

Technická universita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Studijní program B2341 – strojírenství

Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku

**Cast iron with spheroidal graphite with a higher content of
silicon**

Ondřej ŘIDKÝ

KSP-SM-B19

Vedoucí bakalářské práce : Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant bakalářské práce : Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 47

Počet obrázků: 30

Počet tabulek: 7

Počet vzorců: 4

5.6.2009

Anotace

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Obor strojírenská metalurgie

Studijní program: B2341 - strojírenství
Student: Ondřej Řídký
Téma práce : Litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku
Cast iron with spheroidal graphite with a higher content of silicon
Číslo BP: KSP-SM-B19
Vedoucí BP: Prof. Ing. Iva Nová, Csc. – TU v Liberci
Konzultant: Prof. Ing. Iva Nová, Csc. – TU v Liberci

Abstrakt:

Tato Bakalářská práce je věnována litině s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku, jelikož tento materiál dle prvních prováděných výzkumů vykazuje vhodné mechanické vlastnosti. U nás je dosud nepoužívaná a přitom se jeví, jako perspektivní materiál pro automobilový průmysl. V první části bakalářské práce je vysvětleno, jak se litina s kuličkovým grafitem vyrábí, popis jejich vlastností a možnosti použití této litiny. Další část této práce je věnována litině se zvýšeným obsahem křemíku (asi 3,75% Si), která by do budoucna mohla nahradit dosud používanou litinu EN-GJS 500-7, která má feriticko-perlitickou strukturu a tudíž nehomogenní vlastnosti v různých místech. Popřípadě by litina s obsahem okolo 2,75% Si by mohla nahradit EN-GJS 400-15. V poslední části je zmíněn výzkum prováděný na TU v Liberci, kdy se hledala vhodná metalurgická výroba těchto litin, tak aby se dosáhlo mechanických vlastností dané normou ISO1083:2004 (E).

Abstrakt:

This Bachelor thesis is devoted to alloy with spheroidal graphite with a higher content of silicon, since this material according to the first research carried out shows suitable mechanical properties. We have not used it yet, it appears as a promising material for the automotive industry. In the first part of thesis is explained how the cast iron with spheroidal graphite is produced, a description of their characteristics and possibilities of using this iron. Another part of this work is devoted to alloy with a high content of silicon (about 3.75% Si), which would in the future to replace the currently used cast iron EN-GJS 500-7, which has a ferritic-pearlite structure and therefore inhomogeneous properties in different locations. Alternatively, the iron containing about 2.75% Si could replace EN-GJS 400-15. In the last part referred to research carried out at TU in Liberec, where to find appropriate metallurgical production of cast iron in order to achieve the mechanical properties of the standard ISO1083: 2004 (E).

Místopřísežné prohlášení :

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovával samostatně za použití příslušné literatury

V Liberci dne 5. června 2009

.....
Ondřej Řídký

Dopravní 989

463011 Liberec 30

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 5.6. 2009

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully Aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expense invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant

Date: 16.5.2009

Signature:

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, Csc. za poskytnutí některých podkladů a cenných rad pro vyhotovení práce. Dále bych chtěl poděkovat slečně Anetě Pavlenkové za pomoc s překladem anglicky psaných podkladů k bakalářské práci. A symbolicky děkuji všem svým známým a přátelům, kteří mě podporovali při zhotovení bakalářské práce .

















OBSAH:

1. ÚVOD.....	9
2. TEORIE GRAFITICKÝCH LITIN.....	10
2.1. Základní definice litin a její výroba.....	10
2.1.1. Druhy litin.....	10
2.1.2. Vlastnosti grafitických litin.....	11
2.2. Diagram Fe-C-Si	12
2.3. Složení litiny s kuličkovým grafitem.....	15
2.3.1. Vliv základních přísadových prvků na litinu s kuličkovým grafitem...15	
2.3.2. Kovová matrice v litině s kuličkovým grafitem.....16	
2.4. Metalurgie litiny s kuličkovým grafitem.....	20
2.4.1 Příprava taveniny.....	20
2.4.2 Krystalizace litiny s kuličkovým grafitem.....	20
2.4.2.1 Stadia krystalizace.....	21
2.4.2.2 druhy modifikátorů	22
2.5. Použití a mechanické vlastnosti litin s kuličkovým grafitem	23
2.6. Tepelné zpracování litin s kuličkovým grafitem	23
3. VLIV ZVÝŠENÉHO OBSAHU KŘEMÍKU NA LITINU S KULIČKOVÝM GRAFITEM A POZNATKY ŠVÉDSKÝCH AUTORŮ	26
3.1. Vliv zvýšeného obsahu na litinu s kuličkovým grafitem.....	26
3.2. Důvody výzkumu litiny s vyšším obsahem křemíku.....	26
3.3. Zkoušení zvolených litin s vyšším obsahem křemíku.....	30
3.3.1 Příprava zkušebních vzorků.....	30
3.3.2 Zjištěné hodnoty	30
3.3.2.1 Vlastnosti obrobitelnosti	31
3.3.2.2 Pevnost v tahu	34
3.3.2.3 Vrubová houževnatost	36
3.3.2.4 Vlastnosti únavy	37
3.4 Zhodnocení výsledků které byli zjištěny.....	38
4. DISKUSE ZJIŠTĚNÝCH POZNATKŮ	43
5. ZÁVĚR	44
6. POUŽITÁ LITERATURA.....	46



1. ÚVOD

K nejstarším a dosud používaným konstrukčním materiálům patří grafitické litiny, které mají veškerý uhlík ve formě grafitu, nebo jeho převážnou část ve formě grafitu a neobsahují volný cementit. Mají vhodné slévárenské vlastnosti a zdokonalováním technologie v průběhu času dosáhli i velmi dobrých užitných vlastností. V porovnání s ocelí mají lepší obrobitelnost, lepší třecí vlastnosti, menší hustotu, ale především mají schopnost útlumu a menší vrubovou citlivost. Litiny s kuličkovým grafitem (LKG), která byla objevena po druhé světové válce, což v té době znamenalo největší objev v oblasti slitin železných kovů, měla srovnatelné mechanické vlastnosti s ocelí a současně výhody litin. U těchto litin lze tepelným zpracováním výrazně měnit matici a tím i jejich mechanické vlastnosti. Od šedesátých let se začali vyrábět izotermicky zušlechtěné litiny s kuličkovým grafitem - ADI (Austempered Ductile Iron) v porovnání s ostatními litinami mají vysokou pevnost za dobrých plastických vlastností, a k těmto základním vlastnostem mají ještě dobrou odolnost vůči opotřebení, vhodné kluzné vlastnosti a vyšší odolnost vůči cyklickým namáháním.

V současné době se začala v automobilovém průmyslu uplatňovat litina s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku, který se pohybuje v rozmezí od 2,40 do 4,1 [%]. Tento materiál nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, kde byla snaha najít litinu s kuličkovým grafitem, která by vykazovala homogenitu mechanických vlastností i při různé tloušťce stěn odlitku. Tato litina je používána zatím ve Švédsku a její výroba se řídila podle normy ISO 1083:2004, jak uvádí L. E. Björkegren a K. Hamberg. Tento typ litiny by měl do budoucna nahradit litiny EN-GJS 400-15 s mezí pevnosti 400 [MPa] a tažností 15 [%] a EN-GJS 500-7 s feriticko-perlitickou strukturou, pevností 500 [MPa] a tažností 7 [%]. Adekvátní náhrady těchto standardních litin nachází uplatnění při výrobě dílů osobních i nákladních automobilů Volvo a Scania. Tyto díly mají sloužit také k pohlcení nárazové energie. U nás s výrobou této litiny nejsou zkušenosti, i když byla již zahrnuta do evropské normy - EN 1563:1997, resp. ČSN EN 1563.

Problematicke této litiny je věnována také tato bakalářská práce, která by měla shrnout dostupné podklady o této litině a vytvořit práci na základě odborné rešerše.



2. TEORIE GRAFITICKÝCH LITIN

2.1 ZÁKLADNÍ DEFINICE LITINY A JEJÍ VÝROBA

Jak je obecně známo, litina je slitina železa, uhlíku, křemíku, fosforu, síry popřípadě dalších prvků. Obsah uhlíku je vyšší než je jeho maximální rozpustnost v austenitu, to je 2,11% C, při teplotě 1147 °C. tento bod je v stabilním rovnovážném diagramu železo-uhlík značen písmenem *E*.(obr. 2.4).

Litina se vyrábí přetavováním surového železa, litinového vratu a ocelového odpadu v kuplovnách nebo elektrických pecí.

Způsob tavby volíme dle toho, jakou budeme vyrábět litinu. Tavení v kuplovně je vhodné pro nemodifikovanou litinu, která může obsahovat větší obsah síry. Tavení v elektrické peci volíme pro modifikované litiny, obsah síry by se měl být do 0,02% S .

2.1.1. DRUHY LITIN

Rozhodujícím parametrem pro základní rozdělení litin dle struktury je eutektická krystalizace.

V **bílých litinách** probíhá eutektická krystalizace v podmínkách metastabilní rovnováhy a jejich produktem je ledeburit. Strukturu je pak tvořena cementitem a perlitem , a proto mají litiny bílý lom, vysokou tvrdost a dobrou odolnost vůči opotřebení, ale jsou velmi křehké, mají relativně malou pevnost a velmi špatně se obrábí.

V **grafitických litinách** probíhá eutektická reakce dle stabilní rovnováhy a jejím produktem je grafit. Ten pak zůstává ve struktuře bez ohledu na to, jestli další fázové přeměny probíhají podle metastabilního nebo stabilního diagramu.

Když proběhne eutektická reakce z části dle stabilní a z části dle metastabilní soustavy vzniká tzv. **přechodová litina**, která obsahuje ve struktuře jak ledeburit, tak i grafit.

Jestli bude daná slitina krystalizovat dle stabilní či metastabilní soustavy, závisí na několika faktorech:

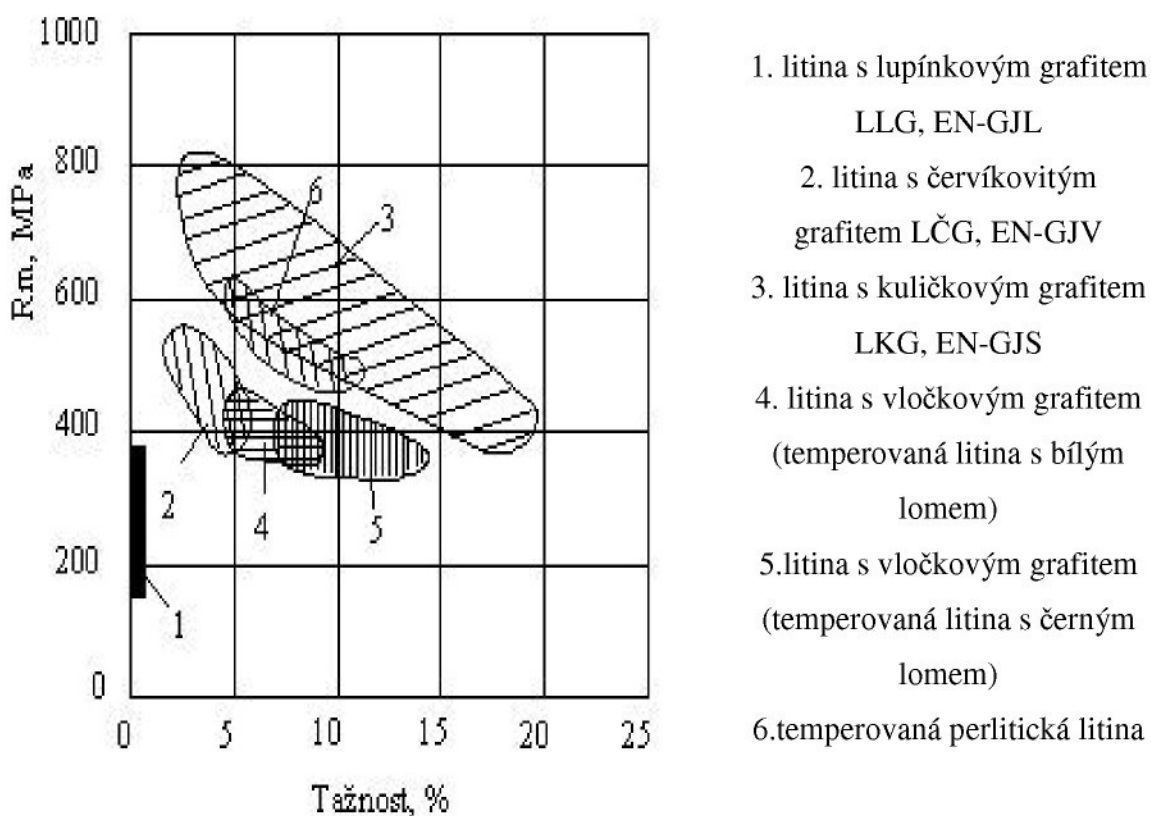
Obsah uhlíku: zvyšování obsahu uhlíku podporuje vylučování grafitu

Rychlost ochlazování: při pomalém ochlazování vznikne stabilní rovnováha a naopak při rychlém ochlazení vznikne cementit.

Obsah dalších prvků: zvyšující se obsah tzv. grafitotvorných prvků (Si, Al) podporuje vylučování uhlíku ve formě grafitu a oproti tomu prvky jako (Mn, S, Cr) podporují vznik cementitu.

2.1.2 VLASTNOSTI GRAFITICKÝCH LITIN

Vlastnosti grafitických litin závisí na množství, tvaru a velikosti grafitických částic a na druhu kovové matrice, ve které je grafit rozložený. Matrice může mít různý podíl feritu a perlitu. Charakteristické mechanické vlastnosti jednotlivých druhů grafitických litin jsou znázorněny na Obr. 2.1 a popsány v tab. 2.1.



Obr. 2.1 ukazuje grafické zobrazení mechanických vlastností grafitických litin [4]



Tab 2.1 V této tabulce jsou ukázány mechanické vlastnosti běžně používaných litin [4]

Litiny	Feritická matrice	Feriticko-perlitická matrice	Perlitická matrice
Litina s lupínkovým grafitem	100-155HB Rm=100-200MPa	120-195 HB Rm=150-300MPa	145-215 HB Rm=250-350MPa
Litina s kuličkovým grafitem	Rm=350-400MPa A=15-22%	Rm=400-600MPa A=3-10%	Rm=600-900MPa A=2%
Litina s vermikulárním grafitem	Mechanické vlastnosti leží mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem.		
Temperovaná litina s bílým lomem	Rm=350- 550MPa A= 4-12% 200-250HB		
Temperovaná litina s černým lomem	Rm=350-800MPa A= 1-10% 140-320HB		

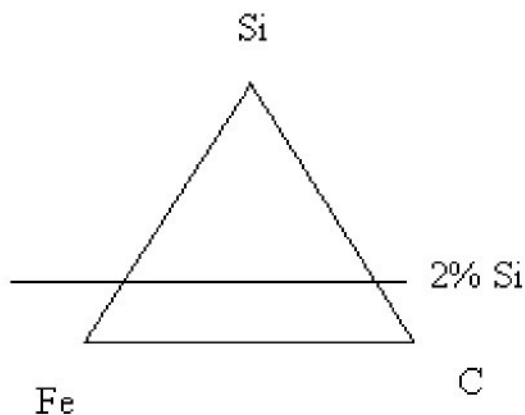
2.2. DIAGRAM Fe-C-Si

Litiny mají obsah uhlíku vyšší než je jeho mezní rozpustnost v austenitu za eutektické teploty, daná bodem E rovnovážného diagramu železo-uhlík. Vedle vyššího obsahu uhlíku mají obvykle i větší množství příměsí (Si, Mn, P, S) než ocel. Nejdůležitější je křemík, jehož množství se v litinách pohybuje v rozmezí 0,3 až 4,0 %. Litiny proto bývají považovány za potrojně slitiny Fe-C-Si. Jejich krystalizace a překrystalizace se řídí ternárním diagramem, v němž obdobně jako v binárním rovnovážném diagramu železo-uhlík, existuje stabilní rovnováha. Jelikož sledování fázových přeměn pomocí ternárních rovnovážných diagramů je obtížné, používají se často tzv. pseudobinární diagramy, které jsou sestaveny, jako řezy ternárních diagramů pro proměnné obsahy dvou základních prvků a konstantní obsah třetího prvku.

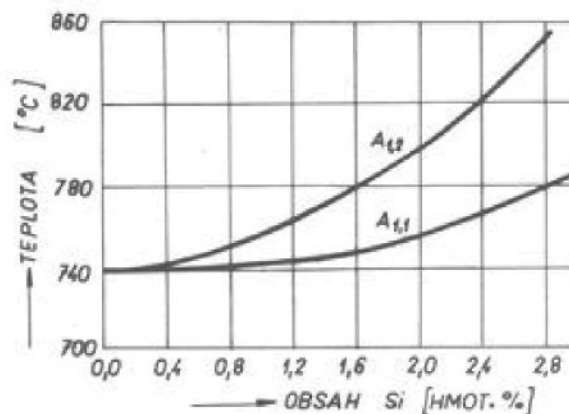
Příklad takového diagramu pro proměnný obsah Fe a C a konstantní obsah 2 % Si je uveden na obrázku 2.4, který vychází z ternárního diagramu uvedeného na obr. 2.2. V diagramu se nevyskytuje jedna konstantní eutektická teplota, ale interval teplot t_{ES1} - t_{ES2} . a



eutektoidní přeměna probíhá v teplotním intervalu $A_{1,1}$ - $A_{1,2}$. Interval eutektoidních i eutektických teplot se rozšiřuje s vzrůstajícím obsahem křemíku, obr. 2.3.

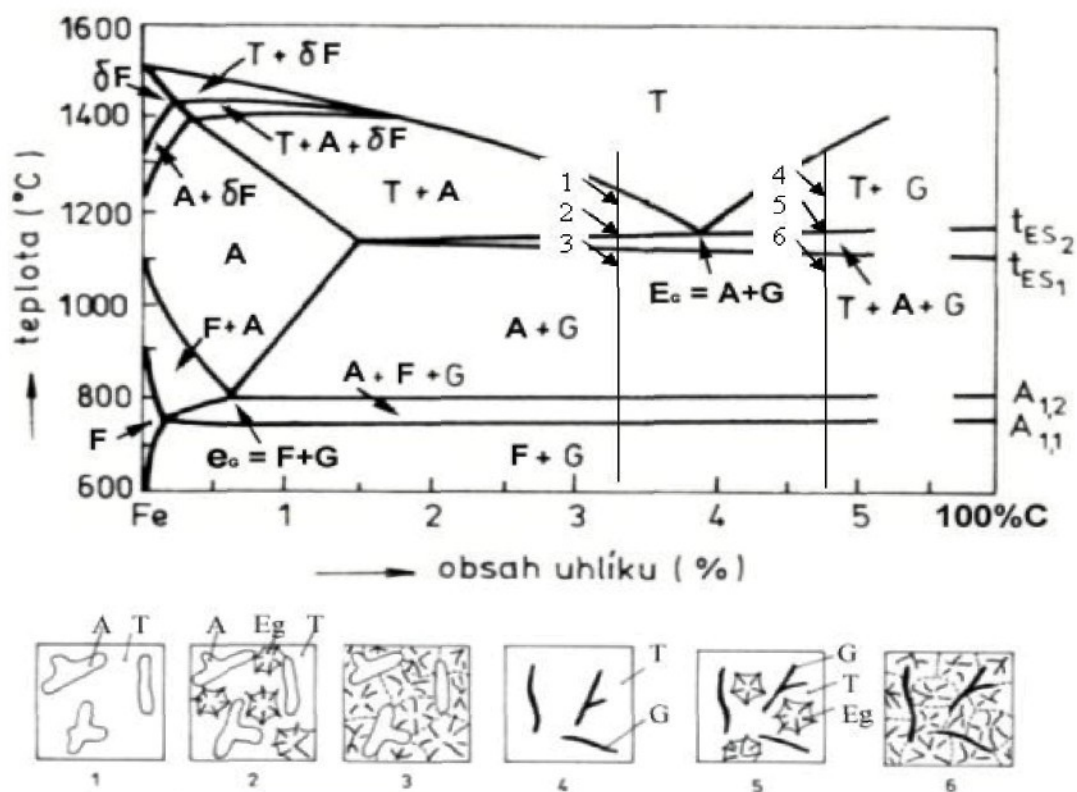


Obr. 2.2 Ternární soustava Fe-C-Si
pro 2 % Si [4]

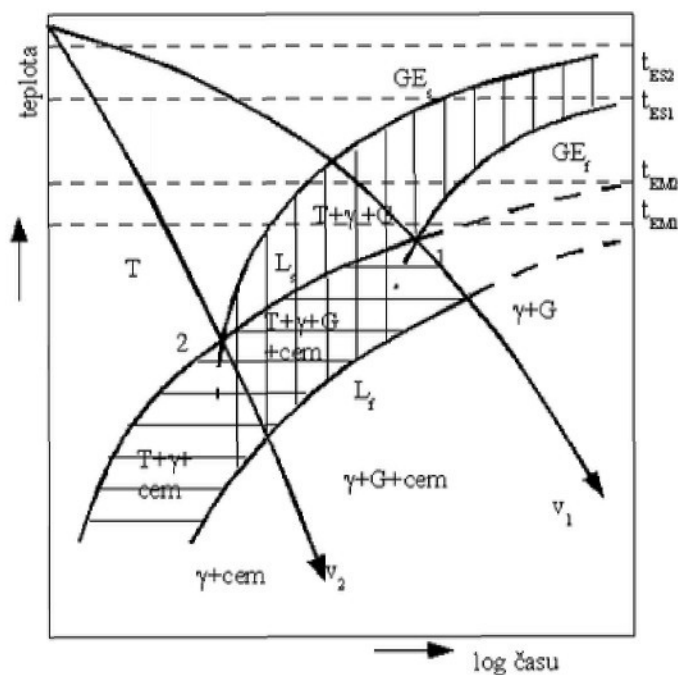


Obr. 2.3 Vliv Si na polohu a interval
eutektoidních teplot [4]

Krystalizace podeutektických litin podle této soustavy začíná vylučováním austenitu, následuje eutektická reakce, snižování rozpustnosti uhlíku v austenitu (Obr.7, body 1-3), eutektoidní reakce, případně grafitizace perlitického cementitu při ochlazení po eutektoidní reakci. Výsledná struktura je tvořena perlitem, feritem nebo jejich směsí a grafitem. Krystalizace nadeutektických litin začíná vylučováním primárního grafitu z taveniny, následuje eutektická reakce a dále dochází k fázovým přeměnám obdobně jako v prvním případě. (Obr.7, body 4-6)



obr. 2.4 Pseudobinární diagram Fe-C-Si pro obsah 2 % Si [4]



$t_{ES12} - t_{ES1}$
teplotní interval vznikustabilního
eutektika
 $t_{EM2} - t_{EM1}$
teplotní interval vzniku
metastabilního eutektika
 GE_s, GE_f
začátek a konec vzniku
grafitového eutektika
 L_s, L_f
začátek a konec vzniku
metastabilního eutektika
(ledeburitu)

Obr. 2.5 Schéma diagramu anizotermické krystalizace eutektické litiny podle Fe-C-Si [4]



2.3 SLOŽENÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Litina s kuličkovým (zrnitým) grafitem, dříve nazývána jako litina tvárna, obsahuje ve struktuře grafit vyloučený v podobě kuliček a matrici se strukturou perlitickou, se směsí perlitu a feritu a se strukturou čistě feritickou nebo bainitickou po tepelném zpracování nebo po přidání niklu a molybdenu vznikne banická struktura již při chladnutí v formě. Chemické složení těchto litin se pohybuje okolo 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.

2.3.1. VLIV ZÁKLADNÍCH PŘÍSADOVÝCH PRVKŮ NA LITINU S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Přísadové prvky se dělí v litinách na žádoucí a nežádoucí. Žádoucím prvkům se říká legury a používají se na zlepšení vlastností materiálu, například pevnosti, tvrdosti, zvýšení odolnosti za vyšších teplot. Dále ale litina obsahuje prvky nežádoucí jako je síra a fosfor, jejichž obsah se snažíme v litině snížit na minim, jelikož negativně ovlivňují její vlastnosti.

Uhlík C má ze všech prvků největší vliv na vlastnosti železa, je přítomen jako intersticiálně umístěn prvek, nebo se ve struktuře vyskytuje jako chemická sloučenina Fe_3C popřípadě je u litin vyloučen v čisté podobě jako grafit. Grafit krystalizuje v šesterečné soustavě, jeho teplota tavení je okolo 3700°C , měrná hmotnost je 2200 kg/m^3 . tvrdost a pevnost jsou zanedbatelné. Při vyšší obsahu v litině působí příznivě na její slévárenské vlastnosti a podporuje grafitizaci.

Křemík Si je v litinách po uhlíku druhou nejdůležitější přísadou. Významně modifikuje její vlastnosti. Je to grafitizační prvek, který se rozpouští ve feritu kde nahrazuje atomy železa ve struktuře. Výrazně zlepšuje slévárenské vlastnosti, jako je tekutost a snížení teploty tavení, ale zvyšuje sklon k tvorbě ředin a trhlin. Působí jako deoxider a zvyšuje pevnost matrice. S rostoucím obsahem křemíku klesá rozpustnost uhlíku v austenitu.

Mangan Mn je to karbidotvorná složka, protože má větší afinitu k uhlíku než železo. A potlačuje tvorbu grafitu, ale kompenzuje negativní vliv křemíku. Mangan má tendenci snižovat kritickou teplotu a obsah uhlíku v eutektiku. Váže na sebe síru a tím taveninu odsiřuje MnS . Při odlévání zlepšuje tekutost taveniny a homogenitu odlitků. S rostoucím obsahem Mn je litina křehká a tvrdá a dochází ke snížení pevnosti a tažnosti, významný pokles pevnosti nastává při obsahu vyšším jak 0,6 % Mn za vyšších teplot. Při



menším obsahu naopak zvyšuje tažnost a rázovou houževnatost vliv manganu souvisí s jeho nerovnoměrným rozložením v matrici. Nachází se totiž na hranicích eutektických buněk, které jsou navíc bohaté na uhlík. Mangan také při vysokém obsahu snižuje rychlost banické přeměny a to zejména za teplot okolo 400°C.

Měď Cu při obsahu nad 3% Cu zvyšuje tažnost po izotermickém zpracování za teplot mezi 300°C až 350°C. Dále zabraňuje tvorbě bainitických karbidů, ale její vliv na zbytkový austenit je minimální.

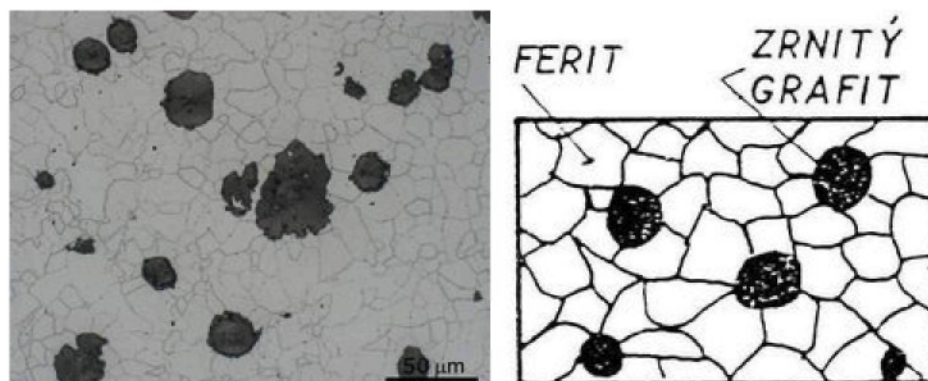
Síra S stabilizuje cementit, zlepšuje smrštivost odlitku, ale zhoršuje homogenitu odlitku. Dále pak zvyšuje tvrdost a způsobuje lámavost litin za tepla. Proto se jí snažíme z litiny odstranit nebo eliminovat její účinek například vazbou MnS. Kvalitní litiny kuličkový grafitem by měli mít obsah síry nad 0,01% S.

Fosfor P stabilizuje cementit, zvětšuje interval tuhnutí, zlepšuje tekutost, proto se litiny s obsahem 2% P používají pro odlévání uměleckých výtvorů jako jsou litinové ploty a brány složitých tvarů. Fosfor zlepšuje odolnost vůči otěru, tvrdost a křehkost, protože vytváří tvrdé fosfidy Fe_3P , které tvoří ternární eutektikum o složení $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}_3\text{P}$, nazývaný se steadit. Dále fosfor snižuje odolnost při dynamickém namáhání a snižuje koncentraci uhlíku v eutektickém bodě.

2.3.2 KOVOVÁ MATREICE V LITINĚ S KULIČKOVÝM GRAFITEM

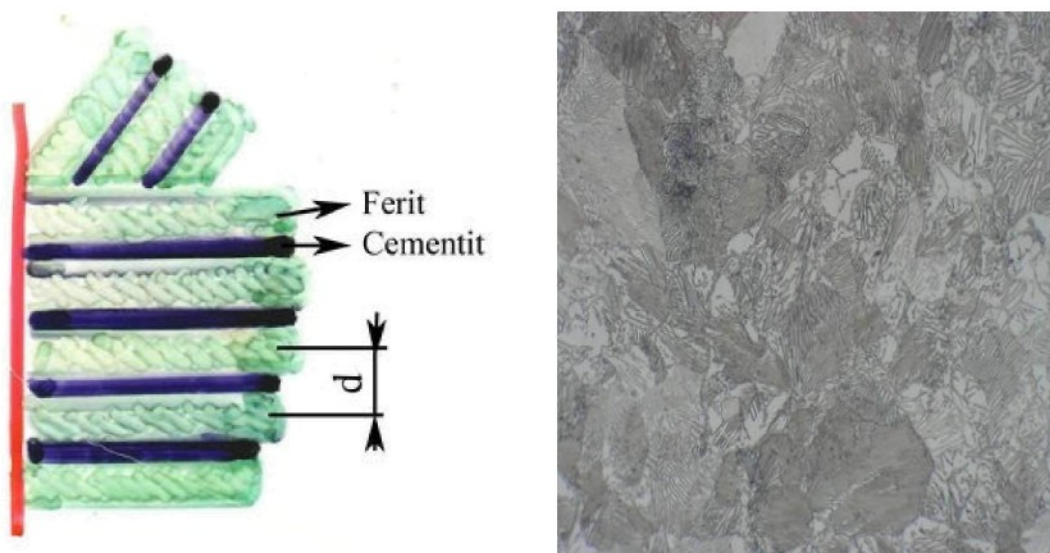
Struktura základní kovové hmoty závisí na chemickém složení litiny, rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí, stavu krystalizačních zárodků a na tepelném zpracování.

Ferit vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu. Přísadový prvek křemík a pomalé ochlazování podporuje vznik feritu. Ferit je měkký, tvárný, dobře obrobitelný a houževnatý. Na jeho vlastnosti mají značný vliv legury a doprovodné prvky, které se železem tvoří substituční tuhé roztoky. Všechny přísadové prvky v litinách zvyšují tvrdost a pevnost feritu. Některé přísadové prvky a legury jako například Ni, Mn, Cr zvyšují houževnatost a naopak třeba křemík Si houževnatost feritu snižuje. Vzhled feritu na metalografických výbrusech je vidět na obr 2.6.

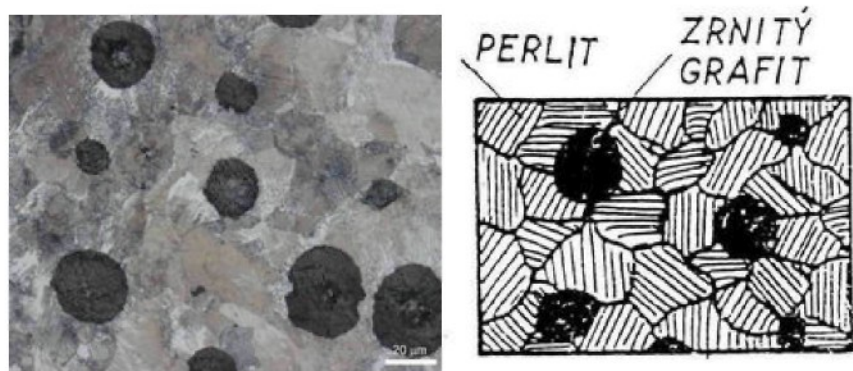


Obr.2.6 LKG s matricí feritickou [4]

Perlit je eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního diagramu. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. Vznik perlitu podporuje měď a jiné karbidické prvky jako Cr, Mn. Oproti feritu má perlit vyšší pevnost a tvrdost, horší plastické vlastnosti, horší obrobitelnost a vyšší odolnost proti opotřebení. Vlastnosti perlitu závisí na hustotě dané jeho dispersitou d (obr2.7). Perlitické struktury lze dosáhnout mimo legování karbidotvornými prvky také přidáním 0,07 až 0,1‰ N. Vzhled perlitu na metalografických výbrusech je vidět na obr 2.8.

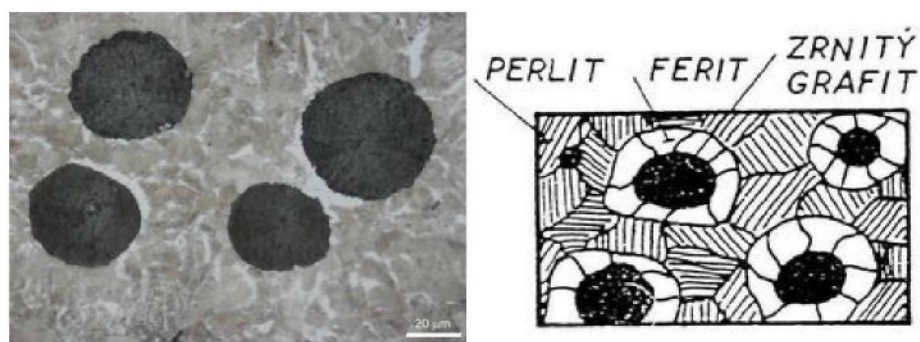


Obr. 2.7 Dispersita perlitu [4]

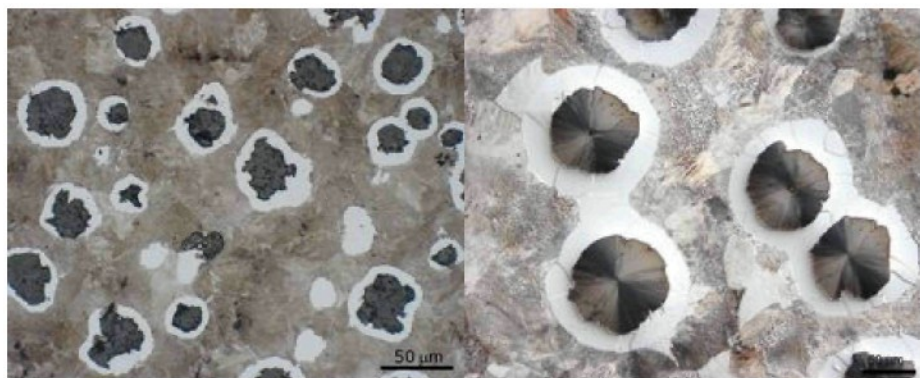


Obr.2.8 LKG s matricí perlitickou [4]

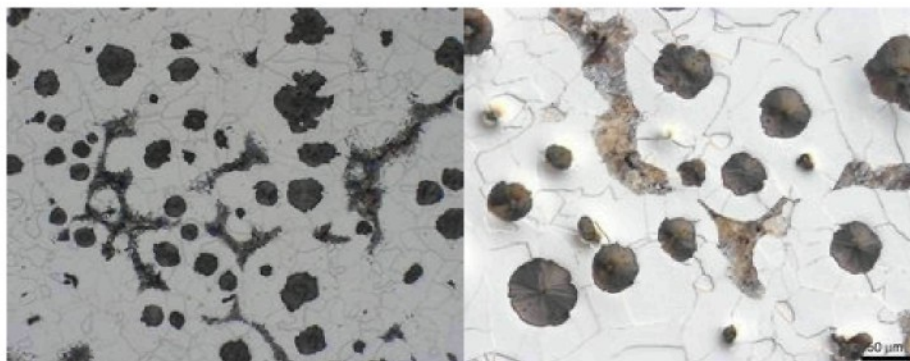
U některých druhů litin s kuličkovým grafitem se ve struktuře vyskytuje perlit a ferit v různém poměru a tyto litiny mají matrici feriticko-perlitickou obr(2.8), (obr2.9) a (obr. 2.10).



Obr.2.9 LKG s matricí feriticko-perlitickou, s min.množstvím feritu [4]

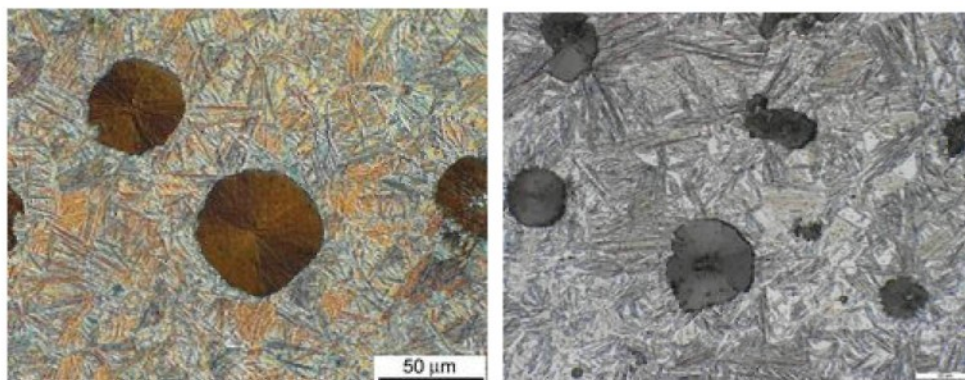


Obr.2.10 Litina s kuličkovým grafitem s matricí feriticko-perlitickou [4]



Obr.2.11 LKG s matricí feriticko-perlitickou, s min. zrnitého perlitu [4]

Bainit je v těchto litinách tvořen jehlcovým feritem a stabilizovaným vysokouhlíkatým austenitem. Vzniká jako lící struktura v litinách legovaných zejména molybdenem a niklem nebo po tepelném zpracování. Tyto litiny mají vysokou pevnost a tvrdost za poměrně dobrých plastických vlastností. Vzhled bainitické struktury na metalografických výbrusech je vidět na obr. 2.11.



Obr.2.12 LKG s matricí bainitickou [4]

Sorbit je to přeměna nízkouhlíkového martenzitu popouštěním na ferit s kulovitými zrny perlitu, tato struktura má vysokou pevnost a dobrou houževnatost.



2.4. METALURGIE LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

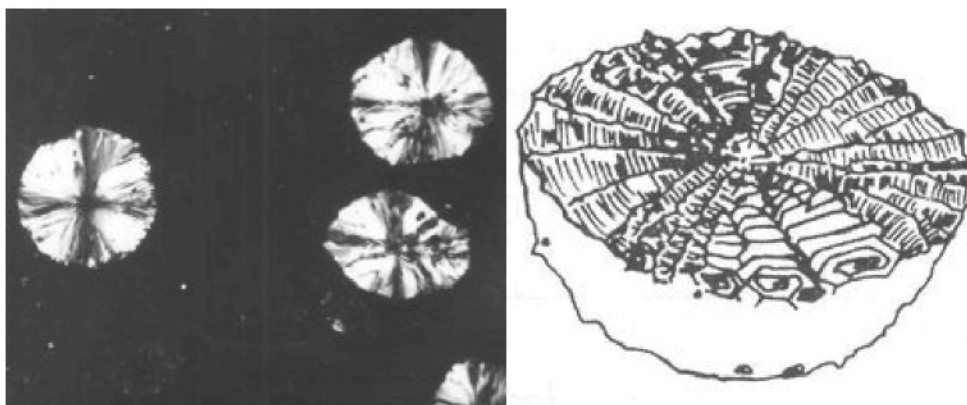
2.4.1 PŘÍPRAVA TAVNINY

Částice grafitu ve formě kuliček jsou složité polykrystaly. Primární pyramidální krystality jsou paprskovitě uspořádány a tvoří tak jednu grafitickou částici, viz obrázek 25. Existuje několik teorií, jak litina s kuličkovým grafitem vzniká. Tou nejznámější je popis vlivu přidávaných látek do tekutého kovu, které zvyšují povrchové napětí na rozhraní grafit – tavenina a vyvolávají tak krystalizaci do tvaru s nejmenším povrchem a to je koule. Další z toho vyplývá, že aby vznikl kuličkový grafit, musí se do taveniny dodávat skupina prvků, které ovlivňují růst zárodku do požadovaného tvaru. Tato technologická operace se nazývá modifikování. Látky používané při modifikaci jsou nejčastěji na bázi hořčíku nebo céru. Při použití Hořčíku je nutné, aby tavenina obsahovala cca 3,8 až 4 % C a obsah síry by neměl překročit 0,02 % S jinak se musí odsířit přidáním CaC_2 , hořčík je totiž vysoce reaktivní se sírou a modifikace by mohla proběhnout jen částečně. Současně s modifikací musíme i očkovat. Očkování totiž potlačuje karbiditvorné účinky modifikátoru a vytvoří v vhodná částice (SiO_2) pro vznik zárodků grafitu. Při modifikaci si dále musíme dávat pozor na reakci hořčíku s kyslíkem. Teplota varu Hořčíku je 1100°C , dochází k jeho intenzivnímu varu a tavenina by vystříkovala z pánve proto se dnes používají metody modifikace v autoklávu, metoda TUNDISH, modifikace v konvertoru +GF+, nebo ponášením profilu, který uvnitř obsahuje modifikátor a očkovadlo. Za minimální obsah Mg, který je potřeba na vznik kuličkového grafitu, se považuje 0,01 % s přídavkem Céru a jiným prvků vzácných zemin nebo 0,02 %, když je hořčík použitý samotný. Přísady použité na výrobu litiny z kuličkovým grafitem, musí zaručovat úplnou globulizaci grafitu a touto aktivní složkou je Mg, který je nepoužívanějším globulizátorem.

2.4.2 KRYSTALIZACE LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Podle některých vědců za vznik kuličkového grafitu můžou přísady, které taveninu odsířují a odkysličují (Mg, Cr, Ca, Li, Ba, K, Na). Prvky které jsou součástí modifikátoru vytvoří zárodky, na kterých pak vyrůstá grafit. Jenž je ovlivněn povrchovým napětím taveniny a tak roste do energetický nejvýhodnějšího tvaru, to je kuličky. Dalšími vlivy na vznik kuličkového grafitu je čistota taveniny a rychlost ochlazování, to znamená, že taveninu musíme dostatečně přechladit. zrnitý grafit nukleuje přímo z taveniny a vytváří

sfelity vyrůstající ze společného zárodku. Po vytvoření zárodku dochází k jeho růstu konstantně ve všech směrech a tavenina se ochuzuje o C. Vlivem sníženého obsahu C se tavenina silně konstitučně podchladí a vznikne z ní austenitická obálka okolo zrna grafitu, její tloušťku ovlivňuje rychlost tuhnutí. Při pomalém ochlazování difunduje uhlík i ze vzdálenější taveniny a austenitická obálka se vytvoří později, tím pádem jsou zrna větší.



Obr. 2.13 Zrna grafitu v tvárné litině (vlevo), strukturní model (vpravo) [4]

2.4.2.1 STÁDIA KRYSTALIZACE

Začíná vylučováním krystalů austenitu z taveniny a grafit vyrůstá na vhodných zárodcích v tavenině. Zárodek z grafitem k sobě přitahuje uhlík z okolní taveniny a vytěsňuje železo a další prvky do taveniny. Vrstva kolem zrna grafitu má sklon k tuhnutí vlivem oduhličení a tím se vytvoří kolem zrna obálka, která je obohacena grafitotvornými prvky.

Za eutektické teploty dosáhne austenit maximální rozpustnosti uhlíku, je v rovnováze s taveninou a probíhá eutektická přeměna, při které se tvoří buňky stabilního eutektika a ve středu těchto buněk roste zrno grafitu. Tato vznikající směs se nazývá grafitické eutektikum a vyplňuje volná místa mezi primárně vzniklým austenitem.

Poté nastává další fáze eutektické krystalizace, kdy je růst grafitu velmi pomalý, protože grafit musí difundovat z taveniny přes austenitovou obálku, která se tím pádem zvětšuje pomaleji, utvoří-li se málo grafitických zárodků a zrna jsou daleko od sebe. Nastává ještě další fáze krystalizace kdy austenitická obálka rychle roste to má za následek že austenit se obohacuje o grafitizační prvky a tavenina o karbidické po ukončení eutektické překrystalizace dochází k dalšímu ochlazování a dochází k přeměně matrice

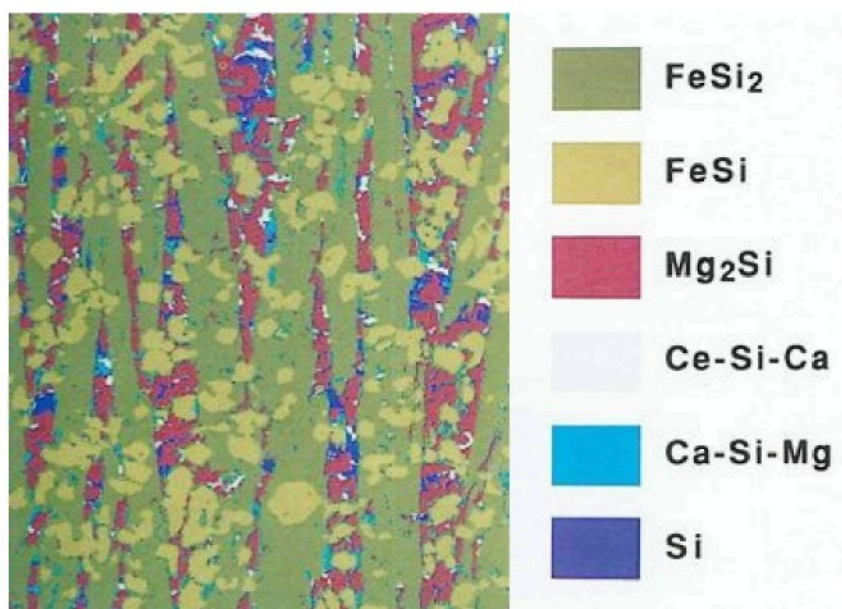
v intervalu mezi eutektickou a eutektoidní teplotou se vylučuje sekundární grafit z austenitu a připojuje se k primárnímu nebo eutektickému grafitu.

Za konstantní teploty probíhá eutektoidní přeměna, kdy se austenit mění buď na ferit, to je podle stabilního rovnovážného diagramu a nebo na perlit podle metastabilního diagramu. Poměrně často, ale nastává kombinace že nejdříve probíhá přeměna podle stabilního diagramu a po určitém čase pak podle metastabilního a tím nám vznikne feriticko perlitická matrice

2.4.2.2 DRUHY MODIFIKÁTORŮ

Slitiny hořčíku s niklem (4 - 6 % Mg a zbytek nikl nebo 13 - 16 % Mg, s přísadou Si, Fe a zbytek Ni) jsou těžší jako tekutý základný kov. Mají dobrou účinnost, protože zůstávají na dně pánve. Jsou na druhou stranu drahé a stabilizují perlit.

Slitiny hořčíku s křemíkem a dalšími přísadami (3 - 30 % Mg, 45 - 55 % Si, do 4 % Ca, cca 1 % Al, do 5 % kovů vzácných zemin, zbytek Fe) jsou v současnosti nejvíc používanými. Schéma struktury konkrétního modifikátoru Fe-Si-Mg-Ca-Ce je na obr. 2.14.



Obr. 2.14 Struktura modifikátoru Fe-Si-Mg-Ca-Ce [4]

Někdy po chybách v modifikaci, nebo po nesprávných ochlazovacích rychlostech a jiných faktorech může dojít ke vzniku odchylek od kulovitého tvaru grafitu. Může vzniknout červíkovitý (vermikulární) grafit, rozpadnutý grafit, explodovaný grafit, lupínkový mezibuňkový grafit, Chunky grafit



2.5 POUŽITÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Vlastnosti odlitků z litin s kuličkovým grafitem závisí na množství, velikosti a druhu grafitu (dokonalý a částečně zrnitý) a od složení základní matrice (poměr mezi feritem a perlitem). Množství a velikost grafitu závisí u nelegovaných litin na množství uhlíku, křemíku a manganu, dále na rychlosti ochlazování (tloušťka stěny, materiál formy). V porovnání s litinami s lupínkovým grafitem má litina s kuličkovým grafitem větší pevnost, modul pružnosti, tvrdost, tažnost a nárazovou práci. Tyto litiny se legují převážně proto, abychom zlepšili konkrétní mechanické vlastnosti, zvýšila odolnost vůči oxidaci a aby byla spolehlivě dosažena požadovaná struktura v litém stavu, popř. po tepelném zpracování.

Aby bylo dosaženo maximálních pevností, to znamená dosáhnout struktury perlitické, sorbitické či bainitické je doporučeno legovat mědí, a to od 1 do 1,5 %, nebo cínem do 0,1 % a také provést tepelné zpracování. Nebo bez tepelného zpracování přidáním molybdenu a niklu.

2.6 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM

Cílem tepelného zpracování ve většině případů bývá snížení vnitřních pnutí popřípadě zlepšení obrobitelnosti, nebo naopak se tepelné zpracování využívá k zvýšení mechanických vlastností, jako je tvrdost a pevnost a jelikož je grafit vyloučen ve tvaru kuliček litina si ponechává dobrou houževnatost.

Žíhání ke snížení vnitřních pnutí se používá hlavně v případech kdy už nenásleduje další tepelné zpracování LKG. Vnitřní pnutí jsou deformace které vznikli vlivem nerovnoměrného chladnutí odlitku. Ke snížení se proto používá na teplotu 550°C až 650°C kdy klesne mez kluzu a dojde ke snížení nebo odstranění pnutí. Obvyklý průběh tohoto popouštění je ohřev na 650°C po dobu jedné až dvou hodin a poté následuje ochlazování v peci rychlostí 50°C/h do teploty 200°C a poté se odlitek nechá dochladnout na vzduchu.

Feritizační žíhání provádíme tehdy, pokud vyžadujeme feritickou strukturu v celém průřezu, jestliže této struktury nedosáhneme při odlévání. Provádí se ohřev do teplot 850°C až 920 °C, prodleva je v hodinách a ochlazování na volném vzduchu o



rychlosti 100 až 150 °C/h. takto získaný ferit je vysoce houževnatý a měkčí než ferit vzniklý přidáním většího množství Si.

Žihání pro snížení tvrdosti se používá u odlitků se zvýšenou tvrdostí, která může být způsobená určitým množstvím ledeburitického cementitu, ve struktuře odlitku pro odstranění této tvrdosti volíme žihání při teplotě 800 °C až 950°C po dobu 1 až 4 hodiny. Při tomto ohřevu se cementit rozpadne na austenit a grafit, a pak pomalu ochlazujeme. Zvýšená tvrdost může být také způsobená velmi jemným lamelárním perlitem. Tuto tvrdost odstraníme ohřevem na teplotu 600°C až 700°C po dobu dvou až osmi hodin, kdy dojde ke sferoidizaci lamel cementitu a vznikne tak struktura se zrnitým perlitem tato struktura má menší tvrdost a lepší houževnatost a tvárnost.

Normalizační žihání používáme pro zvýšení pevnosti a tvrdosti u odlitků, které obsahují velké množství feritu. Teplotu žihání volíme 50°C až 80°C nad teplotu $A_{1,2}$, doba austenitizace je závislá na množství feritu ve struktuře a pak následuje ochlazení na vzduchu. pro složitější odlitky se normalizační žihání kombinuje s žiháním na snížení vnitřních pnutí.

Kalení se používá za účelem získání vysoké tvrdosti a odolnosti vůči otěru. Po kalení následuje popouštění u tvárné litiny pouze nízkoteplotní, aby nedošlo k rozpadu karbidů. A z toho důvodu volíme izotermické zušlechťování

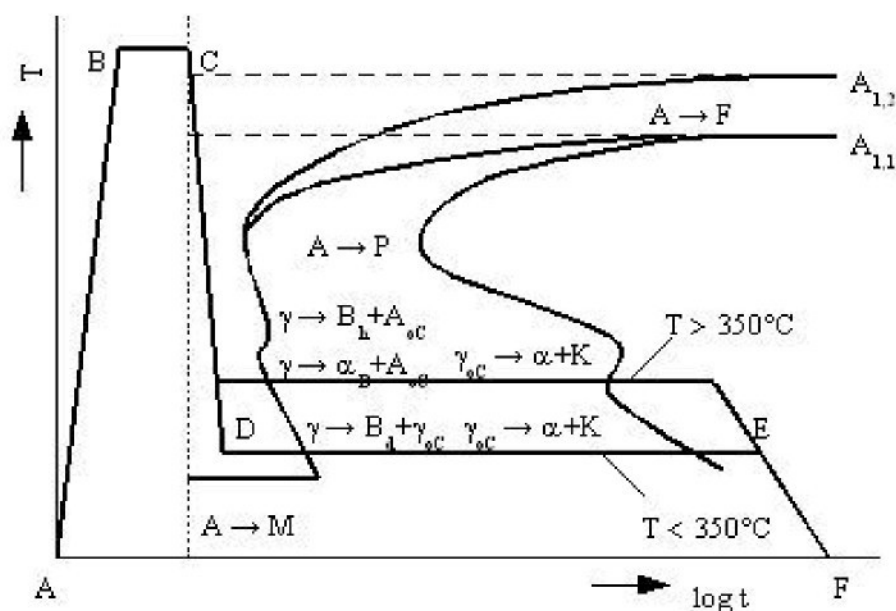
Martenzitické klení se provádí ohřev na teplotu 50°C až 80°C nad $A_{1,2}$, vysoké teploty ohřevu by vedly k velkému množství zbytkového austenitu ve struktuře. Výdrž na požadované teplotě je závislá na obsahu feritu ve struktuře, s rostoucím množstvím feritu se doba výdrže prodlužuje. Prokalitelnost LKG je malá a to hlavně kvůli vyššímu obsahu křemíku, kalíme většinou do oleje a grafit v matrici má za následek že tvrdost bývá asi 700 HV. Po zakalení následuje popouštění.

Povrchové kalení slouží pouze ke zvýšení povrchové tvrdosti, což je pro nás v mnoha případech výhodné. Tloušťka zakalené vrstvy bývá v jednotkách milimetrů záleží na průřezu součásti. Tento způsob kalení je vhodný pro ozubená kola, která mají i dobré kluzné vlastnosti.

Izotermické zušlechťování se provádí pro získání bainitické litiny. Zušlechťování se provádí obvykle izotermickým kalením do solné lázně, režimy ochlazování jsou znázorněny v obr 2.15. Vlastnosti bainické litiny záleží na teplotě transformační prodlevy. Čím je větší austenitizační teplota tím je vyšší obsah uhlíku v austenitu a tím vyšší tvrdost

a nižší tažnost má výsledná struktura. Obvykle se teplota austenitizace pohybuje v rozmezí 830 až 900 . transformační teploty se volí podle požadovaných vlastností dle tabulky.

Dobu prodlevy na transformační teplotě volíme v optimálních mezích, protože při krátké prodlevě se austenit nedostatečně stabilizuje a při ochlazení by se změnil na martenzit, po příliš dlouhé prodlevě by došlo k vylučování karbidů a snížila by se tažnost. Abychom při ochlazování minuli perlitický nos je nutno ochlazovat vhodnou rychlostí. Do solné lázně se můžou takto chladit odlitky z nelegované litiny o tloušťce stěny do 30 mm potom musíme legovat molybdenem nebo kombinací molybden nikl, popřípadě měďí. Bainitickou strukturu lze získat přímo litím, přidáme-li legury nikl a molybden. Množství obou prvků, ale musíme přizpůsobit rychlosti chladnutí, to je hlavně tloušťce stěny. Při příliš nízkém obsahu legur by nám mohl vzniknout perlit a naopak při vysokém obsahu by vznikl martenzit .



Obr. 2.15 Schéma průběhu izotermického zušlechťování ADI litiny v diagramu IRA [4]



3. VLIV ZVÝŠENÉHO OBSAHU KŘEMÍKU NA LITINU S KULIČKOVÝM GRAFITEM A POZNATKY ŠVÉDSKÝCH AUTORŮ

3.1 VLIV ZVÝŠENÉHO OBSAHU KŘEMÍKU NA LITINU S KULIČKOVÝM

Jelikož litiny s kuličkovým grafitem mají sklon k feritizaci za zvýšených teplot, je možno používat tyto litiny s perlitickou strukturou jen do určité teploty a nebo za vyšších teplot po krátkou dobu. Při dlouhém ohřevu asi nad 400°C dochází k rozpadu perlitu, tím se snižuje pevnost litiny a litina zvětšuje svůj objem. Stabilizace pomocí chrómu je nevhodná z důsledku vzniků karbidů a zákalky a ani měď s cínem nedokáže stabilizovat perlit za vyšších teplot. Z toho důvodu se používají zásadně feritické litiny s kuličkovým grafitem. Díky tomu že v těchto litinách s kuličkovým grafitem je grafit vzájemně izolován je pronikání kyslíku do hloubky za vyšších teplot pomalejší než u litin s lupínkovým grafitem. Odolnost za vyšších teplot se dá podstatně zvýšit přidáním Si, optimální množství je okolo 4% Si. Křemík totiž na povrchu vytvoří hustou oxidickou vrstvu a tato vrstva chrání litinu až do teploty austenitizace, kdy nastane vlivem objemových změn porušení této vrstvy. Ale díky zvýšenému obsahu křemíku je spodní teplota austenitické transformace posunuta nad 800°C.

Litiny s obsahem křemíku mezi 4 až 6 % Si se nazývají Silaly, a obsah uhlíku se u nich pohybuje v rozmezí 1,6 až 2,5 takže jsou podeutektické na povrchu se opět vytváří ochranná vrstva silikátů kdy při 6% Si je teplota A_1 posunuta na teplotu 950-980°C a po přidání molybdenu se tyto litiny dají používat za teplot okolo 900°C.

3.2 DŮVODY VÝZKUMU LITINY S VYŠŠÍM OBSAHEM KŘEMÍKU

Dva švédští vědci L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG [10] přišli s myšlenkou, jak ušetřit náklady při výrobě určitých částí nákladních automobilů Volvo a Scania. Jejich myšlenka spočívala v tom, že chtěli nahradit dosud používané dva typy litin (EN-GJS 400-15 s feritickou strukturou a EN-GJS 500-7, která má perliticko-feritickou strukturou, a právě EN-GJS 500-7 chtěli nahradit takovou LKG, která by měla strukturu čistě feritickou a stejné nebo lepší mechanické jako EN-GJS 500-7). Protože je nutné, během procesu lití



dodržovat všechny podmínky, jako je předepsaná rychlost tuhnutí, nukleární stav taveniny a chemické složení, největší problémy byly s dodržáním předepsané rychlosti tuhnutí odlitku v celém jeho objemu. Hlavně tomu bylo u odlitků, které měly velké rozdíly v tloušťkách stěn. A u těchto odlitků s různou tloušťkou stěn, došlo k tomu, že tvrdost v různých místech byla odlišná o několik desítek jednotek Brinella

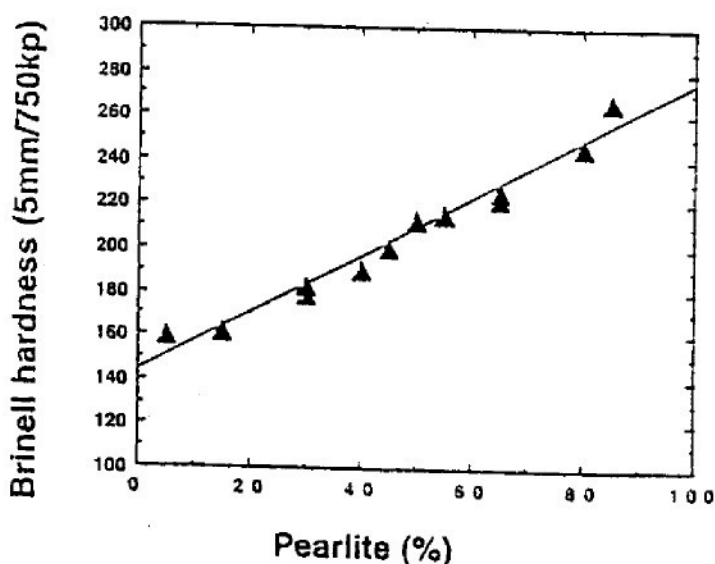
A tak hledali materiál, který by byl méně náchylný ke zvýšeným odchylkám tvrdosti v různých místech. Proto se rozhodli pro materiál s jednosložkovou feritickou matricí, který bude také méně náročný na nukleární stav taveniny, čehož dosáhli vyšším obsahem křemíku, který se železem a uhlíkem tvoří tuhé roztoky o různé tvrdosti a pevnosti v závislosti na množství křemíku. Materiál, který vědci zkoumali měl uhlíkový ekvivalent $Ce = 4,3$ a obsah křemíku se měnil v rozmezí 2,3 %Si až 4,1% Si.

Vědci tento materiál použili pro výrobu nábojů předních kol nákladních vozů Volvo a Scania, protože dosud používaná EN-GJS 500-7 vykazovala velké rozdíly tvrdosti ± 36 HB, kdežto materiál s obsahem křemíku 3,3 až 3,7 % dosahoval odchylky pouze ± 4 HB. Obrobitelnost LKG s 3,7 % Si která je adekvátní náhradou EN-GJS 500-7 se tím pádem oproti EN-GJS 500-7 výrazně zlepšila a praktický test prokázal, že by se náklady na obrábění mohli snížit až o 10%. V této studii se nezkoumala jen obrobitelnost, ale také mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku ve srovnání ze standardními EN-GJS 400-15 a EN-GJS 500-7.

Materiál s přibližně 3,75% Si, měl mechanické vlastnosti srovnatelné, některé dokonce i lepší než EN-GJS 500-7 a tudíž by mohl být jeho alternativou. Materiál s přibližně 3,25% Si se shoduje s EN-GJS 450-10. Tato litina s kuličkovým grafitem s přibližně 3,25% Si by mohla být v budoucnu používána na součástky, u kterých vyžadujeme feritickou strukturu, kterou u litiny EN-GJS 500-7 nedosáhneme.

V porovnání s běžnou LKG mají LKG se zvýšeným obsahem křemíku stejné slévárenské vlastnosti.

Odlitky vyráběné z EN-GJS 500-7, mají rozmezí tvrdosti dané normou ISO 1083 v rozsahu 170 až 230 HB, některé tyto odchylky jsou způsobeny tím, že obsah perlitu ve struktuře je závislý na rychlosti ochlazování, dále na obsahu přísad a typu očkovačla, který má každý dodavatel různý. Pro odběratele to znamená velký problém, jelikož materiál s tvrdostí 230 HB má oproti materiálu o tvrdosti 170 HB poloviční obrobitelnost.(obr.3.1. a obr.3.6).



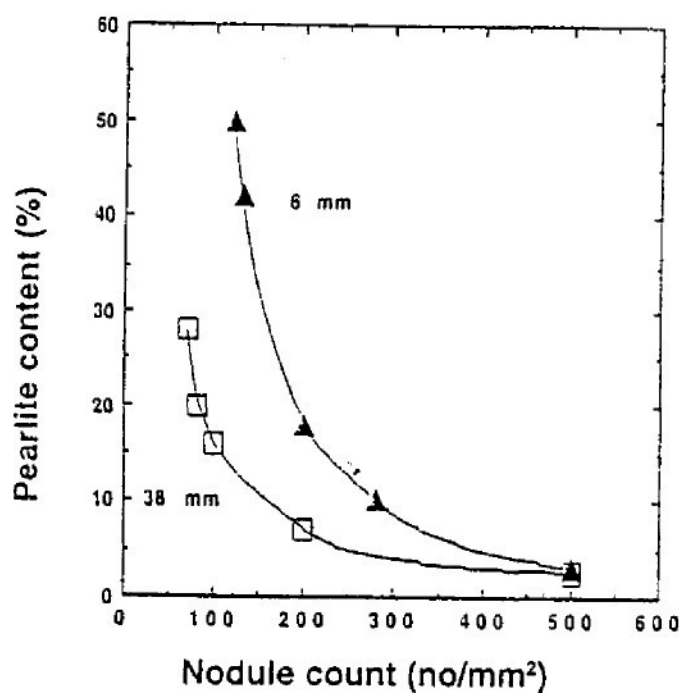
Brinell hardness – tvrdost dle Brinella

Pearlite – perlit

Obr. 3.1: Spojení mezi tvrdostí a obsahem perlitu. Odstupňované vzorky, tloušťka mezi 6 a 50 mm [10]

Nastane-li eutektická transformace, uhlík potřebuje čas, aby se rozptýlil a vytvořily grafitové nodule, tak že ferit bude schopný se okolo něj formovat. Množství feritu, který se formuje, záleží na rychlosti difúze uhlíku, času rozptýlu (rychlosti snižování teploty) a difuzní vzdálenosti (vzdálenost od grafitových nodulí). Vzdálenost mezi grafitovými nodulemi se snižuje s růstem počtu nodulí, které jsou ovlivněné rozmezím tuhnutí a nukleačními podmínkami. Obrázek 3.2 ukazuje účinek počtu nodulí na obsah perlitu. Rostoucí počet nodulí snižuje obsah perlitu. To znamená, že podmínky tuhnutí a rychlosti snižování teploty jsou protikladem všem ostatním. Pro konkrétní návrh s širokou škálou odchylek v tloušťce materiálu existuje spektrum rychlostí snižování teploty, kterému nemůže slévárna předejít.

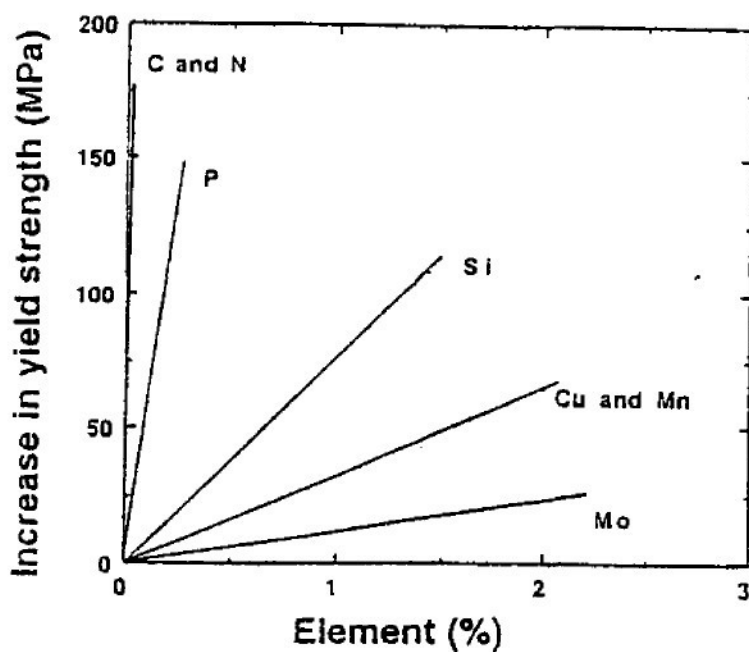
Jednou z možností, jak redukovat odchylky v tvrdosti, je vyrobit materiál, který je méně náchylný k výše zmíněným odchylkám. Alternativou je LKG s jednofázovou maticí, která je méně náchylná k odchylkám v materiálové sekci, chemickém složení a nukleačních podmínkách. V tomto případě je feritická forma, která může být tuhý roztok s křemíkem o různých úrovních tvrdosti (beze změny v úrovni uhlíkového ekvivalentu), která je byla v této studii. (Obr. 3.3)



Pearlite kontent – koncentrace perlitu

Nodule count – počet nodulí

Obr. 3.2: Vliv počtu nodulí na obsah perlitu v různých tloušťkách. 3,5% C. 2,45% Si. 0,3 Mo. A 0,04 Mg [10]



Increase in yield strength – zvýšení meze kluzu

Element (%) – podíl prvků

Obr. 3.3: vliv prvků na nízkou hodnotu meze kluzu tuhého roztoku ve feritické GJS [10]



Je dobře známo, že křemík řeší tvrdnoucí efekt feritu. Tím pádem může být považován za takový, který dokáže odstranit efekt zvyšující se tvrdosti perlitu v litých součástkách. Při výrobě jednofázového materiálu se v tomto případě očekává užší škála rozdílů v tvrdosti.

Slitina se křemíkem snižuje tvárnost a vrubovou houževnatost stejně jako perlit. Proto je zajímavé srovnat EN-GJS 500-7 a LKG s vyšším obsahem křemíku z hlediska chování mechanického lomu, statickou pevnost, odolnost proti únavě a obrobiteľnosť. K objasnění efektu obsahu křemíku ve struktuře a rozptylu tvrdosti v různých místech materiálu byly provedeny zkoušky slévání.

3.3. ZKOUŠENÍ ZVOLENÝCH LITIN S VYŠŠÍM OBSAHEM KŘEMÍKU

3.3.1 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Zkušební materiál byl lity ve formě stupňovitých vzorků (tloušťka: 6,3; 12,5 ; 25 a 50 mm), desky (330 x 225 x 40 mm), zkušební tyče (průměr 25 mm) a náboje kol pro nákladní vozy.

Materiál byl vyráběn běžným výrobním postupem. Chemické složení bylo zvoleno tak, že uhlíkový ekvivalent byl konstantní, přibližně 4,3%. Množství křemíku se pohybovalo od 2,3 – 4,1%Si po očkování. Chemické složení je zobrazeno v Tabulce 3.1.

Náboje kol nákladních vozů byly lity do syrových pískových formách na lince Kunkel Wagner. očkování s 0,1% Tensile 70, bylo prováděno, jako proudové očkování. Slévání bylo prováděno za použití ABB automatické lící vysoké pece s lící teplotou 1400 - 1410°C.

3.3.2 ZJIŠTĚNÉ HODNOTY

Z hlediska pevnosti a obrobiteľnosti byl zájmem objasnit aktuální rozdíly v tloušťce u litých součástek. Dva typy nábojů pro přední kola na nákladní vozy (Scania a Volvo) byly pečlivě zkontrolovány s ohledem na tvrdost pomocí Brinnella. Měření byla provedena stejně vysoce kvalifikovanými osobami. Obrázek 3.4 ukazuje pozici, ve které byla změřena tvrdost jednoho z nábojů. Chemické složení materiálu je zobrazeno v Tabulce 3.1. tvrdost Brinnella je graficky zobrazena na obrázku 3.5. Každá udaná hodnota je výsledkem jednoho vtisku . Statistická data jsou zobrazena v Tabulce 3.2.



LKG s křemíkem poskytuje jistou redukci odchylek v tvrdosti, které se běžně vyskytují u nábojů litých z EN-GJS 500-7. Standardní odchylka může být omezena z ± 36 na přibližně ± 4 HB u GJS s 3,3 – 3,7% Si.

Tabulka 3.1. chemické složení jednotlivých LKG [10]

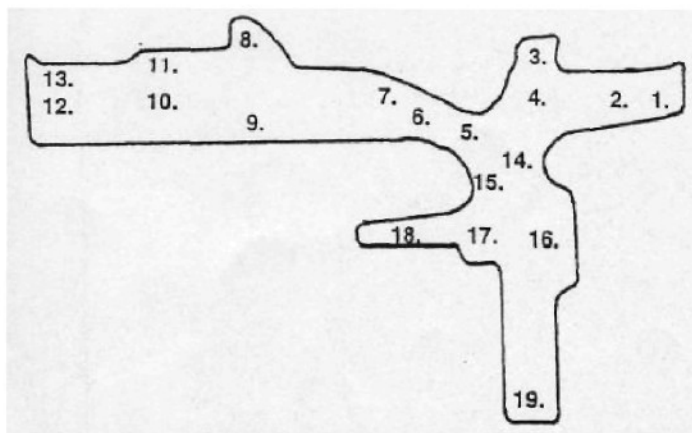
Vzorek, číslo	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	Cu [%]	Mg [%]	Ce
stupňovité vzorky a náboje kol							
1	3,44	3,7	0,25	0,01	0,04	0,037	4,38
2	3,29	3,72	0,23	0,01	0,04	0,043	4,23
3 (EN-GJS 500-7)	3,62	2,33	0,35	0,01	0,26	0,045	4,21
4 (EN-GJS 400-15)	3,55	2,4	0,23	0,01	0,05	0,039	4,16
desky							
EN-GJS 400-15	3,71	2,35	0,22	0,012	0,02	0,04	4,3
I – GJS s 2,74% Si	3,54	2,74	0,24	0,012	0,027	0,04	4,23
II - GJS s 3,27% Si	3,4	3,27	0,23	0,012	0,026	0,049	4,22
III - GJS s 3,74% Si	3,26	3,74	0,23	0,012	0,026	0,059	4,2
EN-GJS 500-7	3,6	2,45	0,37	0,012	0,29	0,048	4,21
zkušební tyče dle ISO 1083 2004(E)							
1	3,68	2,25	*/	<0,02	<0,05	*/	4,24
2	3,45	2,76	*/	<0,02	<0,05	*/	4,14
3	3,35	3,01	*/	<0,02	<0,05	*/	4,1
4	3,4	3,61	*/	<0,02	<0,05	*/	4,3
5	3,32	4,16	*/	<0,02	<0,05	*/	4,36

*/ 0,19 – 0,24% Mn

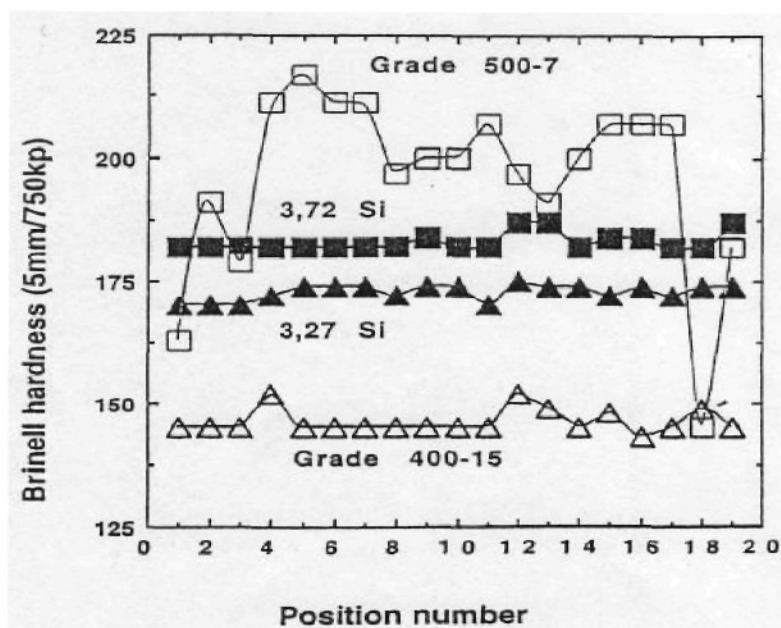
*/ 0,036 – 0,056% Mg

Tabulka 3.2: Výsledky statistického vyhodnocení měření tvrdosti na nábojích kol [10]

hodnoty	2,4 %Si	3,3 %Si	3,72 %Si	EN-GJS 500-7
průměrná hodnota	146,2	172,8	183,1	195,9
střední hodnota	145	174	182	200
standardní odchylka	± 5	$\pm 3,4$	$\pm 3,8$	$\pm 32,6$
min. hodnota	143	170	182	145
max. hodnota	152	175	187	217
MAX-MIN	9	5	5	72



Obr. 3.4: Průřez náboje kola. Označené body ukazují umístění vtisků pro zjištění tvrdosti [10]



Brinell hardness (5mm/750 kp) – tvrdost dle Brinnella

Position nubers – číslo pozice

Obr. 3.5: Rozdíly v tvrdosti na náboji předního kola podle pozice označené v obr. 3.4. Materiál EN-GJS 500-7, EN-GJS 400-15 a experimentální slitiny s různým obsahem Si, které mají feritickou strukturu [10]

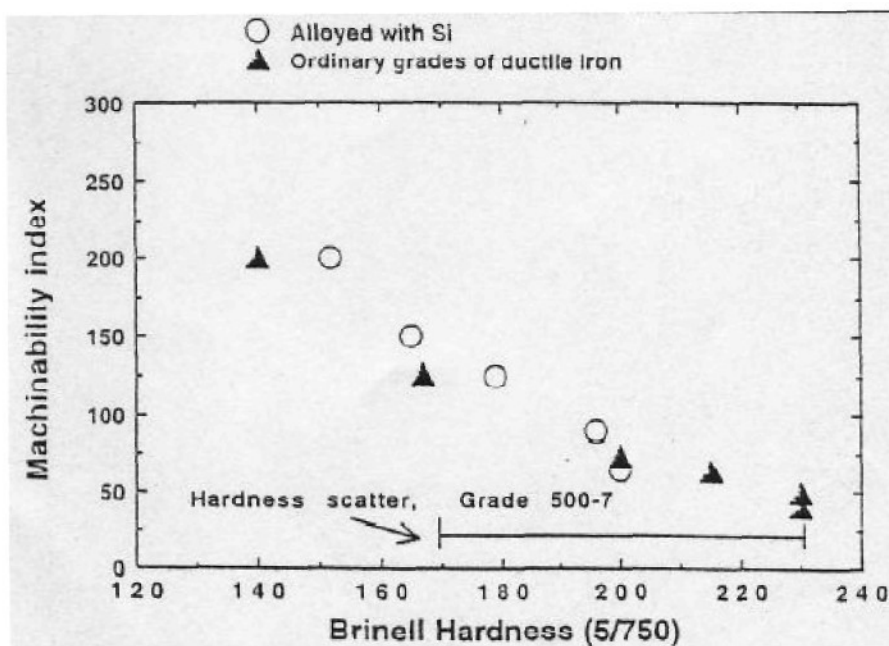
3.3.2.1 VLASTNOSTI OBROBITELNOSTI

Jedna z nejdůležitějších vlastností je obrobiteľnosť. Tato vlastnosť bola testovaná užitím obráběcích operací vyvinutých VAC (Volvo Air Corporation). Míra obrobiteľnosti (index obrobiteľnosti) je opotrebení nástroje. Tabulka 3.3 ukazuje index obrobiteľnosti a tvrdost podle Brinnella pro různé varianty materiálů. Všechny LKG měly feritickou strukturu, s výjimkou EN-GJS 500-7, která měla feriticko/perlitickou strukturu.

Tabulka ukazuje, že škála indexů obrobitelnosti je relativně úzká pro všechny varianty LKG, s výjimkou LKG s 2,74% Si, bylo totiž provedeno méně testů a z tohoto důvodu ukazují větší rozptyl. V případě relativně nízké obrobitelnosti neodráží realitu rozptylu indexů obrobitelnosti, obvykle se bude měnit u EN-GJS 500-7 například z důvodu rozdílů v tloušťce materiálu, s běžnou škálou tvrdosti ležící mezi 170 a 230 HB. Tato škála je obsažena v obrázku 3.6, který také ukazuje, jak se index obrobitelnosti mění s tloušťkou. Obrázek ukazuje, že index obrobitelnosti uvnitř aktuální škály tvrdosti pro EN-GJS 500-7 by měl ležet mezi 40 a 130 jednotkami. Toto způsobuje hlavní problémy s obráběním. Důvod, proč běžné testy neukazují žádné rozdíly je ten, že testovaný díl měl konstantní tloušťku (40 mm).

Odted' budou všechna hodnocení založena na užší škále, která bude konzervativně vypočítána pro nový materiál.

$$Ceq = \%C + \%Si/4 + \%P/2 \quad (3.1.)$$



Alloyed with Si - legováno Si

Ordinary grade of ductile iron – Základní druhy LKG

Machinability index – index obrobitelnosti

Brinell Hardness (5/750)- tvrdost dle Brinella

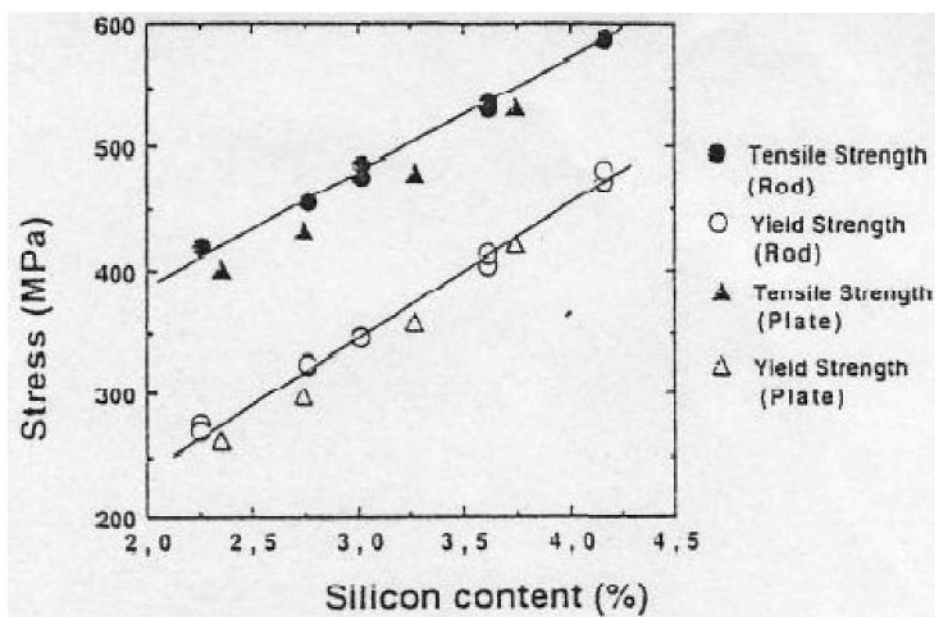
Hardness scatter – rozptyl tvrdosti

Obr. 3.6: Index obrobitelnosti jako funkce tvrdosti LKG [10]

3.3.2.2 PEVNOST V TAHU

Testovaný materiál odlitků byl vyroben jako pláty (330 x 225 x 40mm) a testovacích tyčích (průměr 25mm), s chemickým složením, které je zobrazeno v Tab. 3.1. Obrázky 3.7 a 3.8 ukazují efekt obsahu křemíku na pevnost a tvárnost.

K dosažení limitu pevnosti v tahu 450 nebo 500MPa vyžaduje 2,9% nebo 3,5% Si (obr. 3.7). Nevýhodou slitiny s křemíkem je snížení tvárnosti (obr. 3.8). Pro EN-GJS 500-7 je požadavek na protažení než nastane lom v souvislosti s ISO 1083 minimálně 7%, čehož lze uspokojivě dosáhnout s 3,7% Si. Znázorněná křivka tahové zkoušky pro jednotlivé varianty odlitků je zobrazena na obr. 3.9. Je evidentní, že materiál s feritickou formou vykazuje podobný sklon k rychlosti tvrdnutí a tedy tažnost snižuje, v závislosti na obsahu křemíku. Také zjevně ukazuje, že tvárnost se zmenšuje v závislosti na růstu obsahu křemíku. EN-GJS 500-7, která má feriticko/perlitickou formu ukazuje vyšší sklon k rychlosti tvrdnutí vzhledem k obsahu perlitu.



Stress - napětí

Silicon content – koncentrace křemíku

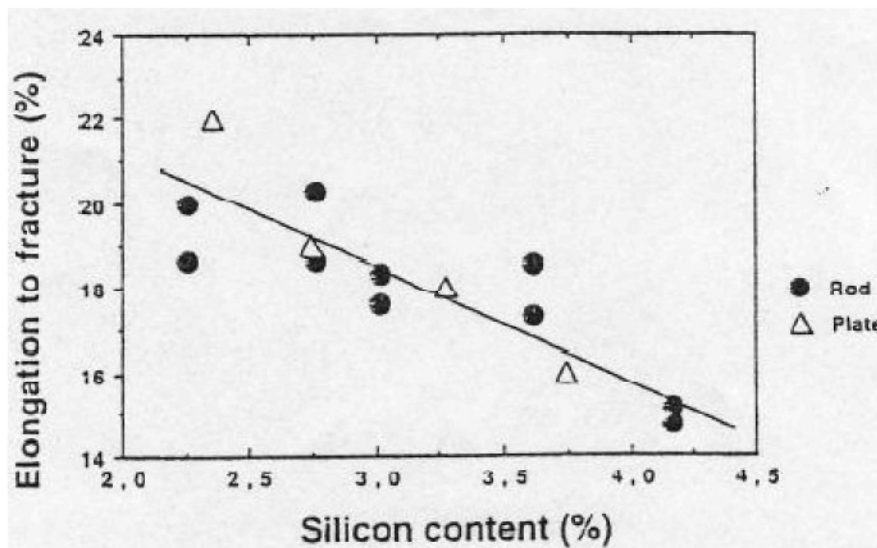
tensile strength - pevnost v tahu

yield strength – mez kluzu

rod - tyč

plate – deska

Obr. 3.7: Vliv obsahu křemíku na pevnost v tahu feritické LKG [10]



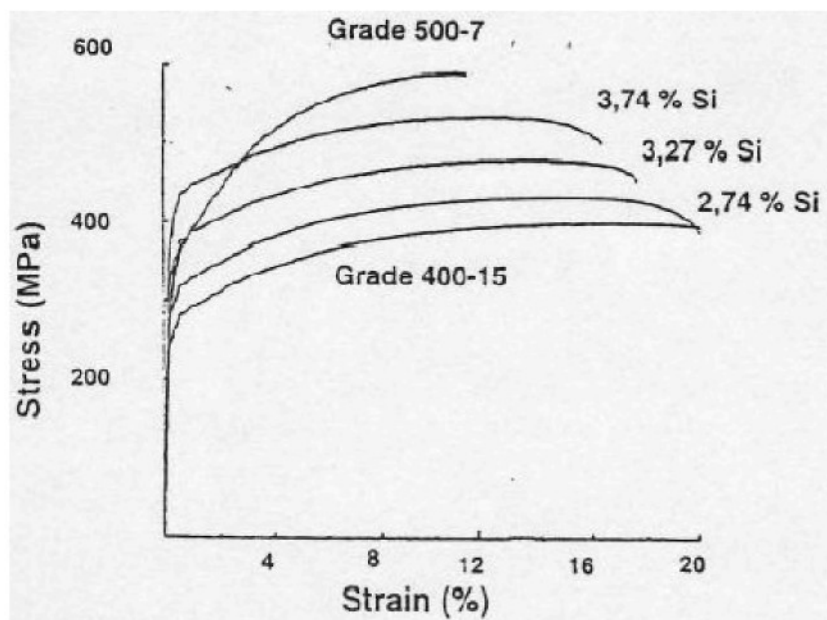
Rod - tyč

Plate - deska

Elongation to fracture – prodloužení do lomu

Silicon content – koncentrace křemíku

Obr. 3.8: Prodloužení do lomu jako funkce obsahu křemíku ve feritické LKG [10]



Stress – napětí

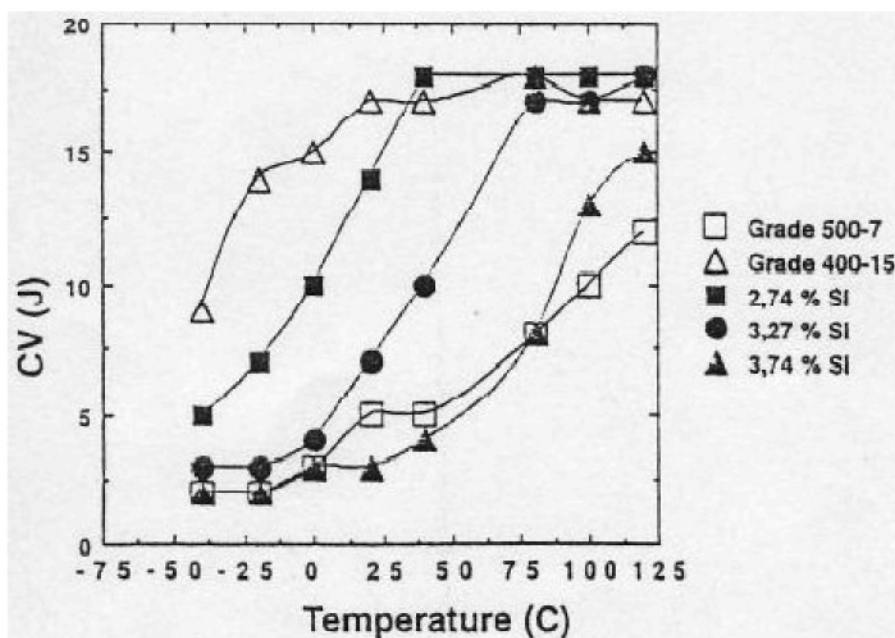
Strain – poměrné prodloužení

Obr. 3.9: Křivky napětí pro různé slitiny, vzorky brané z litých desek ($t = 40\text{mm}$) [10]

3.3.2.3 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Běžné testování vrubové houževnatosti bylo provedeno při různých teplotách na Charpyho V testovací tyči, obr. 3.10. Každá hodnota reprezentuje průměr odebraný z 3 – 5 testovacích tyčí. Přechodová teplota, kterou lze vyčíst z diagramu ukazuje, že přechod u EN-GJS 500-7 z houževnatého ke křehkému materiálu nastane při teplotě $+50^{\circ}\text{C}$, zatímco s 2,35% Si nastane přechod při teplotě přibližně -50°C . Materiál, který obsahuje vyšší obsah křemíku ukazuje, že ferit, který je tuhý roztok s křemíkem má zvýšenou křehkost, ale vykazuje přechodové teploty, které jsou nižší nebo stejné, jako ty u EN-GJS 500-7.

Jak už bylo zmíněno, mechanické vlastnosti běžné GJS jsou regulovány typem složení matrice. Vyšší obsah perlitu poskytuje lepší pevnost. Obrázek 3.11 ukazuje efekt perlitu na vrubovou houževnatost. Materiál EN-GJS 500-7 běžně obsahuje okolo 30 – 60% perlitu, což je vidět na obrázku, kde hodnota nárazové pevnosti může klesnout až na 5J.

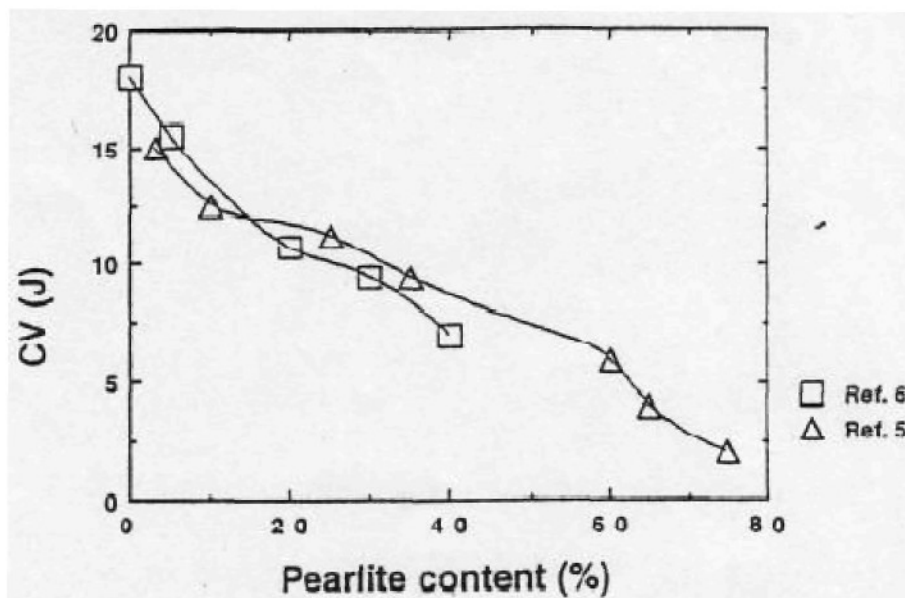


Temperature – teplota

CV - vrubová houževnatost

Obr. 3.10: Odchytky ve vrubové houževnatosti s teplotou pro všechny materiály.

Testované vzorky jsou zhotoveny z materiálu braného z litých plátů, podívejte se na Tabulku [10]



CV - vrubová houževnatost

Pearlite kontent – koncentrace perlitu

Obr. 3.11 Vliv obsahu perlitu vrubovou houževnatost při 20°C [10]

3.3.2.4 VLASTNOSTI ÚNAVY

Všechny varianty materiálů kromě slitiny I s 2,74% Si byly testovány prostým ohybem. Testovací tyče byly kulaté a hladké s $K_t=1,05$ (faktor koncentrace napětí). Některé testovací tyče vyrobené z GJS 400-15 a 500-7 a slitiny III(3,74% Si) byly také testovány s vroubkováním, $K_t=2,06$.

Testovací stroj pracoval s frekvencí 50Hz a testovací technikou byla metoda stupňovitých odlitků na limitu únavy na dvou úrovních napětí na okraji životnostní křivky. Tabulka 3.4 ukazuje hlavní výsledky. Škála měření s limitem únavy je 10 a 90% pravděpodobnosti zlomení v daném pořadí. Konstanta k , která je používána pro předpověď životnosti, je definována, jako inverzní sklon lineární části křivky S-N.



Tabulka 3.4: Výsledky únavy dané níže jsou limity únavy na 50% pravděpodobnosti zlomu v cyklech 10^7 . Daný rozsah je 10 a 90% pravděpodobnost zlomu. Vzorek je kruhový a hladký s průměrem 10mm [10]

Materiál	mez únavy [MPa]	pevnost v tahu [MPa]	mez únavy /pevnost v tahu	K
EN-GJS 400-15	222 ±8	400	0,51	4,4
I – GJS s 2,74% Si (2,35% Si)	226*	430	0,53	-
II - GJS s 3,27% Si	253±6	480	0,53	7,7
III - GJS s 3,74% Si	273±9	530	0,51	8
EN-GJS 500-7	272±4	590	0,46	7,5

* vypočtená hodnota

3.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, KTERÉ BYLY ZJIŠTĚNY

Cílem práce vědců bylo také redukovat odchylky mechanických vlastností závislých na rozsahu rychlost tuhnutí. Odchylka tvrdosti je důležitým parametrem, protože má přímý vliv na obrobiteľnost. LKG s vyšším obsahem křemíku poskytují přímé omezení odchylek tvrdosti, které se normálně vyskytuje u odlitků nábojů kol z EN-GJS 500-7. V sekci nábojů kol, které mají největší odchylky v tloušťce (obr. 3.4), je škála zredukována z ± 36 na přibližně ± 4 HB díky slitině s 3,3 – 3,7% Si, viz tabulka 3.2.

Škála tvrdosti je přímo spojena s indexem obrobiteľnosti (obr. 3.6), který může být snadno převeden do nákladů obrábění. Toto je dáno metodou převzatou z VAC. Kalkulace zhodnocuje hodnoty obrábění, které podstoupily komponenty od surových odlitků až po hotové komponenty, typ postupu výroby, dobu odstavení, směnu v indexu obrobiteľnosti apod. Kalkulace byla provedena pro tři komponenty, všechny odlité z EN-GJS 500-7. První součástí byla konzole pružiny, hromadně vyráběná součástka, které je odlito 50 000 kusů každý rok. Konzole byla jednoduchá a vyžadovala málo práce. Druhou součástí byl náboj kola nákladního vozu, který je hromadně vyráběnou součástí, která vyžaduje velkou přesnost obrábění. Třetí součástí byla skříň zadní nápravy pro nákladní automobil, komplikovaná součástka s vloženými jádry v malém rozsahu zahrnující velké množství obráběcích úkonů. Tabulka 3.5 ukazuje velikost výrobních nákladů zahrnutých pod zkvalitňující faktor

Společně s aktuálním stupněm zkvalitněním ve výrobě a aktuálními změnami v nákladech, které vzniknou, jestliže bude LKG změněna LKG s 3,74%Si je ukázána



v Tabulce 3.6. Tabulky 3.5 a 3.6 ilustrují, že je možné snížit náklady na obrábění o 10% redukcí změn v tvrdosti díky obsahu perlitu.

Tabulka 3.5: Náklady (SEK) na dané součástky [10]

Vyráběná součást	Počet kusů za rok	Čisté náklady [SEK]	Náklady na obrábění [SEK]	Zkvalitnění
Rameno	50000	89	43	1,49
Náboj kola	150000	275	131	1,48
Skříň zadní nápravy	11000	3000	800	1,27

Poznámka: SEK – švédská koruna

Tabulka 3.6: Úspory za rok (Švédských korun) [10]

Vyráběná součást	Úspora [SEK]
Rameno	216 000
Náboj kola	1960 000
Skříň zadní nápravy	880 000

Změna v nákladech, která byla vypočítána, byla založena na předpokladu, že bude využita celá kapacita obrobiteľnosti. Jedním z argumentů, který se objevil je, že není možné mít prospěch ze zlepšeného indexu obrobiteľnosti se samostatným procesem, jako v případě upevnění pružiny. Obrábění je neodborné a bude trvat tak dlouho, jak jen to bude možné. Protiargumentem může být, že lepší index obrobiteľnosti znamená vyšší rychlost podávání a menší počet změn nástrojů na stroji, to znamená lepší výkonnost a lepší využití kapacity stroje než v současné době. Je-li u náboje kol důležitá kvalita zhotoveného povrchu a tolerance, je možné, že lepší obrobiteľnost nemusí být plně využita, protože vyšší rychlost podávání může způsobit problémy s dokončením povrchu. Může být také poukázáno na to, že na moderních výrobních linkách, nejsou nástroje vyměňovány jeden po druhém, pokud jsou opotřebované. Nástroje jsou vyměňovány hromadně po například 250 součástech. To znamená, že ne všechny nástroje jsou opotřebovány, ale jsou vyměněny z praktických důvodů, je-li linka zastavena.

Z kalkulace uvedené výše vyplývá, že je zde značná možnost zredukování nákladů, dokonce i když není možné využít celý potenciál materiálu. Jediná reálná cesta jak ověřit kalkulaci je vytvořit studii obrobiteľnosti užívající výrobní zařízení. Toto bylo uskutečněno na omezeném množství nábojů kol. Dvě tavby s 3,50% Si a 3,70% byly připraveny a z každé bylo vyrobeno 50 nábojů kol. Dvě tavby reprezentují hrubý rozptyl v chemickém



složení, které má slévárna v běžné výrobě. Obrábění bylo provedeno s novými nástroji a s optimálním nastavením zařízení. LKG s vyšším obsahem křemíku byla opracována s nastavením majícím lepší index obrobiteľnosti. Naneštěstí schopnost obráběcí linky nebyla dost vysoká. Lepší index obrobiteľnosti nemůže být plně využit. Po porovnání se standardní LKG došli k závěru, že je možné dosáhnout snížení nákladů na obrábění přinejmenším o 6%.

Je-li materiál více jednotný v kvalitě a pevnosti, může to také znamenat, že pevnost komponentů může být optimalizována, následně v lehkých součástkách. Průměrně každé ušetřené kilo materiálu odpovídá zhruba 10 SEK.

Mechanické vlastnosti indikují, že varianta LKG s 3,5% Si má vlastnosti, které jsou jasně lepší nebo stejné jako ty EN-GJS 500-7. Varianty s 2,9% Si mohou poskytovat alternativu pro EN-GJS 450-10. V obou případech byla tažnost lepší než u běžné LKG.

Jedním z problémů je, že ty příměsi, které mají velmi pevný tuhý roztok, tak jako fosfor, mohou způsobit zhoršení tvárnosti společně se zvyšujícím se obsahem křemíku. Experimenty ukazují, že tažnost leží na škále mezi 18,7 – 21,1% pro materiál s 3,0 – 3,4% Si, 0,02 – 0,08% P a okolo 4,3% Ceq. Analýza zpětného pohybu dalších mechanických vlastností podává následující výsledky:

Pevnost v tahu:

$$R_m = 79,5 \cdot \% Si + 575 \cdot \% P + 191,5 \quad [MPa] \quad (3.2.)$$
$$r = 0,996$$

Mez kluzu:

$$R_{p0,2} = 109,6 \cdot \% Si + 449 \cdot \% P - 20,7 \quad [MPa] \quad (3.3.)$$
$$r = 0,995$$

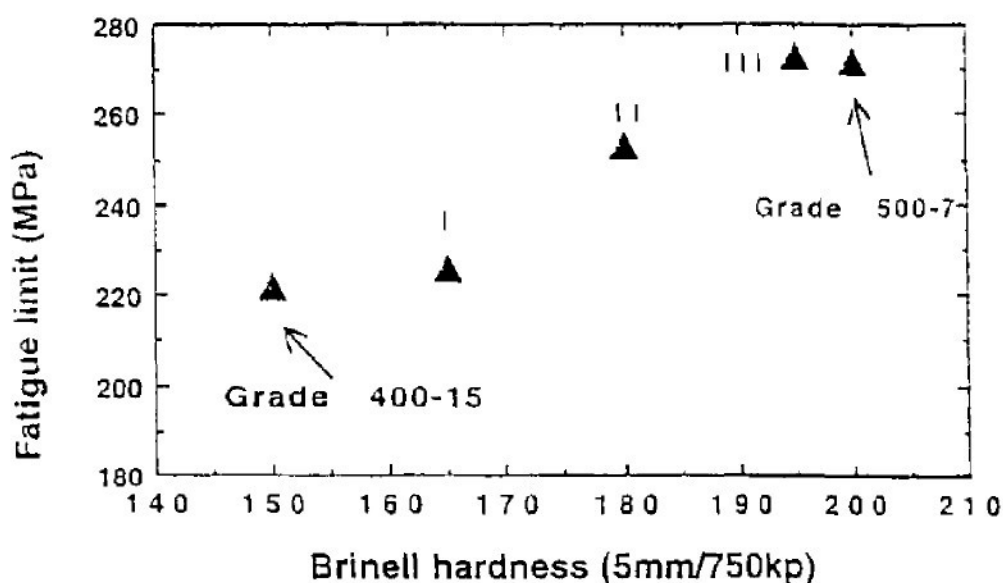
Tvrdost dle Brinella:

$$HB = 26,1 \cdot \% Si + 194 \cdot \% P + 96,3 \quad (3.4.)$$
$$r = 0,89$$

Výsledky testování vrubové houževnatosti stejného materiálu ukazují, že maximální přípustný obsah fosforu, který se běžně nachází u LKG, může být příliš vysoký. Omezení z max. 0,05% může být nezbytné. V praxi je ve švédských slévárnách v současnosti obsah fosforu pod 0,03%.

Je zajímavé, že mez únavy stoupá u LKG s feritickou formou. Zvýšení je zhruba přímočaré s růstem obsahu křemíku. EN-GJS 500-7 s feriticko/perlitickou matricí je na stejné úrovni, jako LKG, která má vyšší obsah křemíku (3,74% Si), obr. 12 a Tabulka 4.

Podíl mezi mezí únavy a pevností v tahu může sloužit, jako další parametr pro porovnání. Obr. 3.13 ilustruje, že LKG s vyšším obsah Si, má poněkud lepší míru odolnosti. Mělo by být možné toto využít na překonstruování dílů. Některé ze specifikovaných testovacích tyčí byly zhotoveny ze standardního materiálu a variant LKG s vyšším obsahem křemíku (3,74%). Experiment byl proveden pouze k „načrtnutí“ křivky S-N pro danou LKG (obr. 3.14). Porovnání mezi vroubkovanými a nevroubkovanými testovacími tyčemi ukazují, že rozdíly mezi standardní LKG a variantou s křemíkem zmizely a limit únavy končí na cca 160MPa. Z tohoto experimentu lze odvodit, že zde nejsou žádné rozdíly v LKG.



Fatigue limit – mez únavy

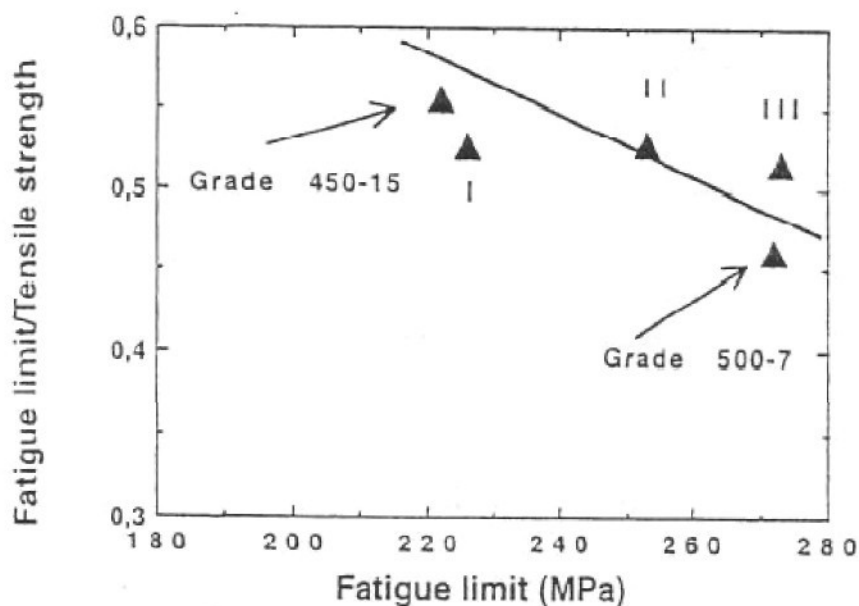
Brinell Hardness (5/750)- tvrdost dle Brinella

I – GJS s 2,74% Si

II - GJS s 3,27% Si

III - GJS s 3,74% Si

Obr. 3.12: mez únavy pro dvě standardní jakosti a pro všechny jakosti feritických slitin, jako funkce tvrdosti [10]



Fatigue limit/Tensile strength - mez únavy / pevnost v tahu

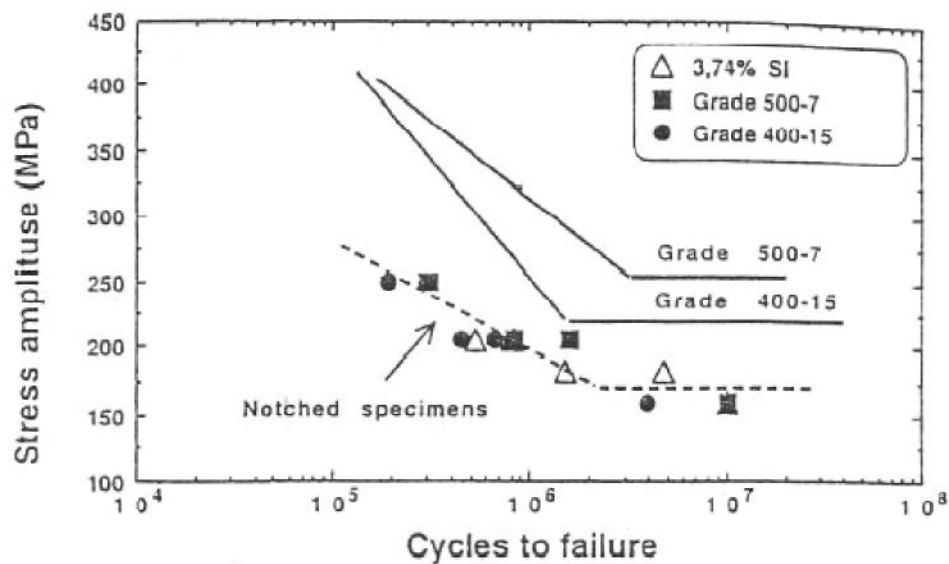
Fatigue limit – mez únavy

I – GJS s 2,74% Si

II - GJS s 3,27% Si

III - GJS s 3,74% Si

Obr. 3.13: Využití pevnost v tahu pro standardní a feritické GJS [10]



Stress amplitude – amplituda napětí

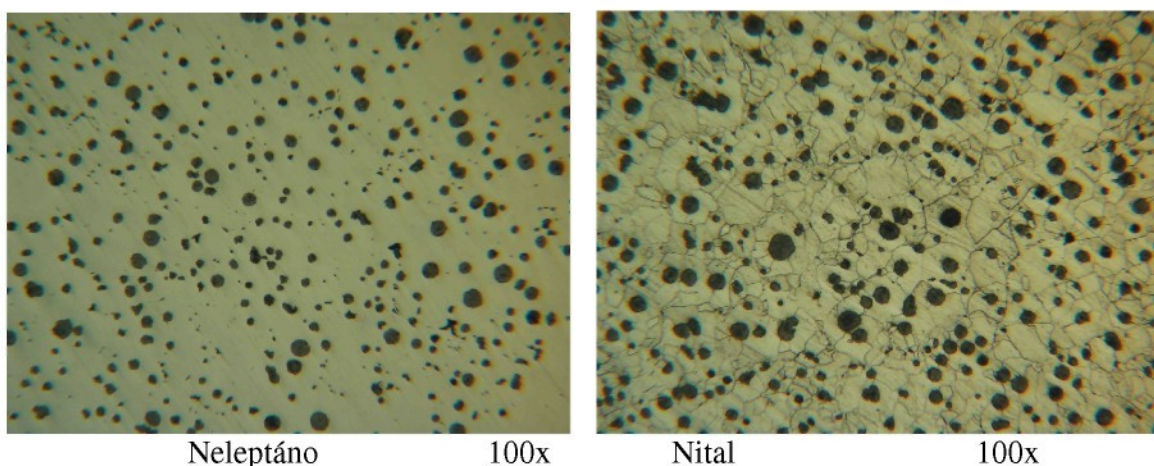
Cycles to failure – počet cyklů do prasknutí

Obr. 3.14: Porovnání meze únavy mezi vroubkovanými a nevroubkovanými vzorky pro dva standardní materiály a pro slitinu 3,74% Si [10]



Další parametr, který je ve středu zájmu je sklon (k) lineární části křivky S-N. Toto se využívá při výpočtu doby použitelnosti; k roste v zásadě lineárně s rostoucím limitem únavy zkoumané LKG. Posunutí této linie je podobné pro zkoumané varianty LKG. Rozptyl, který se nenachází na křivce únavy je úzký, částečně proto, že testovaný materiál je homogenní v mikrostruktuře a částečně proto, že zde nevznikla pórovitost.

Na obr. 3.15 je pro doplnění ukázána struktura litiny s vyšším obsahem křemíku, podle ŠMRHY [5], která odpovídá odlitkům z Y bloků.



Obr. 3.15: Struktura litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem Si, blok Y, (10 % VI 6 + 90 % VI 7, Fe) [5]



4. DISKUSE ZJIŠTĚNÝCH POZNATKŮ

Poznatky obsažené v této práci přináší ucelené první informace o novém typu litiny s kuličkovým grafitem, který byl vyvinut ve Švédsku za účelem úspory výrobních nákladů odlitků z litiny s kuličkovým grafitem určených pro automobilový průmysl (automobily typu Scania a Volvo). Tento typ litiny není ve světě, dle literárních podkladů, velmi známý, i když evropská norma ČSN EN 1563 (Slévárenství – Litiny s kuličkovým grafitem) v příloze tuto litinu uvádí jako dodatek pod označením ISO 1083:2004 (E). V posledních letech je věnována pozornost této litině na Katedře materiálu a strojírenské technologie TU v Liberci. V současné době se hledá vhodný způsob a technologie její výroby, výběru vhodných vsázkových surovin a stanovení metodiky přípravy taveniny. Součástí řešení je i navržení typu surového železa a odzkoušení vhodného poměru surového železa a vratného materiálu, jež tvoří základ vázky pro tavení. Dalším důležitým úkolem je návrh a odzkoušení typu modifikátoru, volba podmínek prováděné modifikace, volba očkovačů, popř. očkovačů a jejich typ. Výroba litiny je vedena pod pojmem „Sandwich“, tj. ve speciální hluboké pánvi s přepážkou pro modifikátor, litinové piliny očkovačů a karosářské ocelové plechy. Pro tavení byla použita elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec o hmotnosti taveniny 40 kg, s kyselou vyzdívkou. Základní kovovou vsázku tvořily housky surového železa Sorel a vratný odpad z běžné feritické litiny s kuličkovým grafitem. Obsah křemíku ve vsázce se doplňoval přidáváním FeSi 75. Po natavení a přehřátí taveniny přibližně na 1500 °C byla stažena struska a tavenina byla přelita do předehřáté modifikační pánve na teplotu 600 °C.

V rámci výzkumu byly postupně odzkoušeny různé typy modifikátorů, nejdříve pomocí KVZ (kovy vzácných zemin), po několika provedených tavebách s neuspokojivými výsledky struktury získané litiny byl použit modifikátor na bázi hořčíku ve formě předslitiny (obchodní název LAMET 5504), v současné době jsou zkoušena další typy modifikátorů. Ukázalo se, že po modifikaci do pánve je velmi příznivé při teplotě taveniny 1400 °C přidat další dávku očkovačů, osvědčilo se očkovačů (obchodní název Superseed). Zkušební odlitky byly destičky 160 x 43 mm, tloušťky 3, 4, 5, 7, 10 mm a dále byly zkoušeny drobné automobilové odlitky (páky, náboje).

V současné době je na tomto pracovišti na toto téma řešena jedna doktorská a jedna diplomová práce. Jejich hlavním úkolem je získat předpokládaný typ litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku, v nejrůznějších typech a tloušťkách stěn odlitku.



5. ZÁVĚR

Nový typ litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku (cca 3,5 %) se zdá být dle prvních literárních informací, perspektivním slévárenským materiálem pro automobilový průmysl.

Pro výrobu LKG s vyšším obsahem (cca 3,3 až 3,9 % Si) lze doporučit středofrekvenční indukční pec a odlévací pánev (Sendwich) s kyselou vyzdívkou. Pro tavící pec o hmotnosti 40 kg lze doporučit 6,19 kg surového železa SOREL, 12,35 kg vratu (LKG) 0,044 kg FeSi75 a 0,023 kg FeMn65. Očkování provádět v pánvi 0,151 kg FeSi75 a 0,1 kg Superseed 75. Následně je možno (např. po změření aktivity kyslíku v tavenině) provést ještě modifikaci 0,453 kg MgFeSi. Tato tavba, včetně dodržování všech metalurgických zásad, vede ke získání LKG s kuličkovým grafitem s feritickou matricí s grafitem pravidelného tvaru, typ VI.

Navržený a odzkoušený postup přípravy taveniny litiny s vyšším obsahem Si je současně zárukou i správných hodnot mechanických vlastností, které udává ISO 1083:2004 (E), tj. minimální pevnost v tahu 500 MPa, min. tažnost 10 % při tloušťce odlitku cca 30 mm a tvrdost 185 až 215 HB.

Při odlévání velmi tenkých odlitků, jako byly použité destičky tloušťky 3, 4, 5, 7, 10 mm výše uvedená metalurgie nevede ke vzniku čistě feritické matrici (obzvláště v tenkých destičkách), ale vzniká matrice feriticko-perlitická s grafitem typu VI, menší velikosti. U takto tenkých odlitků vyšší procento křemíku způsobuje nárůst pevnosti v tahu a tvrdosti. Hodnota tvrdost je závislá na tloušťce destičky. To znamená že destičky s menší tloušťkou vykazovaly nepatrně vyšší tvrdost a tyto tenké destičky, nesplňují hodnotu předepsané minimální tažnosti 10 %, která je předepsána v příslušné normě ISO 1083:2004 (E) předepsána u odlitků tloušťky do 30 mm.



6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NOVÁ, I.: Teorie Slévání, 2. díl Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin, Technická Universita v Liberci březen 2007.
- [2] PLUHAŘ, J.: Nauka o materiálu , 1. vyd. SNTL, Praha 1989.
- [3] ALAXI, J. a kol.: Nauka o materiálu. [Skripta], Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, září 1989.
- [4] PODRÁBSKÝ, T., POSPÍŠILOVÁ, S.: Studijní opora " Struktura a vlastnosti grafitických litin ", Vysoké učení technické v Brně 16.11.2006.
- [5] ŠMRHA, J.: Vliv zvýšeného obsahu křemíku na mechanické vlastnosti tenkostěnných odlitků z litiny s kuličkovým grafitem. [Doktorská práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2009.
- [6] TVRZNÍK, P.: Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z LKG s vyšším obsahem křemíku. [Diplomová práce]. KSP – FS, TU v Liberci, 2009.
- [7] ČSN 42 0461: Hodnocení metalografické struktury litin, ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 1.12. 1975.
- [8] BOUCNÍK, P.: Vliv doby na izotermické transformace na únavové vlastnosti bainitické tvárné litiny [Diplomová práce], VUT v Brně 1996.
- [9] BOUCNÍK, P.: Simulace mikrostruktury s ohledem na dosažení požadovaných vlastností odlitků [Disertační práce], VUT v Brně 2001.
- [10] L. E. BJÖRKEGREN a K. HAMBERG: Ductile iron with better machinability compared to conventional grades. Foundryman - Technical paper, Ductile iron, December 1998 p. 386 to 391.