



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

MECHANICKÉ VLASTNOSTI LITINY S KULIČKOVÝM GRAFITEM VYROBENÉ METODOU TUNDISH A PROCESEM INITEK

MECHANICAL PROPERTIES OF NODULAR CAST IRON PREPARED BY METHOD TUNDISH
AND PROCESS INITEK

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE:
AUTHOR

Radovan Vítek

VEDOUCÍ PRÁCE:
SUPERVISOR

prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi a výrobou litiny s kuličkovým grafitem. V první části je popsána klasifikace, rozdělení a struktura litiny. Další část je zaměřena na popis litiny s kuličkovým grafitem, modifikaci, očkování a výrobu. Důraz je kladen na výrobu litiny s kuličkovým grafitem pomocí metody Tundish Cover a procesu Initek. V závěru je vyhodnocena struktura materiálu na vzorcích, které byly dodány pro metalografickou analýzu. Výsledné hodnocení struktury materiálu slouží k porovnání mechanických vlastností litiny vyrobené metodou Tundish Cover a procesem Initek.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a properties and production of nodular cast iron. The first section describes the classification, distribution and structure of nodular cast iron. The second part is focuses on the description of nodular cast iron, modification, inoculation and production. A strong effort is made on the production of nodular cast iron using the Tundish Cover method and the Initek process. In conclusion, the structure of the material is evaluated on samples that were delivered for metallographic analysis. The final evaluation of the structure of the material is used to compare the mechanical properties of a nodular cast iron produced by Tundish Cover method and Initek process.

KLÍČOVÁ SLOVA

Litina s kuličkovým grafitem, ADI, ferit, perlit, mikrostruktura, elektrická indukční pec, matrice, Tundish Cover, Initek

KEY WORDS

Nodular cast iron, ADI, ferrite, pearlite, microstructure, electrical induction melting furnace, matrix, Tundish Cover, Initek

Bibliografická citace:

VÍTEK, R. *Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem vyrobené metodou Tundish a procesem Initek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 51 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem vyrobené metodou Tundish a procesem Initek, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **24. 5. 2013**

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Stanislavu Věchetovi, CSc., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc během řešení této bakalářské práce.

Děkuji také pracovníkům firmy Motor Jikov Slévárna a.s., zvláště pak Ing. Ivanu Hotovému za cenné rady, připomínky a odborné konzultace.

Zvláštní poděkování patří rodině a blízkým za toleranci a morální podporu v průběhu studia.

V Brně dne: **24. 5. 2013**

.....
podpis autora

OBSAH

Úvod.....	8
1. Klasifikace litiny.....	10
1.1. Definice litin	10
1.2. Struktura litin	10
1.2.1. Grafit	11
1.2.2. Základní kovová struktura	13
2. Rozdělení a druhy litin.....	16
2.1. Základní rozdělení litin	16
2.2. Druhy litin	17
2.2.1. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)	17
2.2.2. Vermikulární litina – litina s červíkovitým grafitem (LVG).....	19
2.2.3. Temperovaná litina	20
2.2.3.1. Temperovaná litina s bílým lomem	21
2.2.3.2. Temperovaná litina s černým lomem.....	21
2.2.3.3. Temperovaná litina perlitická	22
3. Litina s kuličkovým grafitem (LKG).....	23
3.1. Modifikace LKG.....	24
3.2. Očkování LKG.....	24
3.3. Vliv prvků na strukturu a mechanické vlastnosti LKG.....	24
3.4. Struktura matrice LKG	26
3.4.1. Feritická struktura	26
3.4.2. Perlitická struktura.....	26
3.4.3. Feriticko-perlitická struktura	27
3.5. Odchyšky tvaru grafitu od kuličkového tvaru	27
3.6. Druhy LKG a jejich použití	28
3.7. Izotermicky zušlechťená litina s kuličkovým grafitem	29
3.8. Tavení LKG litiny.....	30
3.8.1. Tavení litin v kuplovnách	30
3.8.2. Tavení v elektrických indukčních pecích	32
3.8.2.1. Kelímková indukční pec	32
3.8.2.2. Kanálková pec.....	33
3.9. Modifikace LKG	34
3.9.1. Metody modifikování LKG	35
3.10. Lící pánve	37
4. Výroba litiny metodou Tundish Cover ve firmě Motor Jikov Slévárna a.s.....	38

5. Výroba litiny procesem Initek ve firmě Motor Jikov Slévárna a.s.	39
6. ITACA – Termická analýza	41
7. Vyhodnocení struktury LKG	43
8. Diskuze k metalografické analýze	46
9. Závěr	47
Seznam použité literatury	48
Seznam použitých zkratk a symbolů	50
Přílohy	52

Úvod

Železo je druhý nejrozšířenější kov na zemi a jeho význam pro lidstvo je znám již od pravěku. Právě objev výroby a využití tohoto prvku byl jedním ze základních kamenů při vzniku současné civilizace. Paradoxem je, že čisté železo nemá téměř žádné praktické využití. Naopak technické železo (slitina železa s uhlíkem, křemíkem a dalšími prvky) je nejdůležitějším konstrukčním materiálem v historii lidstva.

Všechna technická železa obsahují uhlík. Z tohoto důvodu se základní dělení technických želez provádí pomocí obsahu uhlíku. Slitiny s obsahem uhlíku nižším než 2% se nazývají oceli a slitiny s obsahem uhlíku vyšším než 2% se nazývají surová železa nebo litiny. Zvláštní podskupinou litin, jsou tzv. grafitické litiny (litina s kuličkovým grafitem - LKG, litina s lupínkovým grafitem – LLG, litina vermikulární – LVG a temperovaná litina). Grafitické litiny jsou jedním z nejpoužívanějších konstrukčních materiálů a právě grafit má významný vliv na charakteristické vlastnosti těchto litin. Ať už se jedná o nižší měrnou hmotnost (až o 10% ve srovnání s ocelí), dobré kluzné vlastnosti, obrobitelnost a tlumící schopnosti. Grafitické litiny mají také výbornou slévateľnost. To znamená, že se vyznačují dobrou zabíhavitostí materiálu do formy.

V minulosti byla výroba kvalitní litiny velmi obtížná. Zpracování litiny bylo prováděno za špatných podmínek a docházelo k chybám, při kterých nebylo možno využívat plného potenciálu matrice a tvaru grafitu. Teprve po výzkumu, který následoval na začátku 20. století, zažila litina zlatý věk. Začaly se odstraňovat chyby při zpracování, tavení a lití, výroba se stala přesnější a spolehlivější. Po těchto zdokonaleních se začalo plně využívat mechanických vlastností matrice. Litina tak začala konkurovat oceli, která je na výrobu náročnější a dražší, proto došlo k rychlému zavedení litiny do výroby.

Důležitý průlom v oblasti grafitických litin nastal v roce 1948, kdy H. Morrogh a H.J.Williams patentovali výrobu litiny s kuličkovým grafitem. Šlo o výrobu LKG nadeutektického složení pomocí přísady ceru. V následujícím roce 1949 K.D.Millis, A.P.Ganebin a N.P.Pilling přihlašují patent na výrobu LKG pomocí hořčíku. Mezi lety 1951 a 1953 se v České republice uskutečnily zkoušky výroby litiny v tlakových pánvích, patentovaných V. Otáhalem [3].

U litiny s kuličkovým grafitem je díky specifickému tvaru grafitu dosažena velmi dobrá tažnost a lepší pevnostní charakteristika oproti litině s lupínkovým grafitem. Kterou lze navíc vylepšit tepelným zpracováním. Izotermickým žiháním litiny s kuličkovým grafitem navíc dostaneme tzv. ADI litinu (z angl. Austempered Ductile Iron), u které lze dosáhnout vysoké pevnosti v tahu (až 1500 MPa) a zároveň poměrně vysoké houževnatosti [2]. Díky těmto vlastnostem má tato litina všestranné využití v průmyslu, ať už jde o strojní součásti zatěžované staticky nebo dynamicky.

Přestože největší výzkumy LKG proběhly před více než 60 lety, je stále co objevovat a vývoj litiny s kuličkovým grafitem se nezastavil. Tím je míněna převážně ekonomická oblast a její snaha zlevnit výrobu. Variant je celá řada. Například změna technologie tavení, zpracování nebo odlévání, popřípadě nahrazení chemických modifikátorů.

Výroba litiny s kuličkovým grafitem se zvyšuje každým rokem a nahrazuje tak výrobu šedé litiny, temperované litiny a oceli na odlitky (viz tab. 1). I když se podíl litiny s kuličkovým grafitem v ČR zvyšuje, neodpovídá situacím v průmyslově vyspělých státech, kde její podíl dosahuje 20-35% [1].

Cílem bakalářské práce je posoudit strukturu materiálu včetně tvaru grafitu a její dopad na mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem (LKG) vyrobené pomocí dvou různých způsobů zpracování, Tundish Cover a Initek. Jde o zavedení nového, ekonomicky výhodnějšího procesu zpracování LKG do firmy Motor Jikov Slévárna a.s., která také dodala vzorky pro fotografickou analýzu.

Tab. 1: Výroba odlitků ze železných slitin v ČR v letech 2005-2010 [4]

Výroba odlitků ze železných slitin v ČR v letech 2005-2010				
	<i>LLG [%]</i>	<i>LKG [%]</i>	<i>temp. litina [%]</i>	<i>ocel na odlitky [%]</i>
<i>2005</i>	62,2	11,4	1,3	25,2
<i>2006</i>	63,4	11,1	0,8	24,7
<i>2007</i>	62,1	12,4	1,0	24,4
<i>2008</i>	61,0	12,6	2,8	23,6
<i>2009</i>	59,4	17,4	0,8	22,4
<i>2010</i>	57,6	17,3	3,4	21,7

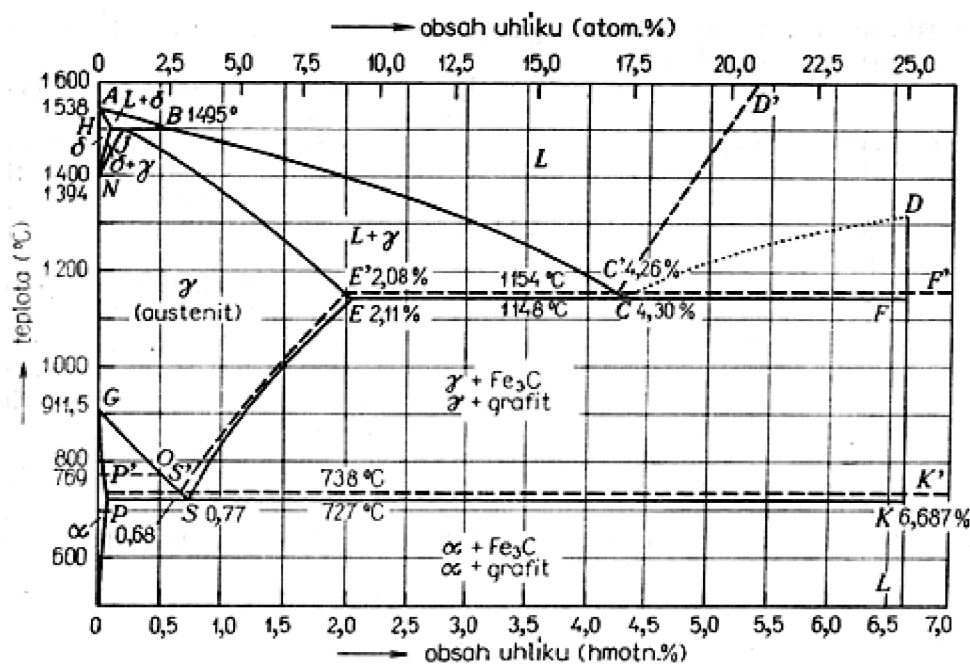
1. Klasifikace litiny

1.1. Definice litin

Litina je slitina železa s uhlíkem a dalšími příměsovými prvky. Uhlík je v litině vyloučen jako grafit nebo karbid železa Fe_3C , popřípadě karbid jiného prvku. Litiny krystalizují podle dvou soustav.

- Stabilní soustava železo-uhlík (Fe-C) - uhlík je zde vyloučen ve formě grafitu.
- Soustava železo-karbid železa Fe- Fe_3C .

Obsah uhlíku v litinách je vyšší než je jeho maximální rozpustnost v austenitu, tedy přibližně více než 2,14% C.



Plně: metastabilní soustava železo-karbid železa.

Čárkovaně: stabilní soustava železo-uhlík.

Obr. 1.1: Rovnovážný diagram Fe-C a Fe- Fe_3C [2]

1.2. Struktura litin

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Pokud tyto litiny tuhnou podle stabilního diagramu Fe-C, nazývají se grafitické litiny a vzniká grafitické eutektikum (grafit a austenit). Výsledné kovové struktury jsou tvořeny perlitem a feritem. Mezi

grafitické litiny patří výše zmíněné litiny (LKG, LLG, LVG a temperovaná litina). Tyto litiny jsou v průmyslu nejpoužívanější.

Pokud litina tuhne podle metastabilního systému Fe-Fe₃C, tak jako eutektikum vzniká ledeburit (austenit a cementit Fe₃C). Tyto litiny se nazývají bílé nebo také karbidické.

Existuje také přechodový typ mezi karbidickými a grafitickými litinami, ten se nazývá maková litina. Zvláštním typem litiny je tzv. temperovaná litina, která tuhne v metastabilním systému, ale po temperování (rozpad cementitu vlivem žhání) se řadí mezi grafitické litiny.

1.2.1. Grafit

Grafit je forma uhlíku krystalizující v šesterečné soustavě. Je měkký, drobný a jeho tvárnost i pevnost je v porovnání s železem nepatrná. Svou malou pevností způsobuje zmenšení nosného průřezu kovové hmoty a snižuje její pevnost. Klasifikace grafitu se hodnotí dle normy ČSN EN ISO 945-1 (vychází ze starší normy ČSN 42 0461), hodnocení se provádí podle etalonů [1].

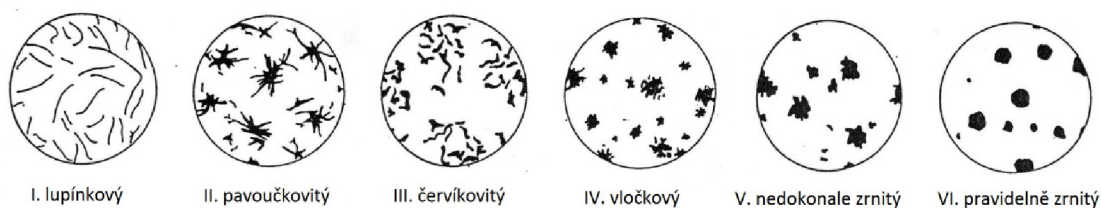
Druhy grafitu

- **Eutektický** (lupínkový, kuličkový, červíkovitý) – vzniká při tuhnutí eutektika. Společně s austenitem vytváří grafitické eutektikum.
- **Primární** – vzniká při tuhnutí nadeutektických grafitických litin. Jeho tvar je lupínkový a při pomalém ochlazení má snahu vyplouvat na hladinu. Toto chování grafitu má nepříznivý dopad na kvalitu litiny.
- **Grafit vznikající při grafitizaci** – rozpad cementitu na grafit a ferit (grafitizační žhání při výrobě temperové litiny).

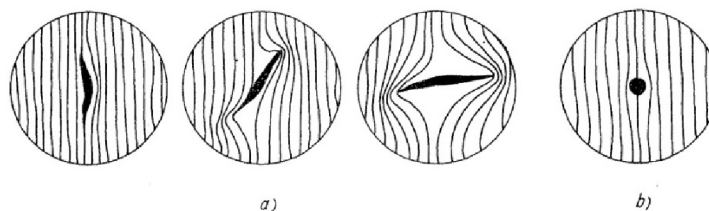
Tvar grafitu

Název je odvozen od tvaru grafitu v materiálu, který je viditelný na metalurgickém výbrusu (tedy podle vzhledu náhodných rovinných řezů grafitických částic). Grafitické částice oslabují strukturu a celistvost kovové hmoty. Ostré hrany grafitu působí na materiál jako koncentrátoři napětí. Platí, že čím ostřejší hrana, tím větší napětí – vrubový účinek.

Tento účinek je nejvyšší u lupínkového grafitu (obr. 1.3a), naopak nejpříznivější vliv má grafit kuličkový (obr. 1.3b) [5].



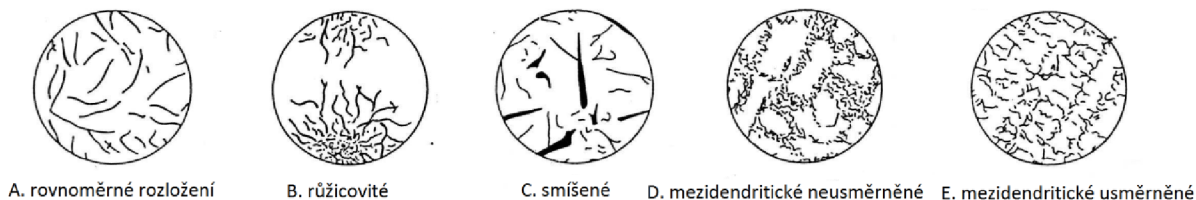
Obr. 1.2: Etalony tvaru grafitu [5]



Obr. 1.3: Napjatost v litině vlivem různého tvaru grafitu a jeho polohy [17]

Rozložení grafitu

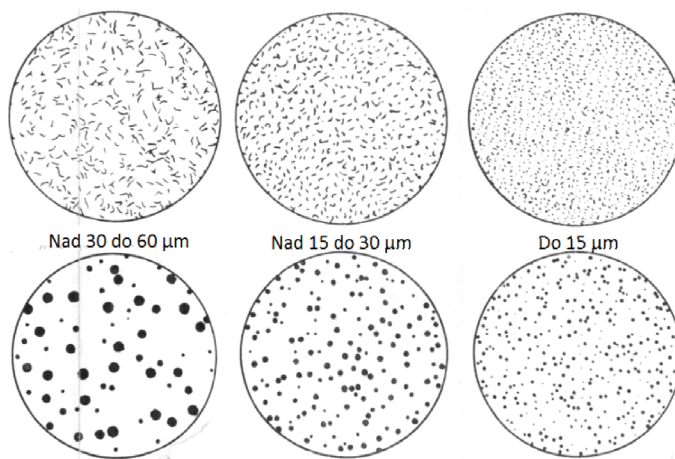
Optimální rozložení grafitu z hlediska mechanických vlastností je rovnoměrné se stejnoměrnou velikostí (obr. 1.4A). Jiné rozložení (obr. 1.4B,C) způsobuje hromadění grafitu a vznik grafitových útvarů, které mají nepříznivý dopad na mechanické vlastnosti. Mezidendritické rozložení grafitu, zachycené na obr. 1.4D a obr. 1.4E, je nazýváno jako přechlazený grafit (vlivem nedostatku krystalizačních zárodků).



Obr. 1.4: Etalony rozložení grafitu [5]

Velikost grafitu:

Pro mechanické vlastnosti materiálu platí, že čím jemnější grafit, tím výhodnější vlastnosti materiálu.



Obr. 1.5: Etalony velikosti grafitu [5]

1.2.2. Základní kovová struktura

Ferit

Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe (Fe_α) s prostorově středěnou mřížkou. Vznik feritu podporuje pomalé ochlazování. Ferit je měkký, tvárný a dobře obrobitelný. U litin charakterizuje houževnatost. Na vlastnosti feritu mají vliv různé legovací prvky. Všechny přísady zvyšují tvrdost a pevnost feritu, přísady jako Ni, Cr a Mn zvyšují také houževnatost. Příklad Si ji naopak snižuje [2].

Cementit (karbid železa Fe_3C)

Intermediální fáze s obsahem 6,687% C. Jeho typickými vlastnostmi jsou křehkost a tvrdost (kolem 800 HB), které výrazně ovlivňují vlastnosti litiny. Karbid železa je metastabilní a za vhodných podmínek (např. žhání, temperování) se rozpadá - grafitizace.

Grafitizace: $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ (grafit) (1)

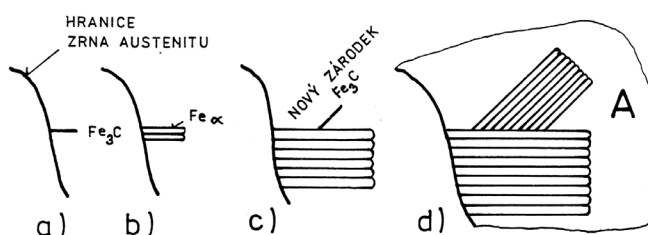
Druhy cementitu v litinách: *primární* – v nadeutektických bílých litinách ve tvaru jehlic,
eutektický – součást metastabilního eutektika – ledeburitu,
perlitický – součást eutektoidu – perlitu.

Perlit

Směs feritu a perlitického cementitu, vznikající při stálé teplotě (eutektoidní teplotě) a eutektoidní koncentraci C. Rozpadá se podle metastabilního systému. Cementit dává perlitu charakteristickou vyšší pevnost a tvrdost, než kterou má ferit. Perlit ve velké míře ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny [1].

Lamelární perlit – směs destiček (lamel) feritu a cementitu střídavě se vylučující z austenitu (obr. 1.6).

Globulární perlit – směs zrn cementitu ve feritické hmotě (destičky cementitu se za určitých podmínek sbalují), výhodou této struktury je lepší obrobitelnost materiálu.



Obr. 1.6: Vznik lamelárního perlitu [1]

Martenzit

Přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α , vzniká bezdifúzním rozpadem austenitu při kalení nelegovaných nebo legovaných litin. U legovaných litin někdy může vzniknout i přímo v litém stavu. Tyto litiny se většinou nepoužívají. Vyznačují se vysokou tvrdostí (až nad 1000HV) a značnou křehkostí.

Austenit

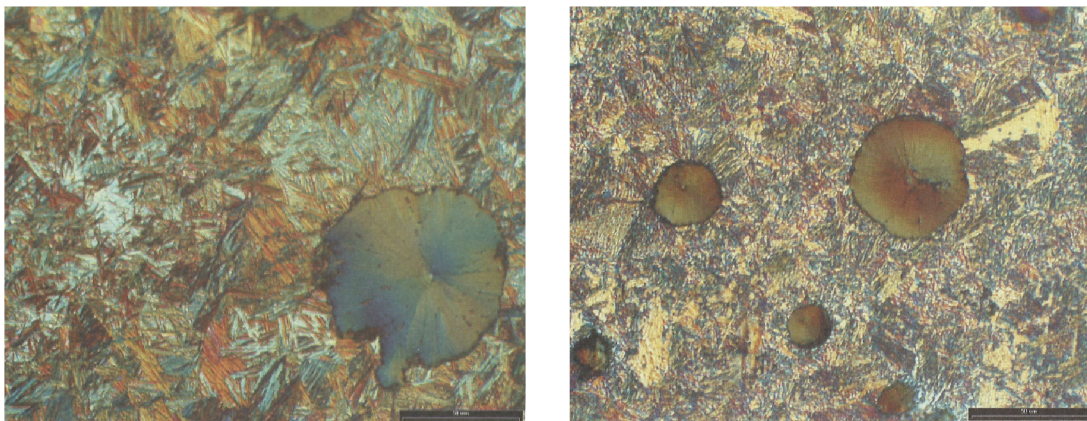
Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe (Fe_γ) s plošně středěnou mřížkou. Rozpouští nejvíce 2,14 % C (při teplotě 1147°C). V nelegovaných litinách je stabilní pouze při nadeutektoidních teplotách. V odlitcích se vyskytuje jen u legovaných litin a jako zbytkový austenit po tepelném zpracování. Je měkký, tvárný a vysoce odolný proti působení koroze a vysokých teplot. Je paramagnetický. Austenitické litiny se používají u legovaných korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí [2].

Bainit

Směs feritu a cementitu. Od perlitu se liší mikrostrukturou a kinetikou tvorby. Vyznačuje se jehlicovitou strukturou, která závisí na teplotě. Tyto litiny mají vysokou pevnost a tvrdost při zachování určité tažnosti [17].

Horní bainit: vzniká nad teplotami 350°C, strukturu tvoří svazky hrubších jehlic bainitického feritu (více přesycen uhlíkem), kde jsou na povrchu jehlic vyloučeny podélně uspořádané částice cementitu.

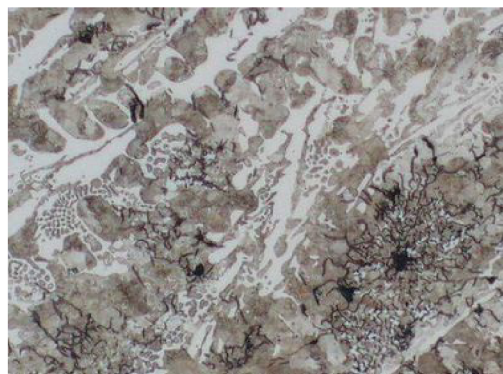
Dolní bainit: vzniká mezi teplotami 350°C a M_s , je tvořen tenkými deskami bainitického cementitu, rostoucími převážně od hranic zrn.



Obr. 1.7: Mikrostruktury: a) dolní bainit; b) horní bainit [8]

Ledeburit

Směs austenitu a cementitu, která se při eutektoidní teplotě mění na transformovaný ledeburit (austenit se přemění na perlit). Ledeburit je velmi křehký a tvoří bílé, lesklé a velmi tvrdé krystalky. Ledeburit je základní složkou bílých litin.



Obr. 1.8: Mikrostruktura obsahující ledeburit [6]

Steadit:

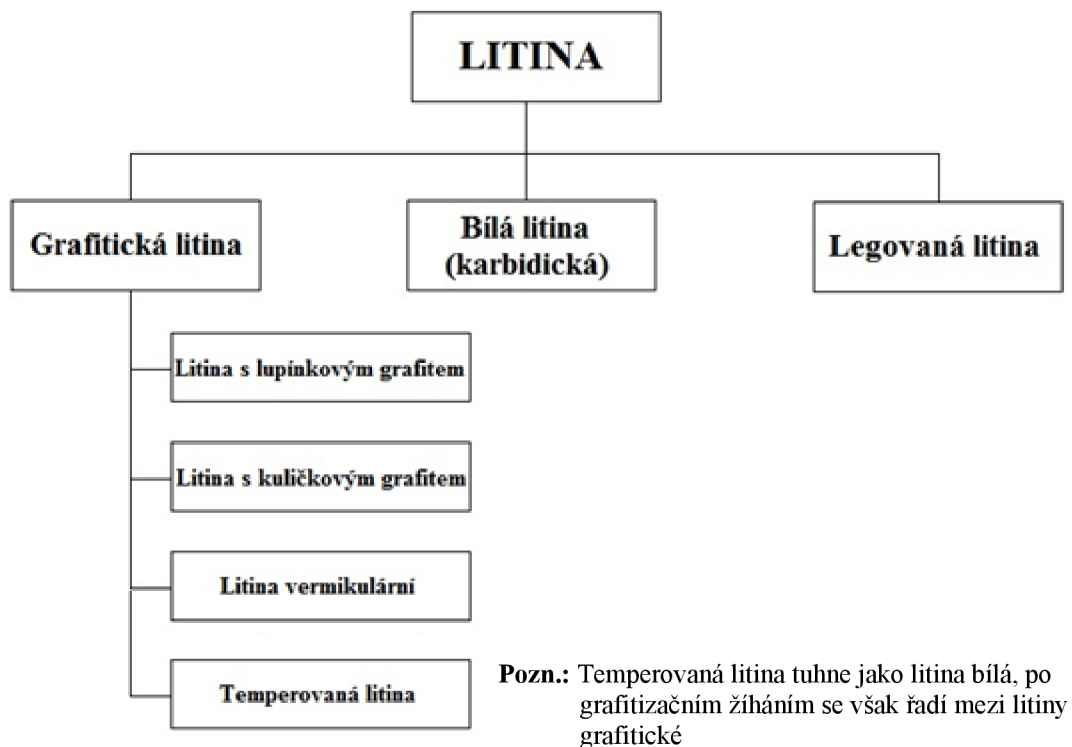
Fosfidické eutektikum Fe-Fe₃C-Fe₃P (steadit), vzniká kvůli malé rozpustnosti fosforu v železe. Zvyšuje zabíhavost materiálu, je tvrdý a velmi křehký. Jeho výskyt je typický pro litinu s lupínkovým grafitem, naopak u litiny s kuličkovým grafitem je nežádoucí.



Obr. 1.9: Mikrostruktura obsahující steadit

2. Rozdělení a druhy litin

2.1. Základní rozdělení litin



Obr. 2.1: Základní rozdělení litin [2]

Grafitická litina

Je tvořena základní kovovou maticí, v níž je přítomen grafit. Matrice i grafit mají největší vliv na vlastnosti litiny. Dopad na tyto vlastnosti je zmíněn výše. Tyto litiny mají šedý lom a jsou nejpoužívanější. Obsah uhlíku a křemíku: 2,5 – 3,8 % C,
0,8 – 3,5 % Si.

Bílá litina

Někdy také karbidická litina. Struktura je tvořena ledeburitem. Uhlík je vyloučen jako vázaná forma - cementit. Matrice i cementit určují výsledné vlastnosti litiny. Lom je bílý. Vliv cementitu je dán velkou tvrdostí, křehkostí a špatnou obrobiteľností materiálu, která je možná pouze broušením. Její hlavní význam spočívá v použití pro tepelné zpracování na litinu temperovanou. Obsah uhlíku a křemíku: 2,4 - 4,5 % C,
0,3 – 1,6 % Si.

Legovaná litina

Tato litina obsahuje legující prvky, zejména Cr, Al, Ni. Podle legujících prvků se mění i barva lomu. Ta může být šedá až bílá. Obsah uhlíku: 2,0 – 4,0 % C.

2.2. Druhy litin

2.2.1. Litina s lupínkovým grafitem (LLG)

Tato litina byla dříve označována jako šedá litina. Krystalizuje podle diagramu Fe-C-Si. Chemické složení litiny s lupínkovým grafitem se nejčastěji pohybuje v koncentracích uvedených v tab. 2.1.

Tab. 2.1: Chemické složení LLG [9]

C	Si	Mn	P	S
%	%	%	%	%
2,5 - 3,5	< 3,5	0,4 - 0,8	0,2 - 1,2	0,08 - 0,12

Litina s lupínkovým grafitem je složena z kovové matrice a grafitu. Kovová matrice je tvořena feritem a perlitem. Feritická i perlitická matrice se může vyskytovat i samostatně, ale nejčastější struktura u LLG je složena z obou těchto fází.

Vlastnosti LLG závisí na tvaru a velikosti grafitu. Čím je menší poloměr zakřivení lupínků a čím je lupínek delší, tím více rostou koncentrace napětí v materiálu. V určitých místech můžou dosáhnout 10 – 20 násobku normálových napětí. Některé části matrice jsou lupínky dokonale odděleny a nemohou přenášet napětí. Lupínkový tvar grafitu má nepříznivé účinky na pevnost v tahu materiálu. Naopak pevnost v tlaku je 3 až 4 krát vyšší než v tahu, a proto se litina s lupínkovým grafitem používá spíše pro konstrukční součásti namáhané tlakem. Také pevnost v ohybu je 1,5 až 2 krát vyšší než v tahu. Platí, že čím jemnější lupínky, tím vyšší je pevnost materiálu. Lupínkový tvar grafitu má skvělou vlastnost tlumit materiál, a také podstatně snižuje vrubovou citlivost materiálu.

Složení litiny posuzujeme podle chemického složení. To určuje tzv. stupeň eutektičnosti:

$$S_c = \frac{C \%}{4,3 - 0,312 \% Si - 0,275 \% P} \quad (2)$$

přičemž nadeutektické litiny mají $S_c > 1$, eutektické = 1 a podeutektické < 1 [2].

LLG se nejčastěji odlévá jako podeutektická. Ve srovnání s ocelí je výhodou této litiny lepší tepelná vodivost. Významná je také tím, že má tuto vlastnost z grafitických litin nejvyšší. V průmyslu se tato litina používá na výrobu součástí strojů, poklopů, armatur, stojanů obráběcích strojů, těles čerpadel, řemenic.

Tab. 2.2: Přehled mechanických vlastností LLG [9]

Mechanické vlastnosti LLG		Pevnost v tahu R_m	Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$	Tažnost A	Max. tvrdost
Označení litiny	Základní struktura	[MPa]	[MPa]	%	HB
EN-GJL-150	ferit/perlit	150 ÷ 250	98 ÷ 165	0,8 ÷ 0,3	170
EN-GJL-200	perlit	200 ÷ 300	130 ÷ 195	0,8 ÷ 0,3	220
EN-GJL-250	perlit	250 ÷ 350	165 ÷ 228	0,8 ÷ 0,3	240
EN-GJL-300	perlit	300 ÷ 400	195 ÷ 260	0,8 ÷ 0,3	260
EN-GJL-350	perlit	350 ÷ 450	228 ÷ 285	0,8 ÷ 0,3	270



Obr. 2.2: Mikrostruktury LLG:

a) feritická matrice; b) feriticko-perlitická matrice; c) perlitická matrice [6]



Obr. 2.3: Výrobky z LLG [10]

2.2.2. Vermikulární litina – litina s červíkovitým grafitem (LVG)

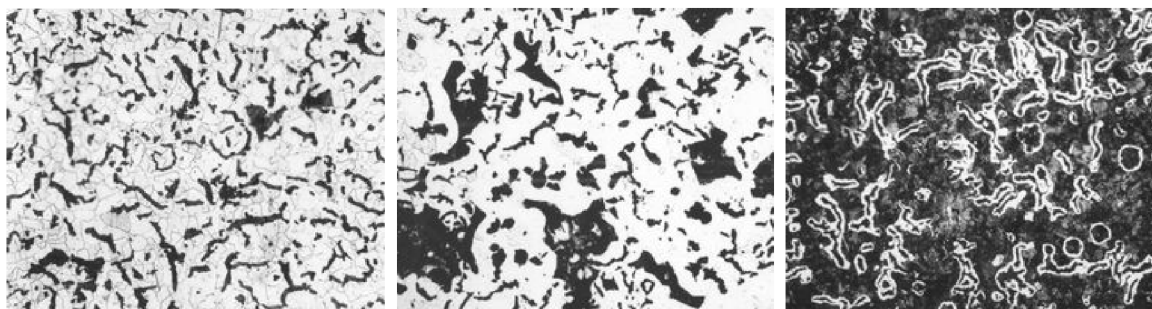
Matrici má feritickou, perlitickou či kombinaci obou složek. Grafit se zde vyskytuje ve tvaru červíkovitém, případně nedokonale zrnitém a kuličkovém (max. 20% z celkového vyloučeného objemu grafitu).

Červíkovitý grafit je morfologická varianta grafitu, která se nachází mezi kuličkovým a lupínkovým grafitem. Buď může vzniknout jako nežádoucí struktura litiny, nebo jej lze vyrábět záměrně. Vzniká při nedostatečné modifikaci nebo při poměrně vysokém obsahu síry v litině. Mechanické vlastnosti litiny se pohybují mezi vlastnostmi litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem.

Používají se například tehdy, když se u litiny požaduje lepší slévatelnost u složitějších odlitků, ale s lepšími mechanickými vlastnostmi než má litina s lupínkovým grafitem. Tato litina se může použít i pro dynamicky namáhané odlitky. Uplatnění v automobilovém průmyslu (hlavy a bloky válců).

Tab. 2.3: Přehled mechanických vlastností LVG [9]

Mechanické vlastnosti LVG		Pevnost v tahu R_m	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	Tažnost A
Označení litiny	Základní struktura	[MPa]	[MPa]	%
GJV-300	ferit	300	240	1,5
GJV-400	ferit/perlit	400	300	1
GJV-500	perlit	500	340	0,5



Obr. 2.4: Mikrostruktury LVG:

a) feritická matrice; b) feriticko-perlitická matrice; c) perlitická matrice [6]



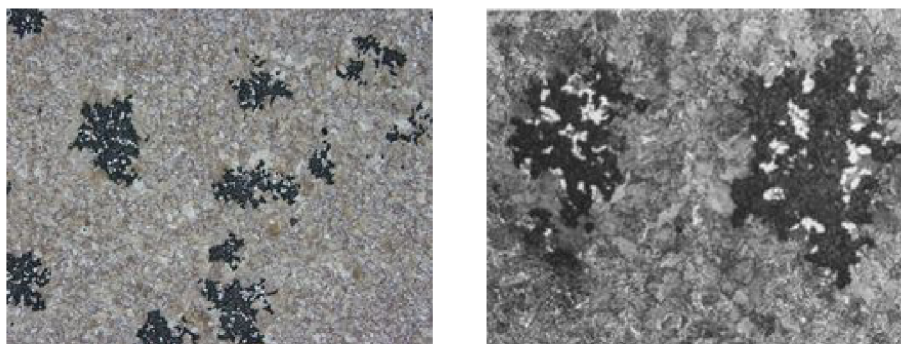
Obr. 2.5: Výrobek z vermikulární litiny [11]

2.2.3. Temperovaná litina

Jde o houževnatý a snadno obrobiteľný materiál. Mechanické a technologické vlastnosti tohoto materiálu tvoří přechod mezi ocelí na odlitky a šedou litinou [16]. Tento materiál se vyrábí tepelným zpracováním bílé litiny – temperováním v temperovacích pecích. Při tomto procesu dochází k rozpadu cementitu a soustava metastabilní se mění na soustavu stabilní. Po tomto procesu jsou odlitky měkčí a částečně tvárnější. Zvýší se také odolnost proti korozi.

2.2.3.1. *Temperovaná litina s bílým lomem*

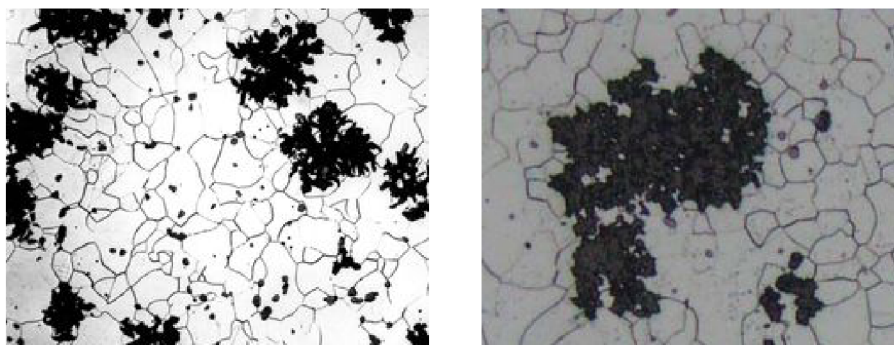
Odlitky se temperují při teplotách okolo 1000°C v mírně oxidačním prostředí, čímž proběhne na povrchu oduhličení. Hloubka oduhličení závisí na době temperování. Výsledkem je litina úplně oduhličená (použití u tenkostěnných odlitků - tloušťka stěny max. 6 mm), nebo je oduhličený pouze feritický povrch (uvnitř zachována perlitická strukturou s vločkami temperovaného grafitu). Druhý typ se používá pro usnadnění povrchové úpravy, například povrchové zinkování nebo cínování. Tato litina je velmi nákladná na výrobu, protože vyžaduje velké množství energie. Z tohoto důvodu není tento materiál moc rozšířený. Přesto se používá při výrobě vozových náprav, kompresorů nebo pák převodovek [9].



Obr. 2.6: Mikrostruktura temperované litiny s bílým lomem [6]

2.2.3.2. *Temperovaná litina s černým lomem*

Tato litina má čistě feritickou nebo perlitickou strukturu s vločkami temperovaného grafitu. Černý lom vzniká rozmazáním grafitu po ploše lomu. Temperuje se v neutrálním prostředí. Pro vytvoření litiny s feritickou maticí musí proběhnout dva stupně grafitizace. V prvním stupni grafitizace, probíhající v teplotách okolo 950°C se úplně rozpadne ledeburitický a sekundární cementit na austenit a temperovaný uhlík (vločkový tvar), poté se chladí na teplotu druhého stupně grafitizace. Po výdrži na tomto teplotním stupni dojde k rozpadu perlitického cementitu na ferit a temperový uhlík. Temperovaná litina s černým lomem je velmi houževnatý materiál, který se hodí na dynamicky zatížené součásti, jenž jsou vystaveny otěru [9].



Obr. 2.7: Mikrostruktury temperované litiny s černým lomem [6]

2.2.3.3. *Temperovaná litina perlitická*

Je tvořena jemným zrnitým perlitem a temperovaným grafitem. Je velmi pevná a odolná proti otěru. Vyrábí se v moderních temperovacích pecích. Používá se například na klikové hřídele a bubnové brzdy.

Tab. 2.3: Přehled mechanických vlastností temperovaných litin [2,9]

Mechanické vlastnosti		Pevnost v tahu R_m	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	Tažnost A	Max. tvrdost
Charakteristika	Základní struktura	[MPa]	[MPa]	%	HV
S černým lomem	ferit/perlit/vločkový grafit	300 ÷ 800	170 ÷ 600	2 ÷ 20	100 ÷ 220
S bílým lomem	perlit/ temperový uhlík	350 ÷ 550	180 ÷ 400	4 ÷ 5	220
Perlitická	perlit/ temperový grafit	450 ÷ 550	270 ÷ 340	4 ÷ 6	204 ÷ 232



Obr. 2.8: Výrobek z temperované litiny [12]

3. Litina s kuličkovým grafitem (LKG)

Tato litina byla dříve označována jako tvárná litina. Krystalizuje podobně jako litina s lupínkovým grafitem podle diagramu Fe-C-Si. Strukturu litiny tvoří kovová matrice (feritická, perlitická nebo feriticko-perlitická) a grafit.

Chemické složení viz tab. 3.1.

Tab. 3.1: Chemické složení LKG

C	Si	Mn	P	S	Mg
%	%	%	%	%	%
3,2 - 4,3	1,5 - 4	0,15 - 0,8	< 0,1	< 0,02	0,04 - 0,08

Grafit je ve struktuře vyloučen ve formě kuliček. Tyto kuličky jsou ve skutečnosti složité polykrystaly, které se skládají z paprskovitě uspořádaných pyramidálních krystalů a kuželovitých spirál. Výrazný vliv na tvorbu kuliček nebo lupínků mají doprovodné prvky, zejména křemík a kyslík.

Kuličkový tvar grafitu v litině má přímý vliv na mechanické vlastnosti odlitku, které jsou lepší než u litiny s lupínkovým grafitem, protože nezpůsobují vysoké koncentrátoři napětí. Nežádoucí složkou matrice, která negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti litiny, jsou karbidické fáze (ledeburit a sekundární cementit). Proto se musí zabezpečit vysoká grafitizační schopnost taveniny. Tato schopnost se zabezpečí zvolením stupně eutektičnosti s přibližně eutektickým složením ($S_c = 0,98$ až $1,05$) nebo stanovením uhlíkového ekvivalentu CE v rozmezí $CE = 4,2$ až $4,4\%$ [9].

$$\text{Ekvivalent uhlíku (CE)} = \%C + 1/3 (\%Si + \%P) \quad (3)$$

kde: $CE < 4,23 \Rightarrow$ litina podeutektická,

$CE = 4,23 \Rightarrow$ litina eutektická,

$CE > 4,23 \Rightarrow$ litina nadeutektická.

Ekvivalent uhlíku vychází ze zkoumání vzájemného vlivu křemíku a uhlíku v tavenině [4].

3.1. Modifikace LKG

Kuličkový tvar grafitu v litině vzniká díky tzv. nodulačním přísadám (Mg, Ce, atd.). Přidáním těchto přísad se dosahuje tzv. modifikování (blíže v kapitole 3.9.). To způsobí přechlazení taveniny a umožní sbalení grafitu do tvaru kuliček. Při vyšších rychlostech chlazení nebo při větším množství přísad se však teplota eutektické přeměny přibližuje k teplotě, při níž krystalizuje litina bílá. Hrozí tedy krystalizace v cementitové soustavě => tvorba ledeburitu. K zabránění v krystalizaci ledeburitu se používají očkovadla s grafitotvornými přísadami.

Modifikační účinek v litině je časově omezený. Doznívá vlivem sloučení hořčíku s doprovodnými látkami, nejčastěji jde o ztrátu vlivem oxidace nebo sloučení se sírou. Zeslabení a případné ukončení modifikace grafitu vede k pseudolamelárním změnám a způsobuje, že po překročení teploty solidu krystalizuje tvárná litina obdobně jako litina šedá. (U obvyklé lici pánve je rychlost doznívání modifikátoru 0,001% Mg za minutu) [9].

3.2. Očkování LKG

Očkovadla jsou nejčastěji složena z 45÷75% Si a určitého obsahu Ca a Al. Zajímavé je, že čisté slitiny Si nejsou jako očkovadla účinné a z tohoto důvodu se nepoužívají. Dalšími doprovodnými prvky v očkovadlech jsou Ba, C, Mn, Zr. Tyto prvky se používají ke zvýšení rozpustnosti nebo účinnosti očkovadla [9].

Zjednodušeně lze říci, že se používají 3 metody očkování:

- do pánve,
- do proudu kovu,
- do formy.

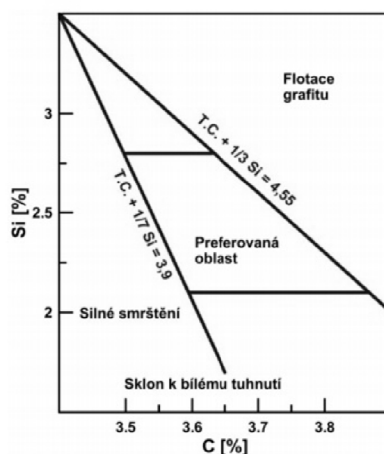
Tyto metody se v praxi mohou doplňovat.

3.3. Vliv prvků na strukturu a mechanické vlastnosti LKG

Přísadové prvky mohou mít různý vliv na strukturu nebo mechanické vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem. Níže je uvedeno několik prvků, které mají na výslednou kvalitu litiny silný dopad a se kterými musíme při její výrobě počítat.

Křemík

Křemík je společně s uhlíkem nejvýznamnějším prvkem v litinách. Tento prvek má příznivý vliv na tvorbu grafitických zrn a potlačuje vznik karbidů. U samotné struktury LKG zvyšuje pevnost a tvrdost feritu, snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Důležitou vlastností křemíku je jeho vzájemný účinek s uhlíkem v závislosti na vlastnostech litiny. Tento účinek je uveden v tzv. Hendersonově diagramu.



Obr. 3.1: Hendersonův diagram [14]

Mangan

Zjednodušeně můžeme říct, že mangan působí opačně než křemík. Tento prvek brání rozpadu austenitu, zabraňuje grafitizaci, usnadňuje rozpustnost uhlíku, dále stabilizuje a zjemňuje perlit, zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost litiny proti otěru. U LKG má mangan téměř o 2/3 vyšší účinnost než u šedé litiny. To je způsobeno tím, že LKG obsahuje jen nepatrné množství síry a mangan se tak nespotřebuje na vytvoření vazby MnS.

Fosfor

Fosfor mírně podporuje grafitizaci, stabilizuje a zjemňuje perlit, zvyšuje tvrdost. Při obsahu nad 0,08% zvyšuje transiční teplotu. Při této koncentraci fosforu se na hranicích zrn vytváří křehké fosfidické síťoví (eutektikum), nazývaní se steadit. To se vlivem své nízké teploty tuhnutí vylučuje až v poslední fázi tuhnutí a výrazně snižuje houževnatost litiny.

Síra

V litinách jde o nežádoucí prvek (max. 0,02%). Spolu s jinými očukujícími prvky tvoří velmi stabilní sulfidy, které zabraňují grafitizaci a způsobují křehkost litiny.

Měď

Jde o prvek podporující grafitizaci (10x slabší než Si) a vznik stabilního perlitu. Snižuje lomovou houževnatost materiálu. Přidává se v množství do 2%, poté se přestává rozpouštět a může mít vliv na degradaci grafitu.

Cín

Tento prvek se přidává do litiny, pokud chceme dosáhnout čistě perlitické struktury bez feritických dvorců kolem grafitových zrn (stačí 0,1% Sn). Do obsahu 0,15% nepodporuje vznik karbidů. U feritické struktury je jeho obsah kolem 0,01%. Cín se hromadí na povrchu grafitových zrn, čímž zabraňuje difuzi uhlíku a tvorbě feritu. Tato vlastnost by mohla mít vliv na dokonalejší kulovou strukturu grafitu [4].

3.4. Struktura matrice LKG

Z výše uvedených údajů zjišťujeme, že různé prvky mají různé vlivy na strukturu a vlastnosti litiny. Po použití vhodných prvků a jejich kombinací tedy můžeme tyto vlastnosti řídit a vytvořit tak pro nás vhodnou strukturu matrice. Specifickým obsahem jednotlivých prvků můžeme dosáhnout čistě feritické struktury, čistě perlitické struktury nebo kombinaci těchto dvou struktur o různém poměru složek. Ve speciálních případech můžeme získat i strukturu martenzitickou nebo austenitickou, tyto struktury se však vyrábějí jen ojediněle.

3.4.1. Feritická struktura

Feritickou strukturu matrice můžeme v litině získat pomocí zvýšení obsahu křemíku nebo následnou tepelnou úpravou (feritizačním žiháním). Křemík v této struktuře způsobuje vyšší pevnost a tvrdost než má litina po úpravě žiháním. Pro dosažení maximální tažnosti a tvárnosti feritické matrice musí litina obsahovat co nejméně Mn, P a Si.

3.4.2. Perlitická struktura

Perlitická struktura se vylučuje při rychlém chladnutí litiny o jejím specifickém chemickém složení. Této struktury můžeme dosáhnout přidáním mědi a cínu, které brzdí feritizaci [4].

3.4.3. Feriticko-perlitická struktura

Jde o nejpoužívanější strukturu u litiny s kuličkovým grafitem. Této struktury dosáhneme změnou chemického složení, případně změnou rychlosti ochlazování litiny. Mechanické vlastnosti této litiny závisí na poměru složek perlitu a feritu v konkrétní litině.



Obr. 3.2: Mikrostruktury LKG:

a) feritická matrice; b) feriticko-perlitická matrice; c) perlitická matrice [6]

3.5. Odchytky tvaru grafitu od kuličkového tvaru

- *Červíkovitý grafit* – vyskytuje se při nedostatečné modifikaci litiny.
- *Rozpadnutý (explodovaný grafit)* – vyskytuje se u nadeutektických litin, kde $CE > 4,5\%$ nebo při pomalém ochlazování, kdy dochází k flotaci a roztříštění grafitu.
- *Lupínkový grafit* - vzniká na určitých místech v tavenině, kde jsou ve vysoké koncentraci obsaženy prvky podporující vyloučení lupínkového grafitu.
- „*Chunky grafit*“ – tvoří se uvnitř buněk, kdy na buněčných hranicích vytváří zformované kuličky. Tuto vlastnost podporují prvky jako Ce, Ca, Si a Ni [9].

3.6. Druhy LKG a jejich použití

Podle ČSN EN 1563 řadíme LKG podle použití do tří skupin.

První skupina:

- EN-GJS-350-22,
- EN-GJS-400-18(15).

Vhodné pro mechanicky i dynamicky namáhané součásti. Používají se na výrobu skříní pro kompresory, armatury, ložiskové skříně nebo jiné dynamicky namáhané součásti.

Druhá skupina:

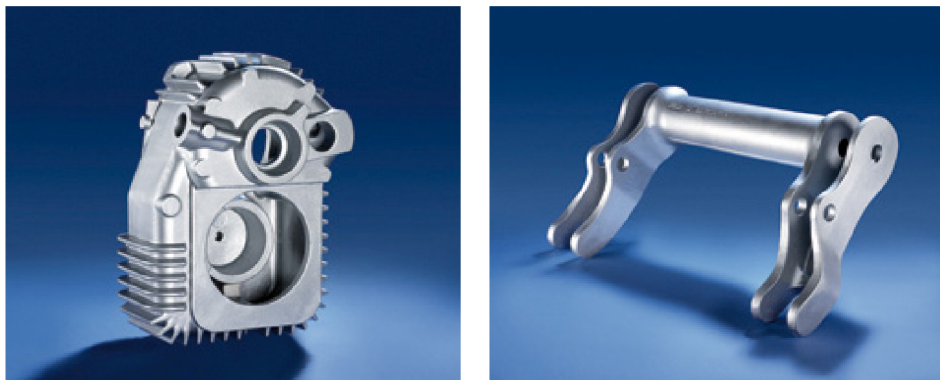
- EN-GJS-500-7,
- EN-GJS-600-3.

Tyto litiny jsou vhodné na výrobu součástek namáhaných dynamicky, které mohou pracovat i za nízkých teplot. Vyrábějí se z nich kluzné lišty, skříně převodovek, vačkové hřídele, ozubená kola a další.

Třetí skupina:

- EN-GJS-700-2,
- EN-GJS-800-2,
- EN-GJS-900-2.

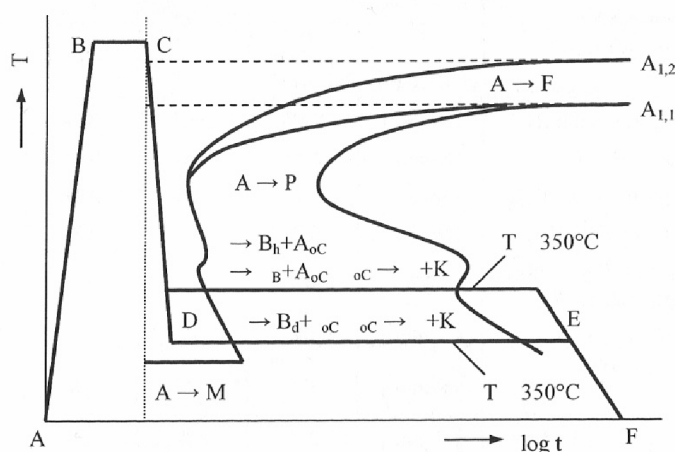
Označují se jako vysokopevnostní litiny. Jsou odolné proti otěru a vhodné pro mechanicky i dynamicky namáhané součásti. Používají se na výrobu vačkových a klikových hřídelí, oběžných kol čerpadel, bubnových brzd a dalších dynamicky namáhaných součástí [9,18].



Obr. 3.3: Výrobky z LKG [10]

3.7. Izotermicky zušlechtěná litina s kuličkovým grafitem

ADI litina (Austempered Ductile Iron). Jde o izotermicky zušlechtěnou litinu s kuličkovým grafitem a s bainitickou maticí. Materiál se zahřeje na 900°- 950°C, poté následuje výdrž na této teplotě, při níž dojde k austenitizaci (viz obr. 3.4). Doba setrvání na této teplotě je závislá na materiálu (chemickém složení) a tloušťce stěn odlitku. Ohřev litiny se provádí v plynových nebo elektrických obloukových pecích s inertní atmosférou. Po úplné austenitizaci následuje prudké ochlazení na požadovanou teplotu izotermického rozpadu austenitu a následnému setrvání na teplotě (230 – 420°C). V tomto rozmezí teplot dojde k protnutí tzv. bainitického nosu. Výdrž na teplotě je uskutečněna vložením součásti do solné lázně o dané teplotě. Při teplotě okolo 400°C vzniká tzv. horní bainit a při teplotách okolo 300°C tzv. dolní bainit. Čím je teplota vyšší, tím je struktura měkčí (je dosaženo nižší pevnosti a vyšší tažnosti) [7].



Obr. 3.4: Schéma průběhu izotermického zušlechtění ADI litiny v diagramu ARA [8]

ADI litina se používá tam, kde chceme využít jejich výhodných mechanických vlastností. Například vysoké houževnatosti při zachování dobré tažnosti a současně vysoké otěruvzdornosti, tvrdosti a pevnosti v tahu. Těchto vlastností se však dosahuje na úkor obrobiteľnosti materiálu.

ADI litina má uplatnění v automobilovém průmyslu a strojírenském průmyslu. Typickými výrobky z ADI litiny jsou ozubená kola, klikové hřídele, motorové vložky, lisovací nástroje a další [9].



Obr. 3.5: Výrobky z ADI litiny [13].

3.8. Tavení LKG litiny

U výroby LKG litiny je velký důraz kladen na vsázku, která se skládá ze surového železa, vlastního vratu (o blízkém chemickém složení), ocelového odpadu (paket), nahličovadla a legur. Ve většině sléváren se taví v kuplovnách nebo v elektrických indukčních pecích (EIP). Z ekonomického hlediska je nejvýhodnější kuplovna, která je v praxi nejvíce využívána pro tavení LLG. Její nevýhodou při výrobě LKG je však obtížné dodržení chemického složení taveniny. Kuplovny se také potýkají s problémem dodržení exhalačních limitů. Tyto nedostatky odstraňuje EIP, která má dražší pořizovací a provozní náklady. Při tavení LKG však dokáže přesněji dodržet chemické složení [15].

3.8.1. Tavení litin v kuplovnách

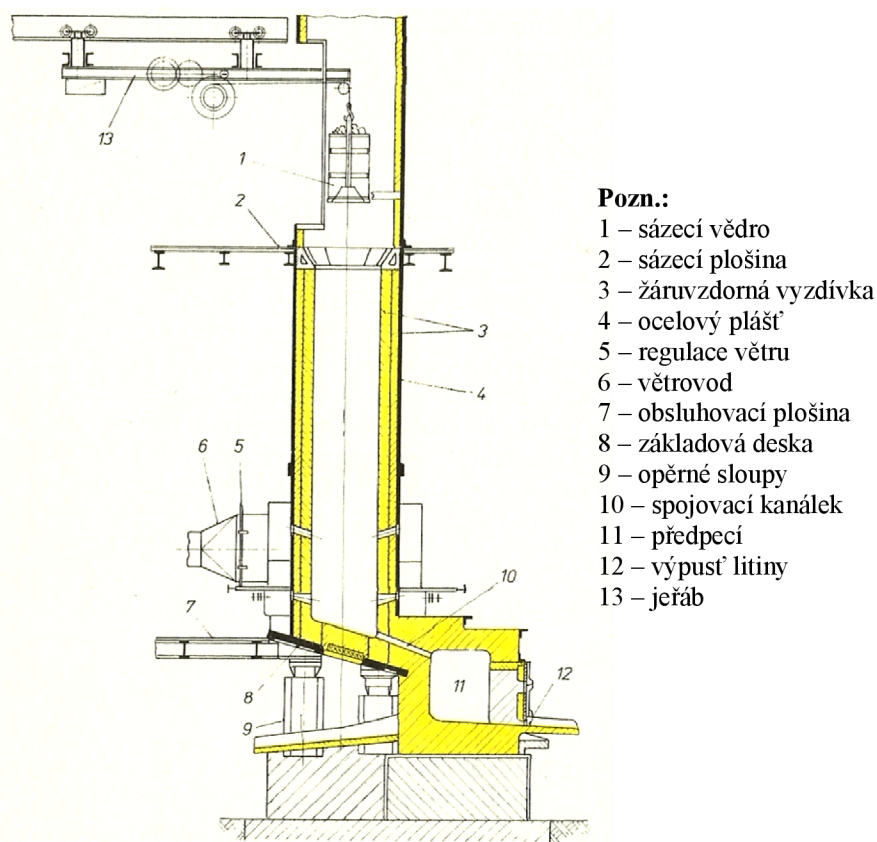
Kuplovna je šachtovitá pec se žáruvzdornou vyzdívkou. Vsázka je zde tavena teplem vznikajícím pomocí spalovaného koksu ve spodní části pece, tzv. nístěji. Vzduch, jenž urychluje a napomáhá spalování, je do nístěje vháněn pomocí dmyšen. Veškerá vsázka včetně legujících prvků, koksu a struskotvorných činidel je do kuplovny vsypána sázecím otvorem v horní části šachty. Vznikající roztavený kov protéká přes koks a shromažďuje se ve spodní části nístěje. Nečistoty kovu se zachycují struskotvornými látkami ve strusce, která díky nižší hustotě plave na povrchu kovu. Jakmile kov dosáhne stanovené hladiny, otevře se odpichový otvor a litina se vylije do pánve. Poté se otevře výpusť strusky a struska na hladině se odstraní. Spalovací plyny, které se vytvořily při tavení, opouštějí pec komínem [15].

Typy kuploven

Studenovětrné – vyzdívkový materiál vydrží pouze jednu tavbu, specificky se stavěly v tandemu (není v nich použit vítr, případně vhánění kyslíku na podporu hoření).

Vodou chlazené kuplovný – část pláště kolem dmyšen je nepřetržitě chlazena vodou, používají se pro kampaňový provoz. Výhodou je zde možnost použití levného odpadu, tím však vzniká nasíření kovu a větší emise CO.

Horkovětrné kuplovný – kuplovný s předehřátým větrem - 700-800 °C, jsou vybaveny intenzivně chlazeným pláštěm ze žáruvzdorné vyzdívky. Výhodou je snížení spotřeby koksu, zvýšení teplot taveniny, vyšší rychlost tavení, snížení nasíření a zvýšení nauhličení.



Obr. 3.6: Kuplovna [16]

3.8.2. Tavení v elektrických indukčních pecích

Jde o nejpoužívanější způsob tavení litiny s kuličkovým grafitem. Indukční pece jsou vybaveny cívkou, která při průchodu elektrického proudu vytváří silné magnetické pole. Působením tohoto magnetického pole na proud kovu způsobuje napětí a následný elektrický proud v kovu. Kov je taven pomocí svého vlastního elektrického odporu.

3.8.2.1. Kelímková indukční pec

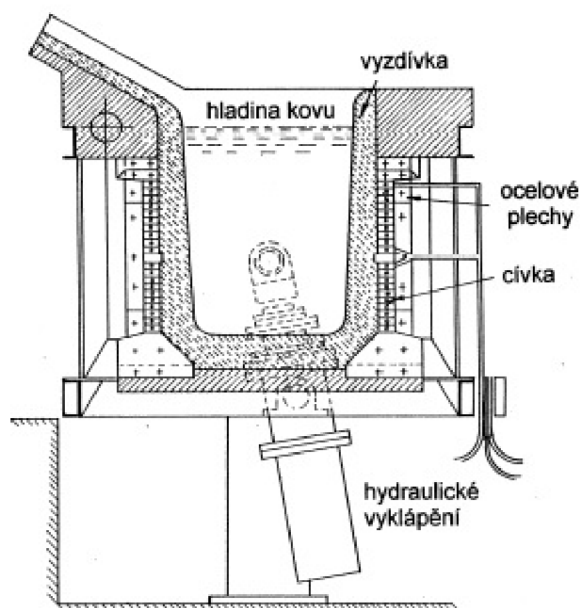
Tato pec je tvořena primárním a sekundárním vinutím. Primární vinutí je tvořeno cívkou a sekundární vinutí představuje samotná kovová vsázka v kelímku. Kelímek je vydusán žáruvzdornou vyzdívkou. Tyto pece nemohou být použity pro rafinaci (musí se používat pouze čistý ocelový vrat – hlubokotažná ocel). Pracují v rozmezí frekvencí od 50 Hz do 10 kHz. Při nastavení menších frekvencí vznikají větší vířivé proudy a zaručují nám dobré promísení taveniny [15].

Nízkofrekvenční kelímkové pece

Kvůli dlouhým tavicím časům se používají spíše jako ohřívací nebo udržovací agregát (může jít o doplněk ke kuplovnám).

Středofrekvenční kelímkové pece

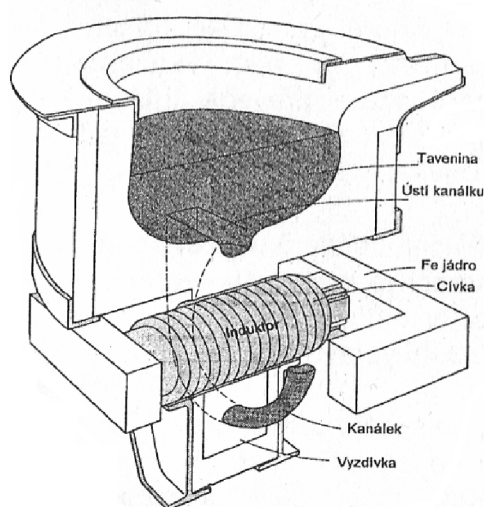
Nejčastější druh EIP, umožňuje natavovat běžnou velikost vsázky, chemické složení vsázky může odpovídat požadovanému chemickému složení (většinou se taví pomocí ocelové vsázky a vlastního vratného materiálu).



Obr. 3.7: Kelímková indukční pec [1]

3.8.2.2. Kanálková pec

Pec je tvořena indukční cívkou napájenou proudem o nízké frekvenci 50 Hz. Tuto cívku obepíná kanálek, ve kterém je tekutý kov. Kov v kanálku se ohřívá a je vytlačován zpět do pece, kde prouděním a vířením předává teplo do taveniny. Při výrobě litiny se tyto pece používají jako udržovací nebo homogenizační. Tyto pece mají oproti kelímkovým pecím vyšší účinnost. Nevýhodou této pece je však nízký pracovní výkon.



Obr. 3.8: Indukční kanálková pec [16]

3.9. Modifikace LKG

Aby v litině došlo k vylučování grafitu ve formě kuliček, musí být do taveniny přidána tzv. nodulační přísada. Nejvýznamnějšími přísadami jsou Mg a Ce. Další prvky, které mají nodulační účinek jsou například Ca, Na, Ba, Li, Sr, ty jsou však drahé nebo nespolehlivé a v běžné praxi se nepoužívají.

Hořčík se jako modifikační přísada nejčastěji používá v průmyslové praxi. Je to způsobeno jeho nízkými náklady a spolehlivým účinkem. Čistý hořčík má teplotu varu 1107°C a v tavenině způsobuje prudkou reakci, doplněnou oslnivými záblesky s vývinem hustého dýmu. Pro modifikování se tedy používají slitiny hořčíku, které bývají doplněny o různé prvky, jenž mají sferodizační (stabilizační) charakter nebo minimalizují bouřlivost reakce s hořčíkem.

U očukujících přísad, které prudce reagují s litinou, nebo mají nižší hustotu než tavenina (např. hořčík), se používají různé technologie vnášení modifikátoru do tekutého kovu. Ten musí být umístěn nebo vnesen pod hladinu kovu. Vhození modifikátoru na hladinu kovu by zapříčinilo pouze jeho spálení, aniž by došlo k modifikaci taveniny [4].

Některé používané slitiny hořčíku

- *Těžké* - slitiny na bázi nikl-hořčík (Ni-Mg),
- slitiny na bázi měď-hořčík (Cu-Ni-Mg, Cu-Mg),
- *Lehké* - slitiny na bázi křemík-hořčík (Mg-Si).

V průmyslu se vyskytuje nezměrné množství těchto slitin, které jsou stále zdokonalovány pro určitý typ výroby. Nejpoužívanější předslitiny jsou Mg-Si (až 80% produkce LKG). Z nichž jsou nejrozšířenější slitiny hořčíku s ferosiliciem (MgFeSi). Tyto slitiny mohou obsahovat i určitý podíl dalších prvků, které ovlivňují vlastnosti modifikátoru. V dnešní době si speciální složení modifikátoru vyvíjí a testují firmy samy.

3.9.1. Metody modifikování LKG

Otevřená pánev

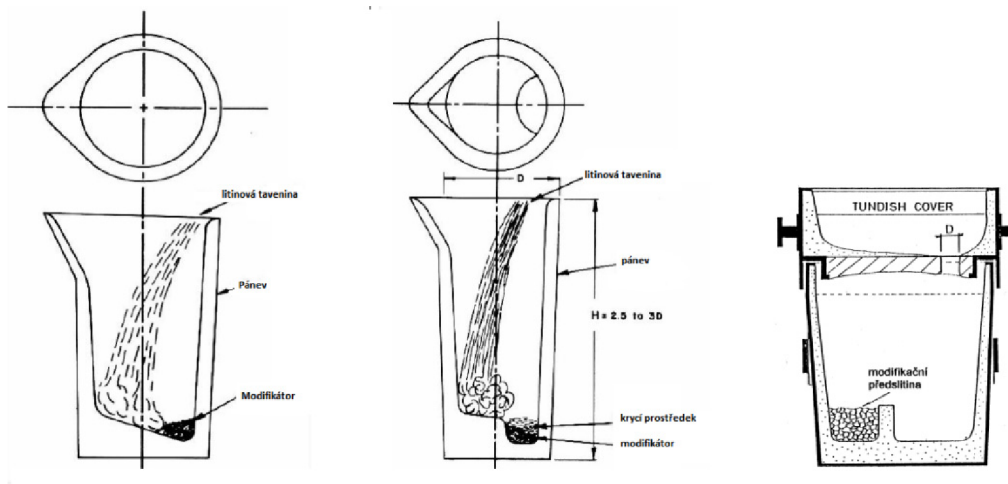
Polévací způsob. Jde o nejjednodušší způsob výroby LKG. Slitina je umístěna na dně předeřtáté pánve, kde je zalita kovem. Metoda má účinnost 20-30%, vyšší účinnost je dosažena s použitím těžkých modifikátorů (50-70%).

Metoda Sandwich

Jde o podobný způsob jako u otevřené pánve. Rozdíl je v tom, že na dně pánve je umístěný žlábek, kde se nasype slitina a poté se přikryje drobným kovovým odpadem (ocelové plíšky, litinové třísky). Ty zpozdí roztavení Mg slitiny při nalévání kovu do pánve a zvýší tak účinnost na 40-50%.

Metoda Tundish Cover

Tato pánev je opatřena víkem s nalévacím otvorem, ve kterém je jamka (tzv. lící bazén). Víko je odklápěcí nebo přenosné. Komora na slitinu je v pánvi umístěna tak, aby kov padal mimo ni. Díky uzavření pánve dojde ke snížení přístupu kyslíku do pánve a tím i ke zvýšení účinnosti modifikace na 60-70% (méně ztrát hořčíku vlivem oxidace). Tato metoda je optimální pro použití v malých i velkých slévárnách.

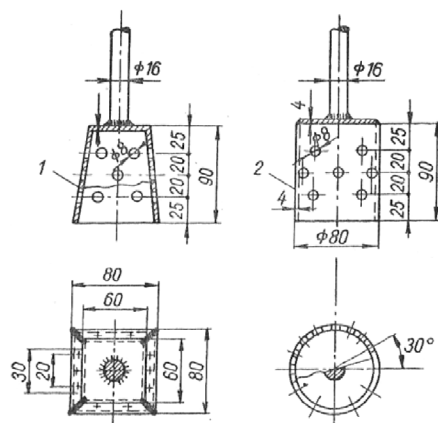


Obr. 3.9: Metody modifikování LKG:

a) otevřená pánev; b) Sandwich; c) Tundish Cover [1,4]

Ponorná metoda

Jde o nejjednodušší metodu modifikace. Hořčíkem se vyplní ponorný zvon, který se na konci uzavře. Poté se vtlačí do taveniny, co nejbližší ke dnu, kde začnou proudit hořčíkové páry otvory ze zvonu do litiny.



Obr. 3.10: Ponorný zvon k očkování litiny hořčíkem [17]

Modifikace ve sferoklávu

Modifikace probíhá za zvýšeného tlaku. Výhodou této metody je snížení prudkosti reakce hořčíku a zvýšení jeho účinnosti (60-80%). Modifikuje se pomocí ponorného zvonu.

Metoda plněným profilem

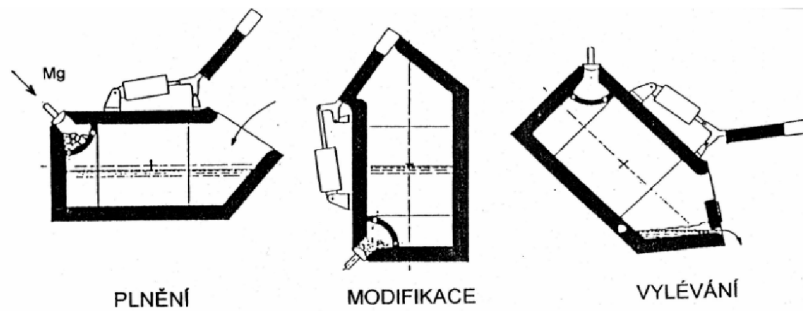
Používá se ocelový drát – trubka, jejíž náplň tvoří modifikátor, který má specifické chemické složení. Množství modifikátoru je dáno délkou drátu, který je roztaven v pánvi. Výhodou je vysoká čistota kovu, malé teplotní ztráty a bezproblémové domodifikování i během odlévání. Nevýhodou je vysoká cena.

Metoda INMOND

U této metody je modifikátor umístěn přímo ve formě, do speciálně upravené komůrky v lici soustavně. Odpadá tak problém odeznívajícího účinku modifikátoru s časem.

Modifikace v konvertoru

Konvertor je určen pro výrobu různých druhů LKG. Jako modifikátor se může použít i čistý hořčík. Při této metodě se uvolňují hořčíkové páry z reakční komůrky na dně konvertoru. Konvertory se nakládá kolem těžiště a mohou být mobilní. Konvertor se naplní ve vodorovné poloze, při níž není modifikátor ve styku s kovem. Poté se natočí do svislé polohy a začne modifikační reakce. Po modifikaci, která trvá 30-60s se konvertor natočí a vylije do připravené lici pánve. Pokud se operace opakuje, obsluha vsype do komůrky další dávku modifikátoru a cyklus se opakuje znovu.



Obr. 3.11: Konvertor +GF+ a jeho pozice při modifikaci [1]

3.10. Licí pánve

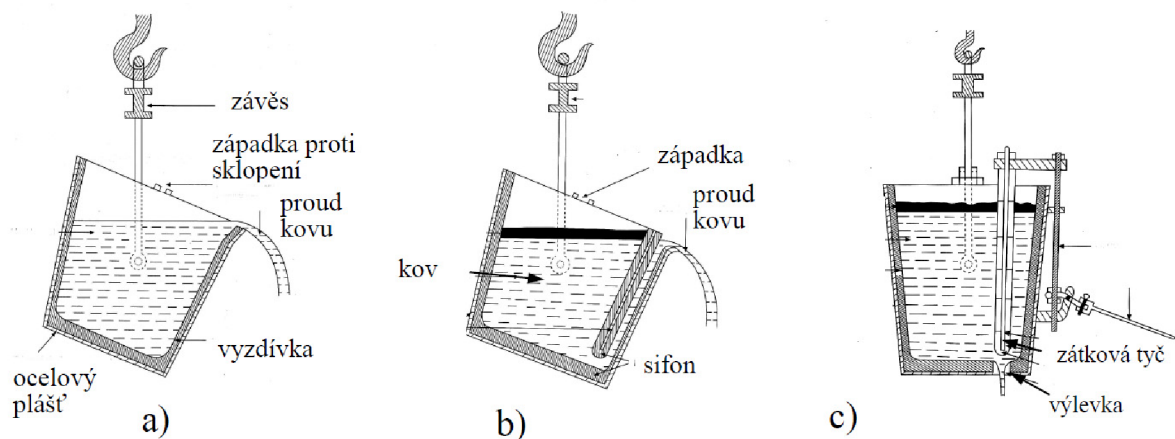
Tyto pánve slouží k dopravě tekutého kovu a jeho následnému odlévání do připravených forem. Pánve jsou opatřeny žáruvzdornou vyzdívkou. K zamezení teplotních ztrát se pánve předehřívají (nejčastěji pomocí plynových hořáků) a případně se jejich pláště izolují speciálním termopapírem, nalepeným zevnitř mezi ocelový plášť a výdusku.

Druhy licích pánví

Sklopné pánve – nutnost pečlivého stáhnutí strusky (obr. 3.12a).

Čajníkové pánve – jde o sklopné pánve, kde kov vytéká ze spodní části pánve a struska je oddělena tzv. sifonem (obr. 3.12b).

Pánve se spodní výpustí – jsou opatřeny odpichovým otvorem, výhodou této pánve je odlévání čistého kovu (ze dna pánve), nevýhodou je nutnost pečlivého čištění odpichového otvoru a zátkové tyče (obr. 3.12c).



Obr. 3.12: Druhy licích pánví [4]

4. Výroba litiny metodou Tundish Cover ve firmě Motor Jikov Slévárna a.s.

Výroba litiny probíhá ve dvou středofrekvenčních pecích o objemu 3,6 tuny. Chemické složení taveniny v peci při výrobě litiny s kuličkovým grafitem, je uvedeno v tabulce 4.1.

Tab. 4.1: Chemická koncentrace taveniny v peci [19].

C	Si	Mn	P	S	Cu(Snx10)	Mg
%	%	%	%	%	%	%
3,5 - 4	1,65 - 1,9	0,15 - 0,4	0,03 - 0,045	0,015 - 0,02	0,15 - 0,45	0,045 - 0,055

K modifikaci litiny se používají pánve, které pracují na principu metody Tundish Cover, s malou obměnou ve vyzdívce pece, která připomíná metodu Sandwich (viz příloha 3). Pánev je vybavena odklápěcím víkem a na dně má vytvořenou jamku, do které se sypou modifikační přísady. Ty jsou poté překryty drobnými ocelovými plíšky. Jejich úkolem je zpomalit reakci taveniny se slitinou hořčíku. Po nalití taveniny z pece do pánve se mění koncentrace křemíku v litině. Tato koncentrace se pohybuje okolo 2,35 – 2,9% Si a klesá zde také koncentrace síry na 0,01 - 0,015% S. K těmto změnám dochází díky přidáním očkovačů a vlivem navázání síry na hořčík. Po bouřlivé reakci s hořčíkem se z pánve stáhne struska a pánev se přesune na válečkový dopravník, který ji přesune k licímu zařízení. Lití probíhá přímo z modifikační pánve do forem.

Výhoda této metody spočívá v její jednoduchosti a relativní rychlosti. Díky několik let nezměněnému postupu výroby, se pracovníci naučili lít s maximální rychlostí a sebraností. Další výhodou je přesně odhadnuté chemické složení, které je potřebné k dosažení kvalitního odlitku (kvalita výrobku je však omezena kvalitou metody). Tím vším je zajištěna určitá spolehlivost při lití. Nevýhoda této výroby spočívá v nízké ekonomičnosti při modifikování (nastává bouřlivá reakce, viz příloha 5). Doznívající účinek modifikátoru je u této metody vysoký, pánve o objemu 500-700 kg litiny se musí vylít do 12 minut. Čas do vylití byl stanoven na základě dlouhodobého vyhodnocování mikrostruktur.

5. Výroba litiny procesem Initek ve firmě Motor Jikov Slévárna a.s.

Příprava taveniny probíhá stejně jako u předchozí metody ve dvou středofrekvenčních pecích o objemu 3,6 tuny. Složení taveniny v peci je uvedeno v tab. 5.1.

Tab. 5.1: Chemická koncentrace taveniny v peci [19]

C	Si	Mn	P	S	Cu(Snx10)	Mg
%	%	%	%	%	%	%
4,1 - 4,2	1,4 - 1,6	0,25 - 0,8	0,03 - 0,045	0,015 - 0,02	0,25 - 0,8	0,028 - 0,033

Pozn.: V pánvi se obsah Si mění na 1,9-2,1% a obsah S na 0,01-0,015%.

Vlastní modifikace probíhá ve speciálním konvertoru pomocí procesu Initek od firmy Foseco s.r.o. Proces Initek je obdobou výroby litiny metodou +GT+ (obr. 3.11). Do konvertoru se z jedné strany nasype slitina hořčíku (obsahující 50% Si - Nodulant), která spadne do speciální komůrky, kde je následně zasypana drobnými ocelovými plíšky. Poté se konvertor otočí o 90° do vodorovné polohy, v níž se nasype předzpracovací přípravek Inodex, který má za úkol dezoxidovat a odsířit taveninu před modifikací. Po nalití kovu proběhne reakce s Inodexem, tato reakce vytvoří na hladině strusku, které při následném obrácení slouží jako vrstva zabraňující úniku hořčíkových par a zmírňující reakci hořčíku s taveninou. Modifikační reakce, k níž dojde po dalším natočení konvertoru, již není tak silná jako u předchozí metody (viz příloha 4). Z konvertoru se stáhne struska a tavenina uvnitř se přelije do lící pánve, z níž se už odlévá do forem.

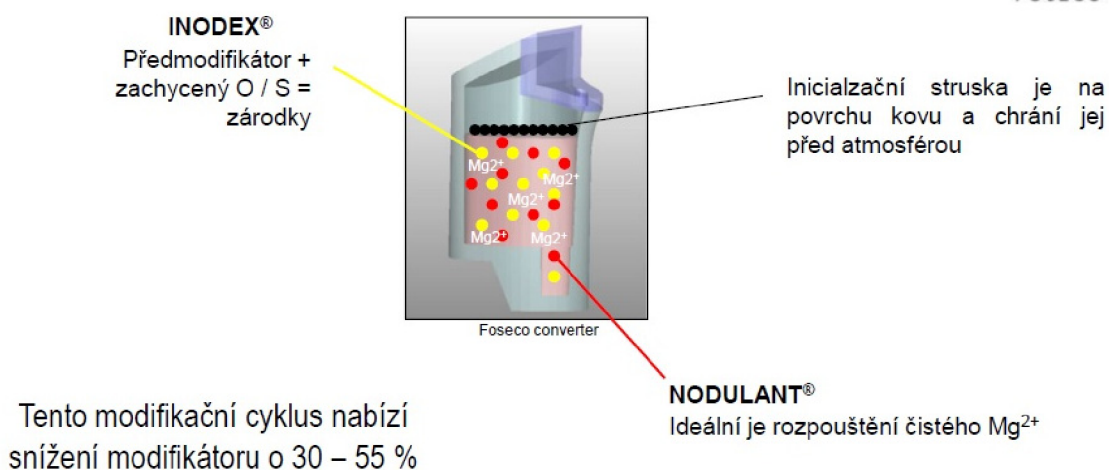
Výhodou této metody je vyšší ekonomičnost vlivem lepšího využití modifikační slitiny. Rovněž je prodloužen čas pro vylití zpracované taveniny (modifikátor působí delší dobu) až na 30 minut. Velkou výhodou je snížení odpichových teplot z pece a relativně malé ochlazení taveniny. V neposlední řadě by se také měla zlepšit kvalita odlitku. Tento aspekt však závisí na vyladění případných problémů této metody a chemického složení taveniny.

Při používání konvertoru od firmy Foseco s.r.o., by mělo dojít k těmto změnám [20]:

- snížení vnitřní zmetkovitosti o cca 25%,
- snížení externí zmetkovitosti o cca 25%,
- snížení ztrát vlivem nedolitých forem o cca 50%,
- snížení ztrát kovu rozstříkem při nalévání do pánve a modifikaci (příloha 1,4),
- snížení nákladů na zpracování kovu (příloha 2),
- snížení odpichové teploty o 20°C (úspora elektrické energie),
- úspora na vyzdívce pánví,
- zvýšení kapacity tavení (odpadají prostoje při výměně pánví).

INITEK proces – konvertor

Reakce Mg

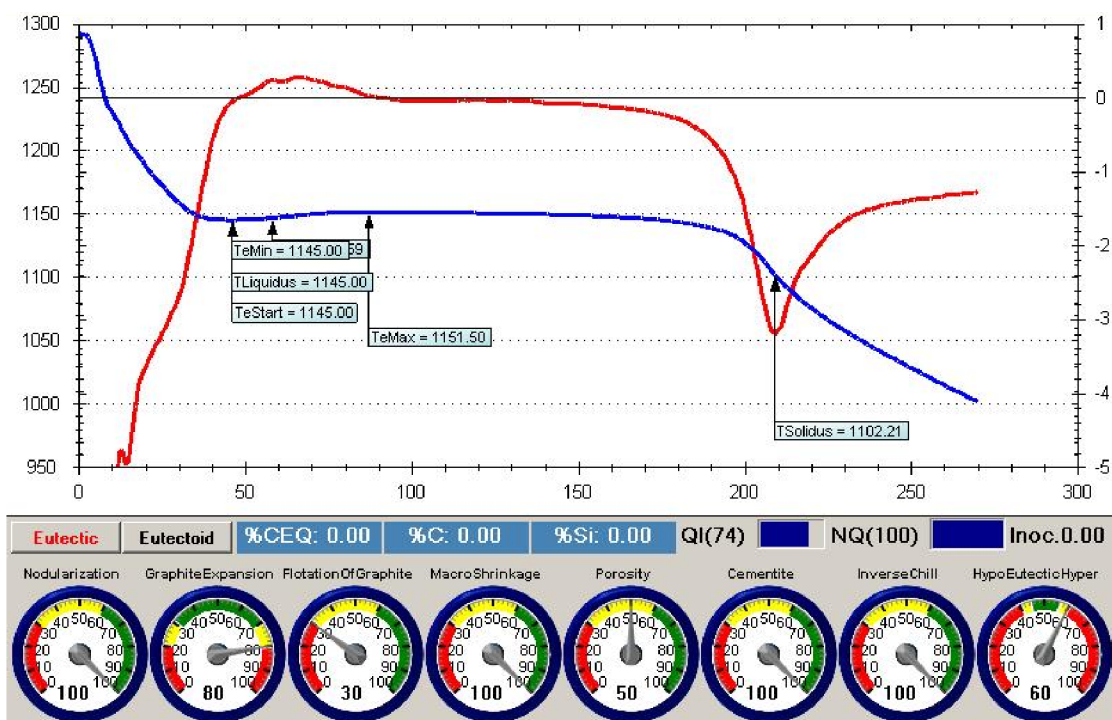


Obr. 5.1: Proces Initek [19]

6. ITACA – Termická analýza

Itaca je software, který slouží k zobrazení termické analýzy při výrobě litiny. Tento software byl použit při zkouškách konvertoru ve firmě MOTOR JIKOV slévárna a.s.

Analýza se vytváří před a po očkování. Z analýzy, která se provede před očkováním, se stanoví přesná dávka očkovačů. Ta musí být do litiny přidána, aby bylo dosaženo požadovaného chemického složení. Analýza provedená po očkování slouží ke kontrole a předběžnému vyhodnocení struktury litiny. Jedním z důležitých funkcí programu je vyhodnocení pravděpodobnosti výskytu cementitu. Dalším důležitým parametrem je správná nodulace grafitu.



Obr. 6.1: Software Itaca

Na obrázku 6.1 je příklad termické analýzy litiny, která byla modifikována v konvertoru. Jde o analýzu, jenž byla provedena po očkování. Modrá křivka značí teplotu ochlazování. Červená křivka značí první derivaci ochlazování (modré křivky). Při výpočtu se použije i druhá derivace, ze které je vypočítáno a vyznačeno maximum (TeMAX). Jak bylo již výše uvedeno, při výrobě LKG je snahou dosáhnout eutektického složení. Při eutektickém složení se musí teploty TeMin, TLiquidus a TeStart na obrázku rovnat.

Tato podmínka je splněna. Jde tedy o eutektickou litinu. Dále je na obrázku vidět, že nodulace grafitu je v pořádku (první indikátor na obrázku zleva) a v odlitku by se neměl vyskytovat cementit (šestý indikátor zleva).

Pojmy:

TeMin – nejnižší teplota grafitické expanze, zde začíná expandovat (růst) grafit a to až do teplot *TeMAX*,

TeStart – teplota při níž začíná vylučování grafitu,

TLiquidus – teplota při níž začíná vylučování dendritů kovové matrice.

7. Vyhodnocení struktury LKG

Vzorky k vyhodnocení struktury materiálu byly vyrobeny v elektrické indukční peci. Jsou vyrobeny z LKG (EN-GJS-400-12, EN-GJS-500-7, EN-GJS-600-3). První série těchto vzorků byla vyrobena pomocí procesu Initek a druhá pomocí metody Tundish cover.

Příprava těchto vzorků spočívala v odebrání vzorku z Y-bloku a jeho následné zalití do pryskyřičné hmoty. Tento vzorek byl dále vyjmut z formy a broušen na brusných papírech o hrubosti 220, 500 a 800. Poté se přešlo na leštící diamantovou pastu, nejprve se leštilo na 3 μ m a nakonec na 1 μ m.

Takto připravené vzorky byly dodány firmou Motor Jikov Slévárna a.s. pro obrazovou analýzu. Vzorky se uložily do speciálních vzduchotěsných nádob, aby se zamezilo jejich oxidaci na vzduchu.

Metalografická zkouška spočívala v pozorování velikosti a tvaru grafitu na naleptaných vzorcích a jejich posouzení podle normy ČSN ISO 945 -1. Toto pozorování bylo provedeno na světelném mikroskopu Olympus GX71 s kamerou DP20 (příloha 15) při zvětšení 100x a 500x. Vyhodnocení grafitu bylo provedeno na mikroskopu Neophot 21 (příloha 14). Výsledky těchto pozorování jsou uvedeny v tab. 7.1 a v tab.7.2.

Poté bylo provedeno naleptání vzorků pomocí 2% NITALu. Po naleptání vynikla struktura matrice a bylo možné posoudit její složení na světelném mikroskopu. Měření bylo provedeno na mikroskopu Olympus GX71 s kamerou DP20. Struktura je ve všech případech tvořena feritem a perlitem, jejich procentuelní zastoupení je uvedeno v tab. 7.3. Tyto hodnoty byly stanoveny pomocí normy ČSN ISO 945 -1.

Tab. 7.1: Hodnocení nenaleptané struktury vzorků vyrobené metodou Tundish Cover

Metoda Tundish Cover			
Počet zrn na mm ²			
Náhodné místo na vzorku	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
Místo 1	147	170	181
Místo 2	127	201	187
Místo 3	136	191	170
Průměr	137	187	179
Velikost grafitu			
Velikost grafitu dle normy	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
5	5%		
6	95%	85%	95%
7		15%	5%
Zrnitost grafitu			
Zrnitost grafitu dle normy	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
III			
V	10%	10%	10%
VI	90%	90%	90%

Tab. 7.2: Hodnocení nenaleptané struktury vzorků vyrobené procesem Initek

Proces Initek			
Počet zrn na mm ²			
Náhodné místo na vzorku	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
Místo 1	209	128	166
Místo 2	205	129	187
Místo 3	190	137	178
Průměr	201	131	177
Velikost grafitu			
Velikost grafitu dle normy	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
5		40%	
6	85%	60%	80%
7	15%		20%
Zrnitost grafitu			
Zrnitost grafitu dle normy	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
III	4%		
V	6%	10%	10%
VI	90%	90%	90%

Legenda ke grafům:Velikost grafitu:5 – nad 60 μm do 120 μm ,6 – nad 30 μm do 60 μm ,7 – nad 15 μm do 30 μm .Zrnitost grafitu:

III – červíkovitý grafit,

V – nedokonale zrnitý grafit,

VI – pravidelně zrnitý grafit.

Tab. 7.3: Naleptaná struktura vzorků

Proces Initek			
Struktura	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
Ferit	30%	15%	10%
Perlit	70%	85%	90%
Metoda Tundish			
Struktura	EN-GJS-400-12	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
Ferit	45%	20%	15%
Perlit	55%	80%	85%

8. Diskuze k metalografické analýze

Při použití procesu Initek by mělo dojít ke snížení vnitřní zmetkovitosti. Potvrzení tohoto předpokladu je mimo jiné obsahem této bakalářské práce. Jak již bylo zmíněno, vnitřní zmetkovitost je úzce spjata s mechanickými vlastnostmi materiálu. Pro odhalení těchto vad byly vyleštěné struktury pozorovány pomocí mikroskopu a vyhodnocovány podle příslušných norem.

Po vyhodnocení naleptaných struktur materiálů vyrobených pomocí procesu Initek a metody Tundish Cover, byly zjišťovány rozdíly mezi tvarem, velikostí a zrnitostí grafitu (viz tab. 7.1 a tab. 7.2).

- Tvar a zrnitost grafitu se ve většině případů liší nepatrně, pouze u EN-GJS-500-7 vyrobené procesem Initek je velikost grafitu výrazněji vyšší, než při výrobě metodou Tundish Cover.
- Množství grafitu v litině EN-GJS-400-12 vyrobené procesem Initek je o 32% vyšší než u metody Tundish Cover. Naopak u litiny EN-GJS-500-7 je množství grafitu o 30% vyšší u metody Tundish Cover.
- Množství grafitu v litině EN-GJS-600-3 je u obou metod shodné.
- V materiálu EN-GJS-400-12 se vyskytuje 4% množství červíkovitého grafitu, které zřejmě vzniklo v důsledku nedostatečného modifikování materiálu.

Po naleptání struktury materiálu bylo pozorováno a odhadnuto procentuální složení feritu a perlitu v litině (viz tab. 7.3). Toto složení se výrazně lišilo pouze u litiny EN-GJS-400-12, kde byl pozorován rozdíl 15% v množství feritu.

V materiálu byly také pozorovány řediny, přičemž velké množství mikroředin vznikalo u metody Tundish Cover. Tyto řediny se však vyskytují ve všech litinách vyrobených odléváním. Z tohoto důvodu není na tento druh vad materiálu kladen důraz, při posuzování struktur.

9. Závěr

Výroba litiny procesem Initek v sobě skrývá velký potenciál. Tato metoda dokáže účinněji využít modifikátor, díky specifickému průběhu reakce za použití strusky a rozfázováním modifikace v konvertoru. Proces Initek také nabízí spoustu dalších výhod zmíněných výše (kapitola 5.).

Po provedení metalografické analýzy a přezkoumání struktury materiálů, se dospělo k překvapivě podobným výsledkům jako u výroby litiny pomocí metody Tundish Cover. Také vnitřní zmetkovitost byla srovnatelná a dostává se tak do rozporu s výhodou, uvedenou v kapitole 5. Tento výsledek mohl být zapříčiněn tím, že proces Initek ještě není ve firmě zcela zaběhnut, nebo tím, že metoda Tundish provozovaná ve firmě Motor Jikov Slévárna a.s. je na velmi dobré úrovni. Pro potvrzení nebo vyvrácení této hypotézy, by bylo zapotřebí rozsáhlejšího výzkumu.

Nicméně velkou výhodou procesu Initek, která však nemá přímý vliv na mechanické vlastnosti LKG, je ekonomický pohled. Proces Initek výrazně snižuje odpichové teploty pece v řádu desítek °C, což podstatně zlevní výrobu. Další výhodou je prodloužení licího času a v neposlední řadě také omezení rozstříku kovu při jeho nalévání a modifikaci. Poslední výhoda ovlivní nejen ekonomickou stránku procesu, ale rovněž zvýší bezpečnost na pracovišti.

Seznam použité literatury

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metallurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1. vydání, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [2] PLUHAŘ, Jaroslav, KORITTA, Josef. *Strojírenské materiály*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1966, 560 s. Redakce strojírenské literatury. ISBN 04-254-66.
- [3] SÝKORA, Pavel, MORES Antonín, OTÁHAL, Vlastislav, HUČKA, Jan. 60. výročí od zahájení výroby litiny s kuličkovým grafitem na území České republiky a současný stav. *Slévárství*. Brno: Svaz sléváren ČR, roč. LVII, 2009, číslo 7-8, s. 298-303. ISSN 0037-6825.
- [4] OTÁHAL, Vlastislav. *Tvárná litina – Litina s kuličkovým grafitem*. Monografie, Metal Casting and Foundry Consult, Otahal Consult Brno, 1. vydání, Brno, 2006, 562 s.
- [5] ČSN EN ISO 945. *Litina - Určení mikrostruktury grafitu*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] *Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT* [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z:
<http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/cs/studium/podklady-pro-vyuku-letni-semestr>
- [7] DORAZIL, Eduard. *Vysokopevná bainitická tvárná litina*. vyd. Praha: ACADEMIA, 1985, 172 s., ISBN 21-075-85.
- [8] VĚCHET, Stanislav, BOKŮVKA, Otakar, KOHOUT, Jan. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. 2. vyd. Žilina: Žilinská univerzita, 2002, 157 s. ISBN 80-7100-973-3.
- [9] SKOČOVSKÝ, Petr, PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické litiny*. vyd. Žilina: EDIS, 2005, 168 s. ISBN 80-8070-390-6.

-
- [10] *Trompetter Guss Bindlach* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://www.trompetter-guss.de/produkte>
- [11] *Heunisch Guss* [online]. 2013 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://www.heunisch-guss.com/cz/produkty/vermikularni-litina.html>
- [12] *TEMAX tech* [online]. 2010 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://www.temax.cz/produkty-spony-herkules.html>
- [13] *Applied Process Inc.* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://www.appliedprocess.com/adi>
- [14] *The Sorelmetal Book of Ductile Iron*. Montréal (Québec) Canada: RIO TINTO IRON & TITANIUM INC., 2004, 172 s. ISBN neuvedeno.
- [15] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 256 s. ISBN 80-720-4455-9.
- [16] HLUCHÝ, Miroslav. *Strojirenská technologie I*. Vyd. 1. Praha : SNTL, 1984. 172 s. ISBN 04-225-84.
- [17] PÍŠEK, František, PLEŠINGER, Adolf Martin et al.: *Slévárenství. 1. díl. Obecná část*. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1974. 499 s. ISBN 04-209-74.
- [18] ČSN EN 1563. *Slévárenství-Litiny s kuličkovým grafitem*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [19] Materiály poskytla firma Motor Jikov Slévárna a.s.
- [20] Materiály poskytla firma Foseco s.r.o.

Seznam použitých zkratek a symbolů

A	[%]	tažnost
a.s.		akciová společnost
ADI		Austempered Ductile Iron
Al		hliník
Ba		baryum
C		uhlík
Ca		vápník
Ce		cér
CE		uhlíkový ekvivalent
CO		oxid uhelnatý
Cu		měď
ČSN		Česká norma
Hz		hertz
EIP		elektrická indukční pec
EN		evropská norma
Fe		železo
Fe _α		alfa ferit
Fe _γ		austenit
Fe ₃ C		cementit (karbid železa)
HB		pevnosti podle Brinella
kg		kilogram
kHz		kilohertz
LKG		litina s kuličkovým grafitem
LLG		litina s lupínkovým grafitem
LVG		litina s vermikulárním grafitem
Mg		hořčík
Mn		mangan
MPa		megapascal
M _s		Martenzit „start“
např.		například
Ni		nikl
obr.		obrázek

P		fosfor
R _m	[MPa]	pevnost v tahu
R _{p0,2}	[MPa]	mez kluzu
s		sekunda
S		síra
S _C		stupeň eutektičnosti
Si		křemík
Sn		cín
Sr		stroncium
s.r.o.		společnost s ručením omezeným
tzv.		takzvaný
z angl.		z anglického
Zr		Zirkonium
°C		stupeň Celsia