohonásobný počet nových keramických hmôt (ktoré často vôbec neobsahujú zlúčeniny kremíka), najmä v súvislosti s rozvojom priemyselnej elektrotechniky a zvlášť potom elektroniky. Prevažná časť hlavnej zložky je kryštalická, často však obsahuje i minoritnú sklenú fázu. Tieto materiály sa nazývajú moderná technická keramika (advanced ceramics). V súčasnosti sa široká paleta keramických materiálov z hľadiska zloženia základnej fázy v podstate stabilizovala; výskum sa zameriava na skúmanie ciest k zlepšeniu terajších materiálov, na ich nové tvarové a funkčné aplikácie a využívanie v nových súvislostiach. V minulosti sa využívala v strojárstve keramika len tam, kde vyrobené súčiastky neboli vystavené ťahovým napätiam alebo mechanickým či tepelným rázom a bolo vhodné využiť jej antikorózne vlastnosti, žiaruvzdornosť, izolačné vlastnosti či odolnosť proti opotrebeniu. Použitie modernej konštrukčnej keramiky sa výrazne rozširuje a využíva sa dnes aj na náročné aplikácie - na vysokonamáhané súčasti (aj ťahom, príp. aj pri zmenách teploty) v koróznom prostredí. Takúto keramiku, vrátane nástrojových keramických materiálov, označujeme ako konštrukčnú keramiku, na rozdiel od funkčnej keramiky, ktorou rozumieme materiály určené svojimi špecifickými (najmä fyzikálnymi) vlastnosťami pre elektrotechniku, elektroniku, optiku a pod.

Pod **konštrukčnou keramikou** teda rozumieme polykryštalické materiály na báze anorganických zlúčenín nekovového charakteru, pripravované spekaním z práškov. Jej hlavnou nevýhodou je jej krehkosť, z ktorej vyplýva možnosť krehkého lomu ako dôsledok statickej únavy, mechanických alebo tepelných rázov. Krehké materiály sa doteraz ako konštrukčné prakticky nevyužívali a je preto s nimi pomerne málo skúseností. Rozvoj využívania konštrukčnej keramiky je preto nerozlučne spojený jednak s výskumom možností zvýšenia húževnatosti keramiky, jednak s vývojom prístupov ku konštrukčným výpočtom i

skúšaníu týchto materiálov. Hlavnými prednosťami konštrukčnej keramiky je ich mimoriadne vysoká tvrdosť (ktorá im dodáva vysokú odolnosť proti opotrebeniu), vysoká korózna odolnosť a vysoká žiaruvzdornosť. Keramické konštrukčné materiály sú elektricky nevodivé a majú aj tepelnoizolačnú schopnosť. Možno ich vytvarovať s veľkou presnosťou, čo je veľmi dôležité vzhľadom na to, že sa dajú opracovávať len diamantovými nástrojmi. Keramiku možno vyrábať v pestrej škále farieb, výrobky si uchovávajú svoj lesk i farbu prakticky nekonečne dlho. Charakteristika a rozdelenie keramiky je na obr.7.1.

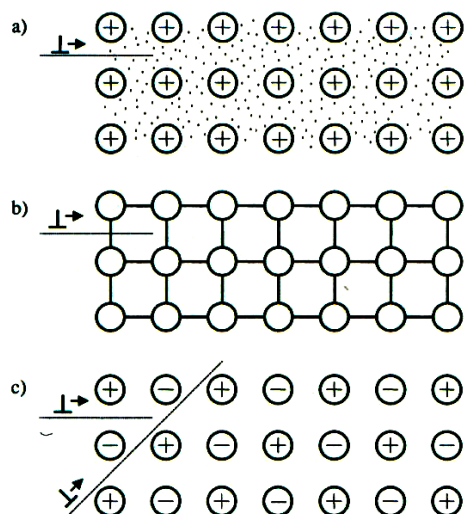


Obr.7.1 Charakteristika a rozdelenie keramiky

Príčiny krehkosti a možnosti jej zníženia

Odlišný typ mediatómovej väzby a odlišný typ kryštálovej štruktúry konštrukčnej keramiky je základnou príčinou jej krehkosti. Pri kovoch a zliatinách sa uplatňuje prednostne väzba kovová, zatiaľ čo pri keramike väzba kovalentná alebo iónová. V kovoch vďaka kovovej väzbe, ktorá nemá charakter lokalizovanej (miestne definovanej) väzby, je pohybujúca dislokácia len vo veľmi malej miere ovplyvňovaná väzbou medzi kationmi a elektrónmi (obr.7.2a) a stretáva sa len s nevelkým odporom. Naproti tomu kovalentná väzba je lokalizovaná tým, že atómy, ktoré ju tvoria sú skoncentrované medzi viazanými atómami, pohybujúca sa dislokácia musí mať energiu potrebnú na porušenie tejto väzby (obr.7.2b), ktorá sa voči dislokácii chová ako pružná priečna prekážka. V iónovej keramike je pohyb dislokácií vo väčšine kryštalografických rovín veľmi obtiažny (napr. vo vodorovnej rovine na

obr.7.2c musia premiestňujúce sa ióny prekonávať odpudivé sily rovnakých iónov, ponad ktoré sa premiestňujú), len v niektorých výhodne orientovaných rovinách ľahký (napr. v rovine pod uhlom 45° na obr.7.2c, pretože pohyb dislokácie zloženej z Na^+ sa nepremiestňuje nad rovnakými iónmi, pôsobiaci odpudivou silou). Zvyčajne prevažuje vplyv nevýhodne

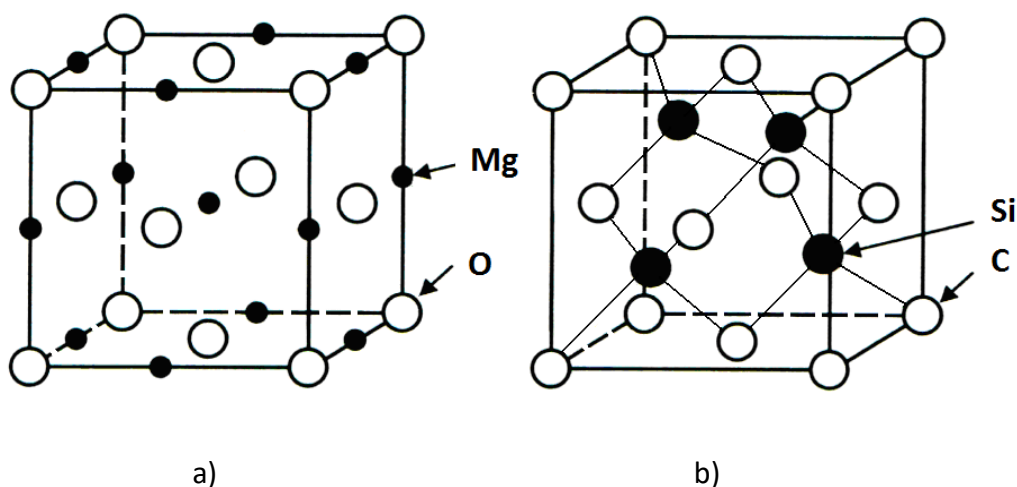


Obr.7.2 Schémy prechodu dislokácií cez jednotlivé druhy mediatomárných väzieb:
a - kovový, b - kovalentný,

sklzoých systémov (tzv. Misesovo kritérium), aby sa pri plastickej deformácii mohli jednotlivé zrná navzájom tvarovo prispôbiť a nevznikali medzi nimi trhliny z geometrických dôvodov (nedostatočná manévrovateľnosť dislokácií).

orientovaných rovin. Z uvedených dôvodov vyžaduje pohyb dislokácií v kryštalických látkach s prevládajúcou kovalentnou alebo iónovou väzbou veľké Peierlsovo-Nabarrovo napätie a je pre ne charakteristická malá pohyblivosť dislokácií.

Pre keramiku je ďalej charakteristické, že v porovnaní s kovmi kryštalizuje v zložitejších mriežkach, ktoré neumožňujú dostatočnú manévrovateľnosť. Príklady sú uvedené na obr.7.3. Oxid horečnatý MgO , ako typický predstaviteľ iónovej keramiky má jednoduchú kubickú mriežku, v ktorej vrcholoch sú striedavo umiestnené ióny Mg a O . Karbid kremíka SiC patrí medzi kovalentnú keramiku a má kubickú mriežku diamantového typu. Kryštalické mriežky keramiky nevyhovujú podmienke, že v polykryštalických látkach musí byť minimálne 5 nezávislých



Obr.7.3 Príklady kryštalických mriežok keramiky a) MgO , b) SiC

Pohyblivosť i manévrovateľnosť (počet sklzových systémov) dislokácií sa zlepšuje až pri vysokých teplotách, nad prechodovou teplotou T_p , nad ktorou sa tvárnosť keramiky približuje tvárnosti kovov. Táto teplota je však veľmi vysoká, u väčšiny keramických materiálov $T_p = 0,7 - 0,9 T_T$, kde T_T je teplota tavenia v K (napr. pre MgO je $T_p = 1700^\circ\text{C}$).

Vedľajšou príčinou krehkosti keramiky je mikroštruktúra spekaného materiálu, ktorá je charakterizovaná pórovitosťou, nehomogenitou a pod. U klasickej keramiky je táto príčina zvyčajným zdrojom ich porušenia už pri nízkych zaťaženiach, u modernej konštrukčnej keramiky je z významnej časti potlačená. Pri vysokých teplotách sa nedokonalosti mikroštruktúry prejavujú u konštrukčnej keramiky často výraznejšie ako pri nízkych teplotách, preto sa ich principiálna tvárnosť nad teplotou T_p nemôže vo väčšine prípadov v plnom rozsahu realizovať.

Existuje niekoľko ciest k **zvýšeniu húževnatosti konštrukčnej keramiky**:

a) Zabezpečenie schopnosti plastickej deformácie inými mechanizmami (ako pohybom dislokácií). Takýmto mechanizmom môžu byť predovšetkým sklzy po hraniciach zŕn, známe napr. u superplastických materiálov. Základným predpokladom je znižovanie zŕn, u keramiky navyše zníženie pórovitosti a odstránenie sklenej fázy na hraniciach zŕn. Požiadavka vysokohomogénneho jemnozrnného jednofázového materiálu sa dá dosiahnuť vysokou čistotou východiskového prášku a využívaním takých metód ďalšieho spracovania, ktoré zabezpečia vysokú hustotu (napr. izostatické lisovanie za tepla). Touto cestou sa dosahuje pevnosť v ohybe 500 až 1000 MPa (tab.7.1). Mimoriadne plastické vlastnosti vykazuje nanokryštalická keramika.

b) Zabezpečenie zvýšenia lomovej húževnatosti fyzikálnym spojením s húževnatým materiálom. Ide najmä o kompozity keramika - kov. Vyvíjajú sa aj čisto keramické kompozity, t.j. s keramickou maticou (napr. Si_3N_4) vystuženou keramickými vláknami alebo whiskermi (napr. SiC). Očakáva sa, že na tejto báze sa získajú keramické materiály s najväčším zvýšením lomovej húževnatosti.

Tabuľka 7.1 Vlastnosti vybraných keramických materiálov

Vlastnosť	SiC	Si_3N_4	Čiast. stab. ZrO_2
Merná hmotnosť [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	3,3	3,2	5,8
Pevnosť v ohybe pri 25°C [MPa]	705	670	1040
1000°C	665	455	240
1200°C	490	450	230
1400°C	210	440	-
Tvrdosť podľa Knoopu	1340	2740	1100
Lomová húževnatosť [$\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$]	4,6	3,6	9

c) Zabrzdzenie šírenia trhliny fázovou premenou, indukovanou vysokým napätím na jej čele. U ocelí TRIP je známy mechanizmus spevňovania napäťovo indukovanou martenzitickou premenou. Analogicky využiteľnou fázovou premenou v keramike obsahujúcej ZrO_2 je premena tetragonálnej alotropickej modifikácie ZrO_2 na monoklinickú.

7.2 Druhy konštrukčnej keramiky

Jednotlivé známe materiály možno rozdeliť do nasledujúcich skupín:

- **Oxidová keramika** - materiály s typicky konštrukčnými aplikáciami na báze ZrO_2 alebo na báze iného oxidu (Al_2O_3).
- **Nitridová keramika** - materiály na báze Si_3N_4 a fáz sústavy Si-Al-O-N.
- **Keramika na báze SiC.**

Prehľad základných keramických materiálov je uvedený v tab.7.2.

Tabuľka 7.2 Charakteristiky základných keramických materiálov

Typ	Atómová väzba	Príklady	Vlastnosti
oxidy	iónová	Al_2O_3 Cr_2O_3 Fe_2O_3 MgO ZrO_2 $LiAl_2SiO_6$	odolnosť proti opotrebeniu, dobrá odolnosť creepu
karbidy	čiastočne iónová kovalentná	ZrC TiC VC NbC B_4C SiC WC	veľmi tvrdé, vysoké E, vysoká tepelná stabilita, slabá odolnosť creepu
nitridy	kovalentná	BN Si_3N_4 AlN Sialon TiN	vysoká tepelná stabilita, vysoká tvrdosť, dobrá odolnosť, dobrá odolnosť creepu
boridy	kovalentná	LaB_6 ZrB_2	výborné vodiče, dobrá odolnosť creepu

7.2.1 Oxidová keramika

Oxidová keramika je najznámejším, najdlhšie vyrábaným a doteraz aj najviac používaným predstaviteľom konštrukčnej keramiky. Ide o pomerne širokú skupinu

materiálov na báze rôznych oxidov, z ktorej najväčší význam pre konštrukčné aplikácie majú materiály na báze oxidu hlinitého a oxidu zirkoničitého.

Materiály na báze α - Al_2O_3

Sú najznámejšou oxidovou keramikou, ktorá sa často používa ako konštrukčný materiál pre rôzne aplikácie. Vyrába sa kalcináciou $\text{Al}(\text{OH})_3$ v rotačných peciach. α - Al_2O_3 začína vznikať asi pri 950°C a pri teplote 1300°C konverzia prebehne asi za 1 h. Vzhľadom na existenciu silných chemických väzieb medzi iónmi Al a O má Al_2O_3 dobrú chemickú stabilitu, vysoký bod tavenia (2050°C) a najvyššiu tvrdosť zo všetkých druhov oxidovej keramiky. Spomínané materiály majú pri izbovej teplote vysokú pevnosť v ohybe, ktorá však nad teplotou 1000°C prudko klesá.

Ich tepelná vodivosť je relatívne vysoká, majú vysoký koeficient teplotnej rozťažnosti, čo spôsobuje, že ich odolnosť voči tepelným rázom je nižšia než akú majú materiály Si_3N_4 a SiC . Lomová húževnatosť pri izbovej teplote sa pohybuje v intervale od 3,8 do 5,9 MPa.m^{1/2}.

Materiály na báze oxidu horečnatého (MgO)

MgO sa v prírode vyskytuje vo veľkom množstve ako magnezit a dolomit a len v málom množstve ako oxid vo forme minerálu s názvom periklas. Magnezitový žiaruvzdorný materiál obsahujúci MgO môže byť získaný z vysoko čistej magnezitovej rudy jednoduchou úpravou a následnou kalcináciou pri teplote 500 – 700°C. Žiaruvzdorné materiály na báze dolomitu sú doteraz široko používané a to hlavne v Európe.

Ďalším komerčne využívaným zdrojom oxidu horečnatého je morská voda a nánosy solí bohatých na MgO . Morská voda o objeme 500 l obsahuje okolo 1 kg MgO vo forme chloridu horečnatého. Rozsiahly výskum v posledných rokoch bol zameraný na prípravu jemného, vysoko čistého nanoprášku MgO pripraveného oxidáciou pár, ktorý je charakteristický svojou vysokou spekateľnosťou. Takýto prášok je východiskovou surovinou pre prípravu priehľadného MgO metódou horúceho lisovania pri teplote 1100°C bez spekacích prídavkov.

Materiály na báze oxidu zirkoničitého (ZrO_2)

Oxid zirkoničitý má teplotu tavenia 2680°C. V tuhom stave vystupuje v troch modifikáciách: c- ZrO_2 , (vysokoteplotná kubická fáza s mriežkou fluoritu, nad 2200°C), t- ZrO_2 (strednoteplotná tetragonálna fáza, medzi 2200 a 1000°C) a m- ZrO_2 (nízkoteplotná monoklinická fáza, pod 1000°C). Premena t- ZrO_2 na m- ZrO_2 je martenzitického typu a je spojená s objemovou zmenou asi 3 %. Výrobky z čistého ZrO_2 sa preto často rozrušia už pri vypaľovaní a sú prakticky nepoužiteľné. Prídavkom vhodných oxidov, napr. CaO alebo Y_2O_3 je však možné docieľiť to, že sa ZrO_2 prevedie na pevný kubický roztok, stály v celom teplotnom rozsahu. Takto upravenú keramiku označujeme ako stabilizovanú. Stabilizovaný oxid zirkoničitý sa ako konštrukčná keramika neuvažuje, pretože má pomerne nízke mechanické

vlastnosti. Využíva sa však ako funkčná keramika pre svoj vysoký bod tavenia a elektrické vlastnosti.

Vynikajúce mechanické vlastnosti naopak má tzv. čiastočne stabilizovaný oxid zirkoničitý, t.j. keramický materiál na báze ZrO_2 so zníženým obsahom stabilizačných prísad, u ktorého bola nasledujúcim tepelným spracovaním vyvolaná v kubickej matici precipitácia veľmi malých útvarov (rozmerov 50-100 nm) metastabilnej tetragonálnej fázy. Priaznivý účinok sa dosahuje tým, že vysoké napätia v okolí koreňa trhliny pri zaťažení vyvolávajú transformáciu tetragonálnej fázy do stabilnej monoklinickej formy. Uvedená fázová transformácia nastáva i pri mechanickom opracovaní povrchu, kedy vznikajú tiež pomerne vysoké napätia.

7.2.2 Nitridová keramika

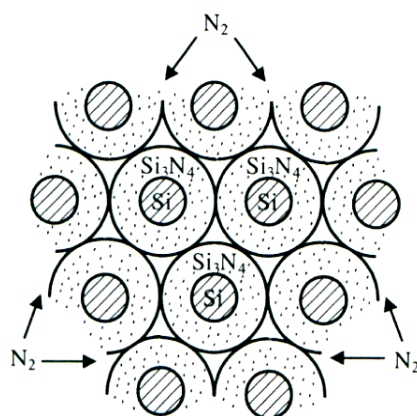
Medzi nitridovú keramiku zaraďujeme **nitrid kremíka Si_3N_4** a **sialony**, t. j. z neho odvodené materiály, v ktorých sú niektoré atómy Si a N nahradené Al a O. Nitrid kremíka sa vyskytuje v dvoch štruktúrnych modifikáciách: $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, ktorá má defektnú mriežku (jeden zo základných atómov dusíka je nahradený kyslíkom) a $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (zastúpenie atómov plne zodpovedá stechiometrickému vzorcu). Obe sú hexagonálne. Keramika sialonového typu je odvodená od nitridu kremíka náhradou niektorých atómov kremíka hliníkom a niektorých atómov dusíka kyslíkom. Dnes je známych asi 400 takýchto materiálov sústavy Si-Al-O-N. Z chemických značiek zložiek sústavy je odvodený ich názov - SiAlON.

Súčiastky z nitridu kremíka je možné vyrábať rôznymi metódami, z ktorých najznámejšie sú:

- **reakčné spekanie** (reaction bounded silicon nitride - RBSN),
- **žiarové lisovanie** (hot pressed silicon nitride - HPSN),
- **beztlakové spekanie** alebo spekanie pod pretlakom dusíka (sintered silicon nitride - SSN),
- **dospekanie reakčne spečeného nitridu kremíka** (sintered reaction bounded silicon nitride - SRBSN),
- **izostatické lisovanie za tepla** (hot isostatically pressed silicon nitride - HIPSN).

V ranom štádiu rozvoja keramiky nitridického typu (Si_3N_4) sa používali technológie založené na súčasnom nitridovaní a spekaní kompaktovaného kremíkového prášku (obr.7.4). Tento proces bol nazývaný reakčným spekaním (ozn. RSSN). Pri použití tejto techniky je keramika charakterizovaná vysokou pórovitosťou, čo vedie k nízkej pevnosti keramického materiálu. Naopak v tomto prípade je možné zaznamenať zanedbateľne malé zmrštenie počas reakčného spekania pri teplote 1400°C . Nedávno bola vyvinutá tzv. hybridná technológia reakčného spekania vychádzajúca z RSSN, ktorá bola neskôr doplnená vysokoteplotným

spekacím procesom s aditívami. Táto technologická varianta je obvykle označovaná ako SRBSN. Dosahovaná štruktúra je svojim charakterom blízka štruktúre, dosahovanej pri technike označovanej ako SSN, avšak pri nižšom zmrštení (10 %), čo je veľmi priaznivé z hľadiska tvarovania keramiky.



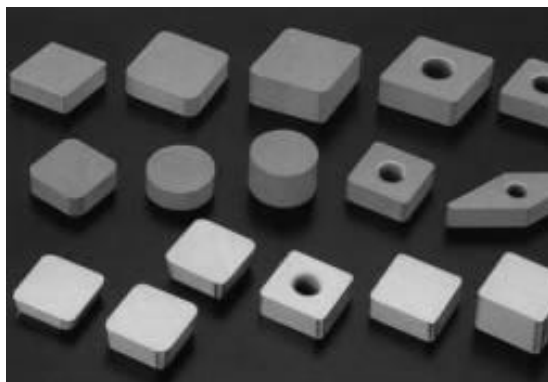
Obr.7.4 Schéma reakčného spekania

Nitrid kremíka (Si_3N_4) s vysokou hustotou sa získava pri použití lisovania za tepla (HPSN) alebo izostatického lisovania za tepla (HIPSN). Vo všetkých prípadoch je komponent SiO_2 spekanej taveniny odvodený z komponentu prítomného na povrchu $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, ktorá je hlavnou súčasťou východiskovej zmesi tvorenej jeho jemnými časticami. Použitie $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ je priaznivé nielen pre jeho jemnozrnnosť a dosiahnutie mikrohomenity v rozdelení SiO_2 , ale aj z hľadiska zaistenia chemického komponentu hybnej sily pre priebeh spekacej reakcie, založenej na procese rozpúšťania a následnej reprecipitácii.

Zvyčajnou aplikáciou nitridu kremíka sú rezné doštičky využívané v strojárskom priemysle na obrábanie tvrdých kovových materiálov. Ich výhodou je vyššia životnosť v porovnaní s nástrojovou oceľou, kvalitnejší povrch obrobeného materiálu a nie je potrebné chladenie. Ďalej sa Si_3N_4 výrazne využíva v automobilovom priemysle (ložiská, ventily, turbodúchadlá, zapalovacie sviečky atď.), ako predmety dennej potreby (nožnice, nôž, otvárač na fľaše, guľčkové pero a iné) a pre rôzne a hlavne vysokoteplotné aplikácie (lopatky plynových turbín, raketové trysky, výmenníky tepla, súčasti zvaracích agregátov, difúzne masky, fixačné telieska pre jadrové palivo). Niektoré príklady využitia nitridu kremíka sú uvedené na obr.7.5.

Sialonová keramika obsahuje odvodenú fázu β' obvykle s veľmi nízkou substitučnou úrovňou, takže jej nosné vlastnosti zostávajú vzhľadom k porovnávanému stavu $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ prakticky nezmenené. Spekaním zmesi $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{AlN}$ vzniká β' -sialon, ktorý má charakter fázy typu tuhého roztoku (s mriežkou $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$) a možno ho formálne opísať vzorcom $\text{Si}_{6-Z}\text{Al}_2\text{O}_3\text{N}_{8-Z}$, kde $0 < Z < 4$. Pre zrýchlenie spekania možno použiť prísadu Y_2O_3 , spekanie prebieha za prítomnosti tekutej fázy a výsledný materiál má zvlášť vysokú hustotu.

Vzniká tak yttriový sialon (Y-Si-Al-O-N) a sú známe aj sialony odvodené od α -Si₃N₄ alebo od keramického oxinitridu Si₂N₂O.



a)



b)

Obr.7.5 Príklady využitia nitridu kremíka, a - rezné doštičky na obrábanie tvrdých kovových materiálov, b - využitie Si₃N₄ sa v automobilovom priemysle

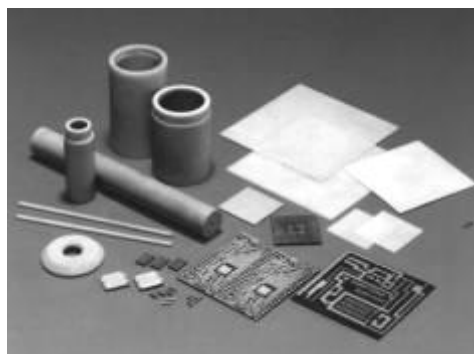
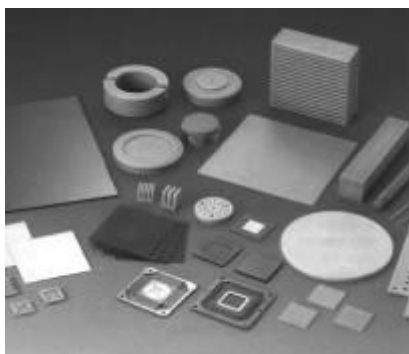
Nitridová keramika je predurčená na vysokoteplotné aplikácie. Uvažuje sa s ňou na súčiastky tepelných strojov namáhaných ťahovými napätiami nad 100 MPa pri teplotách až okolo 1500°C. Ich pevnosť pri vysokých teplotách prevyšuje aj niklové superzliatiny. Nitridová keramika sa ďalej vyznačuje odolnosťou proti tepelným rázom, nízkou tepelnou vodivosťou, nízkou tepelnou rozťažnosťou, vysokou tvrdosťou a koróznou odolnosťou.

Priaznivejšie charakteristiky sialonu vyplývajú z toho, že výhodne kombinuje vlastnosti Si₃N₄ a Al₂O₃. U nitridovej keramiky sa dosahuje lomová húževnatosť okolo 5 MPa.m^{1/2}, v niektorých prípadoch až okolo 10 MPa.m^{1/2}. Používa sa aj ako rezná keramika.

Sialon (Si-Al-O-N) - β -Si₃N₄ tvorí v rozsiahlom koncentračnom pásme tuhé roztoky s Al₂O₃, tzv. β -sialony (často označované tiež β'). β' je izoštruktúrny s β -Si₃N₄ a vzniká substitúciou atómov kremíka atómami hliníka so súčasnou výmenou atómov hliníka za atómy kyslíka. Oblasť homogenity tuhých roztokov β' možno opísať vzorcom Si_{6-z}Al₂O₂N_{8-z} (pričom 0 < z < 4,2). α -sialony (označované α') sú izoštruktúrne s α -Si₃N₄ a vznikajú v sústavách M-Si-Al-O-N, kde M = Li, Mg, Ca alebo Y a všetky prvky vzácnych zemín okrem La a Ce. Prítomnosť uvedených prvkov je nutná na stabilizáciu štruktúry. α -sialony možno opísať obecným vzorcom M_xSi_{12-(m+n)}Al_(m+n)O_nN_{16-n}, pričom hodnota x závisí od mocenstva stabilizujúceho prvku (napr. pre trojmocný Y je hodnota x = m/3). Sialony sa dajú pripraviť voľným spekaním alebo tlakovým spekaním a majú v porovnaní s Si₃N₄ vyššiu oxidačnú odolnosť. Hutný sialon sa pripravuje pri vysokých teplotách od 1750°C do 1850°C v ochrannnej atmosfére dusíka. Jednoduché tvary (tvar disku) a malé série výrobkov sa pripravujú horúcim lisovaním, ale pre hromadnú výrobu sa využíva tlakové lisovanie.

Nitrid hliníka (AlN) je zlúčenina s hexagonálnou kryštálovou štruktúrou typu wurtzitu. Atómy hliníka vytvárajú najhustejšie hexagonálne usporiadanie a obsadzujú polovicu tetraedrických polôh obdobného usporiadania atómov dusíka. Hutný AlN sa pripravuje voľným spekaním pri teplotách 1600-1900°C v atmosfére dusíka. I keď sa AlN v poslednej dobe začína používať aj na výrobu chladičov, jeho dominantné použitie zostáva v

elektrotechnickom priemysle. Použitie AlN je obmedzené do teploty 800°C v dôsledku silnej oxidácie nad touto teplotou.



Obr.7.6 Príklady výrobkov s použitím nitridu hliníka

Od roku 1985 sa záujem výskumníkov a konštruktérov o AlN rapídne zvýšil, keďže sa začal používať ako základný substrát v mikroelektronike vďaka dobrým izolačným vlastnostiam a vysokej tepelnej vodivosti (160 W/m.K). Z keramických materiálov má podobné vlastnosti iba BeO, ktorý je však toxický. AlN sa vo veľkej miere využíva v optoelektronike ako dielektrická vrstva v optických pamäťových médiách, ako čipová karta, kde je dôležitá práve vysoká teplotná vodivosť (elektrické motory, senzory, vysokofrekvenčné moduly, súčiastky telekomunikačných a výskumných satelitov, vojenský priemysel). AlN ako substrát v mikroelektronike, kde sa vo veľkej miere využíva hlavne jeho vysoká tepelná vodivosť.

Nitrid bóru (BN) je izoelektronický s uhlíkom a vyskytuje sa v dvoch štruktúrnych modifikáciách podobných grafitu (hexagonálna štruktúra: h-BN, označovaný tiež „biely grafit“, $\rho = 2,27 \text{ g.cm}^{-3}$) a diamantu (kubická štruktúra: c-BN, $\rho = 3,48 \text{ g.cm}^{-3}$). Kubický nitrid bóru sa vyrába zahrievaním pri vysokom tlaku a teplote, ktoré sú vyššie ako pri príprave syntetického diamantu z grafitu. Priama konverzia hexagonálneho BN na kubickú formu prebieha pri tlakoch do 18 GPa a pri teplotách v rozsahu 1730-3230°C. Prídavok malého množstva oxidu bóru môže znížiť požadovaný tlak do 4-7 GPa a teplotu do 1500°C. Kubický BN, c-BN, β -BN, alebo z-BN (kryštalická štruktúra podobná zafíru ZnS), je široko využívaný ako abrazívny materiál pre priemyselné nástroje. Jeho využiteľnosť súvisí s jeho nerozpustnosťou v železe, nikle a ich zliatinách pri vysokých teplotách (na rozdiel od diamantu). BN má podobne ako diamant vysokú teplotnú vodivosť, spôsobenú fotónmi na rozdiel od kovov, kde je to spôsobované pohybom elektrónov. Pri kontakte s kyslíkom pri vysokých teplotách sa pasivuje za tvorby vrstvy oxidu boritého.

Komerčne je BN známy pod názvom Borazon a Elbor. Hexagonálny BN sa pripravuje nitridáciou alebo amonolýzou trioxidu bóru. Tenký film BN sa môže získať CVD metódou z trichloridu bóru a dusíkových prekurzorov. Na prípravu vysoko jemného BN pre lubrikanty a tonery sa využíva horenie prášku bóru v dusíkovej plazme pri teplote 5500°C.

Hexagonálny BN sa dá pripraviť taktiež vo forme vlákien (niekedy nazývané biele uhlíkové vlákna), ktoré sa využívajú ako spevňovací materiál v kompozitoch s rôznou matricou.

7.2.3 Keramika na báze karbidu kremíka

V podstate všetky materiály na báze karbidov možno zaradiť medzi keramické. Ako konštrukčná keramika prichádzajú do úvahy SiC, B₄C, WC a TiC. Okrem SiC ide o materiály určené na výrobu nástrojov a nebude im v ďalšom venovaná pozornosť.

Karbid kremíka, SiC je materiál s vlastnosťami podobnými nitridu kremíka. Jeho dobrá odolnosť voči oxidácii je daná tým, že povrch SiC sa pokryje tenkým filmom SiO₂ (na vzduchu sa vďaka tejto vrstvičke SiC oxiduje až nad teplotou 1000°C). Má podobnú mernú hmotnosť (3,217 g.cm⁻³), chemickú stálosť, má však nižšiu pevnosť v ohybe a lomovú húževnatosť ako nitrid kremíka. Odolnosť voči teplotným zmenám je dobrá vďaka relatívne nízkej teplotnej rozťažnosti a vysokej tepelnej vodivosti. Hodnoty mechanických vlastností sa môžu značne odlišovať v závislosti od spôsobu prípravy a kvality východiskovej suroviny.

Karbid kremíka sa vyrába žiarovým lisovaním (HP - SiC), reakčným spekaním (Si -SiC) alebo spekaním bez použitia tlaku (S - SiC). Karbid kremíka, pripravený žiarovým lisovaním (pri 2000°C a 35 MPa) sa vyznačuje vysokou mernou hmotnosťou a pevnosťou, ale obtiažnym opracovaním a tvarovaním. Tento problém viedol k vývoju SiC pripraveného reakčným spekaním. Veľkou výhodou tohto spracovateľského postupu sú malé rozmerové zmeny počas procesu. Reakčne spekaný SiC sa najčastejšie získava zo zmesi SiC, grafitového prášku a kremíka. Kremík, ktorý je počas spekania tekutý, reaguje s grafitovým práškom a vytvára sklenú fázu SiC, pôsobiacu ako spojivo. Po spracovaní obsahuje materiál obvykle 10 - 15 % zvyškového kremíka. Spekaný SiC bez použitia tlaku je pripravovaný spekaním prášku SiC s prídavkom bóru, uhlíka alebo hliníka.

Karbid kremíka sa dá získať aj chemickou parnou depozíciou (CVD procesom). Touto metódou sa dajú zhotoviť predovšetkým povrchové vrstvy, ktoré sa uplatňujú ako povlaky odolné voči oxidácii, ale aj celé súčiastky. Mechanické vlastnosti takýchto SiC keramík sú určené okrem iného aj teplotou povlakovaného materiálu a podmienkami rastu kryštálov. CVD-SiC je vysoko čistý materiál a ako taký vykazuje najvyšší odpor voči oxidácii. Najčastejšie sa používa povlak na pórovitých súčiastkach vyrobených z SiC keramiky. Hutný SiC sa pripravuje spekaním v tuhej fáze alebo v prítomnosti kvapalnej fázy pri teplotách okolo 1850 - 2500°C, horúcim lisovaním, reakčným spekaním (RBSC = Reaction Bonded Silicon Carbide), zrážaním z plynnej fázy resp. pestovaním monokryštálov pre špeciálne polovodičové aplikácie. V súčasnosti sa využívajú aj elektrické vlastnosti SiC a používa sa ako polovodič (šírka zakázaného pásma je 2,2 eV pre β-SiC a 3,3 eV pre α-SiC) alebo na výrobu výhrevných elementov s prevádzkovou teplotou do 1800 °C. SiC je známy pod obchodnou značkou **carborundum**.

Pevnosť SiC je nižšia než Si₃N₄, rovnako tak i odolnosť proti tepelnému šoku. Vyznačuje sa vysokou tvrdosťou a vysokou tepelnou vodivosťou, ktorá sa využíva pri konštrukcii tepelných zariadení. Pri teplotách do 1300°C má výhodnejšie vlastnosti Si₃N₄, pre teploty 1300 - 1500°C sa javí výhodnejší SiC.

Karbid kremíka sa stal jedným z hlavných kandidátov na konštrukčné aplikácie vďaka svojej výbornej vysokoteplotnej pevnosti, odolnosti voči vysokoteplotnému tečeniu (creepu), dobrej odolnosti voči oxidácii, oteru a korózii. Využívajú sa aj jeho elektrické vlastnosti a používa sa ako polovodič, alebo na výrobu výhrevných elementov s prevádzkovou teplotou do 1700°C. Tento materiál sa používa aj na pancierovanie vojenských vozidiel, prípadne na výstelky hlavných strelných zbraní.

Za hlavnú oblasť využívania konštrukčnej keramiky sa považujú spaľovacie turbíny a naftové motory pri zvýšených prevádzkových teplotách 1200 - 1400°C.

7.3 Sklo a porcelán

Sklo je označenie pre amorfné tuhé taveniny kyslého oxidu kremičitého so zásaditými oxidmi (oxidy Na, K) a žieravými zeminami (oxidy Ca, Mg) spolu s oxidmi ťažkých kovov (Pb, Zn) a neutrálnym Al_2O_3 . V tavenine sú dlhé „reťazce“ obsahujúce tetraédre SiO_4 viazané väzbami Si-O-Si. Pri ochladzovaní taveniny postupne narastá jej viskozita. Pri týchto podmienkach sa uvedené reťazce obtiažne usporadúvajú do pravidelných (nekryštalizujú) útvarov. V sklách ostávajú častice (reťazce) usporiadané nepravidelne, tak ako boli v tavenine. Vyrába sa tavením tzv. sklárskeho kmeňa (kremičitý piesok, vápenec, sóda, sklený odpad a prísady). Z neho sa zhotovujú výrobky fúkaním, lisovaním, liatím a pod. Fyzikálne a chemické vlastnosti skla závisia od jeho chemického zloženia.

Podľa chemického zloženia rozdeľujeme sklo na:

- kremičité (obsahuje prevažne SiO_2 a je určené pre najširšie použitie),
- olovnaté (optické sklá s veľkým rozptylom svetla),
- borité (špeciálne použitie v optike a chémii),
- fosforečné (špeciálne sklo s veľkou priepustnosťou ultrafialových lúčov),
- farebné a nepriehľadné sklo (základnou surovinou je obvykle kremičitá sklovina, ktorá je sfarbená farebnými silikátmi, ktoré vytvárajú niektoré oxidy).

Sklo má pri vyšších teplotách (okolo 1000°C) malú viskozitu a môže sa odlievať podobne ako materiály kovové. Pri nižších teplotách (okolo 700°C) je taveninou o vysokej viskozite a môže byť spracovávané analogickými metódami tvárnenia ako kovy (valcovanie, lisovanie, kovanie).

Sklo má nízku tepelnú vodivosť. To sa využíva u kaleného bezpečnostného skla pre dopravné prostriedky, ktoré sa vyrába rýchlym ochladením prúdom stlačeného vzduchu po predchádzajúcom rovnomernom zohriatí. Pri tuhnutí vzniká ako dôsledok rozdielneho odvodu tepla po priereze tlakové napätie v povrchovej vrstve. Kalené sklo má potom väčšiu pevnosť v ohybe. Pri roztrieštení sa netvoria ostré úlomky ale drobná drvina, čím sa znižuje možnosť zranenia. Merná hmotnosť skla sa pohybuje podľa druhu v rozmedzí 2200 – 6800 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, pevnosť v ťahu v rozmedzí 35 - 80 MPa, pevnosť v tlaku 500 - 1200 MPa.

Podľa počtu zložiek, ktoré sklo tvoria možno sklá orientačne rozdeliť do troch skupín:

- a) jednozložkové (kremenné sklo),

- b) dvojzložkové (sodnokremičité a draselnokremičité sklo) a
- c) trojzložkové a viaczložkové sklá (sodnovápenaté sklá).

Jednozložkové (kremenné) sklo obsahuje prakticky len jednu zložku - oxid kremičitý SiO_2 . Surovinou na výrobu je čistý žilný kremeň (na výrobu vysokočistého kremenného skla sa používajú syntetické zlúčeniny kremíka). Kremenné sklo má veľmi malú teplotnú rozťažnosť, je preto odolné proti náhlym zmenám teploty (vydrží prudké ochladenie z teploty 800°C vo vode, alebo z teploty 1300°C na vzduchu. Má veľmi dobrú chemickú odolnosť. Prepúšťa ultrafialové žiarenie. Používa sa na špeciálne účely. Napr. na výrobu žiaroviek pre špeciálne osvetľovacie telesá (horské slnko), optické zariadenia (svetlovody), lasery, ďalej na rôzne chemicky odolné nádoby a zariadenia pre chemický priemysel, pre raketovú techniku (okná, tepelné štíty).

Dvojzložkové (sodnokremičité a draselnokremičité) sklo - sodnokremičité sklo sa taví z dvoch zložiek, kremičitého piesku a sódy (Na_2CO_3) vo vaňovej peci pri teplote asi 1400°C . Obsahuje 66 - 76 % SiO_2 . Surovinou na výrobu draselnokremičitého skla je potaš (K_2CO_3). Sodnokremičité a draselnokremičité sklo vznikne po ochladení taveniny (skloviny) s vyššie uvedeným zložením. Takéto sklá sú dobre rozpustné vo vode. Vodné sklo je názov pre tavené sklo, ale najmä sa tak označuje kvapalina, ktorá vzniká jeho rozpúšťaním vo vode. Používa sa na výrobu tzv. kyselinovzdorných tmelov, pre zvýšenie požiarnej odolnosti drevených konštrukcií, na injektáže pri sanácii zavlhnutého muriva, na výrobu silikátových farieb, výmurovky pecí, na výrobu silikagélu pre jeho adsorpčné vlastnosti.

Trojzložkové (sodnovápenaté) sklo. Tavením kremičitého piesku, vápenca, sódy sa vyrába sodnovápenaté sklo. Suroviny sa miesia v požadovanom pomere na tzv. sklársky kmeň, ktorý sa taví v sklárskych peciach pri teplotách $1000 - 1500^\circ\text{C}$. Vzniknuté sklo je nerozpustné vo vode, odolné proti kyselinám a chemickým vplyvom.

Technický porcelán

Je vysoko vypálená biela keramická hmota, pripravená zo zmesi kaolínu, kremeňa a živca. Kaolín je žiaruvzdorná a tvárna hmota s funkciou spojiva. Kremeň je žiaruvzdorný, živec je zložkou ľahko tavitelnou, pôsobiacou ako sklovité spojivo. Technický porcelán sa používa na niektoré špeciálne dielce pri stavbe textilných strojov, v guľových mlynch, v chemickom priemysle, a to ako náhrada za kovy. V elektrotechnike je dôležitým elektroizolačným materiálom.

Špeciálne porcelány vznikli vývojom z technického porcelánu, a to jednak nahradzovaním živca a kremeňa minerálnymi hmotami bohatými na oxid kremičitý, jednak pridávaním umelého oxidu hlinitého, korundu. Do prvej skupiny patria napr. hmoty známe pod obchodnými názvami silimanit, andaluzit, cyanit a pod. Používajú sa na trubice pyrometrov pre teploty do 1600°C . Druhú skupinu predstavuje korundový porcelán, obsahujúci až 90 % Al_2O_3 . Je to hmota vysoko žiaruvzdorná s dobrými mechanickými vlastnosťami. Používa sa na telesá zapaľovacích sviečok, ochranné trubice pyrometrov pre teploty do 1750°C a iné.

8 MEDZNÉ STAVY MATERIÁLOV

Medzný stav je súbor nežiaducich zmien materiálu, vďaka ktorým sa tento materiál stáva pre danú aplikáciu nepoužiteľným.

Významní slovenskí odborníci definujú medzný stav nasledovne:

- Medzný stav je taký stav materiálu, pri ktorom v dôsledku pôsobenia externých či interných faktorov kritickej veľkosti alebo kombináciou pôsobenia externých a interných faktorov kritickej veľkosti materiál skokom stratí funkčné a úžitkové vlastnosti, prípadne postupná zmena funkčných a úžitkových vlastností dosiahne istú úroveň.
- Skokovitá zmena stavu materiálu.
- Medzný stav je stav systému vyjadrený podmienkami (parametrami) činnosti systému, pri prekročení ktorých dôjde k dočasnému alebo trvalému porušeniu (zlyhaniu) funkcie systému. Medzný stav systému je na rozhraní normálneho a poruchového stavu.

Pri opise medzného stavu používame nasledujúce základné pojmy:

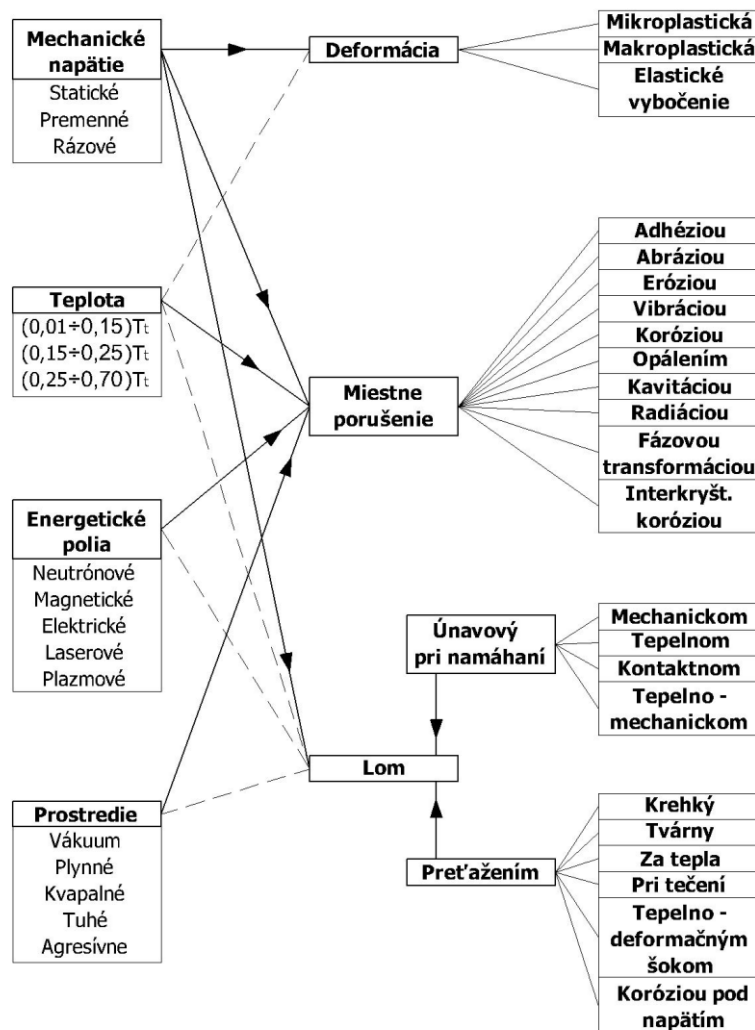
- *Úroveň poškodenia materiálu* je charakterizovaná hladinou vnútornej energie, najmä v miestach jej koncentrácie, alebo podielom oblastí s narušením kohézie materiálu v dôsledku pôsobenia externých alebo interných faktorov medzného stavu.
- *Plastická deformácia* je schopnosť materiálu meniť tvar a rozmery pri pôsobení dostatočne veľkého zaťaženia bez toho, aby menili svoju kryštalickú stavbu.
- *Miestne poškodenie* materiálu je nevratná, objemovo a miestne obmedzená strata kohézie, ktorej výsledkom je oddelenie istého objemu materiálu, vytvorenie trhliny alebo siete trhlín, prípadne vrstvy, ktorá má významne odlišné úžitkové vlastnosti ako okolitý materiál.
- *Lom* je nevratná strata kohézie častíc materiálu v časti alebo v celom priereze telesa.

Vznik medzného stavu ovplyvňujú nasledujúce faktory:

- Štruktúrny a subštruktúrny stav.
- Technológia výroby.
- Prevádzkové podmienky (prostredie).
- Veľkosť a druh zaťaženia.
- Chemické zloženie.
- Rýchlosť zaťaženia.
- Korózia.
- Čas.

- Teplota.
- Superpozícia viacerých faktorov.

Rozdelenie medzných stavov je možné vidieť na obr.8.1.



Obr.8.1 Základné rozdelenie medzných stavov

Rozdelenie medzných stavov:

❖ Medzné stavy únosnosti

■ Deformácia

□ Medzný stav pružnej deformácie

- nadmerná pružná deformácia,
- porušenie pružnej stability (vzper),
- pokles pružnej deformácie (relaxácia).

□ Medzný stav plastickej deformácie

- nadmerná plastická deformácia (kritická),
- porušenie plastickej stability.

- Medzný stav porušenia (lom)
 - Preťažením
 - krehký,
 - tvárny,
 - tečením,
 - rázom,
 - tepelná deformácia šokom,
 - koróziou,
 - zabrzdžený,
 - predčasný.
 - Únavou
 - Mechanickou $\varepsilon = f(\sigma)$
 - Tepelnou $\varepsilon = f(T)$
 - tepelno-mechanickou $\varepsilon = f(T, \sigma)$
 - tečením $\varepsilon = f(T, \sigma, t)$
- Miestne poškodenia
 - Objemové
 - vodíkom,
 - interkryštalická korózia,
 - tekutým kovom,
 - zvarom,
 - radiačné,
 - napučaním,
 - energetickými poľami.
 - Povrchové
 - adhéziou,
 - abraziou,
 - eróziou,
 - kavitáciou,
 - vibráciami,
 - koróziou,
 - teplotou,
 - vytrhnutím,
 - energetickými lúčmi.

❖ Medzné stavy použiteľnosti

- Nadmerné priehyby.
- Veľkosť dynamickej odozvy (kmitanie).
- Strata stability polohy.
- Hluk.

8.1 Trvalá deformácia

Trvalá (plastická) deformácia kovov a zliatin nastáva pri pôsobení napätia nad medzou klzu. Plastickú deformáciu materiálu (súčiastky) počas prevádzky je možné považovať za jeho degradáciu, keďže pri nej dôjde k trvalej zmene tvaru a zdeformovaná súčiastka už zvyčajne nemôže plniť účel, na ktorý bola skonštruovaná, obr.8.2. Konštrukčné časti musia byť preto navrhnuté tak, aby neboli pri prevádzkovom zaťažení preťažované a aby nebola prekročená medza klzu materiálu.



Obr.8.2 Príklad medzného stavu – deformácie ventilu a ojnice motora

Medzu klzu najviac ovplyvňuje:

- štruktúra
- teplota
- rýchlosť zaťažovania

Vplyv štruktúry

Spomedzi štruktúrnych parametrov hrá významnú úlohu veľkosť zŕn, nakoľko hranice zŕn sú prekážkou pre pohyb dislokácií. Jemnozrnné materiály teda majú vyššiu medzu klzu ako hrubozrnné materiály. Túto závislosť popisuje Hall-Petchov vzťah:

$$R_e = K_1 + K_2 \cdot d^{-\frac{1}{2}} \quad (8.1)$$

kde R_e je medza klzu, K_1 , K_2 sú materiálové konštanty a d je stredná veľkosť zrna.

Viacfázové materiály majú medzu klzu ovplyvnenú typom a veľkosťou prítomných fáz. Tvrdé fázy (cementit, precipitáty a pod.) sú prekážkou v pohybe dislokácií, preto medzu klzu zvyšujú. Ich účinnosť rastie tým viac, čím sú jemnejšie a rovnomernejšie rozložené v materiáli. Preto majú zliatiny vždy vyššie mechanické vlastnosti ako čisté kovy.

Medza klzu termoplastov sa zvyšuje plnivami, ktoré môžu čiastočne prenášať pôsobiace zaťaženie alebo priestorovo prekážať pohybu makromolekúl. V tomto zmysle sú veľmi účinné plnivá vo forme vlákien.

Vplyv teploty

Vplyv zvyšujúcej sa teploty na medzu klzu súvisí so zvýšenou pohyblivosťou atómov, molekúl a ich častí. Vďaka tomu je plastická deformácia ľahšia a medza klzu s rastúcou teplotou klesá. Táto závislosť je oveľa výraznejšia u termoplastov ako u kovových materiálov. Naopak, pri veľmi nízkych teplotách sa niektoré materiály (oceľ, termoplasty) stávajú krehkými.

Vplyv rýchlosti zaťažovania

Plastická deformácia je spojená s premiestňovaním štruktúrnych častí materiálu (atómov, molekúl), čo si vyžaduje určitý čas. Pri väčšej rýchlosti zaťažovania prebehne preskupenie v menšom rozsahu ako pri pomalom zaťažovaní. S rastúcou rýchlosťou zaťažovania sa preto zhoršuje plastická deformovateľnosť a teda rastie medza klzu. Pri veľmi veľkej rýchlosti zaťažovania sa materiály nestačia plasticky deformovať vôbec a správajú sa ako krehké.

Závislosť medze klzu R_e od rýchlosti zaťažovania $\dot{\varepsilon}$ má tvar:

$$R_e = K \cdot \dot{\varepsilon}^m \quad (8.2)$$

kde rýchlosť zaťažovania $\dot{\varepsilon}$ (s^{-1}) je definovaná ako relatívna deformácia ε za čas τ :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\tau} \varepsilon \quad (8.3)$$

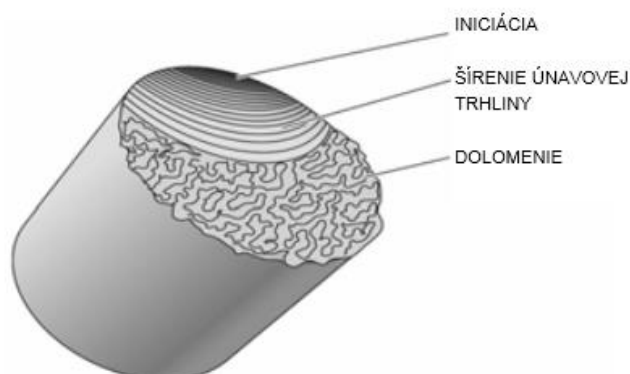
K je konštanta, m (má hodnotu medzi 0,01 a 0,5) je exponent vyjadrujúci citlivosť materiálu na rýchlosť zaťažovania. Táto citlivosť, a teda aj exponent m , rastie so zvyšujúcou sa teplotou. U niektorých kovových materiálov môže pri dostatočne vysokých teplotách hodnota exponentu m dosiahnuť až hodnotu 0,5 a kombinácia veľmi pomalej deformácie a vysokej teploty vedie k značne nízkej medzi klzu. Takéto materiály sú schopné obrovskej plastickej deformácie (rádovo až 1000%) a nazývajú sa superplastické. Podmienkou superplastického správania, ktoré je dôležité pri tvárnení kovových materiálov, je veľmi jemné zrno ($<10 \mu m$).

8.2 Typy lomov

Ak na teleso pôsobí vyššie mechanické napätie ako je medzná hodnota, začnú vznikať zárodky porušenia, ktoré rastú až do vytvorenia lomovej plochy. Teleso stratí kohéziu, vzniká párny počet nových povrchov – lom.

Fraktografia je vedný odbor, ktorý sa zaoberá štúdiom povrchov lomov materiálov. Sleduje charakteristické znaky lomov na povrchu. Na základe nich vieme identifikovať mechanizmus lomu. Cieľom štúdia lomových plôch je zistiť pôvod trhliny a príčiny jej iniciácie. Iniciátorom lomov sú najčastejšie koncentrátoři napätí, ktoré sú geometrické (spojené s tvarom súčiastky), alebo metalurgické (inklúzie, riediny, dutiny).

Nástrojom pri štúdiu lomov je makroskopická a mikroskopická analýza. Výsledkom štúdia je mapa poškodenia zachytávajúca všetky štádiá rastu lomu, obr.8.3.



Obr.8.3 Schematický náčrt častí únavového lomu

Pod pojmom lomová plocha rozumieme systém plôšok (faziet). Lomy je možné klasifikovať podľa rôznych hľadísk:

- ❖ Podľa morfológie:
 - Húževnaté (vzniknuté tvárnym oddeľovaním)
 - Krehké (vzniknuté transkrýštalickým štiepením, interkrýštalickým oddeľovaním, dekohéziou hraníc)
- ❖ Podľa rozsahu plastickej deformácie predchádzajúcej a sprevádzajúcej rast trhliny:
 - Krehké (do 1‰)
 - Kvázikrehké (do 1%)
 - Kvázihúževnaté (do 5%)
 - Húževnaté (nad 10%)
- ❖ Podľa veľkosti objemu zasiahnutého plastickou deformáciou:
 - Húževnaté (rozsiahla plastická deformácia)
 - Krehké (nepozorujeme makrodeformáciu)
- ❖ Podľa potreby dodávania energie pri raste lomovej trhliny:
 - Stabilné (na rozvoj lomovej trhliny je potrebné sústavne dodávať energiu)
 - Nestabilné (nekontrolovateľný rast trhliny účinkom elastickej energie nahromadenej v telese – zvyškové napätia)

Ak vzhľad lomu indikuje prítomnosť vnútorných chýb, alebo výraznú textúru, označujeme lomy ako:

- vločkové (vnútorné nespojitosti vyvolané účinkom vodíka)
- lomy vo vycedeninách (v dôsledku segregácie alebo likvácie počas tuhnutia, alebo plynmi zabraňujúcimi zhutneniu počas tvárnenia)
- svetlé plôšky (rybie očka) spôsobené vodíkom v okolí inklúzií

- bublinaté (množstvo pórov a mikrostiahnutí vzniknutých počas tuhnutia)
- s riedinami (väčšie dutiny spôsobené zmrštením kovu počas tuhnutia)
- s vyššou koncentráciou inklúzií (napr. rozvalcované sulfidy – drevitý lom)

Charakteristické znaky lomu:

- **stopa**, ktorú zanechá lom v priereze komponentu (miesto iniciácie, orientácia lomu k povrchu komponentu, chevronové kontúry – ukazujú smer šírenia sa lomu...)
- **stupeň makroskopickej deformácie** komponentu
- **vzhľad štruktúry povrchu lomu** (makrovzhľad – jemná/drsná, lesklá/matná, mikrovzhľad: jamky, štiepne fazety, únavové striácie...)

Krehký lom

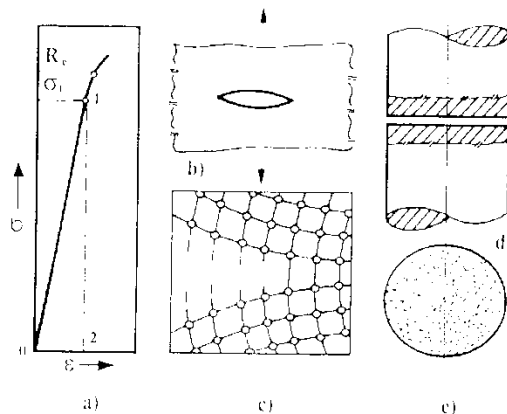
Krehký lom je nežiaduci, veľmi nebezpečný druh lomu. Snahou je maximálne predchádzať jeho vzniku.

Charakteristiky krehkého lomu, obr.8.4:

- Šíri sa vysokou rýchlosťou
- Je mechanicky neočakávaný – vzniká a prebieha bez väčšej plastickej deformácie
- Vzniká náhle pri napätí $\sigma < R_e$
- Lomová plocha je kolmá na smer pôsobenia najväčšieho napätia
- Energia potrebná na jeho vznik a šírenie je minimálna – v tom spočíva jeho najväčšie riziko
- Šíri sa štiepnym mechanizmom transkryštalicky (obr.8.5), alebo interkryštalicky (obr.8.6)

Faktory podporujúce vznik krehkého lomu

- Prítomnosť mikroskopických alebo makroskopických koncentrátorov napätia (trhliny, vruby, náhle zmeny prierezu)
- Veľké hrúbky materiálu (väčšia hrúbka = väčšia pravdepodobnosť prítomnosti vnútorných chýb)
- Dynamické namáhanie
- Veľká energia elastickej deformácie v namáhanom telese (prítomnosť zvyškových napätí)
- Nízke teploty

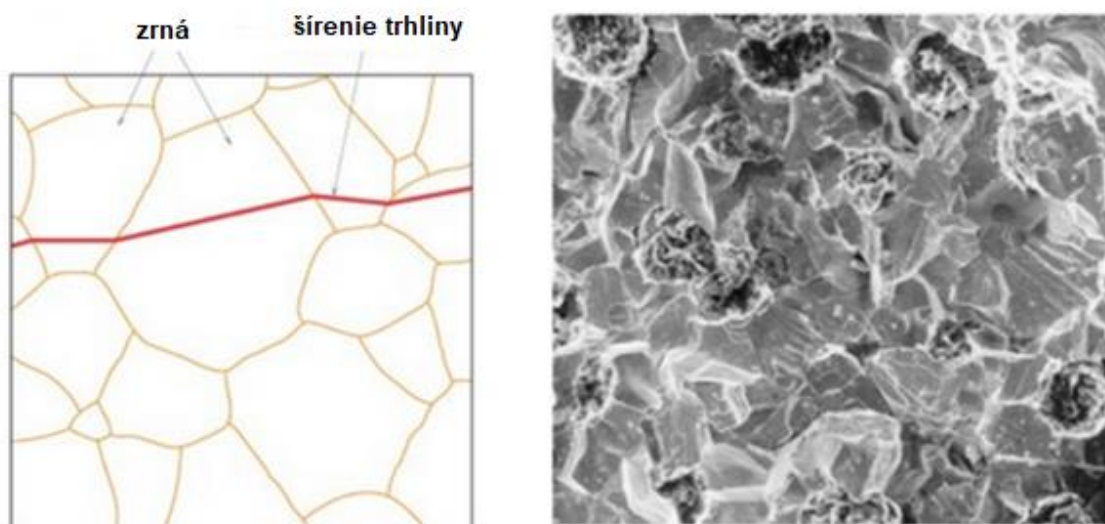


Obr.8.4 Schematické znázornenie základných charakteristík krehkého lomu: a) vzniká pri $\sigma < R_e$, b) predpokladom je prítomnosť vnútorných defektov, c) dochádza k porušovaniu mediatómových väzieb, d) lomová plocha je kolmá na pôsobiace zaťaženie a nevykazuje známky plastickej deformácie v svojom okolí, e) lomová plocha je málo členitá

Krehký lom sa môže šíriť dvoma spôsobmi:

Krehký lom – transkryštalický (štiepny)

Je typický pre materiály s pevnými hranicami zŕn, so silnou adhéziou zŕn. Štiepenie je dôsledkom opakovaného porušenia atómových väzieb pozdĺž špecifických rovín cez jednotlivé zrná.



Obr.8.5 Schéma transkryštalického šírenia lomu a skutočný vzhľad lomovej plochy, REM

Krehký lom – interkryštalický

Je typický pre prípady, kedy sú hranice zŕn z rôznych príčin oslabené napr. chemickým napadnutím, oxidáciou, skrehnutím a pod. Lom sa šíri po hraniciach zŕn.



Obr.8.6 Schéma interkryštalického šírenia lomu a skutočný vzhľad lomovej plochy, REM

Húževnatý (tvárny) lom – znaky

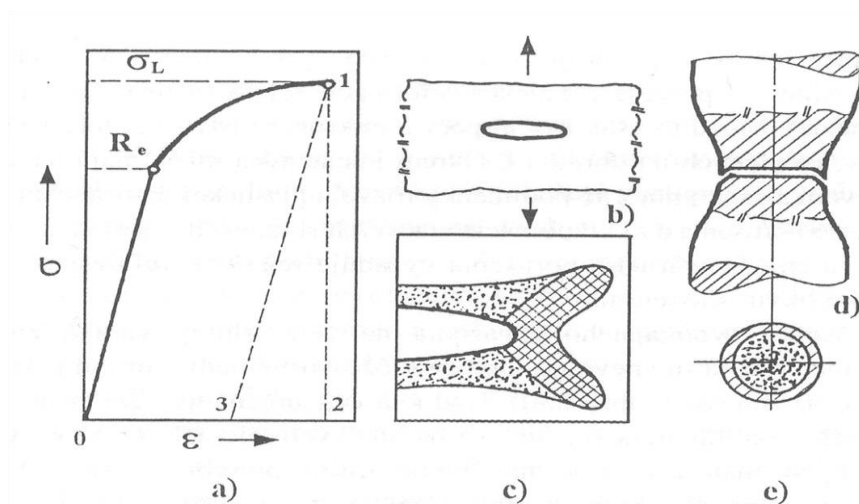
Charakteristiky húževnatého lomu, obr.8.7:

- Je sprevádzaný relatívne veľkou plastickou deformáciou
- Na jeho vznik je potrebné relatívne veľké množstvo energie (preto je menej nebezpečný)
- Veľkosť deformácie pred vznikom porušenia závisí od druhu, čistoty, štruktúry a deformačného stavu materiálu

Priebeh vzniku húževnatého (tvárneho) lomu je možné zosumarizovať nasledovne, obr.8.8:

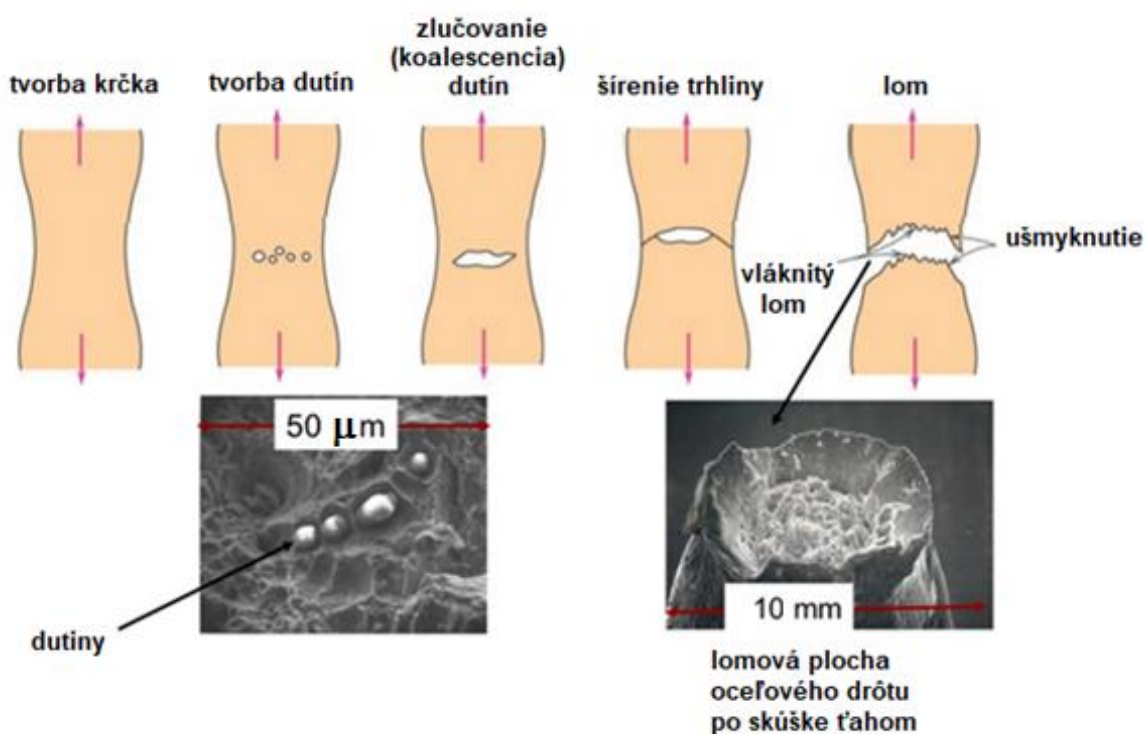
- Mechanické namáhanie
- Plastická deformácia
- Zväčšenie kontrakcie
- Vznik dutín v mieste budúceho lomu
- Rast dutín – zmenšovanie mostíkov medzi dutinami
- Porušovanie mostíkov – spájanie (koalescencia) dutín do trhlín
- Konečná lomová plocha – jamková

V prípade materiálu s kruhovým prierezom má lomová plocha dve oblasti: jadro lomovej plochy má jamkový charakter a je kolmé na smer zaťažovania, okraje lomovej plochy sa porušia šmykom pod uhlom približne 45° voči pôsobeniu zaťaženia. Výsledná plocha má tvar „pohárika“ (angl. cup and cone), obr.8.9.



Obr.8.7 Schematické znázornenie základných charakteristík húževnatého (tvárneho) lomu:

- a) vzniká pri $\sigma > R_e$, b) predpokladom je prítomnosť vnútorných defektov, c) dochádza k vzniku plastickej zóny pred čelom trhliny, d) jadro lomovej plochy je jamkovitého charakteru a je kolmé na pôsobiacie zaťaženie, okraj je poručený šmykom pod uhlom 45° , v blízkosti lomu je viditeľná plastická deformácia, e) lomová plocha má tvar pohárika

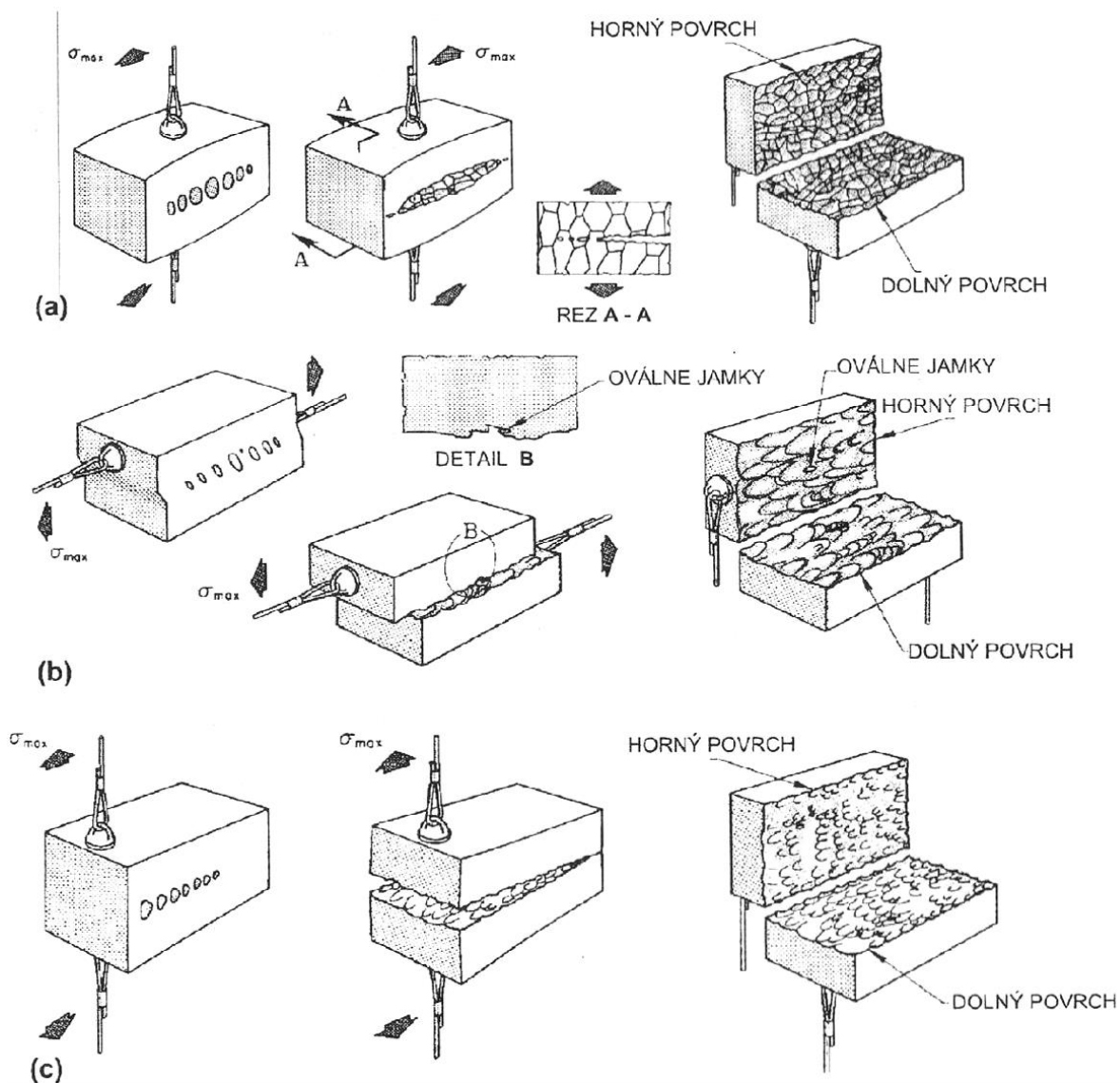


Obr.8.8 Schéma vzniku tvárneho lomu



Obr.8.9 Vzhľad húževnatého (vľavo) a krehkého (vpravo) lomu

Schéma vzniku tvárneho (jamkového) lomu pri troch spôsoboch zaťažovania uvádza obr. 10.



Obr.8.10 Schéma vzniku tvárneho (jamkového) lomu pri troch spôsoboch zaťažovania:
a) ťah, b) šmyk, c) excentrický ťah

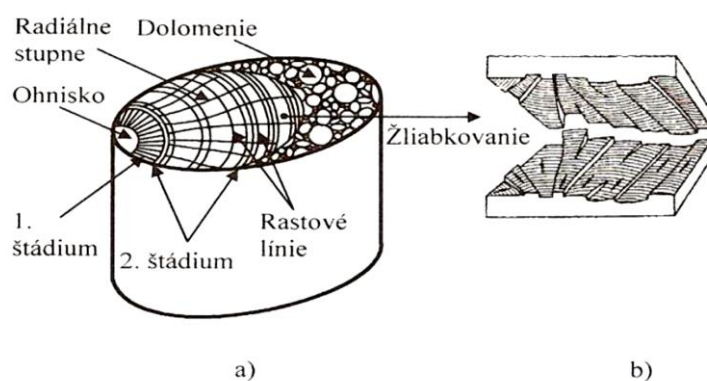
8.3 Cyklické namáhanie materiálov

Pri únavovom procese dochádza k postupnému hromadeniu poškodenia pri cyklickom kmitavom mechanickom, tepelnom alebo mechanicko-tepelnom namáhaní, pri napätí $< R_m$ a často aj $< R_e$, ktoré sa v závere procesu prejaví rastom makroskopickej trhliny a únavovým lomom.

Únavový lom zvyčajne šartuje na povrchu v mieste koncentrácie napätia spôsobenej náhlou zmenou prierezu alebo rôznymi typmi povrchových defektov.

Má tri charakteristické časti, obr.8.11:

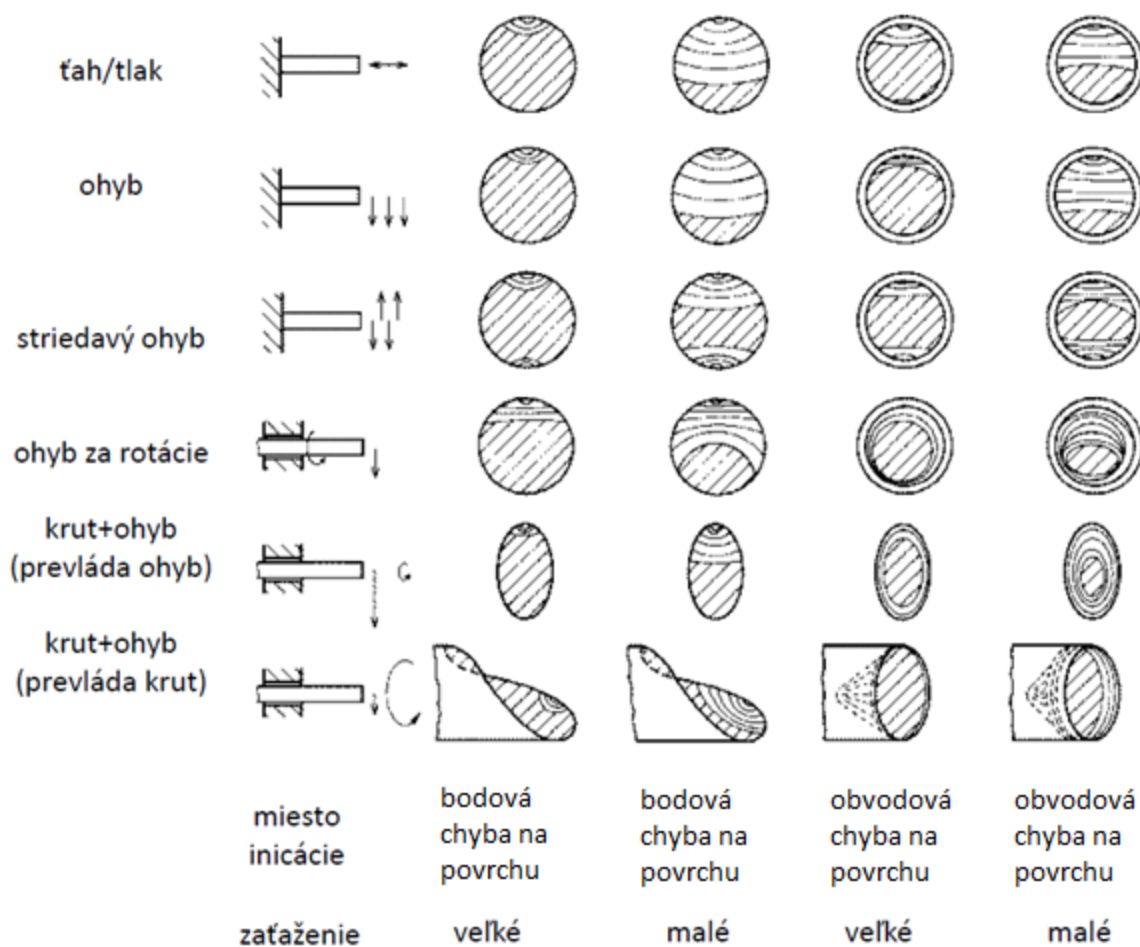
- miesto iniciácie,
- únavová zóna (zóna šírenia lomu, sú tam postupové čiary – striácie, málo členitá časť lomu),
- zóna dolomenia (členitý povrch lomu, bez známkov väčšej deformácie, väčšinou kolmá na smer hlavného napätia)



Obr.8.11 Charakteristické časti únavového lomu, a) makroskopický vzhľad, b) mikroskopický vzhľad

Podľa tvaru jednotlivých oblastí únavového lomu a podľa pomeru ich veľkosti možno spätne usudzovať na podmienky namáhania, za ktorých ku vzniku únavového lomu došlo. Čím pomalší je rozvoj únavovej trhliny, tým viac sa únavová oblasť vyhladí až vyleští. Teda lomy s veľmi hladkým povrchom únavovej oblasti sa rozvíjali dlho. To svedčí tiež o malom zaťažení, popr. o dostatočnom dimenzovaní až predimenzovaní súčasti. Čím menšia časť celkovej lomovej plochy pripadá na únavovú oblasť, tým väčšie bolo zaťaženie súčasti, popr. tým menšie jej dimenzovanie.

Vzhľad lomových plôch pri rôznom type zaťažovania je uvedený na obr.8.12.



Obr.8.12 Vzhľad lomových plôch pri rôznom type zaťažovania

Únavová životnosť súčiastok má 4 štádiá:

1. zmena mechanických vlastností
2. nukleácia trhlín
3. šírenie trhlín
4. konečný lom

ŠTÁDIÁ ÚNAVOVÉHO LOMU

1.Štádium - zmena mechanických vlastností

V prvom štádiu únavy materiálu dochádza k zmene hustoty a konfigurácie mriežkových porúch v celom objeme zaťažovaného kovu. Najväčšie zmeny nastávajú na začiatku cyklického zaťažovania, s rastúcim počtom cyklov ich intenzita klesá a po určitom počte cyklov sa už nemení.

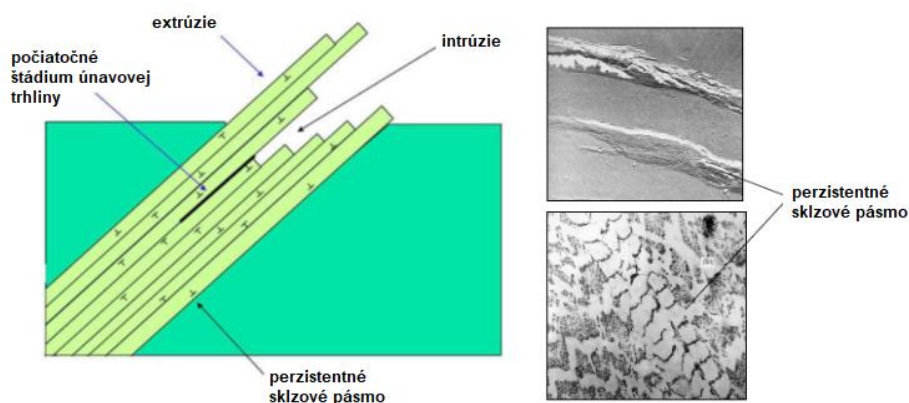
U materiálov vyžíhaných s pomerom $R_m/R_e > 1,4$ dochádza v tomto štádiu k tzv. cyklickému spevneniu; u materiálov s pomerom $R_m/R_e < 1,2$ spevnených deformačne,

precipitačne, disperznými časticami, martenzitickou transformáciou a pod., dochádza k tzv. cyklickému zmäkčeniu.

2. Štádium - nukleácia trhlín

Trhlina začína vždy na voľnom povrchu, v miestach koncentrácie cyklickej plastickej deformácie, po prekročení určitého medzného lokálneho napätia, pričom pod hodnotami tohto napätia nevznikne zárodok trhliny ani pri vysokom počte zaťažovacích cyklov.

Najskôr dochádza k vytváraniu sklzových pásiem v povrchových zrnách, ktorých sklzové roviny sú orientované v smere najväčších šmykových napätí. S rastúcim počtom cyklov narastá aj dĺžka, šírka a počet sklzových pásiem. Povrchový reliéf bude potom tvorený tzv. extrúziami a intrúziami, obr.8.13. Mikrotrhlinou sa neskôr stáva intrúzia a jej rast sa vysvetľuje ako prehlbovanie intrúzie opakovaným sklzom v jednom sklzovom systéme.

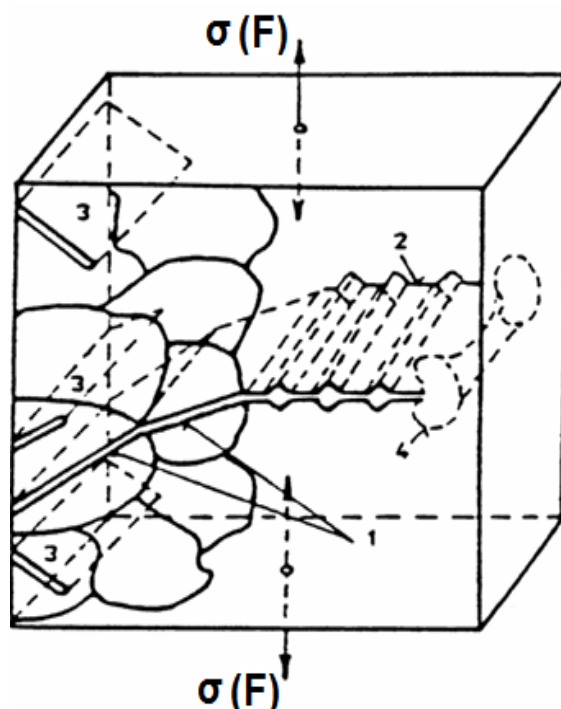


Obr.8.13 Schéma a skutočný vzhľad vzniku sklzových pásiem na povrchu cyklicky zaťažovaného materiálu

3. Štádium – šírenie trhlín

Po ukončení nukleačného štádia obsahuje povrch kovu mikrotrhliny, orientované do smeru aktívnych sklzových rovín (I. štádium šírenia). Pri ďalšom cyklickom zaťažovaní sa tieto trhlinky navzájom prepájajú a rastú do hĺbky. Na základe energetických pomerov na čelách jednotlivých trhlín sa napokon bude šíriť len jedna, tzv. magistrálna únavová trhlina. Táto sa pri svojom šírení natáča do smeru kolmého na vektor vonkajšieho zaťaženia (II. štádium šírenia), obr.8.14.

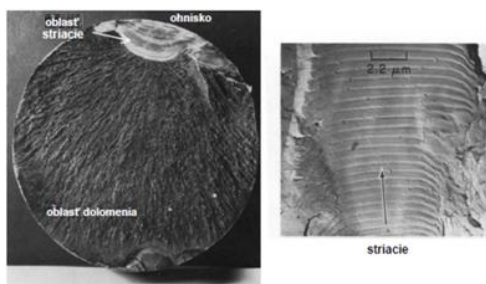
V prípade existencie ostrých vrubov (konštrukčných, technologických alebo metalurgických) je šírenie únavovej trhliny predstavované len II. štádiom. V oboch štádiách sa únavové trhliny šíria pri bežných teplotách transkrystalicky (cez objem zrna), šírenie trhlín po hraniciach zrn sa až na niekoľko výnimiek vyskytuje len pri zvýšených teplotách.



Obr.8.14 Schéma procesu šírenia trhliny, 3 – mikrotrhliny na povrchu kovu orientované do smeru aktívnych sklzových rovín (I. štádium šírenia), 1 – natáčanie hlavnej – magistrálnej trhliny do smeru kolmého na smer zaťaženia (II. štádium šírenia), 2 – postupovanie únavovej časti trhliny so striáciami, 4 – plastická zóna na čele trhliny

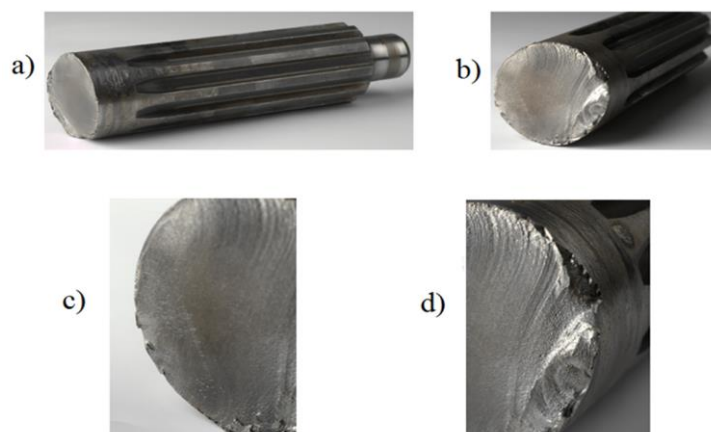
4. Štádium – konečný lom

Únavový lom vzniká **náhle**, bez predošlej makrodeformácie materiálu, aj v prípade húževnatých materiálov, ktoré sa pri statickej skúške porušia až po výraznej plastickej deformácii. Výsledkom šírenia únavovej trhliny je zoslabenie nosného prierezu súčasti. Ak dosiahne trhlina kritickú veľkosť, dôjde k náhlemu lomu zvyšného prierezu, ktorého veľkosť už nepostačuje na prenos zaťaženia. Preto má každý únavový lom **dve rozlíšiteľné oblasti: oblasť únavového poškodenia a zvyškový lom (oblasť dolomenia)**. Oblasť únavového poškodenia, v ktorej prebieha pozvoľný nárast trhliny, má vzhľad jemného lomu, ktorý je spôsobený opakovaným otváraním a zatváraním trhliny. Na lomovej ploche v tejto oblasti je viditeľné **východisko lomu (ohnisko)** a tzv. **rastové čiary (striácie)**. Zvyškový lom vzniká dolomením zvyšnej časti nosného prierezu, obr.8.15.

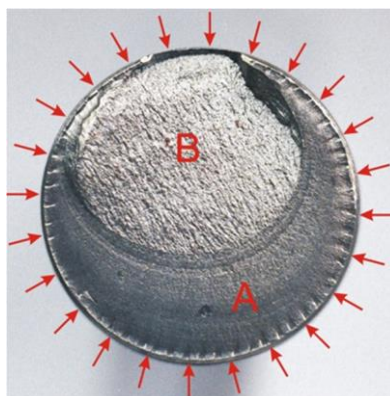


Obr.8.15 Vzhľad typického únavového lomu a detail striácií

Príklady únavového poškodenia súčastok, obr.8.16 a 8.17.



Obr.8.16 a)-d) Lom na spojkovom hriadeľi, nastal v dôsledku jeho priehybu, ktorý v ňom vyvolal striedavé ohybové namáhanie. Toto namáhanie spolu s prenášaným premenlivým krútiacim momentom vyvolávalo v danom priereze kombinované namáhanie. Únavový lom vyvolaný kombinovaným namáhaním sa vyznačuje tým, že jeho postup profilom je v tvare krivky. Tieto sú tu celkom zrejmé a s ohľadom na ich zhodný tvar je zrejmé, že priebeh namáhania hriadeľa bol od začiatku až do konca veľmi podobný.

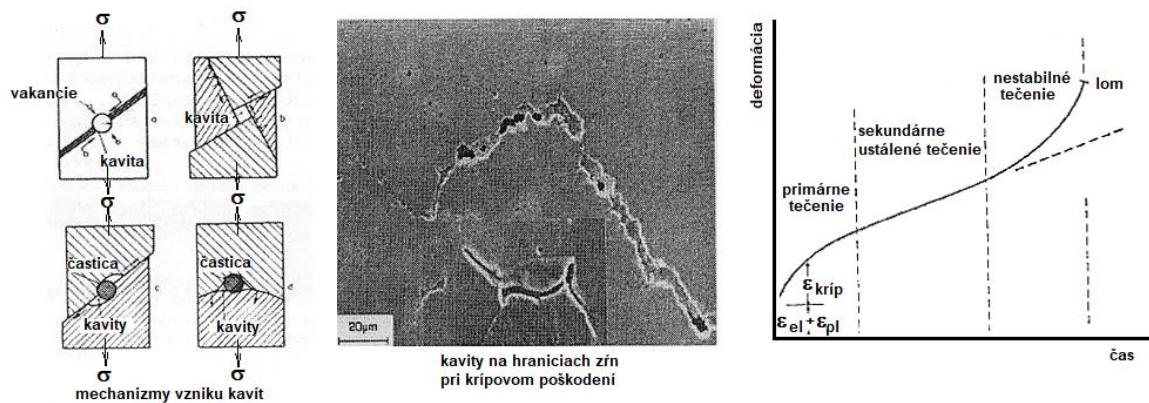


Obr.8.17 Únavový lom hriadeľa poloosi vozidla - jedná sa o lom v oblasti vysokocyklovej únavy materiálu pri namáhaní ohybom za rotácie pri celoobvodovom vrubovom účinku osadenia hriadeľa pre valivé ložisko; časť A: únavová zóna lomu, časť B: oblasť dolomenia

8.4 Tečenie (creep)

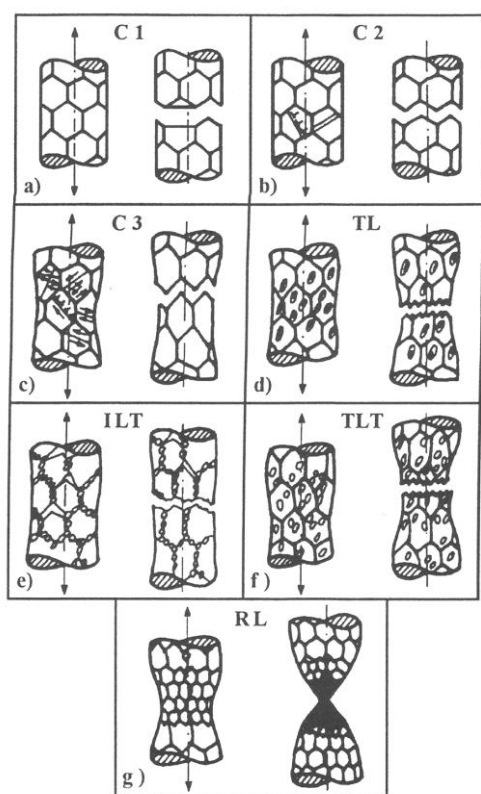
Tečenie (z angl. creep) je časovo závislá plastická deformácia materiálov, ktorá prebieha aj pod medzou klzu materiálov mechanicky zaťažených a súčasne pracujúcich pri zvýšenej teplote. Krípové lomy vznikajú pri $T > 0,3 \cdot T_{\text{tav}}$ a dlhodobom mechanickom zaťažení pod R_m , resp. aj pod R_e . Vznikajú vo forme pórov situovaných v blízkosti hraníc zŕn. Počet pórov s časom rastie, následne sa póry kombinujú do súvislej čiary a nakoniec vzniká lom, obr.8.18.

Krípové lomy vznikajú ako dôsledok tepelne aktivovaného pohybu atómov, vakancií, dislokácií v pevnej fáze. Podľa tvaru dutín môžeme usudzovať na podmienky pri ich vzniku. Pretiahle póry indikujú vysoké napätia alebo nízke teploty. Kaverny/kavity, teda okrúhle dutiny indikujú malé napätia, dlhé časy expozície a vysoké teploty.



Obr.8.18 Mechanizmy vzniku kavit pri tečení, skutočný tvar kavit pri krípovom poškodení, charakteristická krivka tečenia

Schému krípového poškodenia v rôznych napäťovo-teplotných podmienkach je na obr.8.19.



C1 – krehké štiepenie, bez pohybu dislokácií, bez výraznej kontrakcie telesa

C2 – trans- alebo interkryštalické tvárne štiepenie pri $T < 0,3 \cdot T_{tav}$, pohyb dislokácií v blízkosti štiepnej roviny, bez výraznej kontrakcie telesa

C3 – štiepenie sprevádzané výraznou plastickou deformáciou pri $T > 0,3 \cdot T_{tav}$, zaznamenaná menšia kontrakcia telesa

TL – tvárny lom vzniknutý dutinovým mechanizmom, výrazná kontrakcia telesa
ILT – interkryštalický lom pri tečení, pri $T > 0,3 \cdot T_{tav}$, vznik a spájanie dutín po hraniciach zrn, rast trhlín po hraniciach zrn, malá kontrakcia telesa

TLT - transkryštalický lom pri tečení, pri $T > 0,3 \cdot T_{tav}$, vznik a spájanie dutín vnútri zrn, prepájanie dutín do konečnej lomovej plochy, relatívne veľká kontrakcia telesa

RL – lom sprevádzaný rekryštalizáciou, pri $T > 0,8 \cdot T_{tav}$ nastáva plastická deformácia so súčasným spevnením, vďaka vysokej teplote súčasne prebieha rekryštalizácia - obnovenie plasticity materiálu, ktorý je schopný dosiahnuť v okamihu lomu kontrakciu takmer 100%

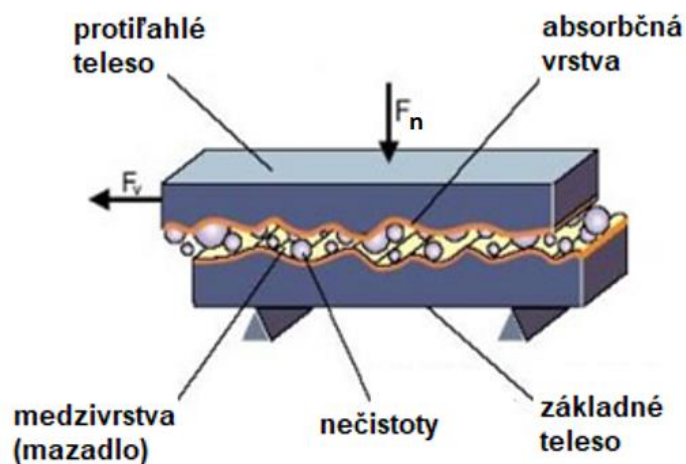
Obr.8.19 Schéma krípového poškodenia v rôznych napäťovo-teplotných podmienkach

8.5 Opotrebenie

Opotrebenie je nežiadúca zmena povrchu alebo rozmerov tuhých telies spôsobená buď vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré opotrebenie vyvoláva. Prejavuje sa odstraňovaním alebo premiestňovaním častíc hmoty z funkčného povrchu mechanickými účinkami (niekedy sprevádzanými i inými vplyvmi, napr. chemickými, elektrochemickými).

Základný **tribologický systém** je tvorený nasledujúcimi členmi, obr.8.20:

- **základné a protiľahlé teleso** - charakterizované mechanickými (tvrdosť, pevnosť), tepelnými (teplotná rozťažnosť) a chemickými (pH, afinita ku kyslíku) vlastnosťami a drsnosťou kontaktných plôch
- **medzivrstva**, s rôznymi nečistotami viazanými s povrchom telies určitým typom chemickej väzby (absorpčná vrstva)
- normálová (F_n) a posuvná (F_v) **sila** ako podmienky pre relatívny pohyb telies v kontakte, pričom je dôležitý druh (kĺzanie, odvaľovanie, narážanie, prúdenie) a typ (plynulý, prerušovaný, oscilačný a i.) tohto pohybu.
- obklopujúce **médium**, charakterizované určitou teplotou, agresivitou a pohybom, ktoré pôsobí na vonkajšie plochy telies, a ovplyvňuje aj vlastnosti kontaktných povrchov.



Obr.8.20 Tribologický systém

Faktory vplyvajúce na tribologický systém:

Vstupné:

- základné vlastnosti trecích telies,
- medzilatka (prostredie),
- podmienky zaťažovania (veľkosť, rýchlosť, teplota).

Vnútorané:

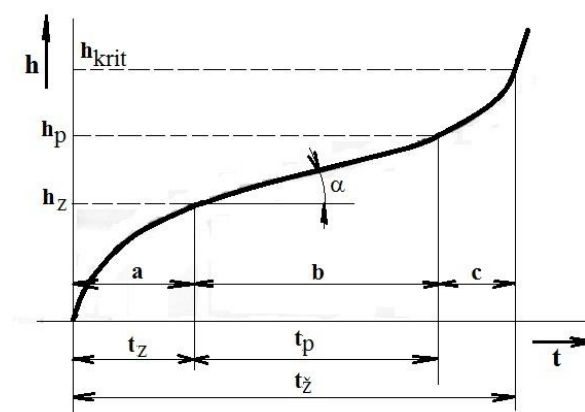
- drsnosť a stav povrchu,
- vlastnosti mazacej vrstvy,
- vznik a prestup tepla,
- štruktúra podpovrchových vrstiev,
- mechanické vlastnosti telies,
- pohyb a sústreďovanie dislokácií.

Výstupné:

- trecia sila a trecí moment,
- intenzita opotrebenia.

Časový priebeh opotrebenia:

Na jeho základe je možné modelovať procesy, hodnotiť výsledky, spoľahlivosť, predpovedať priebeh opotrebenia súčiastky, stroja. Priebeh opotrebenia je možné rozdeliť na 3 časové úseky, v ktorých sú rôzne rýchlosti opotrebenia, obr.8.21.



Obr.8.21 Krivka časového priebehu opotrebenia: a – záběh, b – prevádzka, c – dožívání; havarijná situácia, h – hodnota opotrebenia, t – doba opotrebenia

Dôležitou charakteristikou je **rýchlosť opotrebenia** v sa vyjadruje: $v = tg \alpha$.

Intenzita opotrebenia sa vyjadruje najčastejšie nasledovne:

1. hmotnostnými úbytkami (oterom)

- lineárny [m/m, m/s, m/otáčku],
- objemový [m³/s, m³/m, m³/otáčku]
- hmotnostný [kg/m, kg/s, kg/otáčku],

1. koeficientom opotrebenia – pre trecie dvojice,

2. pomernou veľkosťou opotrebenia skúmaného materiálu oproti veľkosti opotrebenia referenčného materiálu ($W = W_{mat}/W_{ref}$)

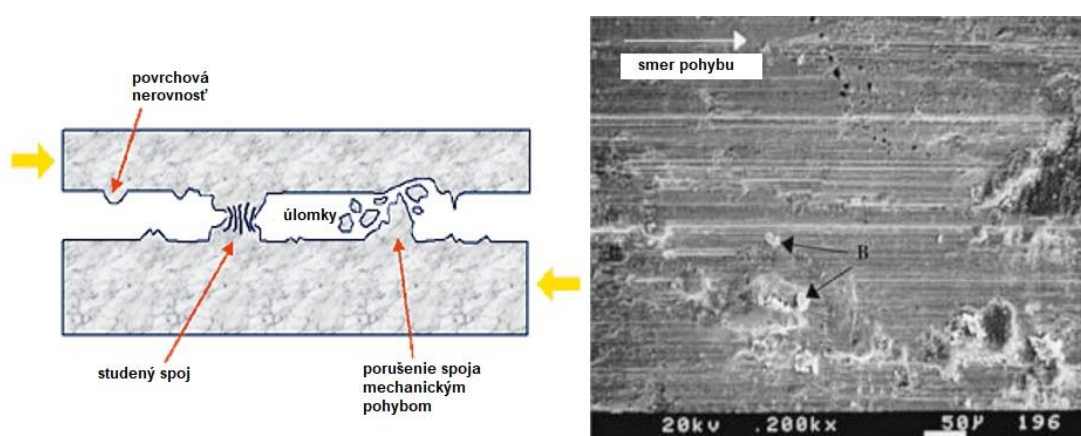
Najdôležitejšou časťou krivky je **doba prevádzky**, ktorá má byť čo najdlhšia s minimálnymi materiálovými úbytkami.

V prevádzkových podmienkach konkrétnych strojov a zariadení je možné súčasné pôsobenie viac druhov opotrebenia, alebo prechod od jedného druhu opotrebenia k inému. Opotrebenie vedie k postupnej strate požadovanej funkčnej spôsobilosti stroja či strojného zariadenia. V 80% prípadov primárnou príčinou vyradenia strojov a zariadení z prevádzky sú procesy opotrebenia.

Procesy opotrebenia môžeme rozdeliť na 6 základných druhov: adhezívne, abrazívne, erozívne, kavitačné, únavové a vibračné.

a) Adhézne opotrebenie

Adhézne opotrebenie povrchu materiálov vzniká dôsledkom periodického vzniku a zániku mikrospojov (mikrozvarov) medzi dvoma materiálmi pri ich vzájomnom relatívnom pohybe. Mikrozvary vznikajú v dôsledku vzájomného normálového silového pôsobenia dvoch povrchov, ktoré sa reálne stýkajú na oveľa menšej ploche ako je ich menovitá styčná plocha. Tým pádom je napätie na jednotlivých dotýkajúcich sa výstupkoch vysoké, materiály sa k sebe priblížia na mediatómovú vzdialenosť a dôjde k vzniku väzieb medzi nimi na podobnom princípe, ako pri spájaní materiálov trecím zvaráním. Keďže dotýkajúce sa materiály sú aj vo vzájomnom relatívnom pohybe, vzniknuté mikrospoje sa porušujú, zvyčajne nie v mieste zvaru, ale tesne pod zvarom, teda v jednom z materiálov. Tým dôjde k „odtrhnutiu“ malého objemu materiálu z jedného povrchu a k jeho „privareniu“ na druhý povrch. Povrch poškodený adhéznym opotrebením bude preto charakteristický oblasťami so známkami vytrhávania častíc z povrchu, obr.8.22 a 8.23.



Obr.8.22 Schéma princípu adhézneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného adhéznym opotrebením (vpravo)

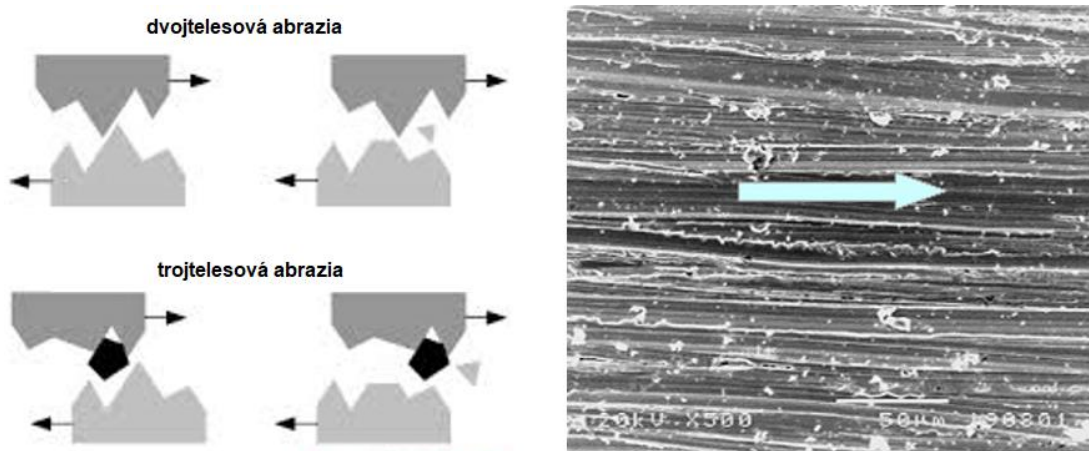


Obr.8.23 Príklad adhezívne opotrebenej súčiastky – klzné ložiská

b) Abrázívne opotrebenie

Abrázívne poškodenie povrchu materiálov je dôsledkom vzájomného relatívneho pohybu dvoch materiálov, pričom dochádza k ryhovaniu mäkkšieho materiálu tvrdším (dvojtelesová abrazia), alebo k ryhovaniu materiálov voľnými abrazívnymi časticami, nachádzajúcimi sa medzi nimi (trojtelesová abrazia).

Povrch poškodený abrazívnym opotrebením bude preto charakteristický súvislými ryhami väčšej dĺžky prítomnými na povrchoch materiálov, obr.8.24 a 8.25.



Obr.8.24 Schéma princípu abrazívneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného abrazívnym opotrebením (vpravo)

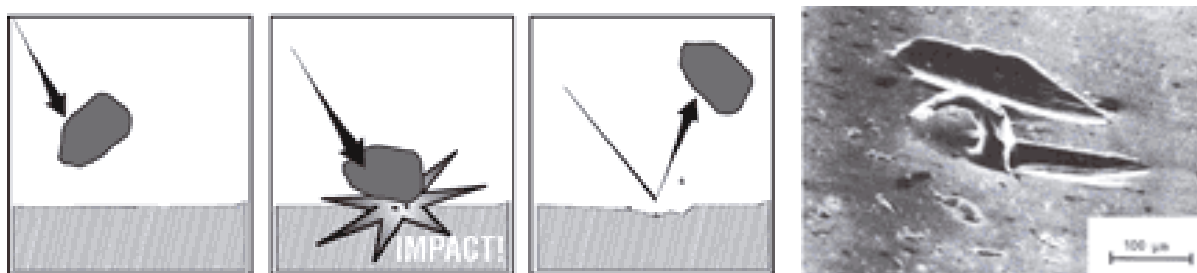


Obr.8.25 Príklad abrazívne opotrebenej súčiastky – piest spaľovacieho motora

c) Erozívne opotrebenie

Poškodenie povrchu materiálov eróziou vzniká v dôsledku kontaktu povrchu materiálu s pohybujúcimi sa časticami, nesenými určitým médium (plynným – erózia trysiek, ventilátorov, kvapalným – erózia potrubí, čerpadiel pri hydraulikej preprave rudy, uhlia), alebo samotným prúdiacim médium (funkčné povrchy armatúr, erózia kozmických lodí pri prechode atmosférou). Kontakt povrchu a častice je časovo obmedzený, nakoľko dochádza k dopadu častice, klzaniu častice po povrchu a jej odrazením a vzdialením od povrchu.

Povrch poškodený erozívnym opotrebením bude preto charakteristický krátkymi ryhami, ktorých dĺžka zodpovedá času kontaktu médium nesenej častice od momentu dopadu, po jej odrazenie z povrchu, obr.8.26 a 8.27.



Obr.8.26 Schéma princípu erozívneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného erozívnym opotrebením (vpravo)

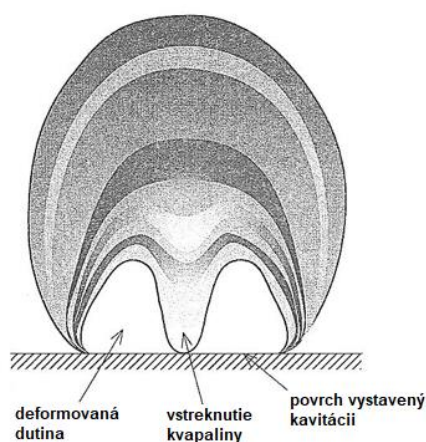


Obr.8.27 Príklad erozívne opotrebennej súčiastky – guľový ventil

d) Kavitačné opotrebenie

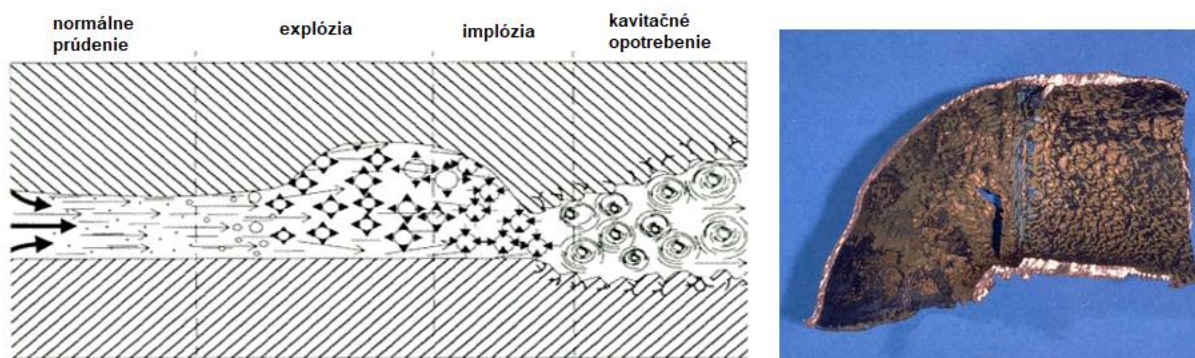
Poškodenie povrchu materiálov kavitáciou vzniká v dôsledku opakovaného vzniku (explózie) a zániku (implózie) kavít – bublín, ktoré sa objavujú v prúdiacej kvapaline v dôsledku náhlej zmeny podmienok prúdenia. Kvapalinu považujeme z fyzikálneho hľadiska za nestlačiteľnú. Prudký lokálny pokles tlaku spôsobí odčerpanie mikroobjemu kvapaliny z určitého miesta – vzniká na krátky čas vákuová bublina. V dôsledku dynamického podtlaku začnú do nej difundovať pary okolitej kvapaliny. Zánik podtlaku spôsobí zánik (kolaps) bubliny (obr.8.28) – kvapalina prudko vyplní prázdny priestor, pričom vznikne rázová vlna. Kolaps bubliny trvá 2-3 µs, rýchlosť vstreknutej kvapaliny pri kolapse je 500 m.s^{-1} a tlak pri kolapse okolo 1,4 GPa. Ak sa v okolí kolabujúcej bubliny nachádza pevný materiál (stena rúrky, lopatka

turbíny a pod.), má to naň deštruktívny účinok. Dochádza k opakovanej plastickej deformácii povrchovej vrstvy materiálu, postupnému vyčerpaniu jeho plasticity (únava) a následne vytrhávaniu mikročastočiek materiálu.



Obr.8.28 Kolaps bubliny v blízkosti pevného povrchu pri kavitačnom poškodení

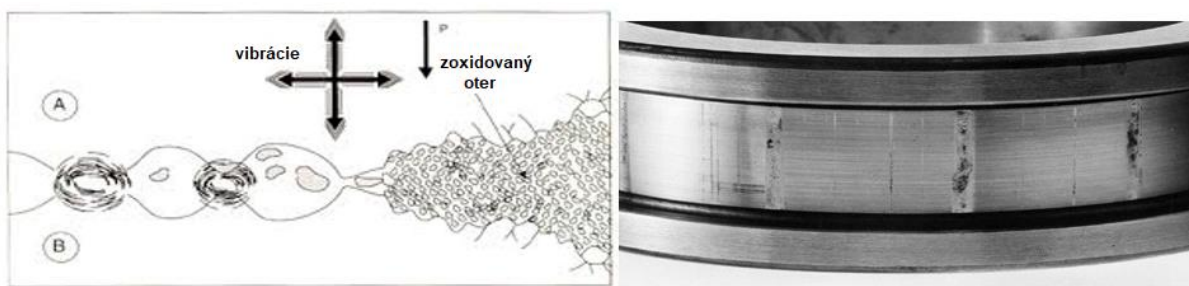
Kavitácia vytvára hluk, nestabilitu chodu, zvyšuje drsnosť povrchu a tým znižuje účinnosť zariadení. Kavitačne opotrebený povrch má charakteristický „hubovitý“ vzhľad, obr.8.29.



Obr.8.29 Schéma princípu kavitačného opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného kavitačným opotrebením (vpravo)

e) Vibračné opotrebenie

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním povrchu vzájomnými oscilujúcimi tangenciálnymi posunmi stykových povrchov telies pri pôsobení normálového zaťaženia, obr.8.30. Voľné častice, ktoré vznikajú v priebehu opotrebenia sa oxidujú vzdušným kyslíkom, hromadia sa medzi stykovými plochami a poškadzujú povrch abrazívne. Vyskytuje sa u súčiastok s hybným uložením (valivé ložiská, čapy, hriadele), ale aj u zdanlivo nepohyblivých súčastí (lisované spoje, nity, skrutky), obr.8.31.



Obr.8.30 Schéma princípu vibračného opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného vibračným opotrebením (vpravo)



Obr.8.31 Príklad vibračne opotrebenej súčiastky – krúžok valivého ložiska

f) Iné druhy poškodenia

Lom pri preťažení rázom

Napätia a deformácie, ktoré vznikajú pri vysokej rýchlosti pôsobenia zaťaženia sú podstatne vyššie, ako keď zaťaženie rastie pomaly, napr. prechod vozidla po moste, buchar, horenie v spaľovacom motore a pod. Pri rázovom preťažení dochádza k miestnej pružnej deformácii, následne k vzniku únavovej trhliny, pospájaním trhlín pod povrchom dôjde k vydrobovaniu materiálu.

Poškodenie tepelno-deformačným šokom

Lom je výsledkom superpozície napäťových vln od mechanického nárazu a tepelných napätí, ktoré vyvoláva tepelný gradient v telese, ktoré majú vysokú hodnotu, ale pôsobia krátky čas.

Zbrzdený lom

Patrí do skupiny krehkých lomov. Vzniká, ak je materiál vystavený istý čas nepremennému zaťaženiu, ktoré je nižšie ako R_m a často aj menšie ako R_e . Vznik lomu sa skladá z času inkubácie, po uplynutí ktorého sa začne šíriť trhlina. Vyskytujú sa u vysokopevný ocelí a tiež v zliatinách titánu pri viacosovej napätosti.

Predčasný lom

Ide o krehké porušenie pri dosiahnutí maximálneho zaťaženia. Po porušení je ťažnosť a kontrakcia blízka nule. Vzniká u vysokopevných ocelí v čerstvo zakalenom alebo nízko popustenom stave, alebo ak je v oceli vložkovitosť. Lomová plocha je heterogénna.

Poškodenie vodíkom

Vodíkové skrehnutie

Je účinok atomárneho vodíka na oceľ pri normálnej teplote (do cca 200°C). Principiálne ide o difúziu atomárneho vodíka do ocele s následným vznikom molekulárneho vodíka v defekte, ktorý vplyvom vnútorných napätí vedie k porušeniu materiálu.

Postup vzniku vodíkovej krehkosti, obr.8.32:

- disociácia molekúl H_2 na atómy H koróznou depolarizačnou reakciou
- difúzia atómov H do ocele
- usadenie atómov H v nepravidelnostiach štruktúry
- rekombinácia atómov H do molekúl H_2 (plyn)
- molekuly H_2 nemôžu kvôli svojej veľkosti späťne difundovať von z materiálu
- hromadenie molekúl H_2 v materiáli
- s rastúcou teplotou materiálu rastie tlak H_2
- dochádza k vzniku priehybov, popraskaniu



Obr.8.32 Schéma vzniku vodíkovej krehkosti

Nebezpečenstvo vodíkoveho skrehnutia spočíva v tom, že na povrchu materiálu nevidieť žiadne varovné zmeny. Dochádza k nemu najmä pri sporadickom odstavení a ochladení zariadení pracujúcich pri zvýšených teplotách, nakoľko s klesajúcou teplotou klesá rozpustnosť vodíka v oceli a uvoľňuje sa plynný vodík.

Krehnutie ocele pri nízkych teplotách

V princípe sa podobá vodíkovej krehkosti – ide o vznik molekulárneho vodíka v trhlne, ale rozdiel je v tom, že vodík je v oceli už prítomný, rozpustený v oceli už z výroby.

Postup vzniku krehnutia ocele pri nízkych teplotách:

- oceľ obsahuje z výroby menšie množstvo rozpusteného vodíka
- pri poklese teploty dochádza k uvoľneniu plynného vodíka v dôsledku klesajúcej teploty
- nárast tlaku v materiáli
- popraskanie materiálu

Príkladom tohto procesu je praskanie koľajníc.

Vodíková korózia

– vyskytuje sa u častí chemických zariadení, ktoré pracujú v prítomnosti vodíka pri vysokých teplotách. H reaguje s C v oceli za vzniku CH₄ (metán). Metán difunduje do materiálu, hromadí sa na hraniciach zŕn, tlak vyvolá napätie a vznik trhlín.

Oduhličenie ocele vodíkom pri vysokých teplotách

Ide o rozklad cementitu Fe₃C vodíkom H₂ za vzniku metánu CH₄ podľa rovnice:



Rozklad cementitu prebieha pri vysokých teplotách (nad 550°C) nasledujúcim postupom:

- rozklad Fe₃C → vznik metánu
- metán nemôže vydifundovať z materiálu von
- metán sa hromadí v dutinách vznikajúcich rozpadom cementitu, ktorý je súčasťou perlitu
- tlak metánu pri zvýšených teplotách rastie
- vznikajú pľuzgiere a trhliny

Nebezpečenstvo oduhličenia ocele vodíkom spočíva vtom, že na povrchu nie sú viditeľné žiadne zmeny. Riešením je použitie špeciálnych legovaných ocelí, ktoré nie sú náchylné na oduhličenie.

Poškodenie tekutým kovom

Je to interkryštalické porušenie v dôsledku objemového skrehnutia materiálu pri styku s roztaveným kovom. Spája sa s malou rozpustnosťou prvkov tekutého kovu v tuhom materiáli a s tvorbou intermetalických fáz. Tekutý kov má slabšiu zmäčavosť a atómy z neho difúziou prechádzajú do oblastí hraníc zŕn.

Poškodenie v okolí zvarov

Zváranie predstavuje významné tepelné a deformačné ovplyvnenie zvarového kovu i okolia zvaru, čo spôsobuje špecifické poškodenie – praskanie.

- **Lamelárne praskanie** - vzniká u jednosmerne valcovaných plechov v smere hrúbky, iniciuje sa na sulfidoch MnS, ktoré sú po valcovaní predĺžené v jednom smere. Riešením tohto poškodenia je zníženie obsahu S v oceli.
- **Horúce praskanie** – vzniká v zvarovom kove alebo v podhúsenicovej TOO pri vysokých teplotách
- **Žihacie praskanie** – vzniká v priebehu tepelného spracovania zvarového spoja (žihanie na zníženie vnútorných napätí)

Poškodenie radiačné

Energia žiarenia môže meniť stav a rozloženie atómov v kove, čím sa zmenia ich fyzikálne, chemické a mechanické vlastnosti. Interakcia žiarenia s elektrónmi látky vedie k ich vybudeniu do vyšších energetických hladín, alebo k ich oddeleniu – ionizácii materiálu. Veľmi vplýva na vlastnosti plastov, kovy sú na žiarenie menej citlivé.

Postup pri radiačnom poškodení:

- Interakcia žiarenia s jadrom atómov látky - zvýšenie energie kmitov mriežky, presun iónu z uzlovej do medziuzlovej polohy
- Bombardujúca častica sa zachytí v atóme, čo vedie k rozštiepeniu alebo transmutácii atómu
- dôsledkom ožiarenia môže byť: vznik bodových porúch, lokálne tepelné ovplyvnenie, pokles húževnatosti ocelí, zvýšenie elektrického odporu, zvýšenie tvrdosti, zníženie odolnosti voči korózii

Poškodenie napučaním

Je jeden z dôsledkov ožiarenia materiálu. Po ožiarení sa zvyšuje počet vakancií a nastáva ich zhromažďovanie, čo vedie k zmene rozmerov telesa. Atómy sa pri ožiarení protónmi môžu vzdialiť až na 10 atómových vzdialeností - napučanie.

Poškodenie energetickými poľami

Je dôsledkom interakcie s laserovým, elektrónovým alebo iónovým lúčom. Dôsledkom pôsobenia lasera môže byť spevnenie povrchu rázovými vlnami, glazúrovanie, obrušovanie, zváranie.

Poškodenie vytrhnutím

Pri lokálnom rázovom zaťažení jedného povrchu dosky môžeme pozorovať vytrhnutie materiálu z druhej strany dosky.

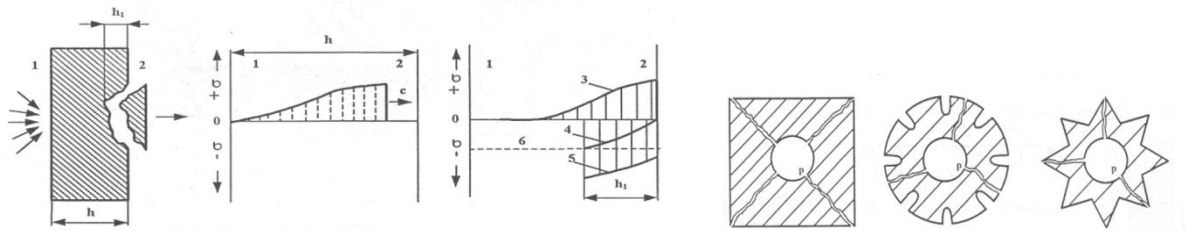
Postup poškodenia vytrhnutím:

- Tlaková vlna prechádza cez dosku. Čelo vlny stlačenia dosiahne voľný (opačný) povrch dosky, odráža sa v tvare vlny roztiahnutia.

- Obe vlny interagujú. V určitej hĺbke pod povrchom je výsledné ťahové napätie vyššie ako kritické lomové napätie – dôjde k vytrhnutiu materiálu.

Priemer vytrhnutého kusu materiálu je doj- až trojnásobok hrúbky dosky, hrúbka vytrhnutého kusa je (0,1-0,5) x hrúbka dosky.

U tvarových súčiastok môže dôjsť paradoxne k prasknutiu stien s najväčšou hrúbkou, pretože miestne ťahové napätia sú dôsledkom interakcie dvoch vln roztiahnutia, ktoré sú odrazené od dvoch vzájomne naklonených povrchov telesa, obr.8.33.



Obr.8.33 Princíp poškodenia materiálu vytrhnutím, príklad poškodených profilov

Prevenencia dosiahnutia medzného stavu

Fraktografia sa zaoberá štúdiom lomov, stanovením príčiny ich vzniku s cieľom identifikácie a realizácie preventívnych opatrení. Prevencia pred vznikom lomov zahŕňa:

- štúdium materiálu a jeho reakcie na rôzne konštrukčné prvky a technologické postupy
- výber vhodného materiálu
- zdokonaľovanie konštrukčných riešení a postupov určovania namáhania v jednotlivých miestach konštrukcie
- dodržiavanie technologických postupov výroby
- správna montáž a prevádzka
- údržba a kontrola zariadenia alebo konštrukcie
- skúšky výrobkov priamo u výrobcu, defektoskopia.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. D. Jankura, a kol.: Materiály v strojárkej výrobe a technológie ich finalizácie. 1. vyd. Košice : TU - 2011. - [378] s. ISBN 978-80-553-0786-2.
2. M. Martinkovič, M. Hudáková, R. Romančík: Náuka o materiáloch II. – Návodý na cvičenia. MTF Trnava, STU Bratislava, 2001, 107-114, ISBN 80-227-1599-9.
3. J. Michel, J. Hidvéghy, M. Buršák.: Náuka o materiáli – Návodý na cvičenia. Hutnícka fakulta, TU v Košiciach, 2000, 50-54, ISBN 80-7099-529-7.
4. M. Mihaliková, J. Hidvéghy, R. Mišičko.: Náuka o materiáli – Návodý na cvičenia. Hutnícka fakulta, TU v Košiciach, 2004, 55-61, ISBN 80-8073-158-6.
5. Z. Iždinská, Š. Emmer, E. Gondár.: Strojárske materiály. Strojnícka fakulta, STU Bratislava, 2006, 25-33, ISBN 80-227-2488-2.
6. Z. Gábrišová, A. Brusilová.: Tepelné spracovanie – Návodý na cvičenia. Strojnícka fakulta, STU Bratislava, Spektrum STU, 2019, 136 s. ISBN 978-80-227-4894-0.
7. M. Mihaliková, M. Buršák, R. Mišičko: Náuka o materiáli – Návodý na cvičenia. Hutnícka fakulta, TU v Košiciach, 2004, 55-61, ISBN 80-8073-158-6.
8. L. Zhang, Y. Gu, Y. Xiang: Energy of low angle grain boundaries based on continuum dislocation structure. Hong Kong, Acta Mater., No. 126, 2017, 21p.
9. D. R. Askeland, P. P. Fulay, W. J. Wright: The Science and Engineering of Materials. Cengage Learning, 2010.
10. W. D. Call, D. G. Rethwisch: Materials Science and Engineering. Wiley, 2010.
11. R. E. Hummel: Understanding Materials Science. Springer-Verlag, 2004.
12. V. Zábavník, M. Buršák: Materiál, Tepelné spracovanie, Kontrola kvality. Technická univerzita v Košiciach, HF, 2004, ISBN 80-8073-159-4.
13. V. Zábavník, M. Buršák: Zošľachťovanie a kontrola kvality materiálov. TU Košice, 2004, ISBN 80-8073-071-7.
14. V. Zábavník: Tepelné spracovanie kovov. VŠT Košice, 1975.
15. V. Zábavník, M. Buršák: Materiál, tepelné spracovanie, kontrola kvality 1. dopl. vyd., TU Košice, 2009. ISBN 978-80-553-0139-6.
16. J. F. Shackelford: Introduction to Materials Science for Engineers. Pearson, 2015.
17. R. E. Smallman, A. H. W. Ngan: Physical Metallurgy and Advanced Materials. Elsevier, 2007.
18. A. Paul, T. Laurila, V. Vuorinen, S. V. Divinski: Thermodynamics, Diffusion and the Kirkendall Effect in Solids. Springer, 2014.
19. R. Abbaschian, L. Abbaschian, R. E. Reed-Hill: Physical Metallurgy Principles. Cengage Learning, 2009.

20. A. Puškár, J. Michel, V. Pulc: Náuka o materiáli I. Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita, 1998, 285 s. ISBN 80-7100-475-8.
21. O. Híreš: Fyzikálna metalurgia ocelí a ich tepelné spracovanie. Fakulta špeciálnej techniky. Trenčianska univerzita A. Dubčeka v Trenčíne, Trenčín, ISBN 80-8075-099-8.
22. L. Ptáček a kol.: Náuka o materiálu I. Cerm s.r.o. 2003, 520 s., ISBN 80-7204-283-1.
23. M. Vocel: Tření a opotřebení strojních součástí. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1976. 374 s.
24. P. Skočovský, A. Vaško: Materiály a technológie. Žilinská univerzita v Žiline, 2004, ISBN 80-7100-831-1.
25. P. Skočovský: Nové konštrukčné materiály, Vybrané kapitoly. Žilinská univerzita, 1995, ISBN 80-7100-264-X.
26. J. Kocich, S. Tuleja: Korózia a ochrana kovov, HF TU Košice, 1998.
27. K. Takáč, I. Krátky: Strojárske materiály a povrchové úpravy. Bratislava, Alfa 1983. 310 s. ISBN 63-721-83.
28. M. Mohyla: Technologie povrchových úprav kovů. Ostrava, VŠV-TU Ostrava, 1995.
29. V. Kriebich: Strojírenské materiály a povrchové úpravy. ČVUT Praha, 1987, 80 s.
30. I. Hrivňák: Úžitkové vlastnosti a voľba materiálu. STU Bratislava, 1999, 186 s.
31. Introduction to Materials Science and Engineering Chapter 4. Defects in Solids. <http://bp.snu.ac.kr> (dostupné 10.11.2020)
32. Jerz, Z. Iždinská, M. Sládková.: Lekcia 1, Kovy. http://www.matnet.sav.sk/data/long_files/umms/schmauder_lekcia1.pps (dostupné 10.11.2020)
33. Minkoff.: Materials Processes, Springer-Verlag, 1992, 135 p. ISBN-13: 978-3-642-95564-8.
34. R. Yin: Metallurgical Process Engineering, Metallurgical Industry Press, Beijing, 2009, 355 p. ISBN 978-7-5024-4956-8.
35. H. Berns, W. Theisen: Ferrous Materials, Steel and Cast Iron. Springer – Verlag, Deutschland, 2008, 442 p. ISBN 978-3-540-71847-5.
36. Z. Iždinská, P. Sejč, P. Švec: Náuka o materiáli II, Návod na cvičenia. STU v Bratislave, 1998, ISBN 80-227-1050-4.
37. D. Jankura, J. Brezinová, D. Draganovská: Technické materiály. - 1. vyd - Košice : TU, SJF, 2008. 221 s. ISBN 978-80-8073-959-1.
38. E. Spišák, J. Brezinová, A. Guzanová, D. Draganovská: Materiály v konštrukcii automobilov.- 1. vyd. - Košice : TU 2015. 103 s. ISBN 978-80-553-2169-1.
39. A. Guzanová, D. Draganovská: Štruktúra a vlastnosti materiálov, Návod na cvičenia. - 1. vyd. - Košice : TU 2015. 93 s. ISBN 978-80-553-2402-9.
40. M. De Graef, M. Mchenry: Structure of Materials. Cambridge University Press, 2012, 739 p., ISBN 978-1-107-00587-7.

41. F. M. Ashby, et al.: Engineering Materials and Processes Desk Reference. Elsevier. 2009. 534 p. ISBN 978-1-85-617586-9.
42. T. Fischer: Materials Science for Engineering Students. Elsevier. 2009. 500 p. ISBN-13: 978-0123735874.
43. CH. M. Gilmore: Materials Science and Engineering Properties. Cengage Learning. 2014. 726 p. ISBN 13-978-1-111-98860-9.
44. M. P. Groover: Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems John Wiley & Sons, Inc. 2010. 1025 p. ISBN 978-0470-467002.
45. D. Guo, et al.: Advances in Materials Manufacturing Science and Technology XIII, Volume II, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2009. 754 p. ISSN 1662-9760.
46. F. M. Ashby, R. H. J. David: Engineering Materials 2, An Introduction to Microstructures, Processing and Design, Elsevier, UK. 2006. 457 p. ISBN-13: 978-0-7506-6381-6.
47. G. E. Totten: Steel Heat Treatment Handbook, Second Edition, Metallurgy and Technologies, Taylor & Francis Group, LLC., CRC Press, USA, 2006. 832 p. ISBN 13: 978-0-08455-4.
48. <https://www.indiamart.com/proddetail/bell-type-annealing-furnace-21936046591.html> (dostupné 15.11.2020).
49. <http://www.ceia-power.com/product.aspx?a=Power%20Cube%20SA/400%20Series&lan=eng>, (dostupné 16.11.2020).
50. <http://www.raysteeltube.com/Decarburization-of-steel-tube-heat-treatment-surface-and-preventive-measures-id6746046.html> (dostupné 10.11.2020).
51. <https://www.ibeda.com/en/autogenous-engineering/methods-and-characteristics/heating-burners-for-flame-hardening> (dostupné 10.11.2020).
52. <https://www.metalsengineering.net/metals-engineering-offers-high-quality-induction-hardening/> (dostupné 12.11.2020).
53. <https://www.laserschneiden-marktplatz.de/lasertec-3d-bearbeitung> (dostupné 12.11.2020).
54. <https://docplayer.net/63546698-Hot-stamping-of-ultra-high-strength-steels.html> (dostupné 12.11.2020).
55. M. Hluchý, O. Modráček, R. Paňák: Strojírenská technologie 1.2. díl, Metalografie a tepelné zpracování, 3.vyd., Praha, Scientia, 2002, ISBN 80-7183-265-0.
56. J. Križan, Ľ. Čaplovič, P. Grgáč: Špeciálna technológia I. Progresívne metódy tepelného spracovania. Skriptum. ES SVŠT, Bratislava, 1986.
57. Chemicko – tepelné spracovanie materiálov. [online] [cit. 2011-06-25] Dostupné na internete: <http://www.htsbb.eu/de/chemicko-tepelne-spracovanie.pdf>.
58. Náuka o materiáloch I. [online] [cit. 2011-07-05] Dostupné na internete: www.scribd.com/doc/46201870/9/ZAKLADY-TEORIE-FAZOV%C3%9DCH-PREMIEN-PRI-TEPELNOM-SPRACOVANI.

59. J. Križan, Ľ. Čaplovič, P. Grgač: Špeciálna technológia II. Mechanizácia a automatizácia procesov tepelného spracovania. Skriptum. ES SVŠT, Bratislava, 1986.
60. I. Zetek, L. Česáková, J. Sklenička: Obrábění laserem kaleného povrchu. Transfer inovací, 20, 2011, TU v Košiciach, s. 36 - 40.
61. M. Smóling: Tepelné a chemicko-tepelné spracovanie v príkladoch. Alfa, Bratislava, 1988.
62. STN EN ISO 4885 - Názvoslovie tepelného spracovania zliatin železa, 2017.
63. P. Veles: Mechanické vlastnosti a skúšanie materiálov. 2. vydanie Bratislava, ALFA 1989, 401 s. ISBN 063 – 552 – 89.
64. P. Skočovský, O. Bokůvka, R. Konečná, E. Tillová: Náuka o materiáli pre odbory strojnícke. ŽU, Žilina 2001, 265 s. ISBN 80 – 7 100 - 831 – 1.
65. <http://qsa.international/services.php?id=24> - boroskop (dostupné 15.11.2020).
66. <https://www.kvark.rs/catalog/equipment-in-the-field-of-industry/ndt-non-destructive-testing/gamma-radiography/> - gama žiarič (dostupné 16.11.2020).
67. <https://www.indiamart.com/proddetail/magnetic-particle-inspection-services-10501148048.html> - magnetická skúška (dostupné 16.11.2020).
68. <http://www.rentgen.cz> (dostupné 10.4.2004).
69. M. Ulrich, R. Koleňák, S. Karvanská: Skúšanie zvarových spojov, STU v Bratislave, 2006, 256 s. - ISBN 80-227-2461-0.
70. Nedeštruktívna kontrola zváraných spojov. Zborník z konferencie Welding 88 Bratislava, DT VTS, 1988.
71. STN EN ISO 6520-1 Zváranie a príbuzné procesy. Zatriedenie chýb zvarových spojov kovových materiálov. Časť 1: Tavné zváranie (ISO 6520-1: 2007).
72. EN ISO 3452-1:2013 Non-destructive testing — Penetrant testing — Part 1: General principles.
73. STN EN ISO 23277: 2015 Nedeštruktívne skúšanie zvarov. Kapilárna skúška zvarov. Úrovně prípustnosti (ISO 23277: 2015).
74. J. Krautkramer: Ultrasonic testing of materials. Berlin, Springer Verlag 1977.
75. J. Obraz: Ultrazvuk v měřící technice. Praha: SNTL, 1984, 485 s. ISBN 80-901936-2-5.
76. D. Ermolov: Metódy ultrazvukovej defektoskopie. Moskva, Moskovskij institut, 1986.
77. <http://www.technotest.cz/www/0015.m.technotest.htm> (dostupné 10.4.2004).
78. EN ISO 9934-1 Non-destructive testing — Magnetic particle testing — Part 1: General principles.
79. STN EN ISO 17638 Nedeštruktívne skúšanie zvarov. Skúšanie magnetickou práškovou metódou (ISO 17638 : 2016).
80. STN EN ISO 23278 Nedeštruktívne skúšanie zvarov. Skúšanie magnetickou práškovou metódou. Úrovně přípustnosti (ISO 23278: 2015).

81. STN EN 25580:2002-09 Nedeštruktívne skúšanie. Priemyselné negatoskopy. Minimálne požiadavky (ISO 5580:1985).
82. STN EN ISO 19232-1 Nedeštruktívne skúšanie. Kvalita obrazu rádiogramov. Časť 1: Indikátory kvality obrazu (drôtový typ). Určovanie úrovne kvality obrazu (ISO 19232-1:2013).
83. STN EN ISO 19232-2 Nedeštruktívne skúšanie. Kvalita obrazu rádiogramov. Časť 2: Mierka kvality (typ stupeň/otvor). Stanovenie hodnoty kvality obrazu (ISO 19232-2: 2013).
84. Diffusion Mechanisms. In: Diffusion in Solids. Springer Series in Solid-State Sciences, vol 155. Springer, Berlin, Heidelberg. (2007) https://doi.org/10.1007/978-3-540-71488-0_6.
85. www.tec-science.com.
86. D.R Askeland, F. Haddleton, P. Green, H. Robertson: The Science and Engineering of Materials. Springer, 1996.
87. K. von Goldbeck: IRON—Binary Phase Diagrams. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982.
88. R. Haynes: Optical Microscopy of Materials. Springer-Verlag New York Inc., 2013.
89. W. Wendelin: Science and Engineering of Materials. Cengage learning, 2015.
90. H. Bhadeshia, R. Honeycombe: Steels - Microstructure and Properties, 4th Edition, Butterworth-Heinemann, 2017.
91. ISO 643: Steels — micrographic determination of the apparent grain size.
92. A. Bhaduri: Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys. Springer, 2018.
93. D. Belyakov: Microstructure and Mechanical Properties of Structural Metals and Alloys. MDPI, 2019.
94. A. Benvenuto: Metals and Alloys, Industrial Applications. De Gruyter, 2016.
95. A. Schweitzer: Metallic Materials: Physical, Mechanical, and Corrosion Properties. CRC Press, 2003.
96. C. Beddoes, M.J. Bibby: Principles of Metal Manufacturing Processes. Science Direct, 1999.
97. D. E. Laughlin, K. Hono: Physical Metallurgy. Science Direct, 2015.
98. H. Ullmaier: Atomic Defects in Metals. Springer, 1991.

prof. Ing. Janette Brezinová, PhD.
prof. Ing. Ján Viňáš, PhD.
doc. Ing. Dagmar Draganovská, PhD.
doc. Ing. Anna Guzanová, PhD.

ZÁKLADY MATERIÁLOVÉHO INŽINIERSTVA

Vydanie:	prvé
Počet strán:	289
Počet obrázkov:	260
Počet tabuliek:	40
Náklad:	100
Vydal:	Technická univerzita v Košiciach

ISBN: 978-80-553-3745-6