

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

Opravné svařování odlitků z litin legovaných chromem

The castings repair welding from iron chromium alloyed

Diplomová práce

Praha 2017

Autor: Bc. Vojtěch Beneš
Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Němec, CSc.

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Bibliografická citace

BENEŠ, Vojtěch. *Opravné svařování odlitků z litin legovaných chromem*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Němec, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorských zákonů).

V Praze dne

Podpis

Poděkování:

Tímto děkuji panu doc. Ing. Milan Němec, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Děkuji doc. Ing. Antonín Mores CSc. Za cenné rady a hodnotné podklady věnující se tématu mé diplomové práce. Děkuji také firmě Slévárna Chomutov, a.s. za poskytnutí zkušebních vzorků. V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu.

Anotace:

Diplomová práce se zabývá problematikou opravného svařování litin legovaných chromem. Pozornost je věnována i bílým litinám, z nichž vycházejí základy otěruvzdorných litin, které jsou dále popsány a rozděleny. V práci je popsána problematika opravného svařování otěruvzdorných litin, z níž vychází i experimentální zkoušky opravného svařování dvou zkušebních vzorků z litiny vysoce legované chromem. Následuje vyhodnocení zkoušky a obecný závěr pro opravné svařování.

Abstract:

This Master's thesis deals with the issue of repair welding of chromium cast iron. Particular attention is paid to white cast irons, from which the foundations of abrasion-resistant cast irons arise and which are also described and subdivided. The thesis describes the issue of the repair welding of abrasion-resistant cast irons, including the experimental examination of the repair welding of two test pieces made from high-alloy chromium cast iron. The evaluation of examination is subsequently exercised followed by general conclusion for the repair welding.

Klíčová slova:

Bílá litina, otěruvzdorná litina, chromová litina, opravné svařování

Key Words:

White cast iron, Abrasion-resistant cast iron (AR cast iron), chrome cast iron, repair welding

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Základní rozdělení litin	11
2. 1. Grafitická litina	12
2. 2. Legovaná litina	19
2. 3. Bílá litina (karbidická litina).....	19
2. 3. 1. Tuhnutí bílých litin	20
2. 3. 2. Strukturální složky bílých litin	22
2. 3. 3. Vlastnosti bílých litin.....	33
3. Otěruvzdorné litiny	36
3. 1. Otěruvzdorná nelegovaná nebo nízkolegovaná litina	37
3. 2. Otěruvzdorná chrom-niklová litina.....	37
3. 3. Otěruvzdorná litina s vysokým obsahem chromu.....	38
4. Vady odlitků z hlediska opravitelnosti	42
4. 1. Problematika opravného svařování otěruvzdorných litin	44
5. Experimentální zkoušky opravného svařování na odlitku z otěruvzdorných litin.....	46
5. 1. Materiál použitý při zkoušce.....	46
5. 1. 1. EXTRA L-1	46
5. 1. 2. EXTRA L-5	47
5. 2. Elektrody vhodné pro opravy odlitků z litin legovaných chromem	49
5. 2. 1. OK Weartrode 60 T	49
5. 3. Opravné svařování	50
5. 4. Vyhodnocení	51
5. 4. 1. Vizuální vyhodnocení	51
5. 4. 2. Metalografické vyhodnocení	53
5. 4. 3. Vyhodnocení podle tvrdosti.....	55
6. Předpis pro opravné svařování otěruvzdorných litin	57

7. Závěr	59
8. Seznam použité literatury	60

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rovnovážný diagram Fe-C - - -; Fe-Fe ₃ C ____ [3]	11
Obrázek 2: Základní rozdělení litin [1].....	12
Obrázek 3: Tvar grafitu u LLG [1]	13
Obrázek 4: Vliv tvaru grafitu na koncentraci pnutí [1]	13
Obrázek 5: Tvar grafitu u LKG [1].....	14
Obrázek 6: Tvar grafitu u LVG [1].....	17
Obrázek 7: Tvar grafitu u TL [1]	18
Obrázek 8: Tuhnutí grafické (vlevo) a bílé (vpravo) litiny [1].....	20
Obrázek 9: Vliv prvků na posun teplot T _{ES} a T _{EM} [1]	20
Obrázek 10: Struktura podeutektické bílé litiny [9]	23
Obrázek 11: Struktura eutektické bílé litiny [9]	23
Obrázek 12: Struktura nadeutektické bílé litiny [9] [10].....	24
Obrázek 13: Vznik lamelárního perlitu [1].....	25
Obrázek 14: Dispersita perlitu [1]	26
Obrázek 15: Schématické znázornění vylučování karbidů u horního bainitu (a) a u dolního bainitu (b) [13].....	27
Obrázek 16: krystalická mřížka Fe ₃ C [15]	30
Obrázek 17: Diagram vlivu chem. složení na typ karbidů ve struktuře bílých litin [1] .	30
Obrázek 18: Nadeutektická litina s vysokým obsahem chromu: porovnání velikosti primárního a eutektického karbidu (Fe,Cr) ₇ C ₃ [17].....	31
Obrázek 19: Odezdnívání modifikačního účinku při držení taveniny v peci [17].....	32
Obrázek 20: Vliv množství modifikátoru na strukturu primárního karbidu u nadeutektické bílé litiny [17]	32
Obrázek 21: Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo [12].....	40
Obrázek 22: Otěruvzdorná chromová litina EXTRA L-1	47
Obrázek 23: Otěruvzdorná chromová litina EXTRA L-5	48
Obrázek 24: Příprava svarů.....	50
Obrázek 25: Velké a střední svary EXTRA L-1 (vpravo) a EXTRA L-5 (vlevo).....	52
Obrázek 26: Malé svary EXTRA L-1 (vpravo) a EXTRA L-5 (vlevo).....	52
Obrázek 27: EXTRA L-1 metalografické vyhodnocení, 100x	53
Obrázek 28: EXTRA L-5 metalografické vyhodnocení, 100x	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Orientační přehled mechanických vlastností LLG [1]	13
Tabulka 2: Chemické složení LKG [2].....	14
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG [1]	15
Tabulka 4: Orientační mechanických vlastností TL [1]	18
Tabulka 5: Závislost obsahu chromu na žáruvzdornosti [1].....	35
Tabulka 6: Tvrdost dle Vickerse a chemické složení nelegovaných nebo nizkolegovaných ořevzdorných litin [20].....	37
Tabulka 7: Tvrdost dle Vickerse a chemické složení ořevzdorných chrom-niklových litin [20]	38
Tabulka 8: Chemické složení ořevzdorných litin s vysokým obsahem chromu [20]..	39
Tabulka 9: Roztřídění vad odlitků podle skupin a druhů [11].....	42
Tabulka 10: EXTRA L-1 chemické složení v procentech [21]	46
Tabulka 11: EXTRA L-5 chemické složení v procentech [21]	47
Tabulka 12: Typické složení čistého svarového kovu [22]	49
Tabulka 13: Výkonové parametry OK 84.78 [22].....	50
Tabulka 14: Vizuální vyhodnocení.....	51
Tabulka 15: Vyhodnocení podle tvrdosti.....	55

Seznam vzorců

(1) Podíl karbidů ve struktuře [17]	30
-------------------------------------	----

1. Úvod

Odlitky z litiny s vysokým obsahem chromu svou tvrdostí a odolností proti opotřebení zcela zastíňují všechny ostatní druhy litin. Tyto litiny nejsou určeny ke konstrukčnímu svařování a rovněž se nedoporučuje na ně navařovat další návary. I přesto, že tyto litiny nejsou vhodné ke svařování, se firma Slévárna Chomutov, a.s. zabývá problematikou jejich opravného svařování. Na odlitcích se často vyskytují malé povrchové vady, které nesnižují jejich materiálové a užité vlastnosti. Tyto vady je možno opravovat svařováním za dodržení určitých specifických podmínek. Požadavkem je vytvořit takový svarový kov, který bude téměř shodný se základním materiálem odlitku.

Pro ověření, zda je tento materiál možné opravně svařovat a současně dodržet materiálové požadavky otěruvzdorných litin, bude nutné provést simulaci opravného svařování tohoto materiálu. Je třeba najít takový přídavný materiál a technický postup, které zaručí bezvadný opravný svar s požadovanými vlastnostmi. Skutečnost, zda opravné svary budou odpovídat požadovaným vlastnostem, ukáže konečné vyhodnocení, které se bude skládat z metalografického vyhodnocení a z vyhodnocení podle tvrdosti.

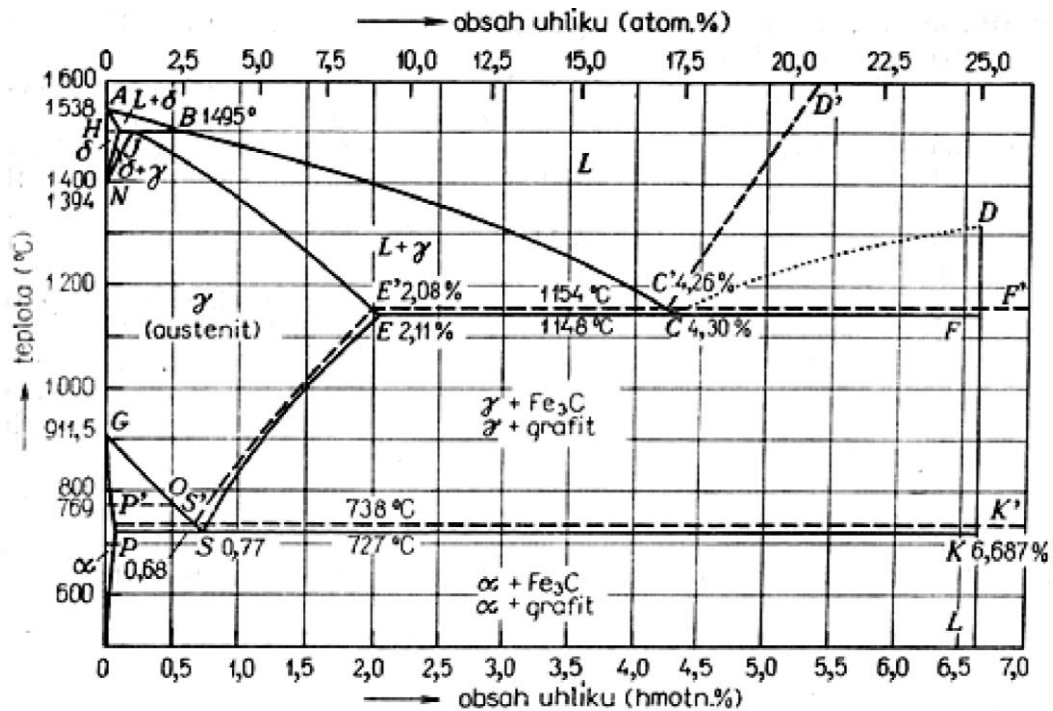
2. Základní rozdělení litin

Definice litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, v nichž je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo vázán jako karbid Fe_3C , případně karbid jiného prvku. Přičemž obsah uhlíku je vyšší, než jeho rozpustnost v austenitu ($\text{C} > 2,08\%$ bez vlivu legujících prvků).

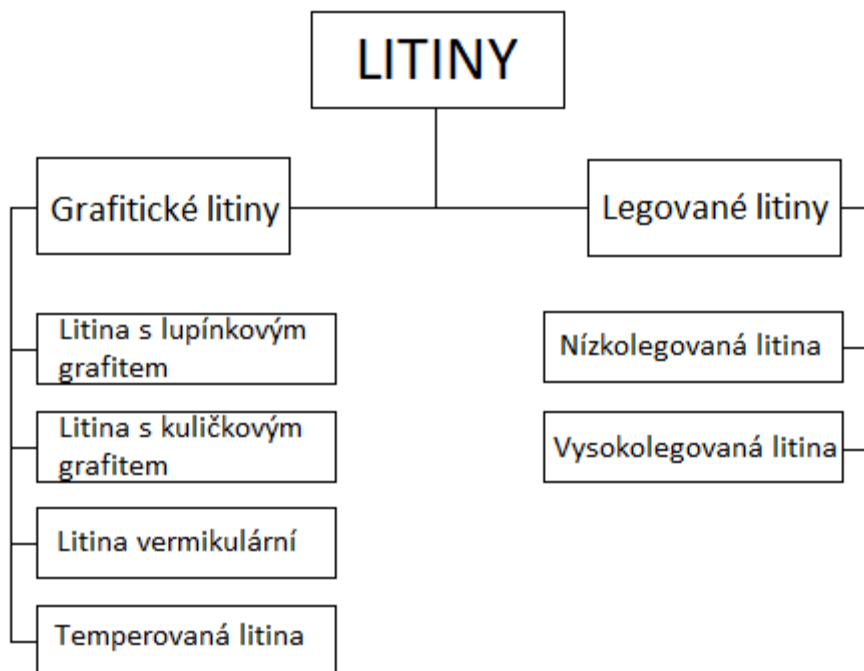
Litiny krystalizují podle dvou diagramů:

- Stabilní diagram železo-uhlík (Fe-C)
- Metastabilní diagram železo-karbid železa (Fe- Fe_3C)



Obrázek 1: Rovnovážný diagram Fe-C - - -; Fe- Fe_3C ____ [3]

Rozdělení litin



Obrázek 2: Základní rozdělení litin [1]

2. 1. Grafitická litina

Je tvořena základní kovovou maticí a grafitem, grafit a základní kovová matrice mají největší vliv na výsledné vlastnosti litiny. Tyto litiny mají šedý lom a jsou nejpoužívanější. Obsah uhlíku u grafitických litin se pohybuje mezi 2,5 – 3,8%. [1]

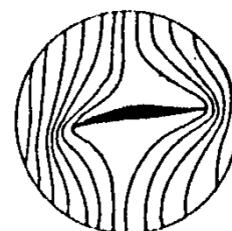
- **Litina s lupínkovým grafitem (LLG) – GJS**

Dříve označována jako šedá litina. Litina s lupínkovým grafitem je složena z kovové matrice a grafitu. Základními složkami kovové matrice je perlit a ferit a jejich obsah je udáván v určitém poměru, litina však může mít i čistě perlitickou nebo čistě feritickou strukturu. Perlit zvyšuje pevnost a tvrdost. Ferit naopak pevnost a tvrdost snižuje a však zlepšuje plastické vlastnosti litiny. Litina s lupínkovým grafitem obsahuje grafit ve tvaru lupínků (obr. 3), jejichž délka je podstatně větší než jejich tloušťka a konce lupínků jsou ostré. Ostré konce lupínků a jejich nepravidelná orientace zapříčiňuje negativní vrubový účinek grafitu (obr. 4), proto litiny s lupínkovým grafitem není vhodná pro konstrukci cyklicky namáhaných součástí. Na velikosti a tvaru lupínků

závisí konečné vlastnosti, čím menší je poloměr zakřivení lupínku a čím je lupínek delší, tím větší koncentrace napětí. Proto mají litiny s lupínkovým grafitem nízkou mez pevnosti v tahu, naopak jejich pevnost v tlaku je vysoká (až 3-krát větší než v tahu), proto jsou vhodné ke konstrukci součástí namáhaných především tlakem. Platí také, že čím jsou lupínky grafitu jemnější, tím vyšší je pevnost materiálu. Litina s lupínkovým grafitem je vyznačuje velice dobrou tepelnou vodivostí. V průmyslu se tato litina používá na výrobu různých součástí strojů, armatur, těles čerpadel, řemenic atd. [1] [2]



Obrázek 3: Tvar grafitu u LLG [1]



Obrázek 4: Vliv tvaru grafitu na koncentraci pnutí [1]

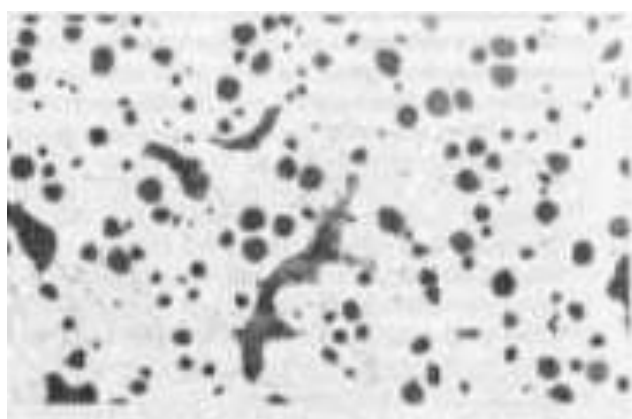
Tabulka 1: Orientační přehled mechanických vlastností LLG [1]

označení materiálu	pevnost v tahu R_m [MPa]	pevnost v tlaku R_d [MPa]	tvrdost [HB]
ČSN EN-GJL 100	100 – 200	-	< 180
ČSN EN-GJL 150	150 – 250	600	< 200
ČSN EN-GJL 200	200 – 300	720	< 220
ČSN EN-GJL 250	250 – 350	840	< 240
ČSN EN-GJL 300	300 – 400	960	< 260
ČSN EN-GJL 350	350 – 450	1080	< 270

* tažnost LLG je zanedbatelná

- **Litina s kuličkovým grafitem (LKG) – GJS**

Dříve označována jako tvárná litina. Struktura LKG je tvořena kovovou maticí a grafitem, kovová matrice může být feritická, perlitická nebo jejich kombinace, a to v určitém poměru. Litina s kuličkovým grafitem obsahuje grafit vyloučený ve formě kuliček (obr. 5), mechanické vlastnosti této litiny úzce souvisejí s jeho velikostí a pravidelností. Chemické složení (viz Tabulka 2) je jedním z nejdůležitějších faktorů, které ovlivňují konečnou strukturu i vlastnosti LKG. Správné chemické složení, jeho pečlivá kontrola a mimopecní metalurgie (modifikace a očkování) jsou stěžejními body k získání litiny s kuličkovým grafitem a požadovanou strukturou kovové matrice. [1] [2]



Obrázek 5: Tvar grafitu u LKG [1]

Tabulka 2: Chemické složení LKG [2]

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Mg [%]
3,2 – 4,3	1,5 – 4,0	0,15 – 0,8	< 0,03	< 0,01	0,03 – 0,06

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti nelegovaných LKG [1]

Označení materiálu	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A [%]	Tvrдость HB	Struktura matrice
EN-GJS-350-22	350	220	22	< 160	F
EN-GJS-400-18(15)	400	250	18 (15)	130-175	F
EN-GJS-450-10	450	310	10	160-210	F
EN-GJS-500-7	500	320	7	170-230	F + P
EN-GJS-600-3	600	370	3	190-270	P + F
EN-GJS-700-2	700	420	2	225-305	P
EN-GJS-800-2	800	480	2	245-335	P, S
EN-GJS-900-2	900	600	2	270-360	B, S

* Struktura matrice: F-ferit, P-perlit, S-sorbit, B-bainit

Modifikace litiny s kuličkovým grafitem

Modifikace ovlivňuje tvar grafitu při jeho krystalizaci a to tak, že se lupínkový grafit působením modifikátoru mění na kuličkový. Nejčastějším modifikátorem v průmyslové praxi bývá hořčík, případně jeho slitiny. Skoro všechny moderní modifikátory obsahují doplňkové prvky, jako cer, lanthan, nebo jiné kovy vzácných zemin. Tyto kovy vzácných zemin mají lepší afinitu ke kyslíku a k síře než hořčík, a proto jsou schopny tvořit stabilní krystalizační zárodky grafitu (zvyšují počet grafitických zrn), také neutralizují účinek řady škodlivých prvků jako olovo, antimon, titan, arsen atd. Dále umožňují snížit potřebné dávkovací množství hořčíku a podporují rovnoměrnější průběh modifikace.

Modifikace je mimopecní zpracování roztavené slitiny, doprovázené bouřlivou reakcí hořčíku. Princip modifikace spočívá v postupném rozpouštění hořčíku, který ve formě páry probublává skrz modifikovanou litinu, absorbuje se na plochách stávajícího grafitu, čímž mění rychlost a směr růstu krystalických ploch. Je žádoucí, aby dráha hořčíkových par (bublin) byla co možná nejdelsí a jejich proudění bylo pomalé a klidné. Proto je nutné, aby byl modifikátor umístěn pod hladinu kovu. Nejčastějšími způsoby přidání modifikátoru do roztavené litiny jsou tyto metody: polévací, ponořovací,

konvertorové, kontinuální a plněnými profily. Pro získání kuličkového grafitu je nutné, aby byl obsah zbytkového hořčíku mezi 0,03% – 0,06% (v závislosti na tloušťce stěny odlitku). [1] [2] [3]

Očkování litiny s kuličkovým grafitem

Hořčík podporuje metastabilní tuhnutí, čím vyšší obsah uhlíku, tím větší sklon ke vzniku karbidů a zákalky. Proto vždy po modifikaci musí následovat očkování, buď jednostupňové očkování (očkuje se zároveň s modifikací), nebo dvoustupňové očkování (očkuje se po modifikaci).

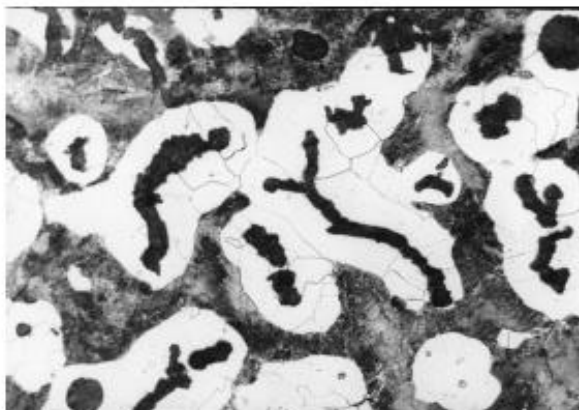
Očkování je velmi složitý proces ovlivněný řadou proměnných faktorů jako: dodržení teploty, chemického složení, typu očkovačla a jeho zrnitost. Při výrobě LKG to je nezbytně nutná metalografická operace, která ovlivňuje základní kovovou matici. Jedná se o způsob mimopecního zpracování litiny. Podstatou očkování je heterogenní nukleace, ta je zapříčiněná přidáním očkovačích látek do roztavené litiny. Očkování zvyšuje počet cizích grafitizačních zárodků, tím maximalizuje počet zrn grafitu a zjemňuje vyloučený grafit. Zabraňuje vzniku volného cementitu a zvýšeného výskytu zákalky. Celkově zlepšuje mechanické vlastnosti litiny, a přitom v podstatě nemění chemické složení litiny.

Pro očkování LKG se používá převážně očkovačel na bázi křemíku (FeSi) s obsahem křemíku 60 – 70%, hliníku 0,5 – 1,25% a vápníku 0,6 – 1,0%. Očkovačla mohou obsahovat minoritní prvky jako barium, zirkon, cer atd.

Očkování je proces dočasný, dle praktických zkušeností se uvádí účinnost cca 20 minut od přidání očkovačla do taveniny. Z toho důvodu je snaha očkovat taveninu těsně před litím, a to tekutým očkovačlem nebo granulovým (nejčastější). Lze očkovat i přímo ve formě očkovačích tělísky, vkládanými buď do licí jamky, nebo do reakční komůrky ve vtokové soustavě. Objem očkovačla se pohybuje od 0,1% do 1,2% na hmotnost tekutého kovu, záleží na specifických podmínkách daného lití. [1] [2] [3]

- **Litina s červíkovitým grafitem (LVG) – GJV**

Dříve označována jako litina vermikulární. Litina s červíkovitým grafitem je složena z kovové matrice a grafitu. Kovová matrice je perlitická, feritická nebo jejich kombinace, stejná jako u litiny s lupínkovým grafitem. Tvar grafitu litiny s červíkovitým grafitem má podobnou morfologii jako grafit lupínkový, ale je kratší a tlustší, tento tvar grafitu se nazývá červíkovitý (obr. 6). Ve struktuře této litiny se obvykle objevuje též určité množství grafitu ve tvaru lupínkovitém nebo kuličkovitém, ale to maximálně do 20% z celkového vyloučeného grafitu. Červíkovitý grafit může vznikat jako nežádoucí struktura při výrobě litiny s kuličkovým grafitem (nedostatečná modifikace, vysoký obsah síry), nebo jej lze vytvářet záměrně (nedomodifikováním nebo titanem). Vlastnosti litiny s červíkovitým grafitem se pohybují mezi vlastnostmi litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem. Vyznačuje se podobnými, velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi, jako litina s lupínkovým grafitem a zároveň velmi dobrými mechanickými vlastnostmi blízcí se litinám s kuličkovým grafitem. Tato litina se používá především u součástí tepelně namáhaných (např. hlavy a bloky válců). [1] [2]

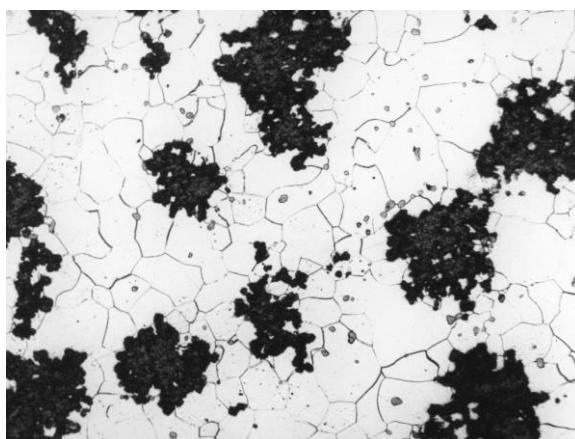


Obrázek 6: Tvar grafitu u LVG [1]

- **Temperovaná litina (TL) – GJM**

Temperovaná litina se vyrábí tepelným zpracováním bílé litiny (temperováním). Při tomto procesu dochází ke grafitizaci ledeburitického a perlitického cementitu, litina se tím stává měkčí a částečně tvárnější. Grafit má tvar vloček (obr. 7). Podle způsobu tepelného zpracování se mění výsledná struktura, temperované litiny se dělí na litiny

s bílým lomem (GJMW) a s černým lomem (GJMB). Litiny s bílým lomem vzniká žháním v oduhličovací atmosféře za teplot kolem 1000°C, vzniká převážně perlitická struktura. Litiny s černým lomem vznikají žháním v neutrální atmosféře a podle způsobu zpracování vzniká buď čistě feritická nebo perlitická struktura. Norma ČSN EN 1562 uvádí celou řadu temperovaných litin. Objem výroby této litiny se v posledních letech výrazně snížil (<1% celosvětově), své uplatnění si zachovává u specifických zejména tenkostěnných odlitků. Tato litina je nahrazována především litinou s kuličkovým grafitem. [1] [2]



Obrázek 7: Tvar grafitu u TL [1]

Tabulka 4: Orientační mechanických vlastností TL [1]

druh litiny	pevnost v tahu R_m [MPa]	tažnost A₃ [%]	tvrdost [HB]
S bílým lomem	350-450	4-10	200-230
S černým lomem			
- feritická	300-350	6-12	> 150
- perlitická	450-700	2-7	150-290

2. 2. Legovaná litina

Legované litiny se dělí na nízkolegované a vysokolegované, výsledné vlastnosti těchto litin jsou závislé na množství a charakteru jejich legur. Obsah legujících prvků je v desetinách až desítkách procent. Hlavními legujícími prvky jsou chrom, vanad, molybden, měď, nikl a cín. [1] [19]

Nízkolegované litiny

Obsah legujících prvků v nízkolegovaných litinách je obvykle několik desetin až jednotek procent. Legováním se většinou nemění zásadně struktura, zůstává v ní ferit nebo perlit (výjimečně karbidy). Účelem legování u nízkolegovaných litin je zejména zajištění perlitické struktury v celém průřezu, zvýšení mechanických vlastností (pevnosti, tvrdosti, ořezuvzdornosti) a zlepšení mechanických vlastností při zvýšených teplotách. Možnosti tohoto legování se využívají především u litin s lupínkovým a kuličkovým grafitem. [1]

Vysokolegované litiny

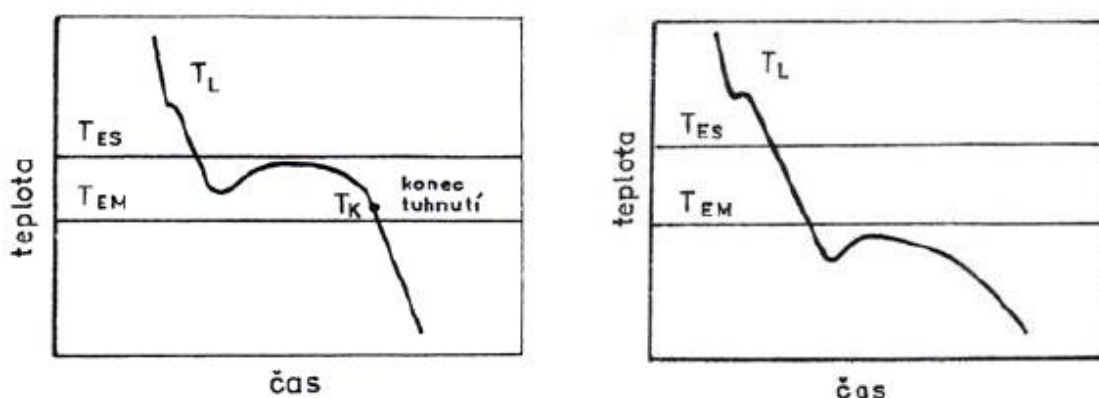
Obsah legujících prvků je v jednotkách až desítkách procent. Struktura často obsahuje karbidy legujících prvků, austenit, martenzit nebo i jiné strukturní složky. Z hlediska významu pro uplatnění v praxi mají největší význam litiny žáruvzdorné, litiny korozivzdorné a litiny odolné proti opotřebení. Základem pro většinu vysokolegovaných litin jsou bílé litiny. [1]

2. 3. Bílá litina (karbidická litina)

Struktura bílé litiny neobsahuje grafit. Uhlík je chemicky vázán jako karbid železa (cementit) v nelegovaných nebo slabě legovaných litinách. U vysokolegovaných litin se tvoří komplexní karbidy chromu, molybdenu, vanadu nebo niobu. Základní kovová matrice je obvykle tvořena perlitem, bainitem nebo martenzitem. Bílých litin je s výhodou používáno v podmínkách, kde hlavní opotřebení tvoří abraze nekovovými částicemi, většinou minerálního charakteru nebo se bílá litina používá na výrobu temperované litiny, a to za pomoci tepelného zpracování (temperování). [1] [5]

2. 3. 1. Tuhnutí bílých litin

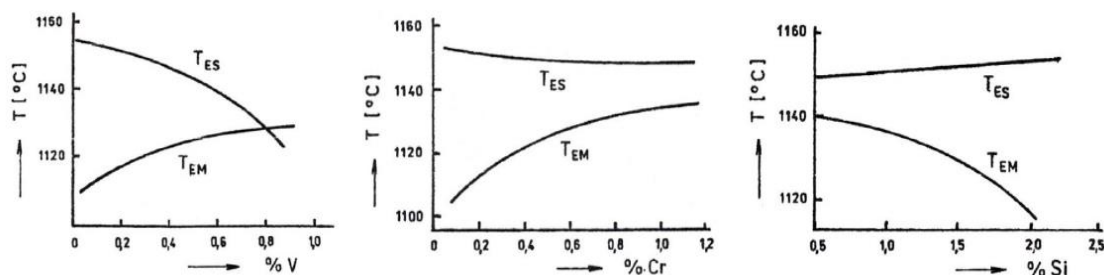
V binárním rovnovážném systému železo-uhlík může docházet k tuhnutí taveniny na eutektikum dvěma způsoby, buď podle stabilního systému při teplotě 1153°C (T_{ES}), nebo podle metastabilního systému na teplotě 1147°C (T_{EM}). Rozdíl mezi oběma teplotami je malý, avšak klíčový. Přesná hodnota těchto teplot a jejich konečný rozdíl je dále ovlivněn legujícími prvky v litině. Ten spolu s podmínkami krystalizace ovlivňuje, jak daná tavenina na eutektikum ztuhne, zda podle stabilního, metastabilního, nebo současně podle obou systémů. Výsledkem je pak různý obsah vyloučeného grafitu a cementitu ve struktuře.



Obrázek 8: Tuhnutí grafické (vlevo) a bílé (vpravo) litiny [1]

Podmínkou tuhnutí grafických litin je, že nukleace a růst eutektika musí nastat v intervalu T_{ES} a T_{EM} . Další podstatnou podmínkou nukleace eutektika je dostatečné množství nukleačních zárodků, aby tuhnutí v daném intervalu stihlo proběhnout.

U bílých litin se tavenina při ochlazování dostane na teplotu, při níž je přechlazení vůči T_{ES} pro nukleaci grafického eutektika ještě nedostačující, avšak přechlazení vůči T_{EM} je již dostatečné pro nukleaci a růst metastabilního eutektika. Výsledkem je litina s metastabilním eutektikem – ledeburitem.



Obrázek 9: Vliv prvků na posun teplot T_{ES} a T_{EM} [1]

Prvky, jako např. vanad, chrom a titan, podporují tuhnutí podle metastabilního systému a zároveň způsobují přiblížení teplot T_{ES} a T_{EM} jsou pro výrobu bílé litiny příznivé. Naopak prvky, které způsobují oddálení teplot T_{ES} a T_{EM} a podporují tuhnutí podle stabilního systému, výrobu bílé litiny komplikují. Tímto prvkem může být např. křemík, nikl a měď (nikl a měď sice způsobují oddálení teplot T_{ES} a T_{EM} , ale na druhou stranu podporují metastabilní transformaci – vznik perlitu, tudíž je jejich efekt do jisté míry protichůdný). [1] [6]

Vliv prvků na tuhnutí

- **Prvky podporující tuhnutí podle metastabilního systému**

Tyto prvky v tavenině během tuhnutí podporují vylučování uhlíku ve formě karbidů a tím podporují tuhnutí dle metastabilního diagramu Fe-Fe₃C (B, Ce, Mg, Te, V, Cr, S, Mo). Chrom, vanad a bor na sebe vážou uhlík jako karbidy a hořčík a cer brání grafitu v jeho krystalizaci.

- **Prvky podporující tuhnutí podle stabilního systému**

Tyto prvky v tavenině během tuhnutí podporují vylučování uhlíku ve formě volného grafitu a tím podporují tuhnutí dle stabilního diagramu Fe-C (Ti, P, Cu, Ni, C, Si, Al).

- **Prvky neutrální**

Tyto prvky jsou bez výrazného vlivu na formu vyloučeného uhlíku během tuhnutí. Jedná se o prvky Mn, Co, Zn a W. [1] [6]

Bílou litinu je možno získat:

- prudkým ochlazováním kovu během tuhnutí
- vhodným chemickým složením taveniny
- vhodnou přísadou antigrafitizačních prvků do taveniny
- přísadou prvků stabilizujících karbidy do taveniny

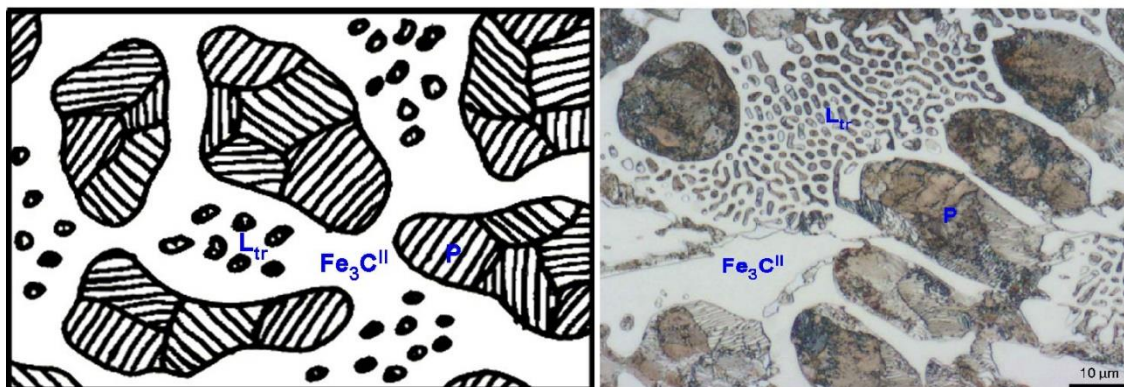
2. 3. 2. Strukturní složky bílých litin

Struktura bílých litin je tvořena základní kovovou hmotou a karbidickým eutektikem. Základní kovová hmota je v závislosti na chemickém složení, rychlosti ochlazování a tepelném zpracování feritická, feriticko-perlitická, perlitická, austenitická, martenzitická nebo bainitická. Rovnovážný diagram Fe-Fe₃C nám teoreticky ilustruje jakou má litina strukturu při daném chemickém složení a teplotě. Na tomto diagramu lze popsat rozdíly v průběhu tuhnutí a chladnutí litiny podeutektické, eutektické a nadeutektické, což má za následek jejich odlišnou strukturu a z ní vyplývající rozdílné vlastnosti. [1] [3] [7]

Krystalizace a překrystalizace bílé litiny

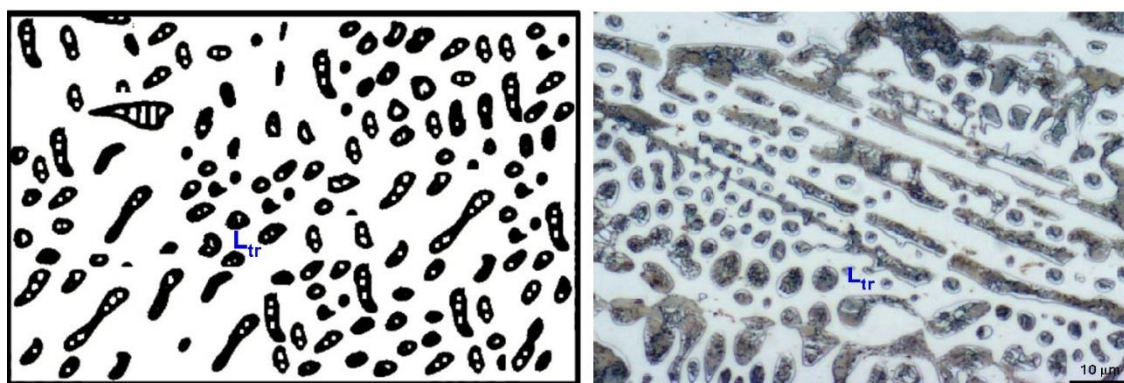
Tuhnutí podeutektické bílé litiny začíná tvorbou austenitických dendritů, a to zpravidla na stěnách formy, dále pokračuje jejich prorůstáním stěnou odlitku. Chemické složení zbývající taveniny se v průběhu tuhnutí posouvá směrem k eutektickému, protože růst dendritu je rychlejší než difuze uhlíku do dendritu. Dochází k dendritickému odmíšení (segregaci), toto odmíšení má za následek nízký obsah uhlíku ve vzniklých dendritech a tím dochází k obohacení zbylé taveniny uhlíkem. Při této reakci vznikne eutektická směs sestávající z drobných krystalů austenitu a cementitu, která se metalograficky označuje jako ledeburit. Cementit, který vzniká jako produkt eutektické reakce, se nazývá eutektický nebo také ledeburitický cementit. K této reakci by teoreticky mělo docházet při eutektické teplotě 1147°C, ve skutečnosti se však tento děj odehrává při jistém přechlazení. Při dalším ochlazování v oblasti mezi eutektickou a eutektoidní teplotou se dendrity primárního austenitu i drobné krystaly austenitu obsažené v ledeburitu stávají přesyceny uhlíkem, tím se uhlík z austenitu vylučuje ve formě sekundárního cementitu. U primárního austenitu se vylučuje po hranicích zrn a u austenitu obsaženého v ledeburitu se připojuje k již existujícím útvarům ledeburitického cementitu. Po dosažení eutektoidní teploty pak nastává eutektoidní přeměna austenitu na perlit (směs feritu a cementitu). Z dendritů primárního austenitu vznikají rozsáhlé oblasti perlitu, kopírující tvar původních dendritů. Z austenitu obsaženého v ledeburitu vznikají drobné ostrůvky perlitu, uložené v eutektickém a sekundárním cementitu, tato strukturní směs perlitu a cementitu, která vzniká z původní eutektické směsi ledeburitu, se označuje jako rozpadlý nebo transformovaný

ledeburit. Výsledná struktura podeutektické bílé litiny (obr. 10) je tvořena třemi základními strukturními prvky, a to transformovaným ledeburitem, perlitem a sekundárním cementitem.



Obrázek 10: Struktura podeutektické bílé litiny [9]

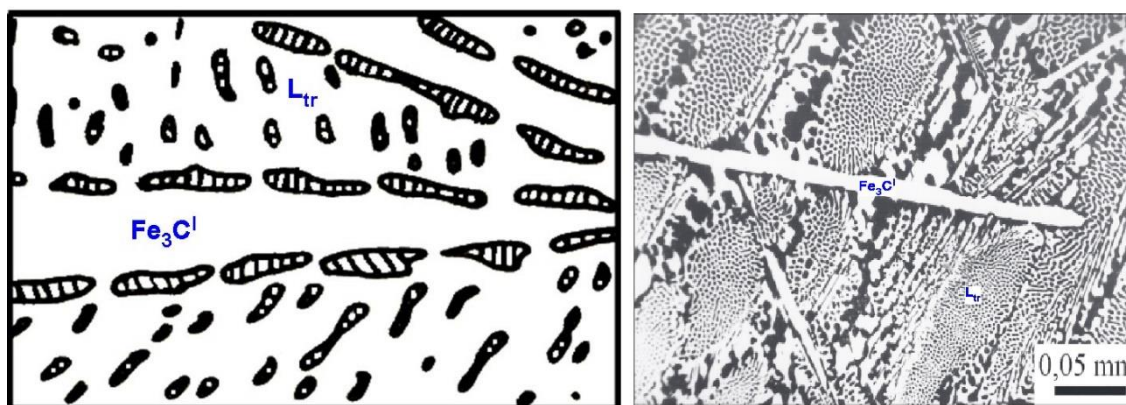
Tuhnutí eutektické bílé litiny začíná na nejnižší, tj. eutektické teplotě, kdy z veškeré taveniny vzniká eutektická směs ledeburit. Další průběh ochlazování je obdobný jako u podeutektické bílé litiny, s rozdílem, že se ve struktuře nenacházejí žádné dendrity primárního austenitu. Přebytečný uhlík se z austenitu vylučuje jako sekundární cementit, který se ukládá k ledeburitickému cementitu bez patrného rozhraní. Výslednou strukturu po překrystalizaci austenitu na perlit tvoří pouze transformovaný ledeburit (obr. 11).



Obrázek 11: Struktura eutektické bílé litiny [9]

Tuhnutí nadeutektické bílé litiny začíná vylučováním hrubých krystalů primárního cementitu. V průběhu jeho vylučování ubývá v tavenině, a ta se svým chemickým složením postupně blíží eutektickému bodu. Po dosažení eutektické teploty zbylá tavenina tuhne na směs austenitu a eutektického cementitu, tj. ledeburitu. Tudiž těsně

pod přímkou solidus je struktura slitiny tvořena primárním cementitem a ledeburitem. Při dalším ochlazování v oblasti mezi eutektickou eutektoidní teplotou se austenit v ledeburitu stává přesycen uhlíkem. Uhlík se z austenitu vylučuje po hranicích zrn jako sekundární cementit a ukládá se k eutektickému (ledeburickému) cementitu. Překrystalizace v tuhém stavu končí podobně jako u podeutektické a eutektické bílé litiny. Po dosažení eutektoidní teploty pak dochází k eutektoidní transformaci, a to k rozpadu austenitu v ledeburitu na perlit. Výslednou strukturu nadeutektické bílé litiny tvoří transformovaný ledeburit a primární cementit (obr. 12). [1] [6] [8] [9] [10]



Obrázek 12: Struktura nadeutektické bílé litiny [9] [10]

Austenit

Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe Fe_γ , mřížka kubická plošně centrovaná. Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu leží v rozmezí 2,08 – 2,14% a to při teplotě 1147°C. Austenit vzniklý přímo z taveniny je hrubozrnný a je nazýván jako tzv. „primární austenit“. V nelegovaných litinách je austenit stabilní pouze v nadeutektoidních teplotách, v tuhém stavu by se měl vyskytovat pouze jako zbytkový austenit. Také se může vyskytovat u některých legovaných litin, především u litin legovaných niklem nebo chromem. [1] [3] [7]

Mechanické vlastnosti austenitu:

- měkký (s výjimkou legování chromem)
- dobré plastické vlastnosti
- odolný proti korozi

Ferit

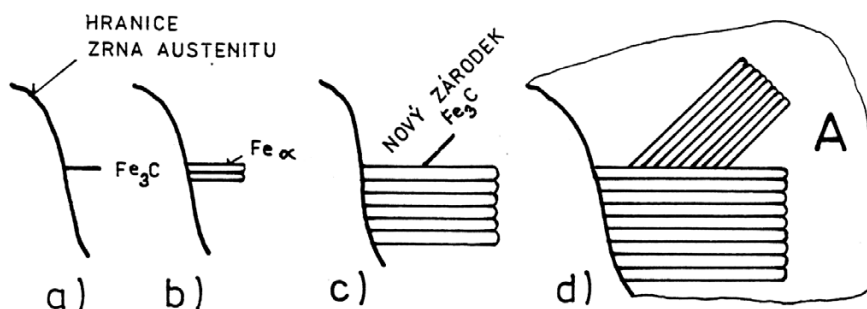
Intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe Fe_α , mřížka kubická prostorově centrovaná. Maximální rozpustnost uhlíku ve feritu leží v rozmezí 0,018 – 0,04% a to při teplotě 723°C. Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu (pomalé ochlazování podporuje vznik feritu). Ferit je v litinách nositelem houževnatosti. Vlastnosti feritu jsou značnou měrou ovlivněny legurami a doprovodnými prvky. [1] [3] [7]

Mechanické vlastnosti feritu:

- nízká pevnost ($R_m = 220\text{MP}$)
- měkký (50 HB)
- dobré plastické vlastnosti ($A = 70\%$)
- dobrá obrobitelnost

Perlit

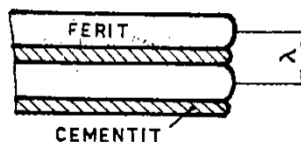
Eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Je to směs feritu a perlitického cementitu. Z rozpadu jednoho austenitického zrna vzniká hned několik zrn perlitu s rozdílnou orientací lamel. To je závislé na teplotě přechlazení, čím je přechlazení větší, tím více zrn perlitických z jednoho zrna austenitického. Perlitické zrno je tvořeno rovnoběžnými lamelami feritu a perlitického cementitu.



Obrázek 13: Vznik lamelárního perlitu [1]

Pro vytvoření jednoho perlitického zrna je vždy nutný vznik dvou zárodků, jednoho zárodku feritu a jednoho zárodku cementitu. Zpravidla tyto dva zárodky nevznikají současně, ale jeden z nich je první. Tento první zárodek perlitickou přeměnu zahajuje, proto je nazýván „aktivním zárodkem perlitu“. U litin je „aktivním zárodkem perlitu“ vždy cementit.

Perlit je v litinách nositelem pevnosti a tvrdosti. Vlastnosti perlitu výrazně závisí také na jeho hustotě, dané jeho dispersitou (obr. 14). Dispersita perlitu v litině je určena vzájemnou vzdáleností dvou sousedících lamel feritu, čím je perlit hustější, tím vyšší jsou mechanické vlastnosti celé litiny.



Obrázek 14: Dispersita perlitu [1]

Perlit se vyskytuje ve dvou morfologických formách, a to jako lamelární perlit nebo globulární perlit. V litině je běžně se vyskytující morfologickou formou perlitu lamelární perlit, kdy jsou perlitická zrna tvořena střídajícími se lamelami feritu a cementitu. Globulární perlit vzniká sbalením lamel perlitu. Dosáhneme toho pomocí sferoidizačního žíhání, nebo velmi pomalým ochlazováním. Litiny s globulárním perlitem vykazují lepší obrobitelnost, tvárnost a houževnatost, avšak menší tvrdost než litiny s lamelárním perlitem. [1] [3] [6] [7]

Mechanické vlastnosti perlitu:

- vysoká pevnost ($R_m=800\text{Mpa}$)
- vysoká tvrdost (280HB)
- špatné plastické vlastnosti
- špatná obrobitelnost (u globulárního perlitu lepší)
- dobrá odolnost proti opotřebení

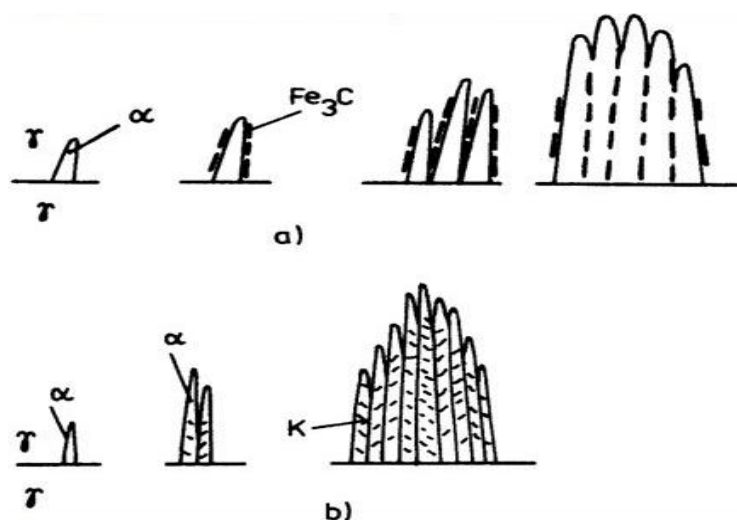
Bainit

Také nazývaný ausferit je směs feritu a cementitu, vyznačuje se jehlicovitou mikrostrukturou. Bainit vzniká při bainitické transformaci, ta je charakterizována rozpadem austenitu při nižších teplotách (500 – 200°C), při vyšších rychlostech ochlazování a snížené difuzi. Bainit se dělí na horní a dolní bainit.

Horní bainit vzniká při vyšších teplotách, a to v rozmezí 550 – 350°C. U horního bainitu jsou karbidy vyloučeny po hranicích feritických desek (jehlic). Karbidy zde nukleují převážně v přesyceném austenitu v blízkosti feritických desek.

Dolní bainit vzniká při nižších teplotách, konkrétně pod teplotou 350°C. U dolního bainitu jsou karbidy vyloučeny uvnitř feritických desek (jehlic). Karbidy zde nukleují převážně ve feritických deskách.

Rozdíl mezi bainitem horním a dolním je způsoben menším rozahem difuze za nižších teplot, proto je dolní bainit pevnější a tvrdší než bainit horní. Schéma vzniku bainitu je patrné z obr. 15.



Obrázek 15: Schématické znázornění vylučování karbidů u horního bainitu (a) a u dolního bainitu (b) [13]

Při bainitické transformaci je rychlost substituční difuze vlivem nižší teploty velmi nízká. V místě vzniku karbidu je nutná přítomnost atomů uhlíku i atomu kovu. Intersticiální uhlík se do tohoto místa přemisťuje intersticiální difuzí, která je rychlá. Atomy kovu se do tohoto místa přemisťují substituční difuzí, která je výrazně pomalejší. Karbidy při bainitické transformaci vyloučené jsou z toho důvodu pouze karbidy železa, atomy ostatních kovů se zde nevylučují, vzhledem k rychlosti sublimační difuze to nestihnou. A to ani u litin legovaných nedochází k vyloučení karbidů jejich legujících prvků. Po skončení bainitické transformace zůstává ve struktuře přítomen jistý podíl zbytkového austenitu, ten zapříčiňuje snížení celkové pevnosti výsledné struktury.

Bainit vzniká jako lící struktura legovaných litin, zejména u litin legovaných molybdenem a niklem. U nelegovaných litin vzniká při tepelném zpracování. Bainitické litiny (izotermicky kalené litiny) řadíme mezi moderní materiály s vysokou progresivitou. [1] [3] [6] [7]

Mechanické vlastnosti bainitu:

- vysoká pevnost
- vysoká tvrdost
- příznivé plastické vlastnosti

Martenzit

Přesycený tuhý roztok uhlíku v železe Fe_α . Vzniká při martenzitické transformaci, ta je charakterizována velkým přechlazením austenitu (teploty menší než 200°C). Aby k tomuto přechlazení bylo možné dojít, je zapotřebí dostatečně vysoká rychlost ochlazování, aby austenit prošel oblastí perlitické a bainitické reakce beze změny. Při teplotách nižších než 200°C již není difuze možná, jedná se tedy o bezdifusní rozpad austenitu. Při dosažení teploty počátku martenzitické přeměny má železo tendenci měnit uspořádání kubické mřížky z plošně centrované na prostorově centrovanou. Rozpustnost uhlíku v nově vzniklé prostorově centrované mřížce je mnohem menší, než tomu bylo v mřížce plošně centrované. Jelikož difuze již není možná, uhlík je v nově vzniklé mřížce uvězněn, to způsobuje deformaci nově vznikající mřížky, čímž je vyvoláno značné pnutí, která se projeví značnou tvrdostí a křehkostí, které jsou pro martenzit charakterizující. Ve výsledku pak nevznikne mřížka kubická prostorově středěná, ale tetragonální prostorově středěná. Čím je obsah uhlíku větší, tím více je mřížka deformována, a tím větší je výsledná tvrdost a křehkost martenzitu. Velikost vzniklých martenzitických jehlic je dána velikostí austenitických zrn, jejichž hranice pro ně při růstu tvoří nepřekonatelnou bariéru.

Martenzitická struktura litiny se většinou získává kalením. U některých legovaných litin je možné dosáhnout jejího vzniku přímo v litém stavu. Jedná se o litiny niklem, molybdenem a případně i chromem V případě oteřuvzdorných bílých litin se jedná zejména o litiny typu Ni-Hard a litiny legované chromem. [1] [3] [5] [6] [7]

Mechanické vlastnosti martenzitu:

- Velmi tvrdý (<1000HV)
- křehký

Ledeburit

Eutektikum v metastabilní soustavě Fe-Fe₃C s obsahem uhlíku 4,3%. Ledeburit je fázová směs tvořená austenitem a ledeburickým cementitem. Ledeburit u podeutektických a nadeutektických litin vzniká ze zbylé taveniny, po vzniku austenitických dendritů nebo primárních karbidů, kdy zbylá tavenina je již přesycena prvky tvořícími slitinu, na eutektické teplotě 1147°C. U litin o eutektickém složení se na ledeburit přemění všechna tavenina, aniž by předtím vznikl austenit nebo primární karbidy. Při eutektoidní teplotě ledeburitický austenit transformuje na ledeburitický perlit, čímž vzniká tzv. transformovaný ledeburit. [1] [7] [8]

Karbidy

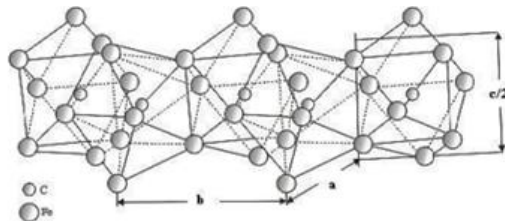
Rozpustnost uhlíku v železe je omezená, při překročení své maximální rozpustnosti, se začne přebytečný uhlík vylučovat ve formě intersticiálních chemických sloučenin, tedy karbidů (u grafitických litin ve formě volného grafitu). Karbidy jsou sloučeniny uhlíku s kovy. V bílých litinách se obvykle vyskytují, v závislosti na chemickém složení, různé typy karbidů, zejména pak železa a chromu. [1] [6]

Karbidy v nelegovaných litinách

V nelegovaných litinách je nejvýznamnějším karbidem Fe_3C , cementit. Obsah uhlíku v cementitu je 6,687% a krystalizuje ve složité romboické mřížce.

V litinách rozlišujeme několik forem cementitu, v závislosti na jejich vzniku:

- primární cementit
- eutektický cementit
- perlitický cementit



Obrázek 16: krystalická mřížka Fe_3C [15]

Primární cementit vzniká při tuhnutí taveniny nadeutektické bílé litiny, ve struktuře pak tvoří velmi hrubé útvary. Eutektický cementit je součástí ledeburitu, který vzniká ze zbylé taveniny na eutektické teplotě, tato forma cementitu značně zvyšuje tvrdost a křehkost litiny. Perlitický cementit vzniká jako součást perlitu při rozpadu austenitu na eutektoidní teplotě, tato forma cementitu zvyšuje pevnost a snižuje plastické vlastnosti litiny. [1] [7] [15]

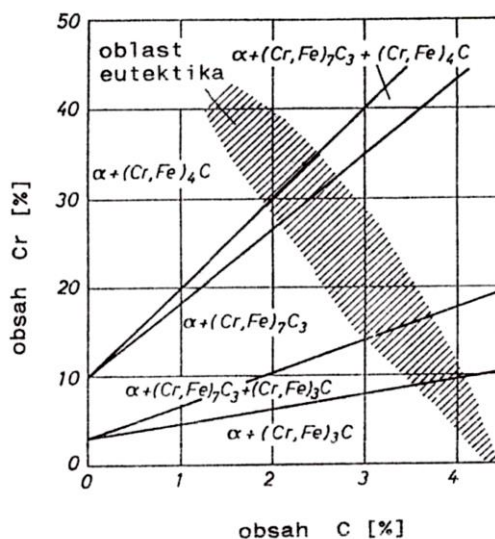
Karbidy v legovaných litinách

Nejčastějším legujícím prvkem v bílých litinách je chrom, v jejich struktuře je cementit nahrazen tvrdšími a stabilnějšími karbidy železa a chromu, typu $(Fe,Cr)_7C_3$. Vliv chemického složení na přítomnost jednotlivých typů karbidů ve struktuře bílé litiny popisuje obr.17.

Podíl karbidů ve struktuře bílých litin je nejvíce ovlivněn obsahem uhlíku a chromu. Tento podíl pak lze odhadnout pomocí následujícího empirického vztahu:

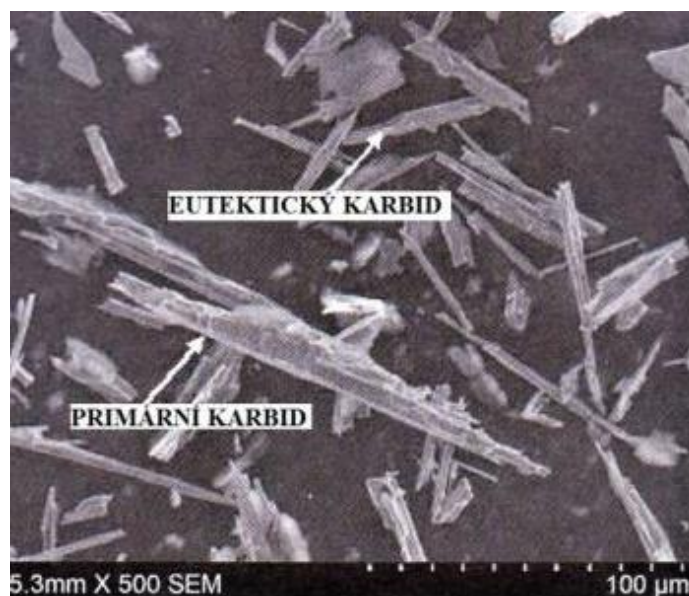
$$CVF = 12.3(\%C) + 0.55(\%Cr) - 15.2 \quad (1)$$

CVF = Podíl karbidů ve struktuře [%]



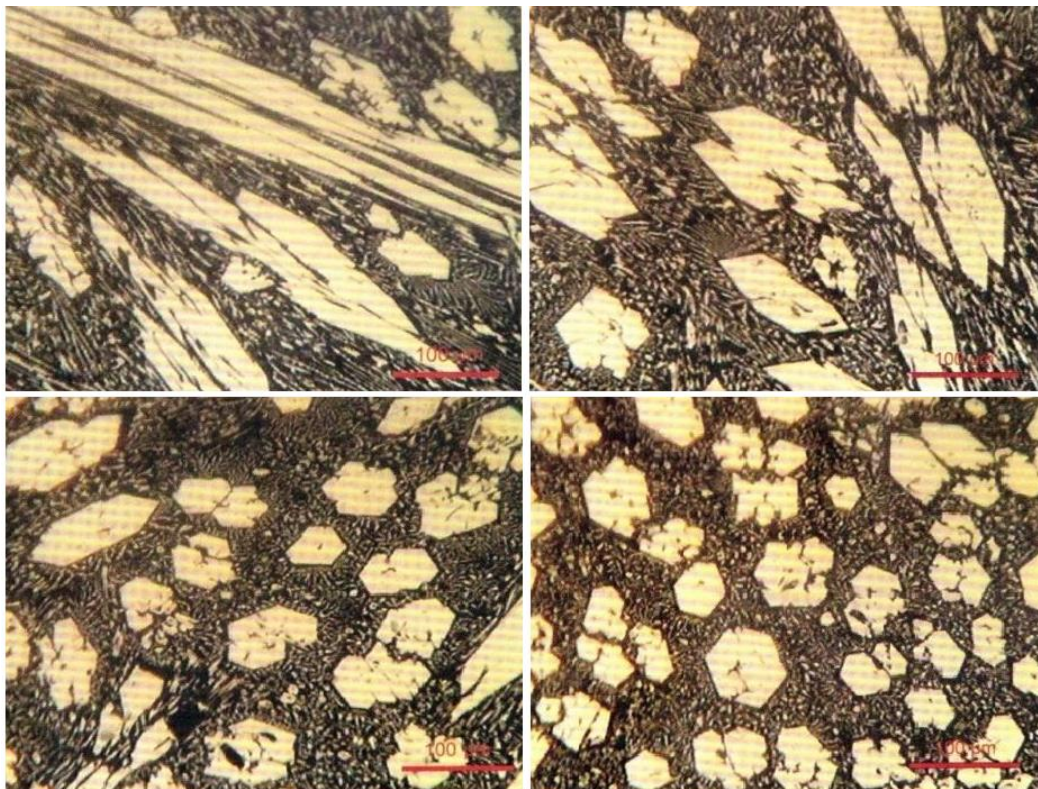
Obrázek 17: Diagram vlivu chem. složení na typ karbidů ve struktuře bílých litin [1]

Přítomnost karbidů typu $(Fe,Cr)_7C_3$ je zásadní u otěruvzdorných litin, hlavně kvůli jejich pozitivnímu vlivu na otěruvzdornost a tvrdost. Ve struktuře nadeutektické bílé litiny s vysokým obsahem chromu můžeme pozorovat výrazný rozdíl ve velikostech primárních a eutektických karbidů (obr. 18).



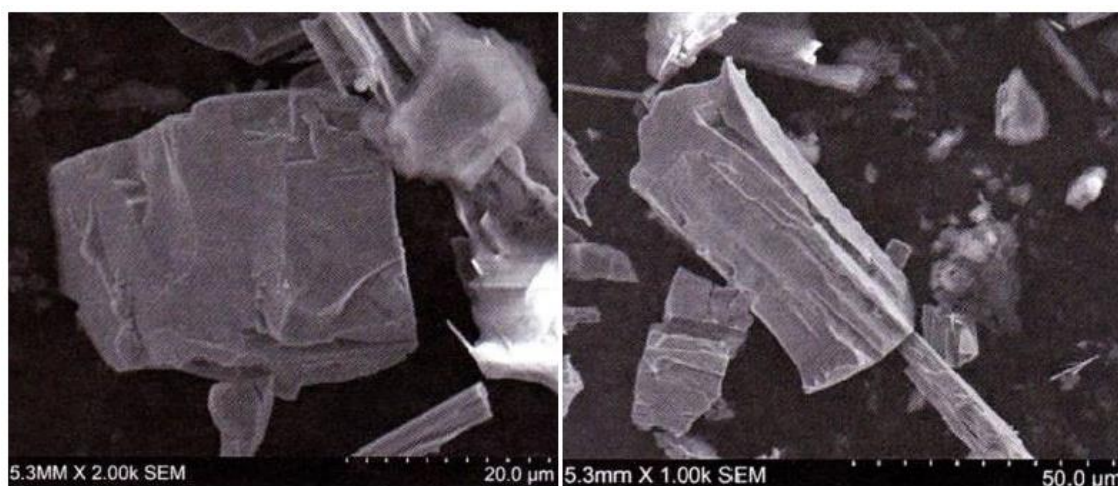
Obrázek 18: Nadeutektická litina s vysokým obsahem chromu:
porovnání velikosti primárního a eutektického karbidu $(Fe,Cr)_7C_3$ [17]

Problematikou nadeutektoidních bílých litin jsou velké primární karbidy, které jsou uloženy v základní matici. Dále pak velký rozdíl ve velikosti primárního a eutektického karbidu mohou vážně zhoršit vlastnosti těchto litin. V těchto případech je vhodné zvážit opatření ke zlepšení morfologie karbidů, spočívá v modifikaci litiny draslíkem. Draslík má modifikační účinek na velké primární karbidy, přísada draslíku se většinou realizuje ve formě modifikátoru obsahující draslík (Fe-10Si-10K). Přidáním takového modifikátoru docílíme zmenšení velkých primárních karbidů a také dosáhneme toho, že jejich rozložení a morfologie je pravidelnější. Krom vlivu na primární karbidy draslík také zjemňuje sekundární karbidy. Toto vše má velmi pozitivní vliv na mechanické vlastnosti výsledné litiny. Modifikační účinek můžeme vidět na obr. 20, kde je nadeutektická bílá litina (4,78%C, 26,88%Cr, 0,4%Mn a 1,89%Si) a vlivu množství modifikátoru na její strukturu, konkrétně jeho vlivu na morfologii primárního karbidu.



Obrázek 20: Vliv množství modifikátoru na strukturu primárního karbidu u nadeutektické bílé litiny [17]

Z obr. 20 je zřejmé, že se zvyšujícím se množstvím modifikátoru se jeho účinek zvětšuje a modifikované karbidy mají tvar šestiúhelníkových hranolů s poměrně malým poměrem délky ku průměru (zřejmé též z obr. 19), namísto nemodifikovaným primárním karbidům.



Obrázek 19: Odezdnívání modifikačního účinku při držení taveniny v peci [17]

Modifikační efekt draslíku není dlouhodobý, ale odeznívá při držení taveniny v peci po její modifikaci. Na obr. 19 vlevo je struktura bílé litiny s vysokým obsahem chromu, která byla odlita ihned po modifikaci, kdežto obr. 19 vpravo je struktura stejné litiny, která byla odlita až po 10–ti minutovém držení v peci. Draslík má nízkou teplotu varu $758,85^{\circ}\text{C}$, a proto se snadno z taveniny vypařuje. Za odeznívání modifikačního efektu tedy může fakt, že v průběhu držení taveniny v peci nastává pokles obsahu draslíku, který se z taveniny vypařuje. [1] [5] [6] [7] [16] [17]

2. 3. 3. Vlastnosti bílých litin

Uplatnění bílé litiny můžeme najít hned v několika typech aplikací, které se nacházejí v různých prostředích. Vzhledem k různým aplikacím je třeba, aby litina byla co možná nejvíce přizpůsobena požadavkům dané situace. Vlastnosti bílých litin jsou dány především jejich strukturou, chemickým složením a případně tepelným zpracováním. Nejvíce využívanou vlastností bílých litin je ořezuvzdornost.

Odolnost proti opotřebení

Definice opotřebení je povrchový úbytek materiálu, vyvolaný třením nebo jinými mechanickými příčinami. Schopnost materiálu odolávat opotřebení nazýváme odolností proti opotřebení, nebo také ořezuvzdorností. Bílé ořezuvzdorné litiny se s úspěchem používají do podmínek erozivního opotřebení tvrdými částicemi nesenými proudem kapaliny či proudem plynu.

Bílá litina je materiál s vysokou odolností proti opotřebení. Ze srovnání odolnosti proti abrazivnímu opotřebení nejlépe vychází bílá litina vysoce legovaná chromem. Její ořezuvzdornost je zapříčiněna zejména přítomností velkého množství eutektických karbidů typu $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$, případně i karbidů $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ (které se vylučují při obsahu chromu více jak 25%), uložených v základní kovové hmotě. Tvrdost těchto karbidů značně převyšuje tvrdost cementitu. Ořezuvzdornost se také zlepšuje při zvyšujícím se objemovém podílu karbidů ve struktuře a při menší velikosti těchto karbidů, což se dá ovlivnit modifikací taveniny draslíkem. Odolnost proti opotřebení je také značnou měrou ovlivněna strukturou matrice. Bílá litina s martenzitickou strukturou má lepší odolnost proti opotřebení než litina se strukturou perlitickou, protože perlitická struktura není schopna chránit a přidržovat karbidy, tak jako martenzitická struktura. Martenzit je také méně citlivý na vydrolování a praskání při opakovaných nárazech, které jsou typické pro aplikaci bílé ořezuvzdorné litiny jako vyložení kulových mlýnů.

Odolnost proti opotřebení je poměrně těžce definovatelnou veličinou. K otěru dochází v tak zvaném tribosystému, v němž působí různé mechanismy otěru. Všechny materiály se v různých tribosystémech chovají zcela různě, takže odolnost proti opotřebení ve smyslu vlastnosti materiálu neexistuje. I přesto, že veličina pro otěruvzdornost neexistuje, do jisté míry souvisí s tvrdostí, avšak nejedná se o přímou úměru, roli v dané problematice hraje více faktorů. Vyšší tvrdost nutně nemusí vést k vyšší odolnosti proti opotřebení, příkladem jsou hrubé primární karbidy, které jsou sice dosahují nejvyšších tvrdostí, ale výrazně zhoršují houževnatost a také se snadněji poruší. [5] [14] [18]

Odolnost proti korozi a chemická odolnost

Koroze je samovolné, postupné rozrušení kovů a slitin vlivem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím. Bílá litina je všeobecně považována za materiál s vysokou odolností proti korozi, jedná se tedy především o legované bílé litiny. Jejich korozivzdornost je založena na pasivačním účinku chromu, ten dodává bílé litině korozivzdornost již od obsahu 12%Cr. Bílé litiny legované chromem odolávají účinkům jak atmosférické koroze, tak i agresivní mořské vodě, většině zásad a solí. Další látkou, která se také objevuje v bílých litinách je molybden, ten také zlepšuje její odolnost vůči korozi. [1] [3] [8]

Žáruvzdornost a žárupevnost

Při práci za vysokých teplot dochází u litinových odlitků k postupné degradaci mechanických vlastností. Tato degradace je zapříčiněna transformací základní kovové hmoty (vznikají vnitřní pnutí). Dále může nastat rozpad karbidů Fe_3C nebo k oxidaci strukturních složek. Při vhodném legování jsou bílé litiny schopny těmto negativním účinkům vysokých teplot dlouhodobě odolávat.

Žáruvzdornost je schopnost materiálu odolávat oxidaci povrchové vrstvy (opalu) za vysokých teplot. U nelegované bílé litiny vznikají okuje již při teplotách okolo $600^{\circ}C$, kdežto u bílé litiny s obsahem 30%Cr okuje nevznikají ani při teplotách nad $1000^{\circ}C$. Chrom totiž na povrchu litiny vytvoří ochrannou neprodyšnou vrstvu oxidů, která brání okujení. Křemík podporuje účinek chromu a zvyšuje jeho žáruvzdornost, avšak na úkor poklesu pevnosti.

Tabulka 5: Závislost obsahu chromu na žáruvzdornosti [1]

Obsah Cr [%]	6	8	12	17	25	33
Žáruvzdornost do teploty [°C]	700	800	850	900	980	1050

Žárupevnost je schopnost materiálu dlouhodobě si udržet své pevnostní vlastnosti i za vysokých teplot. Pro dosažení takovýchto vlastností je nutná stabilizace struktury za vyšších teplot, aby nedocházelo ke strukturním změnám. Vysokolegovaná chromová litina se používá pro práci za vysokých teplot, s obsahem 30%Cr je schopna odolávat teplotě až okolo 1000°C. [1] [3] [8]

..

3. Otěruvzdorné litiny

Bílé otěruvzdorné litiny se často používají pro součásti v podmínkách intenzivního opotřebení částicemi, jejich odolnost je dána přítomností karbidů ve struktuře. Podíl karbidových fází je jedním z hlavních faktorů, které určují otěruvzdornost, pevnost a další vlastnosti bílých litin. Lze je použít ve formě odlitku či návaru, typickými součástmi jsou např.: nárazové lišty drtičů, rotory a skříně kalových a bagrovacích čerpadel, lopatky a obložení komor tryskačů, kolena armatur na dopravu hydrosměsí apod. [5] [14]

Evropské norma ČSN EN 12513, která ustanovuje značení bílých otěruvzdorných litin, rozděluje tyto litiny do 3 základních skupin:

- nelegované nebo nízkolegované litiny
- chrom-niklové litiny dvou základních typů
 - litiny legované 4%Ni a 2%Cr
 - litiny legované 9%Cr a 5%Ni
- litiny s vysokým obsahem chromu (rozdělené do 4 skupin podle obsahu Cr)
 - 11 – 14%Cr
 - 14 – 18%Cr
 - 18 – 23%Cr
 - 23 – 28%Cr

Odlitky z otěruvzdorných litin mohou být dodávány ve stavu tepelného zpracování, to zda budou odlitky dodávány ve stavu litém nebo s tepelnou úpravou záleží na odběrateli. Možnosti tepelného zpracování otěruvzdorných litin:

- bez tepelného zpracování
- popouštěné
- kalené a popouštěné
- žíhané na měkko
- žíhané na měkko a popouštěné
- žíhané na měkko, kalené a popouštěné

3. 1. Otěruvzdorná nelegovaná nebo nízkolegovaná litina

Nelegované a nízkolegované bílé litiny se používají na odlitky, které mají odolávat abrazivnímu opotřebení a erozivnímu opotřebení. Nositelem odolnosti proti opotřebení je u těchto litin Fe₃C (cementit), s jehož rostoucím množstvím stoupá otěruvzdornost. Strukturní fáze těchto litin je perlit nebo ferit, který je z hlediska požadované otěruvzdornosti relativně měkký. Legování se u těchto litin používá jen k zajištění bílého tuhnutí u tlustostěnných odlitku nebo pro zpevnění perlitu. Tento typ litin se obvykle dodává bez tepelného zpracování.

Nelegované a nízkolegované bílé litiny se v některých případech kluzné abraze bez dynamických účinků používají dodnes, i když jejich odolnost v porovnání s legovanými bílými litinami výrazně nižší. Hlavní roli v tomto rozhodovacím procesu hraje určitě cena, která je oproti legovaným bílým litinám příznivější. [14] [18] [19] [20]

Tabulka 6: Tvrdost dle Vickerse a chemické složení nelegovaných nebo nízkolegovaných otěruvzdorných litin [20]

Označení materiálu		HV min.	Chemické složení v % (hmotnostních)			
značkou	číselně		C	Si	Mn	Cr
EN-GJN-HV350	EN-JN2019	350	2,4–3,9	0,4–1,5	0,2–1,0	max. 2,0

3. 2. Otěruvzdorná chrom-niklová litina

Začátek používání legur u bílých litin vedl k vývoji martenzitických bílých litin, ve kterých byla perlitická nebo feritická matrice nahrazena tvrdším martenzitem a zbytkovým austenitem (případně bainitem). Tvrdší martenzit je zárukou zvýšené odolnosti proti opotřebení, oproti nelegovaným a nízkolegovaným bílým litinám. Předpokládá se, že tvrdé karbidy ve struktuře jsou lépe ukotveny relativně tvrdou nedeformující se maticí. Volí se takové chemické složení, aby pokud možno byla martenzitická fáze zaručena již při ochlazování odlitku ve formě nebo na vzduchu.

Otěruvzdorná chrom-niklová litina je známá pod označením Ni-Hard. U těchto litin se používá tepelného zpracování za účelem snížení vnitřního pnutí, anebo na transformaci zbytkového austenitu na martenzit (přesné teploty a výdrže viz. [20]). Přetvořením zbytkového austenitu na martenzit se docílí zvýšení odolnosti proti abrazivnímu opotřebení ve většině aplikací. Bylo však zjištěno, že za určitých podmínek

může být přítomnost zbytkového austenitu žádoucí, aby byla zajištěna dostatečná houževnatost matrice a měla schopnost plasticky se deformovat vlivem lokálního vysokého pnutí. [14] [18] [19] [20]

Tabulka 7: Tvrdost dle Vickerse a chemické složení otěruvzdorných chrom-niklových litin [20]

Označení materiálu		HV min.	Chemické složení v % (hmotnostních)						
značkou	číselně		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
EN-GJN-HV520	EN-JN2029	520	2,5 až 3,0	max. 0,8	max. 0,8	max. 0,10	max. 0,10	3,0 až 5,5	1,5 až 3,0
EN-GJN-HV550	EN-JN2039	550	3,0 až 3,6	max. 0,8	max. 0,8	max. 0,10	max. 0,10	3,0 až 5,5	1,5 až 3,0
EN-GJN-HV600	EN-JN2049	600	2,5 až 3,5	1,5 až 2,5	0,3 až 0,8	max. 0,08	max. 0,08	4,5 až 6,5	8,0 až 10,0

* Tažnost a odolnost proti opakovanému rázovému namáhání stoupají s klesajícím obsahem uhlíku. Odolnost proti opotřebení stoupá se stoupajícím obsahem uhlíku.

3. 3. Otěruvzdorná litina s vysokým obsahem chromu

Chromové litiny jsou dnes nejodolnějším odlévaným materiálem v podmínkách abrazivního opotřebení. Chromové bílé litiny mají 20–40 obj.% komplexních karbidů $(Fe,Cr)_7C_3$ v matrici složené z martenzitu, bainitu, austenitu a sekundárních karbidů. Velký objemový podíl primárních nebo eutektických karbidů v jejich mikrostrukturách zajišťuje vysokou tvrdost, která se projevuje vysokou odolností proti abrazivním a erozivním účinkům částic. Mikrostruktura kovové matrice se odvíjí od množství legujících prvků a tepelného zpracování, je třeba zajistit správnou rovnováhu mezi odolností proti opotřebení a houževnatostí potřebnou pro odolnost proti opakovaným nárazům. Mikrostruktura, která je tvořena heterogenní směsí tvrdých karbidů a pevné houževnaté kovové matrice (martenzit, austenit) má vysokou odolnost proti abrazivnímu a erozivnímu účinku částic. Typ a objemový podíl karbidů ve struktuře i charakter a podíl jednotlivých fází v matrici určují odolnost proti opotřebení. U chromových bílých litin typ i morfologie karbidů jsou dány podmínkami krystalizace

a chemickým složením. Tepelným zpracováním lze měnit pouze kovovou matici, případně morfologií sekundárních karbidů.

Tabulka 8: Chemické složení otěruvzdorných litin s vysokým obsahem chromu [20]

Označení materiálu		Chemické složení v % (hmotnostních)								
značkou	číselně	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
EN-GJN-HV600(XCr11)	EN-JN3019	1,8–2,4 2,4–3,2 3,2–3,6	max. 1,0	0,5 až 1,5	max. 0,08	max. 0,08	11,0 až 14,0	max. 2,0	max. 3,0	max. 1,2
EN-GJN-HV600(XCr14)	EN-JN3019	1,8–2,4 2,4–3,2 3,2–3,6	max. 1,0	0,5 až 1,5	max. 0,08	max. 0,08	14,0 až 18,0	max. 2,0	max. 3,0	max. 1,2
EN-GJN-HV600(XCr18)	EN-JN3019	1,8–2,4 2,4–3,2 3,2–3,6	max. 1,0	0,5 až 1,5	max. 0,08	max. 0,08	18,0 až 23,0	max. 2,0	max. 3,0	max. 1,2
EN-GJN-HV600(XCr23)	EN-JN3019	1,8–2,4 2,4–3,2 3,2–3,6	max. 1,0	0,5 až 1,5	max. 0,08	max. 0,08	23,0 až 28,0	max. 2,0	max. 3,0	max. 1,2

* Tažnost a odolnost proti opakovanému nárazovému namáhání stoupají s klesajícím uhlíkem

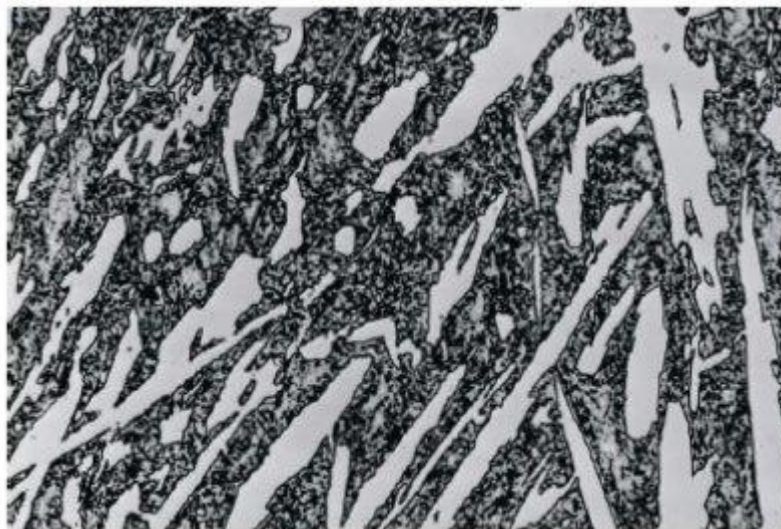
** Mikrostruktura otěruvzdorných litin s vysokým obsahem chromu závisí na rychlosti ochlazování a mění se proto s tloušťkou stěny. Pro dosažení určitých vlastností je nutná úprava procentuálního obsahu legovaných prvků v daném rozmezí (viz. Tabulka 8) v závislosti na změnách rozměrů odlitku

Chromové litiny jsou charakterizovány eutektickými a sekundárními karbidy typu $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$ a $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$, které mohou obsahovat proměnlivé podíly železa, chromu molybdenu, vanadu a jiných karbidotvorných prvků. Tyto karbidy se vyskytují od asi 5%Cr spolu s karbidem železa (Fe_3C) a od 10–12%Cr samostatně. Ve srovnání s karbidem železa mají karbidy chromu několik předností. Jedna z nich je vyšší tvrdost, zatímco karbid železa dosahuje mikro tvrdosti asi 800–1200 HV, tak mikro tvrdost karbidů chromu se pohybuje mezi 1200–1600 HV. U těchto tvrdších karbidů chromu již nedochází k ryhování křemenem, který je hlavní součástí většiny abrazivních minerálů. Eutektickou strukturu nelegovaných a nízkolegovaných litin lze považovat za houbu z karbidu železa, v jejichž dutinách je uložena základní hmota. Mechanické vlastnosti jsou proto u těchto nelegovaných a nízkolegovaných litin více určovány křehkou karbidickou fází. Zatím co karbidy chromu se naproti tomu vylučují ve formě destiček, tyčinek, zrn nebo trubiček úplně obklopených základní hmotou, takže houževnatost

závisí více na základní hmotě, kterou zle tepelně modifikovat. Na základě těchto předností mají chromové litiny potenciálně jak vyšší bezpečnost proti lomu, tak také lepší otěruvzdornost než zbylé bílé litiny.

Tvrдость chromových litin je podmíněna množstvím karbidů ve struktuře, s růstem obsahu uhlíku je spojen postupný růst podílu karbidů ve struktuře. Má-li vzniknout více karbidů chromu, je zapotřebí nejen vyššího obsahu chromu, ale i uhlíku. Nestoupá-li s obsahem chromu úměrně i obsah uhlíku, pak po navázání veškerého dostupného uhlíku na karbidy, nezbyvá pro zbylý chrom v litině další uhlík, s nímž by mohl karbidy vytvořit. To znamená, že neustálé zvyšování obsahu chromu neznamená neustálé navyšování tvrdosti.

Největší množství chromových litin se vyrábí z normovaných druhů s 15–28%Cr a s proměnlivými obsahy molybdenu (obr. 21), niklu nebo mědi. Nejvyšší tvrdosti se při nejjednodušším tepelném zpracování dají docílit pouze s chromovou litinou se 14–18%Cr legovanou molybdenem. Přísada molybdenu zabraňuje perlitické transformaci a zajišťuje maximální tvrdost. Chromové bílé litiny se rovněž legují niklem a mědí, a to do obsahu 1%, tyto prvky zlepšují prokalitelnost a přitom nemění morfologii krystalizace.



Obrázek 21: Mikrostruktura bílé chromové litiny Cr27Mo [12]

Trendem v otěruvzdorných bílých litinách je neustálé zvyšování odolnosti proti opotřebení, a to bez snížení jejich houževnatosti, dále je snahou zlepšit odolnostní vlastnosti v podmínkách kombinovaného působení abraze a nárazů, tudíž zvýšení

houževnatosti otěruvzdorných bílých litin. Problematikou je i růst cen legujících prvků u chromových bílých litin, konkrétně Cr a Mo. Hledají se adekvátní náhrady, které by z hlediska výrobních nákladů byly výhodné. [5] [14] [18] [19] [20]

4. Vady odlitků z hlediska opravitelnosti

Správná a rychlá diagnostika vady odlitku je cestou ke snížení nákladů ve slévárně. Po správné identifikaci je důležité stanovit jejich pravděpodobnou příčinu a posléze návrh zásahů na jejich eliminaci. Příčinou vady odlitku může být jak chyba v technologickém postupu, tak i nevhodná konstrukce součásti. Další příčinou vad může být nedůsledná kontrola výrobního procesu, nebo nedodržení technologického postupu.

Vady odlitků jsou sepsány v normě ČSN 42 1240. Dle této normy se vadou odlitku rozumí každá odchylka rozměrů, váhy, vzhledu, makrostruktury nebo nedosažení požadovaných vlastností odlitku. Vady odlitků mohou být zjevné nebo skryté. Zjevnou vadu je možné odhalit na neobrobeném odlitku pouhým okem, nebo jednoduchými pomocnými měřidly. Skrytá vada je odhalitelná až po obrobení odlitku, nebo speciálními laboratorními přístroji nebo zkouškami.

Norma ČSN 42 1240 rozděluje vady odlitků do sedmi základních skupin a v příslušných skupinách je dále označuje dvoumístným číslem (Tabulka 9).

Tabulka 9: Roztřídění vad odlitků podle skupin a druhů [11]

Číslo skupiny vad	Název skupiny vad	Číselné označení vady	Název druhu vady
1	Vady tvaru, rozměrů a váhy	11	Nezaběhnutí
		12	Přesazení
		13	Zatekliny
		14	Vyboulení
		15	Zborcení
		16	Mechanické poškození
		17	Nedodržení rozměrů
		18	Nedodržení váhy
2	Vady povrchu	21	Přípečeniny
		22	Zavaleniny

		23	Zálupy
		24	Nárasty, strupy
		25	Výronky
		26	Výpotky
		27	Ukujení, opálení
		28	Omáčkání, otlučení, pohmoždění
3	Přerušení souvislosti	31	Trhliny
		32	Praskliny
4	Dutiny	41	Bubliny
		42	Bodliny
		43	Staženiny
		44	Řediny
		45	Mikrostaženiny
		46	Mirokobubliny
5	Vměstky	51	Struskovitost
		52	Zadobeniny
		53	Nekovové vměstky
		54	Broky
		55	Kovové vměstky
6	Vady struktury	61	Odmíšení
		62	Nevyhovující lom
		63	Zatvrdlina, zákalka
		64	Obrácená zákalka
		65	Nesprávná struktura
7	Vady chemického složení, nesprávné fyzikální nebo mechanické vlastnosti	71	Nesprávné chemické složení
		72	Nevyhovující mechanické vlastnosti
		73	Nevyhovující fyzikální vlastnosti

Vady odlitků se dále dělí na vady přípustné, nepřípustné – opravitelné a vady nepřípustné – neopravitelné (takový odlitek nazýváme jako zmetek). Toto členění vychází z velké části na dohodě mezi výrobcem a odběratelem odlitku. Odběratel stanovuje, které vady jsou přípustné, a tedy neovlivňují funkci odlitku. Jedná se o vady, které je možno vhodnou technologií (např. svařováním) opravit a zaručit tak funkčnost odlitku a dále rozhoduje, které vady jsou nepřípustné – neopravitelné, tedy vady, u kterých oprava není možná nebo nepřichází v úvahu. Může se jednat o vady typu: špatné rozměry, jiné chemické složení nebo fyzikální vlastnosti.

Důležitým kritériem z hlediska opravitelnosti je také rozsah dané vady. Pokud se jedná o drobné povrchové vady (povrchové bubliny, vměstky, připečeniny apod.), tak tyto vady většina sléváren opravuje bez souhlasu odběratelů, tedy pokud tomu není výslovně zakázáno na výkrese, v technické dokumentaci nebo přímo ve smlouvě. Opravy větších rozsahů už je nutno konzultovat s odběratelem, a tudíž mít k těmto opravám vysloveno povolení. V zásadě je nutné postupovat tak, aby byly zaručeny všechny předepsané vlastnosti odlitku. Způsob kontroly svaru a tedy to, zda má opravený odlitek požadované vlastnosti záleží též na individuální dohodě mezi výrobcem a odběratelem.

Při opravném svařování je nutno posoudit zejména rozsah vad, způsob vlastní opravy, použité přídavné materiály, druhy svařovacích elektrod, nutnost předehřevu, žihání po svařování a způsob kontroly kvality svaru. Důležité je také zvážit hospodárnost v konkrétních situacích. Je třeba brát v úvahu, že operace jako příprava svarových ploch, předehřev, svařování, žihání po svařování apod. vedou ke zvýšení energetické a časové náročnosti. Pokud toto navýšení energetické a časové náročnosti je stále ekonomicky výhodnější než opětovné roztavení vadného odlitku, opravné svařování je pak vhodnou volbou a vede tak ke zvýšení hospodárnosti celého procesu. Obecně lze říci, že u větších odlitků, tedy pokud jsou vady opravitelné, jsou opravy zavařováním ekonomicky zajímavé. [1] [11] [12]

4. 1. Problematika opravného svařování otěruvzdorných litin

Litinové odlitky se svařují z důvodu oprav slévárenských vad, nanášení vrstev se speciálními vlastnostmi, při renovaci opotřebovaných dílů nebo se jedná o konstrukční svařování jednotlivých dílců. Ve slévárnách se provádí především opravné svařování. Svařování litin je z hlediska technologie náročnější a pozitivní výsledek není vždy

zaručen. Z tohoto důvodu se menší litinové výrobky místo náročného opravného svařování často rovnou zmetkují.

Problémem svařování litin je vysoký obsah uhlíku, kvůli kterému vzniká při rychlém ochlazení svarového kovu nebezpečí tvorby cementitu a v tepelně ovlivněné zóně je možnost vzniku martenzitu (pokud není již výchozí strukturou), to vede ke vzniku vysokých vnitřních pnutí, což může být příčinou praskání. Při dodržení technologických podmínek jsou litiny s lupínkovým, kuličkovým a vločkovým grafitem vcelku uspokojivě svařitelné, bílá litina se považuje za nesvařitelnou.

Otěrzdorné a chromové litiny jsou v podstatě také nesvařitelné, objevují se praskliny jak přímo ve svarech, tak i v tepelně ovlivněné zóně, kdy prasklina kopíruje celý svar. Opravné svařování těchto litin je vzácně možné, a to za předpokladu dodržení specifických technologických podmínek. Opravné svařování by mělo být řešeno tak, aby při svařování došlo k co nejmenšímu natavení základního materiálu a k minimalizaci tepelného ovlivnění svařované oblasti. To znamená svařovat s malým průměrem elektrod a s co možná nejnižším proudem.

Existuje možnost použití přídavných materiálů s vysokým obsahem niklu. Při použití těchto přídavných materiálů je riziko vzniku prasklin výrazně nižší. Avšak v případě otěrzdorných litin je tato alternativa zcela nevyhovující, a to kvůli vlastnostem daného opravného svaru. Takový opravný svar bude měkký a ani zdaleka se nebude přibližovat požadovaným vlastnostem otěrzdorných litin. Proto hledáme takový přídavný materiál, který bude vyhovovat vlastnostem daného otěrzdorného odlitku.

5. Experimentální zkoušky opravného svařování na odlitku z otěruvzdorných litin

Cílem experimentální zkoušky bylo provedení opravného svařování a jeho následné vyhodnocení. Prvním krokem byla analýza materiálu, a to především kvůli jeho chemickému složení a požadovaným užitným vlastnostem. V dalším kroku bylo potřeba najít vhodný přídavný materiál, který bude vhodný jak po stránce chemického složení, tak i po stránce mechanických vlastností. Požadavkem bylo, aby daný přídavný materiál splňoval užitné vlastnosti základního materiálu – otěruvzdornost. Dalším krokem byla simulace opravného svařování, od přípravy svarových ploch až po samotný proces. Závěrem experimentální zkoušky je vyhodnocení, které zahrnuje vizuální vyhodnocení, metalografické vyhodnocení a vyhodnocení podle tvrdosti.

5. 1. Materiál použitý při zkoušce

Tento pokus se prováděl s dvěma druhy materiálů. Tyto materiály byly dodány od firmy Slévárna Chomutov, a.s. s interním označením EXTRA L-1 a EXTRA L-5. V obou případech se jedná o otěruvzdornou chromovou litinu s vysokým obsahem chromu.

5. 1. 1. EXTRA L-1

Tabulka 10: EXTRA L-1 chemické složení v procentech [21]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	B	V
4,00	1,20	1,00	0,15	0,10	26,5	0,25	0,45	0,70	0,004	0,40

Mechanické vlastnosti a hodnoty

- pevnost v ohybu $R_m \geq 650 \text{ N/mm}^2$
- průhyb $y \geq 4 \text{ mm}$
- zatížení při zlomení $F_m \geq 19\,000 \text{ N}$
- vrubová houževnatost $KC \geq 4 \text{ J/cm}^2$
- tvrdost $59 - 62 \text{ HRC}$

EXTRA L-1 (obr. 22) je litina určena výhradně pro abrazivzdorné součásti, kde působí pouze obrus, bez dynamických rázů a větších tlaků. Svařování nebo navařování povrchů tvrdokovy je zakázáno. Obrobitelnost těchto odlitků je možná pouze broušením. Odlitky jsou určeny k přímému použití. Je vhodná pro rudný, keramický a cihlářský průmysl, pro míšení, hnětení nebo mletí jemných frakcí za sucha i za mokra. K vyložení skříní metacích kol tryskačů, krycí závěsné desky, vyložení nádob pro míšení betonových směsí, obložení míchacích lopatek atd. Při větších tloušťkách odlitků dochází v tepelných osách k vycezeninám a odměšování, projevují se v těchto místech nehomogenitou, s ohledem na použití se nemusí jednat o závadu. Tato litina je značně křehká a jsou použitelné do provozních teplot až 250°C. [21]



Obrázek 22: Otěruvzdorná chromová litina EXTRA L-1

5. 1. 2. EXTRA L-5

Tabulka 11: EXTRA L-5 chemické složení v procentech [21]

C	Cr
2,10 – 2,40	26,00 – 28,00

Mechanické vlastnosti a hodnoty

- pevnost v ohybu $R_m \geq 880 \text{ N/mm}^2$
- průhyb $y \geq 10 \text{ mm}$
- zatížení při zlomení $F_m \geq 25\,000 \text{ N}$
- vrubová houževnatost $KC \geq 7 \text{ J/cm}^2$
- tvrdost 46 – 49 HRC

EXTRA L-5 (obr. 23) je litina určena pro abrazivní namáhání, kde spolupůsobí dynamické rázy a tlaky střední intenzity. Svařování nebo navařování povrchů tvrdokovy je zakázáno. Obrobitelnost těchto odlitků je možná pouze broušením. Odlitky jsou určeny k přímému použití. Je vhodná zejména na odlitky pro obložení prvních komor kulových mlýnů na cement, a to plášťových i čelních stěn. Vyniká při mletí za sucha, kde mlecí koule svými údery zpevňují pracovní povrch nejméně o 5HRC, na trvalou tvrdost 51 – 54HRC do hloubky 0,03 – 0,08 mm. Není příliš vhodná pro klasický obrus, kde nemůže docházet k povrchovému zpevnění. Neosvědčuje se ani se ani při mletí za sucha i mokra velmi tvrdých a abrazivních minerálních surovin. Stejně jako EXTRA L-1 je použitelná do provozních teplot až 250°C. [21]



Obrázek 23: Otěruvzdorná chromová litina EXTRA L-5

5. 2. Elektrody vhodné pro opravy odlitků z litin legovaných chromem

Jelikož otěruvzdorné litiny jsou kvalifikovány jako nesvařitelné, neexistuje žádný výčet vhodných elektrod. Vhodná elektroda, pro opravy těchto litin vysoce legovaných chromem, by měla vytvořit takový svarový kov, který svými podmínkami bude odpovídat požadavkům celého odlitku – otěruvzdornosti. Aby se toho docílilo, je třeba aby se elektroda svým chemickým složením co nejvíce blížila chemickému složení odlitku. Jako nejvhodnější použitelnou elektrodou se tedy jeví elektroda OK Weartrode 60 T (OK 84.78) od firmy ESAB VAMBERK, s.r.o. Tato elektroda je svým chemickým složením velmi blízká materiálům EXTRA L-1 a EXTRA L-5. Zda se tato elektroda dá považovat za vhodnou se ukáže v následujícím vyhodnocení struktury svarového kovu a tvrdosti svaru.

5. 2. 1. OK Weartrode 60 T

Vysokovýtěžková elektroda pro navařování součástí zemních a důlních strojů s požadavky na vysokou odolnost proti abrazi pískem, šterkem, rudou, uhlím a jinými minerálními látkami. Návar odolává i korozním vlivům při vysokých teplotách až do 1000°C. Návar se tepelně nezpracovává. Vhodná teplota předehřevu je 100 – 500°C a teplota interpass 100°C. Tvrdost návaru se pohybuje kolem 60HRC, což je pro odlitky z materiálu EXTRA L-1 i EXTRA L-5 zcela dostačující.

Tabulka 12: Typické složení čistého svarového kovu [22]

C	Si	Mn	Cr
4,50	0,8	<1,6	33,0

Základní vlastnosti návaru

Odolnost proti abrazi:	výborná
Odolnost proti opotřebení za vys. teplot:	dobrá
Korozní odolnost:	výborná
Obrobitelnost:	broušením

Tabulka 13: Výkonové parametry OK 84.78 [22]

Průměr [mm]	Délka [mm]	Proud [A]	Výtěžnost [%]	Doba hoření [s]	Podíl svar. kovu [%]	Výkon navarováním [kg/h]
2,5	350	90-120	180	60	0,62	1,20
3,2	350	115-170	190	85	0,62	1,60
4,0	450	130-210	180	135	0,64	2,00
5,0	450	150-300	185	140	0,64	2,90

* napětí na prázdno > 50 V

5. 3. Opravné svařování

Prvním krokem samostatného experimentu byla příprava zkušebních vzorků ke svařování, ta spočívala ve vybroušení drážek, které imitovaly případné povrchové vady odlitků. Svary byly provedeny jako návary v těchto záměrně vybroušených drážkách. Velikost drážek se pak pohybovala od 100x10x8 mm až po 10x5x5 mm (obr. 22, 23 a 24), rozpětí velikostí bylo voleno z důvodu, aby byly zahrnuty jak malé typy vad, tak i větší.



Obrázek 24: Příprava svarů

Teplota předehřevu byla volena, s ohledem na podmínky provozu, na 250°C. Dále následoval proces svařování, bohužel byla k dispozici pouze elektroda s průměrem 4 mm, což znamenalo vyšší proudové nastavení a tím i větší množství vneseného tepla, než by bylo v případě elektrody s průměrem 2,5 mm. Po provedení návarů se vzorky nechaly dochladiť na vzduchu.

5. 4. Vyhodnocení

Po provedení všech návarů a vychladnutí vzorků následovala vizuální kontrola, při které se hodnotily svary pouhým okem, jednalo se především o identifikaci vad celistvosti u opravných svarů. Dále se vzorky, vzhledem k jejich vysoké tvrdosti, nechaly rozřezat vodním paprskem a provedli se metalografické výbrusy z oblasti svarů. Posledním krokem vyhodnocení bylo měření tvrdosti.

5. 4. 1. Vizuální vyhodnocení

Vizuální kontrola proběhla po vychladnutí zkušebních vzorků. Některé praskliny se objevovaly dokonce v horizontu pár desítek sekund po samotném provedení návaru. Svary a případné praskliny je možné vidět na obrázku 25 a 26. Vyhodnocení vizuální kontroly viz. Tabulka 14.

Tabulka 14: Vizuální vyhodnocení

Materiál	Velikost drážky	Teplota předehřevu [°C]	Výsledek
EXTRA L-1	velká	250	praskliny
	střední		praskliny
	malá		praskliny
EXTRA L-5	velká	235	praskliny
	střední		praskliny
	malá		dobry

* teplota vzorků byla měřena těsně před samotným procesem svařování dotykovým termočlánkem



Obrázek 25: Velké a střední svary EXTRA L-1 (vpravo) a EXTRA L-5 (vlevo)

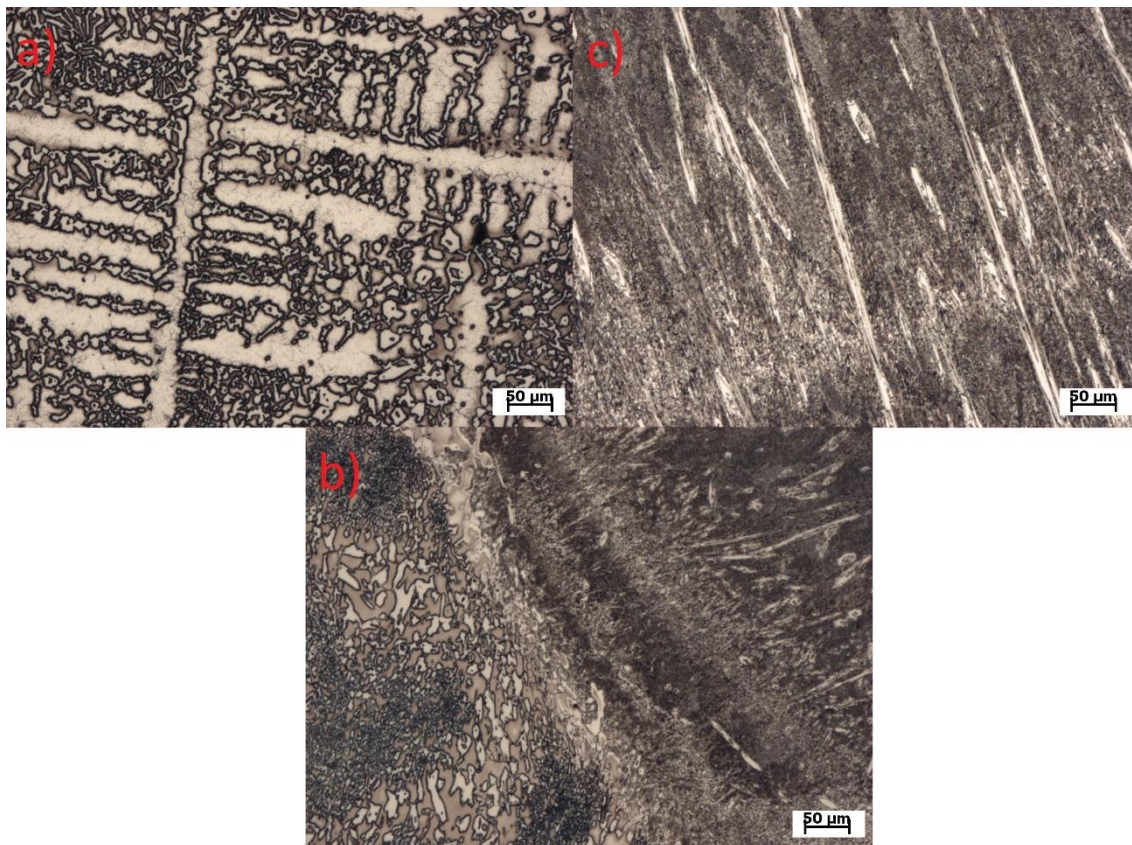


Obrázek 26: Malé svary EXTRA L-1 (vpravo) a EXTRA L-5 (vlevo)

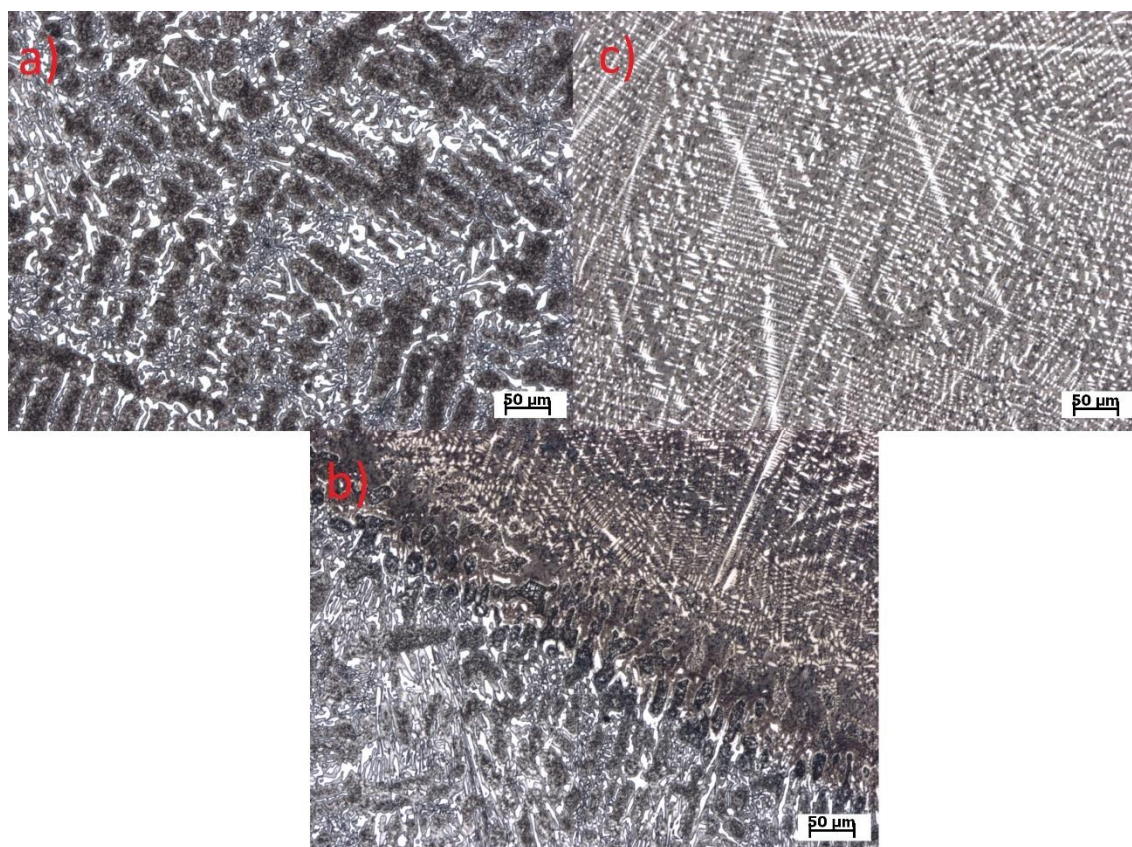
Vizuální kontrola potvrdila fakt, že ani jeden ze zkušebních materiálů není vhodný ke svařování. Avšak u materiálu EXTRA L-5 je výjimka v případě opravného svařování malých vad, kdy se návary po vizuální zkoušce jeví jako bezvadné.

5. 4. 2. Metalografické vyhodnocení

Cílem metalografického vyhodnocení bylo porovnat strukturu svarového kovu se strukturou základního kovu. Příprava metalografických vzorků se prováděla běžným způsobem, jenom vzhledem k nepatrné pórovitosti bylo potřeba použít ultrazvukovou vanu k jejich vyčištění. Po přípravě metalografických vzorků došlo k jejich naleptání a následnému vyhodnocení pod mikroskopem.



Obrázek 27: EXTRA L-1 metalografické vyhodnocení, 100x
a) základní kov b) základní kov – svarový kov c) svarový kov



Obrázek 28: *EXTRA L-5 metalografické vyhodnocení, 100x*
a) základní kov b) základní kov – svarový kov c) svarový kov

Na metalografickém výbrusu je vidět struktura obou zkušebních materiálů (obr. 27 a 28), hlavními složkami jsou austenit a eutektické karbidy $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$. Struktura obsahuje i složitější typy karbidů. I přesto, že byl přídavný materiál v obou případech stejný, struktury svarových kovů nejsou naprosto totožné, tento fakt je dán vlivem promíšení, který je při ručním svařování obalenou elektrodou vysoký. Cílem bylo dosažení podobnosti základní a svarové struktury, i přestože struktura svarového kovu je znatelně jemnější než struktura základního kovu, dosahuje se určité shody těchto struktur. To znamená, že výchozí podmínka podobnosti struktur základního a přídavného materiálu je splněna.

5. 4. 3. Vyhodnocení podle tvrdosti

Vzhledem k tomu, že se dané opravné svařování aplikuje na otěruvzdorné odlitky, je faktor průběhu tvrdostí velmi důležitý. U otěruvzdorných litin vysoce legovaných chromem tvrdost odlitku souvisí s jeho odolností proti opotřebení. Je proto žádoucí, aby průběh tvrdostí od základního do svarového kovu neměl velkou výchylku. Tvrdost vzorků byla měřena podle Vickerse, naměřené hodnoty jsou zapsány v tabulce 15.

Tabulka 15: Vyhodnocení podle tvrdosti

Materiál	Tvrdost HV1		
	základní kov	tepelně ovlivněná oblast	svarový kov
EXTRA L-1	482,5	526,5	531,8
	520,1	488,7	517,7
	496,3	535,2	504,3
EXTRA L-5	573,8	615,3	540,0
	589,2	679,1	538,2
	570,4	628,0	544,7

Cílem bylo dosažení co možná nejkonstantnějšího průběhu tvrdostí. Z výsledků je vidět, že tato podmínka byla také splněna, protože průběh tvrdostí nevykazuje velkou výchylku. U materiálu EXTRA L-1 má svarový kov dokonce vyšší tvrdost než základní kov, co se týče materiálu EXTRA L-5 rozdíl tvrdostí základního a svarového kovu je nepatrný.

Celkové vyhodnocení vypovídá ve prospěch zvoleného přídavného materiálu, jak po stránce strukturní, tak i po stránce průběhu tvrdostí odpovídá vyhovujícímu přídavnému materiálu pro otěruvzdorné litiny vysoce legované chromem. Problémem zůstává velká četnost prasklin. Faktory, které mají vliv na tvorbu prasklin a lze je ovlivňovat jsou množství vneseného tepla, teplota předehřevu a rychlost ochlazování. Při experimentu byla použita elektroda o průměru 4 mm, což znamená určitě větší množství vneseného tepla, než kdyby byl použit nejmenší možný průměr elektrody 2,5 mm. Teplota předehřevu a průběh chladnutí byl volen tak, aby byl případně dobře realizovatelný i v provozních podmínkách. Nejspíše by bylo vhodné zkoušku opakovat při vyšších teplotách předehřevu, případně zvážit i možnost pomalejšího ochlazování. Tím by však došlo k částečnému navýšení energetické a časové náročnosti, a tudíž ke zvýšení ekonomické náročnosti celého opravného procesu.

6. Předpis pro opravné svařování otěruvzdorných litin

Podle ČSN EN 1559-1 musí být možnost opravného svařování vždy dohodnuta předem mezi odběratelem a dodavatelem z těchto možností:

- a) Výrobce může vykonat opravné svařování bez zpětného dotazu na odběratele
- b) Výrobce musí informovat odběratele, že se provedlo opravné svařování
- c) Výrobce musí obdržet od odběratele souhlas před provedením opravného svařování

Drobné vady, jako vtoky po nárůstech a zadrobeniny nebo zavaleniny malého rozsahu může dodavatel opravit, nebo ponechat neopraveny, nepředepíše-li odběratel výslovně opravu. Při posuzování uvedených případů se má odběratel řídit účelem použití výrobku. Z toho vyplývá, že opravy svařováním malých vad jsou přípustné, u většího rozsahu vad je nutný souhlas odběratele. [23]

Příprava pro opravné svařování

Opravované menší vady lze vybrousit ruční bruskou na čistý kov. Opravovanou vadu lze rovněž odstranit odvrtáním. V případě prasklin je nutno konce prasklin odvrtat vrtákem tak, aby byla záruka jejich odstranění před opravou zavařováním.

Pro zajištění dokonalého spojení svarového kovu a základního materiálu musíme upravit na svařovaných dílech svarové plochy. Svarové plochy musí před svařováním odpovídat určitým zásadám a požadavkům jako je čistota plochy, odmaštění, odstranění rzi apod.

Zásady při opravném svařování

- Zajistit co nejmenší natavení základního materiálu
- Zajistit co nejmenší tepelné ovlivnění svarové oblasti
 - Použít minimální průměry elektrod
 - Použít minimální intenzity proudu zaručující dobrou kresbu svarových housenek
- Délka oblouku se rovná průměru elektrody
- Volit vhodné teploty předehřevu

Kontrola svarů po opravě

Po skončení opravy nesmí svary jevit žádné známky vad celistvosti a povrch svarů se musí zabrousit do roviny povrchu odlitku. Vzhledem k požadavkům na otěruvzdorné litiny je možné, že si odběratel zažádá i doplňující zkoušky celistvosti svaru jako např. kapilární zkoušku.

Žihání po opravách

Vzhledem k faktu, že otěruvzdorné litiny jsou vhodné jen na opravování malých vad, po opravě není nutné provádět následné žihání. Opět záleží na dohodě výrobce a odběratele.

7. Závěr

Cílem experimentální zkoušky bylo ověřit, zda je možné provádět opravné svary na odlitcích z litin vysoce legovaných chromem z firmy Slévárna Chomutov, a.s., která se zabývá problematikou jejich opravného svařování. Jednalo se o malé povrchové vady, které nemají vliv na materiálové a užité vlastnosti odlitku. Účelem opravných svarů bylo tyto malé povrchové vady odstranit, a přitom zachovat materiálové vlastnosti odlitku, především otěruvzdornost.

Výsledky experimentální zkoušky opravného svařování otěruvzdorných litin potvrdily fakt, že tyto litiny obecně vzato nejsou vhodné ke svařování. Při experimentu se prokázala nemožnost zhotovení opravného svaru větších rozměrů, avšak zhotovení opravných svarů menších rozměrů se ukázalo jako možné. Strukturní vyhodnocení a vyhodnocení podle tvrdosti dále ukázalo, že svarový kov svými vlastnostmi odpovídá požadavkům daných otěruvzdorných litin. Vzhledem k výsledkům vyhodnocení a faktu, že se malý opravný svar aplikoval bez identifikace vad celistvosti, lze konstatovat, že opravné svařování malých povrchových vad je možné.

I přesto, že se opravné svařování těchto otěruvzdorných litin ukázalo jako realizovatelné, je stále nutné brát v úvahu, že pozitivní výsledek není zaručen. Opravné svařování by mělo být navrženo tak, aby při svařování došlo k co nejmenšímu natavení základního materiálu a k celkovému tepelnému ovlivnění svařované oblasti. To znamená svařovat s malým průměrem elektrod a s co nejnižším proudem.

8. Seznam použité literatury

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1. vydání, 1998, 166 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-1263-1.
- [2] SKOČOVSKÝ, Petr; PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Grafitické liatiny*. 1.vydanie. Ľilina :Edis, 2005. 168 s. ISBN 80-8070-390-6.
- [3] PLUHAŘ, Jaroslav, KORITTA, Josef. *Strojírenské materiály*. 1. vydání, Praha: SNTL, 1966, 560 s. Redakce strojírenské literatury. ISBN 04-254-66.
- [4] Norma ČSN EN ISO 945. *Litina - Určení mikrostruktury grafitu*. Praha: 2003.
- [5] RÖHRIG, K. *Verscheißbeständige weiße Gußeisenwerkstoffe*. Düsseldorf: ZVG, 1999
- [6] VETIŠKA, Aleš. *Teoretické základy slévárenské technologie: učebnice pro strojní fakulty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1972, 388. Řada strojírenské literatury. ISBN teoretické základy slévárenské technologie.
- [7] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu I*. Praha: SNTL- Nakladatelství technické literatury, 1986, 247 s.
- [8] PÍŠEK, František. *Slévárenství*. 1. vyd. V Praze: Česká matice technická, 1941.
- [9] PACAL, Bohumil, DOLEŽAL, Pavel. *Struktura a vlastnosti slitin metastabilní soustavy železo – karbid železa (Fe – Fe₃C)*. Ústav materiálových věd a inženýrství. [online]. [cit. 2017-05-16]
Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/svms/index.htm>
- [10] K. Novotný, J. Filípek. *Dynamické vertikální sauerovy diagramy metastabilní soustavy Fe-Fe₃C*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2005, LIII, No. 2, pp. 89-98
Dostupné z: <http://docplayer.cz/7715493-K-novotny-j-filipek.html>
- [11] Norma ČSN 42 1240. *Vady odlitků, názvosloví a třídění vad*. Praha: 1964.
- [12] Šanovec, J., & České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. (2000). *Technologie I* 1. vyd. Praha: ČVUT.
- [13] Transkript prezentace. *Základy tepelného zpracování* [online]. [cit. 2017-05-16]
Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2727188/>

- [14] Suchánek, Jan. *Trendy vývoje bílých otěruvzdorných litin*. Slévárenství: časopis pro slévárenský průmysl. Brno: Svaz sléváren České republiky, 1953-, 2017(1-2). ISSN 0037-6825.
- [15] PODRÁBSKÝ, Tomáš. *Soustava Fe – C. Ústav materiálových věd a inženýrství*. [online]. [cit. 2017-05-16]
Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/bum/prednasky/05b-BUM%20-%20soustava%20Fe-C.pdf>
- [16] Jankauskas, V.; Kreivaitis, R.; et al. *Research of abrasive erosion wear for Fe-C-Cr-B hard layers*. ISSN 1392 - 1207. MECHANIKA. 2008. Nr.4(72)
- [17] LIU QING, YANG HUA a DING HAIMIN. *Effect of potassium on as-část microstructure of a hypereutectic high chromium cast iron*. China Foundry. 2011, 8(2), 202-206. ISSN 1672-6421.
- [18] SUCHÁNEK, J. *Bílé otěruvzdorné litiny*. Tribotechnika[online]. [cit. 2017-05-16]
Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-42013/bile-oteruvzdorne-litiny-.html>
- [19] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie slévání*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06026-1.
- [20] Norma ČSN EN 12513. *Slévárenství – Otěruvzdorné litiny*. Praha 2002
- [21] Slévárna Chomutov, a.s. *Produkty a služby* [online]. [cit. 2017-05-16].
Dostupné z: <http://www.slevarnachomutov.cz/produkty-a-sluzby/odlitky/abrazivzdorne/>
- [22] ESAB VAMBERK, s.r.o. *Katalog přídatných svařovacích materiálů* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://bcz.vamberk.eu/cd-dst-2013/PDF/1_pridavne_svarovaci/Katalog_CZ_2012.pdf
- [23] Norma ČSN EN 1559-1. *Slévárenství – Technické dodací podmínky – Část 1: Všeobecně*. Praha 1999