



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

GRAFITICKÉ LITINY A VLIV HOŘČÍKU NA JEJICH STRUKTURU A VLASTNOSTI

GRAPHITIC CAST IRON AND THE INFLUENCE OF MAGNESIUM ON ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Nekuda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Václav Kaňa, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Pavel Nekuda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Grafitické litiny a vliv hořčíku na jejich strukturu a vlastnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Grafitické litiny patří mezi materiály, které jsou lidstvu známy již dlouhou dobu. Přesto se jedná o materiály, které mají své nezastupitelné místo ve výrobě strojních i konstrukčních součástí. Je známo mnoho druhů litin lišících se mikrostrukturou a z toho plynoucích mechanických a jiných vlastností. A hořčík patří mezi prvky, které i v malém množství významně tuto mikrostrukturu ovlivňují.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je popsat druhy grafitických litin a zejména jejich metalurgické zpracování hořčíkem. V rámci práce bude také proveden experiment s cílem sledovat a zhodnotit různá množství hořčíku s vlivem na strukturu a vlastnosti výsledné litiny.

Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.

ALAGARSAMY, A. Ductile iron handbook. Des Plaines, Ill.: American Foundrymen's Society, c1992. ISBN 08-743-3124-2.

ŠENBERGER, J. Metalurgie oceli na odlitky. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

NEKUDA Pavel: Grafitické litiny a vliv hořčíku na jejich strukturu a vlastnosti.

Práce pojednává o druzích grafitických litin a jejich metalurgickém zpracování hořčíkem. V praktické části je proveden experiment, při němž jsou odlity vzorky grafitické litiny s různým množstvím použitého modifikátoru, u kterých jsou sledovány výsledné mechanické vlastnosti a struktura.

Klíčová slova: tvárná litina, hořčík, výroba litiny, modifikace

ABSTRACT

NEKUDA Pavel: Graphitic cast iron and the influence of magnesium on its structure and properties.

The bachelor thesis deals with types of graphitic cast iron and their metallurgical treatment with magnesium. In the practical part of the thesis, an experiment is performed in which there are cast samples of graphitic cast iron with different amount of modifier, in which mechanical properties and structure are observed.

Keywords: ductile iron, magnesium, cast iron production, modification

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEKUDA, Pavel. *Grafitické litiny a vliv hořčíku na jejich strukturu a vlastnosti* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124724>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 21. 6. 2020

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Zapletalovi, Ph.D. za provedení mechanických zkoušek vzorků do praktické části práce a mé rodině za pomoc s překladem cizojazyčné literatury.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Charakteristika litin	10
2 Druhy litin.....	11
2.1 Bílá litina	12
2.2 Grafitická litina.....	12
2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem.....	13
2.2.2 Litina s červíkovitým grafitem.....	14
2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem.....	15
2.2.4 Litina s vločkovým grafitem.....	16
2.3 Maková litina	17
2.4 Tvrzená litina	17
2.5 ADI litina	17
3 Tavení grafitických litin.....	19
3.1 Kuplovna	19
3.2 Elektrická indukční pec	20
3.3 Elektrická oblouková pec.....	20
3.4 Bubnová pec	21
4 Modifikace grafitických litin	23
4.1 Historie modifikace.....	23
4.2 Používané modifikátory	24
4.3 Mechanismus růstu grafitového eutektika	25
4.4 Průběh modifikace.....	25
4.5 Metody modifikace	27
4.5.1 Metoda SANDWICH.....	28
4.5.2 Metoda TUNDISH.....	28
4.5.3 Modifikace ve sferoklávu.....	28
4.5.4 Modifikace v +GF+ konvertoru	29
4.5.5 Modifikace plněným profilem	30
4.5.6 Metoda Inmold.....	31
5 Praktická část.....	32
5.1 Příprava vzorků	32
5.2 Vyhodnocení vzorků.....	33
5.2.1 Mikrostruktura	33
5.2.2 Mechanické vlastnosti.....	34
6 Závěry	38

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Úvod

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem. Obsahují také určitý podíl žadoucích prvků (Si, Mn apod.) i nežadoucích prvků (S, P, Pb apod.), které se mohou do materiálu dostat jak ze vsázkového materiálu, tak z vyzdívky pece v průběhu tavení. V porovnání s ocelí na odlitky je litina levnější a má lepší slévatelnost. Nevýhodou však může být její menší pevnost, houževnatost a horší svařitelnost.

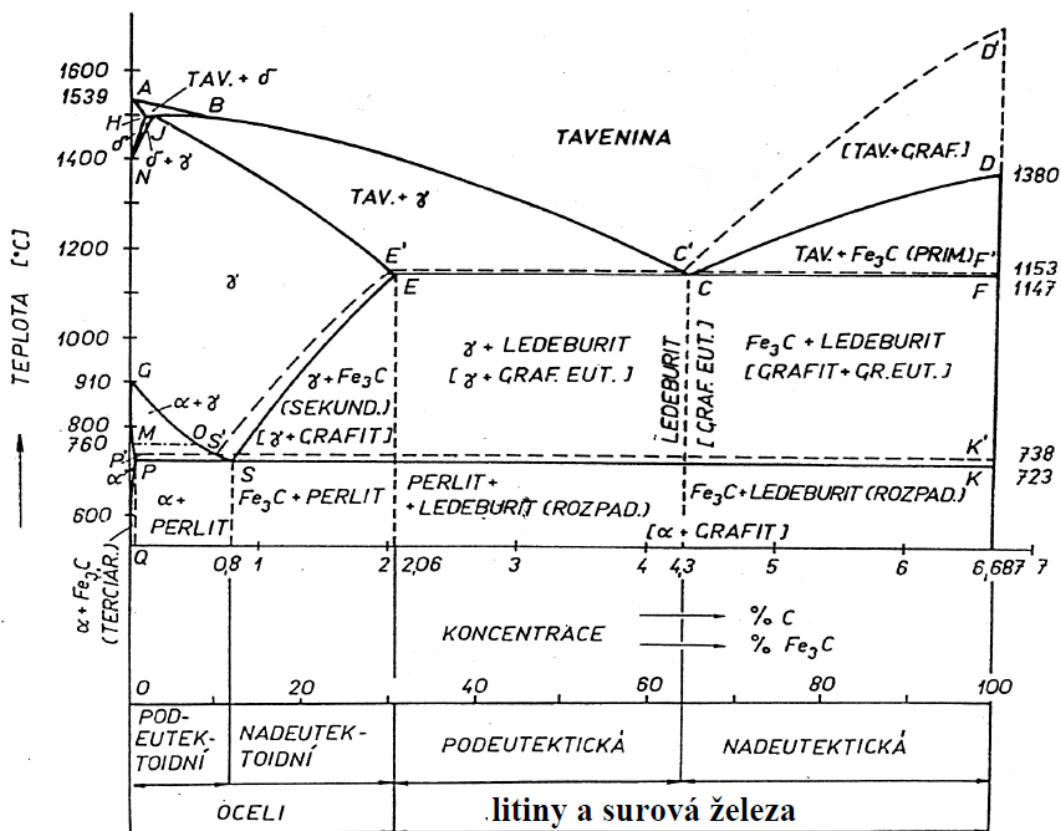
Ačkoliv byl první litinový odlitek vyroben v Číně kolem roku 600 př. n. l., v Evropě se litina začala vyrábět až ve 14. stol. n. l. I když proces modifikace sahá teprve do 40. let 20. století, je historie metalurgického zpracování litin dosti bohatá. V té době u nás existovala (a stále existuje) spousta podniků, které přispěly k vývoji metalurgického zpracování litin do podoby, jakou známe nyní. Za pouhých asi 80 let od první modifikace litiny cerem byl tento vývoj zdokonalen a v současné době existuje spousta metod modifikace a modifikačních prostředků a to i přes skutečnost, že neexistuje jednotná teorie, která by popisovala růst eutektika s kuličkovým grafitem.

V současné době je litina vyráběna převážně v kupolních a indukčních pecích a má široké využití. V praxi se lze setkat se širokou škálou litin, lišící se svými vlastnostmi a strukturou. Jejich systém označování stanovuje norma ČSN EN 1560.

1 Charakteristika litin

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem a dalšími prvky, přičemž obsah uhlíku je minimálně 2 % C. Podle chemického složení a podmínek tuhnutí vzniká v litinách buď cementitické eutektikum – ledeburit, nebo grafitové eutektikum. Litina, ve které se vyloučí krystalizací ledeburit, tuhne podle metastabilní soustavy Fe-Fe₃C a je označována jako bílá litina, neboť má bílý lom. Grafitické litiny mají veškerý uhlík nebo jeho převážnou část vyloučen jako grafit a tuhne podle stabilní soustavy Fe-C. Obsahují grafitické eutektikum, mají šedý lom a řadí se mezi nejstarší konstrukční materiály. [1]

Na obr. 1 lze vidět binární rovnovážný diagram metastabilní soustavy Fe-Fe₃C (plná čára) a stabilní soustavy Fe-C (čárkovaná čára).



Obr. 1 Binární rovnovážný diagram Fe-Fe₃C a Fe-C [2]

Velmi významným prvkem ve slitinách železa je kromě uhlíku také křemík, který má výrazný vliv na strukturální přeměny. Proto je pro podrobnější studium krystalizace litin vhodný ternární diagram Fe-C-Si, popřípadě jeho řezy pro určitý konstantní obsah křemíku (pseudobinární diagramy). [3]

Co se týče produkce litiny, jsou litiny nejčastější používanou slitinou železa na odlitky. Jejich celosvětová výroba ročně dosahuje asi 60 milionů tun. [4]

2 Druhy litin

Litiny je možno rozdělit dle stupně eutektičnosti nebo dle formy uhlíku.

Jedná-li se o stabilní soustavu Fe-C, nachází se eutektický bod při koncentraci 4,23 % C a teplotě 1153 °C. Přítomnost dalších prvků, zejména křemíku a fosforu, polohu eutektického bodu mění. Pro vyjádření vlivu chemického složení na polohu eutektického bodu lze použít následující kritéria, díky kterým lze litiny rozdělit na: [3]

- eutektické,
- podeutektické
- nadeutektické.

Prvním kritériem je tzv. uhlíkový ekvivalent, který převádí obsah chemických prvků na obsah uhlíku. Jeho nejpoužívanější zjednodušený výraz má tvar: [3]

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

Má-li uhlíkový ekvivalent hodnotu $C_E = 4,23$, jedná se o eutektickou litinu. Pro podeutektickou litinu je hodnota $C_E < 4,23$ a pro nadeutektickou je $C_E > 4,23$. [3]

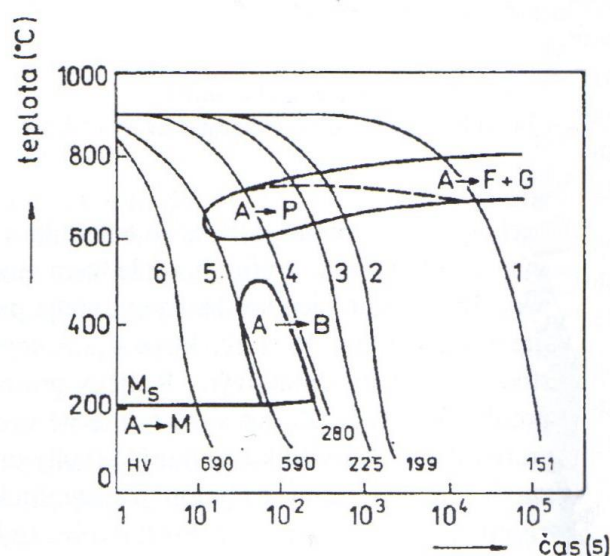
Druhé kritérium, které lze použít, se nazývá stupeň eutektičnosti. Vyjadřuje poměr celkového obsahu uhlíku k eutektické koncentraci uhlíku ovlivněného dalšími prvky. Pro jeho vyjádření lze použít zjednodušený tvar: [3]

$$S_C = \frac{\% C}{\% C_{eut.}} = \frac{\% C}{4,23 - 0,3(\% Si + \% P)} \quad (2.2)$$

Je-li hodnota stupně eutektičnosti $S_C = 1$, pak se jedná o eutektickou litinu. Podeutektická litina má hodnotu $S_C < 1$ a nadeutektická litina potom nabývá hodnot $S_C > 1$. [3]

Další způsob rozdělení litin je z hlediska formy grafitu. Jak už bylo uvedeno v úvodu této práce, dle rychlosti ochlazování může být uhlík vyloučen buď ve formě cementitického eutektika, nebo grafitového eutektika.

Na obr. 2 je příklad ARA diagramu pro nelegovanou litinu s kuličkovým grafitem, ze kterého je zřejmé, že při velmi pomalém ochlazování (křivka 1) vzniká úplná transformace austenitu na ferit a grafit. Se zvyšující se rychlostí ochlazování probíhají oba druhy eutektoidní přeměny. Výsledkem je potom feriticko-perlitická matrice (křivky 2 a 3). Při dosažení určité rychlosti ochlazování (křivka 4) může nastat metastabilní přeměna austenitu na perlit. Při vyšší rychlosti ochlazování (křivka 5) vzniká strukturní směs perlitu, bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Je-li ochlazení



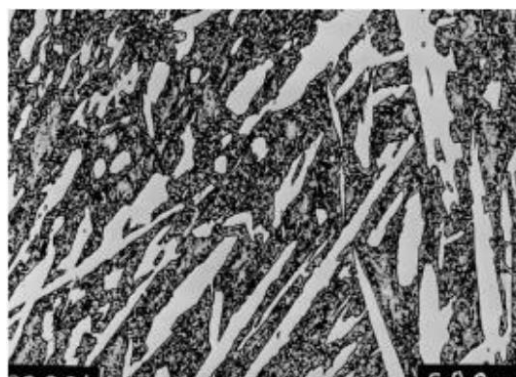
Obr. 2 Diagram ARA nelegované LKG (3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn) [1]

velmi prudké (křivka 6), nastane bezdifuzní přeměnou austenitu martenzitická struktura. Jedná se o nerovnovážný tuhý roztok uhlíku v železe, který se vyznačuje vysokou tvrdostí, ale také značným vnitřním pnutím, způsobeným jednak růstem měrného objemu při přeměně austenitu v martenzit a jednak tepelným pnutím spojeným s nerovnoměrným ochlazováním, způsobující vysokou křehkost martenzitu. [1]

2.1 Bílá litina

Bílá litina tuhne metastabilně podle soustavy Fe-Fe₃C. Její tvrdost je ovlivněna zejména obsahem cementitu a pohybuje se mezi 350 až 500 HB. Bílá litina je využívána k výrobě tvarově jednoduchých odlitků, na které je kladen důraz vysoké odolnosti proti opotřebení. Nelegované bílé litiny mohou být použity jako výchozí produkt k výrobě temperované litiny. [1]

Na obr. 3 je znázorněn příklad mikrostruktury bílé chromové litiny legované molybdenem pro zvýšení tvrdosti. [5]



Obr. 3 Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo (zvětšení 500x) [5]

2.2 Grafitická litina

Grafitické litiny tuhnu dle stabilní soustavy Fe-C, a tudíž jsou tvořeny grafitem a základní kovovou hmotou zvanou matrice. Vlastnosti těchto litin jsou závislé na mnoha parametrech, mezi které patří například tvar, velikost a způsob rozložení grafitu a druh matrice (perlit, ferit, cementit, popřípadě další produkty transformace austenitu). Tvar grafitu lze rozdělit dle normy ČSN EN 1560 na lupínkový, kuličkový, vločkový a vermikulární (červíkovitý). [1]

Tab. 1 Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností grafitických litin [3].

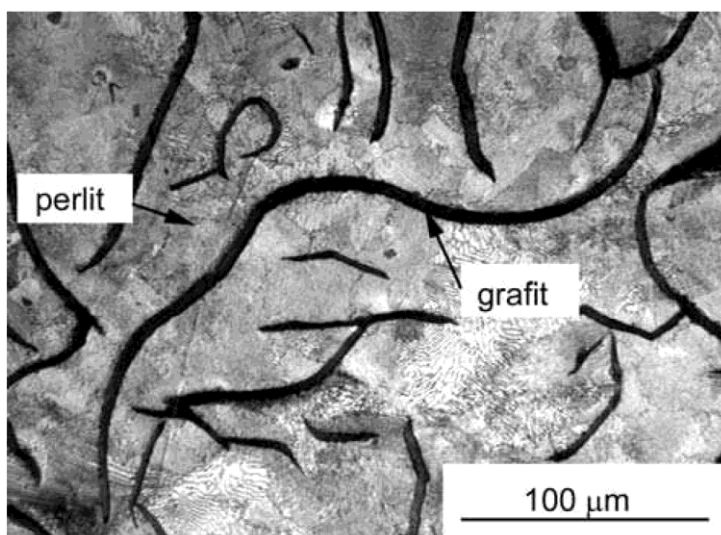
Mechanické a fyzikální veličiny		Jednotky	Tvar grafitu		
			lupínkový	červíkovitý	kuličkový
Mez pevnosti v tahu	R _m	MPa	150 - 400	300 - 500	350 - 900
Mez kluzu	R _{p0,2}	MPa	-	250 - 350	250 - 600
Tažnost	A ₅	%	max. 1,5	2 - 10	2 - 25
Modul pružnosti	E	kN/mm ²	75 - 155	130 - 160	140 - 185
Pevnost v tlaku	R _{mt}	MPa	500 - 1000	600	600 - 1200
Tvrdost	HB	-	140 - 300	150 - 250	120 - 350
Mez únavy tah-tlak	σ _C	MPa	90	120	150
Mez únavy v ohybu	σ _{OC}	MPa	140	170	190
Tepelná vodivost (20 až 200 °C)	λ	W/m.K	42 - 67	36 - 50	25 - 38
Délková roztažnost	α	μm/m.K	11 - 12	12 - 14	11 - 13
Hustota	ρ	g/cm ³	7,0 - 7,5	7,0 - 7,3	7,1 - 7,3
Měrný el. odpor	R	Ωmm ² /m	0,5 - 1	0,7 - 0,8	0,5 - 0,7

Tab. 1 porovnává hodnoty mechanických a fyzikálních vlastností litin s lupínkovým (LLG), červíkovitým (LČG) a kuličkovým grafitem (LKG). Z těchto hodnot je patrné, že litina s lupínkovým grafitem má celkově horší mechanické vlastnosti než litina s kuličkovým grafitem. Ve většině případů je to zapříčiněno vznikem místních koncentrací napětí v oblasti grafitu během zatěžování odlitku. LLG má kvůli svému tvaru grafitu ve tvaru hrubých lupínků ve struktuře nejsilnější vrubový účinek. Proto jsou nejpříznivějšími tvary grafitu z hlediska porušování celistvosti matrice kuličky, popřípadě vločky u temperovaných litin. [1] [3]

Grafitické litiny, zejména jejich výroba a zpracování, budou podrobně rozebrány v následujících kapitolách této práce.

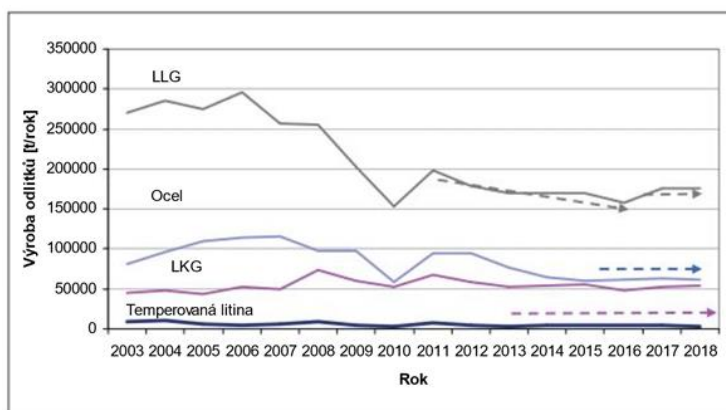
2.2.1 Litina s lupínkovým grafitem

Litiny s lupínkovým grafitem, dříve označované jako šedé litiny, mají uhlík převážně ve formě lamelárních částic – lupínků (obr. 4). Jak už bylo zmíněno, tyto grafitové lupínky vytváří v kovové hmotě velké množství vrubů, a proto mají horší mechanické vlastnosti v porovnání s jinými druhy grafitických litin. I přesto však zaujímají první místo v celosvětovém objemu výroby odlitků, díky svým nízkým výrobním nákladům a dobrým slévárenským vlastnostem. [1] [3]



Obr. 4 Struktura LLG s perlitickou matricí zobrazená světelnou mikroskopií [6]

Na obr. 5 je graf vývoje výroby odlitků ze slitin železných kovů v ČR do roku 2018. Je patrné, že výroba litiny s lupínkovým grafitem (LLG) převládá nad výrobou oceli na odlitky, litinou s kuličkovým grafitem (LKG) a temperovanou litinou, která tvoří u nás jen zlomek z celkové produkce odlitků. Podrobněji bude vývoj výroby odlitků rozebrán později v kapitole Výroba litiny. [7]



Obr. 5 Výroba odlitků ze slitin železných kovů v ČR v letech 2003-2018 [7]

LLG jsou převážně podeutektické slitiny. Nejdůležitější grafitotvornou přísadou je křemík. Se vzrůstajícím obsahem křemíku roste podíl grafitu v matrici a vzniká tak hrubší lupínkový

grafit. Roste také podíl feritu ve struktuře a klesá množství perlitu. Chemické složení LLG je v tab. 2. Dalšími prvky, které se mohou do LLG přidávat ve formě legur, jsou Mn, Cr, Cu, Mo, Ni, Sn aj. Chrom společně s manganem patří mezi karbidotvorné prvky, které zvyšují pevnost a tvrdost litiny. Mangan na sebe navíc váže síru, která je nežádoucím prvkem, neboť zabraňuje grafitezaci a zvyšuje křehkost. Minimální množství manganu, které je potřeba pro vázání síry a k zabránění jejího odmíšení po hranicích eutektických buněk, je u litiny s lupínkovým grafitem dáno vztahem 2.3. [1] [2]

$$\% Mn_{min} = 1,7 \cdot \% S + 0,45 \quad (2.3)$$

Dosazením vztahu 2.2 pro výpočet stupně eutektičnosti do empirických rovnic je možno určit přibližnou hodnotu meze pevnosti v tahu (2.4) a tvrdosti podle Brinella (2.5). [1]

Tab. 2 Chemické složení LLG [1].

% C	% Si	% Mn	% P	% S
2,8 - 3,6	1,7 - 2,4	0,5 - 1,0	0,2 - 0,5	max. 0,15

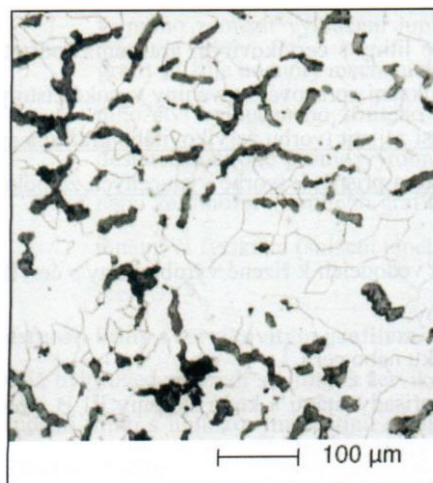
$$R_m = 1006 - 800S_c \quad (2.4)$$

$$HB = 465 - 270S_c \quad (2.5)$$

Litina s lupínkovým grafitem je dle ČSN EN 1561 řazena do šesti jakostních skupin podle své pevnosti v tahu EN-GJL-100, 150, 200, 250, 300 a 350. Číslo uvedené na konci značky udává nejmenší pevnost v tahu v MPa na tyči o průměru 20 mm vyrobené ze zkušebního tělesa litého odděleně o průměru 30 mm. Litina s jakostí EN-GJL-350 se vyrábí převážně v elektrických tavicích pecích a společně s EN-GJL-100 se moc často nevyrábí. Nejčastěji se lze setkat s výrobou litiny o jakostech EN-GJL-150 do jakosti EN-GJL-300 v kuplovnách. [3]

2.2.2 Litina s červíkovitým grafitem

Litina s červíkovitým grafitem (LČG) (obr. 6), neboli vermikulární litina (LVG), je moderní materiál, jehož produkce ve světě každým rokem roste. V anglické literatuře bývá často označována jako CGI (Compacted Graphite Iron), což v překladu znamená litina s kompaktním grafitem. Má podobný tvar grafitu jako LLG. Útvary grafitu jsou však kratší, tlustší a jejich konec bývá zaoblený. Obvykle je v mikrostruktuře obsažen také určitý podíl lupínkového a kuličkového grafitu. Vysoký podíl lupínků je však zpravidla nežádoucí, jelikož dochází ke snížení tažnosti a houževnatosti materiálu. Je-li však naopak příliš vysoký podíl kuličkového grafitu, zvyšuje se sklon ke vzniku staženin a snižování tepelné vodivosti. [2] [4]



Obr. 6 Struktura LČG zobrazená světelnou mikroskopií [3]

Co se výroby LČG týče, je vermikulární litina vyráběna modifikací LLG. Proto se také červíkovitý grafit může nechtěně vyskytnout při výrobě litiny s kuličkovým grafitem, když není modifikace hořčíkem dostatečně účinná, například z důvodu malého množství použitého modifikátoru nebo při dlouhém odstátí taveniny před odlitím. Proto také po 2. světové válce, kdy vzrůstala výroba litiny s kuličkovým grafitem (LKG), byla LČG považována za nežádoucí formu grafitu při výrobě LKG. Až poté byl objeven praktický přínos tohoto typu litiny. [1] [8]

Jak je patrné z tabulky 2.1, svými vlastnosti se LČG řadí mezi litinu s lupínkovým a kuličkovým grafitem. Díky vhodné kombinaci vyšší tepelné vodivosti oproti LKG a lepších pevnostních vlastností než u LLG jsou vhodné pro tepelně namáhané odlitky, které jsou vystavovány změnám teploty. LČG má také oproti LKG lepší tlumící schopnosti, dobrou slévateľnost, nižší modul pružnosti a menší sklon k deformaci při vysokých teplotách. V současnosti se nejvíce používají v automobilovém průmyslu a to například na bloky válců a části brzd. [1] [3] [4] [8]

2.2.3 Litina s kuličkovým grafitem

Litina s kuličkovým grafitem (LKG), dříve nazývaná tvárná, se vyznačuje sférickou formou vyloučeného grafitu. Má vyšší obsah křemíku (vyšší než u LLG) a zrnitý grafit je v kovové matici obsažen již v litém stavu. Jedná se o vysoce jakostní druh grafitické litiny, vyznačující se vysokou hodnotou pevnosti, ale také tažnosti a houževnatosti. [3] [5] [6]

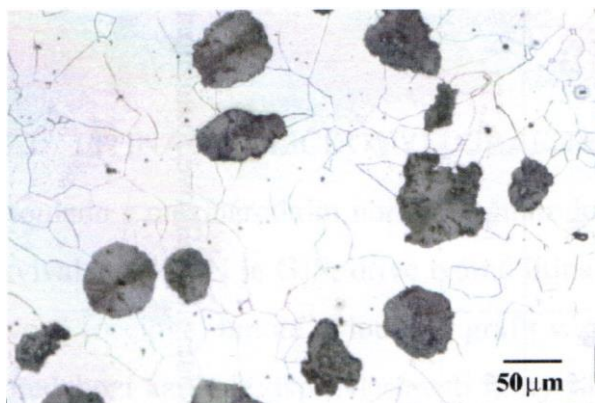
Chemické složení (tab. 3) odpovídá eutektické, popř. nadeutektické koncentraci. Běžně se obsah fosforu pohybuje v rozmezí 0,04 – 0,06 %. Při nižším obsahu hořčíku, než je uvedeno v tabulce 2.3, nemusí být zaručeno vyloučení grafitu ve tvaru kuliček. [1] [4]

Tab. 3 Chemické složení LKG [1].

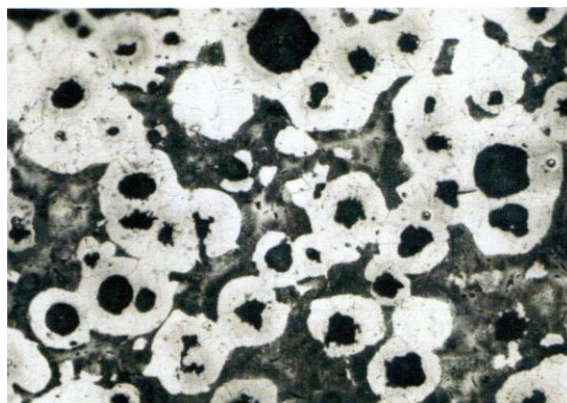
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
3,2 - 4,0	1,8 - 3,0	0,2 - 0,8	max. 0,1	max. 0,05	0,04 - 0,08

LKG je vyráběna modifikací taveniny čistým hořčíkem v autoklávu nebo jeho předslitinami v pánvi nebo přímo ve formě. Podrobněji je způsob získávání litiny s kuličkovým grafitem popsán v kapitole 5.3 Průběh modifikace. [1]

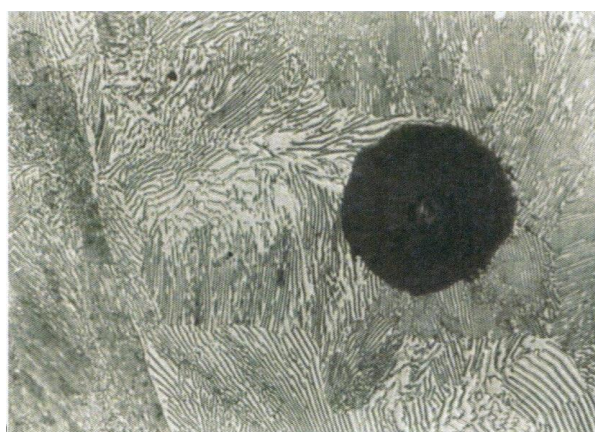
Obr. 7-10 ukazují strukturu LKG se čtyřmi různými druhy kovové matrice. Na obr. 7 je struktura feritické LKG, kde se zrnitý grafit nachází ve feritické kovové hmotě. Se zvyšujícím se obsahem feritu se zvyšuje tažnost, ale klesá pevnost a mez kluzu materiálu. Obr. 8 patří litině feriticko-perlitické. Čistě perlitickou LKG představuje obr. 9. Tento lamelární perlit je však kromě pevnosti a tvrdosti také nositelem nízké hodnoty houževnatosti a nízkých plastických vlastností. Po zušlechtnění lze proto dostat velmi jemnou strukturu, označovanou jako sorbit, která se potom vyznačuje vyšší tvárností a houževnatostí. Jestliže se zakalí jeden ze základních typů LKG, je možno dostat tvrdou martenzitickou strukturu, kterou lze vidět na obr. 10. [1] [3] [4]



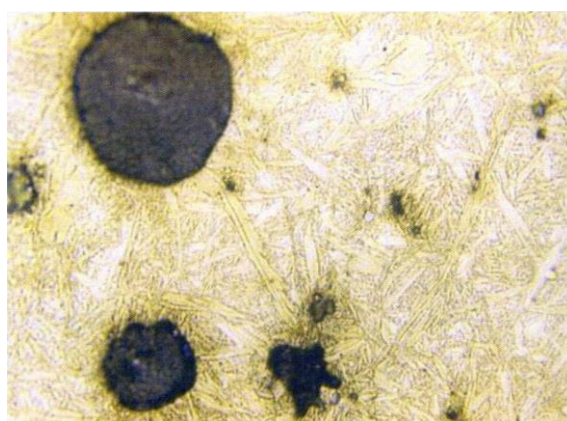
Obr. 7 Snímek feritické struktury LKG [3]



Obr. 8 Snímek feriticko-perlitické struktury LKG [3]



Obr. 9 Snímek perlitické struktury LKG [3]



Obr. 10 Snímek martenzitické struktury LKG [3]

Výroba LKG byla patentována v roce 1948. Ve srovnání s ocelovými odlitky má řadu výhodných technologických vlastností, kterými jsou menší spotřeba energie při tavení, nižší lící teploty, vyšší přesnost a kvalita povrchu odlitků a nižší náklady na výrobu forem, tepelné zpracování a obrábění. V některých případech mohou odlitky z LKG nahrazovat kované nebo válcované součásti (kontinuálně lité profily). [3]

Na rozdíl od litiny s lupínkovým grafitem je LKG spojena se zvýšením ceny odlitku. Má však vyšší pevnost a houževnatost. Proto se hojně využívá na výrobu kanalizačních a vodovodních trub místo LLG. [3]

2.2.4 Litina s vločkovým grafitem

Litina s vločkovým grafitem, neboli temperovaná litina, obsahuje kromě uhlíku také křemík, mangan, fosfor a síru, kde uhlík a křemík má takový obsah, že litina tuhne metastabilně jako bílá litina, tj. bez grafitu. Uhlík je zde vázán ve formě karbidu železa Fe_3C . Následným tepelným zpracováním, které se nazývá temperování, získává materiál lepší houževnatost a obrobitelnost. Během tohoto procesu se dosáhne úplného rozpadu cementitu ledeburického, částečného nebo úplného rozpadu cementitu perlitického a vyloučení grafitu ve tvaru vloček. [1] [3]

Ve srovnání s litinou s lupínkovým grafitem má temperovaný grafit v kovové matici menší vrubový účinek. Díky tomu má litina zvýšené deformační charakteristiky, zejména tažnost. Proto je vhodná pro dynamicky namáhané součásti odolávající vibračnímu nebo rázovému zatížení. Má také dobrou žáruvzdornost, ořevzdornost a rozměrovou přesnost. Má proto široké využití. Používá se například v automobilovém průmyslu, ve výrobě nástrojů ve strojírenství, v elektroprůmyslu, ve stavbě potrubních sítí a ve stavebnictví. [1]

Dle postupu temperování a chemického složení lze tyto litiny rozdělit na temperované litiny s bílým lomem, které se temperují v oduhličujícím prostředí, a temperované litiny s černým lomem, temperované v neoduhličujícím prostředí. Orientační chemické složení obou druhů litiny s vločkovým grafitem je uvedeno v tab. 4. [1]

Tab. 4 Orientační chemické složení temperované litiny s bílým a černým lomem [1].

Druh temperované litiny	% C	% Si	% Mn	% P	% S
Temperovaná litina s bílým lomem	3,0 - 3,4	0,8 - 0,4	0,4 - 0,6	max. 0,1	0,12 - 0,25
Temperovaná litina s černým lomem	2,3 - 2,6	1,2 - 1,5	0,4 - 0,5	max. 0,1	0,10 - 0,15

Označování, výrobu, doporučené mechanické vlastnosti a zkoušky temperovaných litin popisuje norma ČSN EN 1562. [9] [10]

2.3 Maková litina

U makových litin je ve struktuře přítomen jak eutektický grafit, tak i současně cementit. Tvoří tedy přechod mezi grafitickou a bílou litinou. Makové litiny jsou někdy také označovány jako melírované nebo polovičaté. [3]

2.4 Tvrzená litina

U tvrzené litiny je v litém stavu plně zvládnut proces krystalizace za zvláštních podmínek ochlazování. Na povrchu je materiál ochlazován rychleji, přičemž je plně potlačena tvorba grafitového eutektika. Tím na povrchu vznikne vrstva bílé litiny s metastabilním ledeburitem. Ta postupně přechází přes makovou litinu do jádra, které je ochlazováno pomaleji a tvoří ho buď litina s lupínkovým, nebo kuličkovým grafitem. Rychlejšího chladnutí je docíleno odléváním do kovových forem – kokil nebo jsou do lící formy vložena chladítka. Povrch tvrzené litiny, tvořený cementitem a perlitem, je potom tvrdý a odolný proti opotřebení, zatímco jádro je měkké a v případě LKG i houževnatější. [1]

Tento druh litiny se používá převážně na výrobu litých válců pro válcovací stolice, vačkové hřídele, zdvihátka ventilů spalovacích motorů apod. [1]

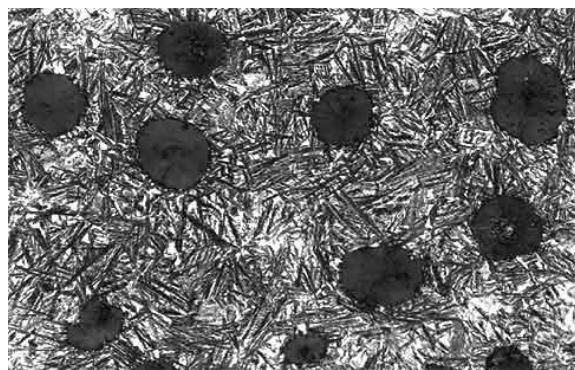
2.5 ADI litina

ADI litiny (Austempered Ductile Iron) (obr. 11) jsou též označovány jako izotermicky zušlechtnuté litiny s kuličkovým grafitem. Jedná se o materiály vyznačující se mimořádně vysokou pevností a houževnatostí struktury. [3]

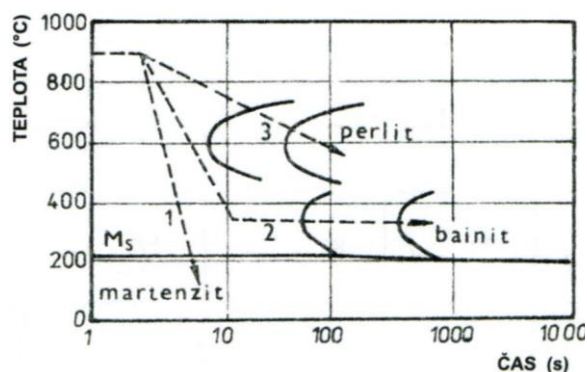
Výroba ADI litiny, jak už její název napovídá, spočívá v izotermickém zušlechťování, jehož průběh představuje křivka 2 na obr. 12. Nejprve se LKG ohřeje (nejlépe v solné lázni) na teplotu 850 – 950°C. Poté dochází k austenitizaci, tj. přeměně původní struktury na austenitickou. Po vytvoření austenitických zrn ve struktuře je odlitek rychle přesunut do druhé solné lázně s teplotou 250 – 450 °C, přičemž nejprve dochází k přeměně austenitu na strukturu austeniticko-feritickou, která je označována jako ausferit a má vysokou houževnatost. Delší setrvání na této teplotě by potom vedlo k vyloučení karbidů a tím k tvorbě bainitu, což bývá nežádoucí. [1] [3] [12]

Vlastnosti ADI litin jsou srovnatelné s vysokopevnostními oceli a svou cenou konkurují výkovkům. Jejich pevnost je v rozmezí 800 až 1400 MPa. Z ADI litin jsou vyráběny odlitky o hmotnostech desítek gramů až do několika set kilogramů. [12]

Odlitky z ADI litiny mají též dobrou odolnost proti opotřebení. Proto jsou vhodné například na výrobu dílů strojů na úpravu surovin v těžebním průmyslu. Dále také na armatury, pancéřové pokladny (trezory) apod. [3] [12]



Obr. 11 Struktura ADI litiny [11]



Obr. 12 Tepelné zpracování LKG: 1 – kalení na martenzit, 2 – izotermické zušlechťování, 3 – žihání na perlit [3]

3 Tavení grafitických litin

Zařízení pro tavení litin by mělo zajišťovat dosažení dostatečně vysoké teploty roztaveného kovu, která se pohybuje v rozmezí 1450 – 1550 °C. Dále zajistit dosažení požadovaného chemického složení kovu, stejnoměrnost struktury, dosažení požadovaného tvaru grafitu, obsahu plynů a výsledných mechanických vlastností odlitků. [2]

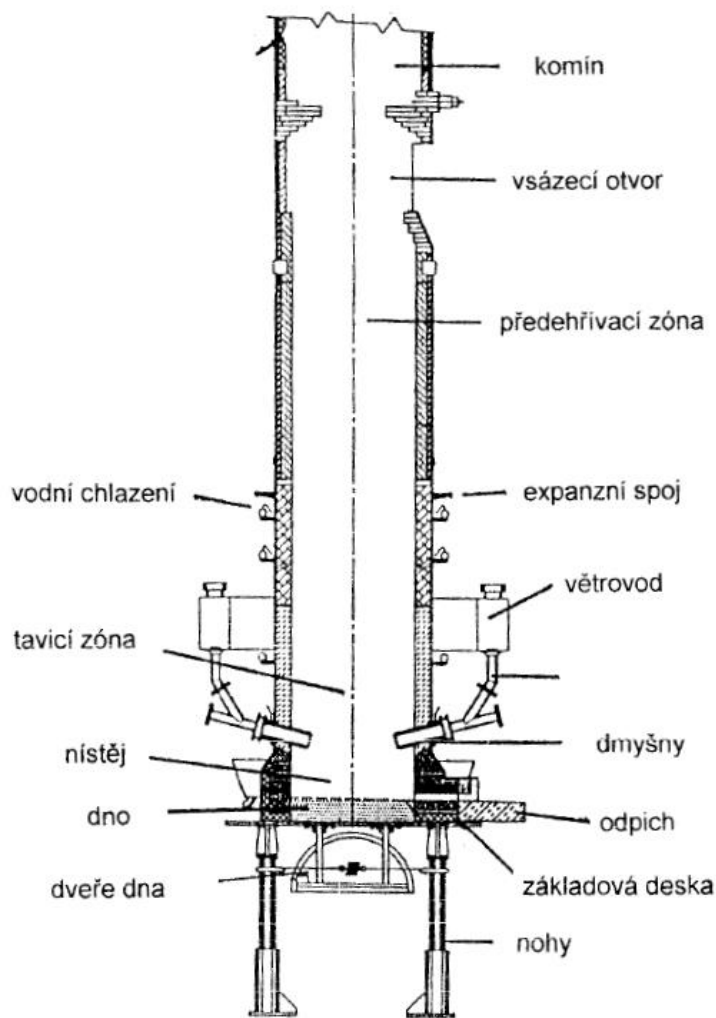
Pro tavení litin se používají kuplovny, elektrické indukční pece, elektrické obloukové pece a bubnové pece. V následujících kapitolách bude stručně popsán jejich princip, popřípadě výhody a nevýhody. [2]

3.1 Kuplovna

Jedná se o šachtovou pec se žáruvzdornou vyzdívkou, v jejíž spodní části, nazývané nístěj, dochází k ohřívání kovové vsázky spalováním koksu. Na obr. 13 je schéma kuplovny pro tavení litiny. [13]

Nejprve je vsázcím otvorem v horní části šachty do kuplovny dodáván kov v podobě surového železa a ocelového odpadu, koks, legující prvky (FeSi, SiC), struskotvorná činidla (SiO_2) a tavidla (např. CaCO_3). Dmyšny ve spodní části jsou vháněny do kuplovny spalovací plyny, které předávají vsázce teplo a opouštějí pec komínem. Kov se začíná tavit. Koks, který je využíván jako palivo a redukční činidlo, hoří za přítomnosti kyslíku. Kov po kapkách protéká skrz koksové lože a je shromažďován v nístěji. Na jejím povrchu je struska, na níž jsou zachycovány nečistoty. Viskozita a teplota tavení strusky je snížena tavidly. Při dosažení určité hladiny tekutého kovu je otevřen odpichový otvor a litina vytéká do pánve kanálem nebo odpichovým žlabem. [13]

Struska je sbírána zvlášť přes výpust' strusky, která se nachází nad odpichem kovu a je granulována nebo se sbírá do nádob. Odebranou strusku je dále možno využít například ve stavebnictví jako přísada do cementu nebo jako posypový materiál pro zimní údržbu komunikací. [13] [14] [15]



Obr. 13 Schéma kuplovny [2]

3.2 Elektrická indukční pec

Princip tavení litiny v elektrických indukčních pecích (EIP) spočívá v působení magnetického pole, vznikajícího v indukční cívce, ve které prochází střídavý proud. Tato cívka je umístěna v části zařízení zvaném induktor. Podle umístění induktoru se pece dělí na: [2]

- Kelímkové pece (obr. 14)
- Kanálkové pece (obr. 15)

Dalším rozdělením indukčních pecí je z hlediska velikosti používané frekvence proudu na: [2] [16]

- Vysokofrekvenční (nad 10 000 Hz)
- Středofrekvenční pece (250 – 1000 Hz)
- Pece na síťovou frekvenci (50 Hz)

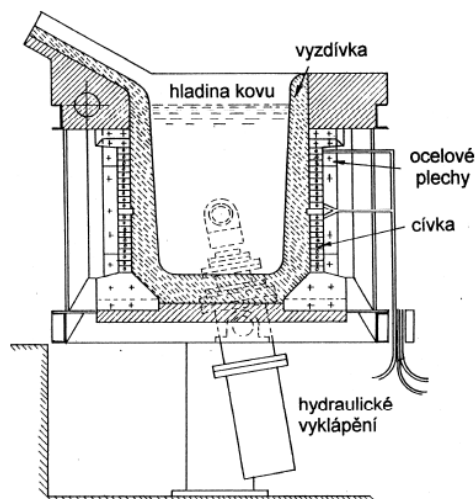
Tavení v elektrických indukčních pecích má řadu ekologických, metalurgických a provozních výhod, mezi které patří například velká variabilita vsázkových surovin a možnost tavení i ze 100 % ocelové vsázky. Elektrické míchání urychluje metalurgickou reakci mezi taveninou a struskou. Také může napomáhat k odstraňování nekovových vměstků a plynů v tavenině. Je zde možnost dosažení vyšších homogenních teplot a homogenního chemického složení roztaveného materiálu. Díky malé jednotkové ploše povrchu lázně jsou zde menší propaly prvků, což vede k vysoké míře využití materiálu. Jednoduché nastavení výkonu a teploty zaručuje přesnou regulaci požadované teploty. V neposlední řadě je zde oproti kuplovnám mnohem menší množství plynných a prachových exhalací a možnost jejich snadnějšího zachycování. [2] [17]

Mezi nevýhody EIP patří nižší teplota strusky, neboť nemůže být ohřívána indukcí, ale pouze taveninou, a malá životnost kelímku. [17]

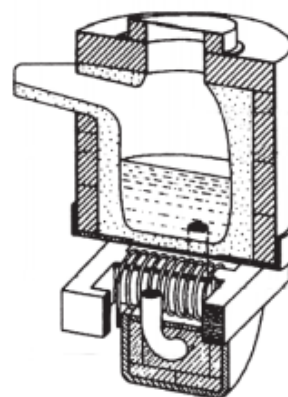
3.3 Elektrická oblouková pec

Elektrické obloukové pece (EOP) nejsou typickým agregátem pro tavení litin. Převážně je využívaly pouze ocelárny, které začaly později vyrábět kromě oceli i odlitky z LKG. Speciálně pro litiny se ale neinstalují. [2]

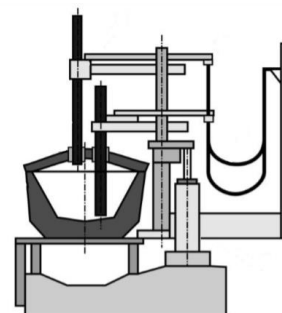
EOP jsou obvykle sklopné třífázové pece na střídavý proud, které mají vsázení horem. Ohřívání taveniny je za pomoci elektrického oblouku, který hoří mezi grafitovými elektrodami a vodivou vsázkou. Schéma EOP je znázorněno na obr. 16. V praxi se lze setkat převážně s pecemi s přímým obloukem a se třemi elektrodami, jejichž pohyb je automatizován. Pec je



Obr. 14 Indukční kelímková pec [2]



Obr. 15 Indukční kanálková pec [18]



Obr. 16 Schéma EOP [19]

vyzděna žáruvzdorným materiálem v podobě cihel na bázi magnezitu. Vnější část je ze svařovaných nebo nýtovaných plechů. EOP je potom umístěna v kolíbce, která umožňuje nakládění pece. [13] [20]

U pece se ještě nachází manipulační prostor s dvířky, pro stahování strusky, sázení struskotvorných přísad, sázení feroslitin a pro další technologické operace. [19]

Zdrojem elektrického proudu je pecní transformátor, který převádí elektrické napětí ze sítě 22 kV na cca 100 – 220 V pro menší a středně velké typy pecí. U velkých pecí až na 600 V. [19]

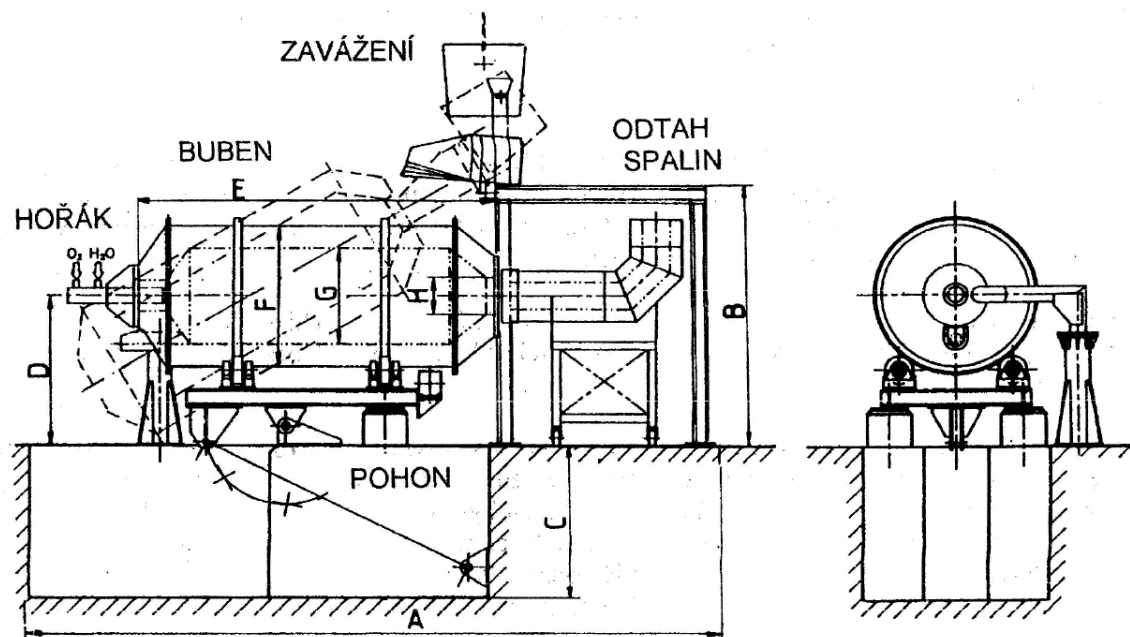


Obr. 17 Elektrická oblouková pec [21]

Na obr. 17 je příklad elektrické obloukové pece z německé kovárny a ocelárny Gröditz. [21]

3.4 Bubnová pec

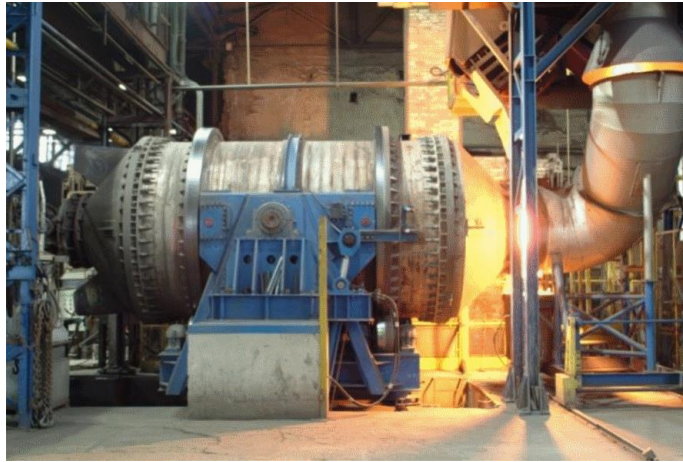
Další způsob tavení litiny je pomocí bubnové pece (obr. 18 a obr. 19). Někdy se také používá její alternativní název rotační plynová pec, neboť zdrojem tepla pro tavení je kyslíko-palivový hořák, který obvykle využívá zemní plyn. Tento hořák je umístěn ve středu čelní stěny pece, vyzděné žáruvzdornou vyzdívkou na bázi SiO_2 . [22]



Obr. 18 Schéma rotační bubnové pece [2]

Vsázka se skládá z 30 – 50 % surového železa. V případě tavení LKG je podíl surového železa vyšší, zatímco u LLG je nižší. Zbytek vsázky tvoří vratný materiál, jako je litinový a ocelový odpad. Dále je do vsázky přidáváno cca 0,5 – 1 % vápence, který váže oxidy vzniklé z opotřebené vyzdívky a z propalu prvků (např. Si, Mn) do strusky. [2]

Přenos a rozvod tepla je uskutečňován pomalým otáčením pece. Na konci procesu tavení se hořák vysune a odklopí, pec se natočí směrem k pánvi a tavenina se vylije do pánve. Struska, která díky své nízké tekutosti plave na kovové lázni, je za rotace odstraněna do nádoby na vozíku pod pecí. [13]



Obr. 19 Rotační bubnová pec [22]

4 Modifikace grafitických litin

Modifikací se rozumí metalurgické zpracování taveniny litiny za účelem vyloučení grafitu ve tvaru kuliček. K tomu je zapotřebí, aby obsah zbytkového hořčíku v litině byl nejméně 0,025 %. Obvyklé množství je 0,030 – 0,060 % Mg_{zbyt} . Vliv Mg_{zbyt} na tvorbu kuličkového grafitu bude později popsán v kapitole 4.4 Průběh modifikace. Hořčík není jediným prvkem, který vytváří sferoidizaci grafitu v litině. Tento účinek mají také Ca a kovy vzácných zemin (Ce aj.). Mají však slabší účinek než Mg a jejich aplikace je problematická. Proto je hořčík jediným technicky vhodným modifikačním prvkem. Hořčík má však tu nevýhodu, že jeho modifikační účinek rychle slábne. Proto je nutné, aby modifikovaná litina s kuličkovým grafitem byla odlita v co nejkratším časovém intervalu (doporučuje se 10 až 15 min.). [2] [4] [13]

Současně s modifikací nebo po modifikaci se ještě doporučuje provést očkování předslitinami FeSi. Jinak by výsledná neočkováná LKG měla velké kuličky grafitu, hrubou strukturu a, jelikož hořčík mimo jiné potlačuje vylučování grafitu, měla by litina sklon k metastabilnímu tuhnutí. [2] [4]

4.1 Historie modifikace

Počátek historie výroby litiny s kuličkovým grafitem se datuje do roku 1946, kdy američan Henton Morrogh z bývalé britské asociace British Cast Iron Research Association zjistil, že přidáním malého množství ceru do taveniny litiny lze získat podobnou mikrostrukturu jako u litiny s kuličkovým grafitem už během lití. 7. května 1948 na slévárenském kongresu AFS ve Philadelphii pak předkládá referát o patentované výrobě LKG pomocí Ce, kde byl kuličkový grafit vyloučen v nadeutektické LLG. [23] [24] [25]

Patent na modifikaci litiny pomocí Mg byl udělen v roce 1947 američanům K. D. Millis, A. P. Gangebin a N. P. Pilling, což pomohlo průmyslovému využití LKG ve světě i u nás. První průmyslová tavba LKG byla provedena 4. února 1948 ve společnosti Cooper-Bessemer Corp. v Mount Vernonu v Ohiu. [25]

U nás se výroba LKG zahájila v několika závodech už v roce 1948. Ve Státním výzkumném ústavu materiálů (SVÚM) v Brně v letech 1951 až 1953 byla provedena zkušební výroba kuličkového grafitu pod tlakem v autoklávu a v podniku TOS Kuřim v tlakových pánvích s použitím čistého Mg podle patentu V. Otáhala. Poté se výroba tohoto materiálu začala prudce rozšiřovat do dalších závodů, jako jsou například Vítkovické železárny Ostrava, ČKD Praha, ŠKODA Plzeň, Moravské železárny Olomouc a ČSD Plzeň, přičemž každý podnik využíval jiné výrobní postupy. [25]

Zaměříme se například na historii výroby LKG v závodech ČKD Praha a Vítkovické a Třinecké železárny. V podniku Českomoravská-Kolben-Daněk v Praze (ČKD Praha), byla litina modifikovaná ponořovacím způsobem čistého Mg do taveniny v uzavřené bubnové pánvi, přičemž byl výchozí materiál taven v kyselé kuplovně. Po roce 1967 se začalo díky vyšší produkci odlitků tavit v obloukové peci se zásaditou vyzdívkou. Díky dosažení výchozího obsahu S pod 0,015 % potom bylo možné z ekonomických důvodů použít jako modifikátor předslitinu FeSiMg s 5 – 6 % Mg. Modifikace byla prováděna ve speciální štíhlé pánvi. Až potom se přešlo na výrobu odlitků metodou inmold a trigger. U výroby LKG způsobem trigger byla předslitina na dně pánve zakryta karbidem vápníku. V roce 1975 byla v ČKD Praha uskutečněna první modifikace LKG hořčíkem v plněném profilu. [25]

Co se týče Vítkovických železáren v Ostravě, výchozí LLG se v roce 1952 až 1954 tavila v kuplovně vyzděné forsteritem, díky čemuž bylo možno dosáhnout nízkého obsahu S. Jako modifikátor se používal upravený Mg plněný do „kovových patron“. Proces byl prováděn v protáhlé hrncové pánvi. V roce 1970 se začala využívat polévací metoda s NiMg. V současnosti se modifikace touto předslutinou z důvodu její vyšší ceny už moc nepoužívá. Lze se s ní setkat spíše u vysokolegovaných niklových litin. [3] [25]

Ve Třineckých železárnách se v roce 1954 LKG začala získávat ponořovací metodou pomocí čistého Mg. V roce 1968 byla zahájena výroba odlitků kol pro důlní průmysl modifikací v jednotunovém autoklávu čistým Mg. Nyní se již tento způsob modifikace v Třineckých železárnách nepoužívá. V roce 2009 se modifikovalo předslutinou FeSiMg s 15 – 18 % Mg a specificky upraveným polévacím postupem metodou Tundish s tím, že se připravovala technologie úpravy litiny pomocí plněného profilu. [25]

4.2 Používané modifikátory

Existují různá složení modifikátorů, jejichž použití závisí především na způsobu výroby LKG. [22]

Nejčastěji se k modifikaci používá předslitina FeSiMg, která tvoří až 58 % světové výroby tvárné litiny. Její koncentrace hořčíku se pohybuje v rozmezí 5 – 35 %. Spíše výjimečně se lze setkat také s modifikací předslutinou NiMg. Jak už bylo dříve zmíněno, modifikovat lze také prvky vzácných zemin, jejichž modifikační účinek je však menší než u hořčíku. Při vysokém obsahu KVZ (ale také Si, Ni nebo Ca) však může vznikat tzv. chunky grafit. Jedná se o grafit netvořící kompaktní kuličky, ale spíše „rozsypané“ částice. [2] [22]

V Rusku byl například nedávno proveden výzkum zvýšení životnosti litinových brzdových destiček u vagónů na železnici Dálného východu modifikací pomocí Zr. Následně byla měřena pevnost těchto destiček v ohybu. Bylo zjištěno že, takto upravená litina měla asi o 30 % vyšší provozní životnost, než litina nemodifikovaná (LLG). [26]

Nejčastěji používaným prvkem je hořčík. Čistý hořčík má stříbřitě bílou lesklou barvu. Je poměrně měkký, lehký a má hexagonální krystalovou mřížku. V tab. 5 jsou uvedeny jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. [1] [27]

Tab. 5 Základní mechanické a fyzikální vlastnosti čistého Mg [1] [2] [27].

Mechanické nebo fyzikální veličiny	Hustota	Teplota tání	Teplota vypařování	Pevnost v tahu	Tvrdość podle Mohse	Elektrodový potenciál
Jednotky	[kg.m ³]	[°C]	[°C]	[MPa]	[-]	[V]
Hodnoty	1740	650	1107	190	2,5	-2,372

Hořčík má silnou afinitu ke kyslíku a k síře. Při jeho zapálení na vzduchu hoří bílým a intenzivním plamenem za vzniku oxidu hořečnatého (MgO), případně také nitridu hořečnatého (Mg₃N₂). Mg má poměrně velký záporný elektrodový potenciál (tab. 5). Řadí se proto mezi neušlechtilé kovy. [2] [27]

Modifikace čistým Mg není tak častá, neboť, jak už lze vidět z tab. 5, hořčík má nízkou teplotu vypařování. Důsledkem je bouřlivá reakce s horkou taveninou litiny, která má min. 1150 °C. Proto, jak už bylo dříve zmíněno, se většinou využívají předslitiny FeSiMg. Čistý hořčík se k modifikaci používá spíše jen u metod, kdy je možno omezit nebo regulovat

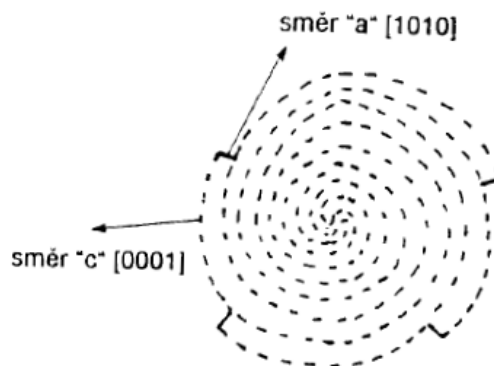
bouřlivost této reakce. Takovými metodami mohou být např. modifikace ve sferoklávu nebo +GF+ konvertoru. [2] [3]

4.3 Mechanismus růstu grafitového eutektika

O mechanismu růstu grafitického eutektika existuje spousta teorií. Dle Elliota je grafit v ideálních podmínkách v systému Fe-C-Si vyloučen ve formě kuliček. Lupínky jsou vyloučeny až vlivem určitých nečistot v materiálu, které z tuhnutí kovu segregují do okolní taveniny, čímž dochází ke změně povrchového napětí mezi taveninou a grafitem. To má za následek změnu energetické náročnosti růstu grafitu v určitých směrech a ovlivnění mechanismu jeho dalšího růstu. [2]

Významný vliv na sferoidizaci grafitu mají globulizační prvky (Mg, Ce, Ca, Na apod.), které se mohou vázat na prvky antiglobulizační (Pb, Bi, Ti, O, S apod.) a vykompenzovat tak jejich účinek, což je využíváno při výrobě LKG. Globulizační prvky mají navíc velkou afinitu k S a O. [2]

Jedna z teorií růstu eutektika s kuličkovým grafitem popisuje model tvorby grafitu obvodovým růstem po spirále (obr. 20) jako následek sloučení globulizačních prvků s dvěma povrchově aktivními prvky: S a O. Dochází přitom ke zvýšení povrchových napětí na tzv. prizmových plochách (tj. různoběžné plochy krystalové mřížky, jejichž společné hrany jsou navzájem rovnoběžné) a tím ke zhoršení podmínek ke spirálovému růstu ve směru „a“ [1010], čímž se naopak zlepšují podmínky pro růst grafitu ve směru „c“ [0001]. [2] [28]



Obr. 20 Model spirálového růstu grafitu sbalováním lamel po obvodu kuličky [2]

4.4 Průběh modifikace

Kvůli snížení ztrát Mg při modifikaci, je před samotným modifikačním zpracováním litiny důležité dodržet nízký obsah síry ve výchozí tavenině na hodnotě cca 0,01 % S. Síra se totiž slučuje s Mg za vzniku sulfidu hořečnatého (MgS) (4.1), který se potom rozptýluje v tavenině, nebo vyplouvá a tvoří tzv. sekundární strusku. 0,75 % Mg tak odstraní 1 % S. [2] [3]

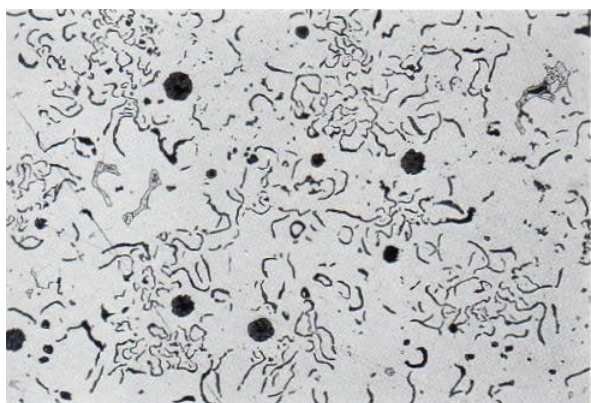


Jako modifikátor pak působí v tavenině pouze nezreagovaný hořčík, tzv. zbytkový. Velké množství modifikační předslitiny FeSiMg za účelem snížení obsahu S však zvyšuje náklady na výrobu LKG a vhání do taveniny velké množství křemíku. Z tohoto důvodu se před modifikací taveniny ještě provádí její odsířování a to nejčastěji karbidem vápníku (CaC₂). Modifikuje-li se pouze čistým Mg, může být výchozí obsah S až 0,1 % i více. Je však potřeba brát na vědomí skutečnost, že čím vyšší je obsah Mg, tím je reakce bouřlivější. [2] [3]

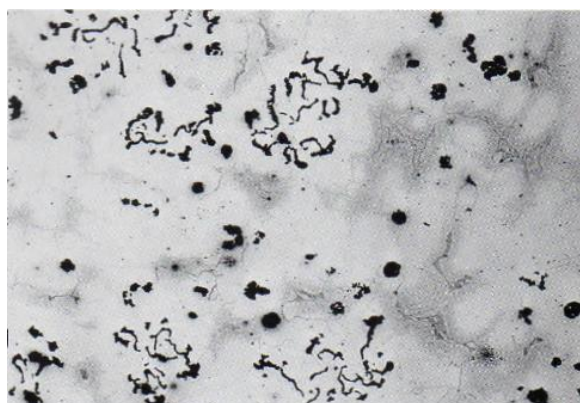
Hlavním problémem při modifikaci je teplota varu Mg, která je 1107 °C a tudíž je nižší než teplota samotné taveniny. Dochází tedy přitom k vypařování Mg, kvůli čemuž se obtížně zaručuje dosažení požadovaného obsahu 0,03 – 0,06 % Mg. Existují proto různé metody a

patenty, kterými lze reaktivitu hořčíku omezit nebo utlumit. Některé z těchto výrobních metod budou později rozebrány v následující kapitole 4.5 Metody modifikace. FeSiMg je nejčastějším prostředkem k modifikování taveniny. [3]

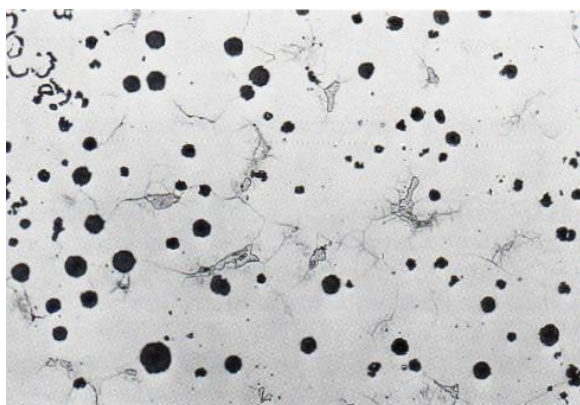
Část Mg tedy z taveniny unikne v podobě par, které shoří na hladině. Další část, nazývaná zbytkový hořčík (Mg_{zbyt}), se rozpustí v kovu. Mg_{zbyt} je tedy částí modifikátoru, která má vliv na tvorbu kuličkového grafitu. Obsah Mg_{zbyt} musí být větší než 0,03 %. Na obr. 21-24 je znázorněna mikrostruktura litiny s různým množstvím zbytkového hořčíku. U tenkostěnných odlitků postačuje obsah zbytkového hořčíku mírně nad 0,03 %. U silnostěnných odlitků 0,045 až 0,06 % Mg_{zbyt} . V případě obr. 21-24 bylo pro vyloučení grafitu ve tvaru ideálních kuliček zapotřebí minimální množství 0,035 % Mg_{zbyt} . Při výrobě LČG je rozmezí zbytkového hořčíku 0,015 – 0,025 % (což dokazuje i mikrostruktura na obr. 21), přičemž se doporučuje hodnota kolem 0,018 % Mg_{zbyt} . Tento interval je poměrně úzký. Je proto technicky velmi obtížné ho dodržet. Nicméně červíkový grafit lze získat i jinými způsoby, mezi které patří například modifikace kovy vzácných zemin (Ce apod.). Příliš vysoký obsah Mg_{zbyt} způsobuje více vměstků v tavenině a větší sklon kovu k zákalce. [2] [29] [30]



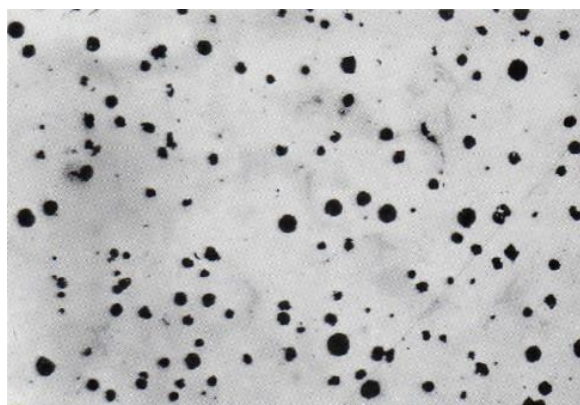
Obr. 21 Mikrostruktura litiny s 0,025 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]



Obr. 22 Mikrostruktura litiny s 0,029 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]



Obr. 23 Mikrostruktura litiny s 0,032 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]



Obr. 24 Mikrostruktura litiny s 0,038 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]

Množství potřebného modifikátoru lze přibližně zjistit pomocí zjednodušeného vzorce: [2]

$$m_{mod} = \frac{Mg_{zbyt} + \% S}{\eta_{Mg} \cdot Mg_{pred}} \cdot 100 \cdot 100 \quad (4.2)$$

kde: m_{mod} – množství modifikačního prostředku [%]

Mg_{zbyt} – zbytkový obsah hořčíku v litině [%]

S – obsah síry v modifikovaném kovu [%]

Mg_{pred} – obsah hořčíku v předslitině [%]

η_{Mg} – využití hořčíku [%]

Účinek modifikátoru časem slábne. Tento jev je nazýván odeznívání modifikačního účinku. Důvodem je především vypařování hořčíku z taveniny. Proto je důležité, aby byl kov odlit ještě v době, kdy je modifikační účinek dostatečně silný pro vznik kuličkového grafitu (tj. obvykle 15 – 20 min.). Při delším odstátí taveniny po její modifikaci by jinak mohl vzniknout nedokonale zrnitý grafit. Výsledným materiálem by potom byla vermikulární litina. [2]

Konečným produktem po modifikaci je surová LKG, která by ale po ztuhnutí vykazovala nízký počet nedokonale tvarovaných grafitových zrn s vysokým podílem cementitu ve struktuře. Proto, jak už bylo dříve zmíněno, je potřeba provést grafitizační očkování modifikované taveniny. To se provádí nejčastěji očkovačkou na bázi Si (např. ferosilicium FeSi75). [3]

4.5 Metody modifikace

Existuje široká škála různých metod modifikace litiny, které se liší způsobem vnášení modifikačního prostředku do taveniny, druhem používaného modifikačního prostředku, svojí produktivitou a pořizovacími a provozními náklady. V následujících kapitolách budou podrobněji rozebrány pouze nejdůležitější z nich. [4]

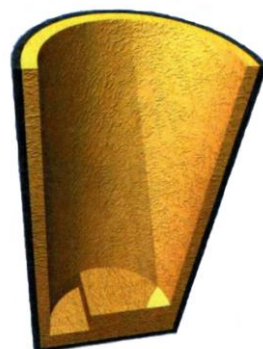
Tyto metody lze v zásadě rozdělit na *polévací* (např. SANDWICH, TUNDISCH) a *ponořovací* (např. pomocí plněného profilu, modifikace ve sferoklávu). U polévacích metod je modifikátor umístěn v pánvi, nejčastěji ve speciální komůrce, kdy je tavenina přes tento modifikátor do pánve přelévána. Ponořovací metody bývají zpravidla investičně náročnější. Modifikátor zde může být ponořován do taveniny například pomocí ponorných zařízení, přičemž se často využívá zvýšeného tlaku okolní atmosféry, který sníží bouřlivost reakce, a tak je možno pracovat s prostředky s vyšší koncentrací Mg. [2] [4]

Dalším možným rozdělením je na metody *průtočné* (např. Inmold) a *neprůtočné*, přičemž tavenina u průtočných metod kontinuálně protéká přes modifikační prostředek. V případě metod neprůtočných je modifikace uskutečňována v celé zpracované dávce současně. [4]

4.5.1 Metoda SANDWICH

U této metody je předslitina Mg umístěna v komůrce na dně otevřené pánve. Tato komůrka je provedena buď jako prohlubeň, nebo od ostatního prostoru oddělena keramickou příčkou. Na ní je potom uložena vrstva očkovačla FeSi a překryta ocelovým plechem nebo plechovými odštířky, které zamezí vyplavení modifikátoru a očkovačla na kladinu roztaveného kovu a tím se oddálí začátek modifikace. Mezitím, než kov protaví ocelový plech, se pánev stihne naplnit. [2]

Často se používají speciální štíhlé a vysoké pánve (obr. 25), díky kterým vzniká velký metalostatický tlak taveniny, jenž bouřlivost reakce zmírní. Během procesu modifikace dochází nejen ke ztrátám teploty (30 – 50 K), ale také obsahu uhlíku (asi 0,05 – 0,1 % C). [2]



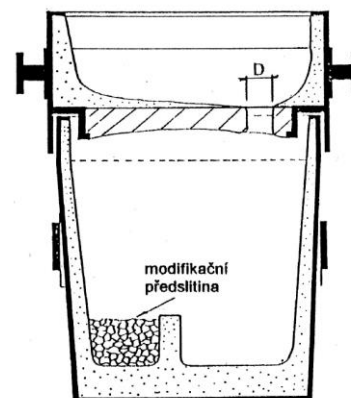
Obr. 25 Řez pánví pro metodou SANDWICH [3]

4.5.2 Metoda TUNDISH

Metoda TUNDISH je vylepšená metoda SANDWICH. Nejprve se do komůrky na dně pánve umístí předslitina FeSiMg (obr. 26). Poté je pánev zakryta víkem s licí jamkou a nalévacím otvorem, který je umístěn tak, aby kov protékající tímto otvorem do pánve padal mimo komůrku. Je důležité, aby víko bylo během procesu modifikace pevně zajištěno k pánvi, aby nedošlo tlakem plynů k jeho odklopení. [2] [13]

Uvedený způsob modifikace litiny má oproti metodě SANDWICH řadu výhod. Díky tomu, že se nemodifikuje v otevřené pánvi, se omezí během reakce množství kyslíku uvnitř pánve. Tím pádem dojde k výraznému snížení vznikajícího kouře, který nemůže unikat do okolní atmosféry a zůstává v pánvi, čímž se omezí množství plynných exhalací. Metoda TUNDISH má rovněž minimální investiční náklady a je účinnější než předchozí metoda, neboť dochází během oxidace k menším ztrátám Mg v tavenině. Dále se sníží i teplotní ztráty a ztráty rozstříkem kovu. [2] [30]

V současnosti se jedná o nejpoužívanější polévací metodu. Například v USA je modifikace v TUNDISH pánvi prováděna ve 40 % sléváren tvárné litiny. [2] [30]



Obr. 26 Pánev pro modifikaci metodou TUNDISH [2]

4.5.3 Modifikace ve sferoklávu

Sferokláv je autokláv (tj. tlaková uzavíratelná nádoba určená pro reakce probíhající za zvýšeného tlaku a teploty) sloužící pro sferoidizační zpracování taveniny. Jeho schéma je znázorněno na obr. 27. Tento proces je prováděn za zvýšeného tlaku 0,4 – 1,0 MPa, přičemž se tavenina umístí do nádoby sferoklávu. Následně je víko nádoby uzavřeno, dojde k vytvoření přetlaku a k ponoření zvonu s předslutinou a očkovačem do taveniny. Tlak uvnitř nádoby je během procesu měřen kontrolním manometrem. [2] [22] [31]

Vysoký tlak uvnitř nádoby způsobí, že reakce vypařování Mg je pomalejší, než kdyby se proces prováděl za atmosférického tlaku. Díky tomu lze modifikovat čistým hořčíkem nebo předslitiny s vyšším obsahem hořčíku. [2] [22]

Výhodou této metody je malé nebo žádné vnášení křemíku do taveniny, a proto lze bez problémů přetavovat vratný materiál s vysokým obsahem Si. [2]

Velkou nevýhodou jsou však velké investiční a provozní náklady. Vzhledem k tomu, že jde o modifikaci pod tlakem, která podléhá přísným provozním předpisům, je dále potřeba provádět periodické kontroly pánve. [2] [22]

4.5.4 Modifikace v +GF+ konvertoru

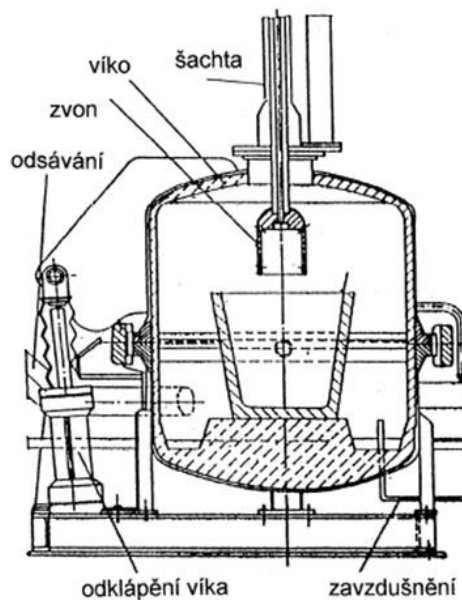
Technologie modifikace kovu pomocí +GF+ konvertoru byla vyvinuta v letech 1968 až 1970 ve Švýcarsku. Proces je prováděn ve válcové žáruvzdorné nádobě konvertoru, která je schopna téměř 180° rotace kolem své osy. Uvnitř konvertoru je modifikační komůrka, která je od okolního prostoru oddělena grafitovou deskou s několika otvory. Velikost a počet těchto otvorů hraje významnou roli při procesu modifikace, neboť ovlivňuje rychlost reakce. Do této komůrky je potom vložen čistý Mg, který taveninu modifikuje (obr. 28). [2] [30]

Nejprve je konvertor nacházející se ve vodorovné pozici naplněn pomocí nalévacího otvoru výchozí taveninou. Reakční komůrka se přitom nachází nad hladinou taveniny, aby se zamezilo styku mezi modifikátorem a roztaveným kovem. Po vložení čistého Mg do modifikační komůrky se všechny otvory v konvertoru hydraulicky uzavřou. Poté se nádoba otočí do svislé polohy, čímž se kov dostane otvory do komůrky, a začne probíhat reakce taveniny s Mg. Proces modifikace se často pohybuje od 1 do 2 minut, v závislosti na velikosti dávky a uspořádání otvorů v komůrce. Když je reakce u konce, je konvertor otočen do lící polohy a obsluha otevře nalévací otvor, kterým se zpracovaný kov vyleje z nádoby do pánve. [2] [30]

Před dalším procesem modifikace je nezbytné reakční komůrku a otvory v grafitové desce řádně očistit od zbytků kovu a strusky. [30]

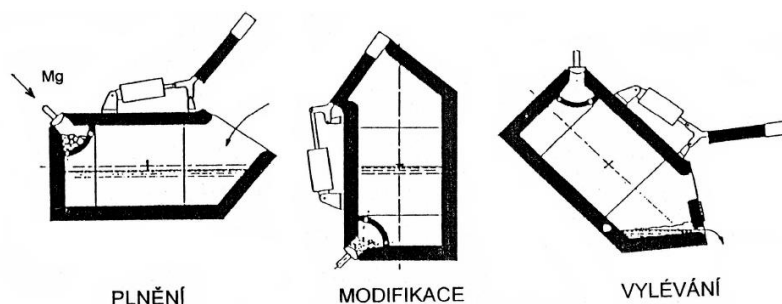
Využití hořčíku se přitom pohybuje mezi 50 a 70 %. [2]

Výhodami této metody je poměrně klidný průběh modifikace a vzhledem k tomu, že se modifikuje čistým Mg, lze zpracovávat také kov s vysokým obsahem S (např. litina tavená v kyselé kuplovně). Tím odpadá nutnost nechat výchozí taveninu ještě před procesem modifikace odsířit. [2] [30]



Obr. 27 Schéma modifikace ve sferoklávu [2]

Velikosti konvertorů jsou od 700 kg do 3 t. Aby nebylo zapotřebí provádět dodatečný ohřev a udržela se jejich dostatečná teplota, je nezbytné dodržet optimální frekvenci modifikačních cyklů (5 – 3 cykly za hodinu). To omezuje použití metody modifikace v +GF+ konvertoru pouze pro slévárny s velkou produkcí litinových odlitků. Další nevýhodou potom může být také náročnější očkování litiny po modifikaci, neboť, jak už bylo dříve zmíněno, je Mg antigrafitizačním prvkem a v modifikátoru nevystupuje žádný jiný prvek, který by podporoval vyloučení C v podobě grafitického eutektika. [2] [30]



Obr. 28 Schéma +GF+ konvertoru a jeho polohy při plnění, modifikaci a vylévání [2]

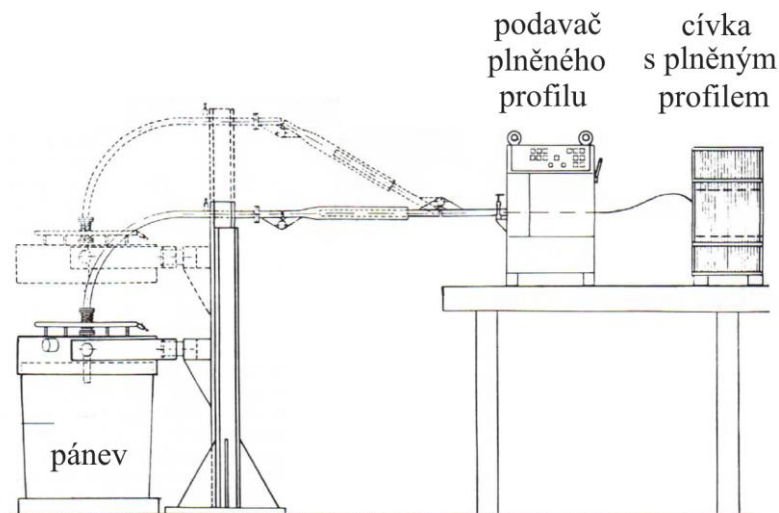
4.5.5 Modifikace plněným profilem

Tato metoda je poměrně jednoduchá a spolehlivá. Principem metody je injektování plněného profilu určitou rychlostí do roztaveného kovu tak, aby odtavování profilu probíhalo na dně pánve. Plněný profil představuje dutý drát o tloušťce ocelového obalu 0,2 až 0,5 mm plněný modifikátorem. Velikosti drátu se vyrábí v průměrech 3, 5, 8, 12 a 18 mm. [22]

První zmínka o této technologii modifikace se v literatuře objevila v roce 1975, ale kvůli různým problémům (např. použití málo spolehlivých zařízení pro podávání drátu) neměla prakticky žádné komerční využití. Navíc byly náklady na obalení drátu z čistého Mg do ocelového pláště příliš vysoké. [30]

Zájem o metodu modifikace plněným profilem přišel až v 80. letech 20. století. Došlo k vylepšení zařízení pro podávání drátu a profily se začaly plnit modifikátory v podobě prášků. Tímto způsobem bylo možno smíchat s Mg také jiné prvky, jako je např. karbid vápníku, ferosilicium nebo kovy vzácných zemin, čímž se zvýšilo využití modifikátoru. [30]

Současné využití Mg je 35 – 70 % v závislosti na obsahu síry, přičemž je výchozí obsah S neomezen. [22]



Obr. 29 Schéma automatizovaného procesu modifikace plněným profilem [30]

Metoda plněným profilem má řadu výhod, mezi které patří vysoká čistota kovů, snížení tepelných ztrát, snížení vzniku kouřových spalin při reakci, možnost automatizace procesu (obr. 29) apod. [30]

Mezi nevýhody potom patří vysoká cena plněného profilu, investiční náklady na pořízení podavače plněného drátu a pánve určité štihlosti s víkem a složitější očkování. Provádí-li se očkování současně s modifikací, je třeba zavést další plněný profil zvláště s očkovadlem. Kvůli tomu je konstrukce podavače navržena tak, aby bylo možno podávat 2 případně 3 profily zároveň. Jinak se očkování provádí až po skončení modifikace při přelévání kovu do lící pánve. [2] [22]

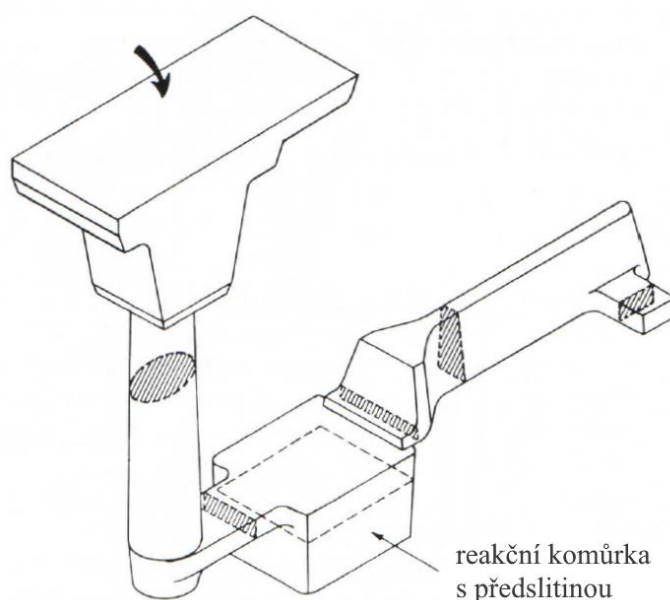
4.5.6 Metoda Inmold

Jde o průtočnou metodu, kdy je přesně odměřená dávka předslitiny FeSiMg s 3 – 5 % Mg umístěna ve speciální reakční komůrce, která je součástí rozváděcího kanálu vtokové soustavy (obr. 30). Ke zpracování taveniny potom dochází během procesu lití. [2] [30]

Aby množství strusky vznikající při modifikaci bylo malé, je nezbytné, aby výchozí tavenina obsahovala maximálně 0,01 % S. Tato struska je při procesu zachytávána nejčastěji pomocí filtrů v části vtokové soustavy za reakční komůrkou. [2]

Mezi výhody metody Inmold patří vysoké využití hořčíku (60 – 80 %), odstranění problému s omezenou dobou mezi modifikací a litím z hlediska odeznívání modifikačního účinku, eliminace plynných exhalací, odstranění potřeby taveninu po modifikaci očkovat a snížení tepelných ztrát kovu, ke kterým u jiných procesů dochází například vlivem manipulace s pánví. [2] [30]

Nevýhodami této metody jsou například vyšší riziko ztuhnutí strusky a jiných produktů z reakce na výsledném odlitku a nutnost zajištění postupné reakce taveniny protékající komůrkou po celou dobu lití, což je potřeba prakticky odzkoušet u každého provedení (lišící se svou velikostí, geometrií, stupněm zaplnění komůrky apod.) zvláště. Kvůli tomu je metoda Inmold vhodná pouze pro hromadnou výrobu odlitků s vysokým stupněm automatizace a kontroly jakosti. [2] [30]



Obr. 30 Typický tvar vtokové soustavy pro metodu Inmold [30]

5 Praktická část

V roce 2020 byl proveden experiment s cílem sledovat vliv obsahu Mg na výsledné mechanické vlastnosti a mikrostrukturu litiny. Byly přitom odlity celkem čtyři vzorky litiny v podobě zkušebních bloků Y3 s tloušťkou stěny 50 mm s různým množstvím použitého modifikátoru. Byla přitom cíleně odlita litina nemodifikovaná, nedostatečně modifikovaná, správně modifikovaná a mírně přemodifikovaná.

Bylo očekáváno, že vzorek, který nebyl nijak modifikován, bude odpovídat litině s lupínkovým grafitem. Vzorek s optimálním množstvím modifikátoru litině s kuličkovým grafitem a nedostatečně modifikovaný vzorek bude mít mechanické vlastnosti a mikrostrukturu mezi LLG a LKG. U posledního vzorku bylo zkoumáno, jaký vliv na mechanické vlastnosti a mikrostrukturu bude mít litina s vyšším obsahem Mg, než je doporučená mezní hodnota 0,06 %, a zároveň bylo vzhledem ke karbidotvorným vlastnostem Mg předpokládáno, že mikrostruktura takto přemodifikované litiny bude obsahovat určité procento cementitu, tj. tavenina bude tuhnout částečně metastabilně.

5.1 Příprava vzorků

Bylo modifikováno metodou Sandwich a odléváno do formy ze samotuhnoucí směsi na bázi geopolymery s křemenným ostřivem.

Pro každý vzorek byla uskutečněna nová tavba, která trvala kolem 60 min. Výchozí tavenina měla vždy 40 kg a byla připravena v elektrické indukční peci s maximální hmotností vsázky cca 120 kg. Složení vsázky bylo následující:

- 15 kg surového železa
- 15 kg ocelového šrotu v podobě hlubokotažné oceli
- 8,7 kg vratného materiálu v podobě LLG
- 0,7 kg nahličovadla
- FeSi45

Množství použitého ferosilicia FeSi45 bylo u každého odlévaného vzorku odlišné, neboť s měnícím se množstvím použitého modifikátoru byl měněn také obsah vnášeného Si, jenž bylo potřeba kompenzovat změnou FeSi45 do vsázky, aby výsledné obsahy Si byly u všech zkušebních bloků podobné (např. u vzorku 4 s 0,89 kg modifikátoru byl obsah ferosilicia 0,2 kg). Během tavby byla z povrchu roztaveného kovu pravidelně odstraňována struska.

Těsně před odpichem se do přehřáté lící pánve vložila předslitina Elmag 6039 od výrobce Elkem společně s očkovačem Inocast 125 a 2 kg hlubokotažné oceli v podobě

Tab. 6 Množství použitého modifikátoru a očkovačla.

Číslo vzorku	1	2	3	4
Množství modifikátoru [kg]	0	0,11	0,50	0,89
Množství očkovačla [kg]	0,28	0,28	0,28	0,28

odstřížků z plechu. V tab. 6 je znázorněno množství použitého modifikátoru a očkovačla u všech čtyř vzorků.

Po dosažení teploty kovu přibližně 1555 °C byla tavenina z EIP vylita do pánve, kde byla za bouřlivé reakce modifikována. Z takto metalurgicky zpracovaného kovu byl odebrán vzorek, který byl poslán na chemickou analýzu pomocí optického emisního spektrometru Q4 Tasman. V tab. 7 je znázorněno výsledné chemické složení odlitých vzorků litiny s vypočítaným uhlíkovým ekvivalentem C_E , který u všech čtyř vzorků odpovídá eutektické až mírně nadeutektické litině, a v tab. 8 je teplota lití.

Tab. 7 Výsledná chemická složení odlitých taveb a uhlíkový ekvivalent.

Číslo vzorku	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Mg	C_E
1	3,72	2,18	0,18	0,03	0,03	0,03	0	4,39
2	3,45	2,64	0,21	0,03	0,03	0,03	0,011	4,25
3	3,51	2,69	0,18	0,03	0,03	0,05	0,040	4,33
4	3,54	2,44	0,20	0,03	0,02	0,04	0,070	4,28

Tab. 8 Teploty lití u jednotlivých vzorků.

Číslo vzorku	1	2	3	4
Teplota lití [°C]	1340	1340	1340	1310

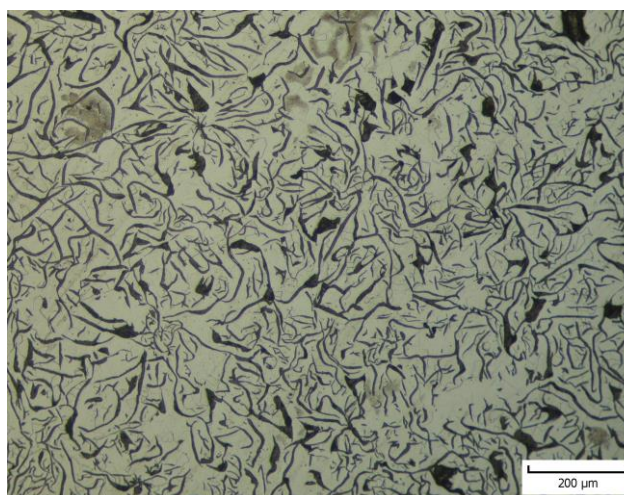
5.2 Vyhodnocení vzorků

5.2.1 Mikrostruktura

Mikrostruktura odlitých vzorků byla vyhodnocena z metalografických výbrusů z hlav trhacích tyčí až po jejich přetržení u zkoušky tahem. Povrch takto připravených výbrusů byl naleptán pomocí leptadla Nital.

Na obr. 31 je znázorněna mikrostruktura vzorku 1, která patří litině, jež nebyla nijak modifikována. Litina tedy podle tab. 7 neobsahuje žádný Mg. Lze si všimnout, že zde byl grafit vyloučen pouze ve formě lupínků s ostrými konci. Jedná se tedy o typickou nadeutektickou LLG s feritickou maticí s pouze ojedinělým výskytem perlitu.

Vzorek 2 je na obr. 32. Jde o nedostatečně modifikovanou litinu s 0,011 % Mg. Grafit je tvořen mnohem jemnějšími lupínky, než tomu bylo u vzorku 1, s převážně zakulacenými konci. I přesto, že je hodnota obsahu Mg daleko od doporučeného intervalu 0,03 % až 0,06 %, již zde byly na určitých místech vytvořeny malé nedokonalé kuličky grafitu. Vzorek 2 by tedy bylo možno svou mikrostrukturou zařadit mezi litinu s lupínkovým a červíkovým grafitem. Matrice je opět feritická s místním výskytem perlitu.



Obr. 31 Mikrostruktura litiny pod 0,005 % Mg (vzorek 1)

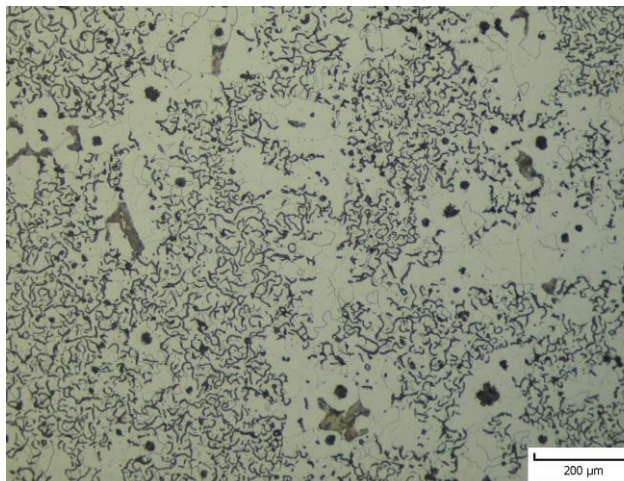
Na obr. 33 je zobrazen vzorek 3 s 0,040 % Mg. Z mikrostruktury je možno si všimnout, že je zde grafit vyloučen v podobě dokonalých i méně dokonalých kuliček o velikosti 5 až 6, které bylo možno dosáhnout s min. 0,03 % Mg. Co se kovové matrice této LKG týče, je opět přítomna matrice feritická s 3% výskytem perlitu.

Velmi podobná mikrostruktura byla dosažena u vzorku 4 na obr. 34. Grafit u této mírně přemodifikované litiny s 0,070 % Mg byl opět jako u vzorku 3 vyloučen ve tvaru dokonalých i méně dokonalých kuliček o velikosti 5 až 6. Je zde ale mírně zvýšený podíl perlitu ve feritické kovové matici (asi 10 %), což je způsobeno nepatrně vyšším obsahem perlitotvorného Mn a nižším obsahem feritotvorného Si (tab. 7) v litině. I přesto, že je zde přítomen vyšší obsah Mg než 0,06 %, stále zde není potvrzen výskyt cementitu ve struktuře. 0,070 % Mg má tedy minimální vliv na výslednou mikrostrukturu grafitické litiny.

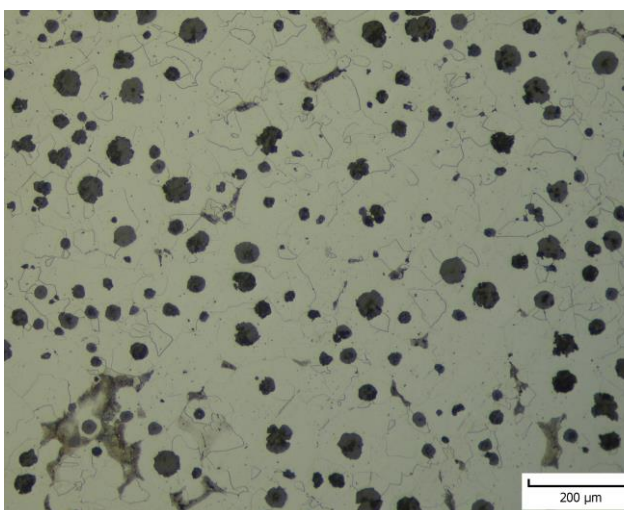
5.2.2 Mechanické vlastnosti

Dále byla provedena tahová zkouška na stroji Zwick/Roell Z250 dle normy ČSN EN ISO 6892-1.

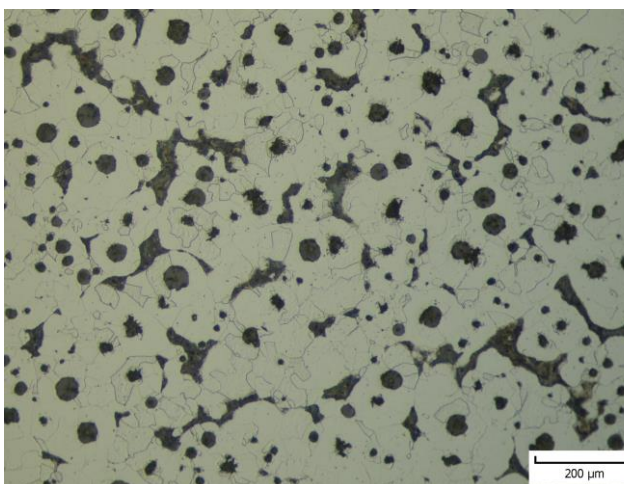
Z každého vzorku byly vytvořeny vždy dvě zkušební tyčky o průměru 10 mm a délce měřené části 50 mm se závitovou hlavou dle normy DIN 50125, které byly následně zatěžovány tahem. Výsledné grafy tahové zkoušky z obou měření pro vzorky 1-4 jsou znázorněny na obr. 35 a v tab. 9 jsou uvedeny aritmetické průměry hodnot mechanických vlastností: modul pružnosti v tahu E , mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , tažnost A a kontrakce Z . Maximální dosažené hodnoty jsou zvýrazněny tučným písmem s kurzívou.



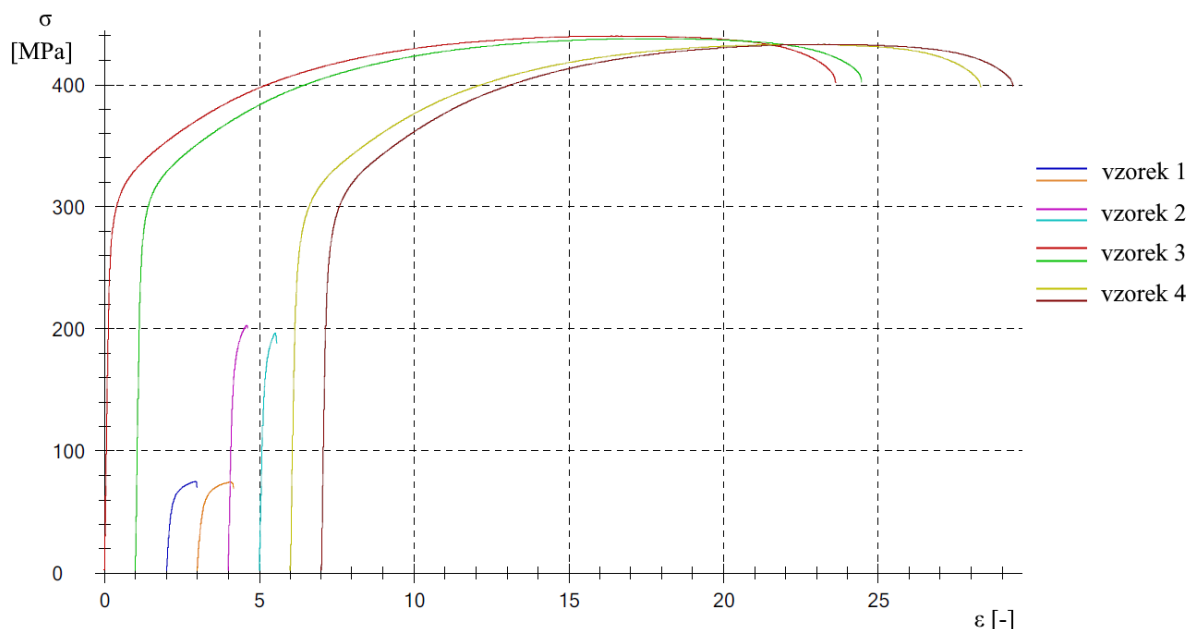
Obr. 32 Mikrostruktura litiny s 0,011 % Mg (vzorek 2)



Obr. 33 Mikrostruktura litiny s 0,040 % Mg (vzorek 3)



Obr. 34 Mikrostruktura litiny s 0,070 % Mg (vzorek 4)



Obr. 35 Výsledné grafy tahové zkoušky odlitých vzorků litiny

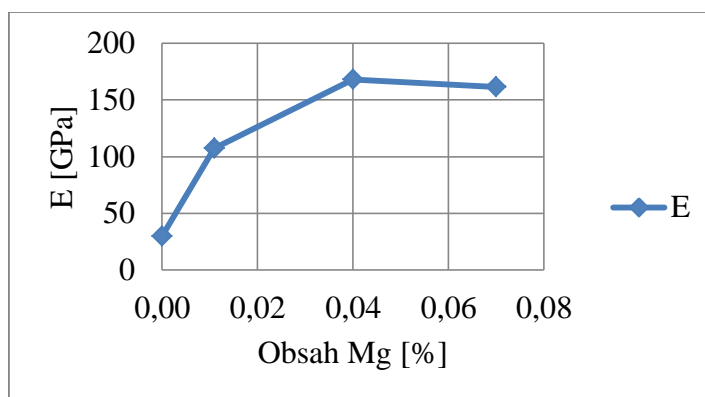
Tab. 9 Průměrné hodnoty mechanických vlastnosti jednotlivých vzorků.

Číslo vzorku	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Z [%]
1	30	67	75	0,9	0,0
2	108	190	200	0,4	0,3
3	168	298	439	23,3	26,1
4	162	280	433	22,1	26,6

Z tab. 9 je patrné, že nejhorší mechanické vlastnosti má podle očekávání vzorek 1, který náleží nijak nemodifikované LLG. Tyto nízké hodnoty jsou zapříčiněny převážně ostrými konci lupínků v mikrostruktuře, viz obr. 31, ve kterých je koncentrováno napětí. Je zde také nulová hodnota kontrakce.

Lepší mechanické vlastnosti byly dosaženy u vzorku 2 s 0,011 % Mg, jehož mikrostruktura je tvořena jemnějšími lupínky s kulatějšími konci a s občasným výskytem nedokonalých kuliček (obr. 32). Je třeba také zmínit nepatrné zvýšení hodnoty kontrakce o 0,3 % a snížení hodnoty tažnosti o 0,5 %.

Nejvyšší hodnoty modulu pružnosti v tahu, meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti bylo dosaženo u vzorku 3 s obsahem 0,040 % Mg. Je to díky vhodné mikrostruktuře tvořené převážně dokonalými kuličkami grafitu, které nejsou takovými



Obr. 36 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě E

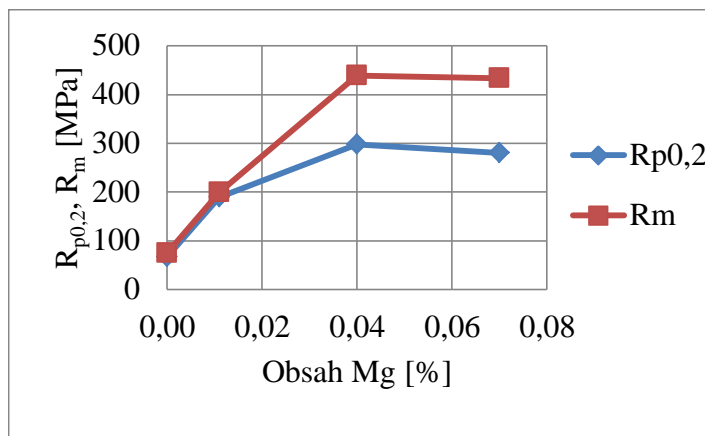
koncentrátory napětí jako lupínky. Čím dokonalejší tedy kuličky jsou, tím lepší mechanické vlastnosti je možno získat.

U vzorku 4 s 0,070 % Mg, jehož mikrostruktura byla velmi podobná vzorku 3 a který patří mírně přemodifikované litině, byly naměřeny nepatrně horší mechanické vlastnosti s výjimkou kontrakce, jež byla zvýšena o 0,5 %.

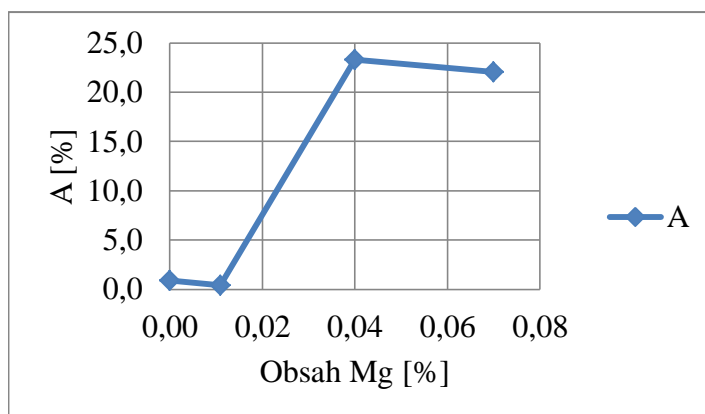
Vliv obsahu Mg v litině na modulu pružnosti E , meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti R_m , tažnosti A a kontrakce Z vzorků je možno vidět také na grafech na obr. 36-39. Z grafu této závislosti na modulu pružnosti v tahu (obr. 36) je patrné, že je-li zvyšován podíl Mg v grafitické litině, je tato hodnota též zvyšována. Přitom postupně klesá strmost této křivky až do hodnoty cca 0,04 % Mg, kdy je hodnota E maximální, tj. kolem 168 GPa. Poté je velikost modulu pružnosti v tahu nepatrně snížena.

Stejně je tomu také u pevnostních charakteristik, jako jsou mez kluzu (modrá křivka) a mez pevnosti (červená křivka) na obr. 37. Z grafu je zřejmé, že u vzorků 1 a 2, u kterých byl v mikrostrukturu obsažen grafit ve tvaru lupínků, byla naměřena hodnota meze pevnosti jen nepatrně větší než hodnota meze kluzu, což je způsobeno jejich velmi malou oblastí plastické deformace. Je-li ale podíl Mg v litině 0,04 % a vyšší, je rozdíl mezi hodnotami $R_{p0,2}$ a R_m větší.

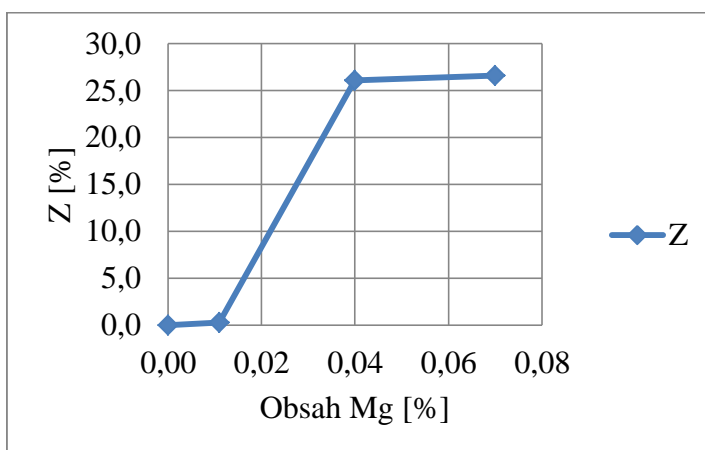
Co se týče tažnosti na obr. 38, je u ní zaznamenána hodnota nepatrně nižší u vzorku 2 než u vzorku 1. S přibývajícím obsahem Mg je potom tažnost prudce navýšena až na hodnotu 23,3 % u vzorku 3 s 0,040 % Mg. Poté opět tažnost v přemodifikované litině mírně klesá.



Obr. 37 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotách $R_{p0,2}$ a R_m



Obr. 38 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě A



Obr. 39 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě Z

Hodnota kontrakce je na rozdíl od tažnosti s přibývajícím obsahem Mg neustále zvyšována a její hodnota je nejvyšší právě u přemodifikovaného vzorku 4 s 0,070 % Mg. Největší růst kontrakce je mezi 0,011 % a 0,040 % Mg v litině.

6 Závěry

V teoretické části práce byly shrnuty druhy litin a jejich nejdůležitější vlastnosti. Dále byla popsána modifikace litin a také základní modifikační metody a zařízení.

U modifikace taveniny při výrobě LKG dochází ke sferoidizaci grafitu v litině. Aby byl grafit vyloučen ve tvaru dokonalých kuliček, je doporučována hodnota Mg_{zbyt} mezi 0,03 a 0,06 % a obsah S před procesem modifikace asi 0,01 %. Poté je ještě vhodné taveninu očkovat.

V praktické části práce byly odlity celkem čtyři vzorky eutektické až mírně nadeutektické grafitické litiny s různým výsledným obsahem Mg. Z provedených metalografických výbrusů a mechanických zkoušek bylo zjištěno, že u vzorku 1, který neobsahoval žádný Mg a který patřil LLG, byly vykazovány nejhorší mechanické vlastnosti.

Vzorek 2 byl získán nedostatečnou modifikací, přičemž bylo dosaženo 0,011 % Mg. V mikrostruktuře tohoto vzorku již byl obsažen určitý podíl nedokonale kuličkového grafitu. Tomu také odpovídaly výsledné mechanické vlastnosti provedené zkouškou tahem, které byly vyšší než u předcházejícího vzorku 1. Výjimkou byla hodnota tažnosti, která byla snížena o 0,5 %.

Nejoptimálnější mechanické vlastnosti byly získány u vzorku 3 s 0,040 % Mg. Svou mikrostrukturou i obsahem Mg odpovídal typické LKG.

Nepatrně horší mechanické vlastnosti byly dosaženy u mírně přemodifikovaného vzorku 4 s 0,070 % Mg. Mikrostruktura byla velmi podobná vzorku 3 a i přes karbidotvorné vlastnosti Mg zde však stále nebyl potvrzen výskyt cementitu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [32]

- [1] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [3] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [4] ŠENBERGER, Jaroslav, Karel STRÁNSKÝ a Václav KAFKA. *Metalurgie oceli na odlitky*. Brno: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [5] SUCHÁNEK, Jan. Trendy vývoje bílých ořezávacích litin. *Slévárství*. Svaz sléváren České republiky, 2017, **65**(1-2), 16-20. ISSN 0037-6825.
- [6] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [7] HLAVINKA, Josef. Slévárenská výroba v ČR: výroba odlitků v České republice. *Slévárství*. Svaz sléváren České republiky, 2019, (9-10), 368-369. ISSN 0037-6825.
- [8] JONULEIT, Manfred, Werner MASCHKE a Roman ZEMÁNEK. Výroba odlitků z litiny s vermikulárním grafitem (LVG). *Slévárství*. Svaz sléváren České republiky, 2016, (11-12), 436-439. ISSN 0037-6825.
- [9] ČSN EN 1562 (420955): Slévárství - Temperované litiny. *NORMY.biz* [online]. Brno: Hrazdil, c2003-2020 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/91369>
- [10] ČSN EN 1562 (420955): Slévárství - Temperované litiny. *NORMY.biz* [online]. Brno: Hrazdil, c2003-2020 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/507616>
- [11] ADI Information: What is ADI? *Chamberlin & Hill Group* [online]. Walsall (UK): Chamberlin, c2018 [cit. 2020-02-07]. Dostupné z: http://www.iron-foundries.co.uk/pages/adi_info.php
- [12] BŘEZINA, Roman, Josef FILÍPEK a Jaroslav ŠENBERGER. Abrasivní opotřebení izotermicky zušlechtnuté litiny s kuličkovým grafitem v laboratorních a provozních podmínkách. *Sborník Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně*. 2005, **53**(4), 15-22.
- [13] CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-456-7.
- [14] Úvodem o koksu. *OKK Koksovny, a.s.* [online]. Ostrava-Prívov: OKK Koksovny, [2015] [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: www.koksovny.cz/cz/uvodem-o-koksu
- [15] Struska. *Strusky* [online]. Ostrava: ZWA Company, c2008 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.strusky.cz/>
- [16] DA, Sheng a Liu JINCHENG. *Cast irons containing rare Earths*. Čína: Tsinghua University Press, 2000. ISBN 7-302-03918-6.

- [17] Výhody a nevýhody indukční pece ocelárny, výběr pece obložení a tavení. *Greenery Refractories Greenery Refractory & Insulation Material Co., Ltd* [online]. Yu'an: Greenery Refractories Greenery Refractory & Insulation Material, 2019 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://m.cz.greeneryrefractories.com/news/advantages-and-disadvantages-of-induction-furn-25220797.html>
- [18] ČERNÝ, Václav. Obsah čísla 12/2002: Indukční ohřev. *ELEKTRO - odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC Public, c2014-2020, 2002 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/indukcni-ohrev-3--14655>
- [19] ČAMEK, Libor. *Slévárenství ocelových odlitků* [online]. Ostrava: VŠB - TUO, 2013, 144 s. [cit. 2020-03-10]. ISBN 978-80-248-3358-3. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/10_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku/Camek_Slevarenstvi_ocelovych_odlitku.pdf
- [20] BAŽAN, Jiří a Ladislav SOCHA. *Základy teorie a technologie výroby železa a oceli: část II - Základy teorie a technologie výroby oceli* [online]. Ostrava: VŠB - TUO, 2013, 58 s. [cit. 2020-03-10]. ISBN 978-80-248-3353-8. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/05_Zaklady_teorie_a_techologie_vyroby_zeleza_a_oceli_II_Zaklady_teorie_a_techologie_vyroby_oceli/Bazan_Vyroba_zeleza_a_ocel_II.pdf
- [21] Železářny a ocelárny: Schmiedewerke Gröditz GmbH, Německo. *Pavel Zubek: fotografie* [online]. Třinec: Zubek, c2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.pavelzubek.cz/galerie/schmiedewerke-groditz-gmbh-nemecko/>
- [22] HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin* [online]. Ostrava: VŠB - TUO, 2013, 85 s. [cit. 2020-03-15]. ISBN 978-80-248-3357-6. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf
- [23] DORAN, David a Bob CATHER. *Construction materials reference book*. Second edition. Milton Park, Abingdon, Oxon: Routledge, 2014. ISBN 978-0-7506-6376-2.
- [24] Ductile iron: history of ductile iron development. *Sorelmetal®* [online]. London: Rio Tinto Iron, [2001] [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://www.sorelmetal.com/en/ductile/frset_history.htm
- [25] SÝKORA, Pavel, Antonín MORES, Vlastislav OTÁHAL a Jan HUČKA. 60. výročí od zahájení výroby litiny s kuličkovým grafitem na území České republiky a současný stav. *Slévárenství*. Svaz sléváren České republiky, 2009, **57**(7-8), 298-303. ISSN 0037-6825.
- [26] GRIGOR'JEV, V. M. a Ja. V. ŽATČENKO. Možnosti povýšení eksploatacionnych svojstv čugunnych tormoznych kolodok. *Litejnoje proizvodstvo*. 2016, **2016**(3), 2-4. ISSN 0024-449X.
- [27] Periodická tabulka: hořčík. *Prvky* [online]. Prvky, c2009-2017 [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/12.html>
- [28] VÁVRA, Václav a Zdeněk LOSOS. Morfologická krystalografie: Krystalové tvary. *Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium* [online]. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity, [2007], Poslední aktualizace: 11. 1. 2013 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_2_3_kryst_tvary/kap_2_3_kryst_tvary.htm

- [29] PETRAKOV, O. V. a K. V. MAKARENKO. Raspredelenije ostatočnogo sodržanija elementov v kovše posle modificirovanija. *Litejnoje proizvodstvo*. 2008, **2008**(11), 19-22. ISSN 0024-449X.
- [30] ALAGARSAMY, Al. *Ductile iron handbook*. Des Plaines, Ill.: American Foundrymen's Society, 1992. ISBN 08-743-3124-2.
- [31] Technika: autokláv. *Co je to?* [online]. Superia, c2020 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z: <https://cojeto.superia.cz/technika/autoklav.php>
- [32] *Citace PRO* [online]. Brno: Ústřední knihovna VUT, c2012-2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A ₅	Tažnost	[%]
C _E	Uhlíkový ekvivalent	[-]
d ₀	Průměr zkušební tyče vzorku před zkouškou	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
HB	Tvrdomost	[-]
Mg _{pred}	Obsah hořčíku v předslitině	[%]
Mg _{zbyt}	Zbytkový obsah hořčíku v litině	[%]
m _{mod}	Množství modifikačního prostředku	[%]
R	Měrný elektrický odpor	[Ωmm/m]
R _m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{mt}	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
S	Obsah síry v modifikovaném kovu	[%]
S _C	Stupeň eutektičnosti	[-]
Z	Kontrakce (zúžení)	[%]
α	Délková roztažnost	[μm/m.K]
η_{Mg}	Využití hořčíku	[%]
λ	Tepelná vodivost	[W/m.K]
ρ	Hustota	[g/cm ³]
σ_C	Mez únavy tah-tlak	[MPa]
σ_{OC}	Mez únavy v ohybu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Binární rovnovážný diagram Fe-Fe₃C a Fe-C [2]
- Obr. 2 Diagram ARA nelegované LKG (3,61 % C, 2,83 % Si, 0,20 % Mn) [1]
- Obr. 3 Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo (zvětšení 500x) [5]
- Obr. 4 Struktura LLG s perlitickou matricí zobrazená světelnou mikroskopií [6]
- Obr. 5 Výroba odlitků ze slitin neželezných kovů v ČR v letech 2003-2018 [7]
- Obr. 6 Struktura LČG zobrazená světelnou mikroskopií [3]
- Obr. 7 Snímek feritické struktury LKG [3]
- Obr. 8 Snímek feriticko-perlitické struktury LKG [3]
- Obr. 9 Snímek perlitické struktury LKG [3]
- Obr. 10 Snímek martenzitické struktury LKG [3]
- Obr. 11 Struktura ADI litiny [11]
- Obr. 12 Tepelné zpracování LKG [3]
- Obr. 13 Schéma kuplovny [2]
- Obr. 14 Indukční kelímková pec [2]
- Obr. 15 Indukční kanálková pec [18]
- Obr. 16 Schéma EOP [19]
- Obr. 17 Elektrická oblouková pec [21]
- Obr. 18 Schéma rotační bubnové pece [2]
- Obr. 19 Rotační bubnová pec [22]
- Obr. 20 Model spirálového růstu grafitu sbalováním lamel po obvodu kuličky [2]
- Obr. 21 Mikrostruktura litiny s 0,025 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]
- Obr. 22 Mikrostruktura litiny s 0,029 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]
- Obr. 23 Mikrostruktura litiny s 0,032 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]
- Obr. 24 Mikrostruktura litiny s 0,038 % Mg_{zbyt} (zvětšení 100x) [30]
- Obr. 25 Řez pánví pro metodu SANDWICH [3]
- Obr. 26 Pánev pro modifikaci metodou TUNDISH [2]
- Obr. 27 Schéma modifikace ve sferoklávu [2]
- Obr. 28 Schéma +GF+ konvertoru a jeho polohy při plnění, modifikaci a vylévání [2]
- Obr. 29 Schéma automatizace procesu modifikace plněným profilem [30]
- Obr. 30 Typický tvar vtokové soustavy pro metodu Inmold [30]
- Obr. 31 Mikrostruktura litiny pod 0,005 % Mg (vzorek 1)
- Obr. 32 Mikrostruktura litiny s 0,011 % Mg (vzorek 2)
- Obr. 33 Mikrostruktura litiny s 0,040 % Mg (vzorek 3)
- Obr. 34 Mikrostruktura litiny s 0,070 % Mg (vzorek 4)
- Obr. 35 Výsledné grafy tahové zkoušky odlitých vzorků litiny
- Obr. 36 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě E
- Obr. 37 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotách R_{p0,2} a R_m
- Obr. 38 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě A
- Obr. 39 Graf závislosti obsahu Mg na hodnotě Z

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Porovnání mechanických a fyzikálních vlastností grafitických litin. [3]
Tab. 2 Chemické složení LLG. [1]
Tab. 3 Chemické složení LKG. [1]
Tab. 4 Orientační chemické složení temperované litiny s bílým a černým lomem. [1]
Tab. 5 Základní mechanické a fyzikální vlastnosti čistého Mg. [1] [2] [27]
Tab. 6 Množství použitého modifikátoru a očkovadla.
Tab. 7 Výsledná chemická složení odlitých taveb a uhlíkový ekvivalent.
Tab. 8 Teploty lití u jednotlivých vzorků.
Tab. 9 Průměrné hodnoty mechanických vlastností jednotlivých vzorků.