



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA A STRUKTURA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

MANUFACTURE AND STRUCTURE OF COMPACTED GRAPHITE CAST IRON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ADAM VISKUPIČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Adam Viskupič

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba a struktura litiny s červíkovitým grafitem

v anglickém jazyce:

Manufacture and structure of compacted graphite cast iron

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Litina s červíkovitým grafitem je moderní materiál, jehož výroba ve světě každým rokem roste a v současnosti je velice často používána v automobilovém průmyslu. Její výroba vyžaduje přísné dodržování technologie a značné zkušenosti. Výroba odlitků z litiny s červíkovitým grafitem, resp. její zavedení do výroby ve slévárně může v budoucnosti představovat konkurenční výhodu dané slévárny.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši na téma výroby, struktury a vlastností litiny s červíkovitým grafitem a možnosti výroby odlitků z tohoto materiálu.

Seznam odborné literatury:

1. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632- 9.
2. LAMPIC, M. Gußeisen mit Vermiculargraphit GJV. Giesserei Praxis. 1/01, 2001, s.17-22.
3. ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR Real, 1998. 166 s. ISBN 80-214-1263-1.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

VISKUPIČ Adam: Výroba a struktura litiny s červíkovitým grafitem.

Práce provádí rešerši na téma výroby, struktury a možnosti výroby odlitků z litiny s červíkovitým grafitem. Obsahuje popis mechanických fyzikálních a technologických vlastností litiny s červíkovitým grafitem. Součástí práce je také hodnocení vsázkových surovin, tavicích agregátů, způsobu očkovaní a modifikace litiny s červíkovitým grafitem.

Klíčová slova:

Litina, litina s červíkovitým grafitem, grafit, perlit, ferit, obrobiteľnosť, blok motoru

ABSTRACT

VISKUPIČ Adam: Manufacture and structure of compacted graphite cast iron.

This publication conducts a search on the topic of manufacture, structures and the possibilities of producing castings from compacted graphite iron. It contains a description of the mechanical, physical and technological properties of compacted graphite iron. This thesis also reviews the charge materials, melting furnaces, a methods of inoculation and modifying compacted graphite iron.

Keywords:

Cast-iron, compacted graphite iron, graphite, pearlite, ferrite, machinability, cylinder block

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VISKUPIČ, Adam. *Výroba a struktura litiny s červíkovitým grafitem*. Brno, 2015. 54s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Slévárenství. Vedoucí práce doc. Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 29. 5. 2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Děkuji také rodičům, za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 KLASIFIKACE LČG	10
2 STRUKTURA LČG	11
2.1 Základní kovová hmota LČG	11
2.2 Grafit	18
2.2.1 Červíkovitý grafit.....	20
3 TECHNOLOGIE VÝROBY LČG	23
3.1 Vsázkové suroviny.....	23
3.2 Tavicí agregáty	25
3.3 Způsoby modifikace LČG	27
3.3.1 Modifikace hořčíkem	27
3.3.2 Modifikace hořčíkem + deglobulitizační prvek	29
3.3.3 Modifikace hořčíkem + kov vzácných zemin.....	31
3.3.4 Modifikace cerem + kov vzácných zemin	32
3.3.5 Modifikace hořčíkem – cerem + množství Ca a Al	33
3.4 Očkování LČG.....	34
4 VLASTNOSTI LČG	35
4.1 Mechanické vlastnosti LČG	37
4.2 Fyzikální vlastnosti LČG.....	41
4.3 Technologické vlastnosti LČG	42
5 APLIKACE LČG V PRAXI	44
ZÁVĚRY	47

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých zkratk

Seznam použitých symbolů

Seznam použitých obrázků

Seznam použitých tabulek

ÚVOD

Litina s červíkovitým grafitem (dále v textu jen LČG) je moderní materiál, který své uplatnění nachází v řadě typů odlitků. Výraznému využití LČG dochází v automobilovém průmyslu a to v podobě odlitků bloků vznětových motorů (obr. 1), hlav válců motoru, klikových skříní, převodovek, dílů převodovek, vík ložisek, setrvačníků, výfukových potrubí spalovacích motorů apod. Velká část z výše uvedených součástí vyrobených z LČG je ve svém provozu cyklicky tepelně namáhána. Pro své mechanické i fyzikální vlastnosti, je právě LČG využita v tomto sofistikovaném segmentu výroby. Konkrétním příkladem aplikace litiny s červíkovitým grafitem je blok motoru Audi 3,0 TDI. Motor dosahuje výkonu 171kW a jeho celková hmotnost činí 202 kg, viz (obr. 2).

Období vyvinutí LČG je datováno od konce čtyřicátých let dvacátého století a je nedílně spjata s existencí litiny s kuličkovým grafitem (LKG).[27] Získání LČG bylo často příčinou neúspěšných pokusů vyrobit LKG. Odeznívání příliš nízkého obsahu zbytkového hořčíku, či vyšší koncentrace síry v kovu, než připouští výrobní technologie LKG, jsou podmínky, za kterých nedochází dosažení grafitu zcela ve tvaru kuliček. V porovnání s LKG, litina s červíkovitým grafitem vykazuje nižší mechanické vlastnosti a v počátcích svého vývoje byla považována za materiál nižší jakosti, anebo také nevyhovující LKG.

Výrobní požadavky a tlak konkurence nutí průmyslové výrobce, konstruktéry a technické pracovníky vyvíjet stále nové materiály. Proto při hledání materiálu, který by současně splňoval vysokou pevnost a tažnost stejně jako LKG a zároveň dostačující obrobiteľnosť a tepelnou vodivost, které splňuje litina s lupínkovým grafitem, dochází k obnovení pozornosti a zájmu o využití LČG. Předpokladem budoucího vývoje produkce je, že trh s odlitky vyrobených z LČG bude nadále narůstat. Dle zdroje [4], výrobci zahrnující značky jako Audi, Daf, Ford, Hyundai, MAN, Mercedes, PSA, Volkswagen a Volvo produkují více jak 40 000 tun odlitků bloků motorů z LČG každý rok.

V neposlední řadě je nutné zmínit, že i přes to, že je technologická příprava výroby LČG známa již řadu desítek let, zůstává výroba LČG stále technologicky náročná. Obtížnost výroby LČG spočívá například v optimálním složení vsázky, také v citlivosti LČG na změny výrobních parametrů, jako jsou: čas a teplota modifikace, množství a druh použitého modifikátoru.



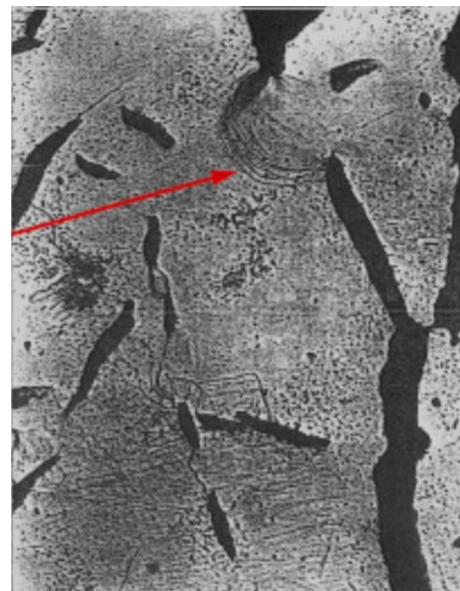
Obr. 1: Blok vznětového motoru [1]



Obr. 2: Motor Audi 3,0 TDI [2]

1 KLASIFIKACE LČG

Jak již bylo předznamenáno v úvodu, litina s červíkovitým grafitem tvoří přechodný typ, jak z hlediska fyzikálních, mechanických tak i z hlediska slévarenských vlastností mezi litinami s lupínkovým grafitem (LLG) a litinami s kuličkovým grafitem (LKG). Ve struktuře LČG by se však nikdy neměl vyskytovat lupínkový grafit, který výrazně snižuje houževnatost a tažnost litiny.[16] Vyloučený červíkovitý grafit narušuje primární kovovou hmotu podstatně méně, než grafit lupínkový a to z důvodu jeho kompaktnějšího tvaru. Vliv vrubového účinku lupínkového grafitu na vznik trhlin v litině, lze názorně vidět na (obr. 3). V literatuře se také pro LČG setkáváme s označením litina s kompaktním grafitem. Anglickým ekvivalentem názvu je *Compacted Graphite Iron*, čili CGI.[32] LČG není zatím v české normě normalizována, proto se pro označení používá norma ASTM (CGI) nebo ÖGI (Österreich Giesserei Institut) – označení GGv. Zdroj [32] uvádí, že od roku 2002 je k dispozici německá norma VDG – Merkblatt W 50 tvořená dle evropského systému norem a je plánováno její schválení jako normy evropské.



Obr. 3: Vznik trhliny [26]

V současné době platné standardy pro litinu s červíkovitým grafitem jsou sumarizovány, viz (tab. 1).

Tab. 1: Přehled LČG standardů [4]

Země	Vydávající subjekt	Číslo	Rok
Mezinárodní	ISO	ISO 16 112	2006
Mezinárodní	SAE	J 1887	2002
Německo	VDG	W 50	2002
USA	ASTM	A 842 – 85	1997
Čína	JB	4403-87	1987
Čína	GB/T	26655	2011
Rumunsko	STAS	12443 – 86	1986

ISO značení zavádí pro litinu s červíkovitým grafitem označení GJV a to v pěti třídách, specifikovaných dle minimální pevnosti v tahu. Hodnoty mechanických vlastností se stanovují na odděleně litych vzorcích. Značení litiny s červíkovitým grafitem dle ISO je pak následovné: GJV 300(feritická), GJV 350, GJV 400, GJV 450(perlitická), GJV 500(legované).[4]

2 STRUKTURA LČG

Struktura litiny je tvořena kovovou hmotou a grafitem. LČG se řadí mezi litiny grafitické, které tuhnou dle stabilního diagramu Fe – C. Během tuhnutí litiny vzniká při eutektické reakci grafitické eutektikum (GE). Lupínkový grafit v litině obvykle vzniká bez jakýchkoliv metalurgických zásahů.[24] Pro získání červíkovitého grafitu je nutné provést modifikaci litiny.[24] Jednotlivé způsoby modifikace litiny, pro získání LČG, jsou následně rozepsány v kapitole 3.3 Způsoby modifikace LČG.

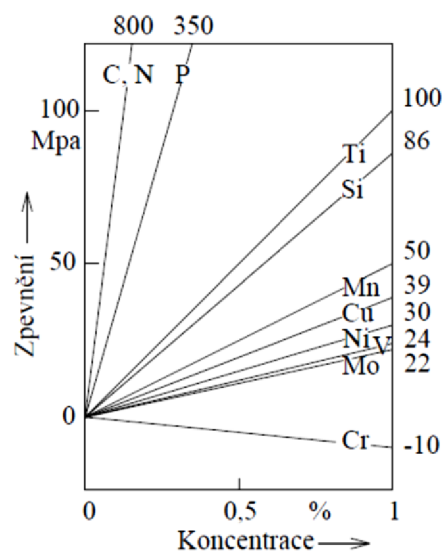
2.1 Základní kovová hmota LČG

Struktura základní kovové hmoty je závislá na chemickém složení litiny, rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí litiny (závislost na tloušťce stěny odlitku a materiálu formy), stavu krystalizačních zárodků a tepelném zpracování litiny.[24]

Kovová matrice LČG je primárně tvořena feritem, feritem a perlitem, anebo jen perlitem. U izotermicky kalených litin je tvořena ausferitem. Popřípadě u vysokolegované litiny je kovová matrice tvořena austenitem.[17]

- Ferit

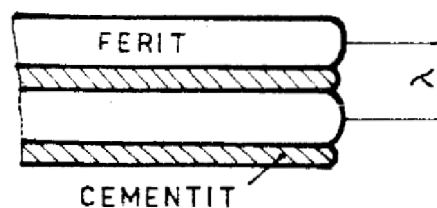
Literatury [23],[24],[32] uvádějí, že ferit je v litinách nositelem houževnatosti. Znakem feritu je také tvárnost a dobrá obrobiteľnosť. Jak je zmíněno v [24], ve srovnání s perlitem má ferit nižší pevnost. Vznik feritu je podporován pomalým ochlazováním odlitku. Tvoří se při eutektoidní transformaci austenitu, podle stabilního systému.[24] Mezi feritotvorné prvky se řadí křemík, hliník, titan.[24] Křemík rozpuštěný v základní kovové hmotě způsobuje substituční zpevnění feritu. Vliv křemíku a dalších prvků na substituční zpevnění feritu je znázorněn na (obr. 4). Z obrázku je patrné, že při stejné koncentraci prvku má výrazný vliv na zpevnění feritu titan, křemík následně molybden. Chrom působí opačným účinkem, zpevnění feritu snižuje. Významné zpevnění feritu má za následek také fosfor. Nicméně ve srovnání s velikostí atomů železa je velikost atomů fosforu menší, tím má fosfor mnohem vyšší schopnost difundovat.[19] Bližší poznatky ohledně vlivu fosforu na litinu s červíkovitým grafitem uvádí podkapitola: Vliv prvků na strukturu litiny.



Obr. 4: Vliv prvků na substituční zpevnění feritu [15]

- Perlit

[24] definuje perlit jako eutektoid vznikající rozpadem austenitu dle metastabilního systému. Perlit (obr. 5) se skládá z lamel cementitu a feritu. Lamely rostou paralelně vedle sebe. Ze zrna austenitu dochází obvykle ke vzniku několika zrn perlitu. Perlitická zrna mají obvykle rozdílnou orientaci lamel.

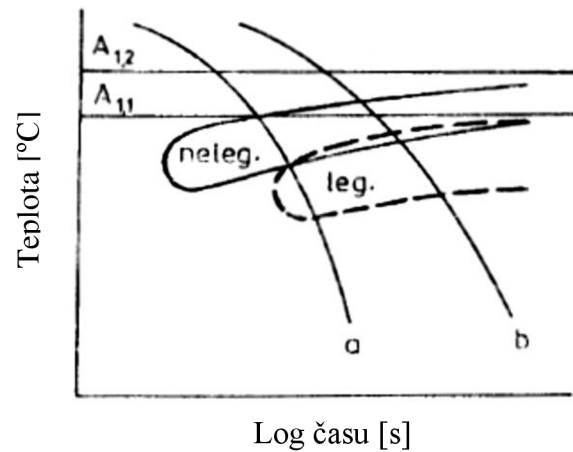


Obr. 5: Struktura perlitu [24]

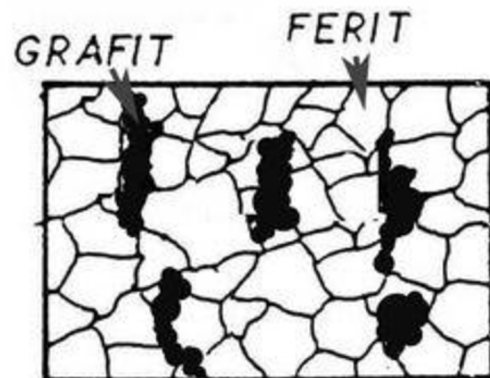
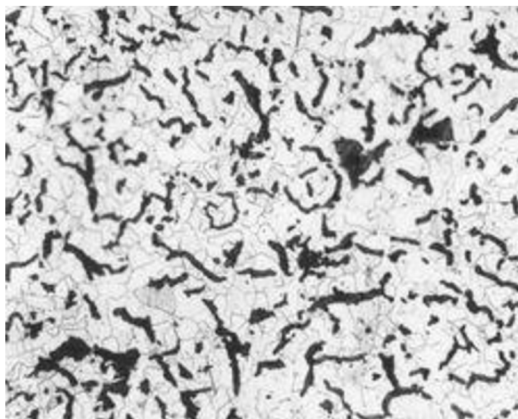
Perlit vyniká ve srovnání s feritem svou vyšší pevností, tvrdostí a odolností vůči opotřebení.[24] Charakteristické pro perlit je, že v litinách je nositelem pevnosti a tvrdosti. Literatura [24] také uvádí, charakteristické hodnoty pevnosti v tahu perlitu a tvrdost perlitu ($R_m = 800 \text{ Mpa}$ a $HB = 280$). Nepříznivými vlastnostmi perlitu jsou horší plastické vlastnosti a obrobiteľnosť. Mezi perlitotvorné prvky se převážně řadí: Mn, Cu, Ni, Sn, Sb, Cr, V, W a B.[24]

Pomocí perlitotvorných prvků je možné získat perlitickou strukturu i v odlitcích s vyšší tloušťkou stěny, i za předpokladu pomalejšího ochlazování odlitku. Podle (obr. 6) je názorně vidět, že dochází k posouvání rozpadových křivek v diagramu ARA k delším časům.[24]

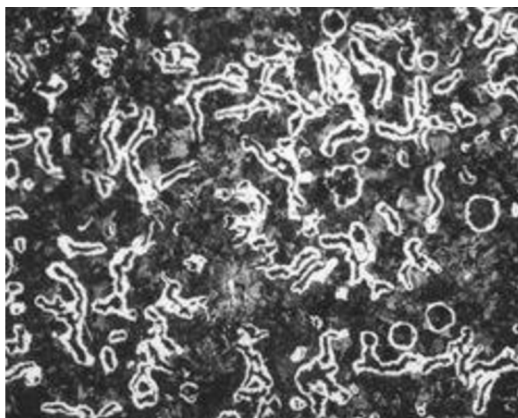
Pro názorné doplnění informací, na obrázcích (obr. 7, 8 a 9) jsou vyobrazeny litiny s červíkovitým grafitem s matricí feritickou, perlitickou a matricí tvořenou feriticko – perlitickou strukturou.



Obr. 6: Vliv perlitotvorných prvků na tvar diagramu ARA [24]



Obr. 7: Litina s červíkovitým grafitem s feritickou matricí [21]



Obr. 8: Litina s červíkovitým grafitem s perlitickou matricí [21]



Obr. 9: Litina s červíkovitým grafitem s feriticko - perlitickou matricí [21]

- Austenit

Charakteristickou vlastností austenitu je jeho dobrá tažnost. Austenit je poměrně měkký a dále také houževnatý, odolný vůči korozi, paramagnetický. Za normálních teplot se austenit ve struktuře vyskytuje pouze v legovaných litinách a to převážně legovaných niklem. Nikl, jako legura, je považován za přísadu s vyšší cenou[24],[32]. Výskyt austenitu ve struktuře je také možný po tepelném zpracování.[24] Své využití nacházejí austenitické litiny například v oblastech, kde je od odlitku vyžadována vyšší houževnatost, nebo korozivzdornost.[32] V případě aust. litiny, tvar vyloučeného grafitu příliš neovlivňuje fyzikální vlastnosti. Výrazně ovlivňuje vlastnosti mechanické. Znakem austenitických litin je také vysoká houževnatost za nízkých teplot. Tento jev souvisí s krystalickou mřížkou austenitu (FCC). Ta nevykazuje tranzitní chování, v porovnání u slitin s mřížkou BCC (feritické litiny).[32]

- Ausferit

Základní kovovou hmotu může také tvořit austeniticko-feritická struktura. Ta je představována jehlicovitým až lamelárním feritem, ve kterém se vyskytují nepravidelné útvary uhlíkem stabilizovaného austenitu.[23] Struktury se dosahuje ohřevem na austenitizační teplotu a následným rychlým ochlazením na teplotu izotermické výdrže.[32]

Izotermicky kalenou LČG zkoumá práce [29]. Zde je konstatováno, že při izotermickém kalení dochází ke snížení hodnot modulu pružnosti E , hodnoty meze pevnosti v tahu R_m se násobí. Jak uvádí literatura [29], litiny mají nejvyšší ekonomickou odolnost vůči teplotní únavě ETF.

$$ETF = EF/P = R_m \cdot \lambda / (E \cdot \alpha \cdot P) \text{ [W/m} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (2.1)$$

Kde:

R_m – mez pevnosti v tahu [Mpa],

EF – Eichelberfov faktor odolnosti k teplotní únavě [W/m],

P – cena [Kč],

λ – koeficient teplotní vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

α – koeficient teplotní roztažnosti [K^{-1}],

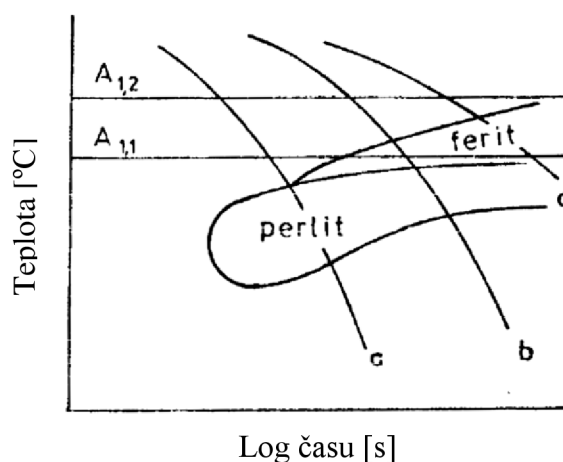
E – modul pružnosti v tahu [Mpa]

Z litin je LČG přikládána nejvyšší hodnota Eichelbergova faktoru.[29] Izotermickým kalením jsou hodnoty Eichelbergova faktoru LČG zvyšovány. Zmiňovaná práce konstatuje, že LČG se stává, z hlediska využití v oblasti odolnosti vůči teplotní únavě, ještě zajímavějším materiálem.[29]

- Vliv rychlosti ochlazování na strukturu litiny

Litiny jsou materiálem, který je na rychlost ochlazování velmi citlivý. Při návrhu chemického složení, či predikci vlastností v jednotlivých průřezích odlitku je nutné rychlost chladnutí zohlednit. Rychlé ochlazování podporuje tvorbu perlitu a také vznik zákalky.[24]

Pomocí diagramu ARA, jenž je znázorněn na (obr. 10), můžeme hodnotit vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu. Pomalé ochlazování popsané křivkou a, začíná transformací pod teplotou $A_{1,2}$ vylučováním feritu. Vzniklá struktura je čistě feritická, pokud transformace proběhne zcela v oblasti teplot $A_{1,2}$ a $A_{1,1}$. Při rychlejším průběhu ochlazování reprezentovaného křivkou b, začíná transformace vylučováním feritu, následně pod teplotou $A_{1,1}$ dochází ke vzniku perlitu. V tomto případě je struktura ferito-perlitická. Při dostačující rychlosti ochlazování vzniká struktura zcela perlitická. Tento průběh znázorňuje křivka c. Důsledkem je různá struktura a různé vlastnosti v tenkých a tlustých stěnách odlitku.[24]



Obr. 10: Vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu [24]

- Chemické složení litiny

Chemické složení litiny je nejčastěji posuzováno dle stupně eutektičnosti nebo pomocí uhlíkového ekvivalentu. Hodnocení chemického složení, posouzeného dle stupně eutektičnosti, zcela odpovídá hodnocení podle uhlíkového ekvivalentu.

Pro LČG je chemické složení voleno tak, aby litina dosahovala eutektického složení, případně byla lehce nadeutektická. Hodnoty uhlíkového ekvivalentu se pohybují přibližně v rozmezí $C_E = 4,2 - 4,4$. [32]

Tab. 2: Doporučené chemické složení pro LČG dle zdroje[24]

Prvek	C	Si	Mn	P	S
[%]	3,4 – 3,8	2,4 – 2,7	max. 0,6	max. 0,06	max. 0,02

Také zdroj [5], dodává typické hodnoty chemického složení pro LČG s 20% obsahem grafitu kuličkového. Dle mezinárodního značení ISO 16 112 se jedná o konkrétní typy, a to GJV 400 s přibližným obsahem perlitu 70% a GJV 450 s obsahem perlitu větším jak 90%.

Tab. 3: Doporučené chemické složení pro LČG dle zdroje[5]

Typ	Per.	C	Si	Mn	S	Mg	Cu	Sn
GJV 400	~70	3,6-3,8	2,1-2,5	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,3-0,6	0,03-0,05
GJV 450	>90	3,6-3,8	2,1-2,5	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,7-1,0	0,08-0,10

○ Stupeň eutektičnosti

Stupeň eutektičnosti definujeme jako poměr skutečného obsahu uhlíku k obsahu uhlíku odpovídajícímu eutektické koncentraci při daném obsahu křemíku a fosforu.[24]

$$S_E = \frac{C}{4,25 - 0,3 \cdot (Si + P)} \quad (2.1)$$

Kde:

- C – obsah uhlíku v litině [%],
- Si – obsah křemíku v litině [%],
- P – obsah fosforu v litině [%]

Pro hodnoty stupně eutektičnosti grafitických litin platí:[24]

$S_E < 1$ – litiny podeutektické,

$S_E = 1$ – litiny eutektické,

$S_E > 1$ – litiny nadeutektické.

○ Uhlíkový ekvivalent

Uhlíkový ekvivalent vyjadřuje souhrnně vliv uhlíku a ostatních prvků přítomných v litině. Účinek prvků je „ekvivalentní“ obsahu uhlíku. V tabulce (tab. 4) je znázorněn vliv 1% daného prvku na hodnotu uhlíkového ekvivalentu.[24]

Vzorec pro uhlíkový ekvivalent lze zapsat ve tvaru:

$$C_E = C + \sum m_i \cdot X_i \quad (2.1)$$

Kde:

- X_i – obsah prvků X [%],
- m_i – koeficient vlivu (ekvivalence) prvku X_i [-]

Tab. 4: Vliv 1% daného prvku na hodnotu uhlíkového ekvivalentu[24]

Prvek	P	Si	Al	Cu	Ni	Mn	Cr	V	Ti
m_i	+ 0,33	+ 0,32	+ 0,22	+ 0,07	+ 0,05	- 0,03	- 0,06	- 0,14	- 0,14

Dle velikosti koeficientu m_i a množství jednotlivých prvků v litině, má nejvýznamnější vliv na uhlíkový ekvivalent Si a P.[24]

Tudíž pro uhlíkový ekvivalent je zaveden vztah:

$$C_E = C + 1/3 \cdot (Si+P) \quad (2.1)$$

Nebo se také používá varianta:

$$C_E = C + 0,3 \cdot (Si+P) \quad (2.1)$$

Pro hodnoty uhlíkového ekvivalentu grafitických litin platí:[24]

$C_E < 4,25$ – litiny podeutektické,

$C_E = 4,25$ – litiny eutektické,

$C_E > 4,25$ – litiny nadeutektické.

- Vliv prvků na strukturu litiny
 - Uhlík

Uhlík, který je během tuhnutí vyloučen ve formě eutektika snižuje objemové smrštění během tuhnutí, čili kompenzuje stahování, ke kterému dochází při krystalizaci austenitu. Z pohledu slévárenské technologie je vhodné, aby litina byla, pokud je to možno, eutektická. Mezi prvky zvyšující aktivitu uhlíku řadíme Al, Cu, Ni, P, S, Si. Prvky jako Cr či Mn aktivitu uhlíku snižují.[32]

Uhlík podporuje grafitizaci. Čím vyšší je obsah uhlíku, tím větší je grafitická expanze. Přičemž dochází k snížení celkové pórovitosti odlitku.[24]

- Křemík

Spolu s uhlíkem má křemík největší vliv na strukturu a vlastnosti litiny. Křemík během tuhnutí značně podporuje grafitizaci a je nejvýznamnějším grafitizačním prvkem v litinách. Při eutektoidní přeměně podporuje vznik feritu.

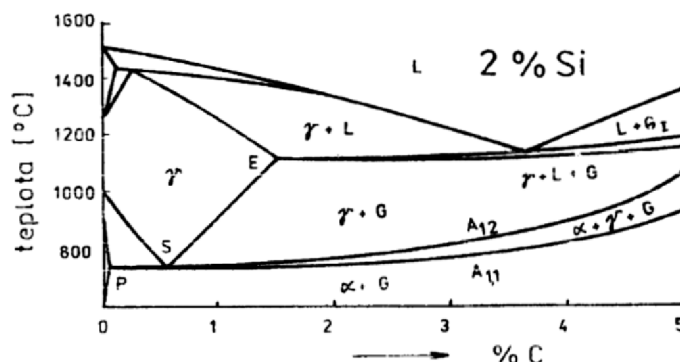
Křemík zvyšuje tvrdost feritu, viz (obr 4).[15] Příčinou růstu tvrdosti feritu je jeho substituční zpevnění, zmíněné v kapitole 2.1 Základní kovová hmota LČG. Zároveň křemík snižuje tažnost a rázovou houževnatost feritu. Z významných vlivů na mechanické vlastnosti je podstatný feritotvorný účinek křemíku. Větší podíl feritu ve struktuře litiny zapříčiňuje snížení její pevnosti a tvrdosti.[24]

Přítomnost křemíku má výrazný vliv na polohu eutektické a eutektoidní přímky v stabilním, tak i metastabilním diagramu slitin železa s uhlíkem [23], viz diagram (obr. 11). Jak je z rovnovážného diagramu patrné, obsah působení 2% křemíku v litině má za následek rozšíření eutektické teploty do pásma ohraničeného rozmezím teplot $T_{ES} - T_{EM}$. V tomto pásmu je v rovnováze tavenina, austenit a grafit [24]. Vlivem křemíku dochází také k rozšíření eutektoidní teploty (rozmezí teplot $A_{1,1} - A_{1,2}$) v této oblasti vedle sebe existují ferit, austenit a grafit [24]. Křemík způsobuje posunutí eutektického a eutektoidního bodu k nižším koncentracím. Dle (obr. 11) je názorně vidět, že dochází k posunu eutektického bodu směrem doleva na hodnotu přibližně 3,6%.

Pro doplnění informací týkajících se křemíku: U litin u kterých je požadována vyšší houževnatost při nízkých teplotách, je nutné udržovat obsah křemíku okolo 2 hmot %. Křemík má vliv na zvýšení tranzitní teploty litiny, což vede k značnému snížení její houževnatosti, již při testech provedených za teploty -20°C .[32]

- Mangan

Z běžných prvků obsažených v litině má mangan nejvyšší afinitu k síře. Tato vlastnost je vhodná pro litiny s lupínkovým grafitem, kde je funkcí manganu vázání síry.[32] Po ztuhnutí litiny s lupínkovým grafitem je prakticky veškerá síra vázána na mangan a to ve formě MnS . Pro litiny s kuličkovým či červíkovitým grafitem je odsířovací funkce manganu převzata hořčíkem. Příčinou je malý obsah síry, tudíž mangan nemá z hlediska vyloučení síry ve formě sulfidů význam.[24]



Obr. 11: Rovnovážený diagram Fe – C – 2%Si [23]

- Fosfor

Fosfor při tuhnutí značně segreguje do zbylé taveniny. Na hranicích zrn tvoří fosfidické síťoví. Takzvaný steadit [24]. Takto vzniklý steadit má nepříznivý vliv na lomovou houževnatost a tažnost litiny.[24] Přítomnost steaditu zapříčiňuje snížení dynamických vlastností litiny. Další charakteristické znaky steaditu jsou vysoká tvrdost a velká křehkost. Jak dále doplňuje [24], steadit se ve struktuře vyskytuje již při obsah fosforu cca nad 0,1%. Teplota tuhnutí steaditu je kolem 950°C. Tento fakt má za následek značné zlepšení zabíhavosti litiny [9]. Jelikož je velká část odlitků z LČG mechanicky namáhaných, snížení tažnosti a zvýšení křehkosti litiny vlivem steaditu je nepřijatelné. Tudíž je doporučováno sledovat obsah fosforu v LČG a nedovolit jeho přesáhnutí nad maximální přípustné hodnoty udávané dle doporučeného chemického složení pro LČG, viz (tab. 2).

- Síra

Síra má velký koeficient odmíšení, je téměř nerozpustná v austenitu, cementitu i grafitu, při tuhnutí obohacuje zbytkovou taveninu.[9] Jelikož má síra vysokou afinitu k manganu, lze kompenzovat její negativní vlastnosti přidáním Mn do taveniny. Reakcí manganu a síry vzniká MnS.[32] Vznik sulfidů MgS zapříčiňuje vznik sekundární strusky, která ovlivňuje kvalitu a čistotu kovu v odlitku.[24] Dále [24] uvádí že, síra je silný karbidotvorný prvek a její přítomnost v podobě MnS zhoršuje slévárenské vlastnosti, příkladem je negativní vliv na zabíhavost litiny. Z těchto důvodů je S považována za negativní prvek v LČG. Nicméně i přes všechny problémy, které síra způsobuje je její role, z pohledu nukleace zárodků grafitu, velice důležitá.[24] Obsah síry dostačující pro nukleaci je několik setin procenta. Extrémně nízký obsah síry způsobuje zhoršenou grafitisační schopnost litiny.[24] Optimálně zvolený obsah síry v litině, má za následek zvýšení počtu grafitizačních zárodků a tím usnadnění růstu grafitu.[24]

Jak je zmíněno o odstavci výše, odsiřovací schopnost manganu v LČG přejímá hořčík. Kromě zmiňovaných sulfidů MnS, vytváří síra také sulfidy FeS. Dle [9] je jejich výskyt opět nežádoucí. Jsou příčinou snížení pevnosti a mechanických vlastností, zvýšení křehkosti litiny za tepla. Výskyt FeS je zde jen informativní, v litině s červíkovitým grafitem tvoří síra primárně MnS.

- Měď

V literatuře [32] je měď popisována jako perlitotvorný prvek lehce podporující grafitizaci, který při vyšších koncentracích, nebo s kombinací s dalšími legujícími prvky posiluje vznik austenitické struktury. V téže literatuře je také zmíněno, že při obsahu stopových prvků v litině, zejména (Ti a Sn), je možno litinu legovat 1 až 2% mědi to bez vlivu na morfologii grafitu.

- Nikl

Nik lze charakterizovat jako je austenitotvorný prvek. Nikl má vliv na snížení eutektoidní teploty. Podle [32], přísada niklu zvyšuje eutektickou teplotu a současně rozšiřuje oblast vylučování grafitu. V Litině obsahující vyšší množství niklu pomaleji odeznívá modifikační účinek hořčíku. Tento účinek niklu je dán snížením aktivity a zvýšením rozpustnosti hořčíku v niklových litinách.[32]

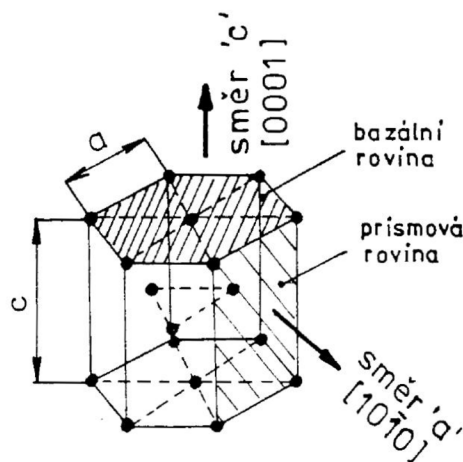
- Hořčík

Při modifikaci grafitu je v litinách zásadně využíván hořčík. Hořčík má také velkou afinitu k síře a kyslíku. Pro doplnění, je obsah hořčíku ve slévárnách stanovován spektrální analýzou. Technologie modifikace a vliv hořčíku na LČG je následně popsán v kapitole 3.3.1. Modifikace hořčíkem.[32]

2.2 Grafit

Grafit je krystalickou formou uhlíku. Charakteristickým znakem grafitu je dobrá tepelná vodivost, nízká pevnost a tvárnost. Hustota grafitu dosahuje hodnoty $2220 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Poloměr atomu grafitu je $0,077 \text{ nm}$. [24]

Grafit krystalizuje v hexagonální soustavě. Parametry mřížky jsou $0,264 \text{ nm}$, $0,691 \text{ nm}$. Základny mřížky grafitu se nazývají bazální roviny. Dle obrázku (obr. 12) růst grafitu, ve směru bazální roviny, je značen směrem „a“ $[10\bar{1}0]$. Směr tvorby nových bazálních rovin je značen směrem „c“ $[0001]$. [24]



Obr. 12: Krystalická mřížka grafitu [24]

- Nukleace grafitu

Grafitisace probíhá mechanismem heterogenní nukleace [24] a její princip je vysvětlován velkým množstvím teorií. Literatura [24], v které je nukleace grafitu velice názorně popsána vysvětluje, že rozhodující roli při nukleaci grafitu mají zárodky na bázi sulfidů, oxidů nebo karbidů. Dále zdroj sumarizuje požadavky, které grafitisační zárodky musí splňovat:

- Při teplotě tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a také v tavenině nerozpustné,
- Mají mikroskopickou velikost,
- Krystalizační účinek působí na žádoucí fázi (grafit, nikoliv cementit)

V každé litině je tvořeno určité množství zárodků z běžně přítomných prvků. Vyšší počtem jsou zastoupeny ty zárodky, které jsou termodynamicky nejstabilnější. [24] Zvýšení počtu grafitisačních zárodků je dosaženo očkovaním. O vlivu očkování je bakalářské práci blíže pojednáváno v kapitole 3.4 očkování LČG.

- Růst grafitického eutektika

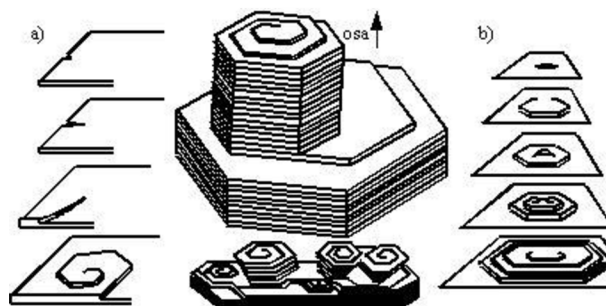
Eutektický grafit je v litinách zastoupen v řadě morfologických podob. Základními typy podob grafitu jsou, grafit lupínkový a kuličkový. Grafit červíkovitý vzniká mezi těmito základními morfologickými formami grafitu. [24]

Morfologie grafitu je výrazně ovlivňována dvěma hlavními vlivy, které jsou: [24]

- Přítomnost modifikačních prvků, nečistot v tavenině a jejich vliv na růst fází,
- Poměr G/R. Kde G charakterizuje velikost teplotního gradientu na mezifázovém rozhraní a R je rychlost růstu mezifázového rozhraní.

Jak je v konkrétní publikaci [24] uvedeno, každý tvar grafitu má svou vlastní teplotu růstu, která odpovídá určité rychlosti ochlazování a chemickému složení.

Růst grafitu je možný, jak ve směru osy „a“ [1010], tak ve směru osy „c“ [0001].[21] Mechanismus růstu grafitu znázorňuje (obr. 13). Z obrázku je patrné, že grafit může růst mechanismem spirálovým nebo pyramidovým.



Obr. 13: Mechanismus růstu grafitu a) spirálový; b) pyramidový [21]

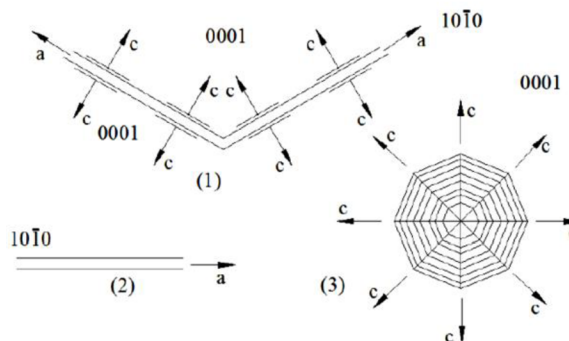
Dále [24] doplňuje, že změna morfologie grafitu souvisí se segregací prvků z tuhajícího kovu do zbývající taveniny a s jejich vlivem na energii mezifázového rozhraní. Jinak řečeno, změna povrchového napětí mezi taveninou a grafitem ovlivňuje energetickou náročnost růstu grafitu v jednotlivých krystalografických směrech. Tím je určen přednostní směr růstu grafitu.

Z hlediska vlivu na tvar grafitu publikace [24] rozděluje (i vyjmenovává) prvky na globulitisační a antiglobulitisační. Mezi globulitisační prvky se řadí: Na, K, Mg, Ca, Sr, Ba, Ce. Antiglobulitisační prvky tvoří: Sb, Pb, Bi, Ti, O, S a další.

Účinek obou skupin prvků (globulitisační, antiglobulitisační) se dá vzájemně kompenzovat, příčinou je možnost jejich vzájemné vazby.[24] Tato vlastnost je využita také při výrobě litiny s červíkovitým grafitem, kdy přítomnost vlivu hořčíku je kompenzována přidáním například titanu.

Charakteristickou vlastností prvků, které ovlivňují růst grafitu je nízká hodnota rozdělovacího koeficientu k_0 . [24] Důsledkem této vlastnosti je značná segregace, prvků ovlivňujících růst grafitu, na mezifázovém rozhraní. [24]

Rys globulitisačních prvků je jejich velká afinita k síře, kyslíku a uhlíku.[24] Antiglobulitisační prvky síra, kyslík, olovo a další z řady uvedených antiglob. prvků jsou povrchově aktivní. Výsledkem toho je, že snižují povrchového napětí na rozhraní mezi grafitem a taveninou. Antiglobulitisační prvky jsou absorbovány především na prizmových rovinách a tím usnadňují růst grafitu ve směru „a“ [1010] [24]. V opačném případě, přidáním globulitisačních prvků dojde k jejich reakci se sírou a kyslíkem v tavenině. Výsledkem je zhoršení energetické náročnosti pro růst grafitu ve směru „a“ [1010]. [24] Pro doplnění, směry růstu grafitu lupínkového, i kuličkového jsou pro porovnání s červíkovitým grafitem zobrazeny na obrázku (obr. 14).



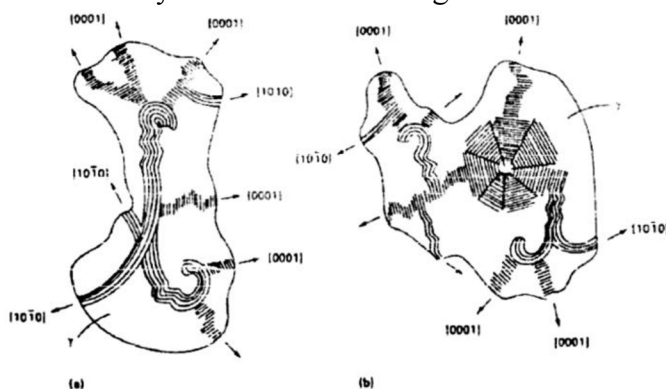
Obr. 14: Schéma růstu: 1) červíkovitého; 2) lupínkového; 3) kuličkového grafitu [18]

2.2.1 Červíkovitý grafit

[16] předkládá pohled na vznik červíkovitého grafitu. Zde se uvádí, že podle posledních názorů je červíkovitý typ grafitu odvozován přímo od grafitu zrnitého, představuje vlastně spojité uspořádání kuliček. Charakteristický tvar červíkovitého grafitu je v publikaci vysvětlován ztrátou bezprostředního kontaktu grafitu s taveninou v určité fázi jeho tvorby a dalším růstem grafitových útvarů ke směru krystalografické osy „c“ $[0001]$ prostřednictvím difúze uhlíku před obklopující austenit.

Názor na vznik červíkovitého grafitu doplňuje i [18]. I v tomto zdroji autor tvrdí, že červíkovitý grafit primárně tuhne v zrnité – globulární (kuličkové) formě. Následně dodává, že LČG pravděpodobně vzniká z rozpadlých grafitových globulí nebo jejich shluků a roste určitým směrem v přímém styku s taveninou výstupem do prostředí, kde již není obklopen austenitem. Podle [18] je dále červíkovitý grafit formován především postupem eutektické krystalizace a je vyvinut jako propojený segment s austenitickou maticí.

Další zmínka o vzniku červíkovitého grafitu je uvedena v [24]. Podle ní červíkovitý grafit vzniká za podmínek jakési rovnováhy mezi obsahem globulitisačních a antiglobulitisačních prvků. Svůj pohled na vznik červíkovitého grafitu dále rozvádí tak, že růst červíkovitého grafitu probíhá částečně podle mechanismu růstu kuličkovitého grafitu, částečně grafitu lupínkového, přitom se může vycházet jak od grafitu lupínkového, tak i kuličkového. Tento princip je zobrazen na schématu (obr. 15). Morfologie červíkovitého grafitu se pak více blíží jedné, či druhé formě grafitu.



Obr. 15: Růst červíkovitého grafitu
a) z lamelární formy; b) z kuličkové formy [24]

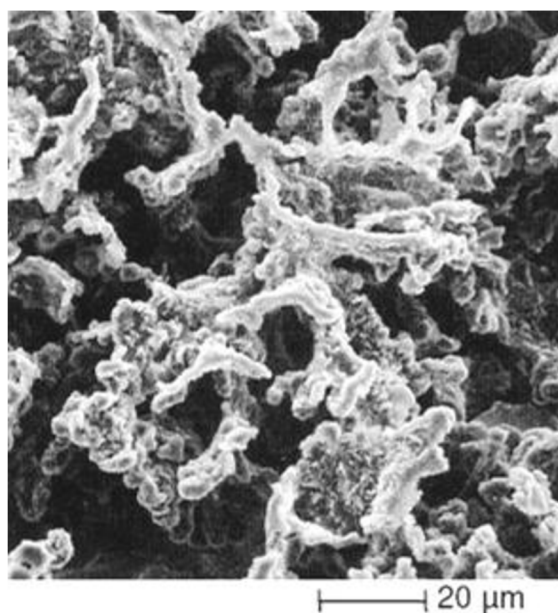
Vzniklý tvar červíkovitého grafitu může také vypadat a být hodnocen podle sestavených etalonů, viz (obr. 16). [21]



Obr. 16: Etalony hodnotící červíkovitý grafit [21]

Normou ČSN EN ISO 945 je červíkovitý grafit hodnocen třídou III. Taktéž rozložení grafitu ve struktuře je hodnoceno dle normy ČSN EN ISO 945 a to v pěti etalonových řadách. Optimální rozložení grafitu ve struktuře odlitku a to z hlediska vlastností litiny je rozložení typu A, tj. rovnoměrné rozložení. [24]

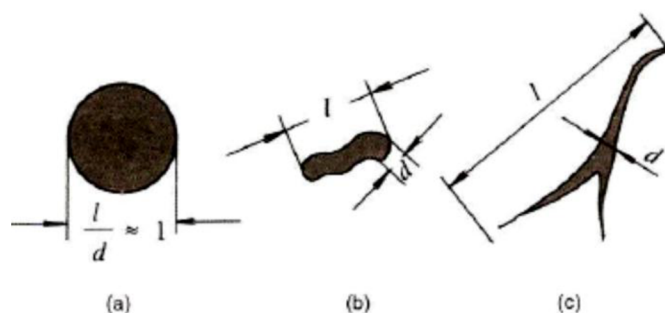
Charakteristickým znakem pro červíkovitý grafit (obr. 17) je jeho jemná stavba, která je vzájemně propojena a tvoří široce rozsáhlou strukturu. Tloušťka červíkovitého grafitu je asi 5 – 10krát menší než jeho délka. [27]



Obr. 17: Červíkovitý grafit, zaznamenaný elektronovým mikroskopem [35]

Hodnocení kompaktnosti grafitu se stanovuje dle poměru d/l . Nekompaktnost je reprezentována převrácenou hodnotou poměru d/l . Nejkompaktnější podoba grafitu, tj. tvar kuličky má hodnotu poměru rovnu jedné. S nekompaktností tvaru hodnota poměru roste. Jednotlivé tvary jsou uvedeny dle (obr. 18). [12]

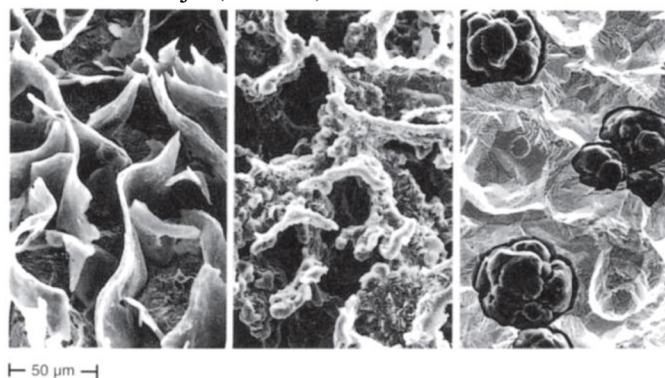
- a) Kuličkový grafit: $l/d = 1$,
- b) Červíkovitý grafit: $l/d = 2 - 10$,
- c) Lupínkový grafit: $l/d \geq 50$



Obr. 18: Tvar grafitu, poměr délka/ šířka [12]

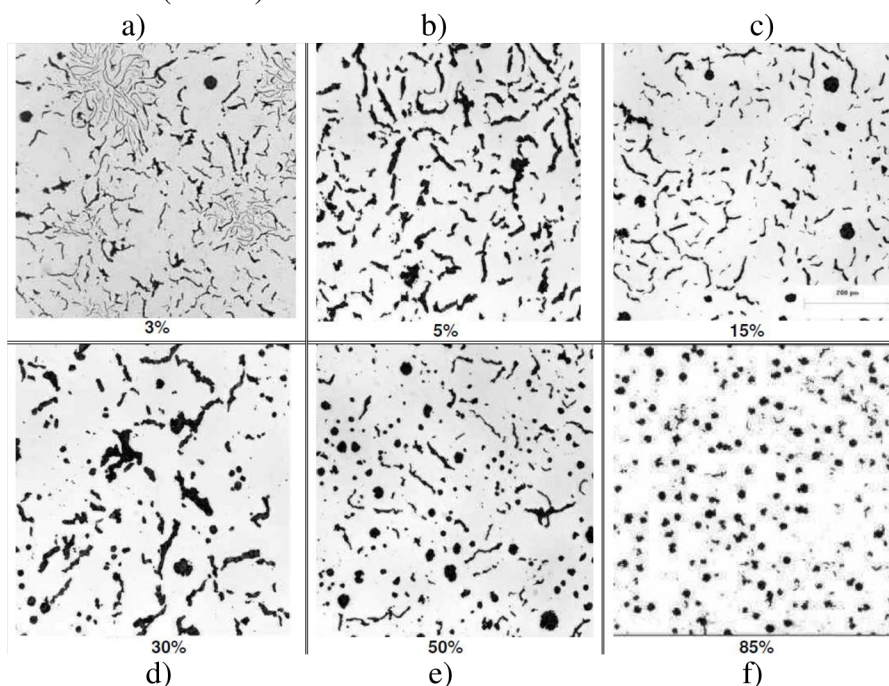
Výskyt lupínkového grafitu je ve struktuře LČG neakceptovatelný a to z důvodu výrazného snížení mechanických vlastností LČG (zhoršení tažnosti, houževnatosti). Zastoupení kuličkového grafitu se ve struktuře LČG připouští. Přítomností LKG dochází ke zvýšení pevnosti a tažnosti LČG. [16] Výrazné množství kuliček ve struktuře LČG je naopak příčinou snížení tepelné vodivosti litiny a zvýšení sklonu ke vzniku staženin. [32]

Červíkovitý grafit působí, ve srovnání s lupínkovým grafitem, na primární kovovou hmotu menšími vrubovými účinky. Tvar grafitu je oproti LLG je kratší, tlustší a má výrazně zakulacené konce. Při působení vnějšího namáhání na odlitek dochází v oblastech grafitu k místním koncentracím napětí, viz (obr. 3). Tyto hodnoty napětí mohou dle tvaru grafitu (10 až 20) krát převýšit jmenovitá napětí. [21],[26] Příkladem srovnání tvarů grafitu pro jednotlivé typy litin znázorňuje (obr. 19).



Obr. 19: Tvary grafitů: lupínkový, červíkovitý, kuličkový [33]

Typy jednotlivých struktur červíkovitého grafitu v litinové tavenině v závislosti na množství zbytkového hořčíku a to v rozmezí 0,008% až 0,028% také předkládá [18]. Zobrazení struktur viz (obr 20).



Obr. 20: Vliv zbytkového hořčíku na tvar a množství grafitu v litině [18]

Struktura a) se zbytkovým obsahem cca 0,008% Mg je tvořena převážně lupínkovým grafitem, který přechází v LČG jen ojediněle, LČG je zastoupeno do 3%. Struktura f) tvořená zbytkovým obsahem cca 0,028% Mg obsahuje 80 až 90% grafitu kuličkového. LČG tvoří obsah maximálně z 10%. Literatura udává, že rozmezí pro kvalitní litinu s červíkovitým grafitem je v rozmezí 0,009 až 0,012%. Bližší informace ohledně výroby a problémů s dodržením takto úzké tolerance zbytkového Mg uvádí kapitola 3.

3 TECHNOLOGIE VÝROBY LČG

Získání červíkovitého grafitu lze dosáhnout různými způsoby výroby. Vždy je hlavním a určujícím kritériem výrobní jistota a také stabilní kvalita při nízkých výrobních nákladech. Podstatou technologie výroby litiny s červíkovitým grafitem je modifikační zpracování litiny a grafitizační očkování. Prostředky určené k modifikaci musí zajistit vznik červíkovitého grafitu.[20] Pro dosažení jemnějšího vyloučeného grafitu a také pro zabránění tvorby cementitu a výskytu zákalky v kritických místech odlitku se provádí zmíněné očkování[20], následně popsané v kapitole 3.4 Očkování LČG.

Použití vsázkových surovin pro tavbu LČG je prakticky stejné jako u litiny s kuličkovým grafitem.[16] Tentýž zdroj také udává, že ve výchozí tavenině je nezbytné sledovat obsah síry, fosforu a manganu. Vliv působení zmíněných prvků na litinu byl již popsán v kapitole: vliv prvků na strukturu litiny. Pro doplnění informací, [16] shrnuje požadavky na výchozí taveninu, viz (tab. 5).

Tab. 5: Požadavky na výchozí taveninu [16]

Prvek	S	P	Mn	Karbidotvor. prvky
%	max. 0,015	max. 0,05	max. 0,3	max. 0,1

Dodatek k uvedené tabulce: Jak uvádí zmíněný zdroj [16], hodnota max. 0,3 % Mn je vztahována pro LČG s požadavkem na feritickou strukturu. Pro dosažení perlitické struktury LČG je možné použít legování Mn až do koncentrace 0,6% [32]. Hodnota 0,1% reprezentuje celkové zastoupení karbidotvorných prvků ve výchozí tavenině.

Neméně důležitým kritériem pro volbu použitých surovin je také volba tavícího agregátu.

3.1 Vsázkové suroviny

Při sestavování vsázky, je nezbytné uvažovat se změnou obsahu křemíku během zpracování taveniny. Křemík je do taveniny také dodáván jak z modifikátoru, tak i z očkovačla.[32] V porovnání s množstvím modifikátoru, kterého je oproti LKG použito v menší míře, nevytváří vyšší obsah křemíku v kovové vsázce LČG tak velké potíže, jako u LKG.[32] Bližší informace týkající se vlivu křemíku na litinu s červíkovitým grafitem opět uvádí kapitola: vliv prvků na strukturu litiny.

- Surové železo

Pro výrobu LČG je vhodné používat surová železa s vyšší čistotou. Běžně využívaná surová železa pro výrobu LLG nevyhovují pro svůj vyšší obsah Mn, P a nečistot.[24]

Další možnou variantou je aplikace speciálních surových želez, známých pod obchodními názvy jako SOREL, KUGRA, DUCTIL aj. Jedná se o slitiny Fe – C – Si s minimálním obsahem dalších prvků. Vyznačují se vyšší cenou a jejich užití nachází místo v metalurgicky náročných případech.[24] Příkladem použití surového železa SOREL o chem. složení (viz tab. 6), při výrobě litiny s červíkovitým grafitem uvádí literatura [17]. Cíl výzkumu, který proběhl na FS TU v Liberci, katedře strojírenské technologie spočíval ve výrobě tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovitým grafitem.

Tab. 6: Chemická složení materiálu SOREL[17]

Obsah prvků [%]						
Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni
94,60	4,260	0,120	0,04	0,022	0,0730	0,007

- Ocelový odpad

Při využívání ocelového odpadu, jako vsázkové suroviny, je opět nutné sledovat obsah síry a fosforu. Hodnoty obsahů těchto prvků musí být výrobcí litiny známy. To vyžaduje pečlivé třídění ocelového odpadu, čímž se snižuje vnášení dalších škodlivých stopových prvků a plynů[24]. Nežádoucími prvky jsou dále olovo, bismut, kadmium nebo antimon.[32] Za kvalitní vsázkový materiál je považován mimo jiné hlubokotažný plech.[24,][36]. Možnost využití hlubokotažného plechu je zmíněna i v [36]. Zde je uvedeno, že příčina vzniku nežádoucích vměstků v litině je také podmíněna použitím kvalitního vsázkového materiálu s minimálním obsahem vměstků. Příkladem tohoto materiálu je právě hlubokotažný plech.

- Vratný materiál

Vratný materiál je označován za technologický odpad slévárny. Vratný materiál může být například tvořen odřezanými nálitky či vtokovými soustavami. U tohoto druhu vsázkové suroviny, pokud je dobře provedeno jeho třídění, známe chemické složení.

Množství vratu bývá však limitováno maximálním obsahem křemíku a to v případě, kdy se modifikuje předslitinami na bázi Fe – Si – Mg. Stejně jak u ocelového odpadu je nezbytné, věnovat zvýšenou pozornost pečlivému třídění. Příkladem třídění vratného materiálu je třídění vratu LKG různých značek. Ty se liší obsahem perlitotvorných prvků.[24]

- Litinový odpad

Z důvodu nejistého složení se obvykle litinový odpad nevyužívá. Je považován za nekvalitní vsázkovou surovinu, zapříčiňující vnášení nežádoucích prvků do taveniny.[24] Výčet těchto nežádoucích prvků, způsobující například vznik degenerovaných forem grafitu, byl již uveden v odstavci ocelový odpad.

3.2 Tavicí agregáty

Pro tavbu litiny s červíkovitým grafitem lze používat řadu agregátů. Literatury se shodují, že způsob tavení LČG je podobný jako tavení litiny s kuličkovým grafitem. Pro tavbu LKG, tak i pro LČG je vyžadováno splnění řady požadavků, jimiž jsou [24]:

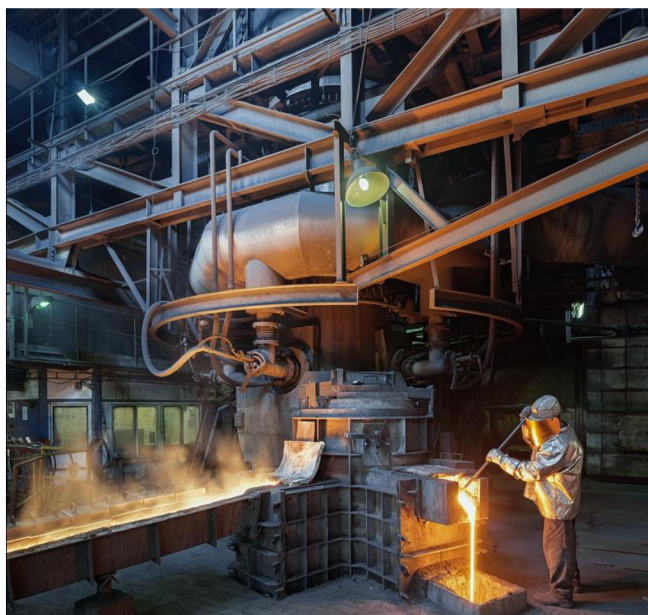
- Udržet optimální obsah síry v natavené litině, v rozsahu 0,005 až max. 0,015% S,
- Možnost kontroly kvality litiny, čili možnost přesného řízení dané metody výroby v každé fázi výroby litiny,
- Odpichová teplota v mezích 1480°C až 1540°C, teplota závisí na metodě modifikace a velikosti odlévaného odlitku,
- Relativně vysoký obsah uhlíku.

V bakalářské práci jsou porovnávány celkově čtyři tavicí agregáty, jimiž jsou kupolová pec, elektrická indukční pec, elektrická oblouková pec a rotační bubnová pec.

- Kupolová pec (KP)

Kuplovný jsou šachtové pece, které fungují jako protiproudý výměník tepla. [24] Jak konstatuje [24], kuplovný jsou stále ekonomicky nejvýhodnějším agregátem, který obvykle vyhovuje pro tavení LLG. Nevýhodou kuplové pece je dodržení chemického složení taveného kovu, těžkopádná změna složení taveného kovu a limitovaná teplota kovu [24].

Pro tavbu LČG se převážně používají horkovzdušné kuplovný. Studenovětrné kuplovný pro tavbu LČG příliš nevyhovují a to z pohledu požadované odpichové teploty taveniny. Provádí – li se tavba LČG na kuplovně, lze počítat s vyšším obsahem síry v tavenině. Síra je do taveniny vnášena, prostřednictvím koksu. Ten je dodáván společně s ostatními vsázkovými surovinami do kupolové pece. I přes tento fakt, mohou horkovzdušné kuplové pece nalézt své uplatnění při výrobě LČG a to při aplikaci metody modifikace připouštějící vyšší obsah síry. Tato metoda modifikace taveniny, je následně popsána v kapitole 3.3.5 Modifikace hořčíkem – cere + množství Ca a Al.



Obr. 21: Kuplovna slévárny HEUNISCH [28]

Příkladem využití kuplovný pro tavbu LČG, je horkovzdušná kuplovna slévárny HEUNISCH Brno, s.r.o., vyobrazena na (obr. 21). [3] Požadovaného obsahu síry v tavenině je zde dosahováno mimo jiné použitím nižšího podílu koksu do vsázky. V tomto konkrétním případě (slévárna HEUNISCH) dochází, po natavení vsázky, k homogenizaci taveniny. Případ slévárny HEUNISCH využívá k homogenizaci taveniny elektrické předpece. Kapacita tohoto konkrétního předpece je 35 tun. Zdroj [3] doplňuje, že teplota kovu v předpece se řídí v rozmezí 1480 -1500°C.

- Elektrické indukční pece (EIP)

Jsou nejčastěji využívaným tavicím agregátem při tavbě LKG.[24] Jak uvádí [24] využití elektrické indukční pece odstraňuje výše uváděné nevýhody kuplovný, [24] dále dodává, že v porovnání s kuplovnou jsou sice pořizovací a provozní náklady EIP vyšší.

Ve velké míře se slévárnách využívají středofrekvenční kelímkové pece. Uplatnění kelímkových pecí na síťovou frekvenci je nižší. Podle [32] je jejich nevýhodou rozsah řízení lázně při vyšších příkonech.

V porovnání s ostatními uváděnými tavicími agregáty se elektrická indukční pec jeví jako nejvhodnější varianta tavicího agregátu pro tavbu litiny s červíkovitým grafitem. Tento argument výrazně podporují následně vyjmenované přednosti EIP, které uvádí [10].

Přednostmi elektrické indukční pece (obr. 22) jsou:

- Velmi přesné chemické složení litiny,
- V porovnání s KP, možnost vyrábět litiny s velmi nízkým obsahem uhlíku,
- Operativní změna sortimentu,
- Přesné řízení parametrů tavení,
- Dobrá homogenita kovu,
- Vyhovující ekologické tavení,
- Nízký propal prvků,
- Snadné řízení tavby.

- Obloukové pece (EOP)

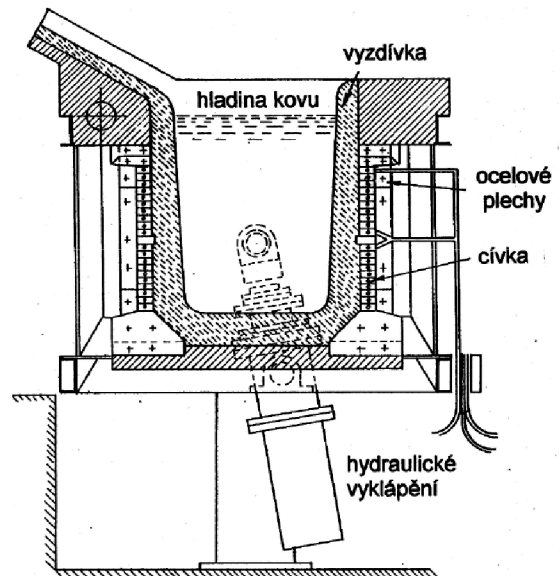
Jak uvádí literatura [32], využití EOP je vhodné při výrobě litiny s kuličkovým grafitem tak i litiny s červíkovitým grafitem. Jedním z důvodů vhodnosti EOP pro tavbu LČG nebo LKG je snadné odsíření taveniny. V zásaditých obloukových pecích je možné dosáhnout obsahu síry pod 0,010%. Taktéž je možné litinu i odfosfořit. Výhodou EOP je možnost použití méně kvalitní vsázky o velké kusovitosti. Z nevýhod lze jmenovat vyšší tavicí náklady a v porovnání s EIP nižší homogenitu taveniny během tavby.[24]

Elektrické obloukové pece své uplatnění nacházejí převážně ve slévárnách oceli. S ohledem na sortiment výroby sléváren oceli se neočekává jejich výrazná produkce odlitků z LČG, tudíž nenastává předpoklad, že bude EOP hojně využívána pro tavbu LČG.

- Rotační bubnové pece

Rotační bubnová pec je moderním tavicím agregátem [24], který také přichází v úvahu jako alternativa pro tavbu LČG.

Pozitivním znakem rotačních bubnových pecí jsou poměrně nízké investiční náklady a vysoká operativnost během tavby.[24] Podle [10] se rotační bubnové pece převážně používají v menších a středních slévárnách.



Obr. 22: Kelímková indukční pec [25]

3.3 Způsoby modifikace LČG

Dle literatury[20], taktéž i dle zdroje[24],[32], pro praktické zpracování roztavené litiny připadají v úvahu tři metody výroby LČG, jimiž jsou:

- Modifikace hořčíkem, neboli „nižší stupeň modifikace“,
- Zabránění dokonalé sferoidisace grafitu některým deglobulatisačním prvkem, čili kombinace modifikace pomocí Mg a deglobulitizačních prvků,
- Modifikace cerem nebo jiným KVZ, to je například využití směsného kovu, jenž obsahuje cca 50% Ce.

Kromě těchto tří uvedených metod zpracování roztavené litiny, práce dále předkládá možné dvě metody výroby LČG:

- Kombinace modifikace pomocí Mg a kovů vzácných zemin,
- Kombinace modifikace pomocí Mg, ceru a určitého množství Ca a Al.

3.3.1 Modifikace hořčíkem

Modifikace je proces ovlivňující tvar grafitu, při průběhu jeho krystalizace a to tím způsobem, že grafit lupínkový se mění působením modifikátoru na grafit kuličkový. Mechanismus modifikace lze shrnout do následujících názorů: [36]

- Při průběhu modifikace dochází k vypařování hořčíku, ten se dostává do atomárního stavu a je absorbován na plochách stávajícího krystalu grafitu. To zapříčiňuje změnu rychlosti růstu krystalových ploch,
- Při procesu modifikace dochází k desoxidaci, odsíření (na 1 hmotnostní dílu síry se váže 0,76 dílu hořčíku), odplynění taveniny – její rafinaci. Důsledkem je následná změna fyzikálních vlastností taveniny – ovlivnění růstu grafitu – změna (zvýšení) povrchového napětí na prismatických plochách. Následkem jsou zhoršené podmínky pro růst grafitu ve směru „a“. [24] Bližší informace uvádí kap. 2.2 Grafit.
- Dochází k změně nukleačních podmínek grafitizace.

Podmínkou, pro zpracování roztavené litiny modifikací, je velká grafitizační schopnost litiny. Důvodem je, že modifikace je rafinační proces, který omezuje grafitizační schopnost taveniny. Tedy chemické složení litiny musí mít vysoký obsah prvků podporující grafitizaci, čili C a Si.[36]

• Technologie modifikace hořčíkem

Do současné doby je patentováno na 200 způsobů přidávání modifikátoru do roztavené litiny. Požadavky na jistotu modifikace lze zahrnout do následujících bodů, jimiž jsou: Spolehlivost, hospodárnost, nízká nákladovost a ekologické podmínky.[36]

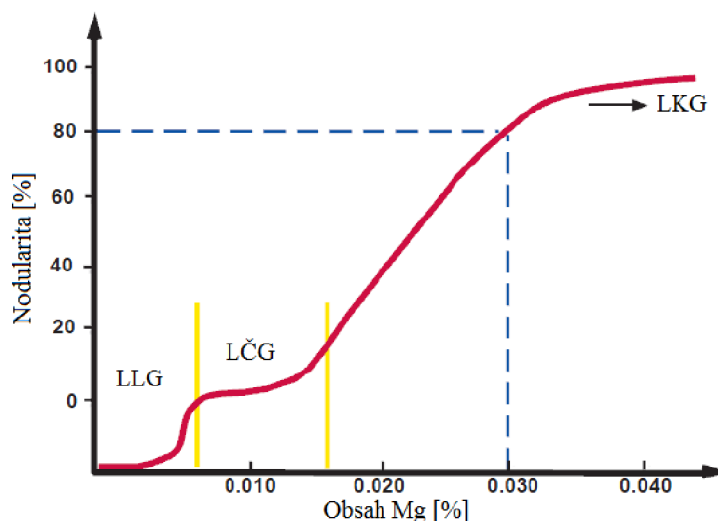
Hlavní způsoby metod modifikace:[36]

- Metoda polévací
- Metoda ponořovací
- Metoda konvertorová
- Kontinuální
- Plněnými profily

Postup modifikace LČG prostřednictvím hořčíku lze považovat za nejobtížnější metodu výroby. Dosáhnutí zbytkového obsahu hořčíku, při kterém vzniká červíkovitý grafit je dosti náročné.[24] Tato úzká tolerance zbytkového obsahu Mg pro vzniku LČG odpovídá přibližnému rozmezí hodnot 0,010 – 0,020%.[32] Podle zdroje[22] je úzká tolerance zbytkového Mg vyobrazena na obrázku (obr. 23) Podílu cca 50/50% lupínkového a červíkovitého grafitu je dosahováno při hodnotě zbytkového obsahu hořčíku cca 0,0085%.

Krystalizace grafitu kuličkového začíná krystalizovat při obsahu cca 0,012% Mg. Po dosažení hranice cca 0,03%Mg je grafit zcela vyloučen jako grafit kuličkový. Literatura uvádí[18], že pro LČG je vhodný obsah zbytkového hořčíku v rozmezí 0,009 % – 0,012 %. Porovnáme – li literaturu, [32],[24] hodnoty tohoto „procesního okna“ se mírně odlišují. Rozmezí 0,010 – 0,020% Mg dle literatury[32] a 0,015 – 0,025 % udává literatura[24].

Jako modifikátor lze využít hutnický čistý Mg (99,5%), nebo předslitiny Mg v kterých je použito koncentrace Mg od 5 – 35%Mg. S rostoucím obsahem Mg dochází k zvýšení reaktivnosti předslitiny. [36] Nosnými prvky jsou převážně Si, Ni, Cu, Fe – koncentrace těchto nosných prvků se pohybuje v rozmezí cca 40 – 55%. Doprovodné prvky představují Ca, Al, Ce, případně KVZ – koncentrace těchto prvků je do 7%.



Obr. 23: Závislost zbytkového Mg na množství kulič. grafitu [22]

Nicméně, jak bylo předznamenáno, dodržení takto úzké tolerance a řádné řízení obsahu hořčíku, které zabrání buď to podmodifikování, či naopak přemodifikování litiny je poměrně obtížné.[27]

Z nežádoucích charakteristik modifikace prostřednictvím hořčíku, lze zmínit značnější ztráty modifikačního účinku způsobené vypařováním hořčíku. Jeho teplota vypařování je 1107°C.[27] Následkem je velice značný vliv této metody na čas a teplotu při průběhu modifikace. Je vhodné, aby vyplouvání hořčíkových bublin bylo pomalé a klidné [27]. Toho se může dosáhnout například tím, že se modifikace litiny provádí za zvýšeného tlaku okolní atmosféry, která sníží bouřlivost reakce [24]. Do této varianty se řadí především modifikace ve sféroklávu (autoklávu) [24].

Dalším faktorem ovlivňujícím výsledek modifikace je výrazná závislost morfologie vyloučeného grafitu ve struktuře LČG na tloušťce stěny odlitku.[3] Ve zmíněné literatuře [3] je zhodnoceno, že podíl výskytu červíkovitého grafitu ve struktuře odlitku je závislý na obsahu Mg v odlitku, ale při dané koncentraci Mg je podíl červíkovitého grafitu silně závislý na tloušťce stěny odlitku. [3] dále dodává, že podíl kuličkového grafitu při konstantním chemickém složení roste s klesající tloušťkou stěny, čili se zvyšující se rychlostí ochlazování odlitku stoupá množství kuličkového grafitu ve struktuře. V této souvislosti, [17] konstatuje, že výroba tenkostěnného odlitku (tloušťka stěny pod 4mm) z litiny s červíkovitým grafitem je velice obtížná.

3.3.2 Modifikace hořčíkem + deglobulizační prvek

Poměrně delší dobu je známá možnost použití prvků, pro řízení vývoje tvaru grafitu. Mezi tyto prvky se řadí: Ti, Al, Sb, Sn, Bi případně N. Z uvedené řady je nejčastěji používaným prvkem titan a to pro svou vysokou účinnost. S odkazem na literaturu [27], vynalezení postupu modifikace hořčíkem s kombinací s deglobulizačního prvku je přisuzováno R. D. Schellengu.[27]

o Titan

Ve velmi malém množství je titan přítomen téměř ve všech litinách. Důvodem přítomnosti titanu je jeho zastoupení ve většině surových želez a řadě ocelí. Deglobulizační účinnost titanu závisí na tloušťce stěny odlitku.[18] Jak uvádí autor [18], u tenkostěnných odlitků, je hodnota obsahu titanu tolerována hodnotou 0,07%, při obsahu 0,02% u tlustostěnných odlitků, může titan působit destruktivně na tvar grafitu. Dále se autor zmiňuje, že je všeobecně doporučováno, aby hodnota obsahu titanu u tvárných litin nepřekračovala hodnotu 0,035%.

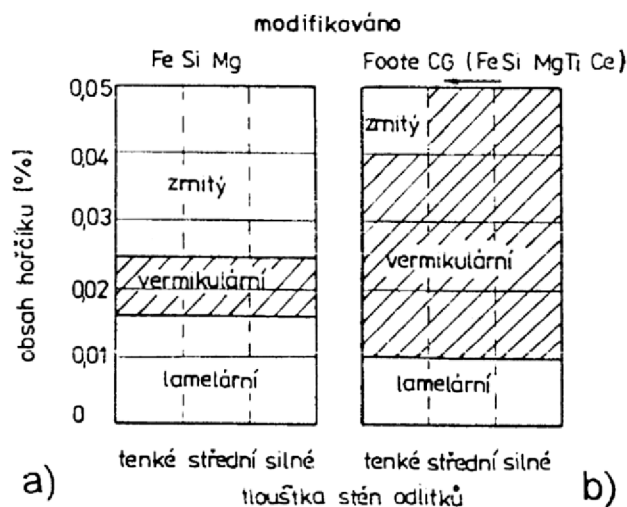
Zobrazení vlivu modifikační předslitiny obsahující titan, na tvorbu litiny s červíkovitým grafitem, je zobrazen na (obr. 24).[24] Dle zdroje [18], účinnost titanu je definována jako, paralýza účinku hořčíku na růst zrnitého grafitu a příspěví k vyloučení červíkovitého grafitu.

Modifikace taveniny probíhá podobně jako u LKG přísadou Mg tak, aby zbytkové množství hořčíku činilo minimálně 0,035% (0,035 – 0,15%).[18] Daná literatura také uvádí, že zbytkový obsah Ti v tavenině by se měl pohybovat v rozmezí 0,08 až 0,15%.

Přidání titanu do lázně, ve formě FeTi, probíhá před modifikací. Množství by mělo odpovídat 0,15 – 0,3 % Ti.[24]

Druhou variantou, je přítomnost titanu v modifikačním přípravku. Takto použité modifikační prostředky obsahují cca 4 – 5% Mg; 8 – 10% Ti; 4 – 5,5% Ca; 1 – 1,5% Al; 0,2–0,35% Ce a 48 – 52% Si, zbytek obsahu tvoří Fe. Dodání slitiny je ve standardní velikosti, a to 2,5 až 30mm, teplota tavení předslitiny se pohybuje okolo hodnoty 1100°C.[27]

Množství použité předslitiny je definováno obsahem síry a modifikační teplotou. Při zpracování taveniny je nutné zajistit konstantní modifikační teplotu a omezit kolísání teploty.[27]

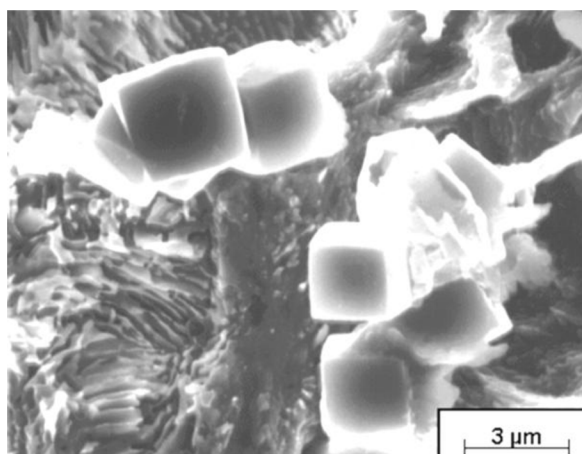


Obr. 24: a) modifikace Fe – Si – Mg; b) modifikace Mg – Ti – Ca – Ce [24]

Přestože metodu kombinace hořčíku a deglobulitizačního prvku (titanu) můžeme označit za celkem spolehlivou, nelze však opomenout řadu nevýhod, spojených právě s touto metodou:[18]

- Neustálé obohacování vratného materiálu titanem, či případě jinými prvky,
- Zvýšené riziko zmetkovitosti odlitků, z důvodu obsahů přechodového typu grafitu (D), karbidů, staženin apod.,
- Velmi zhoršená obrobiteľnosť, jejíž příčinou je přítomnost karbidů titanu.

Přítomností titanu v litině narůstá podíl feritu. Jak bylo popsáno v kapitole 2, ferit zapříčiňuje snížení tvrdosti litiny. Titan v litině tvoří velmi tvrdé karbidy TiC (Obr. 25), které při obrábění odlitku výrazně zvyšují opotřebení rezných nástrojů a snižují tak jejich životnost.[33] Vzniku karbidů nelze zcela zabránit, je však možné jejich přítomnost omezit [3]. Dle [3] je konstatováno, že obrobiteľnosť LČG lze považovat za přijatelnou, jestliže obsah titanu nepřesáhne koncentraci 0,02%. Tato hodnota koncentrace titanu je však podstatně níže, než je doporučené množství zbytkového obsahu titanu v tavenině. Pro připomenutí, podle zdroje [18], je doporučené rozmezí zbytkového obsahu titanu v tavenině 0,08 až 0,15%. Lze konstatovat, že použití titanu jako deglobulitizačního prvku při výrobě LČG bude mít za následek zhoršení obrobiteľnosti odlitku. Bližší informace ohledně obrobiteľnosti jsou uvedeny v kapitole 4.3 Technologické vlastnosti LČG.



Obr. 25: Karbid titanu ve struktuře litiny [33]

○ Dusík

Dalším prvkem z uvedené řady, který lze použít jako deglobulitizační prvek, je dusík. Podle [10] se dusík v litinách pohybuje v rozmezí 15 až 100 ppm (0,0015 až 0,01 %). Častěji než z atmosféry, přechází do litiny z pojivových formovacích směsí, které dusík obsahují.[10] Pro doplnění, dusík podporuje tvorbu karbidů a u tlustostěnných odlitků z LLG zjemňuje grafit.[10]

Aplikování metody využívající dusík je možné, avšak v praxi se tato metoda provádí velice zřídka.[9] Hranice nejmenšího množství dusíku obsaženého v tavenině je v rozmezí 0,008 – 0,009 %. Je – li obsah dusíku menší, než uvedená hranice, nemá dusík žádný vliv na strukturu. Zvýšený vliv dusíku na tvorbu LČG je uplatňován u silnostěnných odlitků. Obsah dusíku, obsaženého v tavenině, by se měl pohybovat v rozmezí 0,01 – 0,015% [9]. Při vyšším obsahu dusíku v tavenině, hrozí nebezpečí vzniku bodlin.[32] Hodnotu 0,015% považujeme za hraniční a to vzhledem k rozmezí obvyklého obsahu dusíku v litině, jak je ve výše uvedeném odstavci. Dodání dusíku do litiny se provádí, pomocí dusíkatého feromanganu nebo také pomocí dusíkatého vápna.[9]

3.3.3 Modifikace hořčíkem + kov vzácných zemin

Při této variantě modifikace LČG se předslitina skládá, stejně jako u dvou předešlých variant modifikace, z nosiče na bázi ferosilicia FeSi. Obsah hořčíku se pohybuje v rozmezí 5 až 6 %. Kovy vzácných zemin tvoří 5 až 6,5 %.[24]

Jak již bylo popsáno v kapitole 3.3.1 Modifikace hořčíkem. Samotný proces modifikace, pouze hořčíkem, je velmi náročný a to jak z hlediska teploty (rychlost ochlazování), tak z pohledu rychlosti vypařování hořčíku, či konstantních vlastností vstupních surovin. Efekt modifikace LČG ovlivňuje také samotná konstrukce odlitku (rozdíl velikosti tloušťek stěn má opět vliv na rychlost ochlazování odlitku).

Všechny tyto parametry, které ovlivňují výsledek modifikace, jsou i v této variantě zachovány a ve větší nebo menší míře ovlivňují výsledky dále uvedených variant modifikace LČG.

Přípustné rozmezí koncentrace Mg lze rozšířit použitím prvků z řady KVZ. Příkladem může být předslitina firmy Elkem, jejíž obchodní název je CompactMag. Chemické složení této předslitiny se skládá z: 44 – 48% Si; 5,0 – 6,0% Mg; 5,0 – 6,5 % KVZ; 1,8 – 2,3% Ca; max1,0% Al; zbytek obsahu tvoří Fe.[7]

Dle[, tabulka (tab. 7) porovnává vlastnosti litin vyráběných ve slévárně kde, pro výrobu LČG, bylo využito jak metody modifikace pomocí Mg a titanu, tak i metody modifikace prostřednictvím Mg + KVZ (CompactMag). Dodané množství modifikátoru Mg + Ti se skládalo z 1,3%Mg – Fe – Si a 0,5% FeTi. Množství předslitiny CompactMag tvořilo 0,35%. Zvolená technologie modifikace byla v tomto případě, metoda sandwich.

Pro srovnání je v tabulce zahrnuta i LLG (ISO 100), tak i LKG (ISO 400 – 12).

Tab. 7: Porovnání modifikace Mg + Ti a předslitiny CompactMag [8]

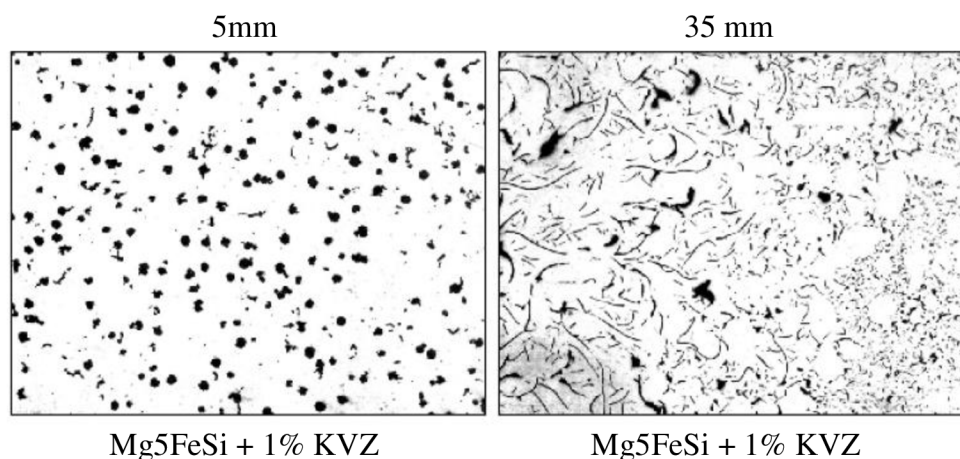
Vlastnosti	LLG	Mg + Ti	CompactMag	LKG
Mez kluzu [Mpa]	-	290	300	min. 250
Pevnost v tahu [Mpa]	min. 100	365	380	min. 400
Prodloužení[%]	0,5	4,5	5	min. 15

Z tabulky publikované v [8] je patrné, že tavenina modifikovaná prostřednictvím předslitiny CompactMag dosahuje lepší tažnosti a pevnosti v tahu.

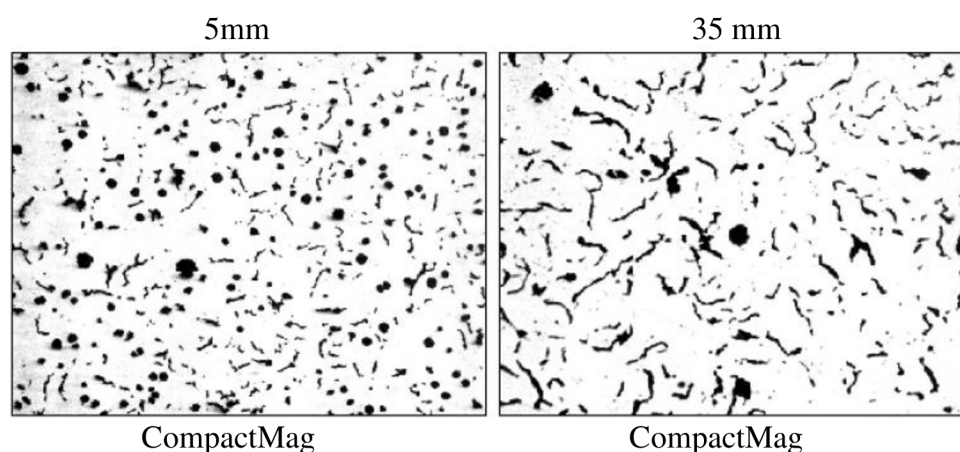
V tomto samém zdroji [8], je uvedeno srovnání struktur litin, viz (obr. 26. a obr 27). Porovnává se struktura litiny zpracované předslitinou tvořenou Mg₅FeSi + 1% KVZ v množství 0,35%, se strukturou zpracovanou opět ve stejném množství (0,35%) a to předslitinou CompactMag. Srovnání struktur litin bylo provedeno na odlitcích o tloušťkách stěn 5 a 35mm.

Jak je možné vidět v první variantě kdy, je litina zpracovávána na základně předslitiny Mg₅FeSi + 1% KVZ se v 5 mm silné části odlitku vyskytují převážně kuličky grafitu. V 35mm silné části odlitku se již objevují přechodové typy grafitu. V druhé variantě, litina zpracovaná pomocí předslitiny CompactMag, je v části odlitku o tloušťce stěny 35mm plně vyvinuta struktura obsahující červíkovitý grafit. Část odlitku o síle stěny 5mm také obsahuje červíkovitý grafit, nicméně s velkým obsahem grafitu kuličkového.

V toto srovnání, předloženém v [8], se názorně poukazuje na výrobní možnosti předslitiny CompactMag.



Obr. 26: Litina zpracovaná předslitinou Mg5FeSi + 1% KVZ [8]



Obr. 27: Litina zpracovaná předslitinou CompactMag [8]

Pro úplnost, významnější výhody použití metody modifikace pomocí hořčíku + KVZ pro výrobu LČG jsou sepsány v následujících bodech: [18]

- Širší procesní okno a větší flexibilita výroby k získání kompaktního grafitu,
- Nižší reaktivita modifikátoru na bázi Mg + KVZ a tím i klidnější reakce v pánvi,
- Prodloužení odeznívacího účinku modifikátoru při zpracování litiny,
- Odpadá kontaminace vratného materiálu titanem,
- Výchozí tavenina může obsahovat vyšší úroveň obsahu síry,
- Nižší zbytkový obsah Mg a KVZ a tím i nižší sklon k zákalkám.

3.3.4 Modifikace cerem + kov vzácných zemin

Pro tuto variantu jsou obvyklé předslitiny obsahující značný obsah separovaného ceru s přísadou neseparovaných KVZ. V tomto případě může daná předslitina obsahovat až cca 90% KVZ. Je doporučováno, kombinace cca 50% Ce, 20% La, zbytek obsahu ostatní lanthanoidy. Spotřeba předslitiny je závislá na množství síry. Jak ukazuje (tab. 8), znázorňující doporučené množství modifikační předslitiny Si – Ce – KVZ dle obsahu síry v tavenině.[18]

Tab. 8: Množství předslitiny Ce – KVZ dle obsahu S [18]

%S	0,003	0,008	0,012	0,033	0,076
%Ce – KVZ	0,05	0,1	0,1	0,25	0,65

Dodání předslitiny je prováděno v průběhu odpichu taveniny do lící pánve. Složení vsázkových surovin i taveniny je podobné jako složení pro tvárnou litinu. Opět i zde je kladen důraz na obsah síry. Hodnota obsahu síry v tavenině by měla být pod 0,02%. Účinek odeznívání se projevuje cca po 10 – 12 minut.

S aplikací této metody současně vzniká riziko způsobené předávkováním KVZ. Důsledkem je následný zvýšený sklon litiny k zákalce.[24] V porovnání s výše uvedenými variantami modifikace LČG, lze jako přednosti této metody zmínit poměrně klidné rozpouštění předslitiny, bez značných pyroefektů a nadměrného dýmu (bod tavení v rozmezí 790 až 860°C). Nedochází ke kontaminaci vratného materiálu prvky, jako je titan.

Tento způsob modifikace LČG se používá jen omezeně. Limitujícím faktorem použití této metody modifikace je poměrně vysoká cena použitých předslitin.[18]

- Předslitina Ce – KVZ s kombinací Ca

Další z variant výroby LČG je předslitina na bázi Si – Ce – KVZ (obsah 50% Ce) a to s kombinací s Ca. Vápník je použit ve formě CaSi (35% Ca). Tato varianta zpracování je vhodná pro taveninu s vyšším obsahem síry a to do cca 0,10%S.[18]

Jako první je dávkována předslitina Ce – KVZ (50% Ce) a posléze CaSi. Následujícím krokem je sekundární očkování. Opět množství přísady souvisí s obsahem síry v tavenině. Tvoří – li obsah síry cca 0,1%, pak je následná přísada Ce a Ca tvořena cca 0,1% Ce a 0,8% Ca. V opačném případě, kdy je obsah síry nízký a to do cca 0,02% činí přísady Ce a Ca cca 0,06% a 0,5%. Na výsledné vlastnosti litiny, modifikované touto metodou, má vliv zvýšená přítomnost sulfidických částic typu CaS a CeS.[18]

3.3.5 Modifikace hořčíkem – cerem + množství Ca a Al

Podle zdrojů [18] a [27], byla tato metoda vyvinuta společností General Motors v USA. Výroba LČG se provádí z taveniny s vyšším obsahem síry. Vyšší obsah síry v tavenině je v rozmezí cca 0,07 – 0,13%. Modifikovaná tavenina je LLG tavená v kuplovně.

Touto metodou používaná předslitina je na bázi Mg – Ce – Al – Ca. V závislosti na obsahu síry ve zpracovávané tavenině, je množství použité předslitiny poměrně vysoké, cca 1,5 – 2%. Teplota pro zpracování taveniny by měla být v rozmezí 1475 až 1520°C. [18]

V průběhu vzrůstajícího obsahu síry ve zpracovávané tavenině, roste zároveň přítomnost dispersních sulfidů hořčíku, vápníku a ceru. Ty následně působí jako grafítizační zárodky. Tím dochází ke snižování přechlazení taveniny a tím i sklonu ke vzniku karbidů a zákalky.

Výrazně velké množství sulfidů zapříčiňuje zvýšenou struskovitost. Specificky lehčí sulfidy jsou schopny vyplouvat na hladinu taveniny a to během přelévání, či odlévání taveniny. Lehčí sulfidy jsou tvořeny CaS a MgS, mají hustotu v rozmezí 2,5 – 2,85 g/cm³. Těžší sulfidy CeS (5,00 g/cm³) zůstávají v tavenině a to i po ztuhnutí. V odlitku jsou přítomny v podobě vměstků.[18]

3.4 Očkování LČG

Očkování je definováno jako vnášení takových látek do roztavené litiny, které vedou ke vzniku heterogenních zárodků pro krystalizaci grafitu.[24]

Hlavní cíle očkování jsou, zjemnění vyloučeného grafitu, tím zvýšení mechanických vlastností litiny, zabránění vzniku volného cementitu a omezení výskytu zákalky, zajištění rovnoměrného vyloučení grafitu po celé struktuře odlitku.[10]

Výsledný efekt očkování závisí na řadě faktorů, jimiž v souhrnu jsou: vlastnost očkovačů, zvolená metoda očkování, chemické složení taveniny, množství použitého očkovačů, časový průběh očkování, účel očkování.[10]

Je známo, že při očkování litiny s lupínkovým grafitem, tak i litiny s kuličkovým grafitem dochází k zvyšování počtu grafitisačnických zárodků. Při zkoumání se dochází k závěrům, že nadměrné očkování snižuje množství červíkovitého grafitu a zvyšuje podíl kuliček ve struktuře litiny. Dále se udává, že pro litinu s červíkovitým grafitem o určité tloušťce odlitku existuje optimální počet grafitových zárodků. Příliš nízký počet grafitových zárodků vede k vzniku karbidů v litině. [30]

V porovnání s litinou s kuličkovým grafitem má LČG mnohem méně zárodků grafitu. Zato v porovnání s litinou s lupínkovým grafitem je počet zárodků grafitu mírně vyšší.[31]

Očkování LČG je stejně, jako u LKG nutná metalurgická operace. Pro očkování LČG lze využít běžná očkovačů na bázi FeSi.[32]

- Druhy očkovačů
 - Očkovačů na bázi křemíku
 - Komplexní očkovačů na bázi ferosilicia
 - Očkovačů na bázi uhlíku
 - Silikokalcium
 - Karbid křemíku

- Způsoby očkování

Je velmi nutné, aby se co nejvíce zkrátila doba mezi očkováním a litím, popřípadě docházelo k očkování až v průběhu očkování.

- Očkování v pánvi

Dosud nejběžnější metoda. Princip je dodání očkovačů o vhodné zrnitosti do lící pánve během průběhu nalévání kovu z pece nebo z transportní pánve. [24]

- Očkování do proudu kovu

Využito automatických lících zařízení. Očkovačů o jemné zrnitosti je po celou dobu lití průběžně dodáváno do proudu kovu. [24]

- Očkování plněným profilem

Ocelový tenkostěnný profil o průměru 9 – 13 mm je plněn očkovačů. Tento profil je zasouván směrem do taveniny. Očkovat lze přímo v pánvi, nebo v mezipánvičce. [24]

- Očkování očkovačůmi tělísky

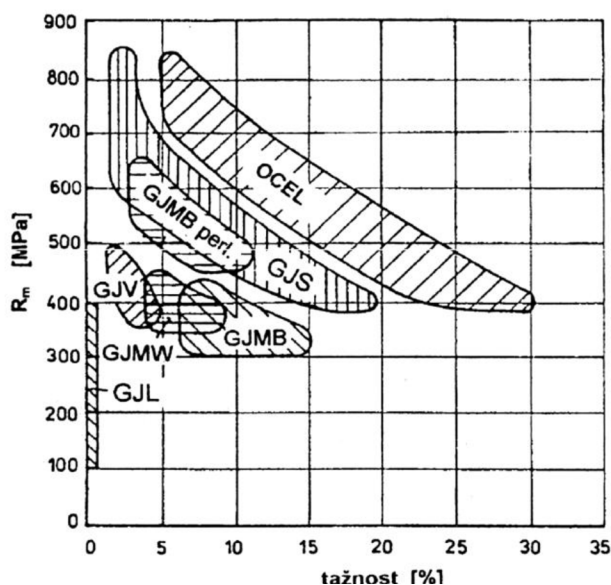
Očkovačů ve tvaru tělísky je umístěno na dno lící jamky, popřípadě do filtru. Velikost tělísky je volena dle množství kovu. [24]

4 VLASTNOSTI LČG

Tvar a dispersita vyloučeného grafitu, spolu se strukturou a vlastnostmi základní kovové hmoty mají zásadní vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti litiny.[24] Jak bylo popsáno v kapitole 2. Struktura litin, základní kovová hmota LČG je nejčastěji tvořena feritem, perlitem, popřípadě feriticko – perlitickou strukturou.

Charakteristickými vlastnostmi leží LČG v oblasti mez vlastnostmi LLG a LKG, viz tabulka (tab. 9), která porovnává charakteristické vlastnosti LČG s LLG a LKG. Pro názornost je tabulka (tab. 9) doplněna o (obr. 28) znázorňující diagram srovnávající oblasti mechanických vlastností ocelí na odlitky a litin.

V diagramu je zastoupena jak litina s červíkovitým grafitem, kuličkovým a lupínkovým grafitem, tak i litiny: temperovaná perlitická, temperovaná s bílým a černým lomem.



Obr. 28: Porovnání mechanických vlastností litin a ocelí na odlitky [26]

Tab. 9: Charakteristické vlastnosti litin – porovnání LČG s LLG a LKG [26]

Mechanické a fyzikální vlastnosti	Jednotka	Druh litiny – tvar grafitu		
		LLG	LČG	LKG
Pevnosti v tahu R_m	MPa	150 - 350	300 - 500	350 - 900
Mez kluzu $R_{p0,2}$	MPa	-	250 - 350	250 - 600
Modul pružnosti E	MPa·10 ⁶	0,075 - 0,155	0,13 - 0,16	0,14 - 0,185
Pevnost v tlaku R_d	MPa	500 - 1000	600	600 - 1200
Tvrдость	HB	150 - 280	150 - 250	140 - 350
Tepelná vodivost λ	W/m·K	42 - 65	35 - 48	25 - 38
Teplotní roztažnost α	10 ⁻⁶ /K	11 - 13	12 - 14	11 - 13
Hustota ρ	Kg/dm ³	6,9 - 7,2	7,0 - 7,3	7,1 - 7,3

V kapitole 1 Klasifikace LČG je zmiňováno, že litina s červíkovitým grafitem není dosud v České republice normalizována. Z tohoto důvodu jsou čeští výrobci nuceni využívat, pro značení LČG, zahraniční normy. Seznam zavedených standardů určených pro LČG je uveden, viz (tab. 1).

Z tabulky jde názorně vidět značný rozdíl mezi hodnotami pevnosti v tahu a tepelné vodivosti jednotlivých litin. Zatímco hodnoty pevnosti v tahu LLG, podle uvedené tabulky, dosahují maximálně hodnoty 350MPa, v případě LKG je možné dosáhnout hodnot blízkých se až 900MP. Rozdíly hodnot obou zmíněných veličin značně souvisí s morfologií vyloučeného grafitu ve struktuře litiny.

Zároveň je v kapitole 1 předloženo, že od roku 2002 je k dispozici Německá norma VDG – Merkblatt W 50. Litiny značené touto normou jsou uvedeny spolu se svými mechanickými vlastnostmi v tabulce (tab. 10).

Tab. 10: Značení a mechanické vlastnosti LČG podle VDG – Merkblatt W 50[32]

Značení litiny	Pevnost v tahu R_m [MPa] min.	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min.	Tažnost A [%] min.	Tvrдость HBW 30
EN – GJV – 300	300 – 375	220 – 295	1,5	140 – 210
EN – GJV – 350	350 – 425	260 – 335	1,5	160 – 220
EN – GJV – 400	400 – 475	300 – 375	1,0	180 – 240
EN – GJV – 450	450 – 525	340 – 415	1,0	200 – 250
EN – GJV – 500	500 – 575	380 – 455	0,5	220 – 260

[32], také udává nejčastěji používané litiny s červíkovitým grafitem, ty jsou se svými charakteristikami uvedeny v (tab. 11). Značení litin s červíkovitým grafitem uvedených v tabulce (tab. 11), je podle ÖGI (Österreich Giesserei Institut).

Tab. 11: Charakteristické vlastnosti LČG podle ÖGI (Österreich Giesserei Institut) [32]

Značení	GGV – 30	GGV – 40	GGV – 50
Základní kovová hmota	Ferit	Ferit + Perlit	Perlit
Nejmenší pevnost v tahu R_m [Mpa]	300	400	500
Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa]	240	280	340
Pevnost v ohybu [Mpa]	600	700	-
Pevnost v tlaku [Mpa]	500	600 – 1200	min. 1000
Tažnost A [%]	2	1 – 2,5	min. 0,5
Tvrдость HB 30	130 – 190	190 – 280	240 – 280
Rázová práce při 20°C A_b [J]	15 – 35	6 – 10	6 – 10
Vrubová houževnatost při 20°C A_{ISO-V} [J]	3 – 6	až 6	až 6
Modul pružnosti E [Gpa]	130 – 160	150 – 160	min. 170
Součinitel tepelné roztažnosti α [K ⁻¹]	$11 \cdot 10^6$	$(11 – 13) \cdot 10^6$	$(11 – 13) \cdot 10^6$
Hustota [kg·m ⁻³]	7000	7100	7100

Komentář k tabulce (tab. 10): Značení LČG je řazeno dle minimální pevnosti v tahu. Škála hodnot pevnosti v tahu LČG se pohybuje v rozmezí od 300 až do 575Mpa. Za zmínku stojí také změna tažnosti LČG. Pro EN – GJV – 300 hodnota minimální tažnosti A odpovídá 1,5 %, zato EN – GJV – 500 vykazuje hodnoty minimální tažnosti A jen 0,5%. Tento jev je způsoben tím, že kovovou hmotu EN – GJV – 500 tvoří jen perlit, který zhoršuje plastické vlastnosti litiny. Kovová hmota EN – GJV – 300 je výhradně feritická. Potřebné informace ohledně základní kovové hmoty LČG doplňuje podkapitola 2.1 Základní kovová hmota LČG. Je vhodné se také zmínit o tvrdosti LČG. Ta je podrobněji přiblížena v následující kapitole 4.1 Mechanické vlastnosti LČG. Nicméně v (tab. 10) je patrné, že hodnoty tvrdosti LČG jen pozvolna narůstají. Tvrдость LČG je primárně spojena se strukturou její základní kovové hmoty. Pro měření tvrdosti vyhovuje zkouška dle Brinella z důvodu velkých rozměru zkušební indontoru (kuličky)

4.1 Mechanické vlastnosti

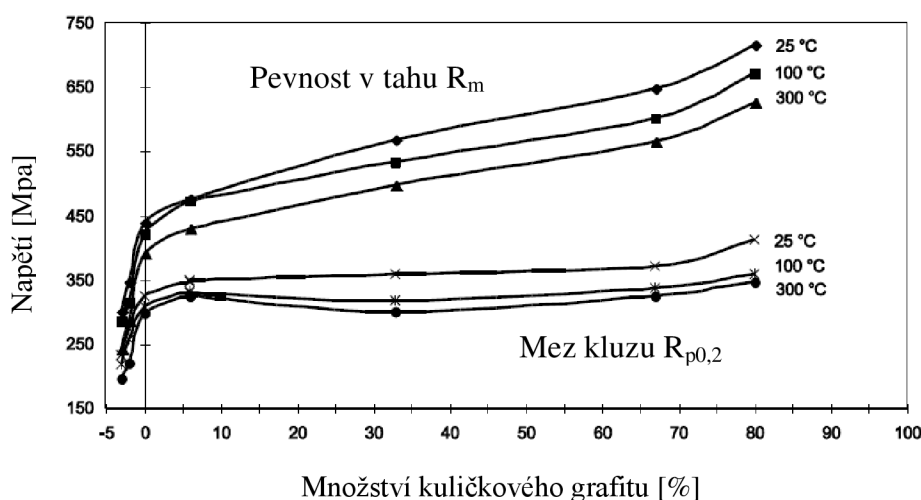
Mechanickými vlastnostmi LČG se důkladně zabývá práce [6] společnosti SinterCast. S řady předložených poznatků, týkajících se mechanických a fyzikálních vlastností LČG, jsou z hlediska mechanických vlastností podstatné informace týkající se pevnosti v tahu a kluzu, tažnosti, modulu pružnosti a tvrdosti LČG.

- Pevnost v tahu R_m a mez kluzu $R_{p0,2}$ LČG

Podle zmíněné práce [6], byly hodnoty pevnosti v tahu a meze kluzu LČG zjišťovány na tyčových vzorcích. Jak uvádí [6], zkušební vzorky určené pro tahovou zkoušku byly zhotoveny dle normy ASTM A536. Test zkušebních vzorků proběhl při teplotách prostředí 25 °C; 100 °C a 300 °C. Dále byly zkušební vzorky rozděleny do dvou skupin, a to:

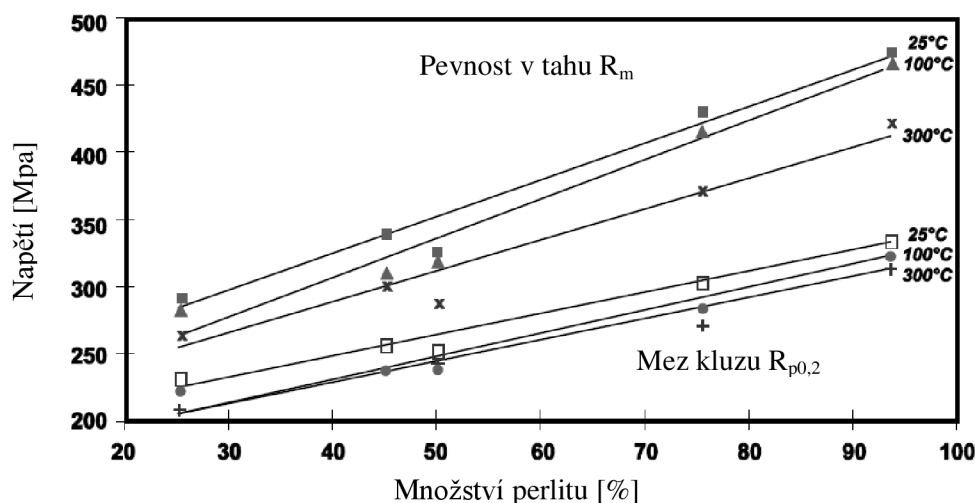
- LČG s obsahem kuličkového grafitu ve struktuře v rozmezí 0% až 10% a kovovou maticí tvořenou z 20% až 100% perlitem,
- LČG s kovovou maticí tvořenou z 85 až 100% perlitem a výskytem kuličkového grafitu v rozmezí 0% až 90%. Ve struktuře zkoušených vzorků se vyskytoval také lupínkový grafit. Přítomnost lupínkového grafitu ve struktuře LČG představuje hodnota, -5% na vodorovné ose X v diagramu zobrazeném, vis. (obr. 29).

Hodnoty získané tahovou zkouškou prezentuje diagram (obr. 29) průběhu pevnosti v tahu a meze kluzu 0,2% LČG s převážně perlitickou strukturou, v závislosti na procentním zastoupení kuličkového grafitu ve struktuře LČG a teplotě okolního prostředí. Z diagramu je patrné, že LČG s perlitickou strukturou a s výskytem 10% kuličkového grafitu ve struktuře má za pokojové teploty pevnost v tahu 450Mpa. Hodnoty pevnosti v tahu LČG následně s přibývajícím obsahem kuličkového grafitu ve struktuře vzrůstají. Jak z diagramu vyplývá, přítomnost lupínkového grafitu značně snižuje hodnoty meze pevnosti LČG. I při výskytu velice malého množství lupínkového grafitu ve struktuře hodnota pevnosti v tahu klesá přibližně o 30% až 40%. Dále LČG s téměř 100% obsahem kuličkového grafitu ve struktuře, čili nejedná se už o LČG, ale o LKG, vykazuje hodnoty pevnosti v tahu až 750Mpa. Vliv zvyšujícího se množství kuličkového grafitu ve struktuře LČG na mez kluzu 0,2% není tak markantní, jako v případě pevnosti v tahu. Hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ rostly mírně, přibližně o 5% až 10%.



Obr. 29: Průběhu pevnosti v tahu a meze kluzu 0,2% LČG, v závislosti na množství kuličkového grafitu a teplotě [6]

Diagram (obr. 30) znázorňuje vliv působení obsahu perlitu ve struktuře LČG s přítomností 10% kuličkového grafitu na pevnost v tahu a mez kluzu 0,2% a to při teplotách okolního prostředí 25°C, 100°C a 300°C. Zdroj[6] vysvětluje, že znázorněná závislost představuje lineární vztah s koeficientem korelace $R^2 = 0,95$. Podle [6] to znamená, že přírůstek perlitu ve struktuře LČG o 20% (např. v rozmezí 60% až 80%) zvýší pevnost v tahu LČG 10% až 15%. Z provedených testů [6] uvádí doporučení, že pro kvalitu LČG je hlavní tvrdost, opotřebení a obrobiteľnosť, pak teprve pevnost v tahu.



Obr. 30: Průběhu pevnosti v tahu a meze kluzu 0,2% LČG, v závislosti na množství perlitu ve struktuře a teplotě [6]

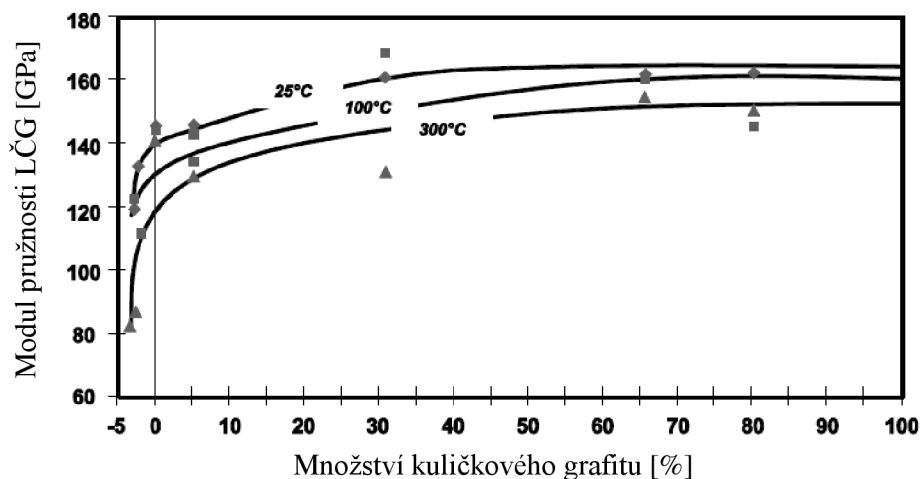
- Tažnost LČG

Poznatky ohledně tažnosti LČG předkládá [18]. Podle [18], je tažnost LČG značně ovlivňována obsahem kuličkového grafitu ve struktuře LČG. S přibývajícím množstvím kuličkového grafitu tažnost LČG roste.[18] Tažnost LČG ovlivňuje také přítomnost perlitu v její struktuře. Opět platí, v souvislosti s poznatky o vlastnostech perlitu, že s přibývajícím množstvím perlitu tažnost LČG klesá. Tažnost LČG také souvisí s teplotou okolního prostředí.[18] Pro LČG platí, že se vzrůstající teplotou prostředí plastické vlastnosti LČG klesají a to přibližně do hodnot kolem 300 °C. Od teploty cca 450°C tažnost litiny s červíkovitým grafitem narůstá.[18] Tažnost feritické litiny s červíkovitým grafitem ve stavu po odlití je cca 2 - 5%, perlitická LČG vykazuje hodnoty tažnosti přibližně 0,5 až 2,0%.[18] Tentýž zdroj dále uvádí, že vyžíhaná LČG zcela na feritickou strukturu dosahuje tažnosti až 9%.

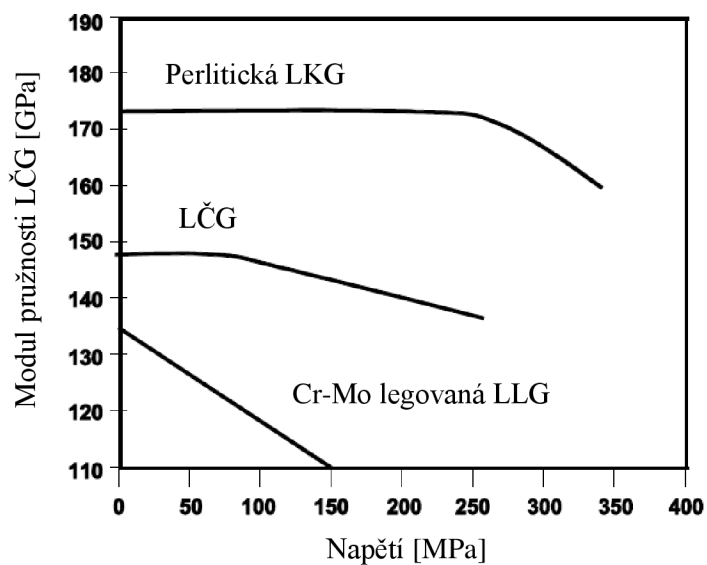
- Modul pružnosti LČG

Hodnoty modulu pružnosti byly zjišťovány ve zmíněné práci [6] společnosti SinterCast. Zde se uvádí, že hodnoty modulu pružnosti LČG s převážně perlitickou strukturou a s obsahem 10% kuličkového grafitu ve struktuře LČG byly v rozmezí 145 až 155Gpa. Modul pružnosti převážně perlitické LČG je znázorněn na (obr. 31). Jak je z obrázku patrné, výskyt už nepatrného množství lupinkového grafitu ve struktuře LČG prudce snižuje modul pružnosti LČG.[6]

Průběh modulu pružnosti pod napětím znázorňuje (obr. 32). Jak je z diagramu patrné, LČG si udržuje poměrně vysoké a konstantní hodnoty modulu pružnosti i pod zatížením. Literatura dále dodává, že tento průběh modulu pružnosti LČG zůstává konstantní i při zvýšených teplotách. Z praktického hlediska vykazuje LČG při dynamickém namáhání za provozu o 50 až 70% vyšší odolnosti vůči LLG.



Obr. 31: Modul pružnosti LČG, v závislosti na množství kuličkového grafitu a teplotě [6]



Obr. 32: Průběh modulu pružnosti LČG pod napětím[6]

- Tvrdost LČG

Tvrdost litiny je závislá především na struktuře základní kovové hmoty.[26] Čím více je ve struktuře litiny zastoupen perlit, tím více roste její tvrdost. Orientační hodnoty tvrdosti litin s rozdílnou strukturou základní kovové hmoty znázorňuje tabulka (tab. 12) uváděná ve zdroji [26].

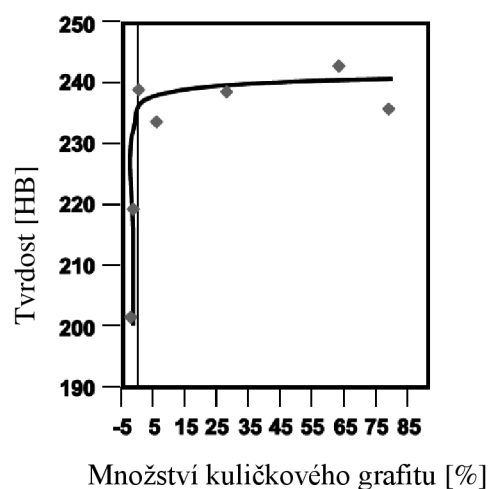
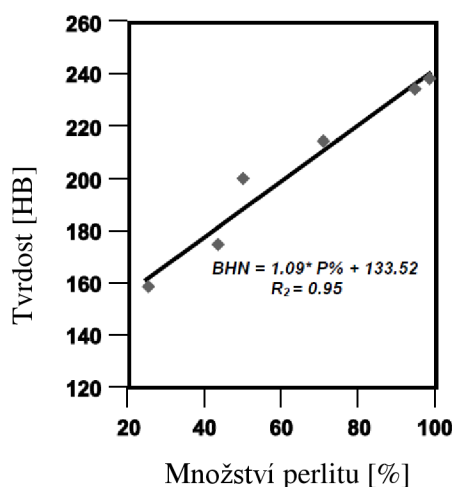
Tab. 12: Tvrdost litiny s rozdílnou strukturou [26]

Litina	Tvrdost HB
Feritická	120 – 150
Feriticko perlitická	140 – 200
Perlitická	180 – 260
Nízkolegovaná perlitická	210 – 280

Jak znázorňuje obrázek (obr. 33), tvrdost litiny s červíkovitým grafitem lineárně roste a to se vzrůstajícím obsahem perlitu ve struktuře.[6] Sklon uvedené křivky je podle [6] také ovlivňován množstvím manganu, chromu a titanu obsaženého v LČG. Hodnoty získané pro sestavení křivky závislosti tvrdosti na obsahu perlitu ve struktuře litiny, byly měřeny na nelegovaných LČG s přibližným obsahem 10% kuličkového grafitu.

Dále v souvislosti s vlivem obsahu perlitu ve struktuře [6] předkládá informace, že tvrdost bloku motoru vyrobeného z LČG s 70% perlitu ve struktuře je stejná jako tvrdost bloku motoru vyrobeného z plně perlitické LLG. K tomuto tvrzení dodává, že typická tvrdost plně perlitických bloků motorů z LLG může být v rozsahu 179 až 223 HB, zatím co hodnoty plně perlitických bloků motoru z LČG mohou dosahovat hodnot 192 až 255 HB.

Vliv působení kuličkového grafitu (v rozmezí 0 až 90%) na tvrdost litiny s červíkovitým grafitem zobrazuje (obr. 34).[6] Struktura základní kovové hmoty LČG byla tvořena převážně perlitem a to z 85 až 100%. Z obrázku je patrné, že hodnoty tvrdosti LČG byly v závislosti na obsahu vyloučeného kuličkového grafitu rozmezí 0 až 90% konstantní. Přítomnost lupínkového grafitu ve struktuře LČG představuje hodnota – 5% na vodorovné ose X. Jak je z obrázku patrné, už malý výskyt lupínkového grafitu zapříčiňuje skokové snížení tvrdosti LČG. Příčinou takto rapidního snížení tvrdosti LČG, je morfologie lupínkového grafitu a jeho vrubové účinky na kovovou matici LČG.



Obr. 33; 34: Tvrdost LČG v závislosti na množství perlitu a množství kul. grafitu [6]

4.2 Fyzikální vlastnosti LČG

Rozhodující vliv na výsledné fyzikální vlastnosti LČG má tvar a množství vyloučeného grafitu. Druhý faktor, který značně ovlivňuje fyzikální vlastnosti LČG je druh základní kovové hmoty litiny. Fyzikální vlastnosti, které se u litin standardně hodnotí, jsou: hustota, tepelná vodivost, tepelná roztažnost a útlumové schopnosti.

- **Hustota LČG**

Hodnoty hustoty litiny se snižují s vzrůstajícím se množstvím vyloučeného grafitu.[24] Podle [24], grafitické litiny (včetně LČG) vykazují o 10% nižší hustotu než oceli a za normálních teplot je hustota litiny v rozmezí 7100 až 7300 kg·m⁻³.

- **Tepelná vodivost LČG**

Velikosti hodnot tepelné vodivosti litiny značně souvisí s tvarem a množstvím grafitu obsaženého v litině.[24] Čím více je ve struktuře grafit, tím větší je tepelná vodivost litiny.[24] Tepelná vodivost LČG je pro 20°C cca 40 [W·m⁻¹·K⁻¹].[17] Jak uvádí zmíněná literatura [17], hodnota 40 [W·m⁻¹·K⁻¹] je o 25% nižší než je tepelná vodivost LLG. Tepelná vodivost LČG při teplotě 400°C je 46 [W·m⁻¹·K⁻¹] [17]. Opět hodnota tepelné vodivosti LČG je pouze o 15 až 20% nižší než při této teplotě vykazuje LLG. Tepelná vodivost LKG je podle [26] v rozmezí 25 – 38 [W·m⁻¹·K⁻¹]. Z pohledu tepelné vodivosti litiny, dochází prostřednictvím LČG k vyplnění prostoru mezi litinami s lupínkovým a kuličkovým grafitem.

- **Tepelná roztažnost LČG**

Součinitel tepelné roztažnosti u grafitických litin je menší než u oceli.[24] Zdroj dále dodává, že součinitel tepelné roztažnosti grafitických litin se pohybuje v rozmezí hodnot 10 až 13 ·10⁻⁶ K⁻¹. S ohledem na zmíněný zdroj[24] lze konstatovat, že dobrá tepelná vodivost a menší tepelná roztažnost vedou ke vzniku relativně malých tepelných pnutí, či dobré odolnosti vůči tepelným šokům. Na součinitele tepelné roztažnosti nemá prakticky vliv tvar vyloučeného grafitu.[18] Zato je tepelná roztažnost litiny značně ovlivňována strukturou základní kovové hmoty. LČG s feritickou strukturou má tepelnou roztažnost poněkud vyšší než LČG se strukturou perlitickou. S narůstající teplotou roztažnost vzrůstá.[18] Tento fakt potvrzuje sestavená tabulka (tab. 13) pro LČG se 70% a 100% obsahem perlitu ve struktuře. Struktura LČG dále obsahovala 10% kuličkového grafitu. Zaznamenané hodnoty součinitele tepelné roztažnosti jsou v rozmezí teplot 20°C až 600°C. Z tabulky je názorný lineární nárůst součinitele se vzrůstající teplotou. Hodnoty součinitele se také lehce liší pro konkrétní teplotu a to s přítomností feritu ve struktuře.

Tab. 13: Součinitel tepelné roztažnosti LČG [18]

Kul. graf. [%]	Perlit [%]	Chem. složení[%]			Součinitel tepelné roztažnosti [K ⁻¹]					
		C	Si	Mg	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
10	70	3,73	2,35	0,009	11,4	11,8	12,4	12,9	13,4	13,9
10	98	3,66	2,26	0,009	11,4	11,4	12,4	12,4	13,4	13,4

- Útlumové schopnosti LČG

Litina s červíkovitým grafitem je technicky vhodným materiálem pro výrobu strojních součástí s dostatečnými útlumovými vlastnostmi.[34] Materiál s vhodnými útlumovými vlastnostmi zvyšuje životnost součástí vystaveným vibrací. Taktéž se snižuje hlučnost pracovního prostředí.[34]

Podle [34], litina s červíkovitým grafitem tlumí vibrace třikrát až čtyřikrát slaběji než litina s lupínkovým grafitem, ale dvakrát více než litina s kuličkovým grafitem a to při vyšších mechanických vlastnostech ve srovnání s litinou s lupínkovým grafitem.

Publikované hodnoty útlumu Q^{-1} v [34], byly zjišťovány metodou volného útlumu ohybových kmitů plochých vzorků, rozkmitaných deformační amplitudou. Zkoumané litiny přibližného chemického složení dosahovaly následných úrovní útlumu Q^{-1} :

LLG (24 až 28) $\cdot 10^{-3}$; LČG (6 až 7) $\cdot 10^{-3}$; LKG (3 až 4) $\cdot 10^{-3}$. Uvedené úrovně útlumu reprezentují hodnotu logaritmického dekrementu útlumu na cyklus $\cdot 10^{-3}$.

Jak dodává zmíněný zdroj [34], rozhodující vliv na útlumové vlastnosti LČG má množství vyloučeného červíkovitého grafitu ve struktuře litiny. [34] dále tvrdí, že s rostoucím obsahem uhlíku dochází k zvýšení útlumových schopností litiny, ale klesá její pevnost. Předmětem zkoumání bylo také zlepšení útlumových vlastností LČG pomocí legování litiny komplexními předslutinami s Ni, Co, Mn a Al. [34] dochází k zjištění nejvyšších přípustných obsahů předslutin k dosažení optimálních útlumových vlastností LČG. Tyto hodnoty jsou: 2,0%Mn; 2,0%Ni; 1,2%Co a 0,6%Al. Překročení zmíněných mezních hodnot má za příčinu snížení útlumu i ostatních mechanických vlastností LČG.[34]

4.3 Technologické vlastnosti LČG

- Zabíhavost LČG

Zabíhavost je schopnost roztaveného kovu vyplnit dutinu formy. Tato slévárenská charakteristika tekutého kovu je ovlivněna převážně materiálem odlitku, materiálem formy, způsobem odlévání a také konstrukcí samotného odlitku. [20]

Zabíhavost litiny s červíkovitým grafitem je za stejných podmínek odlévání odlitku stejná jako při odlévání odlitku s lupínkovým grafitem.[32]

- Sklon LČG ke vzniku staženin

Literatura [32] udává, že sklon ke vzniku staženin LČG je větší než u litiny s lupínkovým grafitem. Zato v porovnání s litinou s kuličkovým grafitem je sklon ke vzniku staženin LČG menší. Také z důvodu, menšího sklonu ke vzniku mikrostaženin je možné snadněji než u LKG odlévat značně složitější odlitky. Příkladem jsou hlavy válců motoru.[32] Pro formování odlitků z LČG se často používají modelová zařízení původně určená pro LLG. Tato modelová zařízení nevyžadují pro své použití žádné větší změny.[32] Lineární smrštění odlitků z LČG je 0,5 až 0,9%. Tyto hodnoty jsou obdobné jak u ostatních druhů grafitických litin.[32]

- Obrobitelnost LČG

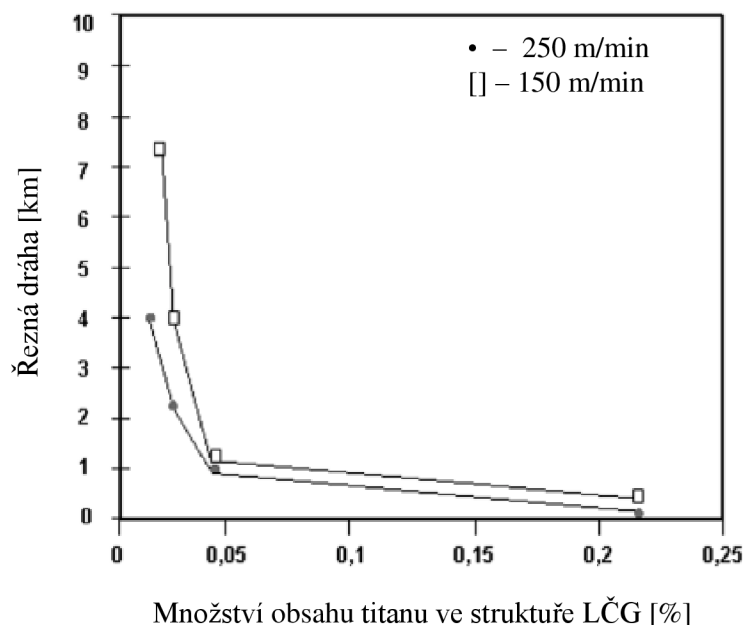
Obrobitelnost lze definovat jako míru schopnosti daného konkrétního materiálu být zpracován některou z metod obrábění. [11] Z tohoto pohledu se obrobitelnost LČG nachází mezi obrobitelností litiny s lupínkovým grafitem a litinou s kuličkovým grafitem. [14]

Dle [14], je ve srovnání s litinou s lupínkovým grafitem, tepelná vodivost LČG, menší. Nižší tepelná vodivost, porovnaná právě dle uvedeného zdroje [14], je důvodem vzniku vyšších řezných sil a většího množství tepla vznikajícího v místě řezu. Také, jak je zmíněno v [14], nejčastěji prováděnými obráběcími operacemi na součástích vyrobených z LČG jsou čelní frézování anebo vrtání válců.

Závěr obsáhlé práce [33], zabývající se obrobiteľností LČG, shrnuje řadu poznatků týkajících se obrobiteľnosti LČG. Ze závěru této konkrétní práce je možné zmínit, že:

- Životnost řezného nástroje PCBN – polykrystalický kubický nitrid boru, je při obrábění LČG obsahující ve struktuře 10% kuličkového grafitu o 40% delší než při obrábění LČG s 50% obsahem kuličkového grafitu a 3,5 krát delší, než u LČG s obsahem 85% grafitu kuličkového.
- V rámci rozsahu 70 – 100% perlitu obsaženého ve struktuře LČG, nižší úroveň obsahu perlitu ve struktuře LČG zlepšují soustružení, ale zhoršují frézování LČG. Z hlediska obrobiteľnosti LČG a jejího rozdílného chování pro frézování a soustružení je obtížné určit optimální kovovou matici LČG.
- Vysokorychlostní soustružení řezným nástrojem PCBN není ovlivněno obsahem perlitu v rozmezí 50 až 100%.
- Malé zvýšení obsahu titanu ve struktuře LČG v rozsahu 0,01 až 0,02% snižuje životnost řezného nástroje přibližně o 50%.

Jak je uvedeno o odstavci výše, již malé zvýšení titanu výrazně snižuje životnost řezného nástroje. Zmíněná práce [33] zkoumá vliv působení titanu na obrobiteľnost LČG. V rámci výzkumu byly provedeny testy na vzorcích z LČG s převážně perlitickou strukturou. V konkrétních vzorcích byl obsah kuličkového grafitu ve struktuře zastoupen hodnotou menší jak 5 %. Řezné rychlosti testovacích řezných nástrojů s materiálem ze slinutého karbidu byly 150m/min a 250m/min. Výsledná závislost životnosti řezného nástroje (řezná délka) na množství titanu ve struktuře litiny s červíkovitým grafitem je zobrazena na (obr. 35). V návaznosti na provedených testech obrobiteľnosti LČG je možné potvrdit velmi negativní vliv titanu na obrobiteľnost litiny s červíkovitým grafitem.



Obr. 35: Řezná dráha řezného nástroje v závislosti na množství Ti ve struktuře LČG [33]

5 APLIKACE LČG V PRAXI

Otázky, týkající se směrů využití litiny s červíkovitým grafitem jsou stále otevřené a stejně, jako u většiny nově vyvinutých materiálů je otázkou času, pro jaký sortiment výrobků bude nově vyvinutý materiál účelně a ekonomicky využit. Již v samotném úvodu práce je naznačeno, že LČG nachází významné uplatnění v automobilovém průmyslu. Dříve než bude LČG hodnocena z pohledu využití v automobilovém průmyslu, je vhodné zmínit přednosti LČG a to ve srovnání s LLG a LKG. V porovnání s LLG výhody LČG představují:[18]

- Vyšší pevnost v tahu a vyšší mez únavy bez použití legujících přísad,
- Značně vyšší houževnatou,
- Menší sklon k oxidaci a okujení za vyšších teplot,
- Menší citlivost na tepelné šoky,

LČG ve srovnání s LKG vykazuje:[18]

- Nižší modul pružnosti,
 - Nižší součinitel tepelné roztažnosti,
 - Lepší tepelná vodivost,
 - Lepší odolnost vůči tepelné únavě při velmi rychlém střídání tepelných nárazů,
 - Vyšší tlumící schopnost,
 - Lepší rozměrová stabilita v prostředí zvýšených teplot,
 - Lepší slévateľnost a proto vyšší schopnost k odlévání složitějších dílců
- Využití LČG v automobilovém průmyslu

Možnostmi využití LČG v praxi se konstruktéři zabývají již delší dobu. Příkladem je článek publikovaný v časopise slévárenství v roce 1993 [13]. [13] vede úvahu nad novým uplatněním LČG. [13] uvádí, problémy setrvačnicků automobilů vyrobených z LKG. Vznik problémů setrvačnicků byl v důsledku špatné tepelné vodivosti LKG, tento fakt zapříčiňoval strukturální změny (měknutí) v místech spojového obložení. Jak tvrdí literatura [13], litina s červíkovitým grafitem by pro tento typ výrobku bezesporu vyhovovala lépe a to díky své podstatně lepší tepelné vodivosti v porovnání s LKG. Z pohledu pevnosti by LČG pro výrobu setrvačnicku plně dostačovalo.[13]

V současné době se LČG převážně používá pro výrobu bloků motorů osobních automobilů. Objem současné roční produkce bloků motorů vyrobených z LČG odpovídá zhruba 500 000 kusů.[4] Práce [4] predikovala, že s ohledem na schválený výrobní program výrobců automobilů, bude v roce 2010 produkce představovat 30 různých konstrukcí bloků motorů nebo hlav válců motorů vyrobených z LČG.

Jak tvrdí zmíněný zdroj [4], z pohledu výroby bloku motoru litina s červíkovitým grafitem poskytuje ve srovnání se standardní litinou s lupínkovým grafitem tyto možnosti a to: Snížení tloušťky stěn odlitku (snížení hmotnosti) a to za běžných provozních nákladů či zvýšení provozních zatížení.

Redukci hmotnosti bloku motoru vyrobeného z LČG vůči bloku motoru z LLG dokládá tabulka (tab. 14) uváděná v [4].

Tab. 14: Porovnání bloků motorů vyrobených z LČG a LLG [4]

Objem motoru [litry]	Typ motoru	Hmotnost bloku motoru (LLG) [Kg]	Hmotnost bloku motoru (LČG) [Kg]	Redukce hmotnosti [%]
1,6	I – 4 benzín	35,4	25,0	29,4
1,8	I – 4 diesel	38,0	29,5	22,4
2,0	I – 4 benzín	31,8	26,6	16,4
2,5	V – 6 benz.	56,5	45,0	20,4
4,6	V – 8 benz.	72,7	59,6	18,0
9,2	I – 6 diesel	158	140	11,4
12,0	V – 6 diesel	240	215	10,4

- Porovnání LČG s legovanou LLG z pohledu využití v automobilovém průmyslu

Jak uvádí [4], vzhledem k postupnému narůstání výkonů a hodnot zatížení bloku motoru dochází k překračování pevnostních schopností standardní litiny s lupínkovým grafitem.[4] dále dodává, že výrobci, v souvislosti s tímto trendem, reagovali na tuto skutečnost přidáním legujících prvků do LLG za účelem zvýšení její pevnosti v tahu a tvrdosti. Použitými legujícími prvky byly převážně chrom, nikl, měď, cín a molybden. Cílem bylo zvýšení minimální pevnosti v tahu na hodnotu 300Mpa. Tento krok poskytl zvýšení mechanických vlastností LLG o 10 až 20%. Nevýhody, které legování LLG způsobilo, byly: zhoršení slévárenských vlastností LLG, snížení schopnosti přenosu tepla, zhoršení obrobiteľnosti či zvýšení celkových nákladů na výrobu LLG.

Podle [4], pokroky v řízení procesů výroby LČG a schopnost vyrábět LČG ve velkých objemech může přimět konstruktéry k zvýšení zájmu o využívání LČG při výrobě bloků motorů. V porovnání LČG a legovaná LLG [4] tvrdí, že tepelná vodivost legované LLG je pouze o 5 až 7% vyšší než standardní perlitická LČG. Obrobiteľnost LČG vůči standardní LLG je výrazně rozdílná (v neprospěch LČG), zatímco [4] předkládá, že obrobiteľnost legované LLG je téměř podobná jako obrobiteľnost LČG. Slévárenské vlastnosti LČG a legované LLG jsou, opět podle tvrzení [4], podobné.

Náhradou LČG ve výrobě bloku motorů, za legovanou LLG, již nebude nutné přijímat kompromisy spojené s využíváním legované LLG.[4]

- Porovnání LČG a hliníku z pohledu využití v automobilovém průmyslu

Kvůli značnému rozdílu hustoty mezi LČG (7100 kg/m^3) a hliníkem (2700 kg/m^3) je možné očekávat, že blok motoru vyrobený z LČG bude těžší než blok motoru o podobném objemu z hliníku. Nicméně z hlediska vyšší pevnosti a tuhosti LČG je vůči hliníku možné vyrábět blok motoru o tenčích tloušťkách stěn či menších rozměrech. V souladu s tímto poznatkem se mohou, podle [4], i ostatní díly motoru, v závislosti na rozměrech bloku motoru, konstruovat v menších rozměrech. Ze součástí, kterých se konstrukční změna může týkat, jmenujme například hlavu válců motoru, klikový hřídel či vačkový hřídel. Jak

je uvedeno ve zdroji [4], čím více budou tyto součásti kratší a menší tím více dochází k úspoře hmotnosti. Výsledkem je, že kompletně smontovaný motor s blokem z LKG může mít skutečně stejnou váhu jako kompletně smontovaný motor s hliníkovým blokem motoru. Tento výsledek je zřejmý v následující tabulce (tab. 15), která ukazuje, že motor Audi 4,2L V8 TDI s blokem motoru z LČG je z celkového hlediska o 4Kg lehčí než motor Mercedes – Benz 4,0 V8 CDI s blokem motoru vyrobeného z hliníku.

Tab. 15: Porovnání motoru Audi 4,2L V8 TDI a motoru Mercedes – Benz 4,0 V8 CDI[4]

Parametr	Audi 4,2L V8 TDI	Mercedes – Benz 4,0 V8 CDI
Výkon [KW]	240	231
Specifický výkon [KW/l]	57	57
Točivý moment [Nm]	650	580
Zrychlení [s]	5,9	6,1
Rozteč vrtání [mm]	90	97
Celková délka [mm]	520	640
Hmotnost motoru [Kg]	255	259
Výkon/hmotnosti [KW/Kg]	0,94	0,89

ZÁVĚRY

Litinu s červíkovitým grafitem lze označit za progresivní materiál s širokým polem uplatnění. Jak práce v úvodu naznačuje, významnému využití litiny s červíkovitým grafitem dochází v segmentu automobilového průmyslu. Vzhledem k trendu výroby motorových vozidel, je předpokladem, že produkce odlitků vyrobených z LČG bude nadále narůstat.

Optimální dodržení technologie výroby LČG zahrnující faktory, jako správnou volbu vsázkových surovin, volbu vhodného tavicího agregátu či správné provedení celého procesu modifikace a očkování LČG zaručují její požadované mechanické, fyzikální tak i technologické vlastnosti.

Východoasijské výrobce odlitků, kteří nejsou svazováni, tak jako evropští výrobci, emisními normami nebo vysokou cenou práce, produkuje odlitky cenově výhodnější a staví mimoevropské výrobce odlitků do konkurenčně výhodnější pozice před evropskými. Výsledkem je to, že jsou evropští výrobci odlitků nuceni hledat alternativy, jak svou pozici na globálním trhu vylepšit.

Touto cestou může být produkce kvalitních odlitků s vysokou přidanou hodnotou. Je známo, že velká část mimoevropských producentů odlitků i přes svou nízkou cenu nedosahuje patřičných kvalit odlitků evropských tj. i odlitků vyrobených v České republice.

Zavedení produkce odlitků z litiny s červíkovitým grafitem do výrobního programu dané slévárny, může v budoucnu představovat její konkurenční výhodu před ostatními výrobci.

Proto se litina s červíkovitým grafitem jeví jako relevantní a zajímavý materiál umožňující zvýšit přidanou hodnotu odlitku a rozšířit spektrum sortimentu výrobků konkrétní slévárny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *Aftermarket Block Technology - How It Works* [online]. Super Chevy. (2012). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.superchevy.com/how-to/engines-drivetrain/1207clt-aftermarket-block-technology/shp.html>
2. *Audi's Second-Generation 3.0L V-6 – Torque* [online]. Truck trend. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.trucktrend.com/news/1401-audis-second-generation-30l-v-6-torque/>
3. BOUŠKA, O., HEUNISCH, J., ZÁDĚRA, A., NEDĚLOVÁ, K., KOBĚRSKÝ, F. Výroba odlitků z litiny s červíkovitým grafitem v podmínkách Slévárny HEUNISCH Brno, s.r.o.. *Slévárenství*. LXI (2013), 3-4, s. 99-105. ISSN 0037-6825.
4. *Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads* [online]. SinterCast. (2014). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/published-papers/SinterCast-CGI-A-New-Material-for-Highly-Stressed-Cylinder-Blocks-and-Cylinder-Heads-1.pdf>
5. *Compacted Graphite Iron - Material Data Sheet* [online]. SinterCast. (2014). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/one-page-technology-descriptions/SinterCast-Compacted-Graphite-Iron-Material-Data-Sheet.pdf>
6. *Compacted Graphite Iron - Mechanical and Physical Properties for Engine Design* [online]. SinterCast. (2014). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/published-papers/SinterCast-CGI-Mechanical-and-Physical-Properties-for-Engine-Design.pdf>
7. *Compacted Graphite Iron Technical Information 13* [online]. Elkem. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.atilim.edu.tr/~kazim.tur/mate401/Dosyalar/45-ELKEM-TIS13%20Compacted%20Graphite%20Iron.pdf>
8. ECOB, C. M., HARTUNG, C. An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons. *Elkem foundry* [online]. Elkem, 2003 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.elkemfoundry.com.cn/pdf/db7e4b4b73.pdf>
9. GEDEONOVÁ, Zora. 2000. *Metalurgia liatin*. 1. vyd. Košice: Hutnícká fakulta Technickej univerzity, 288 s. ISBN 80-709-9516-5.
10. HAMPL, Jiří. 2014. *Metalurgie slévárenských slitin: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 85 s. ISBN 9788024835853.
11. HUMÁR, Antonín. Technologie I – Technologie obrábění – 1. část. *Studijní opory. UST, Odbor technologie obrábění* [online]. VUT – FSI v Brně, 2003 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf

12. JIYANG, By Zhou. Colour Metallography of Cast Iron: Vermicular Graphite Cast Iron. *Chinafoundry*. 2011, vol. 8, No. 1, s. 150 – 160.
13. LAMPIC, M. Nové uplatnění pro litinu s červíkovitým grafitem. *Slévárenství*. XLI (1993), 4, s. 227. ISSN 0037-6825.
14. *Litina s červíkovitým grafitem (CGI) K 4.1 – 4.2* [online]. SANDVIK Coromant. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_k_cast_iron/pages/compacted-graphite-iron-%28cgi%29-k-4.1-4.2.aspx
15. MACEK, Karel. 2006. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.
16. NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. 2009. *Teorie slévání*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 218 s. ISBN 9788001043950.
17. NOVÁ, I., KOSEK, P. Výroba tenkostěnných odlitků z litiny s červíkovitým grafitem. *Slévárenství*. LVI (2008), 11-12, s. 492-496. ISSN 0037-6825.
18. OTÁHAL, Vlastislav. *Litina s kompaktním – vermikulárním (červíkovitým) grafitem – Monografie*, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2010
19. PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. 1989. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. 1. vyd. Praha: Academia, 206 s.
20. PLACHÝ, J., NĚMEC, M., BEDNÁŘ, B. *Teorie slévání*. Vydavatelství ČVUT, Praha: 1990. 108 s.
21. PODRABSKÝ, T., POSPIŠILOVÁ, S. Struktura a vlastnosti grafitických litin. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. VUT – FSI v Brně, 16. 11. 2006 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=1>
22. *Process Control for the Reliable High Volume Production of Compacted Graphite Iron* [online]. SinterCast. (2014). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/published-papers/SinterCast-Process-Control-for-the-Reliable-High-Volume-Production-of-Compacted-Graphite-Iron-1.pdf>
23. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
24. ROUČKA, Jaromír. 1998. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 166 s. ISBN 8021412631.

25. ROUČKA, Jaromír. *Tavení litin*. [přednáška]. Brno: VUT – FSI, 2014.
26. ROUČKA, Jaromír. *Vlastnosti litin*. [přednáška]. Brno: VUT – FSI, 2014.
27. RÖDTER, Hans. Litina s kompaktním grafitem - nový litý materiál s uznávanou jakostí. *Slévárství*. LIII (2005), 9, s. 395-397. ISSN 0037-6825.
28. *Slévárna Heunisch Guss, Brno* [online]. Viktor Mácha INDUSTRIAL dokumentace těžkého průmyslu. (2015). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.viktormacha.com/galerie/heunisch-guss-brno-253/>
29. SKRBK, B. Ausferitická litina s červíkovitým grafitem. *In 51 Slévárenské dny – sborník přednášek – sekce metalurgie litin*. Brno. 2014. s. 31 – 35. ISBN 978–80–02 – 02405–7.
30. STEFANESCU, D. M., F. MARTINEZ a I. G. CHEN. Solidification Behaviour of Hypoeutectic and Eutectic Compacted Graphite Cast Irons: chilling tendency and eutectic cells. *AFS Transactions*. 1983, č. 91, s. 205-216.
31. SUBRAMANIAN, S. V. Compacted Graphite Morphology Control in Shaped-Castings. *MRS (Materials Research Society) Symposium Proceedings*. 1985, vol 34, s. 73-80.
32. ŠENBERGER, Jaroslav. 2008. *Metalurgie oceli na odlitky*. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 311 s. ISBN 9788021436329.
33. *The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron* [online]. SinterCast. (2014). [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.sintercast.com/file/documents/pdf/library-2/technical-publications-1/2014/published-papers/SinterCast-the-Effect-of-Metallurgical-Variables-on-the-Machinability-of-Compacted-Graphite-Iron-1.pdf>
34. USOLCEV, A. A. Útlumové vlastnosti litiny s červíkovitým grafitem. *Slévárství*. XLI (1993), 4, s. 226. ISSN 0037-6825.
35. *Vermicular Graphite Cast Iron* [online]. Total Materia. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=263>
36. VONDRÁK, Vladimír, Jiří HAMPL a Aleš HANUS. 2011. *Metalurgie litin: mimopecní zpracování roztavené litiny (očkování, modifikace)*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 133 s. ISBN 9788024824154.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ARA	[-]	Anizotermický rozpad austenitu
ASTM	[-]	American Society for Testing and Materials
BCC	[-]	Prostorově středěná krystalická mřížka
CDI	[-]	Commonrail Direct Injection
C _E	[-]	Uhlíkový ekvivalent
CGI	[-]	Compacted Graphite Iron
EIP	[-]	Elektrická indukční pec
EOP	[-]	Elektrická oblouková pec
FCC	[-]	Plošně středěná krystalická mřížka
GGV	[-]	Gusseisen mit Vermiculargraphit
GJV	[-]	Litina s červíkovitým grafitem
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
KP	[-]	Kupolová pec
KVZ	[-]	Kovy vzácných zemin
LČG	[-]	Litina s červíkovitým grafitem
LKG	[-]	Litina s kuličkovým grafitem
LLG	[-]	Litina s lupínkovým grafitem
ÖGI	[-]	Österreich Giesserei Institut
PCBN	[-]	Polykrystalický kubický nitrid bóru
PSA	[-]	PSA Peugeot Citroën
S _E	[-]	Stupeň eutektičnosti
TDI	[-]	Turbocharged Direct Injection
VDG	[-]	Deutsche Vakuum Gesellschaft e. V.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
A _b	[J]	Rázová práce
a	[K ⁻¹]	Součinitel tepelné roztažnosti
c	[J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
E	[GPa]	Modul pružnosti
EF	[W/m]	Eichelberfův faktor odolnosti k teplotní únavě
ETF	[W/m·Kč ⁻¹]	Ekonomická odolnost vůči teplotní únavě
P	[Kč]	Cena
R _d	[Mpa]	Pevnost v tlaku
R _m	[Mpa]	Pevnost v tahu
R _{p0,2}	[Mpa]	Smluvní mez kluzu

Seznam písmen řecké abecedy

Symbol	Jednotka	Popis
α	[ηm·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Délková roztažnost
λ	[W·m ¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost
ρ	[g·cm ⁻³]	Hustota

SEZNAM POŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blok vznětového motoru	9
Obr. 2: Motor Audi 3,0 TDI	9
Obr. 3: Vznik trhliny	10
Obr. 4: Vliv prvků na substituční zpevnění feritu	11
Obr. 5: Struktura perlitu	11
Obr. 6: Vliv perlitotvorných prvků na tvar diagramu ARA	12
Obr. 7: Litina s červíkovitým grafitem s feritickou matricí	12
Obr. 8: Litina s červíkovitým grafitem s perlitickou matricí	12
Obr. 9: Litina s červíkovitým feriticko - perlitickou matricí	13
Obr. 10: Vliv rychlosti ochlazování na transformaci austenitu	14
Obr. 11: Rovnovážný diagram Fe – C – 2%Si	16
Obr. 12: Krystalická mřížka grafitu	18
Obr. 13: Mechanismus růstu grafitu a) spirálový; b) pyramidový	19
Obr. 14: Schéma růstu a) červíkovitého; b) lupínkového; c) kuličkového grafitu	19
Obr. 15: Růst červíkovitého grafitu a) z lamelární formy; b) z kuličkové formy	20
Obr. 16: Etalony hodnotící červíkovitý grafit	20
Obr. 17: Červíkovitý grafit zaznamenaný elektronovým mikroskopem	21
Obr. 18: Tvar grafitu, poměr délka/ šířka	21
Obr. 19: Tvary grafitů, lupínkový, červíkovitý, kuličkový	22
Obr. 20: Vliv zbytkového hořčíku na tvar a množství grafitu v litině	22
Obr. 21: Kuplovna slévárny HEUNISCH	25
Obr. 22: Kelímková indukční pec	26
Obr. 23: Závislost zbytkového Mg na množství kuličkového grafitu	28
Obr. 24: a) modifikace Fe – Si – Mg; b) modifikace Mg – Ti – Ca – Ce	29
Obr. 25: Karbid titanu ve struktuře litiny	30
Obr. 26: Litina zpracovaná předslitinou Mg5FeSi + 1% KVZ	32
Obr. 27: Litina zpracovaná předslitinou CompactMag	32
Obr. 28: Porovnání mechanických vlastností litin a ocelí na odlitky	35
Obr. 29: Průběh pevnosti v tahu a meze kluzu 0,2% LČG, v závislosti na množství kuličkového grafitu	37
Obr. 30: Průběh pevnosti v tahu a meze kluzu 0,2% LČG, v závislosti na množství perlitu ve struktuře a teplotě	38
Obr. 31: Modul pružnosti LČG, v závislosti na množství kuličkového grafitu a teplotě	39
Obr. 32: Průběh modulu pružnosti LČG pod napětím	39
Obr. 33: Tvrdost LČG v závislosti na množství perlitu	40
Obr. 34: Tvrdost LČG v závislosti na množství kuličkového grafitu	40
Obr. 35: Řezná dráha řezného nástroje v závislosti na množství Ti ve struktuře LČG	43

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1: Přehled LČG standardů	10
Tab. 2: Doporučené chemické složení pro LČG dle zdroje[24]	14
Tab. 3: Doporučené chemické složení pro LČG dle zdroje[5]	14
Tab. 4: Vliv 1% daného prvku na hodnotu uhlíkového ekvivalentu	15
Tab. 5: Požadavky na výchozí taveninu	23
Tab. 6: Chemická složení materiálu SOREL	23
Tab. 7: Porovnání modifikace Mg + Ti a předslitiny CompactMag	31
Tab. 8: Množství předslitiny Ce – KVZ dle obsahu S	33
Tab. 9: Charakteristické vlastnosti litin – porovnání LČG s LLG a LKG	35
Tab. 10: Značení a mechanické vlastnosti LČG podle VDG – Merkblatt W 50	36
Tab. 11: Charakteristické vlastnosti LČG podle ÖGI (Österreich Giesserei Institut)	36
Tab. 12: Tvrdost litiny s rozdílnou strukturou	40
Tab. 13: Součinitel tepelné roztažnosti LČG	41
Tab. 14: Porovnání bloků motorů vyrobených z LČG a LLG	45
Tab. 15: Porovnání motoru Audi 4,2L V8 TDI a motoru Mercedes – Benz 4,0 V8 CDI ...	46