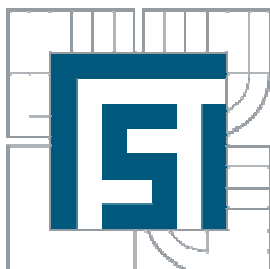




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

MANUFACTURE OF COMPACTED GRAPHITE CAST IRON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ERIK JANKES

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.

BRNO 2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Erik Jankes

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 litiny s červíkovitým grafitem

v anglickém jazyce:

Manufacture 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 v dané slévárně, může v budoucnosti představovat konkurenční výhodu dané slévárny. To však vyžaduje, aby odlitky z tohoto materiálu byly slévárnami co nejdříve ověřeny a zavedeny do vyráběného sortimentu a současně také byly nabízeny a poptávky realizovány. V opačném případě bude velice obtížné v poptávkovém řízení v budoucnosti v evropské konkurenci uspět.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je provést rešerši na téma výroby a vlastností litiny s červíkovitým grafitem odlitků a na jejím základě popsat současné základní předpoklady pro její výrobu.

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. 2001, no. 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: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 8.11.2011




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Litina s červíkovitým grafitem je novým druhem litiny s uplatněním zejména v automobilovém průmyslu. Při zavádění výroby je nutné optimalizovat metalurgický postup tavení a ověřit technologické chování litiny. V této rešerši jsou popsány vlastnosti a známé možnosti výroby tohoto materiálu.

Klíčová slova

Litina s červíkovitým grafitem, výroba LČG, červíkovitý grafit, modifikace, technologické vlastnosti LČG

ABSTRACT

Compacted graphite cast iron is new kind of cast iron that is applied especially in car industry. It is necessary to optimize metallurgical process of melting and verify technological behaviour of cast iron at loading production. This bachelor thesis describes the properties and known production possibilities of the material.

Key words

Compacted graphite cast iron, production of CGI, compacted graphite iron, modification, technologic properties of CGI

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANKES, Erik. *Název: Výroba litiny s červíkovitým grafitem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 49 s. Vedoucí práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Výroba litiny s červíkovitým grafitem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

v Brně

.....

Erik Jankes

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Antonínu Záděrovi, Ph.D. za ochotu, připomínky a za to, že mě vedl, abych přemýšlel, co píšu. Veliké poděkování patří také mé rodině za trpělivost při mém studiu.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 LITINA S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM	11
1.1 Tvar a nukleace červíkovitého grafitu.....	11
1.2 Struktura	18
1.3 Chemické složení.....	19
2 VLASTNOSTI LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM	22
2.1 Mechanické vlastnosti.....	23
2.1.1 Pevnost v tahu a mez kluzu LČG.....	24
2.1.2 Tvrdost.....	28
2.1.3 Vrubová houževnatost	29
2.1.4 Mez únavy.....	29
2.2 Fyzikální vlastnosti.....	30
2.2.1 Tepelná vodivost.....	30
2.2.2 Útlum vibrací.....	31
2.2.3 Součinitel tepelné roztažnosti.....	32
2.3 Vlastnosti za zvýšených teplot	33
2.3.1 Mez kluzu a pevnosti za zvýšené teploty	33
2.3.2 Tečení (Creep)	34
2.3.3 Opal (okujení), oxidace, růst.....	35
2.4 Technologické vlastnosti	37
2.4.1 Zabíhavost.....	37
2.4.2 Sklon ke staženinám	37
2.4.3 Obrobitelnost	37
2.4.4 Požadavky na konstrukci odlitku	38
3 VÝROBA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM	39
3.1 Vsázkový materiál.....	39
3.2 Zařízení vhodná pro tavení litiny s červíkovitým grafitem	40
3.3 Očkování	41
3.4 Modifikace.....	42
3.4.1 Modifikace hořčíkem	43
3.4.2 Modifikace kombinací prvků.....	43

3.4.3	Modifikace kombinací kovů vzácných zemin (KVZ).....	44
3.4.4	Modifikace kombinací Mg – Ce s malým obsahem Ca, Al.....	44
3.4.5	Modifikace kombinací Ce – KVZ a CaSi.....	45
4	ODLÉVÁNÍ.....	46
	ZÁVĚR.....	47
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	48

..

ÚVOD

Litina s červíkovitým grafitem je moderní materiál, který je technologicky náročný na výrobu. Tento druh grafitické litiny kombinuje některé dobré vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem jako je vyšší tepelná vodivost, vysoký útlum vibrací a současně vyšší pevnost a tažnost. Pro tuto litinu je používáno označení podle normy ISO 16 112 „compacted (vermicular) graphite cast iron (CGI)“. V německé literatuře je používán název "Gusseisen mit Vermiculargraphit (GGV)"[1].

Historie LČG se přibližně píše od roku 1940, kdy byla objevena Litina s kuličkovým grafitem. Tehdy byla považována spíše za kuriozitu a její výroba byla proveditelná pouze v laboratořích, kde bylo možné kontrolovat náročný výrobní proces. Na výslednou strukturu má vliv mnoho faktorů, které s tehdejší technikou a znalostmi bylo náročné dodržet, proto nebyla výroba rentabilní. Nebyla možná masová produkce [2].

Počátkem roku 1980 začal rozvoj počítačově řízených systémů a metalurgických procesů. Díky počítačovým simulacím bylo možné začít s výrobou LČG mimo laboratorní prostředí. Používaná metoda byla metoda dvou pánví. Po modifikaci hořčíkem se v tavenině sledovala teplota a obsah oxidů. Podle naměřených výsledků bylo rozhodnuto dalším způsobu zpracování. Díky tomu se výrazně zlepšila kvalita výsledného odlitku. Při snaze vyrábět velké série „stejných“ odlitků stále docházelo k poměrně k velkým rozdílům v kvalitě jednotlivých kusů [2].

Důsledkem celkového technického pokroku došlo k tomu, že se objevovali stále nové a lepší možnosti jak ovlivňovat výsledný produkt. Kolem roku 1990 začali slévárny využívat řídicí systémy (později i např. simulace plnění formy). Objevovaly se nové způsoby modifikace až po ty „zatím nejlepší“ - Tundish Cover a In mould proces. Možnost použití pro modifikaci byla rozšířena kromě Mg i o další prvky jako Ce a KVZ (viz kapitola modifikace 3.4). Tyto nové poznatky v oblasti metalurgie litin umožnily v roce 1999 zahájení první masové produkce bloků motorů a dalších výrobků z LČG [3].

Litina s červíkovitým tvarem grafitu má různé možnosti použití. Nejčastější oblasti použití LČG jsou následující: [4]

- odlitky, které musí mít lepší mechanické vlastnosti a nižší hmotnost než poskytuje LLG, např. skříně, kryty, víka, rámy základových desek, apod.
- odlitky vystavené náhlým změnám teplot (nízkolegované Si, Mo až do 650 °C) a zvýšeným teplotám (až 950 °C), např. bloky a hlavy válců, výfuková potrubí, brzdové kotouče a disky, formy na sklo, apod. Použitím LČG se sníží tepelné pnutí a deformace (působením zvýšené teploty), zlepší se tlumící schopnost a obrobitelnost
- odlitky hůře vyrobitelné tvárnou litinou. Díky lepší zabíhavosti umožňuje vermikulární litina výrobu odlitků se sníženou tloušťkou stěn.

Největší část výroby odlitků z vermikulární litiny je spotřebována v automobilovém průmyslu (části osobních a nákladních automobilů) obr. 1 a 2, lodního průmyslu (motory) obr. 3 a pro jiné stacionární motory obr. 4. Stále se zvyšující cena paliva a požadavky na snížení produkce emisí u automobilů nutí automobilky zlepšovat spalování paliva v motorech vyráběných aut. Jednou z možností může být například zvýšení tlaku ve spalovací komoře motoru ze 180 bar

až na 220 – 240 bar. Vzhledem k tomu, že LČG má dobrou těsnost stěn a to až do 250 bar, je proto vhodnější než jiné materiály [5].

V současnosti automobilový průmysl vyprodukuje více než 40 000 bloků motorů za měsíc pro OEM (zkratka anglického **O**riginal **E**quipment **M**anufacturer). Tento fakt svědčí o tom, že stále více firem má zájem zařadit produkci tohoto materiálu do výrobního programu nebo prodejního sortimentu (zvýšení konkurenceschopnosti) [3].

Příklady bloků motorů vyráběných z vermikulární litiny.



Obr. 1 Blok motoru Audi 2.7L, 3.0 L V6 diesel [6].



Obr. 2 Blok motoru 12L pro lokomotivy a nákladní vozy [7].



Obr. 3 Blok motoru V – 12 pro lokomotivy [7].



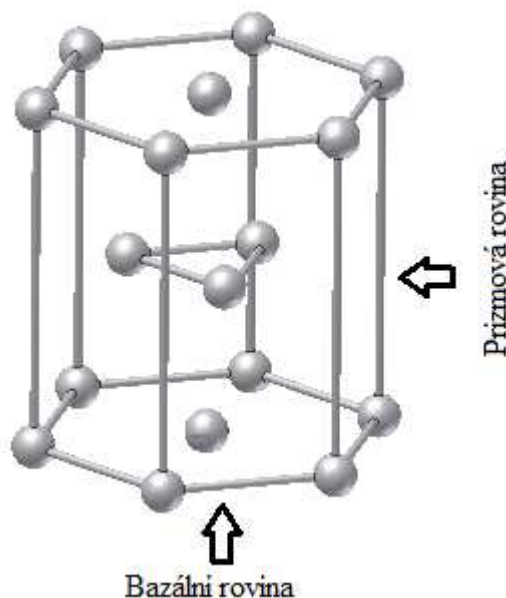
Obr. 4 Blok motoru Rolls Royce [6].

1 LITINA S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

Základním kriteriem pro rozdělení druhu litiny je tvar vyloučeného grafitu. Grafické litiny jsou rozdělovány na Litinu s lupínkovým grafitem (LLG), Litinu s červíkovitým (vermikulárním) grafitem (LVG, LČG) a Litinu s kuličkovým grafitem (LKG). Pro vermikulární litinu je typický grafit ve tvaru krátkých protáhlých částic, náhodně orientovaných se zaoblenými konci. Je označován jako červíkovitý nebo vermikulární v normě ČSN EN 1560 typ III. Litina s červíkovitým grafitem je podle potřeby nelegovaná nebo legovaná litina s přibližně eutektickým složením. Základní matici tvoří feritická, feriticko-perlitická nebo perlitická struktura.

1.1 Tvar a nukleace červíkovitého grafitu

Grafit je nekovová fáze, která má vliv na vlastnosti litiny. Je tvořen uhlíkem s hexagonální krystalickou mřížkou obr. 5. Ve srovnání se základním kovem má mnohonásobně nižší pevnost a tvrdost.



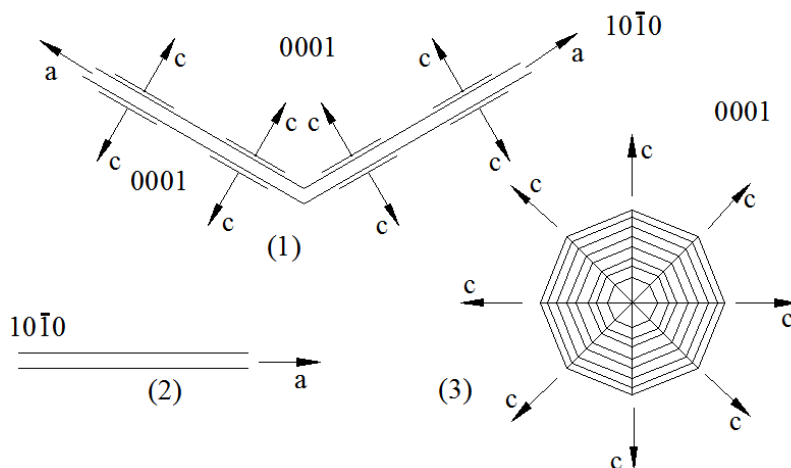
Obr. 5 Krystalická mřížka grafitu.

Vylučování grafitu v průběhu tuhnutí probíhá mechanismem heterogenní nukleace. Grafit se tvoří v austenitu a krystalizuje na oxidech, sulfidech, karbidech (podstata očkování). Vermikulární grafit je v eutektické buňce spojitý a podobně jako u lupínkového grafitu větve vyrůstají ze stejného centra [8].

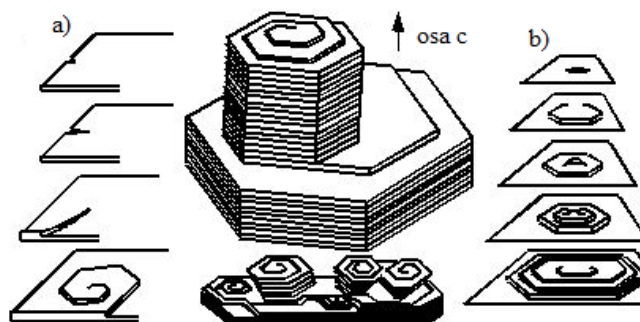
Základem růstu červíkovitého grafitu je drobný kuličkový grafit vyloučený mezi zrna primárního austenitu. Přeměna kuličkového tvaru grafitu na červíkovitý nastává v průběhu eutektické krystalizace. Když je červíkovitý grafit v kontaktu s taveninou, probíhá kromě čelního růstu i boční růst, čímž se vytváří větvení. Jednotlivé větve grafitu vyrůstají z deformovaného lupínku [9].

Grafit roste ve dvou směrech. Ve směru bazální (osa „a“) a prizmatické roviny (osa „c“), v obou směrech může probíhat nezávisle, společně nebo se mění, přičemž

hlavní orientace růstu je rovnoběžná s osou „a“. Na obr. 6 jsou modely růstu základních litin LČG (1), LLG (2), LKG (3). Krystalografická orientace LČG začíná a končí rovnoběžně s osou „c“ (kolmo na bazální rovinu). Hlavní orientace růstu zůstává ve směru osy „a“ (kolmo na prizmatické plochy). Směry růstu se mohou měnit. Průběh na osách „a“ a „c“ se liší rychlostí růstu. Ve směru osy „a“ je čelo větve ve stálém kontaktu s taveninou s přímou difuzí atomu uhlíku z taveniny. Růst ve směru osy „c“ je pomalejší, protože difuze uhlíků z taveniny probíhá přes austenitovou obálku. Grafit má dva mechanismy růstu a to spirálový nebo pyramidový obr. 7 [9].

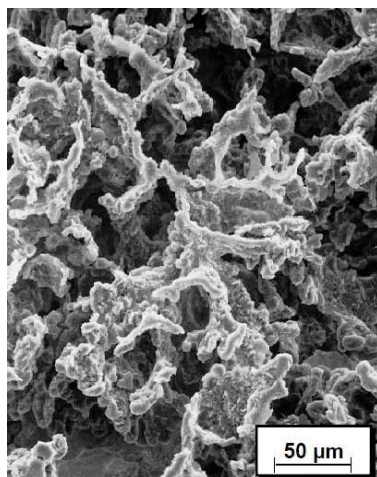


Obr. 6 Schéma růstu – 1 kompaktního, 2 lupínkového, 3 kuličkového grafitu [9].



Obr. 7 Spirálový (a) a pyramidový (b) růst grafitu [10].

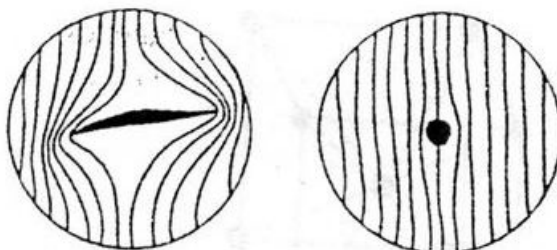
Na metalografickém výbrusu se grafit jeví jako samostatná částice červíkovitého tvaru. Z hloubkově naleptaného vzorku na obr. 8 je zřejmé, že jsou jednotlivé červíkovité útvary grafitu spojeny v rozvětvené útvary podobné korálům.



Obr. 8 Mikrofotografie grafitu, při hloubkovém naleptání [11].

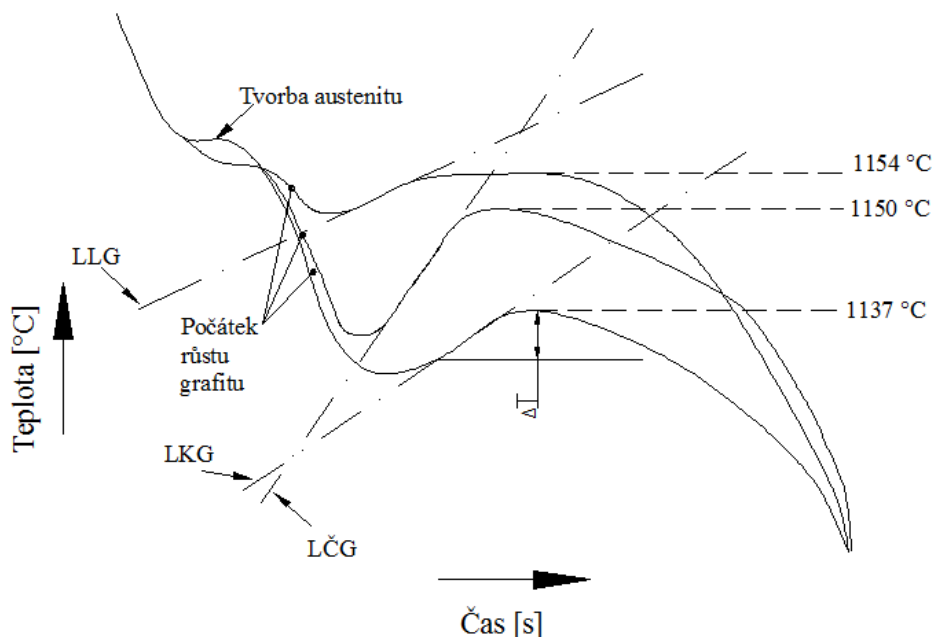
Červíkovitý grafit není jediný, který je ve struktuře LČG obsažen. Ve struktuře je obsažen vždy i podíl kuličkového grafitu, podle publikace [6] by neměl překročit max. 20 %. Povolené množství obsahu kuliček závisí na dohodě mezi výrobcem a zákazníkem. Výskyt lupínkového grafitu je nepřipustný.

Částice grafitu narušují základní kov a oslabují nosný průřez obr. 9. Přítomnost grafitu zapříčiňuje místní koncentraci napětí. Největší koncentraci napětí způsobuje lupínkový, dále červíkovitý a nejmenší kuličkový grafit [10].



Obr. 10 Vliv grafitu na koncentraci napětí [10].

Rozdílné průběhy nukleace a růstu grafitu jednotlivých druhů litin jsou zřejmé na křivkách chladnutí v oblasti eutektické přeměny. Grafické znázornění křivek chladnutí při krystalizaci různých tvarů grafitu s přibližně stejným chemickým složením litin ($CE = 4,03$) je uvedeno na obr. 11. Rychlost tuhnutí LČG má vliv na tvar vylučovaného grafitu. U odlitků s rozdílnou tloušťkou stěn vzniká v tenkostěnných průřezích odlitku vyšší podíl kuličkového grafitu než v silnostěnných. Při návrhu konstrukce odlitků z LČG je nutné zajistit, aby měl odlitek pokud možno stejnou nebo podobnou tloušťku stěny [12].



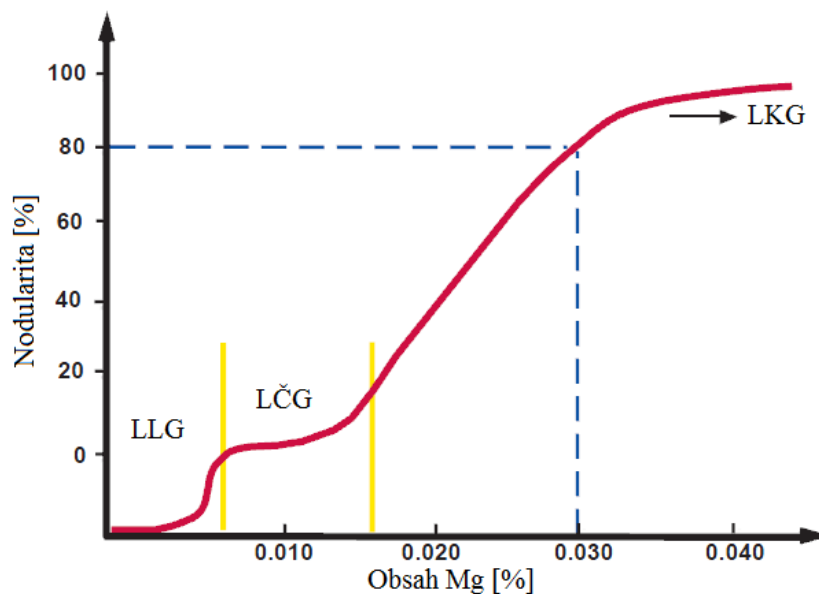
Obr. 11 Křivky chladnutí pro LLG, LČG a LKG [6].

Porovnáním křivek chladnutí zjistíme charakteristické odlišnosti:

- ve velikosti eutektického podchlazení
- ve sklonu křivky rekalescence a ve velikosti rekalescence
- v hodnotě eutektické teploty

Každý tvar grafitu má odlišnou křivku chladnutí, tvar prodlevy, výšku eutektické teploty, rozsah rekalescence a podchlazení [6].

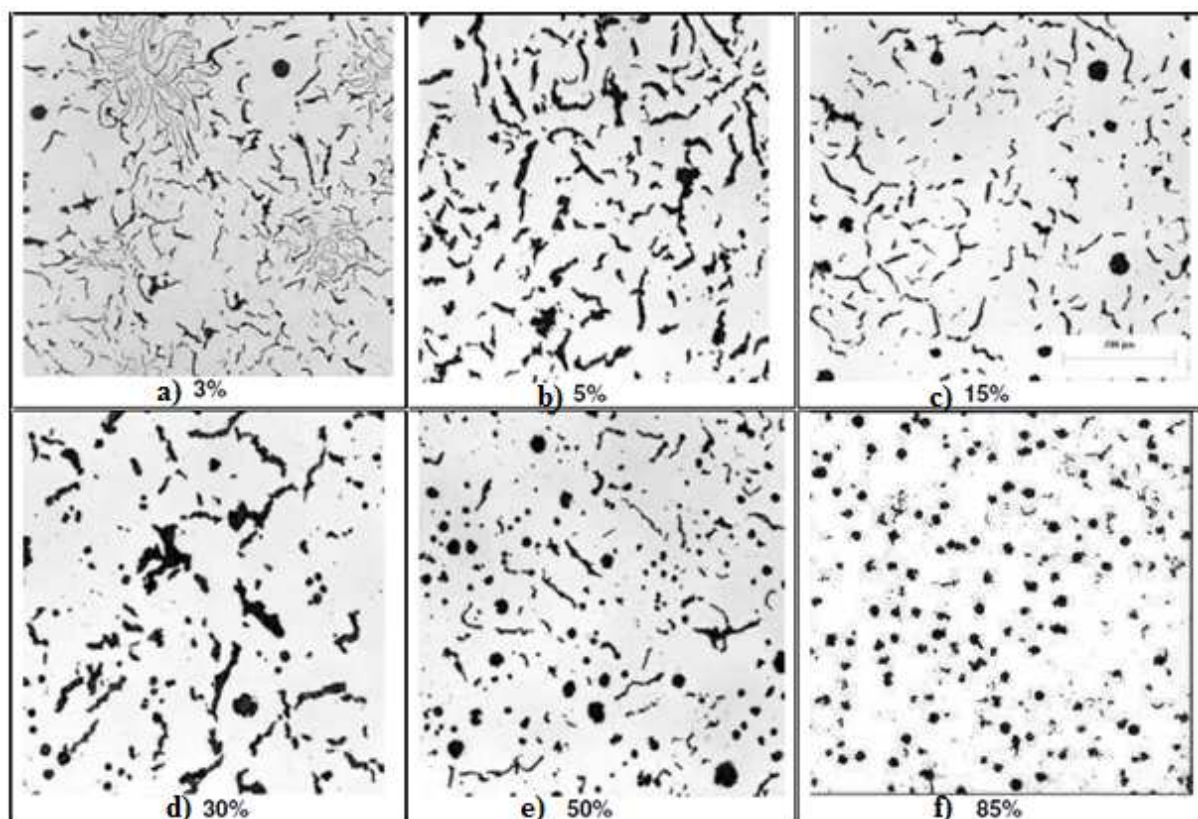
Na obr. 12 je znázorněno velmi úzké „procesní okno“ vzniku červíkovitého grafitu ve srovnání s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Červíkovitý grafit se začne vylučovat při zbytkovém obsahu Mg cca 0,005 %. Při hodnotě zbytkového obsahu Mg cca 0,0085 % je podíl lupínkového a vermikulárního grafitu cca 50/50 %. Tato transformace probíhá až do obsahu cca 0,012 % Mg, kdy začíná krystalizace kuličkového grafitu. Když dosáhne obsah hořčíku cca 0,03 %, krystalizuje všechna uhlík na kuličkovitý tvar. Toto úzké rozmezí obsahu Mg je obtížné v praxi dodržet [6].



Obr. 12 Vliv obsahu zbytkového hořčíku v litinové tavenině na tvar vyloučeného grafitu [13].

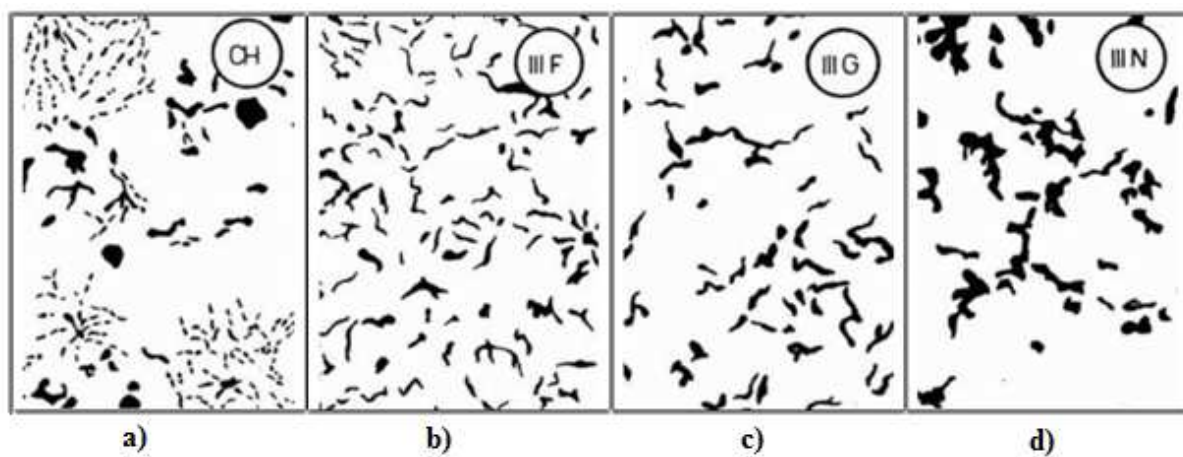
Publikace [6] doporučuje rozmezí obsahu červíkovitého grafitu mezi 70 – 90 %. Pro vlastnosti odlitku je vhodný procentuální obsah cca 10 % kuličkového grafitu. Zvýšením obsahu hořčíku v tavenině zamezíme vzniku lupínkového grafitu v litině.

Zbytkový obsah hořčíku v rozmezí 0,008 – 0,028 % a jeho vliv na strukturu je znázorněn na obr. 13 a – f. Na obr. 13 a) při zbytkovém obsahu hořčíku 0,008 % struktura obsahuje lupínkový grafit. V obr. 13 f) je zbytkový hořčík 0,028 % a na vzorku se vyskytuje převážně jen kuličkový grafit. Vysoká koncentrace Mg způsobuje výskyt 80 – 90 % kuličkového grafitu ve struktuře kovu. Podle publikace [6] je pro vermikulární litinu doporučený obsah zbytkového hořčíku 0,009 % – 0,012 %.



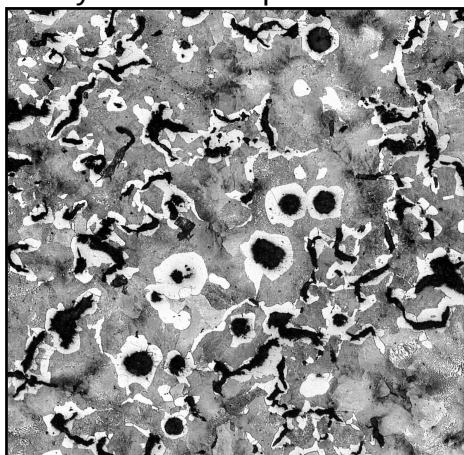
Obr. 13 a – f Vliv zbytkového hořčíku na množství a tvar vyloučeného grafitu (3 – 85 % kuličkového grafitu) [6].

Pro zhodnocení struktury vermikulární litiny můžeme použít také etalony obr. 14 a – d. Hodnotí se tvar a rozložení červíkovitého grafitu [10].

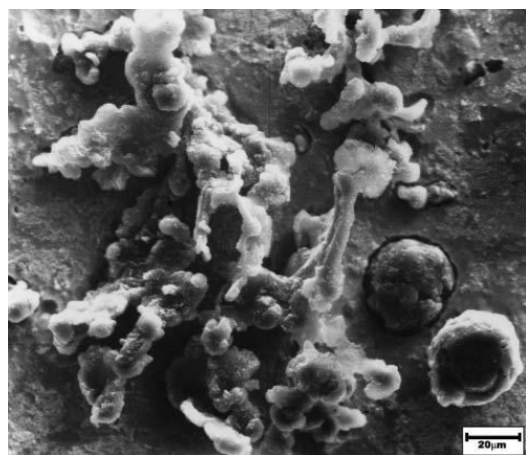


Obr. 14 a – d Etalony pro strukturu vermikulární litiny [10].

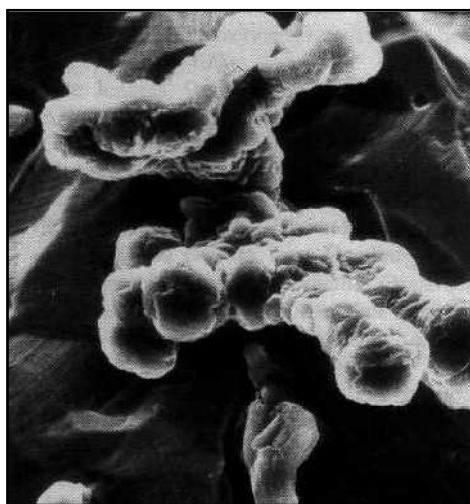
Detailní snímky morfologie červíkovitého grafitu pořízené optickým a elektronovým mikroskopem obr. 15 – 19.



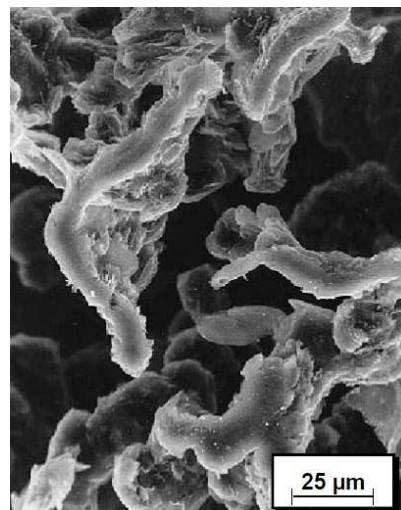
Obr. 15 Morfologie grafitu zvětšení 100:1 [14].



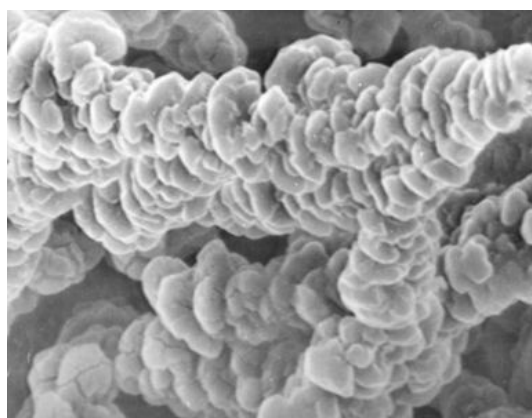
Obr. 16 Mikrofotografie grafitu zvětšeno 500 x [15].



Obr. 17 Grafit v 3D zobrazení MEV 395x [16].



Obr. 18 Mikrofotografie grafitu, při hloubkovém naleptání [7].



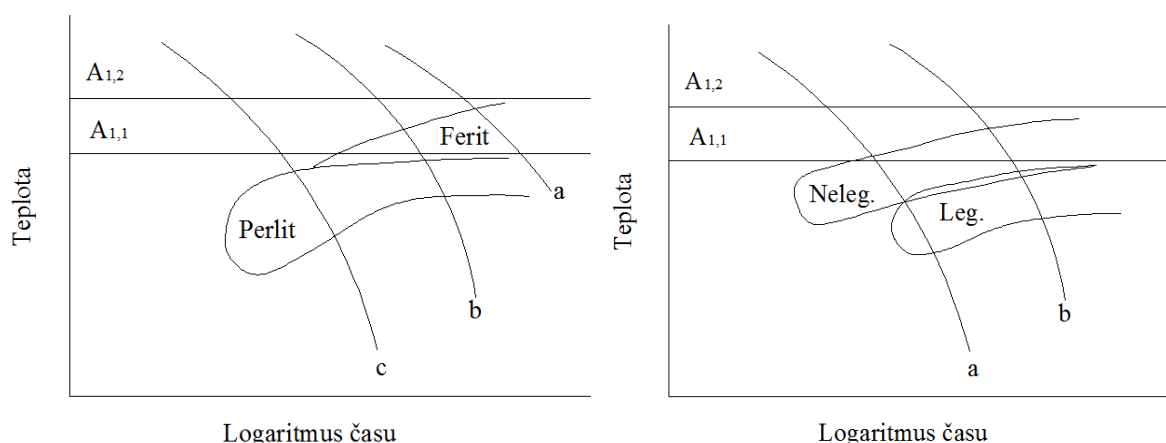
Obr. 19 Detail červíkovitého grafitu (hloubkově leptáno) [10].

1.2 Struktura

Výsledná struktura základní kovové hmoty závisí na několika faktorech[8]:

- rychlosti ochlazování v průběhu tuhnutí a chladnutí
- chemickém složení litiny
- stavu krystalizačních zárodků
- tepelném zpracování (perlitizační a feritizační žíhání).

Základní kov může mít feritickou, feriticko – perlitickou nebo perlitickou strukturu. Vznik dané struktury závisí na rychlosti ochlazování. Vysoká rychlost ochlazování podporuje perlitickou transformaci. Pomalá rychlost ochlazování podporuje transformaci feritu. Rychlost ochlazování je dána tloušťkou stěn odlitku (tenké stěny = rychlé chladnutí, silné stěny = pomalé chladnutí). Vliv plynulého ochlazování na vznik dané struktury popisuje ARA diagram obr. 20. ARA diagram je diagram popisující závislost času potřebného pro počátek a konec rozpadu austenitu (v tomto případě na ferit a perlit). Rychlost ochlazování v ARA diagramu popisují křivky chladnutí. Rychlost ochlazování je znázorněna změnou strmosti křivky. Čím je rychlost vyšší tím je křivka strmější. Pro každou litinu je tento diagram jiný.

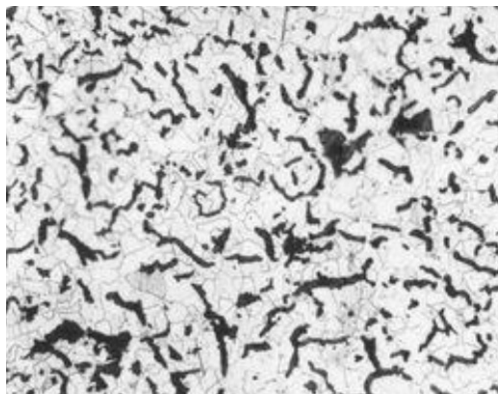


Obr. 20 Vliv rychlosti ochlazování na vznik struktury. a) feritická, b) feriticko – perlitická, c) perlitická matrice [15].

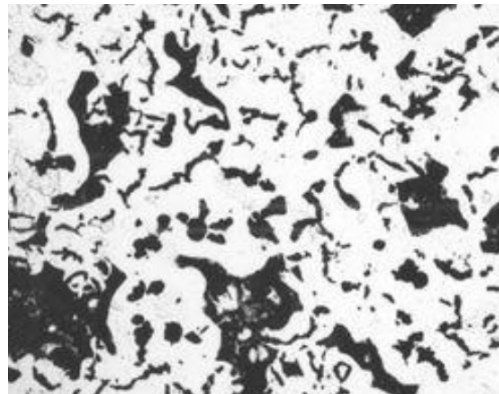
Ferit vzniká při eutektoidní transformaci austenitu za pomalého ochlazování (stabilní diagram FeC). Feritotvorné prvky jsou Si, Al, Ti. Vlastnosti feritu jsou dále ovlivněny přidanými legujícími prvky a doprovodnými prvky, které převážně zvyšují pevnost a tvrdost. Houževnatost zvyšují Ni, Cr, Mn a snižuje Si [8].

Perlit je eutektoid vniklý rozpadem austenitu při vyšší rychlosti ochlazování (metastabilní diagram Fe₃C). Perlitotvornými prvky jsou Mn, Cu, Sn a Cr. Některé mechanické vlastnosti perlitu ve srovnání s feritem jsou vyšší např. pevnost až cca R_m 800 MPa a tvrdost [8].

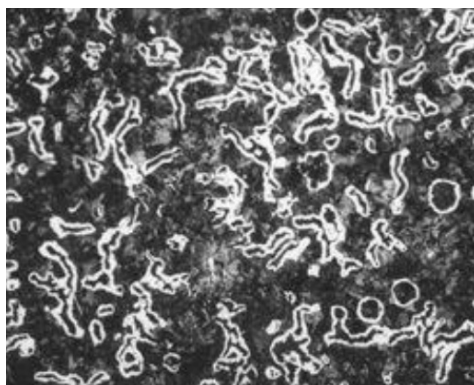
Detailní snímky základních kovových struktur – feritická obr. 21, feriticko – perlitická obr. 22 a perlitická obr. 23.



Obr. 21 Feritická matrice [10].



Obr. 22 Feriticko – Perlitická matrice [10].



Obr. 23 Perlitická matrice [10].

1.3 Chemické složení

Grafitizační schopnost a struktura litiny je ovlivněna chemickým složením. Závislosti mezi výslednou strukturou a chemickým složením popisují strukturní diagramy. Chemické složení litin se určuje pomocí uhlíkového ekvivalentu C_E nebo stupně eutektičnosti S_E . Metody výpočtu chemického složení pomocí C_E se S_E jsou rovnocenné [8].

Uhlíkový ekvivalent je dán vzorcem (2.1)

$$C_E = C + \frac{1}{3}(Si + P) \quad (2.1)$$

Podle hodnoty C_E se určí složení litiny:

$C_E < 4,25$...podeutektické litiny

$C_E \sim 4,25$...eutektické litiny

$C_E > 4,25$...nadeutektické litiny

U LČG obsah uhlíku a křemíku odpovídá přibližně eutektickému až mírně nadeutektickému složení - CE = 4,2 – 4,5. [8]

Stupeň eutektičnosti se vypočítá pomocí vzorce (2.2)

$$S_E = \frac{C}{4,3 - \frac{1}{3}(Si+P)} \quad (2.2)$$

Podle hodnoty S_E se určí složení litiny:

$S_E < 1$...podeutektické litiny

$S_E = 1$...eutektické litiny

$S_E > 1$...nadeutektické litiny

Poměr C/Si se pohybuje v rozmezí 1,2 – 2,4. Čím je hodnota nižší při stejném uhlíkovém ekvivalentu, tím je grafitizační schopnost litiny lepší (snížení možnosti vzniku zákalky a zvýšení podílu feritu ve struktuře).

Kromě železa jsou v litinách obsaženy základní prvky, legury a nečistoty. Mezi základní prvky patří C, Si, Mn, P a S. Tyto prvky mají velký vliv na vlastnosti vermikulární litiny.

Obsah a vliv nejdůležitějších prvků obsažených v LČG

a) Uhlík C 3,2 – 3,8 %:

Uhlík společně s křemíkem má největší vliv na vlastnosti a strukturu litin. Zvýšený obsah uhlíku vyloučeného ve formě grafitu snižuje objemové smrštění a snižuje stahování při tuhnutí. Vysoký obsah C je vhodný pro složité tenkostěnné odlitky a snižuje pórovitost odlitku [8].

Porovnání obsahu C: LLG 2,8 – 3,6 %

LKG 3,4 – 3,8 %

b) Křemík Si 1,5 – 4 %:

Je druhý nejvýznamnější prvek v litině a je silně grafitizační. Podporuje vznik feritu a při jeho nízkém obsahu má litina silný sklon k zákalce. Křemík zvyšuje tvrdost feritu, snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Při nižších teplotách podporuje vznik křehkých lomů. Vysoký obsah podporuje vznik kuličkového grafitu [8].

Porovnání obsahu Si: LLG do 3,0 %

LKG 1,5 – 3,5 %

c) Mangan Mn 0,1 – 0,6 %:

Stabilizuje a zjemňuje perlit. Zvyšuje mechanické vlastnosti jako pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení. Mangan v LLG a bílé litině váže síru, ale tuto funkci u vermikulární a tvárné litiny nahrazuje hořčík [8].

Porovnání obsahu Mn: LLG 0,1 – 0,8 %

LKG 0,4 – 0,8 %

d) Fosfor P < 0,1 %

Mírně podporuje grafitizaci, pevnost, tvrdost a odolnost proti opotřebení. Při vyšší koncentraci zlepšuje zabíhavost, snižuje pevnost a tvoří fosfidické eutektikum (steadit). Teplota tuhnutí steaditu je cca 955 °C. Steadit je tvrdý a křehký a snižuje houževnatost, proto je důležité udržet obsah fosforu pod 0,08 % [8].

Porovnání obsahu P: LLG 0,2 – 0,5 %
 LKG < 0,1 %

e) Síra S 0,005 – max. 0,012 %

Síra je nežádoucí prvek, který se dostává do taveniny především vsázkovými surovinami. Působí proti grafitizaci a způsobuje vyšší křehkost litiny. Sulfidy, které síra vytváří, slouží k tvorbě zárodků pro růst grafitu. V litině s červíkovitým grafitem se obsah síry snižuje během modifikace Mg (tvoří MgS). Pokud je v tavenině před modifikací vysoký obsah síry (0,013 %), dochází k reakci většího množství Mg s touto sírou a k tvorbě většího množství sekundární strusky. Proto je vhodné před modifikací udržet obsah síry v rozmezí cca 0,02 – 0,03 % [6][8].

2 VLASTNOSTI LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

U každého materiálu je důležité znát mechanické vlastnosti (pevnost, tvrdost, houževnatost, tažnost, atd. ...) a fyzikální vlastnosti (útlum vibrací, tepelná vodivost, atd. ...). Litina s červíkovitým grafitem do jisté míry kombinuje vlastnosti litiny s lupínkovým a kuličkovitým grafitem tab. 1. Mechanické a fyzikální vlastnosti litiny jsou nejvíce ovlivněny chemickým složením a strukturou základní kovové hmoty.

V tab. 1 jsou shrnuty vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti třech základních druhů grafitických litin. Tyto údaje byly získány z publikace [4][9].

Tab. 1 Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností grafitických litin.

Vlastnost		Jednotky	Tvar grafitu		
			lupínkový	červíkovitý	kuličkový
Pevnost v tahu R_m		MPa	100 – 400	300 – 550	380 – 900
Smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$		MPa	70 – 300	250 – 380	250 – 600
Pevnost v tlaku R_{mt}		MPa	500 – 1000	600 – 1200	600 – 1200
Tažnost A		%	do 1	2 – 8	2 – 25
Tvrdost HB		-	140 – 250	130 – 280	120 – 350
Koeficient $m = R_m/HB$		-	0,8 – 1,8	1,9 – 2,5	2,7 – 3,1
Houževnatost na vzorku bez		J/cm ²	5 – 20	5 – 40	10 – 200
Vrubová houževnatost KCU		J/cm ²	1,5	3 – 10	3 – 25
Mez únavy	tah – tlak	MPa	30 – 90	120 – 180	150 – 310
	střídavý ohyb	MPa	50 – 150	160 – 210	190 – 380
	ohyb za rotace	MPa	50 – 125	200 – 270	200 – 400
Modul pružnosti E		kN/mm ²	75 – 155	130 – 160	140 – 185
Součinitel teplotní		μm/m.K	11 – 12	11 – 13	11 – 13
Součinitel tepelné vodivosti λ		W.m/K	45 – 55	35 – 50	25 – 33
Hustota ρ		kg/m ³	7000 – 7300	7000 – 7100	7000 –
Poměrná velikost staženin		%	0,5	2 – 6	3 – 10
Měrný elektrický odpor R		Ω.mm ² /m	0,5 – 1	0,7 – 0,8	0,5 – 0,7

Hodnoty uvedeny v publikaci [9] jako požadované vlastnosti pro LČG (německy GGV) jsou shrnuty v tab. 2. Vermikulární litina není v ČSN normována.

Tab. 2 Předepsané vlastnosti vermikulární litiny s feritickou (GGV – 30) a převážně perlitickou (GGV – 40) základní hmotou [9].

Vlastnost		Jednotky	GGV – 30	GGV – 40
Struktura			feritická	převážně perlitická
Pevnost v tahu R_m		MPa	min. 300	min. 400
Smluvní mez v kluzu $R_{p0,2}$		MPa	min. 240	min. 280
Pevnost v tlaku R_{mt}		MPa	500	600 – 1200
Pevnost v ohybu		MPa	600	700
Tažnost A		%	min. 2	1 až 2,5
Tvrdost HB 30		-	130 – 190	190 – 280
Koeficient $m = R_m/HB$		-	1,9 – 2,5	-
Houževnatost na vzorku bez vrubu KC		J/crn ²	15 – 35	6 – 10
Vrubová houževnatost KCU		J/crn ²	3 – 6	do 3
Mez únavy	tah – tlak	MPa	120 – 150	150
	v ohybu	MPa	160 – 180	190 – 210
Modul pružnosti E		kN/mm ²	130 - 160	150 – 160
Součinitel teplotní roztažnosti α		μm/m.K	11	11-13
Součinitel tepelné vodivosti λ		W/m.K	38 – 46	40
Hustota ρ		kg/m ³	7000	7100
Měrný elektrický odpor R		Ω.mm ² /m	0,5	0,6

2.1 Mechanické vlastnosti

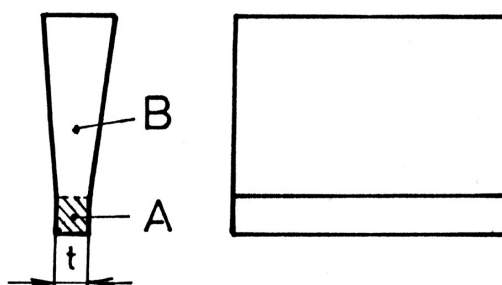
U litin se standardně hodnotí mechanické vlastnosti při zkoušce tahem, zkoušce tvrdosti a zkoušce vrubové houževnatosti. Hodnocené mechanické vlastnosti jsou:

- **pevnost** - mez pevnosti v tahu R_m , u LČG rovněž mez $R_{p0,2}$
- **plastické vlastnosti** - tažnost A_5 , obvykle pouze u LČG, LKG
- **dynamické vlastnosti** - rázová houževnatost KCV na tělesech s V – vrubem, obvykle pouze u LČG a LKG
- **tvrdost** - hodnota tvrdosti v HB

Hlavní vliv na mechanické vlastnosti litin má tvar, velikost grafitu, struktura základní kovové hmoty a také koncentrace legujících prvků. Zkoušky mechanických vlastností se provádí na zkušebních vzorcích. Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku i zkoušku vrubové houževnatosti u vermikulární litiny jsou vyráběny z odděleně litych nebo přilítých zkušebních těles. Nejčastěji používané zkušební tělesa jsou zejména tzv. Y – bloky - obr. 24 a tab. 3. Rozměry zkušebního tělesa se volí v souladu s tloušťkou stěn odlitků tak, aby rychlost ochlazování zkušebního tělesa a odlitku byla podobná. Jelikož se z vermikulární litiny odlévají převážně tenkostěnné odlitky, jako zkušební těleso se nejčastěji používá typ I a II. U typu I je kvůli rozměrům zkušebního vzorku obtížnější vyhodnocování výsledků, proto je vhodnější používat typ II. Typ III a IV se příliš nepoužívají právě z důvodu odlévání tenkostěnných odlitků. Zkušební vzorek se skládá ze spodní části tělesa (část A) a nálitku (část B) [8].

Tab. 3 Rozměry zkušebního Y – bloku [8].

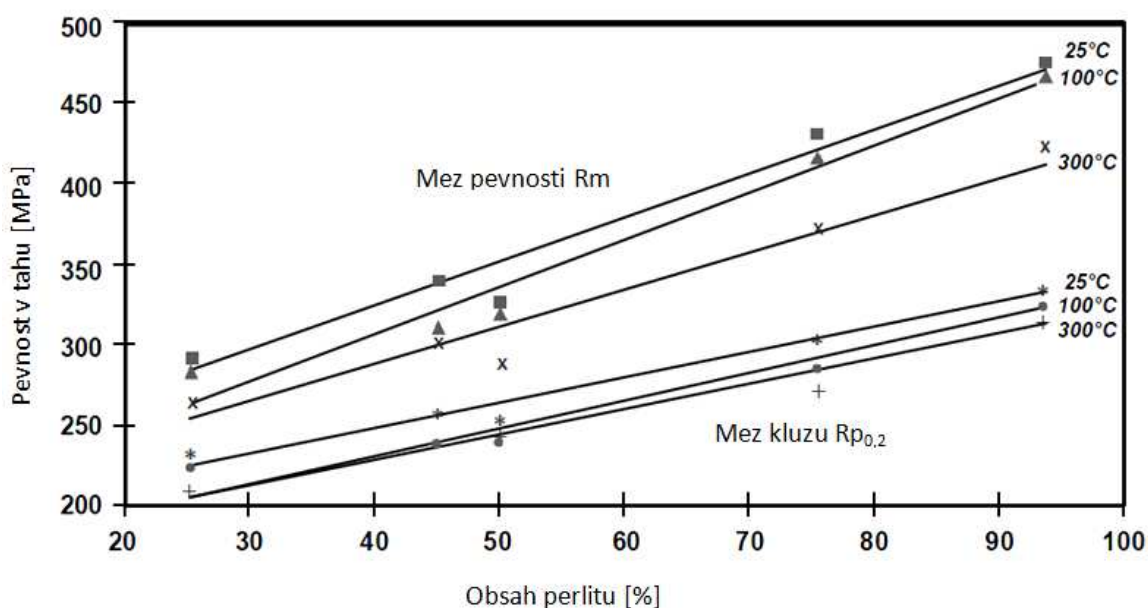
Typ bloku	t [mm]
I	12,5
II	25
III	50
IV	75



Obr. 24 Zkušební těleso tvaru Y [8].

2.1.1 Pevnost v tahu a mez kluzu LČG

Pevnost litiny je dána především strukturou a tvarem grafitu. U nelegované litiny je nositelem pevnosti perlit a nositelem houževnatosti a plastických vlastností ferit. V obr. 25 je zobrazen nárůst pevnosti při zvyšování obsahu perlitu v litině.



Obr. 25 Graf závislosti meze pevnosti a meze kluzu na obsahu perlitu a teplotě (při nodularitě 10 %) [17].

Vyšší pevnosti lze dosáhnout zvýšením podílu kuličkového grafitu v litině, který by však neměl přesáhnout 20 % kvůli zachování některých výhodných vlastností LČG např. tepelné vodivosti. Vyšší obsah kuliček má malý vliv na tažnost, která s jeho rostoucím podílem nepatrně roste tab. 4.

Tab. 4 Vliv obsahu kuličkového grafitu na vybrané vlastnosti [9].

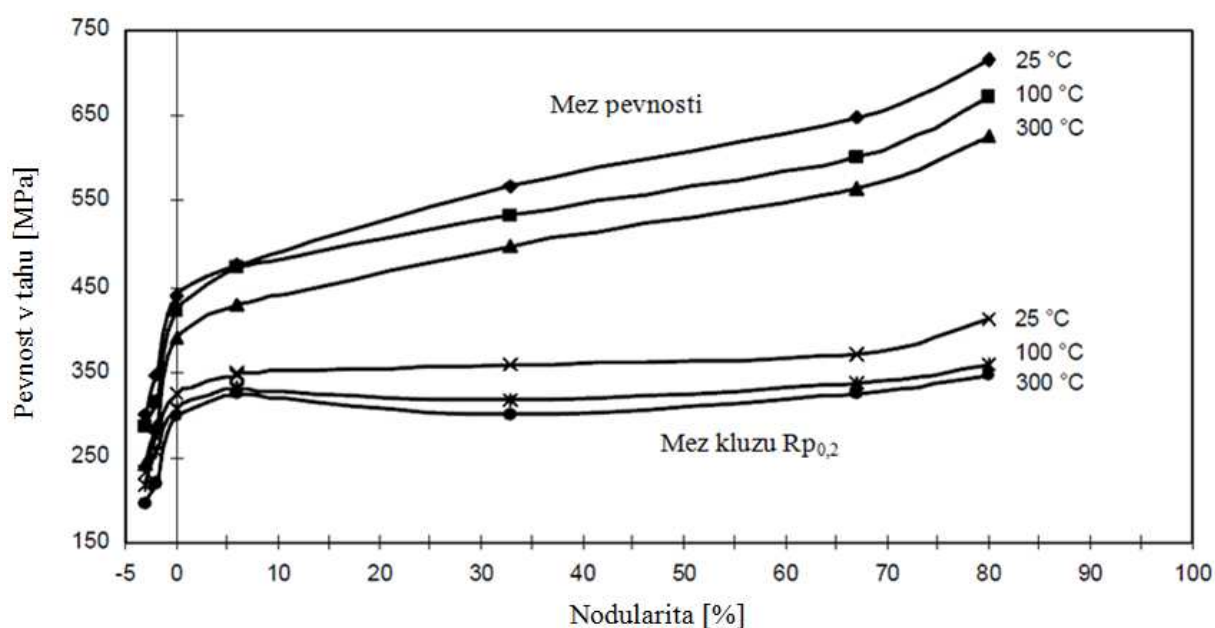
Podíl kuličkového grafitu [%]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Tepelná vodivost [W/m . K]	Objem ztuhnutí [%]
10 – 20	320 – 380	2 – 5	50 – 52	1,8 – 2,2
20 – 30	380 – 450	2 – 6	48 – 50	2,0 – 2,6
40 – 50	450 – 500	3 – 6	38 – 42	3,2 – 4,6

Publikace [17] popisuje výsledky ze zkoušek mechanických vlastností vermikulární litiny určené k výrobě bloku válce. Zkoušky byly provedeny na třech zkušebních vzorcích odebraných z válcových odlitků. Každý vzorek byl testován za jiné teploty (při 25 °C, při 100 °C a při 300 °C).

Vzorky byly rozděleny do dvou kategorií:

1. LČG s pevnou nodularitou 0–10 % a s obsahem 20–100 % perlitu v základní kovové struktuře
2. LČG s pevnou nodularitou 90 % a s obsahem 85–100 % perlitu, ve struktuře byly obsaženy i lupínky (v obr. 26 vyjádřeno modularitou -5 %)

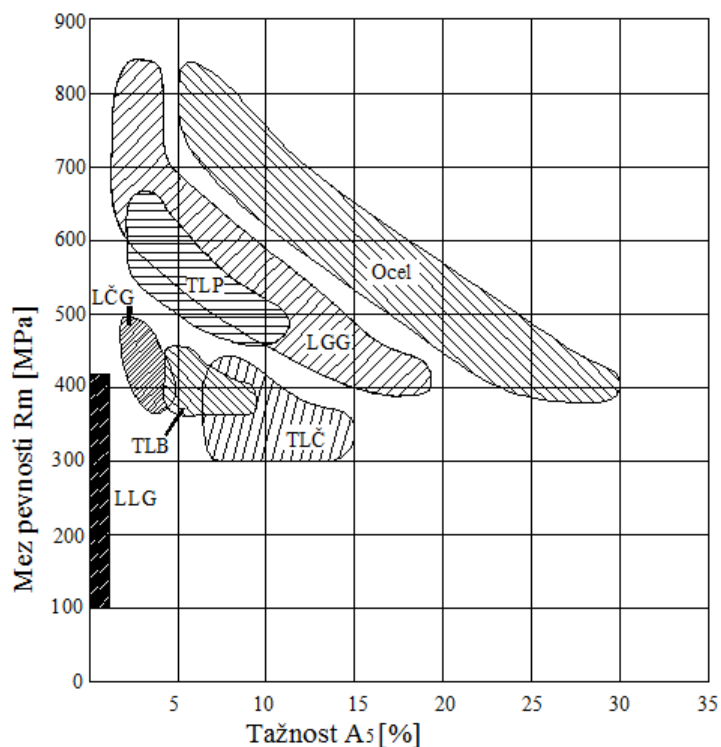
Na obr. 26 jsou zobrazeny meze pevnosti a meze kluzu vermikulární litiny s perlitickou matricí a různou nodularitou při teplotě 25 °C, 100 °C, 300 °C. Při zvyšování podílu kuličkového grafitu ve struktuře narůstá pevnost. Zvýšený obsah kuličkové formy mírně zvyšuje mez kluzu. Poměr $R_{p0,2}/R_m = 0,72$ až 0,82. Lupínkový grafit se ve struktuře nesmí vyskytovat, protože výrazně snižuje pevnost vermikulární litiny [17].



Obr. 26 Křivky závislosti meze pevnosti a kluzu na nodularitě [17].

Tažnost:

Tažnost litiny souvisí se strukturou základního kovu a tvarem vyloučeného grafitu. Lepší tažnost vykazují feritické litiny než perlitické litiny. Jak je uvedeno výše v tab. 3, vyšší obsah kuličkového grafitu má jen nepatrný vliv na tažnost LČG. Porovnání meze pevnosti a tažnosti nejčastěji odlévaných materiálů je v obr. 27. Tažnost vermikulární litiny dosahuje hodnot podle publikace [6] – pro feritickou matici cca 2 – 5 %, pro perlitickou matici cca 1 – 2,5 % a pro vyžíhanou feritickou matici dosahuje hodnot cca 8 – 9 %. Dále se tažnost zvýší při zvýšení teploty, a to od hodnoty cca 450 °C [4].

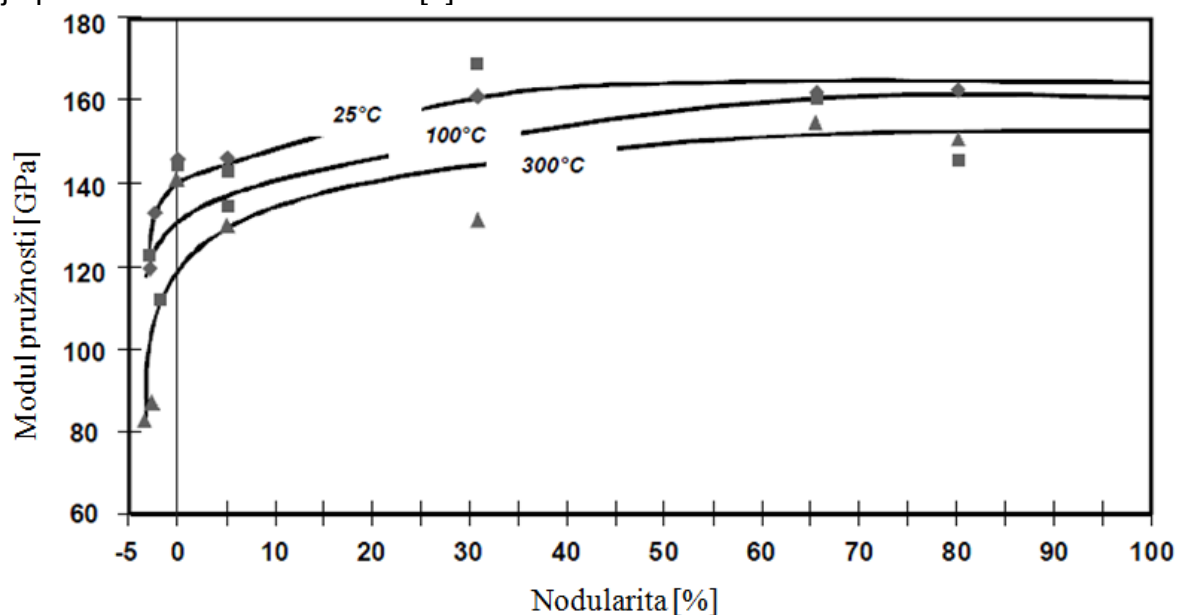


Obr. 27 Porovnání meze pevnosti a tažnosti nelegovaných litin [6].

Modul pružnosti:

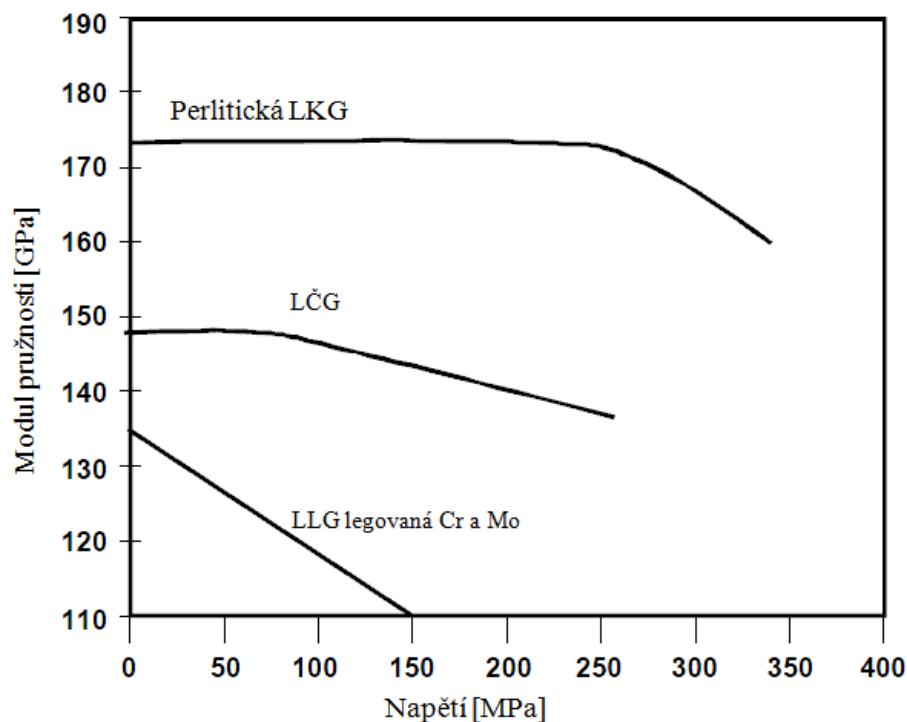
Modul pružnosti litin rovněž souvisí se strukturou, tj. s pevností a tvrdostí. Čím vyšší je pevnost litiny, tím větší je i modul pružnosti. Jak je znázorněno na obr. 28 s rostoucí nodularitou a podílem perlitu v matici roste i modul pružnosti (E). Významný vliv má i tvar grafitu. Lupínkový grafit i v malém množství snižuje modul pružnosti až o 20 % obr. 28 [6].

Modul pružnosti je za normální teploty cca 150 GPa. S rostoucí teplotou se snižuje při 300 °C na cca 140 GPa [4].



Obr. 28 Modul pružnosti při 85 – 100 % perlitu, jako funkce teploty a nodularity [6].

V obr. 29, jsou uvedeny křivky poklesu modulu pružnosti při zatížení. V případě zatížení odlitku litiny s lupínkovým grafitem vykazuje tento materiál rychlý pokles modulu pružnosti. Vermikulární a tvárná litina udržují konstantní modul pružnosti do určité hodnoty napětí. V provozu má šedá litina o 50 – 70 % menší odolnost vůči dynamickému namáhání než vermikulární litina [6].



Obr. 29 Křivky poklesu modulu pružnosti při zatížení, pro LLG, LČG a LKG [6].

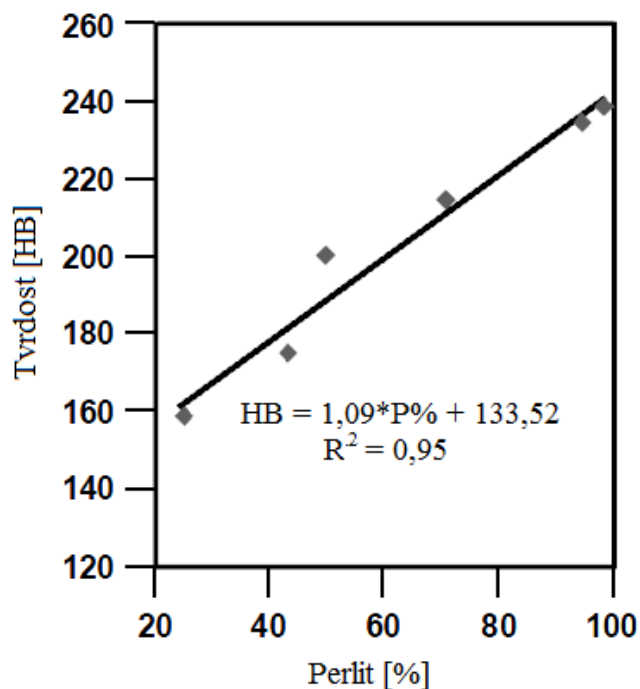
2.1.2 Tvrdost

Tvrdost litiny má významný vliv na obrobiteľnosť a na životnosť obrábacích nástrojů. Tvrdost LČG se mění v závislosti na struktuře základní kovové hmoty a její dispersitě (rozptýlení). Jemnozrnná struktura má větší tvrdost než hrubozrnná struktura. Nositelem tvrdosti je perlitická struktura obr. 30. Perlitickou strukturu je možné vytvořit přidáním perlitotvorných prvků (Mn, Cu, Cr, Sn,...). V případně tenkostěnných odlitků je to i rychlejším chladnutím. Vermikulární litina má o cca 10 – 15 % vyšší tvrdost než litina s lupínkovým grafitem se stejným obsahem perlitu. Dále ji ovlivňuje obsah přísadových prvků (Mn, Cr, Ti, atd.) a tepelné zpracování. Změnami uvedených vlivů ji můžeme ovlivňovat. Přibližné hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v tab. 5 [8][17].

Tab. 5 Různé struktury a jejich přibližná tvrdost.

Struktura	Tvrdost [HB]
feritická	120-150
feriticko – perlitická	140-200
perlitická	180-260
nízkolegovaná perlitická	210-280

Tvrdost vermikulární litiny v závislosti na obsahu perlitu v základním kovu roste lineárně obr. 30. Této závislosti je možné využít např. při hodnocení obsahu perlitu v odlitku tím, že se provede zkouška tvrdosti dle Brinella.



Obr. 30 Tvrdost dle Brinella pro vermikulární litinu s nodularitou 10 % v závislosti na obsahu perlitu [17].

2.1.3 Vrubová houževnatost

Pro zjištění hodnoty vrubové houževnatosti (KCV) se používá zkouška rázem v ohybu pomocí Charpyho kladiva a zkušební vzorek s V – vrubem. Jak je uvedeno v tab. 1, vermikulární litiny mají vrubovou houževnatost 7 – 10 J/cm². V důsledku obsahu kuličkového grafitu má LČG větší vrubovou houževnatost než LLG. Vyšší KCV má LČG s feritickou strukturou a nízkým obsahem fosforu (P < 0,02 %). U tyčí s vrubem se za teplot 20 °C dosahuje KCV = 2 – 8 J/cm². Působením nízkých teplot plynule klesá i houževnatost litin až do stavu, kdy se stává křehkou [4].

2.1.4 Mez únavy

Největší vliv na schopnost materiálu odolávat cyklickému zatěžování má mez únavy materiálu, následně rozložení a tvar grafitu, rozložení a objemové množství různých vměstků, karbidů, staženin, ředin a rovněž i kvalita povrchu a velikost součástí. Červíkovitý tvar grafitu má zaoblené konce, působí proti dalšímu šíření trhliny. Struktura červíkovitého grafitu je více rozvětvená a lépe propojená s matricí, proto se trhlina šířit „klikatější“ cestou. Při hodnocení naměřených údajů je nutné uvést jakou má zkoušející vzorek strukturou a pevnosti v tahu. Tyto dvě informace poslouží jako referenční bod [17].

Únavové vlastnosti vzorků namáhaných ohybem za rotace jsou uvedeny v tab. 6. Hodnoty jsou udávány z hlediska dvou bezrozměrných indexů [17].

$$\text{poměr meze únavy k pevnosti} = \frac{\text{nevrubová mez únavy}}{\text{pevnost v tahu}} \quad (2.3)$$

$$\text{únavová pevnost (redukční koeficient)} = \frac{\text{nevrubová mez únavy}}{\text{vrubová mez únavy}} \quad (2.4)$$

Tab. 6 Únavové vlastnosti a vliv vrubu u vzorku namáhaných ohybem za rotace [17].

Druh litiny	Perlit [%]	Nod. [%]	Tvrdost [HB]	Pevnost [MPa]	Mez únavy		Poměr meze únavy	Únavová pevnost (Redukční koeficient)
					Bez vrubu	S vrubem		
LČG	70 – 80	0 – 10	184	388	178	100	0,46	1,77
LČG	> 90	0 – 10	205	414	185	108	0,45	1,72
LČG	< 20	10 – 20	134	351	196	131	0,57	1,50
LČG	> 85	10 – 30	229	583	255	180	0,44	1,42
LKG	< 20	90	159	449	226	142	0,50	1,59
LKG	> 85	90	277	727	275	183	0,38	1,50
LČG	ferit	-	134	248	186	137	0,58	1,36
LČG	perlit	-	223	346	186	118	0,45	1,57
LKG	ferit	-	143	269	235	147	0,57	1,60
LKG	perlit	-	223	404	255	147	0,35	1,73
LČG	ferit	-	143	388	221	137	0,57	1,61
LČG	ferit	-	143	269	235	147	0,57	1,60
LKG	ferit	-	137	320	196	108	0,61	1,82
LKG	ferit	-	128	285	157	93	0,55	1,68
LLG	ferit	-	103	201	98	88	0,49	1,11

V publikaci [17] byly uvedeny hodnoty meze únavy různých vzorků LČG, LKG a jednoho vzorku LLG. Vermikulární litina má poměr meze únavy v rozmezí od 0,44 do 0,58 a únavová pevnost v rozmezí od 1,36 do 1,77. Vermikulární litina má vyšší mez únavy než LLG ale nižší než LKG.

2.2 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti litin jsou ovlivněny přítomností grafitu ve struktuře, jeho tvarem a druhem základní kovové hmoty. Mezi důležité fyzikální vlastnosti patří:

- **tepelná vodivost** – s rostoucím podílem grafitu ve struktuře roste i tepelná vodivost materiálu
- **útlum vibrací** – tato vlastnost charakterizuje schopnost materiálu tlumit mechanické vibrace
- **součinitel tepelné roztažnosti** – snižuje teplotní pnutí a tepelné borcení
- **hustota** – závisí na množství vyloučeného grafitu, za normálních teplot obvykle v rozmezí 7 000 – 7 100 kg.m⁻³.

2.2.1 Tepelná vodivost

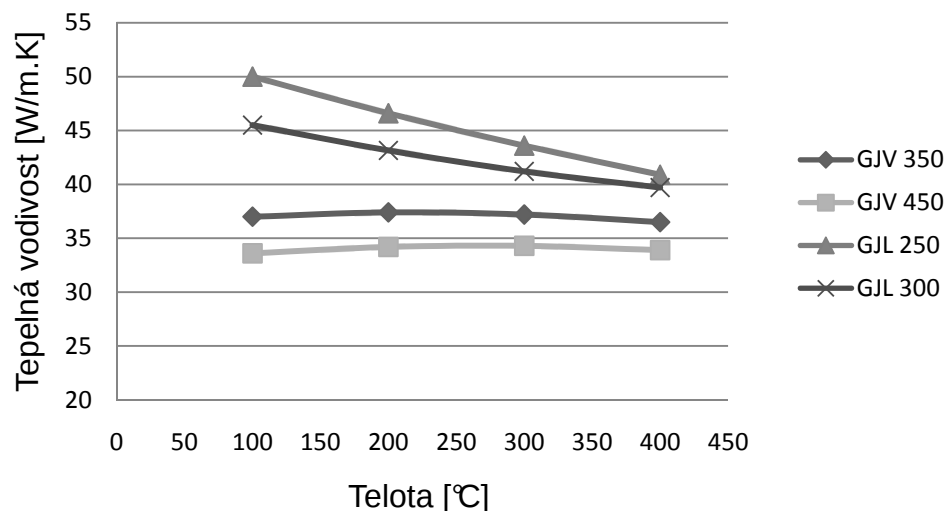
Tuto fyzikální vlastnost ovlivňuje mnoho faktorů. Závisí na množství a tvaru vyloučeného grafitu, s rostoucím obsahem grafitu ve struktuře roste i tepelná vodivost materiálu. Nejvyšší tepelnou vodivost má LLG, dále LČG a nejnižší má LKG. Tepelná vodivost vermikulární litiny s rostoucí teplotou mírně roste [17].

Platí, že vyšší tepelnou vodivost má grafit, dále ferit, perlit a nejnižší má cementit. U grafitu mají jednotlivé směry krystalizace „růstu“ různou tepelnou vodivost. Největší tepelnou vodivost grafitu má bazální rovina krystalu. Přítomnost některých legujících prvků snižuje tepelnou vodivost. Nejvíce ji snižuje přítomnost prvků jako nikl a molybden [18].

Tab. 7 Tepelná vodivost metalografických litiny za různých teplot [18].

Struktura		Tepelná vodivost [W m ⁻¹ °C ⁻¹]		
		0 – 100 °C	500 °C	1000 °C
Ferit		71 – 80	42	29
Perlit		50	44	40
Cementit		7 – 8	-	-
Grafit	Rovnoběžně s bazální rovinou	293 – 419	84 – 126	42 – 63
	Kolmo na bazální rovinu	84	-	-

V publikaci [18] jsou uvedeny výsledky testu porovnávajícího tepelnou vodivost LČG a LLG při působení různých teplot obr. 31. Naměřené výsledky tepelné vodivosti ukázaly, že litina s lupínkovým grafitem má vyšší tepelnou vodivost. Zvýšení teploty má nepříliš významný vliv na tepelnou vodivost vermikulární litiny. Vzorek GJV 350 má vyšší tepelnou vodivost než vzorek GJV 450. To je dáno podílem perlitu.

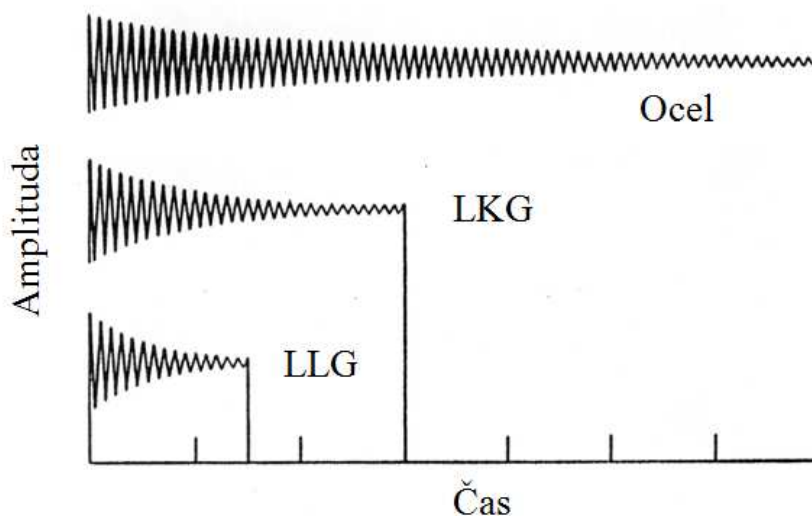


Obr. 31 Graf výsledných hodnot tepelné vodivosti v závislosti na zvyšování teploty.

Pro některé použití je tepelná vodivost hlavním důvodem výběru daného materiálu. Například spojení vhodných mechanických a třecích vlastností s tepelnou vodivostí umožňuje nahradit některé dosavadní materiály vermikulární litinou např. v automobilovém průmyslu – vnitřní součásti spalovacích motorů a brzdových systémů (hlavy válců, písty).

2.2.2 Útlum vibrací

Jedna z nejdůležitější fyzikálních vlastností litin je schopnost materiálu utlumit mechanické vibrace. Materiál s vysokou tlumicí schopností redukuje subsonické vibrace a hluk vytvářený zařízením (strojem). Velký útlum litin je dán rozptylem energie na grafitické částice jistou formou vnitřního tření. Proto se litiny používají tam, kde je potřeba klidný chod (části motoru, atd. ...), snížení hluku a chvění (obráběcí stroje, atd. ...). Nejčastěji se používá normalizovaný vztah relativní tlumicí schopnosti v rozmezí od 0 do 1. LLG dosahuje nejvyšší hodnoty tedy 1. Průběh útlumu jednotlivých materiálů je znázorněn na obr. 32 [6] [8][15].



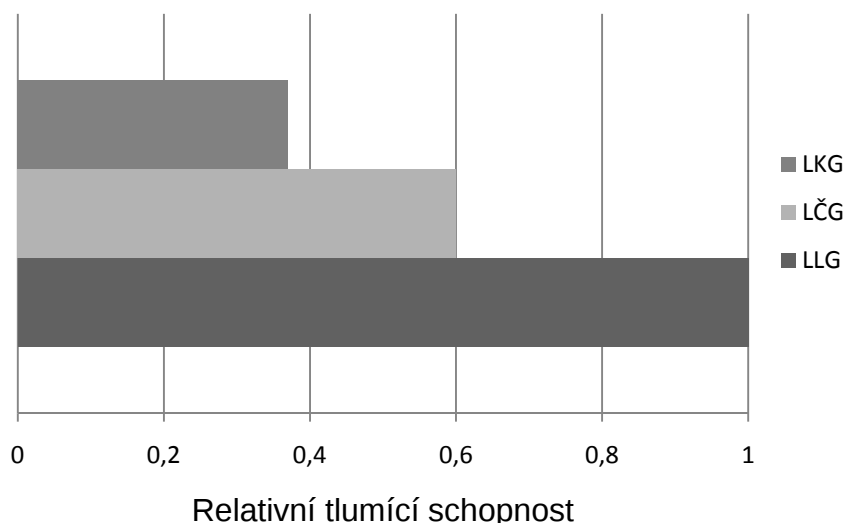
Obr. 33 Útlum vibrací v závislosti na čase, dvou typů grafitické litiny a oceli dle Gallowaye [8].

V publikaci [6] byly uvedeny hodnoty tlumící schopnosti LLG, LČG, LKG. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tab. 8. LLG dosahuje nejvyšší hodnoty 1, proti tomu nejnižší přibližně 0,14 – 0,37 perlitická LKG a mezi nimi se pohybuje LČG s hodnotami 0,35 – 0,60 %.

Tab. 8 Relativní tlumící schopnost [6].

LLG	LČG	LKG	Poznámky
1,0	0,38	0,19	Perlitická LČG, $C_E = 4,0 - 4,3 \%$
1,0	0,53	0,37	Všechny feritické litiny
1,0	0,35	0,14	Podobné chemické složení všech vzorků
1,0	0,59	0,24	Perlitická LLG, feritická LČG a LKG
1,0	0,60	0,34	Nespecifikovaná mikrostruktura

Obr. 34 popisuje rozdíly tlumících schopností jednotlivých druhů grafitických litin (hodnoty uvedeny v tab. 8).



Obr. 35 Relativní tlumící schopnost grafitických litin rozmezí 0 – 1.

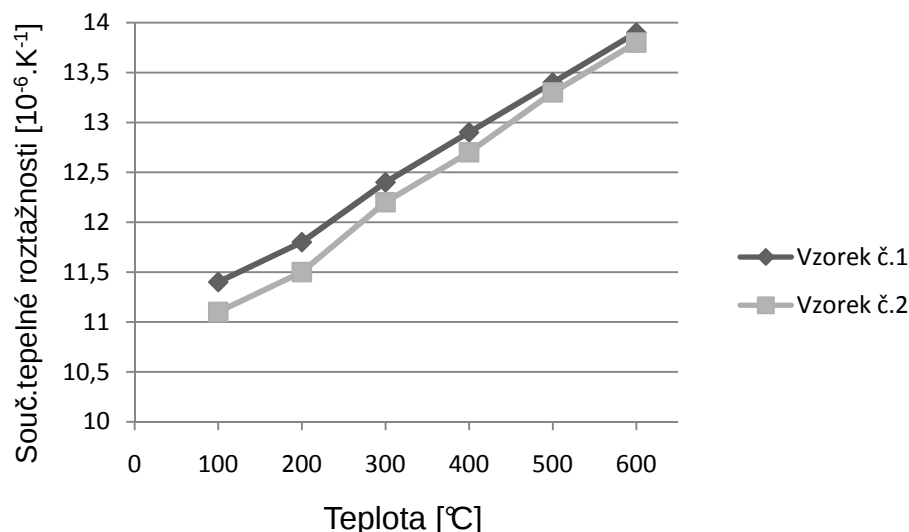
2.2.3 Součinitel tepelné roztažnosti

Tepelná roztažnost je jev, při kterém se po dodání/odebrání tepla tělesu (po zahřátí/ochlazení tělesa o určitou teplotu) změní délkové rozměry (objem) tělesa. Většina látek se při zahřívání rozpíná. To znamená, že jejich molekuly se pohybují rychleji a jejich rovnovážné polohy jsou dále od sebe. Vermikulární litina s feritickou maticí má vyšší tepelnou roztažnost než LČG s perlitickou maticí. Součinitel tepelné roztažnosti se pohybuje u jednotlivých druhů litin v rozpětí $\pm 1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ v rozmezí teplot $20^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$ [6].

LČG má tepelnou roztažnost v rozmezí $11 - 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Menší tepelná roztažnost, dobrá tepelná vodivost a nižší modul pružnosti odlitku z vermikulární litiny

vede ke vzniku menších teplotních pnutí, dobré odolnosti proti teplotním šokům a menšímu tepelnému borcení [8].

V obr. 36 jsou uvedeny hodnoty součinitele tepelné roztažnosti dvou vzorků vermikulární litiny s obsahem 70 % a 98 % perlitu v základní kovové struktuře. Oba vzorky mají téměř lineární nárůst hodnot součinitele tepelné roztažnosti, ale u vzorku 1 je při 70 % perlitu vyšší součinitel roztažnosti [6].



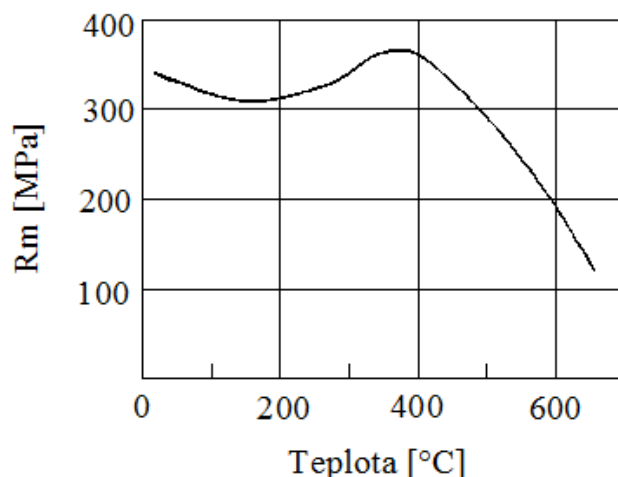
Obr. 36 Součinitel tepelné roztažnosti LČG v závislosti na teplotě.

2.3 Vlastnosti za zvýšených teplot

Vermikulární litina má lepší žáruvzdornost než nelegované litiny s lupínkovým grafitem. Odličky určené pro použití v prostředí se zvýšenou teplotou se legují prvky (Si, Mo). Vyšší teploty nepříznivě působí i na mez únavy. Při teplotě cca 20 °C je vyšší cca o 1/3 než při 500 °C [8][19].

2.3.1 Mez kluzu a pevnosti za zvýšené teploty

Vermikulární litina má poměrně dobrou žáruvzdornost. V rozmezí teplot 20 °C až do cca 400 °C hodnota meze pevnosti mírně klesá obr. 37 (tzv. relaxace pnutí). V dalším rozmezí 400 – 450 °C se pevnost snižuje a nad 450 °C strmě klesá obr. 37. Nízko legované litiny (Cr, Ni, Mo) mají oblast velkého poklesu pevnosti posunutou o 50 – 100 °C k vyšším teplotám. Prudký pokles pevnosti je důsledkem rozpadu perlitu a transformace na ferit. Příčinou snížení pevnosti za hranicí 700 °C je transformace feritu na austenitu. Tuto hranici můžeme ovšem posunout do vyšších teplot a to přidáním křemíku (ferit a křemík vytvoří tzv. silikoferit), tato možnost se používá při výrobě odlitků výfukového potrubí [6][8][19].



Obr. 37 Křivka pevnosti litiny při zvýšené teplotě [8].

V publikaci [6] byly uvedeny hodnoty, které jsou shrnuty v tab. 9. Hodnoty se týkají meze pevnosti a kluzu vermikulární litiny v závislosti na teplotě. U některých vzorků je pokles meze pevnosti v rozpětí teplot od 20 °C – 500 °C až o 170 MPa. Nejvyšší pevnost měly vzorky s vyšším obsahem perlitu a vzorky s obsahem molybdenu.

Tab. 9 Mez pevnosti a kluzu v závislosti na teplotě [6].

Nod. [%]	Perlit [%]	Chemické složení			Mez pevnosti [MPa/°C]					Mez kluzu [MPa/°C]				
		C	Si	Mo	20	200	300	400	500	20	200	300	400	500
10	80	3,52	2,33	-	403	377	358	381	286	300	256	264	258	199
10	8	3,53	2,27	-	300	-	-	-	165	260	-	-	-	124
9	9	3,47	2,26	0,43	410	-	-	-	240	320	-	-	-	200
5	95	3,53	2,40	-	400	-	-	-	220	320	-	-	-	180
8	100	3,52	2,49	0,52	540	-	-	-	370	435	-	-	-	265
10	< 5	3,43	2,61	-	322	272	281	263	172	250	207	207	191	155
10	25	3,78	2,39	-	370	340	325	290	235	290	255	240	200	150
14	48	-	2,42	0,02	413	352	-	338	-	-	-	-	-	-
16	27	3,47	2,50	-	366	335	-	290	-	-	-	-	-	-
5	20	3,73	2,30	-	-	242	243	232	192	-	-	-	-	-
15	20	3,70	2,30	-	-	260	268	258	202	-	-	-	-	-

2.3.2 Tečení (Creep)

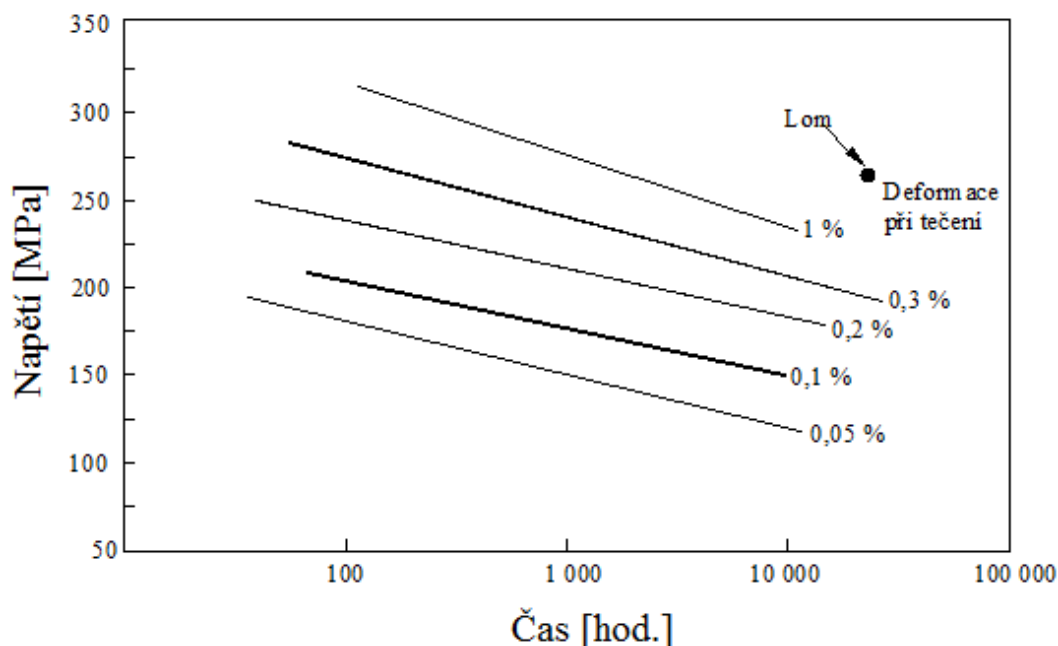
Tečení (Creep) je pomalá časově závislá trvalá deformace, ke které dochází v průběhu dlouhodobého působení vysokých teplot při konstantním zatížení nebo konstantním napětí nižším než mez kluzu.

V tab. 10 a obr. 38 je uvedeno chování při tečení LLG, LČG a LKG zatížených tahem za teploty 350 °C [6].

Tab. 10 Deformace při tečení a napětí LLG, LČG a LKG [6].

Deformace při tečení	Napětí [MPa] pro deformaci při tečení po 10 000 hod.		
	LLG	LČG	LKG
0,1 %	100	136	178
0,5 %	165	193	270
1,0 %	-	216	297
Lom	182	259	370

Hodnoty v tabulce a grafu ukazují, že LČG má při přibližně stejném časovém cyklu o cca 30 – 40 % vyšší odolnost proti tečení než LLG. Odolnost vůči tečení má vermikulární litina o cca 25 % nižší než LKG [6].

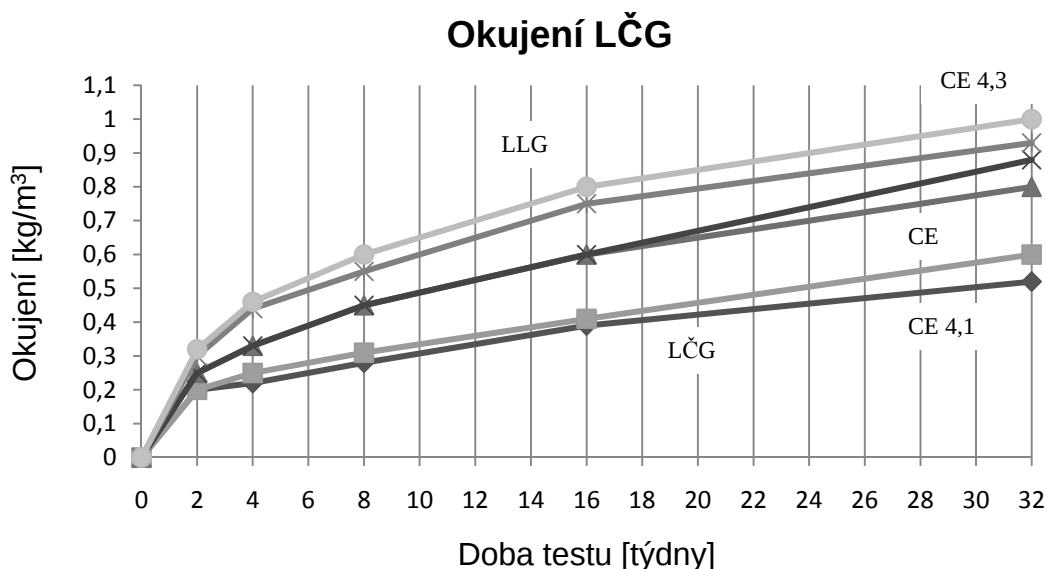


Obr. 38 Křivky tečení perlitické LČG za teploty 350 °C v závislosti na čase [6].

2.3.3 Opal (okujení), oxidace, růst

Opal (okujení):

Opal je vrstva oxidů kovu vzniklá dlouhodobým působením vyšší teploty (od cca 400 °C) a okolní atmosféry. Podle informací v publikaci [6] je opal LČG do teploty 500 °C srovnatelný s opalem LLG. Na obr. 39 jsou uvedeny křivky opalu LLG a LČG za teploty 600 °C. Jak ukazují křivky na obr. 39, LČG má menší opal než LLG, protože se opal šíří podél grafitových částic a eutektických buněk. Větvení grafitu v LČG omezuje hloubku penetrace oxidace [8][19].



Obr. 39 Opal LLG a LČG při teplotě 600 °C v průběhu 34 týdnů [6].

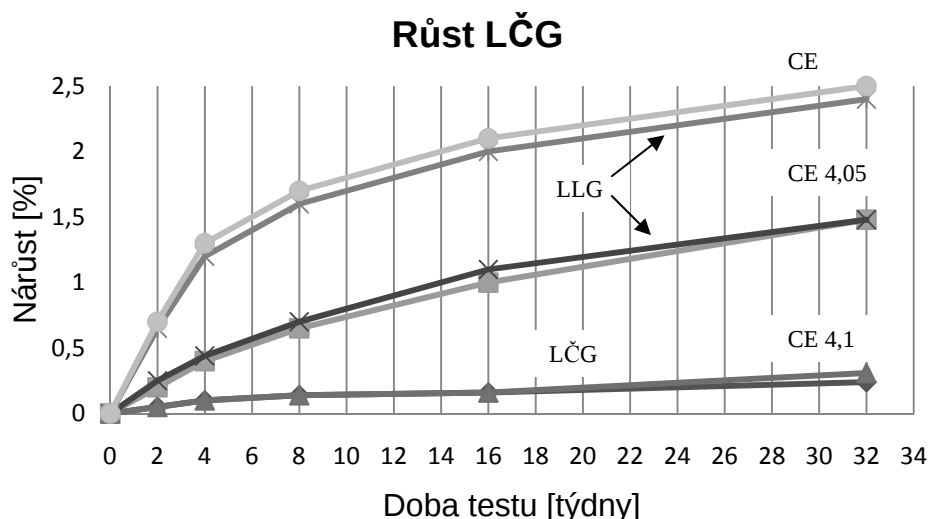
Oxidace:

Oxidace je průběh ztráty valenčních elektronů v materiálu. Výsledkem je vrstva koroze tvořena převážně oxidy kovů. Oxidace proniká do struktury kovu podél částic grafitu. Proto je vhodnější jemný grafit (kvůli pomalejší oxidaci). Díky menšímu počtu částic grafitu na jednotku objemu dochází u odlitků z LČG k menšímu pronikání atomů kyslíku pod povrch. U teplot nad 650 °C roste vliv oxidace na povrch litiny. Nejdříve oxiduje ferit a nad 700 °C i grafit. Vnitřní oxidace a změna struktury snižují mechanické vlastnosti a způsobují „růst“ litiny [6][8].

Růst:

Růst je proces zvětšování objemu způsobený strukturními přeměnami a oxidací za zvýšených teplot doprovázené změnami tvaru a rozměrů odlitku. Růst LČG je do teploty 500 °C podobný růstu u LLG. U teplot nad 500 °C je 5 – 10 x menší než u litiny s lupínkovým grafitem. Na obr. 40 jsou uvedeny křivky růstu LLG a LČG za teploty 600 °C. Větší redukce růstu tvárné litiny v porovnání s vermikulární litinou je přisuzována větší difuzní vzdálenosti mezi eutektickými buňkami [6][8].

Zvýšení odolnosti litiny proti oxidaci a růstu je dosahováno zjemněním struktury a legováním zejména Cr, Cu, Ni, Mo a jejich kombinacemi. Zvláště molybden je v tomto směru velmi účinný [19].



Obr. 40 Růst LLG a LČG při teplotě 600 °C v průběhu 34 týdnů [6].

2.4 Technologické vlastnosti

Technologické vlastnosti popisují chování materiálu dané struktury při dané teplotě za působení okolních vlivů. Technické vlastnosti se mění v průběhu technologie výroby od počátku až do konce – zhotovení konečného výrobku. Důležité technologické vlastnosti pro výrobce odlitků jsou: zabíhavost, sklon k zákalce a staženinám, atd....

2.4.1 Zabíhavost

Zabíhavost je technologická vlastnost materiálu, která udává schopnost vyplnění všech dutin formy. Vermikulární litina má přibližně stejnou zabíhavost jako LLG. Prvek, který zvyšuje zabíhavost je fosfor, ale ten je obsažen v malém množství cca 0,08 %. Vermikulární litina umožňuje odlévat odlitky s tloušťkou stěn od cca 6 mm [4].

2.4.2 Sklon ke staženinám

Sklon ke vzniku staženin a ředin je u LČG větší než u LLG, ale menší než u LKG. Pro lití LČG a LLG můžeme použít stejné modelové zařízení. LČG je vhodná pro odlévání složitějších odlitků (hlavy válců), jelikož má menší sklon ke vzniku mikrostaženin [15].

2.4.3 Obrobitelnost

Hlavními faktory ovlivňujícími obrobitelnost vermikulární litiny jsou:

- **tvar grafitu** – podíl kuličkového grafitu zhoršuje obrobitelnost
- **podíl perlitu v základním kovu** – perlit zvyšuje tvrdost, snižuje obrobitelnost
- **chemické složení (Ti, Cr, Mn, Si, S, Mg, ...)**
- **obsah vměstků (TiC, CrC, MgS, MnS, ...)**

Litiny s červíkovitým grafitem mají lepší obrobiteľnosť než LKG, ale horší než LLG. Nižší tepelná vodivosť LČG je pri obrábení dôvodom vzniku vyšších rezných síl, čiže väčšieho množstva tepla v mieste rezu (potreba viac chladit).

Vliv na obrobiteľnosť LČG má obsah vměstků (sulfidy, karbidy). Přítomnost síry je nežádoucí, její obsah je kolem 0,02 %. Po modifikaci Mg se obsah síry sníží na 0,01 % a vzniká sulfid MgS. Tento sulfid je tvrdý a zhoršuje obrobiteľnosť. Vermikulární litina může obsahovat i malé množství MnS, ale protože převážná většina síry reaguje s Mg, je obsah tohoto sulfidu nízký. Sulfid MnS zlepšuje obrobiteľnosť litiny. Nedostatek MnS v mieste rezu způsobuje vyšší tření, vyšší rezné síly, vyšší drsnost obrobeného povrchu a menší životnosť nástroje. Tyto nepříznivé rezné podmínky lze eliminovat použitím rezného média s obsahem síry [20][21].

Nežádoucí karbidy jsou TiC a CrC. Malé zvýšení obsahu titanu (0,01 – 0,02 %) v LČG ovlivňuje negativně životnosť nástroje (až o 50 %), protože tvoří tvrdé karbidy TiC. Další prvek, který tvoří karbidy, je chrom. Proto jeho obsah má být do 0,04 % [20].

Nejvíce používané rezné materiály jsou rezná keramika a kubický nitrid boru. Nejčastější obráběcí operace jsou čelní frézování a hrubování válcových otvorů. Firma Sandvik [22] uvádí, že zlepšení životnosti nástroje a produktivity můžeme také dosáhnout změnou operace a to vrtání válců za frézování kruhovou interpolací (druh pohybu nástroje).

2.4.4 Požadavky na konstrukci odlitku

Pro docílení rovnoměrného vyloučení grafitu v celém objemu odlitku, je potřeba vytvořit jednotnou tloušťku stěn. V tloušťkách stěn pod 3 – 5 mm je nebezpečí vzniku zákalky (nežádoucí). Citlivost vlastností odlitků na rychlost chladnutí je poněkud menší než u LLG (ale např. u odlitků s tloušťkou stěn 200 mm bývá zaznamenáván pokles pevnosti na 70 % hodnoty pevnosti v tloušťce stěny 30 mm) [4].

3 VÝROBA LITINY S ČERVÍKOVITÝM GRAFITEM

Výrobu vermikulární litiny ovlivňuje několik faktorů – vsázkový materiál, typ tavícího agregátu, modifikace, očkování, podmínky chladnutí a tuhnutí, atd.... Některé postupy výrobního procesu jsou stejné jako při výrobě tvárné litiny (např. tavící zařízení). Jiné postupy jsou specifické právě pro výrobu vermikulární litiny (kombinace prvků při modifikaci).

3.1 Vsázkový materiál

K výrobě vermikulární litiny je vhodné používat suroviny s nízkým obsahem síry, fosforu, karbidotvorných prvků (Mn, Cr, V, Mo) a nečistot, které ovlivňují tvar grafitu (podporují metastabilní tuhnutí). Stejně jako při výrobě litiny s kuličkovým grafitem jsou kladeny vyšší nároky na kvalitu surovin. Kvalita a typ použitých surovin závisí rovněž na druhu použitého tavícího zařízení [8].

Surové železo

Surové železo k výrobě vermikulární litiny musí mít vyšší čistotu (vysokopecní a speciální surová železa) a co nejnižší obsah P, Mn a nečistot. Vsázka s nízkým obsahem manganu je vhodná k výrobě feritického druhu litiny [8].

Ocelový odpad

Ocelový odpad je nutné roztřídit. Může obsahovat mangan a karbidotvorné prvky (Cr, V, Mo), které zvyšují tvrdost, zhoršují zabíhavost a plastické vlastnosti. Ocelový odpad může být znečištěn organickými sloučeninami (tuky) a tvořit tak ve vsázce škodlivé plyny (N, H, atd....) [8].

Vratný materiál

Vratný materiál je převážně z vlastní produkce slévárny a tvoří ho vadné kusy, vtokové soustavy, nálitky atp. Je vhodné, aby byl otryskán od formovacích směsí. U vratného materiálu je výhodou jeho známé chemické složení. Vratný materiál z LLG není vhodný, protože může mít vyšší obsah nežádoucích prvků (P, S). Podíl vratného materiálu se někdy omezuje v závislosti na maximálním obsahu křemíku a to v případech, kdy se modifikuje předslitinou na bázi Fe-Si-Mg. Vratný materiál je potřeba roztřídit [8].

Litinový odpad

Litinový odpad a třísky se jako vsázka kvůli nejistému chemickému složení téměř nepoužívají. Jeho původ je ze sběren kovového odpadu. Jedná se o nekvalitní vsázkovou surovinu, která může vnést to vsázky nežádoucích prvků (Cr, Sn, Pb, P, S, atd. ...). Čím vyšší je požadovaná kvalita litiny, tím menší podíl vsázky tvoří litinový odpad [8].

3.2 Zařízení vhodná pro tavení litiny s červíkovitým grafitem

Pro tavení vermikulární litiny je možné použít různé typy tavicích agregátů. Vhodná tavicí zařízení jsou indukční pece, rotační bubnové pece a horkovětrné kuplovny. Obloukové pece se pro tavení vermikulární litiny obvykle nepoužívají. Tavicí zařízení musejí splňovat určitou kvalitu nataveného kovu [8]:

- vysoký obsah uhlíku v tavenině cca 3,5 – 3,8 %
- nízký obsah křemíku cca 1,0 – 1,5 % v případech, kdy po tavení proběhne modifikace předslitinami typu FeSiMg
- tavenina musí mít optimálně nízký obsah síry do cca 0,02 %
- vysoká odpichová teplota mezi 1480 – 1540 °C, v závislosti na metodě modifikace a velikosti odlitků
- možnost kontroly kvality taveniny

Indukční pece – jsou nejčastěji používaným tavicím agregátem při výrobě LČG. Obvykle se používají středofrekvenční kelímkové pece. Indukční pece umožňují snadno dosáhnout požadované odpichové teploty, snadná kontrola chemického složení taveniny.

Výhody:

- přesné řízení teploty taveniny
- lepší homogenita tekutého kovu
- menší propal prvků
- nenáročná obsluha
- ekologičtější tavení

Kuplovna – používané jsou horkovětrné kuplovny. Nevýhodou je vyšší obsah síry v nataveném kovu. Zvýšený obsah síry není vždy nežádoucí. Některými metodami modifikace (např. Ce – KVZ a CaSi), je možné modifikovat taveninu s obsahem síry až 0,1 % (viz. kapitola 3.4.5).

Obloukové pece – se používají ve slévárnách ocelí, které často vyrábí litinu, zejména litinu s kuličkovým grafitem. Hlavně se používají pro výrobu oceli. Výhoda obloukových pecí je možnost provedení rafinaci taveniny.

Rotační bubnové pece – jsou velmi vhodným tavicím agregátem. Nízké pořizovací a provozní náklady. Vhodné pro malé a středně velké slévárny.

3.3 Očkování

Jako očkování se označuje proces, kdy se do roztaveného kovu záměrně vnáší látky, které vytvářejí heterogenní zárodky pro krystalizaci grafitu. Aktivní prvky (Ca, Al, Sr, Ba, Zr) obsažené v očkovadle způsobují interakci s dalšími prvky (O, S) přítomnými v litině a dochází ke vzniku zárodků. Vyšší obsah aktivních zárodků zlepšuje nukleaci a růst grafitu. Důvodem očkování je zjemnění grafitu, jeho rovnoměrné vyloučení a zabránění vzniku zákalky [6].

Proces očkování je velice důležitý v případech, kdy jsou nepříznivé podmínky pro grafitizaci:

- vysoká rychlost ochlazování odlitku
- nízký uhlíkový ekvivalent
- malý obsah grafitizačních prvků (Si, C, Al, Ni, Ti, atd. ...)
- vysoký obsah antigrafitizačních prvků (Cr, V, Mg, Ce, Te, atd. ...)

Vyšší dávka očkovadla zlepšuje očkovací účinek a zvyšuje počet eutektických buněk. Příliš vysoký obsah eutektických buněk je nežádoucí. Nízká teplota, nevhodně zvolené složení očkovadla nebo příliš vysoká dávka způsobují struskovitost odlitku. Výsledkem jsou špatné slévárenské a technologické vlastnosti. Pro kontrolu očkovacího účinku se provádí zákalková zkouška nebo hodnocení pomocí termické analýzy [6].

Složení očkovadla

Hlavními složkami tvořící očkovadlo jsou nosič a krystalizační složka. Nosič nemá očkovací účinek. Nejběžněji používané nosiče jsou ferosilicia na bázi Fe-Si (obsah 65 – 75 % Si). Je snadno rozpustný, zvyšuje aktivitu uhlíku a vytváří krystalizační složku [15]. Krystalizační složka je obsažena v malém množství. Tvoří ji např. Ca, Al, Sr, Ba, Zr, Tyto prvky spolu s kyslíkem a sírou tvoří sulfidy a oxidy, které slouží jako nukleační zárodky.

Druh očkovadla

Očkovadla na bázi křemíku – nejběžnější typ očkovadel ferosilicium FeSi s obsahem 65 – 75 % Si.

Aktivní prvky jsou [8]:

- Ca** – při vyšším obsahu tvoří struskotvorné vměstky
- Al** – často používaný tvoří oxidy, které obalují jádro zárodku
- Sr** – prodlužuje očkovací účinek, zvyšuje rozpustnost očkovadla
- Ba** – prodlužuje očkovací účinek, tvoří zárodky s vysokou hustotou
- Zr** – zabraňuje vzniku bodlin a prodlužuje očkovací účinek
- Mn** – zlepšuje rozpustnost očkovadla při nízké teplotě tavení
- Ce** – prodlužuje očkovací účinek a tvoří velmi stabilní sulfidy a oxidy
- Ti** – zabraňuje vzniku bodlin (váže dusík), málo používaný

Je důležité zabezpečit homogenizaci taveniny a rozpustnost očkovadla. Potřebná teplota taveniny je nad 1400 °C. Účinek očkovadla odeznívá, je tedy

vhodné zkrátit čas mezi očkováním a litím nebo očkovat až v průběhu samotného liti do formy [8].

Vhodné způsoby očkování LČG:

- očkování v pánvi
- očkování plněným profilem
- očkování ve formě

3.4 Modifikace

Vermikulární litina obsahuje grafit specifického tvaru. K docílení požadovaného tvaru grafitu provádíme tzv. modifikaci. Používají se různé způsoby modifikace [6]:

1. „nedokonalá“ modifikace hořčíkem – užívá se nižší množství Mg než je potřebné pro výrobu kuličkového grafitu
2. modifikace kombinací prvků – s antiglobularizačním účinkem, kombinace Mg + Ti nebo Sb, Al, Sn
3. modifikace hořčíku klasickým způsobem dle ad. 1, s mírným přebytkem Mg s následnou přísadou síry ve formě modifikátoru typu FeS ke korekci složení taveniny pro získání kompaktního grafitu
4. modifikace slitinami kovů vzácných zemin (KVZ) – KVZ v poměru cca 50 % Ce a 20 % La a zbytek ostatní lanthanoidy

Metody modifikace:

Pro modifikaci vermikulární litiny se používají stejné metody jako pro modifikaci litiny s kuličkovým grafitem. Metody rozdělujeme:

Polévací metody:

- Sandwich,
- Tundish cover,
- modifikace v konvertoru (+GF+)

Ponořovací metody:

- modifikace v autoklávu v tlakové pánvi
- plněným profilem – do taveniny se přivádí drát plněný modifikátorem

Průtočné:

- InMold – modifikátor je umístěn ve vtokové soustavě
- Flotret

3.4.1 Modifikace hořčíkem

Metoda je podobná jako při modifikaci tvárné litiny. Rozdíl je v množství přidaného hořčíku. Hořčík se do taveniny přivádí ve formě předslitiny FeSiMg (4 – 6 % Mg), případně NiMg. Optimální obsah zbytkového hořčí v tavenině je v rozmezí 0,009 % – 0,012 %. Toto procesní „okno“ je velice úzké, proto je tato metoda výroby náročná. Více informací o vlivu hořčíku a rychlosti ochlazování v kapitole 1.1 [15].

Pro modifikaci hořčíkem se nejčastěji používají metody Sandwich, Tundish cover, +GF+ a plněný profil. Modifikátor je uložen na dně pánve pod krycími plechy a následně se zalije roztaveným kovem. Při reakci čistého hořčíku s taveninou dochází k „bouřlivé“ reakci a vzniku oxidu MgO a sulfidu MgS. Z důvodu „klidnější“ reakce hořčíku s taveninou se místo čistého Mg používají předslitiny FeSiMg [15].

3.4.2 Modifikace kombinací prvků

Používá se kombinace modifikátoru (Mg) + antiglobularizačních prvků (Ti, Al, Sb, Sn, Bi, N). Nejčastěji používaný je titan. Ostatní prvky se samostatně (jako titan) příliš nepoužívají.

Titan

V publikaci [6] bylo uvedeno, jako doporučené množství titanu v LČG max. 0,035 %. Použité množství titanu je závislé na tloušťce stěn odlitku. Pro tenkostěnné odlitky je možné použít větší množství titanu, cca 0,07 %. Pro silnější stěny odlitku je doporučené množství Ti cca 0,02 %, protože může způsobit degradaci grafitu. Titan podporuje vznik feritu a karbidů (TiC). Vliv titanu na modifikaci je takový, že potlačuje účinek hořčíku a tím vznik kuličkového grafitu [8].

Postup zpracování taveniny je podobný jako u výroby LKG. Výchozí tavenina by měla obsahovat zbytkový obsah hořčíku min. cca 0,035. Titan je možné do taveniny aplikovat samostatně v podobě FeTi nebo pomocí předslitiny FeSiMg. Jiný typ předslitiny FeSiMg5TiCe obsahuje Ca a snižuje tak závislost Mg na obsahu S. Po aplikaci metody Mg + Ti by tavenina měla obsahovat cca 0,08 – 0,15 % Ti [6][20][29].

Obvyklé složení předslitiny [9]:

Mg	4,0 – 5,0 %,
Ti	8,5 – 10,5 %,
Ca	4,0 – 5,5 %,
Al	1,0 – 1,5 %,
Ce	0,5 – 0,35 %,
Si	48 – 52 %,
Fe	zbytek.

Tato metoda je relativně spolehlivá, ale má několik nevýhod:

- nebezpečí vzniku mezidendritického neusměrněné rozložení grafitu
- horší obrobitelnost (vyšší tvrdost)
- přítomnost Ti ve vratném materiálu
- vyšší cena titanu

Dusík

Dusík je další prvek, který se může použít pro modifikaci vermikulární litiny. Obsah dusíku v tavenině by měl být cca 0,01 – 0,015 %. Pokud je obsah N menší než 0,008 %, má na taveninu minimální vliv. Podporuje vznik perlitu. Do litiny se může přidat jako feromangan nebo dusíkaté vápno. Vliv na vznik červíkovitého grafitu má především v silnějších stěnách odlitku. Vysoký obsah dusíku vede ke vzniku bodlin a pórovitosti. Účinek dusíku neutralizuje Ti a Al. Dusík může tvořit nitrid FeMn. V praxi se modifikace dusíkem nepoužívá [15][23].

3.4.3 Modifikace kombinací kovů vzácných zemin (KVZ)

Při této metodě se nejčastěji používají předslitiny s vysokým obsahem separovaného ceru a neseperovaných KVZ. Takový typ předslitiny může obsahovat cca 99 % KVZ. Často používaný typ předslitiny je Si-KVZ s 30 – 35 % KVZ. Dále se používají předslitiny obsahující cca 50 % Ce, 20 % La, zbytek ostatní lanthanoidy [6][9].

U této metody má vsázka a tavenina podobné složení jako při výrobě LKG. Množství předslitiny Si-Ce-KVZ, které musí být použito pro různé obsahy síry, je v tab. 11. Aplikace předslitiny probíhá během odpichu do lící pánve, a to plněným profilem nebo do proudu kovu. Teplota rozpustnosti těchto předslutin je cca 790 – 860 °C a bod varu cca 3000 °C. Rozpouštění probíhá klidně bez bouřlivých reakcí a vyššího množství dýmu. Účinek odeznívá přibližně po 10 – 12 minutách [6][9].

Tab. 11 Doporučené množství předslitiny Ce-KVZ v závislosti na obsahu S [9].

S [%]	0,003	0,008	0,012	0,033	0,076
Ce – KVZ [%]	0,05	0,10	0,10	0,25	0,65

V porovnání s výše uvedenými metodami (kapitola 3.4.1 a 3.4.2) má metoda výroby LČG pomocí Ce – KVZ tyto výhody [9]:

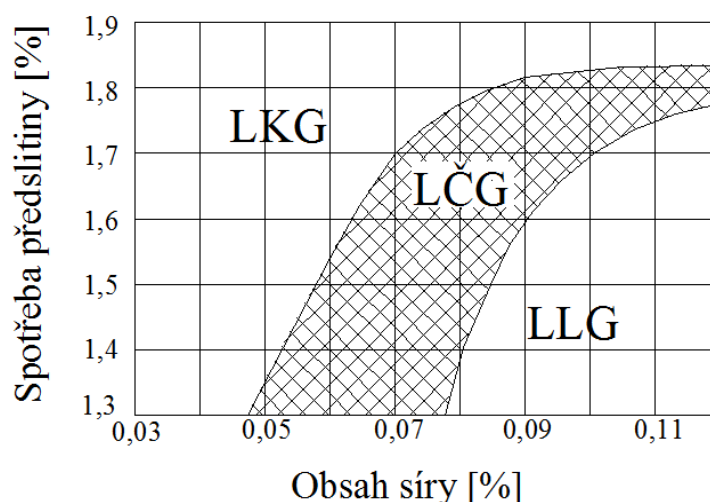
- vratný materiál neobsahuje prvky jako Ti
- klidná reakce předslitiny Ce – KVZ s taveninou a malé množství dýmu
- pomalé odeznívání
- obsah ceru snižuje křehkost litiny při teplotách 300 – 450 °C

Nevýhoda této metody je cena předslutin.

3.4.4 Modifikace kombinací Mg – Ce s malým obsahem Ca, Al

Tuto metodu vyvinula firma General Motors v USA. Metoda spočívá v modifikaci výchozí taveniny s vysokým obsahem síry cca 0,07 – 0,013 %. Modifikační předslitina je složena z Mg – Ce s nízkým obsahem Al, Ca [9].

Při tomto postupu se modifikuje šedá litina z kuplovy. Množství předslitiny potřebné pro přeměnu grafitu na červíkovitý tvar je závislé na obsahu síry. Potřebné množství předslitiny je v rozsahu 1,3 – 1,8 % (obr. 41) při teplotě zpracování cca 1475 – 1520 °C [9].



Obr. 41 Spotřeba předslitiny v závislosti na obsahu síry [9].

Publikace [9] uvádí, že při modifikaci touto metodou už není potřeba očkování. Jako grafitizační zárodky působí sulfidy Mg, Ca, Ce. Snižují přechlazení taveniny a vznik karbidů a zákalky. Mechanické vlastnosti takto vyrobené LČG jsou R_m 420 – 470 MPa a tažnost 2,5 %.

Vysoký obsah síry je problematický. Síra společně s prvky obsaženými v předslitině tvoří sulfidy CeS, CaS, MgS. Lehčí sulfidy CaS = 2,50 g/cm³ a MgS = 2,84 g/cm³ mohou při přelévání a odlévání vyplouvat na hladinu. Těžší CeS = 5,00 g/cm³ zůstává v tavenině a po ztuhnutí odlitku tvoří vady a vměstky [6][9].

3.4.5 Modifikace kombinací Ce – KVZ a CaSi

Tento způsob modifikace předslitinou Ce – KVZ s pozdějším přidáním CaSi umožňuje modifikovat taveninu s obsahem síry až 0,1 %. Při této metodě se litina zpracuje přidáním Si-Ce-KVZ (50 % Ce) spolu s Ca ve formě CaSi (35 % Ca). Nejdříve se musí použít Si-Ce-KVZ a potom CaSi. Následně proběhne sekundární očkování. Množství Ce potřebné pro modifikaci závisí na obsahu S v tavenině. V publikaci [6] bylo uvedeno, že pro modifikaci taveniny s obsahem 0,02 % S je doporučeno použít předslitinu s obsahem 0,06 % Ce a 0,5 % Ca. Pro taveninu s obsahem 0,1 % S je doporučena předslitina s obsahem 0,1 % Ce a 0,08 % Ca. Výsledná LČG bude mít menší sklon k zákalce, vyšší obsah sulfidů CeS, CaS a nízký obsah karbidů [6][9].

4 ODLÉVÁNÍ

V této fázi výrobního procesu se často rozhodne, jestli vznikne odlitek s dobrou vnitřní strukturou, požadovanými rozměry a kvalitním povrchem nebo odlitek, který má vnitřní, vnější vady. Ve většině případu se jedná o vady neopravitelné. Proces odlévání se neobejde bez pečlivé kontroly. To zahrnuje

Přesnost výsledného odlitku závisí na [24]:

- vlastnostech formovací směsi při působení nízkých i vysokých teplot
- přesnosti modelového zařízení
- složitosti a tvaru vtokové soustavy
- použití filtrace taveniny
- umístění nálitků
- vlastnostech kovu při tuhnutí
- rychlosti odlévání
- tvaru a tloušťce stěn odlitku
- způsobu odstranění formovacího materiálu z povrchu a dutin odlitku
- přesnosti použitých formovacích přípravků
- způsobu tepelného zpracování

Významný vliv na vznik vad v odlitku má konstrukce jednotlivých částí vtokové soustavy. Přibližně 45 – 55 % slévárenských vad vzniká právě špatným návrhem vtokové soustavy [24].

Závěr

V bakalářské práci bylo formou rešerše zpracováno téma výroby litiny s červíkovitým grafitem. Práce byla rozdělena do čtyř kapitol: *Litina s červíkovitým grafitem*, *Vlastnosti litiny s červíkovitým grafitem*, *Výroba litiny s červíkovitým grafitem* a *Odlévání*. Potenciál předpokladu rozšíření litiny s červíkovitým grafitem bude v budoucnosti pravděpodobně stoupat. Rozšíření tohoto materiálu je závislé na celkovém technologickém pokroku, rovněž na ochotě slévárenských společností investovat do této technologie a také na informovanosti a technickém podvědomí o těchto možnostech. Problematika litiny s červíkovitým grafitem je též závislá na zjištění způsobů dalšího využití, čímž nabízí prostor pro výzkum a vývoj v tomto oboru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Compacted Graphite Iron Castings - CGI Castings. *Durham Foundry* [online]. [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: <http://www.durhamfoundry.com/compacted-graphite-cast-iron.html>
- [2] Introduction to Compacted Graphite Iron. *NovaCast* [online]. [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: <http://www.novacastfoundry.se/index1.asp?siteid=1&pageid=144>
- [3] DAWSON, S. Compacted Graphite Iron. *Foundry Gate* [online]. 22. 6. 2011. [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: <http://foundrygate.com/en/noticias/ver/938/compacted-graphite-iron>
- [4] LAMPICE, M. *Taschenbuch der Gießerei-Praxis*, 2001. ISBN 3-7949-0658-6.
- [5] GUESSER, W., et al. Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components. *AFS Transactions 01-071* [online]. s. 1–11. Dostupné z: http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/product_exp_grafita_auto.pdf
- [6] OTÁHAL, V. *Litina s kompaktním - vermikulárním (červíkovitým) grafitem* - Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2010.
- [7] DAWSON, S. Practical Applications of Compacted Graphite Iron. *Sinter Cast* [online]. 2. 6. 2005. [cit. 2012-2-10]. Dostupné z: http://www.engine-expo.com/05engine_conf/pres/day3/dawson.pdf
- [8] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. 1 st ed. Brno:PC-DIR real, s.r.o, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
- [9] GEDEONOVÁ, Z.; JELČ, I. *Metalurgia liatin*. Košice:HF TU v Košiciach, 2000. ISBN 80-7099-516-5.
- [10] PODRABSKÝ, T.; POSPIŠILOVÁ, S. Struktura a vlastnosti grafitických litin. *Ústav materiálových věd a inženýrství VUT v Brně* [online]. 16. 11. 2006. [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php?chapter=1>
- [11] Vermicular Graphite Cast Iron. *Key to Metals* [online]. [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=263>
- [12] JINHAI, L., et al. Influence of fading on characteristics of thermal analysis curve of compacted graphite iron. *China Foundry* [online], 2011 [cit. 2012-2-20]. Dostupné z: <http://www.foundryworld.com/uploadfile/2011083135382569.pdf>

- [13] DAWSON, S. Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron. *Sinter Cast* [online]. 7. 3. 2002 [cit. 2012-3-20]. Dostupné z: [http://www.sintercast.ro/\\$2/200431721250559afs-paper.pdf](http://www.sintercast.ro/$2/200431721250559afs-paper.pdf)
- [14] Compacted graphite iron. *Wikipedia* [online]. [cit. 2012-2-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Compacted_graphite_iron
- [15] ŠVÁBENSKÝ, P. *Litina s vermikulárním grafitem*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2011 40 s.
- [16] MOCELLIN, F., MELLERAS, E., GUESSER, W. Study of the Machinability of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. *Tupy Fundições* [online]. 2004, roč. 24, č. 1 [cit. 2012-4-2]. Dostupné z: <http://www.scielo.br/pdf/jbsmse/v26n1/a04v26n1.pdf>
- [17] Dawson, S. Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design [online]. 1999, [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: [http://www.sintercast.com/\\$2/200431723285110vdi-paper.pdf](http://www.sintercast.com/$2/200431723285110vdi-paper.pdf)
- [18] GUESSER, W., MASIERO, I., MELLERAS, E., CABEZAS, C. Thermal conductivity of gray iron and compacted graphite iron used for cylinder heads. *Revista Matéria*, 2005, roč. 10, č. 2, p. 265–272 [cit. 2012-3-4]. ISSN 1517-7076. Dostupné z: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10660/>
- [19] KRÁL, V. *Nízkolegované litiny pro použití za zvýšených teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 31 s.
- [20] DAWSON, S., et al. The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron. 2001, [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: http://www.uscti.com/u_pages/publications/pdfs/ItemETheEffectOfMetallurgicalVariablesOnMachinabilityCGI2001AEIStark.pdf
- [21] EVANS, R., et al. Lubrication & Machining of Compacted Graphite Iron. *AFS Transactions, DesPlaines*, 2001, [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: http://www.mmsonline.com/cdn/cms/uploadedFiles/Machinability%20of%20CGI_image%20removed%205_27.pdf
- [22] Výrobce obráběcích nástrojů Sandvik, [cit. 2012-4-20]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/technical_guide/materials/workpiece_materials/iso_k_cast_iron/pages/default.aspx#8
- [23] ECOB, C., HARTUNG, C. An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons. *Elkem ASA, Norway*, [cit. 2012-5-6]. Dostupné z: <http://www.elkem.no/dav/db7e4b4b73.pdf>
- [24] Otáhal, V.: *Šedá litina, litina s lupínkovým grafitem - Monografie*, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2007.