

Obsah

1. Úvod	2
2. Teoretická část	4
2.1. Litiny	4
2.1.1. Druhy litin	5
2.2. Grafitické litiny	5
2.3. Litina s kuličkovým grafitem	7
2.4. Výroba litiny s kuličkovým grafitem	8
2.4.1. Modifikace	8
2.4.2. Očkování	9
2.4.3. Krystalizace	10
2.5. Vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem	11
2.5.1. Výhody a možnosti použití LKG	12
2.5.2. Vlivy přísadových prvků	15
2.6. Tepelné zpracování	17
2.6.1. Feritizační žhání	18
2.6.2. Normalizační žhání	18
2.6.3. Sferiodizační žhání	18
2.6.4. Žhání ke snížení tvrdosti	19
2.6.5. Žhání ke snížení vnitřního pnutí	19
2.6.6. Izotermické zušlechťování	20
2.6.7. Kalení a popouštění	21
2.7. Izotermicky zušlechtěná ADI	22
2.7.1. Austenitizace	22
2.7.2. Izotermická transformace	23
2.8. Bainitická přeměna	24
2.9. Diskuse – Struktura s mechanické vlastnosti ADI	25
2.9.1. Vliv teploty austenitizace	27
2.9.2. Vliv teploty transformace	27
2.9.3. Vliv doby transformace	27
2.9.4. Mikrostruktura ADI	30
2.10. Použití ADI v praxi a průmyslu	34

3. Cíl práce	36
4. Závěr	37
5. Seznam použité literatury.....	38

1. ÚVOD

Konkurence, zdokonalování a vyšší uplatnění výrobků na trhu má za následek obrovský rozvoj ve slévárenském průmyslu.

Historie slévárenství sahá dokonce až 700 let před n.l, kde vznikají v Číně první litinové odlitky například dekorace, šperky, jednoduché zbraně a nástroje. V Evropě velké uplatnění nastalo ale až kolem roku 1400, když se začala ve velkém množství tavit litina, a to z válečných důvodů např. na dělové koule a hlavně. Později byla použita také pro mírové účely v oblasti uměleckého řemesla.

První funkční kuplovna byla vynalezena v roce 1789 a od té doby se stala litina nejrozšířenějším materiálem pro výrobu odlitků. V druhé polovině 19. století je zaznamenán největší rozvoj litiny, kdy využití litiny spadá již převážně do strojírenského oboru a vyvíjí se až dodnes. V současnosti se využívá a rozeznává široké spektrum litin s různým využitím a různými mechanickými vlastnostmi.

Mezi nejmladší druhy litiny patří litina s kuličkovým grafitem LKG, jako metalurgický vynález ve výrobě grafitických litin, způsobem ovládní krystalizace (tzv. modifikace), který vede k vylučování grafitu ve tvaru zrn. Tato litina byla vynalezena v období posledních 60 let. Poprvé byla presentována jako kuriozita na 6. kongresu v Düsseldorfu v roce 1963. Oficiálně však začala být komerčně využívána až po roce 1948 a v roce 1949 byla poprvé vyrobena v naší zemi v ČKD Praha a ve Vítkovických železárnách v Ostravě. Výrazné komerční využití je zaznamenáno až po roce 1960 a právě v 70 letech začala litina s kuličkovým grafitem LGK masivně nahrazovat odlitky z oceli.

Dnes objem výrobků z LKG tvoří více jak 20-30% z celkové tonáže odlitků.

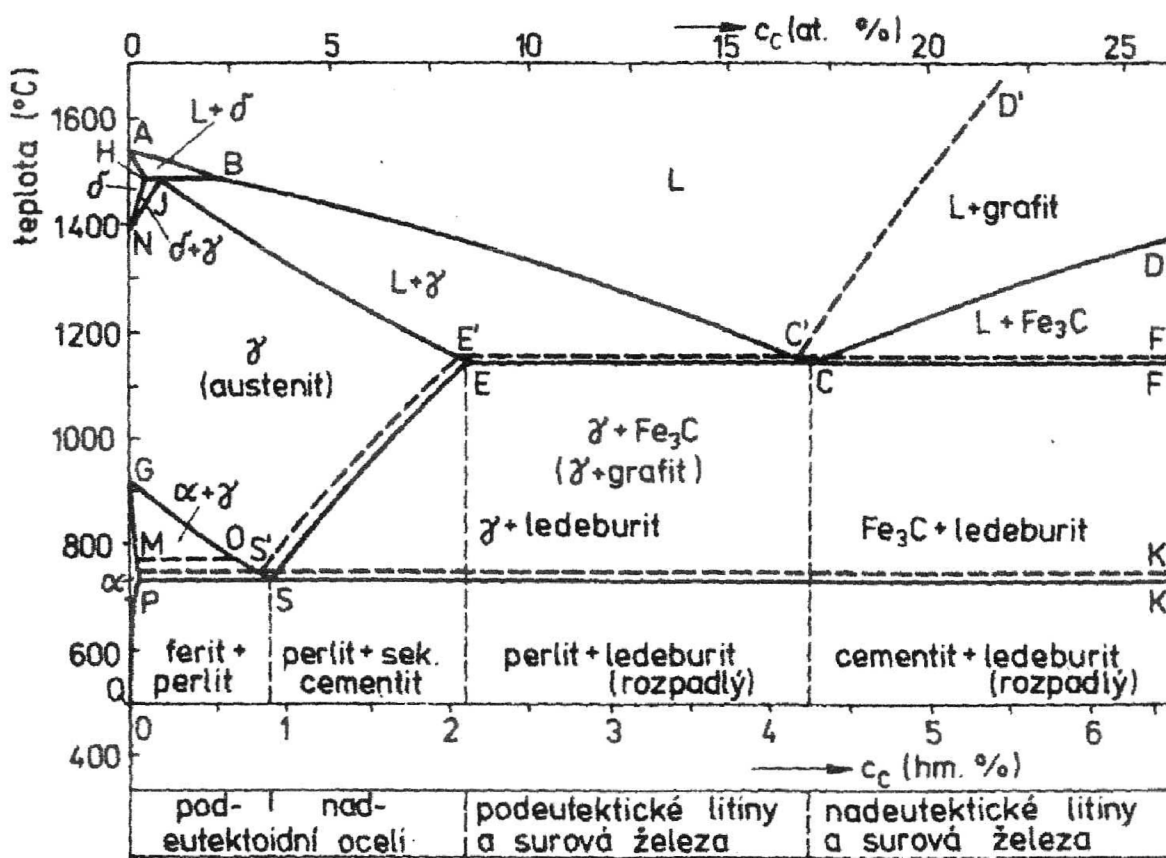
Na začátku sedmdesátých let se v průmyslové praxi začala využívat tzv. ADI litina. Jedná se o izotermicky zušlechtěnou litinu s kuličkovým grafitem na bainit. Mezinárodně se ujala anglická zkratka ADI (Austempered Ductile Iron). Tento materiál v porovnání s ostatními litinami vyniká velmi příznivou kombinací pevnosti, tažnosti, otěruvzdornosti (abrazivní a adhézní opotřebení). Tato litina je proto vhodná pro vysokopevné odlitky.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Litiny

Za litiny se považují slitiny železa Fe s uhlíkem C, křemíkem Si, manganem Mn a dalšími přísadovými prvky, z čehož obsah uhlíku je minimálně 2 %. Litiny se vyrábí roztavením surového železa a dalších surovin (litinový vratný materiál, litinové zlomky, příp. ocelový odpad a další přísady) v kuplovně, v elektrické indukční nebo obloukové peci.

Z rovnovážného diagramu železo-uhlík (obr. 1) plyne, že podle podmínek tuhnutí a chemického složení vzniká v litinách buď cementitické eutektikum – ledeburit, nebo grafitové eutektikum. Podle vyloučeného typu eutektika rozlišujeme druhy litin.



Obr.1 Rovnovážný diagram soustavy železo-uhlík

2.1.1. Druhy litin

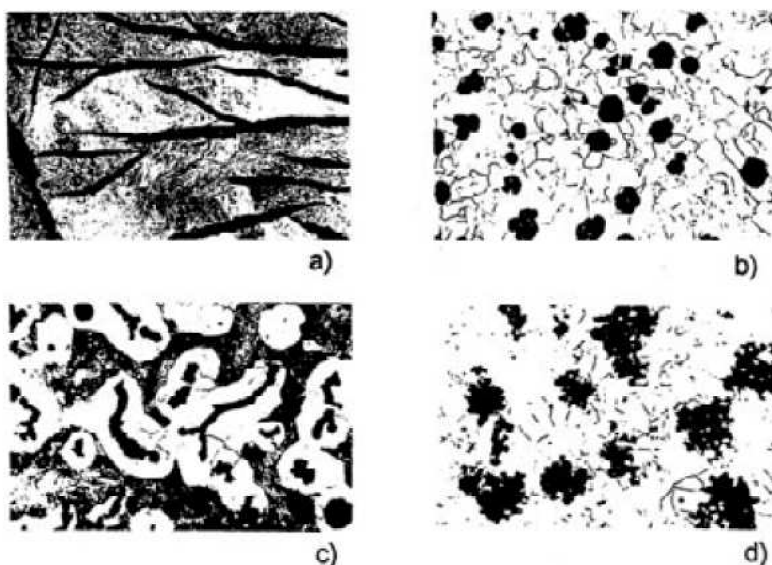
Litiny rozlišujeme podle jejich struktury na:

- 1) Grafitické litiny – grafitické eutektiku (je tvořeno austenitem a uhlíkem)
- 2) Bílé litiny – cementitické eutektikum
- 3) Tvrzené litiny – cementitické grafitické eutektikum

2.2. Grafitické litiny

Podle tvaru grafitu se litiny dále dělí na:

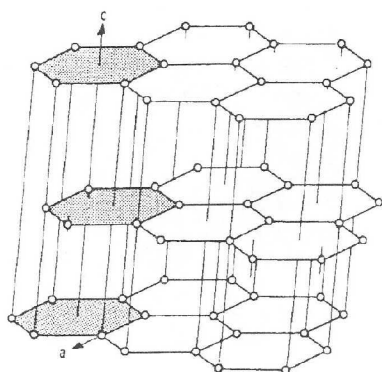
- a) Litiny s lupínkovým grafitem (GJL,LLG) – dříve nazývána jako „šedé“
- b) Litiny s kuličkovým grafitem (GJS,LGK) – dříve nazývána jako „tvárné“
- c) Litiny s vločkovým grafitem (GJM) – nazývána jako „temperované“
-u této litiny vzniká grafit rozkladem cementitu v tuhém stavu až při tepelném zpracování tzv. temperováním. Litina se dále dělí na litinu:
 - S bílým lomem(GJMW)
 - S černým lomem (GJMB)
- d) Litina s červíčkovým grafitem (GJV) – nazývána jako „vermikulární“
-grafit má podobnou morfologii jako grafit lupínkový. Útvary jsou však tlustší a kratší, konce zaoblené.



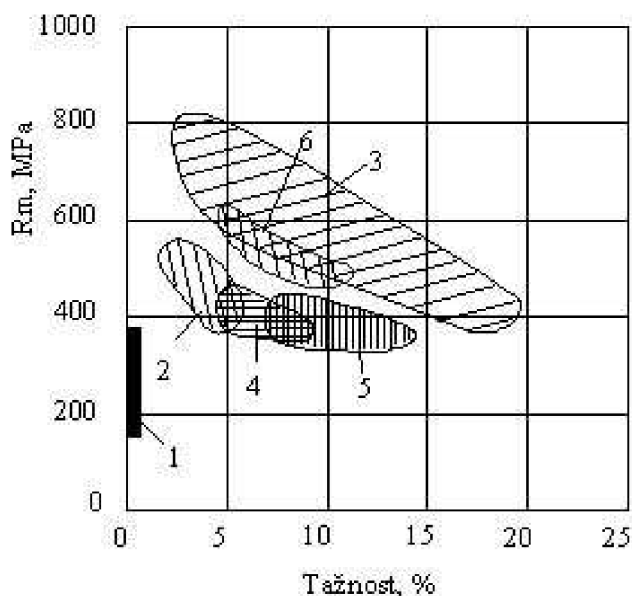
Obr 2 . Tvary grafitu: a) GJL b) GJS c) GJV d) GJM

Grafit je čistý uhlík a krystalizuje v hexagonální soustavě obr.3. Je měkký a jeho tvárnost a pevnost jsou v porovnání s čistým železem nepatrné. Z hlediska termodynamického jde o fázi stabilní.

Grafit a základní kovová hmota (matrice) tvoří strukturu grafitických litin. Na vlastnosti litin má vliv jeho tvar, obsah a způsob rozložení grafitu, velikost a druh matrice (perlit, ferit, cementit, atd.). Litina s vyšším obsahem perlitu v matrici má vyšší pevnost a nižší tažnost. Charakteristické mechanické vlastnosti jednotlivých druhů grafitických litin jsou znázorněné na obr. 4.



Obr.3 Krystalová struktura grafitu



1. litina s lupínkovým grafitem
2. litina s červíkovitým grafitem
3. litina s kuličkovým grafitem
4. litina s vločkovým grafitem (temperovaná litina s bílým lomem)
5. litina s vločkovým grafitem (temperovaná litina s černým lomem)
6. temperovaná perlitická litina

Obr.4 Mechanické vlastnosti grafitických litin

Grafitické litiny patří do skupiny nejstarších konstrukčních materiálů. Tyto slitiny oproti oceli mají spoustu předností: nižší měrnou hmotnost, lepší obrobiteľnosť a třecí vlastnosti, menší citlivost na vruby, větší schopnost tlumení aj.

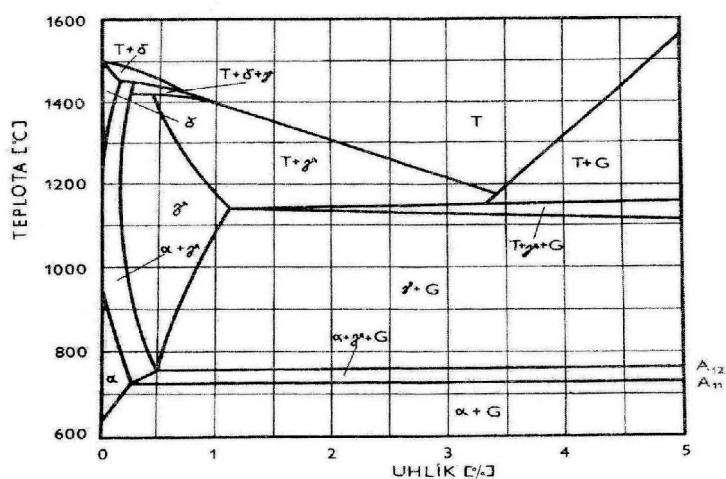
Struktura a mechanické vlastnosti lze stejně jako u ocelí, tak i u těchto litin ovlivňovat volbou vhodného tepelného zpracování

2.3. Litina s kuličkovým grafitem

Litina s kuličkovým grafitem je podle ČSN EN 1563 slitina železa s uhlíkem (C), křemíkem (Si), manganem Mn, fosforem (P), sírou (S) a hořčíkem (Mg). Tyto prvky ovlivňují strukturní přeměny. Obsah uhlíku je vyšší, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu, tj. $C > 2,08\%$.

Významnou roli také plní přísadový prvek křemík. Potrojně slitiny Fe-C-Si a jejich krystalizace můžeme podrobněji studovat v ternárním diagramu této soustavy (obr. 5). Kromě doprovodných a přísadových prvků může tvárná litina také obsahovat legující prvky. Odlitky z LGK se často tepelně zpracovávají.

Litina s kuličkovým grafitem (LKG), dříve tvárná litina patří mezi grafitické litiny. Má podobné chemické složení jako litina s lupínkovým grafitem (LLG), ale s výrazně nižším obsahem síry. Zásadně se odlišuje průběhem krystalizace, kde se grafit vylučuje ve tvaru kuliček. Ten má příznivý vliv na pevnostní i plastické vlastnosti. Tyto vlastnosti mohou být ještě zlepšeny vhodným tepelným zpracováním. Průběh krystalizace litin názorně popisuje binární rovnovážný diagram Fe-C viz. Obr.5.



Obr. 5. Řez ternárním diagramem Fe-C-Si

2.4. Výroba litiny s kuličkovým grafitem

Při výrobě litiny s kuličkovým grafitem se postupuje od tavení litiny až k hotovému odlitku. Výchozím předpokladem jsou takové podmínky, aby při modifikování litiny, se grafit vylučoval ve tvaru kuliček.

V prvním kroku sestavíme kovovou vsázku, která se skládá ze surového železa a dalších surovin. Je nutné dbát na vysokou čistotu vsázkové suroviny, více než je běžné při tavení litiny s lupínkovým grafitem nebo temperované litiny. Dále nesmí obsahovat prvky, které působí proti růstu kuličkového grafitu a musí mít nízký obsah karbidotvorných prvků, fosforu a síry.

Vsázka tedy obsahuje:

- Surové železo (vyhovující výše uvedeným jakostním kritériím)
- Ocelový odpad (pečlivě tříděný)
- Vratné litiny (přetavení nálitků, zmetkových odlitků, tedy technologický odpad vracející se do výrobního procesu)

Litina se převážně taví v kuplovnách a v elektrických indukčních pecích. Kuplovný spíše vyhovují při tavení litiny s lupínkovým grafitem, ale jsou velmi ekonomicky výhodné. Pro výrobu litiny s kuličkovým grafitem jsou vhodnější tedy elektrické indukční pece. Výhodou této pece oproti kuplovně je především snadná regulace tavicího procesu, také snadná možnost úpravy chemického složení, menší propal a další.

2.4.1. Modifikace

Litina s kuličkovým grafitem se vyrábí modifikací taveniny čistým hořčíkem. Modifikace probíhá postupným rozpouštěním hořčíkových par, které probublávají sloupcem modifikované litiny. Je nutné, aby hořčíkové bubliny vyplouvaly pomalu a klidně a jejich dráha byla dostatečně dlouhá.

Získat potřebné množství hořčíku v litině je obtížné, protože rozpustit hořčík v roztavené litině je velice problematické. Teplota roztavené litiny je vyšší než bod varu hořčíku a při ponoření hořčíku do roztavené litiny nastává prudký ohřev a unik hořčičných par, které explozivně vyhadzují litinu z pánve. Tento nežádoucí děj nastane zvýší-li se teplota taveniny nad 1400°C. Pro vznik kuličkového grafitu, potřebujeme rozpustit ve litině minimálně 0,025% (v praxi obvykle 0,03-0,06%).

Při modifikaci dochází k velké spotřebě hořčíku, kde jeho využití činí pouhých 15-20%.

Je nezbytné při výrobě dodržet nízký obsah síry. Je-li obsah vyšší, dochází ke sloučení hořčíku se sírou a vzniká tzv. sirník hořečnatý, který vyplouvá na povrch nebo se rozptýluje v tavenině. Nezareagovaný zbytek hořčíku působí jako modifikátor, který ovlivňuje tvar grafitu. Je tedy významnou surovinou pro výrobu LGK.

Metody modifikace - předslitiny hořčíku

- modifikace v autoklávu

2.4.2. Očkování

Protože hořčík zvyšuje sklon k tvorbě karbidů a z modifikované litiny by se při tuhnutí mohla stát bílá litina, proto po ukončení reakce s hořčíkem dochází k dalšímu zpracování litiny a to očkování. Očkování je obecně technologická operace, při které se do tekutého kovu vnáší malé množství vhodně zvolené substance (očkovadla), a tím se zvýší množství krystalizačních zárodků určité fáze. Grafitizační očkování litiny s lupínkovým grafitem umožňuje zvýšit počet krystalizačních zárodků grafitu.[8].

Mechanismus očkování není dosud jednoznačně objasněný. Převládá názor, že očkování prvky, které snižují rozpustnost uhlíku, způsobuje v tavenině v uzavřeném objemu lokálně přesycenou taveninu právě uhlíkem. Takto vznikne shluk grafitu, což je vlastně nový zárodek. Nebo se využívají tzv. oxidické zárodky, kdy po přidání FeSi proběhne v tavenině dezoxidace, jejíž produktem jsou jemné částice SiO₂. A ty pak slouží jako zárodky, na kterých vzniká grafit. Očkovadla nejčastěji přidáváme do taveniny buď pouhým sypáním do proudu kovu při vylévání z pece nebo sypáním do lící pánve, která je z 1/4 naplněná. Ferosilicium FeSi75 (slitina Fe se 75 % Si) je nejčastěji používaným očkovadlem. Důvodem je jeho cena a dostupnost. Dodává se ve formě zrnité, drátu nebo kompaktního bloku. V současnosti se na trhu nabízí velmi široká škála očkovadel, viz. tab..[8]

Očkovadlo	Obsah základních prvků, % (zbytek je Fe)
FeSi75	Min. 68 Si, max. 0,5 Mn, max. 1,7 Al, max. 0,4 Cr
SIMANCAL	Si 70-75, Mn 2-4, Ca 0,8-2, Al 1-2
Foundry-Grade 75	Si 75±2, Al max. 1,25, Ca 0,8±0,2
Foundrysil 75	Si 75±2, Al max. 1,25, Ca 1,0±0,25, Ba 1,0±0,25
Superseed 75	Si 75±2, Al max. 0,5, Ca max. 0,1, Sr 0,8±0,2
Zirconic	Si 75±Al 1,25±0,25, Ca 2,25±0,25, Zr 1,55±0,25
Inogen 75	Si cca 75, Al+Ca cca 2,5
Inoculoy 63	Si 60-65, Mn 7-12, Ca 1,5-3, Ba 4-6, Al 1-1,5
Optinoc Z	Si 73-78, Zr 1,2-2,0, Ca 1,5-3,5, Al 1,2-2,2
SB 5	Si 64-70, Ba cca 2, Al cca 1,5, Ca cca 1
Inoculin	Si cca 65, Zr cca 5, Ca cca 1,3, Mn cca 3,5, Al cca 1,3

Tab.1 Příklady složení zrnitých očkovacích přísad [8]

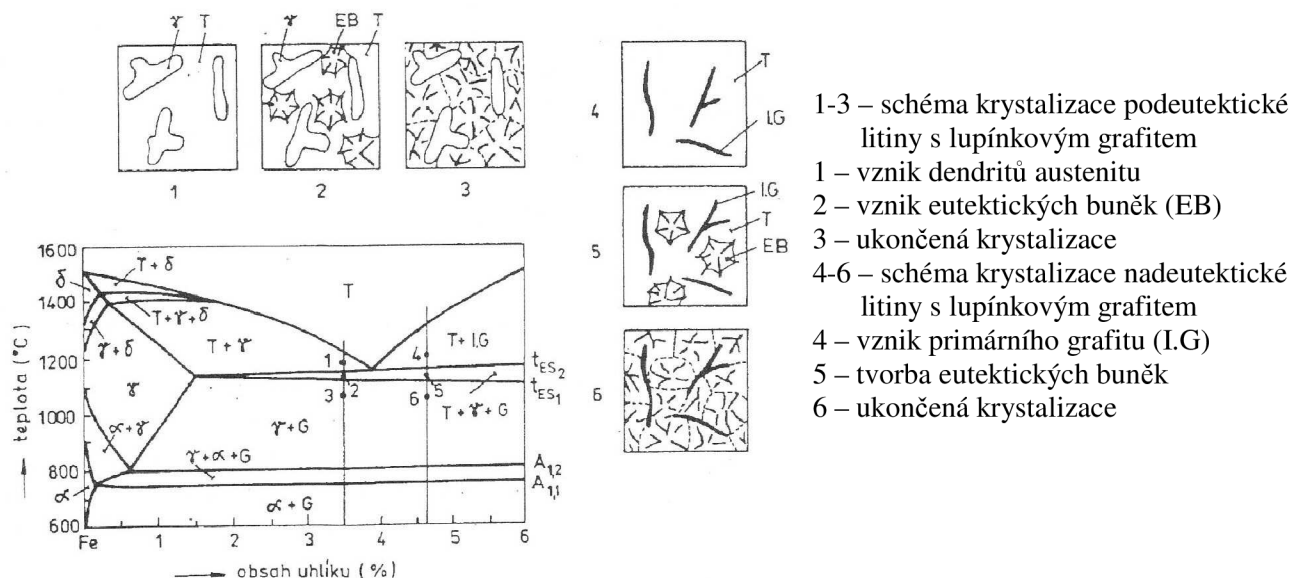
2.4.3. Krystalizace

Na průběh krystalizace litin s kuličkovým grafitem má výrazný vliv rychlost chladnutí. Průběh tuhnutí litin je ovlivněn podílem přísadových prvků. Při rychlém tuhnutí litiny jsou kuličky grafitu malé. Dlouhý interval tuhnutí podporuje vznik odmíšení. Pásma austenitické obálky kolem grafitových zrn, která se vytvoří jako první, jsou obohacena křemíkem, zatímco oblasti se zbylou taveninou mezi eutektickými buňkami, které tuhnou jako poslední, jsou o křemík ochuzeny. V těchto místech se hromadí síra, mangan a ostatní doprovodné prvky. Tím se vytvoří podmínky pro deformaci tvaru grafitu nebo pro tvorbu ledeburitu.

Fázovou přeměnu můžeme sledovat v rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C.

U podeutektické LKG začíná krystalizace tvorbou primárních dendritů austenitu, kde osy dendritů se obohacují grafitotvornými prvky. Karbidotvorné prvky se přesunují do mezidendritických prostorů a do zbytkové taveniny a tím dochází k eutektické krystalizaci.

Významnou roli v litinách hraje přísadový prvek křemík, jehož obsah se může měnit v poměrně širokém rozmezí. U grafitických litin, které mají vyšší obsah křemíku (2% a více), u nichž se uplatňuje stabilní rovnováha soustavy Fe – C – Si, je nutno fázové přeměny sledovat v ternárních diagramech. Používá se vertikální řez rovnovážným diagramem pro konstantní množství křemíku a poměrné obsahy železa a uhlíku viz. obr.6 [2].

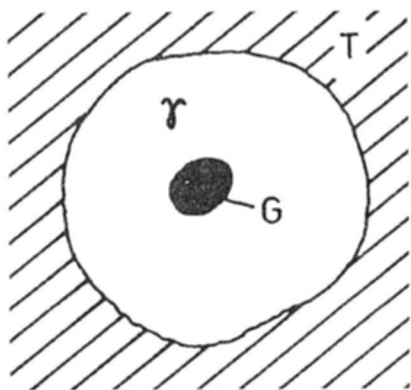


Obr.6 Pseudobinární rovnovážný diagram Fe-C-Si (pro 2% Si)

Průběh krystalizace LKG

V první fázi krystalizace dochází k vylučování prvních krystalů austenitu a růstu grafitu volně v tavenině. Přitahuje k sobě uhlík a tím snižuje jeho obsah v tavenině v okolí zrna grafitu. Tavenina je tedy silně konstitučně přechlazená a má velký sklon k tuhnutí. Kolem zrna grafitu se začne tvořit austenitická obálka viz. obr.7.

Při eutektické teplotě dosáhne austenit mezní koncentrace, je v rovnováze s taveninou a vzniká eutektická přeměna – vznik eutektických buněk z taveniny.



Obr.7 Vznik eutektické buňky z taveniny u litiny s kuličkovým grafitem



Obr.8 Kulička grafitu ve struktuře litiny REM, 2000x

V další fázi eutektické krystalizace se výrazně zpomalí růst grafitu a dochází k ukončení tuhnutí. Nyní dochází pouze k difúzním přesunům atomů uhlíku přes austenitickou obálku ze zbytkové taveniny. Nyní máme strukturu s velkým počtem grafitových zrn s malou vzdáleností mezi sebou.

Vznikne-li nám ale struktura s malým počtem grafitových zrn od sebe vzdálených, vlivem různých metalurgických faktorů, austenitická obálka stále roste a dochází k dalším přesunům přísadových prvků do austenitu.

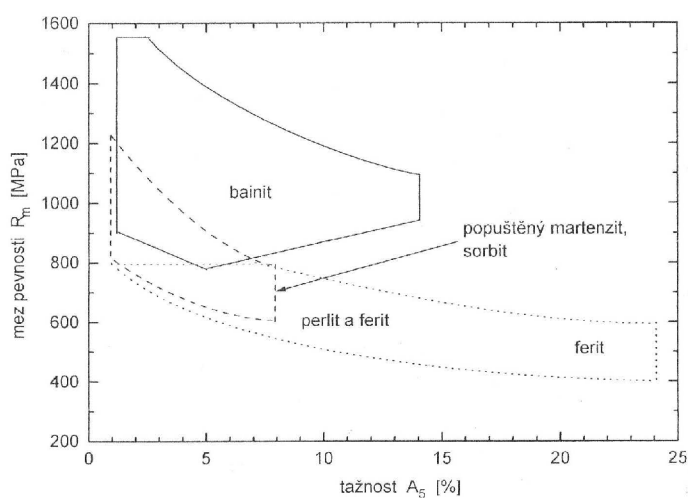
Po skončení eutektické krystalizace následuje ochlazování, které rovněž způsobuje přeměny týkající se hlavně kovové hmoty.

2.5. Vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem

Mechanické vlastnosti jsou zásadním způsobem ovlivňovány strukturou matrice. U feriticko-perlitických struktur mez pevnosti, mez kluzu a tvrdost vzrůstá se zvyšujícím se obsahem perlitu v matrici. Plastické vlastnosti, jako tažnost, případně kontrance naopak klesají.

U bainitických struktur je situace poněkud složitější, neboť kromě typu bainitu ovlivňuje mechanické vlastnosti i obsah zbytkového austenitu, který je funkcí jak výše transformační teploty, tak i doby setrvání na této teplotě. Pevnostní charakteristiky s poklesem transformační teploty rostou a maxima dosahují u struktur dolního bainitu. Optimální hodnoty tažnosti se naopak dosahují u struktur horního bainitu s maximálním obsahem zbytkového austenitu (teplota transformace 400°C, doba transformace 30 až 60 minut).

Možné kombinace pevnostních a plastických vlastností v závislosti na struktuře jsou uvedeny na obr.11. [3]



Obr. 11. Vztah mezi pevností a tažností pro různé druhy matrice litiny s kuličkovým grafitem

2.5.1. Výhody a možnosti použití litiny s kuličkovým grafitem

Ve srovnání s litými i tvářenými ocelmi (litinou s kuličkovým grafitem jsou nahrazovány ocelové odlitky, výkovky i svařence) má litina s kuličkovým grafitem řadu výhod:

Hustota

LKG obsahuje v základní kovové hmotě 10 až 13 objemových % kulovitých zrn grafitu. Proto má odlitek z tohoto materiálu asi o 8 až 10 % menší hustotu ($7,0 - 7,09 \text{ kg/dm}^3$) než součást ocelová. Náhradou oceli odlitkem z LKG se bez zásahu do konstrukce ušetří na hmotnosti součásti asi 10 %. Dalších 10 až 30 % hmotnosti je možno ušetřit úpravou konstrukce odlitku, která u ocelového odlitku musí respektovat horší slévárenské vlastnosti oceli [3].

Schopnost útlumu

Odlitek z LKG vystavený vibračním se v porovnání s ocelí o srovnatelné pevnosti utlumí asi za poloviční dobu. Je schopen absorbovat až 3x více energie než odlitek ocelový. Dobrá schopnost litiny s kuličkovým grafitem tlumit kmity omezuje hlučnost strojů a zařízení, umožňuje zklidnit jejich chod a přispívá k jejich přesnější funkci. Zlepšuje se tak i pracovní prostředí. Ještě větší schopnost útlumu v porovnání s litinou s kuličkovým grafitem mají litiny s lupínkovým nebo červíkovitým grafitem [3].

Kluzné vlastnosti

Na obrobeném povrchu odlitku z litiny s kuličkovým grafitem jsou četná rozříznutá zrna grafitu, který slouží při kluzném tření s protilehlou funkční plochou jako mazadlo. Po vydrolení grafitu slouží vzniklé jamky jako zásobníky mazadla olejem. LKG má z toho důvodu výrazně lepší kluzné vlastnosti nežli ocel, zejména při nouzovém chodu bez mazání [3].

Slévárenské vlastnosti

Tyto vlastnosti patří, při srovnávání s ocelí na odlitky, k jejím základním přednostem. Nižší tavní teplota LKG (asi o 350 °C) oproti oceli znamená nižší energetická náročnost při tavení a menší namáhání slévárenských forem. S tím dále také souvisí lepší povrch odlitků z litiny s kuličkovým grafitem a nižší náklady na jeho úpravu. Odlitky z LKG je také možno vyrábět přesněji, tzn. s menšími přírůstky na obrábění nežli odlitky z oceli. Moderní slévárenské technologie, již dovolují dosáhnout přesnosti srovnatelné s výkovkem.[3]

LKG má výrazně lepší zabíhavost nežli ocel. Tloušťku stěny ocelového odlitku proto určuje častěji technolog slévárny s přihlédnutím ke slévárenským vlastnostem oceli, než konstruktér na základě pevnostního výpočtu. Zatímco z LKG lze odlévat drobné odlitky s tloušťkou stěny i 2 mm, u oceli je tloušťka stěny odlitku nejméně 5 mm.

Sklon ke staženinám je u obou materiálů srovnatelný, ale v průběhu krystalizace LGK dochází na rozdíl od oceli k vylučování grafitu, což je pochod spojený s nárůstem objemu litiny. Tím se částečně hradí úbytek objemu ochlazené taveniny. Zmenšení objemu v tuhém stavu činí u LKG asi 2,8 %, u oceli na odlitky asi 6 %. Tento rozdíl se projeví v menších nálitcích pro litinové odlitky. Příznivý je také menší sklon LKG ke vzniku trhlin za tepla [3].

Jakost surového odlitku

Požadovanou jakost surového odlitku z LKG lze v mnoha případech získat již ve stavu po ztuhnutí ve formě bez následného tepelného zpracování. Při chladnutí odlitku z LKG ve formě nemusí být nutné ani žhání na snížení vnitřního pnutí [3].

Obrobitelnost

LKG se strukturou feritickou nebo feriticko-perlitickou je velmi dobře obrobitelná. Při stejných parametrech obrábění je spotřeba nástrojů při obrábění litiny s kuličkovým grafitem v porovnání s obráběním ocelí výrazně nižší (až o dvě třetiny). Dobrá obrobitelnost je přisuzována přítomnosti grafitu, který maže břit nástroje a intenzivnějšímu deformačnímu zpevňování materiálu při tvorbě třísky a usnadnění následného lomového procesu.

Dobrá obrobitelnost má významný podíl na všeobecném rozvoji spotřeby odlitku z LKG. Náhradou za součásti ocelové se dosáhne zlepšení obrobitelnosti a výrazných úspor na energii, mzdách, nářadích, strojích aj.. Úspory těchto výrobních nákladů při konverzi ocel - LKG se uvádějí 30 až 50 %.

Použití LKG ve strojírenství je velmi široké. V současné době se z tohoto materiálu vyrábějí například rotory elektrických generátorů, skříně plynových kompresorů, bloky naftových motorů, ložiskové skříně železničních vagónů, ozubená kola, zalomené hřídele osobních i nákladních automobilů, kola důlních vozíků, lisovací zápustky, válce válcovacích stolic, atd. [3].

Označení materiálu značkou		Pevnost v tahu (min.)	Mez kluzu (min.)	Tažnost (min.)	Struktur matrice	
dle ČSN EN	číselně dle ČSN	R_m [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]		
EN-GJS-350-22-LT	EN-JS1015	350	220	22	ferit	
EN-GJS-350-22-RT	EN-JS1014	350	220	22	ferit	
EN-GJS-350-22	EN-JS1010	350	220	22	ferit	
EN-GJS-400-18-LT	EN-JS1025	42 2314	400	240	18	ferit
EN-GJS-400-18-RT	EN-JS1024		400	250	18	ferit
EN-GJS-400-18	EN-JS1020	~ 42 2303	400	250	18	ferit
EN-GJS-400-15	EN-JS1030	~ 42 2304	400	250	15	převážně ferit
EN-GJS-450-10	EN-JS1040		450	310	10	ferit + perlit
EN-GJS-500-7	EN-JS1050	42 2305	500	320	7	ferit + perlit
EN-GJS-600-3	EN-JS1060	42 2306	600	370	3	perlit + ferit
EN-GJS-700-2	EN-JS1070	42 2307	700	420	2	převážně perlit
EN-GJS-800-2	EN-JS1080	42 2308	800	480	2	perlit
EN-GJS-900-2	EN-JS1090		900	600	2	perlit

Tab.2 Mechanické vlastnosti litin s kuličkovým grafitem

V tabulce 2 jsou uvedeny jednotlivé druhy litin s kuličkovým grafitem, které jsou v normě ČSN EN 1563 seřazeny podle mechanických vlastností, zjištěných na tyčích z odděleně litých zkušebních vzorků. Tabulka také uvádí nejnižší hodnoty nárazové práce na zkušebních vzorcích s V-vrubem pro vybrané druhy litin určených zejména pro práci za snížených teplot [2].

2.5.2. Vlivy přísadových prvků

Významný vliv na krystalizaci litin mají přísadové prvky. Chemické složení litiny má za následek, že při stejných podmínkách zpracování budou mít odlitky různou strukturu.

Přísadové prvky máme žádoucí, které přidáváme pro zlepšení vlastností výsledného materiálu a nežádoucí nebo-li nečistoty, které se snažíme eliminovat.

Doprovodné prvky: prospěšné – Mn, Si, Al, Cu

Škodlivé – S, P, N, O₂, H

Přísadové prvky: C, Cr, Ni, Mo, W, V, Ti, Al

Uhlík

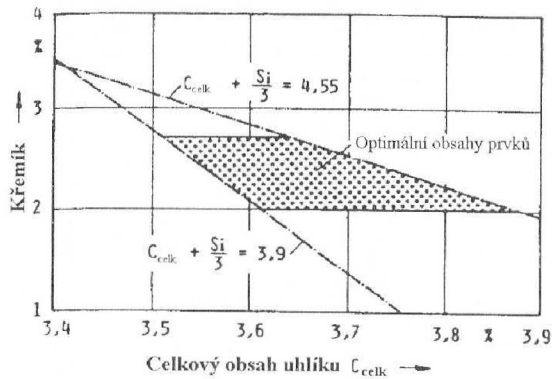
Sledujeme-li vliv prvků na krystalizaci, zajímá nás jejich vliv na grafitizaci. Prvek, který nejvíce ovlivňuje grafitizaci litin je uhlík, zvětšuje počet zárodku a zvyšuje eutektickou teplotu.

Uhlík je intersticiální prvek a má výrazný vliv na vlastnosti materiálu. S železem tvoří intersticiální tuhý roztok s omezenou rozpustností uhlíku. Po překročení této rozpustnosti se začne uhlík vylučovat jako samostatná fáze. Při nízkém obsahu uhlíku tvoří uhlík intersticiální sloučeninu Fe₃C a tato sloučenina není stabilní. Jestliže se uhlík vylučuje jako grafit, jde o stabilní soustavu a ta má významný vliv na posuzování změn při tuhnutí a chladnutí surových želez.

Křemík

Další důležitou přísadou v litinách je křemík, který výrazně modifikuje jejich vlastnosti. Zvyšuje mez kluzu, tvrdost feritu, mírně i mez pevnosti, snižuje tažnost a zejména rázovou houževnatost.

Křemík je velmi silně grafitotvorný a feritotvorný prvek. Také zvyšuje teploty přeměny A₁ a A_{c3} a tím snižuje kritickou rychlost ochlazování.



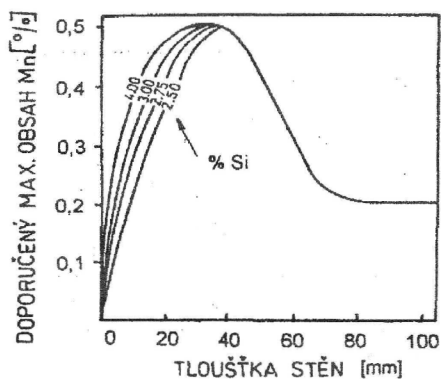
Obr.9 Optimální obsahy uhlíku a křemíku v litinách s kuličkovým grafitem

Mangan

Mangan je karbidotvorný prvek. Na rozdíl od uhlíku a křemíku mangan zabraňuje grafítizaci. Proto je nutno dodržet co nejnižší obsah Mn asi do 0,15%. Svoji přítomností má, ale také příznivý význam, vyvažuje negativní vliv síry. Síru na sebe váže a tím litinu odsiřuje.

Mangan zvyšuje rozpustnost uhlíku v tavenině, tedy zlepšuje homogenitu odlitku.

Vyšší množství obsahu manganu snižuje tažnost a zároveň pevnostní vlastnosti, zvyšuje se tvrdost a křehkost.



Obr.10 Doporučený maximální obsah manganu

Hořčík

Hořčík je významný především při modifikaci viz.str.6.. Vpravuje se do taveniny, čímž se značně zvyšuje počet eutektických buněk (obr.) a tím zaručuje vznik jemného grafitu. Přidává se v malém množství buď čistý nebo ve formě předslutin Ni-Mg, Cu-Mg, Al-Mg.

Hořčík působí jako silné odsiřovadlo a dezoxidovadlo. Při vyšším obsahu než je nutné dochází k tvorbě karbidů.

Síra

Je to prvek, který v litině stabilizuje cementit, zvětšuje smrštění a zhoršuje homogenitu odlitku. Síra v litině je považována za škodlivý doprovodný prvek, proto musí být její obsah co nejnižší. Do taveniny se dostává převážně z koksu a vratného materiálu.

Síra snižuje bod tání. Zvyšuje tvrdost a křehkost, také lámavost za tepla. Proto je důležitý mangan, který na sebe síru váže. Vzniká siriček manganatý (MnS) který se považuje za neškodný. Pro dobrou jakost litiny by obsah síry neměl přesahovat 0,1%.

Fosfor

Výskyt fosforu ve struktuře litin zvyšuje jejich tvrdost, křehkost a odolnost proti opotřebení. U běžných litin se obsah fosforu pohybuje kolem 0,2 – 0,5 %. Při obsahu nad 0,3 % tvoří binární nebo ternární eutektika – Steadit. (samostatná strukturní součást fosfid železa Fe_3P).

Fosfor zlepšuje tekutost taveniny a také zvyšuje dobu tuhnutí. U uměleckých litin se jeho obsah zvyšuje až nad 1%.

Měď

Měď podporuje vznik perlitické struktury, která ji mění ze základní feriticko-perlitické struktury při množství 0,4% Cu. Při obsahu větším nad 1% má měď nepříznivý vliv na tvar grafitických zrn. Zvyšující se pevnost litiny je přímo úměrná množství perlitu ve struktuře.

2.6. Tepelné zpracování

U litiny s kuličkovým grafitem se můžou ovlivňovat mechanické vlastnosti ve velmi širokém rozmezí tepelným zpracování kovové matrice, neboť vlastnosti odlitků grafitických litin jsou určeny jednak tvarem, velikostí, rozložením a množstvím grafitu, jednak vlastnostmi kovové hmoty. Grafitické částice porušují souvislost matrice a způsobují vznik lokálních koncentrací napětí při namáhání materiálu. Špičky napětí jsou tím větší, čím větší je rozměr částice grafitu a čím menší je její poloměr zakřivení. Vrubový účinek zrnitého grafitu je tedy, ve srovnání s jinými tvary grafitu, malý a mechanické vlastnosti LKG se blíží vlastnostem ocelí [8].

Způsoby tepelného zpracování:

- Feritizační žíhání
- Normalizační žíhání
- Žíhání sferoidizační
- Žíhání ke snížení tvrdosti
- Žíhání na odstranění vnitřního pnutí
- Izotermické zušlechťování
- Kalení a popouštění

2.6.1. Feritizační žíhání:

Cílem tohoto postupu je získat rovnovážný stav. Po ohřevu a výdrži na austenitizační teplotě je materiál pomalu ochlazován přes eutektoidní interval teplot ($A_{1,2} - A_{1,1}$) takovou rychlostí, aby došlo k rozpadu austenitu dle stabilní rovnováhy a to na ferit a grafit. V průběhu přeměny difunduje uhlík z austenitu k eutektickým grafitickým částicím a vylučuje se na jejich povrchu. Výsledná struktura LKG je tvořena čistě feritickou maticí [3].

2.6.2. Normalizační žíhání:

Účelem tohoto žíhání je zvýšit pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Používá se v těch případech, kdy je po odliti ve struktuře přítomno větší množství feritu. Po austenitizaci následuje ochlazování na vzduchu, v průběhu něhož dochází k transformaci austenitu na perlit. Výsledná struktura je čistě perlitická matrice a grafit [3].

2.6.3. Sferoidizační žíhání:

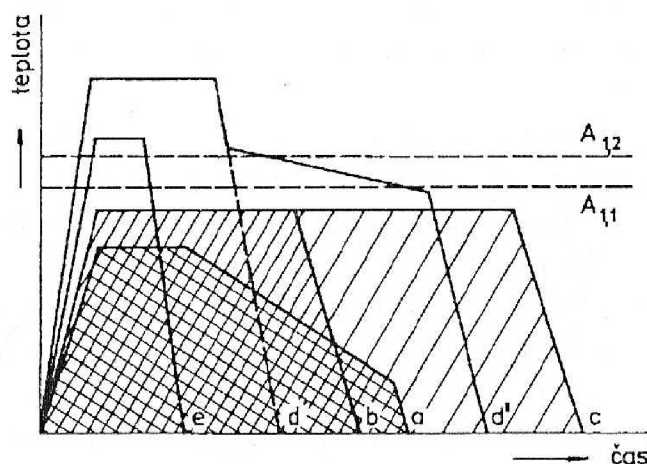
Sferoidizačním žíháním se snižuje tvrdost a zlepšuje obrobitelnost. Mění se poměr perlitu a feritu ve struktuře.

2.6.4. Žihání ke snížení tvrdosti:

Používá se u grafitických litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem tehdy, kdy vysoká tvrdost odlitku zhoršuje jeho obrobiteľnosť. Žihání ke snížení tvrdosti se provádí, jestliže se vyskytne ve struktuře ledeburit, který způsobuje vážné problémy při obrábění. Rozpad ledeburitického cementitu probíhá za teplot 900 až 950 °C po dobu zhruba 2 až 3 hodiny. Po té je doporučená ochlazovací rychlost 50 až 100 °C za hodinu. Pokles teploty přes eutektoidní interval je potřeba regulovat, aby výsledný poměr feritu a perlitu odpovídal požadavkům. Po vychladnutí je nutné žíhat ke snížení pnutí [8].

2.6.5. Žihání ke snížení vnitřního pnutí:

Provádí se u tvarově složitých odlitků z litiny, kde v odlitcích vznikají vlivem chladnutí velká pnutí. Tímto způsobem se žíhají odlitky s perlitickou nebo feriticko-perlitickou strukturou. Odlitek se pozvolna zahřívá na teplotu okolo 600 °C a na této teplotě se udržuje určitou dobu. Následuje pomalé ochlazování v peci na teplotu okolo 300 °C a další chladnutí probíhá na vzduchu. Doba a žíhací teplota závisí na druhu odlitku.



- a – žihání ke snížení vnitřního pnutí
- b – žihání sferoidizační
- c – žihání feritizační
- d – žihání ke snížení tvrdosti
- e – normalizační žihání

Obr.12 Způsoby žihání grafitických litin

2.6.6. Izotermické zušlechťování:

Cílem tohoto moderního tepelného zpracování je zvýšit pevnost, tvrdost a dosáhnout optimální kombinace pevnostních a plastických vlastností. Výhodou izotermického zušlechťování oproti martenzitickému kalení, je nízká úroveň vnitřního pnutí, tzn. minimální deformace a výrazné snížení náchylnosti k praskání.

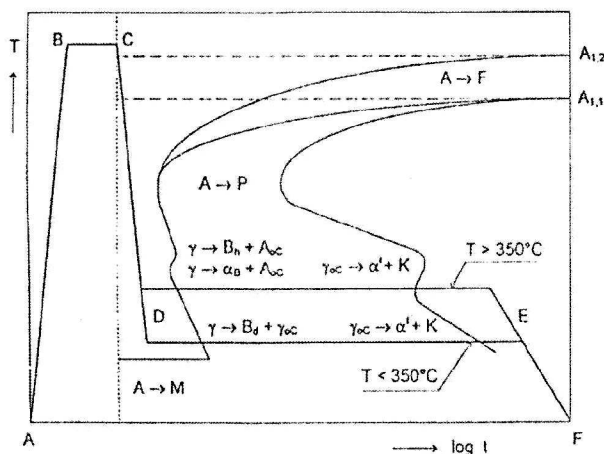
Izotermické zušlechťování sestává z austenitizace a následného ochlazení nadkritickou rychlostí do oblasti bainitické přeměny. Tato přeměna probíhá v solné lázni o konstantní teplotě (250 až 450°C). Podle výše izotermické prodlevy transformuje austenit buď na horní bainit (nad teplotou 350°C) nebo na dolní bainit (pod teplotou 350 °C) [3].

Po setrvání v termální lázních (0,5 až 3 h.) následuje dochlazení na vzduchu nebo ve vodě. Podle zvolené teploty přeměny může struktura obsahovat kromě bainitu také austenit. Je-li doba zušlechťování příliš krátká, může při chladnutí vzniknout z austenitu i malý podíl martenzitu.[3]

Základní chemické složení litin s kuličkovým grafitem pro účely izotermického zušlechťování se pohybuje v běžném rozsahu litin EN-GJS-400-18 nebo EN-GJS-400-15. Použití legujících přísad (Mo, Cu, Ni) má zabránit vzniku perlitu při ochlazování na teplotu transformace a zvýšit kalitelnost [2].

Izotermické zušlechťování má význam zejména u litin s kuličkovým grafitem, kdy izotermickým zušlechťováním LKG vzniká tzv. ADI litina, která vyniká řadou příznivých vlastností.

Na rozdíl od běžných ocelí, neprobíhá bainitická přeměna u LKG až do konce, ale po určité době se zastaví, a ve výsledné struktuře zůstane tak zachováno jisté množství zbytkového austenitu. Tato plastická fáze se výraznou měrou podílí na velmi dobrých mechanických vlastnostech izotermicky zušlechťované litiny s kuličkovým grafitem [3].



Obr.13 Schéma průběhu izotermického zušlechťování LKG v diagramu IRA

2.6.7. Kalení a popouštění:

Cílem kalících pochodů u litin je dosažení strukturního stavu, kdy matrice je převážně tvořena martenzitem nebo bainitem. Výsledná tvrdost grafitických litin po kalení je nižší než u ocelí, protože je snižují přítomné částice grafitu. Vliv tvaru grafitu, jeho velikosti a rozložení v základní kovové hmotě je největší u litin s lupínkovým grafitem, kdy se tvrdost po martenzitickém kalení pohybuje kolem 50 HRC. Navíc mají tyto litiny při kalení z důvodu přítomnosti lupínkového tvaru grafitu značný sklon k praskání. U litin s kuličkovým grafitem se dosahuje tvrdosti po kalení poněkud vyšší (cca 55 HRC) [2].

Martenzitické kalení:

Požívá se u grafitických i bílých litin. U grafitických se provádí za teplot 50 až 80 °C nad $A_{1,2}$. Při vyšších teplotách vzrůstá ve výsledné struktuře podíl zbytkového austenitu a tvrdost klesá. Kalí se do studené lázně (olej, voda) nebo pro snížení sklonu k deformacím a náchylnosti odlitků k praskání také termálně. Po kalení se odlitky popouštějí ke snížení vnitřních pnutí za nízké teploty do 200 °C. Odlitky z litiny s kuličkovým grafitem je možno pro dosažení výsledné kombinace pevnosti, houževnatosti a plasticity po kalení do oleje také popouštět při vysokých teplotách 550 až 650 °C. Tak například pro dynamicky namáhané odlitky (ojnice spalovacích motorů) se používá nízkolegované litiny s kuličkovým grafitem se sorbitickou strukturou [2].

Povrchové kalení

Povrchové kalení se provádí pro zvýšení odolnosti proti opotřebení povrchu odlitku. Často se požaduje vysoká otěruvzdornost na povrchu, ale zároveň houževnaté jádro odlitku. Vysoké tvrdosti povrchu se dosáhne jeho rychlým ohřevem (na teplotu 850 až 950 °C) – austenitizací povrchové vrstvy a jejím zakalením a následuje rychlé ochlazení olejem nebo vodou. Ohřev na kalící teplotu musí být rychlý a intenzivní, čímž se dosáhne vytvoření a zachování teplotního rozdílu mezi povrchem a jádrem kalené součásti. Struktura povrchové vrstvy je martenzitická, zatímco jádro ve kterém nedošlo v překrystalizaci je měkčí a houževnatější se strukturou feriticko-perlitickou nebo sorbitickou. Je důležité aby výchozí struktura byla perlitická s obsahem perlitu do 15 % a bez ledeburitického cementitu.

2.7. Izotermicky zušlechtěná ADI

V zahraničí dnes již běžně používané označení ADI (Austempered Ductile Iron) přísluší novému konstrukčnímu materiálu pro výrobu vysokopevných odlitků. Je jím litina s kuličkovým grafitem (LKG) tepelně zpracována izotermickým zušlechtěním. Tento způsob tepelného zpracování byl objeven v roce 1930 Devenportem a Bainem, používaný ale jen u ocelí. Po izotermické transformaci byla získána feritická struktura v kombinaci s karbidy, která dostala název „bainit“ [6,7].

Během druhé světové války se tento proces tepelného zpracování používal při výrobě zbraní. Vybavení na provedení izotermického zušlechtění bylo ale nedostatečně výkonné, a tak se izotermické zušlechtění stalo relativně drahým procesem tepelného zpracování a používalo se jen na vysoce výkonné součásti [7].

Izotermické zušlechtění se u LKG začal laboratorně zkoumat až v druhé polovině šedesátých let. V průběhu následující 25 let byl tento nový vysokopevný konstrukční materiál v mnoha zemích patentován a zaveden do výroby. První průmyslové aplikace se objevily v první polovině 70. let. První austemperizační pec byla vyrobena v roce 1972 a ve stejném roce bylo izotermické zušlechtění poprvé použito pro běžnou výrobu ADI [6,9].

O trvalém a stále vzrůstajícím zájmu o ADI svědčí růst objemu světové průmyslové výroby, který od roku 1985, kdy činil 8000 tun ročně, vyrostl asi třicetinásobně.

Izotermické zušlechtění zahrnuje tři kroky: Austenitizaci, rychlé ochlazení na teplotu izotermické transformace v bainitické oblasti, výdrž na této teplotě a konečné ochlazení na pokojovou teplotu. Ve srovnání s litinou s kuličkovým grafitem v litém stavu jsou mechanické vlastnosti ADI získané pomocí tepelného zpracování výrazně zlepšeny [7].

2.7.1. Austenitizace

Austenitizace probíhá v teplotním rozmezí 820 – 950 °C (tedy nad kritické teploty $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ v diagramu Fe - C), kde odlitek setrvá určitou dobu, potřebnou k získání austenitické matrice nasycené uhlíkem [7].

Doba austenitizace je ovlivněna strukturou LKG, množstvím a rozložením zrn grafitu, některými legujícími prvky a velikostí odlitku. Doba výdrže na austenitizační teplotě je 1 – 3 hodiny.

Významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti ADI má austenitizační teplota. Při nízké teplotě austenitizace nedochází k úplné austenitizaci a ve struktuře zůstává nerozpuštěný ferit, který snižuje pevnost [6].

K austenitizaci se používají plynové elektrické odporové pece a to převážně s interní atmosférou (pro zabránění oxidaci a oduhličení povrchu odlitku), solné lázně nebo fluidní lože [6].

2.7.2. Izotermická transformace

Po austenitizaci následuje izotermická transformace austenitu v bainitické oblasti. Odlitek se vyjme z austenitizační pece, rychle se ochladí na teplotu transformace (230 – 450 °C) a to nejčastěji v solné lázni.

Doba izotermické transformace se pohybuje v rozmezí 0,5 – 4 h. a závisí na teplotě austenitizace, teplotě transformace a chemickém složení materiálu.

Izotermická transformace prochází třemi údobími, během nichž austenit transformuje na bainit.

2.8. Bainitická přeměna

Bainitická transformace je považována za reakci smíšené povahy, za přechod mezi difúzní perlitickou přeměnou a bezdifúzní martenzitickou transformací. Dochází k přeměně přechlazeného austenitu v rozmezí teplot 550 až M_s , kdy vzniká při konstantní teplotě nelamelární rovnovážná feriticko-karbidická směs „bainit“.

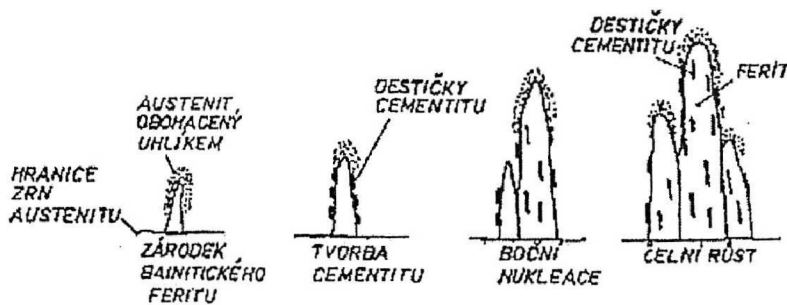
Bainit je pojmenovaný podle Edgara Baina, který popsal mechanismus jeho vzniku. Je to stabilní strukturní složka soustavy Fe-Fe₃C. Bainit je jemná nelamelární struktura složená hlavně z feritu a cementitu. Složením je podobný perlitu, jeho struktura připomíná martenzit (jehličky). Díky precipitačnímu zpevnění karbidy vyloučených z přesyceného roztoku austenitu a feritu je pevnější a tažnější než perlit [11].

Při bainitické přeměně dochází k bezdifúzní transformaci mřížek Fe_γ → Fe_α a současně probíhá difúze uhlíku. Přeměna mřížek tuhých roztoků se uskutečňuje smykovým mechanismem. Ten spočívá v homogenním smyku sousedních krystalografických rovin.

Vnitřní napětí, vyvolávající smykový pohyb rovin, vzniká v důsledku nerovnoměrného rozložení uhlíku v přechlazeném austenitu. Homogenní austenit se v průběhu bainitické přeměny rozděluje na dva tuhé roztoky o různé koncentraci uhlíku, a tím i s různou krystalografickou mřížkou.

Struktura bainitu je výrazně ovlivněna teplotou přeměny a chemickým složením slitin.

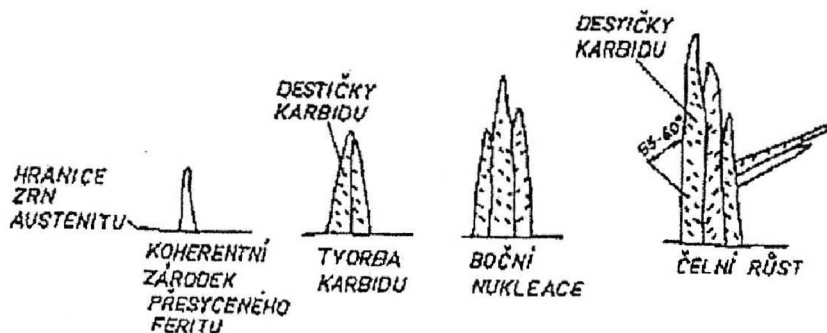
Při vyšších teplotách (550 až 350 °C) vzniká horní bainit, který je charakteristický tím, že hrubé karbidy jsou vyloučeny na hranicích feritických částic. Horní bainit je tvořen laťkami menší šířky bainitického feritu s podélně uspořádanými částicemi cementitu na povrchu laček a zbytkovým austenitem. Austenit zůstávající mezi feritickými laťkami se obohacuje o uhlík a tím dochází k vylučování cementitu na mezifázovém rozhraní ferit-austenit.



Obr.14 Schéma vzniku horního bainitu

V nižší teplotní oblasti (350 °C až M_s) vzniká při rozpadu austenitu dolní bainit. Drobné částice karbidu jsou vyloučeny uvnitř desek bainitického feritu, protože je již obtížná difúze uhlíku.

Tyto karbidické částice jsou orientované pod úhlem 55 až 60° k rovině čelního růstu feritu. Dolní bainit je velmi podobný popouštěnému martenzitu.



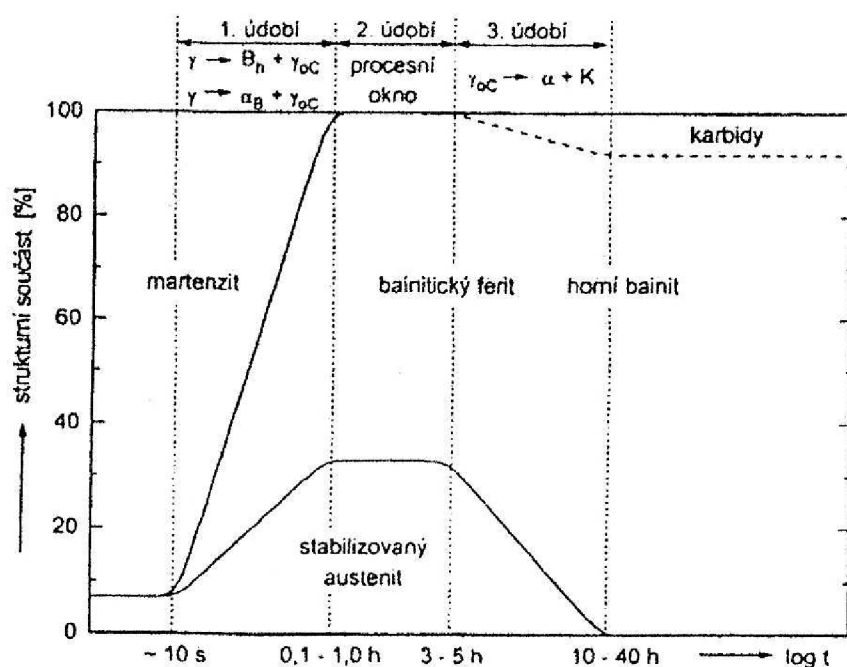
Obr.15 Schéma vzniku dolního bainitu

Bainitická přeměna se rozlišuje do tří údobí:

V prvním údobí dochází za vyšších teplot izotermické přeměny austenitu (asi nad 350 °C – oblast horního bainitu) k vylučování horního bainitu B_h bez nebo jen s malým množstvím karbidické fáze vyprecipitované uvnitř desek, kde se nachází bainitický ferit (α_B). Zbylý netransformovaný austenit se obohacuje uhlíkem (γ_{0C}). V tomto údobí nukleace a růst jednotlivých částic probíhá vysokou průměrnou rychlostí. Průběh první fáze přeměny lze popsat schématem $\gamma \rightarrow B_h + \gamma_{0C}$.

Ve druhém období výrazně klesá reakční rychlost na velmi nízkou hodnotu a vylučování bainitického feritu ustává. Dochází pouze k bočnímu růstu částic bainitu a větvení horního bainitu. Množství stabilizovaného austenitu ve výsledné struktuře (až 42 %) a koncentrace uhlíku v netransformovaném austenitu (1,5 – 2,1 % C) dosahují maxima. Hodnoty obou maxim ovlivňuje chemické složení a přeměny. Druhé stádium izotermické transformace se popisuje schématem $\gamma \rightarrow \alpha_B + \gamma_{0C}$ (také pro první stádium) [6].

Ve třetím stádiu se reakční rychlost opět zvyšuje, ale ve srovnání s prvním údobím je však nižší. Změny ve struktuře charakterizuje transformace uhlíkem obohaceného, netransformovaného austenitu na ferit a karbidy. Toto stádium izotermické transformace se popisuje schématem $\gamma \rightarrow \alpha' + K$ [6].



Obr.16 Schéma změn struktury matrice ADI v průběhu izotermické přeměny v bainitické oblasti za teplot nad 350°C

Průběh izotermické přeměny v oblasti dolního bainitu lze také rozdělit do tří údobí:

V prvním stádiu se nejvyšší reakční rychlostí vylučují z austenitu desky bainitického feritu, v nichž precipitují jehlice karbidů. Podobně jako v oblasti horního bainitu má vylučování bainitického feritu za následek ochlazování netransformovaného austenitu uhlíkem. Vlivem nižší rychlosti difúze uhlíku při nižších teplotách je maximální množství stabilizovaného austenitu ve výsledné struktuře dolního bainitu asi poloviční (15 – 20 %) [6].

V druhém stádiu stejně jako u transformace v oblasti horního bainitu, dosahuje množství netransformovaného austenitu, obohaceného uhlíkem, maxima. Ale za těchto teplot je obtížnější difúze, proto austenit není schopný akceptovat množství uhlíku, vylučujícího se z bainitického feritu. Dochází k tvorbě karbidů uvnitř bainitického feritu. Karbidickou fází je ϵ -karbid. Opět celková rychlost bainitické přeměny je nižší [7].

Ve třetím stadiu je přeměna zpomalena a dochází k transformaci uhlíkem obohaceného austenitu na ferit a karbidy. Doba tohoto stadia je výrazně delší [7].

2.8. Diskuse – struktura a mechanické vlastnosti ADI

V závislosti na podmínkách tepelného zpracování se výsledná struktura různých druhů ADI může lišit, to má vliv na mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti jsou stejně tak jako obsah zbytkového austenitu velmi výrazně ovlivněny délkou izotermické výdrže v solné lázni. Hodnoty meze pevnosti i meze kluzu vzrůstají s dobou transformace a maxima dosahují při nejdelších časech. Velmi nízké hodnoty meze pevnosti, stanovené při krátkých transformačních časech souvisí s předčasnými lomy, které nastávají v důsledku přítomnosti martenzitu ve struktuře. Tažnost, která reprezentuje plastické vlastnosti matrice je stejně jako napěťové charakteristiky ovlivněna transformačními časy, ale její průběh je odlišný viz. obr.18.

Nejvyšší hodnoty mechanických vlastností byly získány v průměrně úzkém intervalu 40 až 60 minut, tedy uprostřed intervalu, v němž je maximální obsah zbytkového austenitu [3].

Pro daný případ technického použití je možné volbou podmínek izotermického zušlechťení vyrobit konstrukční materiál s takovou kombinací několika vlastností, které při použití jiného druhu grafitické litiny, popřípadě lité oceli nelze dosáhnout. Můžeme tedy vyrobit ADI s pevností nad 1600 MPa, tažností 1 % a vysokou tvrdostí a odolností proti otěru nebo ADI

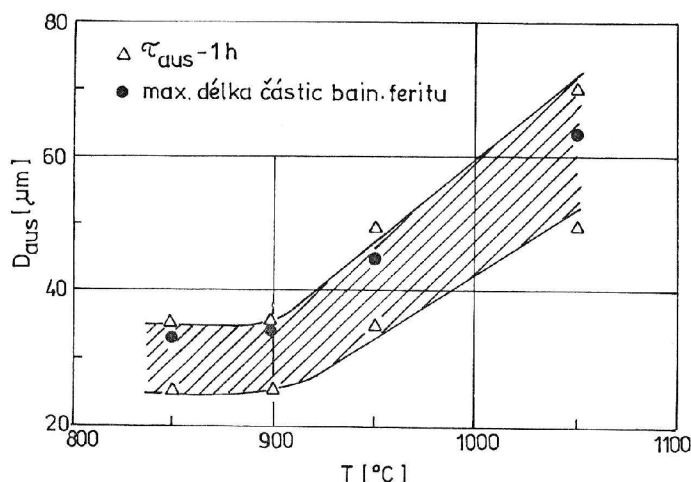
s pevností 1000 Mpa, houževnatostí 14 % a nízkou tvrdostí pro případ potřeby využití plastických vlastností tohoto materiálu [7].

ADI má vyšší dislokační hustotu, z toho důvodu může být až 2x pevnější než ostatní LKG. Pevnostní a deformační charakteristiky se odvíjejí od struktury ADI, kterou ovlivňují teplota austenitizace, teplota a doba izotermické transformace a chemické složení.

2.9.1. Vliv teploty austenitizace:

Teplota austenitizace má výrazný vliv na výslednou strukturu materiálu. Se zvyšující se teplotou austenitizace, se ve struktuře horního i dolního bainitu, zvětšuje délka jehlic bainitického feritu. Jehlice rostou tak dlouho, až dosáhnou nějaké bariéry, například hranice austenitu.. Vyšším austenitizačním teplotám lze tedy přisoudit jev, hrubnutí zrna austenitu.

Výrazným zvýšením austenitizační teploty (asi nad 950 °C) může dojít k nárůstu tvrdosti a ztráty tažnosti ADI, vzhledem k možnému výskytu martenzitu, důsledkem ochlazování.



Obr.17 Vliv teploty austenitizace na velikost zrna austenitu

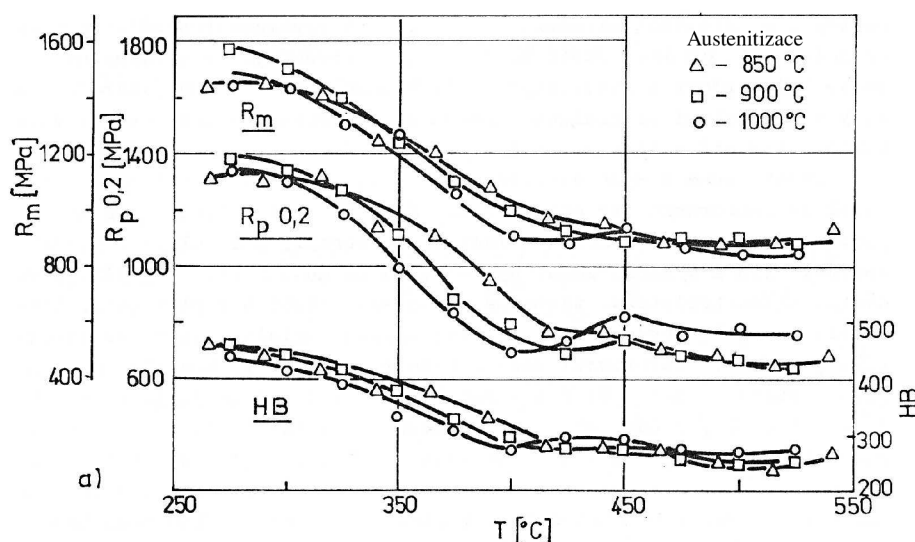
2.9.2. Vliv transformační teploty:

Se vzrůstající teplotou izotermické přeměny (cca do 420 °C) roste tažnost a houževnatost, zatímco pevnost, mez kluzu a tvrdost klesá. To má za následek změna v mikrostruktuře. Pevnost souvisí s vyšší pevností okolního bainitu. Zbylá část uhlíkem obohaceného austenitu, který se ve struktuře zachová, má příznivý vliv na plastické vlastnosti a houževnatost [7].

Za nižších teplot probíhá difúze i nukleace pomaleji, jehlice bainitického feritu se formují pomalu, jsou jemné a blíže u sebe. Struktura stabilizovaného austenitu je také jemnější, ale jeho obsah oproti transformaci, za vyšších teplot klesá což vede k zvýšení pevnostních charakteristik ADI [7].

Za vyšších transformačních teplot je difúze uhlíku vysoká, i při větším přechlazení. Austenit je více stabilizován uhlíkem a jeho obsah ve výsledné struktuře je vysoký. Důsledkem těchto změn je pokles bainitického feritu, jehož jehlice jsou hrubé. Tím se mění mechanické vlastnosti ADI a dochází k růstu pevnosti a houževnatosti. Nejvyšší tvárnost a houževnatost v rozmezí použitých teplot do 420 °C je u směsi horního bainitu a velkého množství zbytkového austenitu. Z toho tedy vyplývá, že tažnost a houževnatost souvisí s obsahem stabilizovaného austenitu v matici [7].

Nejvýhodnějších mechanických vlastností (tažnost a houževnatost) se dosahuje při transformačních teplotách 350 až 420 °C.



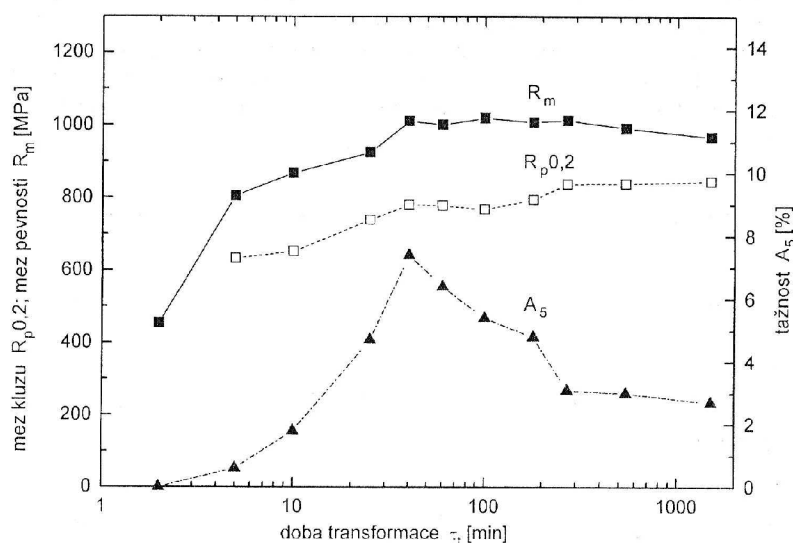
Obr.18 Závislost mechanických vlastností (R_m , $R_{P\,0,2}$, HB) na transformační teplotě [5]

2.9.3. Vliv transformační doby

S dobou transformace na příslušné teplotě roste pevnost v tahu a mez kluzu a maxima dosahují při nejdelších časech, ale tvrdost klesá. Zatímco tažnost dosahuje maxim v čase, kdy se ve struktuře vyskytuje menší obsah stabilizovaného austenitu.

Nízké hodnoty pevnostních a deformačních charakteristik stanovené při kratších časech izotermické transformace mají souvislost s výskytem martenzitu ve struktuře ADI. Při delších

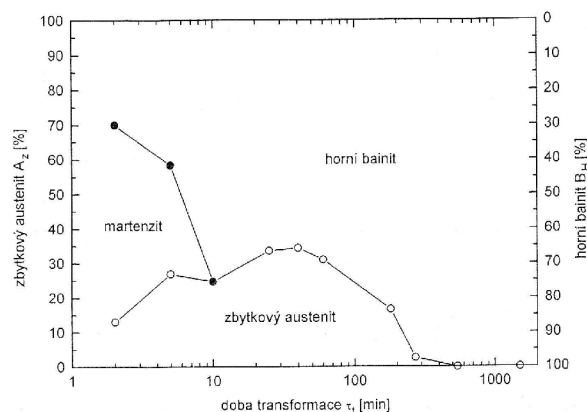
časech, také může dojít k poklesu tažnosti a nárůstu pevnosti, což má za následek přítomnost karbidických fází z důsledku rozpadu netransformovaného austenitu podle rovnice třetího stádia přeměny [7].



Obr.19 Závislost mechanických vlastností $R_p 0,2$, R_m , A_5 na době transformace ADI (teplota transformace $t_T = 400^\circ\text{C}$) [3]

Struktura ADI při transformační teplotě $t_T = 400^\circ\text{C}$

Na základě rentgenografické i metalografické analýzy bylo prokázáno, že struktura izotermicky zušlechtné LGK ($t_T = 400^\circ\text{C}$) sestává zejména z horního bainitu a zbytkového austenitu, jehož obsah je funkcí doby transformace, obr.20. U dvou materiálů s nejkratšími transformačními časy byla zjištěna i přítomnost martenzitu. Výskyt martenzitu souvisí s krátkým časem izotermické transformace, v důsledku čehož proběhne bainitická přeměna jen částečně a po následném zchlazení do vody se uskuteční martenzitická transformace [3]. Fáze jako martenzit, karbidy přísadových prvků, případně perlit jsou ve struktuře ADI nežádoucí, protože vedou ke snížení tažnosti i ostatních mechanických vlastností.



Obr.20 Vliv doby transformace na strukturu ADI (teplota transformace $t_T = 400^\circ\text{C}$)

2.9.4. Mikrostruktura ADI

Binitický ferit:

Při izotermické transformaci za vyšších teplot (nad 350 °C), nebo-li v oblasti horního bainitu, se bainitický ferit začíná tvořit feritickými deskami. Tyto desky rostou ve shlucích a v každém shluku jsou desky rovnoběžné s identickou krystalografickou orientací. Desky jsou od sebe odděleny vrstvou karbidu s odlišnou krystalografickou mřížkou, viz. obr.14.

V průběhu izotermické transformace při nižších teplotách (pod 350 °C), oblast dolního bainitu, dochází k tvorbě bainitického feritu s podobnými krystalografickými rysy jako při transformaci za vyšších teplot. Ale v tomto případě, v průběhu tuhnutí, se vylučují karbidy uvnitř desek feritu, viz. obr.15.

Stabilizovaný austenit

Během austenitizace se vytváří ve struktuře austenit s určitým podílem uhlíku, jehož obsah se mění v závislosti na austenitizační teplotě. Bainitickou přeměnou se zvyšuje jeho stabilita tak, že se nepřeměněný austenit obohacuje uhlíkem. Stabilitu austenitu také ovlivňuje chemické složení a doba transformace. Stabilizovaný austenit společně s bainitickým feritem mají příznivý vliv na vlastnosti, zejména na únavu ADI [7].

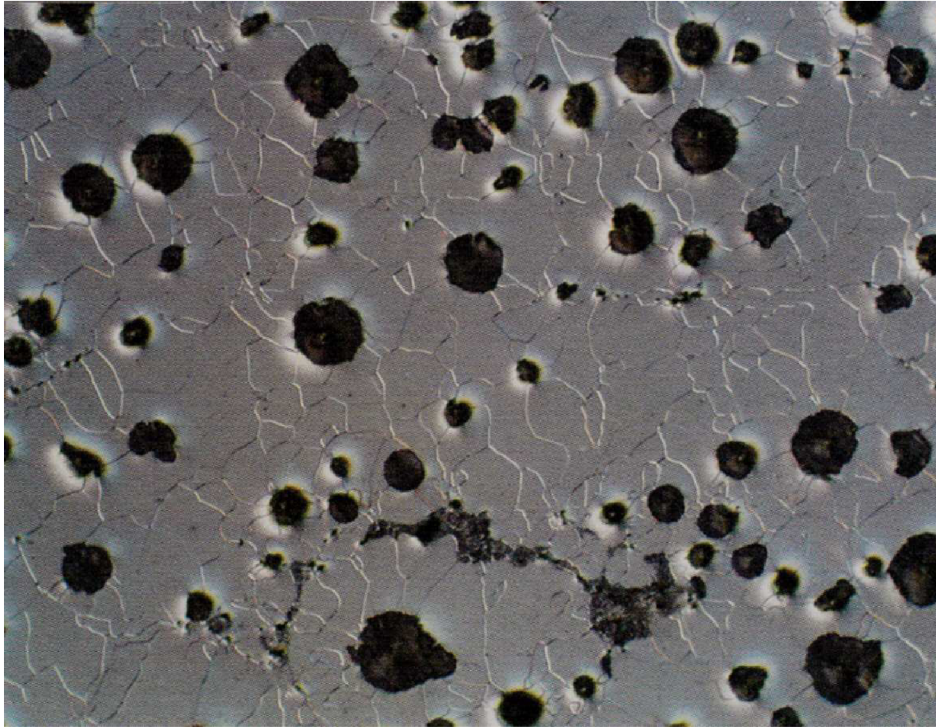
Martenzit

Výskyt martenzitu ve struktuře ADI je nežádoucí, protože zvyšuje tvrdost. Může vzniknout v průběhu ochlazování, kdy část netransformovaného austenitu transformuje na martenzit. K tomu dochází v případě krátké izotermické prodlevy, kdy austenit není dostatečně nasycen uhlíkem nebo v důsledku segregace legujících prvků [2,7].

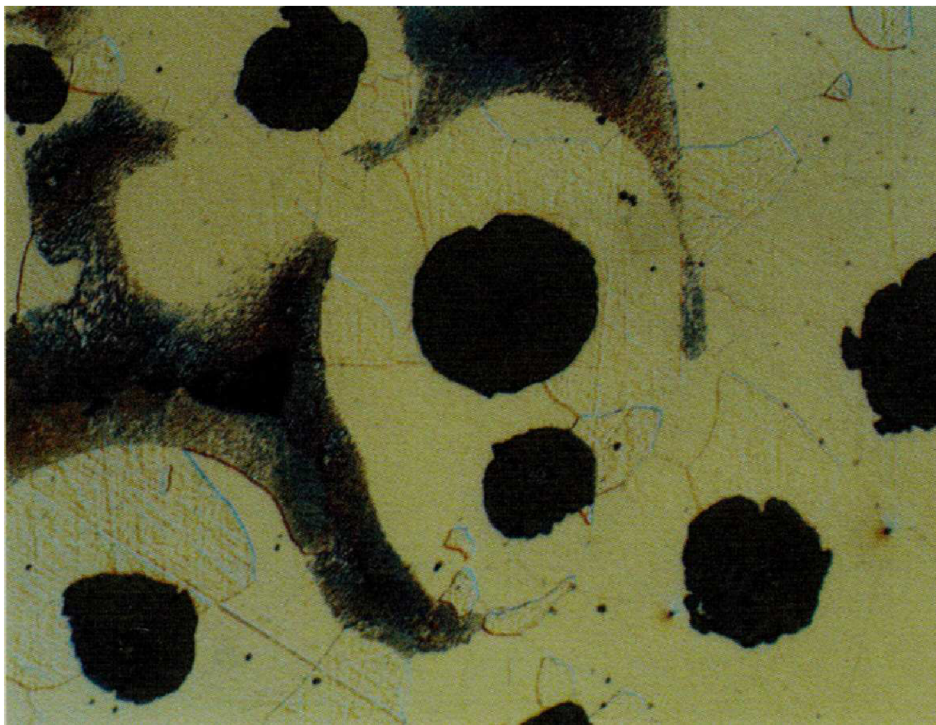
Karbidy

K precipitaci karbidické fáze na povrchu jehlic bainitického feritu, případně v jejich objemu, dochází v závislosti na chemickém složení a podmínkách tepelného zpracování.

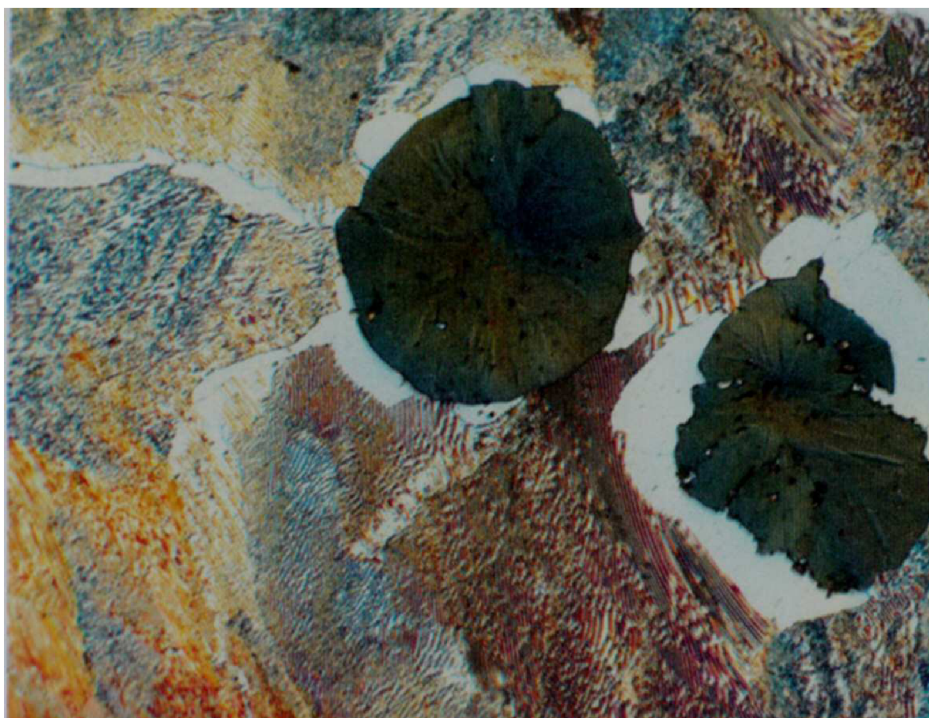
Výrazná vliv má zejména délka izotermické prodlevy. S jejím prodlužováním dochází k rozpadu netransformovaného austenitu na směs karbidů a feritu, což zhoršuje mechanické vlastnosti ADI [7].



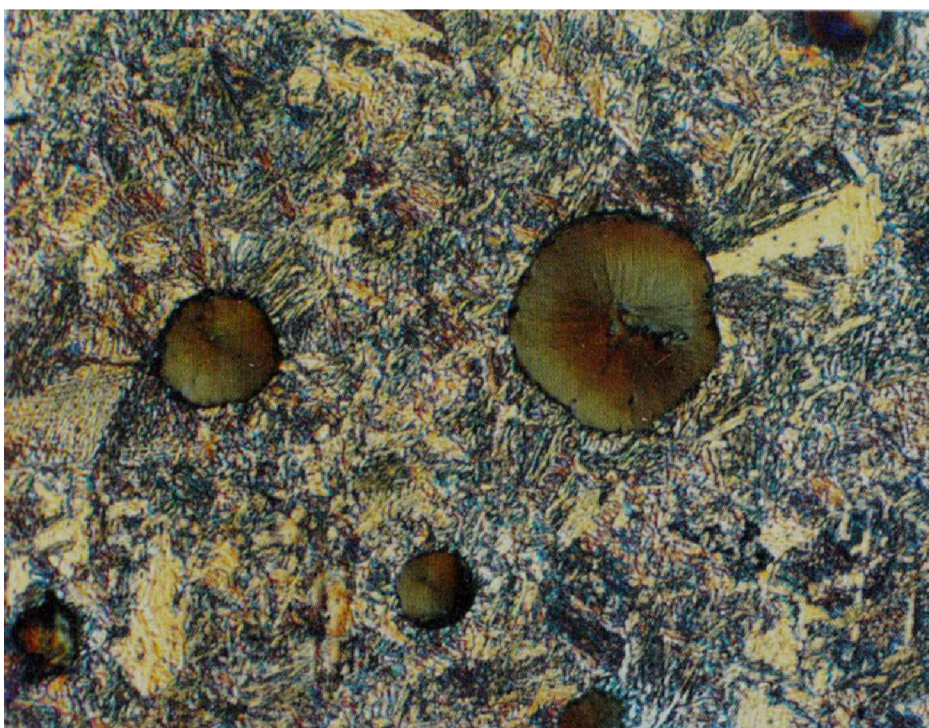
Obr.21 Feritická LKG F0



Obr.22 Feriticko-perlitická LKG FP15



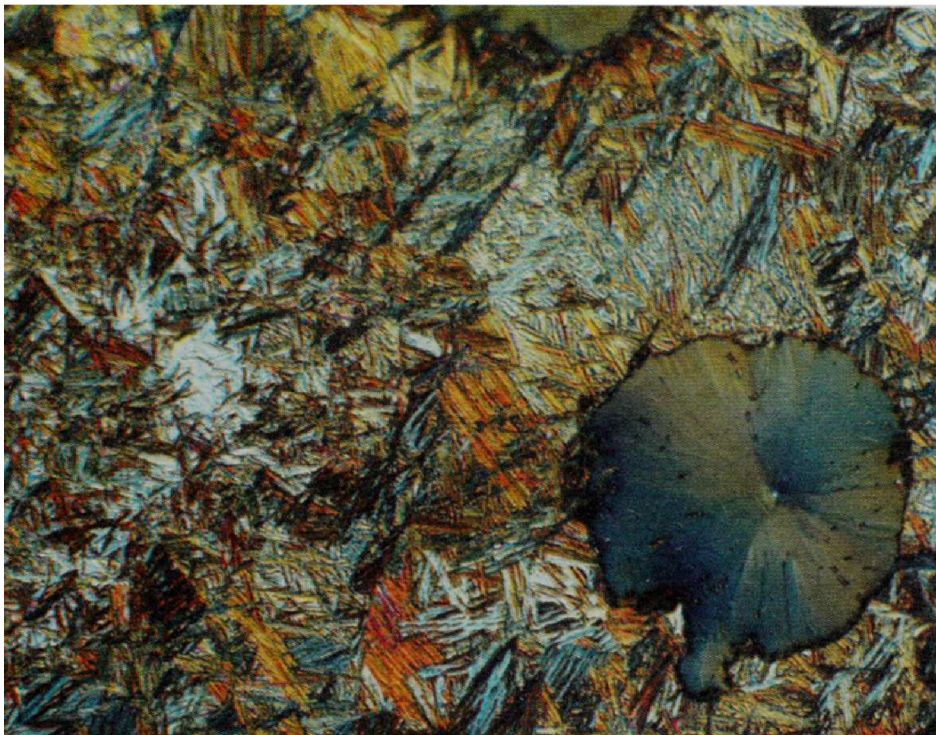
Obr.23 Perlitická LKG P15



Obr.24 ADI – struktura horního bainitu BH15



Obr.25 ADI – struktura přechodového bainitu BP15



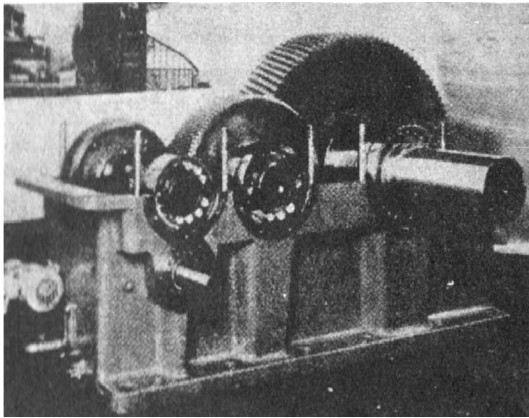
Obr.26 ADI – struktura dolního bainitu BD15

2.10. Použití ADI v praxi a průmyslu

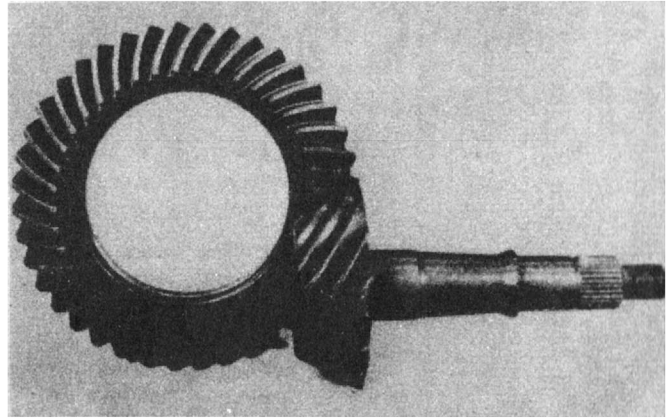
Výhodná kombinace mechanických vlastností – vysoká houževnatost, dobrá tažnost, vysoká otěruvzdornost a pevnost v tahu, předurčuje ADI k použití na náročné komponenty ve strojírenském a automobilovém průmyslu. Typické výrobky z ADI jsou ozubená kola, soukolí náhonu náprav osobních i nákladních automobilů, části převodovek, klikové hřídele pro těžké diesellové motory, kola a klouby lokomotiv, brzdové špalky pro kola lokomotiv, kladky pro pásové dopravníky, řetězová kola, lisovací nástroje (válce válcovacích stolic, lisovací zápustky) atd.[5].

Použití ADI má své výhody:

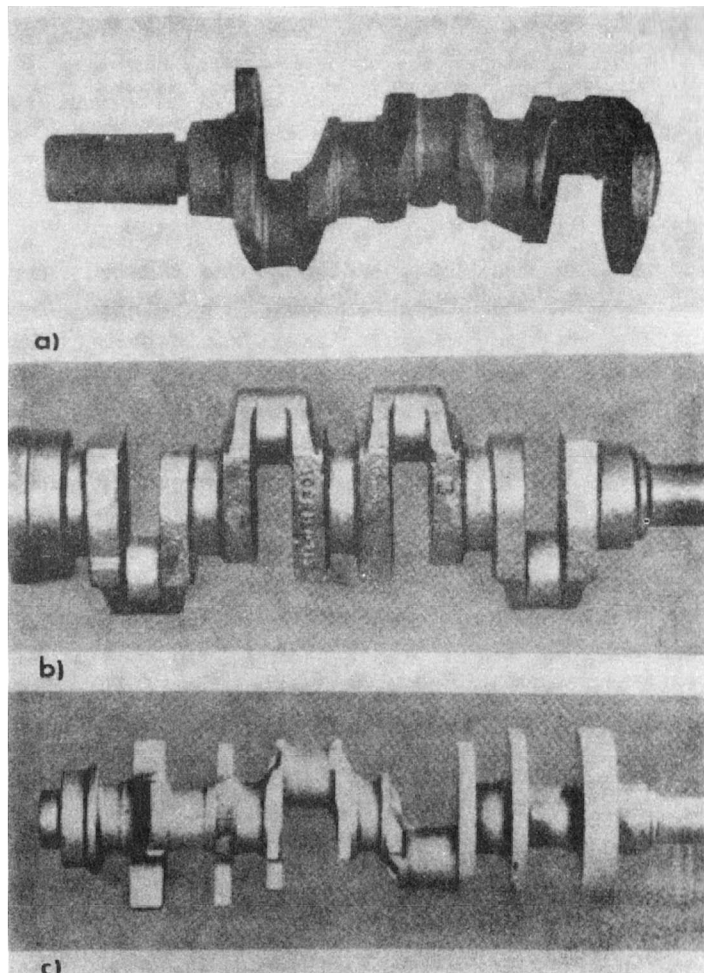
- vynikající slévatelnost;
- nižší náklady na obrábění;
- lepší obrobitelnost než ocel, pokud je obráběna před izotermickým kalením. Třísky jsou jemně dělené, mohou být snadněji odstraněny;
- nižší náklady na tepelné zpracování (než při např. indukčním kalení) – homogenní struktura tvarově komplikovaných dílů;
- nižší spotřeba energií – jeden typický odlitek spotřebuje o 50 % méně energie než z oceli a o 80 % méně energie než kovaný z oceli;
- srovnatelná pevnost s ocelí;
- o 10 % nižší specifická hmotnost, díl je pak o 10 % lehčí oproti ocelovému;
- díly z ADI mají třikrát větší pevnost než odlévané nebo kované z hliníku, ale přitom mají jen 2,5krát větší hmotnost;
- vynikající odolnost proti dynamickému zatížení;
- vynikající tlumicí vlastnosti při chvění;
- vynikající odolnost proti otěru, jak u zemních strojů, ale také například pro klikové hřídele automobilů.[13]



Obr.27 Stacionární hnací ústrojí s ozubenými koly z ADI [5]



Obr.28 Soukolí náhonu zadní nápravy osobního automobilu z ADI [5]



Obr.29 Odlitky klikových hřídelů motorů osobních automobilů z ADI
 a) Volvo b) Mercedes c) Leyland [5]

3. Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo zjistit, na základě literární rešerše a analýzy získaných informací strukturu a mechanické vlastnosti ADI a navrhnout optimální podmínky izotermického zpracování pro litinu s kuličkovým grafitem.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Literární rešerše dané problematiky
- 2) Analýza literárních údajů
- 3) Volba podmínek tepelného zpracování
- 4) Diskuse
- 5) Závěr

4. Závěr

Na základě studie a analýzy získaných informací z literatury o zadaném tématu lze říci, že:

1. Izotermickým zušlechťováním litiny s kuličkovým grafitem vzniká izotermicky zušlechtěná LKG, zvaná jako ADI (Austempered Ductile Iron).
2. Strukturu a mechanické vlastnosti ADI výrazně ovlivňují podmínky transformace a chemické složení. Průběh izotermické transformace se dělí na tři údobí:
 - V první fázi dochází k tvorbě bainitického feritu s podílem uhlíkem obohaceného austenitu. Tato přeměna probíhá velmi rychle.
 - V druhém údobí transformace se rychlost výrazně snižuje a dochází k růstu austenitu na bočních stranách bainitického feritu. Toto druhé údobí se považuje za nejvýznamnější pro vznik příznivých kombinací mechanických vlastností materiálu.
 - Ve třetí fázi se rychlost transformace opět zvyšuje a dochází k transformaci uhlíkem obohaceného austenitu na ferit a karbidy.
3. Mechanické vlastnosti ADI jsou dány strukturou a ta se mění v závislosti na podmínkách izotermické transformace.
 - Teplota austenitizace: 820 – 950 °C po dobu 1 – 3 h.
 - Teplota izotermické transformace: 230 – 450 °C, optimálních mechanických vlastností (tažnost a houževnatost) se dosahuje při teplotách transformace 350 – 420 °C
 - Doba izotermické transformace: 0,5 – 4 h., nejlepších mechanických vlastností se dosahuje v intervalu 40 – 60 minut, kdy je ve struktuře maximální výskyt zbytkového austenitu.
 - Chemické složení
4. ADI litina je poměrně nový materiál, který vyniká svou příznivou kombinací mechanických vlastností. Považuje se za vysokopevný, houževnatý materiál s širokým uplatněním, převážně ve strojírenském a automobilovém průmyslu

5. Seznam použité literatury

1. PTÁČEK LDĚK a kol.: Nauka o materiálu I. CREM, Brno 2003
2. PTÁČEK LDĚK a kol.: Nauka o materiálu II. CREM, Brno 2002
3. VĚCHET, S. – KOHOUT, J. – BORŮVKA, O.: Únavové vlastnosti tvárné litiny, Žilinská universita, Žilina 2001
4. SKOČOVSKÝ, P. – ŠIMAN, I.: Štruktúrna analýza liatin, Alfa, Bratislava 1989
5. DORAZIL, E.: Vysokopevná bainitická litina, Akademia, Praha 1985
6. DORAZIL, E – VĚCHET, S. - KOHOUT, J.: Litina s kuličkovým grafitem a její vysokopevná varianta – ADI. Slévárství XLVI., 1998, č. 11-12, str. 440-446
7. HANZLÍKOVÁ, K.: Vliv doby izotermické transformace na mikrostrukturu ADI a únavové vlastnosti ADI – Dizertační práce, Brno 2005
8. Grafitické litiny, www.ime.fme.vutbr.cz, studijní opory – grafitické litiny
9. Litina, www.guido.cz/objevy/litina.html
10. Rozpad austenitu, www.atcam.ic.cz/rozpad-austenitu.pdf
11. Bainit, www.sk.wikipedia.org/wiki/bainit
12. Bainitická litina, www.sk.wikipedia.org/wiki/Bainiticakliatina
13. Progresivní nástroje pro nové konstrukční materiály, www.mmspektrum.com/clanek/progresivni-nastroje-pro-nove-konstrukcni-materialy
14. SZÁRAZ, A. – FABIAN, P. – SLÁDEK, A.: Vplyv tepelného zpracovania na tribologické vlastnosti grafitických liatin
15. SKOČOVSKÝ, P. – PODRÁBSKÝ, T.: Grafitické liatiny, EDIS ŽU, Žilina 2005
16. SKOČOVSKÝ, P. – MATEJKA, M.: Mikroštruktúra liatin – metalografická príručka, Trenčín 1994