

Technická univerzita v Košiciach
Fakulta materiálov, metalurgie a recyklácie

LIATINY – vlastnosti, výroba, použitie

*doc. Ing. Peter Futáš, PhD. – prof. Ing. Alena Pribulová, CSc. –
prof. Ing. Marcela Pokusová, PhD. – Ing. Andrea Junáková, PhD.*

Košice, 2020

Táto publikácia vznikla vďaka projektu KEGA 027STU-4/2019 "Príprava akreditovaného študijného programu "Výrobné systémy a manažérstvo kvality" na EUR-ACE akreditované štúdium"

Autori: doc. Ing. Peter Futáš, PhD.
prof. Ing. Alena Pribulová, CSc.
prof. Ing. Marcela Pokusová, PhD.
Ing. Andrea Junáková, PhD.

Recenzenti: prof. Ing. Marián Murgaš, CSc.
prof. Ing. Vierošlav Molnár, PhD.

Za odbornú stránku učebného textu zodpovedajú autori.

ISBN 978-80-553-3644-2

OBSAH

PREDSLOV	9
ÚVOD	11
1. ROZDELENIE LIATIN A ICH VLASTNOSTI (MECHANICKÉ, FYZIKÁLNE A TECHNOLOGICKÉ)	13
1.1 Rozdelenie liatin	14
1.2 Charakteristika liatiny s lupienkovým grafitom (LLG)	20
1.2.1 Akostné kritéria LLG	23
1.3 Charakteristika liatiny s guľôčkovým grafitom (LGG)	27
1.4 Charakteristika temperovanej liatiny	32
1.5 Izotermicky kalená liatina s guľôčkovým grafitom – ADI	34
1.6 Charakteristika liatiny s červíkovitým grafitom (vermikulárna liatina)	39
1.7 Štruktúra liatin	41
1.7.1 Grafit	41
1.7.2 Ferit	45
1.7.3 Perlit	45
1.7.4 Austenit	47
1.7.5 Cementit	47
1.7.6 Ledeburit	47
1.7.7 Martenzit	48
1.7.8 Bainit (ausferit)	48
1.7.9 Ďalšie štruktúrne zložky	49
1.8 Fyzikálne vlastnosti liatin	50
1.9 Technologické vlastnosti	52
1.10 Vlastnosti liatin za zvýšených teplôt	54
2. KRYŠTALIZÁCIA A TVORBA ŠTRUKTÚRY LIATIN	53
2.1 Eutektická kryštalizácia liatin	61
2.2 Eutektoidná grafitizácia liatin	62
2.3 Stupeň grafitizácie liatin	62
2.4 Eutektická grafitizačná schopnosť liatiny (EGS)	63
2.5 Vplyv tvaru grafitu na mechanické vlastnosti liatin	64
2.6 Kovová matrica liatin	64
2.7 Objemové zmeny pri tuhnutí liatin	65

3. POSTUPY OVPLYVNENIA ŠTRUKTÚRY LIATIN	68
3.1 Vplyv chemického zloženia na priebeh eutektickej kryštalizácie	68
3.1.1 Vplyv prvkov na štruktúru a vlastnosti liatin	70
3.2 Vplyv rýchlosti ochladzovania (tuhnutia)	78
3.3 Vplyv metalurgie tavenia a úpravy tekutého kovu	79
3.3.1 Kvalita vsádzkových surovín	80
3.3.2 Metalurgia tavenia	80
3.3.3 Očkovanie liatin (LLG a LGG)	81
3.3.4 Modifikovanie liatin	82
4. TAVENIE LIATIN	83
4.1 Tavenie liatiny v kuplovej peci	84
4.1.1 Základné konštrukčné časti kuplovej pece	84
4.1.2 Režim prevádzky kuplovej pece	89
4.1.2.1 Kuplové pece s periodickou prevádzkou	89
4.1.2.2 Kuplové pece s kampaňovou prevádzkou	90
4.1.3 Spaľovací vzduch	91
4.1.4 Emisie	92
4.1.5 Metalurgia tavenia v kuplovej peci	93
4.1.6 Tavenie a prehrievanie liatiny	99
4.1.7 Metalurgické pochody v kuplovej peci	101
4.1.7.1 Nauhličenie liatiny v kuplovej peci	101
4.1.7.2 Prepal kremíka, mangánu a železa	103
4.1.7.3 Zmena obsahu fosforu	104
4.1.7.4 Zmena obsahu síry	104
4.1.7.5 Zmena obsahu sprievodných prvkov	106
4.1.8 Vznik a pôsobenie trosky	106
4.1.8.1 Bazicita trosiek	107
4.1.8.2 Vlastnosti trosiek	107
4.1.8.3 Výpočet troskotvorných prísad	108
4.1.9 Riadenie chodu kuplovej pece	109
4.1.9.1 Množstvo a tlak spaľovacieho vzduchu	109
4.1.9.2 Hmotnosť kovovej vsádzky a jej kvalita	111
4.1.10 Vsádzkové suroviny	111
4.1.10.1 Surové železo	112

4.1.10.2 Oceľový odpad	113
4.1.10.3 Vratný materiál	113
4.1.10.4 Zlomková liatina	114
4.1.10.5 Triesky	114
4.1.10.6 Legúry	114
4.1.11 Kusovitost' vsádzky	115
4.1.12 Palivo	115
4.1.13 Troskotvorné prísady	116
4.1.14 Druhovanie vsádzky	116
4.1.15 Optimalizácia zloženia vsádzky	117
4.1.16 Modernizácia tavenia v kuplovej peci	117
4.1.17 Duplexný postup výroby liatin	119
4.1.17.1 Metalurgické procesy pri duplexnom tavení	120
4.2 Tavenie liatiny v elektrických peciach	121
4.2.1 Základné typy elektrických pecí na tavenie liatiny	121
4.2.2 Postup – zásady tavenia v indukčnej peci a jej konštrukcia	123
4.2.3 Postup tavenia v kanáľkovej indukčnej peci a ich konštrukcia	124
4.2.4 Technológia a metalurgia tavenia liatiny v indukčnej peci	125
4.2.5 Tavenie liatiny v elektrickej oblúkovej peci	129
4.3 Zvyšovanie tepelnej účinnosti tavenia	130
4.4 Tavenie liatiny v rotačnej bubnovej peci	131
4.4.1 Technológia a metalurgia tavenia liatiny v rotačnej bubnovej peci	133
4.5 Odliedacie panve	134
 5. METALURGICKÉ SPRACOVANIE NATAVENEJ LIATINY	 137
5.1 Odsírenie liatin	137
5.2 Očkovanie liatin	138
5.2.1 Zloženie očkovadiel	141
5.2.2 Doznievanie očkovacieho účinku	142
5.2.3 Druhy očkovadiel	143
5.2.4 Spôsob očkovania	145
5.2.5 Kontrola očkovacieho účinku	148
5.2.6 Chyby odliatkov spojené s očkovaním	149
5.3 Metalurgia výroby LGG (modifikovanie)	150
5.3.1 Požiadavky na východiskovú taveninu na výrobu LGG	150
5.3.2 Modifikácia LGG	150
5.3.3 Metódy modifikácie	154

5.3.3.1 Metóda Sandwich	155
5.3.3.2 Metóda Tundish Cover	156
5.3.3.3 Metóda Flotret	157
5.3.3.4 Metóda In-mold	158
5.3.3.5 Modifikácia v konvertore +GF+	159
5.3.3.6 Modifikácia v autokláve	160
5.3.3.7 Modifikácia plneným profilom	161
5.4 Mimopecné legovanie liatin	162
5.5 Kontrola metalurgického spracovania liatin	163
 6. TEPELNÉ SPRACOVANIE ODLIATKOV Z GRAFITICKÝCH LIATIN	169
6.1 Žihanie na zníženie zvyškových pnutí	169
6.2 Žihanie na zníženie tvrdosti	170
6.3 Perlitizačné (normalizačné) žihanie	171
6.4 Zušľachťovanie (kalenie + popúšťanie)	171
 7. VPLYV KVALITY VSÁDZKY NA VLASTNOSTI LIATIN	173
7.1 Eliminácia negatívnych technologických vlastností u syntetickej liatiny	176
7.1.1 Vplyv vysokého podielu oceleového odpadu vo vsádzke na vlastnosti LLG	177
7.1.2 Mikrolegovanie titánom	178
 8. METALURGICKÉ CHYBY LIATINOVÝCH ODLIATKOV	184
8.1 Nevyhovujúce mechanické vlastnosti	184
8.2 Odchýlky hodnôt fyzikálnych vlastností	185
8.3 Nevyhovujúca homogenita odliatku	186
8.4 Výpotky	186
8.5 Bublíny	187
8.6 Zatvrdlina, zákalka	188
8.7 Nesprávny obsah štruktúrnych zložiek	190
8.8 Obrátená zákalka	190
 9. NUMERICKÉ SIMULÁCIE	192
9.1 Simulačné programy	192
9.2 Štruktúra simulačných programov	193
9.3 Vytvorenie geometrie v CAD systéme a hlavné kroky výpočtov	194
9.4 Matematické modely v simulačných programoch	195

9.4.1 Metóda konečných diferencií – FDM	196
9.4.2 Metóda – CVM	196
9.4.3 Metóda konečných prvkov – FEM	197
9.5 Prehľad simulačných programov	198
9.5.1 NovaFlow & Solid	198
9.5.2 Pam-Cast	199
9.5.3 MAGMASOFT	200
9.5.4 SIMTEC/WinCast	201
9.5.5 ProCast	202
 10. HISTORICKÝ PREHLAD VÝROBY ODLIATKOV Z LIATINY	 204
 11. POUŽITIE LIATINOVÝCH ODLIATKOV	 212
 LITERATÚRA	 216
 POĎAKOVANIE	 223

PREDSLOV

Táto monografia vznikla na základe zhromaždených materiálov a výsledkov, ktoré boli dosiahnuté v rámci projektu **APVV-16-0485** ako aj projektov **VEGA 1/0703/16** a **VEGA 1/0073/17**. Autori monografie sú zamestnanci Ústavu metalurgie Fakulty materiálov, metalurgie a recyklácie Technickej univerzity v Košiciach, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave a spoločnosti Marelli v Kechneci, ktorí sa v posledných rokoch intenzívne venujú problematike zliatin na báze železa.

Pri písaní tejto monografie autori vychádzali z najnovších poznatkov publikovaných predovšetkým v zahraničných časopisoch a prezentovaných na zahraničných konferenciách. Časť publikácie prezentuje výsledky, ktoré boli publikované v článkoch a prezentované na konferenciách v Bulharsku, Mexiku, Brazílii a v Singapore.

Táto publikácia je určená predovšetkým pre zlievarenskú odbornú verejnosť. Je zostavená tak, aby ju mohli využívať študenti vysokých škôl a doktorandi zlievarenských a metalurgických odborov. Keďže obsahuje množstvo informácií všeobecného charakteru, týkajúcich sa predovšetkým liatin, veríme, že si ju prečítajú všetci, ktorí sa zaoberajú týmto materiálom v praxi.

ÚVOD

Liatinové odliatky si dlhodobo udržiavajú prvenstvo medzi odliatkami na báze železa. Majú výborné zlievarenské vlastnosti (zabiehavosť, zmraštenie) v kombinácii s dobrými mechanickými parametrami v porovnaní s uhlíkovými oceľami.

Prvenstvo v tejto skupine odliatkov si stále udržiava liatina s lupienkovým grafitom (LLG), pričom báza tejto natavenej liatiny slúži i na výrobu ďalších typov liatin. Predovšetkým liatina s guľôčkovým grafitom (LGG) si našla svoje miesto a takmer celkom vytlačila ďalšie druhy zliatin. Odliatky z LGG často nahrádzajú drahšie oceľové odliatky a prinášajú niektoré výhodnejšie výrobné a užívateľské parametre. Nové typy liatin, najmä liatina s vermikulárnym grafitom (resp. s červíkovitým grafitom) a izotermicky kalené liatiny (obyčajne nazývané ako bainitické) dosahujú vysoké mechanické a technologické a úžitkové vlastnosti. Uplatňujú sa najmä v automobilovom priemysle a v ďalších strojárskych oblastiach.

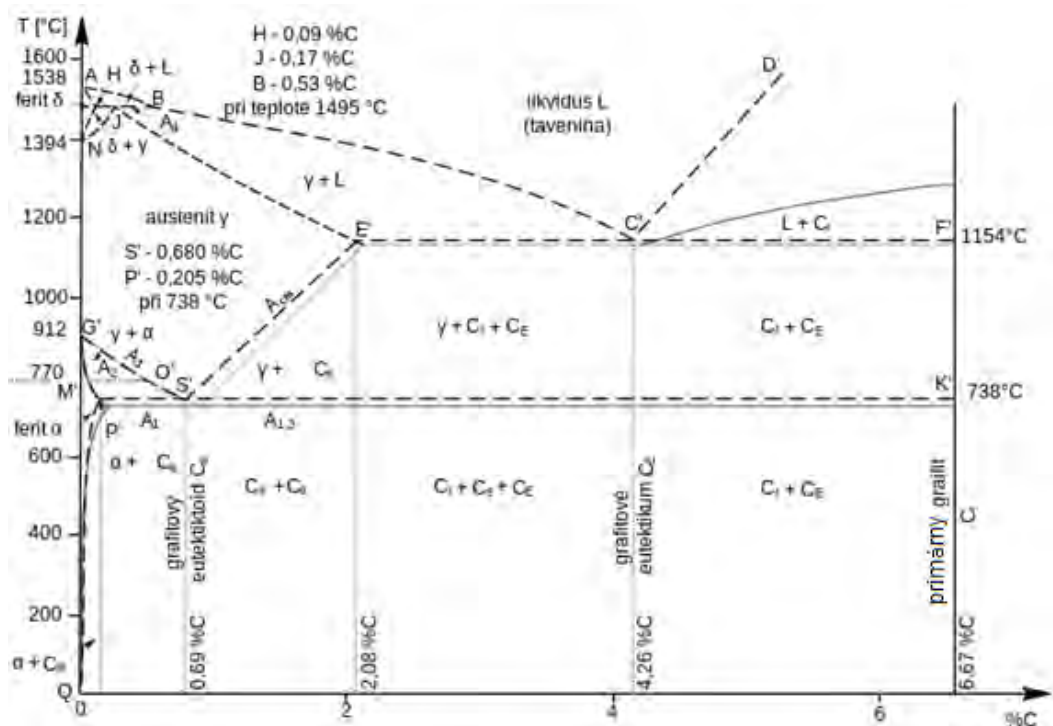
Neustále rastúce nároky na nové súčiastky s vyššími úžitkovými parametrami si vynucujú modernizáciu metalurgie a inováciu technologických zariadení. Pri súčasnom trende rastu vstupných nákladov na výrobu odliatkov, zvyšovania nárokov na ich kvalitu a tlaku obchodníkov na znižovanie cien výrobkov sú výrobcovia nútení znášať tieto disproporcie trhového mechanizmu. Uvedené skutočnosti nútia zlievarne k racionalizácii výroby, a tým k znižovaniu výrobných nákladov.

V oblasti metalurgie existuje veľmi veľa faktorov ovplyvňujúcich výslednú kvalitu liatiny, počnúc vsádzkovými surovinami, taviacim zariadením, chemickým zložením, mimopecnou úpravou a končiac liatím. Adekvátnymi metalurgickými zásahmi a podmienkami pri odlievaní a tuhnutí sa dajú dosiahnuť požadované mechanické vlastnosti.

Vlastnosti liatiny sú určované objemom, tvarom a veľkosťou vylúčeného grafitu, ako i stavbou základnej kovovej hmoty. Už malé rozdiely v metalurgickom spracovaní menia podmienky kryštalizácie, čo vedie ku kolísaniu akosti taveniny a následkom toho ku vzniku chýb v odliatkoch ako sú stiahnutiny, pórovitosť, bubliny, praskliny, vznik troskotvorných inklúzií a odchýlok v kryštalizácii.

Zvládnutie metalurgického procesu výroby liatin je prvotným krokom v zlievarenskej výrobe a poznanie všetkých faktorov vplývajúcich na ich výslednú

akosť je dôležitá. Uvedená publikácia prináša komplexný prehľad z oblasti metalurgie výroby liatin až po ich konečné vlastnosti a faktory, ktoré na nich vplývajú.



Obr. 1.1 Rovnovážný diagram $Fe - C$ ---- $Fe - Fe_3C$

Dôsledkom vysokého obsahu uhlíka je jeho grafitizácia t.j. vylúčenie vo forme grafitu, ktorého množstvo, tvar, veľkosť a rozloženie v základnej kovovej hmote určuje vlastnosti liatin.

Tým, že grafit znižuje nosný prierez základnej kovovej hmoty, znižuje pevnosť liatiny. Súčasne na koncoch útvarov grafitu dochádza ku koncentrácii napätia – grafit pôsobí vrubovým účinkom. Čím ostrohrannejšie sú zakončené útvary grafitu, tým väčší je vrubový účinok, čím sa znižuje plasticita liatiny a zvyšuje sa krehkosť.

Základnými prvkami liatiny sú C, Si, Mn, P a S. Liatina obsahuje aj ďalšie prvky, ktoré označujeme ako sprievodné – prichádzajú so vsádzkou (Cr, Ni, Cu) rovnako ako stopové, ktorých obsah je veľmi nízky, pod 0,1 a 0,001 % (najčastejšie Pb, Zn, Sn, Mg, Al, Ti, Ca, Sb a ďalšie). Liatina môže obsahovať tiež legujúce prvky, pridávané za účelom zlepšenia jej vlastností.

1.1 Rozdelenie liatin

Liatiny sa triedia podľa rôznych hľadísk, najčastejšie podľa tvaru uhlíka v štruktúre:

1. Liatina s lupienkovým grafitom – LLG
2. Liatina s guľôčkovým grafitom – LGG
3. Liatina s červíkovým grafitom – LČG
4. Biela liatina – negrafitická liatina, liatina s voľným cementitom
5. Temperová liatina
6. Legované liatiny pre špeciálne účely
7. Liatiny so špeciálnymi vlastnosťami

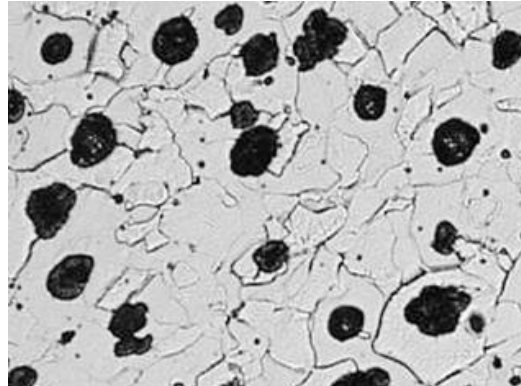
Podľa tvaru vylúčeného grafitu vychádzajúc z európskej normy EN 1560 sa liatiny delia na nasledujúce typy (**obr. 1.2**):

1. **Liatina s lupienkovým grafitom – LLG** (nazývaná tiež ako sivá liatina) – obsahuje grafit v tvare priestorových útvarov, ktoré na metalografickom výbruse majú tvar lupienkov. Dĺžka lupienkov je podstatne väčšia ako ich hrúbka, koniec lupienkov je ostrý. LLG je najobvyklejším typom vyrábaných liatin.
2. **Liatina s guľôčkovým grafitom – LGG** (nazývaná tiež ako tvárna liatina) – obsahuje grafit vo forme guľôčok. Z hľadiska vlastností liatiny je ideálnym tvarom dokonalá guľôčka, občas sa však vyskytuje grafit "nedokonale zrnitý".

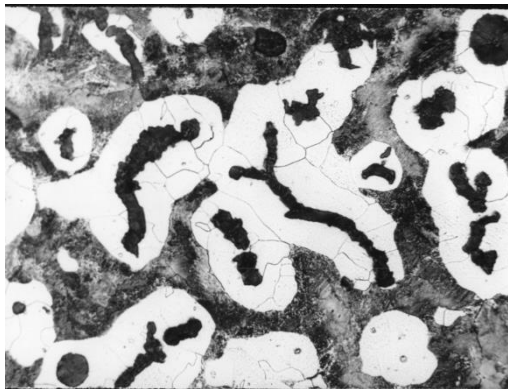
3. **Liatina s červíkovitým grafitom – LČG** (vermikulárna liatina). Vermikulárny grafit má podobný tvar ako grafit lupienkový. V porovnaní s LLG sú však útvary grafitu kratšie, hrubšie a ich koniec je zaoblený. Vermikulárna liatina obvykle obsahuje tiež určité množstvo lupienkového alebo guľôčkového grafitu.



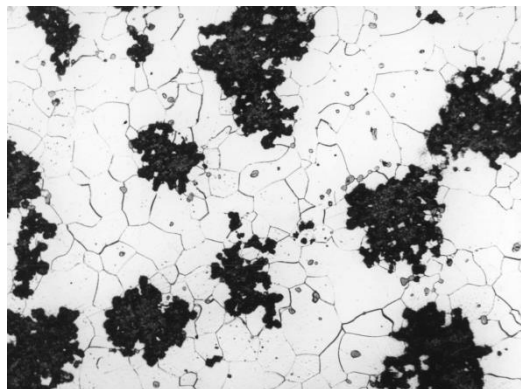
a)



b)



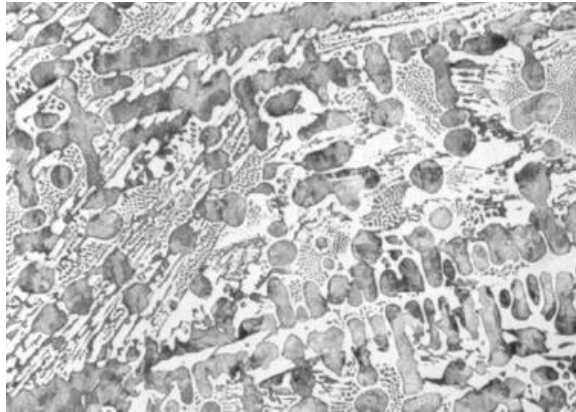
c)



d)

Obr. 1.2 Tvar grafitu v liatinách: a) lupienkový – LLG, b) guľôčkový – LGG, c) vermikulárny – LČG, d) vločkový – TL

4. **Biela liatina** – bez grafitu. Štruktúra v dôsledku metastabilnej kryštalizácie (cementitovej) je tvorená cementitom a perlitom (**obr. 1.3**) v dôsledku čoho je veľmi tvrdá (až 500 HB), krehká a obrobiteľná len brúsením. Vzniká pri nízkom stupni nahličenia (obsah Si = 0,5 až 1,2 %), alebo pri prudkom ochladení v priebehu tuhnutia odliatkov.



Obr. 1.3 Mikroštruktúra bielej liatiny

5. **Temperovaná liatina – TL** (nazývaná tiež liatina s vločkovým grafitom) – obsahuje grafit vo forme vločiek. Grafitové vločky vznikajú rozpadom ledeburitického cementitu.
6. **Legované liatiny** – tvoria rozsiahli sortiment materiálov na špeciálne druhy odliatkov. Ich vlastnosti sú zabezpečované legúrami (Cr, Ni, Al, Si, Mn, V, W, ďalšie). Podľa množstva (obsahu) týchto prvkov sa delia na:
 - a) nízkolegované (s nízkym obsahom prísadových prvkov)
 - b) nízkolegované – do 5 % súčtu legúr
 - c) stredne legované – obsah jednotlivých legúr 5 – 10 %
 - d) vysokolegované – súčet legúr nad 10 %

Podľa konkrétnych špecifických vlastností a účelu použitia ich rozdeľujeme na liatiny:

- žiaruvzdorné
- oteruvzdorné
- korózivzdorné
- so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami.

Prehľad týchto liatin je v **tab. 1.1**. Zvláštnu skupinu tvoria vysokolegované liatiny vyrábané z legovaných LLG alebo LGG. Patria sem:

- austenitické liatiny – označované ako Ni – Resist
- bainitické liatiny – označované ako ADI

Sú náročné na dodržiavanie technológie výroby, avšak svojimi vlastnosťami sa vyrovnajú, resp. predčia vlastnosti zušľachtených ocelí, ktorých výroba je nákladnejšia.

Tab. 1.1 Normované legované LLG

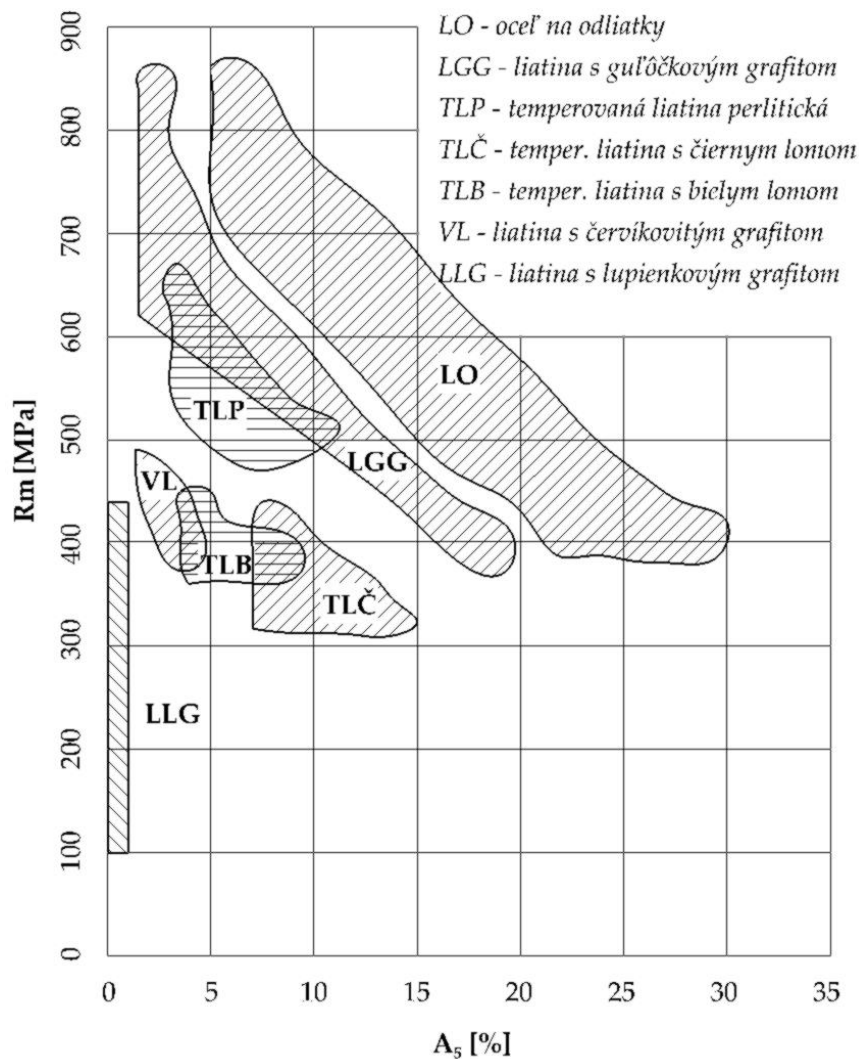
Označenie liatiny STN	Chemické zloženie [%]								Pevnosť v ťahu R _m [MPa]	Tvrdosť HB	Lineárne zmršenie pri tuhnutí [%]	Charakteristika liatiny a použitie
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Cu	P _{max}	S _{max}			
42 2465	2,50 až 3,20	4,50 až 6,00	max. 0,80	max. 1,00	max. 1,00	-	-	0,30	0,12	max. 220	0,80 až 1,20	Feriticko-perlitická (max. 20 % perlitu), s lupienkovým grafitom. Na odliatky používané do 800 °C
42 2472	3,00 až 3,80	1,70 až 2,70	max. 1,00	0,50 až 1,20	-	-	-	0,30	0,12	max. 220	1,00 až 1,20	Perlitická, s voľnými karbidmi a lupienkovým grafitom. Na odliatky používané do 600 °C.
42 2478	3,00 až 3,80	2,80 až 3,80	max. 1,00	2,00 až 2,70	-	-	-	0,30	0,12	max. 330	1,10 až 1,50	Štruktúra ako pri 42 2472. Na odliatky tepelne namáhané do teploty 700 °C.
42 2481	2,50 až 3,00	1,50 až 3,00	max. 1,00	2,00 až 3,00	-	6,00 až 8,00	-	0,30	0,12	max. 220	1,00 až 1,50	Štruktúra ako pri 42 2472. Liatina vysoko opaluvzdorná v oxidačnom alebo sirovodíkovom prostredí s použiteľnosťou do 850 °C.
42 2488	2,00 až 2,50	4,50 až 5,50	0,50 až 1,50	2,50 až 4,50	18,00 až 22,00	-	-	0,10	0,05	140 až 220	1,40 až 1,80	Dobre odolná korózii a erózií i v zriedenej H ₂ SO ₄ . Veľmi odolná oxidácii. Odoláva žiaru do 800 °C.
42 2489	2,00 až 2,60	5,00 až 6,00	0,40 až 0,80	4,50 až 5,50	29,00 až 32,00	-	-	0,10	0,05	120 až 200	1,40 až 1,80	Obzvlášť odolná korózii a erózií. Žiaru odoláva do 800 °C.
42 2492	2,50 až 3,00	1,00 až 2,80	0,50 až 1,50	1,00 až 2,50	13,50 až 17,50	-	5,50 až 7,50	0,10	0,05	120 až 200	1,50 až 1,90	Odoláva koróziu v alkáliách zriedených kyselinách, soliach a v morskej vode. Má dobré klzné vlastnosti a je nemagnetická. Odoláva žiaru do 800 °C. Nie je vhodná pre styk s potravinami.
42 2493	2,50 až 3,00	1,00 až 2,80	0,50 až 1,50	2,50 až 3,50	13,50 až 17,50	-	5,50 až 7,50	0,10	0,05	140 až 220	1,60 až 2,00	Veľmi odolná korózii a erózií v alkáliách, zriedených kyselinách, soliach a v morskej vode. Má horšie klzné vlastnosti a je magnetická. Ďalšie vlastnosti ako pri 42 2492
42 2494	2,50 až 3,00	1,0 až 2,80	0,50 až 1,50	1,00 až 2,50	18,00 až 22,00	-	-	0,10	0,05	120 až 200	1,60 až 2,00	Veľmi odolná korózii, dobre odolná v zriedených kyselinách, soliach a morskej vode. Má dobré klzné vlastnosti a je nemagnetická. Odoláva žiaru do 800 °C.
42 2495	2,50 až 3,00	1,00 až 2,80	0,50 až 1,50	2,50 až 3,50	18,00 až 22,00	-	-	0,10	0,10	140 až 220	1,60 až 2,00	Vysoko odolná korózii a erózií v alkáliách, dobre odolná v zriedených kyselinách, soliach a morskej vode. Má horšie klzné vlastnosti a je magnetická. Odoláva žiaru do 850 °C.
42 2496	2,00 až 2,60	1,00 až 2,00	0,40 až 0,80	2,50 až 2,50	28,00 až 32,00	-	-	0,10	0,10	120 až 200	1,40 až 1,80	Odolná korózii za vysokých teplôt, veľmi odolná erózií vo vlhkej pare a solných kaloch. Je odolná oxidácii a tepelným rázom do 800 °C.

V praxi sa aj naďalej vyrábajú osvedčené liatiny so zvláštnymi špecifickými vlastnosťami mimo predpísaných noriem. Sú to dlhodobo osvedčené akosti pre konkrétne špeciálne účely (Hematit pre oceliarské kokily, liatiny pre odlievanie klavírnych rámov a pod.).

Tvar, rozloženie a veľkosť grafitu

Lupienkový grafít vzniká obyčajne bez akýchkoľvek metalurgických zásahov. Pre získanie liatiny s guľôčkovým a červíkovitým grafítom je potrebné robiť modifikáciu. Temperovaný grafít vzniká po tepelnej úprave – po temperovaní bielej liatiny.

Tvar a rozloženie grafitu majú zásadný vplyv na mechanické vlastnosti liatin. Orientačné porovnanie základných mechanických vlastností nelegovaných liatin a ocele na odliatky dokumentuje **obr. 1.4**.



Obr. 1.4 Porovnanie mechanických vlastností nelegovaných liatin

Ako je z **obr. 1.4** vidieť, najnižšie mechanické vlastnosti má LLG (ťažnosť skoro nulová a R_m – pevnosť v ťahu iba v rozsahu 100 až 420 MPa, najčastejšie 150 až 250 MPa). Napriek tomu je najpoužívanejším zlievarenským materiálom z dôvodu jej výhodných zlievarenských a fyzikálnych vlastností.

Postupne je nahradzovaná liatinou s guľôčkovým grafitom (LGG), ktorá má lepšie plastické vlastnosti, najmä ťažnosť. Jej výroba je nákladnejšia a zložitejšia. Podiel liatinových odliatkov z celkovej výroby odliatkov je cca 70 %.

Pri striedavom namáhaní materiálov klesá ich pevnosť až do určitej hodnoty (medza únavy), kedy už zostáva konštantná. Pomer medze únavy k medzi pevnosti je u liatina 0,4 až 0,5 zatiaľ čo u ocelí je iba 0,05 až 0,1.

Z tohto dôvodu je liatina často vhodným konštrukčným materiálom.

Liatiny rozdeľujeme aj:

- *podľa farby lomu odliatku:*

1. **sivá liatina** – jej farba lomu je spôsobená vylúčeným grafitom, ktorý je tmavošedý.
2. **biela liatina** – neobsahuje voľný grafit. Uhlík je viazaný vo forme cementitu (Fe_3C). Je oteruvzdorná avšak krehká.
3. **maková liatina** – prevažne v bielom lome sa objavujú zrnka grafitu t.j. sivé miesta, ktoré majú vzhľad makových zrníek. Je menej krehká ako biela.
4. **tvrdená liatina** – sivá liatina odlievaná do kovových foriem (kokíl), má biely povrch rôznej hrúbky a stred odliatku má sivý lom.

- *podľa spôsobu výroby* (očkovaná, modifikovaná, temperovaná, tvrdená),

- zvláštnym druhom je **syntetická liatina** vyrábaná zo 100% - tného podielu oceleového materiálu prednostne v elektrických peciach,

- **podľa spôsobu tavenia** rozdeľujeme liatiny na liatiny z kuplovne, el. pecí, zriedkavo z materiálu prvého tavenia t.j. zo surového železa vysokých pecí.

- **podľa špecifických vlastností** na tepelne stabilné LLG, liatiny na ložiskové puzdra (STN 42 2456), liatiny s vyššími frakčnými vlastnosťami (brzdové segmenty) s $P > 0,6$ % a ďalšie.

Presnejšie rozdelenie a číselné označenie zliatin železa na odliatky je určené normami STN 42 0006 a EN 1563.

Pre číselné označovanie a rozdelenie zliatin na báze železa platí norma STN 42 0006. Zaradenie liatin do skupín triedy 42 – podľa tejto normy je uvedené v **tab. 1.2**.

Tab. 1.2 Zaradenie liatin do skupín podľa STN 42 0006

Skupina triedy 42	Druh liatiny
42 23 xx	liatiny s guľôčkovým grafitom
42 24 yy	liatiny s lupienkovým grafitom
42 25 zz	biele, tvrdené a temperované liatiny

1.2 Charakteristika liatiny s lupienkovým grafitom (LLG)

Liatina s lupienkovým grafitom je najstarším materiálom používaným na výrobu odliatkov na báze železa, vďaka jej výborným zlievarenským vlastnostiam a výhodným fyzikálnym vlastnostiam. Vhodnými metalurgickými zásahmi a podmienkami pri tuhnutí a chladnutí sa dajú dosiahnuť dobré mechanické vlastnosti. Vlastnosti LLG sú určované objemom a tvarom vylúčeného grafitu, veľkosťou a rozložením lupienkov grafitu, ako i stavbou základnej kovovej hmoty. Štruktúra je závislá od výrobných podmienok, chemického zloženia, doby tuhnutia a rýchlosti ochladzovania vo forme. Teda hrúbka steny, hmotnosť a konštrukcia odliatku majú výrazný vplyv na štruktúru týchto liatin.

Pri výrobe akostných druhov LLG sa aplikuje technologický postup očkovania, ktorý optimalizuje štruktúru a vlastnosti liatiny. Výsledné vlastnosti liatin najviac ovplyvňuje tvar, počet, veľkosť a rozloženie grafitových lupienkov v štruktúre. Menej akostné liatiny majú lupienky hrubé, usporiadané do grafitových hviezd. Akostné liatiny majú grafitové lupienky primeranej hrúbky a dĺžky, počtu a sú rovnomerne rozložené (typ A). Priaznivé ovplyvnenie vylúčenia grafitu sa dosahuje očkovaním, a preto sú akostné liatiny (od triedy 42 2425) vždy očkované. Pri očkovaní sa zohľadňuje hrúbka steny a požadovaná R_m a HB v stene odliatku. Dôležitá je tiež makroštruktúra materiálu určená veľkosťou eutektických zŕn, ktorá má byť jemnozrná.

Liatiny s lupienkovým grafitom sú označované podľa normy STN EN 1561. Hodnoty mechanických a iných charakteristických vlastností jednotlivých akostí uvádzajú podľa STN príslušné materiálové listy. Prehľad základných vlastností nelegovaných LLG podľa STN udáva **tab. 1.3**. Štruktúra nelegovaných LLG sa skladá zo základnej hmoty tvorenej feritom, perlitom a feritom, alebo len perlitom, ktorá je porušovaná lupienkami grafitu.

Tab. 1.3 Prehľad normalizovaných akostí nelegovaných LLG podľa STN

Označenie materiálu STN	Pevnosť v ťahu min. R _m [MPa]	Tvrdosť max. HB	Stupeň eutektickosti Se	Štruktúra zákl. hmoty
42 2410	100	180	1,05 – 1,11	ferit (málo perlitu)
42 2415	150	200	0,99 – 1,05	ferit + perlit
42 2420	200	220	0,93 – 0,99	perlit + ferit
42 2425	250	240	0,87 – 0,93	perlit (málo feritu)
42 2430	300	260	0,81 – 0,87	perlit
42 2435	350	270	0,75 – 0,81	perlit

Základné vlastnosti a obvyklé chemické zloženie nelegovaných LLG podľa európskej normy EN 1561 dokumentuje **tab. 1.4**.

Tab. 1.4 Vlastnosti a chemické zloženie nelegovaných LLG (GJL – podľa EN 1561)

STN EN-GJL	100	150	200	250	300	350
R _m [MPa]	100 – 200	150 – 250	200 – 300	250 – 350	300 – 400	350 – 450
R _{p0,1} [MPa]		98 – 165	130 – 195	165 – 228	195 – 260	228 – 285
R _d [MPa]		600	720	840	960	1080
E.10 ³ [MPa]		78 – 103	88 – 113	103 – 118	108 – 137	123 – 143
HB _{max} (1)	180	200	220	240	260	270
Se	1,05 – 1,11	0,99 – 1,05	0,93 – 0,99	0,87 – 0,93	0,81 – 0,87	0,75 – 0,81
Chemické zloženie (2)						
C	3,5 – 3,7	3,4 – 3,6	3,3 – 3,5	3,1 – 3,3	3,0 – 3,2	2,8 – 3,1
Si	2,3 – 2,5	1,9 – 2,2	1,8 – 2,1	1,7 – 1,9	1,6 – 1,8	1,5 – 1,7
Mn	0,4 – 0,6	0,5 – 0,7	0,6 – 0,8	0,8 – 1,0	0,9 – 1,1	1,1 – 1,3
P _{max}	0,7	0,6	0,5	0,5	0,3	0,25
S _{max}	0,15	1,15	0,15	0,15	0,15	0,10
doporučená hrúbka steny [mm]	4 – 15	5 – 30	8 – 45	15 – 70	25 – 100	40 – 100 (a viac)
štruktúra	ferit + stopy perlit	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit + ferit	perlit	perlit
Pozn.: 1 – uvedené hodnoty tvrdosti sú orientačné 2 – chemické zloženie nie je normalizované						

Akosť nelegovanej LLG sa podľa STN a EN posudzuje a zatrieďuje podľa hodnôt pevnosti v ťahu a Brinellovej tvrdosti HB zisťovaných na vzorkách z oddelene odlievaných valcových tyčí s priemerom Ø 30 mm. Chemické zloženie, hlavne obsah uhlíka a kremíka si volí zlievareň podľa druhu pecí, surovín, materiálu a ďalších výrobných podmienok, ale odporúča sa dodržať stupeň eutektickosti liatiny Se (alebo stupeň nasýtenia; v zahraničnej literatúre je označovaný ako stupeň nasýtenia uhlíkom Sc).

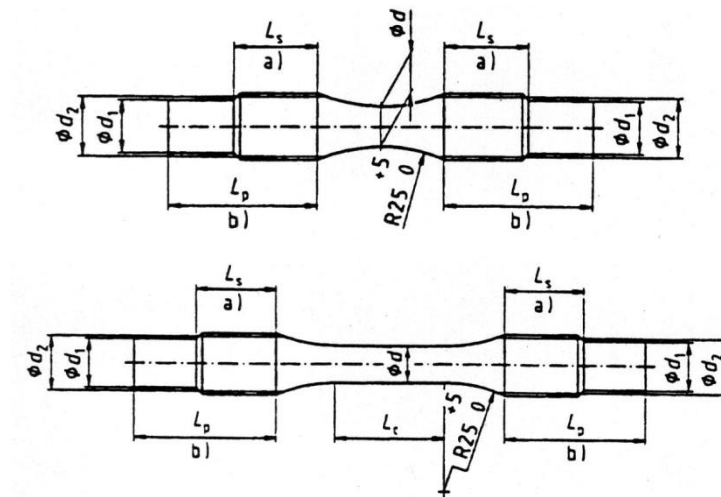
Podľa európskej normy EN 1561 sa LLG rozdeľujú do dvoch hlavných skupín, podľa toho, či je rozhodujúcou veličinou v odliatku pevnosť v ťahu alebo tvrdosť. **Tab. 1.5** dokumentuje zatriedenie liatin podľa tvrdosti HB.

Tab. 1.5 Brinellova tvrdosť na odliatkoch podľa EN 1561

Označenie materiálu		Určujúca hrúbka steny [mm]		Tvrdosť podľa Brinella HB 30	
Značka	Číslo	nad	do	min.	max.
EN-GJL-HB 155	EN-JL-2010	40	80 ^{*)}	-	155
		20	40	-	160
		10	20	-	170
		5	10	-	185
		2,5	5	-	210
EN-GJL-HB 175	EN-JL-2020	40	80 ^{*)}	100	175
		20	40	110	185
		10	20	125	205
		5	10	140	225
		2,5	5	170	260
EN-GJL-HB 195	EN-JL-2030	40	80 ^{*)}	120	195
		20	40	135	210
		10	20	150	230
		5	10	170	260
		4	5	190	275
EN-GJL-HB 215	EN-JL-2040	40	80 ^{*)}	145	215
		20	40	160	235
		10	20	180	255
		5	10	200	275
EN-GJL-HB 235	EN-JL-2050	40	80 ^{*)}	165	235
		20	40	180	255
		10	20	200	275
EN-GJL-HB 255	EN-JL-2060	40	80 ^{*)}	185	255
		20	40	200	275
Pozn.: *) Referenčná hrúbka steny pre značku					

Skúšobné telesá pre skúšanie mechanických vlastností LLG

Mechanické vlastnosti sa určia na skúšobných telesách vyrobených z **oddelene liatych tyčí** $\varnothing 30$ mm dĺžky 300 alebo 600 mm. Tie sa odlievajú vo zvislej polohe do surovej formy alebo sa odlievajú skúšobné vzorky priliate k odliatku. Pevnosti liatin, vyplývajúce z ich značky, sa vzťahujú k tyči $\varnothing 30$ mm. Tvar skúšobných telies je znázornený na **obr. 1.5**. Priemer tyče po opracovaní je v skúšanej časti $\varnothing 20$ mm.



Obr. 1.5 Skúšobné telesá pre skúšku ťahom

1.2.1 Akostné kritéria LLG

Okrem bežného hodnotenia kvality liatiny pevnosťou v ťahu, tvrdosťou, príp. chemickým zložením, alebo i ďalšími mechanickými a fyzikálnymi vlastnosťami sa používajú i tzv. akostné kritéria LLG. Tieto kritéria sa snažia kvantitatívne vyjadriť vplyv konkrétnych výrobných podmienok na dosiahnuté vlastnosti liatiny v porovnaní s optimálnymi štatisticky platnými podmienkami. Medzi akostné kritéria LLG patria:

- stupeň eutektickosti Se a uhlíkový ekvivalent CE,
- stupeň eutektickosti a teplota likvidu,
- uhlíkový ekvivalent a teplota likvidu,
- závislosť Rm od Se,
- závislosť HB od Se,
- stupeň zrelosti liatiny RG,
- relatívna tvrdosť RH,
- relatívna pevnosť RZ,
- faktor akosti m,
- akostné číslo GZ

Stupeň eutektickosti a uhlíkový ekvivalent

Stupeň eutektickosti Se, alebo stupeň nasýtenia liatiny (uhlíkom; v zahraničnej literatúre je označovaný ako **Sc**), je daný pomerom % obsahu uhlíka v liatine k uhlíku v eutektiku podľa vzťahu (v %):

$$Se = \frac{\%C}{\%C_{C'}} = \frac{\%C}{4,23 - 0,31.Si - 0,33.P + 0,027.Mn - 0,40.S}$$

kde: C – analyticky zistený obsah uhlíka v hm. %

C_{C'} – obsah uhlíka v bode C' (eutektiku) ovplyvnenom prísadovými prvkami v hm. %

Podľa STN sa stredná hodnota stupňa eutektickosti počíta podľa rovnice:

$$Se = \frac{\%C}{4,23 - 0,3 \cdot (\%Si + \%P)}$$

Pri hodnote Se = 1 – eutektická liatina

Se < 1 – podeutektická liatina

Se > 1 – nadeutektická liatina

Uhlíkový ekvivalent CE udáva polohu liatiny v prísadami neovplyvnenom diagrame železo – uhlík a vyjadruje sa vzťahmi:

$$CE = C + 0,31.Si + 0,33.P - 0,0027.Mn + 0,04.S \quad [\%]$$

Medzi stupňom eutektickosti Se a uhlíkovým ekvivalentom CE je prepočet:

$$Se = \frac{\%C}{4,3 - CE + \%C}$$

Medzi stupňom eutektickosti Se a teplotou likvidu T_L existuje lineárna závislosť:

$$Se = \frac{1598 - T_L}{435} = 3,674 - 0,0023.T_L$$

Teplota likvidu T_L sa určí pomocou termickej analýzy.

Stupeň zrelosti liatiny

Stupeň zrelosti liatiny RG (%), je daný pomerom skutočnej, nameranej pevnosti v ťahu (na oddelene odliatej tyči Ø 30 mm) k teoretickej, tzv. normálnej pevnosti vypočítanej zo stupňa eutektickosti:

$$RG (\%) = \frac{Rm_{nameraná}}{Rm_{normálna}} \cdot 100$$

Pre výpočet normálnej pevnosti zo stupňa eutektickosti Se pre tyče s priemerom Ø 30 mm platí rovnica:

$$\text{normálna pevnosť } Rm_{normálna} = 981 - 785 \cdot Se \quad (MPa)$$

Z toho sa vypočíta stupeň zrelosti RG pre rozsah pevností do 400 MPa:

$$RG (\%) = \frac{Rm_{nameraná}}{981 - 785 \cdot Se} 100$$

Hodnoty RG nad 100% patria kvalitným liatinám, pod 100% upozorňujú na to, že vyrobená liatina má nižšiu pevnosť ako odpovedá jej zloženiu.

Relatívna tvrdosť

Relatívna tvrdosť RH, ktorá je daná pomerom skutočnej, nameranej Brinellovej tvrdosti (na oddelene odliatej tyči Ø 30 mm) ku tzv. normálnej tvrdosti vypočítanej z nameranej pevnosti v ťahu:

$$RH = \frac{HB_{namerané}}{HB_{normálna}}$$

Normálna tvrdosť sa vypočíta zo zistenej pevnosti v ťahu Rm pri ťahovej skúške na normovanej skúšobnej tyčke z oddelene odliatej tyče s Ø 30 mm podľa rovnice:

$$\text{normálna tvrdosť } HB_{normálna} = 100 + 0,44 \cdot Rm$$

Táto rovnica platí pre nízkofosforové liatiny v rozsahu pevnosti od 200 do 400 MPa. Vplyv fosforu sa odhadne tak, že prídavkom 0,1%P sa zvýši Brinellova tvrdosť o cca 2,44 jednotiek.

Relatívna pevnosť

Je pomer nameranej pevnosti a vypočítanej (teoretickej v %):

$$RZ (\%) = \frac{Rm_{nameraná}}{Rm_{teoretická}} \cdot 100$$

Ak sa teoretická pevnosť vypočíta zo stupňa eutektickosti liatiny Se, potom relatívna pevnosť RZ je totožná so stupňom zrelosti liatiny RG. Teoretická pevnosť sa dá tiež stanoviť ako funkcia chemického zloženia pomocou regresnej rovnice, ktorú je potrebné v praxi určiť z väčšieho súboru skúšok vyrábanej liatiny.

Faktor akosti

Faktor akosti „m“ (podľa Czikela), posudzuje kvalitu liatiny podľa pomeru nameraných hodnôt pevnosti a tvrdosti:

$$m = \frac{Rm_{namerané}}{HB_{namerané}}$$

Čím vyššia hodnota faktoru akosti **m**, tým je liatina kvalitnejšia.

Akostné číslo

Akostné číslo GZ, posudzuje liatinu podľa pomeru dosiahnutého stupňa zrelosti RG ku teoretickej tvrdosti RH:

$$GZ = \frac{RG}{RH}$$

Akostná liatina vykazuje čo najvyšší stupeň zrelosti RG a čo najnižšiu relatívnu tvrdosť RH, príp. čo najvyšší faktor akosti „m“.

Osvedčené sú vzťahy pre určenie Rm a HB zo známeho chemického zloženia (podľa Weisa a Orthsa):

$$Rm \text{ (MPa)} = 786,5 - 150 \cdot \% C - 47 \cdot \% Si + 45 \cdot \% Mn + 219 \cdot \% S$$

odchýlka s = 25 MPa

$$HB = 444 - 71,8 \cdot \% C - 13,9 \cdot \% Si + 21 \cdot \% Mn + 170 \cdot \% S$$

odchýlka s = 12,46

Pevnosť R_m priamo v odliatkoch pri prevládajúcej perlitickej štruktúre je možné určiť z nameranej tvrdosti HB podľa rovnice:

$$R_m \text{ (MPa)} = 258,3 + 1,275 \cdot HB_{\text{nameraná}} - 63,8 \cdot \% C - 25 \cdot \% Si - 31 \cdot \% P$$

odchýlka $s = 21 \text{ MPa}$

1.3 Charakteristika liatiny s guľôčkovým grafitom (LGG)

Liatina s guľôčkovým grafitom je grafitická liatina s grafitom vylúčeným v tvare guľôčok uložených v matrici zo zliatiny železa, uhlíka a kremíka. Vylúčenie guľôčkového grafitu sa dosahuje modifikáciou liatiny pomocou horčíka. K dosiahnutiu tohto tvaru grafitu je nutné, aby „**zvýškový horčík**“ v tavenine bol minimálne 0,030 % Mg.

LGG liatina má v porovnaní s oceľou na odliatky výborné technologické vlastnosti, ako nízku taviacu teplotu, lepšiu zlievateľnosť a obrobitelnosť. Guľôčkový tvar grafitu na rozdiel od grafitu lupienkového spôsobuje minimálne oslabenie kovovej matrice (minimálny vrubový účinok má guľový tvar). Mechanické vlastnosti liatiny s guľôčkovým grafitom sa preto veľmi približujú vlastnostiam ocelí. Základná kovová hmota môže byť feritická, feriticko – perlitická a perlitická. Obsah týchto fáz v štruktúre najvýznamnejšie rozhoduje o mechanických vlastnostiach LGG. Ferit je nositeľom húževnatosti a plastických vlastností, perlit je nositeľom pevnosti a tvrdosti. Legovaním alebo tepelným spracovaním je možné získať v štruktúre sorbit, bainit (liatina je označovaná ako ADI), martenzit alebo austenit. Výskyt ledeburitu alebo iných karbidov je v štruktúre nelegovaných LGG nežiadúci. Ich vznik môže byť zapríčinený najmä nasledovnými faktormi:

- **ledeburit** – rýchle ochladzovanie, nevhodné chemické zloženie, nedostatočné očkovanie,
- **karbidické ihlice** – vysoký obsah Mg (Ce),
- **karbidy na hraniciach zŕn** – v dôsledku segregácie Mn, najmä v hrubostenných odliatkoch, a tiež obsah Cr.

Pri priaznivo vylúčenom tvare grafitu sú mechanické a ďalšie vlastnosti LGG určované predovšetkým druhom a stavbou jej kovovej hmoty. Liatiny sú triedené na jednotlivé akosti na základe ich najnižšej hodnoty pevnosti v ťahu.

Prehľad normovaných akostí liatin s guľôčkovým grafitom podľa STN 42 23xx a ich požadované mechanické vlastnosti uvádza **tab. 1.6**. Hodnoty mechanických vlastností týchto liatin musia byť dodržané a nesmú byť nižšie ako predpisuje norma. Chemické zloženie a tepelné spracovanie, pokiaľ odberateľ nestanoví inak, sú prenechané na uváženie výrobcu.

Mechanické vlastnosti LGG sú definované:

- pevnosťou v ťahu,
- medzou sklzu 0,2,
- ťažnosťou,
- tvrdosťou HB,
- vrubovou húževnatosťou (u vybraných akostí).

Tab. 1.6 Prehľad normovaných akostí LGG podľa STN

Akosť STN	Pevnosť v ťahu R _m min. [MPa]	Medza 0,2 min. [MPa]	Ťažnosť A5 min. [%]	Tvrdosť HB	Vrub. húževn. [J]	Merná hmot. [kg/dm ³]	Modul pružn. E [GPa]	Štruktúra základnej hmoty
42 2303	370	230	17	140-180	14 (KCU ³)	7,01	169	ferit
42 2304	400	250	12	150-200	10 (KCU ³)	7,04	169	ferit
42 2305	500	320	7	170-240	-	7,05	169	ferit+perlit
42 2306	600	370	3	190-270	-	7,06	169	perlit+ferit
42 2307	700	420	2	230-300	-	7,07	169	perlit
42 2308	800	480	2	250-350	-	7,08	169	perlit
42 2314 ¹⁾	400	250	18	130-180	pri -20°C 16 (KCU) 11 (KCU)	7,04	169	ferit
42 2340 ²⁾	300	-	-	260-320	-	7,07	169	ferit
Pozn.: 1) akosť so zaručenou vrubovou húževnatosťou v oblasti mínusových teplôt 2) akosť so žiaruvzdornosťou do 850 °C								

Vysoký počet guľôčok grafitu a pomalá rýchlosť ochladzovania podporuje tvorenie feritu, zatiaľ čo mnoho legujúcich prvkov ako napr. Mn, Cu, Cr, ... podporuje vznik perlitu. Preto aj pri voľbe vsádzkových surovín treba zabezpečiť nízky obsah legúr, lebo i nepatrné množstvá môžu viesť k zmene štruktúry základnej kovovej hmoty. Tvorbu degenerovaného guľôčkového grafitu spôsobujú už minimálne množstvá legúr (škodlivých prvkov) najmä Pb, Sb, As, Sn, Cd, To môže mať za následok zmenu mechanických vlastností LGG.

Podľa európskej normy EN 1563 sú normalizované nelegované LGG (GJS) s pevnosťou v ťahu 350 – 900 MPa. Základné mechanické vlastnosti podľa EN 1563 uvádza **tab. 1.7**.

Tab. 1.7 Mechanické vlastnosti a štruktúra nelegovaných LGG (GJS) podľa EN 1563

Označenie materiálu	Pevnosť v ťahu Rm [MPa]	Medza 0,2 R _{p0,2} [MPa]	Ťažnosť A5 min. [%]	Tvrdosť HB (4)	Štruktúra	Pozn.
EN-GJS-350-22	350	220	22	< 160	ferit	(1)
EN-GJS-400-18 (15)	400	250	18 (15)	130 – 175	ferit	(2)
EN-GJS-450-10	450	310	10	160 – 210	ferit	
EN-GJS-500-7	500	320	7	170 – 230	ferit + perlit	
EN-GJS-600-3	600	370	3	190 – 270	perlit + ferit	
EN-GJS-700-2	700	420	2	225 – 305	perlit	
EN-GJS-800-2	800	480	2	245 – 335	perlit, sorbit	
EN-GJS-900-2	900	600	2	270 – 360	bainit, sorbit	(3)
1 – varianty so zaručenými vlastnosťami za nízkych teplôt 2 – varianty s ťažnosťou 15 a 18 % a varianty so zaručenými vlastnosťami za nízkych teplôt 3 – dosiahnuteľné iba tepelným spracovaním a/alebo legovaním 4 – tvrdosť na priľiatych skúšobných kusoch						

Chemické zloženie rovnako ako u LLG ani u LGG norma nepredpisuje. Výrobca si ho volí podľa výrobných metalurgických podmienok (druh pece, kvalita surovín, postup mimopecného spracovania (modifikácia + očkovanie), materiál foriem, najmä ich chladiaci účinok, a pod.). Dôležité je zvoleným chemickým zložením zabezpečiť normované mechanické vlastnosti vyrábanej značky a kvalitu samotných odliatkov. Výslednú štruktúru odliatku tiež ovplyvňuje rýchlosť jeho ochladzovania, t.j. hmotnosť, hrúbka steny a modul. Dôležitými požiadavkami sú vyšší obsah C a Si, t.j. prvkov podporujúcich grafitizáciu ($Sc = 0,95$ až $1,05$), nízky obsah S (pod 0,2 %), nízky obsah P (pod 0,1 %), nízky obsah Mn (pod 0,2 %) resp. Mg nad 0,03 %.

Doporučené medzné hodnoty C a Si pre rôzne hrúbky stien sú v **tab. 1.8**.

Tab. 1.8 Doporučené medzné obsahy uhlíka a kremíka pre rôzne hrúbky steny odliatku

Základná hmota		Hrúbka steny					
		< 25 mm		25 až 50 mm		> 50 mm	
		C	Si	C	Si	C	Si
		[%]					
Liaty stav	feritická	3,70	2,80	3,60	2,50	3,60	2,10
	perlitická	3,80	2,50	3,70	2,10	3,60	2,10
	perlit – ferit	3,80	2,50	3,70	2,10	3,60	2,10
Žiháný stav	feritická	3,70	2,50	3,70	2,40	3,60	2,10
	perlitická	3,70	2,20	3,70	2,10	3,60	2,10
	perlit – ferit	3,70	2,40	3,70	2,10	3,60	2,10

V hrubostenných odliatkoch pri vysokých hodnotách C + Si v dôsledku presýtenia C dochádza k flotácii grafitu, t.j. k jeho vyplávaniu do horných častí resp. do tepelných uzlov, kde vytvára tzv. **grafitové hniezda**. Vznikajú tak vážne poškodenia celistvosti odliatku, minimálne k zhoršeniu mechanických vlastností. Uhlíkový ekvivalent CE má byť pod 4,2 %.

V tenkostenných odliatkoch musí byť CE nad 4,2 % (4,3 – 4,7 %), kvôli zníženiu tvorby zákalky a zvýšeniu zabiehavosti. Dôležitý je pritom obsah uhlíka, má byť v rozsahu 3,3 – 3,8 %. Obsah kremíka má byť v rozsahu 1,7 až 2,5 %. Výrazne potláča vznik zákalky, podporuje vznik feritu, ktorý ale spevňuje zvyšuje krehkosť LGG, znižuje ťažnosť a tepelnú vodivosť.

Mangán stabilizuje perlit a karbidy v štruktúre. Jeho obsah je najčastejšie doporučovaný pod 0,3 % pre zabezpečenie plasticity a zníženie krehkosti.

Síra – jej obsah je požadovaný čo najnižší – pod 0,02 %. Znižuje modifikačný účinok Mg, na ktorý sa prednostne viaže (vzniká MgS) čím zvyšuje jeho spotrebu a pri vyšších obsahoch MgS (príp. MgO – z prepalu) dochádza k znečisteniu kovu a zníženiu kvality odliatku.

Fosfor je v LGG nežiadúci. Fosfidy (Fe₃P), ktoré sú krehké sa vylučujú na hraniciach zŕn a výrazne znižujú ťažnosť (až o polovicu), húževnatosť a pevnosť, zvyšujú tvrdosť LGG. Jeho max. obsah je požadovaný pod 0,03 %, prípustný do 0,10 % (pre perlitické liatiny).

Karbidotvorné nečistoty – stabilizujú karbidy (Mn, Cr, V, B, Te, Mo) a zhoršujú najmä plastické vlastnosti.

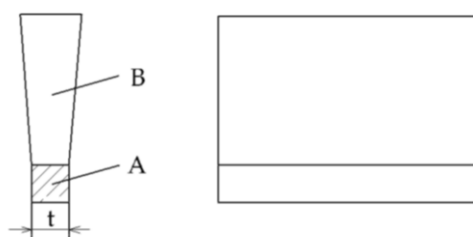
Škodlivé antiglobulizačné prvky – (Pb, Al, Sb, As, Bi, ...) už pri veľmi nízkych obsahoch degradujú tvar guľôčiek grafitu.

Mechanické vlastnosti nie sú príliš závislé na uhlíkovom ekvivalente, ale predovšetkým na štruktúre základnej kovovej hmoty. Liatiny s feritickou štruktúrou majú veľmi dobré plastické a dynamické vlastnosti, perlit spôsobuje zvýšenie pevnosti a tvrdosti a pokles ťažnosti. Zvýšenie podielu perlitu sa dosahuje pri vyššom obsahu mangánu alebo pomocou legúr stabilizujúcich perlit (najmä Cu). Pri LGG je nutné udržiavať čo najnižší obsah fosforu, karbidotvorných prvkov a ďalších nečistôt, najmä degradujúcich guľôčok grafitu.

Modul pružnosti liatin s guľôčkovým grafitom je vyššia, než u liatiny s lupienkovým grafitom a pohybuje sa v rozmedzí približne $(1,6 - 1,85 \cdot 10^5 \text{ MPa})$.

Vrúbová húževnatosť liatiny s guľôčkovým grafitom závisí predovšetkým na jej štruktúre. Hodnota nárazovej práce je normou predpísaná iba u značiek s pevnosťou 350 a 400 MPa. Zisťuje sa na skúšobných telesách s V – vrubom.

Skúšobné vzorky pre skúšku mechanických vlastností LGG sa vyrábajú z oddelene liatych alebo na odliatkoch priliatych skúšobných telies. V zlievarňach sa ako oddelene liate telesá používajú najmä tzv. Y – bloky (**obr. 1.6**), ktorých rozmery sa volia v súlade so štandardnou hrúbkou stien odliatkov tak, aby rýchlosti ochladzovania skúšobného telesa a odliatku sa čo najviac blížili. Skúšobné vzorky sa vyrábajú zo spodnej časti telesa, označené A, časť B je náliatok.



typ bloku	t [mm]
I	12,5
II	25
III	50
IV	75

Obr. 1.6 Skúšobné teleso tvaru Y

1.4 Charakteristika temperovanej liatiny

Vyrába sa tepelným spracovaním bielej liatiny. Grafit je v týchto liatinách v tvare vločiek, preto sa táto liatina často nazýva tiež ako liatina s vločkovým grafitom.

Temperované liatiny sa rozdeľujú do dvoch skupín (podľa EN 1562):

- temperovaná liatina s bielym lomom (GJMW)
- temperovaná liatina s čiernym lomom (GJMB).

Temperovaná liatina s bielym lomom sa získava žiňaním východzej bielej liatiny v oxidačnej atmosfére. Uhlík je z odliatkov čiastočne alebo úplne odstránený (v tenkých prierezoch). Stupeň oduhličenia závisí od atmosféry, doby žiňania a hrúbky steny odliatku. Temperovaná liatina s bielym lomom preto vykazuje štruktúru závislú od hrúbky steny smerom od povrchu do stredu so stúpajúcim obsahom uhlíka vzniká:

ferit → pribúdajúci podiel perlitu → + výskyt temp. ulíka → perlit + temperový vločkový grafit v strede

Temperovaná liatina s čiernym lomom sa získava žiňaním východzej bielej liatiny v neutrálnej atmosfére. Vylúčený temperový uhlík (vločkový grafit) v štruktúre zostáva. Štruktúra odliatkov je nezávislá od hrúbky stien odliatku a je teda rovnaká vo všetkých prierezoch. Štruktúra základnej hmoty je feritická alebo perlitická.

Mechanické vlastnosti sa zisťujú na valcových skúšobných tyčiach s priemerom Ø 12 alebo 15 mm.

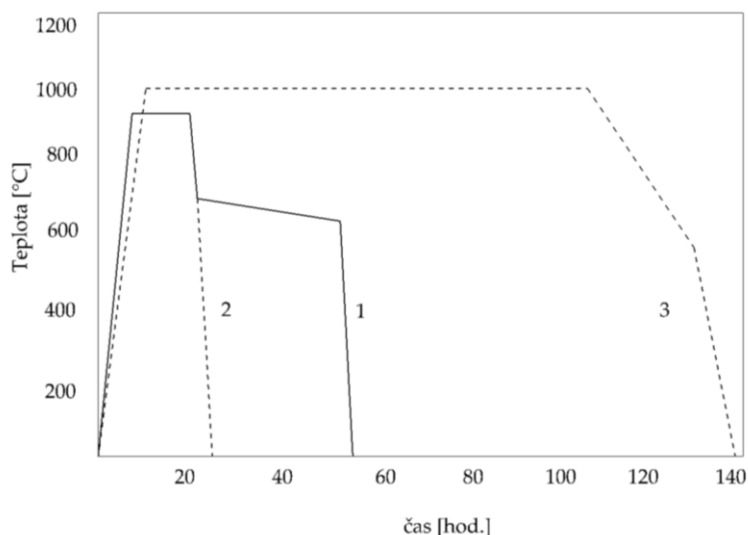
Temperovanie je spôsob tepelného spracovania odliatkov z podeutektickej bielej liatiny. Jedná sa vlastne o dlhotrvajúce žiňanie za účelom dosiahnutia grafitizácie ledeburitického, resp. perlitického cementitu. Cementit sa môže odstrániť dvoma spôsobmi:

- oduhličeníím,
- rozkladom v tuhom roztoku (austenit alebo ferit), kedy sa cementit rozpadá na grafit a príslušný tuhý roztok.

Výroba temperovanej liatiny oduhliččením prebieha pri teplotách okolo 980 až 1000 °C, **obr. 1.7**, krivka 3. Pri takejto teplote dochádza k oduhliččeniu povrchu, čím vzniká koncentračný spád uhlíka od povrchu k jadrú. Dochádza teda k difúzii atómov uhlíka z jadra na povrch odliatku a znižuje sa obsah uhlíka v austenite. V dôsledku toho začína postupné rozpúšťanie karbidov v austenite. Cementit sa rozpadá na austenit (tuhý roztok) a grafit. Po úplnom rozpustení karbidov sa rovnováha udržiava difúziou uhlíka do austenitu z povrchových vrstiev odliatku.

Ochladením liatiny po temperovaní vzniká v miestach, kde bol austenit ochudobnený o uhlík ferit, vo vnútorných menej oduhliččených vrstvách vzniká zmes feritu a perlitu.

Výroba temperovanej liatiny rozpadom v tuhom roztoku prebieha grafitizáciou v dvoch stupňoch v neutrálnom prostredí (H_2 , N_2 , CO_2), **obr. 1.7**, krivka 1. Prvý stupeň grafitizácie prebieha pri teplotách okolo 950 °C, pokiaľ sa úplne nerozpadne ledeburitický cementit na austenit a temperovaný uhlík (grafit). Po prvom stupni grafitizácie nastáva ochladzovanie na teplotu druhého stupňa (700 °C) a zotrvanie na tejto teplote určitý čas, ktorý je potrebný na rozpad perlitického cementitu na ferit a grafit. Nasleduje pomalé ochladzovanie z teploty druhého stupňa grafitizácie, aby sa neporušila stabilná rovnováha. Výsledná štruktúra bude tvorená feritom a grafitom.



Obr. 1.7 Temperovanie odliekov z bielej liatiny: 1-výroba rozpadom v tuhom roztoku; 3-výroba oduhliččením

Mechanické vlastnosti a chemické zloženie temperovaných liatin podľa EN 1562 dokumentuje **tab. 1.9**.

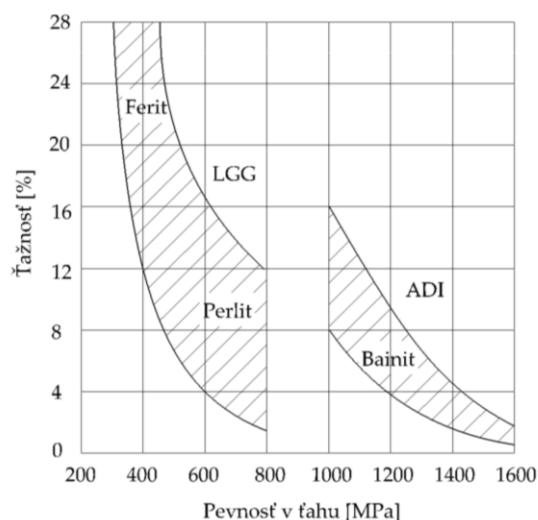
Tab. 1.9 Mechanické vlastnosti a chemické zloženie temperovaných liatin

	Druh liatiny		
	s bielym lomom	s čiernym lomom	
		feritická	perlitická
R_m [MPa]	350 – 450	300 – 350	450 – 700
Ťažnosť A3 [%]	4 – 10	6 – 12	2 – 7
Tvrdosť HB	200 – 230	max. 150	150 – 290
C [%]	2,8 – 3,4	2,4 – 2,8	2,0 – 2,8
Si [%]	0,4 – 0,8	0,9 – 1,5	0,7 – 1,2
Mn [%]	0,2 – 0,4	0,3 – 0,5	0,4 – 1,0
P [%]	max. 0,1	max. 0,1	max. 0,1
S [%]	max. 0,2	max. 0,15	max. 0,12

1.5 Izotermicky kalená liatina s guľôčkovým grafitom – ADI

Je to izotermicky kalená LGG, v ktorej sa vysoké mechanické vlastnosti dosahujú legovaním s Ni, Cu a najmä tepelným spracovaním, pri ktorom vzniká zvláštna austeniticko – feritická matrice, v ktorej sú uložené guľôčky grafitu. Táto liatina patrí k progresívnym vysokoakostným materiálom. Označuje sa ako „ADI“ – „Austempered Ductile Iron“. Matrica bola pôvodne považovaná za bainitickú a liatiny označované ako bainitické tvárne liatiny.

Porovnanie dosahovaných hodnôt pevnosti v ťahu a ťažnosti klasických LGG s feritickou alebo perlitickou štruktúrou a liatinami ADI na **obr. 1.8.** dokumentuje vysoké akostné parametre liatiny ADI.



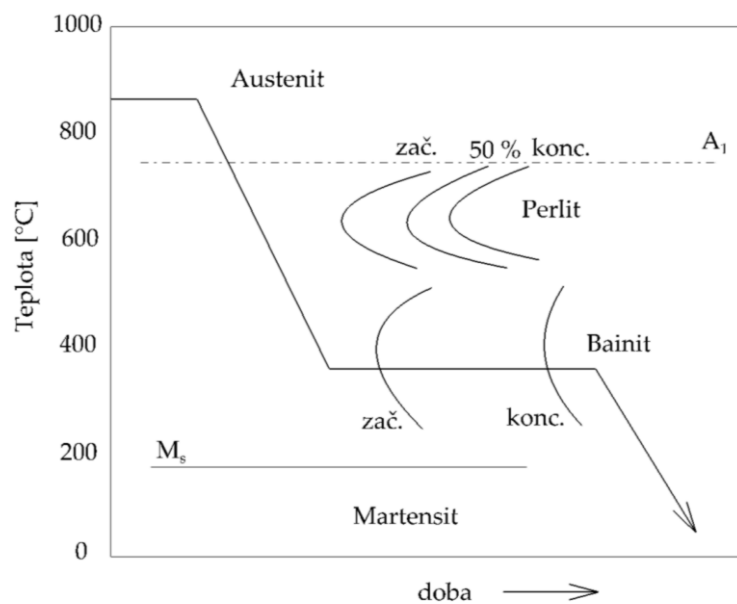
Obr. 1.8 Porovnanie pevnosti v ťahu a ťažnosti LGG s ADI

Rozdelenie bainitických liatin podľa mechanických vlastností, ktoré sú zisťované na vzorkách po trieskovom opracovaní z oddelene odliatych kusov do 4 akosti podľa EN 1564 dokumentuje **tab. 1.10**.

Tab. 1.10 Mechanické vlastnosti bainitických liatin LGG podľa EN 1564

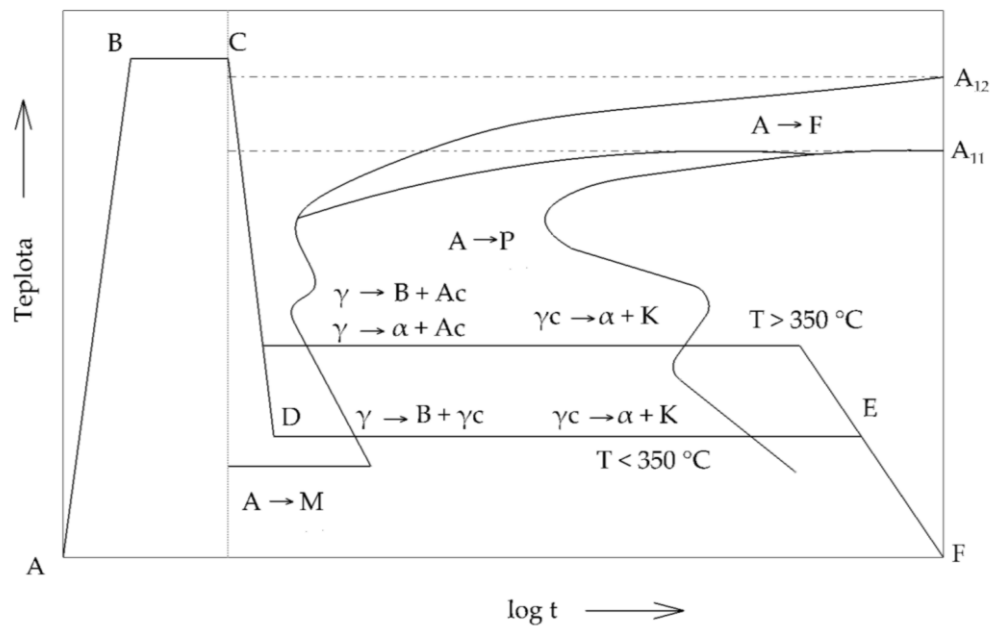
Označenie	Číslo	R _m min [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	Ťažnosť A5 [%]	Tvrdosť HB
EN-GJS-800-8	EN-JS 1100	800	500	8	260 – 320
EN-GJS-1000-5	EN-JS 1110	1000	700	5	300 – 360
EN-GJS-1200-2	EN-JS 1120	1200	850	2	340 – 440
EN-GJS-1400-1	EN-JS 1130	1400	1100	1	380 – 480

Bainitická liatina s optimálnymi mechanickými vlastnosťami sa získava izotermickým zušľachťovaním LGG, **obr. 1.9**.



Obr. 1.9 Diagram rozpadu austenitu – izotermické zušľachťovanie

Proces tepelného spracovania sa rozdeľuje na štyri etapy (**obr. 1.10**):



Obr. 1.10 Priebeh izotermického zušľachťovania LGG v diagrame IRA

1. Ohrev odliatku na austenitizačnú teplotu (A – B), pričom výdrž (B – C) má byť tak dlhá, aby základná hmota získala rovnomerné rozloženie obsahu uhlíka.
2. Rýchle ochladenie odliatku (C – D) tak, aby pred dosiahnutím teploty izotermického rozpadu nemohla nastať žiadna iná premena austenitu.
3. Výdrž odliatku na zvolenej teplote izotermickej premeny austenitu (D – E) tak dlho, kým želaný podiel štruktúry nie je premenený na bainit.
4. Ochladzovanie na izbovú teplotu (E – F) sa uskutočňuje pomaly, aby sa zabránilo vzniku napätí.

Pri premene na bainitickom stupni sa tvorí najprv ihlicovitý až doštičkovitý ferit, ktorý rastie z austenitu s uvoľňovaním uhlíka. Uhlík je vo ferite už nerozpustný a nasycuje zvyškový austenit. Vylučovanie uhlíka vo forme karbidov je v dôsledku vysokého obsahu kremíka (oproti oceliam) v základnom materiáli potláčané.

Výroba ADI vyžaduje dokonalé zvládnutie výroby kvalitnej LGG už v liatom stave. Štruktúra východzej liatiny musí mať dokonale vylúčený guľôčkový grafit s nodularitou min. 80 – 90 %, rovnomerne rozložené guľôčky v počte min. 150 mm². Štruktúra musí byť bez voľných karbidov (max. 0,5 %), odmiešania, pórovitosti a iných zlievarenských chýb.

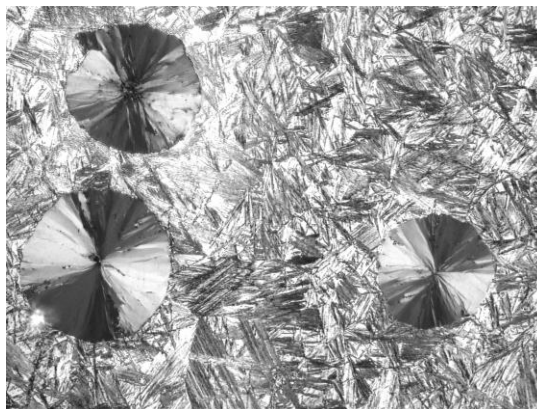
Obsah C je od 3,7 % pre hrúbky steny 5 až 25 mm s poklesom až na 3,3 % pri 100 mm hrúbke.

Obsah Si sa pohybuje medzi 2,4 % pri 5 až 25 mm hrúbke steny a 1,9 % pri hrúbke steny okolo 100 mm.

Obsah Mn má byť čo najnižší (Mn do 0,2 %), keďže segreguje na hraniciach zŕn, čím predlžuje v týchto miestach dobu výdrže pri izotermickej premene austenitu a tak vznik martenzitu na hraniciach zŕn. Znižuje sa tým pevnosť, ťažnosť a húževnatosť liatiny. Dôležitý je obsah legúr Ni, Mo, Cu a ich kombinácia. Načastejšie obsahy 0,3 – 1,0 % Mo, alebo 1,0 – 2,3 % Ni, resp. 1,0 – 1,7 % Cu.

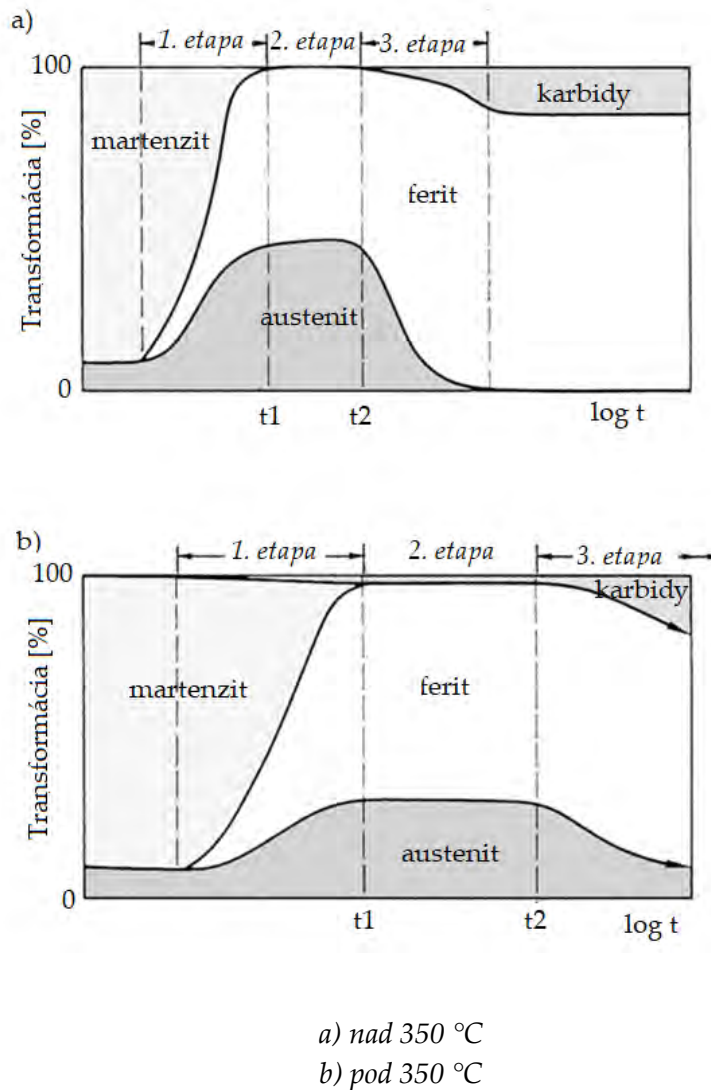
Teplota izotermickej premeny a doba výdrže na tejto teplote určuje výslednú štruktúru a vlastnosti zušľachteného odliatku. **Pri vyšších teplotách 370 až 450 °C** sa získa ADI s nižšími pevnostnými vlastnosťami a tvrdosťou, s vyššou ťažnosťou a húževnatosťou, a s lepšími únavovými vlastnosťami. **Nižšie teploty 230 až 350 °C** izotermickej premeny austenitu sa využívajú pri požiadavkách na vyššiu pevnosť, tvrdosť a odolnosť proti opotrebeniu, ťažnosť a húževnatosť klesá.

Štruktúra izotermicky zušľachtenej liatiny ADI pozostáva z ihlicovitého až doštičkového feritu. V tejto základnej hmote sú uložené pôvodné guľôčky grafitu. Štruktúra má byť bez perlitu, bainitických karbidov a martenzitu. Typická mikroštruktúra ADI je znázornená na **obr. 1.11**.



Obr. 1.11 Mikroštruktúra ADI

Bainitická premena LGG rozlišuje v jej priebehu dve, resp. tri etapy, **obr. 1.12**.



Obr. 1.12 Štruktúrne zmeny matrice ADI pi izotermickej premene austenitu v bainitickej oblasti

Za vyšších teplôt izotermickej premeny austenitu, **nad 350 °C (obr. 1.12 a)** prebieha v prvej etape vylučovanie bainitického doskovitého feritu (α_B). Zostávajúci netransformovaný austenit sa obohacuje uhlíkom (γ_C).

Priebeh premeny v 1. etape je možné popísať schématicky $\gamma \rightarrow \alpha_B + \gamma_C$, čiže austenit $\rightarrow$ bainitický ferit + stabilizovaný zvyškový austenit.

V 2. etape klesá reakčná rýchlosť a premena prakticky ustáva. Štruktúra je tvorená bainitickým feritom a stabilizovaným austenitom – ausferit. Zmeny v štruktúre v 3. etape izotermickej výdrže charakterizuje premena uhlíkom obohateného austenitu na feriticko – karbidickú zmes podľa schémy $\gamma_C \rightarrow \alpha + K$. Zvyšovanie jej podielu

v priebehu 3. etapy je sprevádzané znižovaním plasticity a húževnatosti ADI a obvykle miernym zvýšením tvrdosti.

Priebeh izotermickej premeny v oblasti dolného bainitu, **pod 350 °C** sa viac blíži bainitickej premene ocelí.

V 1. etape s najvyššou reakčnou rýchlosťou sa z austenitu vylučujú dosky bainitického feritu. Jeho vylučovanie má za následok obohacovanie nepremeného austenitu uhlíkom. Priebeh izotermickej premeny v tejto etape je možné napísať schémou $\gamma \rightarrow B + \gamma_c$.

2. etapa je charakterizovaná koncentráciou uhlíka v netransformovanom austenite a maximálnym množstvom stabilizovaného austenitu (15 až 20 %) v štruktúre.

Priebeh 3. etapy sa dá podobne ako v oblasti horného bainitu vyjadriť schémou $\gamma_c \rightarrow \alpha + K$. Začiatok a koniec tejto etapy sú však posunuté výrazne k dlhším časom.

1.6 Charakteristika liatiny s červíkovitým grafitom (vermikulárna liatina)

Liatina s červíkovitým grafitom (LČG) je nelegovaná grafitická liatina s približne eutektickým zložením:

3,2 - 3,6 % C	CE = 4,2 - 4,4
2,7 - 3,2 % Si	
0,1 - 0,6 % Mn	
max. 0,1 % P	
max. 0,02 % S	

Mechanické vlastnosti sa pohybujú medzi vlastnosťami LLG a LGG, orientačné hodnoty sú:

R _m	= 300 – 500 MPa
R _{p0,2}	= 250 – 350 MPa
A ₅	= 3 – 6 %
E	= (1,3 – 1,6).10 ⁵ MPa
HB	= 150 – 240

Mechanické, fyzikálne a zlievarenské vlastnosti LČG sú ovplyvňované obvyklou prítomnosťou aj guľôčkového grafitu v štruktúre liatiny. Zvyšovaním jeho podielu sa

mierne zvyšujú pevnosť a ťažnosť liatiny, ale znižuje sa tepelná vodivosť. Štruktúra týchto liatin je obyčajne feriticko – perlitická.

Kryštalizácia červíkovitého grafitu je prevádzaná zvýšeným eutektickým podchladením (na krivkách chladnutia), takmer rovnakým ako pri LGG. Základom vzniku ČG je drobný guľôčkový grafit vylúčený medzi zrnami primárneho austenitu. Premena GG na ČG nastáva v priebehu eutektickej kryštalizácie.

Červíkovitý typ grafitu vzniká aj pri výrobe LGG pri jej nedostatočnom modifikačnom spracovaní, prípadne po odoznení očkujúceho účinku. Preto sa dá LČG označiť ako „zle vyrobená“ resp. „podmodifikovaná“ LGG. Červíkovitý grafit je vlastne „prechodový, „degenerovaný“ typ grafitu, a preto zámerné dosiahnutie jeho kryštalizácie a výskytu v štruktúre v množstve nad 80 % a bez prítomnosti lupienkového grafitu je výrobne veľmi náročné.

Základné výrobné postupy výroby LČG sú:

- A. Postup ako pri výrobe LGG, ale so zámerným „podspracovaním“ t.j. so zníženým množstvom pridávaného horčíka alebo horčíkovej predzliatiny. Táto metóda je z technologicko-prevádzkového hľadiska najťažšie prevediteľná, lebo obsah zvyškového Mg, pri ktorom sa vytvorí červíkovitý grafit, má výrazne úzky interval medzi 0,015 – 0,022 % Mg_{zvyš.}, takže prakticky vždy vzniká väčší alebo menší podiel guľôčkového grafitu.
- B. Spracovanie taveniny horčíkom ale pri súčasnom pridaní prvkov rušiacich tvorbu guľôčkového grafitu. K riadeniu nodularity grafitu sa aplikujú antiglobulizačné prvky Pb, Ti, Al, Sb, Sn a pod. Metódy spracovania (modifikácie) tekutého kovu sú rovnaké ako pri výrobe LGG.
- C. Modifikácia tekutej liatiny komplexnými zliatinami kovov vzácnych zemín (KVZ) s vysokým obsahom céru. Zliatina obsahuje až 99 % KVZ, je možné použiť aj predzliatiny typu Si – KVZ obsahujúce 30 – 35 % KVZ. Obsah síry vo východzej tavenine musí byť pod 0,02 % presne dodržaný $\pm 0,001$ % S. Obecne platí, že čím viac síry tavenina obsahuje, tým väčšie množstvo modifikátora je potrebné. Dávkovanie Ce – KVZ sa uskutočňuje pri odpichu do panve.

- D. Výroba LČG spracovaním východzej taveniny s vysokým obsahom síry (0,07 až 0,13 % S) s predzliatinou Mg – Ce s malým obsahom Al a Ca. Pre dosiahnutie červíkovitého grafitu je potrebná prísada predzliatiny v množstve do 1,8 % v závislosti od obsahu síry pri exaktnom dodržaní teploty spracovania medzi 1475 – 1520 °C. Pri tomto postupe, umožňujúcim spracovanie liatiny z kuplovne vzniká veľké množstvo sírníkov, ktoré sako nečistoty (vtrúseniny) znižujú kvalitu odliatkov.
- E. Výroba LČG súčasným pridávaním Ce a Ca do roztavenej liatiny obsahujúcej až 0,1 % S. Pri tejto metóde sa tavenina spracuje pridaním zliatiny Ce – KVZ s 50 % Ce spolu s CaSi (35 % Ca). Tavenina sa následne očkuje. Prídavky Ce a Ca závisia od počiatočného obsahu síry v základnej liatine. V liatine s nízkym obsahom síry (0,02 %) sa získa dobrý červíkovitý grafit pri 0,5 % Ca a 0,054 % Ce. Liatina s vyšším obsahom síry vyžaduje aj vyššie prídavky Ca a Ce. Liatinu je nutné následne očkovať.

1.7 Štruktúra liatin

Vlastnosti a kvalita liatin úzko súvisí s ich kryštalizáciou a štruktúrou. Výsledná štruktúra liatin závisí predovšetkým na chemickom zložení a na rýchlosti ochladzovania odliatku. Značne ju ovplyvňuje tiež metalurgia t.j. technológia jej výroby (tavenia a odlievania) príp. jej mimopecná úprava.

Hodnotenie základných štruktúrnych zložiek liatin – grafitu, feritu, perlitu, cementitu a steaditu predpisuje norma STN 42 0461 (príp. EN). Predpisuje jednotný postup na určenie charakteristiky vyrábaných liatin.

1.7.1 Grafit

Grafit je najvýznamnejší, pretože najviac ovplyvňuje mechanické a fyzikálne vlastnosti liatin. Je to nekovová štruktúrna zložka, na metalografickom výbruse sa pozoruje v neleptanom stave ako tmavosivé až čierne častice. Jeho pevnosť a tvrdosť sú nepatrné. Porušuje celistvosť základnej kovovej hmoty (oceľovej), znižuje jej efektívny prierez a tým znižuje jej mechanické vlastnosti, najmä pevnosť a výrazne ťažnosť.

Dôležitou vlastnosťou grafitu je jeho nízka hustota, resp. vysoký merný objem, ktorý je 3,2 krát väčší oproti základnej kovovej hmote. Merná hustota grafitu je 2207 g.dm^{-3} a merná hustota kovovej hmoty v závislosti od typu je 7194 až 7874 g.dm^{-3} . Merný objem grafitu je $0,4539 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$ pričom merná hmotnosť kovových zložiek je len 0,127 až $0,139 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$.

Vylučovanie grafitu s tak vysokým merným objemom v priebehu kryštalizácie (grafitizácie) vyvoláva značné objemové a dĺžkové zmeny v odliatku.

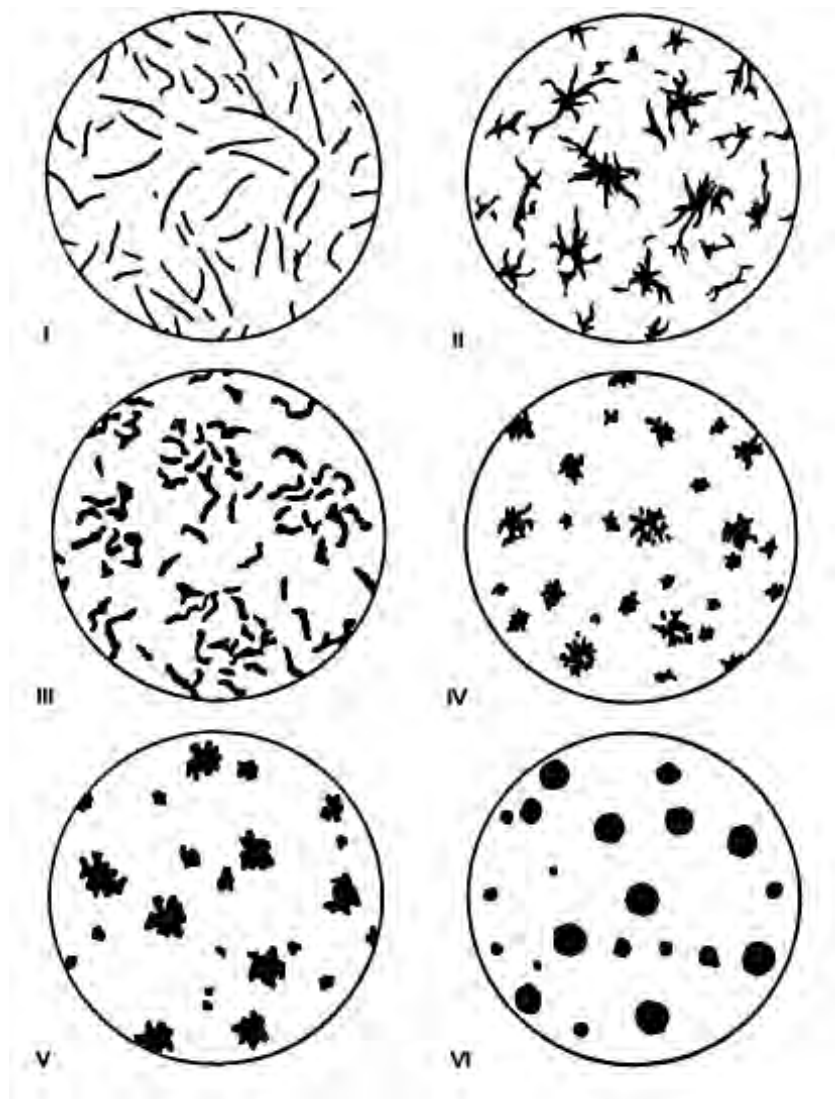
Výsledné vlastnosti liatin úzko súvisia s tvarom, veľkosťou, množstvom a rozložením grafitu. Výsledok grafitizácie závisí od podmienok metalurgického spracovania a rýchlosti ochladzovania liatiny.

Hodnotenie tvaru grafitu a jeho zloženie určuje STN 42 0461, resp. EN ISO 945. Táto norma rozdeľuje grafit do 6-tich tried, **obr. 1.13**. Z nich II. a V. sú nežiaduce tvary grafitu, zhoršujú kvalitu liatin.

V nadeutektických liatinách ($\text{CE} > 4,3 \%$) môže vznikáť veľmi hrubý **primárny grafit**, ktorý je menej vhodný ako podeutektický. Vylučuje sa priamo už z tekutého kovu a čiastočne vypláva už na hladinu kovu v pánve, alebo v hrubostenných odliatkoch tvorí grafitické zhluky – hniezda. Časť primárneho grafitu ostáva v štruktúre materiálu.

Eutektický grafit sa vylučuje z taveniny s eutektickým zložením z presýteného roztoku austenitu.

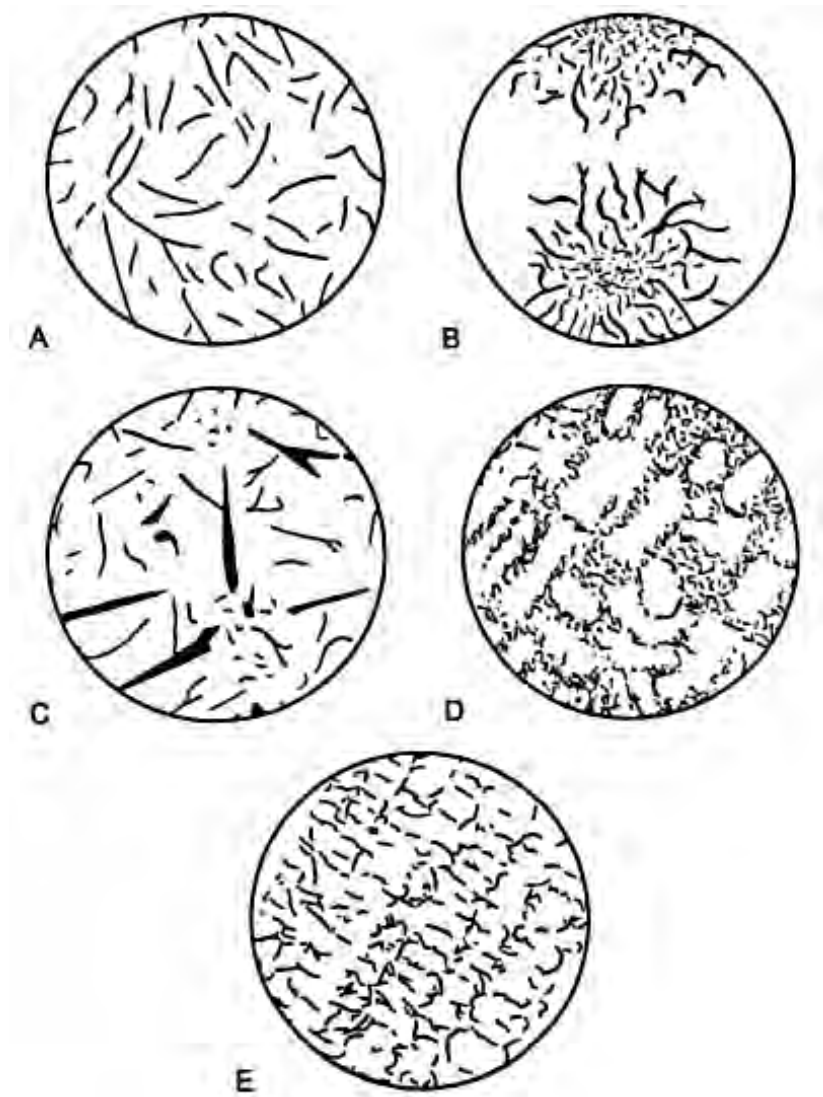
Sekundárny grafit sa vylučuje z perlitu, rozpadom perlitického cementitu najmä pri grafitizačnom žíhaní (zvyšuje sa pri tom podiel feritu v štruktúre).



*I - lupienkový grafit, II - pavúčkový grafit, III - červíkovitý grafit,
IV - vločkový grafit, V - nedokonale zrnitý grafit, VI - pravidelne zrnitý*

Obr. 1.13 Tvar grafitu

Rozloženie grafitu môže byť v štruktúre vo forme pravidelných, rovnomerne veľkých útvarov, alebo nerovnomerne, kedy sú útvary nerovnako veľké, alebo miestami sú nahromadené (zhluky). Rozloženie grafitu sa podľa normy hodnotí podľa etalónovej rady, uvedené na **obr. 1.14** do 5-tich tried a značí sa:



*A - rovnomerné rozloženie, B - ružicovité rozloženie, C - zmiešané rozloženie,
D - medzidendritické neusmernené rozloženie, E - medzidendritické usmernenie*

Obr. 1.14 Rozloženie grafitu

Z hľadiska vlastností liatin je optimálne rozloženie typu A – grafit rovnomerne rozložený s rovnomernou veľkosťou. Nepravidelné rozloženie a výskyt hrubých grafitových útvarov je príčinou horších mechanických vlastností.

Typy grafitu D a E sa nazývajú tiež ako prechladený grafit, vznikajú pri nedostatku kryštalizačných zárodkov a pri rýchlom ochladzovaní a nie sú prechodom od stabilného k metastabilnému tuhnutiu.

Veľkosť grafitu z hľadiska mechanických vlastností je u všetkých typov liatin výhodný jemnozrnný grafit, vylúčený vo forme drobných lupienkov alebo guľôčok. Zvlášť prítomnosť hrubých lamiel grafitu významne znižuje mechanické vlastnosti liatiny.

Veľkosť grafitu sa hodnotí metalograficky. Veľkosť lupienkov sa hodnotí ich dĺžkou udávanou v μm (STN 42 0461). Veľkosť (disperzita) guľôčkového grafitu sa hodnotí podľa počtu guľôčok na mm^2 plochy výbrusu (obvyčajne 80 – 500 guľôčok/ mm^2). Vyhodnocovanie sa robí obvykle opäť pomocou etalónov.

Základnú kovovú hmotu v nelegovaných liatinách za normálnej teploty tvoria: ferit, perlit prípadne ledeburit. Legovaním alebo tepelným spracovaním je možné získať taktiež austenit, martenzit, bainit alebo komplexné karbidy.

Štruktúra základnej kovovej hmoty závisí od:

- chemického zloženia liatiny,
- rýchlosti ochladzovania v priebehu tuhnutia a chladnutia,
- stavu kryštalizačných zárodkov,
- tepelného spracovania.

1.7.2 Ferit

Vzniká pri eutektoidnej transformácii austenitu podľa stabilného diagramu. Pomalé ochladzovanie podporuje vznik feritu.

Mechanické vlastnosti feritu: mäkký, tvárny, má relatívne nízku pevnosť, dobre obrobiteľný, v liatinách je nositeľom húževnatosti a plastických vlastností. Na vlastnosti feritu majú značný vplyv legúry a doprovodné prvky. Všetky prísady zvyšujú tvrdosť a pevnosť feritu a majú taktiež vplyv na jeho húževnatosť. Pomerne významné je zníženie húževnatosti feritu s rastúcim obsahom kremíka.

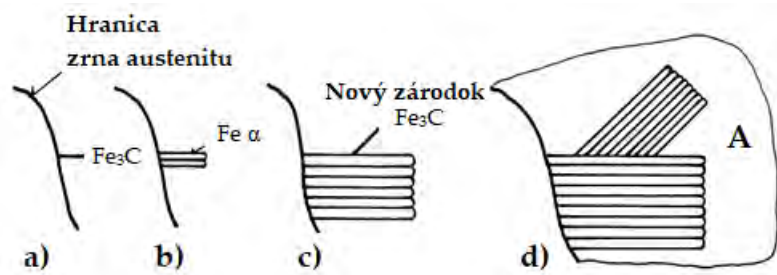
1.7.3 Perlit

Eutektoid vzniknutý rozpadom austenitu podľa metastabilného systému. Je tvorený feritom a perlitickým cementitom, ktorý mu dodáva väčšiu pevnosť a tvrdosť ako má ferit.

Perlit má dve morfológické formy - lamelárnu a globulárnu:

- **lamelárny perlit** - (v odliatkoch obvyklá forma - vzniká pri bežnom chladnutí odliatku), je tvorený lamelami feritu a cementitu, ktoré rastú rovnobežne vedľa seba.

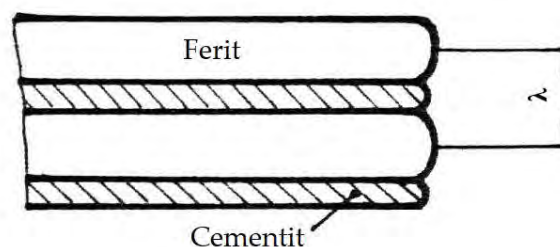
Z jedného zrna austenitu obvykle vzniká niekoľko zŕn perlitu s rozdielnou orientáciou lamiel, **obr. 1.15**.



Obr. 1.15 Schéma vzniku perlitu

- **globulárny** – vzniká obalením lamiel cementitu pri sferoidizačnom žíhaní. Liatiny s globulárnym perlitom majú v porovnaní s lamelárnym perlitom lepšiu obrábiteľnosť.

Vlastnosti perlitu: v porovnaní s feritom má perlit vyššiu pevnosť a tvrdosť, horšie plastické vlastnosti, horšiu obrábiteľnosť, vyššiu odolnosť proti opotrebovaniu. Perlit je v liatinách nositeľom pevnosti a tvrdosti (R_m asi 800 MPa, $HB = 280$). Vlastnosti perlitu významne závisia na "hustote perlitu" teda jeho disperzite. Disperzita je určená vzdialenosťou dvoch susediacich lamiel feritu, **obr. 1.16**. Čím je hustejší perlit, tým sú vyššie mechanické vlastnosti.



Obr. 1.16 Disperzita lamelárneho perlitu

1.7.4 Austenit

V nelegovaných liatinách je austenit stabilný len pri nadeutektoidných teplotách. V odliatkoch sa vyskytuje iba:

- v legovaných liatinách (hlavne legovaných niklom - nad 18% Ni)
- ako zvyškový austenit, po tepelnom spracovaní

Vlastnosti austenitu: mäkký, výborne tvárny, odolný proti korózii a proti pôsobeniu vysokých teplôt, paramagnetický. Austenitické liatiny sa používajú na výrobu žiaruvzdorných a korozivzdorných odliatkov.

1.7.5 Cementit

U nelegovaných liatin je tvorený karbidom železa Fe_3C s 6,67 %C. Za prítomnosti legúr (napr. Mn, Cr, W, V, Mo) môžu byť atómy Fe nahradzované atómami týchto prvkov za vzniku komplexných karbidov typu $(\text{Fe},\text{X})_3\text{C}$.

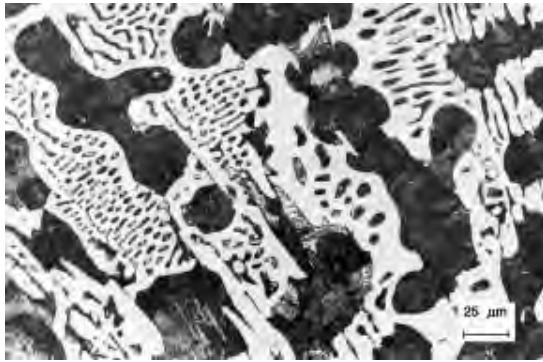
Vlastnosti cementitu: veľmi tvrdý (660 až 850 HB, komplexné karbidy i viac) a krehký. Pri vyššom obsahu v štruktúre sa liatina stáva neobrobiteľnou.

Druhy cementitu v liatinách:

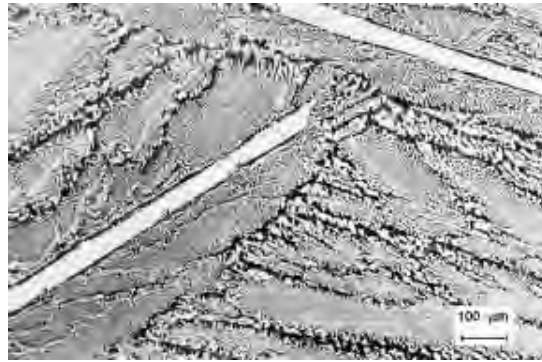
- primárny - vyskytuje sa v nadeutektických bielych liatinách v tvare hrubých ihlíc (vzniká zriedka)
- eutektický - súčasť metastabilného eutektika - ledeburitu. Spôsobuje veľkú tvrdosť, krehkosť a neobrobiteľnosť bielej liatiny.
- perlitický – súčasťou eutektoidu - perlitu. Zvyšuje pevnostné a znižuje plastické vlastnosti liatiny.

1.7.6 Ledeburit

Eutektikum v metastabilnej sústave Fe– Fe_3C , obsahuje 4,3 %C. Je tvorený austenitom a ledeburitickým cementitom, **obr. 1.17**. Pri eutektoidnej teplote ledeburitický austenit transformuje na perlit a vzniká tzv. transformovaný ledeburit. Ledeburit je jednou zo základných zložiek bielych liatin. V grafitických liatinách vzniká obvykle v miestach s rýchlym odvodom tepla ako tzv. zákalka.



a) podeutektická liatina – perlit a ledeburit



b) nadeutektická liatina – ihlice primárneho cementitu a ledeburitu

Obr. 1.17 Ledeburit

1.7.7 Martenzit

Vzniká bezdifúznym rozpadom austenitu pri kalení nelegovaných alebo legovaných liatin, v legovaných liatinách niekedy priamo v liatom stave. Martenzitické liatiny sa používajú len výnimočne.

Vlastnosti martenzitu: veľmi tvrdý (až nad 1000 HV), krehký.

1.7.8 Bainit (ausferit)

Vzniká ako liaca štruktúra v liatinách legovaných hlavne molybdénom a niklom, u nelegovaných liatin pri tepelnom spracovaní. Liatiny s bainitickou štruktúrou majú vysokú pevnosť a tvrdosť pri pomerne dobrých plastických vlastnostiach. Bainitické liatiny (správne sa nazývajú „izotermicky kalené liatiny“) patrí k moderným, vysoko progresívnym materiálom.

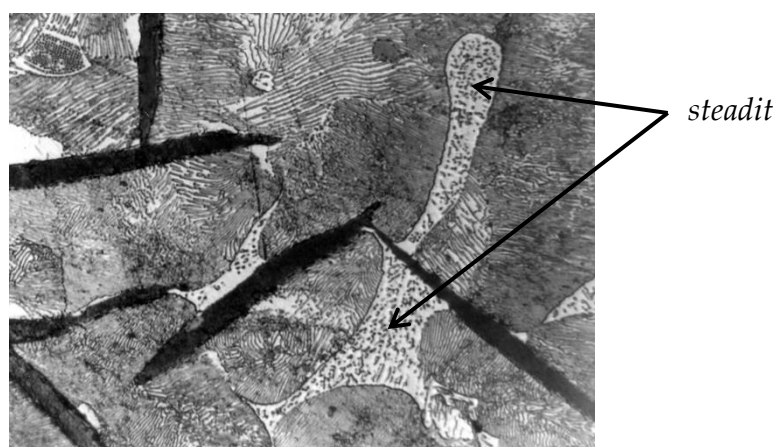
Základná kovová hmota nelegovaných grafitických liatin je obvykle tvorená feritom a perlitom. Podľa podielu oboch zložiek sa štruktúra označuje ako feritická, ferito-perlitická alebo perlitická.

1.7.9 Ďalšie štruktúrne zložky

Fosfidy (Fe_3P a Fe_2P)

Vznikajú v dôsledku malej rozpustnosti fosforu v železe a vylučujú sa na hraniciach zŕn. V liatinách v ternárnom systéme Fe – C – P vzniká fosfidické eutektikum – **steadit**. Má nízku teplotu tuhnutia (až pri teplotách okolo 950 °C). Vďaka tomu významne zlepšuje zabiehavosť liatiny.

V štruktúre sa vyskytuje už pri obsahu fosforu nad asi 0,1%. Vzhľad steaditu je na **obr. 1.18**.



Obr. 1.18 Fosfidické eutektikum

Vlastnosti fosfidu: tvrdý, veľmi krehký, vzhľadom k nepriaznivému vylúčeniu na hraniciach zŕn významne znižuje dynamické vlastnosti liatin. Výskyt fosfidov je hlavne u liatiny s guľôčkovým grafitom veľmi nežiadúci.

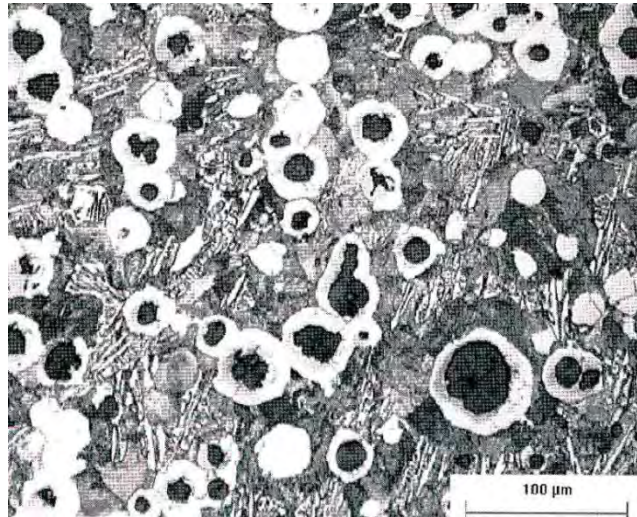
Sulfidy

V dôsledku obmedzenej rozpustnosti síra segreguje k hraniciam zŕn, kde spolu so železom tvoria sulfid železa FeS , s teplotou tuhnutia až okolo 952 °C. Sieťový FeS významne zvyšuje krehkosť a tekutosť liatiny. Za prítomnosti niektorých ďalších prvkov, hlavne mangánu vznikajú sulfidy týchto kovov (napr. MnS). Vznikajú vo vnútri zŕn, čo je priaznivejšie, než vznik FeS na hranici zŕn a negatívny vplyv síry je takto znížený.

Karbidy

Vznikajú za prítomnosti karbidotvorných prvkov, najčastejšie chrómu. V bežných nelegovaných liatinách môžu vznikať i karbidy, obsahujúce mangán - $(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{C}$,

hlavne na hraniciach zŕn (**obr. 1.19**). V nelegovaných liatinách je výskyt karbidov nežiadúci, lebo zvyšuje krehkosť a výrazne zhoršuje obrobiteľnosť. Ich vzniku sa zabráňuje zvýšeným očkovaním, u hotových odliatkov sa odstraňujú žíhaním.



Obr. 1.19 Karbidy na hraniciach zŕn v LGG

1.8 Fyzikálne vlastnosti liatin

Fyzikálne vlastnosti liatin sú ovplyvnené prítomnosťou grafitu v štruktúre, jeho tvarom a typom základnej kovovej hmoty. Dôležitými vlastnosťami, ktorými sa liatiny významne odlišujú od ocelí sú:

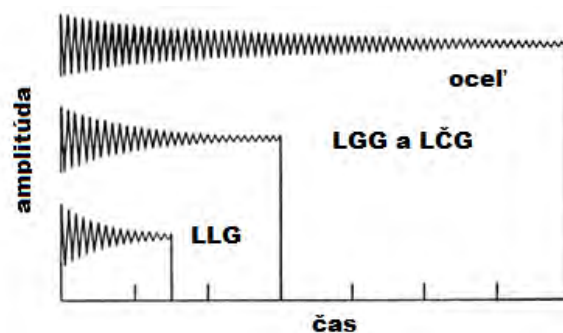
Merná hmotnosť (hustota) – znižuje sa s rastúcim množstvom vylúčeného grafitu. Je približne o 10 % nižšia ako hustota ocelí, za normálnej teploty obvyčajne v rozmedzí 7100 – 7300 kg.m⁻³. Merná hmotnosť kovu pri ohreve klesá v dôsledku teplotnej rozťažnosti a pri roztavení klesne skokom. Pri kryštalizácii grafitu (s malou mernou hmotnosťou), hustota liatiny sa znižuje a pri vzniku cementitu sa zvyšuje.

Tepelná vodivosť – súvisí s tvarom a množstvom vylúčeného grafitu a je podstatne vyššia ako tepelná vodivosť ocelí. Čím viac je v štruktúre grafit, tým väčšia tepelná vodivosť. Vodivosť LLG s hrubým grafitom je vyššia, ako u liatiny s jemným grafitom, tepelná vodivosť LLG je vyššia ako u LGG. Tepelná vodivosť LLG je v rozmedzí 45 – 67 W.m⁻¹.K⁻¹, u LGG je približne 25 – 38 W.m⁻¹.K⁻¹, u liatiny s červíkovitým grafitom je v rozmedzí 36 – 50 W.m⁻¹.K⁻¹.

Súčiniteľ tepelnej rozťažnosti – je u grafitických liatin menší ako u oceli a bežne sa pohybuje v rozmedzí $\alpha = 10 - 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dobrá tepelná vodivosť, nižší E – modul

pružnosti a menšia tepelná rozťažnosť ako má oceľ, vedie pri porovnaní s oceľami k vzniku menších teplotných napätí, menšiemu tepelnému borteniu odliatkov a k dobrej odolnosti voči praskaniu odliatkov.

Útlm – jedna z najvýznamnejších fyzikálnych vlastností liatin. Táto vlastnosť charakterizuje schopnosť materiálu tlmiť mechanické vibrácie. Vysoký útlm majú hlavne feritické LGG s hrubým lupienkovým grafitom. Útlm LGG je podstatne menší, no i tak tieto liatiny pohlcujú až 10 x väčšiu energiu ako ocele. Priebeh útlmu v rôznych zliatinách železa je na **obr. 1.20**.



Obr. 1.20 Útlm vibrácií v zliatinách železa

Oteruvzdornosť – je úmerná tvrdosti a závisí hlavne od štruktúry základnej kovovej hmoty, obyčajne je vyššia ako u bežných ocelí. Vyššia odolnosť proti opotrebeniu má perlitická štruktúra, hrubší grafit oteruvzdornosť znižuje. Priaznivý vplyv má fosfor vplyvom fosfidického eutektika. Vhodné je legovanie prvkami, ktoré zjemňujú perlit a sú karbidotvorné (Cr, V, Mn). Pri vyšších nárokoch na oteruvzdornosť je nutné voliť bielu liatinu.

Korózivzdornosť – je lepšia ako u ocelí vďaka vyššiemu obsahu kremíka. Je možné ju zvýšiť legovaním prvkami, ktoré majú vyšší elektrochemický potenciál (Cu, Mo, Ni) alebo prvkami, ktoré sú schopné tvoriť na povrchu ochranný povlak (Cr, Si, Al). Pri LLG je korózivzdornosť nižšia ako u LGG nakoľko korózia môže ľahšie postupovať pozdĺž lupienkov grafitu.

Žiaruvzdornosť – je nízka, i keď vyššia ako u bežných ocelí. Zvyšuje sa legovaním Si, Cr alebo Al. Narušovanie povrchu prebieha oxidáciou pozdĺž lupienkov grafitu u LLG, preto LGG rovnakého zloženia má použiteľnosť do teplôt o cca 100 °C vyšších.

Klzné vlastnosti – súvisia s vylúčeným grafitom, ktorý môže mazivo udržiavať, resp. sám pôsobí ako mazivo. Vhodný druh LLG (STN 42 2456) môže byť použitý na ložiskové puzdra namiesto bronzu.

1.9 Technologické vlastnosti

Zabiehavosť – LLG má veľmi dobrú zabiehavosť, ktorá je závislá na chemickom zložení a teplote odlievania. Vyššiu zabiehavosť podporuje najviac C, P a Si, pričom ich vplyv je úmerný hodnote uhlíkovému ekvivalentu zabiehavosti CE_z :

$$CE_z = C + \frac{\% Si}{4} + \frac{\% P}{2}$$

Pri nižších teplotách môže byť vplyv fosforu väčší ako vplyv uhlíka, pretože fosfor znižuje viskozitu liatiny a zlepšuje zmáčanlivosť formy tekutým kovom. Zvýšenie stupňa grafitizácie pôsobí priaznivo tým, že zväčšenie objemu pri vylučovaní grafitu lepšie zaplní formu.

Sklon k tvorbe stiahnutí – pri tuhnutí odliatkov, ktorý súvisí so zmenšovaním objemu pri klesajúcej teplote (so zmrašťovaním). LLG (podobne i LGG) má voči ostatným materiálom odlišné chovanie. V určitom teplotnom intervale v priebehu tuhnutia odchádza ku grafitizácii, ktorá spôsobuje zväčšenie objemu (predzmrašťovacie rozťahnutie) a zmenšuje tak celkové zmraštenie. U bielej liatiny je zmraštenie väčšie, podobne ako u ocelí.

Pri eutektickom zložení alebo jemu blízkom je zmraštenie malé, preto odliatky nie je potrebné náliatkovať, pokiaľ sa nejedná o veľké tepelné uzly. Znižovanie stupňa eutektickosti (Sc) vedie k zväčšovaniu sklonu k sťahovaniu. Predzmrašťovacie rozťahnutie môže mať negatívny vplyv pri liatí do málo pevných foriem (na syrovo), kde spôsobí deformáciu formy a tým zväčšenie jej objemu. Pri pokračujúcom zmrašťovaní dochádza k vzniku neočakávaných stiahnutí.

Sústredené stiahnutiny vznikajú pri eutektickom zložení aj blízkom tomuto zloženiu, kde je malý interval tuhnutia. So zväčšovaním intervalu tuhnutia sa zvyšuje sklon k tvorbe rozptýlených stiahnutí. Zvýšením teploty odlievania sa zväčšuje objem stiahnutí, súčasne sa podporuje vznik sústredených stiahnutí. Pri LLG je objem stiahnutí do 3 %.

Zmrašťovanie (lineárne) – je zmenšenie rozmerov odliatku voči rozmerom dutiny formy (modelu). Závisí na fyzikálnej hodnote tepelného zmraštenia, na stupni grafitizácie (vrátane vplyvu rýchlosti ochladzovania) a vplyvu prekryštalizácie (eutektoidnej premeny).

Chemické zloženie sa priamo podieľa na výslednom zmrašťovaní vplyvom jednotlivých prvkov, ale hlavne ich pôsobením na grafitizáciu. Veľký vplyv môže mať na mechanicky brzdené zmrašťovania odporom formy alebo jadier, ktoré znižuje veľkosť voľného zmraštenia. Pri veľkých a zložitejších odliatkoch môže byť v rôznom smere zmrašťovanie rozdielne. Hodnoty lineárneho zmraštenia LLG (vrátane vplyvu brzdeného zmrašťovania) sa pohybujú v rozpätí 0,5 až 1,3 % - najčastejšie 1 % dĺžky.

Sklon k vzniku napätí – súvisí s rozdielnym zmrašťovaním odliatku vplyvom nerovnomerného chladnutia (Δt rozdielnych teplôt, tepelné napätia), vplyvom fázových premien a vznikom štruktúrnych zložiek odlišného merného objemu voči pôvodnej fáze (fázové napätie) i mechanickým odporom formy alebo jadier voči zmrašťovaniu (zmrašťovacie napätia). Hodnoty napätí sa v priebehu ochladzovania menia, po vychladnutí zostávajú v odliatku (zvyškové pnutia).

Pri poddajnej konštrukcii odliatku sa môže časť napätí uvoľniť plastickou deformáciou t.j. zbortením odliatku.

Pri nepoddajnej konštrukcii odliatku sa pnutie uvoľniť nemôže. Pokiaľ jeho hodnota presiahne pevnosť materiálu, dôjde k vzniku prasklín. Veľkosť pnutí je úmerná zmrašteniu, modulu pružnosti a rozdielu teplôt:

$$\sigma \approx \alpha \cdot E_0 \cdot \Delta t \quad [MPa]$$

Pri odliatkoch z LLG vznikajú pomerne nízke hodnoty napätí, avšak tieto napätia sú nebezpečné pre jej nízku pevnosť a malú plasticitu.

Sklon k tvorbe zákaliiek – súvisí so sklonom k vzniku rozdielnych mechanických vlastností v rôznych hrúbkach odliatku. V rohoch odliatku, resp. v jeho tenších stenách závisí od charakteru tvorby štruktúry kovovej základne a grafitu. Hodnotí sa zákalkovými skúškami, napr. klinovou skúškou. Sklon k bielemu tuhnutiu a tvorbe karbidov môžu spôsobiť najmä nekontrolované legúry, najmä karbidotvorných prvky.

Obrátená zákalka – vzniká občas v hrubých stenách odliatku v dôsledku segregácii fosforu a síry pri pomalom tuhnutí.

Sklon k vzniku rozdielnych mechanických vlastností v rôznych hrúbkach odliatku je nežiadúcim javom najmä pri použití zvýšeného podielu ocele vo vsádzke (syntetická liatina). Táto vlastnosť je zatiaľ málo preskúmaná a najčastejšie je pripisovaná nadusičeniu liatiny. Môže sa potlačiť nízkou prísadou titánu.

Obrobiteľnosť – je schopnosť materiálu k trieskovému opracovaniu. LLG má oproti oceli s rovnakou tvrdosťou podstatne lepšiu obrobiteľnosť. Grafit zlepšuje obrobiteľnosť liatiny tým, že znižuje odpor materiálu, láme triesky a čiastočne pôsobí ako mazadlo. Ako hodnotu dobrej obrobiteľnosti je možné považovať hodnotu tvrdosti do 230 HB. Pri liatine s vyššou tvrdosťou obrábanie nemusí byť problém, ak sa v nej nevyskytujú vo väčšom rozsahu štruktúrne zložky s vysokou tvrdosťou (cementit, steadit, karbidy).

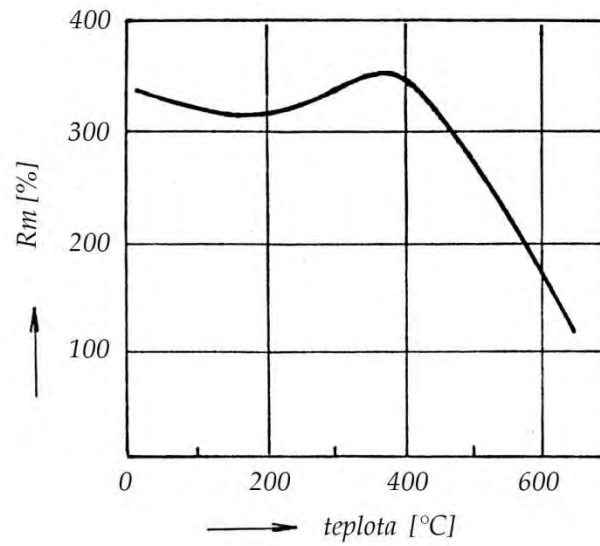
1.10 Vlastnosti liatin za zvýšených teplôt

Mechanické vlastnosti liatin sa pri teplotách do 300 – 400 °C podstatne nemenia. Nad teplotou 400 – 450 °C sa pevnosť znižuje a nad teplotou 450 °C už veľmi strmo (**obr. 1.21**).

U nízkolegovaných liatin (legovaných zvyčajne Cr, Ni a Mo) sa oblasť prudkého poklesu mechanických vlastností posúva o 50 – 100 K k vyšším teplotám.

Ťažnosť (LGG) sa s teplotou znižuje na minimum okolo 400 – 500 °C, potom sa rýchlo zvyšuje.

Pri dlhodobom zahriatí na teploty nad 450 – 500 °C dochádza pozvoľna ku sferoidizácii perlitického cementitu a následne k jeho rozpadu na ferit a grafit. Pri teplotách nad 550 – 600 °C sa tento proces značne zrýchľuje.



Obr. 1.21 Závislosť pevnosti liatiny na teplote

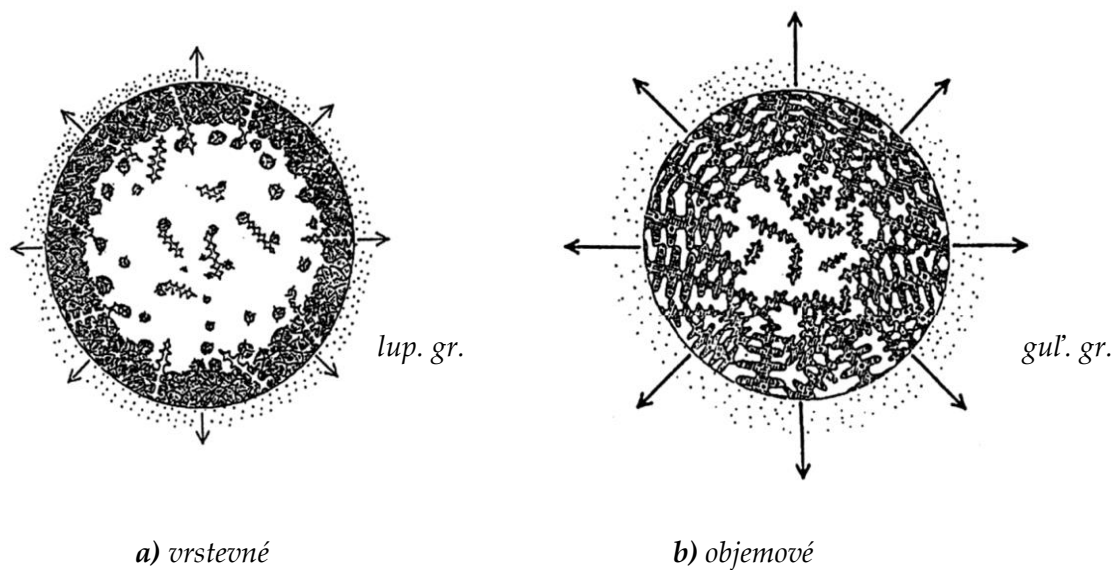
2. KRYŠTALIZÁCIA A TVORBA ŠTRUKTÚRY LIATIN

Kryštalizácia liatin prebieha v dvoch fázach. V 1. fáze tuhnutia, medzi teplotami likvidu a solidu sa z taveniny vylučujú dendrity austenitu. V 2. fáze tuhne eutektikum, ktorého priebeh je rozdielny v závislosti od podmienok tuhnutia a od typu liatin.

Kryštalizácia všetkých typov liatin začína vylúčením a rastom kryštálov primárneho austenitu. Pre aktivizáciu zárodkov austenitu je potrebné len relatívne malé podchladenie pod rovnovážnu teplotu likvidu. Kryštály austenitu rastú dendriticky, rozvetvenie dendritov je podporované vyšším obsahom uhlíka a rýchlejším rastom kryštálov. **Primárny austenit** je kovovou štruktúrnou zložkou neporušovanou grafitom, preto čím je v liatine väčší podiel primárneho austenitu, tým má liatina vyššiu pevnosť. Podiel primárneho austenitu závisí predovšetkým od zloženia liatiny, hlavne od obsahu uhlíka, resp. stupňa eutektickosti (Sc). Ak je liatina viac podeutektická, zvyšuje sa podiel primárneho austenitu.

Austenit vzniká mechanizmom heterogénnej nukleácie na cudzích časticiach, vmestkoch a na stenách formy. Austenit tvorí dendrity, ktoré rastú postupne od steny smerom do tepelnej osi odliatku – vrstevné tuhnutie (exogénne) – **obr. 2.22a**. Medzi dendritmi potom vzniká grafitické eutektikum. V miestach odliatku, kde je pomalé ochladzovanie (v stredných častiach stien odliatku a zvlášť u hrubostenných odliatkov) rastie tuhá fáza v objeme taveniny pred frontom tuhnutia. Dochádza k tzv. **objemovému tuhnutiu** – **obr. 2.22b**, pri ktorom sa tavenina postupne „zahusťuje“ až stráca tekutosť. V priestoroch zvyškovej taveniny medzi zrnami tuhej fázy potom vznikajú mikroťahnutiny. Sklon k tzv. exogénnemu (od steny) a endogénnemu tuhnutia (v objeme) závisí na počte kryštalizačných zárodkov a na ďalších vplyvoch.

U tvárnej liatiny je väčší sklon k objemovému tuhnutiu a preto obsahuje obyčajne viacej mikro riedin.



Obr. 2.22 Vrstvené a objemové tuhnutie liatin

Kryštalizácia eutektika nastupuje, keď obsah uhlíka, príp. uhlíkový ekvivalent CE dosiahne v zvyškovej tavenine hodnotu 4,3 %. Uhlíkový ekvivalent je definovaný ako:

$$CE (\%) = C + \frac{(Si + P)}{3}$$

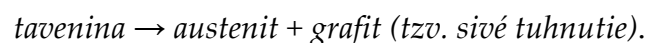
Pri eutektickej kryštalizácii nelegovaných liatin Fe – C môže dôjsť k tvorbe:

- metastabilného eutektika, t. j. ledeburitu, podľa reakcie:



alebo k vytvoreniu:

- stabilného, t. j. grafitického eutektika, podľa reakcie:



Za určitých podmienok sa môžu pri eutektickej kryštalizácii uplatniť obidve vyššie uvedené reakcie. Vzniknutá štruktúra je potom tvorená zmesou austenitu, grafitu a cementitu.

Tvorba grafitického eutektika, príp. ledeburitu závisí od termodynamických a kinetických podmienok kryštalizácie.

Termodynamické podmienky kryštalizácie sú určené rozdielom voľných entalpií taveniny a grafitického eutektika, či ledeburitu. Pre čisté zliatiny Fe – C je voľná entalpia vyjadrená rovnicou:

$$\Delta G = -L \cdot \frac{\Delta T}{T_E}$$

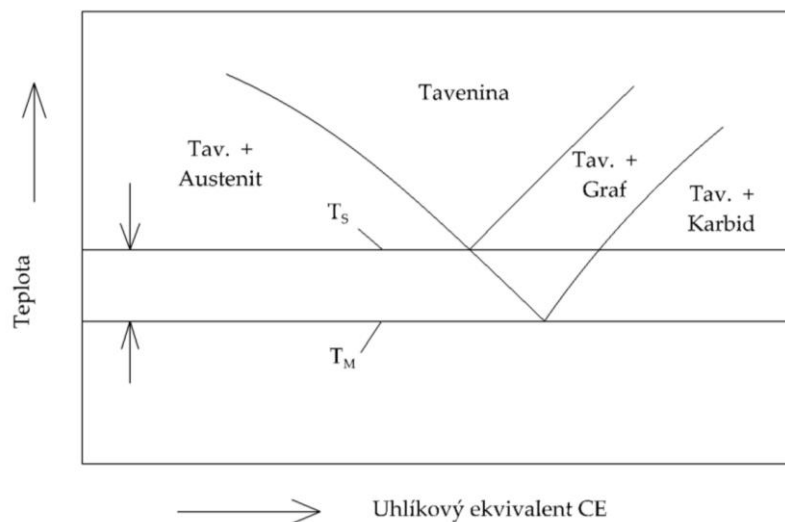
kde: L – latentné teplo kryštalizácie grafitického eutektika, príp. ledeburitu

ΔT – podchladenie pod rovnovážnu teplotu eutektickej premeny

T_E – rovnovážna teplota grafitického eutektika, príp. ledeburitu

Rozhodujúca je teplota eutektickej kryštalizácie sústavy, ktorá u stabilnej sústavy Fe – C je $T_{ES} = 1153\text{ }^{\circ}\text{C}$ a metastabilnej $T_{EM} = 1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ (rozdiel $\Delta T_E = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$), **obr. 2.23**.

Aktivácia zárodkov grafitickej fázy vyžaduje väčšie podchladenie pod rovnovážnu teplotu. Ak je podchladenie veľmi hlboké môže sa tavenina ochladiť až pod T_{EM} (eutektickú teplotu metastabilnej sústavy) a tuhne bielo (bez grafitu). Grafitické liatiny tuhnú v teplotnom intervale $\Delta T = T_{ES} - T_{EM}$ (**obr. 2.23**).



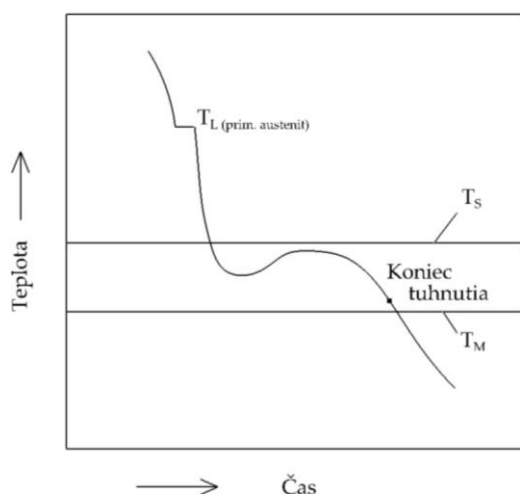
Obr. 2.23 Rozdiel medzi eutektickými teplotami stabilnej a metastabilnej sústavy – výrez z diagramu Fe – C

V praxi je možné kontrolovať budúcu štruktúru liatiny pomocou merania priebehu kriviek chladnutia.

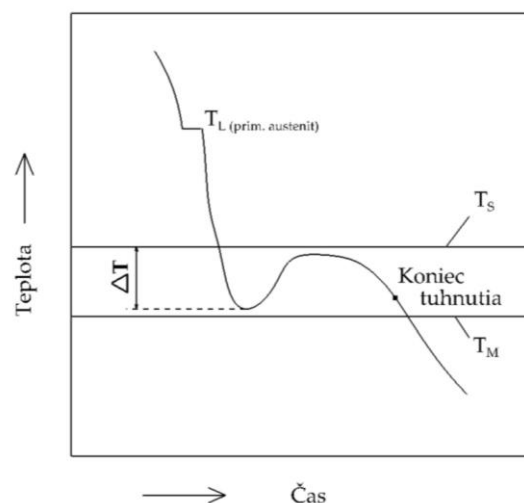
Prvá výdrž na teplote „ T_L – **teplota likvidu**“ odpovedá vylúčeniu primárneho austenitu. Ďalší pokles teploty prebieha až pod teplotu „ T_{ES} – **eutektická teplota stabilného systému**“.

Hĺbka podchladenia závisí od počtu aktívnych zárodkov grafitu. Skupenské teplo topenia, ktoré sa uvoľňuje pri eutektickej reakcii spôsobuje mierny nárast teploty. Tuhnutie končí nad teplotou T_{EM} . Takto získaná štruktúra pozostáva z austenitu a lupienkového, rovnomerne rozloženého grafitu typu A. Krivka chladnutia podeutektickej sivej liatiny (LLG) je znázornená na **obr. 2.24**.

Na **obr. 2.25** je krivka chladnutia s nedostatočným množstvom aktívnych zárodkov grafitizácie. Liatina vykazuje silné podchladenie ΔT , ktoré predikuje vznik metastabilnej sústavy Fe – Fe₃C, najmä u tenkostenných odliatkov. Ak sa pri eutektickej reakcii uvoľní dostatok tepla, môže teplota znovu stúpnuť nad T_{ES} . Karbidotvorná reakcia sa zastaví a hĺbka zákalky sa zmenší.



Obr. 2.24 Krivka chladnutia podeutektickej LLG

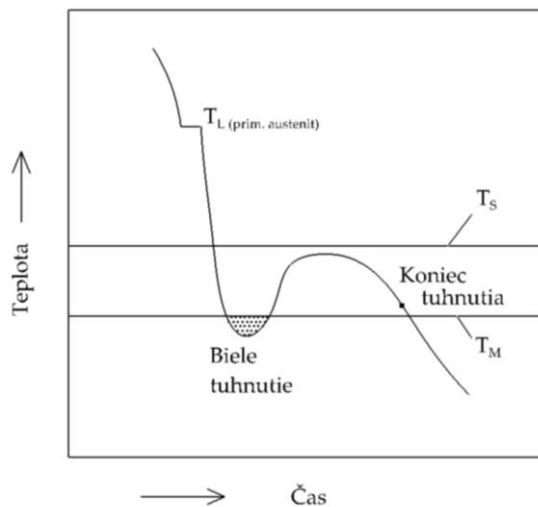


Obr. 2.25 Krivka chladnutia s nedostatočným množstvom aktívnych zárodkov

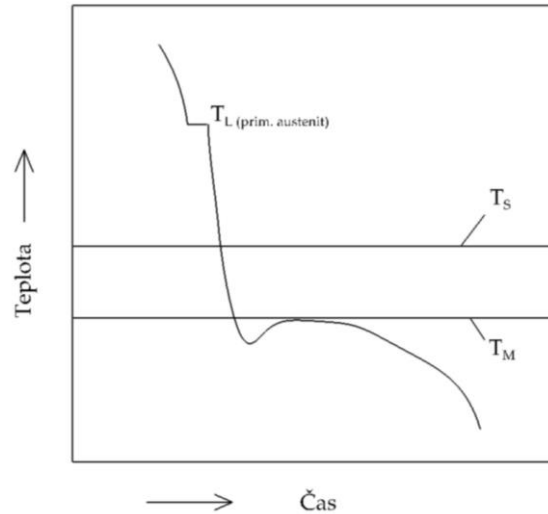
Na **obr. 2.26** je krivka chladnutia prechodovej štruktúry (melírovanej sivo – bielej, makovej) v dôsledku nedostatočného množstva zárodkov, alebo pri rýchlom ochladzovaní.

Na **obr. 2.27** je krivka chladnutia bielej liatiny. Eutektické tuhnutie (kryštalizácia) prebieha pod T_M . Vzniká metastabilné eutektikum – **ledeburit** (austenit + cementit).

Takto tuhne liatina s veľmi nízkym stupňom *Se*. Podporuje ho aj prudké ochladzovanie taveniny.

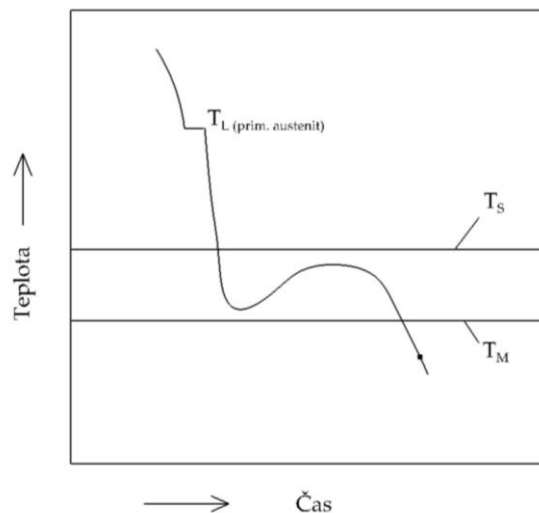


Obr. 2.26 Krivka chladnutia melírovanej, bielo-sivej, makovej liatiny



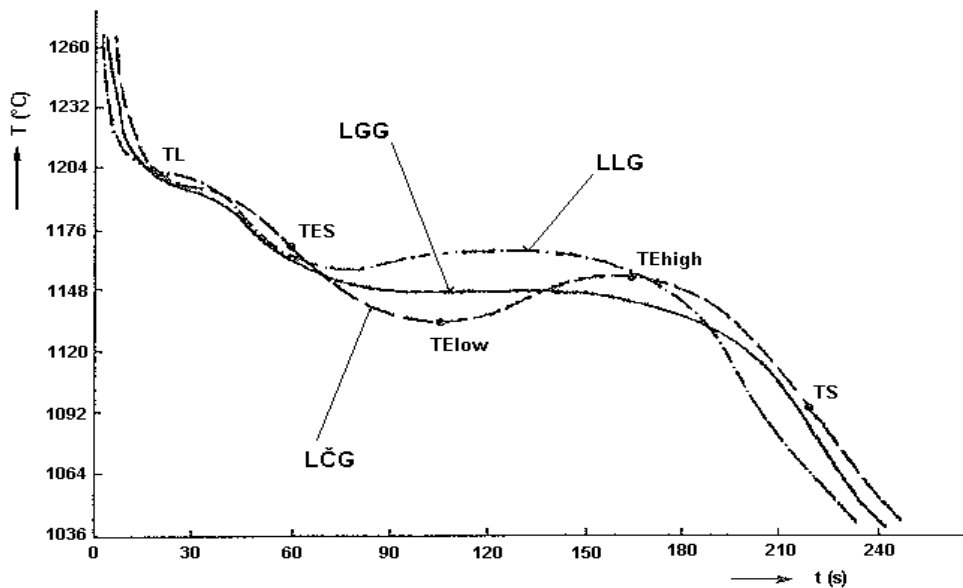
Obr. 2.27 Krivka chladnutia bielej liatiny

Zvláštny prípad tuhnutia, kedy sa zvyšková tavenina ku koncu tuhnutia odliatku ochladí až pod teplotu T_S je na **obr. 2.28**. Dochádza pri tom k tvorbe Fe_3C , ktoré sa vylučujú na hraniciach už vzniknutých eutektických buniek (eutektických zŕn).



Obr. 2.28 Krivka chladnutia pri tvorbe karbidov na hraniciach zŕn

Charakteristické krivky ochladzovania pre podeutektické liatiny s lupienkovým grafitom (LLG), guľôčkovým grafitom (LGG) a červíkovitým grafitom (LČG) v oblasti likvidu a v oblasti tuhnutia eutektika znázorňuje **obr. 2.29**.



Obr. 2.29 Charakteristické krivky chladnutia podeutektických liatin

Pri výrobe grafitických liatin musí eutektické tuhnutie prebiehať v teplotnom intervale medzi oboma rovnovážnymi eutektickými teplotami. Ak je podchladenie veľmi hlboké, môže sa stať, že sa tavenina ochladí až pod eutektickú teplotu metastabilnej sústavy T_{EM} a stuhne ako austenit + cementit.

Z kriviek chladnutia podeutektických liatin uvedených na **obr. 2.29** je vidieť určité rozdiely. Hlavnou príčinou je úplne odlišný spôsob vylučovania eutektického grafitu.

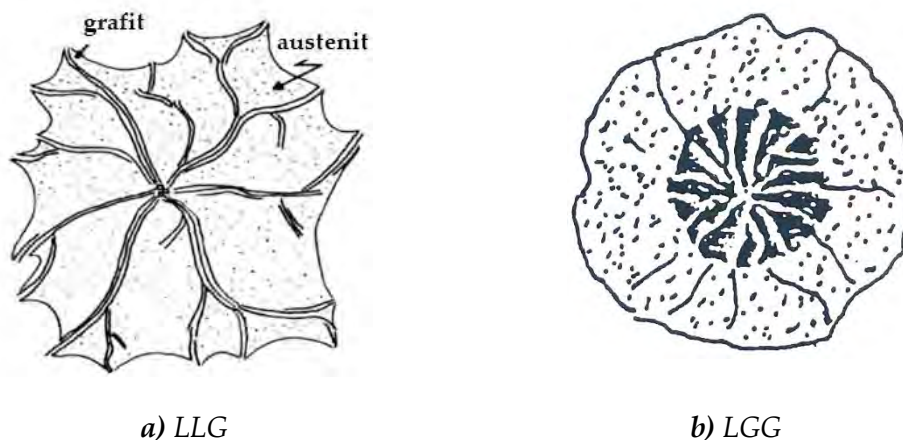
2.1 Eutektická kryštalizácia liatin

Výsledkom eutektickej reakcie pri tuhnutí podeutektických liatin je austenit a grafit, t.j. grafitické eutektikum. Jeho morfológický tvar je kompaktné zrno tzv. eutektická bunka. Táto kryštalizuje na endogénnych zárodkoch. Eutektická bunka je tvorená rozvetveným grafitovým skeletom, ktorý je obalený dendritickým austenitom.

V LLG tuhne eutektikum už pri malom podchladení vo forme malého počtu zrn. Ich mikromorfológia je na **obr. 2.30a**. Uhlík z taveniny sa prepravuje k špičkám grafitu, ktoré z bunky vystupujú.

V LGG austenit svojím rastom predbieha grafit a vytvára okolo neho obálky (**obr. 2.30b**). Uhlík z taveniny sa prepravuje cez obálku austenitu, pričom liatina tuhne pri výrazne vyššom podchladení (20 až 40 °C). V dôsledku toho liatina LGG vytvára

podstatne väčší počet buniek, čím sa skracuje difúzna dráha uhlíka (počet buniek je asi 10^2 krát väčší ako v LLG).



Obr. 2.30 Rez eutektickým zrnom (bunkou)

Priebeh eutektickej kryštalizácie určuje nielen druh vyrobenej liatiny (LLG, LGG, biela liatina, LČG), ale i jej výslednú štruktúru, mechanické prípadne aj fyzikálne vlastnosti.

2.2 Eutektoidná grafítizácia liatin

Austenit pri ochladzovaní pod eutektickú teplotu sa v dôsledku eutektoidnej transformácie premieňa na stabilnejšie zložky, najčastejšie na perlit. V závislosti od chemického zloženia a rýchlosti ochladzovania môže vzniknúť výsledná matrica (základná kovová hmota) **perlitická**, **perliticko – feritická** a ojedinele aj **feritická**.

Pri fázových premenách v tuhom stave dochádza ku **sekundárnej grafítizácii** (v dôsledku zníženia rozpustnosti C v austenite), prípadne rozpadu perlitu (jeho cementitu). Grafítizácia sa označuje ako nepriama cez tuhý roztok. Uhlík difunduje z miest zvýšenej koncentrácie a kryštalizuje na zárodkoch, ktorými sú už primárne vylúčené častice grafitu. Nastáva pritom hrubnutie grafitu, bez zmeny jeho typu a rozloženia. Objem grafitu sa pri tom zvýši o 20 až 30 % (podľa charakteru základnej kovovej hmoty).

2.3 Stupeň grafítizácie liatin

Množstvo vylúčeného grafitu z celkového množstva uhlíka v liatine označujeme ako **stupeň grafítizácie S_{GR}** . Určuje sa výpočtom:

$$C_{cel.} = C_{gr} + C_{viaz.}$$

$$S_{GR} = \frac{C_{gr}}{C_{cel.}} \cdot 100 \%$$

kde: C_{gr} – uhlík vylúčený ako grafit, %

$C_{cel.}$ – celkový obsah uhlíka v liatine, %

$C_{viaz.}$ – uhlík viazaný v štruktúre cementitu, %

Jednotlivé obsahy uhlíkov sa určia chemickou alebo metalografickou analýzou (metódami kvantitatívnej metalografie).

Pre perlitické liatiny (najčastejší prípad) sa S_{GR} určí zo vzťahu:

$$S_{GR} = \frac{C_{gr}}{C_{cel.} - C_{perlit}} \cdot 100 \%,$$

pričom C_{perlit} je uhlík viazaný v perlite, ktorého hodnota je približne 0,7 %.

Tento výpočet určuje aj stupeň grafitizácie pri rozpade perlitu, konkrétne ak je $S_{GR} > 1$, napr. 1,2 – znamená to, že sekundárna grafitizácia sa uskutočnila na 20 %. Ak je $S_{GR} < 1$, v štruktúre je perlit a voľný cementit (Fe_3C).

2.4 Eutektická grafitizačná schopnosť liatiny (EGS)

Charakter liatiny určuje priebeh eutektickej kryštalizácie, ktorá má byť čo najvyššia. Pri ideálnom priebehu eutektickej grafitizácie sa pri rovnovážnej teplote T_{ES} vylúči z taveniny maximálne množstvo eutektického grafitu. Stupeň eutektickej grafitizácie $S_{EGS} = 1$. Skutočné množstvo grafitu je nižšie v dôsledku poklesu T_{ES} (podchladenie), spôsobeného rôznymi metalurgickými činiteľmi. Dochádza tak k zníženiu grafitizačnej schopnosti liatiny a zníženiu jej kvality. Eutektická grafitizačná schopnosť liatiny sa vyjadruje ako pomer vylúčeného množstva eutektického grafitu k rovnovážnemu:

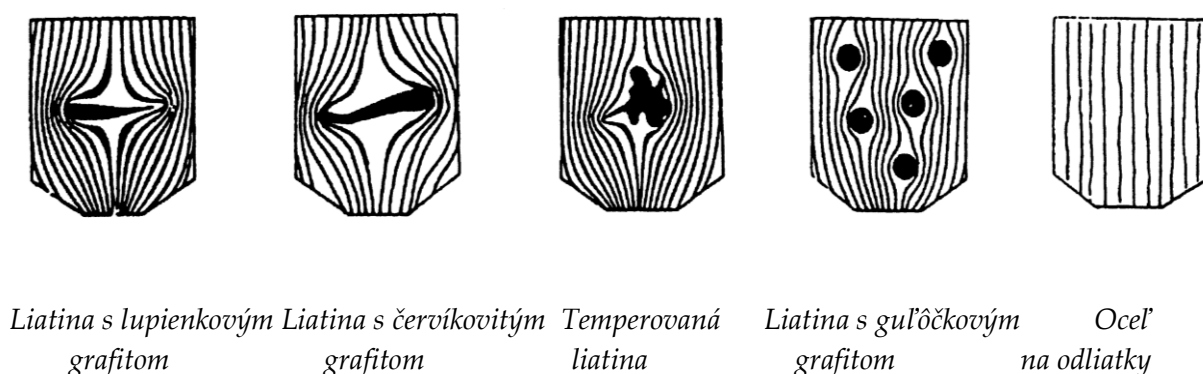
$$\%EGS = \frac{EG_{vyluč.}}{EG_{rovnov.}} \cdot 100 \%$$

Pri $EGS = 100 \%$ obsahuje liatina eutektické množstvo grafitu a pri $EGS = 0$ liatina bude kryštalizovať bielo (bez grafitu).

2.5 Vplyv tvaru grafitu na mechanické vlastnosti liatin

Účinok grafitu na mechanické vlastnosti liatin výrazne súvisí s jeho tvarom a ďalšími parametrami. Grafít narušuje kompaktnosť základnej kovovej hmoty a výrazne ovplyvňuje mechanické a fyzikálne vlastnosti liatin. Liatina s lupienkovým grafitom sa pri ťahovej skúške chová ako krehký materiál. Jeho plastické vlastnosti (ťažnosť) sú veľmi nízke ($A_5 = 0$ až $0,8\%$).

Vplyv tvaru grafitu na priebeh napätí pri zaťažení je znázornený na **obr. 2.31**.



Obr. 2.31 Vplyv grafitu na priebeh napätí

Negatívny účinok grafitu na mechanické vlastnosti je spôsobený:

1. Zmenšením prierezu namáhanej plochy o plochu vylúčeného grafitu ($6 - 8\%$).
2. Vznikom koncentrácie napätí na koncoch lupienkov na úkor celkového napätia vyvolaného mechanickým namáhaním. Koncentrácia napätí sa zväčšuje s dĺžkou a ostrosťou (polomerom zaoblenia) častíc grafitu. Grafít, najmä lupienkový pôsobí na zníženie mechanických vlastností vrubovým účinkom. Guľôčkový grafít v dôsledku minimálneho vrubového účinku znižuje vlastnosti základnej kovovej hmoty minimálne.

2.6 Kovová matrica liatin

Podstatnou zložkou štruktúry liatin je jej základná kovová hmota - kovová matrica, ktorej štruktúra a vlastnosti určujú spolu s vylúčeným grafitom jej mechanické a fyzikálne vlastnosti. Táto zložka štruktúry je v podstate oceľ tvorená najčastejšie perlitom, príp. feritom a ich kombináciou. Špecifické liatiny majú kovový základ

tvorený požadovanými špecifickými štruktúrami ako napr. bainit, martenzit, trostit, austenit a ďalšie.

Mimo druhu základnej štruktúry je dôležitá jej zrnitosť t.j. veľkosť jej „austenitických buniek“ – jednotlivých kryštálov, ako aj kvalita a štruktúra obalov zrn. Táto môže byť u liatin veľmi rôznorodá, avšak vždy znižuje kvalitu liatin.

Obálky zrn sú tvorené zložkami s najnižšou teplotou tavenia. Najčastejšie sú to fosfidy a sírniky, ale aj nečistoty pochádzajúce z mikrolegúr a stopových prvkov.

Pre hodnotenie kvality kovovej hmoty platia tie isté pravidlá ako pre štruktúru ocele v ocelových odliatkoch.

Najvýznamnejšia je kryštalizácia t.j. veľkosť, tvar, čistota a ďalšie parametre kryštálov. Najčastejšie je požadovaná jemnozrná kryštalická štruktúra. Hrubozrná je krehká a znižuje mechanické vlastnosti. Zároveň zvyšuje sklon liatin k vzniku trhlín (za tepla).

2.7 Objemové zmeny pri tuhnutí liatin

Zmrašťovanie kovov v priebehu tuhnutia je u jednotlivých kovov a zliatin dosť rozdielne a z technologického dôvodu významné. Liatina na rozdiel od ostatných kovov pri kryštalizácii nezmršťuje, ale naopak v dôsledku grafitizácie zväčšuje svoj objem.

Grafit po vylúčení z austenitu spôsobuje objemovú expanziu v dôsledku jeho až 3,2 krát väčšieho merného objemu ako základná hmota austenit. Tento nárast objemu je z technologického hľadiska veľmi výhodný, nakoľko znižuje sklon liatiny k vzniku stiahnutí a riedin. Liatina má tzv. samonapájaciu schopnosť. To znamená, že zväčšovanie objemu vykompenzuje úbytok objemu základnej hmoty v dôsledku jej zmraštenia.

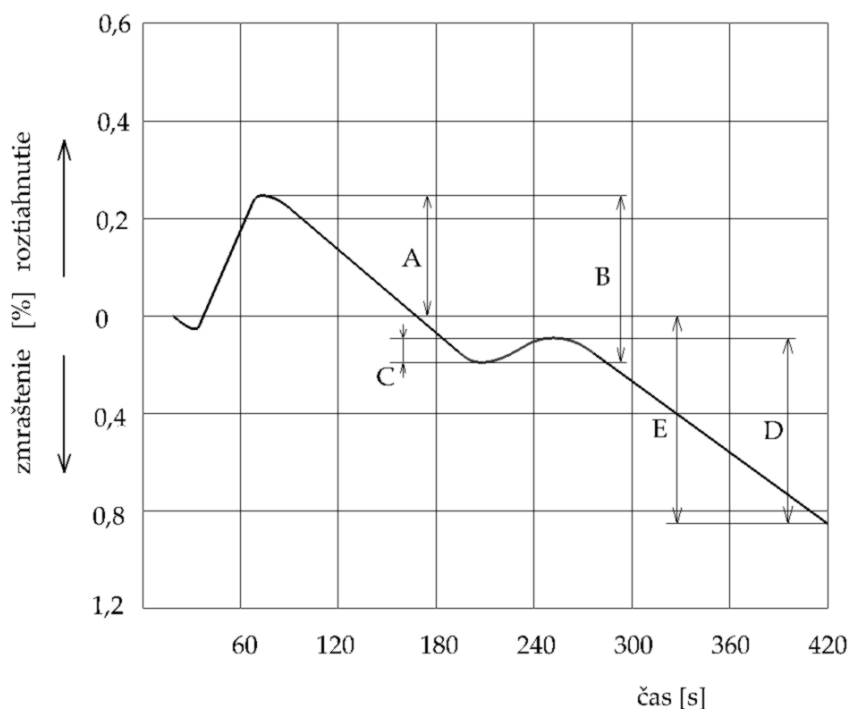
Liatina umožňuje odlievanie odliatkov bez náliatkovania, resp. úspornejšie náliatkovanie. Výsledkom je lepšie využitie tekutého kovu a zníženie pracnosti pri odstraňovaní náliatkov.

Grafitická expanzia je priamoúmerná grafitizačnej schopnosti t.j. zväčšuje sa so stupňom nahličenia.

Rozdiel v kinetike a morfológii vylučovania grafitu v LGG v porovnaní s LLG je dôvodom nižšej samonapájacej schopnosti LGG aj pri rovnakom objeme vylúčeného grafitu.

Grafitická expanzia si vyžaduje tuhé nepoddajné formy a formovacie rámy, príp. vhodnú konštrukciu odliatku s dostatočne veľkým modulom a vpadlými stenami (konkávnymi). V opačnom prípade pri grafitovej expanzii dôjde k roztláčaniu formy t.j. zväčšením rozmerov odliatku a k vzniku stiahnutí.

Dilatačné krivky priebehu tuhnutia a chladnutia odliatkov (**obr. 2.32**) umožňujú posúdiť priebeh kryštalizácie rôznych druhov liatin.



Obr. 2.32 Vyhodnocovanie krivky dilatačných zmien v priebehu tuhnutia a chladnutia

Z nameranej krivky je možné odčítať tieto údaje:

- A - predzmrašťovacie roztiahnutie vyvolané grafitizačným tlakom pri tuhnutí eutektika, závisí od stupňa grafitizácie liatiny
- B - predperlitické zmraštenie

C - rozťahnutie pri eutektoidnej premene, závisí od stupňa grafitizácie a podielu vylúčeného feritu

D - poperlitické zmraštenie

E - celkové dĺžkové zmraštenie

V **tab. 2.11** sú uvedené hodnoty objemového zmraštenia „ β “ počas tuhnutia a lineárneho zmraštenia odliatku „ ϵ “ v % z materiálov LLG, LGG a uhlíkovej ocele.

Tab. 2.11 Koeficienty objemového a lineárneho zmraštenia liatinových odliatkov

	β [%]	ϵ [%]
LLG	1 – 4	0,8 – 1
LGG	0 – 13	0,5 – 1
Uhlíková oceľ	4 – 8	1,8 – 2,4

Minimálne hodnoty zmraštenia (objem stiahnutí β (%)) sa dosiahnu pri použití kvalitných formovacích zmesí (nepoddajných).

3. POSTUPY OVPLYVNENIA ŠTRUKTÚRY LIATIN

Na samotný priebeh eutektickej kryštalizácie vplývajú hlavne tieto faktory:

- chemické zloženie taveniny,
- rýchlosť ochladzovania,
- fyzikálno-chemický stav taveniny.

3.1 Vplyv chemického zloženia na priebeh eutektickej kryštalizácie

Rozhodujúci význam má obsah uhlíka a sprievodných prvkov, vyjadrený stupňom eutektickosti Se (resp. stupňom nasýtenia Sc), príp. uhlíkovým ekvivalentom liatiny CE .

Stupeň eutektickosti Se alebo stupeň nasýtenia liatiny uhlíkom sa určí z pomeru obsahu C v liatine k jeho obsahu v eutektiku:

$$Se = \frac{C}{C_c} = \frac{\% C}{4,23 - 0,31. \%Si - 0,33. \%P + 0,027. \%Mn - 0,40. \%S}$$

kde: C – skutočný obsah uhlíka (analyticky zistený) v hm. %

C_c – obsah uhlíka ovplyvnený prísadovými prvkami v hm. %

Podľa STN sa odporúča skrátený vzťah:

$$Se = \frac{\% C}{4,23 - 0,3. (\%Si + \%P)}$$

Pri hodnote $Se = 1$ – eutektická liatiny

$Se < 1$ – podeutektická liatina

$Se > 1$ – nadeutektická liatina

Uhlíkový ekvivalent liatiny CE udáva polohu danej liatiny v prísadami neovplyvnenom diagrame železo – uhlík a vyjadruje sa vzťahmi:

$$CE = C + 0,31. Si + 0,33. P - 0,027. Mn + 0,04. S \quad [\%]$$

zjednodušené:

$$CE = C + 0,3. (Si + P) \quad [\%]$$

Pri hodnote: $CE = 4,23$ – eutektická liatina

$CE < 4,23$ – podeutektická liatina

$CE > 4,23$ – nadeutektická liatina

Okrem základných prvkov (C, Si, Mn, P, S) liatiny obsahujú aj určité množstvo prímiesi t.j. bežných legúr (Cu, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Al a ďalšie) a stopových prvkov (Pb, Sb, Sn, As, Te, Zn, Ce, Mg) ako aj plyných prvkov (N, H, O). Do liatiny sa tieto prvky dostávajú vsádzkovými surovinami a pri tavení.

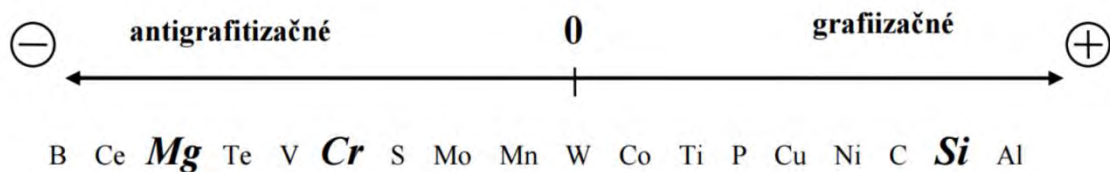
Na základe kvalitatívneho pôsobenia ich rozdeľujeme na:

- grafitizačné prvky (Al, C, Si, Ni a P),
- karbidotvorné prvky (Cr, Mo, V, S, Mg, Ce, Te a B),
- amfotérne prvky (Cu, Ti, Zn, Co, Zr, Mn a W).

Grafitizačné prvky podporujú tuhnutie podľa stabilného systému a vylúčenie uhlíka v podobe grafitického eutektika. Najdôležitejším grafitizačným prvkom je kremík.

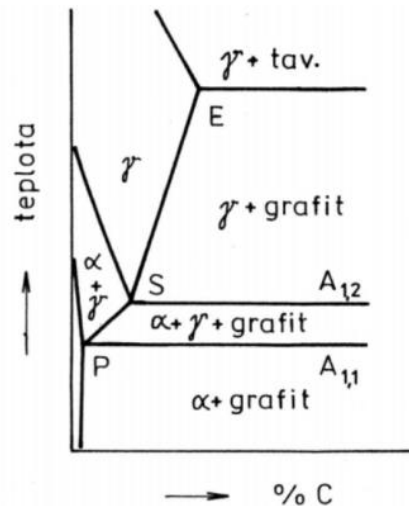
Karbidotvorné prvky podporujú vznik metastabilného eutektika – ledeburitu. Dôležitým antigrafitizačným prvkom v liatinách je hlavne chróm, v LGG pôsobí antigrafitizačne i horčík.

Mieru vplyvu na grafitizáciu je možné znázorniť na grafitizačnej osi:



Feritotvorné prvky podporujú transformáciu austenitu podľa stabilného systému. Z feritotvorných prvkov je dôležitý najmä kremík. Spôsobuje zmeny v priebehu kryštalizácie v oblasti tuhnutia ale i eutektoidnej transformácie.

Za prítomnosti kremíka prebieha transformácia austenitu v rozmedzí teplôt, v oblasti, ktorá je v diagrame Fe-C-Si vymedzená teplotami $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ – **obr. 3.33**. V tejto oblasti vedľa seba existujú ferit, austenit a grafit. Eutektoidná transformácia austenitu začína na teplote $A_{1,2}$ vylučovaním feritu a grafitu, ktorý difunduje k už existujúcim útvarom grafitu. Táto premena je v stabilnom systéme ukončená pri teplote $A_{1,1}$. Pokiaľ eutektoidná transformácia prebieha podľa metastabilného diagramu, vzniká pod teplotou $A_{1,1}$ zo zvyšku austenitu perlit.



Obr. 3.33 Transformácia austenitu v diagrame Fe-C-2% Si

3.1.1 Vplyv prvkov na štruktúru a vlastnosti liatin

Uhlík a kremík

V bežnej praxi sa grafitizácia liatin riadi obsahom uhlíka a kremíka. Kremík zvyšuje eutektickú i eutektoidnú teplotu. Zmenou ich obsahu sa výrazne mení stupeň grafitizácie a tým aj štruktúra liatin.

C/Si – dôležitý je optimálny pomer C/Si, najčastejšie pre LLG = 1,2 – 1,4 a pre LGG = 1,5 – 2,4.

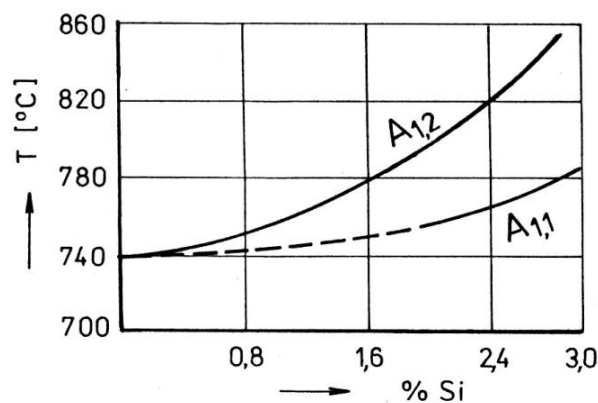
Čím nižšia je hodnota pomeru C/Si pri rovnakom uhlíkovom ekvivalente (nižší uhlík, vyšší kremík), tým dokonalejšia je grafitizácia – menší sklon k zákalke a väčší podiel feritu v štruktúre. Pomer C/Si sa bežne pohybuje v rozmedzí 1,2 – 2,4.

Uhlík – spolu s kremíkom má najväčší vplyv na štruktúru a vlastnosti liatin. Čím viac uhlíku je vylúčené ako grafit, tým menšie je sťahovanie liatiny pri tuhnutí. Tento fakt umožňuje obmedziť, prípadne až celkom vylúčiť náliatkovanie liatin. Pri vysokom obsahu uhlíka ale dochádza k zhrubnutiu grafitu.

Kremík – je okrem uhlíka najvýznamnejším prvkom v liatinách. Pri tuhnutí výrazne podporuje grafitizáciu, pri transformácii austenitu podporuje vznik feritu. (Pri nízkom obsahu kremíka majú liatiny silný sklon k tvorbe zákalky.)

Z vplyvu na mechanické vlastnosti liatin je významné, že kremík zvyšuje tvrdosť feritu, znižuje ťažnosť a rázovú húževnatosť (dôležité pri LGG). Za nízkych teplôt kremík podporuje vznik krehkých lomov.

Kremík má za následok zvyšovanie austenitizačnej teploty – **obr. 3.34**. To je dôležité rešpektovať hlavne pri tepelnom spracovaní.

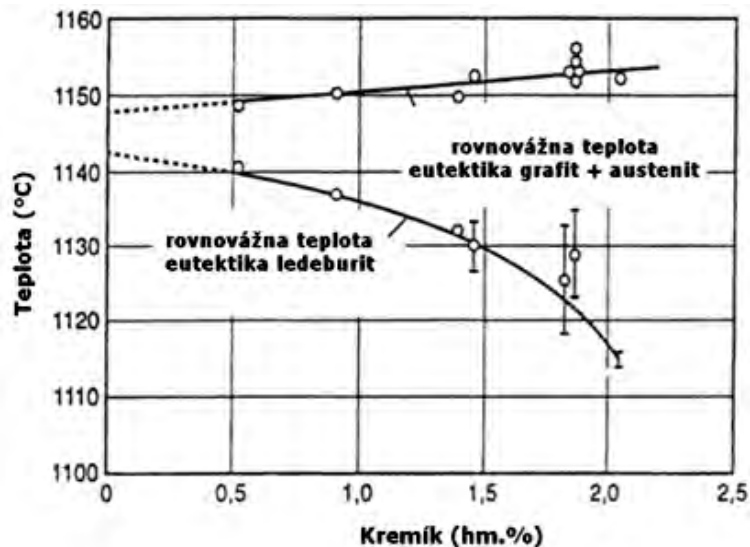


Obr. 3.34 Zvyšovanie austenitizačnej teploty vplyvom kremíka

Kremík má najväčší význam na rozšírenie teplotného intervalu eutektických teplôt (**obr. 3.35**). Zvyšuje stabilnú eutektickú teplotu a znižuje metastabilnú eutektickú teplotu podľa rovníc:

$$T_{ES} = 1153 + 6,7 \cdot \%Si$$

$$T_{EM} = 1147 - 12 \cdot \%Si$$



Obr. 3.35 Vplyv kremíka na rovnovážne eutektické teploty T_{ES} a T_{EM}

Účinok obsahu **kremíka** na vlastnosti liatiny je v podpore grafítizačnej schopnosti liatiny a feritizácie základnej hmoty. Takto pôsobí až do obsahu 2,5 až 3 %, kedy sa už znižuje kritická rýchlosť ochladzovania pre rozpad austenitu.

U LLG je pevnosť závislá od hrúbky steny odliatku a teda pokles pevnosti s rastúcou hrúbkou steny je tým väčší, čím je vyšší obsah kremíka. Je to spôsobené feritizáciou a hrubnutím lupienkov grafitu. Obsah kremíka v LLG sa pohybuje medzi 2,5 % (v tenkostenných odliatkoch) a 1,5 % (v hrubostenných odliatkoch). Obsah kremíka nemá byť väčší ako 3 %, pretože jeho vyšší obsah spomaľuje grafítizáciu, začína sa vytvárať silikokarbit, prudko sa znižuje plasticosť liatiny a zhoršuje sa zabiehavosť.

C + Si – s rastúcim obsahom uhlíka a kremíka sa zvyšuje stupeň grafítizácie. Prejavuje sa to poklesom mechanických vlastností, okrem dynamickej húževnatosti a útlmových vlastností. Uhlík vo forme grafitových lupienkov brzdí rozvoj napätí v odliatkoch, zvyšuje tepelnú vodivosť a najmä tekutosť (zabiehavosť) liatin.

So znižovaním obsahu uhlíka a kremíka sa hodnoty pevnosti zvyšujú a vyrovnávajú v jednotlivých častiach odliatku, ktoré sa ochladzujú rôzne rýchlo. Znižovaním obsahu kremíka pri zachovaní konštantnej hodnoty Se vzrastajú mechanické hodnoty LLG, ale zvyšuje sa sklon k zákalke tenkostenných odliatkov a zhoršuje sa obrábiteľnosť.

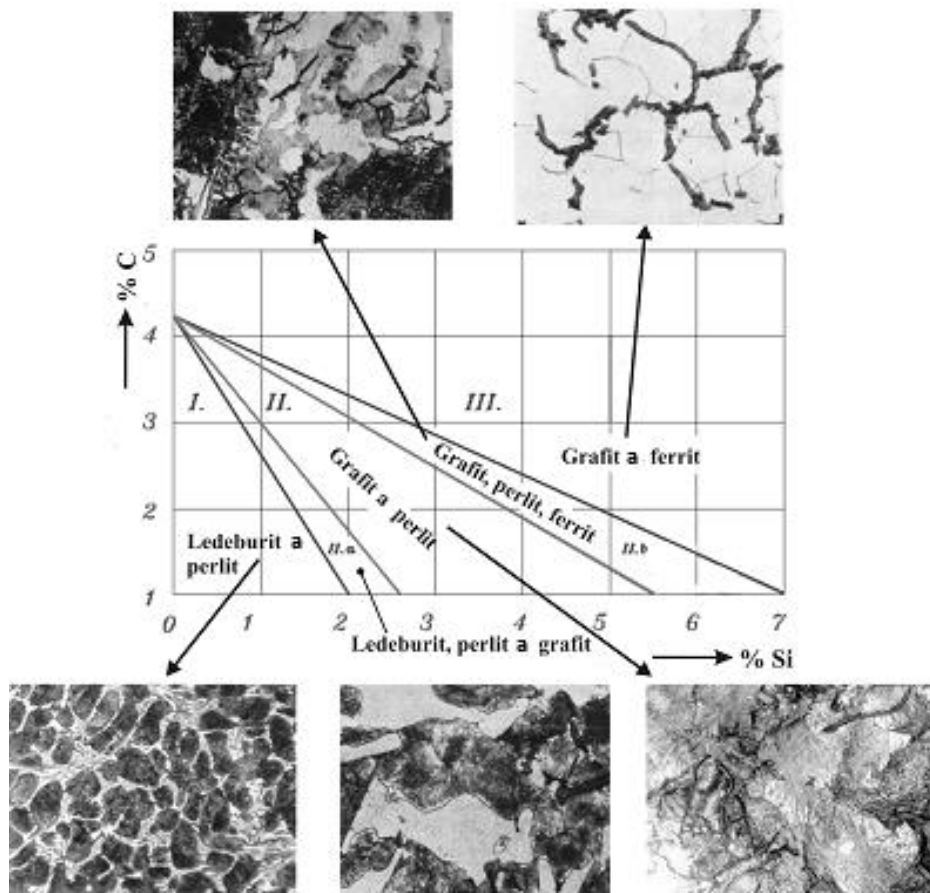
Obsah kremíka a uhlíka súčasne s vplyvom na polohu teploty eutektika (T_{ES}) ovplyvňuje polohu teploty likvidu T_L podľa rovnice:

$$T_L = 1660 - 120 \left(\%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{S} \right)$$

Obsah uhlíka do obsahu 2,9 % podstatne neovplyvňuje eutektické teploty. Vplyvom kremíka prebieha eutektické tuhnutie v intervale teplôt. Tento interval sa s rastúcim obsahom kremíka rozširuje. Práve toto rozšírenie teplotného intervalu zvyšuje uhlíkový potenciál, rýchlosť difúzie uhlíka, rýchlosť vylučovania a rastu grafitických častíc, čím kremík podporuje grafitizačnú schopnosť liatiny. **Kremík** zvyšuje počet eutektických buniek a potláča zákalku. V cementite je jednoznačne nerozpustný, zvyšuje stabilitu feritu, spevňuje ferit a zvyšuje jeho krehkosť.

Rast obsahu **kremíka** pri konštantnej hodnote stupňa eutektickosti Se znamená zníženie obsahu uhlíka, tým i množstva grafitu, čím pevnosť v ťahu u liatiny vzrastie. Tým sa súčasne zvyšuje tvrdosť, znižuje húževnatosť, zhoršuje útlm, znižuje tepelná vodivosť a rastie sklon k riedinám.

Závislosť štruktúry liatiny od obsahu uhlíka a kremíka vyjadruje Maurerov diagram – obr. 3.36.



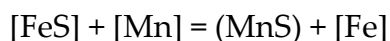
Obr. 3.36 Vplyv Si a C na štruktúru liatiny

V praxi osvedčené hodnoty pre obsahy uhlíka a kremíka a ich pomeru (C/Si) v LLG sledujú dosiahnutie požadovanej pevnosti v ťahu podľa normy a zároveň priaznivé zlievarenské vlastnosti.

Mangán – má pri tuhnutí liatiny malý vplyv na grafitizáciu. Pri obsahu nad 0,5 % pôsobí mierne antigrafitizačne. Pri vyššom obsahu (približne nad 1 %) môže podporovať vznik prechladeného grafitu. Pri pomalom ochladzovaní môže mangán v hrubých stenách odliatku tvoriť karbidy.

Mangán stabilizuje v štruktúre perlit (spomaľuje jeho rozpad pri zvýšených teplotách). U LGG zjemňuje perlit, zvyšuje pevnosť liatiny, tvrdosť a odolnosť voči oteru. Pri výrobe feritickej, resp. feriticko – perlitickej LGG je jeho obsah nutne dodržať pod 0,2 %.

Dôležitou funkciou mangánu u LLG a bielej liatiny je, že viaže síru. V reakcii so sírou dochádza podľa vzťahu:



Minimálny obsah mangánu v LLG a v temperovanej liatine sa odporúča:

$$\begin{array}{ll} \text{Mn} = 1,7.S + 0,3 [\%] & \text{– pre LLG} \\ \text{Mn} = 1,7.S + 0,15 [\%] & \text{– pre bielu liatinu} \end{array}$$

V LGG a LČG pôsobí Mn ako legúra. Podporuje vznik perlitu a karbidov. Obsah Mn pri výrobe feritických LGG musí byť nízky – pod 0,15 až 0,2 %. Jeho max. obsah závisí od obsahu Si a hrúbky stien odliatku. Kremík účinne neutralizuje vznik karbidov do hrúbky stien cca 25 až 30 mm. V hrubostenných odliatkoch Si nezabráni segregácii na hraniciach zŕn a vylučovaniu karbidov.

Fosfor – mierne podporuje grafitizáciu. Fosfor sa v priebehu tuhnutia výrazne odmiešava do zvyšku taveniny a na hraniciach zŕn tvorí fosfidické eutektikum, ktoré sa nazýva steadit. Táto fáza je tvrdá a krehká a významne znižuje húževnatosť liatiny. Preto je nutné najmä u LGG a LČG udržiavať čo najnižší obsah fosforu (obvyčajne pod 0,10 % P). Zvyšuje sklon liatin k vzniku trhlín a riedin a u hrubostenných odliatkoch v dôsledku rozšírenia intervalu tuhnutia dochádza k jeho segregácii do posledných tuhúcich častí odliatku, kde sa jeho obsah zvýši.

V LLG je obsah fosforu prípustný vyšší, obyčajne 0,2 – 0,4 % P. Niekedy sa volí vyšší obsah fosforu z dôvodu zvýšenia oteruvzdornosti odliatkov (napr. vodiace plochy obrábacích strojov, brzdové segmenty, piestne krúžky a ďalšie).

V dôsledku tvorby nízkotaviteľného eutektika fosfor zvyšuje zabiehavosť liatin. Z tohto dôvodu sa u veľmi tenkostenných a umeleckých odliatkov obsah fosforu zvyšuje, niekedy až nad 1%.

Síra – je v liatinách nežiadúci prvok. Zdrojom síry sú vsádzkové suroviny, nahličovadla a pri tavení v kuplovej peci koks. Síra má silný sklon k segregácii (tvorí FeS) a pri vyššom obsahu, pokiaľ nie je viazaná ako sulfid mangánu, zabraňuje grafitizácii a spôsobuje krehkosť liatiny. (Vplyv na grafitizáciu je tým nepriaznivejší, čím nepriaznivejšie sú ostatné grafitizačné podmienky.) Preto je väčšinou snaha udržať obsah síry v liatinách čo najnižší, najmä pri výrobe LGG (pod 0,02 %).

Meď – mierne podporuje grafitizáciu. V množstve 0,5 – 1,5 % sa používa pre stabilizáciu perlitu v LGG a zvýšenie mechanických vlastností, najmä tvrdosť. U LLG sa občas s výhodou kombinuje s chrómom, obyčajne v pomere Cu : Cr = 4:1, kedy sa dosahuje perlitická štruktúra s jemným grafitom a vysokými mechanickými vlastnosťami. Pre legovanie je nutné používať veľmi čistú meď bez prímеси prvkov, ktoré spôsobujú degeneráciu grafitu (Sn, Pb, Sb).

Nikel – má podobné účinky ako meď – pôsobí mierne grafitizačne, stabilizuje perlit, zvyšuje mechanické vlastnosti. Prísada 1 % Ni zvýši pevnosť až o 10 %. Pre tieto účely sa pridáva až do obsahu 4 %. Nikel zabraňuje tvorbe voľných karbidov. Pre zvýšenie tvrdosti liatiny sa kombinuje s Cr. Pri obsahu nad asi 18 % (za prítomnosti Cu už od asi 13 %) nikel stabilizuje v štruktúre austenit.

Chróm – je silným karbidotvorným prvkom. Podporuje metastabilné tuhnutie. Zdrojom chrómu sú vsádzkové suroviny – najmä oceľový a liatinový odpad. Chróm zjemňuje perlit a grafit a zjemňuje štruktúru. Často však spôsobuje vznik mezidendritického grafitu. Zvyšuje pevnosť a tvrdosť liatiny. Pokiaľ v štruktúre vzniknú voľné karbidy, nežiadúco sa zhoršuje obrobiteľnosť. Pre zvýšenie mechanických vlastností sa leguje obyčajne v množstve do 0,3 – 0,5 % Cr, sklon k vzniku karbidov sa kompenzuje meďou. Vo feritických liatinách má byť obsah Cr čo najnižší (< 0,04 %). Pri obsahu nad 1 % zvyšuje odolnosť voči oxidácii.

Molybdén – veľmi významná, avšak veľmi drahá legúra. Používa sa v kombinácii s inými perlitotvornými prvkami, hlavne s Cr, a tiež s Cu a Ni. Zvyšuje pevnosť perlitickej základnej kovovej hmoty a stabilizuje štruktúru a vlastnosti liatin za vyšších teplôt. Používa sa na výrobu hrubostenných tepelne namáhaných odliatkov. Znižuje citlivosť štruktúry na rýchlosť ochladzovania, uplatňuje sa preto u odliatkov s rôznou hrúbkou stien. Leguje sa v množstve do max. 0,8 – 1,0 %.

Cín – používa sa pre stabilizáciu perlitickej štruktúry v odliatkoch z LLG, je ho však možné použiť i u LGG. Pre dosiahnutie celkom perlitickej štruktúry obyčajne stačí množstvo do 0,1 – max. 0,15 % Sn. Cín zvyšuje hustotu perlitu, zvyšuje pevnosť a tvrdosť liatiny. V LGG sa pre dosiahnutie perlitickej štruktúry miesto cínu leguje obyčajne meďou do 1 – 1,5 %. Cín je deficitnou a drahou legúrou.

Stopové prvky a nečistoty (olovo, bizmut, ...)

Stopové prvky a nečistoty sa do liatiny dostávajú najmä zo zle vytriedeného šrotu. Ich škodlivý účinok sa prejavuje najmä u LGG, že spôsobuje vznik degenerovaných tvarov grafitu.

Olovo a bizmut – sú jednými z najškodlivejších prvkov v grafitických liatinách. Už v množstve stotín percenta spôsobuje degradáciu lupienkového grafitu a v množstve tisícín percenta guľôčkového grafitu a znižuje mechanické vlastnosti až niekoľkonásobne.

Škodlivý účinok má taktiež arzén, kadmium a ďalšie prvky. Nároky na nízky obsah nečistôt sú u LGG podstatne vyššie ako u ostatných druhov liatin.

Mnoho prvkov (napr. Sb, Ti a ďalšie), ktoré v LLG príliš nevadia, alebo sú niekedy dokonca pridávané zámerne, majú v LGG veľmi škodlivý účinok.

Veľká pozornosť je venovaná prísade Ti od 0,1 až 0,3 %, ktorá zlepšuje vlastnosti najmä syntetickej liatiny.

Vplyv plynných prvkov (N, H, O) – majú silný vplyv na štruktúru a mechanické vlastnosti liatiny. Ich obsah v liatine sa pohybuje v rozsahu:

$[N] - (15 - 140) \cdot 10^{-4} \% \text{ t.j. } 15 - 140 \text{ ppm}$

$[H] - (0,5 - 3) \cdot 10^{-4} \% \text{ t.j. } 0,5 - 3 \text{ ppm}$

$$[O] - (4 - 100) \cdot 10^{-4} \% \text{ t.j. } 4 - 100 \text{ ppm}$$

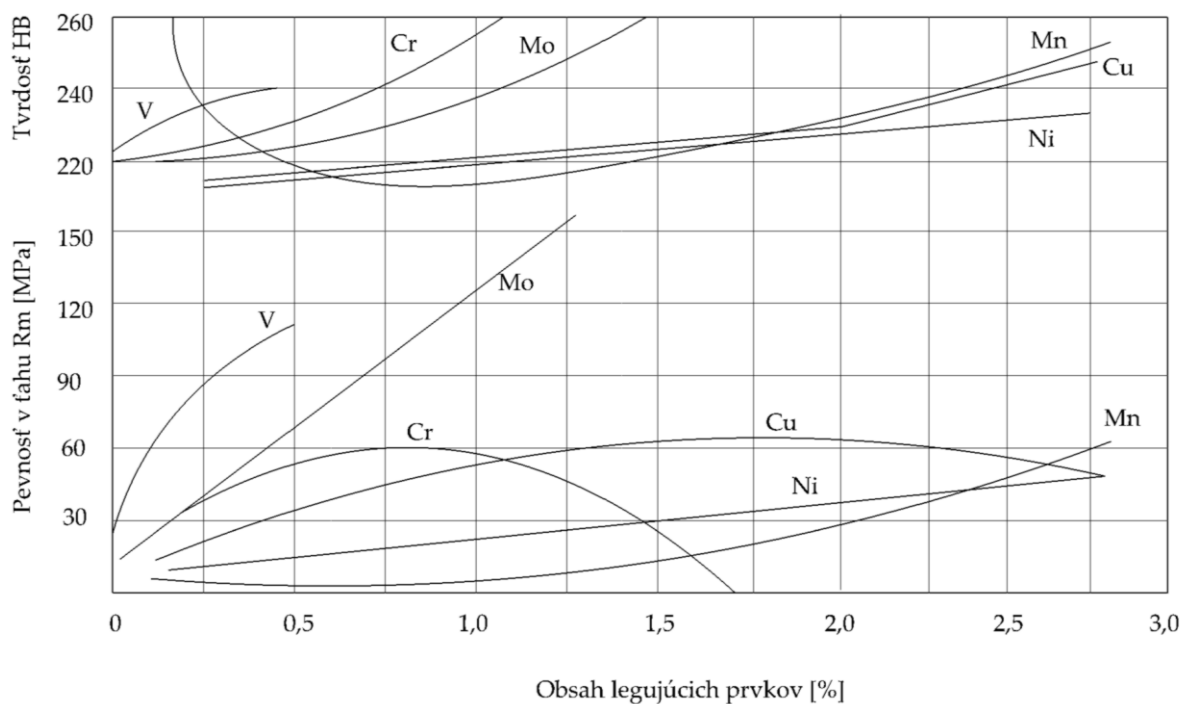
Nitridy typu AlN, TiN, BN, ... v dôsledku modifikačného vplyvu zjemňujú štruktúru liatin a grafit v etape primárnej kryštalizácie (bez očkovania).

Ich účinok na grafitizáciu závisí od stavu v akom sa v liatine vyskytujú (chemické zlúčeniny, roztoky, bubliny) a môže byť rôzny.

Dusík zvyšuje pevnostné vlastnosti LLG a v praxi sa nadusičením nízkopevnostnej liatiny výrazne zvýši jej pevnosť a tvrdosť.

Najintenzívnejšie antigrafitizačne pôsobí dusík, najmenej kyslík.

Vodík pri obsahu nad 0,015 % spôsobuje pórovitosť liatin. Vplyv legúr na mechanické vlastnosti liatin je na **obr. 3.37**.



Obr. 3.37 Vplyv legujúcich prvkov na pevnosť a tvrdosť liatin

3.2 Vplyv rýchlosti ochladzovania (tuhnutia)

Rýchlosť ochladzovania výrazne ovplyvňuje kryštalizáciu grafitického eutektika a teda aj jej výsledok t.j. vznik štruktúry liatin. Zvyšovaním rýchlosti ochladzovania kryštalizácia štartuje pri väčšom podchladení (pod teplotu T_{ES} – stabilného eutektika) – štruktúra sa zjemňuje. Avšak pri určitej kritickej rýchlosti ochladzovania tavenina sa podchladí až pod T_{EM} (teplotu metastabilného eutektika) a kryštalizácia prebieha metastabilne (bez grafitu). Rozsah podchladenia významne určuje povahu eutektickej premeny, počet eutektických buniek, ale tiež veľkosť, jemnosť a charakter rozloženia fáz eutektika, najmä grafitu. Pri pomalom ochladzovaní vzniká hrubší grafit rovnomerne rozložený, typ A, resp. ďalšie jeho tvary.

Zvýšením rýchlosti ochladzovania sa mení aj jeho rozloženie (ružicovité až medzidendritické – nežiaduce). Rýchlosť ochladzovania je určená hrúbkou stien odliatku, jeho konštrukciou, hmotnosťou (modulom), ale tiež materiálom formy, jej tepelno – fyzikálnymi vlastnosťami (tepelnou difuzivitou – b_f). Vysoká b_f zvyšuje rýchlosť ochladzovania.

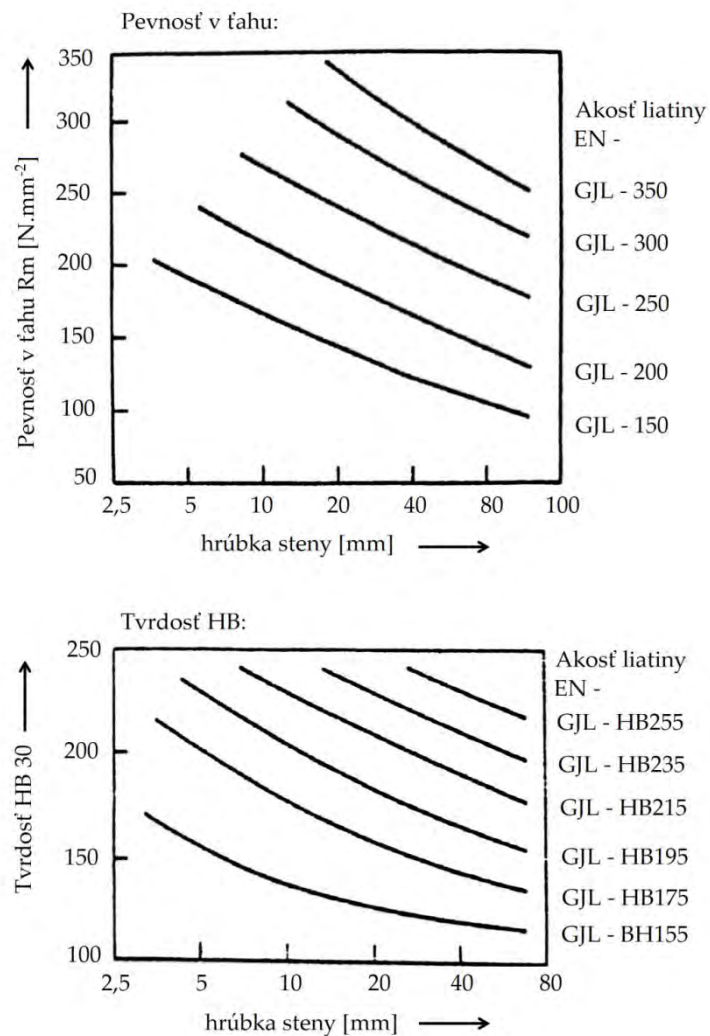
Rýchle ochladzovanie podporuje:

- vznik metastabilnej štruktúry (zákalčky, karbidy)
- vznik perlitu

V dôsledku citlivosti liatiny na rýchlosť ochladzovania vzniká rôzna štruktúra a rôzne mechanické vlastnosti v tenkých a hrubých stenách odliatku. V hrubých stenách je viac feritu a teda v nich nižšie mechanické vlastnosti ako v tenkých stenách toho odliatku. Údaje o vlastnostiach liatin sa preto musia vždy vzťahovať ku konkrétnej hrúbke stien.

Táto nehomogenita liatinových odliatkov je spôsobená rozdielnou kinetikou kryštalizácie. Zvýšená rýchlosť ochladzovania znižuje teplotu T_{ES} aj T_{EM} tuhnutia eutektika a pôsobí proti grafitizácii. Zvýšením rýchlosti ochladzovania sa grafit zjemňuje, mení sa aj jeho rozloženie až na medzidendritické (typ D). Zjemňuje sa tiež štruktúra – zvyšuje sa počet eutektických buniek. Výsledkom takejto kryštalizácie je zvýšená tvrdosť (HB) a pevnosť (Rm), zvyšuje sa však krehkosť liatiny a zhoršuje sa jej obrábateľnosť.

Výsledné vlastnosti Rm a HB v závislosti od hrúbky stien pre jednotlivé akosti liatin (GJL-150 až 350, resp. HB 155 až 255) podľa EN 1561 sú na **obr. 3.38**.



Obr. 3.38 Závislosť R_m a HB od hrúbky steny odliatkov pre jednotlivé akosti liatin (podľa EN 1561)

3.3 Vplyv metalurgie tavenia a úpravy tekutého kovu

Fyzikálno – chemický stav tekutej liatiny je najviac charakterizovaný prítomnosťou a množstvom aktívnych **kryštalizačných zárodkov** grafického eutektika. Sú tvorené tzv. klastermi t.j. usporiadanými komplexmi atómov C, nekovovými disperznými vtrúseninami (SiO_2 , MnS a pod.), zvyškami nerozpustných častíc grafitu a pod. Dôležité sú tiež **fyzikálne vlastnosti** tekutého kovu – viskozita, povrchové napätie a medzifázové napätie, ktoré ovplyvňujú rast kryštalizačných zárodkov.

Uvedený stav tekutého kovu ovplyvňujú:

- vsádzkové suroviny a ich čistota (ich tzv. dedičné vlastnosti),
- spôsob tavenia t.j. podmienky tavenia (druh pece),
- teplota prehriatia a výdrž na zvýšenej teplote,
- vnútropecná resp. mimopecná úprava tekutého kovu (očkovanie, modifikovanie, odsírenie, rôzne postupy rafinácie).

3.3.1 Kvalita vsádzkových surovín

Kvalita vsádzkových surovín znamená najmä ich chemickú čistotu t.j. nízky obsah stopových prvkov a prímiesí, vrátane dusíka, vodíka a kyslíka. Čistota, aj povrchová je veľmi dôležitá pri tavení liatiny v elektrických indukčných peciach, kde sú rafinačné metódy obmedzené (minimálne). Význam dedičných vlastností surových želez bol vysvetlený pôsobením stopových prvkov, ktorých obsah a druh veľmi súvisí s kvalitou vysokopecnej vsádzky a s vysokopecnou metalurgiou.

Tvar a veľkosť grafitu, ako aj sklon ku grafitizácii súvisí s jeho morfológiou vo vsádzkových surovinách, najmä v surovom železe a vratnom materiály. Pri použití vsádzky obsahujúcej grafit v tvare hrubých lamiel, resp. veľmi jemný grafit, vyrobená liatina vykazuje tendenciu ku kryštalizácii s grafitom podobného tvaru. Rovnako pôsobí aj použitie oceliarenských surových želez a liatiny s bielou štruktúrou. Nežiaduce je tiež znečistenie surového železa s veľkým množstvom primárneho grafitu (grafitovou penou). Nežiaduce výsledky týchto dedičných vlastností vsádzky môžeme odstrániť vysokým prehriatím tekutého kovu (nad rekryštalizačnú teplotu).

Pre zabezpečenie stability kvality odliatkov je potrebný stabilný dodávateľ surovín. Za najčistejší oceľový odpad sú považované hlbokočistné ocele. Ich výroba vyžaduje vysokú čistotu dosahovanú často vákuovaním.

3.3.2 Metalurgia tavenia

Metalurgia tavenia významne ovplyvňuje kvalitu tekutého kovu t.j. jeho fyzikálno – chemický stav. Najlepšie rafinačné možnosti a dosiahnutie vysokej čistoty umožňujú elektrické oblúkové pece (EOP), avšak sú energeticky najnákladnejšie. Kvalita

(čistota) liatiny z kuplovej pece je považovaná za vyššiu ako z elektrickej indukčnej pece (EIP) aj keď v kuplovej peci dochádza k zvýšeniu obsahu síry (0,04 až 0,08 %S).

V kuplovej peci sa pozitívne prejavuje silná redukčná atmosféra, najmä v nísteji pece a v špeciálnych prípadoch zásaditá troska, čo tavenie v EIP neumožňuje. Liatina z EIP obsahuje veľké množstvo nekovových zložiek. Sú to rôzne vtrúseniny (oxidy), ktoré majú prevažne negatívny vplyv na grafitizáciu a vlastnosti liatin.

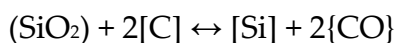
Veľmi škodlivou prímiesou v štruktúre liatin je fosfidické eutektikum, ktorého výskyt je častejší u liatin z kuplových pecí (obsah P často až 1 %).

3.3.3 Očkovanie liatin (LLG a LGG)

Grafitizačné očkovanie liatiny je zámerné vnášanie prísad (očkovadiel) do tekutého kovu za účelom ovplyvnenia nukleačnej (grafitizačnej) schopnosti a vzniku nových zárodkov. Zvyšuje sa tým počet kryštalizačných zárodkov grafitu, ktorý sa zjemňuje a najmä sa tým zväčšuje počet eutektických buniek (zjemňuje štruktúra).

Očkovanie je potrebné u podeutektických liatin s nízkym Se, pri ktorých je nebezpečenstvo kryštalizácie v súlade s metastabilnou sústavou (vylučovanie cementitu). Podstatne lepší účinok očkovania vznikne po vysokom prehriatí a výdrži na zvýšenej teplote (cca 20 minút).

Prehriatím (nad $T_{kr.}$) a zotrvaním tekutej liatiny na tejto teplote sa dosiahne rozpustenie nežiadúcich (nevhodných) zárodkov SiO_2 ich redukciou uhlíkom podľa tzv. téglíkovej reakcie:



kde: [] – zložky rozpustené v kove

() – zložky tvoriace trosku

{ } – plynné zložky

$T_{kr.}$ je najčastejšie nad 1450 °C (v závislosti od obsahu C a Si).

Smer reakcie sa mení pri rovnovážnej teplote T_i (inverznej teplote), závislej od obsahu C a Si v tavenine.

Výdrž na teplote T_{kr} je potrebná za účelom úplného priebehu téglikovej reakcie, resp. dostatočnej redukcie SiO_2 a vyplávania CO a inklúzií z taveniny. Očkovaním sa vnášajú do takto pripravenej taveniny nové, vhodnejšie v tavenine nerozpustné častice, na ktorých vzniká heterogénna nukleácia. Sú to v podstate nové vhodnejšie kryštalizačné zárodky. Očkovaná liatina je jemnozrnnejšia, pevnejšia a bez tvrdého a krehkého cementitu.

Očkovadlá sú drvené ferozliatiny, najčastejšie na báze FeSi (70 – 90 %) s prísadou Ca, Ba, Al, Sr a Be, ktoré sú v tavenine nerozpustné a po zreagovaní so zložkami liatiny vytvoria kryštalizačné zárodky. Vhodným **grafitizačným** očkovadlom je tiež grafit (zabezpečí vyšší podiel lamelárneho grafitu v štruktúre tenkostenných odliatkov).

3.3.4 Modifikovanie liatin

Modifikácia je proces, pri ktorom prísadou modifikátorov do tekutej liatiny (najčastejšie kovmi Mg, Ce a Ca) sa ovplyvňuje rýchlosť rastu zárodkov tak, že sa v konečnom dôsledku zmení tvar (morfológia) vylúčenej fázy. Pri kryštalizácii grafitu modifikátory znižujú povrchové napätie σ_{KT} na medzifázovom rozhraní kryštál – tavenina, čím sa mení tvar grafitu na zaoblený (gulôčkový).

Odsírenie liatin – síra je považovaná najčastejšie za škodlivý prvok. Nakoľko sa v austenite, grafitu ani cementite nerozpúšťa, vylučuje sa na hraniciach zŕn t.j. medzi eutektickými bunkami. Znižuje tak mechanické vlastnosti liatin a znižuje najmä ich žiaruvzdornosť. Sulfidy majú nízky bod tavenia. Účinky síry sa eliminujú mangánom, ktorý viaže síru na menej škodlivý sulfid MnS.

Veľmi nízky obsah síry je potrebný pri výrobe LGG (pod 0,02 %). Odsírenie sa robí najčastejšie horčíkom, sódou (Na_2CO_3), alebo zliatinami na báze Ca (CaC_2 , CaO, CaSiBa, CaSiMg a pod.).

4. TAVENIE LIATIN

Taviace zariadenia ako aj technológia vedenia tavby majú významný vplyv na metalurgickú kvalitu taveniny, tým aj na akosť vyrábaných odliatkov a na celkovú ekonomiku výroby.

Taviace agregáty v zlievarňach musia zaistiť:

- výrobu kovu s požadovaným chemickým zložením a metalurgickou kvalitou,
- dosiahnutie dostatočne vysokej teploty roztaveného kovu – obyčajne v rozmedzí 1400 – 1520 °C,
- produkovať také množstvá škodlivín a odpadov, ktoré vyhovujú ekologickým zákonom, normám a predpisom.

Na výrobu tekutej liatiny požadovanej kvality sa používajú tieto taviace zariadenia:

- kuplová pec (KP),
- elektrická indukčná pec (EIP),
- elektrická oblúčková pec (EOP),
- rotačná bubnová pec.

Kuplové pece sú stále najvýhodnejšími taviacimi agregátmi, ktoré obyčajne celkom vyhovujú na tavenie LLG. Ich nevýhodou je ťažšie dodržiavanie (kolísanie) chemického zloženia, oneskorená (zdlhavá) úprava zloženia taveného kovu, limitovaná teplota kovu a nasýtenie liatiny sírou z koksu. Veľké problémy sú tiež s dodržiavaním exhalančných limitov. Musia byť vybavené účinným zariadením na zachytávanie škodlivín. Liatiny tavené v kuplových peciach však majú lepšiu grafítizáciu, pri tuhnutí tvoria menšie stiahnutiny a taktiež je možné v kuplovej peci spracovať niektoré druhy odpadu, ktoré v zlievarni vznikajú (najmä prachové častice obsahujúce železo).

Elektrické indukčné pece majú veľa výhod v porovnaní s kuplovými pecami, ich investičné a prevádzkové náklady však bývajú vyššie ako u kuplových pecí. **Výhody EIP** sa uplatňujú predovšetkým pri tavení LGG, legovaných liatin pri potrebe častej zmeny chemického zloženia liatiny (tavení rôznych značiek s presným chemickým zložením).

Elektrické oblúčkové pece sú typickým agregátom pre tavenie ocelí. Používajú sa

v zlievarňach ocelí, ktoré prešli na výrobu odliatkov z LGG, príp. kvalitných liatín. Ako taviace zariadenie, ktoré je určené iba pre tavenie liatin sa však neinštalujú.

Rotačné bubnové pece sú pomerne novým typom taviaceho agregátu. Po ekonomickej stránke sú ich zriaďovacie (investičné) náklady výhodné. Taktiež sú z metalurgického hľadiska vhodné pre tavenie všetkých typov liatin. Kapacitne sa hodia predovšetkým pre menšie až stredne veľké zlievarne.

4.1 Tavenie liatiny v kuplovej peci

Kuplová pec je šachtová pec kruhového prierezu, ktorá funguje na princípe protiprúdovej výmene tepla. Zdrojom tepla v kuplovej peci je najčastejšie koks, použitie iných druhov palív – plyn alebo tekuté palivá je skôr výnimočné.

4.1.1 Základné konštrukčné časti kuplovej pece

Kuplová pec je tvorená oceľovým plášťom a po celej výške, alebo čiastočne vymurovaná žiaruvzdornou výmurovkou.

Základnými časťami kuplovej pece sú – **obr. 4.39**:

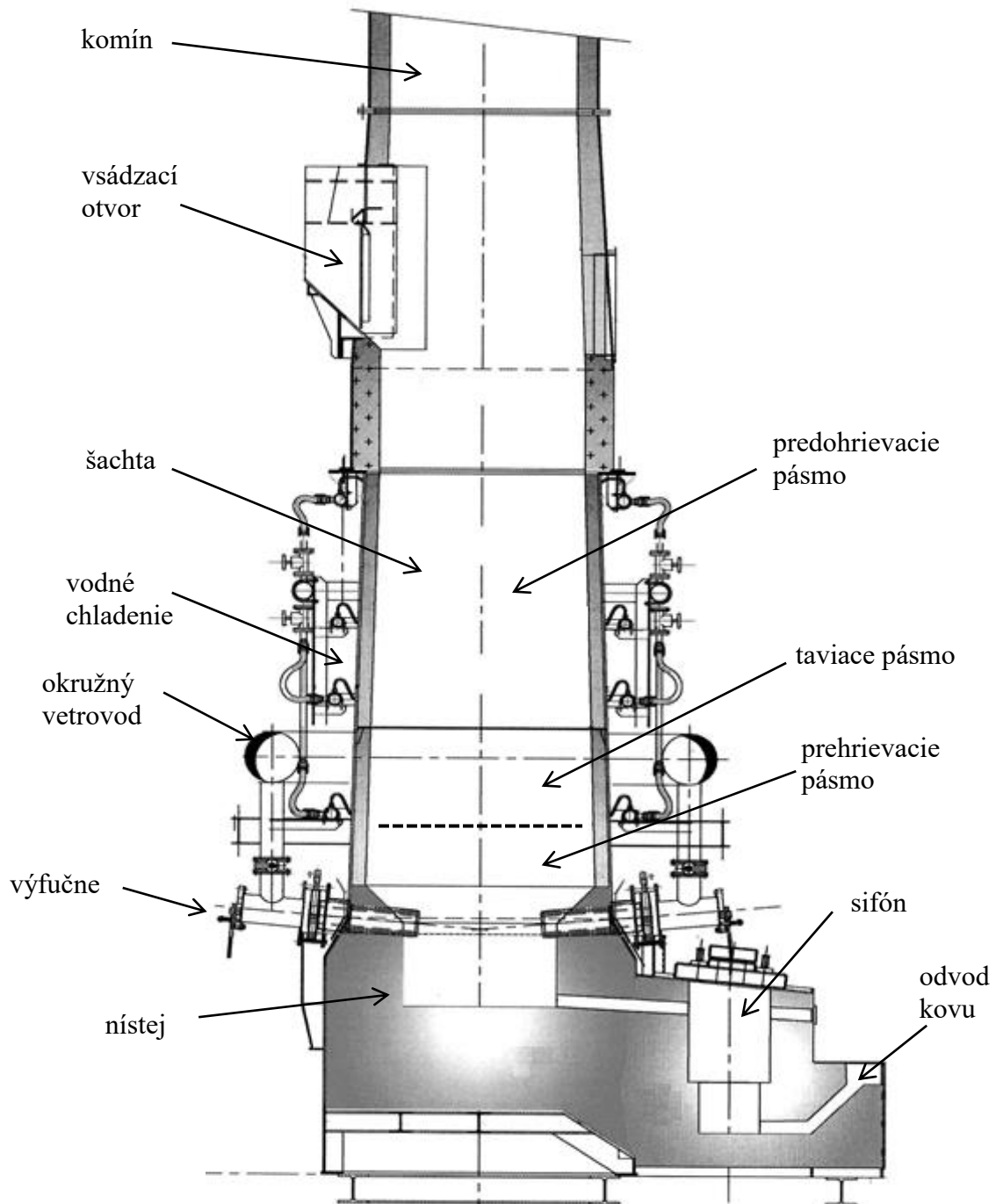
- **komín** – časť nad zavážacím otvorom
- **šachta** – časť medzi zavážacím otvorom a výfučňami
- **nístej** – časť medzi výfučňami a dnom kuplovej pece
- **odpichový otvor a odlučovač trosky (sifón)**
- **vetrovod a výfučne**

Komín – odvádza celý objem spalín, alebo ich časť mimo priestor zlievarne. Komín býva osadený lapačom prachových exhalátov. Moderné teplovzdušné kuplové pece nemajú komín a všetky spaliny sú odvádzané už pod vsádzacím otvorom pece do rekuperátora a filtrov.

Vsádzací otvor – slúži na zavážanie vsádzky. Je prístupný zo sádzacej plošiny. Zavážanie vsádzky sa uskutočňuje obyčajne skipovým výťahom alebo zavážacím žeriavom so zavážacím okovom. Zavážací vozík „**skip**“ sa pomocou konštrukcie vedenia preklápa a jeho obsah sa vysype do šachty kuplovne. Zavážacie okovy sú vybavené dvojdielnym vyklápacím dnom. Každá dávka vsádzky obsahuje všetky

komponenty – kovovú vsádzku, troskotvorné prísady a koks. Menej často sa používajú aj iné spôsoby zavážania, napr. vibračné.

Systém zavážania má zabezpečiť rovnomerné rozloženie vsádzky (vo vrstvách) v celom priereze kuplovej pece. V prípade, že pri zavážaní dochádza k odmiešavaniu zložiek vsádzky, alebo jej kusovitosti v skipovom zavážaní veľkých pecí ($\varnothing > 100$ cm) dochádza k nerovnomernému, jednostrannému chodu kuplovej pece.



Obr. 4.39 Schéma kuplovej pece

Šachta – u starších pecí je valcová, v moderných kuplových peciach sa smerom k nísteji mierne rozširuje kvôli chladeniu, lepšiemu stekaniu vody.

Šachta kuplovej pece je najčastejšie vymurovaná žiaruvzdornou výmurovkou (šamotovou). U bezvýmurovkových kuplových pecí je šachta tvorená iba vodou chladeným oceľovým plášťom. Rovnako u niektorých pecí s vymurovanou šachtou sa používa vodné chladenie plášťa, aby sa zvýšila životnosť výmurovky. Veľkosť kuplovej pece sa hodnotí priemerom šachty v oblasti výfuční. Obvykle je v rozpätí 400 až 1400 mm, moderné až 2200 mm. S priemerom šachty súvisí taviaci výkon pece, ktorý dosahuje asi 10 – 15 t kovu / m². hod.

Okružný vetrovod – prstencové potrubie okolo kuplovne, z ktorého sa privádza spaľovací vzduch k jednotlivým výfučiam. Spaľovací vzduch sa v zlievarenskej terminológii označuje ako "vietor".

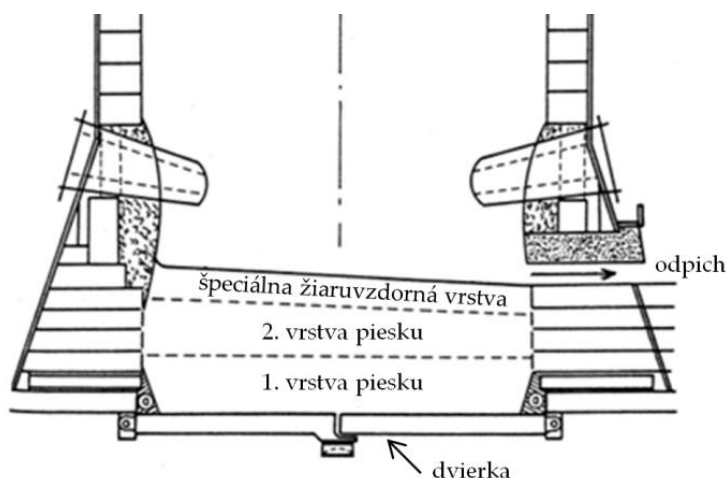
Výfučne – slúžia pre dopravu spaľovacieho vzduchu do kuplovne. Výfučne bývajú liatinové alebo medené, vodou chladené. Počet výfuční závisí od veľkosti kuplovej pece. Obvyklý počet je 4 až 6, príp. až 12. Každá výfučna má možnosť samostatnej regulácie množstva fúkaného vzduchu, ktorá umožňuje riadiť chod pece v danej oblasti. Priebeh tavenia je u každej výfučne možné sledovať skleneným priezorom. Výfučnu je tiež možné otvoriť, aby bolo umožnené mechanické čistenie v prípade, že by dochádzalo k jej upchávaniu tuhnutou troskou.

Nístej – je časť kuplovne pod úrovňou výfuční. V kuplových peciach s **periodickým odpichom** (staršie pece) slúži nístej na akumuláciu nataveného kovu. Odpich sa vykonáva po zaplnení nísteje kovom, keď hladina trosky dosahuje až na úroveň výfuční. V tomto prípade sú výfučne vo výške približne 500 až 800 mm nad dnom kuplovne. Natavený kov v nísteji sa zhromažďuje vo voľných priestoroch medzi kusmi „výplňového“ koksu. Troska sa vypúšťa stroskovým otvorom, ktorý je umiestnený asi 200 – 300 mm nad odpichom kovu (u starého typu pecí).

V modernejších kuplových peciach je obvyčajne **kontinuálny odpich**. V tomto prípade nemá nístej funkciu zásobníka kovu a máva menšiu výšku (okolo 300 – 400 mm). Natavený kov spoločne s troskou odteká plynule odpichovým otvorom do sifónu, kde sa troska oddeľuje od kovu.

V stene nísteje nad dnom kuplovne sú **pracovné dvierka**. Tie slúžia obsluhu k prístupu do pece pri opravách, k vypechovaniu dna a k zaplneniu pece. Po zapálení základového koksu sa otvor zamuruje, dvierka sa uzavru a zaistia.

Dno pece – je v kuplových peciach s periodickou prevádzkou dvojdielne vyklápacie (dvierka, **obr. 4.40**). Počas tavby musí byť jeho uzavretie spoľahlivo zaistené zaklinovaním a podoprením. Po ukončení tavby sa dvierka dna otvoria a zvyšky vsádzky a troska vypadnú pod kuplovňu. Otvoreným dnom je možný prístup pre opravu výmurovky kuplovne. Dno je vypechované suchým pieskom alebo špeciálnou žiaruvzdornou výmurovkou – **obr. 4.40**.



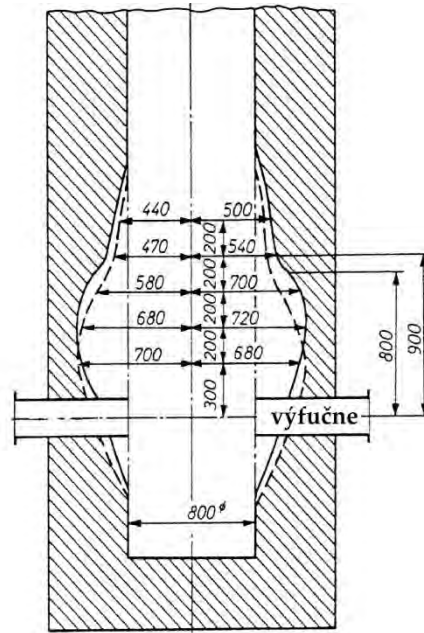
Obr. 4.40 Prevedenie výmurovky dna pece

V kuplových peciach s dlhodobou prevádzkou je dno pece pevné, na pevných základoch. Vstup do pece pri opravách je možný iba pracovným otvorom na boku pece. Žiaruvzdorná výmurovka nísteje a sifónov je uhlíková.

Sifón – slúži u pecí s kontinuálnym odpichom k oddeleniu trosky od kovu. Prepážka rozdeľuje sifón na dve časti. Troska, ako ľahšia, vypláva a odteká nad prepážkou, čistý kov pod prepážkou podteká a po žliabku steká do panve alebo predpecie. Troska kontinuálne odteká zo sifónu do granulačného žlabu, kde dochádza k jej granulácii v prúde vody.

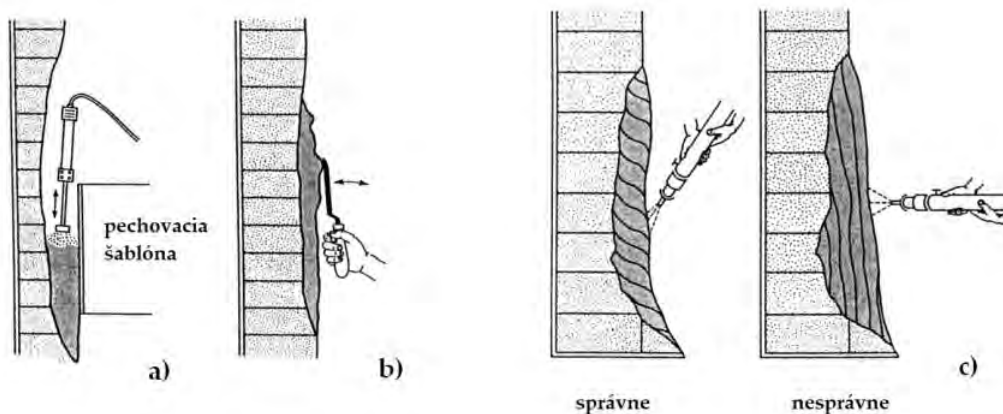
Výmurovka – u kuplových pecí s periodickou prevádzkou je vymurovaná od dna po celej výške šachty najčastejšie šamotom. Rôzne časti kuplovne môžu byť podľa mechanického, tepelného a chemického namáhania, vymurované rôznymi materiálmi. Z metalurgického hľadiska je dôležitá výmurovka taviaceho pásma a nísteje. Podľa chemického charakteru výmurovky sa rozlišujú kuplovne kyslé, neutrálne alebo zásadité. Druh výmurovky musí zodpovedať bazicite trosky. Počas

tavenia dochádza k odtavovaniu výmurovky v najviac tepelne namáhaných prierezoch – najmä v oblasti výfučni a v taviacom pásme, k chemickému napádaniu tekutou troskou a takisto k mechanickému opotrebovaniu výmurovky abrazívnym účinkom vsádzky – **obr. 4.41**. Opotrebenie výmurovky limituje maximálnu dobu tavby (12 až 14 hodín).



Obr. 4.41 Opotrebovanie výmurovky po skončení tavby

Oprava výmurovky sa vykonáva po vychladnutí pece (obyčajne druhý deň po tavbe) vypechovaním suchou výmurovkovou špeciálnou žiaruvzdornou hmotou podľa šablóny, vylepením a vymazaním, alebo torkretovaním (nastriekaním) vlhkej žiaruvzdornej hmoty torkretovacím zariadením – **obr. 42**.



- a) pechovanie podľa šablóny
- b) oprava vymazaním
- c) oprava torkretovaním

Obr. 4.42 Oprava výmurovky

4.1.2 Režim prevádzky kuplovej pece

Podľa spôsobu prevádzky sa kuplové pece delia na:

- pece s periodickou prevádzkou
- pece s kampaňovou prevádzkou

4.1.2.1 Kuplové pece s periodickou prevádzkou

V peciach s periodickou prevádzkou sa taví iba krátkodobo. Pracovný cyklus pozostáva z prípravy kuplovne k tavbe, zapálenia, vlastného tavenia a ukončenia tavby. Pece sa inštalujú v pároch (2, 4) pričom sa jedna opravuje a v druhej sa taví.

Pracovný cyklus:

Príprava pece pozostáva z opravy a vysušenia výmurovky a dna pece, zo zavezenia a zapálenia základového koksu, jeho postupného zvyšovania teploty pomalým fúkaním vzduchu. Pred samotným zavázaním a tavením je nutné zmerať a upraviť výšku základného (výplňového) koksu.

Pred tavením sa pec zavezie vrstvami kovu, koksu a vápenca.

Tavenie začína fúkaním vetra do kuplovne. Prvé kvapky roztaveného kovu je možné cez priezory vo výfúčniach pozorovať obyčajne už za 8 – 10 min. Ak to trvá dlhšie, bola príliš vysoká úroveň základového koksu. V priebehu tavby sa vsádzka zaväza tak, aby pec bola stále plná.

Tavič kontroluje priebeh tavby meraním teploty tekutého kovu, jeho zloženie (minimálne zákalkovou skúškou) a riadi chod pece.

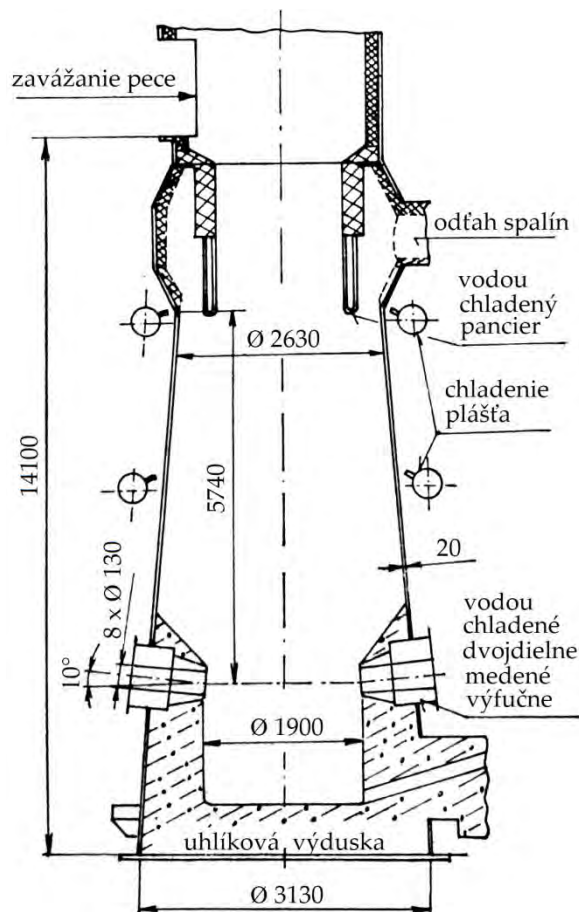
Riadenie chodu spočíva v regulácii množstva koksu a spaľovacieho vzduchu, v zmene zloženia vsádzky, najmä podielu oceleového odpadu pri zmene chemického zloženia, príp. úprave kvality trosky zmenou prísady vápenca.

Po ukončení tavby sa pec „podrazí“ – otvorí sa dno a pec sa vyprázdni – vypadnú zvyšky po tavení, ktoré sa vodou ochladia.

Dĺžka tavby je limitovaná opotrebovaním výmurovky. Maximálna doba tavby z tohto dôvodu nebýva dlhšia ako 12 – 16 hodín denne (obyčajne menej). Pri veľkom opotrebovaní výmurovky hrozí nebezpečenstvo prepálenie plášťa.

4.1.2.2 Kuplové pece s kampaňovou prevádzkou

Moderné kuplové pece pre vysoké taviace výkony sa konštruujú pre kampaňovú (dlhodobú) prevádzku. Dĺžka kampane je zvyčajne niekoľko týždňov. Po skončení kampane je nutné vykonať opravu nístaje sífónov. Jedná sa prevažne o veľké kuplovne s priemerom nad 1200 mm. Šachta je často tvorená len oceľovým, vodou chladeným plášťom a nebýva výmurovaná, alebo je výmurovka len v určitej výške, **obr. 4.43**.



Obr. 4.43 Rez bezvýmurovkovej kuplovne

Dno kuplovne je pevné – nie je otvárateľné. Na boku nístaje nad dnom sú v priebehu taviacej kampane zamurované pracovné dvierka. Pec býva niekedy vybavená dvoma sífónmi, pretože životnosť ich výmurovky je podstatne kratšia, než dĺžka kampane a musia sa počas kampane opravovať. Výfúčne sú medené a chladené vodou.

U bezvýmurovkových kuplových pecí je možné pracovať s kyslou, neutrálnou ale aj zásaditou troskou. Kampaňové kuplové pece môžu taviť bez prerušenia alebo s prerušením tavby. Pri prerušovaní tavby sa pec nenecháva vyhasnúť, ale sa len utlmí.

Utlmenie sa vykonáva tak, že sa prestane vsádzať kovová vsádzka, miesto ktorej sa vsadí niekoľko dávok koksu. Kov sa z pece a zo sifónu vypustí a prestane sa fúkať vietor. Prerušenie tavby môže byť aj niekoľkodňové. K obnoveniu tavby dochádza po navsádzkovaní a úprave výšky výplňového koksu jeho zapálením, rozhorením a po zavezení kovovej vsádzky.

4.1.3 Spaľovací vzduch

Zdrojom spaľovacieho vzduchu fúkaného do kuplovej pece cez vetrovod výfučne je najčastejšie špeciálny ventilátor zabezpečujúci potrebné množstvo a tlak spaľovacieho vzduchu. Na vytavenie 1t liatiny je potrebný kyslík obsiahnutý v 600 – 700 N.m³ vzduchu. Množstvo fúkaného vetra sa pohybuje okolo 100 – 130 N.m³ na 1m² prierezu kuplovne za 1 min. Zdrojom vetra sú dúchadla. Používajú sa predovšetkým dúchadla rotačné alebo odstredivé.

Podľa teploty vzduchu sa kuplové pece rozdeľujú na:

- studenvzdušné kuplovne
- teplovzdušné kuplovne

Pri **studenvzdušných kuplových peciach** sa fúka vietor s bežnou okolitou teplotou. Ich nevýhodou je nižšia tepelná účinnosť peci v dôsledku veľkej straty tepla pecnými plynmi. Vzniká tu problém dosiahnuť dostatočne vysokú teplotu kovu. So studeným vetrom pracujú predovšetkým staršie a menšie taviace agregáty.

Pri **teповzdušných kuplových peciach** sa do pece fúka vzduch o teplote 250 – 550 °C. Na ohrev sa využíva teplo spalín, ktoré z kuplovej pece odchádzajú alebo sa odsávajú v úrovni pod vsádzacím otvorom. Spaliny sa odprašujú, v spaľovacej komore sa spaľuje oxid uhoľnatý, ktorý je v spalínach obsiahnutý v množstve okolo 15 % a vedú do rekuperátora.

Rekuperátor je tepelný výmenník, v ktorom sa teplom spalín ohrieva vzduch fúkaný do pece.

Kuplové pece sú ekologicky nevhodné a musia byť vybavené veľmi nákladným zariadením, slúžiacim na odsávanie a čistenie, ako aj zneškodňovanie škodlivín (emisíí). Súčasťou tohto zariadenia je aj rekuperátor na ohrev spaľovacieho vzduchu.

Zvýšením obsahu kyslíka vo vzduchu, ktorý sa fúka do pece sa zvýši intenzita horenia, znížia sa tepelné straty odvodom menšieho množstva spalín a dosahuje sa zvýšenie teploty kovu. Množstvo pridávaného kyslíka býva v množstve 1 – 4 %. Umožňuje to tiež znížiť spotrebu koksu resp. zvýšiť výkon pece.

4.1.4 Emisie

Spaliny, odchádzajúce z kuplovne, obsahujú značné množstvo plyných a pevných emisií, tvorených unášanými prachovými časticami, splodinami horenia a oxidácie niektorých prvkov. Tuhé exhaláty tvoria koksový prach, nestroskovaný popol a oxidy SiO_2 , FeO , CaO , Al_2O_3 , MgO , MnO , ZnO a iné.

Z kuplovne odchádza asi 8 kg tuhých častíc na 1 t kovu. V spalinách je asi 10 – 15 % CO_2 , 14 – 20 % CO a asi 3 – 4 % SO_2 . Tieto exhaláty je nutné zo spalín odstrániť tak, aby boli splnené zákonné limity.

Tuhé exhaláty sa zachytávajú pomocou gravitačných, odstredivých alebo iných druhov odlučovačov. Jednoduchým typom sú mokré odlučovače, založené na princípe vodnej clony. Zložitejšie systémy sa skladajú z niekoľkých stupňov čistenia.

Dočistenie exhalátov sa robí v látkových alebo elektrostatických filtroch, ktoré sú schopné zachytiť až 99 % častíc s veľkosťou nad 0,5 mikrometrov (spaliny, vypúšťané z filtračného systému sú často čistejšie, než nasávaný vzduch).

Oxid uhoľnatý sa v spalinách likviduje v dohorievacom režime, oxid siričitý neutralizáciou vápennou vodou. Voda, používaná na zachytávanie exhalátov je mechanicky a chemicky veľmi agresívna.

4.1.5 Metalurgia tavenia v kuplovej peci

Základnými charakteristikami tavenia liatiny v kuplovni, ktoré ovplyvňujú taviaci proces a kvalitu vytavenej liatiny (aj jej teplotu na žlabku) sú:

- proces spaľovania koksu, priebeh teplôt v peci, teplota a zloženie plynnej fázy (spalín),
- metalurgické pochody v kuplovni, tvorba trosky, výsledné chemické zloženie a teplota vytavenej liatiny.

Najpoužívanším palivom na tavenie v kuplovej peci je zlievarenský koks. Vyznačuje sa viacerými kvalitatívnymi vlastnosťami, ktoré umožňujú vytaviť liatinu o požadovanej teplote a chemickom zložení. Najpožadovanejšie vlastnosti rôznych druhov koksu sú uvedené v **tab. 4.12**. Rozhodujúca je jeho výhrevnosť, pevnosť a kusovosť.

Tab. 4.12 Predpísané vlastnosti zlievarenského koksu

Parametre			SLK I	SLK I	SLK II
Kusovosť			+ 80 mm	+ 100 mm	60 – 80 mm
Voda	W	max. %	4	3	4
Popol	A _d	max. %	10,5	10,5	11
Síra	S _d	max. %	0,6	0,6	0,6
Prchavé látky	V _{daf}	priem. %	1	1	1
Výhrevnosť	Q _f	MJ.kg ⁻¹	28,5	28,5	28,25
M 80		min. %	-	70	-
M 40		min. %	80	80	-
M 10		%	8	8	-
Podsítný podiel		max. %	10	15	10
<i>Pozn.: M – pevnosť, resp. oternosť určená skúškou Micum</i>					

Spaľovanie koksu v kuplovni je v podstate reakcia uhlíka (až 85 % v kokse) s kyslíkom z fúkaného vzduchu. Spaľovanie tuhého paliva je heterogénnym pochodom. Reakcie spaľovania prebiehajú na styčnej ploche dvoch fáz, t.j. na rozhraní tuhej fázy (koks) a plynnej fázy (splodiny horenia – kuplové plyny).

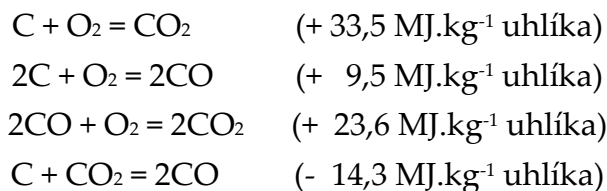
Kinetika spaľovania je závislá najmä od výmeny reakčných zložiek a reakčných splodín na povrchu kúskov koksu. Výmena prebieha pomocou difúzie a preto jej priebeh je riadený známymi zákonmi difúzie (Fickov zákon, Arrcheniov vzťah a ďalšie).

Rýchlosť spaľovania sa zvyšuje najmä s teplotou, rýchlosťou prúdenia vzduchu (odvod splodín horenia z povrchu a prívod čerstvého kyslíka) a znižovaním vrstvy trosky, ktorá vzniká na povrchu koksu z jeho popola (nad 10 % hmotnosti koksu). Pritom má význam chemické zloženie popola, ktoré určuje viskozitu trosky (má byť čo najnižšia).

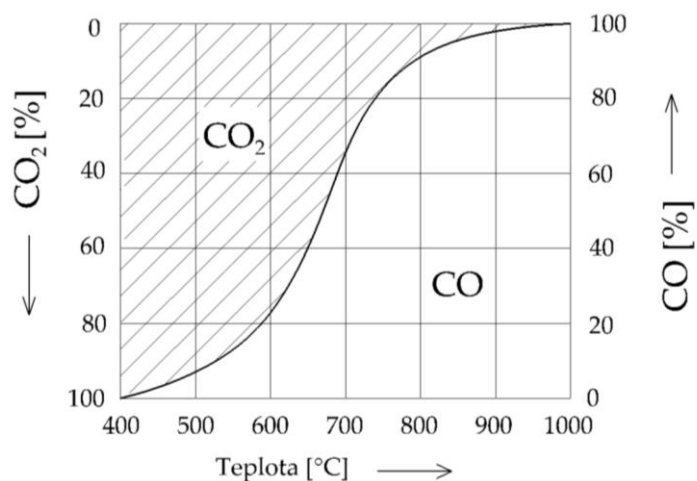
Spaľovanie koksu urýchľuje tiež jeho pórovitosť. Táto výrazne zvyšuje reakčnú plochu, ktorá umožňuje prienik reakčných zložiek do vnútra koksu. Rýchlosť spaľovania sa tiež zvyšuje s reakčnou schopnosťou – **reaktivitou koksu**. Táto vlastnosť je veľmi významná a určuje sa rôznymi skúškami. Priebeh spaľovania je ovplyvňovaný tiež kusovosťou paliva.

Po vstupe do kuplovne sa vzduch najskôr zahrieva na zápalnú teplotu koksu (600 – 700 °C). Potrebné teplo sa získa stykom s rozžeraveným koksom v okolí výfuční, ktorý ochladzuje. Preto teplota aj rýchlosť spaľovania koksu tesne pred výfučňami sú pomerne nízke. Teplota sa zvyšuje až pri hlbšom preniknutí spaľovacieho vzduchu do pece, pričom sa zvyšuje aj intenzita spaľovacích (oxidačných) reakcií.

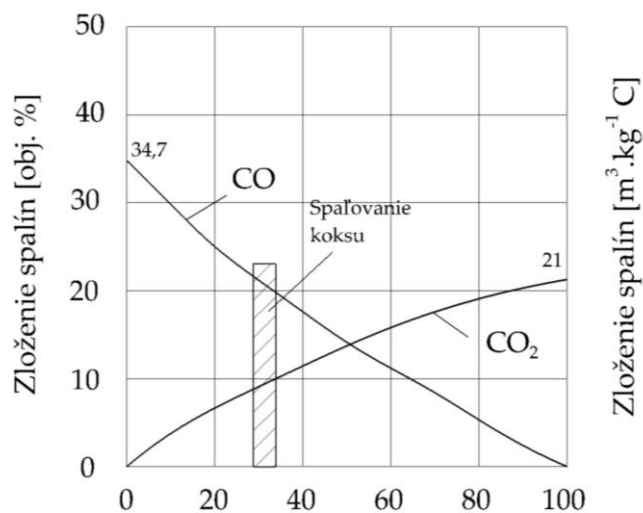
Pri spaľovaní koksu prebiehajú tieto reakcie:



Na priebeh reakcií má vplyv teplota. So stúpajúcou teplotou sa bude za rovnakých podmienok zvyšovať obsah CO v rovnovážnej zmesi CO₂ + CO. Rovnovážny teoretický vzťah medzi obsahom CO₂ a CO a teplotou je vyjadrený Boudouardovým diagramom – **obr. 4.44**. Tento vzťah platí aj pre kuplové plyny – **obr. 4.45**.



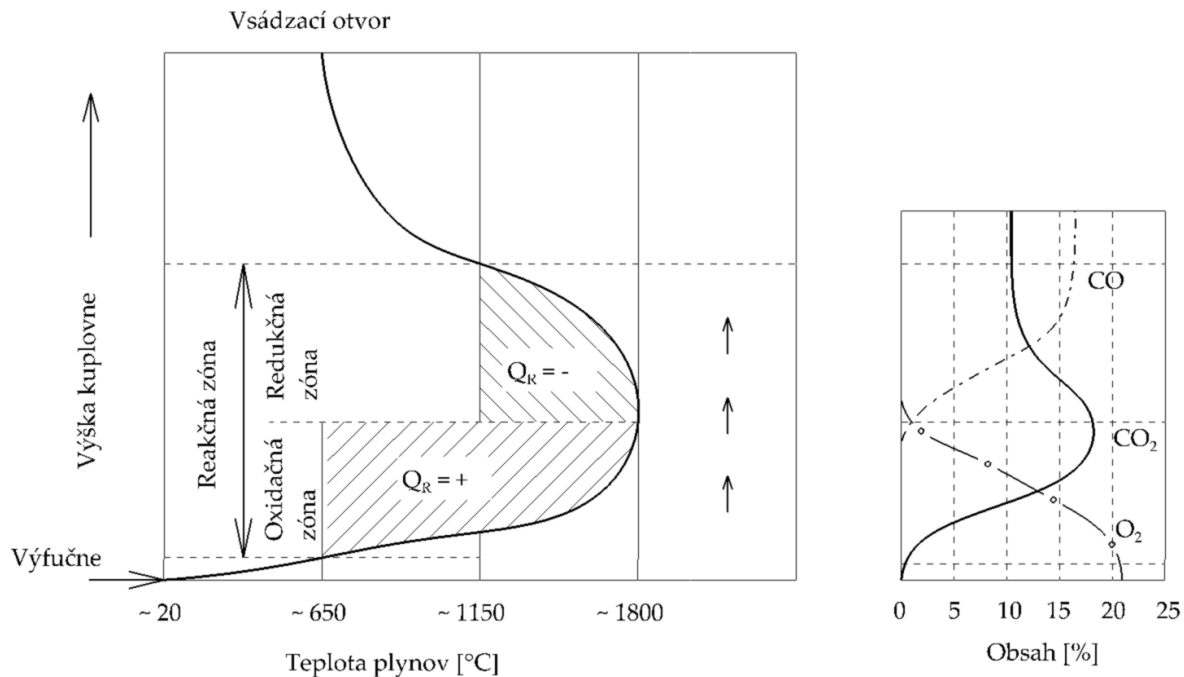
Obr. 4.44 Boudouardov diagram a zloženie spalín v závislosti od účinnosti spaľovania



Obr. 4.45 Vzťah medzi zložením spalín a obsahom CO a CO₂

So stúpajúcou teplotou vzrastá obsah CO a klesá obsah CO₂ (až na 0 pri 1000 °C).

Konkrétny priebeh koncentrácie jednotlivých plynov a ich teploty po výške kuplovej pece je znázornený na **obr. 4.46**.



Obr. 4.46 Priebeh teploty po výške kuplovne a zloženie spalín

Nad výfučňami prudko stúpa teplota v peci až na maximálnu hodnotu (1750 – 1850 °C). Rovnomerne s ňou vzrastá aj obsah CO a CO₂ a klesá obsah O₂. Táto zóna v kuplovej peci sa označuje ako **oxidačné pásmo (obr. 46)**. Vo vyššej zóne nad týmto pásmom teplota klesá, pričom klesá aj obsah CO₂ v dôsledku jeho redukcie až do výšky, v ktorej je teplota 900 až 1000 °C. Pod touto teplotou sa rýchlosť redukcie CO₂ takmer úplne preruší. Táto teplota určuje výšku **redukčného pásma**, ktorá je prakticky totožná s **výškou výplňového koksu**.

Výška oxidačného pásma ovplyvňuje výšku prepálu (oxidácie) kovov v peci.

Nad redukčným pásmom pozvoľne klesá teplota v dôsledku predohrievania vsádzky a preto sa toto pásmo nazýva **predohrievacie**.

Zloženie plynov v tomto pásme sa už prakticky nemení a je totožné so zložením, ktoré môžeme namerať na úrovni vsádzacieho otvoru.

Pásmo pod výfučňami až po dno kuplovne sa nazýva **nístejové**. Je vyplnené koksom, liatinou, troskou a čiastočne plynmi (prevažne CO).

Spaľovanie koksu a teda aj ďalšie metalurgické pochody v kuplovni majú optimálny priebeh vtedy, keď sa pri spaľovaní uvoľní čo najväčšie množstvo tepla. Redukcia CO_2 , pri ktorej sa teplo spotrebováva má prebiehať čo najrýchlejšie a čo najkratšie. Preto rýchlosť prúdenia kuplových plynov, najmä v redukčnej zóne musí byť čo najvyššia (závisí od kusovosti (priedušnosti) vsádzky).

Množstvo uvoľneného tepla je závislé tiež na kvalite koksu (jeho výhrevnosti) a množstve spaľovacieho vzduchu.

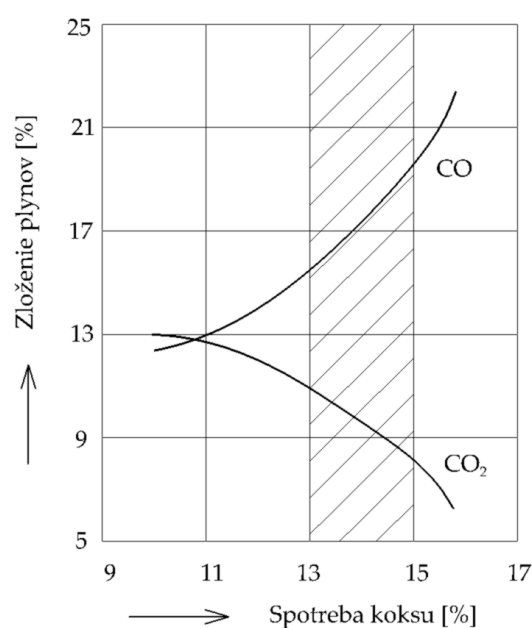
Dokonalosť (účinnosť) spaľovania charakterizuje pomer medzi obsahom CO_2 a CO v kuplových plynov vyjadrený **spaľovacím pomerom**:

$$\eta_s = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Spaľovací pomer je tým vyšší, čím dokonalejšie spaľovanie prebieha, t.j. čím viac CO_2 a menej CO je v kuplových plynov.

Veľmi dôležité pri tavení v kuplovej peci je dodržiavať optimálnu výšku **výplňového koksu**. Táto sa robí v priebehu tavby vsádzaním zvýšeného množstva vsádzkového koksu. Pokles výšky sa prejavuje poklesom teploty tekutého kovu.

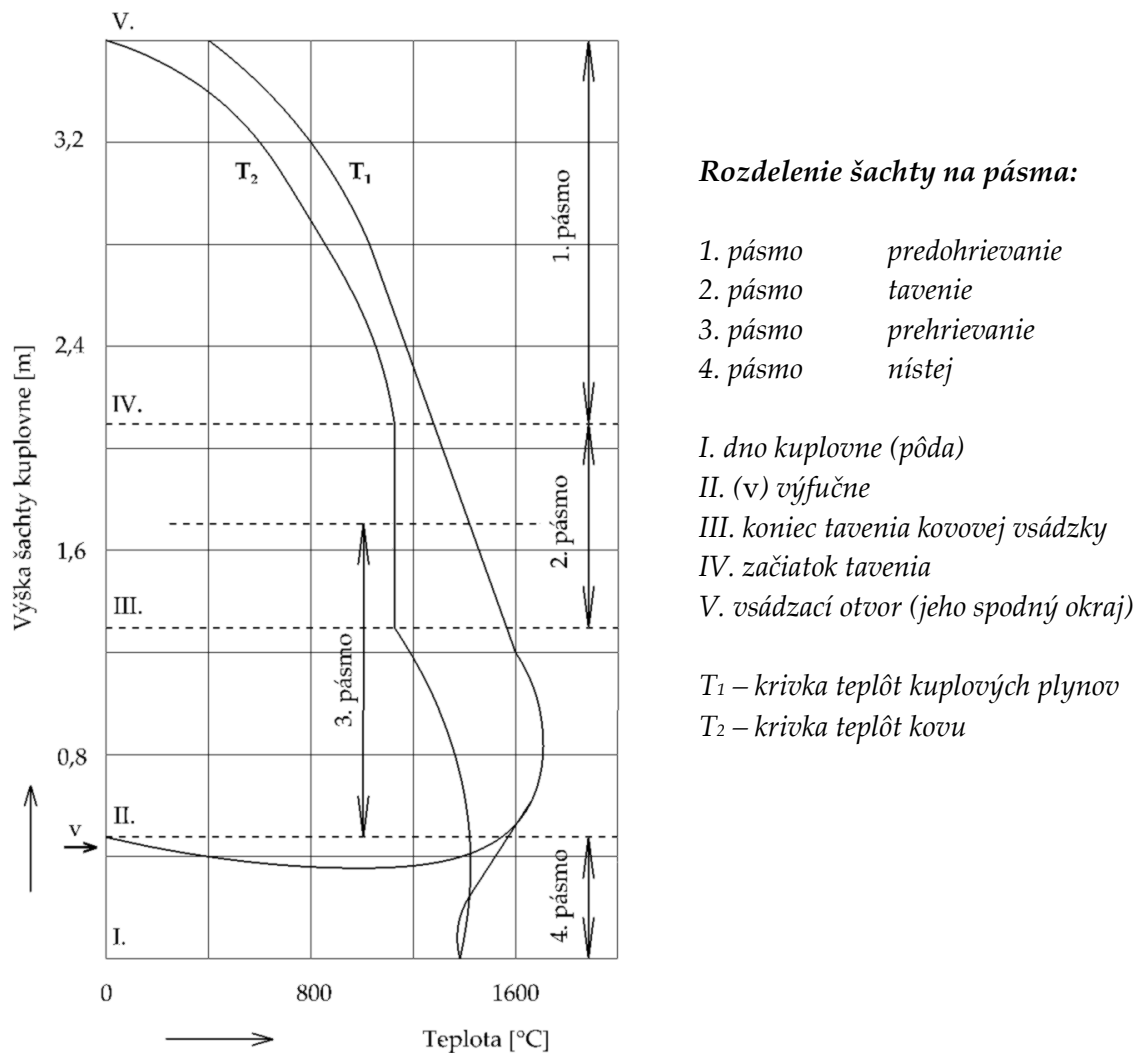
Vplyv spotreby vsádzkového koksu na zloženie plynov je na **obr. 4.47**.



Obr. 4.47 Vplyv spotreby koksu na zloženie plynov v kuplovni

Na zvýšenie teploty tekutého kovu na žlabku je potrebná vyššia spotreba **vsádzkového koksu**. Dôležité je pri zvýšení vsádzky koksu zvýšiť aj množstvo fúkaného vzduchu.

S priebehom teplôt kuplových plynov tiež súvisí **priebeh teplôt kovovej vsádzky a tekutej liatiny**. Rozdelenie šachty kuplovne z tohto hľadiska je na **obr. 4.48**.



Obr. 4.48 Rozdelenie kuplovej pece na pásma

Výška jednotlivých pásiem a teplota spalín v nich priamo súvisí s prestupom tepla a teplotou liatiny. So zvyšovaním 1. pásma (predohrievacieho) sa zlepšuje tepelná účinnosť kuplovne. To si vyžaduje zvýšenie výšky šachty a zvýšenie nákladov na jej výstavbu a prevádzku.

4.1.6 Tavenie a prehrievanie liatiny

V **predohrievacom pásme** sa vsádzka postupne ohrieva z teploty okolia až na teplotu tavenia. Teplota pecných plynov pri vsádzacom otvore dosahuje 250 – 600 °C (v závislosti od výšky šachty a maximálnej teploty v peci). Prestup tepla medzi pecnými plynmi a pevnou vsádzkou sa deje **konvekciou**.

V dôsledku oxidačných plynov, najmä CO₂ a SO₂ v spalinách dochádza k oxidácii železa. Na jeho povrchu vzniká vrstva FeO a FeS ako produkt nasírovania.

Koks v predohrievacej zóne sa postupne suší a ohrieva sa na zápalnú teplotu a začína horieť. V dolnej časti predohrievacieho pásma, pri jeho ohreve nad 1050 °C dochádza k redukcii CO₂ v spalinách.

Vápenec v tejto zóne sa ohrieva – suší a rozkladá podľa rovnice:



V **taviacom pásme** sa pevná kovová vsádzka postupne ohrieva až na teplotu tavenia jej jednotlivých zložiek.

Ako prvá zložka vsádzky sa taví surové železo, ďalej zlomková, resp. vratná liatina. Ich teplota tavenia je najnižšia a pohybuje sa v rozmedzí 1150 až 1200 °C v závislosti od chemického zloženia.

Oceľový odpad sa taví až pri teplote nad 1450 °C (v závislosti od obsahu C). Jeho tavenie sa urýchľuje nahličováním kusov ocele koksom, ktoré začína už v pevnom stave.

Ferozliatiny sa tavia posledné pri teplote 1350 až 1500 °C (podľa druhu).

Tavenie začína na povrchu kusov vsádzky. Vznikajúce kvapky stekajú po kokse a pevnej vsádzke v medzerách do nižších zón. Kusy vsádzky sa pritom rozpadajú.

Použitie ocele a ferozliatin vo vsádzke taviace pásma rozširuje – znižuje jeho spodnú úroveň smerom k výfúčiam.

Procesy oxidácie železa sa s teplotou urýchlujú. Zároveň začína sekundárna oxidácia ďalších prvkov (Si, Mn a C) oxidom FeO. Rovnako sa urýchljuje nasírenie liatiny.

V **prehrievacom pásme** prebieha zvyšovanie teploty roztaveného kovu a vznikajúcej trosky. Prestup tepla prebieha najmä sálaním a stykom kvapiek taveniny a trosky s rozžeraveným koksom.

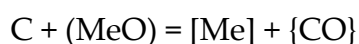
Zvýšenie teploty povrchu koksu sa docieli zvýšením spaľovacej teploty koksu. Dosahuje sa to najmä zabezpečením koksu o **vyššej výhrevnosti** (o nízkom obsahu popola), obohatením vzduchu kyslíkom a predohrievaním spaľovacieho vzduchu.

Zvýšenie výšky prehrievacieho pásma sa dosiahne zväčšením kusovitosti výplňového koksu. Predohrev vzduchu naopak výrazne toto pásmo znižuje. Predohrev vzduchu sa totiž urýchljuje priebeh redukcie CO₂, zmenšuje oxidačné pásmo a urýchljuje pokles teploty v redukčnom pásme. Zároveň znižuje aj výšku taviaceho pásma.

Prehrievacie pásmo z metalurgického hľadiska môžeme rozdeliť na **redukčné** a **oxidačné**.

V **redukčnom pásme** kov steká po vysoko rozžeravených kúskoch koksu, rýchlo sa prehrieva, nauhličuje a nasíruje.

Veľmi významná a pozitívna je účinná redukcia všetkých vzniknutých oxidov podľa redukčnej rovnice:



V tejto zóne začína aj tvorba trosky.

V oxidačnom pásme prebieha sekundárna oxidácia prvkov v prvom rade Fe, ale najmä Si, Mn, C. Oxidácia je aktuálna len v blízkosti výfuční. V oxidačnom pásme pokračuje nauhličovanie tekutej liatiny a ukončuje sa tvorba trosky.

V **nístejovom pásme** – sa zhromažďuje tekutá, dostatočne prehriata liatina a troska.

Dochádza tu k dlhšiemu styku liatiny a koksu a teda aj k ďalšiemu nauhličovaniu a nasírovaniu a k jej čiastočnému ochladeniu.

Dĺžka doby pobytu liatiny a trosky v nísteji je rozdielna a závisí od typu kuplovne. U kuplových pecí s predpecím, resp. so sifónovým odlučovačom trosky je doba zotrvania liatiny veľmi krátka a liatina spolu s troskou nístejou iba pretečie. Nasírenie je potom nižšie, ale nižšie je tiež aj nauhlíčenie, čo je často nežiadúce (o 0,1 až 0,2 % C).

U starých klasických kuplových pecí nístej plní úlohu predpecia. Liatina je odpichovaná periodicky – podľa požiadaviek formovne.

Najdôležitejšie pásma kuplovej pece teda sú **taviace** a **prehrievacie**, ktoré v rozhodujúcej miere určujú kvalitu tekutej liatiny.

4.1.7 Metalurgické pochody v kuplovej peci

Metalurgické pochody v kuplovni sú veľmi dôležité a náročné na jej riadenie a optimalizáciu. Zlepšovaním jedného pochodu môžeme negatívne ovplyvniť ďalšie. Preto liatina vytavená v kuplovni má často veľký rozptyl vlastností, vrátane chemického zloženia. Preto je dôležitá znalosť týchto pochodov.

Základné metalurgické pochody v kuplovni:

- a) nauhlíčenie liatiny
- b) prepal Si, Mn a Fe,
- c) zmena obsahu P
- d) zmena obsahu S
- e) zmena obsahu ostatných prvkov

4.1.7.1 Nauhlíčenie liatiny v kuplovej peci

Výsledný obsah C vo vytavenej liatine je veľmi významný, nakoľko v rozhodujúcej miere určuje skoro všetky vlastnosti liatiny (mechanické aj fyzikálne). Preto je dôležité poznať podstatu zmeny obsahu C a najmä vedieť riadiť tavenie tak, aby vytavená liatina mala požadovaný obsah C (bežne 3,0 až 3,8 %) a aby tento v priebehu tavby jednej akosti liatiny kolísal čo najmenej (max. $\pm 0,1$ %).

Požadovaný obsah C v liatine regulujeme podielom **oceľového odpadu** vo vsádzke. Zvyšovaním jeho podielu rovnomerne znižujeme obsah C. Výsledný obsah C však závisí od množstva ďalších činiteľov, najmä od:

- typu a konštrukcie kuplovní,
- teploty v peci a teploty kovu na žlabku,
- obsahu ďalších prvkov v liatine, najmä základných (Si, Mn, P, S),
- bazicity trosky.

Oceľový odpad výrazne znižuje obsah C vo vytavenej liatine a umožňuje výrobu liatin s nízkym stupňom nasýtenia (S_c), teda pevnejších a tvrdších. Jeho podiel vo vsádzke určujeme z prakticky overenej nauhličovacej schopnosti každej kuplovne. Súvisí teda s jej konštrukciou a teplotou v nej, najmä v prehrievacom pásme a nísteji.

Rozpustnosť C v liatine sa zvyšuje s jej teplotou a prísadou karbidotvorných prvkov (Mn, Cr). Grafitotvorné prvky nauhličenie znižujú. Vplyv obsahu základných prvkov na rozpustnosť uhlíka C_R je určený rovnicou:

$$C_R = C_T + 0,027 \text{ Mn} - 0,317 \text{ Si} - 0,33 \text{ P} - 0,36 \text{ S}$$

kde: Mn, Si, P, S sú obsahy týchto prvkov v hmot. %

Nauhličenie súvisí s výškou prehrievacieho pásma, v ktorom je najintenzívnejšie. Vzniká pri styku kvapiek a pramienkov tekutého kovu s rozžeraveným koksom. K ďalšiemu nauhličeniu dochádza v nísteji pece najmä v dôsledku dlhého pobytu tekutého kovu v nísteji (pri prerušovanom odpichu). Je však menej intenzívne, pretože je tu nižšia teplota ako v prehrievacom pásme a dochádza tu tiež k oxidácii C, oxidmi FeO z trosky t.j. pri ich redukcii. So zvyšujúcou sa bazicitou trosky sa tento účinok znižuje pretože obsah oxidov je v nej nižší.

Nauhličenie v nísteji súvisí s jej konštrukčnou výškou. Predlžuje sa dĺžka styku liatiny s koksom nakoľko surové železo vo vsádzke má výrazne vyšší obsah C (4,2 – 4,5 %) ako je požadovaný v liatine, dochádza v peci k jeho prepalu a len v malej miere podporuje nauhličenie.

Nauhličenie ocele je významné najmä z ekonomického hľadiska. Umožňuje taviť vyššie podiely oceli, ktorej cena v porovnaní so surovými železami je nízka a preto

dnes existujú kuplové pece, ktoré pracujú so 100 % podielom ocele vo vsádzke, resp. sú schopné redukovať železo zo železoruďných peliet (často však čiastočne predredukovaných) a z rôznych kovonosných odpadov (zlievarenských, oceliarskych a pod.).

Pri použití vsádzky bez oceľového podielu nahličenie je nulové, resp. dochádza k prepalu C (obsah C v liatine je nižší ako priemerný obsah C vo vsádzke).

4.1.7.2 Prepal kremíka, mangánu a železa

Prevažne oxidačné prostredie (kuplové plyny) v kuplovni spôsobuje značný prepal železa, ale aj ďalších základných prvkov liatiny Si a Mn, ktoré majú vyššiu afinitu k O₂.

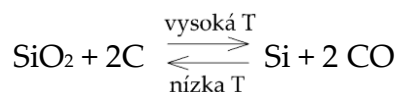
Prepal týchto prvkov znamená ekonomickú stratu (zvýšenie nákladov na legúry), preto je dôležité poznať príčiny a zákonitosti tohto negatívneho javu.

Oxidácia týchto prvkov kuplovými plynmi prebieha podľa všeobecnej rovnice:



kde: Me sú prvky Si, Mn, Fe, ...

Výsledný **prepal kremíka** závisí tiež od teploty, pri ktorej dochádza k jeho redukcii uhlíkom z koksu:

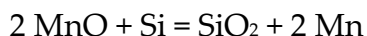


Redukcia začína pri približne 1470 °C. Výsledkom redukcie je **pripal** (zvýšenie) kremíka. V kuplovej peci však vždy dochádza k prepalu kremíka.

Prepal Fe pri tavení v teplovzdušnej kuplovni klesá s teplotou predohrevu vzduchu, ale aj so zvyšovaním spotreby koksu, rovnako ako prepal Si.

Prepal Mn je nižší ako Si a v podstate nastáva z tých istých dôvodov, resp. je rovnako ovplyvňovaný.

Nižší prepál Mn ako Si súvisí s jeho nižšou afinitou k O₂ ako Si a preto môže v kuplovni dôjsť aj k čiastočnej redukcii MnO kremíkom:



Redukciu podporuje zvýšenie bazicity trosky.

Celkový prepál sa zvyšuje tiež so zväčšovaním množstva trosky a s jej viskozitou.

Zvýšenie prepálu nastáva aj pri použití drobnej kovovej vsádzky, obzvlášť pri vsádzke s veľkým povrchom (triesky). Zvýšený prepál Si a Mn je patrný aj pri použití ferozliatin s vyšším obsahom týchto prvkov (FeSi 75 – 90 %, resp. FeMn 70 % a viac). Preto je dôležité zabezpečiť požadovaný obsah týchto prvkov ich zvýšeným obsahom vo vsádzanom surovom železe.

Prepál Fe kolíše v rozmedzí 1 až 5 %. Určuje sa na základe obsahu FeO v troske a známom množstve trosky (kovovou bilanciou).

Prepály prvkov Fe a najmä Si a Mn znamenajú pre zlievareň stratu (zvýšenie nákladov na tavenie).

4.1.7.3 Zmena obsahu fosforu

Obsah fosforu sa pri tavení v kuplovni takmer nemení. Odfosforovanie vyžaduje silne oxidačné podmienky, aby sa fosfor oxidoval a zároveň vysokú bazicitu, aby sa viazal na vápno. V kyslých peciach sa zaznamenáva zvýšenie obsahu fosforu (z popola koksu), zatiaľ čo v zásaditých peciach pri vysokej bazicite trosky ($B > 2,2$) jeho mierny prepál.

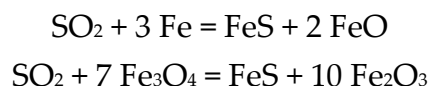
4.1.7.4 Zmena obsahu síry

Síra je u náročnejších akostí liatin považovaná za škodlivý prvok už pri jej veľmi nízkych obsahoch (nad 0,02 %) najmä pri výrobe LGG.

Len asi 50 % síry odchádza z pece so spalinami (SO₂, S₂, H₂S, CS₂) a prevažná časť S, ktorá ostáva v peci prechádza do tekutej liatiny. Do trosky prechádza len okolo 8 – 10 % z celkového množstva síry.

V kyslej kuplovni dochádza k výraznému nasíreniu. Jediným zdrojom zvýšenia obsahu síry (prineseného vsádzkou) je síra z koksu. Prechádza do liatiny z tuhého paliva pri jeho styku s kovom, ako aj prostredníctvom plynnej fázy (SO₂).

Nasírovanie sa uskutočňuje podľa reakcií:



Odsírenie kyslými kuplovými troskami je veľmi nízke. Obsah S sa v kyslých troskách pohybuje v rozmedzí 0,05 až 0,3 %, pričom obsah S v liatine je približne 0,08 až 0,1 %.

Podmienky pre maximálne odsírenie:

- vysoká teplota (teplovzdušná kuplová pec, zvýšenie spotreby koksu),
- zvýšená zásaditosť trosky až do B = 2,2 (zvýšená prísada vápenca),
- nízky obsah FeO v troske (zároveň vyšší obsah C, Si a Mn v liatine),
- zníženie viskozity trosky,
- zvýšenie množstva trosky.

Liatinu s veľmi nízkym obsahom síry (pod 0,02 %) je možné vyrábať len pri bazicite trosky B > 2 v kuplových peciach so zásaditou výmurovkou, resp. bez výmurovky taviaceho pásma. Výsledný obsah síry v liatine pri kyslom tavení môžeme tiež určiť výpočtom pomocou vzorca:

$$S = 0,75 \cdot S_{vs} + k \cdot K \cdot S_k$$

kde: S – výsledný obsah síry v liatine [%]

S_{vs} – obsah síry v kovovej vsádzke [%]

k – súčiniteľ kvality koksu (bežne cca 0,35)

K – spotreba koksu (% · 10⁻²)

Najúčinnejším a najefektívnejším postupom pre zabezpečovanie nízkeho obsahu síry v liatine je mimopecné odsírenie.

4.1.7.5 Zmena obsahu sprievodných prvkov

Veľkosť prepalu závisí najmä od afinity sprievodných prvkov ku kyslíku. **Prepal** prvkov, ktoré majú nižšiu afinitu ku kyslíku ako Fe je veľmi nízky, resp. prakticky nulový (Ni, Mo, Cu, Cr). Vysoký je najmä u Ce, Mg, Al a Ti. Obsah Pb a Zn sa prudko znižuje v dôsledku ich vyparovania už pri teplote nad 950 °C. Rovnako v kuplovni sa odparujú sprievodné prvky As, Sb, Cd, preto ich obsah v liatine je nízky (10^{-2} až 10^{-4}). Avšak aj také nízke obsahy sú pre grafitizáciu guľôčkového grafitu škodlivé.

4.1.8 Vznik a pôsobenie trosky

Pri tavení liatiny vzniká určité množstvo trosky (5 – 10 % hmotnosti kovu). Zdrojom jej vzniku sú:

- **popol z koksu** – koks obsahuje 8 až 15 % popola, ktorého najčastejšie zloženie je asi 46 % SiO_2 , 39 % Al_2O_3 , 4 % CaO a 6 % Fe_2O_3 ,
- **nečistoty z kovovej vsádzky** – piesok a oxidy kovov na povrchu jednotlivých kusov kovovej vsádzky (najmä vratného materiálu),
- **odtavená výmurovka pece** – pozostáva najmä z SiO_2 , Al_2O_3 ,
- **oxidy kovov** – najmä Si, Mn a Fe, ktoré vznikajú pri tavení, resp. ako vmestky kovovej vsádzky,
- **sulfidy a fosfidy** – ktoré vznikajú pri tavení,
- **troskotvorné prísady** – pridávame do kuplovne na zlepšenie vlastností a tým aj funkcie trosky (vápenec a stekucovadlá trosky).

Troska má významný vplyv na priebeh tavenia (metalurgických pochodov) a takto aj zloženie a vlastnosti vytavenej liatiny. Jej význam je najmä v tom, že:

- chráni liatinu pred oxidáciou kuplovými plynmi,
- rozpúšťa popol na povrchu horiaceho koksu a tým napomáha spaľovaniu,
- viaže síru, fosfor a ďalšie prímesi (napr. oxidy), čím pôsobí rafinačne,
- podieľa sa na prestupe tepla do tekutého kovu.

Účinnosť trosiek závisí od ich fyzikálno-chemických vlastností, ktoré sú určené najmä jej chemickým a mineralogickým zložením a teplotou.

Hlavnými zložkami trosky sú oxidy s podstatne vyššou taviacou teplotou ako je teplota v šachte kuplovej pece, **tab. 4.13**.

Tab. 4.13 Chemické zloženie trosky

Troska	Chemické zloženie [%]					B
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MgO	
Kyslá	40 – 50	5 – 18	20 – 40	5 – 15	0,5 – 2,0	< 0,9
Zásaditá	35 – 35	10 – 20	30 – 50	2 – 3	10 – 30	> 1,1

Z mineralogického hľadiska sú kuplové trosky tvorené najmä **kremičitanmi** s výskytom veľkého množstva ďalších typov minerálov, často veľmi zložitých. Najčastejšími minerálmi sú wollastonit (CaO.SiO₂), fayalit (2FeO.SiO₂) a ďalšie známe štruktúrne zložky, najmä kombinácie SiO₂ – Al₂O₃ – CaO.

4.1.8.1 Bazicita trosiek

Chemický charakter trosiek sa vyjadruje tzv. **zásaditosťou** (bazicitou – B), ktorá sa určuje ako pomer množstva (hmot. %) zásaditých a kyslých, prípadne amfotérnych oxidov.

V praxi sa na výpočet zásaditosti najčastejšie používajú tieto vzťahy:

$$B = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + P_2O_5}; \quad B = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}; \quad B = \frac{CaO}{SiO_2}$$

Podľa hodnoty zásaditosti sa trosky označujú ako veľmi (silne) kyslé (B < 0,6), kyslé (B = 0,6 až 0,9), neutrálne (B = 0,9 až 1,1), stredne zásadité (B = 1,1 až 1,6), zásadité (B = 1,6 až 2,2), veľmi (silne) zásadité (B > 2,2).

4.1.8.2 Vlastnosti trosiek

Medzi najvýznamnejšie vlastnosti trosky patrí:

- taviaca teplota trosky,
- viskozita trosky, resp. jej závislosť na teplote.

Teplota tavenia trosky je určená jej komplexným zložením (chemickým a mineralogickým). Mineralogické zloženie trosky sa výrazne mení s teplotou a rýchlosťou vzniku, resp. tuhnutia.

Viskozita trosiek sa výrazne mení najmä s teplotou (klesá), avšak je tiež určovaná ich zložením. Pre optimálny priebeh metalurgických pochodov a bezporuchový chod kuplovne sa odporúča troska s viskozitou 0,5 až 0,6 Pa.s (pri 1500 °C).

Tekutosť trosiek sa zvyšuje prísadami (stekucovadlami – tavidlami). Nakoľko dlhodobo používaný kazivec (CaF_2) je z ekologických dôvodov zakázaný, používajú sa menej aktívne tavidlá, dolomit (MgO) a bauxit (Al_2O_3).

Tekutosť trosky musí umožniť jej plynulé vytekanie z pece. Ak pri vytekaní z troskového otvoru vznikajú dlhé kvaple a trosku je možné pomocou kovovej tyče vytiahnuť do tenkých nití je troska optimálna pre tavenie v kyslej kuplovni. V jej štruktúre prevláda sklovitá zložka.

Ak sú naopak kvaple krátke a troska sa nedá vyťahovať je menej kvalitná. Obsahuje buď veľa CaO alebo SiO_2 (veľmi kyslá alebo zásaditá – krátka).

Orientačné zloženie trosky je možné určiť aj z **farby trosky**. Sklovité trosky sú sfarbené do zelena. Sivé trosky sú väčšinou kamenité, pričom svetlosivá až biela farba je charakteristická pre zvýšený až vysoký obsah CaO . Tmavosivá až čierna troska je typická pri vysokom prepale Fe a Mn.

4.1.8.3 Výpočet troskotvorných prísad

Výpočet troskotvorných prísad sa môže robiť viacerými postupmi. Najčastejšie sa používa postup založený na:

- a) množstve vsádzkového koksu (resp. hmotnosti vsádzky),
 - b) bilancii materiálov prechádzajúcich do trosky
- a) výpočet množstva vápenca na základe mernej spotreby taviaceho koksu, resp. množstva (hmotnosti) popola prineseného koksom sa robí podľa zásady:
- hmotnosť vápenca má byť v rozmedzí 20 až 30 % hmotnosti taviaceho koksu,
 - hmotnosť vápenca podľa stupňa znečistenia kovovej vsádzky, najmä pieskom (SiO_2) má byť v rozsahu 3 až 6 % hmotnosti kovovej vsádzky (obyčajne 4 %).

Uvedené zásady sú platné len pre kyslú trosku s predpokladanou bazicitou $B \approx 0,8$.

b) výpočet množstva vápenca na základe **materiálovej bilancie** je presnejší. Základom výpočtu je materiálová bilancia a ich oxidov prechádzajúcich do trosky.

V praxi je snaha minimalizovať množstvo trosky, nakoľko táto zvyšuje spotrebu koksu, znižuje taviaci výkon a v konečnom dôsledku je odpadom (ekologické problémy s jej deponovaním).

V priebehu tavenia sa reguluje vsádzka vápenca, prípadne ďalších troskotvorných prísad na základe konzistencie vytekajúcej trosky.

4.1.9 Riadenie chodu kuplovej pece

Pre **optimálny chod** kuplovne a pre dosiahnutie potrebnej teploty a chemického zloženia liatiny pri minimálnej spotrebe koksu a zodpovedajúcom výkone pece treba dodržať **základné parametre** taviaceho pochodu v správnych vzájomných pomeroch.

Základné parametre tavby:

- a) množstvo a tlak spaľovacieho vzduchu (prípadne teplota),
- b) hmotnosť kovovej vsádzky a jej zloženie,
- c) hmotnosť vsádzky koksu a výška plniaceho koksu,
- d) teplota a chemické zloženie liatiny na žlabku,
- e) hmotnosť vsádzky vápenca a ďalších troskotvorných prísad,
- f) zloženie a teplota pecných plynov,
- g) kvalita trosky a jej pravidelný odpich.

4.1.9.1 Množstvo a tlak spaľovacieho vzduchu

Fúkanie optimálneho množstva vzduchu je pre spaľovanie koksu a dobrý chod kuplovne najdôležitejšie.

Potrebné množstvo vzduchu môžeme určiť pomocou rôznych vzťahov, výpočtov a diagramov.

Množstvo vzduchu potrebné na spálenie 1 kg koksu:

$$V = 4,45 \cdot \frac{\eta_s + 100}{100} \cdot \frac{\%C_k}{100} \quad [m^3]$$

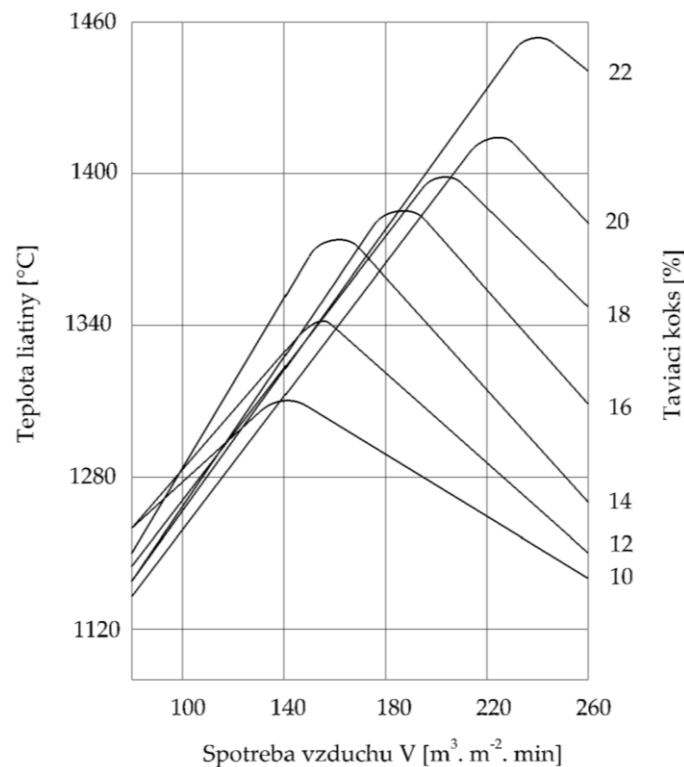
kde: η_s – je účinnosť spaľovania

C_k – obsah uhlíka v kokse [%]

Tento výpočet zanedbáva vzduch na spálenie ďalších prvkov v kokse.

Množstvo fúkaného vzduchu sa určuje aj zo vzťahov k spotrebe taviaceho koksu, vnútornému priemeru kuplovne a najmä k taviacemu výkonu a k teplote liatiny. Optimálne množstvo vzduchu musí zabezpečovať najmä maximálnu teplotu vytavenej liatiny.

So zvyšujúcim sa množstvom vzduchu sa zvyšuje rýchlosť prúdenia plynov v kuplovni, v dôsledku čoho sa pásmo tavenia zvyšuje, predlžuje sa dráha kvapiek liatiny v oblasti vysokých teplôt a tým stúpa prehriatie liatiny. Kladný vplyv zvyšujúceho sa množstva vzduchu na teplotu liatiny sa prejavuje len do určitého množstva, potom nastáva pokles, **obr. 4.49**.



Obr. 4.49 Vplyv množstva fúkaného vzduchu a taviaceho koksu na teplotu liatiny

Tlak vzduchu je spôsobený odporom proti prúdeniu v prívodnom potrubí, okružnom vzduchovode, výfučniciach a najmä proti prúdeniu v šachte kuplovne, kde ho zvyšuje tiež zvýšenie objemu vznikajúcich spalín.

Reálne tlaky sú výsledkom najmä priedušnosti vsádzky a dosahujú hodnotu 5 – 15 kPa.

Pre prax je preto dôležitý **dostatočný výkon ventilátora** aj pri vysokých tlakových stratách vzduchu.

4.1.9.2 Hmotnosť kovovej vsádzky a jej kvalita

Určenie optimálnej hmotnosti **kovovej vsádzky** (zavážky) je veľmi dôležité, pretože táto ovplyvňuje chod kuplovne. Zvyšovaním zavážky sa rozširuje taviace pásmo smerom dole (k výfučniciam), znižuje sa tak výška prehrievacieho pásma. Znižuje sa teplota prehriatia vytavenej liatiny a zvyšuje sa celkový prepal.

Optimálna hmotnosť kovovej vsádzky sa určuje vo vzťahu k optimálnemu množstvu vsádzky koksu:

$$M_{vs} = \frac{K}{m_k} \cdot 100 \quad [kg]$$

kde: M_{vs} – hmotnosť kovovej vsádzky (zavážky) [kg]

K – merná spotreba taviaceho koksu [%]

m_k – hmotnosť vsádzky koksu [kg]

Kvalita kovovej vsádzky je určovaná najmä jej kusovitosťou, hrúbkou a čistotou jednotlivých kusov.

4.1.10 Vsádzkové suroviny

Surovinami na tavenie liatin v kuplových peciach sú:

- kovová vsádzka a legúry,
- palivo,
- troskotvorné prísady.

Základnými surovinami **kovonosnej vsádzky** pre výrobu liatin sú:

- surové železo,
- oceľový odpad,
- vratný materiál,
- zlomková liatina,
- oceľové triesky a kovonosné odpady,
- legúry.

4.1.10.1 Surové železo

Surové železá predstavujú základný materiál kovovej vsádzky, ktorý má najväčší význam pre chemické zloženie, vlastnosti a náklady na výrobu liatiny.

Surové železá sa rozdeľujú podľa obsahu základných prvkov na:

- zlievarenské železá s obsahom Si > 1,25 % (C nad 3,8 %; Si = 1,2 – 3,0 %; Mn = 0,4 – 1,5 %; P = 0,1 – 0,7 %; S = 0,03 – 0,05 %),
- oceliarenské železá s obsahom Si < 1,25 % (C nad 4,2 %; Si = 0,8 – 1,2 %; Mn = 0,2 – 1,5 %; P = 0,1 – 0,7 %; S = 0,03 – 0,05 %),
- špeciálne, na výrobu liatiny s guľôčkovým grafitom, označované ako PIG – NOD, Nodular SG, Sorel metal a ďalšie (s nízkym obsahom Mn < 0,2%; P < 0,1 %; S < 0,03 % a stopových prvkov – Pb, As, Sb, Sn, Zn, Cd, ...),
- legované (obsahujúce zvýšený obsah legúr – Mn, Cu, Cr, Ni, V, P, Cr, Mo, N₂, H₂, ...).

Okrem základných, zaručených prvkov je nutné poznať aj obsah stopových prvkov a legúr. Zlievarenské surové železá majú obsah C nižší (3,75 až 4,25 %) ako oceliarenské (4,2 až 4,7 %). Obsah stopových prvkov (legúr), najmä Cr, Cu, Ni, V často prevyšuje únosnú hranicu a veľmi ovplyvňuje mechanické a technologické vlastnosti vyrobenej liatiny. Preto sa musí obsah týchto prvkov sledovať a s ich účinkom sa musí pri výrobe odliatkov rátať.

Veľký význam sa prikladá tzv. dedičným vlastnostiam surových želez, pričom bolo dokázané, že tieto vlastnosti sú výsledkom pôsobenia stopových prvkov a prímies vrátane dusíka, vodíka a kyslíka. Takmer úplne možno potlačiť vplyv týchto prvkov vysokým prehriatím liatiny v peci a zvýšenou bazicitou trosky.

Oceliarenské surové železo zvyšuje tendenciu tuhnutia odliatkov v metastabilnom systéme (vyššia tvrdosť, krehkosť, tvorba zákaliek atď.).

Dôležitá je kvalita surového železa, hlavne tvar, hmotnosť buchiet a čistota (troska, grafit, piesok, hrdza). Technické požiadavky je potrebné dohodnúť s dodávateľom.

4.1.10.2 Oceľový odpad

Účelom používania oceľového odpadu je zníženie obsahu C, Si, príp. P a S vo vsádzke. Súčasne je najlacnejšia zložka kovovej vsádzky, preto je snahou zlievarne jeho podiel vo vsádzke zvyšovať. V kuplových peciach je možnosť roztavenie veľkého množstva ocele obmedzená a preto jeho podiel vo vsádzke je do 50 %, výnimočne viac. Moderné kuplové pece umožňujú taviť vsádzku zloženú iba z ocele a vratného materiálu.

Oceľový odpad má byť starostlivo triedený podľa chemického zloženia, kusovitosti a hrúbky stien. Hrúbka použitého odpadu musí zodpovedať veľkosti kuplovne, mala by byť rovnomerná a nie väčšia, ako asi 1/2 hrúbky liatinovej časti vsádzky. Príliš hrubé kusy ocele sa v kuplovni ťažko tavia. Dôležitá je tiež dĺžka oceľových kusov (tyčí), môže spôsobiť zavesovanie vsádzky v peci a prerušenie tavenia. Hrubé oceľové kusy sa tavia oneskorene, často až v nížšej peci.

Nesmie obsahovať uzavreté tlakové nádoby a zdraviu škodlivé látky a ľahkozápalné predmety.

4.1.10.3 Vratný materiál

Vratný materiál pochádza z vlastnej produkcie zlievarne a tvoria ho vtoky, náliatky a nepodarky. Pred použitím by mal byť otryskaný (zbavený formovacích zmesí) a upravený na potrebnú kusovitosť. V prípade, že sa v zlievarni tavia rôzne akosti, alebo dokonca rôzne druhy liatin (legované), je nutné vratný materiál triediť. Výhodou vratného materiálu je znalosť jeho chemického zloženia. Vysoký podiel vratného materiálu je vo vsádzke nežiadúci. Nepriaznivo ovplyvňuje zloženie trosky, jej metalurgické účinky a v dôsledku zvýšenia jej viskozity vznikajú problémy pri jej odpichu. Preto sa odporúča maximálny podiel vratného materiálu 60 % hmotnosti kovovej vsádzky.

4.1.10.4 Zlomková liatina

Jedná sa o spotrebitel'ský odpad, ktorý pochádza z vyradených strojov a zariadení a zo zberu kovového odpadu. Jeho nevýhodou je neznáme chemické zloženie. Mal by byť dodávaný vytriedený. Veľmi starostlivo treba vytriediť legovaný odpad od súčastí legovaných s Cr, Ni, Cu, P, S a ďalších. Nežiadúce sú tiež súčiastky zo silne zoxidovaných dielov, veľmi tenkostenných odliatkov (nebezpečenie vysokého P). Dôležitá je úprava veľkých kusov zlomkovej liatiny (často celých strojných súčastí) na vhodnú kusovosť. Obsah oceľových častí je prípustný do 5 % hmotnosti. Nesmie byť znečistená nekovovými prísadami.

4.1.10.5 Triesky

Triesky sú zriedkavou zložkou vsádzky. Ak sa používajú, nesmú byť príliš vlhké a hrdzavé a musia byť paketrované do balíkov, resp. briketované. Triesky majú veľký prepál – vzniká veľa trosky. Používajú sa v množstve maximálne do 5 % hmotnosti vsádzky.

4.1.10.6 Legúry

Pri tavení v kuplových peciach sa obyčajne upravuje len obsah kremíka a mangánu, príp. Cr. K tomuto účelu sa používajú ferozliatiny a to ferosilícium (najlepšie FeSi45) a feromangán (obyčajne FeMn70), ktoré sa pridávajú do vsádzky. Zdrojom kremíka môže byť aj karbid kremíka SiC, ktorý sa pridáva do vsádzky.

Pre dosiahnutie perlitickej štruktúry LLG sa leguje väčšinou Mn a Cr v množstve asi 0,1 – 0,3 %, u LGG meďou, v množstve 0,5 – 1%, ktorá sa pridáva do tekutého kovu. V prípade nízkeho obsahu C v liatine je možné malé nauhlčenie mimopecne, najvhodnejšie plnenými profilmi, príp. injektážou jemne zrnitého uhlíka do panve alebo sypaním na žliabok kuplovej pece. Legovanie inými prvkami sa vykonáva len výnimočne.

Úpravu chemického zloženia je výhodné vykonávať po natavení v homogenizačnom predpeci alebo duplexne v elektrickej indukčnej peci s dostatočne veľkým objemom kovu. Menšie korekcie obsahu C a Si sú možné aj v transportných panvach. Pritom je ale vždy dôležité, aby došlo k premiešaniu a homogenizácii kovu.

Moderné kuplovne majú možnosť injektáže najrôznejších prachových látok do výfuční. Tak je možné pridávať i rôzne legúry a nauhličovala. Injektážou je možné veľmi rýchlo meniť (upravovať) chemické zloženie tekutého kovu na žlabku, čo je v klasických kuplových peciach problematické. Tieto pece umožňujú aj spracovať rôzne kovonosné odpady železa. V kuplovni však nie sú podmienky na redukciu oxidov ani pri vysokej spotrebe koksu, naopak oxidačné podmienky tu spôsobujú prepál kovov.

4.1.11 Kusovitost' vsádzky

Vsádzka musí byť upravená na vhodnú kusovitost'. Maximálna veľkosť kusov vsádzky nemá byť väčšia, než asi 1/3 priemeru kuplovne, optimálne 1/4. Väčšie kusy bývajú príčinou zakliesnenia vsádzky a tvorenia "mostov". Hrubostenný oceľový šrot sa vsádza tak, aby pokiaľ možno ležal priamo na vrstve koksu. Kusovitost' liatinových zložiek vsádzky sa upravuje roztrhaním na roztĺkacom zariadení.

4.1.12 Palivo

Najvhodnejším druhom paliva v kuplových peciach je koks. Výnimočne sa časť koksu nahrádza antracitom, karbidom vápnika a inými tuhými palivami. Bezkoksové kuplovne sa vykurujú plynom. Na pritápanie sa občas používajú odpadové oleje, príp. plyn.

Kvalita koksu má na chod kuplovne a tavenie rozhodujúci význam.

Najvhodnejším druhom koksu je **zlievarenský koks**. Na kvalitu koksu sa kladú vysoké nároky. Sledovanými vlastnosťami sú najmä:

Kusovitost' – za optimálnu sa považuje koks s veľkosťou približne v rozmedzí 60 – 100 mm. Drobný koks asi pod 20 mm a najmä koksový prach sa nemajú do kuplových pecí vsádzať.

Pevnosť – rozhoduje o odolnosti koksu proti drveniu a oteru pri manipulácii, transporte aj v dôsledku vysokého mechanického zaťaženia v kuplovej peci. Vyžaduje sa koks s vysokou pevnosťou a odolnosťou proti oteru. Pevnosť koksu je určená hodnotami M_{40} a M_{10} – skúškami Micum v %.

Pórovitosť – zlievarenský koks má mať nízku pórovitosť.

Obsah popola – má byť čo najnižší – znižuje výhrevnosť koksu. Popol je tvorený asi 50 % SiO_2 , 30% Al_2O_3 , 10 % Fe_2O_3 , zvyšok sú iné oxidy. Popol z koksu je hlavným zdrojom trosky. V dobrom kokse je obsah popola pod 10 %, bežne až 13 %.

Obsah síry – koks je najväčším zdrojom síry v kuplovej peci. V dobrom kokse býva do 1% S (bežne 0,8 %), v menej kvalitnom až 2 %.

Vlhkosť – dostáva sa do koksu pri transporte a skladovaní. V kuplovni dochádza k rozkladu vody a reakcii s uhlíkom, pri ktorej sa spotrebúva teplo a zhoršuje sa tepelná účinnosť. Preto vlhkosť koksu nemá byť vyššia ako 6 %.

Spotreba vsádzkového koksu – závisí od jeho kvality, zloženia vsádzky, veľkosti kuplovne a od požadovanej teploty kovu. Množstvo koksu sa volí podľa prevádzkových skúseností v rozmedzí obvykle 10 – 15 % z hmotnosti kovovej vsádzky. Spotreba koksu je dôležitou nákladovou položkou taviarne.

4.1.13 Troskotvorné prísady

Účelom troskotvorných prísad je viazať popol, oter z výmurovky, piesok pripečený na vratnom materiály a ďalšie nečistoty vsádzky a vytvárať s nimi tekutú trosku, ktorá odteká z kuplovne spoločne s kovom. Troska obaľuje každú kvapku kovu, prechádzajúcej taviacim pásom a tým bráni oxidácii taveniny. V troske sa tiež chemicky viaže časť síry, obsiahnutá v kokse.

Problematika trosky v kuplovni je uvedená v kapitole 4.1.8.

4.1.14 Druhovanie vsádzky

Účelom druhovania je zostaviť vsádzku tak, aby sa získal kov požadovaného chemického zloženia, vlastností a požadovanej teploty pri minimálnych nákladoch. Princípom výpočtu je riešenie bilančných rovníc pomocou výpočtovej techniky.

Výpočet zloženia vsádzky je problémom pri tavení v kuplových peciach, pri ktorom sa uplatňuje veľké množstvo rôznych vplyvov, ktoré spôsobujú kolísanie chemického zloženia a teplôt. Preto je nutné udržiavať konštantné taviace

podmienky. Nevýhodou pri tavení v kuplových peciach je tiež, že chemické zloženie kovu, ktoré z kuplovne vyteká už nemožno príliš meniť. Možná je len malá korekcia legovaním na žlabku alebo v panve.

4.1.15 Optimalizácia zloženia vsádzky

Ak je zadané rozmedzie obsahu jednotlivých surovín, je možné vsádzku zostaviť rôznymi spôsobmi. Výsledkom je rovnaké chemické zloženie, ale rozdielna cena vsádzky. **Účelom cenovej optimalizácie je zostavenie vsádzky tak, aby jej cena bola minimálna.**

Aby bolo možné zloženie vsádzky optimalizovať podmienkou je, aby bol k dispozícii dostatočný sortiment surovín. Pre každú surovinu musí byť zadaná cena a minimálny a maximálny podiel vo vsádzke. Optimalizačné výpočty sa už nerobia manuálne ale pomocou vhodných výpočtových programov. Výsledkom výpočtu je vsádzací predpis, zaisťujúci najnižšiu cenu vsádzky.

V praxi môže dochádzať k odchýlkam skutočného chemického zloženia liatiny od požadovaného a to v dôsledku mnohých metalurgických faktorov. Hlavnými vplyvmi, ktoré spôsobujú kolísanie chemického zloženia sú:

- nehomogenita chemického zloženia vsádzkových surovín
- zmena prepálu v dôsledku:
 - zmeny množstva a teploty vetra
 - fúkanie kyslíka
 - zmeny zloženia a vlastností trosky
 - zmeny obsahu koksu vo vsádzke
 - vlhkosti koksu

Z tohto dôvodu je nutné vykonávať operatívne prevádzkovú kontrolu liatiny a na základe jej výsledkov korigovať chod kuplovne, prípadne upraviť zloženie vsádzky.

4.1.16 Modernizácia tavenia v kuplovej peci

Tavenie v kuplovej peci je energeticky náročný proces, najmä z dôvodu nízkej tepelnej účinnosti (cca 30 %), čo pri vysokej produkcii exhalátov a nutnosti ich eliminácie postupne vyradujú kuplové pece z prevádzky (používania).

Ich modernizácia je zameraná na znižovanie spotreby koksu, jeho náhradu lacnejšími palivami a účinné postupy riešenia ekologických aspektov.

Najúčinnnejšími postupmi modernizácie sú:

- predohrievanie spaľovacieho vzduchu,
- prikurovanie náhradnými palivami,
- fúkanie kyslíka

Predohrievanie spaľovacieho vzduchu sa uskutočňuje v rekuperátoroch, ktoré sa vykurojú odpadovým teplom spalín z kuplovej pece a to fyzikálnym (súvisí s teplotou spalín) a chemicky viazaným (súvisí so spaľovaním CO v spalínach).

Účinnosť rekuperácie závisí od technologického vybavenia zariadenia a zabezpečuje predohrev vzduchu až do teplôt 520 °C. Pre vyššie teploty predohrievania je nutné prikurovanie rekuperátora (plynom, olejom).

Predohrev vzduchu umožňuje:

- znížiť spotrebu koksu (až o 50 %)
- zvýšiť teplotu tekutého kovu (až o 100 °C)
- zvýšiť výkon pece (až o 100 %)

Uvedené efekty je potrebné uvažovať samostatne, ale môžeme ich využívať aj v kombinácii (podľa potreby).

Účinnosť rekuperátorov sa pohybuje od 30 – 70 %.

Prikurovanie náhradnými palivami sa najčastejšie realizuje lacnejšími palivami, často odpadovými, ako sú oleje, plyny, uhoľný prach, SiC, kovový Al (do vsádzky), CaC₂ (karbid vápnika) a ďalšie.

Slúžia na to špeciálne zariadenia, ktoré vnášajú tepelnú energiu priamo do kuplovne nad výfuchami alebo injektovaním paliva cez výfuchne. Pevné palivá (Al, CaC₂ a CaSi) sa pridávajú do vsádzky pece.

Fúkanie kyslíka (obohacovanie spaľovacieho vzduchu kyslíkom o 1 až 3 %) sa robí cez výfučne, a umožňuje znížiť spotrebu koksu o 10 až 30 %, resp. zvýšiť teplotu tekutého kovu a zvýšiť výkon kuplovej pece.

Pri využití tohto postupu je potrebné určiť ekonomický efekt pretože kyslík je tiež energeticky nákladná energia.

4.1.17 Duplexný postup výroby liatin

Duplexné, resp. polyprocesné postupy tavenia, homogenizácie, úpravy chemického zloženia a teploty ako aj prípravy väčšieho množstva tekutého kovu na odlievanie ťažkých odliatkov sa robia kombináciou zariadení (duplexným postupom).

Najčastejšie kombinácie:

- kuplová pec – predpecie
- kuplová pec – elektrická indukčná kanáliková pec
- kuplová pec – elektrická indukčná tégliková pec

Kuplová pec – predpecie

Predpecie je v podstate veľkoobjemová nádoba, najčastejšie v tvare valca (nízke tepelné straty stenami) vymurovaná žiaruvzdorným materiálom (šamot) a zakrytá vekom. Kapacita predpecie sa určuje max. hmotnosťou odlievaných odliatkov, ktorá je určená nosnosťou žeriavu.

Konštrukcie a typy predpecí sú veľmi rôznorodé, najčastejšie je to:

- pevné predpecie pred kuplovou pecou s odpichovým otvorom (najstarší typ)
- sklopné predpecie, resp. aj pojazdné predpecie, umožňujúce vylievanie tekutého kovu pomocou žlabku. Pojazdne predpecie umožňuje dopravu tekutého kovu k odlievaniu (najčastejšie k formovacím linkám)

V predpecí je možná úprava chemického zloženia tekutého kovu avšak v ňom vždy dochádza k poklesu teploty, preto sú vybavené ohrevom pomocou horákov, resp. elektrickými ohrievačmi, príp. chemickým ohrevom (spaľovaním výhrevných materiálov na hladine kovu (CaSi, FeSi, zrnitý Al, ...) pričom vzniká tuhá izotermická troska.

Kuplová pec – elektrická indukčná kanáliková pec

Najvhodnejšia je indukčná kanáliková pec, ktorá má menší príkon elektrickej energie, vhodný pre dlhodobé udržiavanie kovu na potrebnej teplote. Umožňuje tiež tavenie pevnej vsádzky (napr. v noci).

Kuplová pec – elektrická indukčná téglíková pec

Umožňuje taviť liatinu s nízkou teplotou (na žľabku) a zníženie nákladov na energiu. Umožňuje rozsiahle možnosti úpravy chemického zloženia a teploty tekutého kovu.

Menej časté duplexné pochody sú:

- kuplová pec – rotačná bubnová pec
- kuplová pec – elektrická oblúčková pec (úprava liatiny na LGG)

4.1.17.1 Metalurgické procesy pri duplexnom tavení

V priebehu udržiavania a prehrievania (zvyšovania teploty), resp. úpravy chemického zloženia zliatiny dochádza k prepalu najmä C, Si a Mn. Pri kyslej výmurovke udržiavacej pece nastáva redukcia SiO_2 z výmurovky uhlíkom v liatine, ktorého obsah poklesne. Redukcia narastá so zvyšovaním teploty a s dobou udržiavania. Výrazne sa zvyšuje pri teplotách nad 1450 °C.

Prehrievaním liatiny sa znižuje jej viskozita. Nekovové nečistoty koagulujú a vyplávajú do trosky. Nežiadúcim javom je rozpúšťanie a zmenšovanie počtu kryštalizačných zárodkov. Znižuje sa tým grafitizačná schopnosť liatiny, nastáva hrubnutie eutektického zrna a zhoršenie kryštalizácie grafitu, ktorý môže mať až medzidendritické rozloženie. Mechanické vlastnosti liatiny sa zhoršujú a zvyšuje sa sklon liatiny k tvorbe zákaliek. Preto po dlhodobom udržiavaní a vysokom prehrievaní treba liatinu pred odlievaním očkovať.

Zaujímavý je poznatok o vplyve pracovného cyklu prelievania tekutého kovu na vlastnosti liatiny. Predlžovaním cyklu sa grafit zjemňuje a skrakuje a jeho rozloženie je rovnomernejšie.

Pri mimopecnej úprave dôjde k poklesu teploty v dôsledku nárastu entalpie a pri rozpúšťaní kremíka k jej poklesu a zvýšeniu teploty tekutého kovu. Preto je výhodné v kuplovej peci taviť liatinu s nízkym obsahom Si (s použitím oceliarenského železa a oceľového odpadu, čo znamená aj znižovanie nákladov) a legovanie robiť v elektrickej peci.

4.2 Tavenie liatiny v elektrických peciach

Tavenie liatiny v elektrických peciach, najmä v indukčných má v porovnaní s kuplovými pecami a ďalšími postupmi tavenia veľa výhod, aj keď náklady na tavenie (energetické) sú prevažne vyššie.

Výhody tavenia v elektrických peciach:

- a) veľmi presné chemické zloženie liatiny
- b) možnosť vyrábať liatiny s veľmi nízkym obsahom C (v kuplovni pri $C < 3\%$ sú problémy s tavením) a ľubovoľným obsahom Si, Mn, príp. legúr
- c) operatívna zmena sortimentu vyrábanej liatiny a podstatné rozšírenie sortimentu (legované liatiny, LGG a ďalšie typy)
- d) presné riadenie teploty liatiny, možnosť jej ľubovoľného prehriatia a udržiavania na teplote
- e) možnosť použiť lacnejšiu vsádzku, najmä taviť syntetickú liatinu (bez použitia surového železa) a taviť liatinové a oceľové triesky (až 80 % vsádzky)
- f) možnosť taviť aj malé množstvo tekutého kovu požadovanej akosti
- g) lepšia homogenita tekutého kovu v dôsledku premiešania vírivými prúdmi (chemická aj teplotná)
- h) podstatné zlepšenie ekológie tavenia, ktorá je problematická hlavne pri studenovzdušných kuplovniach
- i) prepal prvkov je nižší ako v kuplovni – menšie straty Fe, Si, Mn, ...
- j) nenáročná obsluha elektrických pecí, najmä ich riadenie

Nevýhody elektrických pecí:

- a) vyššie náklady na elektrickú energiu v porovnaní s koksom v kuplovej peci
- b) vyššie investičné náklady, najmä pri inštalácii pecí väčších objemov a taviacich výkonov

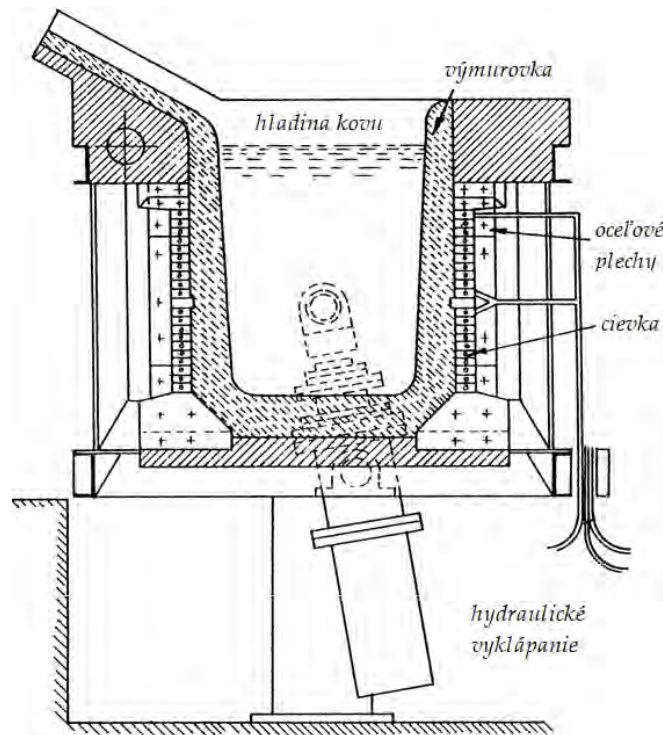
4.2.1 Základné typy elektrických pecí na tavenie liatiny

Na tavenie liatin sa používajú najmä indukčné pece, v menšej miere oblúkové pece. Indukčné pece vhodné na tavenie liatiny sa delia na:

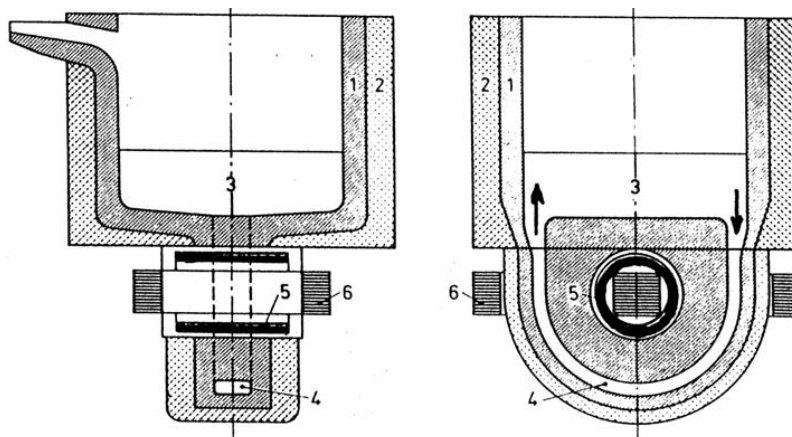
a) **téglikové pece** (bez kovového jadra, **obr. 4.50**), najčastejšie používané na tavenie kovu, ktoré sa podľa frekvencie elektrického prúdu delia na:

- nízkofrekvenčné (50 Hz)
- stredofrekvenčné (300 – 1200 Hz)

b) **pece s kovovým jadrom** (kanáľkové, **obr. 4.51**), používané najmä ako udržiavacie pece, resp. elektrické predpecia kuplovní. Pracujú so sieťovou frekvenciou.



Obr. 4.50 Elektrická indukčná pec (tégliková)

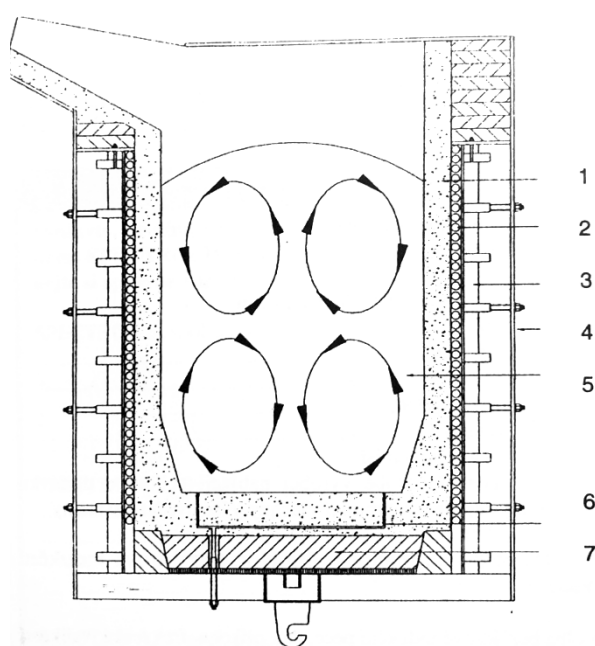


1 – výmurovka, 2 – tepelná izolácia, 3 – tavenina,
4 – taviaci kanál, 5 – indukčná cievka, 6 – magnetické jadro

Obr. 4.51 Kanáľková indukčná pec

4.2.2 Postup – zásady tavenia v indukčnej peci a jej konštrukcia

Podstatou ohrevu a tavenia je v indukovaní elektrickej energie, ktorá sa mení na teplo priamo v kovovej vsádzke. Prúd, ktorý prechádza cievkou vytvára vo vnútri pece magnetické pole, ktoré prechádza vsádzkou a ktoré v dôsledku tzv. vírivých (Foucaultových) prúdov spôsobuje ohrev kovu a premiešavanie nataveného tekutého kovu, **obr. 4.52**. Tento jav je u bezjadrovej indukčnej pece veľmi významný. Príliš malý pohyb (miešanie) môže mať za následok zlé premiešavanie kovu, príliš vysoký stupeň, naopak zvyšuje oxidáciu a väčšie opotrebenie výmurovky pece.



1 – výmurovka, 2 – indukčná cievka, 3 – usmerňovač magnetického toku, 4 – ocelový plášť, 5 – efekt miešania, 6 – čidlo signalizujúce pretečenie, 7 – uzáver zo žiaruvzdorného materiálu

Obr. 4.52 Bezjadrová indukčná pec – efekt miešania

Stredofrekvenčné pece umožňujú inštalovať až trojnásobne vyššie príkony elektrickej energie a zvyšovať taviace výkony, t.j. skrátiť dobu tavby. Čím je vyššia frekvencia, tým je menší prienik prúdu do vsádzky a menšie vírenie v peci. Najvhodnejšia je stredná frekvencia (400 – 600 Hz). Obsah pece je možné vyprázdniť celý, takže nasledujúca tavba môže mať iné zloženie. Tieto pece sú menej závislé na kusovosti vsádzky. Výhodou je tiež nízke znečistenie ovzdušia najmä pri čistej vsádzke.

Nízkočfrekvenčné pece vykazujú nižšiu mernú spotrebu elektrickej energie, nepotrebnú meniť frekvenciu. Vďaka vysokému víreniu umožňujú taviť až 80 %-tné podiely sypaných triesok. Investičné náklady pri ich inštalácii sú nižšie. Veľkou nevýhodou nízkočfrekvenčných pecí je nutnosť nechávať v tégliku 25 – 30 % tekutého kovu a zároveň robiť zdĺhavý rozbeh prázdnej pece pomocou rozbehového bloku, príp. tekutého kovu.

Podľa materiálu téglika sa indukčné pece delia na:

- kyslé (SiO_2 – výmurovka)
- zásadité (MgO , Cr – Mg zmes) umožňujú odsírovanie, príp. zníženie obsahu fosforu

Priama premena elektrickej energie na tepelnú v kovovej vsádzke znamená vysokú tepelnú účinnosť a malé tepelné straty. Dosiahnuteľná teplota je obmedzená žiaruvzdornosťou materiálu téglika (kyslé hmoty cca do 1560 °C, zásadité do 1650 °C).

Bezjadrová indukčná pec (kanáliková) pozostáva:

1. Zo žiaruvzdorného téglika, najčastejšie monolitického, vyrobeného priamo v peci ubíjaním sypkej žiaruvzdornej hmoty a jej spečením. Tégliky na tavenie liatiny sú prevažne kyslého charakteru (až 90 % SiO_2), pripravované zo špeciálnych hmôt.
2. Z indukčnej cievky (medenej), cez ktorú preteká chladiaca voda a elektrický prúd (optimálne upravenej frekvencie, napätia a intenzity).
3. Zo žlabku a plášťa pece, vrátane častí, ktoré upevňujú téglik v pece a umožňujú jeho (hydraulické) vyklápanie.
4. Z elektrického vybavenia a ovládacieho panela.

4.2.3 Postup tavenia v kanálikovej indukčnej peci a ich konštrukcia

Indukčné kanálikové pece (**obr. 51**) majú induktor ako samostatnú časť, výmenným spôsobom spojenú s téglikom. Ohrev kovu sa uskutočňuje v kanáliku induktora, okolo ktorého je indukčná cievka. Kov v kanáliku pôsobením elektromagnetických síl intenzívne prúdi a ohriaty sa premiešava s ostatným kovom v tégliku. Pec nie je možné za prevádzky úplne vyprázdniť a v induktore a časti téglika musí stále zostávať tekutý zvyšok.

Tieto pece sa pri výrobe liatiny používajú obyčajne len ako udržiavacie a homogenizačné, takisto ako „odlievacie pece“, ktoré sú súčasťou odlievacích zariadení formovacích liniek. Prednosťou kanálkových pecí v porovnaní s téglikovými je ich vyššia elektrická účinnosť, majú však nižší elektrický výkon. Vďaka značnému pohybu taveniny je v tejto peci možné dobre upravovať chemické zloženie. Zásadná zmena zloženia taveniny je však veľmi ťažkopádna. V dôsledku intenzívneho pohybu kovu je výmurovka v kanáli induktora mimoriadne namáhaná a jej životnosť je podstatne menšia ako životnosť výmurovky vo vani pece. Induktor je z daného dôvodu možné vymieňať.

4.2.4 Technológia a metalurgia tavenia liatiny v indukčnej peci

Technologický proces tavby v elektrických indukčných peciach pozostáva z postupného zavážania pece, roztavenia kovu a jeho prehriatia a z úpravy chemického zloženia.

Vsádzkovanie kovu má byť robené tak, aby nedošlo k poškodeniu téglika a najmä, aby téglik bol čo najlepšie vyplnený vsádzkou. Nadmerne dlhé, ostré kusy vsádzky môžu spôsobiť zavesovanie vsádzky, ktoré najmä u stredofrekvenčných pecí spomaľuje tavenie a môže spôsobiť vysoké, nekontrolované prehriatie kovu pod závesom a nadmerné odtavenie téglika. Legúry, vrátane nauhličovadla sa zavážajú na začiatku vsádzania (v prvých dávkach vsádzky), okrem kremíka, ktorý znižuje nauhličovanie.

Zloženie vsádzky je veľmi rôznorodé a má byť riadené (vážením) tak, aby sa dosiahlo požadované chemické zloženie liatiny, hneď pri natavení (bez nutnosti dolegovania a najmä problematického nauhličenia plnej pece).

Pri použití pozinkovaného oceľového šrotu je odstránenie zinku v indukčnej peci veľmi ťažké. Odstránenie zinku (0,045 % Zn) vyžaduje pri teplote taveniny 1450 °C asi päťhodinovú dobu udržiavania.

Metalurgické procesy pri tavení liatin (aj vysokolegovaných) sú veľmi jednoduché. V podstate ide len o roztavenie vsádzaných materiálov s nízkymi prepalmi prvkov s vysokou afinitou ku kyslíku. Zložitejšie je len nauhličenie najmä syntetickej liatiny na vyššie obsahy C (blízke eutektickému zloženiu).

V priebehu **natahovovania** sú oxidy a nitridy prinesené vsádzkou, ako aj ďalšie nečistoty vynášané na hladinu, kde tvoria **trosku**. Troskotvorné prísady sa prakticky nepridávajú. Troska ako elektricky nevodivá sa ohrieva len pri styku s tekutým kovom a je vždy pomerne studená (najmä u stredofrekvenčných pecí). Nedochádza k jej intenzívnemu premiešaniu s kovom (reakčný povrch je malý) a preto je metalurgicky nevyužitá (nie je možné ňou odsírovať, ani odfosforovať). Preto je snaha minimalizovať množstvo trosky a znižovať tepelné straty potrebné na jej ohriatie. Zároveň sú problémy s jej odstraňovaním z pece a pri väčšej hrúbke a viskozite sťažuje dolegovanie, nauhličenie a odplynenie.

V priebehu natahovovania a prehrievania má uhlík dostatok času na redukciu oxidov FeO a MnO a pri vyšších teplotách nad rovnovážnou teplotou disociácie, resp. redukcie uhlíkom aj SiO₂. Zvyšuje sa tak využitie kovu (kovových prvkov).

Vznikajúci CO premiešava tekutý kov a znižuje sa naplynenie najmä vodíkom. Po dostatočnom prehriatí a odstátí (udržiavaní na teplote prehriatia) má liatina nižší obsah plynov, ako liatina vyrobená v kupolni.

Prepal základných, ale aj legujúcich prvkov je veľmi nízky (0 až 5 %) a súvisí s ich afinitou ku kyslíku. Poradie prvkov podľa stúpajúcej afinity ku kyslíku v zmysle Ellinghamovho diagramu je nasledovné:

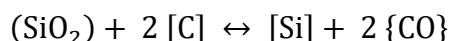
Cu, /Ni, Co,/ Mo, **Fe**, W,/ Cr, Nb, Mn, V, Si, /B, Ti,/ Zr, Al, Ce, Mg, Ca

Podľa tohto poradia by sa malo riadiť aj legovanie, t. j. pridávanie legúr.

Najvýznamnejšie sú zmeny obsahu Si a C v priebehu tavby.

Prepal Si sa v priebehu tavby mení. Pri tavení a prehrievaní sa prepal Si zvyšuje v dôsledku jeho oxidácie vzdušným O₂, ale aj inými oxidmi (FeO).

Pri rovnovážnej teplote dochádza k zvratu, t. j. redukcii SiO₂ uhlíkom podľa tzv. téglíkovej reakcie:



Rozhodujúcou je pritom **rovnovážna teplota reakcie** (nad 1450 °C), ktorá sa mení v závislosti od obsahu Si a C v súvislosti so zmenou aktivity týchto prvkov.

Po prekročení rovnovážnej teploty dochádza k zvyšovaniu obsahu Si, konkrétne k zníženiu prepálu Si až k jeho prípalu (SiO_2 z výmurovky téglika a z trosky).

Optimálna teplota prehriatia súvisí tiež s vyrábanou akosťou liatiny. Očkované liatiny sa prehrievajú až na $1500\text{ }^\circ\text{C}$ a nechajú sa odstáť 10 – 15 minút (držať na teplote). Prehriatie a odstátie tekutého kovu spôsobuje výrazné zvýšenie kvality a dezoxidáciu taveniny.

Zvýšenie obsahu C v liatine sa zabezpečuje **nauhličovaním** pomocou prísad s vysokým obsahom C (nauhličovadla). Kinetika a efektívnosť nauhličovania závisí od:

- **kvality nauhličovadla** – od obsahu C, obsahu a zloženia popola, hustoty (pórovitosti), zrnitosti a obsahu prchavých látok. Pri výrobe LGG je dôležitý čo najnižší obsah síry v nauhličovadle,
- **požadovaného stupňa nauhličovania**, t.j. od začiatočného a požadovaného obsahu C. Nauhličovanie sa zhoršuje so stupňom nasýtenia liatiny uhlíkom.
- **intenzity premiešavania** tekutého kovu (v nízkofrekvenčných peciach je väčšie premiešavanie a je lepšie nauhličenie),
- **teploty nauhličovania** (priamoúmerne),
- **obsahu Si a Mn**, resp. ďalších prvkov. Karbidotvorné prvky sa musia pridávať pred, resp. súčasne s nauhličovadlom, zatiaľ čo grafitotvorné až po nauhličení (najmä Si),
- **obsahu oxidov** (FeO , MnO , SiO_2 a ďalšie) v tavenine, na redukciu ktorých je potrebné určité množstvo C,
- **množstva, tekutosti a charakteru trosky v peci.**

Troska často obaľuje zrná nauhličovadla a zabraňuje ich rozpúšťaniu, takže v nich ostávajú. Nauhličovanie (doughličovanie) už nataveného kovu je problematické a musí sa robiť na čistú hladinu zbavenú trosky.

Rýchlosť nauhličovania je preto rozdielna, rovnako ako prepal, resp. využitie nauhličovadla. Konkrétne príklady nauhličovadiel sú v **tab. 4.14**.

Tab. 4.14 Príklady nauhličovadiel

Nauhličovadlo	C	S	Popol	Prchavé látky	N	Využitie [%]
	Obsah [%]					
Smolný koks	97 – 98	0,28 – 0,35	0,1 – 0,4	0,5 – 1,0	-	90
Petrolkoks	94 – 98	0,9 – 1,5	2,0 – 4,0	5,5 – 6,5	0,5 – 1,0	75
Antracit	82 – 85	0,8 – 2,0	2,8 – 3,5	8,0 – 9,0	-	60
Prírodný grafit	83 – 87	0,10 – 0,15	12 – 13	0,4 – 0,8	-	70
Umelý grafit	98,5 – 99	0,04 – 0,1	0,45 – 0,55	0,3 – 0,4	-	90

Výber nauhličovadla sa robí na základe cenovej relácie a dostupnosti surovín, najmä pri väčšej spotrebe nauhličovadiel (výroba syntetickej liatiny).

Nauhličovanie liatiny je v praxi možné tiež pomocou vsádzkových materiálov s vysokým obsahom C (surové železo oceliarenské až 4,6 % C, uhlíkatý FeMn a FeCr až 10 % C).

Zrornosť nauhličovadla má byť optimálna pre každý typ pece (pre nízkofrekvenčné pece je vyššia). Optimálna je zrornosť 3 – 8 mm s čo najnižším podielom prachu, ktorý pri vsádzaní uniká do ovzdušia. Znižuje využitie nauhličovadla a zhoršuje ekológiu. Využitie uhlíka z nauhličovacej prísady sa pohybuje v rozmedzí 60 až 90 %.

Odfosforenie a odsírenie v stredofrekvenčných peciach s kyslým téglíkom je problematické. Nízky obsah týchto prvkov sa zabezpečuje vsádzkou (vyšší podiel oceľového odpadu).

Čiastočné odsírenie, najmä pri vysokom obsahu S (nad 0,08 %) je možné pomocou karbidu vápnika (CaC_2) v množstve asi 1 % h.d. pri teplote 1400 °C, resp. prísadou zmesi zrnitého Mg s vápnom (15 až 30 % Mg), ktorá sa injektuje dusíkom pod hladinu tekutého kovu. Odsírenie touto metódou je veľmi účinné a spoľahlivé aj pri nízkych teplotách liatiny a môže zabezpečiť obsah S aj pod 0,01 %.

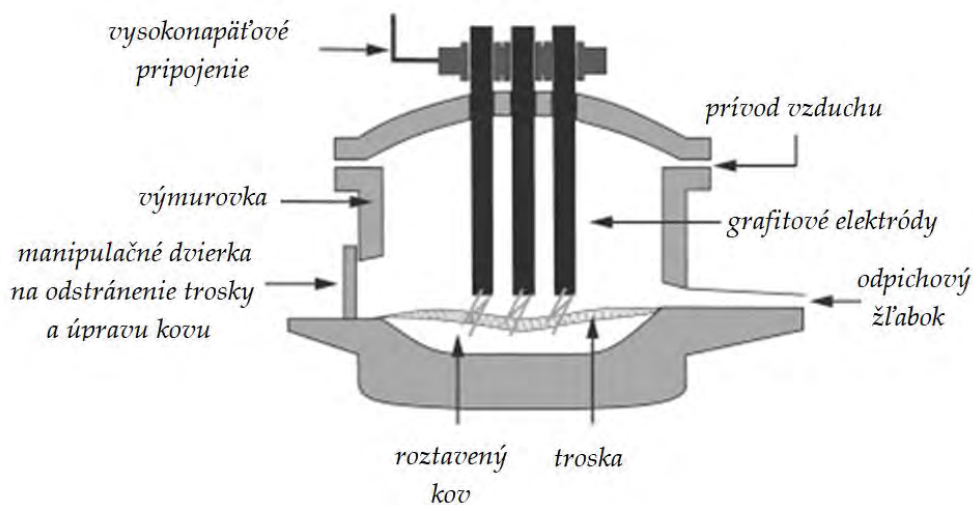
Vysoké odsírenie a ďalšie metalurgické procesy umožňuje zásaditý téglík, ktorý je však cenovo nákladnejší.

Efektívnejšie je mimopecné odsírenie pomocou zásaditej trosky redukovanej mletým koksom, alebo prachovým ferosilíciom.

4.2.5 Tavenie liatiny v elektrickej oblúkovej peci

Tavenie liatiny v elektrickej oblúkovej peci (EOP, **obr. 4.53**), najmä bežnej akosti je neefektívne a robí sa len ojedinele. Najčastejšie sa EOP používa na výrobu LGG, nakoľko táto umožňuje robiť významné metalurgické pochody, hlboké odsírenie a zníženie obsahu Mn, Cr a ďalších karbidotvorných a antiglobulizačných prvkov. Tieto úpravy chemického zloženia neumožňujú iné typy pecí. Výroba LGG pri zásaditej výmurovke je možná aj syntetickým, resp. polosyntetickým postupom.

Oblúčková pec umožňuje taviť neupravenú kovovú vsádzku (kusovitost') a až 80 % podielu vsádzky môžu tvoriť liatinové a ocelové triesky aj mierne znečistené olejom, príp. vlhké (pri kvalitnom odsávaní pece).



Obr. 4.53 Elektrická oblúčková pec

Princíp tavenia v EOP sa zakladá na prenose tepla z oblúkového výboja, ktorý vzniká termoelektrickou emisiou uhlíka elektród, do kovovej vsádzky pece. EOP je nístejová pec s veľkou plochou hladiny tekutého kovu a malou hĺbkou.

Metalurgia tavenia je založená na oxidačnom uhlíkovom vare tekutého kovu, pri ktorom sa zníži obsah C, Si, Mn (pod 0,1 %), ako aj Cr, P a obsah plynov (N, H). Zníži

sa tiež množstvo inklúzií a nečistôt. Najvýraznejšie je aj hlboké odsírenie liatiny (pod 0,015 % S) pomocou karbidickej redukčnej trosky. Hlavnou nevýhodou výroby liatiny v elektrickej oblúkovej peci je vysoká merná spotreba elektrickej energie a nezanedbateľné sú aj náklady na grafitové elektródy.

Pri výrobe LGG je nutné vysoké nauhličovanie a dolegovanie kremíka. Nauhličovanie je najvhodnejšie robiť kombináciou nauhličenia počas tavby a úpravou obsahu C po natavení nahodením nauhličovadla na hladinu kovu bez trosky.

4.3 Zvyšovanie tepelnej účinnosti tavenia

Účinnosť každého tepelného agregátu, teda aj taviacej pece sa určuje ako podiel **užitočného** a **spotrebovaného tepla**. Základné spôsoby výpočtu tepelnej účinnosti tavenia:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_p} \cdot 100 \% = \frac{Q_u}{Q_u + Q_{str}} \cdot 100 \%$$

kde: η - účinnosť tavenia, resp. tepelná účinnosť [%]

Q_p – privedené teplo

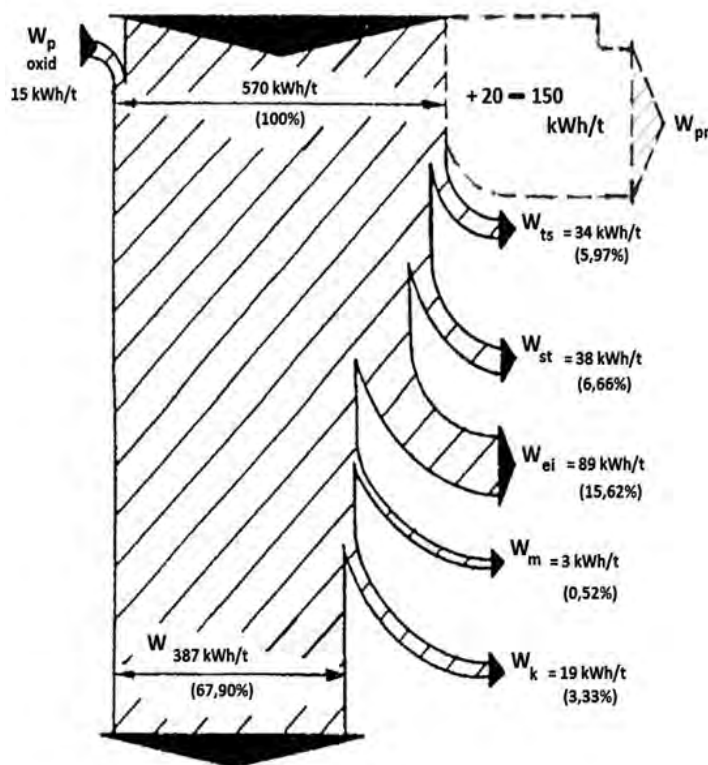
Q_u – užitočné teplo, t.j. entalpia tekutého kovu na žľabku

Q_{str} – tepelné straty (nevyužité teplo)

Užitočné teplo je entalpia liatiny pri teplote odpichu. Merná entalpia liatiny je relatívne vysoká a pri bežných odpichových teplotách 1450 – 1500 °C dosahuje hodnoty 1314 až 1393 MJ.t⁻¹.

Dôležité je poznať (vypracovať) tepelnú, resp. energetickú bilanciu zariadenia a zvyšovať jej účinnosť – využitie tepla.

Príklad takejto bilancie stredofrekvenčnej indukčnej (téglovej) pece s kapacitou 6 ton liatiny a spotrebe 570 kWh.t⁻¹ je na **obr. 4.54**.



Popis:

W_{ei} – straty elektrickou indukciou vo vsádzke. Závisí od elektrického odporu vsádzky ($\rho = \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)

W_{ts} – tepelné straty – tepelnou difúziou tégľa, únikom (sálaním tepla do ovzdušia a odvodom tepla chladiacou vodou cievky)

W_{st} – straty tepla troskou a exhalátmi z pece

W_m – straty meniča frekvencie

W_k – straty v kondenzátoroch, transformátoroch, vodičoch atď.

Obr. 4.54 Energetická bilancia tavenia liatiny v stredofrekvenčnej indukčnej (tégľovej) peci (6t)

Najviac môžeme ovplyvniť (znížiť) straty tepla W_{ts} a W_{st} . Súvisia s taviacim výkonom pece a s postupom tavenia – postupom zavážania a tak aby bola pec pri tavení stále plná, kusovitosťou vsádzky a jej sypnej hmotnosti, ktorá má byť čo najvyššia. Dôležité sú časové straty, najmä po natavení, kedy sa pec udržuje na teplote, resp. prehrieva. Množstvo trosky je závislé od čistoty vsádzky.

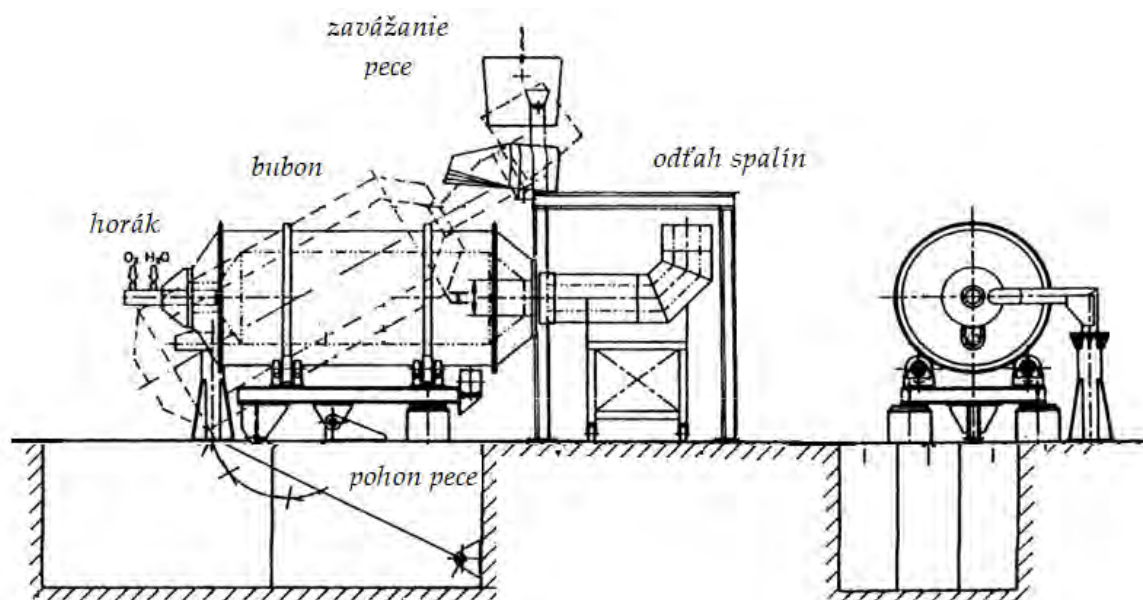
Účinnosť EIP sa pohybuje v dosť širokom rozmedzí t.j. od 65 do 80 % pri spotrebe elektrickej energie cca od 520 až 750 kWh.t⁻¹. Dôležité je tiež téglik po natavení zakrývať vekom a regulovať teplotu chladiacej vody cievky tak, aby na výstupe z cievky mala teplotu 40 až 60 °C.

4.4 Tavenie liatiny v rotačnej bubnovej peci

Rotačná bubnová pec (**obr. 4.55**) patrí medzi progresívne taviace zariadenia, ktorá je vhodná pre tavenie všetkých druhov liatin. Jej prednosťou sú pomerne nízke investičné náklady, vysoká operatívnosť, ktorá umožňuje následne taviť rôzne značky liatin, voľba teploty prehriatia a takisto nízke prevádzkové náklady. Vďaka

spaľovaníu plynu kyslíkovými horákmi vzniká pomerne malé množstvo spalín (cca 700 m³), ktoré je možno účinne odprášiť. Bubnové pece sú preto taviacim zariadením, ktoré obvykle veľmi dobre spĺňajú ekologické predpisy. Z hľadiska taviaceho výkonu sú vhodné najmä pre malé a stredne zlievarne.

Bubnová pec je tvorená valcovou časťou, na každom konci s kužeľovým čelom. V osi predného čela je otvor pre usadenie horáka, otvorom v zadnom čele sa vykonáva zavážanie vsádzky a slúži pre odvod spalín. Vo valcovej časti plášťa je odpichový otvor, ktorý je počas tavenia uzatvorený žiaruvzdornou výmurovkou. Pec je v celom vnútornom profile vybavená žiaruvzdornou výmurovkou. Veľkosť pece je určená maximálnou hmotnosťou vsádzky, obvyčajne v rozmedzí 2 – 10 t.



Obr. 4.55 Rotačná bubnová pec

Pec je uložená na podperných valcoch, poháňaných elektromotormi, zaisťujúce otáčanie pece okolo pozdĺžnej osi. Pomocou hydraulických valcov je možno pec naklápať až o 45° nahor alebo nadol (pri zavážaní).

Pri zavážaní sa pec nakloní so zavážacím otvorom smerom nahor a celé množstvo vsádzky sa navsádzkuje zavážacím zariadením. (Pri tejto operácii je z pece vysunutý horák aby nedošlo k jeho poškodeniu a miesto neho je v horákovom otvore zasadená vložka.)

Po navsádzkovaní sa pec sklopí do horizontálnej polohy, opäť sa vloží horák a prebieha celý proces tavenia.

Na **ohrev** rotačnej bubnovej pece sa používajú vodou chladené horáky na ľahký vykurovací olej alebo kvapalný plyn, najčastejšie zemný plyn. Spaľovanie sa robí výhradne kyslíkom. Nastavenie výkonu, dĺžky plameňa a spaľovacieho pomeru sa pre jednotlivé fázy procesu tavenia vykonáva automaticky podľa nastaveného programu. Horák je upevnený na pantografickom zariadení, ktoré ho umožňuje z pece vysunúť pri zavážaní vsádzky, odoberaní vzoriek kovu aj pri opravách výmurovky. V dôsledku používania kyslíka sa dosahujú vysoké teploty plameňa (až okolo 2700 °C), pričom (vďaka absencii dusíka) vzniká len malé množstvo spalín.

Spaliny odchádzajúce z pece (teplota viac ako 1500 °C) sa v odťahu ochladzujú pripúšťaním studeného vzduchu na teplotu pod 180 °C. Na výstupe z pece obsahujú spaliny 100 – 300 mg prachu na 1 Nm³. Prach pochádza zo vsádzky, nahličovadla, oxidov železa a ďalších oxidačných produktov. Prachové častice sa zachytávajú najprv v cyklóne a potom vo filtroch.

Náklady na energiu sú nižšie ako v elektrickej indukčnej peci.

Pri odpichu sa prerazí zátka v odpichovom otvore a obsah pece sa pootočením bubna vypustí z pece. Po odpichu sa pec nakloní odťahovým otvorom smerom nadol a otáčaním sa vysype zvyšok trosky.

4.4.1 Technológia a metalurgia tavenia liatiny v rotačnej bubnovej peci

Na začiatku tavby nie je zapnutá rotácie bubna, aby sa zabránilo poškodeniu výmurovky pece tvrdými kusy vsádzky. Ohrev vsádzky sa v tejto fáze uskutočňuje priamym sálaním plameňa a ohriatej hornej časti výmurovky. Po nahriatí vsádzky na teplotu, kedy sa vsádzka stáva už čiastočne plastická sa začne otáčanie pece rýchlosťou asi 1 otáčka za minútu. Ohrev potom prebieha jednak priamym sálaním plameňa a taktiež zospodu od nahriatej výmurovky, ktorá sa otáčaním (vyhriata) dostala na dno kovu.

Kontrola chemického zloženia, teploty kovu a odber vzoriek sa uskutočňuje čelným otvorom bubna po vypnutí horáka a jeho vysunutí z bubna. Tadiaľ je tiež možné do pece dostať aj prostriedky pre eventuálnu úpravu chemického zloženia – ferozliatiny alebo nahličovadlo. Po takomto zásahu sa horák znovu inštaluje a tavenie pokračuje až do dosiahnutia požadovanej teploty.

Metalurgické pochody v bubnovej peci sú určené najmä charakterom pecnej atmosféry (oxidačné alebo redukčné nastavenie spaľovacieho pomeru) a súčasne intenzívnym stykom spalných plynov s kovom. Pri natavovaní sa obyčajne volí mierne oxidačný plameň, pri prehrievaní je potrebný redukčný plameň.

Veľkosť prepalu základných prvkov je obyčajne C = 10 – 15 %; Si = 15 – 25 %; Mn = 25 – 32 %.

S týmto prepalom sa počíta už pri zostavovaní vsádzky, drobné korekcie je však bez problémov možné vykonať počas tavenia v peci alebo po odpichu v panve.

Vsádzka do bubnových pecí sa skladá obvykle z 30 – 50 % surového železa (u LLG menej, u LGG viac), zvyšok tvorí vratný materiál, liatinový a oceľový odpad. Obsah uhlíka sa koriguje nahličovadlami, pridávanými pokiaľ možno už do vsádzky. Využitie uhlíka je okolo 40 – 60 %. Do vsádzky sa pridáva okolo 0,5 – 1 % vápenca, ktorý viaže oxidy z opotrebenej výmurovky a oxidy vzniknuté prepalom prvkov do trosky. Troskový film tiež obmedzuje rozsah oxidácie.

Dĺžka tavby sa podľa veľkosti pece pohybuje okolo 1,5 – 3 hodín. V bubnovej peci možno dosiahnuť teplotu kovu až do 1550 °C, z hľadiska životnosti výmurovky by však nemala teplota prekračovať 1480 °C.

4.5 Odlievacie panve

Liate panve slúžia na transport tekutého kovu a jeho odlievanie do foriem (**obr. 4.56**). Podľa veľkosti sú konštruované ako ručné, závesné alebo žeriavové. Panve sú vymurované žiaruvzdornou výmurovkou. Ich veľkosť je udaná menovitým objemom v dm³ resp. hmotnosťou náplne (tekutého kovu) v kg až v tonách – pre liatinu najčastejšie do 9 ton, zriedkavo 10 až 20 t.

Podľa spôsobu vylievania kovu z panve sa delia na:

- ručné,
- závesné (žeriavové), ktoré sú podľa spôsobu vytekania kovu:
 - hrncové,
 - čajníkové,
 - bubnové,
 - zátkové so spodnou výpusťou.

Ručné panvy (obsah do 30 kg tekutého kovu) sa zhotovujú s jednou, resp. dvoma rukoväťami (pre jedného, resp. dvoch odlievačov).

Z **bubnovej panve** sa kov odlieva z úrovne hladiny a hrozí nebezpečenstvo, že s kovom natečie do formy aj troska. Trosku je preto nutné pred liatím starostlivo stiahnuť a zachytávať ju pokiaľ je to možné aj počas liatia.

Čajníková panva je tiež hrncová, ale kov odteká od dna a troska sa zachytáva pomocou prepážky. Panva je náročnejšia na výmurovku a na údržbu v porovnaní so sklopnou panvou.

Bubnová panva má najnižšie tepelné straty a pri odlievaní čiastočne zachytáva trosku. Výmurovka je dosť komplikovaná.

Hrncová panva so spodnou výpusťou má odpichový otvor na dne osadený šamotovou výlevkou. Výlevka je uzavretá zátkovou tyčou, na konci so zátkou. Zátková tyč sa nadvihuje ovládacou pákou. Výhodou tejto panve je, že po celú dobu liatia sa odlieva čistý kov od dna (v panve je nutné ponechať určitý zvyšok kovu, aby nevytekala i troska). Panve so spodnou výpusťou sa používajú pri odlievaní ocele ale aj LGG na automatických liacich zariadeniach. LGG sa obvyčajne odlieva pomocou panve so sklopnou výpusťou alebo čajníkovou panvou.

Problematickú zátkovú tyč už nahradzuje šupatkový uzáver.

Po vyliatí kovu je nutné panvu okamžite čo najlepšie vyčistiť od trosky a zvyškov kovu, poškodené miesta výmurovky sa musia opraviť, pred ďalším použitím vysušiť (opravené miesta výmurovky) a predohriať, podľa možnosti až vyžíhať.

Maximálna veľkosť (kapacita) panve v konkrétnej zlievarni sa určuje v závislosti od možnosti výroby najťažšieho odliatku. Jeho hmotnosť súvisí s kapacitou taviarne (hmotnosťou tekutého kovu v konkrétnom čase) a s maximálnou nosnosťou odlievacieho žeriavu (nezabúdať pri tom aj na hmotnosť samotnej panve).



a) sklopná panva



b) čajníková panva



c) panva so spodnou výpusťou



d) ručná panvička na odlievanie vzoriek

Obr. 4.56 Typy odlievacích pánvy

5. METALURGICKÉ SPRACOVANIE NATAVENEJ LIATINY

Vlastnosti natavenej liatiny je možné zlepšiť mimopecným spracovaním a to už na žlabku pri odpichu alebo v pánve prípadne až pri odlievaní.

Základné postupy mimopecnej úpravy liatin sú:

- odsírovanie
- očkovanie
- modifikovanie

5.1 Odsírenie liatin

Síra je nežiadúcou prímесou v liatinách, pretože na hraniciach zŕn vytvára krehké potrojnú eutektikum $\gamma + \text{Fe}_3\text{C} + \text{FeS}$. Voľná síra výrazne zabraňuje grafitizácii. So zvyšovaním obsahom síry tekutosť liatiny klesá a zmraštenie a sklon k tvorbe prasklín a trhlín stúpa. Preto už pri tavení, najmä v EIP je potrebné urobiť opatrenia na zníženie obsahu síry v natavenej liatine.

Na mimopecné odsírenie sa najčastejšie používa:

- horčík v rôznych zmesiach, resp. nasiaknutý v kokse,
- kalcinovaná sóda Na_2CO_3 v špeciálnych prípravkoch (zmesiach)
- vápno CaO v práškovej forme ako prísada do iných zmesí
- špeciálne predzliatiny (CaSiBa , CaSiAl , CaSiMg a pod.)

Najpoužívanéjšie suroviny:

- **Kovový Mg** zrnitý v zmesí vápna a ďalších prísad je najúčinnnejší, no zároveň cenovo najdrahším. Pridáva sa postupmi ako pri modifikácii
- **Kalcinovaná sóda** je najlacnejším a zároveň najúčinnnejším odsírovačom. Jej výhodou je, že ju možno v rôznych prípravkoch (zmesiach) nasypať na dno panve a zaliať tekutým kovom. Odsírovanie je možné aj pri nízkych teplotách liatiny (1250 – 1300 °C), pri ktorých účinnosť ďalších odsírovadiel veľmi klesá.

Pri odsírovaní sódou sa však tvorí veľké množstvo hustých čpavých dymov, preto je nutné ich odsávanie, príp. zneškodňovanie.

Pri spotrebe 0,8 až 1,2 % hmot. tekutého kovu je stupeň odsírenia do 60 %.

- **Karbid vápnika CaC_2** sa v dôsledku vysokej teploty tavenia pridáva buď do pece alebo v prachovej forme na hladinu tekutého kovu. Stupeň odsírenia je až do 90 % v závislosti od podmienok odsírovania. Spotreba karbidu sa pohybuje od 1 do 2 %. Pri vhodných podmienkach je možné dosiahnuť odsírenie až do 0,002 %. Karbid však zapríčiňuje vznik exhalácií, ktoré okrem nepríjemného zápachu (acetylén) sú aj zdraviu škodlivé.

5.2 Očkovanie liatin

Očkovanie je najekonomickejší spôsob zvýšenia mechanických vlastností liatiny, resp. potlačenia sklonu liatiny k tvorbe zákaliek (grafitizačné očkovanie).

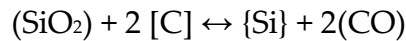
Očkovaním sa rozumie vnášanie prísad do taveniny, čím sa zvýši počet cudzích grafitizačných zárodokov a docieli sa zjemnenie vylučovaného grafitu a zjemnenie kryštalizácie (eutektických zŕn). Tieto kryštalizačné zárodky v tavenine podporujú kryštalizáciu grafitického eutektika.

Predpokladá sa, že z každého zárodku vykryštalizuje jedno eutektické zrno, ktoré je zložené z primárne utvoreného grafitu a z austenitu. V priebehu eutektického tuhnutia tvorba aktívnych zárodokov pre kryštalizáciu grafitu prebieha obtiažnejšie, kým zárodky pre kryštalizáciu austenitu a cementitu sú bežne k dispozícii.

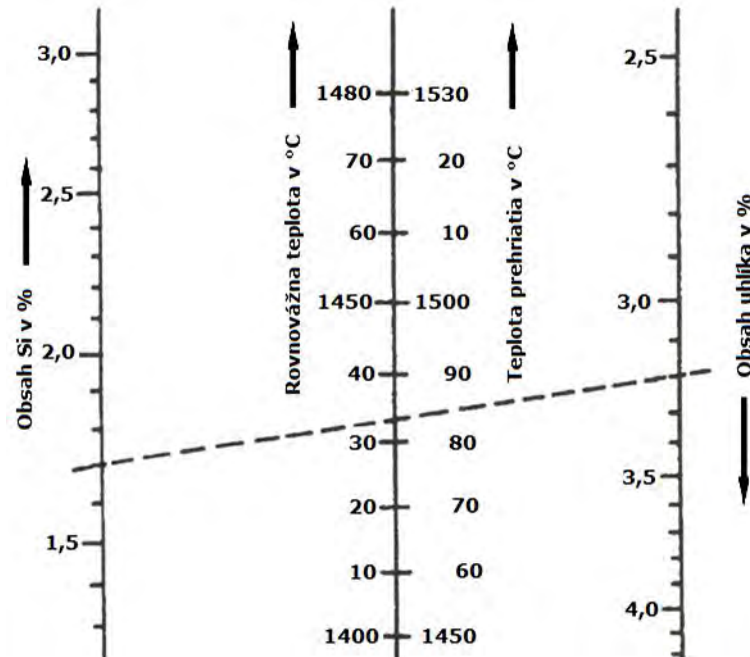
Nedostatok a oneskorená aktivácia grafitizačných zárodokov vedie k tuhnutiu liatiny za vzniku hrubého eutektického zrna a vylúčenia podchladených typov grafitu. Pri podchladení pod metastabilnú eutektickú teplotu sa už vylučuje cementitické eutektikum (ledeburit). Aby sa tomu zabránilo, poskytuje sa grafitu „štartovacia pomoc“ formou očkovania taveniny zárodkami rovnakého druhu, t. j. zárodkami na báze grafitu, alebo heterogénnymi zárodkami, napr. na báze oxidov, keď prídavkom FeSi sa vyzrážajú tuhé suspenzné častice SiO_2 .

Stav a počet účinných grafitizačných zárodokov, ktoré sú pri tuhnutí v tavenine k dispozícii, závisí od vsádzkových surovín, vedenia tavby a očkovania.

Podstatou očkovania je prehriatie tekutého kovu pred očkovaním nad rovnovážnu teplotu stability oxidov SiO_2 podľa rovnice:



Rovnovážna teplota sa určí z diagramu – obr. 5.57.



Obr. 5.57 Nomogram pre určenie teploty prehriatia (odpichovej teploty) podľa obsahu C a Si v tavenine

Východisková tavenina má mať také chemické zloženie, aby liatina pre smerodajnú hrúbku stien odliatku stuhla bez očkovania makovo až bielo. Pre nelegované sivé liatiny to je:

% C	=	2,6 až 3,7 (do 3,2 pre vyššie pevnosti v ťahu)
% Si	=	1,2 až 2,2 (1,1 až 1,5 pred očkovaním)
% Mn	=	0,4 až 1,2
% P	=	max. 0,5 (max. 0,3 pre vyššie pevnosti)
% S	=	max. 0,15 (max. 0,12 pre vyššie pevnosti)
Se	=	0,75 až 1,11 (0,81 pre vyššie pevnosti)

Pre očkovanie liatiny je typické, že východzia tavenina má mať obsah C a Si v dolnom pásme.

Teplota prehriatia ovplyvňuje obsah kyslíka v tavenine. Prehriatím taveniny nad rovnovážnu teplotu stability SiO_2 dochádza k dezoxidácii taveniny uhlíkom a výdržou na tejto teplote odstraňujeme z taveniny nevhodné zárodky ich

rozpúšťaním. Ak neodstránime tieto vlastné zárodky, pri nasledujúcom chladnutí pôsobia veľmi aktívne pri kryštalizácii grafitu a účinok očkovania sa neprejaví.

Optimálna teplota prehriatia je nad 1450 °C, resp. jej výdrž na zvýšenej teplote cca 15min. Vplyv teploty prehriatia liatiny a doby výdrže na teplote je spájaný s ovplyvnením rafinačných pochodov v tavenine. Zvýšenie teploty prehriatia a doby výdrže rafinuje taveninu, t. j. dochádza k rozpúšťaniu dispergovaných tuhých fáz, ktoré boli potencionálnymi zárodkami kryštalizácie. Dochádza k homogenizácii taveniny. Vysoké prehriatie liatiny, ako aj výdrž pri zvýšenej teplote znižujú schopnosť liatiny ku grafitizácii. Prejaví sa to sklonom liatiny k podchladeniu, k zníženiu počtu eutektických buniek a tvorbe zákalky. Je preto nutné následne liatinu očkovať.

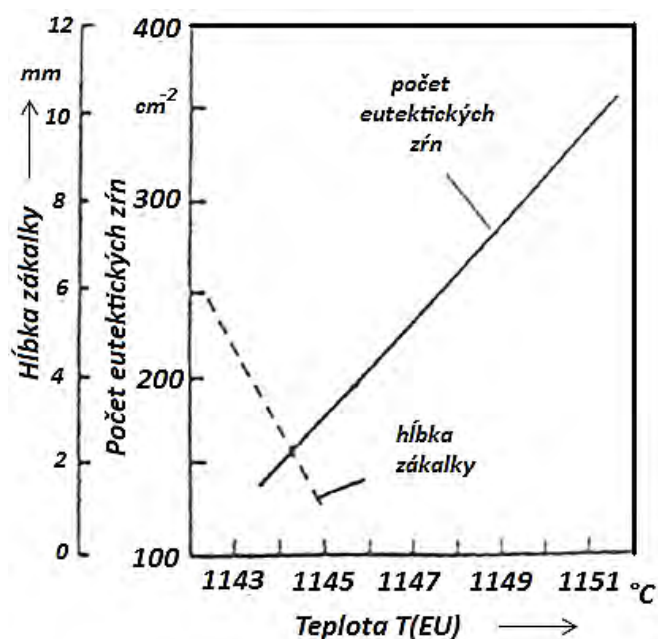
Informácie o priebehu tuhnutia liatin a ich grafitizačnej schopnosti poskytuje **termická analýza**. Pomocou kriviek chladnutia sa určí z ΔT – veľkosti podchladenia spôsob kryštalizácie, t.j. veľkosť, tvar a rozloženie grafitu, ako aj veľkosť zŕn austenitu, čo sú základné charakteristiky – kvality liatin.

Priama súvislosť medzi podchladením, počtom eutektických zŕn a rozložením lupienkového grafitu je uvedená v **tab. 5.15**.

Tab. 5.15 Súvislosť medzi podchladením, počtom eutektických zŕn a typom rozloženia lupienkového grafitu

Označenie liatiny	Podchladenie ΔT [°C]	Počet zŕn [1/cm ²]	Typ rozloženia grafitu	Poznámka
I	cca 2,5	> 600	100 % A	tuhnutie prakticky bez podchladenia
II	cca 5,0	cca 550	100 % A max. 5 % B/D/E	veľmi malé podchladenie
III	cca 10,0	cca 450	85 – 90 % A max. 15 % B/D/E	malé podchladenie
IV	cca 15,0	cca 350	60 % A max. 40 % B/D/E	stredné podchladenie
V	cca 20,0 cca 23,0	cca 250 cca 150	30 % A max. 50 % D/E 20 % B	veľké podchladenie
VI	cca 26,0	cca 100	10 % A max. 70 % D/E 20 % B	veľmi veľké podchladenie
Poznámka: A – rovnomerné rozloženie lupienkového grafitu B – ružicovité rozloženie lupienkového grafitu C – medzidendritické neusmernené rozloženie lupienkového grafitu E – medzidendritické usmernené rozloženie lupienkového grafitu				

Obsah grafitizačných zárodkov v tavenine je merateľný pomocou dolnej teploty grafitického eutektika T(EU) na krivke chladnutia pri sivom tuhnutí (**obr. 5.58**).



Obr. 5.58 Závislosť počtu eutektických zŕn a hĺbky zákalky od dolnej eutektickej teploty T(EU)

5.2.1 Zloženie očkovadiel

Očkovadlá sú rôzne ferozliatiny, resp. zliatiny kovov určené na rôzne postupy očkovania tekutého kovu. Sú tvorené nosičom a kryštalizačnou zložkou.

Nosič tvorí hlavnú časť hmoty očkovadla, sám o sebe však nemá očkovací účinok. Najčastejšie sú očkovadla na báze Fe – Si (FeSi 75 %).

Očkovacia zložka je v očkovadle obsiahnutá len v malej koncentrácii, ale pre funkciu očkovadla je nenahraditeľná. Bolo preukázané, že čistá zliatina Fe – Si má slabé očkovacie účinky. Aktívnymi prvkami sú najmä Ca, Al, Sr, Ba alebo Zr. Tieto prvky reagujú najmä s kyslíkom a sírou, tvoria s nimi nukleačné zárodky grafitu. Túto úlohu má vo ferosilíciu zvyčajne Ca a Al. Oba prvky tvoria oxidy typu $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ alebo $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, ktoré obaľujú jadro zárodku. Podobne pôsobí stroncium a bárium, ktoré tiež tvoria hexagonálne silikáty typu $\text{SrO} \cdot \text{SiO}_2$ alebo $\text{BaO} \cdot \text{SiO}_2$, prípadne tiež spoločne s Al_2O_3 . Jadro zárodku tvoria oxidy (napr. $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$) alebo sulfidy MnS, CaS, MgS, CeS a iné. Aktívne prvky teda nemusia sami tvoriť zárodky, ale aktivizujú zárodky, ktoré už sú v liatine prítomné.

Menej používaným druhom sú uhlíkaté očkovačla, ktoré sa používajú na grafitizačné očkovanie, t.j. na potlačenie vzniku zákaliek u tenkostenných odlievok. Aktívnou zložkou je kryštalický uhlík, ktorého účinok je založený na mriežkovej identite s grafitom v liatine. Najčastejším grafitizačným očkovačlom sú kvalitné nauhličovadlá (mleté elektródy) fúkané do tekutého kovu (vzduchom alebo dusíkom).

5.2.2 Doznievanie očkovačieho účinku

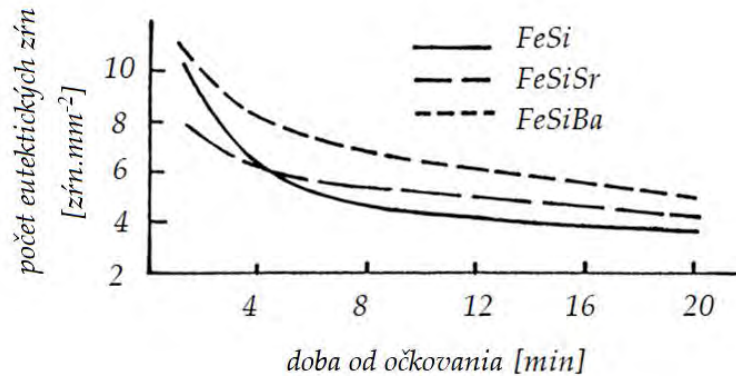
Účinok očkovačla na kryštalizáciu grafitu je časovo obmedzený. Najväčší je bezprostredne po naočkovaní a s časom doznieva. Doznievanie je spôsobené najmä koaguláciou zárodkov, ich hrubnutím, v dôsledku čoho dochádza k ich rýchlejšiemu vyplávaniu a taktiež v dôsledku chemickej homogenizácie taveniny. Pri homogenizácii miznú oblasti s miestnym presýtením grafitotvorných prvkov, ktoré podporovali nukleáciu grafitu.

Rýchlosť doznievania je závislá najmä od druhu očkovačla (takisto od chemického zloženia liatiny, teploty, pohybu taveniny atď.). Rýchlosť doznievania závisí od zloženia očkovačla, spôsobu jeho pridávania do taveniny, teploty kovu (má byť pri očkovaní čo najnižšia), povrchovej energie a difúzných podmienok tekutého kovu. Hlavnými prejavmi doznievania očkovania sú:

- väčší sklon k zákalke v LLG aj LGG, zvlášť v tenkých prierezoch,
- zníženie počtu eutektických buniek v LLG, čo má za následok zhoršenie jej mechanických vlastností (hrubozrnosť),
- zníženie počtu guľôčok grafitu a ich nedokonalý tvar; pričom pri väčšej degenerácii tvaru grafitu sa znižujú mechanické vlastnosti odlievku.

Z uvedených dôvodov je nutné liatinu odliť čo najskôr po naočkovaní, zvyčajne do 10 minút. Niektoré prvky, najmä Ba a Sr spomaľujú rýchlosť doznievania a tým predlžujú maximálnu dobu do odlievania, približne na 20 minút a viac.

Na **obr. 5.59** je znázornený účinok doznievania očkovania ako pokles počtu eutektických buniek. Je zrejmé, že po očkovaní FeSi je účinok doznievania veľmi rýchly. Očkovačlo s obsahom bária odzníeva pomalšie, z počiatku však dáva vysoký počet eutektických buniek. Očkovačlo so stronciom je výhodné preto, že dáva len menší počet eutektických buniek a pritom jeho účinok odzníeva pomaly.



Obr. 5.59 Doznievací účinok očkovania

5.2.3 Druhy očkovadiel

Očkovadlá na báze kremíka

Najbežnejším druhom očkovadla je ferosilícium s obsahom okolo 65 – 75 % Si a zvyčajne 1 – 2 % Al a 0,2 – 1% Ca. Najlepší očkovací účinok sa dosahuje, keď sú v očkovadle prítomné súčasne Ca a Al. Príliš vysoký obsah Al však podporuje vznik bodlín, vysoký obsah Ca vedie k vzniku troskotvorných inklúzií. Obsah oboch prvkov sa preto volí s ohľadom na konkrétny spôsob použitia.

Komplexné očkovadla na báze ferosilícia obsahujú ďalšie kryštalizačné aktívne prvky, ktorých účelom je zlepšenie očkovacieho účinku, spomalenie rýchlosti doznievania alebo zlepšenie rozpustnosti pri nízkych teplotách.

Obvyklými prvkami v komplexných očkovadlách sú:

Sr – (0,5 – 1,0 % Sr) zvyšuje rýchlosť rozpúšťania očkovadla a to aj pri nízkych teplotách kovu. Očkovací účinok je aj pri nízkom dávkovaní dlhodobý a veľmi dobrý.

Ba – (1 – 6 % Ba) tvoria chemicky stále zárodoky s vysokou hustotou, ktoré len pomaly vyplávajú do trosky. Bárium predlžuje dobu očkujúceho účinku.

Zr – (1 – 6% Zr) má vysokú dezoxidačnú schopnosť, zaisťuje dobrý očkovací účinok, spomaľuje doznievanie. Viazne dusík a tým obmedzuje nebezpečenstvo vzniku bodlín v LGG.

Mn – (až 10% Mn) zlepšuje rozpustnosť očkovadla pri nízkych teplotách liatiny.

Ce – (0,5 – 1,0 % Ce, prípadne spoločne s ďalšími kovmi vzácnych zemín) tvoria veľmi stabilné oxidy a sulfidy, znižuje rýchlosť doznievania. V očkovačoch sa používa zriedka, častejšie ako súčasť modifikátora pri výrobe LGG, kde kompenzuje antiglobulizačný účinok niektorých nečistôt.

Ti – (až 10%) používa sa zriedka a to hlavne pri očkovaní LLG a LČG (nie LGG, lebo Ti zabráňuje vzniku guľôčkového grafitu). Viaže dusík a znižuje nebezpečenstvo vzniku bodlín. Titán však môže spolu s uhlíkom tvoriť karbidy TiC, ktoré majú za následok zvýšené opotrebovanie nástrojov na opracovanie.

Očkovačlá na báze uhlíka (grafitizačné očkovanie)

Obsahujú obvykle okolo 30% kryštalického uhlíka a asi 40 – 50 % kremíka. Tento typ nemá očkovací účinok u liatin s veľmi nízkym obsahom síry (pod 0,02 %) – nemožno ho teda použiť u LGG. Uhlíkaté očkovačlá sa obvyčajne horšie rozpúšťajú a tvoria trosku. Pre očkovanie je preto nutná pomerne vysoká teplota kovu až nad 1450 °C. Dávkujú sa obvyčajne do panvy v množstve 0,4 – 0,8 % hmotnosti kovu.

Silikokalcium (CaSi)

Je typom očkovačlá s veľmi silno dezoxidačným a desulfidačným účinkom. Pre očkovanie liatiny nie je príliš bežné. Očkovací účinok sa u liatiny prejavuje aj pri veľmi nízkom obsahu síry. Tvorí značné množstvo trosky. Pre očkovanie liatiny sa zvyčajne používa silikokalcium s asi 30 % Ca a 65% Si, dávkovanie 0,2 – 0,4 %. Očkovací účinok CaSi pomerne rýchlo odznieva.

Karbid kremíka (SiC)

Karbid kremíka má teplotu tavenia nad 1700 °C, v liatine sa teda netaví, ale postupne rozpúšťa, pričom rozpúšťanie SiC je v porovnaní s FeSi endotermické. Tým sa zárodky tvoria postupne po dlhšiu dobu a očkovací účinok je dlhodobý. Očkovačlo obsahuje obvyčajne 85 – 90 % SiC. Pre tavenie v elektrických peciach sa používa zrnitý typ 90 – 92 % SiC, pre kuplové peci je vhodnejší briketovaný druh 20 – 80 % SiC.

Je potvrdené, že očkovanie pomocou SiC je účinné aj v kryštalizačne nepriaznivých podmienkach, napr. pri vysokom podiele ocele vo vsádzke alebo pri tavení iba z oceľového šrotu (syntetická liatina). Vzhľadom k dlhodobému účinku je možné očkovať už do kúpeľa v taviacej peci. Dávkovanie je okolo 0,5 % hmotnosti tekutého kovu.

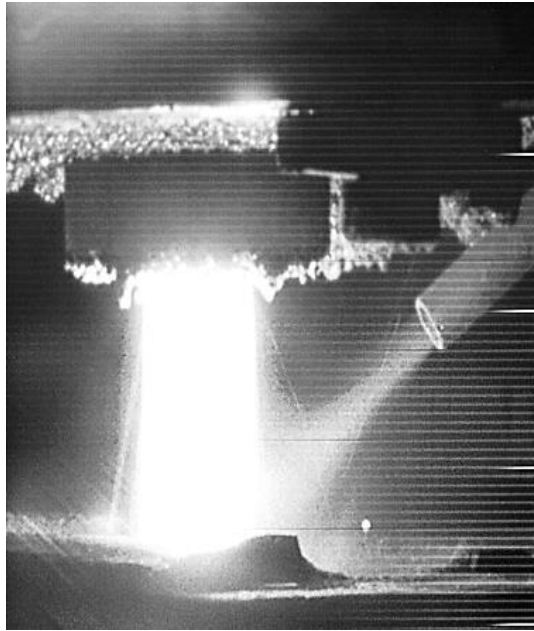
5.2.4 Spôsob očkovania

Pri očkovaní liatiny je nutné zaistiť rozpustenie očkovačla a homogenizáciu taveniny. Podmienkou účinného očkovania je dostatočná teplota kovu, obyčajne nad 1400 °C. Vzhľadom na doznievací účinok očkovania je vhodné očkovať čo najneskôr, aby sa čo najviac skrátila doba medzi očkovaním a liatím, prípadne očkovať až v priebehu odlievania. To umožní výrazne znížiť dávkovanie očkovačla.

Hlavnými postupmi očkovania sú:

Očkovanie do panve – očkovačlo s vhodnou zrnitosťou sa vhodí do odlievacej panve v priebehu nalievania kovu z pece alebo z transportnej do odlievacej panve v čase, keď je už dno zaliate kovom. Nemá sa očkovať do úplne prázdnej panve z dôvodu nalepovania očkovačla na dno panve. Pri očkovaní do takmer plnej panve sa nezaistí rozpustenie očkovačla a homogenizácia v tavenine. Zrnitosť očkovačla sa volí podľa teploty a najmä podľa objemu kovu, od 2 – 4 mm u malých panvy, do 30 mm a viac u veľkých panvy. Frakcie pod 1 mm sú nevhodné, pretože je nebezpečenstvo ich nalepovanie na steny panve a obalenie do trosky. Z hľadiska využitia očkovačla je táto metóda najmenej výhodná, pretože vzhľadom k dlhej dobe od očkovania do odlievania je nutné vysoké dávkovanie u LLG 0,2 – 0,4 % u LGG 0,5 – 1,2 % hmot. kovu a viac. Táto metóda sa často používa pri prelievaní z transportných do odlievacích panvy.

Očkovanie do prúdu kovu (obr. 5.60) – používa sa najmä pri odlievaní pomocou automatických odlievacích zariadení. Očkovačlo s malou zrnitosťou okolo 1 mm je kontinuálne po celú dobu odlievania vzduchom fúkané pomocou rúrky do prúdu kovu, ktorý vyteká z panve do formy alebo do medzipanve. Časový režim očkovania a množstvo očkovačla sa reguluje dávkovačom. Ovládanie dávkovača je obyčajne prepojené s odlievacím zariadením. Očkovanie do prúdu kovu sa používa najmä u LLG, dávkovanie je 0,1 – 0,2 % FeSi hmot. kovu.

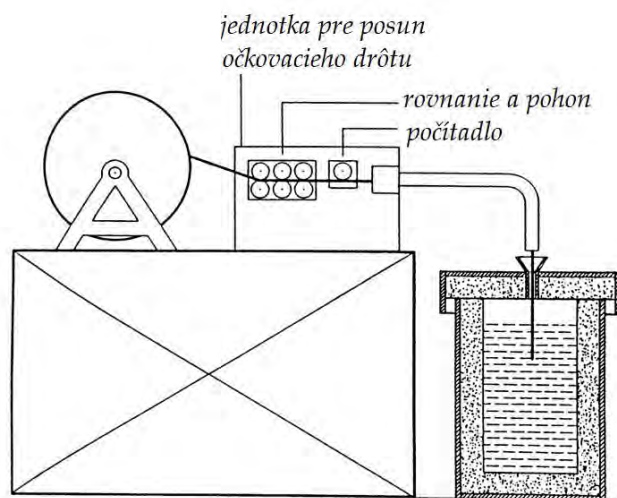


Obr. 5.60 Očkovanie do prúdu kovu

Očkovanie plneným profilom – jemné drvené očkovadlo je obsiahnuté v dutom tenkostennom oceľovom profile s priemerom zvyčajne 9 až 13 mm (**obr. 5.61**), ktorý sa pri očkovaní vtláča do taveniny. Rýchlosť posunu sa reguluje podľa teploty kovu tak, aby sa oceľový plášť roztavil a očkovanie tak prebieha v spodnej časti panve. Príliš rýchly posun, kedy neroztavený profil naráža do výmurovky dna spôsobuje poškodenie výmurovky a naopak pri pomalom posuve dochádza len k očkovaniu kovu v blízkosti hladiny. Plnený profil sa dodáva navinutý na bubnoch a súčasťou očkovacieho zariadenia musí byť podávač s počítačom meraním dávky – **obr. 5.62**.



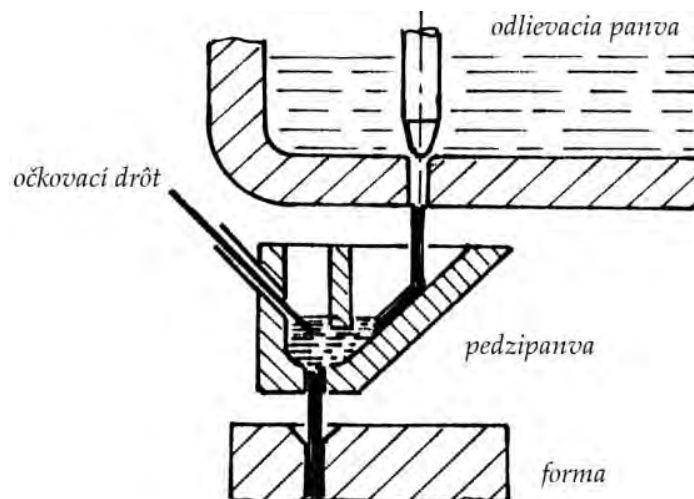
Obr. 5.61 Plnený profil



Obr. 5.62 Očkovanie plneným profilom do panve

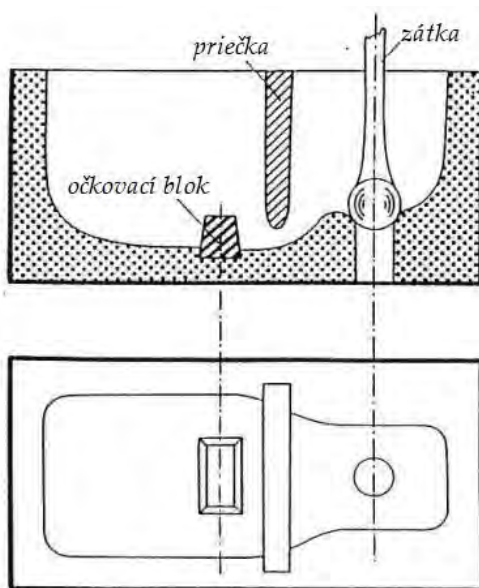
Obsah očkovadla sa udáva v gramoch v jednom dĺžkovom metri. Dávkovanie sa potom určuje ako dĺžka profilu na určité množstvo kovu. Výhodou metódy je jednoduché a presné dávkovanie a vysoké využitie očkovadla. Nevýhodou je vyššia cena plneného profilu v porovnaní s voľným očkovadlom. Dávkovanie pri očkovaní LLG v liacej panve je 0,1 – 0,2 % a u LGG 0,2 – 0,4 % hmot. kovu.

Očkovanie týmto spôsobom je možné vykonávať aj v medzipanve – **obr. 5.63**.

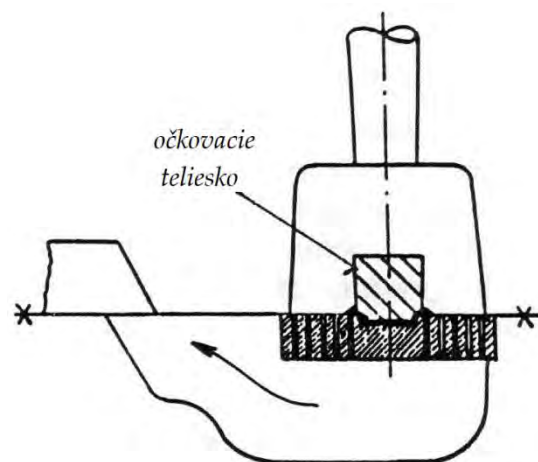


Obr. 5.63 Očkovanie plneným profilom v medzipanve

Očkovanie očkovacími telieskami – očkovadlo na báze FeSi má tvar teliesok, ktoré sa umiestňujú na dno vtokovej jamky (**obr. 5.64**), pod vtokový kôl, alebo do filtra (**obr. 65**). Veľkosť telieska sa volí podľa množstva kovu vo forme (hmotnosť odliatku). Dávkovanie je 0,05 – 0,1 % hmot. kovu.



Obr. 5.64 Očkovanie vo vtokovej jamke



Obr. 5.65 Očkovanie vo filtri

Očkovanie vo forme – metóda In-mold – očkovadlo sa dávkuje do špeciálnej komôrky, predformovanej vo vtokovej sústave. Kov, ktorý preteká komôrkou pri liatí očkovalo postupne rozpúšťa a priebežne očkuje. Tento spôsob očkovania vyžaduje odskúšanie pre každý druh formy. Je nutné dodržiavať konštantné podmienky liatia – zloženie kovu, odlievaciu teplotu a zabezpečiť spoľahlivosť dávkovanie očkovadla. Metóda je vhodná pre hromadnú výrobu (automatické formovacie linky), kde je tiež možné využiť robotov na dávkovanie a ukladanie očkovadla do formy.

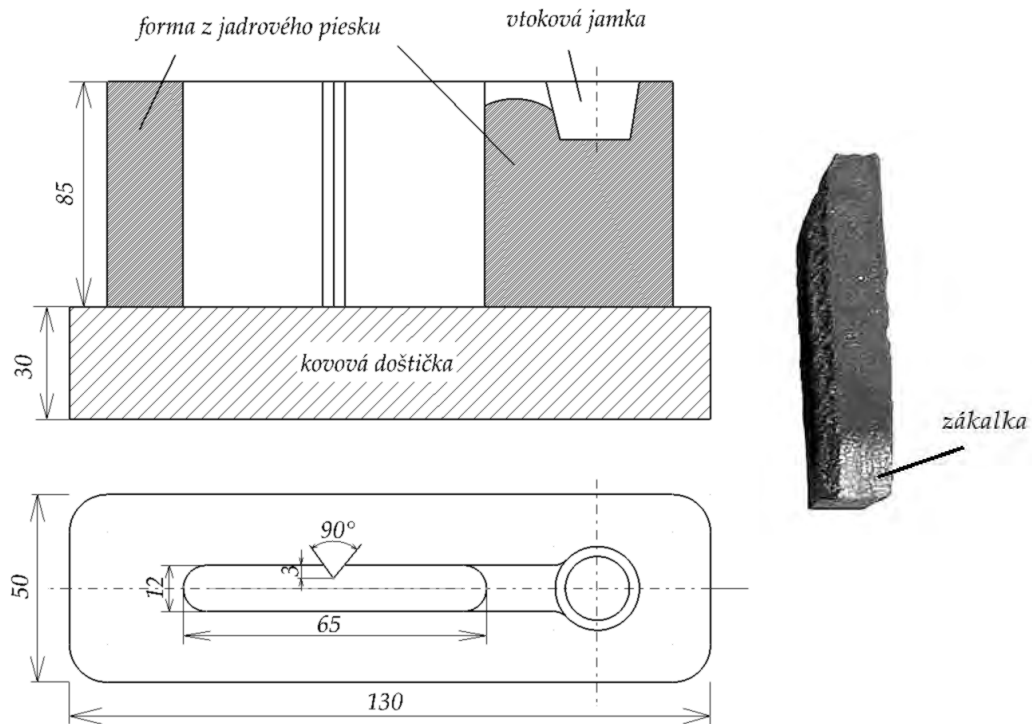
5.2.5 Kontrola očkovacieho účinku

Očkovacia účinok je možné kontrolovať:

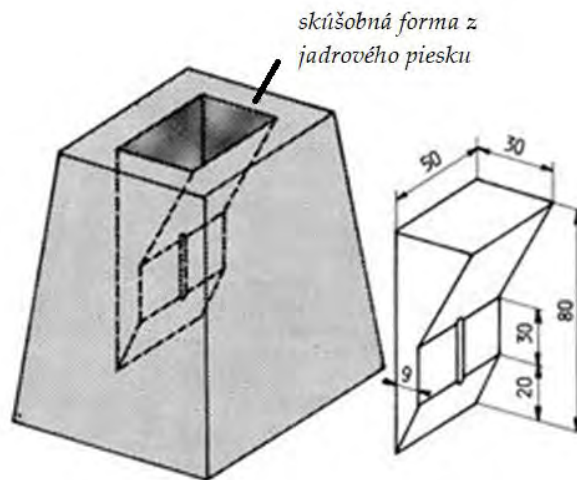
- hĺbkou zákalky na zákalkových skúškach,
- pomocou kriviek ochladzovania,
- podľa počtu eutektických zŕn (podľa disperzity grafitu)

Pre prevádzkové posúdenie je najvhodnejšie hodnotenie zákaliel na zákalkových skúškach. Skúška je veľmi rýchla a nenáročná.

Princíp zákalkovej skúšky spočíva v odliatí vzorky kovu do skúšobnej formy, prelomení stuhnutej vzorky a zmeraní hĺbky zákalky (metastabilné štruktúry bez vylúčeného grafitu). Používajú sa buď skúšky konštantného prierezu s intenzívnym odvodom tepla v jednom smere pomocou kovovej chladiacej dosky – napr. Skúška ISO (**obr. 66**) alebo skúšky s premenlivým prierezom – klinom (a teda premenlivou rýchlosťou chladnutia) – tzv. klinová skúška (**obr. 67**).



Obr. 5.66 Zákalková skúška ISO



Obr. 5.67 Klinová skúška

5.2.6 Chyby odliatkov spojené s očkovaním

Nesprávnym použitím očkovadiel vznikajú chyby v odliatkoch:

- **plynové dutiny, bodliny:** očkovadlo nevhodného zloženia, vlhkosť, dusík v očkovadle
- **dutinky z nerozpusteného očkovadla:** príliš veľká zrornosť očkovadla, nízka teplota kovu, nevhodná technika očkovania

- **troskové vmestky:** preočkovanie, nízka teplota kovu, nevhodný spôsob očkovania
- **flotácia grafitu:** nízka teplota kovu, preočkovanie
- **stiahnutiny a riediny:** nevhodný druh očkovačla, preočkovanie

Druh, zloženie a množstvo očkovačla je nutné prispôbiť konkrétnemu spôsobu očkovania, sortimentu odliatkov, teplote odlievania a druhu odlievanej liatiny.

5.3 Metalurgia výroby LGG (modifikovanie)

5.3.1 Požiadavky na východiskovú taveninu na výrobu LGG

Pri výrobe akostnej liatiny s guľôčkovým grafitom sa kladú na východiskovú taveninu pred jej modifikačným spracovaním vysoké nároky z hľadiska dosiahnutia:

- dostatočne vysokej teploty taveniny,
- požiadaviek na chemické zloženie.

Základné požiadavky na východiskovú taveninu:

- teplota na žliabku pece má dosahovať hodnoty medzi 1450 – 1520 °C, v závislosti od špecifických teplotných strát a použitého spôsobu modifikačného spracovania,
- vysoký obsah uhlíka ($C = 3,4$ až $4,00$ %),
- uhlíkový ekvivalent $CE = 4,3 - 4,5$,
- optimálny obsah Si závislý od vyrábanej akosti a od výrobného postupu ($Si = 1,7$ až $2,5$ %),
- optimálny obsah Mn závislý od vyrábanej akosti ($Mn = 0,1$ až $0,9$ %),
- veľmi nízky obsah P ($0,002$ až $0,08$ %) a S (max. $0,02$ %),
- nízky obsah karbidotvorných prvkov (Cr, V, Mo, Ti, Cu, Sn),
- nízky obsah antiglobulizačných prvkov (Pb, Sb, Bi, As, Te, Se, Ti) tak samostatne (už od $0,002$ %), ako aj ich sumárny obsah.

5.3.2 Modifikácia LGG

Modifikácia LGG sa vykonáva horčíkom alebo zliatinami, ktoré obsahujú horčík.

Základné vlastnosti horčika sú:

- merná hmotnosť: 1740 kg.m^{-3} – je ľahký, má snahu vyplávať na hladinu,
- teplota tavenia: $651 \text{ }^{\circ}\text{C}$,
- teplota vyparovania: $1107 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – preto sa horčík pridaný do taveniny s teplotou $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ prudko vyparuje, splyňuje a tlak jeho nasýtených pár (6 – 10 atmosfér, t. j. 0,6 – 1 MPa) spôsobuje výbuchy a vystrekovanie tekutého kovu,
- horčík má veľmi silnú afinitu ku kyslíku a k síre,
- podporuje vznik zákalky (nutnosť očkovania) – čím vyšší obsah Mg, tým väčší sklon k zákalke

Z dôvodu búrlivej reakcie horčika sa zvyčajne nemodifikuje čistým Mg, ale predzliatinami FeSiMg, alebo výnimočne predzliatinami NiMg. Modifikácia kovovým horčíkom sa vykonávajú len pri tých metódach, kedy je možné obmedziť alebo regulovať búrlivosť modifikačnej reakcie – napr. v autokláve alebo v konvertore +GF+.

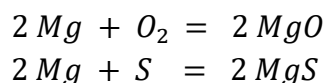
Predzliatiny FeSiMg obsahujú asi 45 % Si a 3 – 15 % Mg. Čím vyšší je obsah Mg, tým búrlivejšia je reakcia. Obvykle sa používa zliatina s 5 – 8 % Mg. Tieto predzliatiny sú ľahšie, než je modifikovaný kov, preto sa musí v modifikačnej panve zabezpečiť proti vyplávaniu na hladinu. Zliatiny s niklom sú ťažšie ako liatina a preto sa samé ponoria na dno. Niektoré modifikačné predzliatiny obsahujú aj kovy vzácnych zemín (hlavne céry). Ich účelom je podporiť modifikačný účinok horčika a kompenzovať vplyvu škodlivých prvkov.

Modifikácia prebieha tak, že pary horčika prebublávajú od dna taveninou. Pritom Mg reaguje so sírou a kyslíkom rozpusteným v liatine a tvoria chemické zlúčeniny, často tiež spolu s kremíkom. Tieto vmestky sa nazývajú "*sekundárna troska*". Časť horčíkových pár unikne z taveniny a na hladine zhorí. Len tá časť, ktorá sa pri ceste bublín Mg k hladine rozpustí v kove vedie k vzniku guľôčkového grafitu. Tento obsah horčika sa nazýva "*zvýškový horčík*" – Mg_{zv} . Obsah Mg_{zv} je obvyčajne väčší ako 0,02 %, nemá byť však zbytočne vysoký, pretože vzniká viac inklúzií a liatina má väčší sklon k zákalke. U tenkostenných odliatkov stačí obsah Mg len mierne nad uvedenou hranicou, u hrubostenných odliatkov musí byť vyšší, okolo 0,045 – 0,06 % Mg_{zv} .

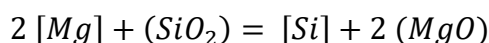
Dávkovanie modifikátora sa robí podľa požadovaného obsahu Mg_{zv} , podľa množstva síry vo východzej liatine a podľa predpokladaného využitia Mg. Využitie

závisí hlavne na modifikačnej metóde a na teplote kovu – čím vyššia teplota liatiny, tým menšie využitie horčíka.

Vzhľadom k tomu, že horčík má voči kyslíku a síre vysokú afinitu, reaguje časť horčíka s kyslíkom a sírou podľa reakcii:

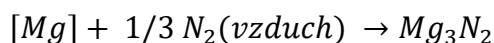
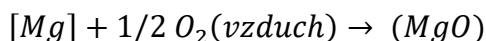


V tavenine modifikovanej liatiny má tiež význam reakcia:



z ktorej vyplýva, že eventuálne existujúce zárodky SiO_2 (v liatine) sú rušené a tým klesá obsah efektívneho horčíka v tavenine a teda sa znižuje aj čas doznievania modifikácie (doznievací efekt modifikácie). Vznik SiO_2 je možný aj z kyslej výmurovky pece, resp. odlievacej panve.

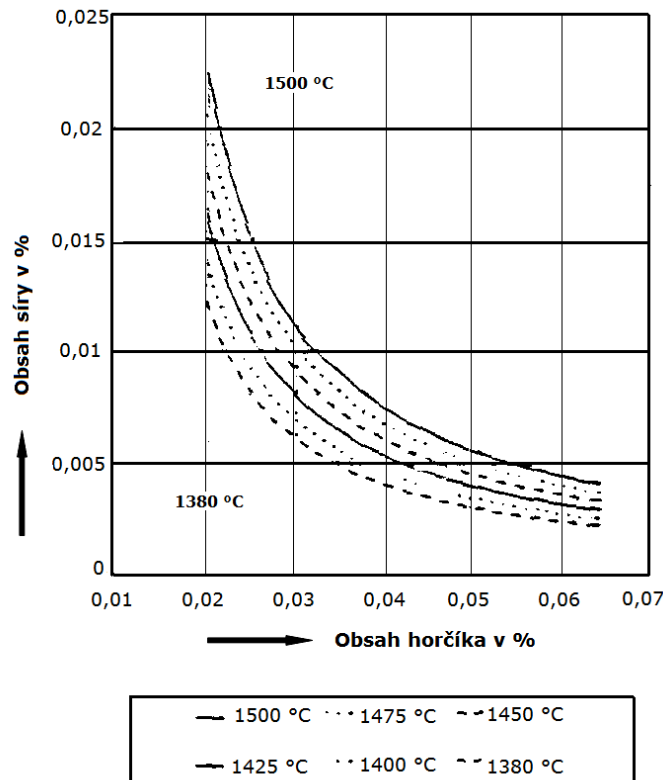
Treba zohľadniť aj reakciu horčíka s atmosférickým kyslíkom a dusíkom na modifikačné využitie horčíka, v zmysle reakcií:



Určitá časť pridaného horčíka sa spotrebuje na odsírenie:

$$\% \text{Mg}_{(\text{odsír})} = 0,76 \cdot \% \text{S}$$

Odsírenie horčíkom charakterizuje **obr. 5.68**, z neho vyplýva, že čím je v liatine vyšší obsah horčíka, tým viac sa znižuje obsah síry v liatine. Teda využitie horčíka na modifikáciu sa so zvyšovaním obsahu síry v liatine výrazne znižuje.



Obr. 5.68 Rovnovážny stav S – Mg

Po modifikácii je obsah síry v tavenine znižovaný až na 0,015 % S. Až pod touto hodnotou obsahu síry a pri ďalších vhodných podmienkach je možná tvorba guľôčkového grafitu. Pokiaľ sa nepodari pripraviť taveninu s primerane nízkym obsahom síry, musí sa počítať s tým, že pri modifikácii dôjde k zvýšenej spotrebe horčíka v dôsledku jeho prednostnej väzby na síru (na odstránenie 1 % S sa spotrebuje 0,75 % Mg). Ak taviaca pec neumožňuje natavenie kovu s nízkym obsahom S (kuplová pec), vykonáva sa pred modifikáciou odsírenie kovu.

Množstvo modifikátora sa vypočíta podľa vzťahu:

$$m_{mod} = \frac{0,76 \cdot \% S + Mg_{zvyš}}{\% \eta_{Mg} \cdot \% Mg_{predzl}} \cdot 100 \quad [hmot. \%]$$

kde: m_{mod} – množstvo Mg v modifikátore [%]

$Mg_{zvyš}$ – zvyškový obsah Mg v liatine [%]

Mg_{predzl} – obsah Mg v predzliatine [%]

η_{Mg} – využitie Mg [%]

S – obsah S v liatine [%]

Modifikáciou predzliatiny FeSiMg sa do liatiny vnáša aj veľké množstvo kremíka. O tento kremík (a tiež kremík donesený očkovadlom) je nutné znížiť obsah kremíka vo vsádzke. To často vedie k obmedzeniu množstva vratného materiálu vo vsádzke.

Pretože horčík potláča tvorbu (znižuje grafitizačnú schopnosť) grafitu, je nutné LGG dobre očkovať. Očkovanie sa vykonáva súčasne s modifikáciou alebo aj po modifikácii (niekedy aj dvojstupňové – prvýkrát pri modifikácii, druhýkrát počas liatia). Ak sa očkuje predzliatinou FeSi, dávkovanie je vyššie ako u LLG – v rozmedzí 0,5 – 1 % hmot. kovu. Pre očkovanie LGG platia všetky pravidlá uvedené v kap. 5.2.

Po modifikovaní liatiny dochádza k vyparovaniu a ďalším stratám horčíka. Jeho obsah sa postupne znižuje a modifikačný účinok preto slabne. Tento dej sa nazýva "doznievanie" modifikácie. Liatinu je preto nutné odliať v čase, keď je modifikačný účinok ešte dostatočne silný – do 15 až 20 min (za vhodných podmienok až do 30 min.). Ak by sa liatina odlievala po dlhšej dobe, tvar grafitu by bol nedokonale zrnitý – liatina by sa menila na vermikulárnu liatinu.

5.3.3 Metódy modifikácie

Na spôsob pridávania modifikátora do roztavenej liatiny je patentovaných vyše 200 spôsobov. V prevádzkových podmienkach sa využíva okolo 40 spôsobov výroby LGG. Tieto metódy modifikácie môžeme rozdeliť do niekoľkých skupín:

- polievacie,
- ponorovacie,
- konvertorové,
- prietočné,
- plnenými profilmi.

Pri polievacích metódach je modifikačný prostriedok umiestnený na dne špeciálnej modifikačnej panvy (obyčajne v osobitnej modifikačnej komôrke) a do tejto panvy sa naleje kov určený k modifikácii. Po ukončení reakcie sa modifikovaná liatina preleje do transportnej alebo liacej panvy. Typickými polievacími metódami sú metódy Sandwich, Tundish a ich modifikácie, prípadne modifikácia v konvertore. Pri modifikácii sa obyčajne pracuje s atmosférickým tlakom. Tieto metódy patri k technicky jednoduchším.

Ponorovacie metódy spočívajú v ponorení modifikačného prostriedku do taveniny

v špeciálnej panve pomocou ponorného zvonu, alebo v jeho dopravení do taveniny iným spôsobom. Často sa pracuje za zvýšeného tlaku okolitej atmosféry, ktorá zníži búrlivosť reakcie a umožňuje používať prostriedky s vyššou koncentráciou horčíka. Do tejto skupiny sa radia predovšetkým modifikácie v autokláve, v tlakovej panve, prípadne modifikácia drôtom plneným profilom. Tieto metódy sú obvykle investične náročnejšie – najmä zariadenia autoklávu.

Prevádzkové podmienky modifikácie dokumentuje **tab. 5.16**.

Tab. 5.16 Prevádzkové podmienky modifikácie

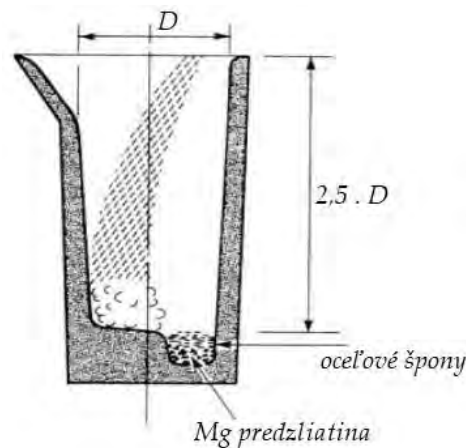
Metóda	Polievacia	Ponorovacia	Konvertor	In-Mold	Plnený profil
Mg predzliatina % Mg	FeSiMg 3 – 10	čistý Mg FeSiMg 5 – 35	čistý Mg	FeSiMg 5 – 10	čistý Mg + ďalšie prvky
Využitie Mg [%]	35 – 60	45 – 60	45 – 60	70 – 80	35 – 70
Obmedzenie % S pred modifikáciou	0,04	0,08	0,15	0,015	žiadne
Nevýhody	dávkovanie, presný obsah Mg	dávkovanie, presný obsah Mg, ponorovací zvon	predpis spracovacieho postupu, vysoké náklady na zariadenie	nebezpečie pri dávkovaní, presný obsah Mg	náklady Mg v plnom profile

5.3.3.1 Metóda Sandwich

Modifikácia sa robí v otvorenej panve, v ktorej je na dne komôrka (priehlbina) oddelená keramickou priečkou – **obr. 5.69**. Modifikácia sa väčšinou vykonáva jednostupňovo a to tak, že na dno komôrky sa uloží dávka predzliatiny Mg, na ňu vrstva očkovačla FeSi a prekryje sa oceľovým plechom alebo oceľovými šponami. Táto vrstva ocele bráni vyplávaniu zliatiny horčíka a očkovačla (obe sú ľahšie ako liatina) na hladinu a oddiaľuje sa začiatok modifikačnej reakcie. Oceľový kryt má tvoriť pokiaľ možno tesný kryt. Používajú sa predzliatiny FeSiMg s obsahom 5 – 6 % Mg. Množstvo predzliatiny je zvyčajne 1,2 – 2,0 %. Hmotnosť krycej oceľovej vrstvy býva okolo 1 % hmotnosti spracovávanej liatiny a jej hrúbka nemá byť menšia ako než 2 mm (v závislosti na objeme panve).

Modifikácia prebieha tak, že naliaty kov musí najprv pretaviť oceľový plech a tak sa oddiali okamih naštartovania reakcie s horčíkom. Počas tejto doby stačí panvu zaplniť a metalostatický tlak liatiny zníži búrlivosť reakcie. Je výhodné, aby

metalostatický tlak bol čo najväčší, preto sa často používajú špeciálne štíhle a vysoké panvy. Kov sa nalieva mimo komôrku s predzliatinou.



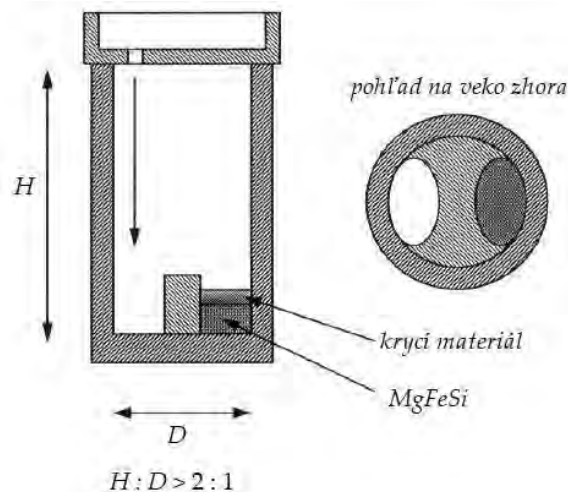
Obr. 5.69 Panva pre metódu Sandwich

Modifikačná reakcia je dosť búrlivá, najmä pri vyšších teplotách liatiny a dochádza k rozstrekovaniu kovu. Pri modifikácii dochádza k strate teploty okolo 30 – 50 K (u veľkých panvy menej, u malých panvy viac). Využitie horčíka sa pohybuje okolo 40 – 50 %. Dochádza tiež k stratám obsahu uhlíka asi 0,05 – 0,1 % C.

Ak sa v zlievarni LGG vyrába len výnimočne, je možné modifikáciu podobným spôsobom vykonávať aj v obyčajnej panve, v ktorej sa všetky komponenty umiestnia na dno do rohu panve a prekryjú oceľovými šponami. Je však nutné počítať s nižším využitím Mg a s väčším kolísaním obsahu Mg_{zv} .

5.3.3.2 Metóda Tundish Cover

Panva Tundish Cover je modifikáciou a zdokonalením metódy Sandwich. Panva je vybavená vekom s nalievacím otvorom. Na veku je tzv. liací bazén (jamka) tak veľký, aby pri nalievaní bolo možné udržať v tomto bazéne hladinu kovu. Veko je odklápacie alebo prenosné so žeriavom. Pri modifikácii musí byť pevne zabezpečené k panve, aby tlakom plynov nedošlo k jeho odklopeniu. Predzliatiny sa ukladajú do komôrky na dne alebo je tam vytvorená prepážka. Otvor vo veku je umiestnený tak, aby dopad kovu bol mimo túto komôrku (prepážku) – obr. 5.70.

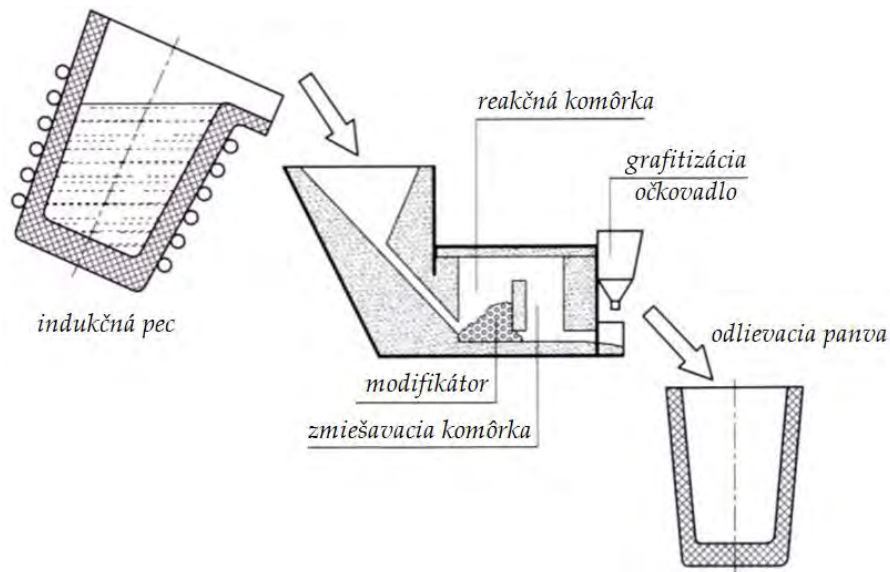


Obr. 5.70 Panva pre metódu Tundish Cover

Pre modifikáciu sa používajú predzliatiny FeSiMg5 – 8. Využitie horčička je okolo 60 – 70 %. Nižšie sú teplotné straty, straty rozstrekom kovu a množstva plyných exhalátov. Metóda Tundish je najpoužívanejšou polievacou metódou s minimálnymi investičnými nárokmi.

5.3.3.3 Metóda Flotret

Princíp metódy je založený na prietoku kovu uzavretou nálevkou cez reakčnú komôrku s modifikátorom **obr. 5.71**. Zariadenie sa skladá z dvoch častí – nálevky a reakčnej komôrky s výtokovým žlabom. Výmurovka je zo šamotových tvárnic. Reakčná komôrka má odkladacie veko, ktoré je po nadávkovaní modifikátora a časti očkovačla potrebné zaťažiť. Po spracovaní každej dávky (panvy) kovu je nálevka vyčistená a do reakčnej komôrky je nadávkovaný nový modifikátor. Pri tejto metóde môžu byť využívané modifikátory s obsahom Mg do 11 %. Výroba touto metódou umožňuje dobrú reprodukovateľnosť procesu bez významného vývinu pár do pracovného prostredia. Výťažnosť Mg viac ako 50 %.

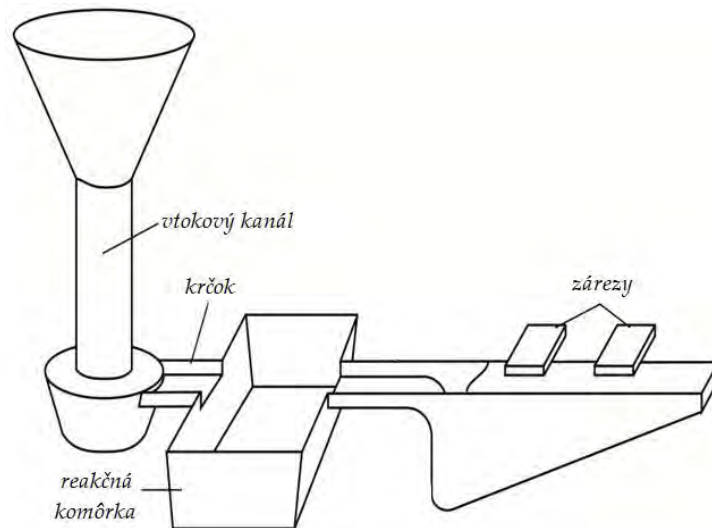


Obr. 5.71 Modifikácia metódou Flotret

5.3.3.4 Metóda In-mold

Táto metóda premiestňuje spracovanie taveniny predzliatinou FeSiMg priamo do vtokovej sústavy v tzv. modifikačnej komôrke v zlievarenskej forme (**obr. 5.72**), čím sa rieši problém doznievania modifikačného a očkujúceho účinku s časom.

Do komôrky sa vsype presne odmeraná dávka predzliatiny FeSiMg s obsahom 3 – 5 % Mg. Neočkuje sa. K modifikácii dôjde v priebehu odlievania. Trosku, ktorá pri modifikácii vzniká, je nutné zachytávať v časti vtokovej sústavy, ktorá sa nachádza za komôrkou (pomocou filtrov). Aby množstvo trosky bolo malé, je bezpodmienečne nutné odlievať liatiny s východiskovým obsahom do 0,01 % S. Využitie horčička je 60 – 80%. Konštrukcia komôrky musí zabezpečiť postupnú reakciu po celú dobu liatia. Nevýhodou metódy In-mold je zníženie využitia tekutého kovu a nižšia využiteľnosť plochy a objemu formy.

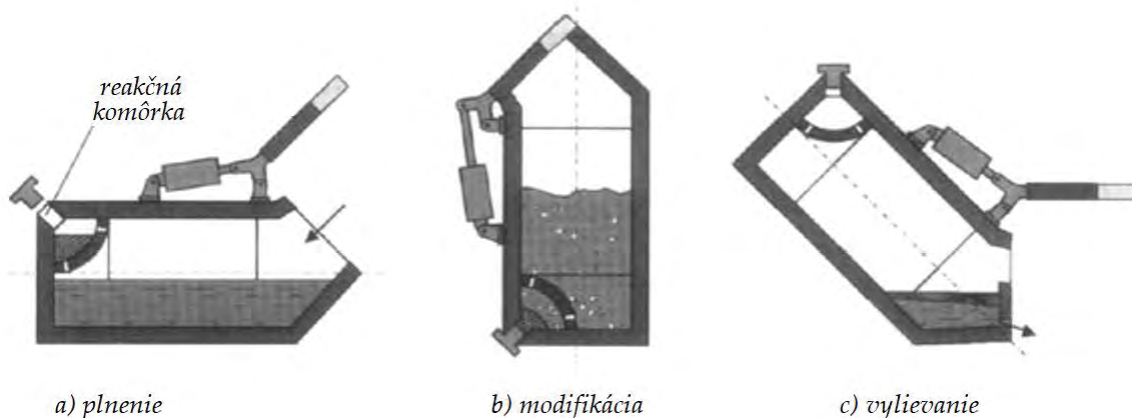


Obr. 5.72 Vtoková sústava pre metódu In-mold

Metóda In-mold sa používa v zlievarňach s hromadnou výrobou, vysokým stupňom automatizácie a kontroly výroby. Tieto podmienky splňajú zlievarne odlievajúce odliatky pre automobilový priemysel.

5.3.3.5 Modifikácia v konvertore +GF+

Modifikácia sa uskutočňuje v nádobe konvertora, ktorá je sklopná podľa priečnej osi. Nádoba je na hornej strane vybavená nalievacím otvorom a na bočnej strane dna je špeciálne modifikačná komôrka. Komôrka je z grafitu, v ktorej je niekoľko otvorov spájajúcich komôrku s hlavnou časťou nádoby. Veľkosť otvorov, ich počet a umiestnenie je pre priebeh modifikácie dôležitá. Do komôrky so samostatným uzatvárateľným otvorom sa vkladá modifikátor – používa sa čistý Mg (obr. 5.73).



Obr. 5.73 Konvertor +GF+

Konvertor je plnený východiskovou liatinou vo vodorovnej polohe, pri ktorej reakčná komôrka nie je v styku s kovom. Po naliatí kovu je konvertor otočený do zvislej polohy, kov sa otvormi dostane do komôrky a začne sa modifikačná reakcia. Potom sa namodifikovaná liatina vyleje do pripravenej panve. Po modifikácii sa veko komôrky otvorí, vyčistí od prípadných zvyškov a vsype sa ďalšia dávka horčíka a otvor sa uzavrie a zaistí. Tým je konvertor pripravený na ďalší cyklus.

Modifikácia prebieha pomerne pokojne vďaka samoregulačnému mechanizmu konštrukcie otvorov v prepážke. Tento mechanizmus je založený na pomere tlaku horčíkových pár v reakčnej komôrke a metalostatického tlaku v otvoroch.

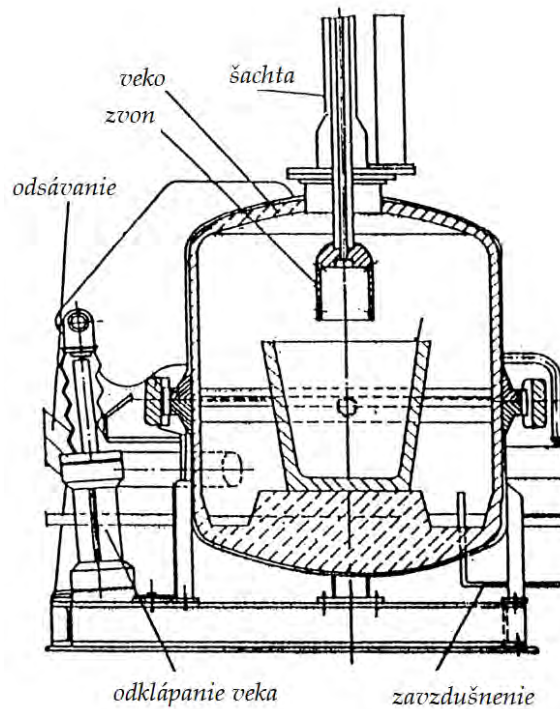
Používanie kovového Mg pre modifikáciu umožňuje spracovávať liatinu s prakticky ľubovoľným obsahom východzej síry – je možné modifikovať liatinu z bežnej kyslej kuplovne. Využitie horčíka je 50 – 70 %.

Veľkosť konvertora je 700 kg až 3 t. Aby sa udržala dostatočná teplota konvertora (bez nutnosti prídavného ohrevu) je nutné dodržať optimálnu frekvenciu modifikačných cyklov, podľa veľkosti asi 3 – 5 cyklov za hodinu. Metóda je preto vhodná len pre zlievarne s veľkou produkciou LGG.

5.3.3.6 Modifikácia v autokláve

Modifikácia prebieha za zvýšeného tlaku. Modifikačná panva s kovom sa umiestni do priestoru autoklávu, ktorý je zabezpečený odklopným vekom, ktorým prechádza ponorovacia tyč zo zvonom. Po uzavretí veka sa zvýši tlak atmosféry v nádobe na 0,4 – 1,0 MPa a zvon s predzliatinou Mg, prípadne aj s očkovadlom sa ponorí ku dnu. V dôsledku vysokého tlaku prebieha reakcia vyparovania horčíka pomalšie ako pri atmosférickom tlaku. Reguláciou tlaku v tlakovej nádobe možno riadiť búrlivosť reakcie.

Pri tejto metóde je možné používať predzliatiny s vyšším obsahom horčíka, obyčajne 15 – 25 % Mg, alebo aj čistý horčík. Využitie Mg sa pohybuje v rozmedzí 60 – 80 %. Výhodou metódy je menšie alebo dokonca žiadne množstvo kremíka, ktoré sa vnáša pri modifikácii. To umožňuje taviť s vysokým kremíkom a teda bez problémov pretavovať aj vratný materiál. Hlavnou nevýhodou sú vysoké investičné aj prevádzkové náklady. Schéma zariadenie je na **obr. 5.74**.

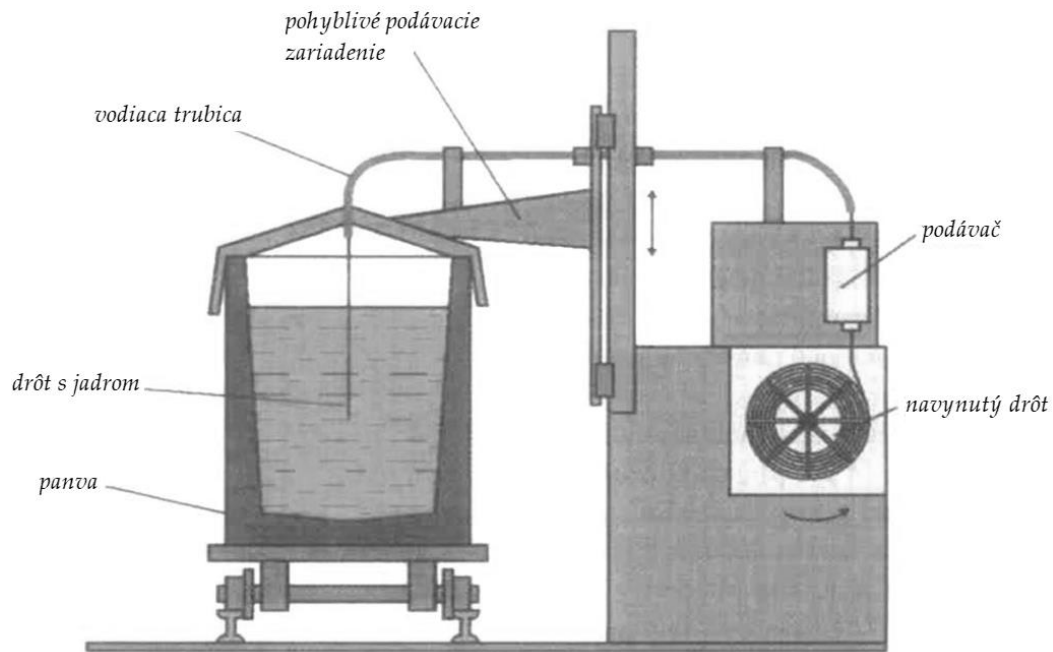


Obr. 5.74 Schéma autoklávu

5.3.3.7 Modifikácia plneným profilom

Modifikácia plneným profilom sa vykonáva rovnakým spôsobom a pomocou rovnakého zariadenia ako očkovanie plneným profilom (**obr. 5.75**). Modifikačný drôt máva priemer $\varnothing 5 - 13$ mm. Chemické zloženie náplne sa líši podľa výrobcu, príp. od požiadavky zlievarne, obyčajne 13 – 25 % Mg, 20 – 40 % Si, 10 – 20 % Ca, 1% KVZ (kovy vzácnych zemín), zvyšok Fe. Množstvo modifikátora sa dávkuje dĺžkou profilu, ktorá sa nastaví na podávacom zariadení. Rýchlosť podávania musí byť taká, aby k reakcii dochádzalo na dne panve.

Výhodou metódy je okrem vysokej čistoty kovu, malého vývinu dymu a malých teplotných strát, najmä veľká operatívnosť a možnosť vykonať domodifikovanie v panve počas odlievania. Nevýhodou je vysoká cena plneného profilu a zariadenia na jeho podávanie.

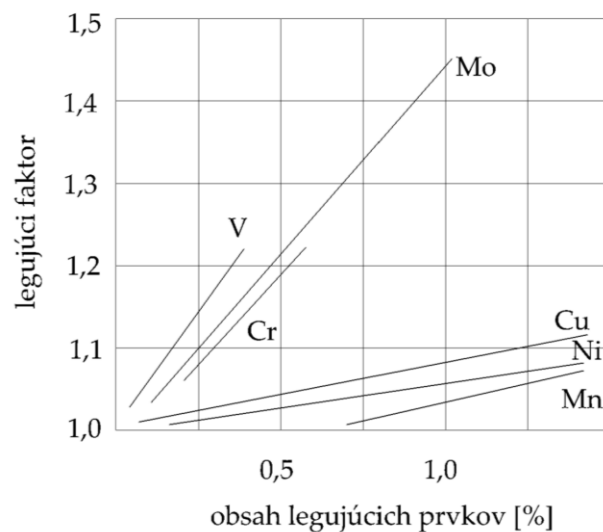


Obr. 5.75 Modifikácia plneným profilom

5.4 Mimopecné legovanie liatin

Mimopecné legovanie tekutého kovu je ekonomicky efektívny postup, ktorý umožňuje malými úpravami chemického zloženia zvýšiť mechanické vlastnosti. Postup je veľmi operatívny a umožňuje vyrábať z jedného druhu liatiny v peci viac druhov s rozdielnymi mechanickými, prípadne aj fyzikálnymi vlastnosťami.

Vplyv legúr na pevnosť liatiny je na obr. 5.76.



Obr. 5.76 Vplyv legujúcich prvkov na pevnosť liatiny

Z diagramu je vidieť výrazný vplyv **vanádu**, **molybdénu** a **chrómu**, ktoré sú zároveň cenovo najnáročnejšie. Najvhodnejšími legúrami sú FeV, FeMo, FeCr v množstvách už 0,1 až 0,3 % hmot. tekutého kovu zvýšia Rm a HB až o 10 – 15 %. Zároveň zvyšujú žiarupevnosť liatin.

Najlepšie využitie (až 98 %) sa pri mikrolegovaní v panve dosiahne prísadou jemne drvených ferozliatin kovu, ktorých príprava je však nákladná.

V panve sa dobre rozpúšťa kovový nikel, meď, antimón, cín, mangán, resp. FeMn. Majú vyššiu hustotu ako liatina, preto ich prepal je minimálny.

Najvhodnejšou legúrou je **meď**, ktorá pôsobí perlitizačne, potláča feritizáciu a zároveň znižuje sklon liatiny k zákalkam. Silne potláča zmenu tvrdosti s hrúbkou stien. Pevnosť liatiny zvyšuje len mierne.

Priaznivý vplyv medi je už pri obsahu 0,5 – 0,7 % Cu, max. prísada do 2 % Cu.

Titán už v množstve 0,04 – 0,08 % účinne eliminuje škodlivý účinok dusíka a síry v liatine. Zároveň pozitívne ovplyvňuje grafitizačnú schopnosť liatiny a zvyšuje jej húževnatosť. Používa sa do obsahu 0,3 %.

Úspešný postup mikrolegovania je **nadusičenie** liatiny, čím sa dosahuje zvýšenie pevnosti a tvrdosti až o 75 %. Na nadusičenie sa používa najmä dikyándiamid ($C_2H_4N_4$). Prebublávanie dusíkom sa neosvedčilo.

Prebublávanie v panve (cez dno, príp. zhora) je rafinačný postup, pri ktorom do trosky vyplávajú nečistoty a primárny grafit (pri $Sc > 4,2$ %) a zníži sa obsah plynov. Zlepšia sa tak mechanické a fyzikálne vlastnosti liatin.

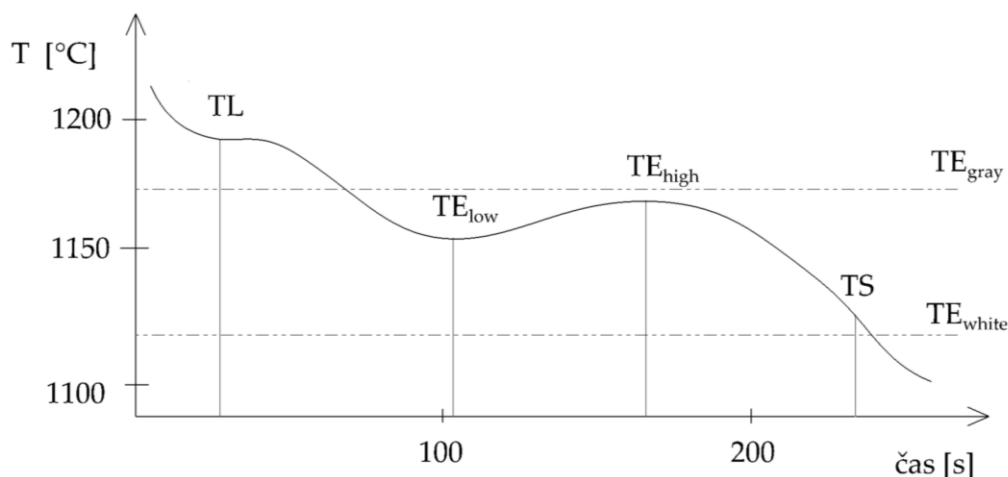
Z ďalších postupov mimopecného legovania je zaujímavé **suspenzné odlievanie** odliatkov, pri ktorom sa do prúdu kovu sypú jemné zrnité kovové materiály.

5.5 Kontrola metalurgického spracovania liatin

Termická analýza je osvedčenou metódou pre rýchle, presné, spoľahlivé a nízko nákladové ovládanie chemického zloženia ale i iných informácií vplývajúcich na charakter tuhnutia taveniny ako:

- účinnosť očkovania
- počet aktívnych guľôčok grafitu
- tvar grafitu
- biele tuhnutie

Je jednou z metód kontroly kvality taveniny z hľadiska obsahu prvkov a tiež z hľadiska očkovacieho a modifikačného účinku. Zakladá sa na zaznamenávaní a analýze krivky ochladzovania (**obr. 5.77**) v priebehu tuhnutia a ochladzovania liatiny, z ktorých sa získavajú informácie o vlastnostiach liatiny. Prínosom tejto technológie je veľmi rýchle určenie kvality taveniny ešte pred odpichom (do 3 – 4 min.).



TL – teplota likvidu ako začiatok tuhnutia [°C]

TE_{low} – minimálna eutektická teplota [°C]

TE_{high} – maximálna eutektická teplota [°C]

TS – teplota solidu [°C]

TE_{gray} – teoretická eutektická teplota pri stabilnom tuhnutí (liatina stuhne ako sivá).

$$TE_{gray} = 1153 + 6,7 * \%Si \text{ [°C]}$$

TE_{white} – teoretická eutektická teplota pri metastabilnom tuhnutí (liatinu stuhne ako biela).

$$TE_{white} = 1147 - 12 * \%Si \text{ [°C]}$$

Obr. 5.77 Krivka ochladzovania podeutektickej liatiny

Štruktúra liatiny a tým aj tvar krivky ochladzovania bude počas kryštalizácie ovplyvňovaný chemickým zložením, množstvom zárodkov a rýchlosťou ochladzovania.

Termická analýza umožňuje určiť **uhlíkový ekvivalent (CE)**, **stupeň eutektickosti (Sc)**, **obsah uhlíka** a **kremíka** vo väčšine druhov liatin. Môže taktiež predpovedať určité mechanické vlastnosti, ako napríklad pevnosť v ťahu (R_m), tvrdosť podľa Brinella (HB), grafitizačný faktor či množstvo eutektického grafitu v odliatkoch z nelegovanej sivej liatiny.

Pri termickej analýze sa snímajú krivky chladnutia vzorky taveniny odliatej do skúšobného téglíka (cca 40 až 50 cm³).

Do skúšobnej vzorky, tzv. téglíka v ktorom je zabudovaný termočlánok sa pridáva telúr, ktorý sa využíva na rozšírenie meracieho rozsahu uhlíkového ekvivalentu a tuhnutie kovu v metastabilnom systéme, čo dopomáha k ľahkému určeniu množstva C a Si. Využíva sa tiež na snímanie kriviek ochladzovania vzorky taveniny.

Použite štandardného termoizolačného téglíka s Te tvoriacim karbid v tomto prípade nie je možné pretože dochádza k reakcii horčíka s nodularizátorom a telúrom pridaným do téglíka. Preto je nutné pridať menšie množstvo síry, ktoré reaguje s Mg a zabráňuje tak nevhodnému vplyvu horčíka na telúr.

Pri výpočte CE, C a Si však treba vziať do úvahy, že obsah síry znižuje teplotu liquidu v téglíku o 5 °C a teplotu solidu o 2,5 °C.

Pre výpočet uhlíkového ekvivalentu vieme uplatniť vzorec, ak sa meraná hodnota zvýši o 5 °C:

$$CE = 14.45 - 0.0089.(TL + 5)$$

Štandardná chyba pri stanovaní uhlíkového ekvivalentu je približne 0,05 CE.

Hlavnou úlohou TA pri hodnotení kvality liatiny s guľôčkovým grafitom je:

- hodnotenie eutektickej grafitizačnej schopnosti liatiny, t.j. schopnosti tvorby grafitických zárodkov
- náchylnosť k bielemu tuhnutiu a tvorbe karbidov
- posúdenie dokonalosti tvaru vylúčeného grafitu
- stavba základnej kovovej hmoty

Vyhodnotenie chemického zloženia liatin sa v praxi používa modernými prístrojmi a realizuje automaticky, obsluha zadáva len korekciu na obsah fosforu.

Spôsob analýzy procesu chladnutia a tuhnutia za pomoci výpočtovej techniky umožňuje ohodnotiť metalurgickú kvalitu natavenej liatiny, získať informácie o liatinách, ich grafitizačnej schopnosti či vzniku zlievarenských chýb. Pri vyhodnocovaní sa využívajú zmeny charakteristických teplôt, zvlášť eutektickej teploty a výskyt a veľkosť podchladenia na tejto teplote.

Znázornenie tvarov kriviek ochladzovania pri termickej analýze je u LGG komplikovanejšie ako pri LLG. Pri vyhodnocovaní grafického záznamu je nutné vychádzať i z priebehu krivky prvej (dT/dt), prípadne druhej derivácie. Pomocou derivovanej krivky je možné presnejšie určiť medzné teploty (T_L , T_S , T_{es} , T_{em}) a zachytiť ich zmeny. Umožňujú analyzovať zmeny rýchlosti ochladzovania uvoľňovanie latentného tepla, ktoré sa dá využiť napr. pre rozlíšenie tvaru grafitu v liatinách.

Eutektická grafitizačná schopnosť (EGS) odpovedá reálne vylúčenému grafitu v pomere k rovnovážnemu množstvu, udáva spoľahlivosť eutektika tuhnúť v stabilnej sústave bez tvorby karbidov. Čím väčšie je EGS, tým vyššie je množstvo vznikajúceho grafitu a tým je väčší rozsah grafitickej expanzie čiže menší sklon k vzniku stiahnutí. Zlepšuje sa obrobitelnosť a znižuje citlivosť ku vzniku zákalky. Táto grafitizačná schopnosť sa hodnotí podľa veľkosti eutektického podchladenia ΔT_M pod rovnovážnu eutektickú teplotu v stabilnej sústave TES.

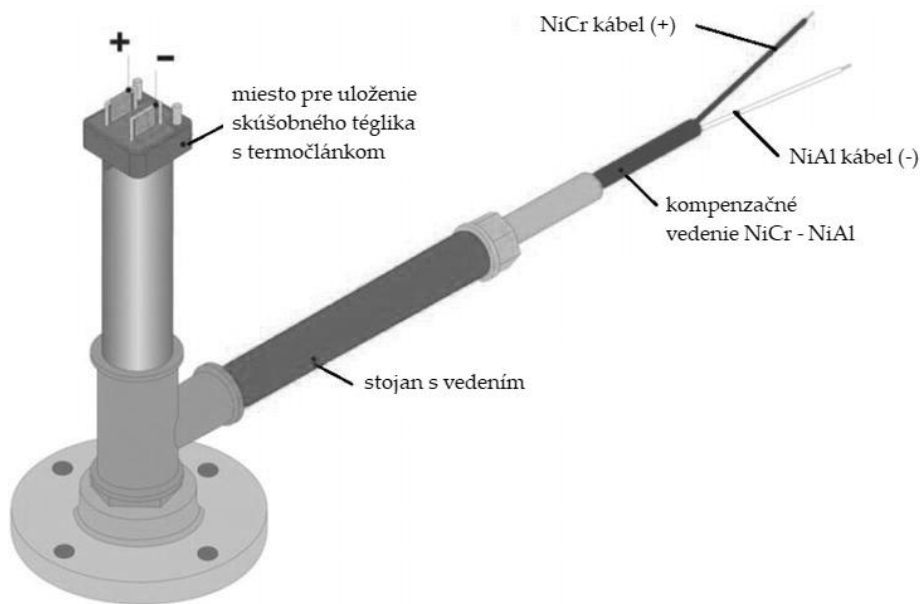
K termickej analýze sú využívané tégly na základe toho čo je predmetom ich skúmania (**obr. 5.78**):

- skúšobné tégly s obsahom telúru, ktoré zabezpečujú biele tuhnutie odliatej taveniny potrebné k stanoveniu množstva uhlíka a kremíka (pre LGG)
- skúšobné tégly bez telúru s rozličným druhom očkovadiel, ktoré zabezpečujú sivé tuhnutie k stanoveniu podchladenia a ku kontrole a simulácii účinku očkovania



Obr. 5.78 Skúšobné tégly s termočlánkom

Skúšobné téglíky sú vyrábané metódou Cronning a ich modul by mal približne odpovedať modulu odliatku. Približná doba tuhnutia taveniny v skúšobnom téglíku je 5 minút. Skúšobný téglík je nasadený na stojane, z ktorého je termoelektrické napätie do záznamového zariadenia (**obr. 5.79**). Následne sa sleduje teplota a zaznamenáva diagram zmien fáz (likvidus, solidus a eutektikum). Kalkulujú sa zmeny fáz, chemické zloženie kovových odliatkov alebo ich kryštalická štruktúra. Je to pokročilá technológia na lokalizáciu diferenciálnej krivky teplotného obratu (zmrašťovanie) alebo exotermickej fázy (karbidy, beta kryštály, fosfid železitý a iné fázy).

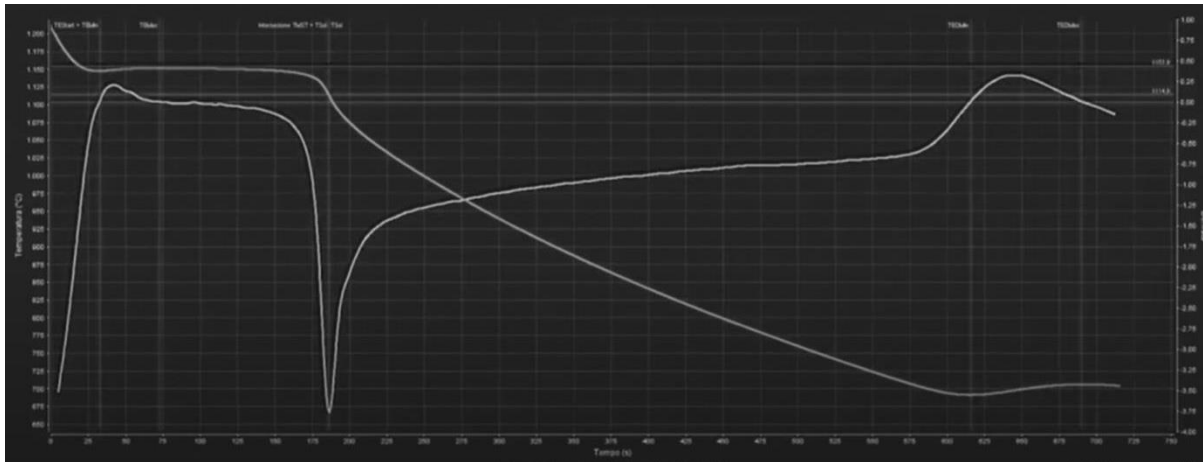


Obr. 5.79 Stojan pre skúšobnú vzorku s izolovaným kompenzačným vedením

Štúdium kriviek ochladzovania slúži najmä k:

- kontrole taveniny ešte pred odliatím = zníženie % zmätkov
- zvyšovanie využitia tekutého kovu
- až 20 nameraných a vypočítaných hodnôt napomáha presne popísať chovanie liatiny
- možnosť overiť si rôzne druhy surovín (očkovadlá, modifikátory, ...)
- navrhuje optimálne množstvo očkovadla, tak aby došlo k jeho maximálnemu efektu v tavenine
- zaznamenáva a akumuluje informácie z prevádzky zlievarne, ktoré sa môžu ďalej vyhodnocovať

Príklad krivky chladnutia a jej derivácia získaná pomocou softvéru TCAST je uvedený na **obr. 5.80**.



Obr. 5.80 Príklad krivky chladnutia a jej derivácia – softvér TCAST

Oblasť eutektoidnej premeny na krivke chladnutia a jej prvej derivácie je využívaná na predpoveď skladby kovovej matrice (pomer perlit – ferit) a tým i mechanických vlastností liatiny. K posúdeniu pevnosti a ťažnosti sa používa uhol, ktorý leží medzi časovou osou a počiatkom eutektoidnej premeny až k reakčnému maximu. S rastúcim uhlom a teda väčším a rýchlejším poklesom derivačných podielov rastie pevnosť (zvyšuje sa podiel perlitu) a znižuje sa ťažnosť.

6. TEPELNÉ SPRACOVANIE ODLIATKOV Z GRAFITICKÝCH LIATIN

Liatinové odliatky nie sú vždy schopné bez tepelného spracovania plniť funkciu, na ktorú boli konštruované. Najčastejšie dôvody sú:

- prítomnosť zvyškových pnutí,
- zhoršená obrobitelnosť,
- nevyhovujúce mechanické vlastnosti,
- dosiahnutie mechanických vlastností, ktoré nie je možné zabezpečiť metalurgickou cestou, resp. by to bolo veľmi nákladné.

Odliatky z LLG sa tepelne spracovávajú v malom merítku. Je to dané tým, že tepelným spracovaním sa nedá meniť tvar a rozloženie grafitu, ale sa dá ovplyvniť len základná kovová hmota.

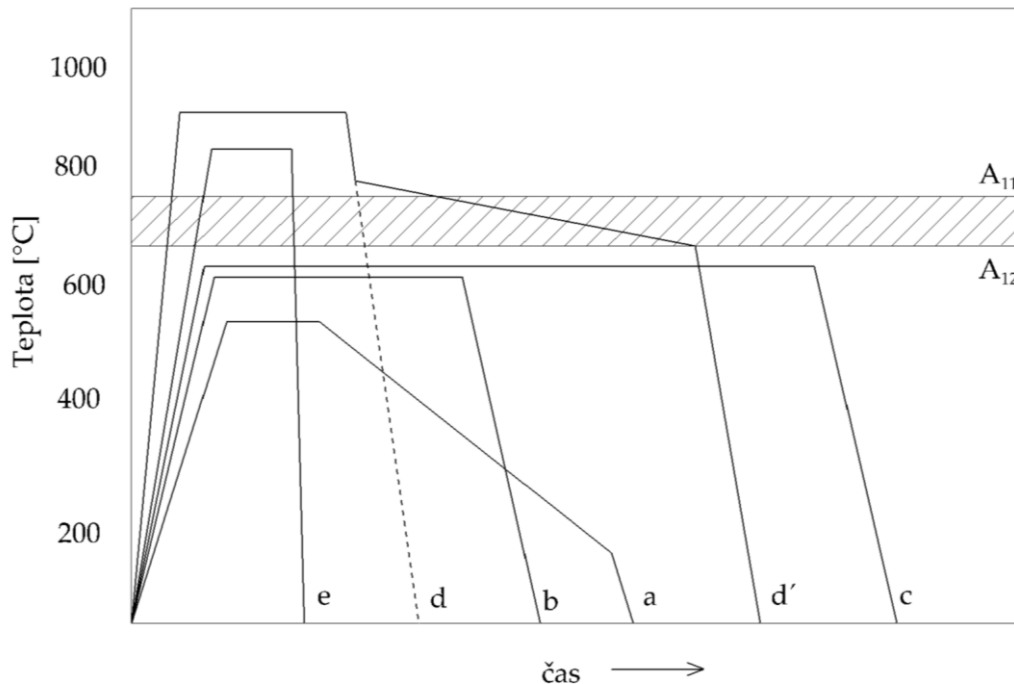
U odliatkov z LGG je možné tepelným spracovaním dosiahnuť význačné vlastnosti, a tým rozšíriť ich využitie.

Základné druhy tepelného spracovania grafitických liatin sú:

- a) žihanie na zníženie zvyškových pnutí
- b) žihanie na zníženie tvrdosti a zlepšenie obrobitelnosti (u LGG súčasne zvýšenie ťažnosti, žihanie na rozpad karbidov, feritizačné žihanie)
- c) perlitizačné (normalizačné) žihanie za účelom zvýšenia pevnosti
- d) zušľachťovanie, t.j. kalenie + popúšťanie za účelom zvýšenia pevnosti, tvrdosti a podľa stupňa popustenia i ťažnosti

6.1 Žihanie na zníženie zvyškových pnutí

Žihanie na zníženie vnútorných napätí sa používa predovšetkým pri tvarovo zložitých odliatkoch zo sivej liatiny s cieľom zabezpečiť tvarovú a rozmerovú stabilitu odliatkov (napr. hláv valcov spaľovacích motorov). Žihanie prebieha pri teplote 550 až 650 °C, počas 1 až 5 hodín (približne 1h na 25 mm hrúbky odliatku), **obr. 6.81a**. Ochladzovanie zo žihacej teploty na teplotu 100 až 150 °C musí byť dostatočne pomalé (20 až 80 °C · h⁻¹), aby nevznikali nové vnútorné napätia v odliatku. Potom nasleduje ochladenie na vzduchu.



Obr. 6.81 Spôsoby žihania grafitických liatin

6.2 Žihanie na zníženie tvrdosti

Žihanie na zníženie tvrdosti a zlepšenie obrobitelnosti sa používa vtedy, ak sa v matici odliatku predovšetkým v miestach rýchleho odvodu tepla vyskytuje ledeburitický cementit, prípadne jemný lamelárny perlit. V prípade výskytu lamelárneho perlitu sa využíva sferoidizačné žihanie, pri teplotách 650 až 700 °C počas 2 až 8 hod., **obr. 6.81b**. Používa sa pri LGG, kde je cieľom zníženie tvrdosti, zvýšenie húževnatosti a ťažnosti. Pri predĺžení času zotrvania na teplote 4 až 12 hod. dochádza ku grafitizácii perlitického cementitu, t. j. k jeho rozpadu na ferit a grafit. Tento postup sa nazýva feritizačné žihanie, **obr. 6.81c**. Získaná feritická tvárna liatina je mäkká s vysokou húževnatosťou, ťažnosťou a nízkou pevnosťou. Pri žíhaní na odstránenie ledeburitického cementitu s cieľom získať priaznivé mechanické vlastnosti sa používa rovnaký postup ako v I. štádiu grafitizácie pri výrobe temperovanej liatiny s čiernym lomom. Ohrev sa realizuje pri teplotách 850 až 950 °C, počas 2 až 8 hod. (čas závisí od množstva ledeburitu v štruktúre). Rýchlosť ochladzovania sa volí v závislosti od požadovaných mechanických vlastností materiálu. Na dosiahnutie perlitickej štruktúry s dobrými mechanickými vlastnosťami je potrebné, aby liatina transformovala podľa metastabilnej sústavy Fe –

C, t. j. ochladzovanie prebieha na vzduchu, **obr. 6.81d**. Ak sa požaduje odliatok mäkký, dobre obrobiteľný, ochladzovanie je veľmi pomalé v oblasti eutektoidnej premeny, kedy sa získa feritická, príp. feriticko–perlitická matrica **obr. 6.81d'**.

V odliatkoch z LGG, kde sa požaduje vysoká húževnatosť a plasticita, je potrebné voliť nízky obsah legúr, ktoré stabilizujú cementit (Mn, Cr). Pri ich vyššom obsahu je dosiahnutie feritickej matrice veľmi obtiažne, prípadne nemožné.

6.3 Perlitizačné (normalizačné) žihanie

Normalizačné žihanie grafitických liatin je v podstate opakom feritizačného žihania. Jeho cieľom je zvýšenie tvrdosti, odolnosti proti opotrebeniu a pevnosti alebo úprava štruktúry pred povrchovým kalením odliatku. Používa sa najčastejšie pri LGG, pri LLG v prípade ak je štruktúra tvorená väčším podielom feritu. Po austenitizácii pri teplote 850 až 900 °C, počas 2 až 8 hod. nasleduje voľné ochladzovanie na vzduchu, **obr. 6.81e**. Získaná štruktúra je perlitická. Pri ochladzovaní predovšetkým veľkých odliatkov na vzduchu vznikajú v ich objeme pomerne veľké vnútorné napätia, preto je potrebné po normalizačnom žihaní zaradiť žihanie na odstránenie vnútorných napätí.

6.4 Zušľachťovanie (kalenie + popúšťanie)

Cieľom kalenia je získanie martenzitickej alebo bainitickej štruktúry matrice. Výsledná tvrdosť liatin po kalení je nižšia ako u ocelí. Na výslednú tvrdosť liatin vplýva prítomnosť grafitu v matrici (jeho tvar, rozloženie a množstvo).

Martenzitické kalenie

Kaliaca teplota je pre všetky grafitické liatiny 50 až 80 °C nad A_{12} . Vzhľadom na nižšie hodnoty tepelnej vodivosti sa volí stupňovitý ohrev. Kalí sa najčastejšie nepretržite do vody, resp. oleja, z hľadiska zníženia rizika deformácie a vzniku trhlín je vhodné termálne kalenie do teplého kúpeľa. Tvrdosť po kalení LLG je približne 51 HRC, LGG až 57 HRC. Po kalení nasleduje popúšťanie pri teplote do 200 °C pre LLG a 550 až 650 °C pre odliatky z LGG.

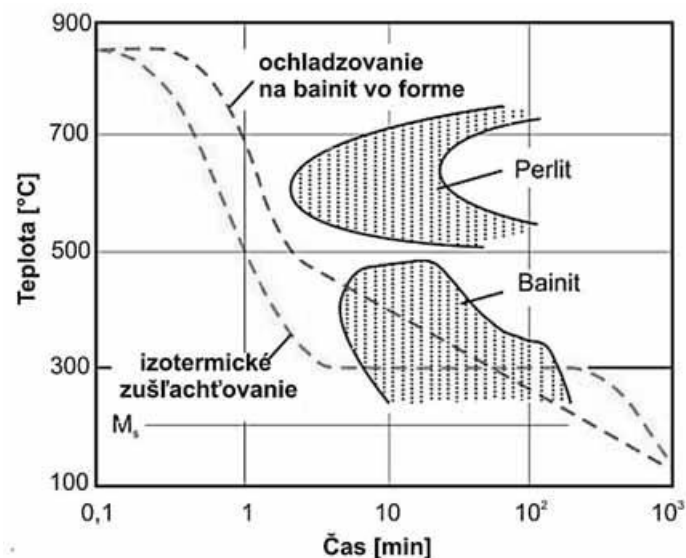
Povrchové kalenie

Povrchové kalenie sa používa na zvýšenie odolnosti povrchu súčiastok proti opotrebeniu. Na povrchové kalenie sú vhodné podeutektické perlitické liatiny s

obsahom feritu do 15 hm. %, s jemným rovnomerne rozloženým grafitom. Ohrev povrchu môže byť indukčný alebo plameňom, kaliacim prostredím môže byť voda, resp. olej. Hrúbka zakalenej vrstvy sa pohybuje od 1 do 5 mm. Dosahovaná tvrdosť po kalení je obvyčajne pre LLG 45 až 55 HRC, pre LGG je 58 HRC. Po kalení nasleduje nízкотеплотné popúšťanie pri teplote 150 až 200 °C.

Izotermické zušľachťovanie

Cieľom izotermického zušľachťovania je zvýšiť pevnosť, tvrdosť a odolnosť proti opotrebovaniu odliatkov. Výhodou izotermického zušľachťovania oproti martenzitickému kaleniu sú malé zvyškové napätia, minimálna deformácia a malá náchylnosť odliatkov na praskanie po tepelnom spracovaní. Tento spôsob tepelného spracovania sa používa najmä pri LGG, čím sa dosahuje priaznivá kombinácia mechanických vlastností odliatkov. Schematické znázornenie izotermického zušľachťovania je na **obr. 6.82**.



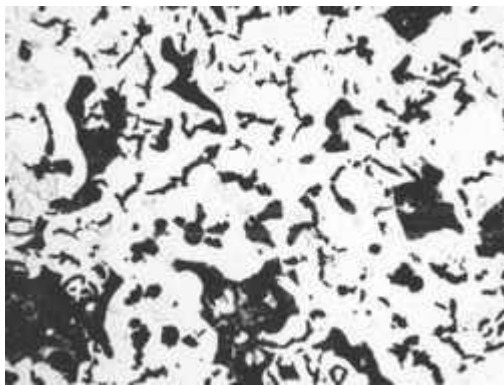
Obr. 6.82 Schematické znázornenie kriviek ochladzovania v ARA diagrame tvárnej liatiny

Odliatky sa austenitizujú pri teplote 50 až 80 °C nad A_{11} , následne sa ochladia na teplotu 230 až 450 °C, keď prebieha bainitická premena počas 0,5 až 3 hodín, najčastejšie v solných kúpeľoch. Nakoniec nasleduje voľné ochladzovanie na vzduchu. Odliatky sa už ďalej nepopúšťajú. Uvedeným spôsobom tepelného spracovania sa získa ausferitová liatina (ADI – austempered ductile iron).

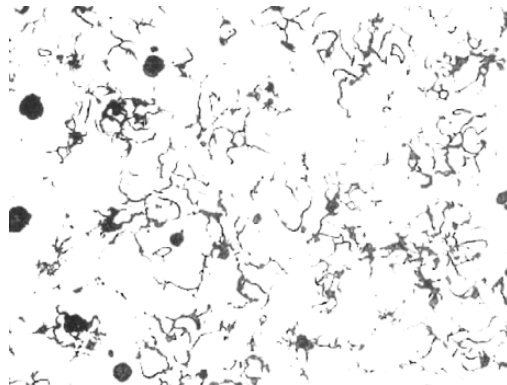
7. VPLYV KVALITY VSÁDZKY NA VLASTNOSTI LIATIN

Na tekutý kov pred jeho modifikačným pracovaním a očkovaním sa kladú určité požiadavky, z ktorých vyplývajú aj nároky na vsádzkové suroviny.

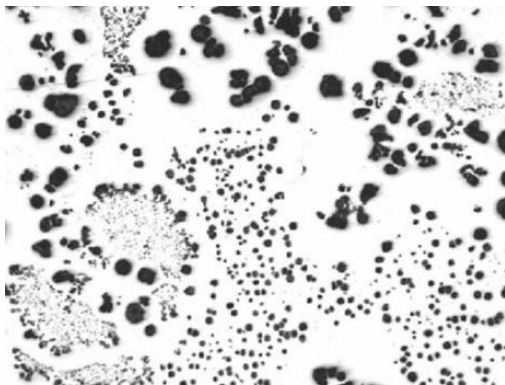
Výsledné vlastnosti LGG veľmi úzko súvisia aj s kvalitou vsádzky. Najvýznamnejšia je „čistota“ vsádzkových surovín, t.j. nízky obsah antiglobulizačných prvkov, ktoré deformujú guľôčkový tvar grafitu a spôsobujú vznik nežiadúcich tvarov (**obr. 7.83**).



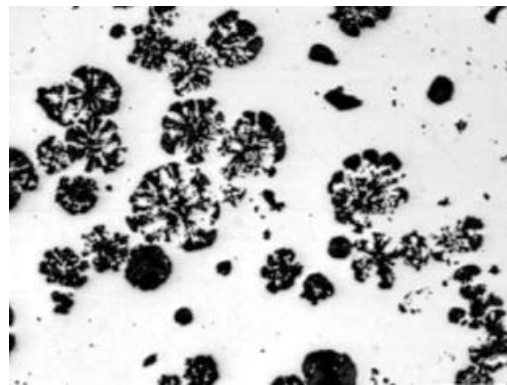
a) červíkovitý (vermikulárny)



b) lupienkový medzibunkový



c) chunky grafit



d) explodovaný grafit

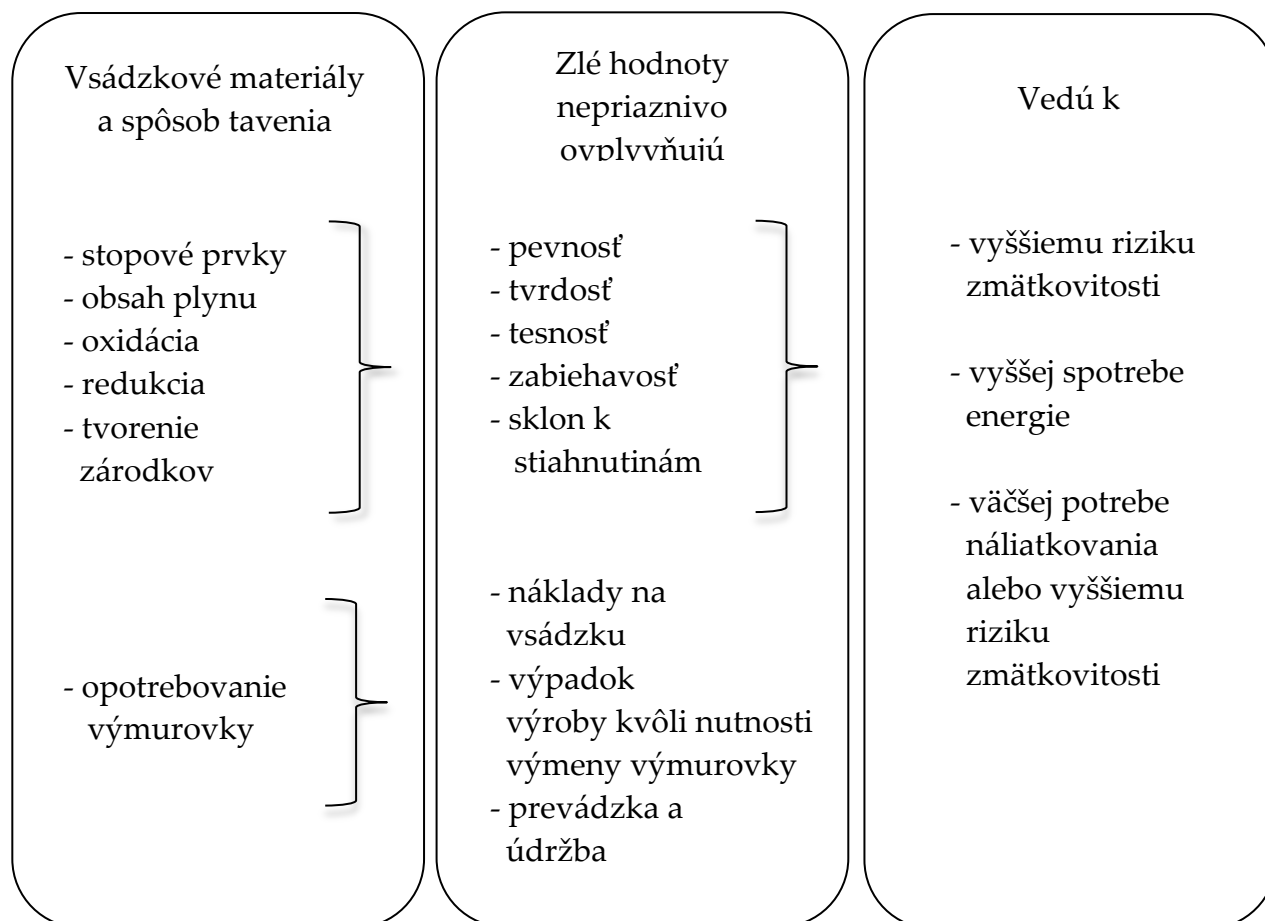
Obr. 7.83 Nežiadúce typy grafitu v LGG

Rovnako významný je vplyv čistoty vsádzky na tvorbu základnej kovovej hmoty a vznik karbidickej štruktúry. Štruktúru základnej kovovej hmoty najviac ovplyvňujú prvky základného zloženia (Si, Mn, P) ako aj perlitizačné prvky Sn, Mo, Cu, Ti, Mn, Ni a Cr.

Škodlivé antiglobulizačné prvky sú najmä Pb, Bi, Sb, As, Sn, Al, Ti. Ich účinok je rozdielny a je charakterizovaný koeficientom účinnosti, preto je potrebné sledovať ich obsah vo vsádzke komplexne. Za nežiadúcu je považovaná síra (nad 0,02 %).

Veľký význam je pripisovaný aj plynom (predovšetkým dusíku), ktorých objem sa v surovom železe pochádzajúcom od rôznych výrobcov môže podstatne líšiť. Dôležité sú i podmienky tavenia, typ taviaceho zariadenia a technológia tavenia. Uvedené faktory ovplyvňujú fyzikálne a chemické vlastnosti tekutého kovu z pohľadu jeho schopnosti nukleácie grafitu v priebehu kryštalizácie.

Vplyv vsádzkových surovín a postup tavenia na metalurgickú akosť liatiny a následné účinky, ktoré sú v bezprostrednej súvislosti s hospodárnosťou zlievarne dokumentuje **obr. 7.84**.



Obr. 7.84 Vplyv vsádzkových surovín na akosť liatiny a druhotné následky

Vsádzkové suroviny je potrebné hodnotiť v poradí:

- akosť vsádzkových surovín,
- stálosť chemického zloženia surovín,
- servis dodávateľa, dodacie termíny, obchodné dodacie podmienky,
- cena surovín.

Vratný materiál je vlastný technologický odpad, ktorý je nutné triediť, najmä pri výrobe rôznych druhov liatin (najmä rôzne legovaných) a zbaviť formovacieho materiálu, ktorý zvyšuje v peci množstvo a ovplyvňuje zloženie trosky.

Oceľový šrot sa používa v množstve od 10 do 100 % podielu vsádzky (syntetická liatina), bežná prax je 30 až 50 %.

Najvhodnejší je odpad hlbokofažnej ocele (plechy), ktorý je chemicky veľmi čistý. V EIP sa spoľahlivo a rýchle nauhličí. Pri pomalom (zdlhavom) tavení (bez trosky) bolo zistené jeho vysoké (až trojnásobné) nadusičenie.

Syntetická liatina však vykazuje viaceré negatívne technologické vlastnosti (vyšší sklon k zákalke, k sťahovaniu, k vzniku tepelných pnutí, rozdielnej tvrdosti pri zmene hrúbky stien odliatku), ktoré je potrebné vo výrobe eliminovať. Oceľový odpad je často legovaný (Cr, Ni, Mn, Cu), čo je pri tavení feritických LGG nežiadúce. Je však lacnou vsádzkovou surovinou a umožňuje výrazne znížiť výrobné náklady.

Surové železá sú pri ich kvalitatívnom výbere najvhodnejšou zložkou vsádzky, obzvlášť špeciálne – určené na výrobu náročných LGG. Sú však cenovo najnákladnejšie (až 3x drahšie ako oceľ). Ich podiel vo vsádzke je najčastejšie 30 %.

Zlomková liatina je vlastne liatinový spotrebiteľský odpad, ktorý musí byť dôkladne vytriedený. Obsah oceľového odpadu v nej sa pripúšťa do 5 % hmotnosti zlomkovej liatiny. Musí byť zbavená kovových povlakov a neželezných kovov. Nesmie byť prehrdzavená (povrchové zhrdzavenie je dovolené), spálená a znečistená nekovovými prímiesami. Triedenie, skúšanie, skladovanie, dopravu a dodávanie zlomkovej liatiny (aj oceľového odpadu) predpisuje STN 42 0030 – Oceľový a liatinový odpad.

Zlomková liatina je pre výrobu kvalitných LGG najnevhodnejšia.

Pri výrobe liatiny s guľôčkovým grafitom je nutné voliť vsádzkové suroviny a technológiu výroby tak, aby vyrobený odlieatok bolo možné dodávať v liatom stave, pretože náklady na tepelné spracovanie výrazne prevyšujú zvýšené náklady na nákup kvalitných surovín.

Nauhličovadlá, očkovačlá a modifikátory sú uvádzané v kap. 4 a 5.

7.1 Eliminácia negatívnych technologických vlastností u syntetickej liatiny

Syntetická liatina bola do výroby zavedená pred 60 rokmi, hneď po vývoji a výrobe stredo a nízkofrekvenčných veľkokapacitných indukčných pecí (1 až 20 ton). Tie umožnili výrobu rozsiahleho sortimentu liatin, najmä legovaných. Ďalším významným efektom bolo zvýšenie podielu ocelového šrotu až na 100 % a hlavne zníženie spotreby deficitného a finančne nákladného surového železa. Jeho cena je v porovnaní s ocelovým odpadom až 2x vyššia.

Hneď na začiatku výroby syntetickej liatiny sa preukázali pri porovnaní s liatinou s kuplovej pece zvýšený sklon k tvorbe zákalky v tenkostenných odlieatkoch, čo sa úspešne rieši očkovaním. Zároveň boli zaznamenané vyššie hodnoty pevnosti v ťahu R_m (o 10 až 15 %) a tvrdosti HB o 20 – 25 % pri rovnakých hodnotách stupňa nauhličenia Se. Tento jav bol riešený zvýšením Se pre jednotlivé typy liatin (akostné liatiny), čo bolo prospešné pre zlepšenie zlievarensko technologické vlastnosti (zabiehavosť, nižší sklon k stiahnutinám).

Vážnejší problém vznikol pri ťažkých hrubostenných odlieatkoch keď sa zistil veľký rozptyl tvrdosti po priereze a v rôznych hrúbkach stein, ako aj vyšší sklon k sťahovaniu a vzniku mechanických napätí v odlieatkoch. Pri týchto odlieatkoch sa zaviedla prax používania minimálne 30% surového železa vo vsádzke.

Bežná prax v zlievarňach stredne ťažkých a malých odlieatkoch je vsádzka s obsahom až 70 % ocelového šrotu doplnená vratným materiálom. Potreba očkovania bola určovaná zákalkovou skúškou resp. pomocou kriviek ochladzovania. Zvýšenie R_m a HB vo vyrábaných LLG je pripisované vysokému obsahu N v oceli (80 až 180 ppm) bez podrobnejšieho výskumu tohto vplyvu.

7.1.1 Vplyv vysokého podielu oceleového odpadu vo vsádzke na vlastnosti LLG

Za účelom spoľahlivosti výsledkov vplyvu vsádzkových surovín na vlastnosti LLG sa robil výskum v prevádzkových podmienkach, konkrétne na elektrických stredofrekvenčných indukčných peciach s kapacitou 4t resp. 6ton tekutého kovu (zlievareň A, B). Základom pre porovnávanie v bežnej praxi vyrábaných tavieb bolo skúmaných 122 tavieb syntetickej liatiny akosti EN-GJL 250 (STN 42 2420) vyrábaných bez surového železa (štatistické hodnotenie).

Dosiahnuté výsledky potvrdzujú významný pozitívny vplyv zvyšovania podielu oceleového odpadu vo vsádzke na zvýšenie pevnosti R_m a tvrdosti HB vyrobenej LLG pri zhodnom stupni nahličenia ($Se = 0,87$ až $0,93$).

V zlievarni "A" bol skúmaný vplyv 100 % podielu oceleového odpadu a 100 % podielu surového železa vo vsádzke na mechanické vlastnosti LLG.

Tavby v zlievarni boli realizované v dvoch 6 tonových nízkofrekvenčných indukčných téglikových peciach s kyslou výmurovkou.

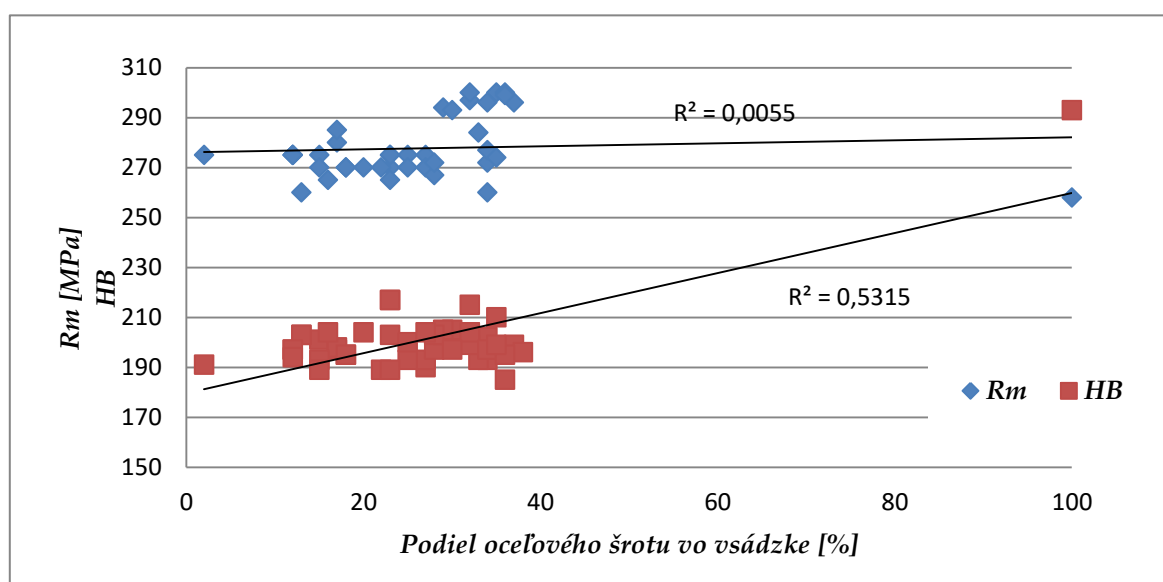
Zloženie vsádzky tavieb sa menilo, pričom boli použité nasledovné vsádzkové suroviny a bol menený podiel kovonosných zložiek vsádzky:

- oceleový odpad
- vratný materiál + zlomkovina
- nahličovadlo (smolný koks)
- FeSi 45, FeSi 75
- dolegovanie: FeMn, FeCr, Cu
- očkovanie FeSi 75 %

Po roztavení vsádzky bola odobratá vzorka na chemickú analýzu a podľa potreby bola potom robená úprava chemického zloženia. Odobratých bolo niekoľko vzoriek v priebehu. Teplota prehriatia bola v rozmedzí $1420 - 1440$ °C. Očkovanie bolo robené pri odpichu na žliabku pece (FeSi v rozsahu $0,2 - 0,3$ hmot. %).

Zo všetkých tavieb boli odliate skúšobné tyčky $\varnothing 30$ mm, ktoré slúžili k meraniu mechanických vlastností (pevnosti v ťahu R_m a tvrdosti HB).

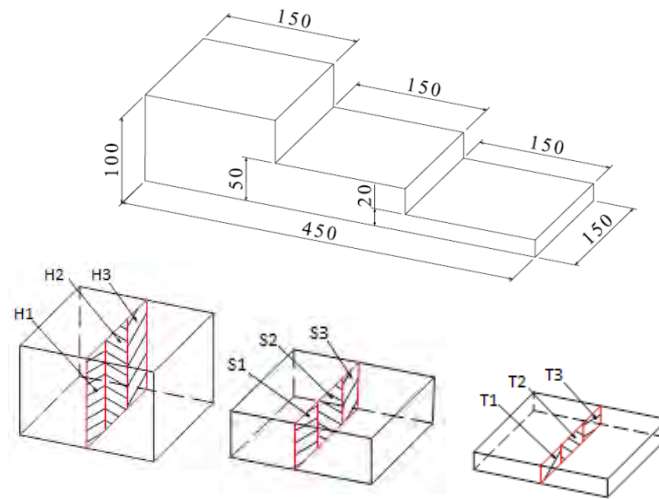
Štatistickým hodnotením (**obr. 7.85**) bol zistený mierny nárast R_m , pričom rozptyl pevnosti bol vysoký vplyvom rôznych druhov ďalších vsádzkových surovín a postupov metalurgického spracovania. Výraznejší vplyv oceľového odpadu bol zistený u tvrdosti (HB). Výrazný nárast tvrdosti bol zistený v liatine skúšobnej tavby so 100 % podielom oceľového šrotu, kedy bola nameraná tvrdosť až 293 HB. To predstavuje oproti hodnotám tvrdosti HB (okolo 200 HB) u bežných tavieb s podielom oceľového odpadu (10 až 40 %) nárast až o 49 %. Akostné kritéria $RG = 83,87 \%$ a factor akosti $m = 1,369$. Nízke parametre kvality vyrábanej LLG je možné pripísať nízkej teplote prehriatia (1420°C) pred očkovaním a nízkemu obsahu síry ($0,015 \%$ S), ktorý je na úspešné očkovanie nevyhovujúci. Doporučený obsah síry pre očkovanie je $0,05 \%$.



Obr. 7.85 Vplyv podielu oceľového šrotu vo vsádzke na R_m a HB

7.1.2 Mikrolegovanie titánom

V laboratórnych a prevádzkových podmienkach bola overovaná eliminácia nepriaznivých vlastností syntetickej LLG nízkym legovaním titánom (FeTi). V laboratórnych podmienkach boli tavby realizované v stredofrekvenčnej indukčnej peci. Okrem základných ukazovateľov kvality určených pomocou mechanických vlastností (R_m , HB) boli sledované aj ďalšie technologické vlastnosti (sklon tvorbe zákalky, rozptyl HB pri zmene hrúbky steny odliatku a sklon k stiahnutinám. Citlivosť zmeny tvrdosti HB so zmenou hrúbky steny odliatku bola skúšaná pomocou tzv. schodíkového odliatku (**obr. 7.86**) s hrúbkou stien 100, 50 a 20mm. Na každej stene boli realizované tri merania tvrdosti (sklon k zákalke pomocou zákalkovej skúšky).



Obr. 7.86 Schodíková skúška

Mikroštruktúra bola hodnotená podľa normy STN 42 061. Tieto vlastnosti – kvalita syntetickej LLG bez a po legovaní titanom (FeTi) boli overované pomocou 6-tich taviieb s približne rovnakým chemickým zložením. Stupeň eutektickosti Se sa pohyboval v úzkom rozsahu 0,848 až 0,913. Za významne bolo meranie nadusičenia liatiny, t.j. N vo vsádzke a vo vyrobenej liatine. Okrem štandardného hodnotenia kvality liatiny meraním pevnosti v ťahu a tvrdosti HB sa hodnotili aj kvalitatívne kritériá a porovnávali sa s chemickým zložením:

$$RG (\%) = \frac{Rm_{nameraná}}{Rm_{normálna}} \cdot 100 \%$$

kde: $Rm_{normálna} = 981 - 785 \cdot Se$ (MPa)

$$RH = \frac{HB_{namerané}}{HB_{normálna}} \cdot 100 \%$$

kde: $HB_{normálna} = 100 + 0,44 \cdot Rm_{nameraná}$

Hodnota vyššia ako 100 % znamená vysokú kvalitu LLG.

Akostné číslo (GZ) alebo faktor kvality (m) sa vypočíta vydelením nameraných hodnôt RG / RH alebo Rm / HB. Kvalitná LLG vykazuje vysokú pevnosť v ťahu pri nízkych hodnotách tvrdosti HB. Kvalitatívne kritériá kvality, kvantitatívne popisujú účinky konkrétnych výrobných podmienok na vyrobené vlastnosti liatiny v porovnaní s optimálnymi štatisticky platnými podmienkami. Liatina vysokej kvality by mala vykazovať vysoké hodnoty zrelosti RG a nízke hodnoty relatívnej tvrdosti RH.

Výsledky chemického zloženia a hĺbku zákalky jednotlivých tavieb dokumentuje **tab. 7.17**.

Tab. 7.17 Výsledky sledovaných vlastností tavieb

Číslo tavby	podiel ocel. odpadu [%]	hmot. [%]					Sc	Rm [MPa]	HB	Faktor akosti m	Zákalka [mm]
		C	Si	Mn	Ti	N ₂					
1. Syntetická liatina	97,8	3,28	1,69	0,84	-	0,0175	0,869	257,67	244 *(312)	1,057	10
2. tenký plech – dlhé tavenie	100	3,27	1,79	0,73	-	0,0040	0,887	232	214 *(223)	1,084	5
3. tenký plech – pomalé tavenie	100	3,32	1,92	0,55	-	0,0044	0,913	237	205 *(235)	1,156	20
4. Tavba s Ti	43	3,34	1,74	0,66	0,148	0,0062	0,863	233	161 *(167)	1,450	1
5. Tavba s Ti	35,5	3,32	1,486	0,66	0,183	0,0091	0,903	268	217 *(224)	1,235	bez zákalky
6. Štandardná tavba	33	3,23	1,612	0,657	-	0,0113	0,848	297,25	186 *(205)	1,599	5

* tvrdosť HB nameraná na tenkej časti odliatku (20 mm)

Vypočítané hodnoty kvalitatívnych kritérií dokumentuje **tab. 7.18**.

Tab. 7.18 Kvalitatívne kritéria

Stupeň zrelosti liatiny RG [%]	Faktor akosti „m“
86,2	1,057
80,64	1,084
89,67	1,156
83,57	1,450
88,3	1,235
94,257	1,599

Tavba č. 1 bola vyrobená v prevádzkových podmienkach zlievarne. Vsádzku tvorili tenké odrezky ocelových plechov a doba tavenia bola 4 hodiny. Výsledkom toho bolo vysoké zvýšenie N vo vyrobenej liatine zo 60 na 175ppm. Kvalita vyrobenej LLG bola priemerná a keďže Rm a HB tejto liatiny boli zo skúmaných tavieb najvyššie (RG = 86,2), faktor akosti m = 1,057 bol najnižší. Vysoký bol tiež sklon k tvorbe zákaliel (10 mm). Zmena tvrdosti HB so zmenou hrúbky steny odliatku (R-blok) dokumentuje **obr. 7.87**.

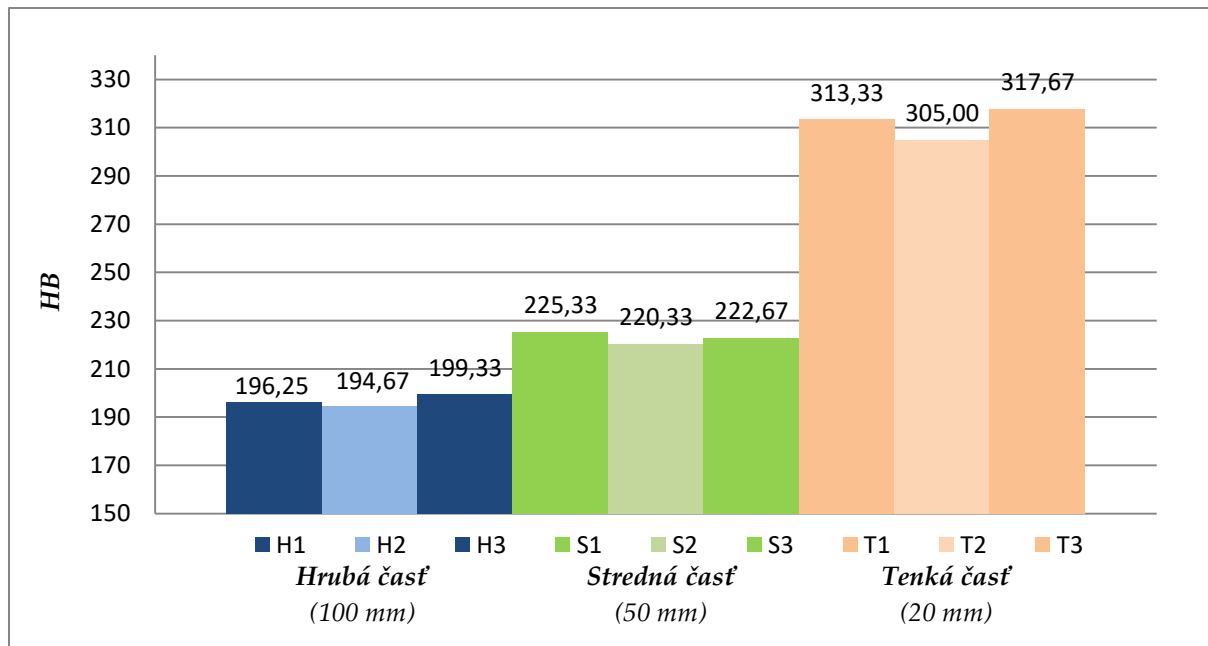
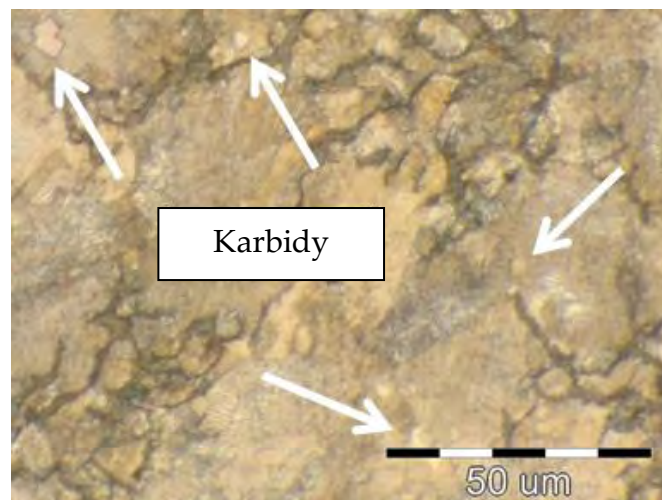


Fig. 7.87 Zmena tvrdosti HB v závislosti od zmeny hrúbky steny (R-blok)

Rozdiel tvrdosti stien odliatku hrúbky 100 a 20 mm bola ž 110 HB t.j. 27,72 %. Zbytkové napätie liatiny bolo 84,9 MPa.

Mikroštruktúra tavby bola plne perlitická s prítomnosťou karbidov – **obr. 7.88**. Tieto karbidy boli príčinou vysokej tvrdosti u danej liatiny.



Obr. 7.88 Mikroštruktúra LLG – tavba č. 1

Tavby č. 2 a 3 boli realizované v laboratórnych podmienkach na Technickej univerzite. Vsádzku tvoril 100% podiel oceľového odpadu (tenké odrezky plechu) ako v tavbe č. 1. Rozdiel bol v dĺžke doby tavenia a na overenie nadusičenia tekutého

kovu. Východzí N = 30ppm sa zvýšil na 40 a 44 ppm. Výsledné vlastnosti boli priemerné, avšak vyššie ako u tavby č. 1. Stupeň zrelosti RG = 80,64% a 89,67% a m = 1,084 a 1,156. Rozdiel tvrdosti stein (100/20 mm) bol 13,3%. Štruktúra tavby č. 2 a 3 bola perlitická s podielom perlitu 92-96 %.

Vplyv titánu na vlastnosti LLG (tavby č. 4, 5, 6)

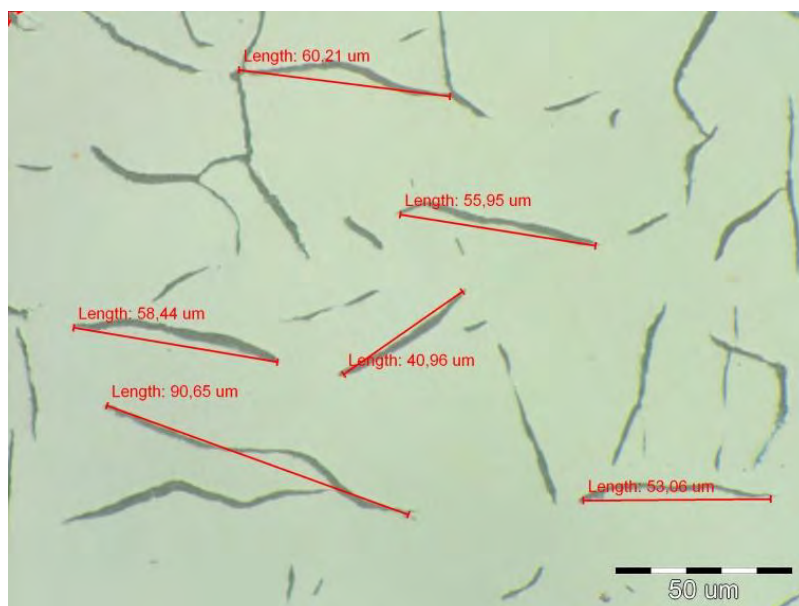
V prevádzkových podmienkach zlievarne bol overovaný vplyv Ti na bežne vyrábané tavby s podielom oceleového odpadu 43 %, 35,5 % a 33 %. Chemické zloženie – Se bol zhodný s ostatnými tavnami (0,848 až 0,913).

Tavba č. 4 (Ti = 0,148%, N=62ppm)

Jej kvalita RG = 83,57% bola najnižšia z hodnotených taviieb. Faktor akosti m = 1,450 bol však najvyšší zo všetkých skúmaných taviieb z dôvodu relatívne nízkej HB = 161. Rovnako zákalka bola minimálna (1mm). Rozdiel tvrdosti (100/20mm) hrúbky steny bol 3 %.

Tavba č. 5 (Ti=0,183, N=91ppm)

Jej kvalita RG = 88,3% bola vyššia ako u tavby č. 4 avšak factor akosti m = 1,235 bol nižší. Pevnosť v ťahu Rm 268 MPa ostala vysoká aj po legovaní titánom a aj pri vyššom Se = 0,903. Rozdiel tvrdosti (100/20 mm) hrúbky steny bol 3,2 %. Zákalka u tejto tavby nebola evidovaná. Mikroštruktúra bola perlitická (96 % perlitu, veľkosť grafitu 30 – 60 μm typu E), **obr. 7.89**.



Obr. 7.89 Mikroštruktúra LLG – tavba č. 5

Tavba č. 6 bola vyrobená za účelom porovnania liatin legovaných titánom. Jej nadusičenie bolo vysoké ($N=113\text{ppm}$). Pevnosť v ťahu $R_m=297,25\text{ MPa}$ bola najvyššia zo všetkých skúmaných liatina pri relatívne nízkej tvrdosti (186 HB). Výsledkom toho je vysoký faktor akosti $m=1,559$ a $RG=94,26\%$. Hĺbka zákalky bola 5mm. Rozdiel tvrdosti (100/20mm) bol 32 HB (15,8 %). Mikroštruktúra bola prelitická (podiel perlitu 92 %, veľkosť grafitu 60 - 120 μm typu C).

Prvé poznatky v rámci štúdia vplyvu Ti na vlastnosti syntetickej LLG, resp. polosyntetickej LLG so zvýšeným obsahom dusíka sú nasledovné:

- vplyv nízkeho obsahu Ti (0,148 – 0,183 %) spôsobil male zníženie pevnosti v ťahu R_m a najmä tvrdosti HB čo je veľmi významné. V dôsledku toho vzrástol faktor akosti “m” z 1,1 na 1,45 a hĺbka zákalky sa znížila z 20 na 1 mm.
- rozdiel tvrdosti v stenách odliatkov 100/20 mm bol cca 3%, čo je výrazný pokles oproti tavbám bez mikrolegovania titánom.
- nízkym legovaním syntetickej LLG titánom (pomocou FeTi) je možné eliminovať nepriaznivé zmeny technologických a mechanických vlastností a vyrábať litany až so 100 % podielom oceľového odpadu vo vsádzke, čo je ekonomicky veľmi dôležité.

Uvedené zmeny kvality LLG je možno vysvetliť pozitívnou zmenou grafitizácie liatiny ako výsledok nízkeho legovania titánom.

8. METALURGICKÉ CHYBY LIATINOVÝCH ODLIATKOV

Podľa STN 42 1240 je chybou odliatku každá odchýlka od vzhľadu, tvaru, rozmeru, hmotnosti, štruktúry alebo odchýlka vlastností od príslušných noriem alebo dohodnutých technických podmienok (TPP), zistená laboratórnymi skúškami.

Chyby súvisiace s metalurgickou kvalitou tekutej liatiny:

- nevyhovujúce mechanické vlastnosti
- odchýlky hodnôt fyzikálnych vlastností
- nevyhovujúca homogenita odliatku
- výpotky
- bubliny
- zatvrdlina, zákalka
- nesprávny obsah štruktúrnych zložiek
- obrátená zákalka

8.1 Nevyhovujúce mechanické vlastnosti

Popis chyby

Sú to odchýlky mechanických vlastností odliatkov, resp. predpísaných, alebo odberateľom dohodnutých vzoriek od hodnôt predpísaných normou resp. požadovaných odberateľom. Najčastejšie sú to tvrdosť (HB), pevnosť v ťahu (Rm) a ťažnosť (A₅), príp. lomová húževnatosť (u LGG).

Príčiny vzniku chyby

Najčastejšie je to nevhodné chemické zloženie, najmä Sc – stupeň nauhličenia pre požadovanú akosť, resp. hrúbku steny odliatkov. Vzniká tak nevhodná štruktúra, ktorá je ovplyvňovaná aj vsádzkovými surovinami, metalurgiou tavenia a rýchlosťou ochladzovania odliatku. U liatin mimopecne spracovaných to môže byť nesprávny postup očkovania, resp. modifikovania (u LGG).

Ďalším činiteľom je nedodržaný režim tepelného spracovania ak je predpísaný alebo dohodnutý.

Spôsob zistenia chyby

Mechanické vlastnosti sa zisťujú v mechanickej skúšobni na štandardných zariadeniach. Výsledky sa porovnávajú s odpovedajúcou normou pre daný materiál, alebo s požiadavkami odberateľa (TPP).

Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- dodržiavanie chemického zloženia
- dodržiavanie metalurgického postupu (predpisu), vrátane výberu prípravy a druhotného vsádzky a postupu mimopecného spracovania
- dodržiavanie rýchlosti ochladzovania pri tuhnutí a chladnutí odliatkov, najmä pri zámene druhu formovacej zmesi (mení sa tepelná akumulácia formy)
- dodržiavanie postupu tepelného spracovania (predpis)

8.2 Odchýlky hodnôt fyzikálnych vlastností

Popis chyby

Sú to odchýlky väčšinou od fyzikálnych vlastností špeciálnych (legovaných) liatin v dôsledku nedodržania ich chemického zloženia, predovšetkým obsahu legúr. Patrí sem znížená oteruvzdornosť, resp. odolnosť voči teplotným zmenám pri cyklickom tepelnom namáhaní, nízka koróziivzdornosť, ako aj nízky elektrický odpor (elektrické odporové články) a ďalšie požadované fyzikálne vlastnosti.

Príčiny vzniku chyby

Príčiny vzniku je potrebné vzťahovať na konkrétnu špecifickú fyzikálnu vlastnosť materiálu. Najčastejšie je to nedodržanie chemického zloženia, rýchlosti tuhnutia a režim tepelného spracovania.

Spôsob zistenia chyby

Laboratórne skúšky fyzikálnych vlastností.

Opatrenia na zabránenie vzniku chyby:

- dodržanie chemického zloženia v celom rozsahu
- dodržanie metalurgického postupu tavenia a legovania
- dodržiavanie technologického postupu a režimu tepelného spracovania

8.3 Nevyhovujúca homogenita odliatku

Popis chyby

Sú to zhluky s vysokou koncentráciou legúr, sulfidov, fosfidov, alebo vmestkov, riedin, primárneho grafitu a ďalšie. Sú to chyby najčastejšie vznikajúce u masívnych odliatkov, viditeľné po ich spracovaní (hrubovaní).

Príčiny vzniku chyby

Príčiny nehomogenity materiálu sú veľmi rôznorodé a súvisia s typom chyby, druhom liatiny. Patria sem aj vnútorné chyby v dôsledku neroztavených chladítok, podperiek jadier. U legovaných liatin zhluky nerozpustných ťažkotaviteľných legúr, či splodiny očkovadiel a modifikátorov.

Spôsob zistenia chyby

Viditeľné povrchové chyby po opracovaní, resp. vnútorné chyby zistené röntgenovým žiarením, ultrazvukom, betatrónom a ďalšími modernými metódami.

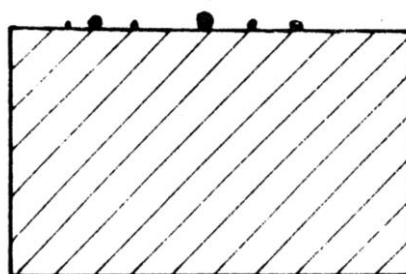
Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- robia sa podľa druhu chyby a príčiny jej vzniku

8.4 Výpotky

Popis chyby

Sú to kvapky alebo vrstvy s hladkým povrchom v priemere až 12 mm a zložení odlišnom od základnej liatiny, **obr. 8.90**. U liatiny vzniká pri vyššom obsahu fosforu (nad 0,15 %).



Obr. 8.90 Výpotky

Príčiny vzniku chyby

Fosfidické eutektikum ($\text{Fe}_3 - \text{FeP} - \text{Fe}_3\text{C}$) vzniká na rozhraní zŕn ku koncu tuhnutia a je vytesňované na povrch odliatku v dôsledku jeho nízkej teploty tavenia pri súčasnom grafitizačnom zväčšovaní objemu. Môže byť vytláčané aj do vnútorných bublín a iných vnútorných defektov. Spôsobujú problémy pri obrábaní liatin.

Spôsob zistenia chyby

Viditeľné sú na povrchu odliatku.

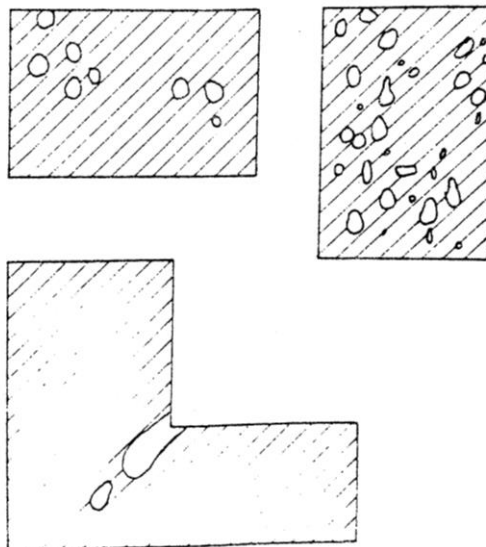
Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- zníženie obsahu fosforu a plynov v liatinách

8.5 Bubliny

Popis chyby

Bubliny sú dutiny v odliatku a to otvorené (povrchové) alebo uzavreté (vnútorné). Majú guľový alebo oválny tvar. Ich povrch je čistý hladký (vnútorné) ale aj oxidovaný – vonkajšie bubliny. Bubliny spôsobené metalurgickými vplyvmi sú endogénne, **obr. 8.91**.



Obr. 8.91 Bubliny

Príčiny vzniku chyby

V liatinových odliatkoch môžu vznikať bubliny CO pri vyššom obsahu kyslíka v tekutom kove, ktorý reaguje s uhlíkom. Ich výskyt je častejší u LGG, najmä pri obsahu hliníka (už pri veľmi nízkom Al = 0,02 %). Kyslík pochádza najmä z vlhkej a zoxidovanej vsádzky.

Ojedinele vznikajú v liatinách aj dusíkaté bubliny v dôsledku vysokého obsahu N v dôsledku jeho zvýšeného obsahu vo vsádzke (oceľový odpad), ale najmä v dôsledku nadusičenia z atmosféry pri pomalejšej a dlhšej tavení vsádzky s vysokým merným povrchom (drobné odrezky tenkého plechu).

V liatinových odliatkoch vznikajú častejšie exogénne bubliny v dôsledku vlhkého odpichového žľabku, nevysušenej odlievacej panvy, ako aj naplyním pri odlievaní vo vnútri formy.

Spôsob zistenia chyby

Otvorené, povrchové bubliny je možno zistiť vizuálne. Vnútorné po opracovaní alebo ultrazvukom a röntgenom.

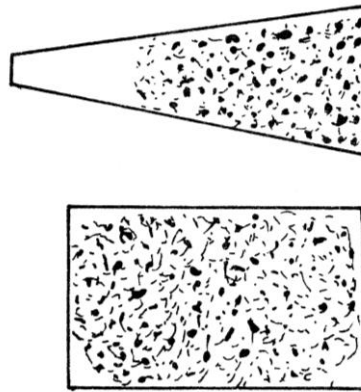
Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- komplexný rozbor ich pôvodu a príčiny ich vzniku
- kvalitná vsádzka, najmä pri tavení v elektrických indukčných peciach. Táto nesmie byť nadmerne hrdzavá a vlhká.
- exogénna bublinatosť sa rieši dôkladným vysušením (až vyžíhaním) žľabkov a výmurovky panvy. Zároveň je nutné riešiť vznik bublín v dutine formy pri odlievaní.

8.6 Zatvrdlina, zákalka

Popis chyby

Zatvrdliny sú tvrdé neopracovateľné miesta na povrchu odliatku spôsobené vznikom voľného cementitu, ledeburitu alebo iných karbidov v liatine. V praxi je dôležitá klinová skúška na zhodnotenie sklonu k tvorbe zákaliek, **obr. 8.92**.



Obr. 8.92 Zákalka

Príčiny vzniku chyby

Vznikajú v dôsledku nevyhovujúceho zloženia (nízky Sc) a vysokej rýchlosti chladnutia. Táto sa zvyšuje s klesajúcou hrúbkou stien a so zvyšujúcou sa ostroťou hrán a rohov. Podporuje ju vysoká tepelná akumulácia (bf) formovacej zmesi.

Spôsob zistenia chyby

Zisťuje sa skúškou tvrdosti, opracovateľnosti (už pilníkom). Po zabrúsení vidieť zákalku ako svetlú lesklú plochu.

Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- správna voľba chemického zloženia (Sc) vo vzťahu k hrúbke stien odliatku a použitej formovacej zmesi. U pevnejších liatin je nutné ich očkovať. Zvláštnym problémom sú zatečeniny najmä do jadra, ktoré pôsobia ako vnútorné chladítka a v ich blízkosti môžu vzniknúť zatvrdliny.
- účinným opatrením je úprava ostrých hrán odliatku zaoblením a zjednotenie hrúbky stien, t.j. zvýšenie technologicnosti konštrukcie odliatku spolu s konštruktérom
- rovnomernosť tuhnutia odliatku je možné dosiahnuť aj návrhom optimálnej vtokovej sústavy a stupňom prietočnosti
- grafitizačné žihanie (900 – 950 °C)

Špecifickým problémom sú odliatky s požadovanou (predpísanou) vrstvou zákalky na ich povrchu za účelom zvýšenia oteruvzdornosti.

8.7 Nesprávny obsah štruktúrnych zložiek

Popis chyby

Nesprávna mikroštruktúra t.j. odchýlky makroštruktúry a mikroštruktúry odliatkov od požiadaviek normy alebo dohodnutých technických podmienok.

Príčiny vzniku chyby

U LGG je to nežiadúci podiel nevhodného tvaru grafitu alebo iných štruktúrnych zložiek.

U LLG je to výskyt cementitu v štruktúre ale aj nevhodný tvar, veľkosť a rozloženie grafitu (špeciálne požiadavky odberateľa).

Spôsob zistenia chyby

Metalografický rozbor a porovnanie s požiadavkami.

Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

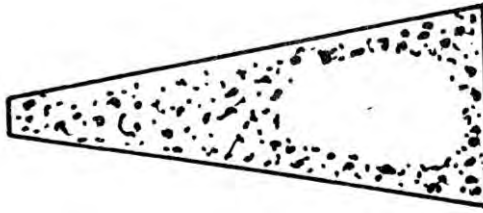
- metalurgická príprava a úprava kovu
- stabilizácia podmienok kryštalizácie a chladnutia odliatku vo forme, príp. dodržiavanie tepelného spracovania (pri výrobe temperovanej liatiny)

Samostatnou skupinou sú iné chyby mikroštruktúry. Sú to najčastejšie grafitové hniezda, resp. primárny grafit u liatin s vysokým obsahom Sc u hrubostenných odliatkov a tepelných uzlov. Opatrením je zníženie obsahu C, resp. Sc.

8.8 Obrátená zákalka

Popis chyby

Obrátená zákalka je vytváranie tvrdých miest vo vnútri odliatkov. Vzniká v hrubších miestach s menej vhodným chemickým zložením, kde sa v dôsledku segregácie nahromadia zložky pôsobiace proti grafitizácii, **obr. 8.93**.



Obr. 8.93 Obrátená zákalka

Spôsob zistenia chyby

Prehliadkou lomu odliatku.

Opatrenia k zabráneniu vzniku chyby:

- dôkladný výber a kontrola vsádzky a vylúčenie škodlivých prímiesí (Bi, Sb, Ti, S).
- obsah Mn by mal byť k síre vo vzťahu: $\% \text{ Mn} > 1,75 \cdot \% \text{ S} + 0,3$

U LGG je nežiadúce prehrievanie kovu a dlhá výdrž v peci. Obsah Mg držať na spodnej hranici, zlepšiť očkovanie.

9. NUMERICKÉ SIMULÁCIE

Numerická simulácia zlievarenských procesov zastáva pevné miesto medzi nástrojmi pre optimalizáciu navrhovaných technológií výroby odliatkov. Stala sa oporným bodom vo výskume tepelných dejov v sústave odliatok – forma – okolie. Je spracovaná pre väčšinu bežne používaných technológií výroby odliatkov. Ide najmä o technológie gravitačného odlievania, pre liatie pod tlakom, Lost foam, procesy Semi – solid a pod.

9.1 Simulačné programy

Simulačný software sa skladá z modulov, ktoré sú usporiadané tak, aby sa mohol uskutočniť simulačný výpočet. Obsahuje moduly **preprocessing**, **mainprocessing** a **postprocessing**. Súčasťou každého simulačného softwaru je databáza, čo je vlastne prehľad tepelno fyzikálnych veličín, používaných materiálov odliatkov a foriem. Databázy najnovších simulačných programov obsahujú hodnoty aspoň niektorých fyzikálnych veličín v závislosti od teploty (tepelná vodivosť, merná tepelná kapacita, hustota, súčiniteľ prestupu tepla).

Takmer u všetkých simulačných programov je možné obohacovať databázu o hodnoty vlastných materiálov, ako aj hodnoty podľa vlastných meraní a tiež s nimi počítať.

V súčasnej dobe je pre priemyselnú prax dobre zvládnutý matematický popis prúdenia jednofázovej nestlačiteľnej kvapaliny s prestupom tepla medzi tekutým kovom a formou, ktorý sa opiera o nasledujúce rovnice:

1. Rovnica kontinuity:

$$(\rho_1 \cdot S_1 \cdot v_1 - \rho_2 \cdot S_2 \cdot v_2) dt' = S ds \frac{d\rho}{d\rho} dt$$

kde: ρ - hustota

S - prierez

v - rýchlosť

t - čas

Zmena hmoty v určitom objeme v čase je daná rozdielom medzi množstvom vtekajúcej a vytekajúcej hmoty z objemu.

2. Navier – Stokesova rovnica:

$$\frac{dv}{dt} = R - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nu \Delta v + \nu \operatorname{grad} (\operatorname{div} v)$$

kde: dp - elementárny tlak

R - intenzita silového poľa

Zmena hybnej sily je spotrebovaná na zmenu rýchlosti prúdenia v danom objeme a na pokrytie strát trením.

3. Rovnica entalpie:

$$I = U + pV$$

kde: I - entalpia

U - vnútorná energia

V - objem

Zmena teploty v danom objeme je daná rozdielom medzi množstvom privedeného a odvedeného tepla prúdom kovu (konvekciou) a vedením (kondukciou) a privedením, odvedením skupenského tepla.

Počítačová simulácia liatia pomocou overených simulačných programov dáva technologom takmer všetky potrebné údaje na optimalizáciu vtokových sústav a celého procesu liatia a tuhnutia odliatkov.

9.2 Štruktúra simulačných programov

Simulácia prebieha spravidla v troch krokoch:

1. krok - preprocessing – príprava geometrie odliatku a formy. Tvar odliatku sa pripravuje postupne pomocou špeciálneho modulu, vybaveného radou funkcií používaných v CAD konštrukčných programoch. Modernejšou metódou tvorby geometrie je prenos geometrických dát vytvorených v CAD programoch (napr. Pro/Engineer, CATIA a pod.). Pre prenos dát sa používajú štandardné rozhrania VDA, IGES alebo najmodernejší STL. Prenesené tvary sú automaticky spracované sieťovým generátorom do matematického modelu konečných prvkov.

2. krok - *mainprocessing* – robí výpočet plnenia dutiny formy, tepelného poľa počas liatia, tuhnutia a chladnutia. Pri výpočte sú jednotlivým materiálom priradené rôzne fyzikálne vlastnosti z databanky. Turbulentné plnenie – prúdenie je prevádzané silovým výpočtom. Na základe výsledkov tepelného poľa je možné vypočítať aj mikroštruktúru v odliatku, zvyškové napätie, deformácie a zmraštenie v odliatku.

3. krok - *postprocessing* – usporiada a zobrazí výsledky na obrazovke. Procesy prebiehajúce vo forme je možné vyhodnotiť pomocou priebehu tepelného poľa, izoterm a kriviek ochladzovania v reálnom čase, alebo podľa rôznych chybových kritérií (napr. gradienty rýchlosti ochladzovania, Nyamovo kritérium, atď.). Je možné vyhodnotiť ktorékoľvek miesto v odliatku. Je možné vykonať ľubovoľné natočenie a rez v odliatku alebo forme.

9.3 Vytvorenie geometrie v CAD systéme a hlavné kroky výpočtov

Pri plánovaní celej simulácie je najprv nutné vytvoriť model sledovaného objektu – odliatku. Vytváranie modelu je časovo náročné, najmä priestorových (3D), poprípade plošných (2D) modelov. Geometria odliatku sa väčšinou načítava z interného alebo externého CAD systému. CAD (Computer Aided Design – počítačová podpora konštruovania) umožňuje nahradiť rutinnú prácu konštruktéra modernými postupmi pri tvorbe geometrie objektu a ďalších technologických parametrov. Výhodou počítačového návrhu geometrie telesa je jeho nadväznosť na ďalšie jeho počítačové činnosti, napr. vytváranie telesa na programovateľných obrábacích strojoch. Samostatnou kapitolou je počítačová simulácia. Pre prenos geometrických dát z používaných CAD systémov sa najčastejšie používajú tri typy formátov: STL (stereolitografia), DXF (z programu AutoCAD), IGES (z CAD systémov). Niektoré simulačné programy musia geometriu vytvorenú v CAD systéme previesť v FEM generátore a až potom načítať formát v simulačnom software. Pre simulačný výpočet je veľmi dôležité správne riešenie počiatočných a okrajových podmienok. Pri simulačnom výpočte tuhnutia a chladnutia odliatku ide o definovanie teplotného poľa v okamihu $t = 0$, t.j.:

$$[T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z)]$$

A prestupu tepla z hranice do okolitého prostredia v ľubovoľnom čase:

$$-\lambda (\delta T / \delta n) = \alpha [T_p - T_0]$$

kde: λ - súčiniteľ tepelnej vodivosti

α - súčiniteľ prestupu tepla

T_p - teplota povrchu

T_0 - teplota okolia (formy)

Všeobecne môže tieto podmienky definovať nielen teplota, ale aj napr. liacia výška. Niektoré simulačné programy majú jednoduché zadávanie počiatkových a okrajových podmienok.

Hlavný krok simulačného výpočtu závisí od konkrétneho programu. Sú programy, ktoré zahŕňajú simuláciu liatia, tuhnutia a chladnutia odliatku, simuláciu štruktúry a zvyškových pnutí, najčastejšie v jednom balíku simulačných modulov, alebo sú programy usporiadané v jednotlivých moduloch špecifického použitia, ako je program pre vysokotlakové alebo nízkotlakové liatie a pod. Zobrazenie výsledkov je opäť závislé od konkrétneho výpočtového programu. Výsledky sa farebne zobrazujú podľa potreby, najčastejšie v 3D, pokiaľ sa jedná o priestorové rozloženie sledovaných veličín. Dajú sa zobraziť izotermy, krivky minimálnych teplôt, zvyškové pnutia atď.

9.4 Matematické modely v simulačných programoch

Základom vedeckotechnických výpočtov pre potrebu technického rozvoja sú riešenia známych diferenciálnych rovníc matematickej fyziky. Výpočtové postupy pred nástupom počítačov používali často veľmi zjednodušené predpoklady, výsledky analytického riešenia robené len pre geometricky jednoduché oblasti a zvláštne prípady okrajových podmienok vhodných pre výpočet. Rozvoj výpočtovej techniky umožnil zavedenie novodobých výpočtových metód, spôsobilých k riešeniu úloh v prakticky ľubovoľne vytváraných geometrických oblastiach a pri okrajových podmienkach, ktoré sa bežne vyskytujú v technickej práci. Najväčší význam medzi približnými numerickými metódami získala metóda konečných prvkov, ktorá sa rýchlo presadila pri riešení úloh z oblasti pružnosti a pevnosti a tak tiež pri úlohách z oblasti teplotných polí a všeobecne potencionálnych stacionárnych a nestacionárnych úloh.

9.4.1 Metóda konečných diferencií - FDM

Metóda konečných diferencií (The Finite Differences Method – FDM) je vhodná pre mnohé aplikácie, kde sa využíva jej vhodnosť pri aproximácii riešení s teplotným procesom. Pre použitie tejto metódy nepochybne hovoria dva dôležité argumenty. Prvým z nich je jednoduchosť pri programovaní a numerickej realizácii a druhým dôvodom je relatívna jednoduchosť v nelineárnych matematických modeloch. Medzi nevýhody tejto metódy patrí problém s aproximáciou okrajových podmienok na jednotlivých častiach hraníc, ktoré nie sú vhodne použiteľné na rozdielne hustej sieti, zhoršenie presnosti aproximovaného riešenia pre sieť s rôznym odstupom uzlov a nakoniec nevyhnutnosť relatívne hustého časového kroku.

Každá geometria musí byť pre potreby výpočtov rozdelená na sieť. Priestorová (geometrická) sieť je tvorená skupinou samostatných bodov v určitej oblasti. Sieť môže byť obdĺžniková, valcová, guľatá, kosouhlá atď. Každá sieť je tvorená uzlami, ktoré rozdeľujeme na vnútorné a hraničné uzly.

Východným bodom metódy FDM je časovo závislé rozdelenie teploty v odliatku, ktoré je popísané diferenciálnymi rovnicami. Tie však môžu byť analyticky riešené len pre guľovú alebo nekonečnú plochu. Všetky ostatné telesá je možné riešiť len na základe podobnosti.

Pomocou tejto diferenčnej metódy sa úloha prevedie podľa diferenciálneho operátora (Taylorov rozvoj) na diferenciálne rovnice, podľa ktorých sa môžu rôzne telesá riešiť za určitých obmedzení – okrajové podmienky pre riešenie diferenciálnych rovníc. Tento postup sa využíva v simulačných programoch.

9.4.2 Metóda – CVM

Control Volume Method – CVM je zvláštnou variantou FDM, ktorá je používaná pri výpočtoch teplotného a látkového prenosu. Aj keď táto metóda nie je plne akceptovaná po matematickej stránke, lebo sa z časti odvoláva na intuitívne postupy a môže mať aj problémy s konvergenciou, predsa sa v numerických aplikáciách pomocou nej riešia aj veľmi komplikované úlohy, a to s vysokou kvalitou výsledkov, ktoré boli následne potvrdené experimentálnymi metódami. Okrem toho je možné dokázať, že pre typické tvary upravených objemov (obdĺžnik, valec, guľa atď.) leží energetická rovnováha v totožných vzťahoch ako u metódy FDM. CVM transformuje

rôznorodé technické úlohy, ako napríklad model makroskopickej segregácie či určenie zmraštenia a vznik dutín v odliatku.

9.4.3 Metóda konečných prvkov – FEM

Metóda konečných prvkov (The Finite Element Method – FEM) predstavuje modernú, vysoko efektívnu numerickú metódu pre riešenie technických a vedeckých úloh. V súčasnosti je považovaná za jednu z najúčinnějších približných metód pre riešenie problémov popísaných diferenciálnymi rovnicami.

Základnou myšlienkou metódy je, že sa najprv triangluje vyšetrené miesto, t.j. rozdelí sa na konečný počet jednotlivých oblastí, ktoré sú pre rovinnú úlohu väčšinou trojuholníky alebo štvoruholníky a pre priestorové úlohy štvorsteny, päťsteny, kvádre a pod. Potom sa minimalizuje potencionálna energia na množine spojitých a po častiach polynomických funkcií nad už vytvorenou trianguláciou. Vhodnou voľbou základných funkcií je možné túto úlohu previesť na riešenie lineárnych (popríklad nelineárnych) sústav algebraických rovníc, ktorých matrica je riedka, t. j. obsahuje väčšinou nulové prvky. Riedkosť matrice znižuje nároky na pamäť počítača a počet vykonávaných aritmetických operácií.

Hlavnou výhodou FEM je, že umožňuje dokonale aproximovať vyšetrené teleso a že celý výpočtový proces je možné zautomatizovať na počítačoch:

- interpolácia vstupných dát
- generovanie triangulí
- zostavenie sústavy algebraických rovníc
- vyriešenie sústavy algebraických rovníc
- vyhľadanie numerického riešenia
- odhady chýb
- grafické znázornenie výsledkov

Metóda konečných prvkov je najpopulárnejšou metódou pre numerické modelovanie okrajových počítačových podmienok ako v oblasti mechaniky, tak aj pre prenosové javy tepla. Vývoj smerom k osobným počítačom a CAD systémom ešte zvýšil význam tejto metódy, ktorá je začleňovaná do CAD systémov a tvorí jeden zo základných blokov moderného počítačového navrhovania.

Veľká pozornosť je venovaná rozvoju nového smeru v metóde konečných prvkov, pre ktorý sa zaužíval anglický termín „Domain Decomposition Method“. Pri tomto postupe je teleso rozdelené na niekoľko oblastí, ktoré majú relatívne jednoduchý geometrický tvar. Využíva sa to, že na oblastiach s jednoduchým tvarom je možné počítať tzv. rýchle algoritmy, čím sa značne zníži počet výpočtových operácií.

9.5 Prehľad simulačných programov

Návrh zlievarenskej technológie veľmi závisí od skúseností a vedomostí konštruktérov, technológov a zlievačov. Tie sú založené na vedomostiach množstva empirických pravidiel a sú získané dlhoročnou praxou. S rýchlym vývojom výpočtovej techniky je tu numerická simulácia ako nový nástroj pri návrhu a optimalizácii zlievarenských procesov. Používanie výpočtovej techniky v zlievarenstve má rastúcu tendenciu. Ukázalo sa, že zavedenie výpočtovej techniky pre modelovanie zlievarenských dejov znamená 40 %-nú úsporu času pri návrhu odliatku, 30 %-nú úsporu v laboratóriách a 25 %-né zvýšenie výťažnosti čo pozitívne vplyva na úsporu finančných prostriedkov.

V súčasnosti je vo svete využívaných niekoľko desiatok zlievarenských simulačných programov, ktoré sa snažia o zodpovedanie otázok týkajúcich sa zlievarenského procesu. Najpoužívanéjšie simulačné programy pre simuláciu zlievarenských procesov pre odlievajú liatiny sú:

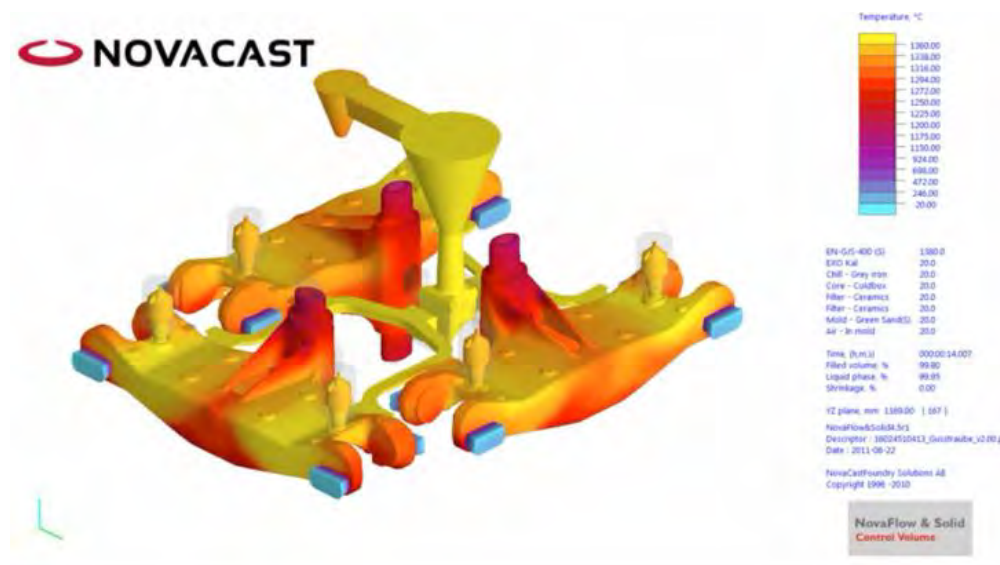
- NovaFlow & Solid
- Pam-Cast
- MAGMASOFT®
- SIMTEC/WinCast
- ProCast

9.5.1 NovaFlow & Solid

Program NovaFlow & Solid (NovaCast, S.A., Švédsko) je výhodne používaný v oblasti, ktorú môžeme nazvať „malou simuláciou“, a užívateľovi dáva predovšetkým globálny pohľad na priebeh plnenia, tuhnutia a na stanovenie veľkosti a rozloženia chýb pre ľubovoľný typ zliatiny. Pri výpočte priebehu plnenia formy sa súčasne rieši rovnica prúdenia a prestupu tepla. Teplotné pole odliatku na konci plnenia sa využíva pre následnú simuláciu tuhnutia. Do úvahy sa berie prúdenie nestlačiteľnej kvapaliny, vplyv Reynoldsovho čísla, trecie straty kovu v kanáloch. Pri

simulácii priebehu tuhnutia sa berie do úvahy zmena hustoty kovu počas tuhnutia, veľkosť objemových zmien.

Simulácia odlievania odliatku z LLG dokumentuje **obr. 9.94**.



Obr. 9.94 Simulácia odlievania v programe NovaFlow & Solid

Program má vlastnú širokú databázu tepelno-fyzikálnych vlastností zliatin a materiálov foriem. Užívateľ môže túto databázu dopĺňať a upravovať. Vizualizácia výsledkov je v 3D podobe vrátane animácie procesu. Program umožňuje zobrazíť vektory prúdenia, rozloženie teplôt tekutej fázy, rozloženie stiahnutí v 2D, 3D alebo v transparentnom móde zobrazenia. Ďalej umožňuje znázorniť časové priebehy teplôt vo zvolených miestach.

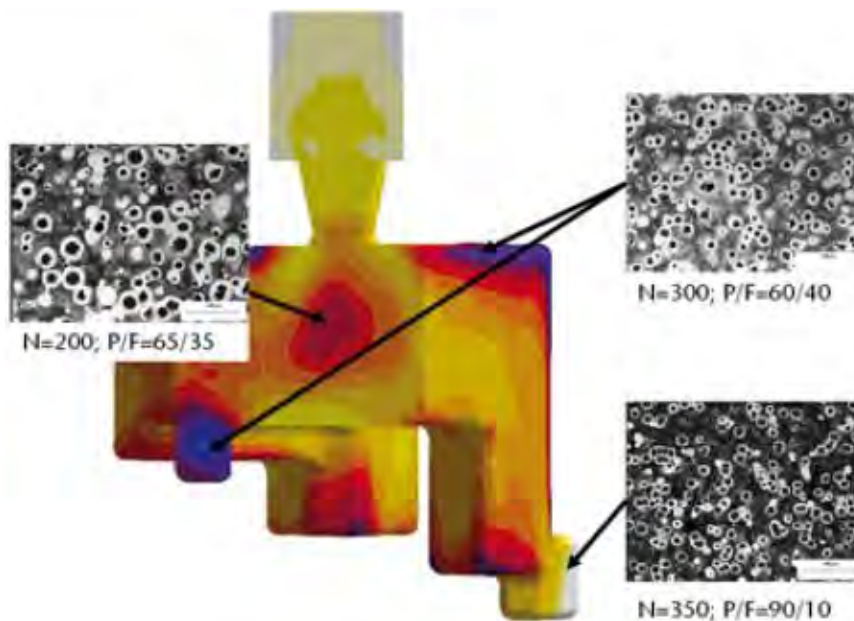
9.5.2 Pam-Cast

Program Pam-Cast (ESI Group, Francúzsko), tzv. systém „veľkej simulácie“ je precíznejší a detailnejší. Program rieši Navier – Stokesove rovnice turbulentného prúdenia kovu a vzduchu súčasne s tepelnou bilanciou s vysokou presnosťou bez akýchkoľvek aproximácií. Vstupné podmienky sú definované užívateľom v závislosti od času a teploty. Pri analýze je možné animovať pohyb voľnej hranice kovu, rozloženie tekutej a tuhej fázy, kritického podielu tuhej fázy, predikovať vznik stiahnutí, stanoviť medzidendritické vzdialenosti a pod.

9.5.3 MAGMASOFT®

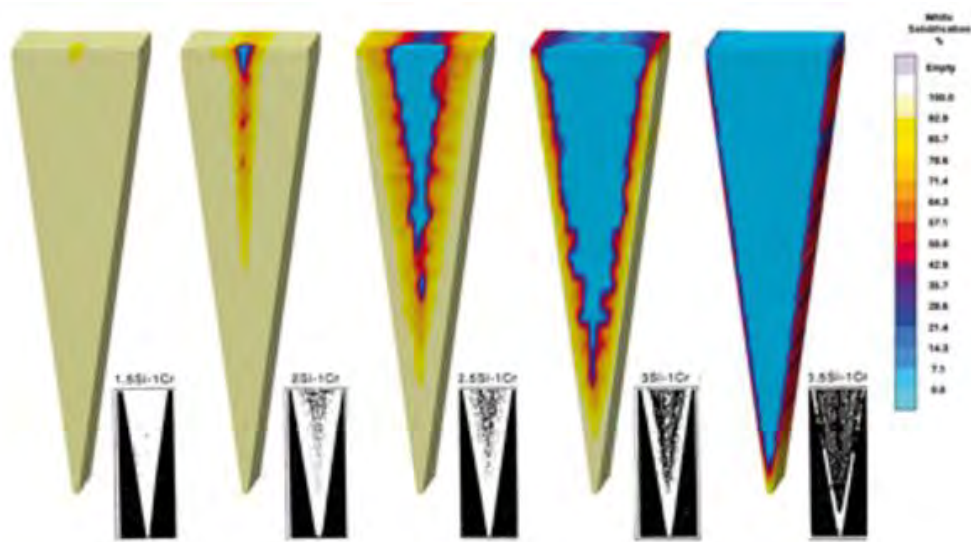
Jeden z najznámejších simulačných programov bol vyvinutý v spolupráci Technical University Aachen (Nemecko), Technical University of Copenhagen (Dánsko) a spoločnosťou Magma (Nemecko). Software Magmasoft je určený pre 2D a 3D simulácie plnenia a tuhnutia odliatkov, tepelného toku a teplotného poľa, výpočtu zvyškového pnutia, štruktúry, mechanických vlastností, inklúzií, stiahnutí a to všetko použitím matematického aparátu FEM – FDM. Ide o úplný a výkonný nástroj, použitím ktorého možno dosiahnuť zníženie nepodarkovosti, zvýšenie využitia kovu a zníženie celkových nákladov pri výrobe odliatkov. Program sa vyznačuje krátkym časom výpočtu, vysokou presnosťou, efektívnosťou a jednoduchosťou obsluhy.

Obr. 9.95 dokumentuje predikciu vzniku podielu perlitu a feritu v odliatku z LGG.



Obr. 9.95 Predikcia podielu perlitu a feritu v odliatku

Na **obr. 9.96** je príklad simulácie vplyvu obsahu Si na vznik a veľkosť zákalky v LLG.



Obr. 9.96 Vplyv obsahu Si na veľkosť zákalky v LLG

9.5.4 SIMTEC/WinCast

Program bol vyvinutý spoločnosťou RWP (Nemecko) a používa metódu konečných prvkov (sieť sa robí automaticky). Je to komplexný všestranný nástroj pre optimalizáciu konštrukcie a výrobného procesu výroby odlievok a ponúka široký rozsah informácií ako sú:

- priebeh liatia a ochladzovania odliatku,
- zvyškové pnútia
- zmraštenie a deformácie po odliatí,
- vznik pórovitosti,
- mikroštruktúru materiálu,
- pevnostné vlastnosti súčiastok,
- vhodnosť zvoleného liaceho systému,
- priebeh teplôt a návrh chladenia u kovových foriem.

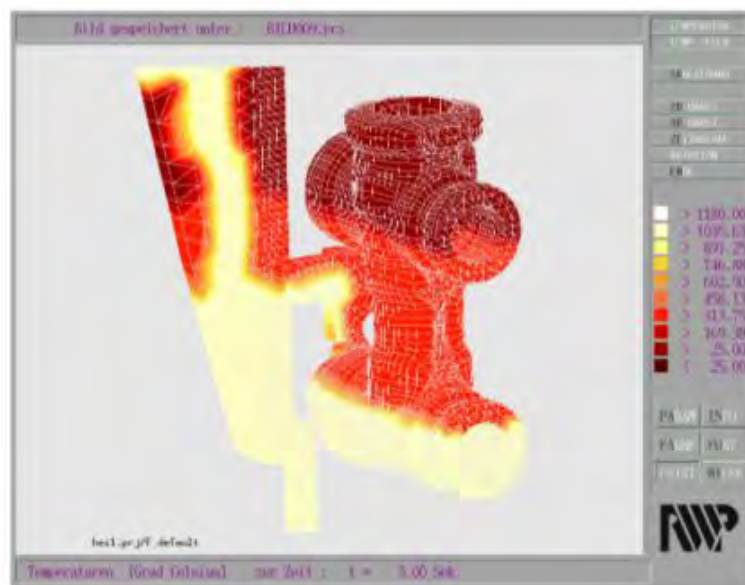
Sú vyvinuté špeciálne funkcie a moduly programu, ktoré urýchľujú presné nastavenie a posúdenie špecifických parametrov odlievania a termofyzikálnych vlastností materiálov.

WinCast je kompletný nástroj pre zlievarenskú simuláciu, vrátane konštrukcie tvaru odliatku (preprocesor FEM), výpočtové časti (procesor) a rada programov a funkcií pre vyhodnotenie výsledkov, animáciu a tlač (postprocesor).

Užívateľ nie je nútený importovať tvar odliatku z iného programu a môže ho upravovať alebo tvoriť priamo vo WinCaste. Komunikácia s inými programami je zaistená mnohými rozhraniami (FEM, VDA, IGES, STL ...).

Použitie matematického modelu FEM zaisťuje najrýchlejšie výpočty pri najvyššej presnosti vo všetkých častiach formy a odliatku.

Príklad simulácie v programe SIMTEC/WinCast (rozloženie teplôt) dokumentuje **obr. 9.97**.

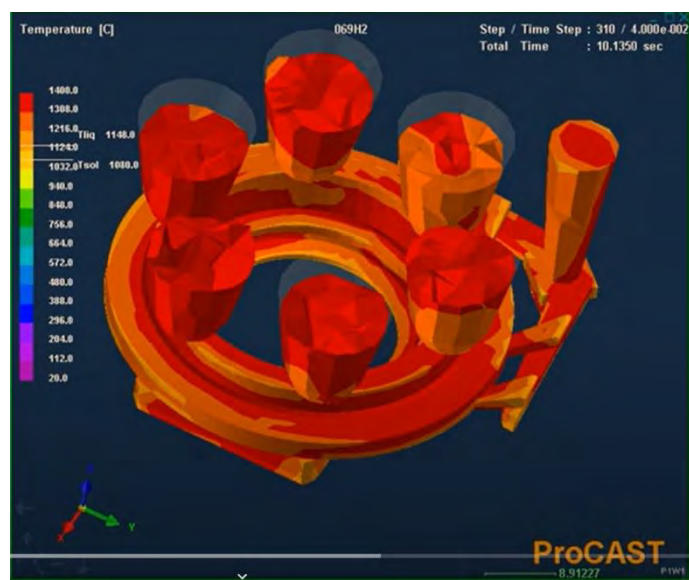


Obr. 9.97 Detail simulácie odlievania odliatku

9.5.5 ProCAST

Program ProCAST bol vyvinutý spoločnosťou UES v USA. Má širokú škálu možných použití, zoskupených podľa modulov. Využíva metódu konečných prvkov (FEM). ProCAST ponúka možnosť určenia entalpie a pevných frakcií v závislosti od teploty a zloženia zliatiny. Vyznačuje sa vysoko výkonným sieťovým režimom. Program integruje: databázu materiálových charakteristík, modely tepelnej analýzy, tepelného toku, metalurgických a špecifických modelov.

Ukážka simulácie odlievania odliatku z LGG je zobrazená na **obr. 9.98**.



Obr. 9.98 Simulácia odievania odliatku z LGG

10. HISTORICKÝ PREHĽAD VÝROBY ODLIATKOV Z LIATINY

„Príbeh liatiny je zložitá časť ságy o odlievání kovov, je to fascinujúci príbeh, ktorého začiatky zanechávajú svoje stopy už v začiatkoch ľudskej civilizácie. Je pretkaný legendami o fantastických zbraniach a vynikajúcich umeleckých dielach. Odlievanie železa (liatiny) vyšlo z temnôt staroveku najprv ako mágia, neskôr sa vyvinulo na umenie a potom sa z neho stala technológia a nakoniec ako komplex interdisciplinárnych vied, ktorým je dodnes. Civilizácia ako ju poznáme, by neexistovala bez odlievania kovov vo všeobecnosti a predovšetkým bez odievania liatiny“.

História akéhokoľvek predmetu alebo činnosti sa začína otázkou „kto bol prvý?“ Malo by nás zaujímať, kto odlial prvý odliatok a ako takýto odliatok vyzeral. Začiatky odlievania kovov siahajú do juhovýchodnej a centrálnej Anatólie, kde boli nájdené prvé tvarové odliatky z medi, ktoré sú datované do obdobia 8200 rokov p.n.l. Naši predkovia začali dlhú cestu, ktorá viedla k výrobe, spracovaniu a využitiu prírodnej medi a táto cesta trvala približne do 5. tisícročia p.n.l.

Znalosť spracovania kovov bola v starých kultúrach veľmi vysoko cenená. Tí, ktorí vedeli opracovať kov mali v spoločnosti vysoké sociálne postavenie.

Železo bolo spájané s vesmírom, keďže meteoritické železo „spadlo z neba“ a niektorí autori predpokladajú, že prvé spracovanie železa súvisí práve s meteoritickým železom, ale nálezy z Anatólie naznačujú, že železo bolo vedľajším produktom pri tavení medených rúd obsahujúcich železo.

Liatina je dôležitým zlievarenským materiálom, využívaným v strojárstve, stavebníctve, spotrebnom priemysle ale aj v oblasti umeleckého odlievania kovov (plastiky, dekoratívne predmety, fontány, lavičky). Liatina patrí medzi zliatiny železa a jej história a rozvoj technológie výroby je úzko spojený so znalosťami metalurgického spracovania železnej rudy.

Číňania boli prví ľudia, ktorí úspešne a pravidelne vyrábali liatinu už 800 až 700 rokov p.n.l. Najstaršie liatinové predmety, ktoré boli nájdené, boli datované do čias dynastie Han (206 p.n.l. – 220 n.l.) a zahŕňajú kachle (**obr. 10.99**), vázu, panvicu a rôzne iné vybavenie.



Obr. 10.99 Najstaršie známe liatinové kachle z dynastie Han

Liatina sa stála v Číne populárnou a využívala sa nie len na výrobu rôzneho náradia do domácnosti, ale aj na umelecké odliatky (kultové predmety – kadidla, sochy, pokrytie striech pagod. Typickým príkladom je pagoda, ktorá stojí pred chrámom Yuguan, **obr. 10.100**.



Obr. 10.100 Železná pagoda pred chrámom Yuguan v Dangyang, postavená v roku 1061, na ktorej je 38 300 kg liatiny a má výšku 17,9 m

Jedným z najdôležitejších majstrovských kúskov je liatinový lev v Cangzhou, **obr. 10.101**. Je to najstarší a najväčší liatinový odlieatok v Číne, pochádza z roku 953 n.l., jeho hmotnosť je okolo 40 ton, výška 6 metrov. Lev stratil svoj chvost v 17. storočí, jeho pysk a brucho boli zničené počas búrky pred 200 rokmi a bronzová socha, ktorá stála na vrchole lotosového kvetu na jeho chrbte bola ukradnutá pred niekoľkými storočiami.



Obr. 10.101 Liatinový lev v Cangzhou

Liatina sa v Európe začala využívať až v polovici 12. až 13. storočia (územia dnešného Anglicka, Nemecka a Talianska). Vzhľadom na nedostatok technických znalostí o materiáloch a o základných výrobných metódach bolo jej použitie obmedzené. Využívala sa predovšetkým na výrobu domácich predmetov, hrncov a kotlov. Tieto boli často veľmi krehké, čo viedlo k výrobe ťažkých – hrubých liatinových odlievok, ktoré vydržali manipuláciu s nimi.

Významným úspechom bola inštalácia liatinového vodovodného potrubia na hrade Dillenburg v Nemecku v roku 1455.

Bronz bol dlhé stáročia bezkonkurenčným materiálom pri výrobe umeleckých odlievok. Umelecká liatina sa stala veľkou konkurenciou bronzu.

Najstaršia európska umelecká liatina pochádza z roku 1496. Ide o plakety s podobizňami Ľudvika XII. a Anny de Bretagne.

História odlievok liatinových ozdobných dosiek pre krby, kachle, studne a hroby siaha do 15. storočia a úzko súvisí s rozvojom vysokej pece pre tavenie liatiny.

Modely, často vyrobené známymi majstrami, sa zaformovali do otvoreného pieskového lôžka na tzv. formu v pôde. Ich motívom boli často erby alebo príbehy z biblickej a svetskej histórie. Z výskytu rovnakého modelu v rôznych hutiach možno usudzovať, že modely putovali alebo sa zhotovovali kópie odliatkov, ktoré sa dajú poznať podľa dvojitého zmraštenia.

Skriňové liatinové kachle zostavené z umeleckých dosiek odlievajúcich do pôdných foriem vznikali okolo roku 1500. Okrem skriňových kachlí sa vyvinuli rôzne ďalšie tvary, takže vznikla celá kultúra liatinových kachlí.

Prvý vrchol odlievania liatiny bol v 16. storočí a jeho znakom boli umelecké dosky, druhý vrchol sa dostavil ku koncu 18. storočia a priniesol nielen malé kusy nábytku (stoličky, vešiaky), umelecké predmety a plastiky s motívmi zo všetkých oblastí života, ale v najväčšom rozkvele i jemne cizelovaný liatinový šperk, **obr. 10.102**. Liatinový šperk sa stal veľmi úspešným a populárnym. Bolo módne nosiť pre zmenu namiesto zlata Geissovo „Fer de Berlin“, berlínske železo. Návrhy šperkov robili veľkí majstri ako Karl Fridrich Schinkel, Daniel Rauch a Johan Gottfried Schadow.



Obr. 10.102 Liatinový šperk



Obr. 10.103 Liatinová žehlička zdobená soškou draka (1850)

Postup tavenia zdokonaľovaný vďaka téglíkovým a stále viac používaným kuplovým peciam umožňoval presnejšie nastavenie zloženia liatiny, než to bolo možné u vysokej pece.

Liatina sa aj naďalej využívala na výrobu predmetov do domácnosti, **obr. 10.103**, ale začala sa používať aj pri výrobe hlavných kanónov. Z liatiny sa odlievali dvere a robili sa klopadla na dvere.

Z 18. Storočia pochádzajú aj unikátne liatinové topánky, **obr. 10.104**, ktoré boli vyrobené pre chemikov. Predpokladá sa, že ich darca (topánky sú umiestnené v múzeu) kúpil od priameho potomka slávneho francúzskeho chemika Antoina Lavoisiera. Sú vyrobené z liatiny. Každá topánka váži viac ako 1- 1,5 libry. Topánky sú nasúvateľné, okolo päty, bokov a priehlavku sú nity.



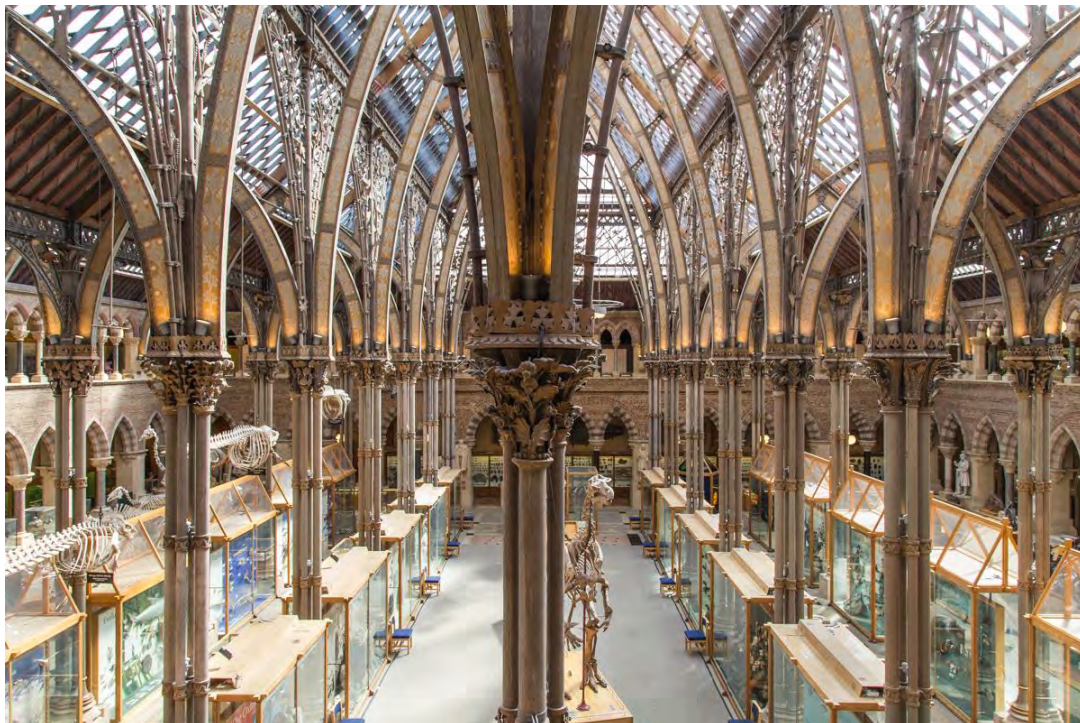
Obr. 10.104 *Liatinové topánky pre chemikov z 18. Storočia (kombinácia liatiny a kože) [4]*

Liatinové odliatky sa začali využívať aj v architektúre. Pravdepodobne najstaršia veľká európska stavba, ktorá urobila liatinu známou aj ako konštrukčný materiál, je Iron Bridge (liatinový most), **obr. 10.105** s dĺžkou asi 30 m cez rieku Severn pri Wolverhamptone v Anglicku, ktorý bol zhotovený v roku 1779. Konštrukčné prvky s celkovou hmotnosťou 380 t boli odliate u Abrahama Daarbyho III v Coalbrookdale podľa návrhu Thomasa Farnollsa Pricharda.



Obr. 10.105 Liatinový most Iron Bridge cez rieku Severn

Obr. 10.106 ukazuje hlavnú halu Oxfordského univerzitného múzea, kde liatinové stĺpy podopierajú strechu (1861).



Obr. 10.106 Oxfordské univerzitné múzeum

„Liatinová architektúra“ predstavovala prominentný štýl v čase priemyselnej revolúcie. Liatina bola relatívne lacná a špeciálna oceľ ešte nebola vynájdená. Famóznym príkladom tejto architektúry je Bulharský železný chrám v Istanbule, **obr. 10.107**. Bohato zdobený chrám v neogotickom štýle bol dokončený v roku 1898. Hlavný skelet chrámu, ktorý bol z ocele, bol pokrytý prefabrikovanými liatinovými tabuľami vážiacimi 500 ton, ktoré boli vyrobené vo Viedni.



Obr. 10.107 Bulharský železný chrám v Istanbule

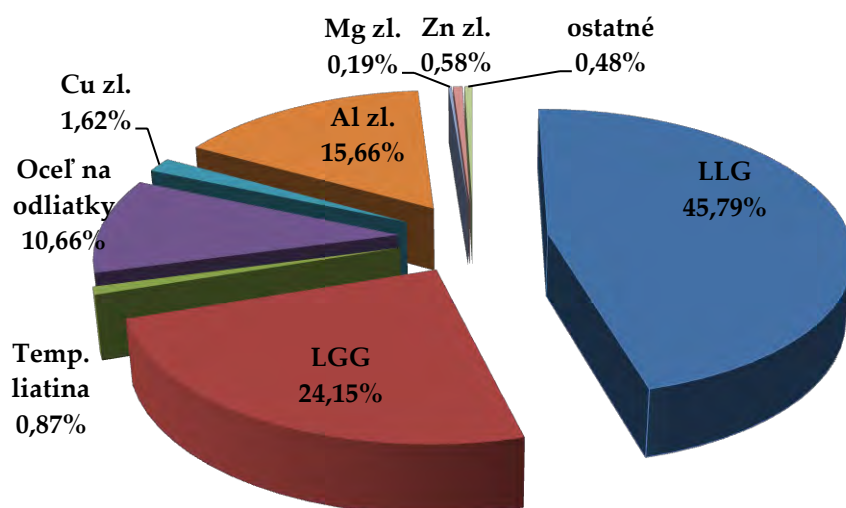
Znalosti o štruktúre a mechanických vlastnostiach liatiny boli až do zavedenia mikroskopie v roku 1880 veľmi obmedzené. V zásade sa liatina klasifikovala len podľa farby lomu na bielu a sivú. Až v roku 1938 bol patentovaný postup výroby tvárnej liatiny. Novodobá história liatiny je tiež spojená so zavedením vermikulárnej liatiny približne v 50-tych až 70tych rokoch 20. storočia.

Na území bývalého Československa sa predmety z liatiny začali vyrábať od 15. storočia, prudký rozvoj jej využitia nastal v 19. storočí s nástupom priemyselnej revolúcie. Predovšetkým Čechy sa stali hlavným producentom odliatkov z liatiny v celej Habsburskej monarchii. V období vojen, kedy bola veľký dopyt po bronz (výroba del) a po drahých kovoch (financovanie vojny) boli z liatiny odlievané

zvony, cimbaly aj šperky. Liatinový zvon má kratší zvonivejší ton a niektoré zvonice sú nimi ozvučené dodnes.

11. POUŽITIE LIATINOVÝCH ODLIATKOV

Liatinové odliatky zastupujú viac ako 70 % z celosvetovej produkcie výroby odliatkov. Z tohto podielu pripadá viac ako 50 % LLG a okolo 20 % LGG. Objem temperovanej liatiny a ocele na odliatky predstavuje podiel cca 10 % – **obr. 11.108**.



Obr. 11.108 Objem výroby odliatkov podľa materiálov vo svete

Výroba odliatkov pre jednotlivé priemyselné odvetvia sa podstatne nemení. Stále vysoko prevažuje objem výroby pre automobilový priemysel. Jeho prednosťou je veľkosériová až hromadná výroba.

Odliatky z LLG sú jedny z najlacnejších druhov odliatkov zo zliatin na báze železa. Majú prijateľnú ťažnosť, pevnosť v ťahu, medzu klzu a odolnosť voči opotrebeniu. Využíva sa na výrobu odliatkov ako sú bloky valcov spaľovacích motorov, zotrvačníky, prevodové skrine, rozdeľovače, rotory, kotúčové brzdy, hydraulické komponenty, časti zavesenia kolies osobných a nákladných automobilov, ventily, stojany obrábacích strojov, kanálové poklopy, časti kachlových pecí a ďalšie (**obr. 11.109**).



Obr. 11.109 Odliatky z LLG

Odliatky z bielej liatiny sú extrémne odolné voči opotrebeniu, ale sú krehké. Vykazujú vysokú tvrdosť v dôsledku svojej mikroštruktúry obsahujúcej karbidy železa a sú ťažko obrobiteľné. Odliatky z bielej liatiny sa používajú v oteruvzdorných častiach, kde ich krehkosť nie je nevýhodná, ako sú napr. krycie vložky, kalové

čerpadlá, guľové mlyny, zdvíhacie tyče, vytlačacie dýzy, príruby, potrubné tvarovky, drviče a obežné kolesá čerpadiel.

Odliatky z temperovanej liatiny vykazujú dobrú pevnosť v ťahu a ťažnosť a používajú sa na elektrické armatúry a zariadenia, ručné náradia, potrubné armatúry, podložky, konzoly, poľnohospodárske vybavenie, banské vybavenie a časti strojov.

LGG je vďaka mikroštruktúre húževnatejšia ako LLG, resp. biele liatiny. Z tohto dôvodu sa používa na odliatky pre vodovodnú a kanalizačnú infraštruktúru, odoláva tepelným cyklom a preto je vhodná v prevodoch a súčiastiach podvozku automobilov, brzdách a ventiloch, čerpadlách a hydraulických častiach a krytoch veterných turbín (**obr. 11.110**).



Obr. 11.110 Odliatky z LGG

Vylepšené mechanické vlastnosti ADI liatiny umožňujú nahradiť oceľové odliatky a výkovky. Odliatky z ADI sú využívané v oteruvzdorných a strojárskych komponentoch v rôznych odvetviach vrátane automobilového priemyslu, stavebníctva, banského, poľnohospodárskeho, železničného a vojenského priemyslu (obr. 11.111).



Obr. 11.111 Odliatky z ADI liatiny

LITERATÚRA

- [1] Roučka, J.: Metalurgie litin, VUT Brno, 1998, ISBN 80-214-1263-1
- [2] Gedeonová, Z., Jelč, I.: Metalurgia liatin, HF TU Košice, 2000, ISBN 80-7099-516-5
- [3] Koreň, J., Jelč, I.: Optimalizácia tavenia liatin, Alfa Bratislava, 1988, OTL 063-057-87
- [4] Boutbee, E., F., Schofield, G., A.: Typical microstructure of cast metals, The institute of British foundrymen, Birmingham 1981
- [5] Skočovský, P., Šiman, I.: Štruktúrna analýza liatin, Alfa bratislava, 1989, SIBN 80-05-00092-8
- [6] Zábavník, V., Buršák, M.: Materiál, Tepelné spracovanie, Kontrola Kvality, Emilena Košice, 2004, ISBN 80-8073-159-4
- [7] Kovařík, J., Barth, H.: Kontrola a řízení jakosti grafitických litin využitím adaptivní termické analýzy systému ATAS, Slévárenství, XLVII, 1999, č. 8 – 9, s. 502 – 508
- [8] Motz, J., M.: Giesserei 69, 1982, č. 22, s. 633 - 641
- [9] Giršovič, N. G.: Kristallizacija i svojstva čuguna v otlivkach, Mašinostrojenje, Moskva 1966
- [10] Shirani, M., Härkegard, G.: A review on fatigue design of heavy section EN-GJS-400- 18-LT ductile iron wind turbine castings, Energy Equipment and Systems, Vol. 2, pp. 5 – 24, 2014
- [11] Pešlová, F., Obuchová, M.: Štruktúrne vlastnosti grafitických liatin, pp. 108 – 112, 2016
- [12] Slebodník, V.: Metalurgia liatin, ES VŠT, Košice 1982
- [13] Taschenbuch der Giesserei-Praxis 1998, Schiele & Schön, Berlin 1998, s. 184 - 185
- [14] Plachý, J., Němec, M.: Metalurgie a technologie slévárenských slitin, ČVUT, Praha 1986
- [15] Davies, Ph.: Bezjádrové indukční pece – přehled výběrových kritérií, Slévárenství XLIV, č. 4, s. 263 – 265, 1996
- [16] Neuman, F.: Theorien über das Impfen, Giesserei 83, 14, 1996, s. 11 - 15
- [17] Ziegler, R.: Einfluss von Kohlenstoff, Silicium, Mangan, Phosphor und Schwefel auf einige primäre Eigenschaften des Gusseisens mit Lamellengraphit, Giesserei 51, 41, 964, s 85 - 94
- [18] Černogorov, P., V. a kol.: Nizkokremnistyje seryje čuguny, Litejnoje proizvodstvo, č. 8, s. 1

- [19] ISO 945-1, International Standard, Microstructure of cast irons – part 1: Graphite classification by visual analysis, Second edition, 2017
- [20] ISO 16112, Compacted (Vermicular) Graphite Cast Irons—Classification, 2017
- [21] Baer, W.: Chunky graphite in ferritic spheroidal graphite cast iron: Formation, prevention, characterization, impact on properties: An overview, International Journal of Metalcasting, 2018, <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00363-8>
- [22] Asensio, J., Pero-Sanz, J., A., Verdeja, J., I.: Microstructure selection criteria for cast irons with more than 10 wt.% chromium for wear applications, Materials Characterization 49 (2003), pp. 83 – 93
- [23] Futáš, P., Pribulová, A.: Quality criteria as implement for advisement of metallurgical quality of grey iron, Evaluation of people and products features, Celje, University of Maribor, 2014, ISBN 978-961-6562-98-0
- [24] Futáš, P., Petrik, J., Vinter, G., Junáková, A.: Improving the properties of cast iron made from steel scrap by Ti alloying, SGEM 19th, pp. 719 – 726, 2019
- [25] Futáš, P., Pribulová, A., Petrik, J., Pokusová, M., Junáková, A.: The study of synthetic cast iron quality made from steel scrap, SGEM 18th, pp. 215 – 222, 2018
- [26] Chisamera, M., Riposan, I., Stan, S., Albu, C. B., Brezeanu, C.: Comparison of Oxy-sulfide Alloy Tablets and Ca-bearing FeSi75 for Late Inoculation of Low Sulfur Grey Irons, 2007
- [27] Marincek, B.: Praxis der Erstarrungsverhaltensmessung als Voraussetzung für die Vergleichsmässigung und Qualitätsoptimierung bei Gussstücken aus Gusseisen mit Lamellengraphit und Gusseisen mit Kugelgraphit, Giesserei-Praxis 1986, s. 83 - 94
- [28] Vondrák, V., Hampl, J., Válek, T.: Vliv objemových změn na velikost nálitků u grafitizujících litin, Slévárenství, LI, 2003, č. 7, s. 259 - 265
- [29] Caspers, K., H.: Eschmelzen von synthetischem Gusseisen im Kupolofen, Giesserei-Praxis, 1998, č. 5, s. 190 - 199
- [30] Deike, R.: Litina s lupínkovým grafitem, Metalurgie a zpracování taveniny, Slévárenství, 2006, LIV, č. 7 – 8, s. 304 - 306
- [31] Horák, L. a kol.: Zákalka pri odlievání odpadních tvarovek ze šedé litiny do kovových forem a možnosti jejího odstránění, Slévárenství XXII, 1974, č. 2, s. 41
- [32] DFB-Information. Giesserei 81, 16, 1994, s. 561 - 562
- [33] Rymaszewski, S.: Wplyw podstawowego skladu chemicznego na powstanie naprezen podczas krzepniecia odlewow z zeliwa szarego, Przegląd Odlewnictwa 1980, č. 3, s. 63

- [34] Mampacy, I., F.: The manganese-sulphur in grey iron, Fonderie Belge 1981, č. 1, s. 11
- [35] Hucíková, Z., Jelč, I.: Slévárenství XXIV, 1976, č. 10, s. 642 - 649
- [36] Novák, V., Skrbek, B.: Třídění litiny a kontrola litiny s kuličkovým grafitem ultrazvukem, Slévárenství, XLVIII, 2000, č. 1, s. 27 – 28
- [37] Murgaš, M.: Grafitické liatiny 1, 2, STU, Trnava 2005
- [38] Röhring, K.: Int. Journ. Of Castings Research, 11, 1999, s. 477 – 582
- [39] Murgaš, M., Pokusová, M., Pokusa, A.: Určenie zloženia liatiny s guľôčkovým grafitom v závislosti od hrúbky stien odliatkov, Slévárenství, XLVI, 1998, č. 3 – 4, s. 101 – 103
- [40] Lazace, J.: Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science, 28 A, 1997, č. 10, s. 2015 – 2025
- [41] The Sorelmetal Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montréal, Canada 2004
- [42] Karsay, S., I.: Gusseisen mit Kugelgraphit I., QIT-FER ET TITANE INC., 1992
- [43] Karsay, I., S.: Tvárna liatina I., Výroba, Fompex, Trenčín 1995
- [44] Pavlík, I.: Technológia výroby litiny s kuličkovým grafitom, SVÚM – VSL Brno
- [45] Mores, A.: Zasedání mezinárodních komisí WFO, 7.1 – litina s lupínkovým grafitem a 7.2 – litina s kuličkovým grafitem, Slévárenství, LI, 2003, č. 1, s. 44 – 45
- [46] Němec, M., Sýkora, P., Svoboda, O.: Litina s kuličkovým grafitem – potenciální materiál pro slévárny přesného lití, Slévárenství, XLIX, 2001, č. 10, s. 592 – 597
- [47] Sýkora, P.: Metalurgie výroby litiny s kuličkovým grafitem z elektrických pecí, Slévárenství, XLVII, 1999, č. 6 – 7, s. 378 – 384
- [48] Henych, I.: Vývojové trendy v oblasti metalurgie litiny s kuličkovým grafitem, Slévárenství, XLI, 1993, č. 4, s. 173 – 180
- [49] Schürmann, E.: Zbornik referator, 37, Ljubljana 1996, s. 47 – 57
- [50] www.vesuvius.com
- [51] Wolters, D.: Litina s kuličkovým grafitem, Slévárenství, XLVI, 1998, č. 5 – 6, s. 230 – 237
- [52] Orths, K., Weiss, W.: Bestimmung der Kieselsäure und anderer Oxide im Gusseisen, Giesserei-Forschung 25
- [53] Píšek, F. a kol.: Slévárenství I. – Obecná část., 2. vyd., Praha, s. 499
- [54] Neuman, F.: Giesserei 83 (1996), č. 14, s. 11 – 15
- [55] Lambresque, C., Gange, M.: Transactions, AFS, 108, 2000, s. 31 – 38
- [56] Henych, I.: Firemný materiál Georg Fischer AG, Schaffhausen

- [57] Caspers, K., H.: Praktické problémy při optimalizaci tavení litiny v indukční peci, Slévárenství, XLVI, 1998, č. 11 – 12, s. 427 – 435
- [58] Caspers, K., H.: Technisch – wirtschaftlicher Vergleich induktiver und Schachtschmelzmethoden, Giesserei 85, 1998, č. 5. – 8. Mai, s. 43 - 47
- [59] STN 42 0461, Rozloženie lupienkového grafitu, etalonová rada 2
- [60] Vaško A., Skočovský, P.: Výhody použitia karbidu kremíka vo vsádzke pri výrobe liatiny s guľôčkovým grafitom, CO-MA-TECH 2002, 1. diel, Trnava 2002, s. 144 – 149
- [61] Plachý, J., Otáhal, V.: Jakostní litiny, SNTL, Praha 1956
- [62] QIT – Fer et Titane Inc.: Tvárna liatina I., Výroba, Fomplex Trenčín, 1995, ISBN 80-967498-8-9
- [63] Hanus, A., Válek, T.: Přehled možných způsobů modifikace tvaru grafitu, Slévárenství, LII, 2004, č. 9, s. 388 – 389
- [64] Olawale, J., O., Ibitoye, S., A., Oluwasegun, K., M.: Processing techniques and productions of ductile iron: A review, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 7, Issue 9, 2016, ISSN 2229-5518
- [65] Hanus, A., Hanusová, P.: Continuous modification of cast iron by the flotret method, Archives of Foundry Engineering, Vol. 12, Issue 1/2012, ISSN 1897-3310
- [66] Herzán, Z.: Vývoj výroby litin s kuličkovým grafitem – základní způsoby modifikace, Slévárenství, XLIX, 2001, č. 7 – 8, s. 396 – 402
- [67] Wolters, D., B.: Litina s kuličkovým grafitem, Metalurgie, Slévárenství, XLVII, 1999, č. 5, s. 348 – 351
- [68] Ebert., B.: Postupy spracovania horčíkom, Giesserei – Praxis, 2000, č. 4, s. 171 – 176
- [69] Caspers, K., H.: prednáška fy. Keßl Gießereibedarf GmbH
- [70] Šlajs, J.: Vsádzkové suroviny a ekonomika sléváren, Slévárenství, XLVII, 1999, č. 6 – 7, s. 390 – 393
- [71] Mores, A.: Technické požadavky a přejímání odlitků z litiny s kuličkovým grafitem, Slévárenství, XLIX, 2001, č. 5 – 6, s. 355 – 361
- [72] Futáš, P., Pribulová, A., Pokusová, M.: Possibilities reducing of energy consumption by cast iron production in foundry, Materials Science Forum, Vol. 998, pp. 36 – 41, 2020, ISSN 1662-9752
- [73] Stránský, K., Šenberger, J., Million, B.: Vliv vsádzkových surovin na vlastnosti litin s kuličkovým grafitem, Slévárenství, XLIX, 2001, č. 7 – 8, s. 388 – 395
- [74] Deike, R.: Litina s lupínkovým grafitem, Slévárenství, LI, 2003, č. 2 – 3, s. 118 – 119

- [75] Walters, B., D.: Litina s kuličkovým grafitom a litina s červíkovitým grafitom, Slévárenství, LI, 2003, č. 2 – 3, s. 119 – 122
- [76] Walters, D.: Litina s kuličkovým grafitom I. část, Slévárenství, XLV, 1997, č. 10, s. 399 – 402
- [77] Bartocha, D. a kol.: Vsázkový materiál, technologie tavení a struktura litiny s lupínkovým grafitem, Slévárenství, LIII, 2005, č. 7 – 8, s. 319 – 323
- [78] Šajgal, J., Lauermann, J., Jedinák, A., Slezáková, R.: Vliv metalurgického zpracování taveniny na mechanické vlastnosti odlitků z tvárné litiny, Sborník vědeckých prací VŠB Ostrava, č. 1, 2006, s. 217 – 226
- [79] Cast Faktes – Ductile Iron (a series of articles). Modern Casting: April 1983, p. 32 A; May 1983, p.37 – 38, June 1983, p. 32 – 33; July 1983, p. 49
- [80] Boulton, E., F., Schofield, G., A.: Typical microstructures of cast metals, The institute of British foundrymen, Birmingham, 1981
- [81] Gábrišová, Z., Brusilová, A.: Tepelné spracovanie, STU Bratislava 2019
- [82] Harding, R., A.: The production, properties and automotive applications of austempered ductile iron, Kovove Mater. 45, pp. 1 – 16, 2007
- [83] Futáš, P.: Eliminácia nepriaznivého vplyvu ocele vo vsádzke na výslednú kvalitu LLG, Habilitačná práca, HF TUKE Košice 2014
- [84] Futáš, P.: Vplyv vsádzkových surovín na kvalitatívne vlastnosti liatin, Dizertačná práca, HF TUKE Košice 2008
- [85] Futáš, P., Pribulová, A., Fedorko, G., Molnár, V.: Influence of steel scrap in the charge on the properties of gray cast iron, ISIJ International 57(2), pp. 374 – 379, 2017, ISSN 09151559
- [86] Futáš, P., Pribulová, A., Vasková, I.: Influence of steel scrap in a charge on cast iron properties, In: Archives of Foundry Engineering, Vol. 8, No. 2, p. 71 – 74, ISSN 1897-3310, 2008
- [87] Futáš, P., Pribulová, A., Pokusová, M.: Possibilities reducing of energy consumption by cast iron production in foundry, Materials Science Forum 998 MSF, Singapore, pp. 36 – 41, ISSN 02555476, 2020
- [88] Pribulová, A., Futáš, P., Pokusová, M.: Influence of charge composition on EN-GJS-500-7 ductile iron properties in foundry operating conditions, Materials Science Forum 998 MSF, Singapore, pp. 42 – 47, ISSN 02555476, 2020
- [89] Pokusová, M., Gábrišová, Z., Brusilová, A., Pribulová, A., Futáš, P.: Abrasion wear resistance of ni-mo alloyed high-chromium cast iron, Materials Science Forum 998 MSF, Singapore, pp. 30 – 35, ISSN 02555476, 2020

- [90] Futáš, P. a kol.: Vplyv zvýšeného podielu ocelového šrotu vo vsádzke na kvalitatívne vlastnosti liatiny EN-GJL 250, Slévárenství, Vol. 57, No. 9-10 (2009), p. 348-350, ISSN 0037-6825
- [91] Futáš, P., Pribulová, A., Malik, J., Vasková, I.: Utilization advantages of steel scrap for the production of cast iron, Proceedings book 8th International Foundrymen conference, Zagreb, University of Zagreb, 2008, ISBN 9789537082062
- [92] Weiss, E., Fedorko, G., Futáš, P., Pribulová, A., Vasková, I.: Dependence of quality properties for grey iron on used raw materials, Metalurgija, Vol. 48, no. 1 (2009), p. 43-45, ISSN 0543-5846
- [93] Futáš, P., Jelč, I., Vasková, I. a kol.: The Gist of Thermal Stresses of Cast Iron Castings, Manufacturing technology, June 2013, Vol 13, No. 2, p. 173 – 177
- [94] Callister, D. W.: Materials Science and Engineering, Department of Metallurgical Engineering the University of Utah, 2009.
- [95] Kagawa, A., Okamoto, T.: Partition of alloying elements in freezing cast irons and its effect on graphitization and nitrogen blowhole formation, Osaka, 2011, The institute of scientific and Industrial research Osaka University
- [96] Wilberfors, F., Ingvar, Svensson, I.: The effect of nitrogen and inoculation on the tensile properties and microstructure of cast iron lamellar, Södertälje, Jönköpings university, 2010
- [97] Qujie, Zhai, Hanqi, H.: Effect of nitrogen on matrix structure of gray cast iron, Acta Metallurgica Sinica, series A, Vol. 6, No. 6, pp. 370 372, 1993
- [98] Mampaey, F. "The manganese:sulfur ratio in gray irons," Fonderie Belge – De Belgische Gieterej, vol. 51, no. 1, pp. 11-25 (March 1981)
- [99] Elbel, T. a kol.: Vadi odlitků ze slitin železa, Matecs Brno, 1992
- [100] Krutiš, V., Kováč, M., Hnilica, R., Bryksí, V.: Numerická simulace technologických procesů jako nástroj komunikace, Slévárenství, 2007, č. 4, 182 – 183
- [101] Kovařík, J., Hirsch, F., Kuzma, Z.: Optimalizace technologie pomocí programu ProCast, Slévárenství, 2004, č. 10, s. 414 – 417
- [102] Futáš, P., Malik, J.: Aplikovaný software v zlievarenstve, Košice 2010
- [103] Weiß, K., Gundlach, Honselund, Ch., Gundlach, J.: RWP – WINCAST SIMULATIONS SOFTWARE zur Prozeßsimulation und Produktentwicklung Möglichkeitender, Roetgen 1999, Möglichkeitender Simulationstechnik
- [104] Futáš, P., Pribulová, A., Fedorko, G., Molnár, V., Junáková, A., Laskovský, V.: Failure analysis of a railway brake disc with the use of casting process

- simulation, Engineering Failure Analysis, 2019, Vol. 95, pp. 226 – 238, ISSN 13506307
- [105] https://www.youtube.com/watch?v=cI_278AZToQ
- [106] Lefebvre, D.: PamCast Product News, EuroPam, Antibes 2007
- [107] <https://www.magmaflow.de/>
- [108] <https://novacast.se/>
- [109] Herman, A., Svárovský, M., Kovařík, J., Roučka, J.: Počítačové simulace ve slévárenství, ČVUT Praha, 2000, ISBN 80-01-02220-X
- [110] Marginean, I., Bratu, C., Cocolas, S.-A.: Software used at castings productions, The annals of “dunarea de jos” university of galati, Fascicle IX, Metallurgy and materials science, No. 2, pp. 101 – 105, ISSN 1453-083-X
- [111] Stefanescu, D.M.: A History of Cast Iron, ASM Handbook, Volume 1A, Cast Iron Science and Technology, 2017
- [112] Stölzel, K.: Giesserei über Jahrtausende, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundindustrie, 1978.
- [113] Engels, G.: 5000 let odlévání kovů. Slévárenství, 1995, s.301 – 306.
- [114] https://americanhistory.si.edu/collections/search/object/nmah_2621
- [115] Průzkum a ošetření předmětu z litiny, metodický materiál M1/2008, Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace
- [116] https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_Lion_of_Cangzhou
- [117] http://www.wikiwand.com/cs/Iron_Bridge
- [118] www.alamy.com ETN6XO
- [119] <https://www.alamy.com/istanbul-st-stephen-church-in-bulgar-made-of-cast-iron-shipped-over-image6499843.html>
- [120] Sołtyski, M., S., Kordas, P., Skurka, K.: Trends in the Production of Castings in the World and in Poland in the XXI Century, Archives of foundry engineering, Vol. 16, Issue 2/2016, 5 – 10, ISSN 2299-2944
- [121] <https://www.statista.com/statistics/237526/casting-production-worldwide-by-country/>
- [122] <http://m.yuloncasting.com/>

POĎAKOVANIE

Zato, že vznikla táto monografia sa chceme poďakovať Agentúre pre podporu vedy a výskumu, ktorá nám pridělila finančné prostriedky na riešenie projektu **APVV-16-0485**.

Naše poďakovanie patrí recenzentom prof. Ing. Mariánovi Murgašovi, CSc. a prof. Ing. Vieroslavovi Molnárovi, PhD. a taktiež Ing. Imrichovi Jelčovi, CSc. za ich cenné rady a pripomienky, ktoré boli zakomponované do tejto knihy.

Poďakovanie patrí aj zlievarňam Eurocast Košice s.r.o. (Silbitz Group), VSS Foundry Košice a Zlievarni SEZ Krompachy, a. s. a im zamestnancom, obzvlášť Ing. Matúšovi Jaremkovi, za umožnenie realizácie experimentov a pomoc pri ich vyhodnocovaní.

Peter Futáš
Alena Pribulová
Marcela Pokusová
Andrea Junáková

Názov: LIATINY - vlastnosti, výroba, použitie

Autori: doc. Ing. Peter Futáš, PhD.
prof. Ing. Alena Pribulová, CSc.
prof. Ing. Marcela Pokusová, PhD.
Ing. Andrea Junáková, PhD.

Vydavateľ: Technická univerzita v Košiciach

Rok: 2020

Vydanie: prvé

Náklad: 100 ks

Rozsah: 224 strán

ISBN: 978-80-553-3644-2