VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF

NÍZKOLEGOVANÉ LITINY PRO POUŽITÍ ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT

LOW ALLOYED HEAT RESISTENT IRON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — VOJTĚCH KRÁL
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — DOC. ING. JAROMÍR ROUČKA, CSC.
SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vojtěch Král

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

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

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

Nízkolegované litiny pro použití za zvýšených teplot

v anglickém jazyce:

Low alloyed heat resistent iron

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu nízkolegovaných litin pro použití za zvýšených teplot a pro cyklické tepelné namáhání.

Cíle bakalářské práce:

Vytypovat nízkolegované litiny, zejména na bázi legur Si a Mo, vhodné pro provoz za střídavých teplot. Vyhodnotit jejich metalurgii a technologické vlastnosti.

Seznam odborné literatury:

1. Rohrig, K. and Wolters, D. Legiertes Gusseisen. 1. auflg. Dusseldorf: Giesereiverlag, 1970. 138 p. ISBN 3872600192.
2. Ductile Iron Handbook. 1st ed. Des Plaines: AFS, 1999. 277 p. ISBN 0-87433-124-2.
3. Campbell, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butteworth-Heinemann, 2006. 288 p. ISBN 0-7506-4790-6.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Při použití litinových odlitků za teplot nad asi 500 °C a to zejména při cyklickém tepelném namáhání, dochází k degradaci struktury a k porušení odlitků. Pro tyto účely se osvědčují litiny s obsahem Si a Mo. Práce předkládá přehled typů slitin, vlastností a způsobu výroby odlitků.

KLÍČOVÁ SLOVA

legované litiny, tepelná odolnost litin, mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti

ABSTRACT

While using iron casting behind temperatures above perhaps 500 °C namely especially at cyclic heat straining, degradation of structure and failure castings may occur. This can be avoided with cast iron with content of Si plus Mo. Work set up survey types alloys, features and way of production of castings.

KEY WORDS

alloyed iron castings, thermal resistence of cast-irons, mechanical, chemical and physical properties

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRÁL, V. Nízkolegované litiny pro použití za zvýšených teplot. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 31 s. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Čestné prohlášení:

Já, Vojtěch Král, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne: . . 2011 .....

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za podnětné rady, připomínky a trpělivost. Dále pak své rodině za obrovskou podporu, hlavně Milanu Královi za pomoc při formulaci některých vět.

OBSAH

1. ÚVOD 2

2. POŽADAVKY PRŮMYSLU NA MATERIÁLY PRO CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÉ ODLITKY 3

3. DRUHY POUŽITELNÝCH MATERIÁLŮ PŘICHÁZEJÍCÍCH V ÚVAHU PRO VÝROBU CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ODLITKŮ 4

4. VLIVY ZPŮSOBUJÍCÍ POŠKOZENÍ LITIN ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT 5

4.1 Odolnost vůči oxidaci a růstu za zvýšených teplot 5

4.2 Změny mechanických vlastností za zvýšených teplot 7

4.3 Vliv zvýšené teploty na opal (okujení) 9

4.4 Cyklické tepelné namáhání materiálu 12

5. ZKOUŠKA ODOLNOSTI VŮČI OKUJENÍ U VYBRANÝCH LKG A LLG 13

6. LITINY TYPU SiMo 21

6.1 Přehled litin SiMo 22

6.2 Vliv Si a Mo 22

6.3 Mikrostruktura SiMo nízkolegovaných litin 26

6.4 Výroba litin SiMo 27

6.5 Vady litin SiMo 28

6.6 Trendy vývoje litin SiMo 30

7. ZÁVĚR 30

8. SEZNAM LITERATURY 31

1. ÚVOD

Jeden z problémů, který musí současné slévárenství řešit jsou neustále zvyšované požadavky na kvalitu materiálů a jejich mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Požadovaná vysoká tepelná odolnost, s ohledem na zvyšování teploty výfukových plynů automobilů, v důsledku snížení emisí na požadovanou úroveň a zvýšení výkonu při zachování malého objemu motoru. Snižování emisí na požadovanou úroveň s sebou přináší hned několik problémů: zvyšování tlaků ve výfukové soustavě, zvýšená teplota zvyšuje náchylnost k oxidaci, zvyšuje se creep a materiál se vlivem tepelné roztažnosti mění.

Z tohoto důvodu byla snaha o vývoj materiálů pro provoz za zvýšených teplot s cyklickým průběhem, jmenovitě Si Mo litiny a Ni Resist litiny. V této práci se zaměřuji na SiMo nízkolegované litiny.

2. POŽADAVKY PRŮMYSLU NA MATERIÁLY PRO CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÉ ODLITKY [1, 2]

Automobilový průmysl je jedním z významných odvětví, která využívají cyklicky tepelně namáhané odlitky. Teplota výfukových plynů u konvenčních spalovacích motorů závisí na typu motoru. Hodnoty teplot výfukových plynů u vznětových motorů jsou v rozmezí 100 až 750 °C a u zážehových motorů 200 až 850 °C. U nejnovějších přeplňovaných motorů dosahují teploty výfukových plynů až 1050 °C a přímo ve válcích jsou teploty až 2000 °C. Nové vývojové trendy pokračují směrem k dalšímu zvyšování těchto teplot. Každé 4 roky se zpřísňují nároky kladené emisní normou EURO na vyráběné automobily (viz. Tabulka 2.1). Touto normou jsou výrobci automobilů stále nuceni zdokonalovat systém spalování paliva. Novým směrem vývoje jsou nízko-objemové přeplňované motory, které musí pracovat za vyšších otáček, aby dodaly výkon porovnatelný se současnými typy motorů. Nejvíce namáhané součásti jsou hlavně turbodmychadla, výfuková potrubí a motorové skříně. Dalším požadavkem je vysoká tepelná odolnost při cyklickém zatěžování. Například u výfukového potrubí může docházet k velmi rychlému ochlazení při kontaktu vody se zahřátými částmi potrubí. Vysoká tepelná vodivost je požadována z důvodu lepšího a rovnoměrnějšího prohřátí soustavy výfukového potrubí a rychlejšího zahřátí katalyzátoru na provozní teplotu (katalytická reakce začíná na 400 °C).

Rok/norma		CO (g/km)		NO_x (g/km)		HC + NO_x (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70*	-	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY
* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva
** 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

Tabulka 2.1: Normy požadavků na maximální emise motorů (zeleně benzínové, černě naftové). /1/

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny zpřísňující nároky na emise ve výfukových plynech, CO – oxid uhelnatý, NOx – oxidy dusíku, HC+NOx – kombinované emise uhlovodíků a oxidů dusíku, HC – emise uhlovodíků a PČ jsou pevné částice obsažené v plynu (popílek).

3. DRUHY POUŽITELNÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ODLITKŮ: [2,3,4,5]

Litina s lupínkovým grafitem dostačuje do 700 °C, velmi levný materiál, ale jelikož moderní motory překračují tuto teplotu ztrácí na důležitosti.

Litiny s červíkovým grafitem odolnost této litiny závisí na složení matrice (perlitická, feritická nebo austenitická), odolnost vůči creepu je vyšší než u šedé litiny, je ovšem menší než tvárné litiny, stejně tak je tomu i u odolnosti vůči tepelným šokům, odolnost vůči opalu je do cca 500 °C stejná jako u šedé litiny nad 600 °C roste, ovšem kvalit litiny tvárné nedosahuje. Tepelná vodivost je lepší než u tvárné litiny, šedá litina má tepelnou vodivost vyšší. Odolnost vůči cyklickému tepelnému zatěžování je podobná jako u tvárné litiny.

Litiny s kuličkovým grafitem **-LKG nelegovaná** je podstatně odolnější proti růstu a oxidaci při středních teplotách než nelegovaná šedá litina. Cyklické tepelné namáhání kombinované s nízkou tepelnou vodivostí a s vysokým modulem pružnosti u těchto litin však může vést ke tvorbě vnitřních trhlin a deformací.

-LKG legovaná křemíkem a molybdenem je tepelně odolná až do 820 °C, má velmi dobrou odolnost vůči oxidaci, nízký creep a vysokou mez pevnosti za zvýšených teplot a má nízkou výrobní cenu.

-LKG „Ni Resist“ litiny legované niklem jsou více tepelně odolné než SiMo litiny, jejich tepelná odolnost dosahuje až 950 °C. Jejich nevýhodou je vysoká cena, jelikož se legují 13.5% až 36.5% Ni.

-LKG legované Si jsou to litiny s obsahem Si nad %, vynikají výbornou odolnost proti korozi a opalu. Jejich velkou nevýhodou je nízká mez pevnosti a obecně velmi slabá odolnost proti cyklickému tepelnému zatěžování. Struktura

kovu by měla být co nejvíce feritická, aby nedocházelo k nadměrnému růstu a nepraskaly vrstvy oxidů na povrchu, čímž by se snížila korozivzdornost.

-LKG legované Cr jelikož chrom silně podporuje tvorbu perlitu a zejména karbidů, feritická struktura se dá dosáhnout jen do obsahu 0,04% Cr ve slitině, nad touto koncentrací se tvoří perlitická struktura, která jde do 0,1% Cr ještě vyžíhat na strukturu zcela feritickou. Tato litina je nevhodná pro výrobu cyklicky tepelně namáhaných odlitků vzhledem ke svému vysokému sklonu tuhnout perliticky. Chrom zvyšuje odolnost proti korozi a dále při koncentraci nad 0,1% segreguje na hranice zrn a tvoří síť karbidů, které zvyšují mez pevnosti a značně komplikují obrábění.

Vysokolegované oceli jsou odolné až do 1150 °C, mají ovšem vysokou výrobní cenu z důvodu legování chromem a niklem. Při výrobě tenkostěnných odlitků z těchto ocelí se často používá metody přesného lití.

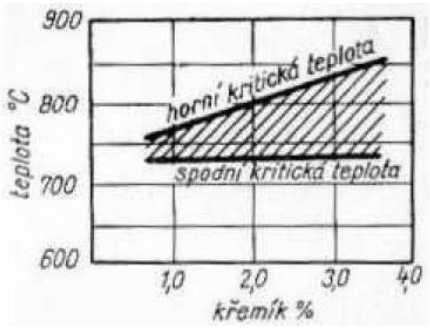
Ti slitiny jejich nevýhodou, kromě ceny, je zvýšená náchylnost k oxidaci za teplot vyšších jak 600 °C, využívány u dvoutaktních motorů.

4. VLIVY ZPŮSOBUJÍCÍ POŠKOZENÍ LITIN ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT [3]

Tepelnou odolnost lze rozdělit do dvou oblastí: odolnost vůči oxidaci za zvýšených teplot a změny mechanických vlastností za zvýšených teplot.

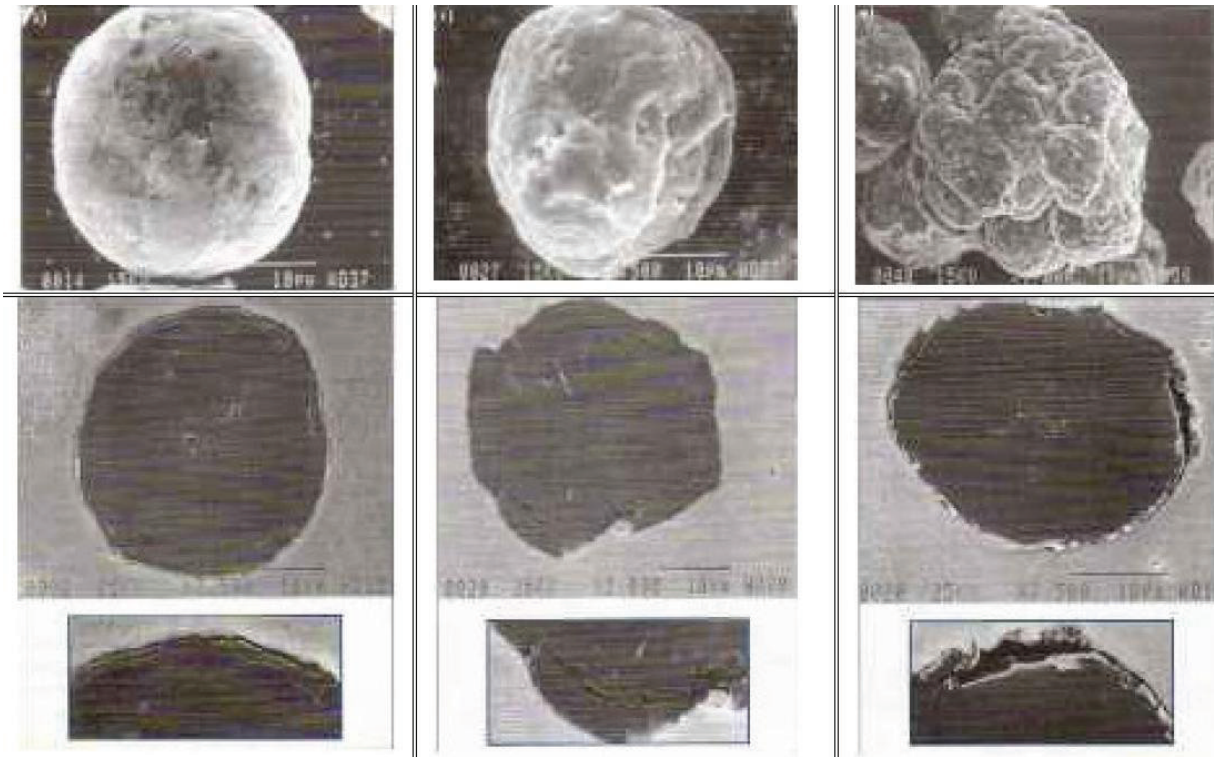
4.1 Odolnost vůči oxidaci a růstu za zvýšených teplot: [3] Základní kovová hmota a teplota má největší vliv na stabilitu mikrostruktury nelegované tvárné litiny při zvýšených teplotách. Feritická tvárná litina vykazuje růst od kritické teploty cca 730 °C, kdežto perlitická tvárná litina není stabilní již od teploty 540 °C, vzhledem ke grafitizaci perlitického cementitu. (Grafitická perlitizace je přeměna primárního cementitu na grafit.) Oba tyto druhy litin vykazují významný růst nad teplotou 815 °C a tento růst je u perlitické tvárné litiny v důsledku grafitizace ještě větší. Růst je závislý na tloušťce stěn a obecně platí, že čím tenčí stěna odlitku je, tím více se projeví růst. Přísadou Si, Cr nebo Mo lze také tento růst snížit. Šedá litina roste více než tvárná z důvodu současně probíhající grafitizace a oxidace.

Kritická teplota je rozmezí teplot, mezi nimiž dochází k přeměně feritické nebo ferito-perlitické struktury na strukturu austenitickou. Tato přeměna je doprovázena vysokým nárůstem objemu. Kritickou teplotu lze ovlivnit legurou Si (viz obrázek č. 4.1). Přísada Si snižuje velkou měrou rozpustnost uhlíku v austenitu a dále zvyšuje mez horní kritické teploty. Také obsah C tuto mez ovlivňuje, vzhledem k tomu, že teplota přeměny je řízena čarami GO-SE na Fe-Fe_3C diagramu.



Obr. č. 4.1 Kritická teplotní oblast slitiny Fe-C-Si 0,8-3,2% Si. /3/

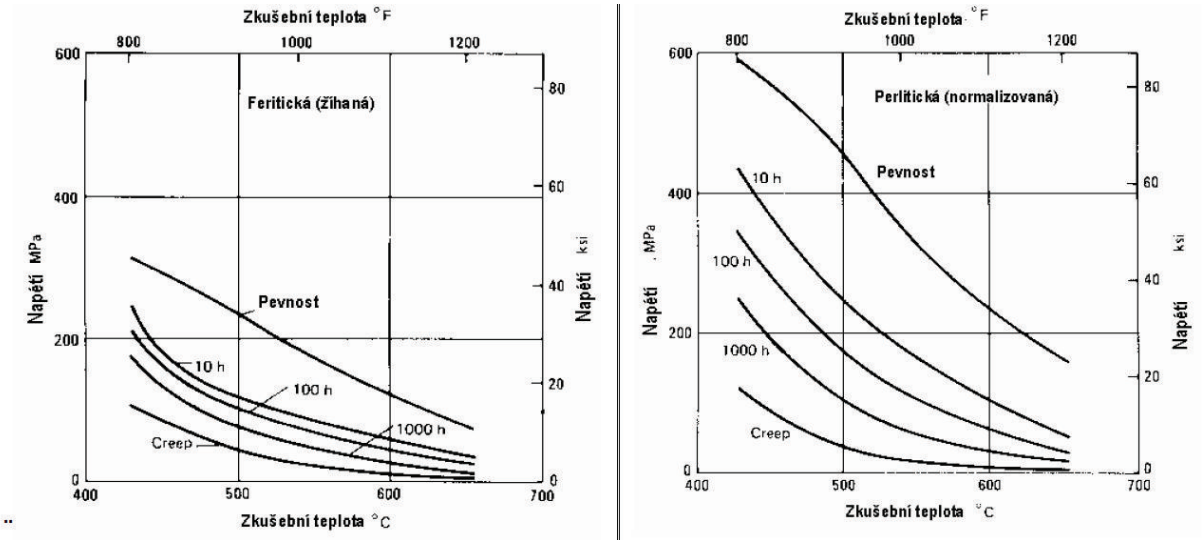
Horní kritická teplota značí teplotu, při které se z austenitu začíná vylučovat grafit a ferit. Z obrázku č. 4.1 je patrné, že legura Si má na tuto teplotu velký vliv. Spodní kritická teplota- přibližně 721 až 750 °C- je teplota, při které se v materiálu přestává vyskytovat austenit. Austenitizace porušuje povrch grafitu, jak je vidět na obr č. 4.2, povrch je rozpukaný, vznikají koncentrátory napětí a degradují se materiálové charakteristiky. Při austenitizaci dochází k rozpouštění grafitu do austenitu, pokud je výchozí struktura litiny feritická jedná se až o 25% objemu grafitových zrn. Během pomalého ochlazování se tento uhlík opět z austenitu vylučuje ale již ne na původní místa. Důsledkem tohoto jevu vznikají po původním grafitu prázdná místa a v grafitových zrnech nepravidelnosti.



Obr. č. 4.2 levý sloupec ukazuje tvar kuliček grafitu ve stavu po odlití, prostřední sloupec ukazuje tvar kuliček grafitu po feritizaci pod kritickou teplotu (750 °C) a pravý sloupec ukazuje grafit vzniklý po pozvolném ochlazení z austenitizační teploty (880 °C). /3/

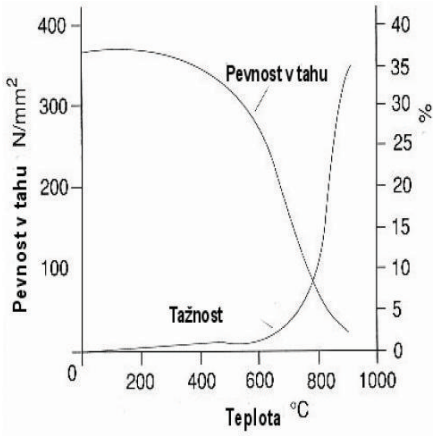
4.2 Změny mechanických vlastností za zvýšených teplot: [3] U feritických a perlitických tvárných litin zvolna klesá pevnost v tahu do teplot cca 425 °C. Jedná se asi o jednu třetinu původní hodnoty pevnosti. Výrazně vyšší a rychlejší je ztráta pevností u obou typů tvárných litin nad touto teplotou. Podstatně vyšší úroveň pevností je u perlitické tvárné litiny než u feritické tvárné litiny. Vliv délky prodlevy na zvýšených teplotách znázorňují grafy č. 4.1 a 4.2. Jedná se o křivky napětí-porušení nad teplotou 425 °C a to při délkách prodlev 10, 100 a 1000 hodin při teplotách do 650 °C. Pro oba druhy struktur tvárné litiny je zde creep definován jako hodnota tečení 0,0001%/h. Perlitická tvárná litina vykazuje téměř dvojnásobné hodnoty pevností při krátkodobých zkouškách ve srovnání s tvárnou litinou feritickou, ale při

zkouškách dlouhodobých jsou creepové křivky téměř totožné. Způsobuje to hrubnutí perlitu a jeho rozpad při dlouhodobém působení vyšších teplot.



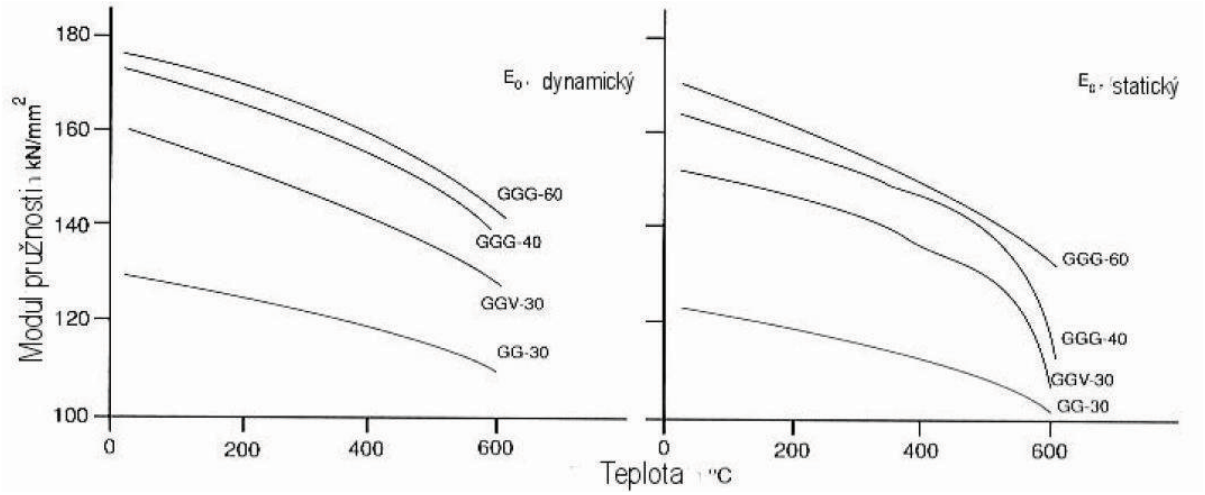
Grafy č. 4.1 a č. 4.2 Zobrazující vliv zvýšených teplot na pevnost v tahu feritické (vlevo) a perlitické (vpravo) litiny. /3/

Materiálové charakteristiky za zvýšených teplot se dají zlepšit nalegováním různých prvků. V grafu č. 4.3 je znázorněn příznivý vliv legury Si (6,4%) až do teploty 550-600 °C.



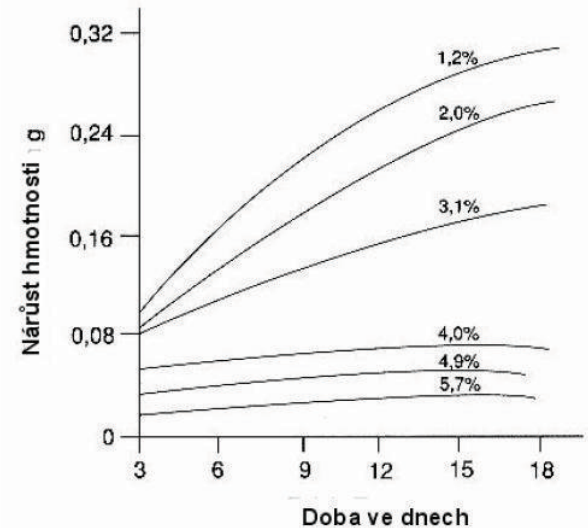
Graf č.4.3 Vliv teploty na mechanické vlastnosti tvárné litiny s feritickou strukturou a obsahem Si 6,4%. /3/

Na následujícím grafu č. 4.4 je možné vidět, že hodnota modulu pružnosti klesá stejně pro všechny druhy litin, její hodnota ovšem závisí na jakosti litiny.

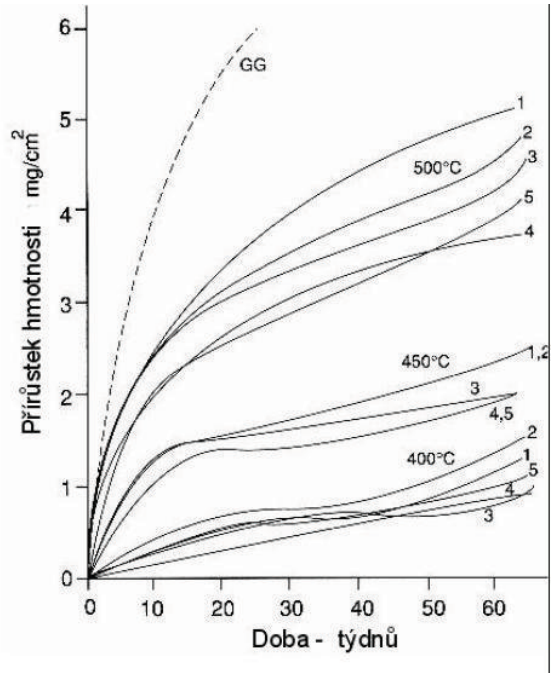


Graf č. 4.4 zobrazující vliv teploty na hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti tvárné (GGG-60, GGG-40), vermikulární (GGV-40) a šedé (GG-30) litiny. /3/

4.3 Vliv zvýšené teploty na opal (okujení): [3] U litiny nastává okujení již od 250 °C a až do 400 °C je jeho vliv nepatrný a téměř zanedbatelný. Ovšem pokud se teploty nadále zvyšují, okujení nabývá na důležitosti. Odolnost tvárné litiny je vyšší než lupínkové litiny, to je z toho důvodu, že se koroze šíří podél lupínků do materiálu, což se u zrnitého grafitu neprojevuje. Okujení je vznik oxidů na povrchu ohřívaného materiálu reakcí s okolní atmosférou obsahující vodní páru, CO_2, soli a kyslík. Z důvodu rozdílné tepelné roztažnosti tyto vrstvy oxidů opadávají.



Graf č. 4.5: Vliv obsahu křemíku na okujení feritické tvárné litiny při teplotě 650 °C. /3/



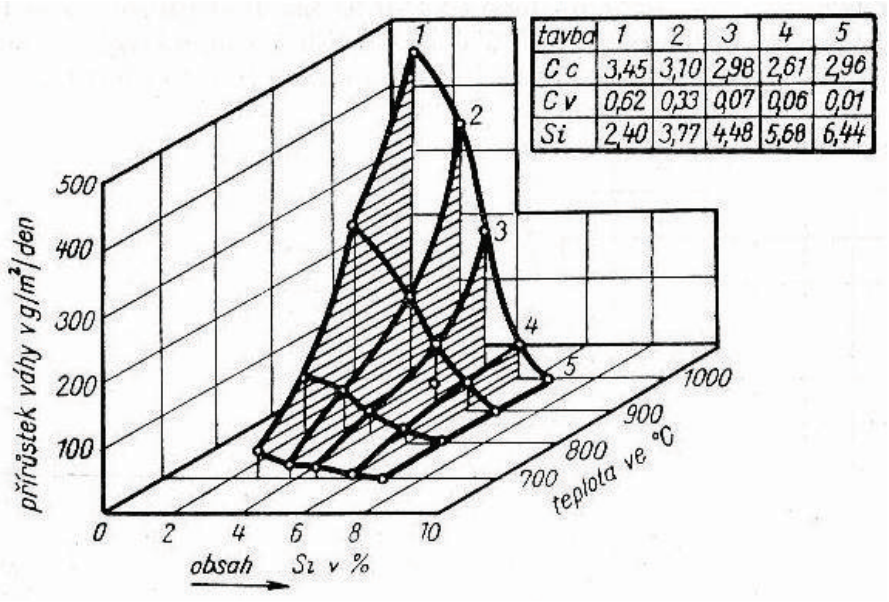
Graf č. 4.6: Vliv chemického složení a struktury na okujení tvárné a šedé litiny, v rozmezí teplot 400 až 500 °C. /3/

Tabulka č. 4.1: Chemické složení litin podrobených okujení vyhodnocených v grafu č. 4.6.

Nr.	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Mg %	Ni %	Ce %	Struktura
1	2,39	1,73	0,41	0,051	0,013	0,075	0,67	0,004	Perlit +30% Ferrit
2	2,95	1,52	0,44	0,051	0,024	0,049	1,11	0,005	Perlit
3	3,23	2,04	0,46	0,051	0,022	0,052	1,21	0,008	Perlit
4	3,06	1,58	0,46	0,054	0,025	0,051	1,17	0,017	Ferrit
5	3,07	2,01	0,47	0,052	0,025	0,052	1,19	0,004	Ferrit
GG-25	3,05	2,01	0,68	0,22	0,107	–	–	–	Perlit

Z předchozích grafů (č. 4.5 a 4.6) a tabulky (č. 4.1) lze usuzovat, že obsah Si výrazně zvyšuje odolnost vůči okujení. Přísadou 5-6% Si lze vyrobit tvárnou litinu pro použití i při teplotách 900 – 950 °C.

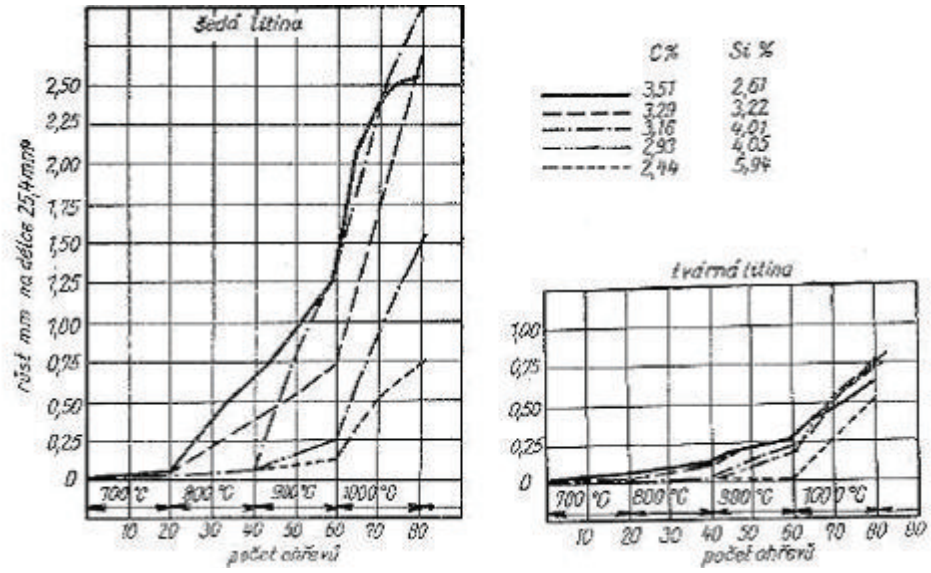
U tvárné litiny byla provedena zkouška na zjištění vlivu legury Si při konstantním zahřátí na určitou teplotu, po dobu 96 hodin, určoval se denní přírůstek hmotnosti (g/m^2). Výsledky jsou uvedeny v následujícím grafu č. 4.7.



Graf č. 4.7 Nárůst hmotnosti tvárných litin s různým obsahem Si po 96 hodinovém zahřátí na 700, 800, 900 a 1000 °C. /3/

Z grafu jednoznačně vyplývá, že nejvíce tepelně stabilní litina byla ta s obsahem Si 6,44%, která byla stálá i za 1000 °C. Její další předností proti šedé litině je vyšší pevnost za vysokých teplot. Pevnost tvárné litiny byla cca 350 MPa a u šedé litiny tato pevnost činila jen 100 MPa.

4.4 Cyklické tepelné namáhání materiálu: [3] Cyklické tepelné namáhání materiálu je úzce spjato se změnami struktury materiálu a následným růstem. U litiny s perlitickou strukturou, dochází při zahřátí k přeměně perlitu na austenit. Tato přeměna s sebou přináší velké objemové změny materiálu. Tyto objemové změny mohou vést například u SiMo litin k popraskání sítě karbidů Mo na hranicích zrn a k degradaci materiálových vlastností. Také může dojít k popraskání vrstvy oxidů Si na povrchu odlitku a redukci odolnosti vůči oxidaci. Vzhledem k těmto výše uvedeným důvodům je výhodnější se změnám struktury u cyklicky tepelně namáhaných součástí úplně vyhnout. Kritické teploty (viz. kapitola 4.1) je možno zvýšit nalegováním různých prvků, nejčastěji Si, Mo a Cr.
V následující zkoušce je zdokumentována objemová změna přeměny perlitu na austenit. V grafu č. 4.8 je patrný vliv přísady křemíku na růst rozměrů. Ohřev byl při každé teplotě opakován 20x pro teploty 700, 800, 900 a 1000 °C. Testované těleso bylo pokaždé udržováno 30 minut na testovací teplotě a následně bylo ponecháno na vzduchu, aby se ochladilo. Při ohřevu pod kritickou teplotu byl růst velmi malý, po překročení kritické oblasti došlo k významnému skoku.



Graf č. 4.8: Růst šedé a tvárné litiny s různým obsahem křemíku přo opakovaném ohřehu na teplotě 700,800,900 a 1000 °C. Každý cyklus se skládá z ohřevu na teplotu, setrvání na teplotě 30 minut a ochlazení na vzduchu. /3/

5. Zkouška odolnosti vůči okujení u vybraných LKG a LLG: [6]

Jedním z hlavních nároků na SiMo litiny je odolnost vůči okujení. Pánové Faruk Unkić, Zoran Glavaš a Katarina Terzić z univerzity v Záhřebu provedli experiment na zjištění vlivu zvýšených teplot na litiny pro automobilové a termomechanicky namáhané součásti. Experiment probíhal za 2 různých teplot, a to 550 °C a 850 °C v peci bez ochranné atmosféry, výdrž na teplotách byla 5 hodin, vzorky byly ochlazeny v peci. Pro každý test byl použit nový vzorek, bohužel ve studii nebyly uvedeny rozvinuté plochy, ani tvar zkoušených těles, jen jejich hmotnost, která se velmi liší vzorek od vzorku. Lze předpokládat, že byly tvarově alespoň podobné, takže přírůstky hmotnosti byly přepočítány na procentuální přírůstky. Při ohřevu byly vloženy do keramických kelímků, které byly předem zahřáty na teplotu 850 °C. Vzorky a kelímky byly před ohřevem přesně zváženy. Litiny použité v testu a jejich chemické složení jsou uvedeny v tabulce č. 5.1. Metalografické rozbory byly provedeny za použití světelného mikroskopu před a po zahřátí. Tvar grafitu, struktura matrice kovu a tloušťka

vrstev oxidů byly zjištěny metalografickým rozborem. Vrstvy oxidů na vzorku EN-GJS-SiMo4-1 a EN-GJS-AXNiCr20-2 byly analyzovány za použití elektronové mikroskopie,

metodou (SEM-EDS). Při ohřevu vznikaly dva druhy vrstev oxidů, vrchní, kterou bylo možné jednoduše oddělit od další vrstvy oxidů, která na matricí základního kovu držela velmi pevně. Lehce oddělitelná vrstva je nejvíce nebezpečná, protože umožňuje šíření oxidů hlouběji do základního kovu.

Obsah prvku hm%	Název materiálu				
	EN-GJL-250	EN-GJS-500-7	EN-GJS-400-18	EN-GJS-SiMo4-1	EN-GJS-AXNiCr20-2
C	3,43	3,71	3,60	2,90	2,38
Si	2,15	2,79	2,01	4,61	2,74
Mn	0,61	0,16	0,17	0,41	0,56
S	0,090	0,005	0,020	0,015	0,003
P	0,031	0,044	0,027	0,045	0,016
Cu	0,12	0,57	0,03	0,02	0,12
Sn	0,010	0,014	0,008	0,005	0,006
Cr	0,07	0,06	0,07	0,09	2,08
Ni	0,05	0,06	0,02	0,01	21,73
Mo	0,006	0,009	0,003	1,27	0,019
Mg	-	0,026	0,054	0,047	0,058

Tabulka č. 5.1: Složení zkoušených litin.

Dále následuje tabulka č.5.2, které ukazuje nárůst hmotnosti po fázi ohřevu na 550 °C a tabulka č.5.3, která ukazuje nárůst hmotnosti po fázi ohřevu na 850 °C. Nárůst hmotnosti je ukazatelem jak silně reagoval vzorek s okolní atmosférou a kolik vzniklo oxidů.

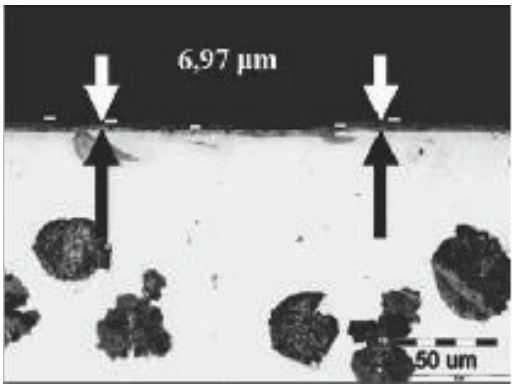
Označení materiálu	Hmotnost vzorku, m [g]	Rozdíl hmotností před a po zahřátí, Δm [g]	Rozdíl hmotností před a po zahřátí, Δm [%]
EN-GJL-250	18,1254	0,0134	0,074
EN-GJS-500-7	7,4301	0,0025	0,034
EN-GJS-400-18	8,6252	0,0023	0,027
EN-GJS-SiMo4-1	15,3985	0,0012	0,0078
EN-GJS-AXNiCr20-2	21,6868	0,0000	0

Tabulka č. 5.2: Údaje o vzorcích ohřívaných na 550 °C. /6/

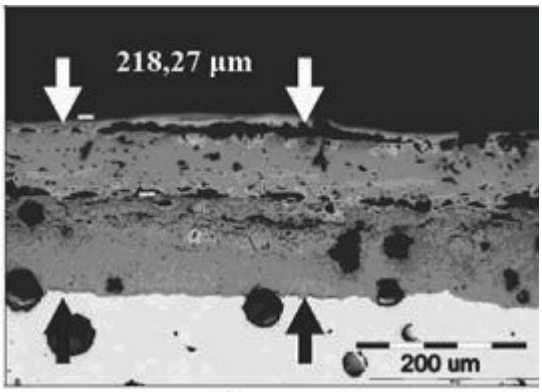
Označení materiálu	Hmotnost vzorku, m [g]	Rozdíl hmotností před a po zahřátí, Δm [g]	Rozdíl hmotností před a po zahřátí, Δm [%]
EN-GJL-250	16,3504	0,3529	2,16
EN-GJS-500-7	8,1970	0,1248	1,52
EN-GJS-400-18	8,3403	0,1041	1,25
EN-GJS-SiMo4-1	15,5324	0,0067	0,043
EN-GJS-AXNiCr20-2	10,2913	0,0019	0,018

Tabulka č. 5.3: Údaje o vzorcích ohřívaných na 850 °C. /6/

Z výše uvedených tabulek je patrné, že nejvyšší odolnost vůči korozi má EN-GJS-AXNiCr20-2, po ní EN-GJS-SiMo4-1 (nižší čísla procentuálního nárůstku = lepší).
Vrstva oxidů utvořených na EN-GJS-500-7 při 550 °C viz obr. č. 5.1 byla tenká a pevně spojená s kovovou matricí, ovšem vrstva vzniklá při zahřátí na 850 °C viz obr. č. 5.2 byla tlustší a nebyla tak pevně spojena s matricí kovu, takže koroze mohla probíhat do větší hloubky vzorku. Jelikož koroze u testovaných kovů EN-GJL-250 a EN-GJS-400-18 dosáhla stejných tloušťek, tak je nadále neuvádím.

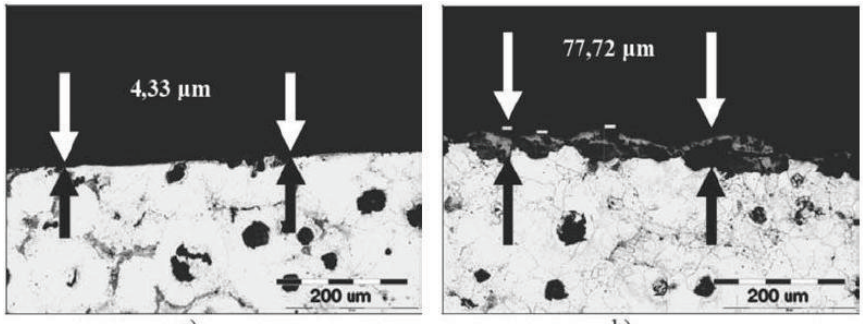


Obr. č. 5.1: Tenká vrstva oxidů utvořená na povrchu zkušebního tělesa z EN-GJS-500-7 po zahřátí na 550 °C. /6/



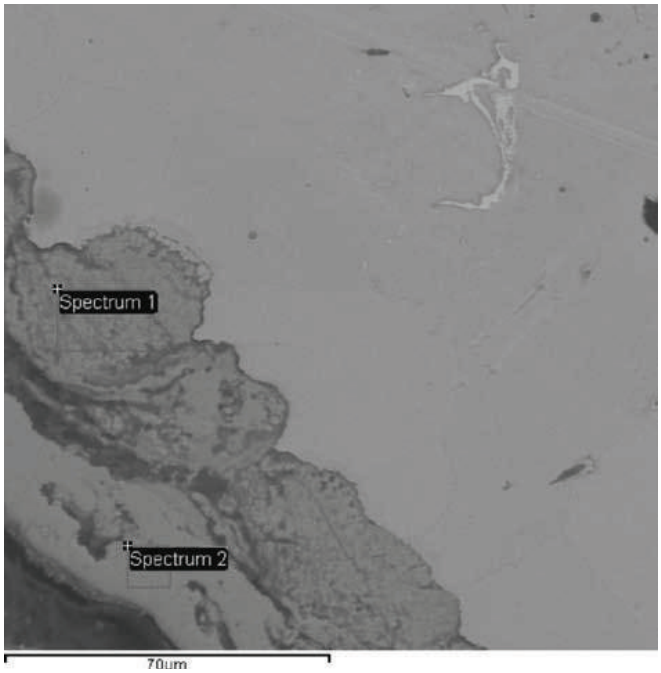
Obr č. 5.2: Vrstva oxidů vzniklá na tělese z EN-GJS-500-7 po zahřátí na 850 °C. /6/

Vrstva oxidů vzniklá na EN-GJS-SiMo4-1 byla po zahřátí na 550 °C tlustá 4,33 µm a po zahřátí na 850 °C měla 77,72 µm viz obr. č. 5.3 a),b), tyto oxidické vrstvy byly ovšem velmi silně spojeny s kovovou matricí a zabraňovaly dalšímu průběhu oxidace. Z tohoto se dá usuzovat, že EN-GJS-SiMo4-1 má velmi dobrou korozivzdornost. Další ukazatel dobré korozivzdornosti je složení vrstev oxidů, které jsou spektrometricky analyzovány dále v pokusu.



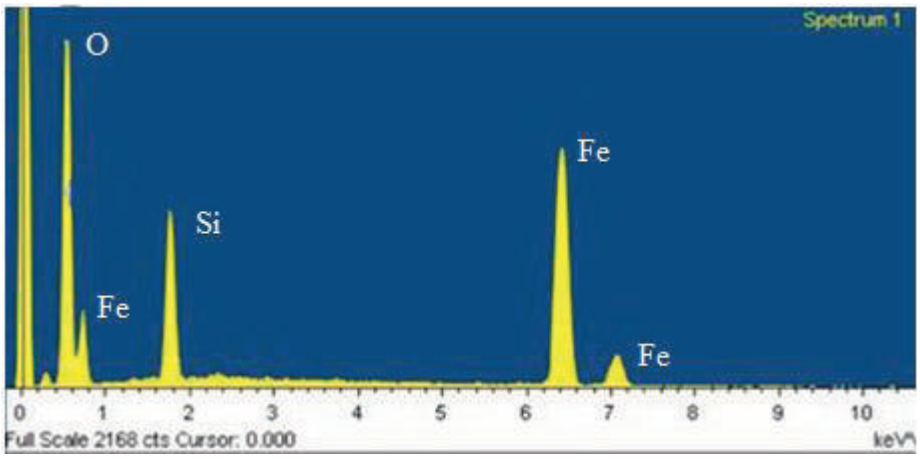
obr. č. 5.3: Tloušťka vrstev oxidů utvořených na EN-GJS-SiMo4-1. a) po zahřátí na 550 °C a b) po zahřátí na 850 °C. /6/

Spektrometrický rozbor:
Struktura oxidů vytvořených na povrchu vzorku EN-GJS-SiMo4-1 je vrstvená, jak je vidět na obrázku č. 5.4, na kterém jsou vyznačena místa spektrometrické analýzy.



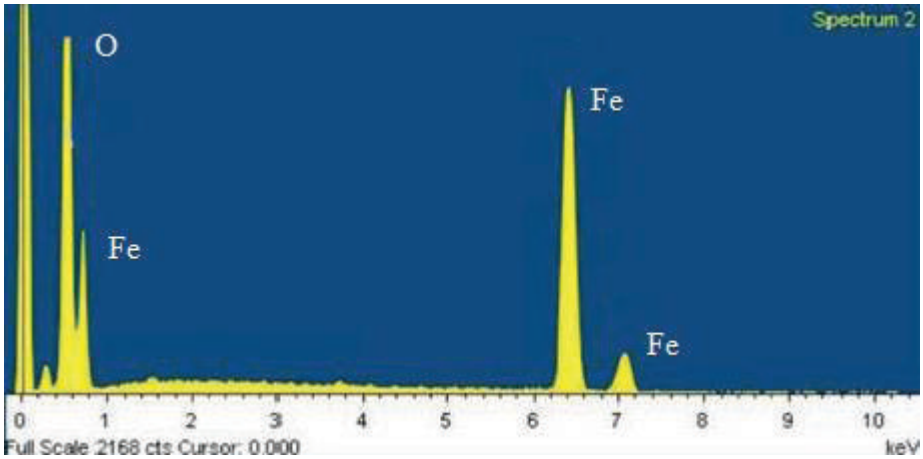
obr. č. 5.4: Vzorek EN-GJS-SiMo4-1 s vrstvami oxidů po 5h při 850 °C. /6/

Z výsledného rozboru vnitřní vrstvy odebrané z bodu Spectrum 1 (obr. č. 5.5) je patrné že tato vrstva byla složená ze sloučenin následujících prvků: O, Fe a Si, které tvoří Fayalit, chemický vzorec Fe_2SiO_4.



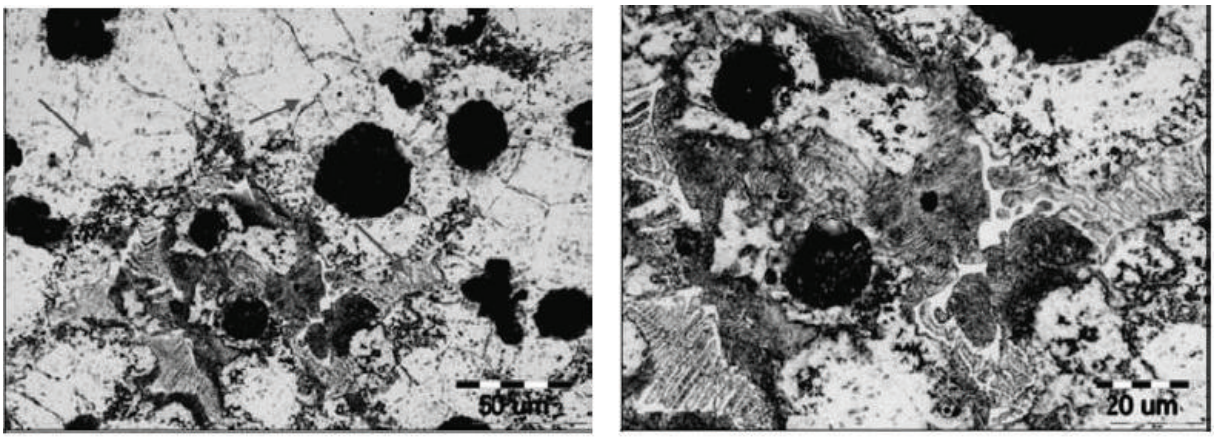
Obr. č. 5.5: Výsledný rozbor vnitřní vrstvy odebrané z bodu Spectrum 1. /6/

Vnější vrstva je dle rozboru na obrázku č. 5.6 složena ze sloučenin O a Fe, které tvoří různé oxidy železa.

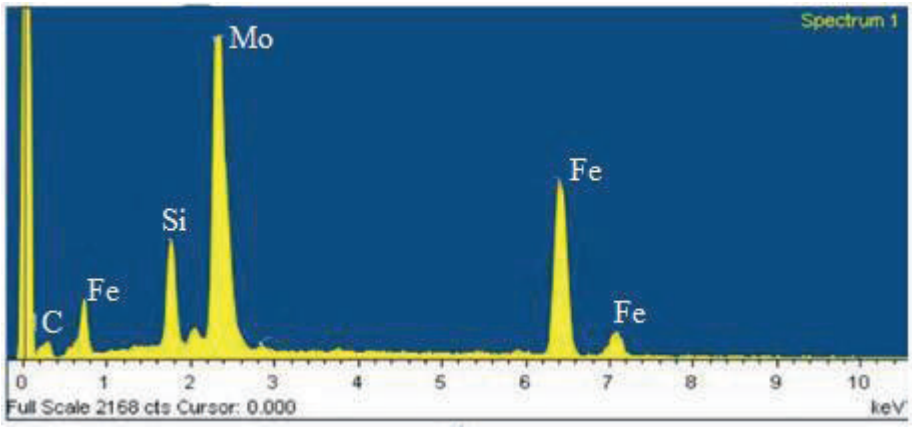


Obr. č. 5.6: Výsledný rozbor vnitřní vrstvy odebrané z bodu Spectrum 2. /6/

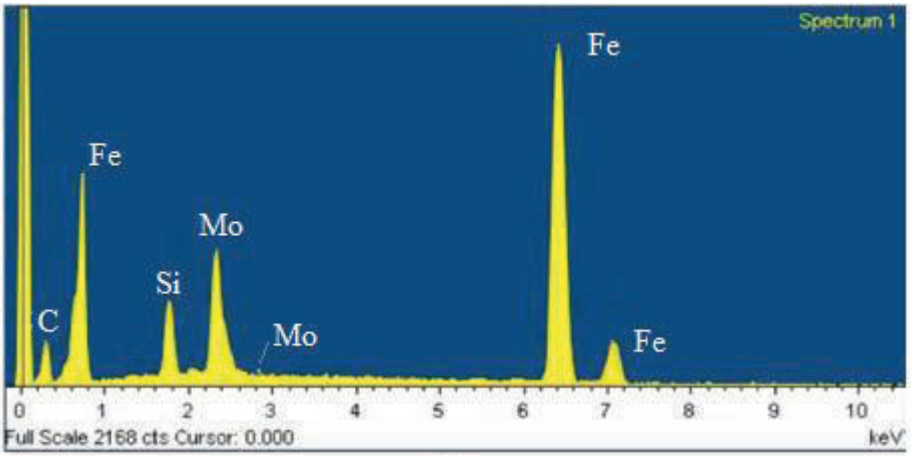
Z důvodu zvýšeného obsahu Mo (1,27%) v EN-GJS-SiMo4-1 došlo k precipitaci primárních karbidů na hranicích zrn a sekundárních karbidů ve feritu (viz. obr. č. 5.7). Při malém zvětšení se karbidy podobají perlitu, ovšem při vyšším zvětšení je lze rozeznat. Karbidy jsou složeny z Fe, Mo, Si a C. (viz. obr. č. 5.8 a 5.9)



Obr. č. 5.7: Záběry z mikroskopu na metalografické výbrusy tvárné litiny EN-GJS-SiMo4-1 před ohřevem, leptáno. Primární karbidy na okrajích zrn a sekundární karbidy ve feritu jsou viditelné. /6/



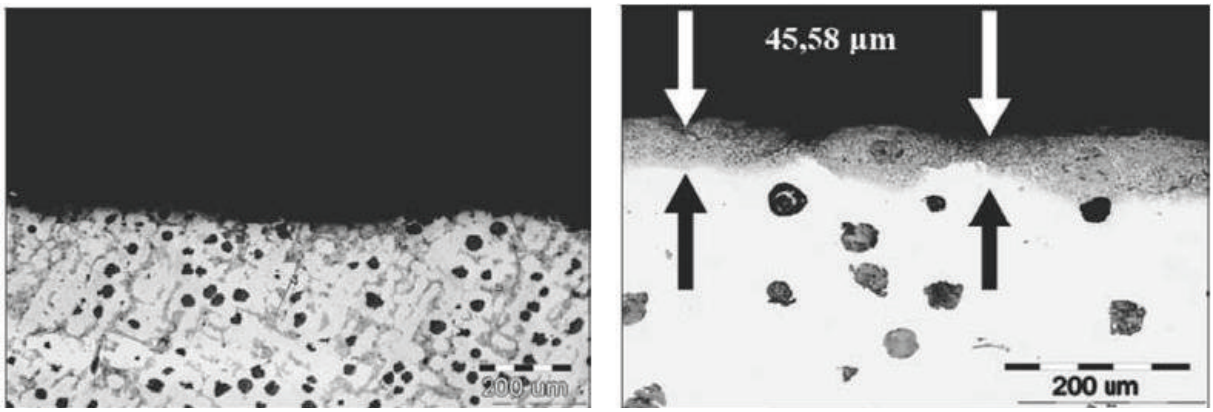
Obr. č. 5.8: Složení primárních karbidů ve feritické tvárné litině EN-GJS-SiMo4-1. /6/



Obr. č. 5.9 složení sekundárních karbidů ve feritické tvárné litině EN-GJS-SiMo4-1. /6/

Přítomnost primárních a sekundárních karbidů v mikrostruktuře v legované feritické tvárné litině EN-GJS-SiMo4-1 zlepšuje materiálové vlastnosti za zvýšených teplot, odolnost vůči creepu a odolnost vůči tepelné únavě.

Poslední z testovaných materiálů byla austenitická tvárná litina EN-GJS-AXNiCr20-1, která vykazovala nejnižší nárůst hmotnosti po ohřevu, tudíž i nejvyšší odolnost vůči korozi. Z obrázku č. 5.10 je patrné, že během ohřevu vzorků došlo k oxidaci jen ve velmi malé míře. Na určitých místech se vytvořila téměř zanedbatelná vrstva oxidů. Tato vrstva se na vzorku vytvořila během ohřevu na 850 °C a byla pevně spojena s kovovou matricí. Průměrná tloušťka vrstvy oxidů byla 45,58 μm. V průběhu ohřevu austenitické tvárné litiny na 850 °C byla vrstva oxidů řidší než vrstva oxidů, která se vytvořila v průběhu ohřevu na 850 °C u ostatních zkoušených materiálů. To dokazuje výhodu používání austenitické tvárné litiny.



Obrázek č. 5.10: Vrstvy oxidu vzniklé po ohřevu na povrchu vzorku austenitické tvárné litiny EN-GJS-AXNiCr20-1 (550 °C vlevo, 850 °C vpravo). /6/

6. Litiny typu SiMo [7]

Litiny legované Si a Mo jsou velmi intenzivně využívány především v automobilovém průmyslu na výrobu výfukových potrubí, turbodmychadel a skříní motorů. Například výrobce automobilů Ford používá výfukové potrubí z SiMo litin u zhruba 70% svých vyráběných vozidel. Doporučená hranice teplot pro SiMo a další materiály přicházející v úvahu je v tabulce 2. Pracovní teploty spalovacích motorů se pohybují okolo 900°C a bylo by logické použití odolnějšího materiálu, například Ni Resistu. SiMo litiny ovšem přináší několik velmi důležitých výhod: První z nich je bezkonkurenčně nejnižší cena, jelikož obsah legur je nízký a Si ani Mo nejsou nijak výrazně drahé. SiMo litina dovoluje výrobcům zvyšovat výkony a zároveň zůstat cenově kompetitivní. Další výhodou je nenáročnost na slévárenskou technologii, která je dále rozebírána v kapitole Výroba SiMo litiny na straně 33. SiMo litiny vyžadují pro obrábění více času než standardní tvárné litiny. Při vrtání s nástroji s břity z rychlořezné oceli lze používat stejné řezné rychlosti jako u normální litiny, vrtáky s karbidovými břity by měly mít sníženou řeznou rychlost o 35%. Životnost karbidových břitů je při frézování snížena o 33%.

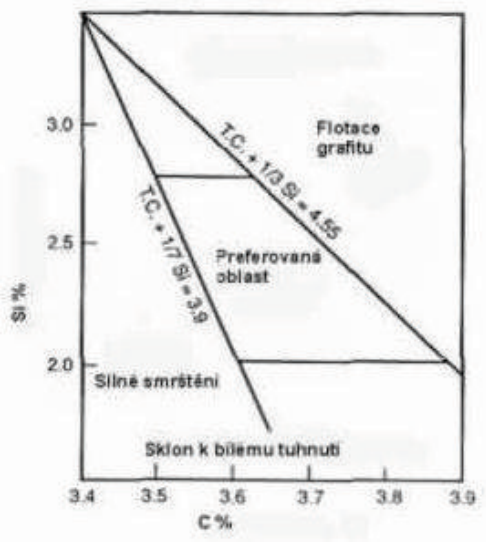
6.1 Přehled SiMo nízkolegovaných kuličkových litin: [8]

Označení slitiny	EN-GJS-SiMo4-0,5		EN-GJS-SiMo5-1
Obsah legur	C [%]	3-3,4	3-3,4
	Si [%]	3,6-4,4	4-5
	Mn [%]	max. 0,3	max. 0,4
	Mo [%]	0,4-0,6	0,8-1,2
Struktura	feritická		feritická
Mechanické vlastnosti	Rm	600	550
	$Rp_{0,2}$	400-520	400-520
	A	16-8	13-4
	E	160-175	160-175
	HB	200-270	200-240
Technologické vlastnosti	Tepelná odolnost*	v.dobrá	v.dobrá
	Tepelná stabilita	dobrá	v.dobrá
	Obrobitelnost	střední	střední
	Otěruvzdornost	dobrá	dobrá
Svařitelnost	se speciální elektrodou		se spec. elektrodou

*Tepelná odolnost je zde brána jako velmi dobrá oproti ostatním materiálům, SiMo s vyšším obsahem legur má lepší tepelnou odolnost, než SiMo s méně legurami.

6.2 Vliv křemíku a molybdenu na vlastnosti litiny: [3]

Obsah křemíku je velmi úzce provázán s obsahem uhlíku, oba prvky se chovají silně grafitizačně, u šedé litiny by měl být obsah uhlíku okolo 3,2%, aby nedošlo k hypereutektickému složení. Vliv Si a C na vlastnosti tvárné litiny vyjadřuje Hendersenův diagram na obrázku č. 6.1.



obr. č. 6.1: Hendersenův diagram. /3/

Je důležité výrazně nepřekročit eutektické složení, uhlíkové ekvivalenty pro různé tloušťky stěn se doporučují následující:

Pro tenkostěnné odlitky se doporučuje (>12 mm) CE = 4,55%, 12 až 40 mm CE= 4,35 až 4,45%, tlustostěnné (<40 mm) CE max. 4,3%. Pro odstředivé lití CE max. 3,5%, aby se zamezilo hromadění grafitu na povrchu odlitku (vrásnění).

Obsah Si dále potlačuje tvorbu karbidů a částečně zvyšuje počet zrn grafitu, ovšem rozhodující vliv na počet a tvar zrn grafitu má rychlost ochlazování.

U feritické tvárné litiny má zvýšení obsahu Si o 0,1% za následek zvýšení pevnosti v tahu o 6-10 MPa, tvrdosti o 3 HB a zvýšení tranzitní teploty. Tvárná litina feritická, obsahující 3% křemíku, má tvrdost v rozmezí 170-180 HB. Proti litinám s nižším obsahem křemíku je tato hodnota vyšší o 40-60 HB. Je to způsobeno hlavně rozpouštěním křemíku ve feritu a vznikem tak zvaného silikoferitu, který je oproti normálnímu feritu mnohem pevnější a tvrdší.

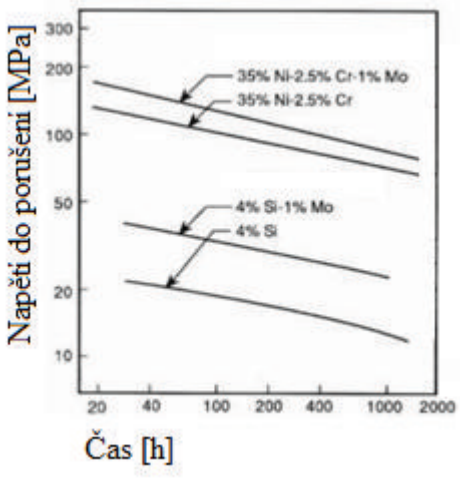
Vliv obsahu křemíku na vlastnosti tvárné litiny je také závislý na obsahu manganu. Pokud je u odlitků z feritické tvárné litiny v litém stavu obsah manganu nízký, křemík zvyšuje pevnost a mez průtažnosti. Při obsahu manganu 0,4% u tvárných litin feriticko-perlitických naopak vzrůstající obsah křemíku pevnostní hodnoty snižuje. Pokud jsou odlitky tepelně zpracovány (žíhány), mechanické vlastnosti závisí na obsahu manganu, ale vliv obsahu křemíku je výrazný.

Dále v rozsahu 3,75-4,25% Si výrazně redukuje oxidaci nad teplotou 649 °C, tím že utváří vrstvu oxidů a redukuje oxidaci na hranicích zrn. Obsah 4% Si v litině zamezuje tvorbě oxidů

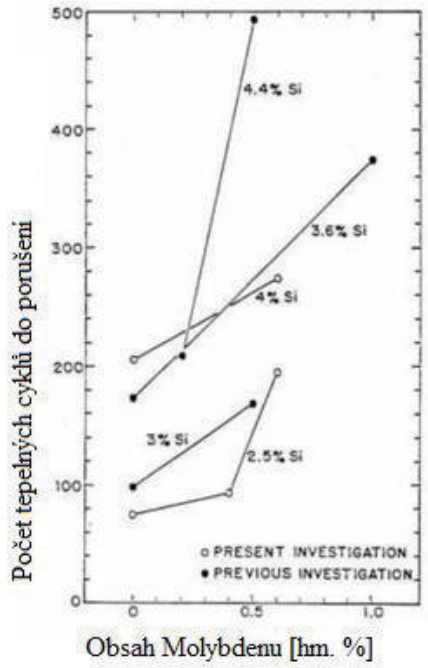
až do teplot 800 °C, 5% až do 900 °C a přídavek 6% Si zamezí tvorbě oxidů na povrchu až do teploty 950 °C.

Molybden je středně karbidotvorný prvek, od obsahu 0,5% a se začínají vylučovat karbidy na hranicích zrn, které jsou teplotně stálé, takže zmenšují růst. Silně zvyšuje prokalitelnost a pevnost za vyšších teplot. Legura 1% Mo zvýší hodnotu pevnosti o 40 až 45 MPa, tvrdost o 15 HB a sníží tažnost o 8%, dále zvýší creepovou pevnost a odolnost vůči únavě za tepla, což je patrné z grafu č. 6.1 a grafu č. 6.2. Karbidy Mo jsou tepelně stálé a za předpokladu, že je matrice čistě feritická, tak je silně redukovaný růst, zvyšuje se výskyt cementitu ve struktuře a tím se snižuje mez pevnosti v tahu a zvyšuje stálost pevnosti za zvýšených teplot. Molybden se dolegovává ve formě ferromolybdenu (62% Mo, 38% Fe) nebo ve formě oxi-molybdenových briket.

Jelikož jsou Si i Mo feritotvorné prvky, lze jejich dostatečným nalegováním dosáhnout čistě feritické struktury.



Graf č. 6.1: Vliv molybdenu na napětí do porušení při teplotě 705 °C u austenitické tvárné litiny s obsahem 35% Ni-2,5% Cr a u tvárné litiny s obsahem obsahem 4% Si a 1% Mo. /3/



Graf č. 6.2 Závislost počtu cyklů potřebných k porušení součásti na obsahu molybdenu a křemíku. /3/

Tvárná litina s 2,5% Si žíhaná na 730 °C			
Složení	$Rp_{0,2}$ [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost [%]
Normální teplota (20 °C)			
2,5%Si-0%Mo	288	432	27,1
2,5%Si-0,4%Mo	290	436	23,9
2,5%Si-0,6%Mo	312	461	22,0
650 °C			
2,5%Si-0%Mo	72	85	61,0
2,5%Si-0,4%Mo	97	119	47,1
2,5%Si-0,6%Mo	98	118	38,5
Tvárná litina s 4% Si žíhaná na 790 °C			
Složení	$Rp_{0,2}$ [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost [%]
Normální teplota (20 °C)			
4%Si-0%Mo	443	565	19,5
4%Si-0,5%Mo	470	569	17,0
4%Si-1%Mo	474	609	14,5
650 °C			
4%Si-0%Mo	67	83	59,0
4%Si-0,5%Mo	112	130	71,5
4%Si-1%Mo	111	130	53,0

Tab. č. 6.1 Vliv obsahu Si a Mo na mechanické vlastnosti za normální a zvýšené (650°C) teploty. /3/

6.3 Mikrostruktura SiMo nízkolegované litiny: [7]

Obsah kuličkového grafitu by měl být alespoň 80% se 100 kuličkami na 1 mm^2. Matrice litiny je z 90% ferit bohatý na Si, na okrajích zrn je síť 5-10% primárních karbidů a perlitu. Perlit není typicky lupínkový, ale spíše jako kuličkový karbid ve feritické matrici na hranicích zrn. Toto je způsobeno precipitací C na hranicích zrn kvůli vysokému obsahu Si v matrici, který zamezuje difuzi C do grafitu. Tato vrstva bohatá na C je vysrážena jako kuličkový karbid. Velký podíl Si v rostoucím austenitu způsobuje vylučování C v okolní tavenině, a proto se okolo austenitických zrn vylučují karbidy.

SiMo litiny nejsou v české normě standardizované, v Evropské normě ČSN EN 1563 jsou uvedeny následující modifikace SiMo litin: EN GJS SiMo 4 -05, EN GJS SiMo 4 -1, EN GJS SiMo 5-05 a EN GJS SiMo 5 -1, obsah bývá obvykle C 3-3,4%, Si 3,75-4,25% a Mo 0,5-0,7%.

6.4 Výroba SiMo litiny: [7]

Metalurgie SiMo litiny je velmi podobná konvenčním litinám, vsázka musí obsahovat minimum složek stabilizujících karbidy a perlitotvorných prvků. Složení taveniny je třeba kontrolovat v průběhu tavby spektrometrickou analýzou, dále se kontroluje teplota tekutého kovu v peci před modifikací a doba odstátí. Kov je modifikován obvyklými metodami. Velmi důležitá je také kontrola teploty lití a čas plnění formy. Pro tvorbu feritické struktury je nutné zajistit, aby odlitek chladnul ve formě požadovanou dobu. Další tepelné zpracování se nedoporučuje.

Jelikož existuje několik typů SiMo litin, které se liší obsahem legur a mají rozdílné mechanické vlastnosti za vyšších teplot a korozivzdornost, je důležité je rozlišovat dle složení a vlastností. Obzvláště důležité jsou následující kroky:

1. Základní složení kovu a správná teplota lití, 1398-1454 °C: stačí běžný způsob kontroly teploty pyrometrem.
2. Údržba licí pánve a očkování: očkuje se na dno pánve o adekvátních rozměrech.
3. Odeznívací účinek modifikace (laboratorní zkouška): dostačuje normální kontrola metalografickým mikroskopem na výbrusu.
4. Počet kuliček grafitu a tvar primárních karbidů: Na 1 mm^2 musí být minimálně 100 zrn grafitu, tento počet je možno ovlivňovat částečně obsahem Si, ale hlavně rychlostí tuhnutí, tvorba karbidů není většinou problematická.
5. Chemické složení odlévaného kovu: je prováděna standardní spektrometrická zkouška pro odhalení chyb vzniklých při tavbě.
6. Struktura matrice: Je požadován minimální obsah perlitu a minimální síť karbidů na hranicích zrn (při tepelné roztažnosti může dojít k mikrotrhlinám).
7. Homogenita materiálu: kontrola probíhá ultrazvukem.

Výroba z praxe (dle firmy Grede, slévárna Liberty Wauwatosa, Wisconsin) na výrobu 100% tekutého kovu :

-Obsah uhlíku se ustaví na 3,35-3,45%;

-Obsah Si se ustaví na 1,5-1,7%;

-2,4 % FeSi 75%;

-1,4 % modifikátoru FeSiMg (5,75% Mg);

-1,1 % FeMo (nespecifikovaná jakost);

-0,7 % FeSi naočkováno dle použité technologie;

-teplota lití 1482 až 1537 °C;

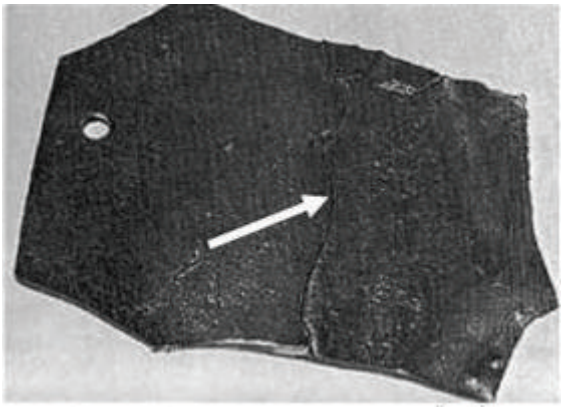
6.5 Vady vznikající při výrobě: [9]

V tenkostěnných odlitcích se mohou z důvodu snížení teploty lití vyskytovat studené spoje nebo zhoršená zabíhavost a mikrostaženiny, což klade zvýšené nároky na manipulaci s taveninou. Z důvodu vysokého obsahu Si je obtížné získat vzorek bez grafitu pro spektrometrickou analýzu, z tohoto důvodu je někdy zapotřebí potvrzení výsledků dodatečným použitím jiné metody. Dalším důsledkem vyššího obsahu Si je možná tvorba oxidické strusky, která je velmi častým důvodem vzniku vad v odlitku.

Studený spoj (COLD SHUT) obr. č. 6.2: [9]

Je to vada způsobená nedokonalým spojením dvou proudů taveniny, má zaoblené hrany, čímž se liší od praskliny, které se může podobat. Může probíhat celou stěnou odlitku jako nespojitost.

Je způsoben: Vysokou tepelnou vodivostí formy.
Nízkou licí teplotou.
Litím probíhajícím v oxidační atmosféře, tavenina na okraji proudu zoxidovala.
Nízkou smáčivostí vnitřního povrchu formy.



Obr. č. 6.2: Fragment odlitku z vany ze šedé litiny lité na syrovo se zavaleninou. /9/

Nezaběhnutí (MISRUN) obr. č. 6.3: [9]

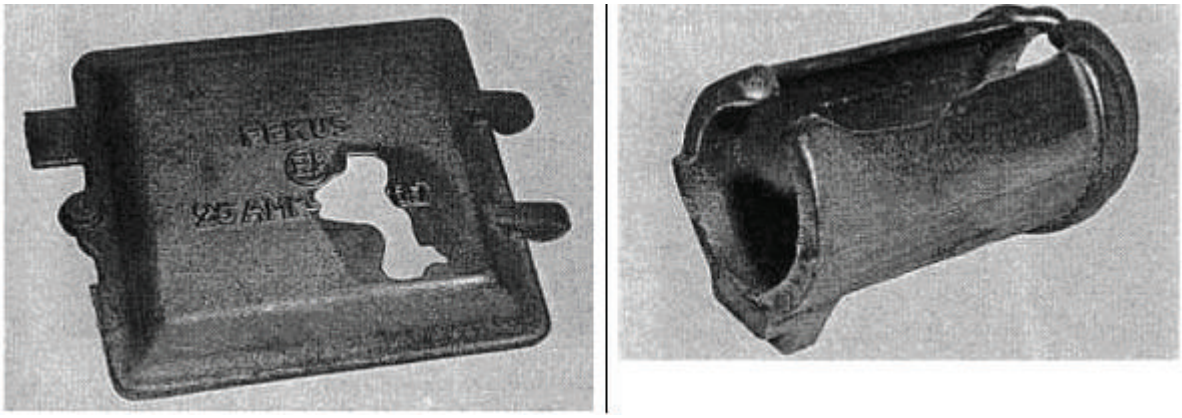
Projevuje se nedokonale vytvořenými tvary (chybějící rohy a hrany) a nebo úplně či částečně chybějícími částmi odlitku.

Je způsobeno: Nestejnoměrná tloušťka stěn odlitku způsobující přerušovaný proud taveniny.

Nedostatečně dimenzovaná vtoková soustava.

Vysoká vlhkost formovací směsi.

Nízká licí teplota.



Obr. č. 6.3 Šedá litina, syrová forma, nedostatečná licí teplota. /9/

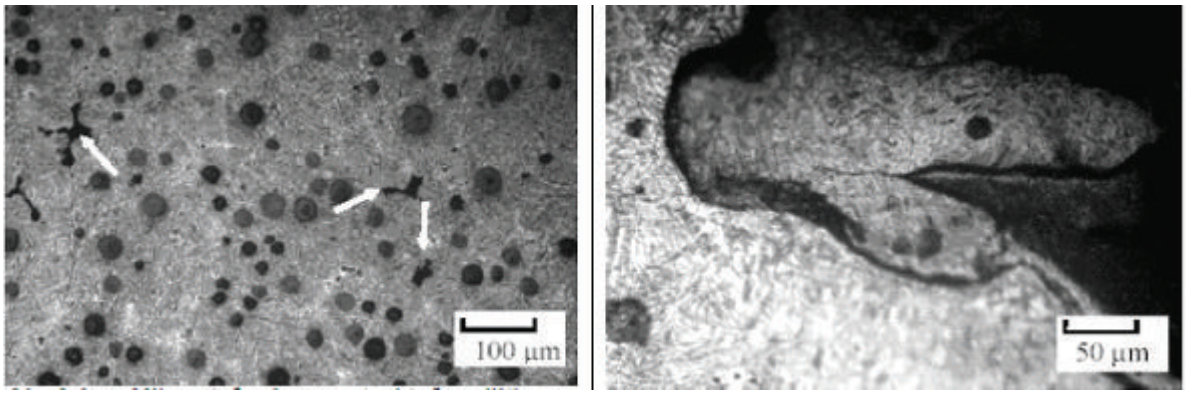
Mikrostaženiny obr. č. 6.4: [9]

Prostým okem obtížně rozeznatelné vady, tvoří se v místech styku rostoucích dendritů nebo zrn tuhnoucí slitiny. Do mezidendritické taveniny se při tuhnutí začne vylučovat většina doprovodných i přísadových prvků a nečistot, které snižují teplotu tuhnoucí slitiny a jsou velmi často důvodem vzniku křehkých fází a následně mikrotrhlin. Litina musí mít velký součinitel smrštění dlouhou dobu intervalu tuhnutí a omezené dosazování kovu.

Jsou způsobeny: Nestejnoměrný průběh tuhnutí taveniny.

Nerovnoměrný přívod taveniny do formy.

Vysoká licí teplota.



Obr. č. 6.4: Mikrostaženiny ve struktuře odlitku z tvárné litiny (vlevo), Detail mikrostaženiny z levého obrázku na hranici s grafitovým zrnem /9/.

6.6 Trendy vývoje litin SiMo [10]

Jak již bylo řečeno další vývoj směřuje k dalšímu zvyšování teplot, které se už blíží limitům konvenčních SiMo litin, proto se přistoupilo k dalšímu dolegování SiMo aby došlo ke zvýšení odolnosti vůči oxidaci, větší tvárnosti za vyšších i pokojových teplot, redukci creepu a meze pevnosti za zvýšených teplot.
Dolegovává se 1,5% W, 0,8% V a 1,2% Nb s kombinací Mo nebo Cr, zvýšením obsahu Al a Si dojde ke zvýšení odolnosti vůči oxidaci za zvýšených teplot. Bohužel nalegováním tolika prvků značně stoupla cena a tyto litiny se neujaly, z důvodu že právě výborný poměr nízké ceny a dobrých materiálových vlastností jsou důvodem pro volbu SiMo.

7 Závěr:

Byly určeny požadavky průmyslu na vlastnosti materiálu pro použití za zvýšených teplot, dále byly vytipovány druhy materiálů vhodných pro použití za zvýšených teplot a určeny hranice jejich použití. Osvětlily se mechaniky poškozování materiálu za zvýšených teplot a to i při cyklickém zatěžování, po zhodnocení výsledků ze zkoušky odolnosti vůči oxidaci různých litin s kuličkovým grafitem a litin s lupínkovým grafitem byly zvoleny nízkolegované litiny legované Si a Mo z důvodu jejich příznivé ceny, která je asi 10x nižší než cena NiResist (byly porovnávány EN-GJS-SiMo5-1 a EN-GJS-AXNiCr20-1) a výborných materiálových vlastností. Byl vypracován přehled těchto litin a vliv legur Si a Mo na jejich vlastnosti. Byla rozebrána jejich výroba, mikrostruktura a vady nejčastěji vznikající při výrobě.

Seznam použité literatury

[1] Emisní norma EURO, cit [27.3.2011] , dostupné z www: http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro

[2] Autor neznámý (SaabJohan), Exhaust Manifold Materials, cit [27.3.2011], dostupné z www: http://www.automotiveforums.com/t692446-exhaust_manifold_materials.html

[3] Otáhal,V.: Tvárná litina, Litina s kuličkovým grafitem -Monografie, CD Rom, II rozšířené vydání, MCFC/TEP, Brno, 2009;

[4] Otáhal,V.: Šedá litina, litina s lupínkovým grafitem -Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2007;

[5] Otáhal,V.: Litina s kompaktním – vermikulárním (červíkovitým) grafitem -Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2010;

[6] Faruk Unkić, Zoran Glavaš, Katarina Terzić, The influence of elevated temperatures on microstructure of cast irons for automotive engine thermo-mechanical loaded parts, January 2009, s. 15, cit [27.3.2011], dostupné z http://www.rmz-mg.com/letniki/rmz56/RMZ56_0009-0023.pdf

[7] Wirth, David J., High Si-Mo ductile iron: views from users and producers, March 1998, cit [27.3.2011], dostupné z: http://www.thefreelibrary.com/High+Si-Mo+ductile+iron%3a+views+from+users+and+producers.-a020518932

[8] vonRoll casting, Katalog litin, cit [27.3.2011] dostupné z www: http://www.vonroll-casting.ch/public/En/02.Technology%20&%20Manufacturing/02.Materials/Cast%20iron.en.pdf

[9] Otáhal,V.: Vady odlitků- Atlas Vad Železné a neželezné slitiny, CD Rom, I vydání, MCFC/TEP, Brno, 2008;

[10] G. Liao, D. Li, G. B. Burger, R. N. Logan, Cast Iron With Improved High Temperature Properties, cit [27.3.2011] dostupné z www: http://www.faqs.org/patents/app/20080274005