



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## LITINA S VERMIKULÁRNÍM GRAFITEM

COMPACTED GRAPHITE CAST IRON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PETR ŠVÁBENSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV LAŠTOVICA

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Petr Švábenský

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

### **Litina s vermikulárním grafitem**

v anglickém jazyce:

### **Compacted graphite cast iron**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Litina s vermikulárním grafitem je materiál, který svými vlastnostmi zaujímá volné místo mezi litinou s lupínkovým a kuličkovým grafitem. V minulosti byl považován za podřadný, ale v současné době nachází širší uplatnění a o jeho výrobu roste zájem zejména v automobilovém průmyslu. Výroba litiny s vermikulárním grafitem má však svá úskalí, která je nutno řešit. Největším problémem se jeví zajištění pro tuto litinu charakteristického vermikulárního tvaru grafitu ve struktuře litiny.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat ucelený přehled dosavadních znalostí, zejména možných metod výroby tohoto materiálu.

Seznam odborné literatury:

1. RÖDTER, H. Litina s kompaktním grafitem - nový litý materiál s uznávanou jakostí. Slévárství. 2005, roč. 53, č. 9, s. 395-397. ISSN 0037-6825.
2. ŠENBERGER, J. a ZÁDĚRA, A. Výroba litiny s červíkovitým grafitem. Transaction of the VŠB - Technical university of Ostrava. Mechanical series. 2009, vol. 52, no. 2, p. 319-326. ISSN 1210-0471.
3. ROUČKA, J. Metalurgie litin. Skripta VUT. 1. vyd. Brno: PC-DIR REAL, 1998. 166 s. ISBN 80-214-1263.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Laštovica

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

**ABSTRAKT**

Tato rešeršní práce má za cíl shrnout dosud známé vlastnosti a způsoby výroby litiny s vermikulárním grafitem. V první části je popsána struktura, chemické složení, vlastnosti, způsoby využití. Druhá část je zaměřena na možnosti výroby litiny s vermikulárním grafitem. Možnosti očkování a modifikace a jednotlivé výrobní postupy.

**ABSTRACT**

This labor search to summarize the known properties and methods of production of compacted graphite iron. The first part describes the structure, chemical composition, properties and uses. The second part focuses on the possibility of production of vermicular cast iron. Inoculation options and treatment and various manufacturing processes.

**Klíčová slova:**

Litina se vermikulárním grafitem, litina s červíkovitým grafitem, očkování, modifikace

**Key words**

Compacted graphite iron, inoculation, treatment,

**Bibliografická citace**

ŠVÁBENSKÝ P., *Litina s vermikulárním grafitem*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2011 40s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Laštovica.

## PROHLÁŠENÍ

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

27. 5. 2011

.....  
Petr Švábenský

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Jaroslavu Laštovicovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**Obsah**

ABSTRAKT .....	4
Prohlášení .....	5
Poděkování .....	6
Obsah .....	7
1. Úvod .....	8
2. Charakteristika litiny s vermikulárním grafitem .....	9
2.1 Tvar grafitu .....	9
2.2 Struktura .....	11
2.2.1 Vliv rychlosti ochlazování na strukturu litiny .....	11
2.2.2 Vliv rychlosti ochlazování na tvar grafitu .....	11
2.2.3 Vliv legur .....	12
2.3 Chemické složení .....	13
2.4 Vlastnosti litiny s vermikulárním grafitem .....	15
2.4.1 Pevnost v tahu a mez kluzu .....	15
2.4.3 Tvrdost .....	17
2.4.4 Odolnost proti opotřebení .....	18
2.4.5 Schopnost útlumu .....	19
2.4.6 Tepelná vodivost .....	20
Slévárenské vlastnosti .....	21
2.4.7 Sklon k zákalce .....	21
2.4.8 Zabíhavost .....	21
2.4.9 Sklon ke staženinám .....	21
2.4.10 Shrnutí základních vlastností litiny s vermikulárním grafitem .....	22
2.5 Využití .....	23
3. Výroba Litiny s vermikulárním grafitem .....	26
3.1 Vsázkový materiál .....	26
3.1.1 Suroviny na přípravu vsázky .....	26
3.2 Tavení .....	27
3.2.1 Tavicí agregáty vhodné k výrobě litiny s vermikulárním grafitem .....	27
3.2.2 Průběh tavení .....	28
3.3 Vybrané metody k zajištění vermikulárního tvaru grafitu .....	30
3.3.1 Nedokonalá modifikace hořčíkem .....	30
3.3.2 Modifikace hořčíkem s přísadkou tzv. antiglobulizačních prvků .....	32
3.3.3 Použití kombinace Mg+kovy vzácných zemin .....	34
Závěr .....	38
Použitá literatura .....	39

## 1. Úvod

Litina s vermikulárním grafitem je materiál, který přichází do popředí zájmu konstruktérů a slévárny zvyšují výrobu odlitků z toho materiálu. Podle Evropské normy ISO 16 112 se tento materiál nazývá „compacted (vermicular) graphite cast iron (CGI)“. V češtině se nazývá litina s vermikulárním (červíkovitým, kompaktním) grafitem a je označována LČG v německé literatuře je označována GVJ. [1]

Přestože vermikulární litina byla poprvé pozorována v roce 1948, úzký rozsah pro stabilní lící výrobu vyloučil velké množství použití litiny s vermikulárním grafitem u složitých součástí, jako jsou bloky válců a hlav, dokud nevznikly pokročilé technologie řízení procesu. Proto se muselo čekat na příchod moderní měřicí elektroniky a počítačových procesorů. [2]

Litina s vermikulárním grafitem je v současné době nejčastěji používána pro výrobu bloků válců a hlav motorů.

Požadavky na snížení spotřeby paliva, zvýšení výkonu a emisí nadále kladou požadavky na konstruktéry motorů a materiály, které si vyberou.

Na základě evropských zkušeností je hlavním cílem k dosažení lepšího výkonu motoru zvýšení maximálního bodu tlaku ( $P_{max}$ ) po vznícení paliva ve spalovací komoře.

V Evropském odvětví užitkových motorových vozidel, se amplituda tlaku zvýšila z přibližně 180 bar v roce 1999 na 220 - 240 bar v roce 2007.

Výsledný nárůst tepelného a mechanického zatížení vyžadoval změnu z konvenční litiny s lupínkovým grafitem na litinu s vermikulárním grafitem. S alespoň o 75 % vyšší pevností v tahu a o 45 % vyšší tuhostí a přibližně dvojnásobnou únavovou pevností konvenční litiny s lupínkovým grafitem, litina s vermikulárním grafitem splňuje požadavky na trvanlivost a také poskytuje rozměrovou stálost nezbytnou pro splnění legislativy emisí po celou dobu životnosti motoru. [2]

Rozvoj slévárenských technik a výrobních řešení byl především v Evropě zahájen v průběhu roku 1990. První série výroby bloků válců z litiny s vermikulárním grafitem začaly během roku 1999. Dnes se vyprodukuje více než 40.000 bloků válců z litiny s vermikulárním grafitem každý měsíc. [2]

Konstruktéři musí vybrat mezi zvyšující se velikostí a hmotností konvenční litiny s lupínkovým grafitem a prvků se slitin hliníku nebo přijetí jiných materiálů, speciálně litiny s vermikulárním grafitem. Vzhledem k tomu, že nové motory jsou obvykle určeny k podpoře tří až čtyř generací vozů, zvolené materiály musí splňovat kritéria pro současný design a také poskytovat potenciál pro budoucí rozvoj, aniž by docházelo ke změně konstrukce celého bloku. S nejméně 75% zvýšením meze pevnosti v tahu, 40% nárůstem v modulu pružnosti a přibližně dvojnásobkem únavové pevnosti oproti litině s lupínkovým grafitem a slitinám hliníku je litina s vermikulárním grafitem ideální pro splnění současných i budoucích požadavků na konstrukci motorů a výkon. [2]



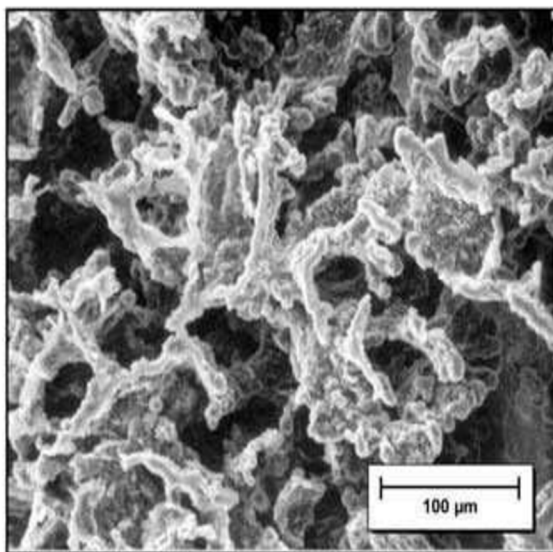
## 2. CHARAKTERISTIKA LITINY S VERMIKULÁRNÍM GRAFITEM

### 2.1 Tvar grafitu

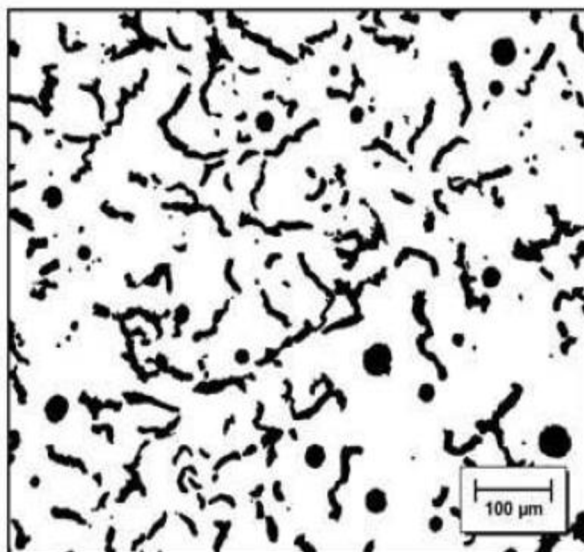
Částice jsou protáhlé a náhodně orientované stejně jako u litiny s lupínkovým grafitem, jsou však kratší a tlustší a nesmí mít ostré hrany. Částice tohoto typu grafitu se ve dvourozměrném pohledu jeví jako jednotlivé částice červíkovitého tvaru. Avšak po hlubokém naleptání se při pořízené elektronové mikrofotografii ukazuje, že jednotliví „červi“ jsou připojeni k nejbližším sousedům v rámci eutektické buňky (tvoří spojitou částici). Morfologie grafitu je tak podobná korálu. [3]

Změny tvaru grafitu můžeme dosáhnout pomocí modifikace, podle které se pak odvíjí jednotlivé metody výroby litiny s vermikulárním grafitem.

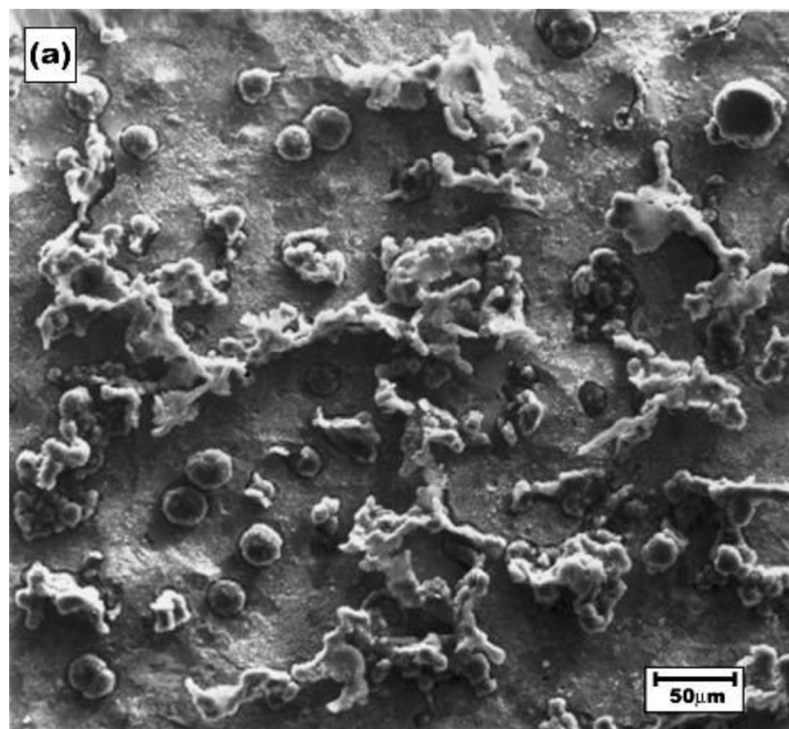
Je však nutno dodat že v litině s vermikulárním grafitem se vždy vyskytuje ještě grafit ve formě kuliček nebo lupínků, případně obou tvarů.



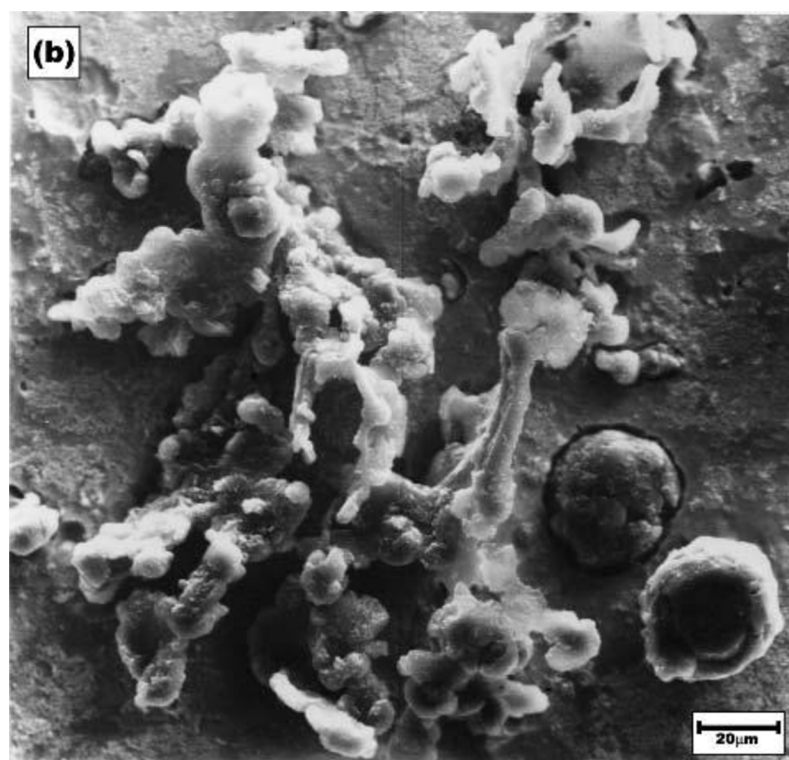
**Obr. 2.1** Mikrofotografie grafitu pořízená při hlubokém naleptání [3]



**Obr. 2.2** Morfologie grafitu (10 % nodularity) [3]



*Obr. 2.3 elektronová mikrofotografie zvětšeno 200x [4]*



*Obr. 2.4 elektronová mikrofotografie zvětšeno 500x [4]*

## 2.2 Struktura

Struktura litiny se mění v závislosti na několika faktorech:

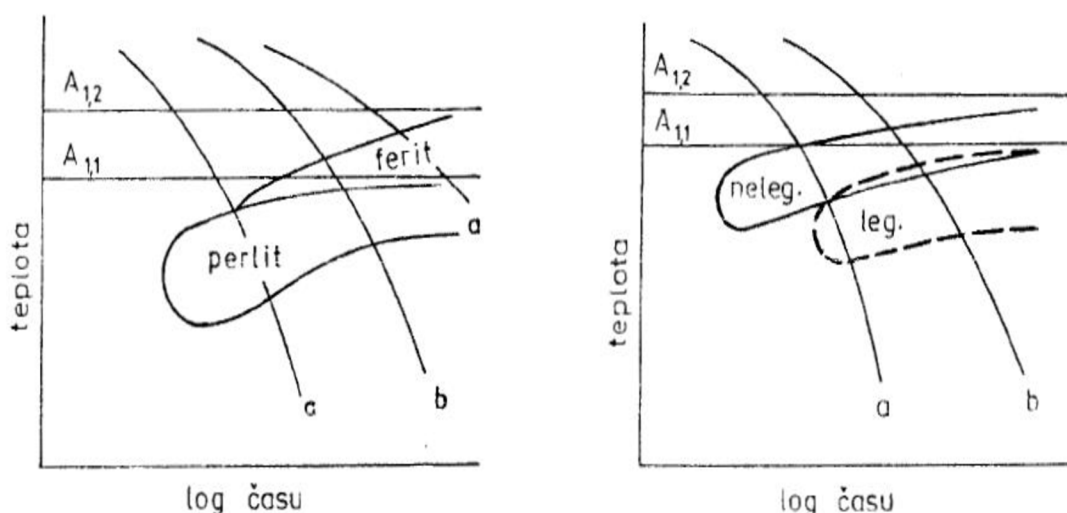
- chemické složení
- rychlosti ochlazování
- obsah nečistot (především S a P)

Struktura může být: a) Feritická  
b) Perlitická  
c) Feriticko-perlitická

### 2.2.1 Vliv rychlosti ochlazování na strukturu litiny

Rychlé ochlazování taveniny potlačuje eutektickou grafitizaci a také podporuje vytvoření perlitu.

Litiny jsou na rychlost ochlazování velmi citlivé, proto je tento faktor důležité uvažovat při návrhu chemického složení.



**Obr. 2.5** Vliv rychlosti ochlazování na strukturu [5]

- a.) Pomalé ochlazování – vzniká struktura čistě feritická
- b.) Rychlejší ochlazování – vzniká struktura feriticko – perlitická
- c.) Rychlé ochlazování – vzniká čistě perlitická struktura

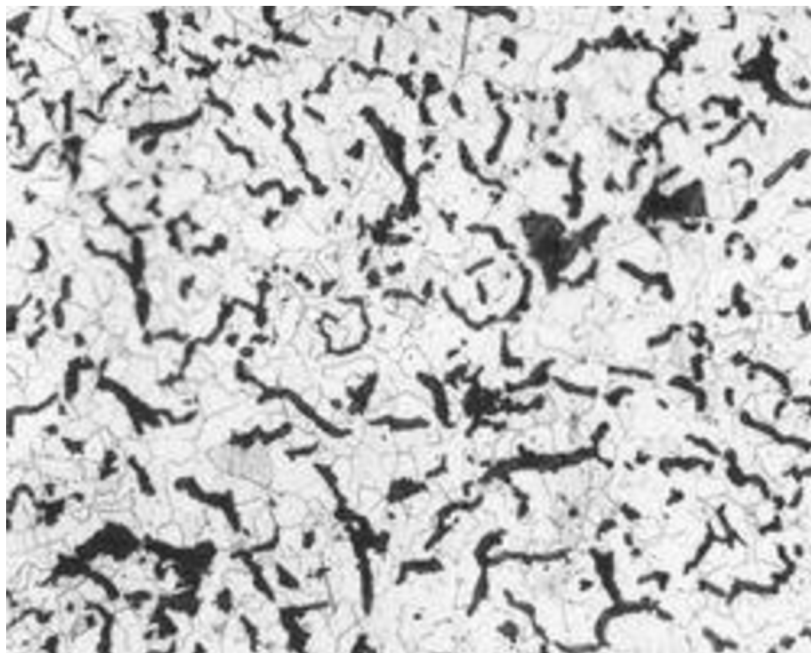
### 2.2.2 Vliv rychlosti ochlazování na tvar grafitu

U litiny s vermikulárním grafitem způsobuje rychlost ochlazování změnu tvaru grafitu. Z různých zkoušek vyplývá, že tenkostěnné odlitky, které mají vyšší rychlost ochlazování a jsou očkované na vermikulární grafit mají převážně grafit kuličkový. S rostoucí rychlostí ochlazování (s klesající tloušťkou stěny) se zvětšuje sklon ke globulizaci grafitu. U odlitků o tloušťce větších než 21 mm by nemělo docházet k výraznějším změnám, se snižující se tloušťkou odlitků a rychlejším chladnutím se však ve struktuře začíná vylučovat kuličkový grafit. [6]

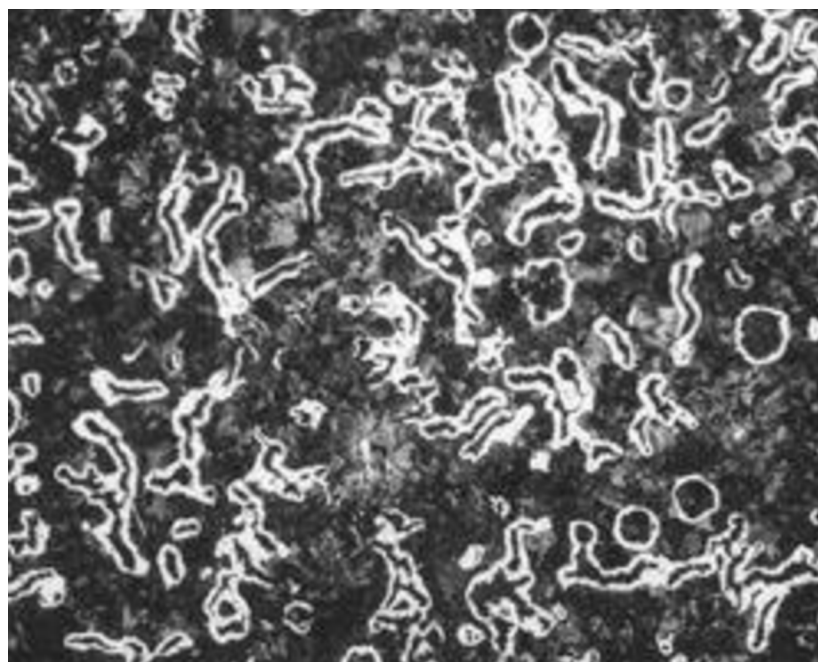
### 2.2.3 Vliv legur

Perlitotvorné prvky zvyšují stabilitu perlitu. To umožňuje pomalejší chladnutí litiny i v silnějších částích odlitků. Jako legující prvky se mohou použít Ni, Mo, Cr. Nejběžněji však Cu a Sn

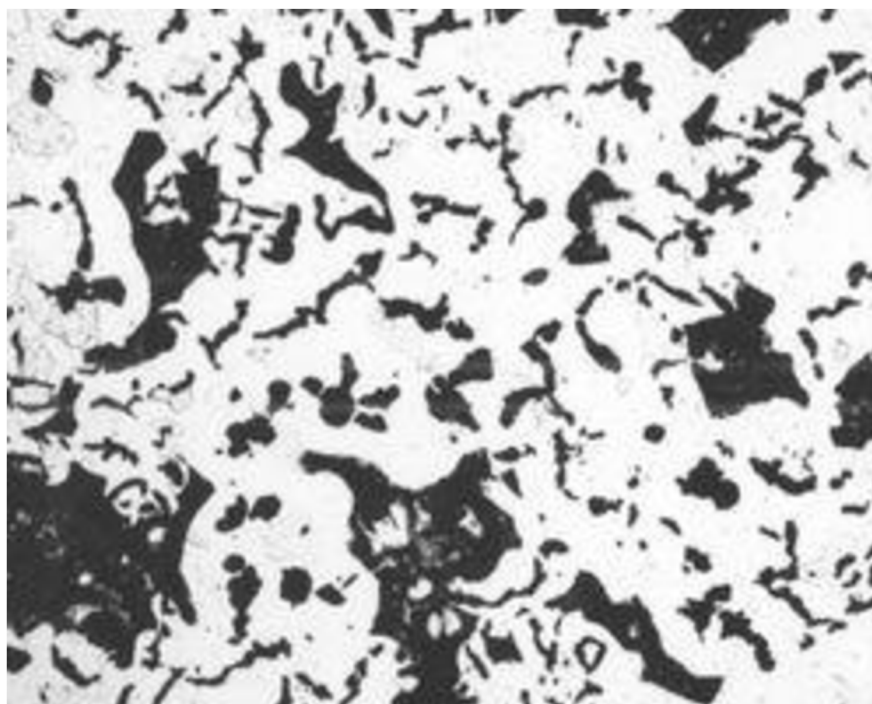
Často používané slovo v dalším textu je nodularita. Nodularita je procentuální vyjádření podílu kuličkového grafitu k ostatním formám grafitu ve struktuře.



**Obr. 2.6** Litina s feritickou maticí [7]



**Obr. 2.7** Litina s perlitickou maticí [7]



**Obr. 2.8** Litina s feriticko-perlitickou matricí [7]

### 2.3 Chemické složení

Chemické složení litiny je nejčastěji posuzováno podle stupně eutektičnosti, nebo podle uhlíkového ekvivalentu  $C_E$ .

Obecný vzorec (2.1): [5]

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

$C$ -obsah uhlíku v litině (%)

$X_i$ -obsah prvku  $X$  (%)

$m_i$ -koeficient vlivu (ekvivalence) prvku  $X$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu má, vzhledem k množství, význam hlavně P a Si, proto se tento vztah uvádí ve tvaru (2.2): [5]

$$C_E = C + 0,3(Si + P) \quad (2.2)$$

Eutektické litiny mají uhlíkový ekvivalent přibližně  $C_E = 4,25$  [5]

Litina s vermikulárním grafitem je většinou eutektická nebo mírně nadeutektická a podle toho se volí chemické složení. Uhlíkový ekvivalent  $C_E$  bývá v rozmezí 4,2-4,4. Uhlíkový ekvivalent má podobný vliv na mez kluzu jako je tomu u litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem. [8]

Chemické složení litin s vermikulárním grafitem udávají především tyto prvky: uhlík C, křemík Si, mangan Mn, fosfor P, síra S.

**Vliv a koncentrace jednotlivých prvků:**

## 1. Uhlík C:

Jeho množství ve slitině se pohybuje od 3,2-3,6 %. Čím vyšší je obsah uhlíku, tím větší je grafitizační expanze, tím se snižuje celková porozita odlitku. Proto je vhodné, aby byl obsah uhlíku spíše vyšší. To platí především u složitějších tenkostěnných odlitků. U masivních odlitků může být obsah uhlíku nižší. [8]

Srovnání:

- Obsah uhlíku – litina s kuličkovým grafitem: 3,2-4,2 %
- litina s lupínkovým grafitem: 2,5-3,5 %

## 2. Křemík Si

Obsah křemíku v litině se pohybuje v rozmezí 2-3 %. Křemík napomáhá tvorbě feritu a zvyšuje jeho tvrdost a pevnost. Také zvyšuje tranzitní teplotu, proto litiny s vermikulárním grafitem nejsou příliš vhodné pro dynamicky namáhané odlitky pracující za nízkých teplot. [8]

Srovnání:

- Obsah křemíku – litina s kuličkovým grafitem: 1,5-4 %
- litina s lupínkovým grafitem: do 3,5 %

## 3. Mangan Mn

Doporučený obsah manganu v litině s vermikulárním grafitem je do 0,3 %, někdy bývá obsah až do 0,5 %. Mangan napomáhá tvorbě perlitu. Mangan stabilizuje perlit, zjemňuje jeho strukturu, zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost proti oděru.

Srovnání:

- Obsah manganu – litina s kuličkovým grafitem: 0,4-0,8 %
- litina s lupínkovým grafitem: 0,1-0,6 %

## 4. Obsah fosforu P

Při nízkém obsahu mírně podporuje grafitizaci, pevnost, tvrdost a otěruvzdornost. Avšak při vyšším obsahu pevnost snižuje. Během tuhnutí fosfor segreguje do zbylé taveniny, vytváří tzv. fosfidické síťoví, které způsobuje křehnutí litiny.

Obsah fosforu je podobně jako u litiny s kuličkovým grafitem nutné udržovat co nejmenší. Maximálně do 0,04 %

## 5. Obsah síry S

Síra je v litině s vermikulárním grafitem nežádoucím prvkem. Obsah síry v litině s vermikulárním grafitem je do 0,02 % považován za neškodný. Síra má silný vliv na průběh tuhnutí litin. Způsobuje zpomalení růstu krystalizačních zárodků a buněk eutektického grafitu.

## 2.4 Vlastnosti litiny s vermikulárním grafitem

### 2.4.1 Pevnost v tahu a mez kluzu

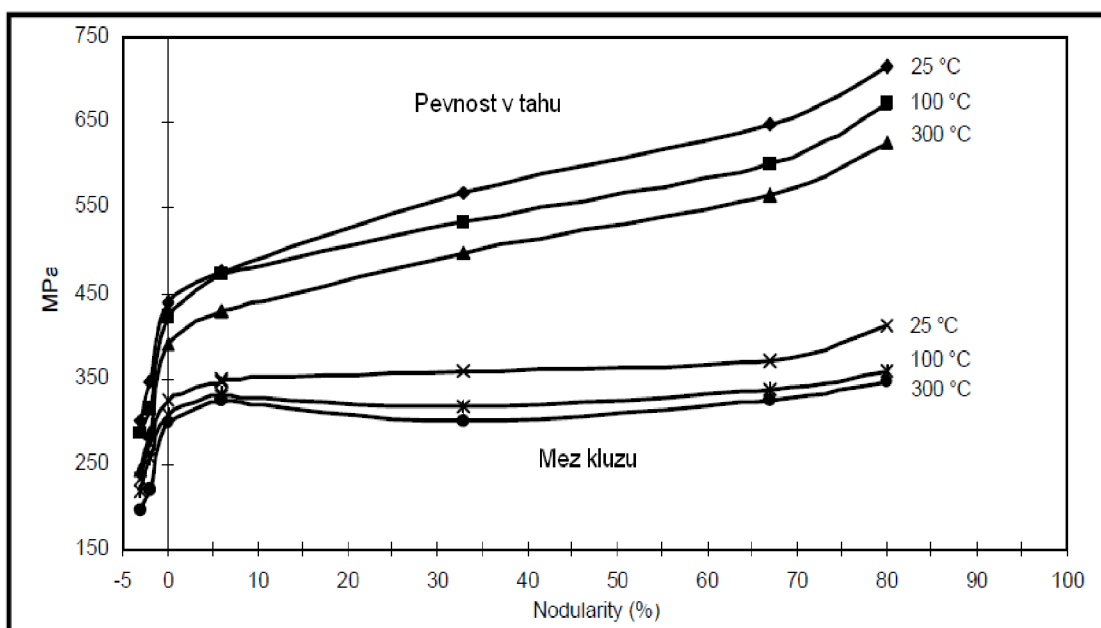
V publikaci [3] byly uvedeny výsledky zkoušky mechanických vlastností litiny s vermikulárním grafitem. Pro vyhodnocení tahových zkoušek byly z válcových odlitků vyrobeny zkušební tyče. Byly zhotoveny tři zkušební tyče z každého odlitku.

Testy byly prováděny při pokojové teplotě, při 100°C a při 300°C.

Tahová zkouška byla provedena s cílem zaměřit se na nejdůležitější mikrostrukturu pro výrobu bloků válců z litiny s vermikulárním grafitem a určit změny tahových vlastností.

Zkoušené materiály se dělí do dvou kategorií: [3] [9]

1. Litina s vermikulárním grafitem s pevnou (0–10 %) nodularitou a s 20–100 % perlitu ve struktuře
2. Litina s vermikulárním grafitem s pevnou (85–100 %) nodularitou

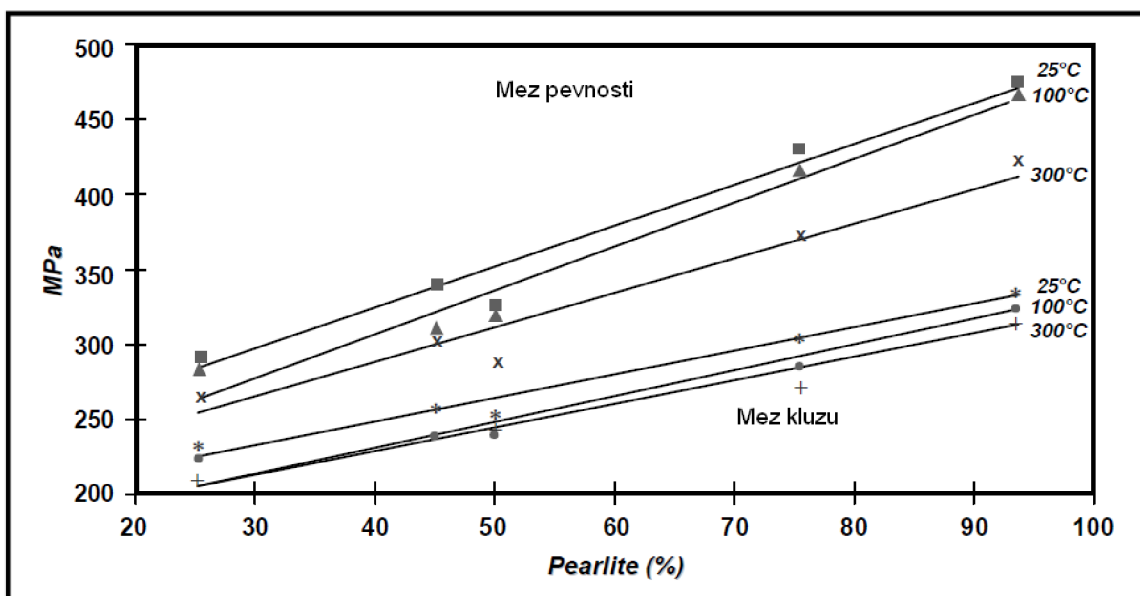


**Obr. 2.9** Pevnost v tahu a mez kluzu v závislosti na nodularitě a teplotě. [3]

Pevnost v tahu litiny s vermikulárním grafitem s nodularitou 10 % a perlitickou strukturou činí za pokojové teploty cca 450MPa. Se zvyšující se nodularitou roste i pevnost. Jestliže se však v litině vyskytuje menší množství lupínkového grafitu, pevnost značně klesá. [3]

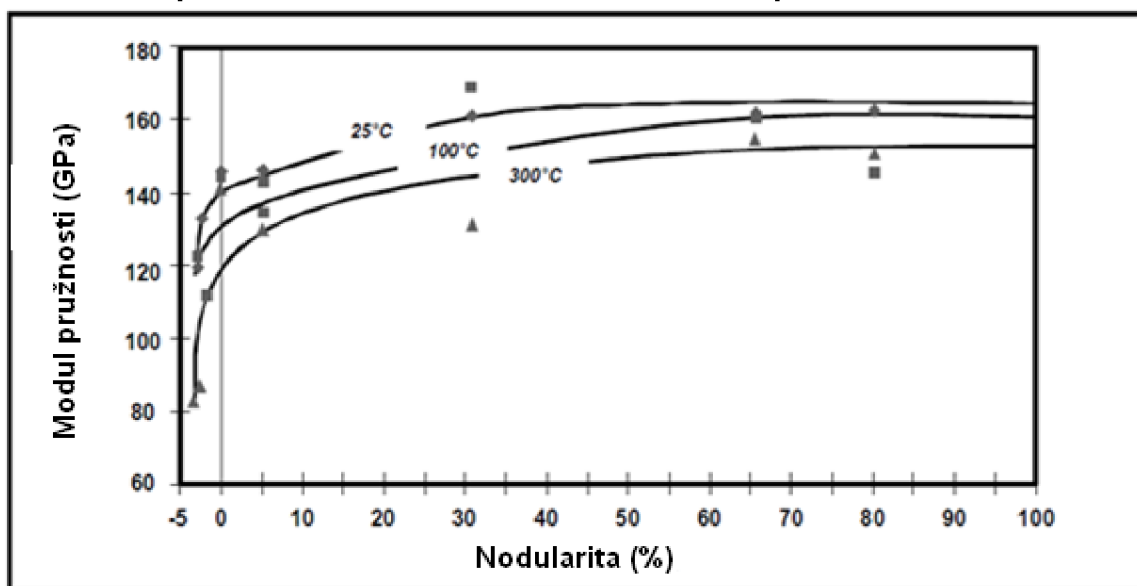
To dokazuje škodlivý vliv i malého množství lupínkového grafitu v litině. Z **obr. 2.9** je též patrné, že čím vyšší je nodularita, tím vyšší je pevnost, ovšem nemá velký vliv na růst meze kluzu.

Z **obr. 2.10** je patrný výrazný vliv obsahu perlitu na mez pevnosti i mez kluzu, který je téměř lineární. [3] [9]



**Obr. 2.10** Pevnost v tahu a mez kluzu v závislosti na množství perlitu a teplotě. Nodularity 10 %. [3]

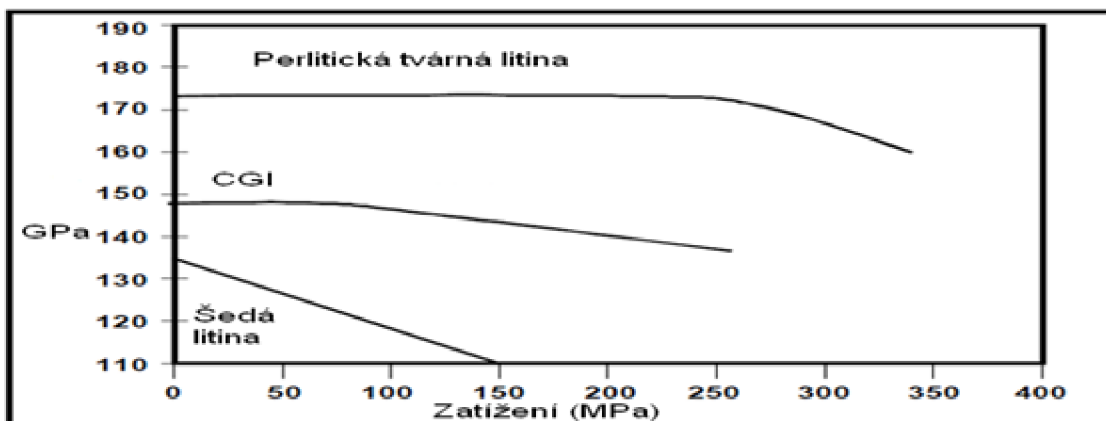
#### 2.4.2 Modul pružnosti v závislosti na nodularitě a teplotě.



**Obr. 2.11** Modul Pružnosti [3]

Jak je znázorněno v **obr. 2.11**, modul pružnosti roste společně s nodularitou. Přítomnost i malého množství lupínků snižuje modul pružnosti až o 20 %. [3]





**Obr. 2.12** Vliv zatížení na modul pružnosti u litin. [3]

### 2.4.3 Tvrdost

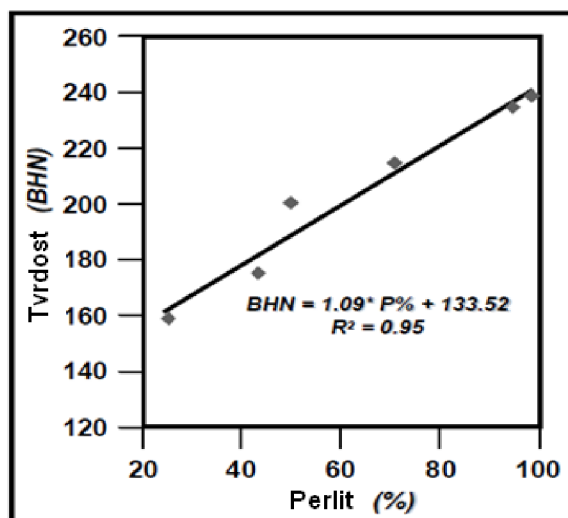
Růst grafitu a difuze uhlíku během tuhnutí litiny s vermikulárním grafitem podporuje spíše tvorbu feritické než perlitické matrice. Proto se do základní taveniny u litiny s požadovanou perlitickou strukturou přidávají prvky podporující vznik perlitické matrice. [3]

Litina s vermikulárním grafitem má o 10 až 15 % vyšší tvrdost než litina s lupínkovým grafitem při stejném obsahu perlitu.

Zatímco tvrdost dle Brinella se u plně perlitické litiny s lupínkovým grafitem pohybuje od BHN 179 do 223, tvrdost u litiny s vermikulárním grafitem leží v rozmezí 192 až 255 BHN.

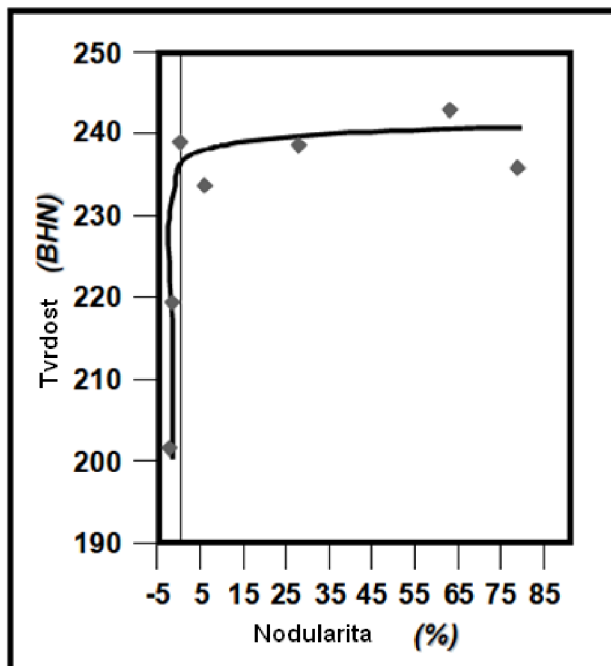
Odlitky z litiny s vermikulárním grafitem obsahující přibližně 70 % perlitu mají podobnou tvrdost jako plně perlitické litiny s lupínkovým grafitem. Jak je znázorněno na **obr. 2.13**, tvrdost litiny s vermikulárním grafitem lineárně roste s rostoucím obsahem perlitu.

Ovšem tvrdost záleží i na dalších prvcích jako je mangan, chrom, titan a další stopové prvky v surovinách.



**Obr. 2.13** Tvrdost dle Brinella pro vermikulární litinu s nodularitou 10 % v závislosti na obsahu perlitu [9]

Vliv růstu nodularity na tvrdost lze vidět na **obr. 2.14**. Při pevném obsahu perlitu (85-100 %) s nodularitou 0-90 %.



**Obr. 2.14** Tvrdost dle Brinella pro 85-100 % perlitickou litinu [9]

V rozsahu nodularity 5 až 90 % a perlitické základní hmotě (85-100 %) je tvrdost litiny prakticky konstantní. Pokles nastává při vzniku lupínkového grafitu. Současné zvýšení tvrdosti při počátečním vzniku vermikulárního grafitu je důsledkem komplexní morfologie grafitu a zhrubnutí povrchu, které brání skluzu a rozštěpení na hranici grafit/tavenina. [9]

#### 2.4.4 Odolnost proti opotřebení

Opotřebení je komplexní jev, který se skládá z několika tribologických mechanismů a nedá se popsat všeobecně přijatelným zkušebním postupem nebo kvantitativním kritériem pro stanovení vhodnosti daného materiálu.

Na rozdíl od definované specifikace limitů pro tahové vlastnosti nebo tvrdost, odolnost proti opotřebení materiálů je obvykle hodnocena v porovnání k odolnosti ostatních materiálů. Experimentální postup se může lišit od skutečné sofistikované simulace zatížení.

Obecně platí, že u nelegované perlitické litiny s vermikulárním grafitem je opotřebení zhruba o polovinu menší než u nelegované perlitické litiny s lupínkovým grafitem.

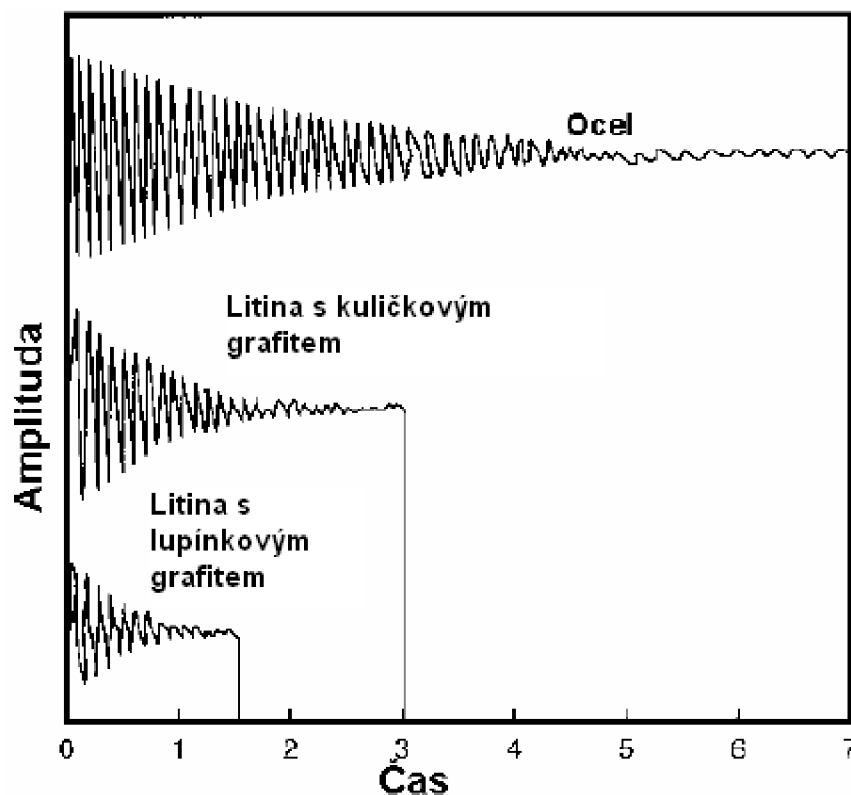
Podobné výsledky byly zjištěny i u zkoušky otěruvzdornosti, kde je úbytek hmotnosti vzorků litiny s vermikulárním grafitem při otěru o 40-55 % menší než u litiny s lupínkovým grafitem. Přestože se zkušební techniky a výsledky liší, ukazuje se, že litina s vermikulárním grafitem má vynikající odolnost proti opotřebení oproti litině s lupínkovým grafitem. [3] [9]

### 2.4.5 Schopnost útlumu

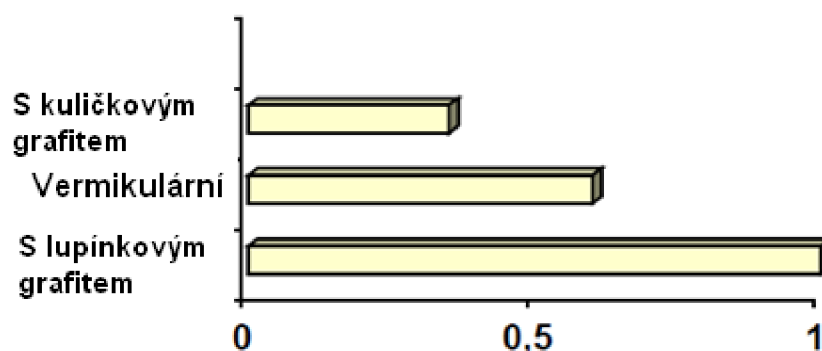
Tlumicí schopnost hraje v moderním pojetí konstrukce významnou roli. Vysoká tlumicí schopnost redukuje hluk a subsonické vibrace emitované strojními součástmi, které jsou vystaveny cyklickému namáhání. Spalovací motory běží klidněji, téměř bezhlučně a obráběcí stroje se téměř nechvějí a vyrábí součásti s velmi hladkými povrchy. [10]

Útlum je schopnost materiálu absorbovat vibrační energii určitou formou vnitřního tření. V kovech je primárním mechanismem útlumu lokalizovat neelastické (mikroplastické) chování. [10]

Schopnost útlumu u bloku válců se často spojuje s předpokládanou NVH (hluk, vibrace, drsnost) u zhotoveného motoru. Konečná úroveň hluku pracujícího motoru je závislá na mnoha faktorech, včetně tuhosti bloku válců (odvozenou jak z návrhu bloku a modulu pružnosti zvoleného materiálu), interakce, vliv pomocných komponent, jako jsou čerpadla, pásy a schopnost útlumu materiálu. [9]



**Obr. 2.15** Křivky útlumu v průběhu času pro ocel a litiny dle Gallowaye [10]



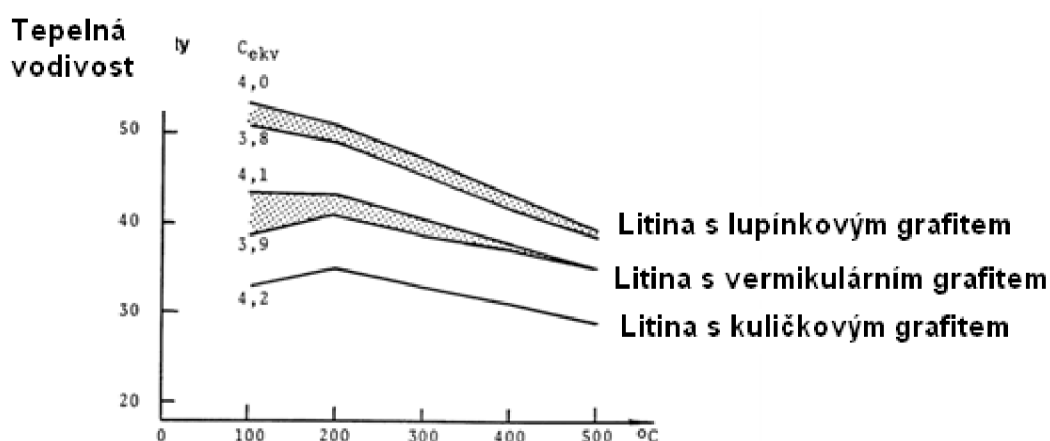
Obr. 16 Relativní útlum u jednotlivých litin [3]

### 2.4.6 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost grafitické fáze je tři až pětkrát větší než feritické nebo perlitické. Je tedy zřejmé, že množství a tvar grafitu jsou hlavní faktory při definování tepelné vodivosti litin.

Provedené zkoušky, uvedené v literatuře [3] ukazují, že tepelná vodivost litiny s vermikulárním grafitem je přibližně o 25 % menší než perlitické litiny s lupinkovým grafitem při pokojové teplotě a o 15-20 % menší než při 400°C. Přítomnost relativně malého množství lupinkového grafitu v mikrostruktúře litiny s vermikulárním grafitem způsobuje, že vodivost klesá spolu s teplotou. Tepelná vodivost litiny s vermikulárním grafitem oproti tomu roste s rostoucí teplotou.

Změny složení v rámci praktické výroby v rozmezí 3,5-3,8 % uhlíku mohou ovlivňovat tepelnou vodivost maximálně o 10 %. Oproti tomu mikrostruktura litiny s vermikulárním grafitem může významně ovlivnit velikost tepelné vodivosti. Zvýšení nodularity v rozsahu 10-30 % může mít za následek snížení tepelné vodivosti až o dalších 10 %. Proto je lepší zaměřit se spíše na snížení nodularity a tím i ztrátě vodivosti (zejména v tepelně namáhaných oblastech) než hledání prostředků ke zvýšení vodivosti. [3] [9]



Obr. 2.17 Tepelná vodivost litiny s vermikulárním grafitem v porovnání s litinou s lupinkovým a kuličkovým grafitem [9]

## Slévárenské vlastnosti

### 2.4.7 Sklon k zákalce

Sklon k zákalce je ovlivněn především druhem použitého modifikátoru, zvyšování zákalky způsobují především prvky Ti, Sb a N, menší vliv mají i kovy vzácných zemin. Při použití modifikátoru s obsahem Si ke zvyšování zákalky nedochází. [9]

### 2.4.8 Zabíhavost

Zabíhavost litiny s vermikulárním grafitem je za stejných podmínek (stejně chemickém složení, uhlíkový ekvivalent, lící teplota, forma, jádra) shodná se zabíhavostí litiny s lupínkovým grafitem. [9]

### 2.4.9 Sklon ke staženinám

Litiny s vermikulárním grafitem mají tendenci vytvářet spíše soustředěnou staženinu, než-li roztroušené řediny. Pro výrobu odlitku je možno použít shodné modelové zařízení bez úpravy, jako pro litinu s lupínkovým grafitem. [9]

Litina		Objem staženiny		Poměr objemu staženiny	
		Objem staženiny %	%	Poměr objemu staženiny %	%
Šedá I.	LLG	4,1	100	1,0	100
Vermikulární	LČG	4,8	117	1,8	180
Tvárná I.	LKG	7,0	170	4,4	440

**Obr. 2.18** Objem staženiny při tuhnutí litin [9]

Slévárenské vlastnosti vermikulární a litiny s lupínkovým grafitem jsou téměř shodné. Vermikulární litina má větší sklon k vzniku staženin a ředin. Může být tedy použita téměř stejná technologie výroby. [9]

### 2.4.10 Shrnutí základních vlastností litiny s vermikulárním grafitem

**Tab. 2.1** Základní vlastnosti vermikulárních litin [8]

Označení	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 $A_5$ (%)	2	1-2,5	min. 0,5
Tvrdość (HB)	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 (J)	3-6		
Modul pružnosti E (GPa)	130-160	150-160	min. 170
Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ ( $K^{-1}$ ) Hustota ( $kg \cdot m^{-3}$ )	$11 \cdot 10^{-6}$	$11-13 \cdot 10^{-6}$	$11-13 \cdot 10^{-6}$
Hustota	7000	7100	7100

## 2.5 Využití

Litina s vermikulárním grafitem je využívána pro mnoho odlitků, avšak největší část výrobků směřuje do automobilového průmyslu konkrétně na výrobu bloků válců motoru.

Úspěšný rozvoj nových výrobních technologií a produkce litiny s vermikulárním grafitem má za následek zvýšení sériové výroby v Evropě, Asii a Americe. [2]

V tabulce je přehled hlavních výrobních programů bloků motorů z litiny s vermikulárním grafitem

**Tab. 2.2** Výrobní programy [2]

	OEM	Motor	Komponent
1	Audi	3.0 L V6 Diesel	Blok motoru
2	Audi	4.2 L V8 Diesel	Blok motoru
3	Audi	6.0 L V12 Diesel	Blok motoru
4	Caterpillar	Heavy-Duty Engines	Blok motoru
5	DAF	12.6 L I-6 Diesel	Blok motoru
6	DAF	12.9 L I-6 Diesel	Blok motoru a hlava válců
7	Ford-PSA	2.7 L V6 Diesel	Blok motoru
8	Ford	3.6 L V8 Diesel	Blok motoru
9	Ford-Otosan	9.0 L I-6 Diesel	Blok motoru a hlava válců
10	Hyundai	3.0 L V6 Diesel	Blok motoru
11	Hyundai	3.9 L I-4 Diesel	Blok motoru
12	Hyundai	5.9 L I-6 Diesel	Blok motoru
13	International	11.0 L I-6 Diesel	Blok motoru
14	International	13.0 L I-6 Diesel	Blok motoru
15	John Deere	9.0 L I-6 Diesel	Blok motoru
16	MAN	10.5 L I-6 Diesel	Blok motoru
17	MAN	12.4 L I-6 Diesel	Blok motoru
18	Mercedes	12.0 L V6 Diesel	Blok motoru
19	Mercedes	16.0 L V8 Diesel	Blok motoru

Aktuální objem produkce je přibližně 500.000 motorů z litiny s vermikulárním grafitem ročně. V současné době je výroba omezena především na dieselové motory, a to především v Evropě. Produkce motorů z litiny s vermikulárním grafitem by měla expandovat do dalších odvětví a dalších zeměpisných oblastí. [11]

Konkrétní příklady zahrnují hlavy válců komerčních vozidel a dieselové motory s válci do V. „V-motorů“ pro severoamerické SUV a pickapy. S ohledem na schválené výrobní činnosti se odhaduje, že se bude vyrábět v průběhu roku 2011 více než 30 různých konstrukcí motorů, které představují více než dva milióny motorů z litiny s vermikulárním grafitem. [2]

Výhody motorů z litiny s vermikulárním grafitem, oproti konvenčním motorům

Výhody litiny s vermikulárním grafitem při konstrukci motorů: [2]

- Snížení tloušťky stěn při běžných provozních podmínkách
- Zvýšení provozních zatížení při stejné konstrukci motoru
- Vylepšené NVH (zkratka z anglického noise, vibration and harshness-zvuk, vibrace, zápach)
- Kratší hloubky závitů, a tedy kratší šrouby

Během počátečního období vývoje v polovině devadesátých let 20. století, byla většina vývoje odlitků z litiny s vermikulárním grafitem zaměřena na snížení hmotnosti.

Hmotnost oproti běžné litině s lupínkovým grafitem se podařilo snížit až o 30 % a zároveň byly zachovány stejné parametry motoru.

Běžně se však redukce hmotnosti pohybuje kolem 15 % oproti litině s lupínkovým grafitem.

Dalším cílem bylo zvyšování výkonu. Vzhledem k téměř dvounásobné únavové pevnosti v poměru k litině s lupínkovým grafitem a slitinám hliníku je možné výrazně zvýšit zatížení motoru.

Firma OEM provedla zkoušky, při kterých bylo zjištěno, že motor o obsahu 1,3 litru vyrobený z litiny s vermikulárním grafitem může mít stejný výkon jako běžný 1,8 litrový motor.

Oproti běžným materiálům byl tedy zvýšen výkon motoru a přitom snížena jeho hmotnost. [2] [11]

Další výhodou motorů z litiny s vermikulárním grafitem je schopnost vydržet vrtání válců bez porušení.

V důsledku vyšších tlaků a teplot při spalování, mají díry pro válce tendenci se rozšiřovat, avšak díky zvýšené tuhosti a pevnosti litiny s vermikulárním grafitem, je motor schopen těmto vlivům odolat. Motory z litiny s vermikulárním grafitem mají také menší spotřebu oleje [12]



*BMW M8**JAGUAR V6**AUDI V8***Obr. 2.19** Ukázky motorů z litiny s vermikulárním grafitem [2]

### **3. VÝROBA LITINY S VERMIKULÁRNÍM GRAFITEM**

#### **3.1 Vsázkový materiál**

##### **3.1.1 Suroviny na přípravu vsázky**

###### **Surové železo**

Základní materiál kovové vsázky, má největší význam na chemické složení, vlastnosti a náklady. Železo se rozděluje podle obsahu základních prvků:

- Slévárenské
- Ocelárenské
- Speciální
- Legované

###### **Ocelový odpad**

Jeho význam spočívá ve snížení obsahu uhlíku nebo křemíku v litině. Má velký vliv na vlastnosti litiny. Zhoršuje zabíhavost a plastické vlastnosti, zvyšuje tvrdost.

Pokud je ocelový odpad znečištěný například tuky nebo organickými sloučeninami, zvyšuje se obsah vodíku v tavenině. Je důležité ocelový odpad důsledně třídit. [13]

###### **Vratný materiál**

Vratný materiál je technologický odpad sléváren, před použitím je nutné ho důsledně roztřídit. [13]

###### **Legury, nauhličovadla, očkovadla, modifikátory, struskotvorné přísady**

###### **Vsázka pro litinu s vermikulárním grafitem**

Jako vsázka pro výrobu litiny s vermikulárním grafitem je vhodné použít vlastní struskotvorný materiál, surové železo a ocelový odpad s malým obsahem síry a fosforu. [8]

Množství surového železa: 20-40 %

Množství oceli: 20-40 %

Vratný materiál: zbytek

Do vsázky se nedoporučuje přidávat zlomkovou litinu kvůli neznámému chemickému složení a kvůli obsahu nečistot. [13]

Na dosažení požadovaného obsahu uhlíku se používají nauhličovadla. Pro dosažení vermikulárního tvaru grafitu se používají modifikátory, které se mohou lišit v závislosti na metodách výroby popsaných níže.

Modifikátory také mohou do taveniny přinášet křemík, proto se musí snížit jeho obsah ve vsázce. [13]

## 3.2 Tavení

### 3.2.1 Tavící agregáty vhodné k výrobě litiny s vermikulárním grafitem

Tavení litiny s vermikulárním grafitem je podobné jako u litiny s kuličkovým grafitem.

Provádí se v elektrických indukčních pecích. Ve slévárnách oceli se též využívá oblouková pec.

V případě výroby litiny s vermikulárním grafitem v kuplovně je důležité provést předpřípravu (složení a podíl vsázky, nízký obsah fosforu) a je nutné provést odsíření taveniny. [8]

Tavení v elektrických indukčních pecích [13]

Výhody:

- Přesné chemické složení
- Možnost výroby litiny s nízkým obsahem uhlíku
- Přesné řízení teploty taveniny
- Možnost tavení malého množství kovu
- Lepší homogenita tekutého kovu v důsledku promíšení vířivými proudy
- Ekologičtější tavení
- Menší propal prvků
- Nenáročná obsluha

Nevýhody

- Vyšší výrobní náklady (vysoká cena elektrické energie)

Tavení litiny v kuplovně [13]

Kuplovna se pro tavení litiny při výrobě vermikulárního grafitu příliš nepoužívá. Ovšem některé slévárny používají metodu výroby s vysokým obsahem síry v základní tavenině, pro kterou je vhodné použít právě kuplovnu. Obsah síry ve výchozí tavenině se pohybuje mezi 0,07-0,13 % S. Předslitina se skládá s Mg-Ce a pro dosažení vermikulárního tvaru se jí přidává do 1,8 % hmotnosti taveniny v závislosti na obsahu síry. Teploty se musí držet mezi 1475-1520°C. Prvky Mg, Ca, Ce reagují se sírou a působí tak jako grafitizační zárodky, zmenšují přechlazení taveniny a zabraňují vzniku karbidů.

Při výrobě litiny s vermikulárním grafitem touto metodou se udávají mechanické vlastnosti pevnost v tahu 420-470 MPa a tažnost 2,5 %. [13]

Při vysokém počátečním obsahu síry vzniká nebezpečí, že sloučeniny síry budou zůstávat v tavenině. Lehčí sloučeniny síry se z taveniny vylučují buď už v odlévací pánvi, anebo v průběhu odlévacího procesu, ale těžší sloučeniny síry (např. CeS). Zůstávají v litině jako nekovová součást. [13]

### 3.2.2 Průběh tavení

#### Očkování

Očkování znamená vnášení látek do roztavené litiny, které podporují vznik heterogenních zárodků pro krystalizaci grafitu. Čím více je v tavenině aktivních zárodků, tím jsou vhodnější podmínky pro nukleaci a růst grafitu, ke kterému pak dochází při menším přechlazení. Teplota nukleace v očkované litině bývá větší než metastabilní eutektické teplota, čímž se zabraňuje vzniku ledeburitu.

Očkováním se nerozumí přímé vnášení zárodků, protože ty vznikají až vzájemnou interakcí mezi prvky v očkovadle a litině. [5] [13]

Důvod pro očkování je především: [5]

- Zabránění metastabilního tuhnutí
- Rovnoměrné vyloučení grafitu v celém odlitku
- Zjemnění struktury a zlepšení mechanických vlastností litiny

Očkovadlo je vhodné použít především tam, kde vznikají nepříznivé podmínky pro grafitizaci. Například nízký uhlíkový ekvivalent, vysoká rychlost ochlazování, vysoký obsah karbidotvorných prvků nebo nízký obsah prvků podporujících grafitizaci. [5]

Pokud je litina nedostatečně očkována grafit v litině může být nepravidelně rozložen a vznikají místa s metastabilní strukturou. To má za následky zhoršení mechanických, slévárenských a technologických vlastností. Očkování také zlepšuje obrobitelnost litiny. [5] [13]

#### Složení očkovadel

##### Očkovadlo

Je tvořeno krystalizačně aktivní složkou a nosičem, který ji dopravuje do taveniny.

Nosič tvoří hlavní část očkovadla, v litině má být snadno rozpustný, vytvářet slitinu s krystalizační složkou, zvyšovat aktivitu uhlíku.

##### Očkovací složka

V očkovadle je obsažena pouze v malé koncentraci. Bývá to například Ca, Al, Sr, Ba, Zr... Tyto prvky reagují se sírou a kyslíkem. Tím se vytváří sloučeniny s vyšší teplotou tuhnutí než má tavenina a ty slouží jako nukleační zárodky grafitu.

## Druhy očkovaadel [5]

### 1. Očkovaadla na bázi křemíku

Nejběžnějším očkovaadlem je ferrosilicium (FeSi). Obsahuje 65-75 % Si a dále hliník Al, a vápník Ca v malém množství.

Komplexní očkovaadla na bázi křemíku obsahují ještě další prvky například

Sr – delší účinnost očkovaadla

Ba – delší účinek, zabránění vzniku bodlin

Zr – zpomaluje odeznívání

Mn – zlepšuje rozpustnost

Ce – zabraňuje vzniku kuličkového grafitu

Ti – zabraňuje vzniku kuličkového grafitu

### 2. Očkovaadla na bázi uhlíku

### 3. Silokalcium

### 4. Karbid křemíku

Očkování se provádí několika způsoby:

- Očkování v pánvi
- Očkování do proudu kovu
- Očkování plněným profilem

## Modifikace litin

Modifikací litin se rozumí přidání látky, která zajistí, že při krystalizaci vznikne požadovaný tvar grafitu (vermikulární, kuličkový). Jako modifikátor se nejčastěji využívají předslitiny na bázi následujících prvků: [13]

- Hořčík
- Cer a kovy vzácných zemin
- Vápník

## Hořčík Mg

Hořčík má vysokou afinitu ke kyslíku a síře, v tavenině reaguje s těmito prvky. Při reakci vznikají sulfidy, které jsou velice termodynamicky stabilní. Hořčík se používá buď ve formě kovového hořčíku, nebo ve formě předslitiny, například s niklem nebo křemíkem. Při vysoké koncentraci můžou vznikat karbidy.

## Kovy vzácných zemin

Mají podobné účinky jako hořčík, používají se v různém složení (mischmetal, compactmag atd.). Nevýhoda využití této modifikace je, že modifikační účinek rychle odeznívá. Prvky mají vysokou afinitu ke kyslíku a síře (vyšší než hořčík). Díky tomu je krystalizace grafitu stabilnější. Pokud je koncentrace těchto prvků příliš vysoká, můžou v litině vznikat karbidy.

## Vápník

V současné době se již příliš nepoužívá, byl využíván při výrobě tenkostěnných odlitků, protože omezuje vznik zákalky. Vápník má vliv na zvýšení tvorby strusky

### Metody modifikace:

Polévací metody (např. sandwich, tundisch, modifikace v konvertoru)

Ponořovací metody (např. modifikace v autoklávu, MAP, v tlakové pánvi) modifikátor je ponořen do taveniny uvnitř ponořovacího zvonu.

## 3.3 Vybrané metody k zajištění vermikulárního tvaru grafitu

### 3.3.1 Nedokonalá modifikace hořčíkem

Postup je podobný jako při výrobě litiny s kuličkovým grafitem, ale záměrně se sníží množství přidávaného hořčíku, nebo hořčíkové předslitiny. Tato metoda je těžko proveditelná, protože obsah zbytkového hořčíku, při kterém se tvoří červíkovitý grafit, se pohybuje pouze v rozmezí 0,15-0,22 % Mg.

Při vysokém obsahu zbytkového hořčíku se v litině začne vylučovat grafit ve formě kuliček, naopak při nízkém obsahu zbytkového hořčíku se začne v litině objevovat grafit ve formě lupínek.

Tento jev nastává zejména v silnějších částech odlitku. Proto se tato metoda téměř nedá použít pro odlitky, s rozdílnou tloušťkou stěn.

Podobně jako u výroby litiny s lupínkovým grafitem se i u litiny s vermikulárním grafitem do taveniny přidává předslitina, nejčastěji FeSiMg (4-6 %Mg), případně NiMg.

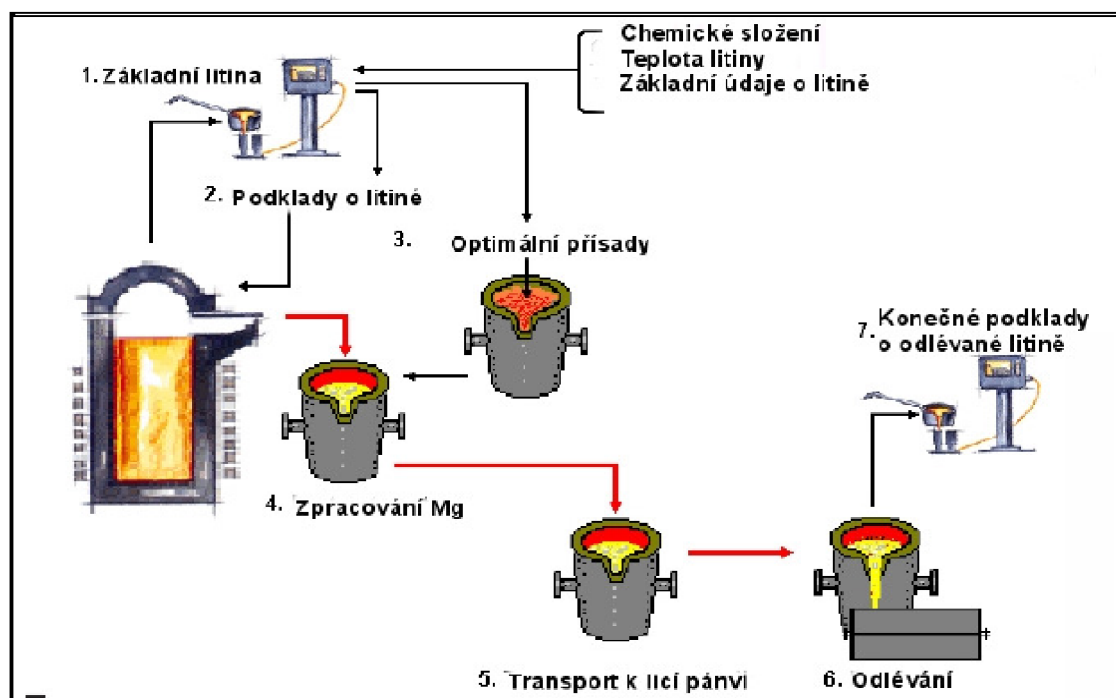
Většinou se využívá metoda sandwich, nebo běžný polévací způsob, který spočívá v tom, že se na dno pánve nejprve položí předslitina a jako další vrstva se přidá FeSi nebo plechy, které se roztavují během plnění pánve a po jejich roztavení začne tavenina reagovat s modifikační (např. FeSiMg) předslutinou umístěnou na dně pánve. Hořčík v předslutině začne reagovat a vypařovat se z taveniny.

V tavenině se rozpustí jen velmi malé množství hořčíku. Většina hořčíku proniká na povrch taveniny ve formě par.

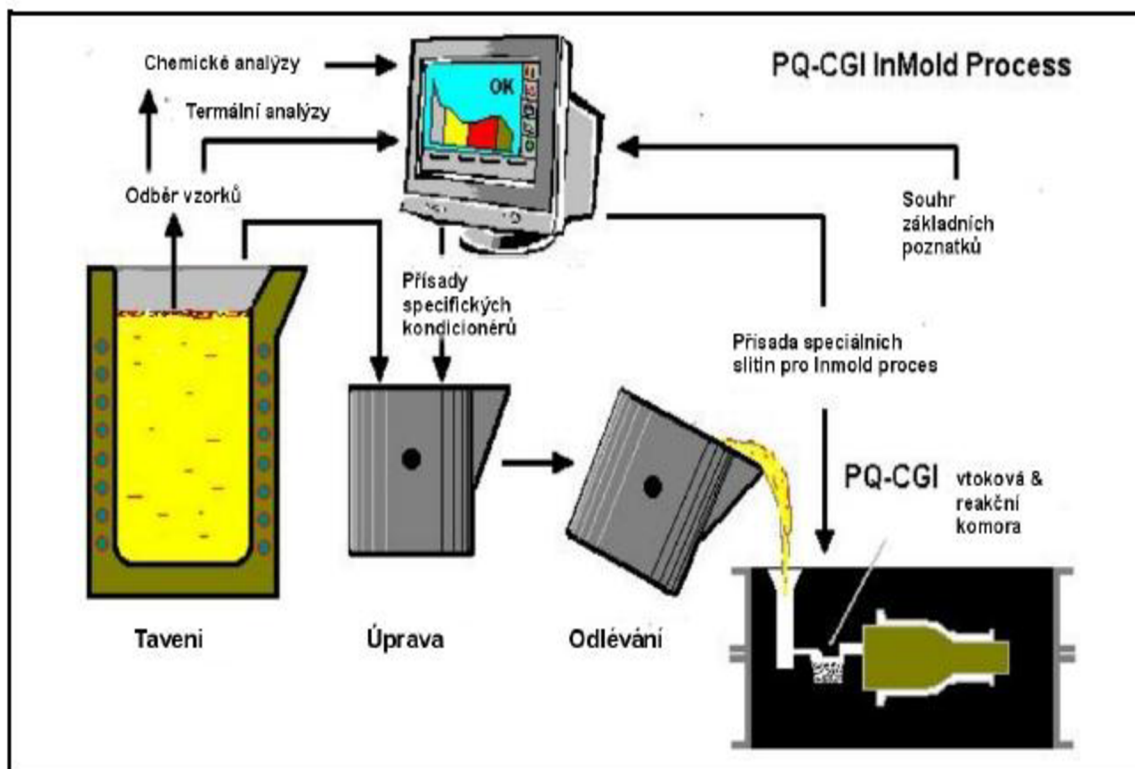
Proto je obtížné určit přesné množství zbytkového hořčíku, při kterém dojde k vytvoření vermikulárního grafitu. [1] [9] [13]

Vzhledem k problémům s výrobou vzniká u odlitků různá struktura, na které závisí i mechanické vlastnosti, které se liší v různých průřezích. Proto se u této metody vyskytuje velké množství zmetků a odlitků, které neodpovídají kvalitativním požadavkům. Toto se dá redukovat neustálým sledováním množství hořčíku v tavenině a následně upravovat jeho množství pro požadavky na výrobu.

Přestože při použití této metody vzniká mnoho problémů, je tato metoda využívána především ve slévárnách, které se také zabývají výrobou odlitků z kuličkového grafitu, protože výchozí tavenina pro obě litiny je podobná. [13]



**Obr. 3.1** Postup výroby litiny s vermikulárním grafitem kontrováním celého postupu [14]



**Obr. 3.2** Postup výroby odlitku z litiny s vermikulárním grafitem metodou inmold [14]

### 3.3.2 Modifikace hořčíkem s přídavkem tzv. antiglobulirizačních prvků

Jako antiglobulirizační prvky se označují prvky, které zabraňují tvorbě kuličkového grafitu.

Radí se mezi ně především titan Ti, hliník Al, antimon Sb a další. Pro výrobu litiny s vermikulárním grafitem se však používá především titan. Titan je v malém množství obsažen prakticky ve všech litinách, protože je přítomen ve většině surových želez, vliv titanu závisí na tloušťce stěny. Titan ruší účinky hořčíku při vzniku kuličkového grafitu a napomáhá tak vzniku vermikulárního grafitu.

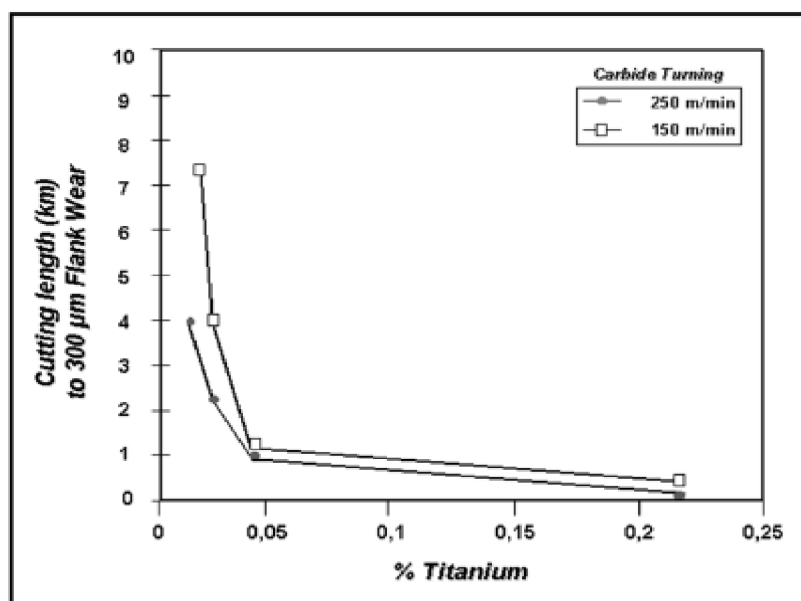
Při tomto postupu se využívají kombinované předslitiny. V tomto případě je litina očkována podobně jako litina s kuličkovým grafitem, pokud jde o hořčík. Rozdíl je v přidání titanu. Titan se přidává jako předslitina a to buď přidáním FeTi nebo použitím Ti jako pevné součásti MgFeSi (MgFeSi-T). [15]

Složení předslitiny:

- Mg: 4-5 %
- Ti 8,5-10,5 %
- Ca 4-5,5 %
- Al 1-1,5 %
- Ce 0,5-0,35 %
- Si 48-52 %

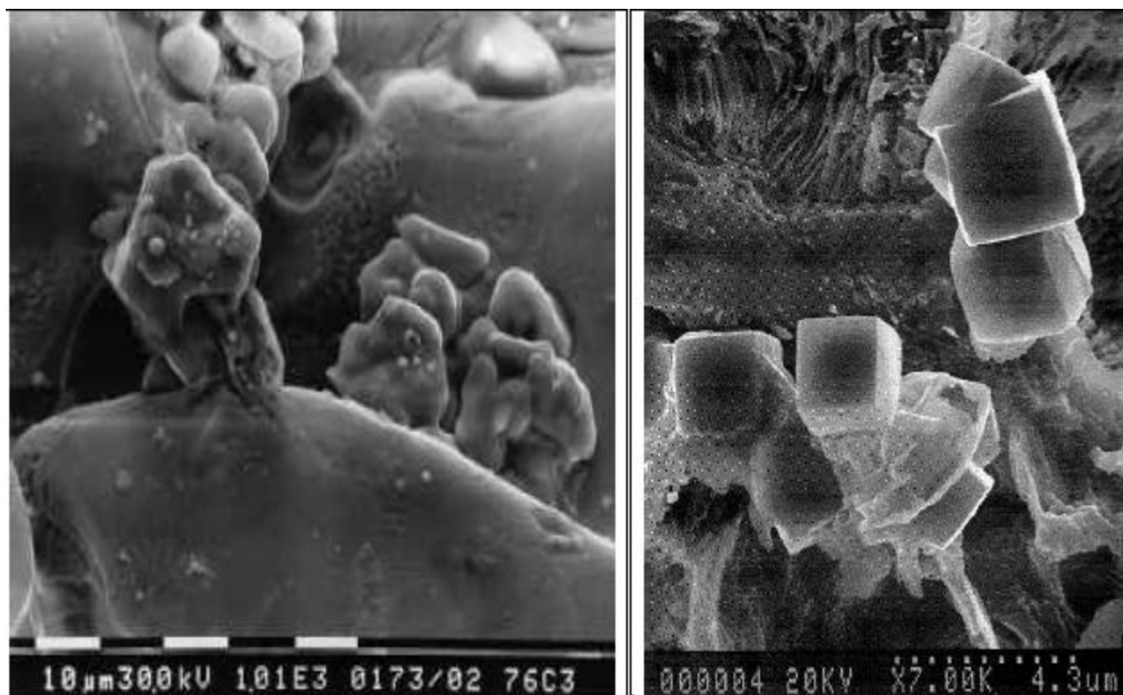
Koncentrace titanu se uvádí v množství 0,08-0,12 % Ti. Tato metoda dává širší možnosti výroby, než Mg metoda a lze dosáhnout uspokojivých vermikulárních struktur jak v tenkých, tak silnějších částech.

Hlavní nevýhoda této metody, kromě vysokých nákladů, je mimořádně špatná obrobitelnost odlitků. Přítomnost titanu podporuje ve struktuře tvorbu feritu a současně může vést ke vzniku nežádoucích karbidů (TiC). Výskyt těchto karbidů ve struktuře vede ke zhoršení obrobitelnosti litiny. Nemůžeme zcela zabránit vzniku karbidů, avšak nabízí se řešení použít kombinovanou modifikaci Mg a Ce, čímž se sníží množství titanu. [1] [13]



Obr. 3.3 Vliv titanu na životnost nástroje [1]





**Obr. 3.4** Karbid titanu a sulfidy [16]

Další nevýhodou této metody je kontaminace titanem u vratného materiálu což jej dělá nevhodným pro další použití a je nutné jeho důsledné třídění. [1]

Nevýhody metody s Ti

- Drahá výroba v důsledku vysoké ceny titanu
- Špatná obrobitelnost kvůli výskytu TiC
- Kontaminace materiálu titanem

Tuto metodu lze však využít pro odlitky, které jsou značně namáhané. Zde je naopak vznik karbidu titanu žádoucí. [16]

Další antiglobulizační prvky jako je Al, Sb, Sn, Bi se většinou samostatně nepoužívají, protože oproti titanu mají ještě falší nežádoucí vlastnosti. Mohou však být u některých výrobců cíleně použity ve velmi malé množství s přesně cílených důvodů. [9]

### **Dusík jako antiglobulizační prvek**

Další možnost představuje modifikace dusíkem. Dusík se v tavenině rozpouští a může se používat jako nosný plyn pro přísady do taveniny.

Nejmenší množství dusíku by mělo být 0,008-0,009 %. Pokud je ho méně, nemá na strukturu žádný vliv. Při zvýšeném množství dusík podporuje vznik perlitu a vznik vermikulárního grafitu. Dusík se přidává do litiny ve formě dusíkatého vápna, nebo feromanganu. Obsah dusíku by se měl pohybovat mezi 0,01-0,15 %. Jeho vliv na vznik vermikulárního grafitu je především u silnostěnných odlitků. Zvýšený obsah dusíku v tavenině může vést ke vzniku bodlin.

I když je výroba vermikulárního grafitu pomocí dusíku možná, v praxi se tato metoda ve slévárnách nevyužívá. [13]

### 3.3.3 Použití kombinace Mg+kovy vzácných zemin

Tato metoda spočívá v modifikaci taveniny slitinami kovů vzácných zemin. Jako nosič se obvykle používá FeSi který obsahuje 5-6 % Mg a 1-6,5 % kovů vzácných zemin. Tato předslitina se obvykle dodává do taveniny v množství 0,3-0,5 % hmotnosti taveniny. Někdy je možné pro lepší vylučování vermikulárního grafitu přidat ještě předslitinu FeTi do maximálního množství 0,5 % celkové hmotnosti.

Tento výrobní postup je pravděpodobně nejehospodárnější a je při něm dosaženo požadovaného tvaru grafitu.

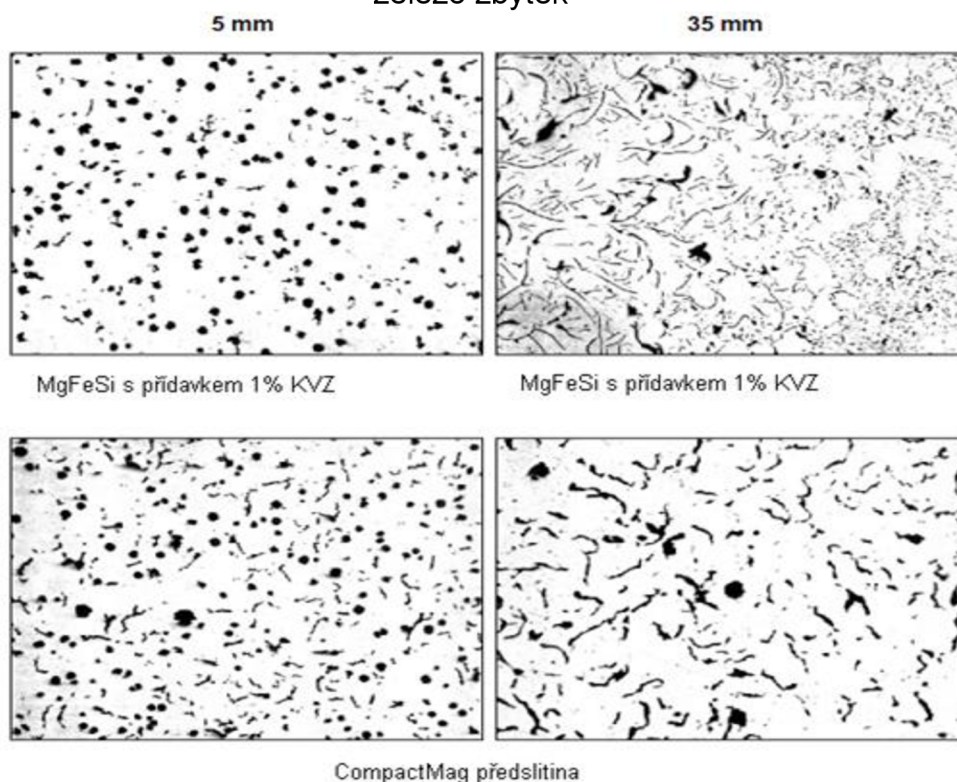
Vsázkový materiál je podobný jako u výroby litin s kuličkovým grafitem. Litina je mírně nadeutektická a obsah síry menší jak 0,02 %. Obsah síry je velmi důležitý a musí být stanovený s velkou přesností.

Hořčík je společným faktorem ve dvou výše popsaných metodách tvorby vermikulárního grafitu a výzkum ukázal, že prvky vzácných zemin mají příznivý vliv na úseku citlivosti, což vede k stálejší mikrostruktuře mezi tenkými a tlustými částmi. Tyto prvky se také dají snadněji kontrolovat než hořčík. [1] [9] [13]

Jako příklad může posloužit předslitina s obchodním označením CompactMag.

Složení této předslitiny je:

- Si 44-48 %
- Mg 5-6 %
- KVZ 5-7 %
- Ca 1,8-2,3 %
- Al do 1 %
- železo zbytek



**Obr. 3.5** Mikrostruktury získané s 0,35 % přísady standardních MgFeSi slitiny (6 % Mg, 1 % RE) a CompactMag slitiny. [1]

Můžeme vidět (**obr. 3.5**), že 5 mm silná stěna se standardní MgFeSi obsahuje převážně kuličky, zatímco 35mm silná část ze stejného odlitku jsou převážně lupínky. Stejný přídavek CompactMag slitiny (0,35 %) vytvoří převážně vermikulární grafit v obou částech, i když je vidět více kuliček v 5 mm silné části. To ukazuje na malé výrobní možnosti metody s hořčíkem. [1]

Tabulka ukazuje porovnání vlastností získaných ve slévárně, která provozovala Mg+Ti metodu a Mg + KVZ (CompactMag slitina).

**Tab. 3.1** srovnání metod [1]

Litina	Litina s lupinkovým grafitem (ISO 100)	Vermikulární litina zhuštěná titanem	Vermikulární litina zhuštěná pomocí CompactMag	Litina s kuličkovým grafitem ISO (400-12)
Mez kluzu (Mpa)	-	290	330	min.250
Pevnost v tahu (MPa)	Min. 100	365	380	min.400
Prodloužení (%)	0,5	4,5	5	min.15

Kromě lepší tažnosti a pevnosti v tahu a kromě nižších nákladů je výhoda také v menším množství strusky na povrchu taveniny jak je vidět na **obr. 3.6**. [1]



**Obr. 3.6** Rozdíl množství strusky s předslitinou MgFeSi a CompactMag [1]

### Složení litiny

Jako u produkce litiny s kuličkovým grafitem je velmi důležitým faktorem příprava základní taveniny.

Mnoho sléváren zbytečně plýtvá litinou a časem, když se pokouší upravit taveninu po modifikaci, i když to mohou provést dříve, než se kov dostane do odlévacího procesu.

Při kontrole železa je nutné sledovat především tyto tři věci:

- C 3,5-3,8 %
- Si 1,5-1,9 %
- S 0,007-0,012 % (preferované)

Všechny ostatní prvky mají menší význam, ale neměly by být podstatně vyšší než jak je tomu u výroby litiny s kuličkovým grafitem.

Po konečném zpracování by mělo konečné složení litiny být v tomto rozsahu: [1]

- C 3,3 – 3,6 %
- Si 2,0 – 2,5 %
- S 0,005 – 0,012 %
- Mg 0,005 – 0,015 %
- Ce 0,005 – 0,015 %

### Obsah síry v základní tavenině:

Obsah síry hraje rozhodující roli v produkci litiny s vermikulárním grafitem. V mnoha případech jsou odlitky přeměněny na vermikulární litinu při výrobě tradiční litiny s lupínkovým grafitem.

Obsah síry v základní tavenině by měl být v rozmezí 0,007-0,015 %. Je sice možné vyrábět kvalitní vermikulární litinu s obsahem síry vyšší jak 0,02 %, ale čím vyšší je obsah síry, tím je těžší proces řídit.

Mnoho sléváren při výrobě litiny s kuličkovým grafitem používají ocelové plechy v lící pánvi ke zpomalení reakce hořčíku.

Výměna ocelových plechů za středně silné očkovadlo (např. foundrysil) poskytuje dostatek dalších nukleací potřebných k minimalizaci nebo odstranění potřeby následného očkování. Zkušenosti ukázaly, že je optimální přídavek 0,3 % hmotnosti.

Toto očkovadlo je vhodnější ke snížení tendence chladnutí formy a k vytvoření vermikulárního grafitu než ocelový šrot.

V některých případech, zejména u silnějších částí odlitků, lze předejít nutnosti očkování. [1]

Výhody metody:

- Větší flexibilita výroby k získání vermikulárního grafitu
- Nižší reaktivita a tím i klidnější reakce v pánvi,
- V některých případech odpadá, nebo se redukuje sekundární očkování (postinokulace),
- Nižší zbytkový obsah Mg a KVZ a tím i nižší sklon k zákalkám,
- Výchozí tavenina může obsahovat vyšší úroveň obsahu síry,
- Menší vývoj strusky
- Odpadá kontaminace vratného materiálu titanem,
- Prodloužen odeznívací účinek (fade time) zpracování
- Při použití FeSi, jako krycího materiálu předslitiny, odpadá sekundární očkování

Existuje několik dalších metod výroby, například:

- Výroba litiny s vermikulárním grafitem přísadou hořčíku s následnou přísadou síry
- Modifikace komplexními slitinami kovu vzácných zemin v různém poměru
- Kombinované způsoby výroby litiny s vermikulárním grafitem
- Výroba litiny s vermikulárním grafitem s vysokým obsahem síry v kuplovně (popsána v kapitole 3.2.1)

## ZÁVĚR

V této práci byla popsána struktura, mechanické vlastnosti a metody výroby litiny s vermikulárním grafitem. Je to materiál s mnoha výhodami a jeho výroba v celém světě roste.

Tento materiál nebyl dlouhou dobu příliš uznávaný, avšak v poslední době se dostává do popředí zájmu konstruktérů. Dlouhou dobu bylo obtížné přesné řízení výroby litiny s vermikulárním grafitem. Byly však již vyvinuty kvalitní metody pro výrobu této litiny. Litina s vermikulárním grafitem je citlivá na tloušťku stěn, proto je nutné volit podmínky zpracování podle typu a tvaru odlitku. Výroba tedy vyžaduje značné zkušenosti a přísné dodržování technologie výroby.

Výroba odlitků z litiny s vermikulárním grafitem může pro slévárnu znamenat zvýšení konkurenceschopnosti, například proti levným odlitkům z „východních zemí“ právě díky složité technologii výroby.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. Ecob, C.; Hartung, C. An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons. [Online] 1-20. [www.elkem.no/dav/db7e4b4b73.pdf](http://www.elkem.no/dav/db7e4b4b73.pdf)
2. Dawson, S. Compacted Graphite Iron – A Material Solution for Modern Diesel Engine Cylinder Blocks and Heads. In *68th WFC - World Foundry Congress*; , Ed.; 2008; pp 93–99.
3. Dawson, S. Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design. [Online] **1999**, 1-22. Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design (accessed May 27, 2011).
4. Imasogie, B.I., Microstructural Features and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron Treated With Calcium-Magnesium Based Masteralloy
5. ROUČKA, J. *Metalurgie litin*. 1st ed. Brno: PC-DIR real, s.r.o, 1998. ISBN 80-214-1263-1.
6. BECHNÝ, J., STRÁNSKÝ, K., VŘEŠTÁL, J. Růstový model kompaktního tvaru grafitu a jeho korelace k reálným systémům grafitických litin. *Slévarenství*, 1985, , no. 5, p. 192–197.
7. Podrabský, T.; Pospíšilová, S. *Struktura a vlastnosti grafitických litin* [online]; 16.11.2006. <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/savgl/index.php> (accessed May 27, 2011).
8. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A. Výroba litiny s červíkovitým grafitem. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské-Technické univerzity Ostrava*, 2009, , no. 1, ročník LII článek č XXXX
9. OTÁHAL Vlastislav, Litina s kompaktním- vermikulárním (červíkovitým grafitem) grafitem CD, I vydání, Brno 2010
10. OTÁHAL Vlastislav, Tvárná litina (litina s kuličkovým grafitem), CD, I vydání, Brno 2010
11. GUESSER, W. L., et al. Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Cylinder Blocks. [online]. 2004 [cited 2011-05-27]. Available from [http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/compacted\\_graphite\\_iron\\_for\\_diesel.pdf](http://www.tupy.com.br/downloads/guesser/compacted_graphite_iron_for_diesel.pdf) .
12. GUESSER, W. L., et al. Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components. [online]. 2001 [cited 2011-05-27].
13. GEDEONOVÁ, Z., JELČ, I. *Metalurgia liatin*. 1st ed. HF-TU, 2000. ISBN 80-7099-516-5.

14. Dawson, S. Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron. In *106th AFS Casting Congress Kansas City*; , Ed.; 2002. –7 Května 2002
15. Elbel, T.; Hampl, J. INFLUENCE OF Al AND Ti ON MICROSTRUCTURE AND QUALITY OF COMPACTED GRAPHITE IRON CASTINGS. [Online] **2009**. [www.vnovak.hr/metalurg/MET\\_48\\_4\\_243\\_247\\_Elbel.pdf](http://www.vnovak.hr/metalurg/MET_48_4_243_247_Elbel.pdf) (accessed May 27, 2011).
16. ROEDTER, H., Litina s kompaktním grafitem- nový litý materiál s uznávanou jakostí, *Slévarenství*, 53, 2005, č9, s. 395-397