

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

**Tuhnutí tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z litiny
s červíkovitým grafitem**

**Solidification of thin-walled castings made of compacted (vermicular) graphite cast iron for
automobile industry**

Ondřej Urban
KSP – SM – B9

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

Konzultant bakalářské práce: Ing. Petr Kosek

Rozsah práce a příloh:

Počet stran55

Počet tabulek....11

Počet příloh.....7

Počet obrázků.. 24

Datum: 5. 1. 2007

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program:	B2341 - Strojírenství
Diplomant:	Ondřej Urban
Téma práce:	Tuhnutí tenkostěnných odlitků pro automobilový průmysl z litiny s červíkovitým grafitem Solidification of thin-walled castings made of compacted (vermicural) graphite cast iron for automobile industry
Číslo BP:	KSP – SM – B9
Vedoucí BP:	prof. Ing. Iva Nová, CSc. - TU v <i>Liberci</i>
Konzultant:	Ing. Petr Kosek – TU v <i>Liberci</i>

Abstrakt: Tato práce shrnuje dosavadní znalosti o litině s červíkovitým grafitem (mech. a technologické vlastnosti, výroba, použití atd.) se zaměřením na výrobu tenkostěnných odlitků a s tím související mechanické a strukturní změny v závislosti na tloušťce odlitků.

Abstract: This thesis summarises previous knowledge about production of compacted graphite cast iron CGI (mechanical and technical quality, production etc.). With a view to a production of thin – walled casts and this related to mechanical and structural changes in dependence on the thickness of casts.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 5. ledna 2007

.....
Ondřej Urban
Uranová 2008
470 01 Česká Lípa

Poděkování:

Chtěl bych touto cestou poděkovat paní prof. Ivě Nové, Ing. Pět'ovi Koskovi a paní Ing. Ivě Novákové za odborné vedení, čas a ochotu při poskytování informací a připomínek, týkajících se této bakalářské práce.

Za nekonečnou podporu ve studiu bych chtěl poděkovat své ženě Kulíše, rodičům a své vedoucí v zaměstnání.

Obsah

I ÚVOD	6
II REŠEŠNÍ ČÁST PRÁCE	7
1 CHARAKTERISTIKA LITIN	7
1.1 ROZDĚLENÍ LITIN	8
1.2 STRUKTURA LITIN.....	9
1.2.1 GRAFIT	9
1.2.2 ZÁKLADNÍ KOVOVÁ MATRICE (HMOTA).....	11
1.2.3 OSTATNÍ STRUKTURNÍ SLOŽKY.....	13
1.3 KRYSTALIZACE LITIN.....	13
1.3.1 KRYSTALIZACE PRIMÁRNÍ FÁZE (AUSTENITU)	15
1.3.3 VLIV RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ NA STRUKTURU – TEPLTNÍ PRŮBĚH KRYSTALIZACE LITIN.....	17
1.3.4 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ NA KRYSTALIZACI	19
2 LITINA S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM	21
2.1 VZNIK ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU	21
2.2 MORFOLOGIE ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU	22
2.3 VÝROBA LČG	23
2.3.1 TAVÍCÍ AGREGÁTY A VSÁZKOVÉ SUROVINY	24
2.3.2 MODIFIKACE	25
2.3.3 SHRUTÍ HLAVNÍCH POZNATKU O VÝROBĚ LČG.....	27
2.4 VLASTNOSTI LČG	28
2.4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI LČG	29
2.4.2 SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI LČG.....	30
2.4.3 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI LČG	31
2.4.4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI LČG.....	32
2.5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ LČG	33
2.6 OBLAST POUŽITÍ LČG	33
2.7 SHRUTÍ.....	36
III EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	37
1 POPIS SLÉVÁRENSKÉ FORMY, FORMOVACÍ SMĚS	37
2 PŘÍPRAVA TAVENINY	39
3 VEDENÍ TAVBY PRO PŘÍPRAVU TAVENINY LČG	39
4 POPIS, VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK	41
4.1 MĚŘENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI	41
4.2 MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	45
4.3 METALOGRAFICKÁ STRUKTURA	47
5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	51
IV ZÁVĚR	53
V SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54
VI PŘÍLOHY	55

I ÚVOD

Slévárství a jeho produkty provází vývoj lidstva od jeho počátku. Ve všech dobách hrála výroba kovových předmětů klíčovou roli ve vývoji společnosti. Ne nadarmo se vývojové etapy lidstva nazývají podle rozhodujícího druhu používaného kovu (doba bronzová, železná). Je s podivem, že řada metalurgických postupů u tak starého materiálu, jako je litina (objevena 1500 před n.l. v Číně), byla objevena a začala se používat teprve nedávno. Jedním z nich je i objevení a používání litiny s červíkovitým grafitem (dále LČG). Tímto tématem se bude zabývat tato práce.

Výroba grafitických litin nejen v celém světě, ale i v České republice roste, což potvrzují mnohé studie či statistiky. Stále vyšší nároky na užité vlastnosti materiálů na odlitky vedou k zavádění modifikovaných litin do výroby, kde se změnou tvaru grafitu docílí požadovaných vlastností, a s tím související přechod sléváren jiných slitin železa na litiny s modifikovaným grafitem .

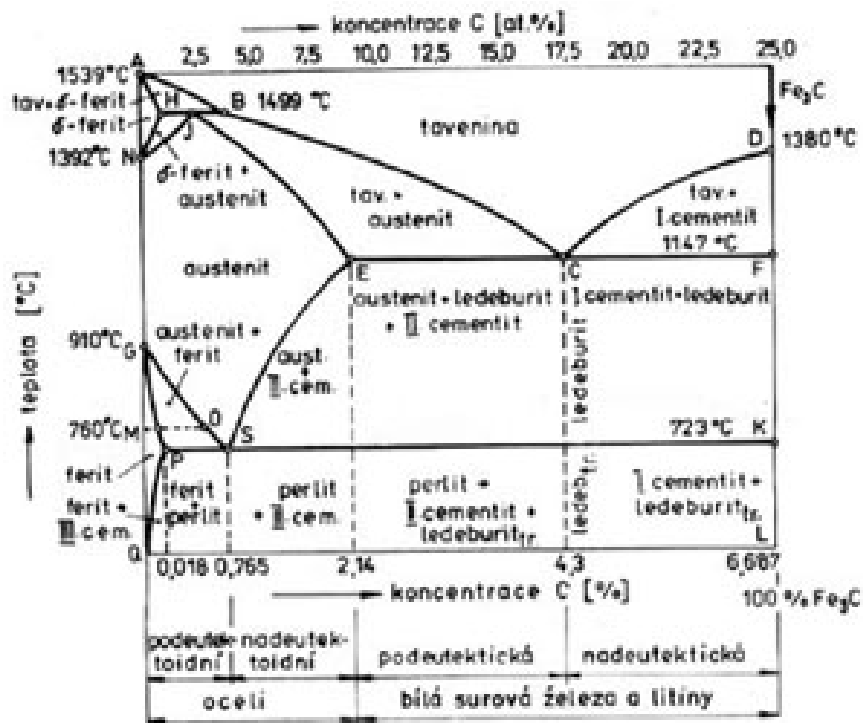
Litiny s červíkovým grafitem jsou novým materiálem ze skupiny jakostních grafitických litin. Je zajímavé, že zpočátku byl výskyt červíkovitého grafitu brán jako nežádoucí tvar grafitu [4]. Od roku 1961 zaplňují mezeru mezi litinami s lupínkovým a kuličkovým (někdy taky uváděným jako zrnitým) grafitem. Mechanickými vlastnostmi se LČG blíží k litinám s kuličkovým grafitem (dříve označované jako tvárná litina), slévárskými vlastnostmi jsou podobné litině s lupínkovým grafitem (označované jako šedá litina). Porovnání vlastností grafitických litin je v příloze 1.

Nečastějším příkladem využití LČG v automobilovém průmyslu jsou odlitky bloků motorů, písty a skříně převodovek. Další použití odlitků z LČG mohou být brzdové bubny, disky, skříně a díly ventilátorů a čerpadel, konzoly, příruby, ozubená kola a další.

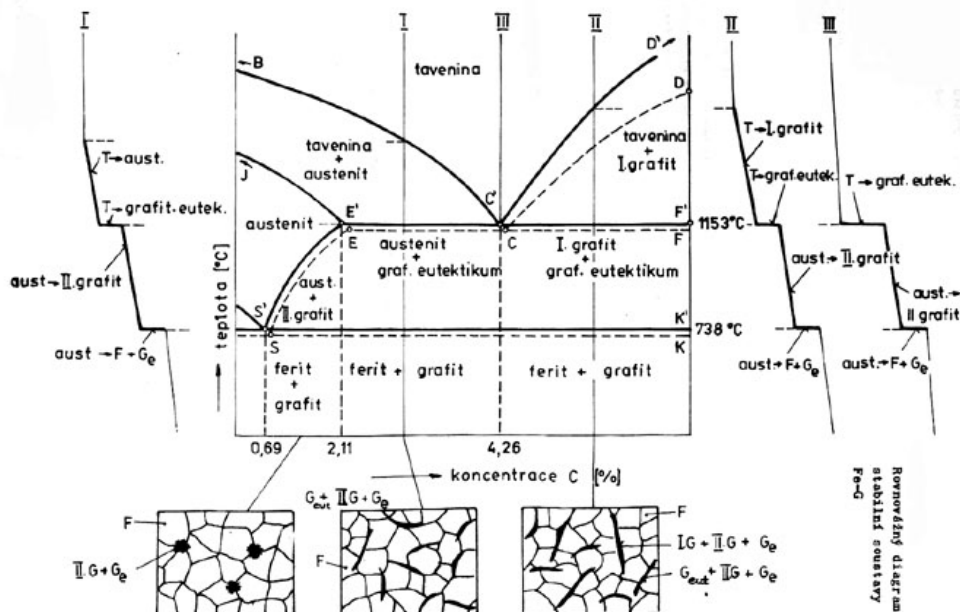
II REŠEŠNÍ ČÁST PRÁCE

1 CHARAKTERISTIKA LITIN

Litina je slitina železa, uhlíku, křemíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Obsah uhlíku je vyšší, než odpovídá jeho maximální rozpustnost v austenitu, tj. $C > 2,08\%$ bez vlivu ostatních prvků. Litiny krystalizují podle stabilního nebo metastabilního diagramu Fe - C, resp. Fe - Fe_3C , případně se v průběhu tuhnutí uplatňují oba systémy (obr.1, 2).



Obr. 1: Rovnovážný diagram metastabilní soustavy Fe - Fe_3C



Obr. 2: Rovnovážný diagram stabilní soustavy Fe –C

Ve stabilní soustavě je u litin převážná část uhlíku přítomna ve formě grafitu, u metastabilní soustavy je všechen uhlík ve formě karbidu železa Fe_3C . Tím, že je uhlík v litinách přítomen ve dvou různých podobách, dosahujeme u litin velmi různých vlastností. Litiny s grafitem jsou měkké, dobře obrobitelné. Litiny s karbidem železa, zvaným cementit, jsou tvrdé, neobrobitelné [6].

1.1 ROZDĚLENÍ LITIN

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Při tuhnutí podle stabilního systému vzniká grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a uhlíkem, vyloučeným v některou z morfologických forem grafitu. Tyto litiny se nazývají grafitické. Při tuhnutí podle metastabilního systému je eutektikem ledeburit. Ve struktuře není přítomen volný grafit a takové litiny se nazývají bílé či karbidické [3].

Základním kritériem pro určení druhu litin je zejména tvar vyloučeného grafitu. A dělíme je na:

Litina s lupínkovým grafitem – GJL (LLG, šedá litina)

Litina s kuličkovým grafitem – GJS (LKG, tvárná litina)

Litina s červíkovitým grafitem – GJV (LČG, vermikulární)

Temperovaná litina¹

¹ Názvy jednotlivých druhů litin, značky a číselné označování respektuje normu ČSN EN 1560 [3].

1.2 STRUKTURA LITIN

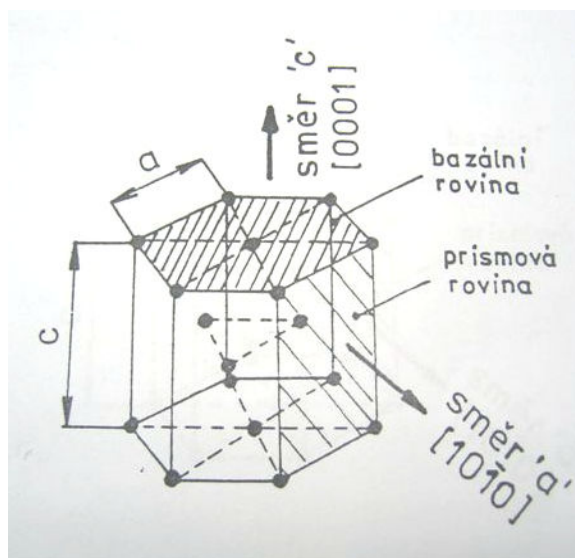
Strukturu litin tvoří grafit, základní kovová hmota a nepatrná část ostatních strukturních složek (fosfidy, siričky, karbidy)² .

1.2.1 GRAFIT

Grafit je krystalická forma uhlíku. Krystalizuje v hexagonální soustavě a tudíž jsou jeho pevnost a tvárnost nepatrné. Základny mřížky se nazývají bazální roviny (viz obr.3). Směr růstu grafitu v bazálních rovinách se označuje “a“ [1010]. Při vytváření nových bazálních rovin se jedná o růst ve směru “c“ [0001]. Krystaly grafitu rostou nejnáze ve směru těchto rovin, proto má grafit sklon vytvářet ploché, deskové krystaly. Obvod šestihranu tvoří prizmatické roviny.

Grafit v litině představuje křehkou, málo pevnou a porézní složku struktury, která oslabuje mechanické vlastnosti základní kovové hmoty.

Grafit dělíme na eutektický (lupínkový, kuličkový, červíkovitý – vzniká při tuhnutí eutektika a s austenitem tvoří grafitické eutektikum), primární (vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafitických litin) a grafit, vznikající rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování (temperování, žhání na odstranění karbidů).



Obr. 3: Krystalová mřížka grafitu [3]

² Bílá litina je tvořena pouze kovovou hmotou.

Tvar grafitu hodnotíme podle normy ČSN EN ISO 945, která grafit rozděluje na:

I. lupínkový grafit (obr. 4a) – poměr délky l a tloušťky a - $l/a > 50$

II. pavoučkový grafit

III. červíkovitý grafit (obr. 4b) – $l/a = 2$ až 8

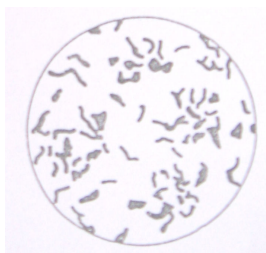
IV. vločkový grafit

V. nedokonale kuličkovitý grafit

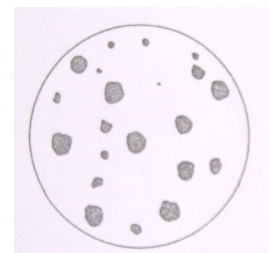
VI. pravidelně kuličkovitý grafit (obr. 4c) - $l/a = 1$ [1,2]



Obr. 4a: Lupínkový grafit



Obr. 3b: Červíkovitý grafit



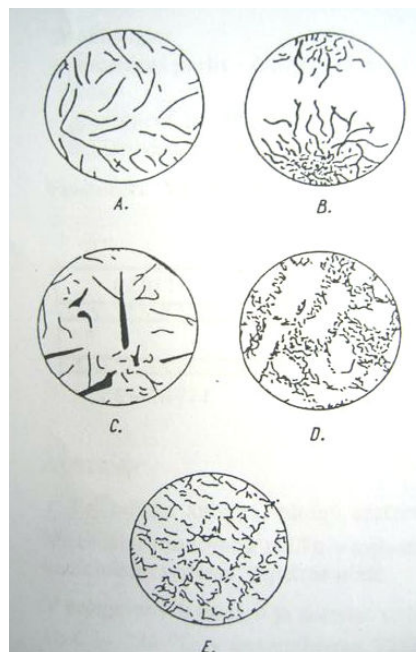
Obr. 3c: Pravidelně kuličkový grafit

Budoucí tvar grafitu v litině ovlivňuje druh, struktura a tvar zárodku. Dále jsou to mechanické faktory, vliv některých chemických prvků a v neposlední řadě také poměr jednotlivých stěn krystalu grafitu při jeho růstu.

Rozložení grafitu je taktéž popsáno normou ČSN EN ISO 945, hodnotí se podle etalonové řady uvedené na (obr. 5) a značí se:

- A – rovnoměrné rozložení
- B – růžicovitě
- C – smíšené
- D – mezidendritické neusměrněné
- E – mezidendriticky usměrněné

Rozložení grafitu D a E se nazývá také jako přechlazený grafit a jeho vznik je způsoben nedostatkem krystalizačních zárodků a rychlým ochlazením a jsou přechodem od stabilního k nestabilnímu tuhnutí.



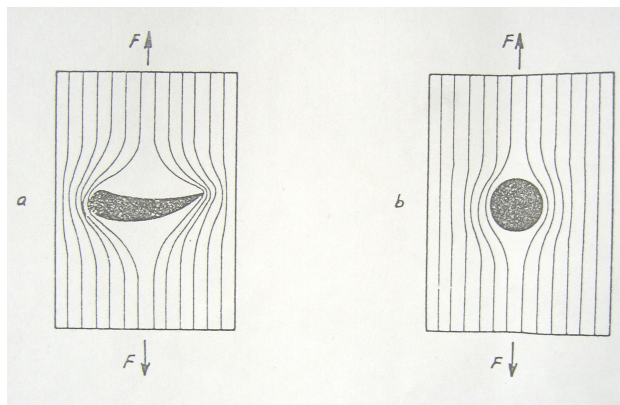
Obr. 5: Rozložení grafitu [3]

Tvar a rozložení grafitu má zásadní vliv na mechanické vlastnosti odlitků. Z tohoto důvodu je nejoptimálnější rozložení typu A –

grafit rovnoměrně rozložený, se stejnoměrnou velikostí. Nepravidelné rozložení a výskyt hrubých grafitových útvarů způsobuje nehomogenní rozložení napětí a horší mechanické vlastnosti.

Samotný grafit má velmi malou pevnost, zmenšuje nosný průřez základní kovové hmoty a tím snižuje pevnost litiny. Navíc dochází na koncích útvarů grafitu ke koncentraci napětí – mluvíme tak o působení grafitu vrubovým účinkem. Čím ostřejší hrany, tím větší je vrubový účinek – obr. 6.

Z tohoto hlediska je nejméně vhodný lupínkový grafit a naopak nejpříznivější je grafit kuličkový. Tím je i vysvětleno proč má litina s kuličkovým grafitem lepší mechanické vlastnosti než litina



Obr. 6: Koncentrace napětí v okolí lupínkového a kuličkového grafitu [1]

s lupínkovým grafitem. Litina s červíkovitým grafitem leží svými vlastnostmi mezi těmito litinami.

Posledním hodnocením grafitu je jeho velikost. Pro co nejlepší mechanické vlastnosti je výhodný jemnozrný grafit, vyloučený ve formě drobných lupínků, červíků či kuliček. Přítomnost hrubých lamel grafitu významně snižuje mechanické vlastnosti litiny.

Disperzitu grafitu stanovujeme metalograficky. Velikost lupínků se hodnotí jejich délkou, disperzita kuličkového grafitu podle počtu kuliček na mm^2 plochy výbrusu. Vyhodnocení se provádí srovnáním s etalony, uvedených v normě.

1.2.2 ZÁKLADNÍ KOVOVÁ MATRICE (HMOTA)

Struktura základní kovové formy nelegovaných grafitických litin bývá obvykle tvořena feritem a perlitem nebo kombinací obou a nazývá se pak ferito – perlitická. Bainit, martenzit, ledeburit či austenit se vykytují jako důsledek tepelného zpracování nebo legování a většinou zvyšují pevnost a tvrdost.

To, jaká bude struktura základní kovové hmoty závisí na:

- chemickém složení litiny
- rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí
- stavu krystalizačních zárodků

- tepelném zpracování

Výsledná základní kovová matrice pak ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny.

FERIT – je měkký, tvárný, s nízkou pevností, s dobrou obrobitelností. V litinách je nositelem houževnatosti.³ Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního systému a je podporován pomalým ochlazováním.

PERLIT – ve srovnání s feritem je tvrdší, pevnější; má horší plastické vlastnosti, horší obrobitelnost a vyšší odolnost proti opotřebení.⁴ Perlit je v litinách nositelem tvrdosti.⁵ Vzniká rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Hlavní fází perlitické transformace je cementit, vedle něhož pak vznikají lamely feritu. Z jednoho zrna austenitu obvykle vzniká několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel.

Podle morfologie dělíme perlit na lamelární (tvořen lamelami feritu a cementitu, rostoucími vedle sebe) a na globulární (vzniká sbalením lamel perlitu při sferoidizačním žíhání, nebo velmi pomalém ochlazování).

Typ lamelárního perlitu se vyskytuje častěji, ale má oproti globulárnímu perlitu horší obrobitelnost.

AUSTENIT - měkký, tvárný, odolný proti korozi a proti působení vysokých teplot, paramagnetický. Za normálních teplot se vyskytuje pouze v legovaných litinách a jako zbytkový austenit, nejčastěji po tepelném zpracování.

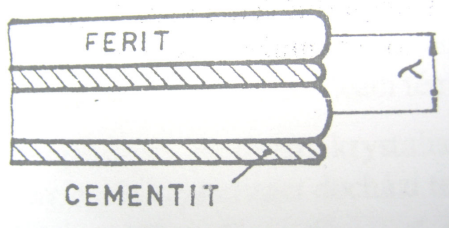
CEMENTIT – Velmi tvrdý (až 850 HB) a křehký. Je tvořen karbidem železa Fe_3C s obsahem uhlíku 6,67 %C. Za přítomnosti legur (Mn, Cr, Mo atd.) mohou být atomy Fe nahrazovány atomy těchto prvků za vzniku komplexních karbidů $(Fe, X)_3C$.

V litinách se cementit vyskytuje v třech formách – primární (tvary hrubých jehlic v nadeutektických bílých litinách), eutektický (součást metastabilního eutektika – ledeburitu), perlitický (součástí eutektoidu – perlitu) [3].

³ Orientační vlastnosti feritu jsou $R_m = 220$ MPa, HB = 50, $A_5 = 70$ %. Do 768 °C je ferit magnetický, nad touto teplotou paramagnetický. Na vlastnostech feritu mají značný vliv legury a doprovodné prvky.

⁴ Mechanické vlastnosti perlitu dosahují hodnot okolo $R_m = 800$ MPa, HB = 280.

⁵ Mechanické vlastnosti úzce souvisí s jeho disperzitou. Disperzita perlitu je určena vzdáleností dvou sousedních lamel feritu (λ). Čím hustěji, tím jsou mechanické hodnoty perlitu vyšší [3].



1.2.3 OSTATNÍ STRUKTURNÍ SLOŽKY

FOSFIDY – vznikají v důsledku omezené rozpustnosti fosforu v železe a jeho segregací na hranicích zrn, kde tuhne jako eutektická fáze. Tím snižují dynamické vlastnosti litin a jsou tudíž nežádoucí.

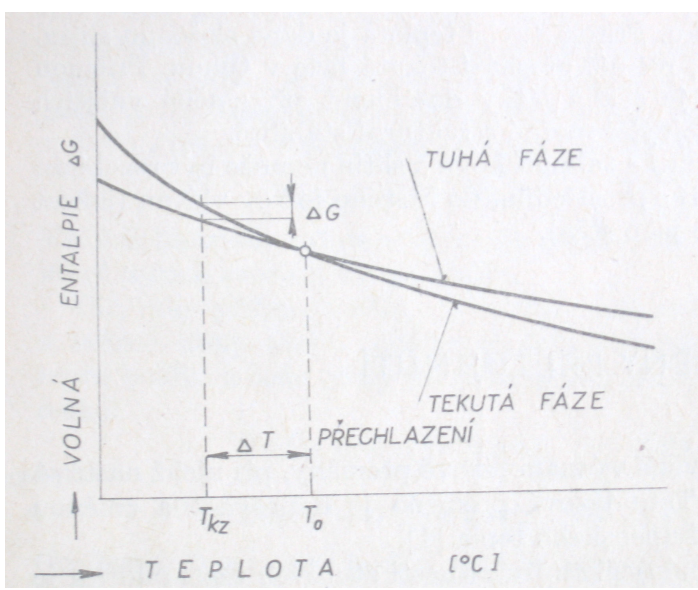
SIRNÍKY – vzhledem k omezené rozpustnosti síry, segreguje na hranicích zrn a vytváří tak sirník železa FeS, který zvyšuje křehkost litiny. Za přítomnosti některých dalších prvků (mangan) mohou vznikat sirníky těchto kovů (MnS).

KARBIDY – vznikají za přítomnosti karbidotvorných prvků (např. chromu – způsobují křehkost a zhoršují obrobitelnost. Jejich výskyt je tak nežádoucí [3].

1.3 KRYSTALIZACE LITIN

Obecně lze krystalizaci definovat jako děj, při němž z původní kapalně fáze vzniká tuhá fáze krystalického charakteru. Krystalizace je difúzní pochod s postupujícím zakládáním zárodků a jejich růstem [7].

U čistých kovů, slitin o eutektické koncentraci a u slitin o koncentraci odpovídajících chemické sloučenině probíhá krystalizace za určité stálé teploty tuhnutí. Ostatní slitiny krystalizují v určitém rozmezí teplot, daném vzdálenosti likvidu od solidu v rovnovážném diagramu. Příčinou krystalizace je snaha kovu nebo slitiny dosáhnout při změně teploty stabilního stavu. Tento stav je určován minimální volnou entalpií ΔG (jinde označované jako hodnota Gibsovy energie – obr.7).



Obr.7: Termodynamické podmínky krystalizace [6]

ΔG – rozdíl volné entalpie, T_0 – teor. teplota krystalizace

Je zřejmé, že nad teplotou T_0 má menší volnou entalpii tavenina a je proto fází termodynamicky stabilnější než fáze krystalická. Pod teplotou T_0 je tomu naopak. Za teploty T_0 dochází k termodynamické rovnováze obou fází (teplota T_0 je teoretická

teplota krystalizace). Aby byl rozdíl volné entalpie ΔG mezi fází nově vznikající a původní dostatečný k podnícení krystalizace, musí dojít k určitému přechlazení pod teoretickou teplotu tuhnutí. Z tohoto rozdílu volných entalpií se uhradí práce potřebná pro zakládání a růst zárodků [6]. Neboli $\Delta G = G_{\text{tuhá fáze}} - G_{\text{tekutá fáze}} < 0$ [3]. Přechlazení je podmínka započítí krystalizace také proto, aby byla zaručena dynamika krystalizačního pochodu proti uvolňujícímu se skupenskému teplu krystalizace [6].

Tuhnutí litin dělíme na dvě fáze – krystalizaci primární fáze a krystalizaci eutektika. Krystalizace eutektika je samostatným procesem, který je ovšem výsledky tuhnutí v primární fázi ovlivněn – např. omezením prostoru pro vznik eutektika, obohacováním zbylé taveniny o minoritní prvky v důsledku segregace z primární fáze atd.

Každý s těchto krystalizačních dějů začíná nukleací zárodků příslušné fáze a jejím následným růstem.

K nukleaci zárodků nové fáze dochází při takovém přechlazení, kdy hodnota volné entalpie ΔG je postačující buď k vzniku vlastních stabilních zárodků – nazývá se homogenní nukleace, a nebo k nukleaci na zárodcích cizích – heterogenní nukleace.

Jelikož je homogenní nukleace jev velmi energeticky náročný (přechlazení $\Delta T =$ až $0,33T_{kr}$), dochází ve skutečnosti téměř výhradně k nukleaci heterogenní. Což platí i u tuhnutí litin.

Při heterogenní nukleaci slouží jako krystalizační zárodky především vměstky a stěna formy. Nutným předpokladem je nízké mezifázové napětí (smáčivost částice) mezi zárodkem a kovem. Čím lepší je smáčivost částice, tím lepší částice působí jako krystalizační zárodek. Dalším faktorem ovlivňující strukturu litiny je rychlost ochlazování. Při pomalém ochlazování dochází k malému přechlazení ΔT , aktivují se pouze velké zárodky a to vede k vzniku hrubozrnné struktury. A naopak při rychlém ochlazování je ΔT větší, aktivuje se větší počet malých zárodků a vzniká jemnozrnnější struktura [3].

Proces nukleace se týká austenitu, grafitu i karbidů. Rozdíl mezi krystalizací austenitu a grafitu je ten, že u austenitu je krystalizace rozdíl volné entalpie pevné a tuhé fáze, u grafitu dochází k vylučování zcela nové fáze z přesyceného roztoku uhlíku v železe. Na přesycení má vliv aktivita uhlíku, která je podporovaná přítomností prvků

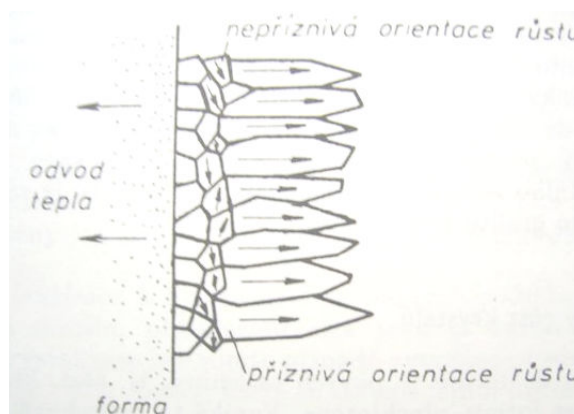
jako např. Si, Al, P, nebo naopak tlumená prvky omezující grafítizaci – např. Mn, Cr, V.⁶

Nejdůležitějším způsobem ovlivnění stavu a množství heterogenních krystalizačních zárodků litin je grafitické očkování litin.

Druhým stádiem procesu tuhnutí je růst zárodků. Dochází k němu mechanismem transportu atomů z tekuté fáze do tuhé přes mezifázové rozhraní. Hlavními faktory, které tento pochod ovlivňují jsou morfologie mezifázového rozhraní a teplotní a koncentrační gradienty v jeho blízkosti [3].

1.3.1 KRYSTALIZACE PRIMÁRNÍ FÁZE (AUSTENITU)

K nukleaci austenitu při heterogenní krystalizaci dochází na místně přechlazených zónách na stěnách formy. Jako zárodky slouží částice formovací směsi nebo oxidy, karbidy a nitridy prvků, obsažených v tavenině. Jedná se především o Ti, V, Al. Očkovadla pro podporu grafítizace nemají obvykle na tuhnutí austenitu vliv. Růst primární osy dendritů austenitu probíhá proti směru odvodu tepla a je ovlivňován rychlostí ochlazování, segregací a difusí prvků (obr.8.).



Obr. 8: Růst dendritů austenitu / 10 /

odvodu tepla a je ovlivňován rychlostí ochlazování, segregací a difusí prvků (obr.8.). Čím větší je rychlost ochlazování, tím je menší (špičatější) poloměr zaoblení špičky dendritu, menší rozteč větví a struktura jemnozrnější.

1.3.2 KRYSTALIZACE EUTEKTIKA

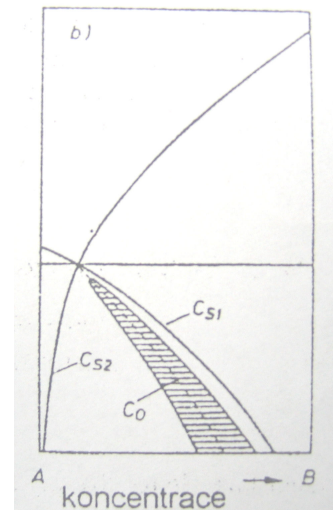
Ke krystalizaci eutektika dochází při přechlazení taveniny pod rovnovážnou eutektickou teplotu v oblasti kooperativního růstu eutektika. Její poloha je určena teplotou eutektickou a prodlouženými rameny čar likvidu obou složek – u litin Fe – C (obr.9) . Asymetrie oblasti je způsobena rozdílnými teplotami tuhnutí železa a uhlíku a

⁶ Vliv prvků na aktivitu uhlíku má souvislost z uhlíkovým ekvivalentem. Uhlíkový ekvivalent odráží účinek přísadových prvků na koncentraci uhlíku v eutektickém bodě. Značí se CE a pro jeho určení se používá vztah

$$CE = \% C + 0,33 (\% Si + \% P)$$

Z něj je patrné, že 1 % Si, popř. 1 % P, posouvá eutektický bod v rovnovážném diagramu Fe-C směrem vlevo o hodnotu 0,33 % C. Litiny tedy tuhnou eutekticky při CE = 4,23. Při CE < 4,23 tuhne litina jako podeutektická, tj. před tuhnutím eutektika se tvoří primární krystaly austenitu. Při CE > 4,23 tuhne litina jako nadeutektická – primárně tuhnoucí je grafit [8]. V jiné literatuře je uvedena hodnota CE = 4,23 [3].

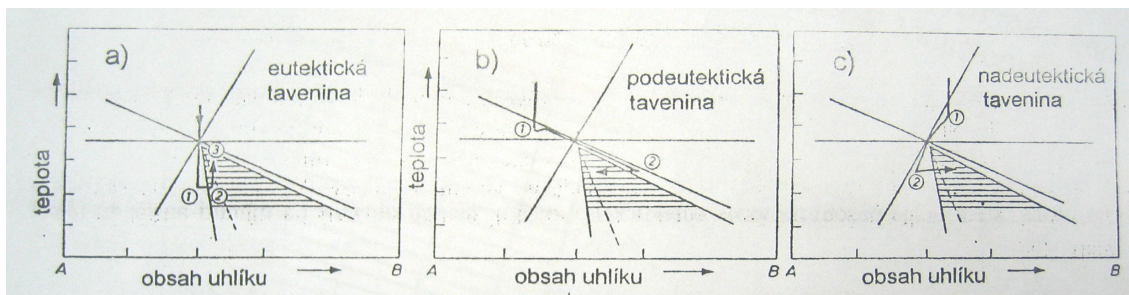
je posunuta směrem k složce s vyšší teplotou tuhnutí – tedy k uhlíku. Postup tuhnutí grafitického eutektika je znázorněn na obrázku 10. V případě litiny **eutektického** složení může dojít k situaci, kdy se vlivem přechlazení dostane tuhnoucí slitina mimo oblast růstu eutektika a krystalizace začíná primární krystalizací dendritů austenitu – viz obr. 10 a) bod 1. V důsledku toho dochází k obohacování taveniny uhlíkem, koncentrace se posouvá do bodu 2. Následuje snížení velikosti přechlazení, nárůst teploty do bodu 3.



Obr. 9. – Oblast kooperativního růstu eutektika v litinách [3]

U **podeutektické** litiny nastává vznik dendritů austenitu před eutektickou teplotou i koncentrací – bod 1 (obr. 10 b). Tavenina se obohacuje o uhlík do bodu 2 za vzniku zárodků grafitu. Složení se posouvá do oblasti růstu eutektika.

Tuhnutí **nadeutektické** litiny začíná bodem 1 vznikem primárního grafitu. Tavenina se ochuzuje o uhlík – posun do bodu 2. Dochází k nukleaci austenitu do oblasti růstu eutektika – obr. 10 c).



Obr. 10. Postup tuhnutí grafitického eutektika [3]

a – tuhnutí litiny eutektického složení, b – tuhnutí litiny podeutektického složení,
c – tuhnutí litiny nadeutektického složení

Samotný děj nukleace grafitu je základním a určujícím aspektem krystalizace grafitických litin. Jak už bylo řečeno grafitizace je proces heterogenní nukleace. Rozložení a velikost grafitu zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti litin. Při nedostatku vhodných zárodků a dalších, pro nukleaci nepříznivých podmínkách, vznikají nežádoucí typy a rozložení grafitu, případně karbidické oblasti, které mají na litinu negativní vliv.

Pro nukleaci grafitu mají rozhodující roli zárodky na bázi oxidů, sulfidů a karbidů. Jako grafitizační zárodky musí splňovat tři podmínky [3]:

a) Při teplotě tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a jsou v tavenině nerozpustné

- b) Mají mikroskopickou velikost (1 μm a menší), pokud možno se neshlukují, nevyplouvají na povrch a jsou rovnoměrně rozložené v tavenině
- c) Krystalizační účinek působí na žádanou fázi (grafit, nikoliv cementit). Je požadována krystalická mřížka stejného typu jako grafitu s maximální odlišností parametrů do 5%.

Následný růst grafitického eutektika souvisí s výsledným tvarem grafitu. O morfologii eutektického grafitu rozhodují 2 hlavní vlivy. Prvním z nich je poměr G/R . Kde G je velikost teplotního gradientu na mezifázovém rozhraní a R je rychlost růstu grafitu. Druhým faktorem je přítomnost modifikačních prvků a nečistot. Tudíž každý tvar grafitu má svou vlastní teplotu růstu, která odpovídá určité rychlosti ochlazování a chemickému složení.

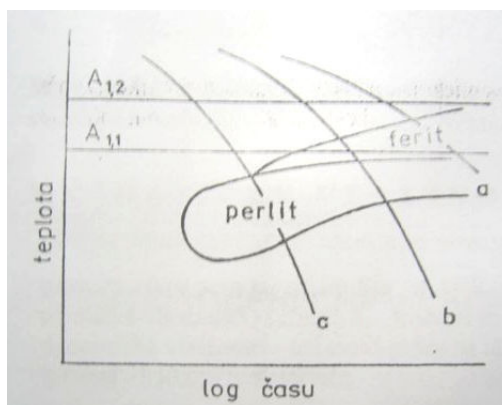
1.3.3 VLIV RYCHLOSTI OCHLAZOVÁNÍ NA STRUKTURU – TEPLOTNÍ PRŮBĚH KRYSATALIZACE LITIN

Na průběh krystalizace má vliv chemické složení, stav krystalizačních zárodků a rychlost ochlazování.

Vliv rychlého ochlazování se projeví omezením všech difúzních procesů, potlačení eutektické krystalizace grafitu a tím podporou tuhnutí podle metastabilní soustavy Fe - C. Vzniká tak ledeburit, označovaný jako zákalka. Jelikož se u litin projevuje rychlost ochlazování na výslednou strukturu, musí být tato skutečnost zohledněna při návrhu chemického složení i určení vlastností v různých tloušťkách stěn odlitku⁷.

Vliv rychlosti chladnutí na strukturu je patrný z diagramu ARA příslušné litiny (obr.11).

Při pomalém chladnutí litiny proběhne přeměna austenitu zcela v oblasti teplot $A_{1,2}$ a $A_{1,1}$ a vzniká tak struktura čistě feritická. Při rychlejším ochlazování začne transformace austenitu vyloučením feritu a následně pod teplotou $A_{1,1}$ vznikem perlitu. Výsledná struktura je pak feriticko – perlitická. S rychlostí



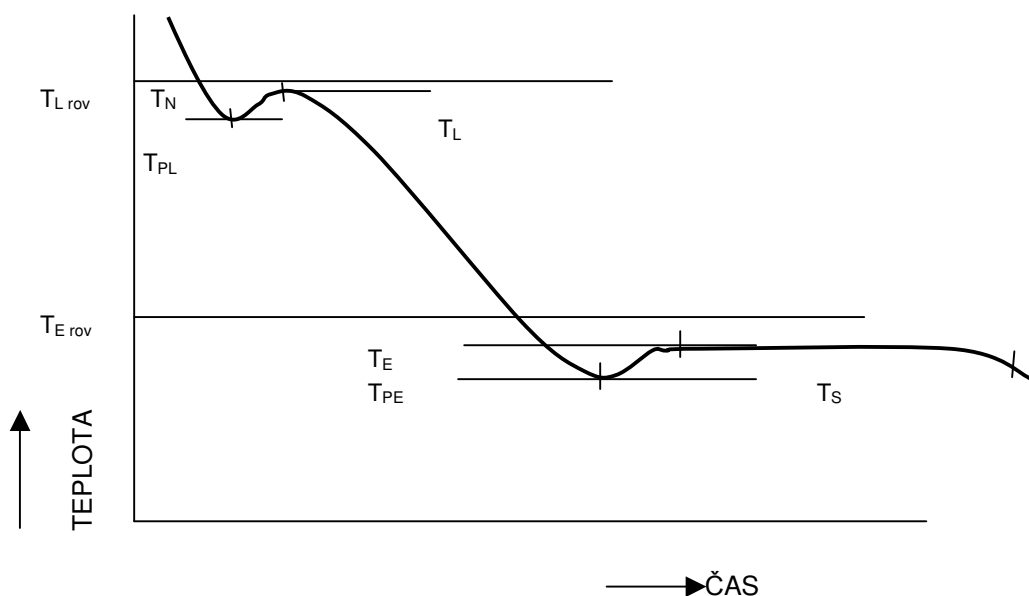
Obr.11. Vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu
a – pomalé tuhnutí způsobuje čistě feritickou strukturu, b – struktura feriticko-perlitická,
c – vznik perlitické struktury při rychlém

⁷ Nejvíce citlivá je litina s kuličkovým grafitem, následuje LČG a nejméně citlivá na rychlost ochlazování je litina s lupínkovým grafitem.

ochlazování roste i množství vyloučeného perlitu na úkor feritu. Čistě perlitické struktury tak můžeme dosáhnout dostatečně rychlým ochlazením [3].

Přítomnost perlitu u silnostěnných odlitků, které tuhnou pomaleji, lze získat přidáním perlitotvorných prvků (např. Ni, Mo, Cr).

Proces krystalizace je pozorovatelný na křivce chladnutí, jak je patrné na obr.12. v případě průběhu ochlazování podeutektické litiny. Po odlití taveniny z lící teploty do formy probíhá souvislé chladnutí až pod teplotu likvidu $T_{L\text{rov}}$ na teplotu T_N . Teplota T_N je teplota nukleace, při níž dochází k vzniku zárodků primární fáze- tedy austenitu. Od tohoto okamžiku dochází k růstu příslušné fáze a začíná se uvolňovat latentní teplo. Velikost přechlazení závisí na druhu, stavu a množství krystalizačních zárodků a na rychlosti ochlazování. Jelikož je množství uvolňovaného krystalizačního tepla menší než množství tepla, odváděného z kovu do okolí, klesá teplota až na teplotu přechlazení T_{PL} . V oblasti mezi T_N a T_{PL} dochází k dalšímu vzniku, a to hlavně menších zárodků. Za bodem T_{PL} se již počet zárodků nezvyšuje. Růst fází je již méně energeticky náročný než jejich nukleace. Přechlazení je menší a proto se teplota kovu zvyšuje na teplotu T_L , což je uváděno jako teplota růstu austenitu. Rozdíl mezi teplotami T_L a T_{PL} se nazývá teplota rekalescence a značí se ΔT_{RL} . Poté křivka chladnutí klesá až pod rovnovážnou teplotu krystalizace eutektika $T_{E\text{rov}}$. Následuje proces stejný jako u tuhnutí primární fáze. Takže T_{PE} je teplota přechlazení eutektika, T_E je teplota růstu eutektika. Tuhnutí litiny je ukončeno při teplotě solidu T_S .



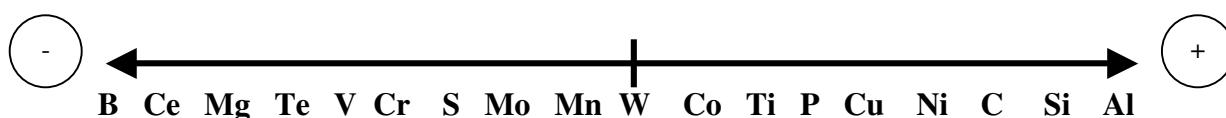
Obr. 12. Průběh křivky chladnutí při krystalizaci litin [3]

$T_{L\text{rov}}$ - teplota likvidu, T_N - teplota nukleace, T_L - teplota růstu austenitu, T_{PL} - teplota přechlazení austenitu, T_{PE} - teplota přechlazení eutektika, T_E - teplota růstu eutektika, T_S - teplota solidu

Souvislost mezi charakteristikami křivky chladnutí a výslednou mikrostrukturou vzorku poskytuje rychlý a kvalitní kontrolní test, který lze aplikovat na různé případy vlastností taveniny litiny ve slévárství.

1.3.4 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ NA KRYSTALIZACI

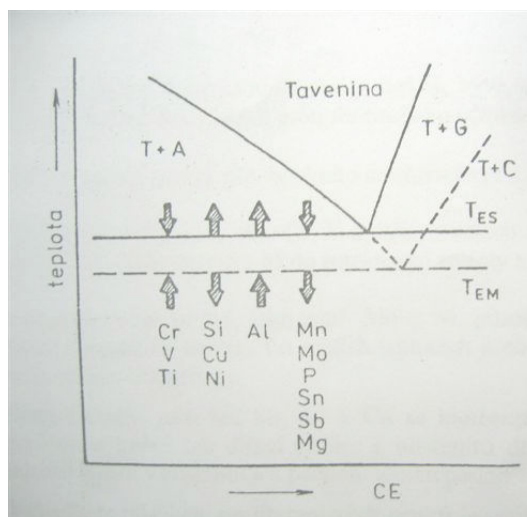
Vliv chemického složení rozdělujeme na vliv prvků na grafitizaci a vliv prvků na transformaci austenitu. Prvky ovlivňující grafitizaci dělíme na grafitizační, antigrafitizační a neutrální. Míra vlivu jednotlivých prvků je znázorněna na grafitizační ose.



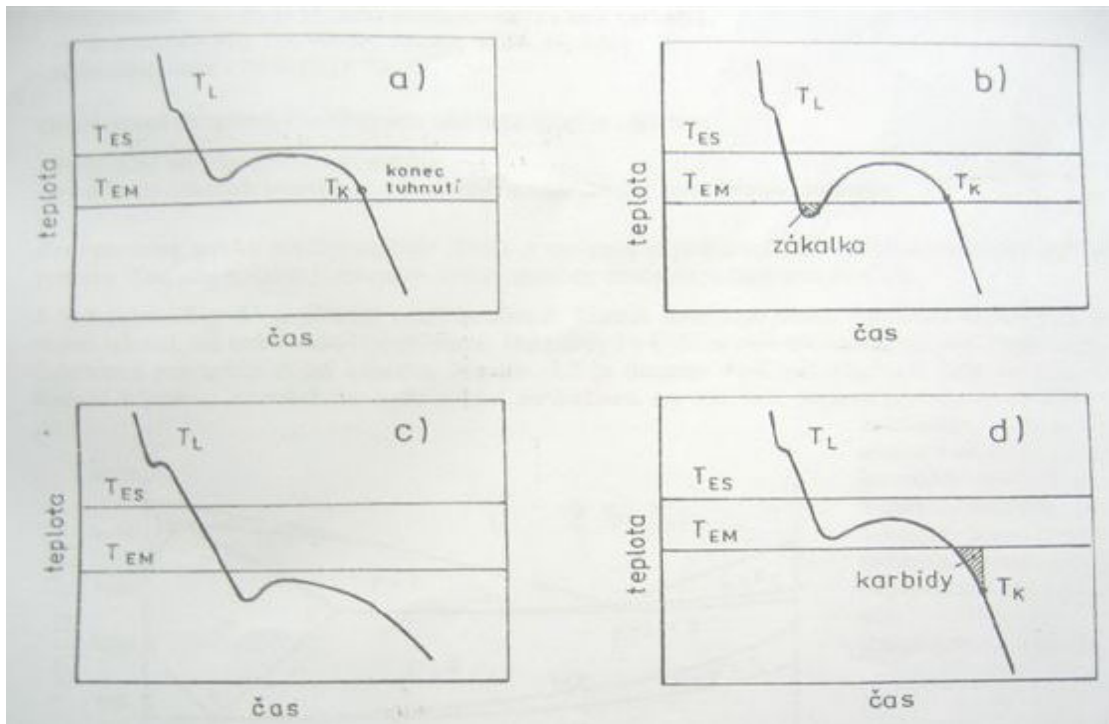
Grafitizační prvky podporují tuhnutí podle stabilního systému a vyloučení grafitu v podobě grafitického eutektika. Antigrafitizační prvky omezují vznik volného grafitu (zamezují krystalizaci grafitu nebo vážou uhlík ve formě karbidů) a podporují vznik metastabilního eutektika – ledeburit.

Dále základní i legující prvky, částečně i nečistoty, způsobují změnu rovnovážné eutektické teploty. A to tak, že zvyšují či snižují oblast mezi eutektickou teplotou ve stabilním a metastabilním systému (obr. 13).

V binárním rovnovážném systému železo – uhlík totiž dochází k tuhnutí eutektika ve stabilním systému při teplotě 1153°C, kdežto v metastabilním systému při 1147°C. Tento nepatrný rozdíl teplot, spolu s podmínkami krystalizace je příčinou toho, že tuhnutí eutektika proběhne podle stabilního, metastabilního nebo současně podle obou systémů. Výsledkem je pak různý obsah vyloučeného grafitu ve struktuře – různý rozsah grafitizace. Na obr.14 jsou pomocí křivek chladnutí znázorněny čtyři případy, které mohou nastat [3].



Obr. 13 – Vliv jednotlivých prvků na zvyšování / snižování eutektické teploty



Obr. 14. Způsoby tuhnutí znázorněny pomocí křivek – a) tuhnutí grafitické litiny, b) vznik přechlazené struktury, c) vznik karbidické litiny, d) vznik mezibuněčných karbidů

T_{ES} – eutektická teplota stabilního systému, T_{EM} – eutektická teplota metastabilního systému

Transformace austenitu má zásadní vliv na konečnou strukturu základní kovové hmoty litiny. Podle vlivu na druh vznikající základní kovové hmoty se prvky rozdělují na feritotvorné (Si, Al, Ti), perlitotvorné (Mn, Cu, Ni ...) a austenitotvorné (Ni - nad 18 %). Účinek prvků spočívá především na ovlivnění aktivity uhlíku v austenitu a na vlivu difúzních poměrů na mezifázovém rozhraní při transformaci austenitu.

2 LITINA S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

Litina s červíkovitým grafitem (LČG) je slitina železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími prvky, přičemž uhlík je vyloučen jako grafit převážně červíkovitého tvaru. V odborné literatuře se setkáváme s celou řadou označení pro tento tvar grafitu jako: vermiculargraphit, compacted graphite, intermediate graphit, grafit tvaru III, GG irons atd.

LČG je poměrně novým materiálem ze skupiny jakostních grafitických litin. Grafit ve struktuře je vylučován ve formě červíků. Červíkovitý grafit je oproti lupínkovému kratší, tlustší s oblým zakončením. Jak už bylo v úvodu řečeno, svými mechanickými a slévárenskými vlastnostmi leží mezi LLG a LKG.

2.1 VZNIK ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU

Výskyt červíkovitého grafitu ve struktuře po odlití může být brán jako nežádoucí, doprovodný či záměrně vyvolaný.

Vznik červíkovitého grafitu byl ve struktuře grafitických litin pozorován při:

- a) tuhnutí za zvýšených rychlostí ochlazování
- b) tuhnutí za vysokých vnějších tlaků
- c) tavení litin z vysoce čistých surovin
- d) intenzivní rafinaci taveniny
- e) modifikování s cílem získat kuličkový grafit, ale mající v tavenině před modifikací antiglobulizačně působící prvky
- f) modifikaci nedostatečným množstvím modifikátoru pro získání kuličkového grafitu
- g) modifikaci modifikátory s globulizačně a současně antiglobulizačně působícími prvky.

Pro záměrný vyvolaný vznik červíkovitého grafitu jsou v současnosti optimální dva způsoby modifikace – modifikace modifikátory s obsahem globulizačních a antiglobulizačních prvků a modifikace globulizačně působícího modifikátoru v množství menším než je potřeba pro krystalizaci zrnitého grafitu [2].

2.2 MORFOLOGIE ČERVÍKOVITÉHO GRAFITU

Teorií o vzniku červíkovitého grafitu je více. Podle [2] je způsob růstu červíkovitého grafitu podobný jako u zrnitého grafitu. Předpokládá se, že každá částice červíkovitého grafitu vzniká podobně jako u zrnitého grafitu vlastní nukleací. Na začátku eutektické krystalizace se červíkovitý grafit velmi rychle začne obklopotvat pevnou fází (austenitem), takže v porovnání ze způsobem krystalizace lupínkového grafitu začíná ztrácet předčasně kontakt s taveninou. Tím vzniká v okolí grafitové částice stav napjatosti, který mění původní kulovitý tvar částice a podporuje růst ve směru delší osy útvaru do tvaru rotačního elipsoidu [4]. Poměr délky a tloušťky je 2 ku 10.

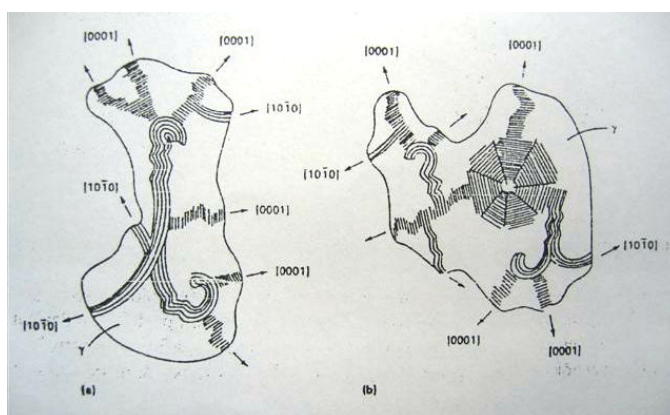
V důsledku podchlazení se celá částice v krátké době uzavře obálkou austenitu. Každá částice tak tvoří s okolním austenitem relativně malou eutektickou buňku stejně jako u litin s kuličkovým grafitem.

Krystalizace červíkovitého grafitu se od kuličkového odlišuje menším množstvím aktivních zárodků, menším podchlazením při eutektické reakci (ale větším jako při lupínkovém grafitu) a menším poměru rychlostí růstu v jednotlivých směrech mřížky.

Omezením růstu grafitu v tavenině lze dosáhnout přidáním hořčíku, kovů vzácných zemin, kombinací Mg a Ti, resp. Zr, Bi, V. Tyto prvky zkracují interval růstu grafitu v tavenině a jeho velikost, přičemž zvyšují energii na vznik stabilního zárodku, to znamená, že zvyšují podchlazení.

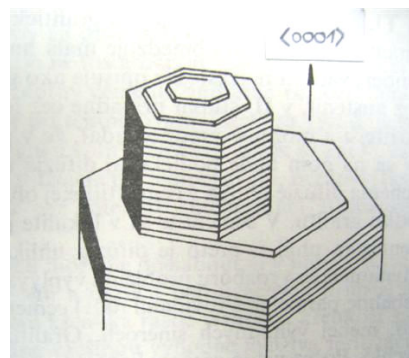
Jiný autor [3] vysvětluje vznik červíkovitého grafitu jako rovnováhu globulizačních a antiglobulizačních prvků. Růst červíkovitého grafitu probíhá částečně podle mechanismu růstu kuličkového grafitu, částečně podle lupínkového. Podle toho se pak morfolgie červíkovitého grafitu blíží více k jedné, nebo

druhé formě (obr.15.). To znamená u lupínkovitého grafitu směr růstu ve směru [1010] v důsledku nižší energetické náročnosti. Rychlost růstu grafitu je rychlejší než lamel austenitu a grafit tak roste v přímém kontaktu s taveninou. Pro vznik lupínkového



Obr. 15. Způsob růstu červíkovitého grafitu z lupínkového grafitu (vlevo) a kuličkového

grafitu je rozhodující přítomnost síry a kyslíku, které snižují velikost povrchového napětí a umožňují právě růst ve směru [1010]. Zatímco k vzniku kuličkového grafitu dochází modifikací hořčíku, který chemicky naváže kyslík i síru. Tím se zvýší povrchové napětí, zhorší se energetické podmínky pro růst ve směru [1010], zvýší se velikost přechlazení, při čemž vzroste rychlost růstu ve směru [0001]⁸ [3].



Obr. 16. Spirálovitý růst ve směru [0001][5]

Tvar, rozložení a velikost grafitu ovlivňuje vlastnosti litiny. Způsobuje to rozdílný vrubový účinek lupínkového a zrnitého grafitu (viz. obr. 6). Při stejné kovové matici má litina s kuličkovým grafitem pevnost v tahu 400 až 900 MPa a litina s lupínkovým grafitem pouze 100 až 400 MPa. Grafit také zmenšuje plochu nosného tělesa a to zejména u lupínkového grafitu. Pro nejvýhodnější kombinace vlastností LČG se snažíme dosáhnout 80 až 90 % červíkovitého grafitu ve struktuře a zbytek grafit kuličkový. Množství zrnitého grafitu by nemělo překročit 20%, aby byly zachovány výhodné vlastnosti LČG. S rostoucím obsahem kuličkového grafitu roste pevnost v tahu a tažnost.

Podíl kuličkového grafitu ve struktuře stoupá s rostoucí rychlostí chladnutí. To znamená, že v tenkých stěnách odlitků z LČG se běžně vyskytuje i přes 50% zrnitého grafitu. Jakýkoliv lupínkový grafit je nežádoucí.

2.3 VÝROBA LČG

Na kvalitu zpracovávané litiny z metalurgického hlediska působí tyto základní vlivy: tavící agregáty a vsázkové suroviny, modifikační přísady, chemické složení, časový interval setrvání taveniny na teplotě, doba odstátí taveniny po modifikaci [4].

⁸ Teorií o nukleaci kuličkového grafitu existuje celá řada. Například teorie založená na spirálovém růstu grafitu sbalováním lamel, rostoucím ve směru [1010] po obvodě kuličky. Jiná teorie vysvětluje růst grafitu difúzí uhlíku přes obálku austenitu, což je způsobeno větší rychlostí růstu austenitu. Grafit je tak uzavřen v austenitové obálce. Při přechlazení pod rovnovážnou eutektickou teplotu se v systému vytvoří koncentrační gradienty uhlíku. V důsledku koncentračního spádu v austenitové obálce pak dochází difúzí uhlíku k dalšímu růstu útvaru grafitu.

Na obrázku 16 je znázorněna teorie vytváření nových bazálních rovin ve směru [0001] mechanismem šroubových dislokací. Způsob růstu je závislý na velikosti přechlazení.

2.3.1 TAVÍCÍ AGREGÁTY A VSÁZKOVÉ SUROVINY

Na výrobu LČG je možné použít všechny běžné tavící agregáty jako indukční kelímkovou pec, elektrickou obloukovou pec, kuplovnu s odsiřovacím zařízením, popřípadě jejich kombinace – duplexní tavení⁹. U středofrekvenční indukční pece je možné při vhodné vsázce zabezpečit nízký obsah síry (spolehlivě pod 0,01%) a to pomocí různých odsiřovacích látek (karbid vápníku, vápno, soda...). Další výhodou je vysoká účinnost, snadné dosažení požadované teploty, malý propal prvků při tavení a snadné legování litiny [7].

V elektrické obloukové peci je možno vhodným metalurgickým procesem snížit koncentraci všech nežádoucích prvků (S,P,Cr). Více se používají pece s kyselou vyzdívkou. Tavení v zásaditých pecích je vhodné jen tehdy, pokud se litina odsiřuje. Pro tavení litiny v obloukových pecích je typické značné přehřátí lázně v místě oblouku. Vysoká teplota a relativně velký povrch lázně způsobují značné naplynění kovu. Tomu se čelí pokrytím hladiny struskou, nejlépe neutrální. Lázeň se během tavení nepromíchává, a proto je tavenina značně nehomogenní [6].

Použití kuplovny bez dalších zařízení je relativně omezené, protože síra z koksu přechází částečně do taveniny. I s použitím zásaditého tavícího pochodu málokdy dosáhneme obsahu síry menším než 0,03%.

Vsázkové suroviny (surové železo, ocelový odpad a vratný materiál) a metalurgický pochod volíme tak, aby byl v tavenině požadovaný obsah uhlíku (3,5 – 3,7%), křemíku (2,1 – 2,4%), fosforu (pod 0,15%), síry (pod 0,035%). Uvedeny jsou optimální hodnoty pro dosažení vysokých pevnostních vlastností. V závislosti na tloušťce stěny odlitků a způsobu jejich použití se může koncentrace Si pohybovat až do 3,5%, ale musíme brát v úvahu, že se nám sníží tepelná vodivost a rázová houževnatost těchto odlitků [4].

Dodržení hraniční oblasti obsahu síry je důležité pro získání optimální tvorby červíkovitého grafitu. To podporuje tavení LČG v indukčních pecích. V souladu s takto získanou koncentrací síry je potřebné přesné dávkování modifikační přísady. Vyšší koncentrace síry v vsázce vyžaduje větší přidávané množství modifikátoru, způsobuje znečištění matrice a hlavně snížení plastických vlastností. Velká část Mg, obsažená v modifikační přísadě, se v tomto případě spotřebuje na odsíření taveniny.

Z dalších prvků se snažíme o minimální koncentraci Cr, Mo (stabilizují cementit) a Pb, Bi, B (působí proti vzniku červíkovitého grafitu).

⁹ U duplexního tavení slouží kuplovna jako levný tavící agregát. Pro legování a dosažení požadovaného chemického složení se pak používá el. pec [6].

Požadujeme-li feritickou strukturu v litém stavu, je nutné použít vysoce kvalitní surové železo s nízkými obsahy Mn, P a S. Při použití běžných surových želez dostáváme litinu s převážně perlitickou základní kovovou hmotou.

2.3.2 MODIFIKACE

Modifikací ovlivňujeme tvar grafitu při krystalizaci a to přidáváním globulizačních prvků (zejména hořčíku) do taveniny za účelem intenzivní reakce modifikátoru s kyslíkem a sírou. V podstatě lze říci, že za pomoci modifikátoru se mění lupínkový grafit na červíkovitý, případně kuličkový.

Modifikační přísady na výrobu LČG by měly zaručit optimální podíl červíkovitého grafitu ve struktuře základní kovové hmoty, dostatečnou dobu působení účinku modifikace a zároveň dostupnou cenu výrobku.

Dokonalé rozpuštění modifikátoru závisí na granulaci modifikátoru, jeho fyzikálních charakteristik (teplota tavení, tepelná vodivost atd.), na dokonalém styku modifikátoru s taveninou a na dostatečně vysoké teploty taveniny při modifikaci.

Důležitá je i znalost hmotnost taveniny. V případě poddávkování či předávkování modifikátoru se nedosáhne požadovaný podíl vylučovaného červíkovitého grafitu, přičemž takto vyrobená litina potom nesplňuje požadovaná kritéria na uvedený materiál.

Dnes existují tyto 4 praktické způsoby modifikace [1]:

1. slitinami na bázi prvků vzácných zemin (KVZ)
2. nedokonalá modifikace Mg
3. aplikace antiglobulizačních prvků
4. komplexními slitinami na bázi MgPVZ (General Motors).

1. Modifikace slitinami na bázi KVZ

Podstatou tohoto způsobu je modifikace výchozí litiny (s nízkým obsahem S – pod 0,03%) směsným kovem KVZ resp. předslitinami SiKVZ. Používají se například modifikátory s obchodním názvem Mischmetal nebo CompactMag (s obsahem okolo 50 % Ce).

Uvedené modifikátory mají poměrně široký obsah optimálního působení, jsou lehce dělitelné a jejich působení není zpravidla provázeno pyroefekty a vývinem plynů.

Množství modifikátoru je přímo úměrné obsahu S v tavenině¹⁰. Modifikátor vhazujeme do proudu kovu při přelévání taveniny z pece do pánve. Vzhledem

¹⁰ Při obsahu 0,02% S je dávkování cca 0,15 až 0,20% KVZ, při obsahu 0,3% S je to 0,3 % KVZ.

k nízkému bodu tavení (790 – 850 °C) a vysokému bodu varu (3000 °C) se snadno rozpouští a nevypařuje se. Musíme počítat s dobou odeznění modifikačního účinku (méně než 10 min.).

Vzhledem ke značnému sklonu vzniku zákalky takto modifikované litiny, musíme taveninu po modifikaci intenzivně grafitizačně očkovat, tj. přidávat do taveniny předepsané množství očkovačla (0,4 až 0,7% FeSi 75%). Sklon k zákalce je také výrazně závislý na uhlíkovém ekvivalentu litiny. Proto je nutno litinu druhovat na vysoký konečný obsah C (nad 3,5%) a Si (nad 3,0%) [1].

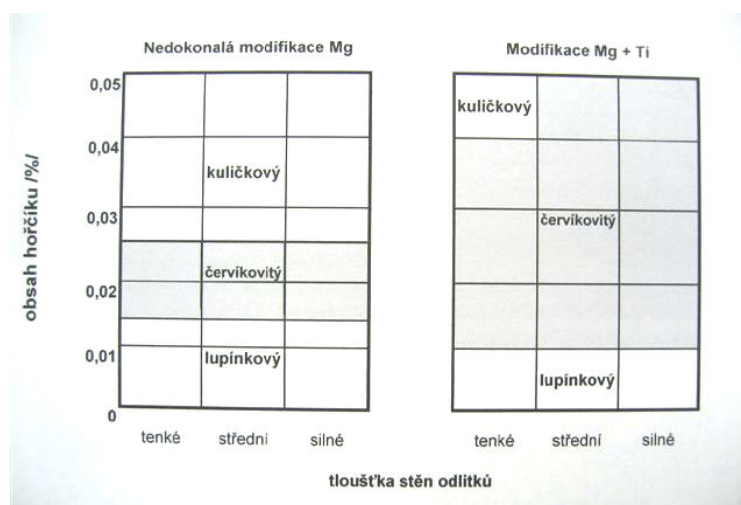
2. Nedokonalá modifikace

Používá se pouze v situaci, máme-li k dispozici výchozí litinu s konstantním obsahem S. Navíc musíme kontrolovat zbytkový obsah Mg, který nám určuje výsledný tvar grafitu. Zbytkový obsah Mg se pohybuje v rozmezí 0,015 až 0,025 %. Dodržení této úzké tolerance v praxi je velmi obtížné. Výhodou je o něco rychlejší odeznívání modifikačních účinků než u modifikace KVZ [1].

3. Aplikace antiglobulizačních prvků.

Podstatou této metody je přítomnost Ti, který nejvíc ruší vznik zrnitého grafitu. Titan pak způsobí, že přeměna tvaru grafitu se zastaví na formě červíkovité a ani předávkování Mg nemá již za následek vzniku grafitu kuličkového. Na obr. 17 je znázorněno porovnání modifikace metody aplikace Ti a nedokonalé modifikace hořčíkem.

Vyráběné předslitiny jsou v zahraničí označovány CG (compacted graphite) nebo SAA (single alloy addition). Obsah S nesmí překročit 0,0035% a teplota litiny při modifikaci musí být 1400 °C (při nižších teplotách se zvyšuje obsah kuličkového grafitu).



Obr. 17. Vliv modifikačních prostředků na vznik červíkovitého grafitu [3]

Výhodou této metody je pouze nepatrný sklon litiny ke vzniku zákalky, odpadá tak nutnost grafitizačního očkovaní. Nevýhodou je znečištění vratné litiny titanem a větší opotřebení nástrojů při jejím obrábění [1].

4. Modifikace komplexními slitinami na bázi MgKVZ

Tento postup vyvinula firma General Motors. Spočívá v modifikaci taveniny předslitinou MgKVZ bez přítomnosti titanu, právě pro lepší obrobitelnost. Při této modifikaci je důležitá teplota výchozí litiny (1475 až 1510 °C). Výhodou této modifikace je, že lze zpracovávat výchozí litinu s obsahem S až do 0,12% [1].

2.3.3 SHRUTÍ HLAVNÍCH POZNATKU O VÝROBĚ LČG

Výroba LČG nemá vyšší nároky na kvalitu vsázkových surovin jako litina s grafitem kuličkovým. Z hlediska optimálního způsobu přípravy tekutého kovu pro modifikaci je pořadí následující. Nejvýhodnějším způsobem je přetavba samostatně zhotovené předslitiny o chemickém složení, které zajistí výsledné chemické složení litiny blízké eutektickému¹¹. O něco méně vhodná je syntetická tavba z tříděného ocelového šrotu při použití nahličovadel s nízkým obsahem síry o výsledném složení, které je blízké eutektickému. Následuje použití speciálních surových želez s nízkým obsahem S, P a dalších škodlivých prvků. Nejméně vhodná je výroba LČG při použití ocelářských surových želez. Při výrobě LČG je možné zpracovat i vratný materiál této litiny v množství do 20%.

Jako grafitizační očkovač je nejlepší použít očkovač FeSi 75 do pánve nebo FeSiCaAl do reakční komůrky ve formě. Optimální množství grafitizačního očkovače se pohybuje od 0,5 až 0,7%.

Při modifikaci se doporučuje použití modifikace na bázi KVZ do proudu kovu po zaplnění dna pánve s následujícím grafitizačním očkováním FeSi 75 či FeSiCaAl. Množství modifikátoru závisí především na obsahu síry ve výchozí litině. Na přípravu kovu se doporučuje indukční pec. Nejvýhodnější metodou modifikace je technologie Sandwich, resp. Tundish s předeřhátím pánve na 600 °C [2].

¹¹ Stupeň eutektičnosti (S_e) – vyjadřuje poměrnou vzdálenost složení litiny od eutektického složení litiny (tj. se zahrnutím vlivu dalších prvků, zejména Si, P). Vypočítá se jako podíl obsahu uhlíku v eutektickém bodě.

Eutekticky tedy tuhne litina při $S_e = 1$, podeutektické litiny mají $S_e < 1$ a nadeutektické $S_e > 1$. Stupeň eutektičnosti má vliv na slévárenské vlastnosti (zabíhavost, lineární a objemové smrštění).

Podle technické zprávy firmy Elkem [12] je doporučováno nadeutektické chemické složení s uhlíkovým ekvivalentem $CE = 4,3$ až $4,5$. Navrhované základní složení je $3,7$ až $3,9$ % C, $1,5$ – $2,0$ % Si, $0,005$ – $0,010$ % S, max. $0,03$ P. Obsah modifikátoru se pohybuje v rozmezí $0,3$ až $0,4$ % modifikátoru Compact Mag, což je feroslitina Si – Mg s obsahem KVZ $5,0$ až $7,0$ %. Pro očkování je použit Foundrisil či Superseed. Orientační mechanické vlastnosti jsou - pevnost v tahu 340 - 400 MPa a tažnost 3 - 6 %. V porovnání z modifikací hořčíkem je tato metoda výhodnější z hlediska pravidelnosti struktury v celém průřezu stěny.

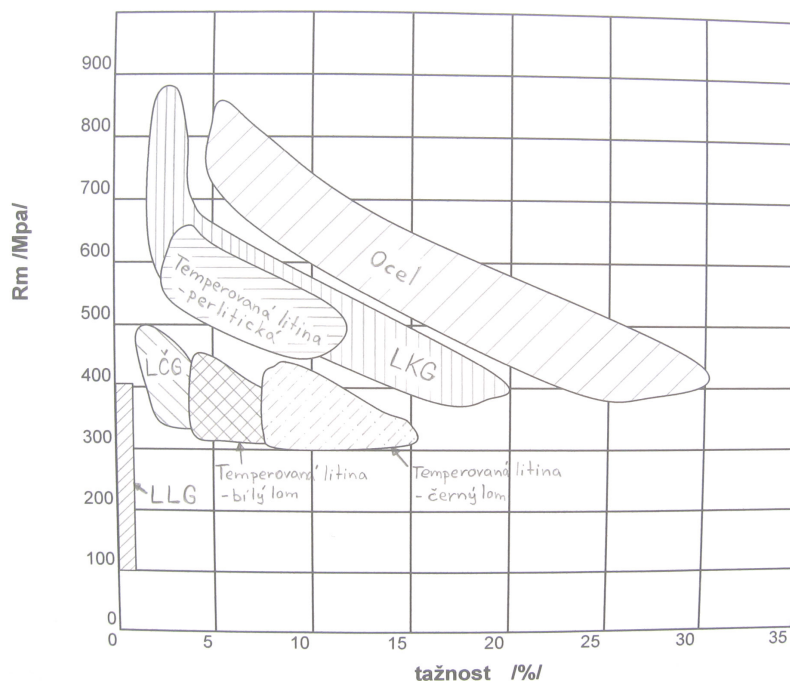
Výroba LČG je v dnešní době již dobře technicky zvládnutá. Pro výběr nejvhodnější metody modifikace nelze jednoznačně preferovat tu či onu metodu, neboť každá je specifická pro dané podmínky, které ve slévárně existují, počínaje druhem tavicího agregátu a konče vyráběným sortimentem odlitku.

2.4 VLASTNOSTI LČG

Obecně lze říci, že mechanické vlastnosti LČG ovlivňuje především složení základní kovové hmoty a hrubozrnnost struktury litiny. Dále lze říct, že červíkovitý grafit posouvá úroveň mechanických vlastností nad

mechanické vlastnosti LLG (obr.18.)

Proto se snažíme pro nejvýhodnější kombinaci vlastností LČG dosáhnout 80 – 90 % podílu červíkovitého grafitu ve struktuře, zbytek má být grafit kuličkový. Jakýkoliv lupínkový grafit je nežádoucí [1].



Obrázek 18: Uspořádání grafitických litin závislosti na mezi pevnosti v tahu a tažnosti [4]

Mechanické a některé jiné vlastnosti předurčují použití LČG jako vhodný konstrukční materiál pro celou řadu strojírenských výrobků.

Slévárenské vlastnosti LČG souvisí s chemickým složením, metalurgickým zpracováním (očkováním, modifikací), odléváním (teplota lití, plnění formy, členitostí výrobku) a podmínkami tuhnutí ve formě [2].

2.4.1 MECHANICKÉ VLASTNOSTI LČG

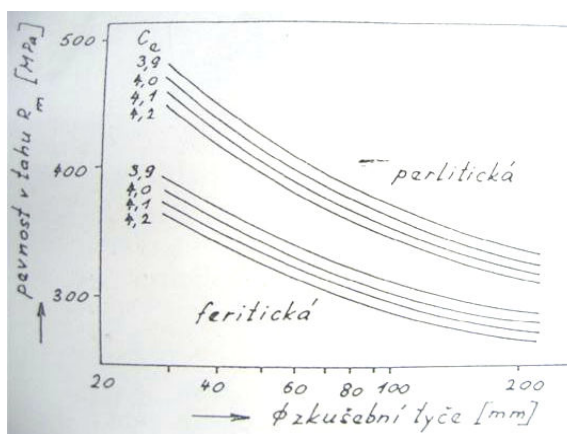
MODUL PRUŽNOSTI – hodnota modulu pružnosti je závislá na tvaru grafitu a pohybuje se okolo 140 000 až 150 000 MPa.

Tato hodnota leží mezi hodnotami modulu pružnosti litiny s lupínkovým grafitem (80 000 až 130 000 MPa) a litiny s kuličkovým grafitem (160 000 až 170 000 MPa).

PEVNOST V TAHU – pevnost v tahu je závislá na uhlíkovém ekvivalentu, struktuře základní kovové hmoty, charakteru

červíkovitého grafitu a na rychlosti chladnutí (obr.19). Pohybuje se v rozsahu 320 až 550 MPa. Hodnoty meze $R_{p0,2}$, leží v rozsahu 260 až 380 MPa. Pevnost v tahu LČG s narůstající teplotou v rozmezí do 200 °C klesá o 50 MPa. V rozmezí teplot 200 až 300

°C vzroste o 25 MPa a od 300 do 500 °C klesá na polovinu výchozí hodnoty [4].



Obr. 19. Vliv uhlíkového ekvivalentu a základní kovové matrice na pevnost LČG

TAŽNOST – tažnost se pohybuje v rozsahu hodnot 0,5 až 4,5% (u materiálů s vyšším podílem zrnitého grafitu ve struktuře jsou hodnoty vyšší) v závislosti na struktuře základní kovové hmoty, čistotě použitých surovin, přítomnosti cementitu ve struktuře, charakteru červíkovitého grafitu, množství grafitu ve sférické formě, uhlíkovém ekvivalentu a rychlosti chladnutí.

Zatěžovací křivka LČG má lineární začátek (oblast pružných deformací) podobně jako litina s kuličkovým grafitem. Zajímavá je vysoká hodnota $R_{p0,2}$ a poměr $R_m/R_{p0,2}$ je vyšší než u LKG – 0,72 až 0,82.

Podobná s litinou s lupínkovým grafitem je rozdílnost zatěžovacích křivek pro tah a tlak. Pevnost v tlaku je podstatně vyšší než v tahu.

TVRDOST – hodnoty tvrdosti se opět pohybují ve velice širokém rozmezí 130 až 270 HB, v závislosti na celé řadě již uvedených faktorů (uhlíkový ekvivalent, množství volného cementitu ve struktuře, základní kovová hmota, chemické složení, rychlost chladnutí). Vlivem jednotlivých faktorů můžeme dosáhnout jakoukoliv požadovanou tvrdost [1].

HOUŽEVNATOST – na zkušebních tyčích o průměru 20 mm byla stanovena rázová houževnatost v rozmezí 15 – 40 J/cm². Hodnoty vrubové houževnatosti pak byly stanoveny v rozsahu 2-8 J/cm², měřeno na zkušební tyči 10 x 10 cm, V vrub. LČG byla zkoušena na houževnatost při nižších teplotách. V případě vrubové houževnatosti je kritická hodnota okolo 0 °C. Pro rázovou houževnatost pak – 40 až 50 °C. Po překročení kritické teploty klesá hodnota houževnatosti podstatně rychleji [1].

Vrubová houževnatost je u LČG nižší jak u LKG, ale podstatně vyšší než u litiny s lupínkovým grafitem. Zkouška na vrubovou houževnatost je vhodné kritérium pro skutečné posouzení kvality různých druhů litin.

ÚTLUM – schopnost útlumu litiny obecně je nepřímo úměrná modulu pružnosti a tvaru grafitu. Z toho vyplývá, že LČG bude ležet mezi litinou s lupínkovým a litinou s kuličkovým grafitem, blíže k LKG. Přičemž poměry doby doznívání kmitů jsou LLG ku LKG ku oceli na odlitky zhruba 1,0 ku 1,8 ku 4,3 [1].

ÚNAVA – únavová pevnost je úměrná pevnosti v tahu; závisí na stejných faktorech. Dále závisí na druhu cyklického zatěžování. Pro míjivý tah – 160 až 185 MPa, pro plochý ohyb – 180 až 210 MPa, a pro ohyb za rotace 250 až 270 MPa. Hodnoty LČG se blíží k hodnotám litiny s kuličkovým grafitem [1].

2.4.2 SLÉVÁRENSKÉ VLASTNOSTI LČG

ZABÍHAVOST – zabíhavost LČG je za stejných podmínek (uhlíkový ekvivalent) shodná se zabíhavostí LLG. V konkrétních podmínkách závisí na formovací technice,

formovací směsi i na konstrukci a složitosti odlitku. Všeobecně se udává nejmenší tloušťka stěn u malých odlitků 5-6 mm, u těžkých odlitků pak 8-10 cm [3]

SKLON K ZAKÁLCE – Sklon k zakálce závisí na typu použitého modifikátoru. Při modifikaci výchozí litiny směsným kovem KVZ sklon k zakálce značně vzrůstá. Lepší situace je použití předslitin na bázi KVZ – Si.

K žádnému vzrůstu sklonu k zakálce nedochází při použití komplexních modifikátorů na bázi Ti, MgTiKVZSiCaAl nebo MgKVZSiCaAl.

V případech, kdy je nutné zvýšený sklon k zakálce snižovat, např. u tloušťek stěn pod 30 mm, kombinuje se modifikace s některým z grafitizačních očkovačů (FeSi75) [1].

SKLON KE STAŽENINÁM – v porovnání sklonu ke staženinám LLG a LKG nám vychází hodnoty LČG blíže k litině s lupínkovým grafitem. Objem staženiny vzniklé v průběhu tuhnutí je:

- LLG	4,1 %	100%
- LČG	4,8 %	117%
- LKG	7,0 %	170%

LČG má spíše tendenci vytvářet soustředěnou staženinu nežli řediny. Výhodou je možnost použití stejného modelového zařízení pro odlitky z LLG i pro litiny z červíkovitým grafitem. [1].

DOBA TRVÁNÍ MODIFIKAČNÍHO ÚČINKU – k odeznění modifikačního účinku, jehož účelem je vytvoření červíkovitého grafitu dochází do 12 minut. Po uplynutí této doby tuhne tavenina opět s grafitem lupínkovým v mikrostruktuře [1].

2.4.3 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI LČG

OBROBITELNOST – obrobiteľnosť LČG je poměrně dobrá, což je v rozporu s faktem, že obrobiteľnosť materiálů pevnějších než je LLG (legované litiny, LKG) je špatná. Červíkovitý tvar grafitu pozitivně ovlivňuje lámavost třísky. Obrobiteľnosť je dobrá i při vyšších řezných rychlostech. Zhoršuje se při předávkování KVZ v důsledku výskytu strukturně volného cementitu v matrici, resp. zvýšeného podílu perlitu v matrici [1].

SVARITELNOST – svařování LČG je možné plamenem při přehřevu 400 až 650 °C za použití originálního přídavného materiálu a pomalého chladnutí svaru. Takto získáme přibližně stejnou pevnost svaru jako u základního materiálu, a to bez trhlin a křehkých struktur. Po svařování se nevyžaduje tepelné zpracování svarů, jako u LKG [2].

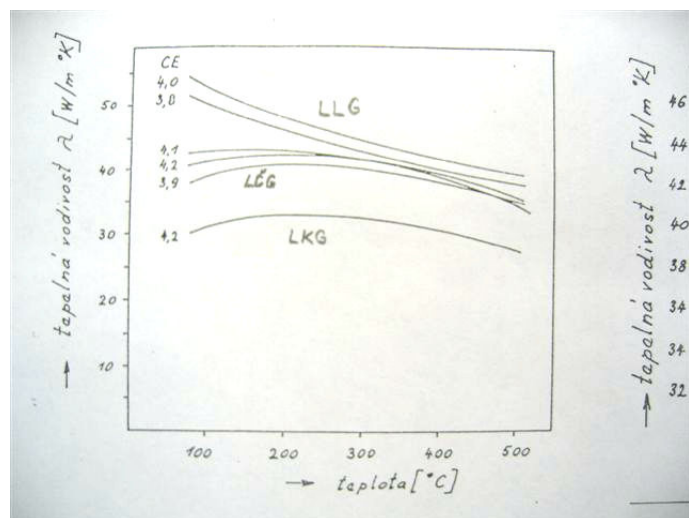
KLUZNÉ VLASTNOSTI – při konstantní teplotě zkušebních těles a obsahu 50% feritu a 80% červíkovitého grafitu byly naměřeny kluzné rychlosti od 0,2 do 1,3 m*s⁻¹ a tlaky 8,1 až 1,4 MPa. Což je shodné s kluznými vlastnostmi perlitických litin s lupínkovým grafitem. Při dané intenzitě mazání se u LČG neprojevoval sklon k zadírání. Naměřené součinitele tření se pohybovali v rozsahu 0,117 až 0,139.

RUST A OPAL – výsledky srovnávání zkoušek růstu a okujení LLG a LČG (při 600 °C) ukazují jednoznačně, že okujení a zejména růst LČG jsou podstatně menší než v případě LLG. Např. růst LČG (Ce=4,0) je asi 10x menší než růst LLG stejného uhlíkového ekvivalentu [1].

ODOLNOST PROTI TEPELNÝM ŠOKUM – uvádí se, že LČG má velmi dobrou odolnost proti tepelným šokům, zejména v rozmezí 0 až 460 °C [1].

2.4.4 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI LČG

TEPELNÁ VODIVOST – hodnota tepelné vodivosti LČG činí 40 W*m⁻¹*K⁻¹ a je určena množstvím a tvarem grafitu. Tepelná vodivost grafitu je totiž podstatně vyšší než základní kovové hmoty. Srovnání tepelné vodivosti grafitických litin je na obr.20. Je zřejmé, že zejména za vyšších teplot je tepelná vodivost LČG shodná se LLG [1].



Obr. 20. – Tepelná vodivost LČG, LLG, LKG v závislosti na teplotě

2.5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ LČG

Litinu s červíkovitým grafitem lze možno zpracovávat běžnými způsoby. Provádí se za účelem zvýšení podílu feritu a perlitu, případně získání bainitické základní hmoty. Základní kovová matrice totiž, jak už víme, značně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Abychom dosáhli převážně feritickou základní hmotu je potřeba použít extrémně čistých výchozích surovin (obsah síry do 0,01%) a následně feritizačně žíhat. Čisté perlitické základní hmoty v litém stavu (bez strukturně volného cementitu) se nedá u nelegovaných typů LČG dosáhnout. Tepelným zpracováním perliticko-feritické LČG byla získaná feritická i perlitická základní hmota. Izotermickým zušlechťováním byla vyrobena litina s bainitickou základní hmotou. Z dalších tepelných úprav jmenujme žíhání k rozpadu karbidů¹² (slouží k snížení tvrdosti a zlepšení obrobiteľnosti), žíhání k odstranění vnitřního pnutí¹³ a nebo chemicko-tepelné zpracování jako nitridace či sulfonitridace.

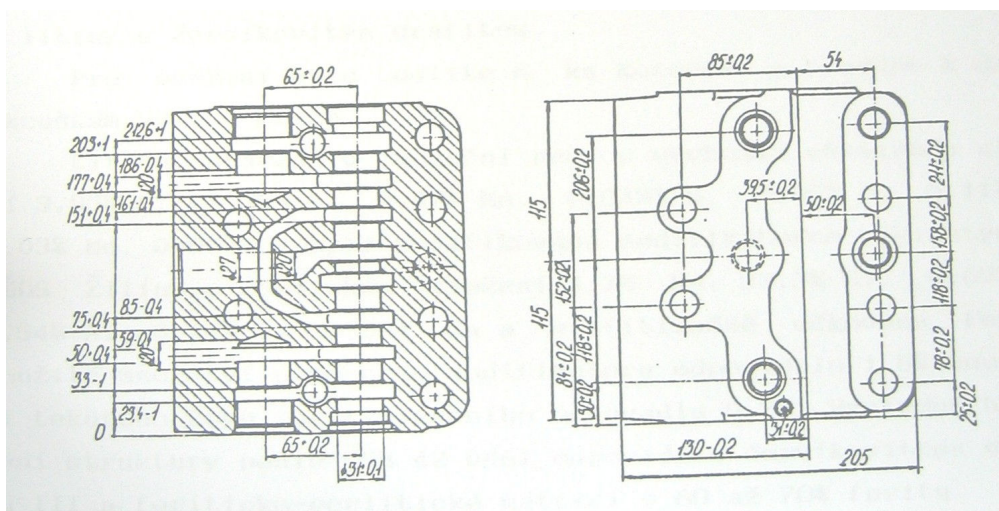
2.6 OBLAST POUŽITÍ LČG

Jak už bylo výše zmíněno, LČG se svými vlastnostmi pohybuje mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem. To předurčuje i její oblast použití, tj. využití předností LKG i LLG. Těmi jsou u LLG dobré slévárenské vlastnosti - zabíhavost, malý sklon k stahování, malé smrštění a některé tepelné a fyzikální vlastnosti - vysoká tepelná vodivost, útlum atd. Naopak vyšší pevnost, tažnost, houževnatost, vyšší odolnost proti cyklickému tepelnému namáhání a vyšší žáruvzdornost přejímá z LKG. Hodnoty těchto vlastností lze dosti úspěšně regulovat volbou převažující formy grafitu.

Příkladem je výroba skupinového rozvaděče v závodu VHJ ZTS Martin (obr.21).

¹² Feritizační žíhání – slouží k odstranění cementitu ve struktuře, který zhoršuje obrobiteľnost. Zároveň zvyšuje tvárné charakteristiky litiny. Není-li ve struktuře volný cementit, má feritizační žíhání vyvolat rozpad perlitického cementitu. K tomu stačí ohřev na žíhací teploty 720 až 780 °C a po ohřevu stěny (1 až 3 hod.) následuje pozvolné ochlazení v peci až na teplotu 680 až 660 °C s konečným ochlazením na vzduchu. Je-li ve struktuře volný cementit, je třeba zvýšit teplotu žíhání až na 950 °C. Výdrž na teplotě stačí obvykle 1 až 4 hod. , podle tloušťky stěny odlitku. Ochlazují-li se odlitky z této teploty přímo na vzduchu, získá se perlitická struktura. Má-li se dosáhnout struktury feritické je nutno během ochlazování umístit prodlevu -720 až 680°C [6].

¹³ Žíhání ke snížení vnitřního pnutí – vnitřní pnutí v odlitku je vyvoláno nerovnoměrným průběhem tuhnutí a chladnutí jednotlivých míst odlitku a podporované menší plasticitou nerovnovážných struktur. Ke snížení vnitřního pnutí je nutno odlitek ohřát na teplotu 550 až 650°C, aby se zvolna dosáhlo pásma plastického nebo pružně plastického. Po ohřevu musí teplota klesat pozvolna, aby přechod do pružné části nebyl náhlý. Výdrž na teplotě závisí na tloušťce stěny odlitku (1 hod na 25 mm tloušťky). Z teploty 350°C lze již odlitek ochlazovat na vzduchu [6].



Obr. 21 – Řez rozvaděče PRS 20 P v rovině kanálů [2]

Vstupní požadavky na výrobek byly vhodné slévárenské parametry vzhledem k složitosti odlitku, odolnost proti statickému a dynamickému namáhání s ohledem na funkci odlitku, a dobrou obrobiteľnosť pro jeho následnou úpravu na obráběcích strojích. Jako optimálním materiálem rozvaděče byla tedy určena litina s červíkovitým grafitem, zaručující limitovanou hodnotu pevnosti okolo 400 MPa a tvrdost do 250 HB. Tj. kovovou maticí jako směs feritu a perlitu a bez volného cementitu ve struktuře.

Jako první příklad použití LČG v praxi se uvádí výroba součástí pro nákladní automobily v roce 1968 v Rakousku. Jednalo se o ložiskové skříně (41 kg), víko převodovky, skříně převodovky (17,9 kg), konzola rámu (1,5 kg) či spojovací vidlice (2,0 kg). LČG modifikovaná směsným kovem prvků vzácných zemin přinesla 20 – 25 % úsporu ve srovnání s litinou temperovanou. Odlitky o tloušťce stěn v rozmezí 4 – 50 mm byly tepelně zpracovávány – 3 hod. 900 °C, ochlazený v peci na 550 °C a dochlazený na vzduchu. Minimální mechanické vlastnosti činily $R_m = 350$ MPa, $R_{p0,2} = 280$ MPa, $A_5 = 4\%$.

Nejčastějším příkladem využití LČG jsou odlitky hlav válců dieselových spalovacích motorů pro nákladní a osobní automobily, výfukové potrubí pro osobní i nákladní automobily, brzdové bubny, disky a čelisti. Dále se z LČG vyrábějí skříně a víka převodovek, ložisek a diferenciálů, konzoly, příruby, řemenice, ozubená kola, písty a jiné drobné odlitky.

Příkladem z praxe je výroba hlav válců pro velké námořní dieselové motory v kooperaci firem Budernsche Eisenwerke ve Wetzlaru a MaK Maschinenbau v Kielu. Vyráběly se hlavy válců o hmotnosti 185 kg, při roční produkci 6000 ks, hlavy válců o

hmotnosti 500 kg při roční produkci 4000 ks a hlavy válců o hmotnosti 1000 kg. Použitím LČG se zvýšil výkon motoru až o 50% navíc zmetkovitost odlitků nepřekročila 0,13%. Vysokou kvalitu zaručuje přesná metalurgická kontrola metalurgického postupu. Podmínkou je dosažení 90% grafitu III ve struktuře litiny o tloušťkách nad 15mm a 80% grafitu II ve stěnách pod 15 mm. Základní kovová hmota musí být feritická s max. 5% perlitu a zbavená cementitu. Minimální hodnoty mechanických vlastností jsou $R_m=380$ MPa, $R_{p0,2} = 280$ MPa a $A_5 = 6\%$.

Dalším příkladem použití LČG jsou hlavy válců motoru MaK vyráběné japonskou firmou UBE Industries LTD. Dále vyrábí tato firma hlavy válců o hmotnosti 100 kg a tloušťkami stěn 8 až 50 mm pro rychloběžné, vysoce výkonné diesellové motory. Dosahují tyto mechanické vlastnosti: $R_m=370$ MPa, $R_{p0,2} = 300$ MPa, $A_5=6,1\%$, $HB=163$.

Motor AUDI 3.0 TDI (171 kW) patří mezi špičku ve své třídě také díky tomu, že blok motoru je odlit z litiny z červíkovým grafitem. Při zachování nízké hmotnosti zlepšilo použití LČG pevnostní vlastnosti a odolnost proti namáhání.

Nejrozsáhlejším průmyslovým využitím odlitků z LČG je výroba ocelářských kokil o hmotnosti až 60 tun (SRN, Rusko, Švédsko, Anglie). Uvádí se, že změna LLG na LČG měla za následek snížení spotřeby ocelářských kokil ze 17,7 kg/t oceli na 12,5 kg/t oceli, tj. o 29 % méně, při zlepšení kvality povrchu ingotů.

Další pole využití LČG je při výrobě výfukového potrubí pro osobní a nákladní automobily (např. ŠKODA). Stoupající výkony motorů, vyšší účinnost paliva atd. zvyšuje teplotu potrubí až nad 500 °C, při kterých potrubí ze LLG praská. Vzhledem k tenkým stěnám (4mm) má struktura litiny vyšší procento zrnitého grafitu (50%). Přítomný červíkovitý grafit však zajišťuje nižší hodnotu modulu pružnosti a snižuje sklon k oxidaci – korozi. Potrubí z LČG má navíc delší životnost než potrubí z LLG.

Použití LČG pro odlitky brzdových bubnů a disků, resp. čelistí vyplývá z výhodných vlastností této litiny, jako je vysoká pevnost, dobrá tepelná vodivost a odolnost proti tepelným šokům. V těchto směrech předčí litinu s lupínkovým grafitem doposud užívanou pro tyto odlitky.

Ve Velké Británii jsou železniční vozy jezdící rychlostí přes 200 km/hod. vybavovány diskovými brzdami z LČG. Tyto brzdy musí absorbovat za 60 sekund brzdění 10 MJ/kolo a to průměrně každých 5 minut. Za těchto podmínek vznikají na discích z LLG ($R_m = 260$ MPa) trhliny způsobené tepelnou únavou. LČG má při této aplikaci výhodu oproti LKG ve vyšší tepelné vodivosti [1].

2.7 SHRNU TÍ

Litiny s červíkovým grafitem jsou vhodné na výrobu součástí vyšších mechanických případně jiných užitkových vlastností, jako má LLG. Používají se i jako náhrada LKG pro případy, kdy se požadují lepší slévárenské vlastnosti a mechanické vlastnosti LČG jsou vyhovující. LČG se používá i na výrobu drobných odlitků, vyráběných původně z temperované litiny.

LČG má v porovnání s LLG následující přednosti:

- vyšší pevnost bez přidávání legujících přísad
- vyšší tažnost a rázovou houževnatost
- možnost využití modelového zařízení, používaného pro litinu s lupínkovým grafitem

V porovnání s LKG má LČG následující výhody:

- vyšší tepelnou vodivost
- lepší tlumící vlastnosti
- lepší slévárenské vlastnosti, hlavně malý sklon k staženinám a tím i lepší využití tekutého kovu
- možnost odlévání komplikovaných odlitků.

Z ekonomického hlediska je využití LČG také velmi výhodné. Např. náhrada LČG za litinu temperovanou představuje 30% ušetření výrobních nákladů. V porovnání z LKG jsou výrobní náklady zhruba stejné, ale u LČG se většinou nemusí používat nálitky, což vede k většímu využití tekutého kovu.

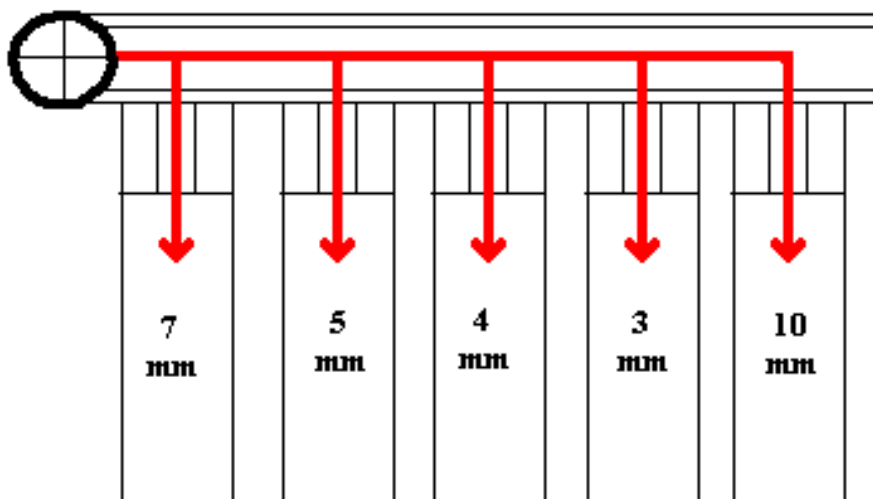
III EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Cílem této části práce bylo navržení a odlití takových zkušebních odlitků litiny s červíkovitým grafitem, aby byl vidět, co nejlépe patrný vliv rychlosti ochlazování na její strukturu. Jako vodítka nám byl podobný pokus provedený na Vysoké škole dopravné v Žilině [2]. Navrhli jsme tedy odlití zkušebních vzorků (destiček) o tloušťkách 3,4,5,7,10 mm. Následně byla stanovena jejich struktura a mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tažnost, tvrdost). Současně s tím byla věnována pozornost metalurgické přípravě taveniny s ohledem na stanovení správného množství základních surovin, očkovacích a modifikačních činidel.

Všechny experimenty obsažené v této práci byly prováděny na Katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.

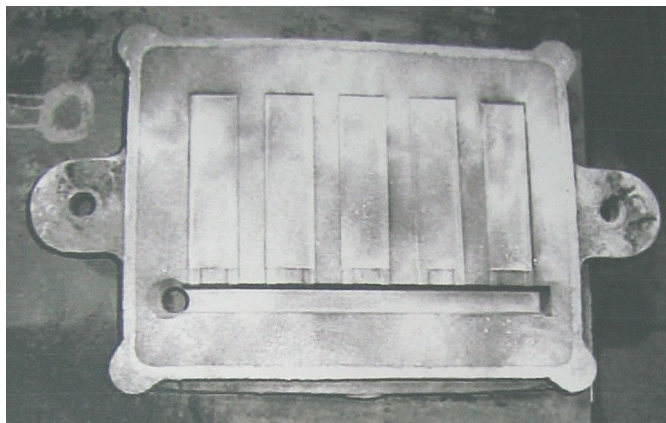
1 POPIS SLÉVÁRENSKÉ FORMY, FORMOVACÍ SMĚS

Pro odlití zkušebních vzorků byla navržena písková slévárenská forma s dutinou, vyrobenou podle modelu, který zahrnoval vtokovou soustavu připojenou k odlitkům 160 x 44 x tloušťka destičky. Rozmístění destiček o tloušťkách 3,4,5,7,10 mm je zobrazeno na obrázku 22.



Obr.22 – Schéma připojení zkušebních destiček k vtokové soustavě s vyznačením toku taveniny

Slévárenská forma byla vyrobena ručním zaformováním modelu do dvou rámů 400 x 300 x 100 mm. V horní části formy byla zaformována vtoková soustava s licí jamkou. Před složením obou rámů dohromady byl líc formy postříkán vodním roztokem melasy (obr.23).



Obr.23 - Pohled na spodní část formy

Formovací směs byla navržena s ohledem na možnosti školní slévárny a byla použita bentovitová směs. Jako ostřívo byl použit křemičitý písek Střeleč T2S, jako pojivo bentonit Speciál 550 (7% celkové hmotnosti). Pro zlepšení vlastností formovací směsi byla přidána kamenouhelná moučka (1% hmotnosti). Obsah vody ve směsi byl 3%. Průměrné hodnoty formovací směsi jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab.1: Průměrné hodnoty vybraných vlastností použité ve formovací směsi

Hustota /kg*m ⁻³ /	Pevnost v tlaku /MPa/	Prodyšnost /j*p*SI/	D ₅₀ /mm/
1550	0,051	334	0,27

Zkouška vlastností formovací směsi byla provedena na standardních vzorcích v laboratoři KSM – TU Liberec. Prodyšnost směsi byla stanovena na přístroji LP, pevnost na přístroji LRu, velikost zrn ostříva určena pomocí síťového rozboru a hustota byla zjištěna podle výpočtu.

2 PŘÍPRAVA TAVENINY

Tavenina byla připravena ve slévárenské laboratoři KSM TU v Liberci. Jako tavící zařízení byla použita elektrická středofrekvenční kelímková indukční pec IO 40 od firmy INDUKCE s.r.o. s maximální hmotností taveniny 40 kg. Vyzdívka pece je kyselá – SURACIT. Stejně tak kyselou vyzdívku – ACYKUP měla i odlévací pánve. Pro modifikaci byla použita modifikační komůrka na dně pánve.

Vsázkový materiál byl pro všechny tavby stejného složení. Základ byl tvořen surovým železem SOREL (viz. tab.2). Jako grafitizační očkovač bylo použito Ferosilicium FeSi75 společně se Superseedem (tab.3), pro modifikaci byla určena předslitina CER - MISCHMETALL (C-MM) od výrobce SKW – GIESSEREI – Německo společně s modifikátorem FeSiMg. (tab. 2,3,4).

Tab.2: Chemické složení surového železa SOREL

Fe / % /	C / % /	Si / % /	Mn / % /	P / % /	S / % /	Ni / % /
95,48	4,23	0,15	0,013	0,026	0,01	0,007

Tab.3: Chemické složení očkovačů

	Fe / % /	Si / % /	Al / % /	Ca / % /	Sr / % /
FeSi75	25	75	-	-	-
Superseed	min. 23,6	75	max. 0,5	0,1	0,8

Tab.4: Chemické složení modifikátoru CER - MISCHMETALL

Ce / % /	La / % /	Nd / % /	Pr / % /	ost.KVZ / % /	Fe / % /	Si / % /	Mg / % /	Al / % /
50-53	20-26	15-19	4-7	cca 3,0	cca 0,5	cca 0,3	cca 0,3	cca 0,2

3 VEDENÍ TAVBY PRO PŘÍPRAVU TAVENINY LČG

Celkem bylo provedeno 6 taveb. Vstupní složení vsázky zůstávalo stejné; měnil se pouze objem používaného modifikátoru a grafitizačního očkovače. Vše je znázorněno v tab.5. Z důvodu menšího obsahu křemíku v surovém železe bylo do taveniny přidáno další množství ferosilicia FeSi75.

Tab.5: Složení vsázky jednotlivých taveb

číslo tavby	Sorel /kg/	KVZ /kg/	KVZ /‰/	FeSi 75 /kg x %/	FeSi 75 /kg x %/	Superseed /kg/	FeMn65 /kg/	Cu /kg/	FeSiMg /kg/
1	30	0,0185	0,06	1,15	0,15	0,17			
2	30	0,016	0,052	0,95	0,15	0,17			
3	25	0,014	0,056	0,8	0,125	0,183	0,12		
4	25	0,013	0,052	0,7	0,13	0,2	0	0,15	
5	25	0,0065	0,026	0,6	0,23	0,2	0	0	0,08
6	25	0,006	0,024	0,6	0,23	0,2		0,12	0,076

Vložená vsázka v peci byla zahřáta na teplotu mezi 1500 až 1550 °C. Teploty taveniny byla měřena pomocí optického pyrometru. Do přehřáté odlévací pánve (na 600 °C) byl vložen modifikátor C – MM a očkovač FeSi75. Následovalo odlití taveniny z pece do pánve. Po 2 minutách, potřebných k rozpuštění modifikátoru, byla tavenina znovu očkována nasypáním Superseedem na hladinu. Po promíchání byla zkontrolována teplota taveniny. Žádaná lící teplota byla 1450°C, kterou bylo nutné dodržet. Poté už následovalo odlití taveniny do připravených forem. Po zchladnutí a ztuhnutí byly odlitky vytlučeny z formy. Dále byly odděleny jednotlivé destičky odděleny od vtokové soustavy a později byly podrobeny zkouškám pevnosti, tažnosti, tvrdosti a struktury. Součástí každé připravené tavby bylo odlití i tzv. „medailí“¹⁴ pro zjištění chemického složení. Ty byly odlity do připravených měděných kokil a poslány na spektrální analýzu firmě LECO ve Slévárně šedé litiny v Liberci – Ostašově. Přehled chemického složení taveb je v tabulce 6.

¹⁴ Tzv. „medaile“ jsou vzorky pro zjišťování chemického složení. Mají tvar válcové destičky o průměru 35 mm a tloušťce 5 mm. Odlévají se do měděné kokily, která má zajistit, co nejrychlejší odvod tepla tak, aby se uhlík v odlitku vyloučil při metastabilních podmínkách za vzniku ledeburit, resp. vázaného uhlíku v Fe₃C. Důvodem je, že se chemické složení litiny určuje pomocí spektrálního kvantometru, který je schopen analyzovat množství uhlíku pouze z Fe₃C.

Tab. 6 – přehled chemického složení jednotlivých taveb

číslo tavby	C /%/	Si /%/	Mn /%/	P /%/	S /%/	Cu /%/
č.1	3,62	3,02		0,026	0,007	
č.2	3,73	2,61		0,026	0,007	
č.3	3,81	2,64	0,26	0,026	0,005	
č.4	3,78	2,39		0,027	0,009	0,42
č.5	3,86	2,78		0,027	0,017	
č.6	3,9	2,21		0,03	0,01	

4 POPIS, VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

Jelikož cílem naší práce bylo zhodnocení mechanických a metalurgických změn u odlitků z LČG v závislosti na tloušťce stěn, bylo nutné provést zkoušky pro zjištění mechanických vlastností v jednotlivých vzorcích. Hlavní sledované parametry odlitků byly pevnost v tahu, tažnost a tvrdost.

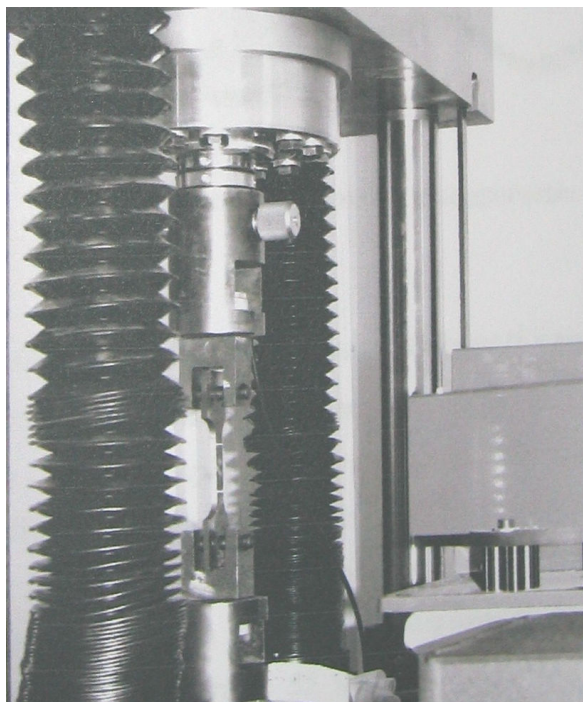
4.1 MĚŘENÍ PEVNOSTI V TAHU A TAŽNOSTI

Jak už bylo uvedeno v rešeršní části této práce, podstatný vliv na mechanické vlastnosti litiny má mimo jiné i tvar grafitu (viz obr. 6). Tudíž se dalo předpokládat, že vyšší pevnosti bude dosahovat přítomnost kuličkového grafitu ve struktuře.

Pro měření byl použit trhací stroj FPZ 100 a laserový extenzometr firmy FIEDLER OPTOELEKTRONIC GmbH pro měření napětí a prodloužení (obr.24). Oba přístroje jsou umístěny na katedře KSP – FS¹⁵

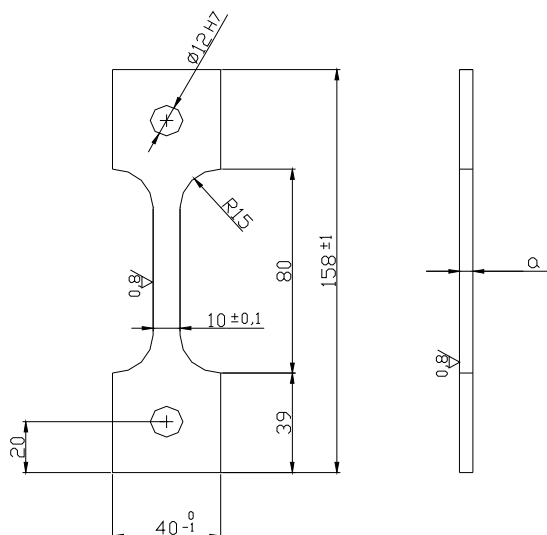
¹⁵ Univerzální trhací stroj FPZ 100 jehož tahová síla byla měřena pomocí indukčních snímačů zabudovaných přímo na upínacím zařízení stroje. Maximální tahová síla, kterou stroj může vyvozovat je 100 kN. Ve vyměnitelných speciálních čelistech se upnuly čtvercové tyče s otvorem pro čep tak, aby se vyloučily přídatné ohybové momenty. – fotka

Bezkontaktní měření lokálně rozloženého tahového napětí bylo prováděno na laserovém extenzometru. Princip tohoto měření je založen na principu kontrastujících značek (v tomto konkrétním měření byly použity bílé lepicí proužky vzdálené $l_0 = 35$ mm) aplikovanými na povrchu vzorků. Ty byly snímány laserovými paprsky, které byly vysílány ze scanneru. Zpětně rozložené světlo zachycuje optický přijímač – receiver. To se pomocí fotodiody převádí na elektrický signál, zpracováváný počítačem. Časová vzdálenost mezi jednotlivými impulsy koresponduje se vzdáleností jednotlivých značek na povrchu



Obr.24 Sestava pro měření pevnosti v tahu. Vlevo na obrázku je trhací stroj, vpravo laserový extenzometr.

Měření bylo prováděno na odlitých destičkách různých tloušťek, které byly obrobena podle normy ČSN ISO 6505 (42 0371-93) – obr.25. Nutno podotknout, že některé vzorky nemohly být kvůli vysoké tvrdosti obrobena, tudíž nedošlo ani k jejich měření.



Obr.25: Rozměry zkušební tyče $a = 3,4,5,7,10$ mm

vzorku. Časové chování signálu je analyzováno a vyhodnoceno pomocí PC v programu LGM. Analogový výstup je převeden do digitální podoby, díky čemu je možné sledovat průběh zkoušky v grafické modelu.

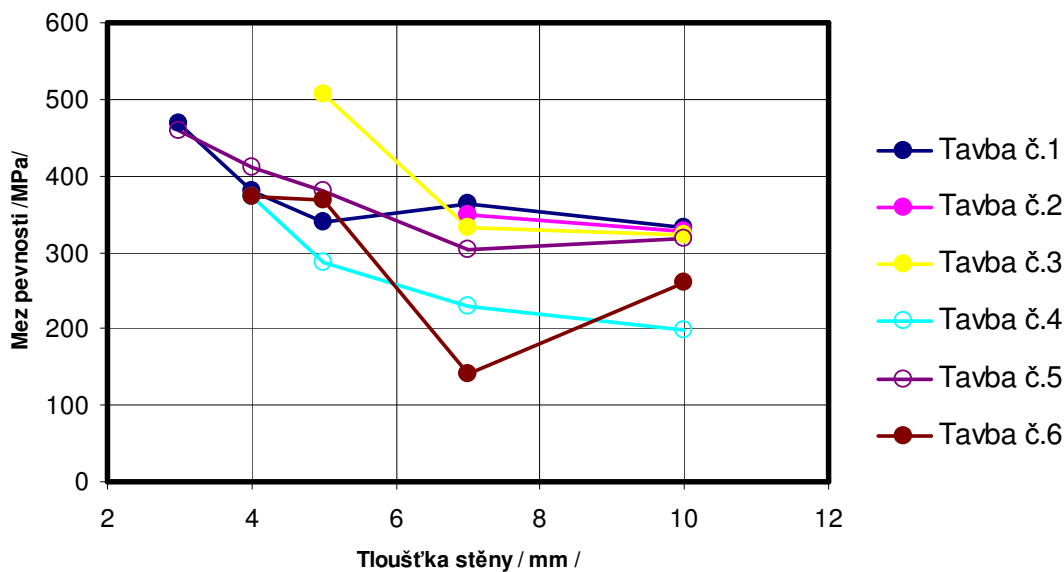
Vlastní měření začalo nalepením kontrastujících značek ve vzdálenosti l_0 (35 mm) a změřením průřezu dřívku zkušební vzorku. Tyto hodnoty byly zapsány. Po upnutí vzorku do čelistí trhačického stroje, následovalo přesné nastavení laserového extenzometru. To bylo důležité vzhledem k šířce laserového paprsku, která je 55 mm. Při chybném umístění by se mohlo stát to, že by se při prodloužení vzorku mohly značky dostat mimo měřenou oblast. Pro co nejlepší citlivost extenzometru je doporučena vzdálenost 200 mm od vzorku. Kontrola správnosti nastavení měřícího zařízení byla provedena pomocí programu LGM. Následovalo nastavení veškerých parametrů (rozměry vzorku, umístění značek) v programu LOMP.

Postupným zatěžováním vzorku vnější tahovou silou došlo k jeho přetržení. Data tahového napětí z trhačického zařízení se digitálně zpracovávají v softwaru LOM. Tento software zaznamenává sílu a optimalizuje příčné zúžení a další data experimentu, které dále synchronizuje s poměrným prodloužením vzorku. Měřená data jsou zobrazována na monitoru zařízení. Současně jsou ukládána do souboru a následně analyzována softwarem LQA.

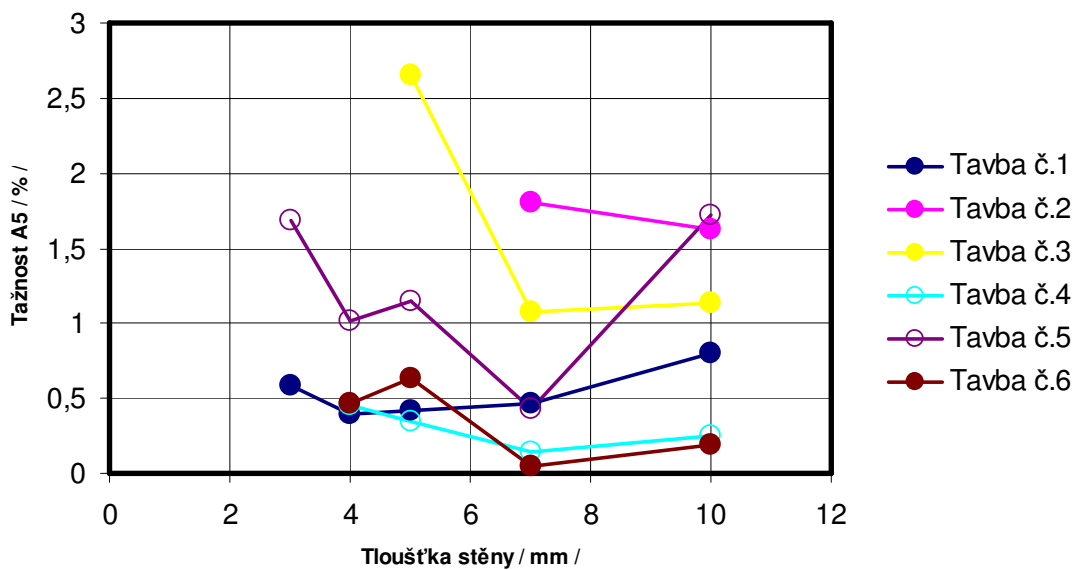
Naměřené a digitálně zpracované hodnoty z programu LQA jsou v tabulce 7. Grafická podoba výsledků je na obr. 26 a 27.

Tab.7: Naměřené hodnoty pevnosti v tahu a tažnosti.

číslo tavby	Tloušťka vzorku / mm /									
	3		4		5		7		10	
	<i>R_m</i> /MPa/	<i>A₅</i> /%/	<i>R_m</i> /MPa/	<i>A₅</i> /%/	<i>R_m</i> /MPa/	<i>A₅</i> /%/	<i>R_m</i> /MPa/	<i>A₅</i> /%/	<i>R_m</i> /MPa/	<i>A₅</i> /%/
1	469	0,58	379	0,4	340	0,42	364	0,47	332	0,8
2							348	1,8	327	1,62
3					506	2,65	333	1,07	323	1,13
4			372	0,46	288	0,35	229	0,14	199	0,25
5	458	1,68	411	1,01	380	1,15	304	0,43	318	1,72
6			373	0,47	369	0,63	142	0,05	260	0,195



Obr.26 Závislost pevnosti v tahu na tloušťce stěny odlitku pro jednotlivé tavby.



Obr.27 Závislost tažnosti na tloušťce stěny odlitku pro jednotlivé tavby

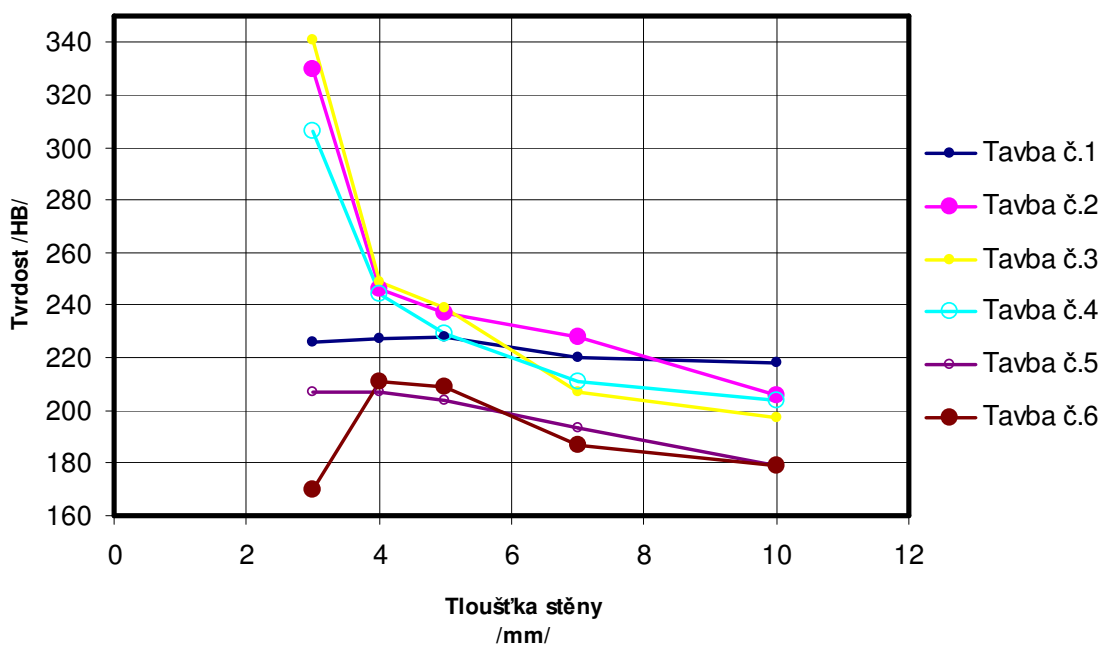
Z uvedených výsledku, lze vyvodit závěr, že pevnost v tahu i tažnost se vzrůstající tloušťkou stěny odlitku klesá. Největší pokles hodnot je mezi 5 a 7 mm tloušťky stěny. Mezi tloušťkou 7 a 10 mm jsou hodnoty víceméně konstantní. Výkyvy hodnot (měření tažnosti u 5. tavby mezi 7 a 10 mm) je možno přisuzovat přítomností vměstku v odlitku, či měkčí struktuře oproti ostatním vzorkům).

4.2 MĚŘENÍ TVRDOSTI

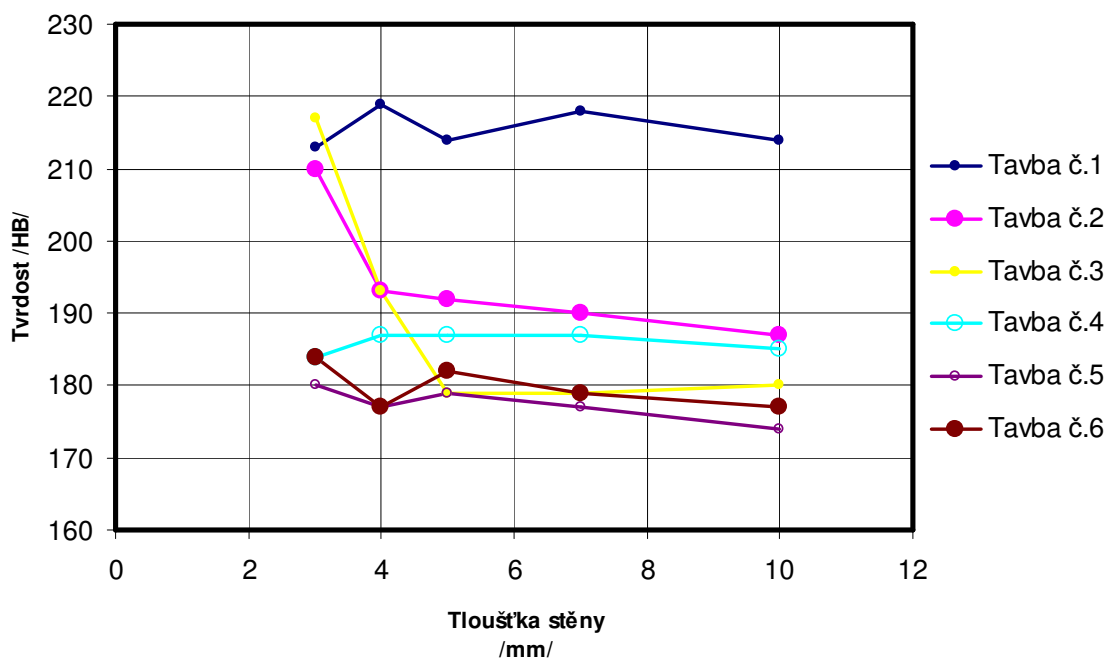
Pro zkoušky tvrdosti byly použity odlité destičkách pro měření pevnosti v tahu. Měření bylo prováděno na tvrdoměru firmy KARL ZEISS podle metody Brinella. Identifikátorem byla zakalená kulička z chromové oceli o \varnothing 10 mm. Použité zatížení bylo 29430 N (3000 kp) po dobu 30 sekund. Plocha pro měření byla obroušena od licí kůry pomocí stolní brusky. Měření bylo prováděno na dvou místech destičky, a to u vtoku a naproti vtoku. Celkem bylo uskutečněno pět měření na každou destičku. Výsledky jsou znázorněny v tab.8., graficky pak na obr. 28 a 29.

Tab.8: Změřené hodnoty tvrdosti vzorků /HB/

Tloušťka vzorku		3 mm	4 mm	5 mm	7 mm	10 mm
tavba č.1	pozice naproti vtoku	226	227	228	220	218
	pozice u vtoku	213	219	214	218	214
tavba č.2	pozice naproti vtoku	330	246	237	228	206
	pozice u vtoku	210	193	192	190	187
tavba č.3	pozice naproti vtoku	341	249	239	207	197
	pozice u vtoku	217	193	179	179	180
tavba č.4	pozice naproti vtoku	306	244	229	211	204
	pozice u vtoku	184	187	187	187	185
tavba č.5	pozice naproti vtoku	207	207	204	193	179
	pozice u vtoku	180	177	179	177	174
tavba č.6	pozice naproti vtoku	170	211	209	187	179
	pozice u vtoku	184	177	182	179	177



Obr.28: Závislost tvrdosti vzorků na tloušťce stěny; měřeno naproti vtoku



Obr.29 Závislost tvrdosti vzorků na tloušťce stěny; měřeno u vtoku

Z grafů je patrný vliv tloušťky stěny na tvrdost odlitku. S rostoucí tloušťkou se tvrdost snižuje. Což plně koresponduje se zásadami rychlosti chladnutí odlitku, kdy nejtenčí odlitek chladne nejrychleji (podle metastabilního diagramu Fe-C, za vzniku cementitu) a tudíž je nejtvrdší.

Měření také ukázalo, jaký vliv má umístění odlitku vzhledem k vtoku. U vtoku, kde je větší průtočnost, dochází k prohřátí formy a odlitek zde chladne pomaleji, což způsobuje nižší hodnoty tvrdosti i v tenčích partiích odlitku.

4.3 METALOGRAFICKÁ STRUKTURA

Zkoumání metalografické struktury odlitých vzorků slouží jako ověření správnosti přípravy taveniny i celého metalurgického procesu a tím i jakosti odlité litiny. Z celkových 30 odlitých destiček bylo 22 vybráno k posouzení dosažené struktury. Vzorky pro metalografické hodnocení struktury odlitků byly odebrány ze středu destičky; vzorky byly vybroušeny a vyleštěny. Pozorování struktury bylo prováděno na světelném mikroskopu NEOPHOT 21 (KARL ZEISS JENA – Německo). Tvar, velikost a rozložení grafitu bylo sledováno na vzorcích v naleptaném stavu, pro zvýraznění matrice byl použit 3 % roztok Nitalu. Struktury byly sledovány při 100x a 500x zvětšení a zaznamenány byly digitálním fotoaparátem NIKON Coolpix 995. Na obrázcích v přílohách 2 až 7 je patrná změna struktury sledované litiny v jednotlivých průřezích.

Při zkoumání struktury bylo postupováno tak, že po odlití jedné tavby bylo provedeno zhodnocení. Důraz byl dán na procento výskytu červíkovitého grafitu v co nejmenším průřezu, a na jeho hrubost. Poté následovala další tavba. Cílem dalších taveb bylo zvyšování podílu červíkovitého grafitu ve struktuře i u nejmenších tloušťek. Proto se snižovalo množství modifikátoru pro podporu vzniku kuličkového grafitu.

U tavby č.1 (Příloha 2) lze pozorovat zvyšování podílu červíkovitého grafitu ve struktuře v závislosti na tloušťce odlitku. U nejmenší tloušťky (3mm) se červíkovitý grafit téměř nevyskytuje, naopak u největší tloušťky (10mm) je červíkovitý grafit obsažen nejméně 95 % podílem. Množství modifikátoru bylo 0,0185 kg.

Při tavbě č.2 (Příloha 3) bylo použito 0,016 kg modifikátoru. Bohužel vzorky o menších tloušťkách tuhly podle metastabilní soustavy za vzniku tvrdé karbidické struktury, tudíž nemohly být obrobena pro metalografické hodnocení.

Na tavbu č. 3 (Příloha 4) bylo použito 0,014 kg modifikátoru. Změna nárůstu obsahu červíkovitého grafitu není patrná.

U tavby č.4 (Příloha 5) došlo k vyloučení červíkovitého grafitu i u tloušťky 4 mm. Množství modifikátoru bylo 0,0130 kg.

Při tavbě č.5 (Příloha 6) se v malém množství objevil červíkovitý grafit i tloušťky stěny 3 mm. Naopak u tloušťky 10 mm byl grafit už velice hrubý. Při tavbě bylo opět sníženo obsah modifikátoru: KVZ – 0,065 kg s přídavkem FeSiMg – 0,08 kg.

Nakonec na vzorcích z tavby č.6 (Příloha 7) byl nalezen červíkovitý grafit i u tenkých stěn. Bohužel nejtenčí 3 mm vzorek tuhnul podle metastabilní soustavy, tudíž nešel obrobit pro metalografické zhodnocení. Množství modifikátoru KVZ bylo 0,060 kg, FeSiMg bylo 0,076 kg.

Z hlediska základní kovové hmoty lze sledovat, že u tloušťek 3,4 a 5 mm je struktura feriticko-perlitická; u vyšších tloušťek perlit s rostoucím průřezem ubývá až do tloušťky 10mm, kde je struktura plně feritická. To je důsledek rozdílné rychlosti chlazení odlitků různé tloušťky ve formě.

Zajímavé bylo vytvoření perlitické struktury s lupínkovým grafitem v povrchové vrstvě odlitků všech tloušťek u taveb č.4,č.5,č.6. To je možné vysvětlit přítomností mědi v tavenině, která stabilizuje perlit ve struktuře. Jistý obsah mědi v tavenině potvrdila i spektrální analýza chemického složení. Důvodem pro výskyt lupínkového grafitu je nedostatek modifikátoru. Ten se v povrchové vrstvě navázal na uhlík z kamenouhelné moučky, použité v odlévací formě proti zapečeninám [13].

V tabulkách 9 a 10 je přehledné shrnutí výsledků z metalurgického pozorování mikrostruktury odlitků.

Tab. 9: Průměrná velikost grafitu v odlitých vzorcích podle ČSN 420461

číslo tavby	Tloušťka vzorku				
	3 mm	4 mm	5 mm	7 mm	10 mm
č.1	6	6	7	7	7
č.2	-	-	-	7	8
č.3	-	-	6	7	7
č.4	-	7	6	6	-
č.5	7	7	7	6	6
č.6	-	7	6	7	6

Pozn. – Hodnotící stupnice: 5 – velikost grafitu 120 - 60 μm
6 – velikost grafitu 60 - 30 μm
7 – velikost grafitu 30 - 15 μm
8 – velikost grafitu 15 - 8 μm

Tab.10: Přehled struktury základní kovové hmoty, tvaru a obsahu grafitu ve zkušebních odlitcích.

Číslo tavby		Tloušťka vzorku				
		3 mm	4 mm	5 mm	7 mm	10 mm
Tavba č.1	<i>Tvar grafitu</i>	kuličkový	kuličkový, 20 % červíkovitý	červíkovitý, 50 % kuličkový	červíkovitý, 30 % kuličkový	červíkovitý, 5 % kuličkový
	<i>Základní kovová hmota</i>	feriticko - perlitická P20 / Fe80	feriticko - perlitická P10/Fe90	feriticko - perlitická P6/Fe 94	feritická Fe/P0	feritická Fe/P0
Tavba č.2	<i>Tvar grafitu</i>				červíkovitý, 30 % kuličkový	jemný červíkovitý, 5% kuličkový
	<i>Základní kovová hmota</i>				feriticko - perlitická P20/Fe80	feritická Fe/P0
Tavba č.3	<i>Tvar grafitu</i>			červíkovitý, 50 % kuličkový	červíkovitý, 30 % nedokonale kuličkový	červíkovitý, 5 % kuličkový
	<i>Základní kovová hmota</i>			feriticko - perlitická P20/Fe 80	feriticko - perlitická P10/Fe90	feritická Fe/P0
Tavba č.4	<i>Tvar grafitu</i>		jemný červíkovitý, 20% kuličkový	jemný červíkovitý, 5% kuličkový	červíkovitý, 10 % kuličkový	
	<i>Základní kovová hmota</i>		feriticko - perlitická P40/Fe60	feriticko - perlitická P20/Fe 80	feriticko - perlitická P10/Fe90	
Tavba č.5	<i>Tvar grafitu</i>	kuličkový, 20% červíkovitý	jemný červíkovitý, 30% kuličkový	červíkovitý, 10 % kuličkový	červíkovitý, 5 % kuličkový	červíkovitý, 5 % kuličkový
	<i>Základní kovová hmota</i>	feriticko - perlitická P6 / Fe94	feriticko - perlitická P10/Fe90	feriticko - perlitická P6/Fe 94	feritická Fe/P0	feritická Fe/P0

Tavba č.6	Tvar grafitu		jemný červíkovitý, 5% kuličkovitý	jemný červíkovitý, 5% kuličkový	červíkovitý	červíkovitý, 5 % kuličkový
	Základní kovová hmota		feriticko - perlitická P10/Fe90	feriticko - perliticko P10/Fe90	feriticko - perlitická P6/Fe94	feritická Fe/P0

Poznámka: Označení podílu feritu a perlitu hodnoceno podle tabulky 11.

Tab.11 – Označení podílu perlitu a feritu podle ČSN ISO 945 (420464)

PERLIT		FERIT	
Označení	Obsah v %	Označení	Obsah v %
P	98 - 100	Fe	98 - 100
P 96	94 - 98	Fe 96	94 - 98
P 92	90 - 94	Fe 92	90 - 94
P 85	80 - 90	Fe 85	80 - 90
P 70	60 - 80	Fe 70	60 - 80
P 45	30 - 60	Fe 45	30 - 60
P 20	10 - 30	Fe 20	10 - 30
P 6	2 - 10	Fe 6	2 - 10
P 0	0 - 2	Fe 0	0 - 2

5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Cílem této práce bylo zkoumání procesu tuhnutí LČG v tenkostěnných odlitcích. Během provedených experimentů byly potvrzeny stávající poznatky. Jednalo se především o fakt, že se ze zmenšující tloušťkou stěny zvyšuje tendence ke krystalizaci v metastabilní soustavě; zvyšuje se výskyt cementitu, což má vliv na mechanické vlastnosti. Jak už bylo několikrát výše uvedeno, toto je způsobeno zvyšující se rychlosti ochlazování.

Dále byla potvrzena skutečnost, že s klesající tloušťkou stěny (hranice se pohybuje okolo 7 – 8 mm) stoupá procento výskytu nedokonale zrnitého až zrnitého grafitu na úkor grafitu červíkovitého. Opět to souvisí se zvyšováním rychlosti chladnutí a tím i se zvyšováním podchlazování taveniny při eutektické reakci. Nezanedbatelný vliv má i množství modifikátoru, jak nám ukázaly tavby č.1 až č.6.

V této práci bylo podrobněji zaměřeno na výrobu tenkostěnných odlitků tloušťek 3 až 10 mm. Pro výrobu LČG bylo použito čisté surové železo SOREL, modifikátorem byly kovy vzácných zemin v předslitině CER-MISCHMETALL a modifikátor FeSiMg. Jako grafitizační očkovadlo byl použito FeSi 75 společně se Superseedem. Tavby byly provedeny v elektrické indukční peci, která se pro tavení LČG plně osvědčila, díky své možnosti regulace chemického složení a teploty.

Z následně provedených zkoušek a studia mikrostruktury byly vyvozeny tyto závěry.

- 1) Naměřené hodnoty tvrdosti jsou v souladu se změnami mikrostruktury. Na výsledek měla podstatný vliv pozice měření vůči vtoku taveniny do zkušebního vzorku. Měření hodnot prováděných naproti vtoku ukázaly výrazný pokles – nejvíce v rozmezí 3 až 7 mm tloušťky stěny. Naopak u vtoku došlo vzhledem k průtočnosti formy pouze k minimálnímu snížení tvrdosti. Jelikož ale hodnoty vycházeli v průměru pod 200 HB, není potřeba měnit systém vtokových kanálků či konstrukci a materiál formy.
- 2) Pevnost v tahu a tažnost klesala nejvíce v rozmezí 3 až 7 mm a to až o 50%. Způsobuje to změna základní kovové matrice z feriticko – perlitické na čistě feritickou, stejně tak ubývání kuličkového grafitu ze struktury. U odlitků z nejhoršími mechanickými vlastnostmi je grafit hrubě červíkovitý se základní kovovou hmotou čistě feritickou.

Za předpokladu, že požadujeme materiál z garantovanou perliticko – feritickou strukturou bez volného cementitu, obsah červíkovitého grafitu minimálně 90 %, tvrdosti do 200 HB a při očkování v pánvi, je nutno počítat s návrhem minimální tloušťky stěny odlitku 10 mm.

Na konec je nutné podotknout, že výroba LČG pro tenkostěnné odlitky je poměrně náročná. Pro vhodné vstupní chemické složení tavby je potřeba správné navážení vsázky, modifikátoru a očkovačla. Svou roli hraje i kvalita vsázkového materiálu. Podotýkám, že bylo použito čisté surové železo SOREL, žádný vratný materiál. Obojí má vliv na případné zavádění výroby tenkostěnných odlitků z LČG. Každopádně se nevyhneme bedlivému sledování celého procesu tavby, spolu s průběžnou kontrolou jakosti odlitků.

IV ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce měla za cíl shrnout a pomocí experimentálních měření ověřit dosavadní znalosti o tuhnutí litiny s červíkovitým grafitem, zvláště se zaměřením na výrobu tenkostěnných odlitků.

Práce je rozdělena do dvou částí: rešeršní a experimentální. V rešeršní části je nejprve obecně popsána charakteristika grafitických litin, jejich rozdělení a krystalizace. Následuje uvedení doposud známých skutečností o litině s červíkovitým grafitem – vznik červíkovitého grafitu, výroba LČG, mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti a její využití v průmyslu. V experimentální části se práce zabývá zjišťováním mechanických vlastností LČG pro jednotlivé tloušťky stěn odlitků a jejich metalografickou strukturou.

Litina s červíkovitým grafitem je poměrně novým materiálem s vhodnou kombinací mechanických, fyzikálních a slévárenských vlastností, které dělají tuto litinu velmi vhodnou pro strojní součásti vystavované vysokým tlakům a tepelným zátěžím při současném požadavku tenké stěny odlitku. Nejvhodněji se proto nabízí použití LČG při odlitcích bloku motoru, hlav válců, vložek válců a výfukového potrubí. Pro dodržení předepsané jakosti je důležité zajistit bezproblémový výrobní postup a s tím související přesné složení a vlastnosti LČG v každé tavbě.

Z hlediska výzkumu LČG existují oblasti, které nejsou doposud dostatečně vysvětleny. Především se jedná o dohady odborníků z hlediska vzniku a růstu červíkovitého grafitu, na které existuje několik teorií. Z praktického hlediska je možno pro výrobu tenkostěnných odlitků pokračovat ve sledování vlivu množství a způsobu modifikátoru a očkovačla na výsledné vlastnosti a strukturu, stejně tak vliv jednotlivých legur v závislosti na tloušťce stěny a množství modifikátoru.

V SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] SVOBODA, A.: *Katalog odlitků z litiny s červíkovitým grafitem*. SVÚM Praha, úsek slévárenského výzkumu Brno, 1990.
- [2] KONEČNÝ, L.: *Možnosti použití litiny s červíkovitým grafitem pro výrobu odlitků*, Habilitační práce, TU – FS Liberec, 1995.
- [3] ROUČKA, J. : *Metalurgie litin*, Skripta, VUT Brno, 2000.
- [4] BECHNÝ, L.: *Zlievarenská metalurgia a technológia*. Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1990.
- [5] SKOČOVSKÝ, P. – ŠIMAN, I.: *Štruktúrná analýza liatin*. Alfa, Bratislava, 1989.
- [6] VETIŠKA, A. a kol.: *Teoretické základy slévárenské metalurgie*. Praha, SNTL 1972.
- [7] DOUBRAVSKÝ, M.- MACÁŠEK, I.- MACHÁČEK, I.- ŽÁK, J.: *Technologie slévání, tváření a svařování*. Skriptum, Brno, 1985.
- [8] ŠANOVEC, J.: *Technologie I. – návody na cvičení*. Skripta. ČVUT Praha, 2000.
- [9] HANUS, A., VÁLEK T.: *Přehled možných způsobů modifikace tvaru grafitu*. In Slévárenství, 2004, roč. 52., č.9, s. 370-372.
- [10] MACÁŠEK, I. – RUSÍN, K. – VETIŠKA, A.: *Slévárenství II*. SNTL, Praha, 1981.
- [11] BECHNÝ, L.- KONEČNÝ, L.: *Aplikácia použitia liatin s červíkovitým grafitem pre výrobu niektorých špeciálnych strojových súčastí*. In Slévárenství, 1980, roč. 28, č. 2, 3, s. 38 – 40.
- [12] *Technická informace firmy Elkem a/s č.13* [on line]. [cit. 2006-11-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.slévárenství.cz>>.
- [13] POLÁK, P.: *Metalurgické vlivy na výrobu tenkostěnných odlitků z vermikulární litiny v automobilovém průmyslu*, Diplomová práce, TU-FS Liberec, 2006.

VI PŘÍLOHY

Obsah:

Příloha 1: Porovnání vlastností grafitických litin

Příloha 2: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.1

Příloha 3: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.2

Příloha 4: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.3

Příloha 5: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.4

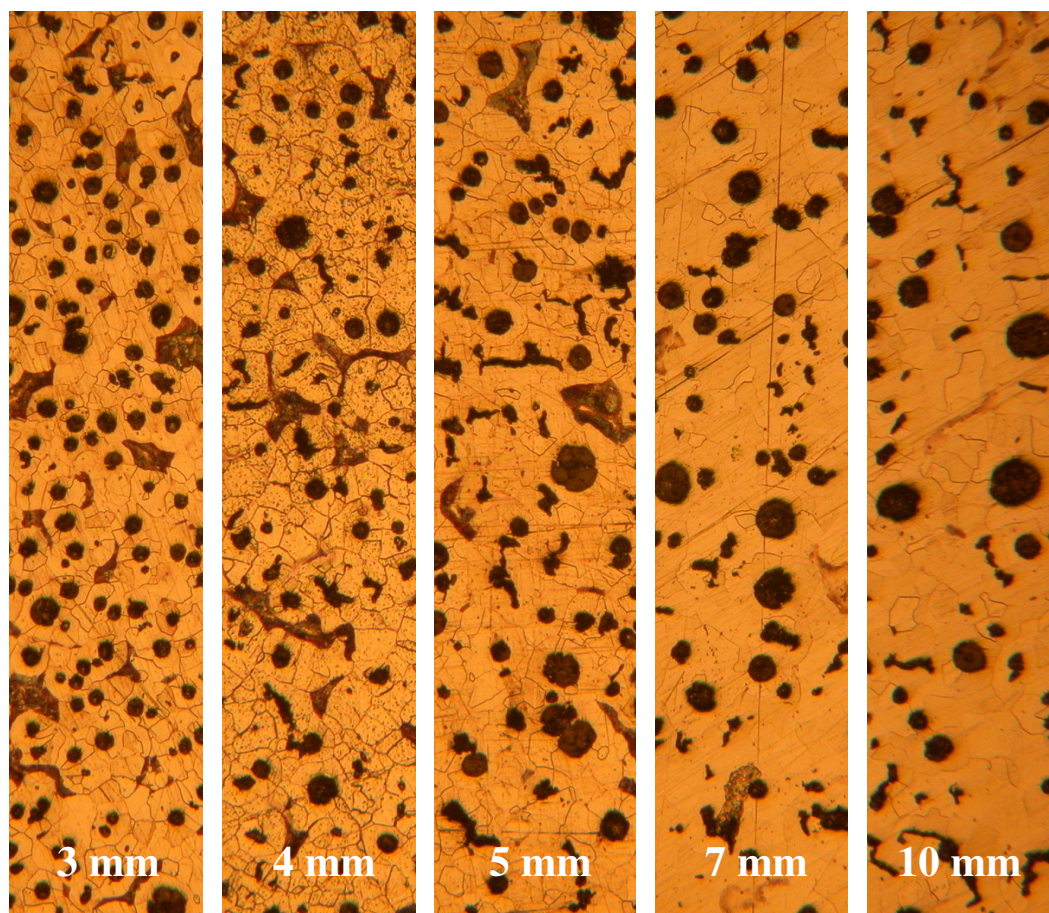
Příloha 6: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.5

Příloha 7: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.6

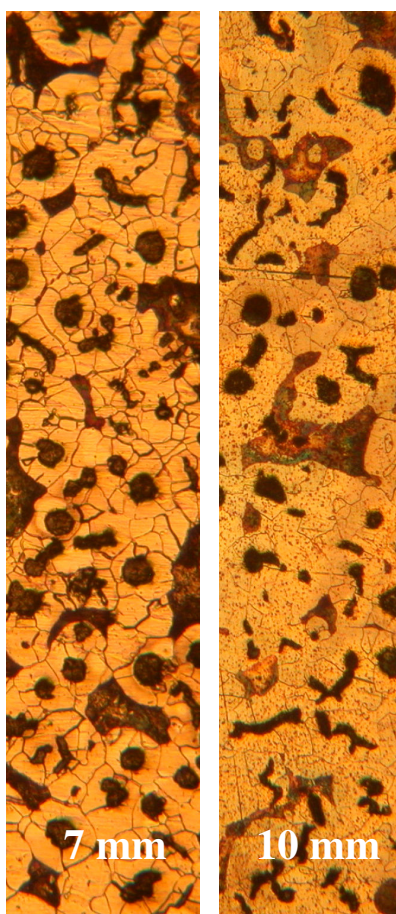
Příloha 1: Porovnání vlastností grafitických litin

Vlastnost		LLG	Litina LČG	LKG
Pevnost v tahu	R _m (MPa)	150 - 400	min.300	350 - 900
Smluvní mez kluzu	Re _{0,2} (MPa)	----	min.250	250 - 600
Tažnost	A ₅ (%)	max. 1,5	2 - 6	7-25
Mez únavy	(MPa)	90	120	150
Pevnost při změně ohybu	(MPa)	140	170	190
Pevnost v tlaku	Re _d (MPa)	500 - 1400	nad 600	600 - 2200
Tvrдость	HB (MPa)	140 - 300	160 - 220	120 - 350
Modul pružnosti	E (kN/mm ²)	70 - 155	140 - 150	165 - 185
Poměr	R _m /HB	0,8 - 1,8	1,9 - 2,5	2,7 - 3,1
Hustota	(kg/dm ³)	7,0 - 7,5	7,0 - 7,2	7,1 - 7,3
Tepelná vodivost	(W/mK)		40	
Lineární koef. roztažnosti	(m/K)		12 - 14*10 ⁻⁶	10 - 13*10 ⁻⁶
Rázová houževnatost	KC (J/cm ²)		20 - 40	40 - 95
Vrubová houževnatost	KCU (J/cm ²)		max. 10	max. 30
El. odpor při 20 - 200 C	(mm ² /m)	0,5 - 1,0	0,7 - 0,8	0,5 - 0,7

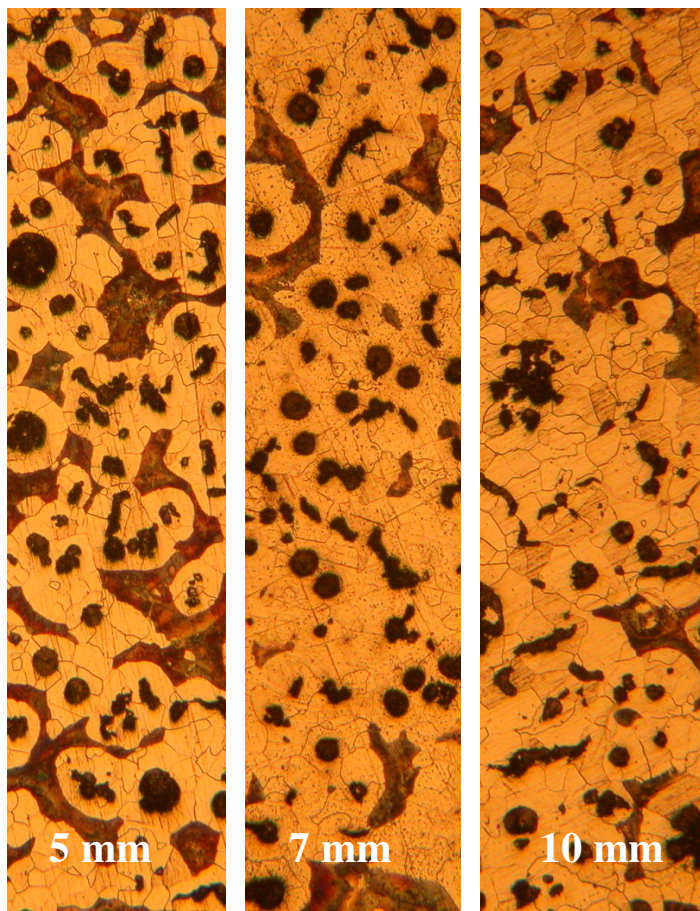
Příloha 2: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitků – tavba č.1



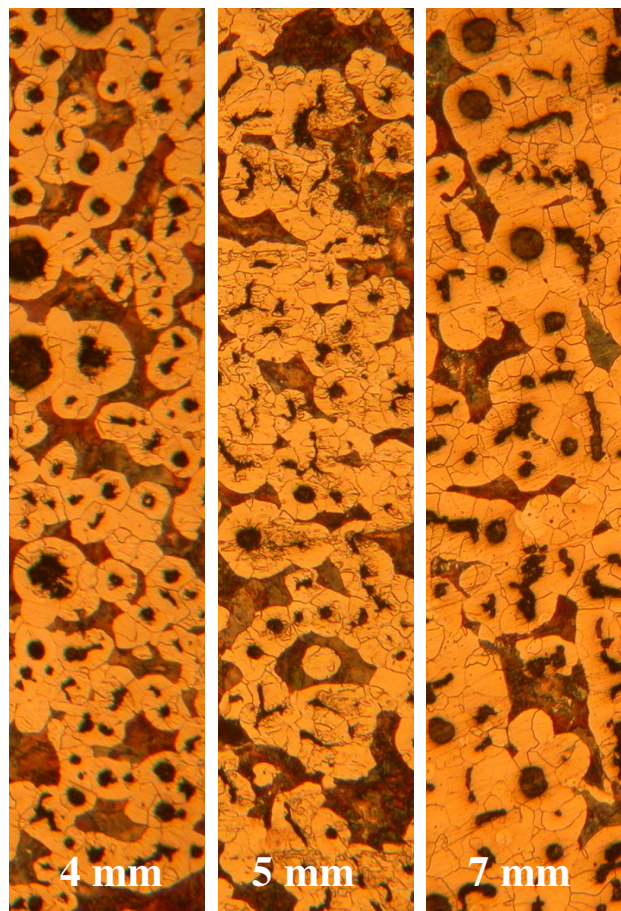
Příloha 3: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitku – tavba č.2



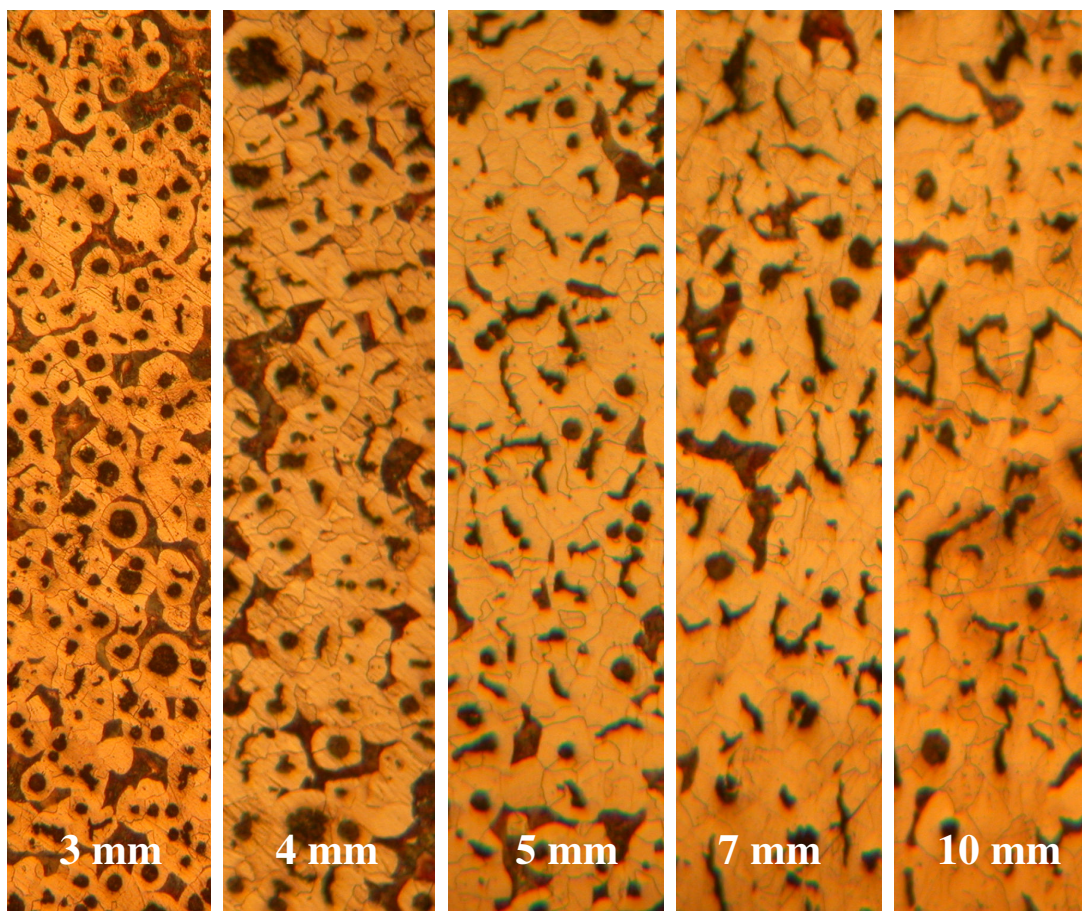
Příloha 4: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitku – tabva č.3



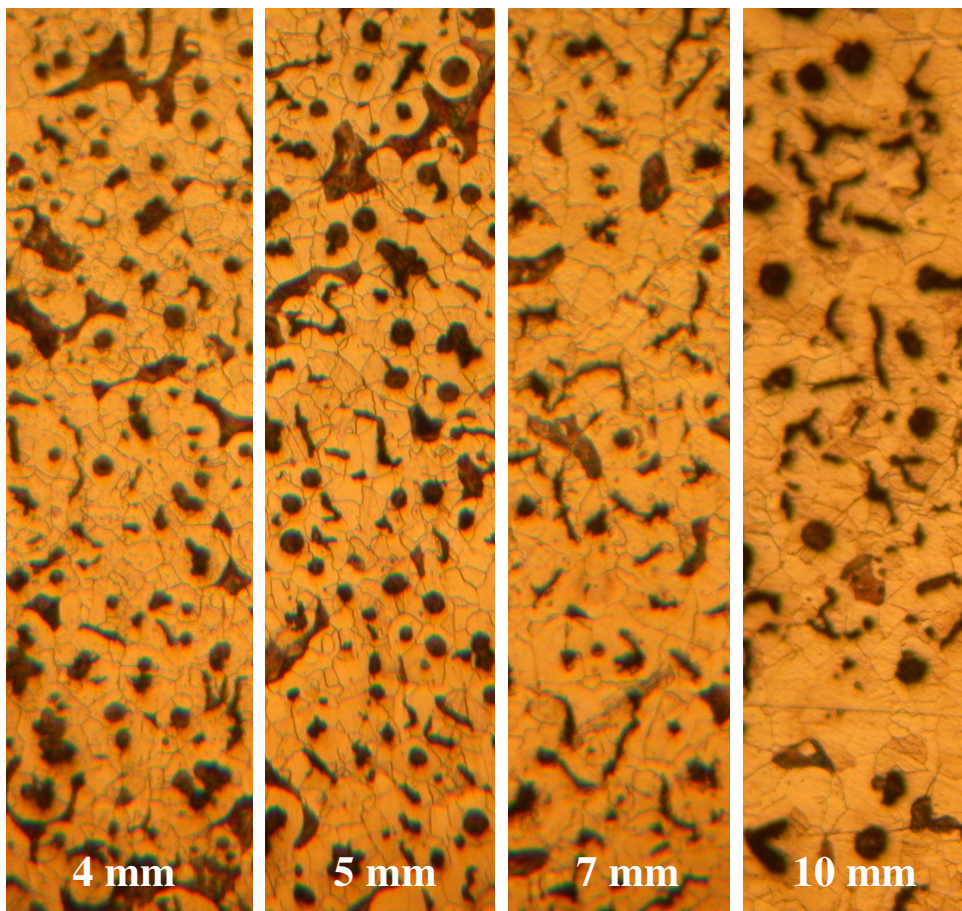
Příloha 5: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitku – tavba č.4



Příloha 6: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitku – tavba č.5



Příloha 7: Mikrostruktura jednotlivých tloušťek stěn odlitku – tavba č.6



Prohlášení

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

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila 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.

5.1. 2007

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 expenses 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 on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

5th January 2007