

4. LIATINY

4.1 Všeobecné poznatky

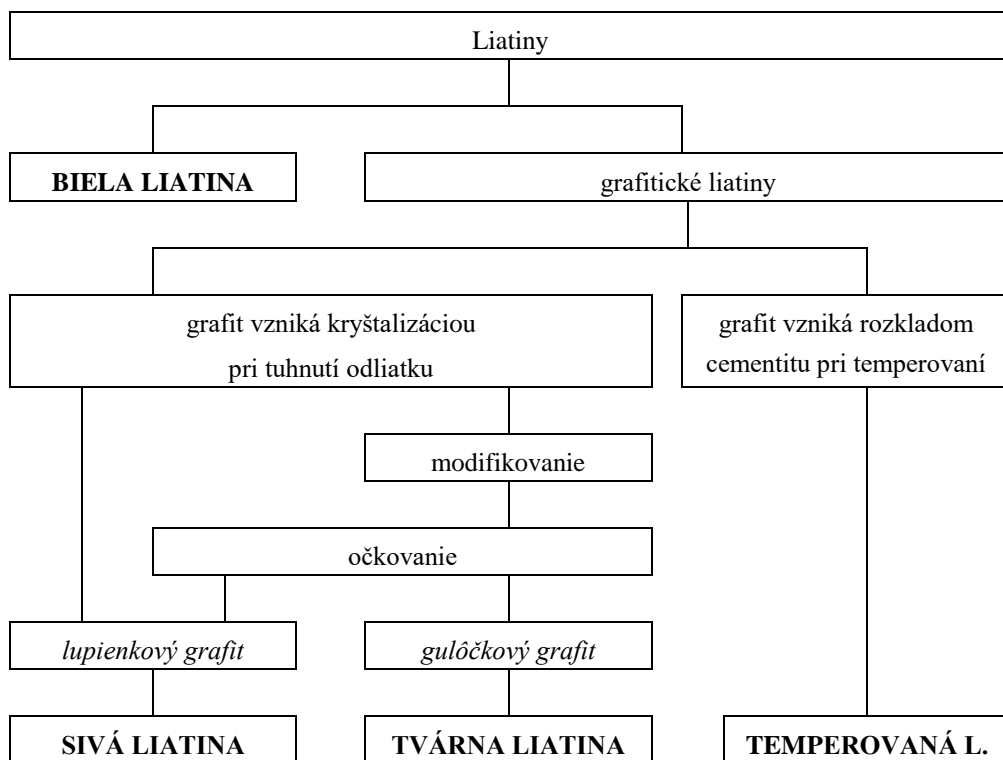
Liatiny sú zliatiny železa, uhlíka a sprievodných prvkov (prípadne prísadových prvkov - legované liatiny), s obsahom uhlíka vyšším ako je max. rozpustnosť uhlíka v austenite. (Tejto definícii vyhovujú aj surové železá, ktoré sa od liatin odlišujú najmä výrobou a použitím.). Ako už bolo uvedené rozdeľujeme liatiny podľa štruktúry na biele a grafitické, pričom technicky podstatne významnejšou skupinou sú liatiny grafitické. Ich vlastnosti závisia od množstva, tvaru a veľkosti grafitových čiastočiek a od charakteru kovovej matrice, v ktorej je grafit rozložený. Základným kritériom pri rozdelení grafitických liatin je preto tvar vylúčeného grafitu. Grafit môže vznikáť aj grafitizáciou cementitu v tuhom stave, preto medzi grafitické liatiny môžeme zaradiť aj temperované liatiny (tab. 4.1) [4]. Grafitické liatiny sú (a v reálne prognostikovateľnej perspektíve aj zostanú) rozhodujúcimi materiálmi na výrobu odliatok. Zliatiny železa na odliatky (ak neuvažujeme temperované a biele liatiny, ktoré majú v súčasnosti i perspektívne okrajový význam) možno podľa rastúcej pevnosti v ťahu a modulu pružnosti, ťažnosti aj húževnatosti zoradiť v poradí sivá liatina, liatina s guľôčkovým grafitom a ocele na odliatky. V rovnakom poradí sa však zhoršuje: zlievateľnosť, obrábateľnosť, tepelná vodivosť, korózna odolnosť a napokon sa aj v tomto poradí zvyšujú výrobné náklady. Podobne ako v iných skupinách kovov a zliatin je jedným z najdôležitejších faktorov, určujúcich vývojové trendy, tendencia k optimálnemu využívaniu kovovej substancie. Pri zliatinách železa na odliatky narastá tak ako všeobecne toto využitie so zvyšujúcimi pevnostnými vlastnosťami, ale výrazne klesá predovšetkým so zvyšujúcim sa sklonom k vzniku stiahnutí, ktorý je nutné korigovať náliatkovaním. Pre zlé zlievarenské vlastnosti je využívanie ocelí na odliatky (na konštrukčné súčasti, pracujúce v obvyklých podmienkach) napriek relatívne vysokej pevnosti, vyslovene degresívne. Na druhej strane klesá aj význam sivej liatiny, u ktorej sú rozhodujúce ukazovatele obrátené ako u ocelí na odliatky, ale v konečnom dôsledku pre vyššie namáhané odliatky horšie ako pri liatine s guľôčkovým grafitom, ktorej produkcia sa preto neustále zvyšuje.

Biela liatina má v štruktúre v podstate cementit a perlit, preto má biely lom, vysokú tvrdosť a dobrú odolnosť proti opotrebeniu. Biele liatiny sú veľmi tvrdé (300 až 550 HB), veľmi krehké, majú relatívne malú pevnosť a sú

veľmi zle obrábatel'né. Praktické použitie bielych liatin je veľmi obmedzené (jednoduché odliatky s vysokou tvrdosťou a odolnosťou proti opotrebeniu sa používajú ako mlecie platne, gule a pod.).

Tab. 4.1

Základné druhy liatin



4.2 Liatina s lupienkovým grafitom – sivá liatina

Sivá liatina má v štruktúre lupienkový grafit (pozri obr. 4.1c) a najčastejšie perlitickú maticu (obr. 4.1a) [64]. Zvyčajne obsahuje 2,5 až 3,5 % C, do 3,5 % Si, 0,4 až 0,8 % Mn, 0,2 až 1,2 % P a 0,08 až 0,12 % S [74]. *Vplyv chemického zloženia a rýchlosti ochladzovania na kryštalizáciu sivej liatiny je natoľko dôležitý, že pri inak nezmenených podmienkach môžu mať odliatky rôznu štruktúru (od bielej po feritickú sivú liatinu). Z hľadiska chemického zloženia je najdôležitejší vplyv prvkov na grafitizáciu.*

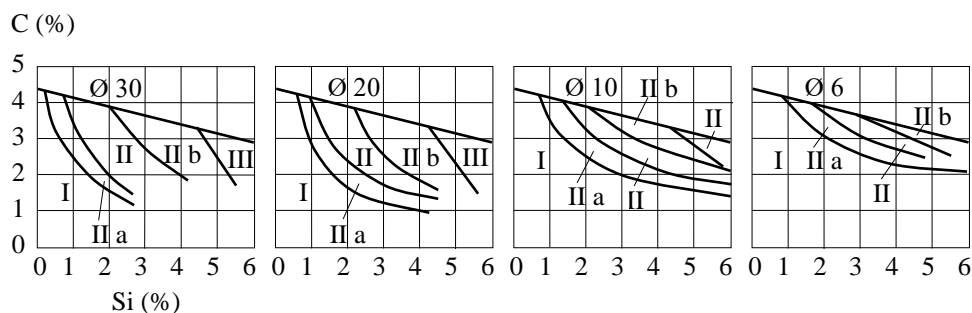
Obr. 4.1. Mikroštruktúra sivých liatin (a- perlitická sivá liatina, lept. Nital, zv.100x, b- perliticko-feritická sivá liatina, lept.Nital, zv.100x, c- lupienkový grafit, hlb.lept., zv.800x, REM)

Podľa tohto faktora môžeme jednotlivé prvky zoradiť takto (zľava doprava klesá grafitizačný účinok): Al, C, Si, Ti, Cu, P, Co, Zr, Nb, W, Mn, S, Cr, V, Te, Mg, Ce, B [52]. Tento prehľad je možné podľa súčasných poznatkov o vplyve jednotlivých prvkov v sivej liatine chápať iba ako orientačný. Všeobecne nie je možné vysvetliť, prečo jednotlivé prvky tým či oným spôsobom ovplyvňujú grafitizáciu. Zo všetkých grafitizačných prvkov najväčší význam majú uhlík a kremík. Obidva prvky pôsobia približne rovnako, a preto pri zvýšení obsahu jedného prvku sa na dosiahnutie rovnakého stupňa grafitizácie musí znížiť obsah druhého prvku. Vplyv jednotlivých prvkov na polohu eutektického bodu (obsah uhlíka v eutektiku) možno približne kvantifikovať. Najčastejšie sa používa stupeň eutektickosti, napr. podľa vzťahu

$$S_C = \frac{\%C}{4,3 - 0,312.\%Si - 0,275.\%P} \quad (3.2)$$

Rýchlosť ochladzovania závisí od konštrukcie odliatku (hrúbky stien), od teploty odlievania a od druhu formy. Zvyšovanie rýchlosti ochladzovania pôsobí na štruktúru opačne, ako zvyšovanie obsahu grafitotvorných prvkov. Vplyv obsahu grafitotvorných prvkov a rýchlosti ochladzovania na štruktúru sivej liatiny znázorňujú štruktúrne diagramy [74]. Na obr. 4.2 sú štruktúrne

diagramy podľa A. Uhlitscha a R. Weichelta. Rýchlosť ochladzovania pri tuhnutí je tým väčšia, čím menšie sú rozmery odliatku (v diagramoch je nepriamo vyjadrená priemerom odlievanej tyče).



Obr. 4.2. Štruktúrne diagramy podľa Uhlitscha a Weichelta (I - biela liatina, IIa - polovičná liatina, IIb - perlitická sivá liatina, III - feritická sivá liatina)

Očkovanie. Okrem charakteru matrice ovplyvňuje významne vlastnosti sivej liatiny veľkosť grafitu. Je ju možné zjemniť očkovaním, tj. pridávaním takých látok do tekutého kovu pred odliatím, ktoré zvyšujú počet kryštalizačných zárodkov grafitu. Najbežnejším očkovadlom je ferosilícium FeSi75 (zliatina Fe so 75 % Si), ktoré sa pridáva v množstve okolo 0,5 %. Nakoľko s klesajúcim stupňom eutektickosti klesá obsah grafitu v štruktúre, zväčšuje sa pevnosť liatiny, ale narastá nebezpečie vylučovania cementitu. Hlavný význam očkovania je v tom, že umožňuje vyrobiť sivú liatinu s nízkym stupňom eutektickosti, ktorá by bez očkovania tuhla ako biela.

Vlastnosti a použitie. Sivé liatiny majú pevnosť v ťahu do 250 MPa, po očkovaní 250 až 350 MPa. Ostré konce lupienkov grafitu pôsobia ako koncentrátoři napätí, ktoré môžu dosiahnuť až 20-násobok menovitého zaťaženia, preto sú sivé liatiny krehké materiály a nemajú takmer žiadnu ťažnosť. Pevnosť v tlaku je až štvornásobne a pevnosť v ohybe až dvojnásobne väčšia ako pevnosť v ťahu. Lupienky grafitu v štruktúre sa pozitívne prejavujú zvyšovaním schopnosti útlmu a znižovaním citlivosti sivých liatin na účinok vrubov. Prednosťou sivých liatin sú vynikajúce zlievarenské vlastnosti a nízka cena [78]. Normované druhy sivých liatin uvádza tab. 4.2. Sivé liatiny 42 2410 až 42 2435 sa používajú na výrobu širokého sortimentu odliatkov a zvolia sa podľa požadovanej pevnosti v ťahu a podľa hrúbky stien odliatkov. Liatina 42 2456 sa používa ako ložisková, pretože má dobré klzné vlastnosti.

Sivé liatiny podľa STN

Akosť podľa STN	Min. R _m [MPa]	Min. R _o [MPa]	Max. tvrdosť [HB]	Použitie
42 2410	100	240	180	Tenkostenné odliatky s hr. steny 4-15 mm, napr. súčasti pecí, smaltovaný tovar
42 2415	150	320	200	Odliatky s hr. steny 5-30 mm, vodovodné tvarovky, súčiastky textilných a poľnohospodárskych strojov, veká, poklopy, ložiská, remenice, časti motorov
42 2420	200	380	200	Odliatky s hr. steny 8-45 mm, armatúry, časti motorov, piestových strojov, turbín, valce kompresorov
42 2425	250	430	240	Odliatky s hr. steny 15-70 mm, valce motorov, ozubené kolesá, stojany obrábacích strojov
42 2430	300	490	260	Odliatky s hr. steny 25-100 mm, namáhané strojné odliatky, súčasti armatúr
42 2435	350	550	270	odliatky s hr. steny 40-150 mm aj viac, vysoko namáhané súčasti - strojany jednoduchých tvarov
42 2456	-	-	190-240	Púzdra klzných ložísk, vačky, závitové kolesá, vodítka ventilov spaľovacích motorov, hydraulické piesty

4.3 Liatina s guľôčkovým grafitom – tvárna liatina

Tvárna liatina obsahuje v štruktúre grafit vylúčený vo forme guľôčok. Podrobným štúdiom grafitového zrna sa zistilo, že je to zložitý polykryštál [8]. Skladá sa z lúčovito usporiadaných (obr. 4.3a) pyramidálnych kryštálov a z množstva kužeľovitých špirál (obr. 4.3b). Existujú viaceré teórie kryštalizácie zrnitého grafitu. Napriek tomu, že nie je exaktne preukázaná žiadna z týchto teórií, je možné za rozhodujúci považovať vplyv pridávaných látok do tekutého kovu, ktoré zvyšujú počas kryštalizácie

povrchové napätie na rozhraní grafit-tavenina a vyvolávajú jeho kryštalizáciu v tvare s najmenším povrchom. Je pri tom pravdepodobné, že sa tak deje nepriamo tým, že pridávané látky viažu nečistoty znižujúce povrchové napätie (síra, kyslík). V každom prípade je nesporné, že okrem železa a uhlíka sú k tvorbe grafitu (lupienkového alebo guľôčkového) potrebné najmenej dva ďalšie prvky: kremík a kyslík. K tvorbe guľôčkového grafitu sú potrebné ďalej prídavné prvky, aby znížili obsah kyslíka a aby podnietili rast grafitu. Guľôčkovitý tvar grafitu sa teda dosahuje pridaním takej látky do tekutého kovu pred odliatím, ktorá ovplyvňuje rast zárodkov grafitu. Táto technologická operácia sa nazýva modifikovanie. Ako modifikátor sa používa horčík, v súčasnosti najčastejšie vo forme zliatin Fe-Si-Mg (3-10 % Mg) [70, 71]. Horčík však zvyšuje stabilitu karbidov, preto musí nasledovať grafitizačné očkovanie.

Obr. 4.3. Zrná grafitu v tvárnej liatine (a - neleptané, polarizované svetlo, zv. 400 x, b - štruktúrny model)

Modifikovanie. Existuje niekoľko postupov, ktorými môže byť tvárna liatina vyrábaná, ale takmer každý vyžaduje použitie niektorej zliatiny horčíka. Za minimálny obsah Mg potrebný na sferoidizáciu grafitu sa zvyčajne pokladá buď 0,01 % s prídavkom céru a iných vzácnych zemín, alebo 0,02 %, ak je horčík použitý samotný. Úroveň zvyškového horčíka sa však musí zvyšovať pri väčších prierezoch a nižších rýchlostiach ochladzovania. Z týchto dôvodov boli vyvinuté také techniky modifikovania a zliatiny, ktoré umožňujú stálejšie a presnejšie dodržiavanie obsahu Mg. Z technologického hľadiska (spôsobu vnášania modifikátora do tekutého kovu) sa používajú

viaceré metódy najmä: prelievacia metóda v otvorenej panve (najjednoduchší a po veľa rokov najviac používaný postup; zliatina Mg je položená na dno prázdnej panvy a zaliata základným kovom), sendvičová metóda v otvorenej panve (v dne panvy zásobník na uloženie Mg zliatiny, na ktorú je položený drobný oceľový odpad alebo triesky tvárnej liatiny), rôzne metódy so zakrytou panvou (znižuje sa intenzita reakcie Mg s kyslíkom v porovnaní s metódami s otvorenou panvou), ponorná metóda (do tekutého kovu sa ponára grafitom alebo žiaruvzdornou látkou potiahnutý dierovaný zvon, obsahujúci Mg zliatinu alebo horčíkom napustený koks), viaceré prietokové metódy (tekutý kov preteká cez nádrž, ktorá v osobitnej komore obsahuje modifikátor), niekoľko metód modifikovania čistým horčíkom (konvertorové metódy), modifikovanie vo forme - Inmold (modifikovanie sa uskutočňuje priamo vo forme, modifikátor FeSiMg sa vkladá do reakčnej komory, ktorá je umiestnená vo vtokovej sústave) atď. [73].

Očkovanie. K dispozícii je široký výber očkovadiel. Väčšina z nich obsahuje 45-75 % Si a určitý obsah Ca a Al [70, 71]. Čisté Si-zliatiny nie sú ako očkovadlá účinné. Iné prvky, ktoré očkovadlo môže obsahovať sú C, Ba, Mg, Mn a Zr. Používajú sa na zvýšenie rozpustnosti alebo účinnosti očkovadla. Na očkovanie kovu sa používajú tri metódy: v panve v priebehu modifikovania, alebo po ňom, v prúde kovu počas liatia a vo forme [73].

Obr. 4.4. Tvárne liatiny s rôznou matricou, lept.Nital, zv. 100 x

Chemické zloženie a štruktúra matrice. Tvárne liatiny obvykle obsahujú 3,2 až 4,2 % C, 1,5 až 4 % Si, 0,4 až 0,8 % Mn, pod 0,1 % P, pod 0,02 % S. Štruktúra matrice môže byť perlitická, tvorená zmesou feritu a perlitu, alebo feritická (obr.4.4) a závisí od chemického zloženia a rýchlosti ochladzovania. Pri voľbe chemického zloženia je v prvom rade dôležité dosiahnúť mikroštruktúru bez voľných karbidov. Karbidy (v liatom stave, teda aj v liatinách určených na tepelné spracovanie) nepriaznivo ovplyvňujú zlievarenské vlastnosti, napr. sklon k tvoreniu stiahnutí. Najväčší význam má správna voľba obsahu oboch hlavných grafitotvorných prvkov - uhlíka a kremíka. Sú to vlastne jediné dva prvky (kremík je pritom oveľa silnejší), ktoré významne bránia vylúčeniu voľných karbidov. Hornú hranicu ich obsahu vymedzuje rozpustnosť uhlíka v tekutej liatine a prípadne zvýšená krehkosť a znížená tepelná vodivosť pri rastúcom obsahu kremíka. Mangán je ďalším prvkom podľa dôležitosti. Je stredne silným aktivátorom karbidov. Jeho maximálny obsah nesmie presiahnuť určitú hranicu, ktorá závisí od obsahu kremíka a hrúbky prierezu. Aktivátory a stabilizátory karbidov, pôsobiace silnejšie ako mangán, sú chróm, vanád, bór, telúr a molybdén, preto ich odporúčané maximálne obsahy sú: 0,05 % Cr, 0,03 % V, 0,02 % B, 0,003 % Te a 0,01 % Mo (v bainitických liatinách pri zníženom obsahu Mn max. 0,75 % Mn). Pokiaľ ide o ovplyvňovanie charakteru matrice nemá z bežných prvkov prítomných v tvárných liatinách žiadny vplyv na štruktúru matrice uhlík, naopak rastúci obsah kremíka zväčšuje podiel ferit/perlit [8], zväčšuje tvrdosť feritu, znižuje rázovú húževnatosť a zvyšuje prechodovú teplotu. Obsah mangánu by nemal byť nikdy volený s cieľom riadiť štruktúru matrice. Obsah sferoidizujúceho prvku (prvkov) neovplyvňuje štruktúru matrice.

Stredne legované tvárne liatiny. Legovanie strednými množstvami prísad sa robí za účelom stabilizovania perlitu v matrici, zlepšenia vlastností pri vysokých teplotách alebo podporu vytvárania bainitických štruktúr (pozri „izotermicky zušľachtená liatina“) [73].

Pokiaľ sa týka stabilizovania perlitu v matrici existujú dva rozdielne mechanizmy. Jeden mechanizmus je spôsobený segregáciou niektorých prvkov (napr. Sn a Sb) na fázovom rozhraní grafit/matrica počas tuhnutia. Táto segregácia predchádza difúziou uhlíka do grafitovej guľôčky, t. j. prakticky eliminuje účinok uhlíkového koncentrátora. Ďalšia skupina prvkov, z ktorej bol predovšetkým skúmaný Mn, brzdí začiatok eutektoidnej premeny, znižuje rýchlosť difúzie uhlíka vo ferite a stabilizuje cementit. Bolo už uvedené, že mangán nemá byť používaný ako perlitizačný prvok.

Náklady na tepelné spracovanie a problémy s tým súvisiace (bortenie, atď.) vysoko prevyšujú náklady na legovanie inými, perlit podporujúcimi prvkami. Perlitizačne pôsobiacich prvkov je celkovo osem. Sú to (v poradí klesajúceho perlitizačného účinku: Sn, Mo, P, Cu, Ti, Mn, Ni a Cr. Z týchto prvkov neprichádza (pre iné negatívne vplyvy) do úvahy použitie P, Ti, Mn a Cr a z ekonomických dôvodov Ni a Mo, preto možno považovať za najúčinnéjšie a najhospodárnejšie prvky na podporovanie perlitickej matrice v liatom stave Cu a Sn. Perlitizačný účinok oboch prvkov je aditívny, pritom vplyv cínu je asi desaťnásobne silnejší než vplyv medi. So zreteľom na ďalšie účinky (vylučovanie medzibunkového lupienkového grafitu) je obsah cínu ohraničený na 0,05 %. Na druhej strane med' môže byť bezpečne prídavaná až do 2 %, keď sa približuje hranici svojej rozpustnosti v tavenine. Táto hranica môže byť zvýšená súčasným legovaním niklom, ale to je drahé a zriedkakedy potrebné.

Legovanie molybdénom je vhodné pre zlepšenie mechanických vlastností pri vysokých teplotách. Takmer vždy sa kombinuje s prísadou Ni, ktorá pôsobí podobne. Legovanie tvárnej liatiny 2 % samotného Mo významne zvyšuje pevnosť a odolnosť proti tečeniu pri zvýšenej teplote. Dodatočný úžitok spôsobí prítomnosť 0,5 až 1,0 % Al. Štruktúra grafitu musí byť pred škodlivými účinkami hliníka chránená pridaním 0,03 % Ce. Obsah molybdénu v tomto rozsahu (2 %) pôsobí negatívne na ťažnosť, a to tým viac, čím je väčší odliatok. Ak je ťažnosť dôležitá, musí sa obsah Mo ohraničiť na 0,50 až 1,0 % a zvyšok nahradiť legovaním 1,0 až 2,0 % Ni.

Vlastnosti a použitie tvárnych liatin. Gulôčkový tvar grafitu nespôsobuje takú koncentráciu napätí ako grafit lupienkový. Mechanické vlastnosti tvárnej liatiny zaraďujú tento materiál medzi špičkové materiály na výrobu odliatok. V súčasnosti sa vyrába viac tvárnej liatiny než temperovanej liatiny alebo ocele na odliatky. Veľa odliatok zo sivej liatiny, z temperovanej liatiny, z ocele na odliatky, oceľových výkovkov a montovaných súčiastok bolo úspešne prevedených na odliatky z tvárnej liatiny. Pevnosť v ťahu je v rozmedzí 400 až 800 MPa, ťažnosť 20 až 2 % a tvrdosť 150 až 300 HB (uvádzané intervaly sú od feritickej matrice po perlitickú). Prehľad tvárnych liatin podľa STN je v tab. 4.3. Výroba tvárnej liatiny je v porovnaní so sivou liatinou náročnejšia na kvalitu surovín a aj na zložitosť technologického procesu a majú okrem toho aj sklon na tvorbu stiahnutí; sú však z hľadiska zlievarenských vlastností podstatne výhodnejšie ako ocele na odliatky. V porovnaní s oceľami na odliatky majú výhodnejší pomer R_e/R_m (0,7; ocele 0,55), sú málo citlivé na účinky vrubu

pri únavovom namáhaní a majú väčšiu hodnotu útlmu. Vo všeobecnosti asi jedna tretina produkcie tvárnej liatiny je určená pre vodovodné rúry, jedna tretina pre automobilový priemysel a jedna tretina pre všeobecné strojárské odliatky. Je zaujímavé, že tvárna liatina mala svoj najväčší úspech predovšetkým v automobilovom priemysle, kde je v oblasti materiálov najväčšia konkurencia z hľadiska výkonu aj nákladov. Tvárne liatiny sa používajú na výrobu odliatkov vysokonamáhaných súčiastok (kľukové hriadele, ojnice, piesty, telesá čerpadiel a pod.).

Tab. 4.3

Tvárne liatiny podľa STN

Akosť podľa STN	Druh	Min. R _{p0,2} [MPa]	Min. R _m [MPa]	Min. A ₅ [%]	Použitie
42 2303	feritická	230	370	17	Odliatky s hr. steny 5-100 aj viac mm, telesá armatúr, súčasti cestných vozidiel a poľnohospodárskych strojov a iné dynamicky namáhané súčasti
42 2304	feritická	250	400	12	Odliatky s hr. steny 5-100 aj viac mm, prevodové a ložiskové skrine, dynamicky namáhané odliatky
42 2305	feriticko-perlitická	320	500	7	Odliatky s hr. steny 5-100 mm mechanicky a dynamicky namáhané; vodiace a klzné lišty, podávacie valčeky, prevodové skrine, armatúry
42 2306	feriticko-perlitická	370	600	3	Odliatky s hr. steny 5-100 mm, dynamicky a otrasom namáhané súčasti, kľukové a vačkové hriadele, ozubené kolesá, valce, piesty, piestne krúžky
42 2307	perlitická	420	700	2	Odliatky s hr. steny 5-75 mm namáhané mechanicky a oterom, ozubené kolesá, kľukové a vačkové hriadele, brzdové bubny
42 2308	perliticko-sorbitická	480	800	2	Odliatky s hr. steny 5-35 mm značne mechanicky namáhané a odolné proti oteru
42 2340	kremíková žiaruvzdorná	-	300	-	Rošty a vyloženie vrát pecí v petrochemickom priemysle. Použitie do 850 °C

4.4 Austenitická tvárna liatina

Austenitická tvárna liatina (DUCTILE NI-RESIST). Je vysokoniklová liatina s austenitickou maticou, určená na antikorózne a žiaruvzdorné odliatky [73]. Chemické zloženie a mechanické vlastnosti niektorých druhov austenitických liatin udáva tab. 4.4. Pretože väčšina druhov obsahuje chróm, sú viac alebo menej karbidické. Napriek tomu vplyvom mäkkej austenitickej matrice nie sú, s výnimkou typu D-4, nadmerne tvrdé a sú ľahko obrobiteľné. Odporúča sa, aby odliatky, ktoré sú tvrdšie než 190 HB boli žíhané pri 950-1035 °C od jednej do päť hodín, s následným chladnutím v peci alebo na vzduchu. V prípade použitia pri vyšších teplotách (480 °C alebo viac), treba odliatky tepelne spracovať pri 870 °C po dobu dvoch až štyroch hodín a ochladiť v peci na 540 °C a potom ochladiť v peci alebo na vzduchu [79].

Tab. 4.4

Austenitické tvárne liatiny podľa ASTM A 439

Typ	D-2	D-3	D-4	D-5
Obsah prvkov (%)				
C, max.	3,00	2,60	2,60	2,40
Si	1,50-3,00	1,00-2,80	5,00-6,00	1,00-2,80
Mn	0,70-1,25	1,00 max.	1,00 max.	1,00 max.
P, max.	0,08	0,08	0,08	0,08
Ni	18-22	28-32	28-32	34-36
Cr	1,75-2,75	2,50-3,50	4,50-5,50	0,10 max.
Mechanické vlastnosti				
Min. R _m (MPa)	400	379	414	379
Min. R _{p0,2} (MPa)	207	207	-	207
Min. A ₅ (%)	8,0	6,0	-	20,0
HB	139-202	139-202	202-273	131-165

4.5 Tepelne spracované tvárne liatiny

Tepelne spracované tvárne liatiny. Jednotlivé postupy možno rozdeliť podľa cieľa, ktorého zabezpečenie tepelné spracovanie sleduje, t. j. najmä zvýšenie rozmerovej stability, rozklad karbidov v liatej štruktúre a získanie požadovanej štruktúry matrice [76].

Tepelné spracovanie na zvýšenie rozmerovej stability a zníženie napätí. Žihanie na zníženie napätí sa predpisuje, ak je vyžadovaná vysoká rozmerová presnosť, najmä vtedy ak je odliatok určený pre použitie pri zvýšených teplotách do cca 315 °C. V závislosti od veľkosti a tvaru majú všetky odliatky určité vnútorné napätie. Istá časť napätia môže byť odstránená pôsobením vonkajšieho napätia (vibráciou). Pokiaľ je potrebné ďalšie zníženie vnútorného napätia, musí sa odliatok žihať pri teplote, pri ktorej prebieha plastická deformácia relatívne vysokou rýchlosťou. V prípade, že nie je požadovaná zmena matrice, býva táto teplota cca 595 °C.

Feritizačné žihanie má za cieľ buď rozložiť karbidy, ak sú prítomné v lepacej štruktúre (feritizačné žihanie s prekryštalizáciou pri teplote 900 °C), alebo dosiahnuť feritickú maticu (feritizačné žihanie bez prekryštalizácie, pod teplotou perlitickej premeny).

Normalizačné (perlitizačné) žihanie. V závislosti vylúčenia karbidov v štruktúre sa volí austenitizačná teplota buď 900 °C (prítomnosť karbidov) alebo 30 °C pod hornou kritickou teplotou (bezkarbidická štruktúra). Doba výdrže je 1 hodina plus 1 hodina na každých 25 mm hrúbky steny. Ochladzovanie z austenitizačnej teploty môže byť na kľudnom vzduchu, prúdom vzduchu (nad 40 mm hrúbky steny), alebo vodnou hmlou (nad 60 mm hrúbky) steny. Odliatky, ktoré majú hrúbku steny väčšiu ako 25 mm sú obvykle legované 0,5 - 1,0 % Cu na podporu perlitizácie. Čím je odliatok hrubší, zvyšuje sa aj obsah Cu. V priebehu rýchleho ochladzovania vznikajú vnútorné napätia, preto často po normalizačnom žíhaní nasleduje žihanie na zníženie napätí (tiež nazývané popúšťanie). K zníženiu tvrdosti matrice možno použiť pri žíhaní na odstránenie vnútorných napätí vyššiu teplotu.

Zušľachtovanie. Týmto tepelným spracovaním sa získava ihlicovitá štruktúra, ktorá môže dosahovať tvrdosť nad 400 HB. Odliatok sa austenitizuje na teplote o 55 °C vyššej ako horná kritická teplota, po vhodnej homogenizačnej výdrži (výdrž 1 h + 1 h na každých 25 mm hrúbky steny) sa kalí obvykle v oleji. Teplota konca martenzitickej premeny závisí, okrem iných vplyvov, od teploty austenitizácie pred kalením a na dĺžke zotrvania medzi

kalením a následným tepelným spracovaním (po kalení môže nasledovať zmrazovanie do suchého ľadu alebo tekutého dusíka, čím sa získa transformáciou zvyškového austenitu čisto martenzitická štruktúra). Po kalení zvyčajne nasleduje popúšťanie na teplote volenej podľa požadovanej tvrdosti.

Kalenie a popúšťanie feritickej tvárnej liatiny (duplexná tvárna liatina). Ide o komplikované a nákladné tepelné spracovanie. Tvárna liatina sa najskôr úplne feritizačne vyžiha a následne kalí z austenitizačnej teploty do oleja alebo vody. Získa sa feriticko-martenzitická štruktúra, ktorá sa popúšťa pri relatívne vysokej teplote (650 °C). Tvárna liatina, tepelne spracovaná týmto spôsobom, má rázovú húževnatosť feritickej tvárnej liatiny, ale pevnosť perlitickej tvárnej liatiny.

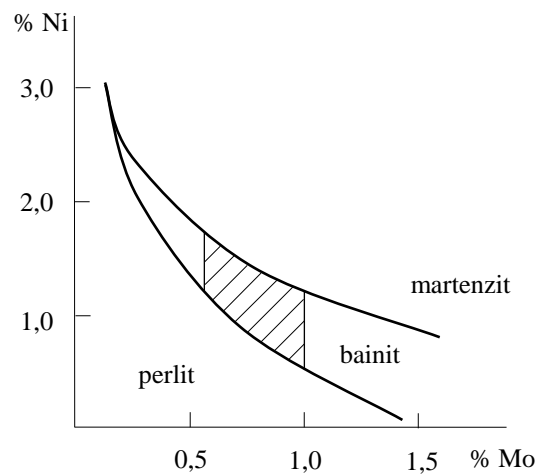
4.6 Izotermicky zušľachtená tvárna liatina

Izotermicky zušľachtená tvárna liatina (ADI - AUSTEMPERED DUCTILE IRON). Je nový typ liatiny, ponúkajúci konštruktérom výnimočnú kombináciu pevnosti, húževnatosti a odolnosti proti opotrebeniu. Mimoriadne vlastnosti ADI sú získané presne riadeným postupom tepelného spracovania (izotermické zušľachtenie), ktorým sa získa unikátna štruktúra matrice (obr.4.5), tvorená acikulárnym (ihlicovitým) feritom a zvyškovým (vysokouhlíkovým) austenitom (*poznámka autora: napriek istej diskutabilnosti, či možno takúto štruktúru označiť ako bainit, pretože neobsahuje karbidy, je v ďalšom používané označenie bainitická matrica, jednak v súlade s veľkou časťou odbornej literatúry, jednak pre väčšiu prehľadnosť textu*). Vysokouhlíkový zvyškový austenit je tepelne stabilný do extrémne nízkej teploty, ale spevňuje sa deformáciou za studena a miestne sa bude pri vhodných podmienkach namáhania meniť na martenzit. Z týchto vlastností ADI vyplýva spevňovanie nosných plôch napätím pri prevádzkovom zaťažení. Namáhanie povrchu (napr. abrazívne čistenie ozubených kolies alebo valčekovanie kľukových hriadel'ov pred prevádzkou) môže byť aj zámerne predpísané pre dosiahnutie výrazného zlepšenia pevnosti a životnosti.

Požadovaná štruktúra matrice môže byť získaná buď v liatom stave, alebo izotermickým tepelným spracovaním. Aby bolo tepelné spracovanie ľahšie a bola zabezpečená prekaliteľnosť v celom objeme je nevyhnutné pre prierezy väčšie než 12 mm liatinu legovať. Zvyčajné legúry sú Ni alebo Cu a Mo.

Obsah molybdénu by mal byť ohraničený maximom 0,25 % z dôvodu jeho tendencie k segregácii. Na obr. 4.6 sú uvedené základné informácie o kombináciách obsahu Ni a Mo pre získanie bainitickej matrice v liatom stave. Vysoký obsah Ni sa volí pre hrubé prierezy. Odliatky tenšie než 25 mm by mali byť bainitizované tepelným spracovaním. V tomto prípade môže byť obsah legúr znížený na polovicu.

Obr. 4.5. Mikroštruktúra izotermicky zušľachtenej tvárnej liatiny (austenitizácia 900°C/3h, izotermické zušľachtovanie 340°C/1 h), lept.Nital, zv. 800 x



Obr. 4.6. Vplyv obsahu Ni a Mo na charakter matrice v liatom stave

Samotné tepelné spracovanie pozostáva z austenitizácie, rýchleho ochladenia na teplotu rozpadu a výdrže na tejto teplote. Teplota rozpadu sa volí v intervale 260 až 480 °C. Odliatok je udržiavaný na konštantnej teplote (obvykle v soľnom kúpeli) dovtedy, kým neprebehne celá transformácia (zvyčajne v rozmedzí 1 - 3 hodín). Potom je súčiastka ochladená na vzduchu. Typická tvrdosť, získaná touto premenou je 275 až 555 HB. Vlastnosti sa menia s teplotou, pri ktorej prebieha premena austenitu na bainit. Premena pri vysokej teplote (vzniká tzv. horný bainit) má za následok relatívne vysokú tvárnosť a priemernú pevnosť, opačne je to pre transformáciu pri nízkej teplote (dolný bainit). Tieto dva extrémny sú označované ako "horný" a "dolný" bainit.

Izotermicky zušľachtená tvárna liatina je takmer dvakrát pevnejšia než obvyklé normované druhy tvárnej liatiny pri zachovaní vysokej ťažnosti a húževnatosti. Izotermicky zušľachtené tvárne liatiny majú navyše mimoriadnu odolnosť proti opotrebeniu a medzu únavy, čím umožňujú znížiť hmotnosť súčiastky a náklady na rovnocenný alebo zlepšený výkon [77].

4.7 Liatina s červíkovitým grafitom

Liatina s červíkovitým grafitom. Červíkovitý (vermikulárny) grafit je morfológický variant grafitu, nachádzajúci sa medzi lupienkovým a zrnitým (priestorovo rozvetvená častica so zaobleným ukončením vetví - obr. 4.7c) [8], pre ktorý sú známe reprodukovateľné technológie [65, 66]. Je známy ako nežiaduca forma vylúčenia grafitu v tvárnej liatine. Príležitostne sa objavuje ako dôsledok nedostatočného modifikovania alebo relatívne vysokého obsahu síry. Liatina s červíkovitým grafitom (t.j. obsahujúca naopak zámerne min. 80 % červíkovitého grafitu a max. 20 % nedokonale alebo pravidelne zrnitého grafitu - obr. 4.7a) sa vyrába zo surovín, ktoré svojou akosťou zodpovedajú východiskovým tavbám pre liatinu s guľôčkovým grafitom. Požaduje sa približne eutektické zloženie a nízky obsah síry (do 0,02 %). Podstatou jej výroby je taký spôsob modifikovania, ktorý zabezpečí neúplnú sferoidizáciu grafitu. Teoreticky možno predpokladať, že jeho podstatou je zníženie negatívneho vplyvu nečistôt typu kyslíka a síry na medzifázové napätie na rozhraní tavenina-grafit v štádiu rastu grafitu, pričom tento nepriamy vplyv na povrchové napätie je

nižší ako pri raste grafitu zrnitého. Sú známe štyri hlavné druhy modifikátorov, ktoré tento proces zabezpečujú:

- Modifikovanie Mg v množstve menšom ako pri výrobe tvárnej liatiny. Proces je v prevádzkových podmienkach ťažko ovládateľný, pretože pre každý obsah kyslíka a síry v tekutom kove existuje konkrétna hodnota modifikujúceho množstva Mg, ktorej stanovenie je v reálnych podmienkach problematické.
- Modifikovanie kombináciou prvkov s globularizačným a antiglobularizačným účinkom. Praktické využitie dosiahla kombinácia Mg+Ti, ktorá má širší koncentračný interval optimálneho pôsobenia v porovnaní s Mg. Od tejto technológie sa ustúpilo v súvislosti s požiadavkou, aby vratný materiál pre zlievarne liatin neobsahoval viac ako 0,1 % Ti [72].
- Modifikovanie komplexami neseparovaných lantanoidov (zliatiny KVZ, koncentráty získané úpravou rúd obvykle s obsahom cca 50 % Ce, 20 % La, zvyšok ostatné lantanoidy, bežne známe pod označením "Mischmetall"). Dosahuje sa širší koncentračný interval optimálneho pôsobenia z hľadiska červíkovitého tvaru grafitu, ale už mierne predávkovanie sa prejaví negatívnym vplyvom na matricu, pretože KVZ podporujú vylučovanie štruktúrne voľného cementitu [65, 66].
- Modifikovanie kombináciou Mg+KVZ. Postup spája prednosti iných postupov a zdá sa byť najperspektívnejší.

Obr. 4.7. Mikroštruktúra liatin s červíkovitým grafitom (a - feriticko-perlitická LČG, lept. Nital, zv. 100 x, b - feritická LČG, lept. Nital, zv. 100 x, c - červíkovitý grafit, hlb. lept., zv. 800 x, REM)

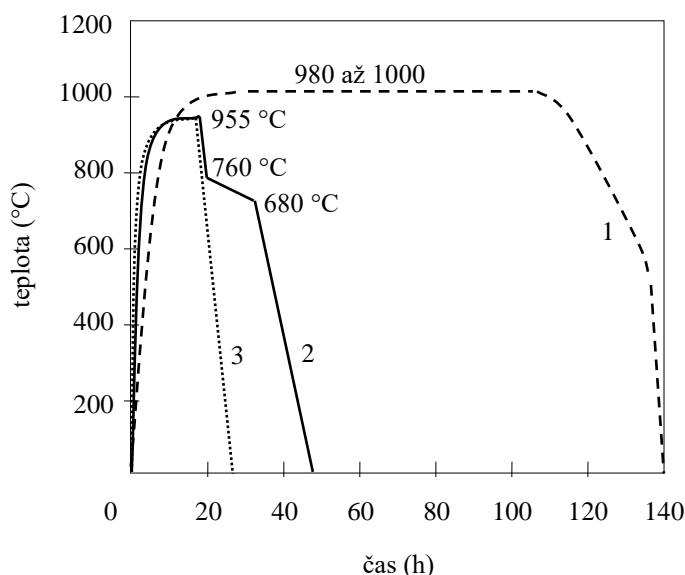
Všeobecne prevláda názor, že štruktúra a vlastnosti vermikulárnych liatin (optimálne modifikovaných) v podstate nezávisia od použitého modifikátora. Vo všeobecnosti kryštalizujú s veľkým podielom feritu v matrici (obvykle 40 - 80 %) a v závislosti od jeho obsahu je pevnosť v ťahu v rozmedzí 500 - 350 MPa, modul pružnosti 160 - 140 GPa, ťažnosť A_5 2 - 6 % a rázová húževnatosť (tyč bez vrubu) 15 - 40 Jcm⁻² [69]. Detailnejšie štúdium štruktúry [9] a nadväzných vlastností preukázalo, že po modifikovaní Mg, Mg+Ti má červíkovitý grafit vždy globulitickejší tvar (menšie rozvetvenie) ako po modifikovaní KVZ a liatina mierne vyššiu pevnosť v ťahu i ťažnosť, pričom obsah Ti v modifikátore zvyšuje prechodovú teplotu a preto pri modifikátoroch Mg+Ti závisí rázová húževnatosť od pomeru Mg/Ti v modifikátore [67, 68].

Dosiahnutie feritickej matrice v liatom stave je podmienené voľbou surovín s veľmi nízkym obsahom nečistôt. Feritická liatina (obr. 4.7b) má potom relatívne vysokú ťažnosť (až 8 %) a húževnatosť (až 50 Jcm⁻²). Tieto hodnoty sa u žíhaných feriticko-perlitických liatin nedosahujú, hoci zvýšenie ťažnosti (až na 4 %) aj húževnatosti (až 40 Jcm⁻²) je významné.

Charakteristická kombinácia vlastností predurčuje liatinu s červíkovitým grafitom na výrobu tvarovo zložitých odliatkov, pre ktoré nepostačuje tvárna liatina svojimi zlievarenskými a sivá liatina svojimi mechanickými vlastnosťami. Výroba tejto liatiny sa však nerozvíja predpokladaným tempom. Uvažovalo sa, že sa na jej výrobu zamerajú hlavne zlievarne sivej liatiny pri odlievaní určitého podielu vyššie namáhaných odliatkov, pretože je v podstate možné použiť tie isté formy ako pre liatinu sivú. Hlavným obmedzujúcim faktorom sa však ukazujú byť vysoké požiadavky na kvalitu surovín a náročnosť technologických postupov, ktoré zrejme prevyšujú význam nárastu mechanických vlastností. Preto je skôr pozoruhodná vysoká tepelná vodivosť vermikulárnej liatiny, ktorou sa blíži liatine sivej a prevyšuje tvárnu liatinu (grafit vo všeobecnosti zvyšuje tepelnú vodivosť v porovnaní s oceľami, pričom toto zvýšenie závisí výrazne od rozvetvenosti grafitových útvarov). Liatina s červíkovitým grafitom sa preto zatiaľ uplatnila najmä na tvarovo zložené, vyššie mechanicky namáhané odliatky pracujúce v podmienkach tepelných rázov a v tejto oblasti je aktuálny aj jej ďalší rozvoj.

4.8 Temperované liatiny

Temperované liatiny. Temperovanie je tepelné spracovanie (žíhanie) podeutektickej bielej (alebo prechodovej) liatiny, pri ktorom prebieha grafitizácia ledeburitického, resp. aj perlitického cementitu [80]. Poznáme viac spôsobov temperovania (obr. 4.8).



Obr. 4.8. Diagramy temperovania (1 - temperovaná liatina s bielym lomom, 2 - temperovaná liatina s čiernym lomom, 3 - temperovaná liatina perlitická)

Temperovanie na biely lom prebieha pri teplotách okolo 1 000 °C v oduhlňujúcom prostredí. Povrch temperovanej liatiny je oduhlňovaný, vnútro odliatku po temperovaní tvorí perlit a grafit (obr. 4.9a), ktorý má pavúčikovitý tvar (obr. 4.9c). Temperovanie na biely lom je zastarané pre zdĺhavosť a nákladnosť. Využíva sa najčastejšie pri tenkostenných odliatkoch s hrúbkou steny do 6 mm.

Temperovaná liatina s čiernym lomom a feritickým kovovým základom sa vyrába grafitizáciou v prvom a druhom stupni grafitizácie. Prvý stupeň grafitizácie prebieha pri teplotách okolo 950 °C, pokiaľ sa úplne nerozpadne ledeburitický, prípadne aj sekundárny cementit na austenit a temperový uhlík (najčastejšie vločkového tvaru). Po prvom stupni grafitizácie nastáva ochladzovanie na teplotu druhého stupňa a zotrvanie na tejto teplote,

potrebné na rozpad perlitického cementitu na ferit a temperový uhlík. Nasleduje pomalé ochladzovanie z teploty druhého stupňa grafitizácie, aby sa neporušila stabilná rovnováha. Mikroštruktúru tvorí feritická matrica a grafit (obr. 4.9b).

Obr. 4.9. Mikroštruktúra temperovaných liatin (a - stredové pásmo temperovanej liatiny s bielym lomom, lept. Nital, zv. 400 x, b - temperovaná liatina s čiernym lomom, lept. Nital, zv. 200 x, c - pavúčkovitý grafit, hlb.lept., zv. 800 x, REM)

Temperovaná perlitická liatina sa získa postupom, ktorý v prvých fázach je rovnaký, ako výroba temperovanej liatiny s čiernym lomom. Rozdiel je v ochladzovaní z prvého stupňa grafitizácie a vo vynechaní druhého stupňa grafitizácie (austenit sa po transformácii nerozpadá na perlit).

Druhy temperovaných liatin (s čiernym lomom a perlitických) podľa STN spolu s charakteristickým použitím sú uvedené v tab. 4.5. Vo všetkých prípadoch ide o odliatky o hrúbke steny 3-30 mm.

Temperované liatiny podľa STN

Akosť podľa STN	Min. R _{p0,2} [MPa]	Min. R _m [MPa]	Max. tvrdosť [HB]	Ťažnosť [%]	Použitie
42 2531		300	180	6	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, stavebné kovanie, kľúče k ventilom, zátky
42 2532	170	320	180	8	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, súčasti textilných a poľnohospodárskych strojov, garážové zdviháky, svorníkové reťaze
42 2533	180	330	160	10	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, súčasti textilných a poľnohospodárskych strojov, armatúry v elektrotechnike
42 2534	190	350	160	12	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, súčasti automobilov, v elektrotechnickom a textilnom priemysle
42 2536	-	300-360	220	3-7	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, pre vozové nápravy, tkáčske stavy, kompresory, prsty k žacím strojom, kľúče
42 2540	180-230	360-420	220	4-10	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, pre motocykle, automobily, odlátky fittingov
42 2545	260	440	200	7	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, konzoly pre dieselové motory, prevodové skrine, súčasti poľnohospodárskych strojov
42 2550	300	490	230	5	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, brzdové bubny, náboje autokolies, prevodové skrine, skrine diferenciálov
42 2555	330	540	240	4	Odliatky s hr. steny 3-30 mm, piesty dieselových motorov, vahadlá, kľukové hriadele