



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV OPRAVNÉHO ZAVAŘOVÁNÍ ZA TEPLA NA ZMĚNU
STRUKTURY A TVRDOST ODLITKŮ Z LITINY S
LUPÍNKOVÝM GRAFITEM**

INFLUENCE OF REPAIR WELDING BY ELEVATED TEMPERATURES ON STRUCTURE AND HARDENESS
OF LAMELAR GRAFITE IRON CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Jan Procházka**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

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 diplomové práce:

Vliv opravného zavařování za tepla na změnu struktury a tvrdost odlitků z litiny s lupínkovým grafitem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytypování odlitků náchylných ke vzniku poruch, souvislosti. Volba způsobu opravného svařování a teplotního režimu odlitku v průběhu opravného svařování. Zjištění změn struktury a tvrdosti základního kovu odlitků, vyrobených z různých druhů litiny s lupínkovým grafitem, vlivem působení zvýšených teplot při opravném svařování.

Cíle diplomové práce:

Vyhodnocení změn struktury a tvrdosti při svařování odlitků z různých druhů litiny s lupínkovým grafitem při zadaném teplotním režimu.

Seznam doporučené literatury:

WALTON, CH.F. Iron Casting Handbook. Iron Founders Society Inc, Cleveland, USA, 1971. Library of Congress Catalog Number 70-165866.

ALAGARSAMY, A. Ductile Iron Handbook. AFS Inc., Des Plaines, Illinois, USA, 1993. ISBN 0-8743-124-2.

Ductile Iron Data for Design Engineers. QIT-Fer et Titane Inc., 1990.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem tepelného cyklu opravného zavařování za tepla u odlitků z litiny s lupínkovým grafitem na změnu tvrdosti. Práce se v teoretické části zabývá klasifikací grafitických litin, jejich strukturou, vlastnostmi a vlivy, které vznik a přeměny struktury ovlivňují. Důraz je kladen na chemické složení a stabilitu struktury za zvýšených teplot. Praktická část se zabývá zkoumáním vlivů opravného zavařování odlitků za tepla na pokles tvrdosti měřené ve Slévárně Heunisch Brno.

Klíčová slova

Litina s lupínkovým grafitem, legování litin, vady odlitků, opravné zavařování za tepla, svařování litin, stabilita struktury za zvýšených teplot, tepelné zpracování litin.

ABSTRACT

The master's thesis deals with the influence of the thermal cycle of welding with preheat on castings made of grey cast iron to change the hardness. The thesis deals with the classification of graphitic cast irons, their structure, properties and influences they have on the formation and transformation of the structure. Emphasis is placed on chemical composition and structure stability at elevated temperatures. The practical part deals with the investigation of the effects of casting repair on the decrease of hardness measured in the foundry Heunisch Brno.

Key words

Grey cast iron, alloying of cast iron, defects of castings, repair welding with preheat, welding of cast irons, structure stability at elevated temperatures, heat treatment of cast iron

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Jan. *Vliv opravného zavařování za tepla na změnu struktury a tvrdost odlitků z litiny s lupínkovým grafitem* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116509>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv opravného zavařování za tepla na změnu struktury a tvrdosti odlitků z litiny s lupínkovým grafitem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jan Procházka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji především panu doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za vedení diplomové práce a pomoc při jejím zpracování. Děkuji vedení Slévárny Heunisch Brno za umožnění vypracování této práce. Za cenné rady a připomínky děkuji jmenovitě paní Ing. Kateřině Nedělové, dále panu Ing. Ondřeji Bouškovi a panu Radkovi Krejčíříkovi.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 METALURGIE LITIN	9
1.1 Litiny	9
1.2 Struktura grafitických litin	13
1.3 Legování grafitických litin	14
1.4 Fázové přeměny grafitických litin a vliv rychlosti ochlazování na strukturu	18
1.5 Vlivy působící na rychlost ochlazování	20
1.6 Vliv zvýšených teplot na strukturu litiny	22
1.6.1 Vliv legování na stabilitu struktury za zvýšených teplot.....	22
1.6.2 Druhy tepelných zpracování	23
2 VADY ODLITKŮ A JEJICH OPRAVA	27
2.1 Druhy opravovaných vad	27
2.2 Opravy vad	28
2.3 Technologie svařování litin.....	29
3 DEFINICE PROBLÉMU	32
3.1 Zařízení ve Slévárně Heunisch.....	32
3.2 Materiály odlévané ve Slévárně Heunisch.....	34
3.3 Zavařování ve Slévárně Heunisch.....	35
3.4 Cyklus odlitků zavařovaných za tepla ve Slévárně Heunisch.....	38
4 METODIKA MĚŘENÍ.....	40
4.1 Měřené parametry	40
4.2 Provozní měření	40
4.2.1 Návrh provozního měření	40
4.2.2 Průběh provozního měření ve Slévárně Heunisch	41
4.3 Laboratorní měření.....	43
4.3.1 Návrh laboratorního měření.....	43
4.3.2 Průběh laboratorního měření	43
5 VÝSLEDKY PROVOZNÍHO MĚŘENÍ.....	46
5.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-200.....	46

5.2	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-250.....	47
5.3	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300.....	49
5.4	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cu.....	51
5.5	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cr.....	52
5.6	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuCr.....	54
5.7	Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuMo.....	55
5.8	Zhodnocení výsledků provozního měření.....	58
6	VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ.....	61
6.1	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-200.....	61
6.2	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-250.....	62
6.3	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-250 Sn.....	64
6.4	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300.....	65
6.5	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Cu.....	67
6.6	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Cr.....	69
6.7	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 CuCr.....	71
6.8	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 CuMo.....	72
6.9	Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Sn.....	74
6.10	Zhodnocení výsledků laboratorního měření.....	76
	ZÁVĚR.....	78
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	83

ÚVOD

Slévárna Heunisch Brno je vybavena jednou horkovětrnou kupolovou pecí na výrobu litiny s lupínkovým grafitem a automatickou formovací linkou společnosti HWS (dnes součást společnosti DISA s.r.o.). Slévárna se specializuje na skříňové odlitky s malou tloušťkou stěny a hmotností od 30 kg do 400 kg, určené pro zemědělské a jiné těžké stroje. [1; 2]

Výroba odlitků je pro danou technologii vždy spojena se specifickými vadami, které mohou vést až k vyřazení odlitku. Některé vady je však možné, se souhlasem zákazníka, opravovat. Ve slévárnách litiny s lupínkovým grafitem to obvykle bývá zavařováním vhodnou metodou. Metoda, při které se pro snížení rychlosti ochlazování svaru zařadí před svařovací operace přehřev odlitku, se nazývá zavařování za tepla.

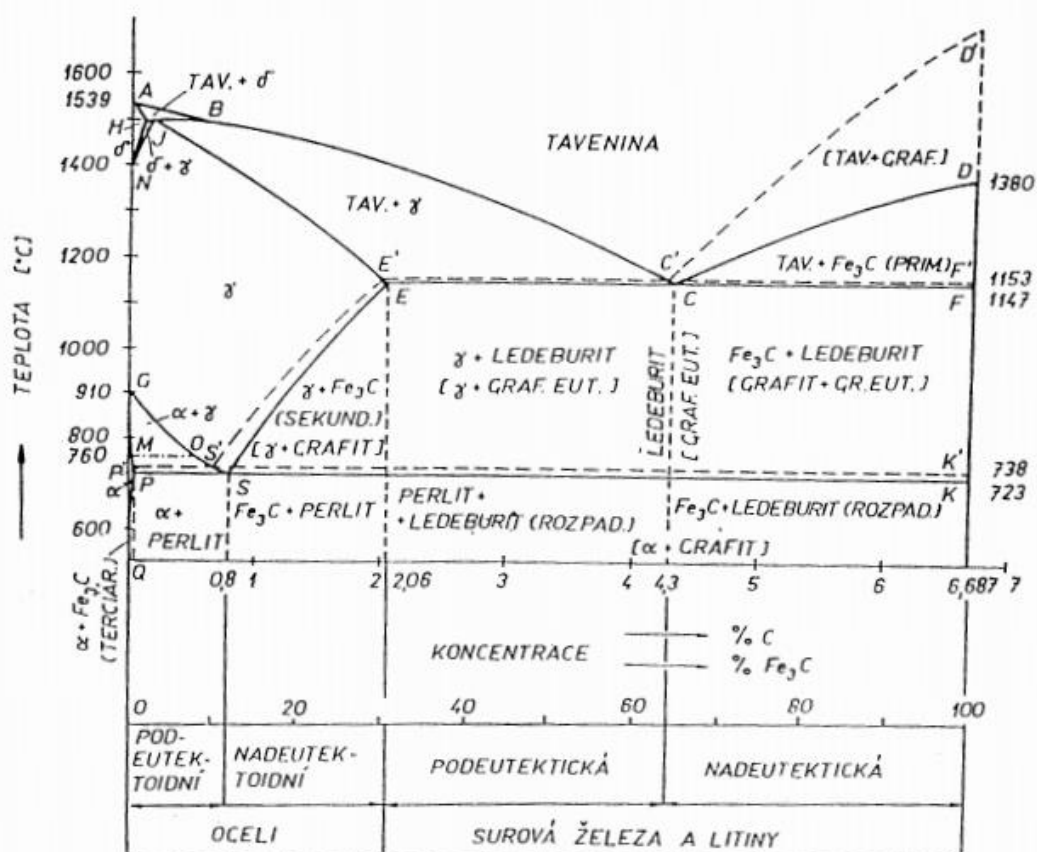
Ve Slévárně Heunisch dochází u některých odlitků, po zavaření vady za tepla, k poklesu tvrdosti, což vede k vyřazení odlitku, a tedy finanční ztrátě. Pokles tvrdosti se vyskytuje náhodně a není možné jej spolehlivě predikovat. Cílem této práce je prozkoumat cyklus zavařování za tepla, odhalit vlivy, které do něj vstupují, a zajistit schopnost predikce poklesu tvrdosti u odlitků z litiny s lupínkovým grafitem zavařovaným za tepla.

1 METALURGIE LITIN

1.1 Litiny

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku, křemíku a další doprovodných prvků, ve kterých je obsah uhlíku větší, než je jeho maximální rozpustnost v austenitu, t.j. více jak asi 2,06 % C, a zároveň je uhlík vyloučen ve formě grafitu nebo karbidů Fe_3C nebo jiných karbidů. [3]

Litiny krystalizují podle stabilního nebo metastabilního binárního diagramu Fe-C. Na obr. 1.1 je plnou čarou zobrazen diagram metastabilní a čárkovanou čarou diagram stabilní. Často však pozorujeme krystalizace podle obou diagramů zároveň. Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Takzvané grafické litiny tuhnou dle stabilního systému a jejich eutektikum je tvořeno austenitem a uhlíkem, zatímco eutektikum u litin tuhoucích dle metastabilního systému je ledeburit a ve struktuře není přítomný volný grafit. [3]



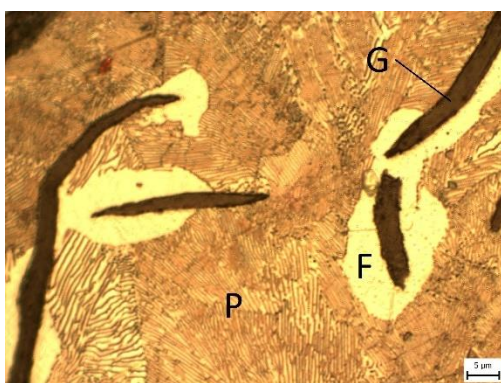
Obr. 1.1 Binární diagram systému železo – uhlík. [3]

Struktura grafických litin je tvořena základní kovovou maticí a grafitem. Vlastnosti litin jsou především ovlivňovány množstvím, tvarem a velikostí grafitu a charakterem kovové

matrice. Základní kovová matrice je tvořena produkty transformovaného austenitu při krystalizaci, kterými jsou především perlit a ferit, přičemž mohou vznikat i další jako cementit. [4]

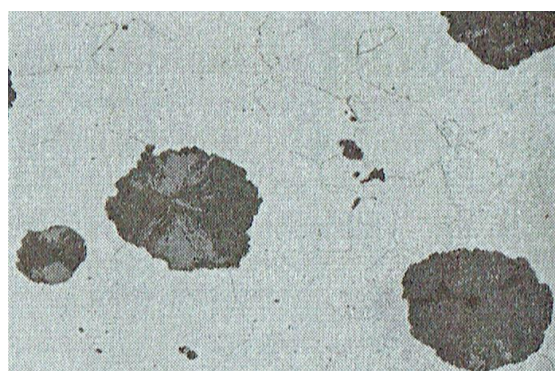
Podle tvaru grafitu dělíme litiny na:

- litina s lupínkovým grafitem (obr. 1.2a),
- litina s kuličkovým grafitem (obr. 1.2b),
- litina s červíkovitým grafitem (obr. 1.2c),
- temperovanou litinu (obr. 1.2d). [3]

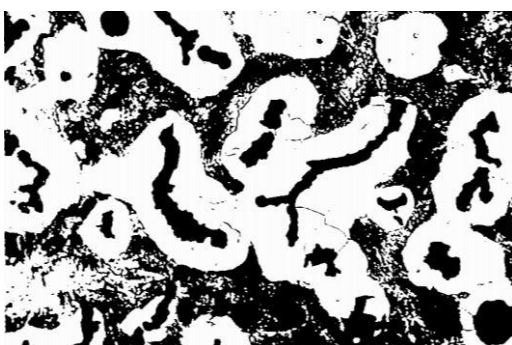


G – grafit, F – ferit, P - perlit

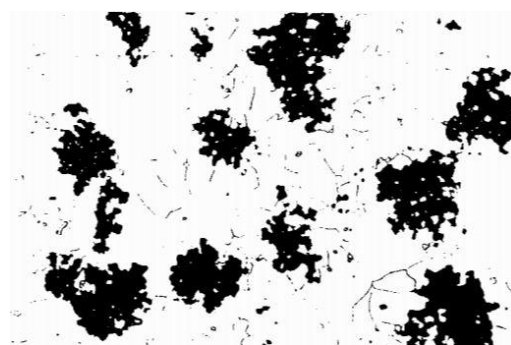
Obr. 1.2a Litina s lupínkovým grafitem.



Obr. 1.2b Litina s kuličkovým grafitem. [4]



Obr. 1.2c Litina s červíkovitým grafitem. [3]

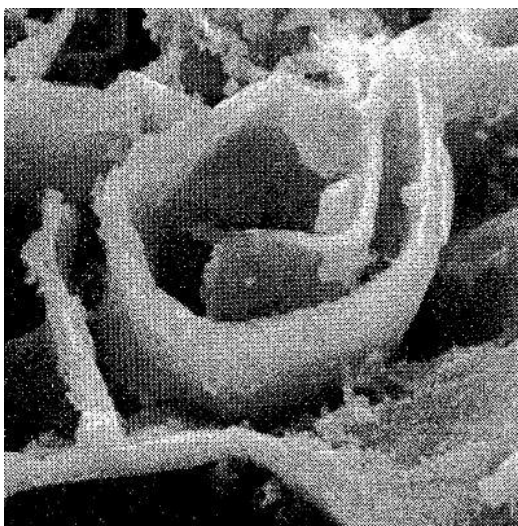


Obr. 1.2d Temperovaná litina. [3]

Nejobvyklejší litinou je litina s lupínkovým grafitem, ve které má grafit podobu prostorových útvarů, které připomínají okvětní lístky růže (obr. 1.3). Na metalografickém výbrusu se pak lístky jeví jako tenké, dlouhé a na konci zašpičatělé lupínky (obr. 1.2a).

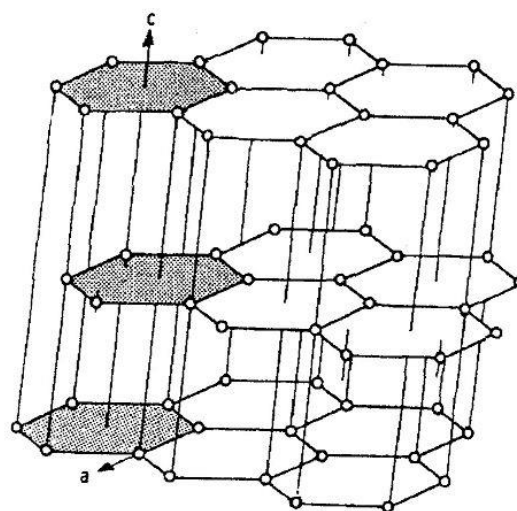
Grafit je forma uhlíku krystalizující v hexagonální soustavě (obr. 1.4). Podstavy této mřížky se nazývají bazální roviny a její stěny se nazývají prismatické roviny, které tvoří obvod šestihranu. [3]

Grafit u litin s lupínkovým grafitem v počátku krystalizuje na zárodcích plovoucích volně v tavenině. Zárodky pro krystalizaci jsou především částice MnS nebo různé oxidy a sulfidy. Krystalizaci grafitu se okolí ochuzuje o uhlík a tím vzniká austenit jako druhá fáze. Útvary grafitu postupně rostou a jelikož je růst ve směru bazálních rovin rychlejší, než růst ve směru rovin prismatických, tvoří se útvary lupínků. Tyto útvary grafitu, jejichž konce jsou neustále v kontaktu s taveninou, tvoří s okolním austenitem tzv. eutektickou buňku. [4]



REM, zvětšení mikroskopu 2 500x

Obr. 1.3 Lupínky grafitu v litině s lupínkovým grafitem. [4]



a – směr růstu v bazálních rovinách, c – směr růstu v prismatických rovinách

Obr. 1.4 Hexagonální krystalická mřížka. [4]

Litiny s lupínkovým grafitem jsou pod označením GJL normalizovány do šesti tříd v normě EN ČSN 1561 – GJL. Každá ze tříd je vymezena rozmezím pevností R_m a $R_m + 100$ MPa. U těchto nelegovaných litin není definováno chemické složení, které se tedy volí tak, aby byly dosaženy předepsané vlastnosti. Vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem jsou shrnuty v tab. 1.1. [3]

Tab. 1.1 Výběr vlastností litiny s lupínkovým grafitem dle EN - ČSN - 1561 – GJL [3]

EN-ČSN-GJL	100	150	200	250	300	350
R_m [MPa]	100-200	150-250	200-300	250-350	300-400	350-450
HB_{max}	180	200	220	240	260	270
Doporučená tloušťka stěny [mm]	4-15	5-30	8-45	15-70	25-100	40-150 a více
Struktura	ferit + stopy perlitu	ferit + perlit	ferit + perlit	ferit + perlit	perlit	perlit

Mechanismus vzniku lupínkového grafitu je přirozený a za běžných rychlostí ochlazování vzniká bez vnějšího zásahu. Pokud je ale do taveniny přidán modifikátor (hořčík, cer nebo jiné prvky), tak se pravděpodobně zvýší povrchové napětí mezi grafitem a taveninou, což má za následek zcela jiný mechanismus vzniku útvarů v grafitickém eutektiku. Útvary grafitu rostou ze zárodku těsně vedle sebe všemi směry stejně rychle, takže útvar má formu kuliček. Každá kulička odpovídá jednomu zárodku a je zcela obklopena austenitem, takže není v přímém kontaktu s taveninou. Každá kulička roste jen díky difuzi uhlíku přes tuto obálku austenitu. Takto vzniklá litina se nazývá litina s kuličkovým grafitem (viz obr. 1.2b). [4]

Litina s červíkovitým grafitem vzniká, dojde-li k nedokonalé modifikaci. Tím může být nedostatek modifikátoru, příliš dlouhý čas mezi modifikací a litím nebo přidáním prvku zastavující modifikační účinek (např. titanu). Takto vzniklá litina je strukturou i vlastnostmi někde na pomezí litiny s lupínkovým a kuličkovým grafitem a je často vyráběna cíleně. Díky zakulaceným koncům lupínků nepůsobí grafit jako silný koncentrátor napětí při namáhání, takže má lepší mechanické vlastnosti než litina s lupínkovým grafitem. Litina s kuličkovým grafitem má sice lepší mechanické vlastnosti než litina s červíkovitým grafitem, zato ale má horší tepelnou vodivost. Proto je litina s červíkovitým grafitem vhodnější na tepelně namáhané stroje, jako jsou třeba bloky motorů nebo brzdová tělesa. [4]

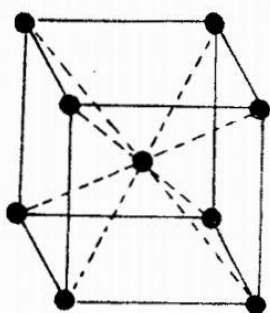
Zvláštním typem grafitických litin je temperovaná litina, která tuhne podle metastabilního diagramu. Veškerý uhlík je ve struktuře vyloučen jako karbid železa a litina je tedy vysoce tvrdá, křehká a téměř neobrobitelná. Příznivé vlastnosti jsou získány až po grafitizačním žihání, kdy se eutektické karbidy rozloží a vznikne volný temperovaný grafit. Vzniklý grafit je kompaktní a má tedy nižší vrubový účinek, stelně jako grafit kuličkový. Navíc má tato litina i zvláštní vlastnosti jako ořezuvzdornost, žáruvzdornost a tlakovou těsnost. [4]

1.2 Struktura grafitických litin

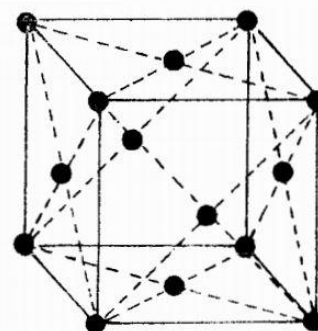
Vedle tvaru grafitu má zásadní vliv na vlastnosti litin také typ kovové hmoty. V grafitických litinách, jejichž struktura nebyla změněna zvláštním tepelným zpracováním nebo legováním, tvoří kovovou hmotu:

- ferit,
- perlit,
- a případně ledeburit (tzv. zákalka). [3; 5; 6]

Železo se v závislosti na teplotě vyskytuje ve více odlišných modifikacích. Základní modifikací je α -železo, které má krychlovou prostorově středěnou krystalickou mřížku (obr 1.5a). Další modifikací je γ -železo, které vznikne při překročení teploty asi 912°C , kdy se atomy krystalické mřížky uspořádají do krychlové plošně středěné mřížky (obr. 1.5b). Při dalším ohřevu vydrží prostorově středěná mřížka až do teploty 1392°C , kdy se opět transformuje do krychlové prostorově středěné mřížky (tzv. δ -železo). [4]



Obr. 1.5a Krychlová prostorově středěná mřížka feritu. [3]

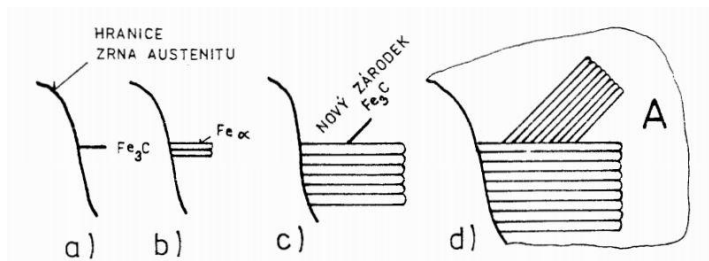


Obr. 1.5b Krychlová plošně středěná mřížka austenitu. [3]

Při nadeutektoidních teplotách je ve struktuře stabilní austenit, což je intersticiální tuhý roztok uhlíku v γ -železe. Při chladnutí podle stabilního systému vzniká eutektoidní transformací austenitu ferit, což je intersticiální tuhý roztok uhlíku v α -železe. Uhlík je rozpustný pouze v austenitu a ve feritu se nerozpouští. Proto krystalizuje ferit izolovaný od ostatních struktur. Ferit je měkký, tvárný a v litině s lupínkovým grafitem krystalizuje poblíž lupínků grafitu (viz obr. 1.2a). [5; 6]

Při rozpadu austenitu podle metastabilního systému vzniká perlit (viz obr. 1.2a), který se skládá z feritu a cementitu (karbidu železa). Vznik perlitu je veden růstem cementitu, vedle kterého krystalizuje ferit. Na obr. 1.6 je znázorněn růst jedné z modifikací perlitu tzv. lamelární perlit. Druhou modifikací je globulární perlit, který vzniká při sferoidizačním žihání nebo velmi pomalém ochlazování, kdy se lamely cementitu sbalí okolo feritu.

Na rozdíl od lamelárního perlitu má globulární perlit nižší tvrdost a nevzniká v odlitcích přirozeně. [3]



a) krystalizace cementitu z austenitu, b) krystalizace feritu podél cementitu, c) krystalizace nové lamely cementitu na již vzniklém perlitu, d) růst nového zrna perlitu

Obr. 1.6 Vznik lamelárního perlitu. [3]

Ledeburit je eutektikum vyskytující se při metastabilním tuhnutí například ve velmi tenkých stěnách, kde dochází k rychlému odvodu tepla a tedy i k prudkému ochlazení. Výskyt ledeburitu je v odlitcích z litin s lupínkovým grafitem nežádoucí, protože je vlivem obsahujícího cementitu křehký a neobrobitelný. [3]

1.3 Legování grafitických litin

Mechanické a fyzikální vlastnosti litin jsou ovlivňovány především chemickým složením. Prvky v litinách kromě železa rozdělujeme na základní prvky, legující prvky a nečistoty. Základní prvky jsou C, Si, Mn, P a S. Legující prvky mění hlavně průběh primární krystalizace a překrystalizace v tuhém stavu, takže mají výrazný vliv na velikost, tvar a rozložení grafitu a kovové matrice. I když se legováním obvykle zvyšuje pevnost feritu, tak na chemickém složení dalších struktur v materiálu (karbidy, nitridy, sulfidy) ve výsledku tolik nezáleží, protože tyto struktury nemají kromě vrubového účinku a blokování kluzných ploch jiný výrazný vliv na mechanické vlastnosti vyjma svého rozložení a velikosti. Litiny nazýváme legované, je-li obsah prvků menší, než je smluvní mez. Naopak je-li jejich obsah nižší, než tato mez, tak je nazýváme nelegované. Mezní obsahy prvků jsou uvedeny v tab. 1.2. [3; 7; 8]

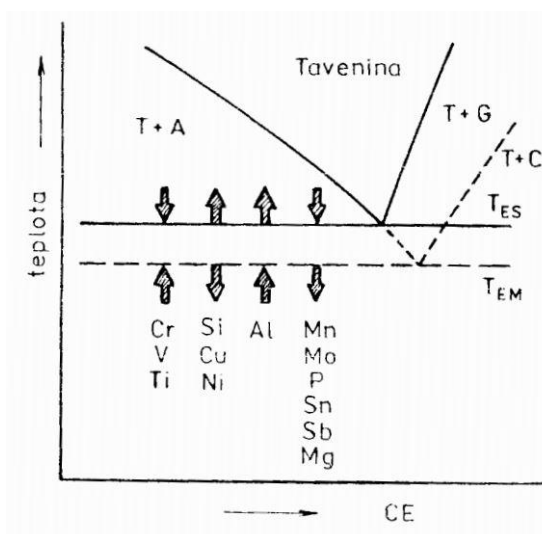
Tab. 1.2 Mezní obsahy prvků v litině s lupínkovým grafitem dle ČSN EN 1559-3. [3]

Prvek	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn	Ostatní
Obsah prvku [%]	3,0	1,0	0,5	0,15	0,2	0,2	-	-	0,05

Prvky v litinách dělíme především podle jejich účinků na charakter přeměn, tedy jestli dochází ke krystalizaci a rekrystalizaci podle stabilního nebo metastabilního diagramu (viz obr. 1.1). Takže můžeme prvky rozdělit dle jejich vlivů na:

- grafítizaci, tedy prvky:
 - grafítizační (Si, Al, Ni, C, Cu a další),
 - antigrafítizační (Cr, V, Mo, Mg a další),
 - neutrální (Mn, Co, Zn a W),
- a transformaci austenitu, tedy prvky:
 - feritotvorné (Si, Al a další),
 - perlitotvorné (Mn, Cu, Ni, Cr, Sn, Mo a další),
 - austenitotvorné (Ni v obsahu nad 18%). [3]

Grafítizační prvky podporují krystalizaci podle stabilního diagramu za vzniku grafítického eutektika, na rozdíl od antigrafítizačních prvků, které podporují krystalizaci dle metastabilního diagramu za vzniku karbidů. Antigrafítizační prvky fungují dvojím způsobem, a to buď vázáním uhlíku ve formě karbidu nebo zabráněním krystalizace grafitu jako další fáze. Prvky mají v litinách významný vliv na teploty eutektických přeměn obou diagramů, čímž přímo ovlivňují mechanismus tuhnutí. Grafítizační prvky obvykle rozšiřují pásmo rozdílu eutektických teplot obou diagramů a podporují stabilní tuhnutí. Na obr. 1.7 je schématicky znázorněný vliv grafítizačních prvků Si, Cu a Ni na teploty eutektické přeměny obou diagramů a zároveň i vliv obvykle antigrafítizačních prvků, jako je Cr a V. Obecně ale mohou mít základní a legující prvky nebo nečistoty různý vliv na teploty eutektické přeměny. [3; 5; 6]



Obr. 1.7 Vliv prvků na eutektické teploty stabilního a metastabilního diagramu. [3]

Feritotvorné prvky podporují transformaci podle stabilního systému. Jediným prakticky používaným feritotvorným prvkem je v litině s lupínkovým grafitem křemík. Křemík má zásadní vliv na austenitické přeměny, protože snižuje maximální rozpustnost uhlíku v austenitu a rozděluje eutektoidní přeměnu na pásmo kritických teplot $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$. V tomto pásmu zároveň pozorujeme grafit, austenit a ferit. Křemík nejenže podporuje vznik feritu, ale také zvyšuje jeho tvrdost a snižuje jeho tažnost a rázovou houževnatost. Kromě feritotvorného účinku je křemík silně grafitizační prvek a při jeho nízkém obsahu mají litiny silný sklon ke krystalizaci karbidů (zákalce). [3; 7]

Většina ostatních prvků v litinách má perlitotvorný účinek. Tyto prvky stabilizují ve struktuře perlitickou fázi buď tím, že snižují aktivitu uhlíku v austenitu, takže uhlík zůstává v tuhém roztoku až do eutektoidní přeměny a netvoří se ferit, nebo tím, že snižují teplotu eutektoidní přeměny tak výrazně, že při tak nízké teplotě je difuze uhlíku velmi pomalá a austenit se transformuje na perlit. Prvky rozšiřující oblast austenitu a snižující teplotu eutektoidní přeměny také nazýváme austenitotvorné prvky. [3; 7]

Měď a cín jsou silnými perlitotvornými prvky, používanými při legování grafitických litin. Velmi často se používají pro zvýšení pevnosti a tvrdosti. Měď a cín jsou svými účinky velmi podobné. Oba prvky mají nižší afinitu ke kyslíku než železo, takže nedochází k propalu. Cín má silnější perlitotvorné účinek než měď, je tedy možné ho dávkovat v menším množství, ale měď je oproti cínu i mírně grafitizační, takže může rušit karbidotvorné účinky jiných legur. Cín navíc zjemňuje hustotu lamel perlitu a stabilizuje perlit při tepelném zpracování. [3]

Chrom je silně karbidotvorným prvkem podporující metastabilní tuhnutí. Jeho karbidotvorný účinek je natolik silný, že výrazně snižuje obrobiteľnosť odlitků, takže musí být jeho účinek kompenzován mědí obvykle v poměru $Cr:Cu = 1:(2,5-4)$. Dalším účinkem chromu je zvýšení ošetrivostnosti. [3; 5]

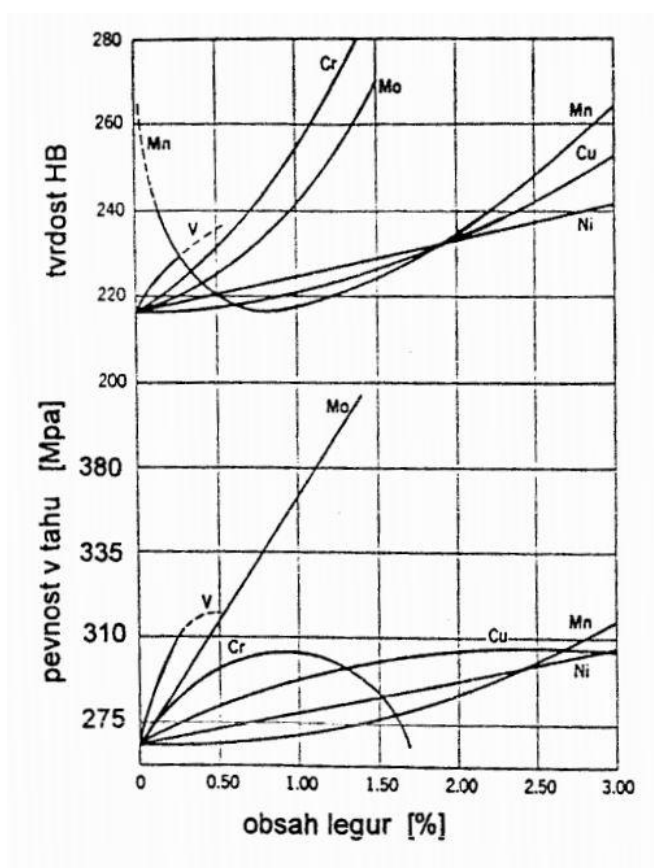
Molybden je kvůli vysoké ceně méně používaným legujícím prvkem. Má mírně karbidotvorný a mírně perlitotvorný účinek, ale stabilizuje strukturu odlitku, výrazně zvyšuje pevnost a tvrdost a snižuje vliv tloušťky stěny. [3; 5]

Nikl má při obsahu do 4% podobné účinky jako měď. Je to grafitizační prvek s perlitotvornými účinky a při obsahu v rozmezí nad 18% má austenitotvorný účinek. [3]

Základní poznatky o legujících prvcích v litinách jsou shrnuty v tab. 1.3 a vlivy prvků na mechanické vlastnosti jsou zobrazeny na obr. 1.8.

Tab. 1.3 Přehled základních legujících prvků litiny s lupínkovým grafitem. [3]

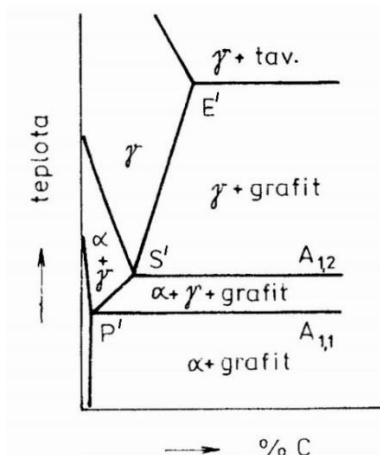
Prvek	Dávkování [%]	Vliv	Použití
Cr	0,2 – 1,0	silně karbidotvorný a perlitotvorný	stabilizace perlitu, zvýšení pevnosti a tvrdosti i za zvýšených teplot
Cu	0,4 – 2,0	perlitotvorný a mírně grafitizační	stabilizace perlitu, zvýšení pevnosti a tvrdosti, snížení citlivosti na tloušťku stěny, kompenzace účinků chromu
Sn	do 0,15	silně perlitotvorný	stabilizace perlitu
Mo	0,3 – 0,8	mírně karbidotvorný a perlitotvorný	zvýšení a stabilizace pevnosti a tvrdosti za zvýšených teplot, snížení citlivosti na tloušťku stěny
Ni	0,5 – 3,0	mírně perlitotvorný a grafitizační	podobné účinky jako u mědi a ještě zvyšuje prokalitelnost



Obr. 1.8 Vliv legur na pevnost a tvrdost litiny s lupínkovým grafitem. [3]

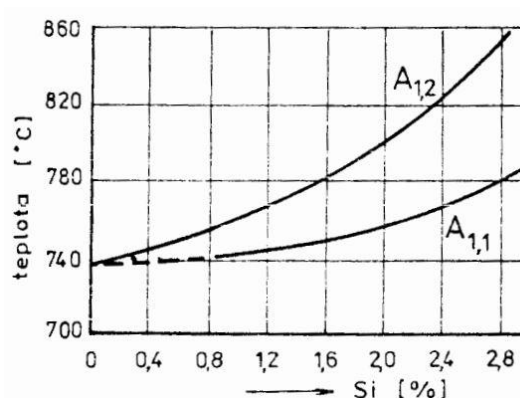
1.4 Fázové přeměny grafitických litin a vliv rychlosti ochlazování na strukturu

Přítomností křemíku, který zvyšuje teploty austenitizace, vzniká u litin třífázové rozhraní, ve kterém se v odlitku vyskytují zároveň ferit (α), austenit (γ) i grafit. Tímto je eutektoidní přeměna (viz úsečka S'K' na obr. 1.1) roztažena na pásmo teplot $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ (obr. 1.9). [3; 5; 6; 9]



Obr. 1.9 Část diagramu Fe-C-Si se 2% Si. [3]

Teploty $A_{1,1}$ a $A_{1,2}$ nazýváme kritické teploty a pásmo jimi vytvořené jako pásmo kritických teplot. Šířka tohoto pásma je úměrná obsahu křemíku a jeho vliv na ně je zobrazen na obr. 1.10. [3]

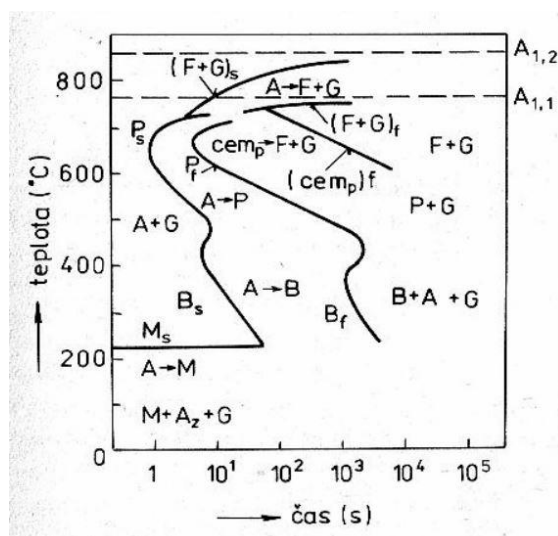


Obr. 1.10 Vliv obsahu křemíku na kritické teploty. [3]

Po úplném ztuhnutí taveniny na pevnou fázi se u podeutektických litin materiál skládá z austenitu a grafitu. Maximální rozpustnost uhlíku v austenitu je asi 2,06 % (viz bod E' v obr. 1.1 a obr. 1.9), takže další uhlík, který litina obsahuje, je vyloučen ve formě grafitu. S klesající teplotou se rozpustnost uhlíku v austenitu zmenšuje, takže se z austenitu vylučuje uhlík, který se pak difuzí přesune k nejbližší částici grafitu a ta tímto roste. Při

ochlazování pod teplotou $A_{1,2}$ se začne vylučovat více uhlíku ku prospěchu grafitu a struktura ochuzená o uhlík se transformuje na ferit. Tento proces se nazývá rozpad austenitu a trvá až do dosažení teploty $A_{1,1}$, kdy struktura obsahuje pouze ferit a grafit. Feritická struktura se objevuje většinou jen u stěn odlitků s velkou tloušťkou, které chladnou pomalu. Avšak rychlost ochlazování u běžných odlitků bývá větší a vede k tuhnutí dle nerovnovážného diagramu, tedy ve struktuře vzniká i cementit ve formě lamel perlitu. Přítomnost perlitu ve struktuře litin je velmi důležitá, protože právě perlitická struktura ovlivňuje tvrdost, pevnost, obrobiteľnosť a mnoho dalších vlastností odlitku. Podíl perlitické struktury je ovlivňován rychlostí tuhnutí odlitku a také podílem a rozložením grafitu, což přímo úměrně souvisí s kvalitou očkování litiny. Křemík snižuje rozpustnost uhlíku v austenitu a rozšiřuje pásmo kritických teplot tak, že difuze může probíhat déle. Tímto vzniká ve struktuře více feritu. Feritická struktura ovšem nebývá v odlitcích z litiny s lupínkovým grafitem kvůli nízké tvrdosti a pevnosti žádaná, takže se do taveniny přidávají legovací prvky, které kompenzují vliv křemíku. [9; 5]

Výše zmíněné procesy nazýváme fázovými přeměnami v tuhém stavu. Výchozí austenitická struktura je ochlazována pod teplotu $A_{1,2}$, kdy začne probíhat eutektoidní přeměna (rozpad) austenitu, a vzniká grafitický eutektoid, který však nekystalizuje osamoceně, ale na nejbližších lupíncích grafitu. V závislosti na rychlosti ochlazování vznikají různé kovové matrice. Rozpad austenitu je možné sledovat na diagramech ARA a IRA. Při ochlazení pod kritické teploty, ale následné výdrži na dané teplotě, dochází k izotermickému rozpadu austenitu. Tento děj je možné sledovat v diagramu IRA, který je na obr. 1.11. [7; 10]

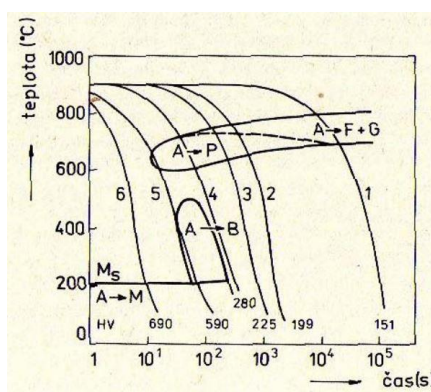


A – austenit, G – grafit, P – perlit, F – ferit, B – bainit, B_s – bainit start, B_f – bainit finiš,
 cem_p – perlitický cementit, P_s – perlit start, P_f – perlit finiš, M – martenzit,
 M_s – martenzit start,

Obr. 1.11 IRA diagram nelegované litiny. [7]

Výchozí struktura je vždy austenitická. Dle požadavku na strukturu je zvolena teplota, na které je odlitek držen až do úplné přeměny struktury. Je-li například u odlitku požadavek na perlitickou strukturu, je odlitek po normalizaci (ohřevu do austenitu) ochlazen pod kritické teploty tak, aby při výdrži na teplotě prošel skrze křivky P_s a následně P_f (start = začátek přeměny, finiš = konec přeměny). Přeměna je tedy řízena volbou konstantní teploty. [7]

Pokud je ale pokles teploty plynulý, dochází k anizotermickému rozpadu austenitu a průběh zachycuje diagram ARA na obr. 1.12. [10]



Obr. 1.12 ARA diagram nelegované litiny. [7]

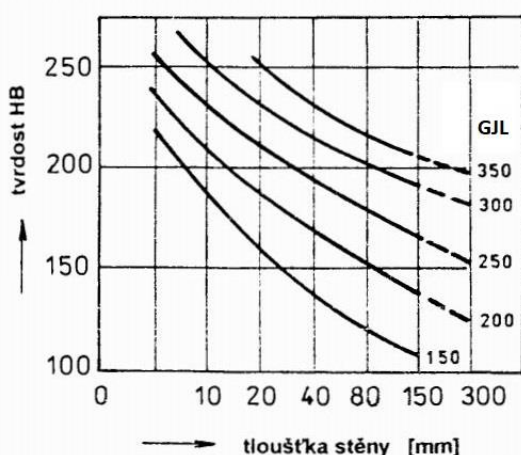
U diagramu ARA je rozpad řízen volbou rychlosti ochlazování odlitku. Při velmi pomalém ochlazování (křivka 1 na obr. 1.12) dochází k eutektoidní přeměně dle stabilního diagramu (viz obr. 1.1) a vzniká čistě feritická kovová matrice s nízkou tvrdostí. Pokud je rychlost ochlazování volena vyšší (křivky 2 a 3 na obr. 1.12), je eutektoidní přeměna stabilní i metastabilní zároveň, takže se v kovové matici vyskytují ferit i perlit. Při dostatečně rychlém ochlazování (křivka 4 na obr. 1.12) je přeměna čistě metastabilní a matrice je jen perlitická. Při rychlosti ještě vyšší (křivka 5 na obr. 1.12) je dosažena struktura obsahující zároveň perlit, bainit (cementit a ferit), martenzit (přesycený tuhý roztok uhlíku v α železe) a zbytkový austenit. Jestliže dosáhne rychlost ochlazování extrémních hodnot (kalení, křivka 6 na obr. 1.12), nedochází k žádným difúzním tokům a struktura je složena pouze z martenzitu a zbytkového austenitu. [4; 5; 7]

1.5 Vlivy působící na rychlost ochlazování

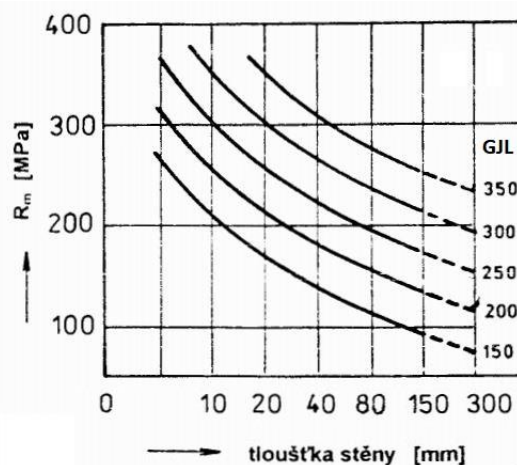
Při odlévání litinových odlitků má na strukturu a vlastnosti, kromě chemického složení, zásadní vliv rychlost ochlazování. Významné vlivy, které ovlivňují rychlost ochlazování jsou:

- tloušťka stěny odlitku,
- průtočnost stěny odlitku,
- materiál formy a tepelná akumulace formy. [3; 5; 11]

Tloušťka stěny odlitku má významný vliv na výslednou strukturu a vlastnosti všech odlévaných kovů. Litiny s lupínkovým grafitem jsou obzvláště citlivé na tloušťku tuhnutí stěny. Čím tlustší je stěna odlitku, tím pomalejší je krystalizace a ochlazování dané sekce, což vede k tvoření hrubšího grafitu a většího podílu feritické matrice. Tato struktura má obecně nižší tvrdost a pevnost. Naopak tenké stěny tuhnou rychleji, takže jejich strukturu tvoří jemnější grafit a více perlitu. Pokud je rychlost ochlazování nadkritická, vylučují se ve stěně karbidy namísto grafitu. Vliv tloušťky stěny u běžných litin s lupínkovým grafitem na tvrdost HB je zobrazen na obr.1.13 a vliv na pevnost R_m na obr. 1.14. [5]



Obr. 1.13 Vliv tloušťky stěny na tvrdost HB u různých tříd GJL. [3]



Obr. 1.14 Vliv tloušťky stěny na pevnost R_m u různých tříd GJL. [3]

Průtočnost stěny je objem litého kovu, který proteče daným průřezem stěny odlitku. Po odlití odvádí forma z odlitku teplo a tímto teplem se sytí, přičemž různé formovací materiály mají různé tepelné kapacity. Pokud se stěna odlitku nachází v blízkosti zářezů vtokové soustavy, tak jí musí protect větší objem kovu, než stěnami, které se nachází v místech odlehlých od zářezů. Stěny, jimiž proteče větší objem kovu, naakumulují i více tepla. Pokud je forma nasycena teplem, tak se snižuje teplotní gradient odvodu tepla a forma začne odvádět méně tepla, což vede k pomalejšímu ochlazování. Lze tedy prohlásit, že stěny s vysokou průtočností kovu se chovají jako stěny s velkou tloušťkou, protože chladnou pomaleji, a naopak stěny odlehlé od vtokové soustavy se chovají jako tenké stěny, protože do nich kov doteče chladnější a mezi kovem a formou je velký gradient odvodu tepla. [5]

Celkový vliv formy na odvádění tepla z odlitku a jeho tuhnutí a chladnutí popisuje koeficient tepelné akumulace formy b_f . Koeficient b_f závisí na měrné tepelné kapacitě formy, její tepelné vodivosti a hustotě formovací směsi ve formě. S rostoucí hodnotou b_f se zvyšuje ochlazovací účinek formy. [11]

1.6 Vliv zvýšených teplot na strukturu litiny

Stabilita struktury litin za zvýšených teplot je významná vlastnost, protože celá řada litinových odlitků je těmto teplotám při své funkci vystavena (bloky motorů, části pecí nebo kryty tepelných turbín). K tomu je u mnoha odlitků provedeno tepelné zpracování, jako třeba žíhání k odstranění vnitřnímu pnutí, které ovšem může vést k poklesu tvrdosti a pevnosti. [5]

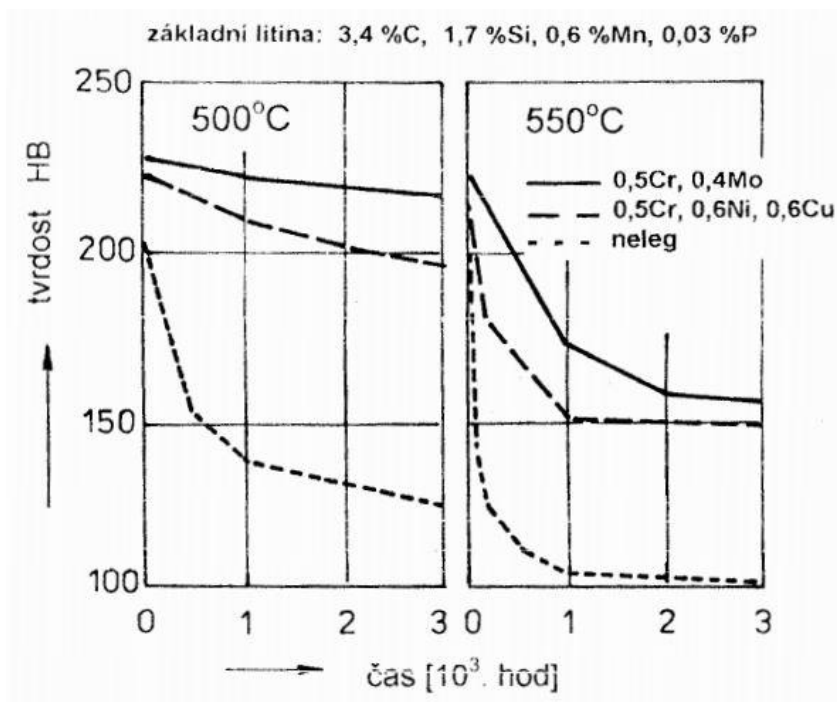
Do teploty 230 °C je změna struktury litiny s lupínkovým grafitem zanedbatelná. To stejné platí i pro litiny s vyšší pevností (GJL 250 až GJL 350) do teplot 350 °C. Při delší výdrž nad teplotou 370 °C už začnou být změny struktury a mechanických vlastností měřitelné, protože se začne pozvolna rozpadat perlit na ferit a grafit. Přesáhne-li u odlitku výdrž na teplotě 500 °C delší dobu, dochází k výrazným strukturním změnám, které vedou především k poklesu tvrdosti. [5]

1.6.1 Vliv legování na stabilitu struktury za zvýšených teplot

Jedním z hlavních důvodů legování je stabilizace struktury za zvýšených teplot. Legováním lze zvýšit odolnost litin proti creepu, oxidaci, tepelné únavě nebo poklesu tvrdosti a pevnosti. Hlavní účinek legur spočívá ve stabilizaci perlitu za zvýšených teplot, který by se jinak při takových teplotách začal rozpadat na ferit a grafit. Většina prvků, kromě křemíku, působí jako stabilizátory struktury. Legující prvky jako nikl, chrom a molybden mají na stabilizaci struktury za zvýšených teplot nejvýznamnější vliv. Jejich pomocí lze, v závislosti na dávkování, stabilizovat perlit i do teplot blízkých podkritickým teplotám. [5; 7]

Bylo dokázáno že obsah chromu v litině alespoň 0,14 % stabilizuje perlitickou strukturu tak, že je možné odlitek žíhat po dobu jedné hodiny na teplotě 650 °C bez výrazného snížení tvrdosti. Při obsahu 0,2 až 2,0 %Cr, v závislosti na tloušťce stěny, se výrazně zvyšuje stabilita struktury při zvýšených teplotách. Litiny vysoce legované chromem (při obsahu 27 až 33 %Cr) mají zvýšenou odolnost proti teplotám až do 1100 °C. [7; 12]

Nejlepší stabilizace struktury se docílí kombinací více stabilizačních prvků. Tato skutečnost je patrná z obr. 1.15, který zachycuje vliv kombinace legujících prvků Cr, Mo a Cr, Ni, Cu na stabilitu tvrdosti litiny s lupínkovým grafitem při žíhání na teplotách 500 a 550 °C po velmi dlouhé doby. [5; 7; 12]



Obr. 1.15 Vliv legujících prvků na stabilitu struktury u litiny s lupínkovým grafitem žíhané na teplotách 500 a 550 °C. [3]

Tab. 1.4 zachycuje vliv chemického složení nízkolegovaných litin na stabilizaci tvrdosti při žíhání na teplotě 620 °C po dobu 8 hodin. [12]

Tab. 1.4 Vliv žíhání nízkolegovaných litin s lupínkovým grafitem na tvrdost při teplotě 620°C po dobu 8 hodin. [12]

Litina	Chemické složení [%]								Tvrdost [HB]		
	C	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Mo	Před žíháním	Po žíhání (8 hod, 620°C)	Rozdíl HB
A	2,93	2,14	0,110	0,57	0,47	0,35	0,10	-	229	203	26
B	3,43	2,12	0,104	0,70	0,81	0,34	0,18	0,23	229	203	26
C	3,24	2,55	0,107	0,62	0,87	0,51	0,20	0,22	212	212	0
D	3,91	1,43	0,540	0,25	0,32	1,56	0,06	-	154	147	7
E	3,18	2,13	0,730	0,125	0,70	1,03	0,33	0,65	229	229	0

1.6.2 Druhy tepelných zpracování

Tepelné zpracování lze používat u všech slitin železa, ale výsledky jsou u jednotlivých materiálů různé. U ocelových odlitků jsou změny velmi výrazné. U litiny s kuličkovým grafitem lze dosáhnout velkých změn mechanických vlastností, zatímco u litiny

s lupínkovým grafitem již lze ovlivňovat jen některé vybrané vlastnosti. Většinou lze velmi dobře ovlivňovat tvrdost, méně pak pevnost (v závislosti na tvaru a rozložení grafitu). [7]

Stejně jako při volbě teplot tepelného zpracování oceli je zásadní obsah uhlíku, tak u litin jsou podmínky tepelného zpracování voleny na základě obsahu křemíku a jiných legujících prvků. [5]

Krystalizace a překrystalizace vedou ke vzniku lité struktury v odlitku. Je-li však u odlitku žádaná struktura s jinými vlastnostmi, je třeba provést tepelné zpracování, které má opačný průběh. Odlitek je zahříván v peci na teploty, kdy dochází k opačným pochodům změny struktury. Opět zde hraje významnou roli křemík. Vyšší obsah křemíku zvyšuje tendence uhlíku formovat za zvýšených teplot grafit a tvořit tak feritické struktury ochuzené o uhlík. Většina ostatních prvků tento proces brzdí. [5; 6]

Tepelné zpracování je proces používaný pro změnu struktury a mechanických vlastností odlitku, jako je:

- odstranění vnitřního pnutí odlitku,
- zvýšení pevnosti a tvrdosti,
- zlepšení obrobitelnosti. [3; 13]

Každé tepelné zpracování je charakteristické ohřevem na pracovní teplotu výdrží na teplotě a rychlostí chladnutí. Teploty a časové prodlevy tepelného zpracování závisí především na druhu grafitické litiny a obsahu jejích legujících prvků. Dle maximální dosažené teploty a tedy i fázových přeměn rozlišujeme tepelné zpracování za:

- podkritických teplot a
- nadkritických teplot. [3]

U tepelného zpracování je třeba dodržet maximální rychlost ohřevu, protože odlitek ohřevem mění svůj objem, a mohlo by docházet ke vzniku vnitřních pnutí. Změna ale není stejná v celém objemu, protože se odlitek zahřívá nerovnoměrně v průřezu stěn. Proto se volí rychlost ohřevu na základě tloušťek stěn a složitosti odlitku. Maximální rychlost ohřevu by měla být:

- 10-25 K·hod⁻¹ pro odlitky tvarově složitě,
- 30-50 K·hod⁻¹ pro odlitky tvarově jednoduché avšak
- maximálně až 100 K·hod⁻¹. [3]

Tyto rychlosti ohřevu je třeba dodržovat až do teplot 450 až 500 °C. Nad těmito teplotami už je materiál dostatečně plastický a dochází k relaxaci vnitřního pnutí. [3]

Existuje řada typů tepelného zpracování grafitických litin a jejich shrnutí včetně režimů je v tab. 1.5. Ale nejpoužívanějšími jsou především:

- žihání na snížení vnitřního pnutí,

- žíhání na měkko,
- normalizace. [3; 5; 7]

Tab. 1.5 Přehled tepelného zpracování grafitických litin. [7]

Tepelné zpracování	Druh materiálu odlitku	Požadavek	Teplota	Čas	Způsob chlazení ze žíhací teploty
Snížení vnitřních pnutí	nelegované nizkolegované vysoce legované	snížení vnitřních pnutí	500 – 550°C 560 – 600°C 600 – 650°C	1 h + 1h na 25 mm síly stěny	40K/h do 300°C (do 100°C pro složité odlitky)
Měkké žíhání při nízkých teplotách	nelegované nizkolegované	feritická struktura, lepší obrobitelnost	700 - 760°C	45 min. až 1 hod. na 25 mm stěny	55K/h mezi 540 a 300°C
Měkké žíhání při střed. teplotách	nelegované nizkolegované vysoce legované	feritická struktura, lepší obrobitelnost	790 - 900°C	Přes 45 min. na 25 mm stěny	v peci do 300°C
Měkké žíhání při vyšších teplotách	melírovaná nebo bílá struktura	feritická struktura, lepší obrobitelnost	900 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	v peci do 300°C
Měkké žíhání při vyšších teplotách	melírovaná nebo bílá struktura	odstranění karbidů při udržení maximální pevnosti a tvrdosti	900 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	ochlazení na vzduchu do 540°C, pak pec do 300°C
Normalizace Perlitizace	všechny druhy	perlitická struktura	850 - 955°C	1až 3h + 1h na 25 mm stěny	ochlazení na vzduchu do 540°C, pak pec do 300°C
Kalení	všechny druhy	martenzitická struktura, vysoká tvrdost	800 - 955°C	1h + 1h na 25 mm stěny	Vzduch nebo lázeň na <200°C
Zušlechťování	všechny druhy	snížení důsledků martenzitické transformace	150 - 650°C	1h na 25 mm stěny	vzduch nebo pec

*Měkké žíhání možno označit také jako grafitizaci

Odlitky z litiny s lupínkovým grafitem obsahují zbytková pnutí, která vznikají v různých částech odlitku různými vlivy. Jiné pnutí vzniká v průřezích stěn vlivem rozdílné rychlosti chlazení (vliv tloušťky stěny a průtočnosti), bržděným smršťováním jádry a formou (vliv technologie) nebo dokonce tryskáním odlitku při čištění. Toto pnutí není na pohled zřejmé, ale může se projevit při obrábění součásti nebo při její funkci poklesem pevnosti, zkroucením nebo dokonce v extrémních případech jejím porušením. Řešením je žíhání na snížení vnitřního pnutí. Při zahřátí odlitku na podkritické teploty se výrazně sníží mez elasticity a pnutí se sníží vlivem plastických deformací. Zároveň mají vyšší teploty vliv na rychlost přesunu atomů v krystalické mřížce ve směru klesajícího napětí. [3; 7; 12]

Žíhání na snížení vnitřního pnutí se provádí za různých teplot (viz tab. 1.5). Se vzrůstající teplotou je snížení pnutí rychlejší a významnější, ale zároveň při dlouhých prodlevách na teplotách okolo 600°C už dochází k rozpadu perlitu a tedy i ke snížení tvrdosti a pevnosti odlitku. U legovaných litin se snižuje účinek žíhání, ale zároveň se vlivem legovacích prvků obvykle stabilizuje perlitická struktura a dochází k mírnějšímu poklesu tvrdosti. [3; 7; 12]

Pro snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti a zvýšení rázové houževnatosti se provádí žíhání na měkko. Při tomto tepelném zpracování, kdy jsou teploty buď těsně podkritické

nebo nadkritické, dochází nejdříve k rozpadu perlitického cementitu. Zánikem cementitu a difuzí uhlíku směrem k lupínkům grafitu vzniká feritická struktura, která je doprovázena snížením tvrdosti. Pokud litina obsahuje prvky jako chrom, molybden nebo vanad, které brzdí rozpad perlitu, jen třeba pro stejný efekt zvýšit teploty a výdrž na nich. Je-li požadováno odstranění eutektického cementitu nebo volných karbidů vzniklých při krystalizaci, je třeba zvýšit teplotu žhání nad kritickou teplotu $A_{1,2}$, kdy se karbidy transformují na grafit a austenit. Doba rozpadu je kratší s vyšším obsahem křemíku a při vyšší teplotě. [7]

Žhání na měkko způsobuje rozpad perlitu, který je ale doprovázen snížením pevnosti a tvrdosti. Perlit je tedy v odlitku nositelem pevnosti a tvrdosti a jeho výskyt je proto žádaný. Pro zaručení rovnoměrné perlitické struktury v celém průřezu stěn odlitku je třeba provést normalizační (též perlitizační) žhání. Odlitek je při tomto tepelném zpracování nejdříve ohříván až do nadkritických teplot, kdy celá kovová matrice překrystalizuje na austenit. S rostoucí teplotou roste i rozpustnost uhlíku v austenitu a výchozí strukturou pro další procesy je tedy austenit dostatečně nasycený uhlíkem. Uhlík se do austenitu dostane nejen z rozpuštěného cementitu, ale částečně i z vyloučeného grafitu. Proto je třeba feritické litiny žíhat dostatečně dlouho, aby se mohl uhlík v austenitu rovnoměrně rozpustit. Jakmile je matrice čistě austenitická, je třeba provést ochlazování správnou rychlostí, protože ochlazováním nadkritickou rychlostí může v odlitku vznikat bainit nebo martenzit (především v tenkých stěnách), zatímco příliš pomalým ochlazováním může vznikat feritická struktura. To znamená, že přesným ochlazováním lze ve struktuře docílit různého poměru feritu a perlitu. Tento typ tepelného zpracování se zařazuje i před zušlechťovací procesy jako je kalení a popouštění, při kterých je rychlostí ochlazování řízena změna struktury odlitku dle požadovaných vlastností. [7]

2 VADY ODLITKŮ A JEJICH OPRAVA

Výskyt vad je ve slévárnách zcela běžný. Je to způsobeno tím, že do procesu výroby odlitku vstupuje velmi mnoho proměnných, které jsou často protichůdné. Může tedy změnou technologie a odstraněním vady jedné vznikat vada nebo vady jiné. [14]

2.1 Druhy opravovaných vad

Odlitek musí mít takové vlastnosti, aby mohl bezpečně plnit svoji funkci. To lze docílit opravou případné vady vhodnou metodou. [14]

Vady odlitků byly u nás v roce 1955 popsány a seřazeny v normě ČSN 42 1240. Ta byla roku 1965 novelizována, a tato novelizace je doposud platná. V roce 1992 sestavil kolektiv autorů (viz [14]) návrhy pro revizi této normy, která ovšem nikdy nevyšla v platnost. Vady zde byly rozděleny do 7 tříd a 38 skupin. [14; 15]

Každá vada je označena trojmístným číslem, kdy první číslice značí třídu vad, druhá skupinu a třetí konkrétní druh. Kompletní přehled vad je shrnut v Příloze 1, 2 a 3. [14; 15]

Ve slévárnách litin s lupínkovým grafitem se obecně vyskytuje celá řada vad. S vysokou frekvencí se při kontrole objevují vady určené na zavaření, jako:

- nezaběhnutí,
- omačkání, potlučení, pohmoždění,
- vyštípnutí,
- zahlcený plyn,
- otevřené staženiny,
- zadrobeniny.

Nezaběhnutí (vada 111) je jedna z nejčastějších vad. Vyznačuje se chybějící částí odlitku tam, kam nedoteklo čelo proudící taveniny ve formě. Nejčastější příčinou bývá nízká lící teplota nebo špatně navržená vtoková soustava, kdy kov zatéká dlouho do odlehlých částí odlitku. Zabránění vzniku vady vyplývá ze samotných příčin, tedy zvýšením teploty kovu nebo nápravě konstrukce formy (protažení struskováku a přidáním více zářezů). Oprava vady se provádí dovařením. [14; 15]

Omačkání, pohmoždění a potlučení (vada 116) je nejčastěji způsobeno nekázní při manipulaci s odlitkem nebo při vytloukání odlitku z formy na pneumatickém roštu. Oprava se i zde provádí dovařením chybějícího materiálu. [14; 15]

Vyštípnutí (vada 123) je vada, která se vyskytuje v místě, kdy byly k odlitku napojeny technologické prvky jako nálitky, zářezy a výfuky, které byly nevhodně odstraněny uražením tak, že se s prvkem odštípнула i část materiálu odlitku. Oprava se provádí dovařením materiálu. [14; 15]

Zahlcený plyn (vada 414) je vada na povrchu, nebo těsně pod ním. Vzniká při lití, kdy je potřeba veškeré plyny vznikající ve formě (vzduch ve formě, plyny z formovací směsi a jader, vlhkost) odvést pryč za pomoci výfuků a skrze prodyšnost formovací směsi, ale nedostatečným odvzdušněním zůstávají tyto plyny v tavenině. Vada se často zaměňuje za exogenní bublíny (vady 411, 412, 413), které jsou většinou způsobeny buď plyny z jader, formovací směsi nebo se jedná o plyny v tavenině. Řešením zahlceného plynu je obvykle zklidnění proudu kovu při lití a přidáním výfuků. Vada se opravuje jejím vybroušením a následným dovařením. [14; 15]

Otevřené staženiny (vada 441) jsou vady způsobené nepodchyceným stahováním kovu pod nálitky nebo v místech tepelných uzlů. Jsou to otevřené dutiny se zoxidovaným hrubým povrchem protažené do hloubky odlitku. Řešením této vady je přidání nebo zvětšení nálitku, použití exotermického zásypu nebo technologických přísad. Staženiny se opravují vybroušením a dovařením. [14; 15]

Zadrogeniny (520) jsou vady vzniklé nekovovými vměstky, jako jsou částice formovací směsi nebo jader. Vady jsou buď otevřené nebo uzavřené a úplně nebo z části vyplněné těmito částicemi. Zadrogeniny jsou nejrozšířenější vadou sléváren formujících do pískových forem. Nezkušení pracovníci často do zadrogenin řadí i ostatní vady vzniklé nekovovými vměstky, jako je rozplavený písek (vada 522), odpadnutý nátěr (vada 523), oxidické pleny (vada 524) a uhlíkové pleny (vada 525). Vizually odhalitelné zadrogeniny na povrchu jsou nejdříve kyslíkovým plamenem nataveny tak, až se z vady hořákem vyfouká veškerý připečený písek, a poté se dovaří novým materiálem. [14; 15]

2.2 Opravy vad

Odlitky jsou během výrobního procesu kontrolovány. Pokud je na některém nalezena vada, tak je označen, a odvezen na posouzení tzv. zmetkové komisi. Ta vadu identifikuje a rozhodne, bude-li odlitek přetaven nebo opraven. Vady na opravu jsou dále rozděleny na ty, které jsou na funkčních plochách, které budou dále obráběny, a vady na plochách neobráběných. Obráběné plochy jsou především dosedací plochy, ke kterým budou při konečné montáži připevňovány další části strojní soustavy. U odlitků na opravu je třeba dále určit, jak bude vada opravena. [14; 15]

Po konzultaci s techniky bylo zjištěno, že ve Slévárně Heunisch se provádí běžně tyto způsoby oprav:

- zavaření za tepla,
- zavaření za studena,
- vyplnění vady tmelem.

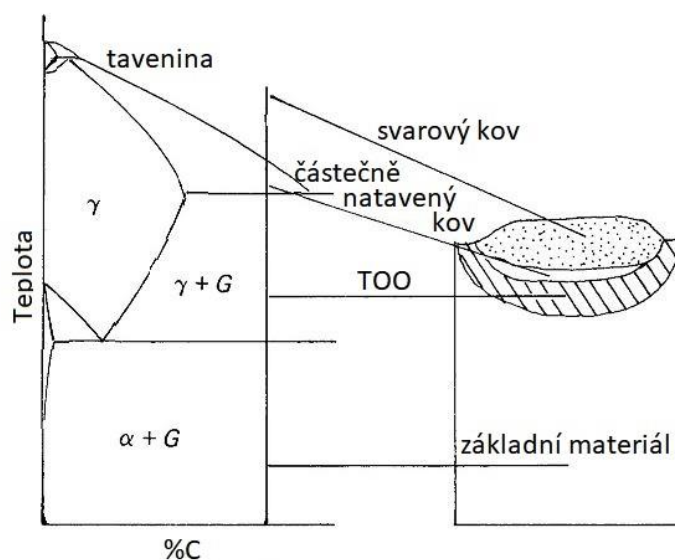
Zavaření za tepla se provádí buď u velkých vad na neobráběných plochách nebo u malých vad na plochách obráběných. Ve slévárnách se používá především zavařování plamenem nebo elektrickým obloukem obalenou elektrodou. [16]

U malých vad na neobráběných plochách se provádí zavařování za studena. Tento způsob zavaření může zanechat v odlitku zbytkové pnutí, a proto se provádí pouze z pohledové strany z estetických důvodů. Nejčastěji se používá pouze zavaření elektrickým obloukem obalenou elektrodou. [16]

Velmi drobné vady na neobráběných plochách, kde ale nesmí dojít k tepelnému ovlivnění, se vybrousí a vzniklá dutina se vyplní dvousložkovým tmelem.

2.3 Technologie svařování litin

Svařování je zvláštní druh dynamického procesu slévání, kdy základní materiál odlitku tvoří pomyslnou otevřenou formu, zatímco přídavný svářečský materiál a natavený materiál odlitku tvoří taveninu. Na obr. 2.1 jsou popsány základní zóny svaru tepelně korespondující s oblastmi binárního diagramu železo-uhlík (viz obr. 1.1). [9]



Obr. 2.1 Zóny svaru v závislosti na dosažené teplotě. [9]

Obecně je svařování litin náročnější než svařování ocelí, protože díky vyššímu obsahu uhlíku ve formě grafitu lépe vedou teplo, takže i rychleji chladnou, přičemž právě rychlost tuhnutí má nejvýznamnější vliv na výslednou strukturu. Při nesprávně zvolené technologii mohou v oblasti svaru vznikat fáze jako ledeburit nebo martenzit. Tyto fáze jsou tvrdé, křehké, téměř neobrobitelné a náchylné na porušení. Zóna v blízkosti svaru se nazývá tepelně ovlivněná zóna (TOO) a teplota v ní dosahuje teplot austenitických přeměn. [9]

Jednou z nejvíce užívaných aplikací technologie svařování grafitických litin je oprava menších vad, které se mohou objevit na jinak vyhovujícím odlitku. Svařování grafitických litin se podle funkce svaru dělí na:

- svary při funkci namáhané,

- svary bez namáhání,
- svary pro zvýšení kvality povrchu. [5]

Nejvyšší nároky jsou kladeny na správné provedení svarů, u kterých se předpokládá mechanické a jiné namáhání. Svary při funkci namáhané musejí mít stejné mechanické vlastnosti a kvalitu jako okolní materiál odlitku. Provedení těchto svarů nesmí ovlivňovat okolí. Často se jedná o obráběné funkční plochy nebo opravy netěsnosti tlakem namáhaných odlitků, které zadržují nějaké médium (kapalinu nebo plyn). Svary bez namáhání mají naopak menší nároky na kvalitu a jsou nejčastěji prováděny na plochách, které zůstávají v litém stavu, nebo jsou sice obráběny, ale nemají mechanicky náročnou funkci. Často se jedná o kosmetické opravy. Oba předešlé svary by ale měly mít kvalitní strukturu bez vad a především bez nepříznivých struktur, jako je ledeburit nebo martenzit. Svary pro zvýšení kvality povrchu jsou prováděny navařováním materiálu, který zvýší odolnost proti korozi, abrazi nebo různým druhům opotřebení, jako je například opotřebení mechanické nebo poškození vzniklé vlivem nepříznivého chemického prostředí. [5]

K opravě odlitků se používá celá řada metod tavného svařování. Tavné svařování je takové svařování, u kterého se energie do svaru dodává ve formě tepla, a u kterého ke spojení materiálů dochází natavením tzv. svarové lázně. Nejdůležitější metody tavného svařování vad odlitků z litiny s lupínkovým grafitem jsou:

- ručním plamenné svařování kyslíko-acetylenovým plamenem,
- ručním obloukovým svařováním obalenou elektrodou. [5; 17]

Ruční plamenné svařování kyslíko-acetylenovým plamenem (metoda 311 dle ISO 4063) je nejčastěji používanou metodou svařování litiny s lupínkovým grafitem a je používáno v kombinaci s litinovým přídatným materiálem. Pro svařování litiny s lupínkovým grafitem jsou litinové tyče přídatného materiálu obvykle z GJL 200 s dostatečným obsahem křemíku, aby byl zaručen jeho grafitizační účinek. Pokud je vysoká šance vzniku ledeburitu, je možné použít přídatné tyče s obsahem 1,2 až 1,6 % niklu a 0,25 až 0,45 % molybdenu, které podpoří stabilní tuhnutí. Při nejvyšších požadavcích na kvalitu svaru je nutné zajistit pozvolné ochlazování v TOO. Pokud je svar proveden správně, je výsledná struktura svaru a jeho okolí shodná se zbytkem odlitku a TOO se neliší vlastnostmi a ani obrobitelností. [5]

Ručním obloukovým svařováním obalenou elektrodou (metoda 111 dle ISO 4063) je metoda využívající tepla vzniklého v elektrickém oblouku mezi elektrodou a odlitkem. Elektrický oblouk je zdrojem většího množství tepla, než je tomu u plamenné svařování. Ve většině případů svařování litiny s lupínkovým grafitem je použito elektrod obsahujících přídatným materiál. V takovém případě je výsledný svar složen z nataveného materiálu odlitku i tavné elektrody. Svar obloukového svařování vzniká rychleji a ovlivňuje menší objem kovu odlitku, takže jej lze aplikovat i bez předehřevu. Na druhou stranu tento svar rychleji chladne, takže je kladen větší důraz na správné nastavení svarového proudu

a chemické složení tavné elektrody. Proto se jako přídavný materiál používají slitiny obsahující prvky s grafitizačními účinky, jako je nikl a měď. Nejpoužívanější jsou niklové přídavné materiály s hmotnostním obsahem niklu 50 až 95 %, které redukují vznik ledeburitu. [5; 16]

Jestliže se od svarového spoje vyžaduje vysoká kvalita srovnatelná se zbytkem odlitku, je nutné, aby ztuhl svarový kov jako grafitická litina. V tomto případě svařujeme výhradně plamenem nebo elektrickým obloukem s přídavným materiálem z litiny, přičemž svar musí být proveden po předehřevu na 600 až 650 °C a poté řízeně ochlazován. Předehřev je efektivní způsob, jakým lze předejít vzniku různých vad, protože se jím snižuje rozdíl mezi teplotou svaru a zbytkem odlitku, a tedy i rychlost ochlazování svaru a jeho okolí. Snižením rychlosti ochlazování nataveného kovu lze předejít vzniku karbidů a celkovým snížením rychlosti ochlazování v TOO lze zamezit překrytí austenitu na martenzit. Také díky snížení rozdílu teploty svaru a zbytkem odlitku vzniká zbytkové pnutí v daleko menší míře. Předehřev a teplota se volí na základě velikosti odlitku a složitosti odlitku, respektive rozdílu tloušťky stěny v různých částech odlitku. Čím je odlitek větší, tím více tepla jím může být pohlceno, a čím větší je rozdíl tloušťek stěn odlitku, tím větší je možnost vzniku pnutí a deformací. Volba předehřevu je také volena na základě velikosti svaru, protože malé svary chladnou rychleji, než svary velké, takže při svařování menšího objemu materiálu je třeba zvolit předehřev na vyšší teploty. Ochlazování odlitku je neméně důležité a mělo by být pozvolné. Po zavaření lze odlitek přikrýt izolačním materiálem, přehřívat jej plamenem nebo v nejlepším případě jej vrátit do pece a pozvolna jej ochlazovat v ní. [5; 16]

Při nižších nárocích na kvalitu svarového spoje je možné použít přídavný materiál jiný, než je litina. Svařovat lze s předehřevem nebo i bez něj. Přídavný materiál se volí tak, aby ve svaru a v TOO nevznikal ledeburit nebo martenzit. [16]

3 DEFINICE PROBLÉMU

Slévárna Heunisch je slévárnou litiny s lupínkovým grafitem a odlévají se zde především odlitky pro zemědělské stroje, jako bloky dieselových motorů, hlavy válců pro tyto motory, skříňové převodovky, kryty náprav, závaží a další. [1; 2]

Odlitky, které jsou určeny k opravě vad zavařením za tepla, projdou cyklem opravného zavaření. Ten se skládá z předehřevu na teplotu 650 °C, zavaření vybranou metodou a z následného řízeného ochlazování. Vystavení zvýšeným teplotám předehřevu způsobuje u některých odlitků pokles tvrdosti, který je zjištěn až při výstupní kontrole. Pokles tvrdosti pod předem definované minimum vede k vyřazení odlitku. Cílem této práce je prozkoumání vlivů působících na pokles tvrdosti, aby bylo možné pokles predikovat a vyvarovat se mu. Mezi vlivy, které mohou pokles tvrdosti způsobovat, patří především chemické složení odlévaného materiálu a použitá technologie opravného zavaření.

3.1 Zařízení ve Slévárně Heunisch

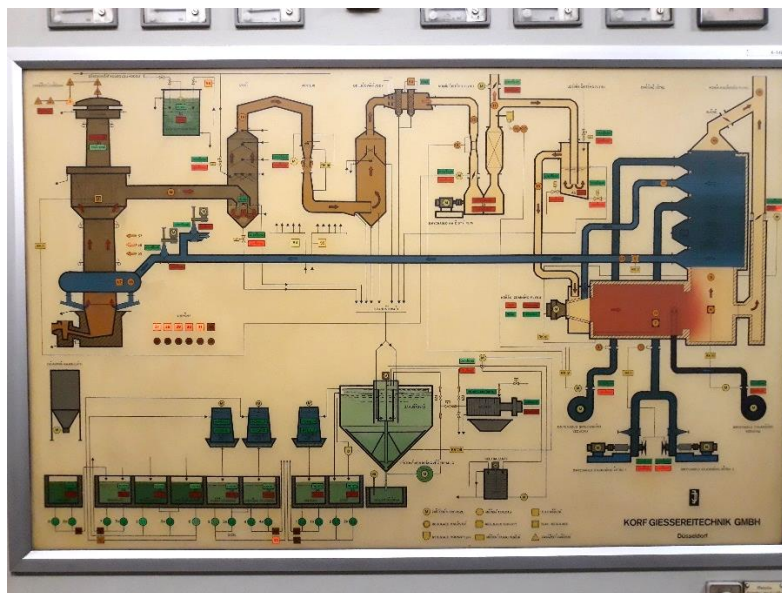
Formování se provádí na automatické formovací lince HWS. Odlévá se gravitačně do rámu 1400 x 850 x 400/400 mm. Roční produkce je, podle velikosti odlitků, 200 až 50 000 kusů odlitků za rok. Vzhledem k tomu, že se slévárna specializuje především na skříňové odlitky, vyrábí se jádra pro tvorbu velkých dutin odlitků, popřípadě drobných a vysoce přesných jader například pro odlitky hlav válců se složitými tvary. [1;2]

Slévárna je vybavena stroji na výrobu jader používající technologie Cold-box nebo CO₂ proces. Jáderna disponuje moderními vstřelovacími automaty v rozmezí kapacit od 12 do 180 l. Strojní výrobou se jádrová směs v jaderníku plní, zhušťuje a vytvrzuje. Po vytvrzení je jádro obsluhou vyjmuto z jaderníku, zkontrolováno, očištěno a ve většině případů i máčeno v kádích s lihem ředitelným nátěrem. Nátěr zlepšuje vlastnosti jader, jako například kvalitu povrchu a žáruvzdornost. [1; 2; 18]

Hotová jádra jsou přepravována na paletách pomocí vysokozdvíhových vozíků do skladu jader, kde ještě pokračují tvrdící chemické reakce a jádra schnou. Délka sušení jader závisí na složení směsi a okolních podmínkách. Je-li třeba, tak se jádra suší.

Tavárna Slévárny Heunisch má horkovětrnou kuplovnu a předpecí s udržovací kanálkovou pecí od firmy ASEA. Kuplovna má průměr 1,8 m a tavící výkon 16 t tekutého kovu za hodinu. V plášti je pět otvorů pro pět měděných, vodou chlazených, dmyšen horkého větru, který je rozváděn okružním větrovodem. Objem foukaného větru je 8 000 m³/hod a jeho teplota je 550 °C. Teplo pro předehřev foukaného větru se získává spalováním kychtového plynu v rekuperátoru. Do větru je přiváděno až 400 m³/hod kyslíku, který podporuje spalování v kuplovně. V plášti jsou pracovní dvířka a otvor pro odpich strusky a litiny. Nad okružním větrovodem je odsávání kychtových plynů. Aby z komína nevycházely žádné plyny, musí být odtah plynů zhruba 1,1 krát větší, než je objem foukaného větru, což znamená 8 800 m³/hod (po přidávání kyslíku až 9 200 m³/hod) plynů. Kychtové plyny míří

do souboru zařízení pro mokré odlučování částic. Nad odtahem plynů je už sázecí otvor kuplovný. Na obr. 3.1 je schéma zařízení kuplovný z velínu tavný. [1; 2; 3; 18; 19]



Obr. 3.1 Schéma kuplovný a jejího zařízení ve velínu tavný.

Vsázka pro kuplovný je sestavována v sázecím koši, do kterého jsou suroviny naváženy automaticky systémem dopravníků. Vsázku tvoří základní tři části: kov, palivo a metalurgické přísady. Kov tvoří buď vlastní vratný materiál slévárny, nebo kupovaný kovový odpad, který se skladuje ve skladu kovového odpadu. Palivem je koks.

Do pece se vsázka dávkuje jednou za 10 až 15 minut podle potřeby tavný a licího pole. Složení vsázky je v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Složení vsázky v kg. [19]

Ocelový odpad	Litínový odpad	Vlastní vrat	Koks	FeSi 65%	FeMn 78%	Vápenec	Křemenc
1000	400	200	180	55	12	75	8

Hlavní část předpecí tvoří udržovací kanálková pec ASEA, která zajišťuje homogenizaci složení taveniny a udržení její teploty. Pec má kapacitu 30 t tekutého kovu. Vedle předpecí je stanoviště termické analýzy, na kterém se pomocí měření obsahu uhlíku, uhlíkového ekvivalentu, křemíku a fosforu určuje kvalita tekutého kovu. Na licí pole se od předpecí kov transportuje v přepravních a zároveň i licích sifonových pánvích o kapacitě 2,2 t. Pánve jsou před nalitím kovu předehřívány hořáky a manipuluje se s nimi za pomoci vysokozdvížného vozíku. Dle potřebného složení se naváží množství očkovaadel a legur. Jako očkovaadlo se používá SB5 od firmy ASK Chemicals v množství 0,27% na hmotnost

kovu. Je to očkovadlo s bariem a doba očkovacího účinku je přibližně 15 až 20 minut. Pokud uplyne od naočkování více jak 20 minut a nedojde k použití celého objemu taveniny v sifonové pánvi, je tavenina vrácena zpět do udržovací pece. Očkovadlo se dávkuje pozvolna do proudu tekutého kovu zároveň s legujícími prvky. [19]

3.2 Materiály odlévané ve Slévárně Heunisch

Ve slévárně Heunisch se odlévá řada typů litiny s lupínkovým grafitem, kdy každý materiál má jiné uplatnění v závislosti na funkci odlitku, požadavku zákazníka, slévárenských vlastnostech odlitku, tloušťce stěn, ceny a dalších. Materiály jsou značeny dle ČSN EN 1561. Tyto litiny jsou buď nelegované nebo legované tak, aby splňovaly předem definované mechanické vlastnosti. Proto se ve Slévárně Heunisch používají legující prvky, které se dávkují buď samostatně nebo v kombinaci. Kromě cínu, jsou legovány vždy jen litiny GJL-300. Cínem se leguje jak litina GJL-300, tak i litina GJL-250. Hlavním důvodem legování je zvýšení podílu perlitické struktury a její zjemnění. Přehled odlévaných litin ve Slévárně Heunisch je v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Přehled litin odlévaných ve Slévárně Heunisch včetně detailů legování.

Označení litiny	Legující prvky a jejich dávkování	Důvod legování	Typické odlitky
GJL 200			Skříň převodovky
GJL 250			Skříň převodovky
GJL 300			Pouzdra nápravy
GJL 300 Cu	0,3 až 0,4 % Cu	Stabilizace perlitu, zvýšení pevnosti a tvrdosti, snížení citlivosti na tloušťku stěny	Skříň převodovky
GJL 300 CuMo	0,55 až 0,65 % Cu a 0,25 až 0,35 % Mo	Stabilizace perlitické struktury při zvýšených teplotách, zvýšení odolnosti proti tepelné únavě, zvýšení pevnosti a tvrdosti	Pouzdra nápravy, skříň převodovky
GJL 300 Cr	0,25 až 0,35 % Cr	Zvýšení pevnosti a tvrdosti za normálních i zvýšených teplot,	Pouzdra nápravy
GJL 300 CuCr	0,45 až 0,55 % Cu a 0,25 až 0,35 % Cr	Zvýšení pevnosti a tvrdosti za normálních i zvýšených teplot, Cu – kompenzace karbidotvorného účinku Cr	Skříň převodovky
GJL 250 Sn a GJL 300 Sn	do 0,1 % Sn	Zvýšení tvrdosti a pevnosti, stabilizace perlitu při zvýšených teplotách	Hlavy válců a bloky dieselových motorů

Nelegovaná litina GJL-200 má z odlévaných materiálů zpravidla nejvyšší obsah uhlíku (3,40 až 3,50 %C) i křemíku (2,00 až 2,20 %Si). Vlivem zvýšeného uhlíkového ekvivalentu má tato litina i nízkou teplotu liquidu (asi 1185 °C), což má za následek lepší

zabíhavost. Litina GJL-200 se používá především pro odlitky, které jsou méně mechanicky namáhané, jako třeba skříně a kryty strojních součástí. Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 180 HB a pevnost v tahu 250 MPa.

Nelegovaná litina GJL-250 má oproti GJL-200 menší obsah uhlíku (3,35 až 3,40 %C) a křemíku (1,90 až 1,95 %Si). Vlivem snížení uhlíkového ekvivalentu se zvýší teplota liquidu (na asi 1200 °C). Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 195 HB a pevnost v tahu 270 MPa.

Nelegovaná litina GJL-300 dosahuje z odlévaných nelegovaných litin nejvyšších mechanických vlastností. Má nižší obsah uhlíku (asi 3,30 %C) a křemíku (asi 1,80 %Si) a má tedy i nižší uhlíkový ekvivalent, což má za následek i vysokou teplotu liquidu (asi 1210 °C). Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 210 HB a pevnost v tahu nad 300 MPa.

Legované litiny GJL-300 se od nelegované GJL-300 příliš neliší obsahem uhlíku a křemíku, ale obsahy dalších prvků (legur).

Legování litiny GJL-300 Cu mědí se provádí pro zvýšení pevnosti a tvrdosti. Zároveň měď stabilizuje perlit za zvýšených teplot a snižuje vliv tloušťky stěny, protože zabraňuje vzniku karbidů. Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 215 HB a pevnost v tahu 320 MPa.

Legováním litiny GJL-300 CuMo mědí a molybdenem se zvýší tvrdost a pevnost asi o 10%, takže se používá pro nejvíce namáhané součásti. Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 240 HB a pevnost v tahu 350 MPa.

Litina GJL-300 Cr se odlévá jen občas a se zvýšenou opatrností, protože chrom je karbidotvorný prvek. Může způsobovat metastabilní tuhnutí a tedy vznik karbidů. Běžně se karbidotvorný účinek chromu kompenzuje mědí, ale pro snížení ceny materiálu lze měď vynechat, pokud je sníženo riziko vzniku zákalky (odlitek je bez tenkých stěn). Chrom zvyšuje pevnost a tvrdost za normálních i zvýšených teplot. Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 215 HB a pevnost v tahu 320 MPa.

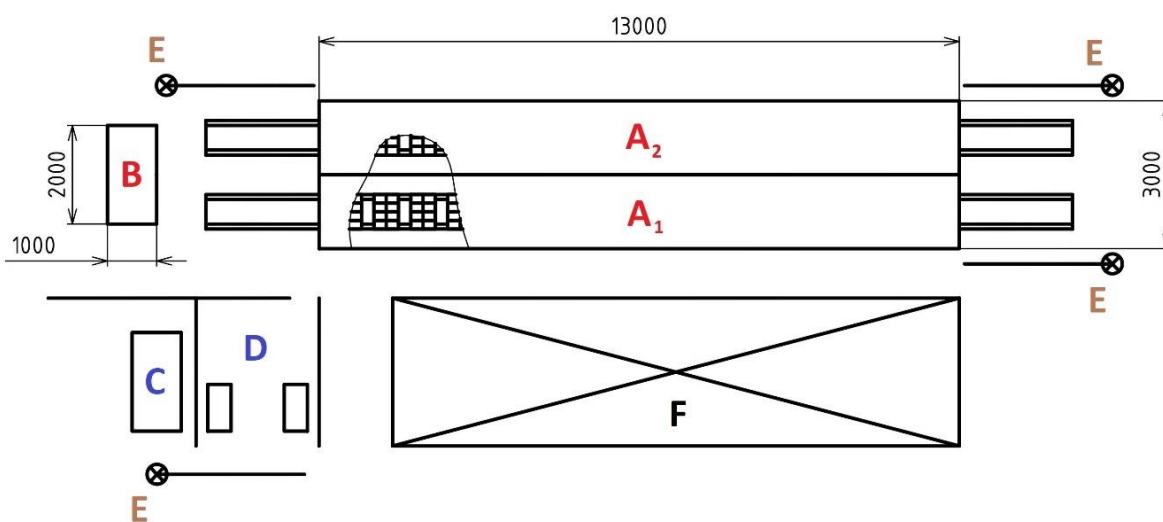
U litiny GJL-300 CuCr se kombinací mědi a chromu dosahuje zvýšení pevnosti a tvrdosti. Zároveň měď kompenzuje karbidotvorný účinek chromu. Tvrdost na zkušební tyči bývá okolo 225 HB a pevnost v tahu 320 MPa.

Legované litiny GJL-250 Sn a GJL-300 Sn se legují cínem, protože legování cínem je levnější než legování mědí. Cín zvyšuje pevnost a tvrdost. Cín ale zároveň zvyšuje i křehkost litin a proto se používá pouze po domluvě se zákazníkem. Ve Slévárně Heunisch se cínem legují pouze hlavy válců a motory pro společnost TEDOM. Na zkušební tyči bývá u GJL-250 Sn tvrdost okolo 200 HB a pevnost v tahu 285 MPa a u GJL-300 Sn bývá tvrdost 210 HB a pevnost v tahu nad 300 MPa.

3.3 Zavařování ve Slévárně Heunisch

Ve slévárně Heunisch jsou prováděny dva typy zavařování vad odlitek, a to zavařování za tepla a zavařování za studena. Zavařování se provádí na svářečském pracovišti, které se

nachází v hale apretace odlitků. Na obr. 3.2 je schéma svářečských pracovišť ve Slévárně Heunisch.



A₁ – průběžná pec – předehřev, *A₂* – průběžná pec – řízené chlazení, *B* – svářečské pracoviště zavařování za tepla, *C* – svářečské pracoviště zavařování za studena, *D* – svářečská technika, *E* – sloupové jeřáby (4x), *F* – prostor pro palety s odlitky

Obr. 3.2 Schéma pracovišť svářečů.

Odlitky označené za opravitelné, jsou vysokozdvíhými vozíky přemístěny na paletách do prostoru *F* vedle svářečských pracovišť. Technologie je dle požadavků zákazníka určeno, zda budou odlitky zavařeny za tepla, nebo za studena. S odlitky je poté manipulováno pomocí sloupových jeřábů *E*.

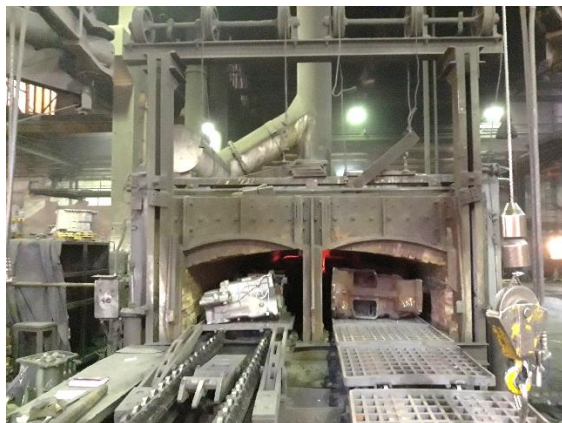
Odlitky určené k zavaření za tepla jsou nejdříve položeny na rošty o rozměrech 900x750 mm (obr. 3.3a) a předehřáty v průběžné peci *A₁* na teplotu 650 °C (obr. 3.3a a 3.3b, více v kapitole 3.4). Poté jsou zavařovány na svářečském pracovišti *B*. Svařování musí být provedeno do cca 10 minut, protože teplota odlitku nesmí na pracovišti klesnout pod 400 °C. Svařování za tepla se na pracovišti *B* provádí dvěma způsoby a to ručním zavařováním plamenem a ručním obloukovým svařováním obalenou elektrodou.

Zavařování plamenem se provádí pomocí směsi plynů acetylenu a kyslíku a tavného materiálu v podobě litinové tyčinky. Litinové tyčinky se do Slévárny Heunisch dodávají z Výzkumného ústavu zvaračského (Slovensko). Někteří zákazníci zakazují opravné zavařování plamenem u svých odlitků, takže je na pracovišti možné zavařovat i elektrickým obloukem obalenou elektrodou. Pro zavařování elektrickým obloukem se používá elektroda EutecTrode 2-26 DH od společnosti Castolin Eutectic. Po zavařování je odlitek vložen zpět na rošt a vsunut do průběžné pece *A₂*, kde je pozvolna ochlazován.

Vedle svářečských pracovišť je prostor svářečské techniky *D*, kde jsou uloženy dvě rotační svářečky P 500 od výrobce MEZ Vsetín vyrobené v závodě Brumov (obr. 3.3d). Jedna je pro zavařování za tepla a druhá pro zavařování za studena.

Zavařování za studena se provádí na pracovišti *C* pomocí elektrody UTP 8 od firmy UTP.

Na obr. 3.3a až obr. 3.3d jsou jednotlivá svářečská pracoviště.



Obr. 3.3a Předehřívací průběžná pec. Nalevo vstup odlitků určených na zavaření A_1 . Napravo výstup zavařených odlitků A_2 .



Obr. 3.3b Průběžná předehřívací pec z pohledu pracoviště zavařování za tepla *B*.



Obr. 3.3c Pracoviště zavařování za studena *C*.

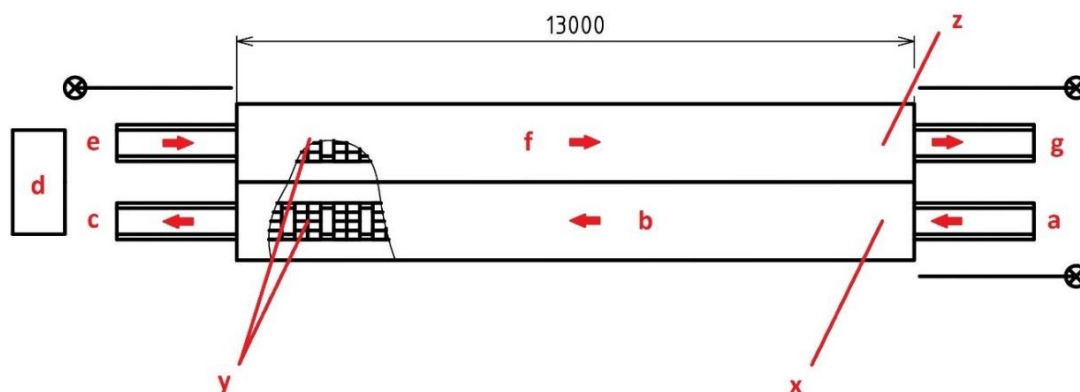


Obr. 3.3d Svářečská technika *D*. Dvě rotační svářečky MEZ Vsetín P 500.

3.4 Cyklus odlitků zavařovaných za tepla ve Slévárně Heunisch

V této práci je blíže zkoumán vliv předehřevu v průběžné peci na pokles tvrdosti v odlitcích. Samotné zavařování má v odlitku vliv pouze lokální a nebude v práci dále zkoumáno.

Na obr. 3.4 je schéma pece pro předehřev procesu zavařování za tepla.



a – vstup odlitku určených k zavaření, *b* – směr postupu odlitků pecí, *c* – výstup odlitků z pece, *d* – zavaření za tepla, *e* – vstup odlitků do pece řízeného chlazení, *f* – postup odlitků pecí s řízeným chlazením, *g* – výstup odlitků z pece řízeného chlazení
x – začátek ohřevu, *y* – umístění hořáků, *z* – konec chlazení

Obr. 3.4 Schéma procesu zavařování za tepla.

Proces zavařování odlitků za tepla (obr. 3.4) je následovný. Odlitky na roštích jsou umístěny do pece ve směru *a* a posouvány pomocí pístů dovnitř ve směru *b*. Do každé pece se najednou vejde 16 roštů. Hořáky na zemní plyn, které obě pece vyhřívají, jsou umístěny v místech *y*, tedy u předposledního roštu od konce pece z pohledu svářečského pracoviště *d*. Jinde v peci již hořáky nejsou. To znamená, že místa *y* jsou místa s nejvyšší teplotou v peci, zatímco místa *x* a *z* mají teplotu nejnižší, protože jsou od hořáků nejdále. Posouváním roštů z místa *x* ve směru *b* jsou odlitky pozvolna ohřívány až na nejvyšší teplotu 650 °C v místě *y*. V místech *y* jsou i termočlánky, které regulují hořáky. Po vyjmutí předehřátých odlitků z pece ve směru *c*, jsou odlitky zavařeny na pracovišti svářeče *d*. Svářeč dle pokynů zavaří odlitky buď pomocí plamenného svařování nebo ručně obalenou elektrodou. Na pracovišti *d* je řada nástrojů pro očištění míst svarů před a po zavaření. Zavařování musí probíhat tak rychle, aby teplota odlitku neklesla pod 400 °C. Po zavaření je odlitek opět položen na rošt a vsunut do druhé pece ve směru *e*. Zde projde celým cyklem znovu, ale tentokrát je pozvolna ochlazován z nejteplejšího místa *y*, ve směru *f*, až dosáhne konce řízeného chlazení v místě *z*, kde je vyjmut z pece ve směru *g*. S odlitky vyjmutými z pece je již zacházeno jako s odlitky vyhovujícími, takže jsou na paletách přemístěny na oddělení expedice, kde je na vybraných plochách kontrolně změřena tvrdost.

Vyhovující odlitky jsou expedovány, nevyhovující jsou označeny za neshodné výrobky. Právě v tomto momentě je obvykle odhaleno, zda je odlitek shodný, či nikoliv. Problémem je, že v tomto momentě prošel odlitek veškerou výrobou slévárny. Postupně byl odlit z nataveného materiálu, vytlučen z formy, otryskán tryskači, apretován na čistírně, ohříván, zavařen a nakonec schlazen. Pokud je odlitek označen za neshodný až úplně na konci výrobního postupu, dochází k vysoké finanční ztrátě. Výsledky této práce budou pro Slévárnu Heunisch dobrým nástrojem pro predikci poklesu tvrdosti a tedy i vyřazení odlitku, jejichž zavaření by bylo zbytečné, ba naopak by degradovalo odlitek jako celek.

I když se celý proces zavařování odlitků za tepla zdá být jednoduchý, není tomu tak. Samotná konstrukce pece způsobuje nestálost procesu u každého jednotlivého odlitku. Pro pochopení je třeba sledovat pracovní směnu svářeče. Svářeč pracuje na jednu pracovní osmihodinovou směnu. Pec se po ukončení směny vypíná (plynové hořáky jsou přes noc vypnuty) a pec je již plná odlitků z předešlého dne, protože posuv roštů s odlitky v peci je zajišťován posouváním roštů pístem na začátku pece. Svářeč na začátku své směny pec zapne a čeká, dokud teplota v peci nedosáhne požadovaných 650 °C, což trvá přibližně půl hodiny až hodinu v závislosti na roční době a okolní teplotě. Po dosažení teploty v peci vyjme svářeč první odlitek a začne jej zavařovat. Mezitím se rošty s odlitky posunou o jeden dopředu. Tento cyklus se opakuje celý den po celou pracovní směnu svářeče. To znamená, že první odlitek na řadě je zavařován po velmi krátkém a prudkém ohřevu, zatímco poslední odlitek v peci se dostane na řadu až na konci směny svářeče, tedy po maximálně 8 hodinách, kdy byl průběžně zahříván. Odlitek, na který se v ten den nedostane řada, je ale v peci průběžně ohříván po celou směnu svářeče, ale na konci směny je pec vypnuta, a odlitek přes noc chladne. Druhý den je tento odlitek jako první na řadě, jak to bylo popsáno výše. Další komplikací pro pochopení procesu je, že některé malé odlitky se vejdou na rošt po dvojicích, takže svářeč takovýto rošt nevytáhne ihned, ale až jsou postupně zavařeny oba odlitky.

Řízené chlazení odlitků probíhá stejně, jen v opačném pořadí.

Jak je z výše napsaného patrné, každý odlitek podstoupí zcela individuální cyklus ohřevu a chlazení, takže neexistuje obecný popis teplotního režimu v průběhu změny teplot. Tato skutečnost vedla k rozhodnutí provést dvě na sobě nezávislá měření (více v kapitole 4).

4 METODIKA MĚŘENÍ

Základem této práce je měření poklesu tvrdosti po tepelném cyklu a zkoumání vlivu zvýšených teplot na stabilitu struktury. V této kapitole jsou popsána jednotlivá měření.

4.1 Měřené parametry

Jednotlivé faktory ovlivňující výslednou strukturu odlitku a procesy, které k ní vedou byly popsány v kapitole 1. Nejdůležitějšími parametry ve vztahu k poklesu tvrdosti jsou:

- chemické složení a legování vzorků,
- tvrdost,
- tloušťka stěny,
- struktura,
- teplota ohřevu a výdrž na ni.

V následující kapitole je uvedeno, jakým způsobem byla měření jednotlivých parametrů provedena.

4.2 Provozní měření

V počátcích realizace této práce mělo být provedeno pouze jedno měření, a to měření vlivu tepelného cyklu předeřevu na stabilitu struktury a pokles tvrdosti ve spolupráci se Slévárnou Heunisch (dále jen provozní měření). Kvůli nestálosti tepelného režimu odlitků bylo navrženo měření druhé, které je popsáno v kapitole 4.3.

4.2.1 Návrh provozního měření

V prvním měření budou zjištěny dopady režimu předeřívací pece na změnu sktruktury a pokles tvrdosti. Výše bylo vysvětleno, že proces předeřevu v peci není stejnorodý, takže první měření spíše uceluje poznatky o tom, jaký pokles tvrdosti může u odlitku po průchodu zavařovacím cyklem nastat, než aby zkoumal obecně vliv zvýšených teplot na změnu struktury a vlastností litin. Měření ve Slévárně Heunisch dá technologickým pracovníkům informace, které povedou ke snížení počtu zbytečných oprav u odlitků, které by byly u výstupní kontroly vyřazeny z důvodu nízké tvrdosti.

Pro měření tvrdosti se u litin obvykle používá Brinellův tvrdoměr. Konstrukce Brinellova tvrdoměru nedovoluje měření tvrdosti u celých odlitků, ale pouze u vzorků menších rozměrů. U výstupní kontroly není možné používat Brinellův tvrdoměr, protože by byla nutná destrukce odlitku. Z toho důvodu je při výstupní kontrole ve Slévárně Heunisch používán přenosný Shoreův tvrdoměr TIME Hardness Tester TH130. U Shoreho tvrdoměru se měří výška odskoku zkušebního tělíska od povrchu vzorku. Zkušebním tělískem Shoreho tvrdoměru je ocelová tyčinka průměru 1,1 až 1,4 mm s koncem ve tvaru

komolého kužele a s pláštěm pod úhlem 35°. Tato metoda není zcela vhodná pro měření tvrdosti grafitických litin, ale mobilita tvrdoměru dovoluje měřit tvrdost i u tak velkých odlitků, jaké jsou odlévány ve Slévárně Heunisch. Při provozním měření bylo provedeno rozřezání vzorových odlitků, takže byla vždy změřena tvrdost oběma způsoby na stejných místech. Z výsledků je možné srovnat oba způsoby měření tvrdosti, případně je možné odhadnout s jakou chybou se při výstupní kontrole měří tvrdost. [4; 20; 21; 22]

4.2.2 Průběh provozního měření ve Slévárně Heunisch

Měření ve Slévárně Heunisch bylo provedeno následovně. Nejdříve byly vytypovány odlitky zastupující sortiment materiálů odlévaných ve Slévárně Heunisch. Od každého materiálu byly vybrány tři odlitky označené jako neshodné výrobky, takže jejich destrukcí nedošlo k finanční ztrátě. Vady na odlitcích byly malého rozsahu a neměly na měření vliv. Byly vybrány odlitky materiálů:

- GJL-200,
- GJL-250,
- GJL-300,
- GJL-300 Cu,
- GJL-300 Cr,
- GJL-300 CuCr,
- GJL-300 CuMo.

Vzorové odlitky byly označeny a poté na nich byla vždy vybrána dvě místa, u nichž byla nejdříve změřena tloušťka stěny v daném místě pomocí posuvného digitálního měřidla KINEX 150/10/0.01, a poté na nich byla změřena tvrdost pomocí Shoreho tvrdoměru TIME Hardness Tester TH130. Před měřením bylo třeba povrch odlitku v místě měření obrousit jemným brousícím papírem na úhlové brusce. Shoreho tvrdoměr TIME Hardness Tester TH130 měří vždy tři hodnoty tvrdosti, ze kterých poté vypočte aritmetický průměr. Tato měření byla provedena na zkoušeném místě třikrát, takže celkem bylo na jednom místě provedeno devět měření tvrdosti pomocí Shoreho tvrdoměru. Na obr. 4.1 je Shoreův tvrdoměr TIME Hardness Tester TH130 při měření.



Obr. 4.1 Měření tvrdosti pomocí Shoreho tvrdoměru TIME Hardness Tester TH130.

Před dokončením provozního měření ve Slévárně Heunisch byl Shoreho tvrdoměr zaslán na kalibraci, takže u části odlitků byla tvrdost dle Shorea změřena po kalibraci. Naměřené hodnoty tvrdosti po kalibraci Shoreho tvrdoměru jsou ve výsledcích vždy odlišeny od zbytku hodnot.

Po změření tvrdosti dle Shorea byly ze stejného místa vyřezány vzorky úhlovou bruskou pomocí diamantového řezacího kotouče. Diamantový kotouč ovlivňuje vzorek tepelně mnohem méně, než třeba vyřezávání pomocí kyslíkového plamenu, a jeho vliv může být zanedbán. Na vyřezaných vzorcích byla v laboratoři Slévárny Heunisch změřena tvrdost dle Brinella. Na obr. 4.2 je měření tvrdosti podle Brinella.



Obr. 4.2 Měření tvrdosti na stacionárním Brinellově tvrdoměru ve Slévárně Heunisch.

Po vyřezání vzorků bylo s odlitkem zacházeno jako s odlitkem určeným k opravě vad zavařením za tepla, takže byl na paletě převezen k pracovišti zavařování a odlitek podstoupil celý proces, jak bylo popsáno v kapitole 3.4, ale bez zavařování. Místo zavařování byl odlitek vyjmut z pece a svářeč ho nechal na pracovním stole ležet stejně dlouho, jako by tam ležel zavařovaný odlitek. Takto odlitek podstoupil shodný tepelný cyklus jako opravované odlitky.

Po tepelném cyklu bylo provedeno stejné měření a odebrání vzorků na stejných místech jako před cyklem. Hodnocena jsou data a vzorky z odlitku před a po tepelném cyklu.

U vybraných vzorků byl pro každý materiál proveden metalografický výbrus a byla zkoumána struktura vzorku před a po tepelném cyklu.

4.3 Laboratorní měření

Po bližším pochopení cyklu zavařovaných odlitků a zjištění, že odlitky jsou ve Slévárně Heunisch vystaveny zcela nejednotným teplotním režimům, bylo navrženo měření druhé. Druhé měření je měřením vlivu zvýšených teplot na stabilitu struktury a pokles tvrdosti provedeným v laboratorních podmínkách na Odboru slévárenství FSI VUT v Brně (dále jen laboratorní měření), a které vedlo k obecným závěrům.

4.3.1 Návrh laboratorního měření

Druhé měření má odstranit problém spojený s nestejným tepelným režimem u průběžné přehřívací pece ve Slévárně Heunisch a dát obecné poznatky o vlivu zvýšených teplot na změnu struktury a tvrdosti.

V tomto měření bylo v laboratorních podmínkách několik vzorků z různých litin vystaveno v žíhací peci zvýšené teplotě 650 °C. Teplota 650 °C odpovídá tepelnému zpracování žíhání na snížení vnitřních pnutí (viz kapitola 1.6.2). Vzorky byly postupně z pece vyjímány v předem daných periodách, takže bylo možné sledovat změny struktury a tvrdosti postupně v závislosti na výdrži na teplotě. V tomto měření bylo jednoznačně určeno, jak dlouho setrvaly vzorky na konstantní teplotě.

4.3.2 Průběh laboratorního měření

Ve Slévárně Heunisch se pravidelně archivují vzorky z každé tavby. Archivuje se vzorek pro chemickou analýzu na spektrometru a odlitá tyč pro zkoušku v tahu o rozměrech $\phi 30/300$ mm. Z archivu bylo vybráno třicet čtyři tyčí, zastupující materiály:

- GJL-200,
- GJL-250,
- GJL-250 Sn,
- GJL-300,
- GJL-300 Cu,

- GJL-300 Cr,
- GJL-300 CuCr,
- GJL-300 CuMo,
- GJL-300 Sn.

O každého materiálu byly vybrány čtyři tyče, kromě materiálu GJL-300 Sn, kde byly vybrány tyče dvě, protože se tento materiál odlévá velmi málo, a více tyčí v archivu nebylo k dispozici.

Na Odboru slévárenství FSI VUT v Brně byly tyto tyče nařezány na vzorky o rozměrech $\phi 30/30$ mm a označeny. Z každé tyče bylo vyřezáno pět zkušebních vzorků a zbytek tyče nebyl použit. Rozřezání tyče je patrné z obr. 4.3.



Obr. 4.3 Dělení tyče na vzorky $\phi 30/30$ mm.

Vzorky byly rovnoměrně rozděleny na dvě skupiny, kdy v každé skupině byl stejný počet vzorků daného materiálu. Chemické složení vzorků z první i druhé skupiny je v Příloze 4 a stejně tak je z příloh jasné rozdělení vzorků do skupin. Vzorky byly rozděleny na dvě skupiny, protože více vzorků se do pece rovnoměrně nevešlo a jejich manipulace by byla příliš náročná. Navíc by při vytahování velkého počtu vzorků z pece najednou byla pec příliš dlouho otevřena a mohlo by dojít k poklesu teploty v peci natolik, že by bylo měření ovlivněno.

První z pěti vzorků z každé tyče nepodstoupil tepelný cyklus, ale byla na něm změřena tvrdost v litém stavu. Zbylé čtyři vzorky byly na Odboru slévárenství FSI VUT v Brně vloženy do pece vyhřáté na teplotu $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ a poté byly vyjímány vždy po hodině a půl. Takže vzorky jednotlivých materiálů byly takto tepelně ovlivněny:

- vzorek 1: bez tepelného ovlivnění,
- vzorek 2: 1,5 hod při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vzorek 3: 3 hod při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vzorek 4: 4,5 hod při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- vzorek 5: 6 hod při teplotě $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

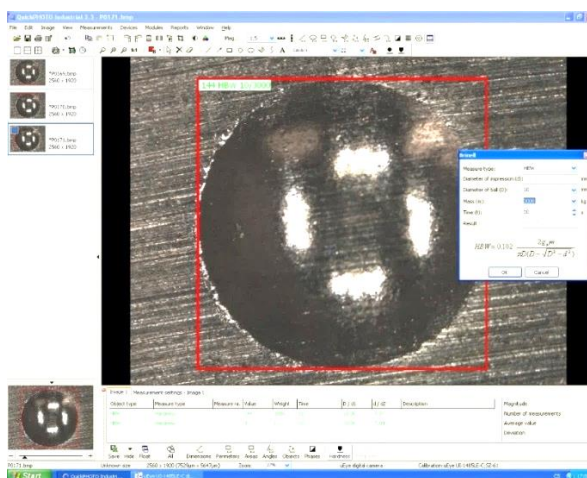
Vzorky po vytažení z pece chladly na vzduchu na podložce z šamotové žáruvzdorné cihly, aby bylo ochlazení pomalé. Po ochlazení byla vzorkům zarovnána čela na konvenčním soustruhu, aby se docílila rovnoběžnost čel vzorků. Poté byla čela vzorků obroušena na jemném brousícím papíru.

Měření probíhalo v laboratoři pro měření mechanických vlastností na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně. Zde byla na vzorcích změřena tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 podle normy ČSN 42 0371. Vzorky byly nejdříve zatíženy indentorem a vzniklá deformace byla zkoumána pod samostatným mikroskopem. Měření tvrdosti je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Pracoviště pro měření tvrdosti dle Brinella na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Mikroskop byl napojen na počítač s nainstalovaným programem QuickPHOTO Industrial 2.3, kde byly deformace po zatížení indentorem změřeny a tvrdost byla automaticky dopočítána programem. Rozhraní programu QuickPHOTO Industrial 2.3 je na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Práce s programem QuickPHOTO Industrial 2.3.

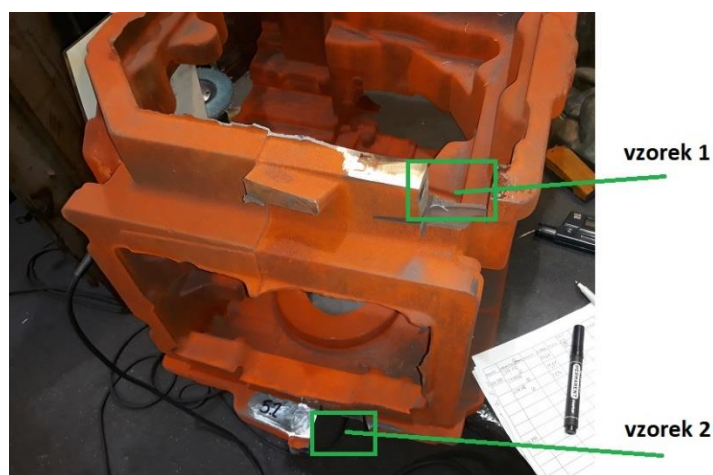
5 VÝSLEDKY PROVOZNÍHO MĚŘENÍ

Kompletní tabulky výsledků provozního měření ve Slévárně Heunisch jsou v Příloze 5 a Příloze 6. Aritmetické průměry u těchto jednotlivých měření a rozdíly těchto průměrů před a po tepelném cyklu jsou v Příloze 7 a Příloze 8.

Hodnoceny jsou především poklesy tvrdosti, tedy rozdíly aritmetických průměrů naměřených hodnot před a po tepelném cyklu ($\Delta HB = HB_{po} - HB_{před}$). Naměřené hodnoty tvrdosti dle Shorea jsou uvedeny ve stupnici dle Brinella.

5.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-200

Pro měření vlivu předehřevu zavařování za tepla ve Slévárně Heunisch byl jako zástupný odlitek vybrán skříňový odlitek s označením L 217 558 pro firmu John Deere. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.1.1. Hmotnost odlitku je 93 kg. Litina se odlévá z teploty 1430 °C. Odlitky jsou ve formách po dvojicích.



Obr. 5.1.1 Odlitek L 217 558 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 28 mm a ve 2. místě 25 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.1.1. V tab. 5.1.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.1.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-200 – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	ΔHB	HB před	HB po	ΔHB
3	202	198	4	197	192	5
4	204	197	7	197	187	10
5	201	197	4	192	180	12

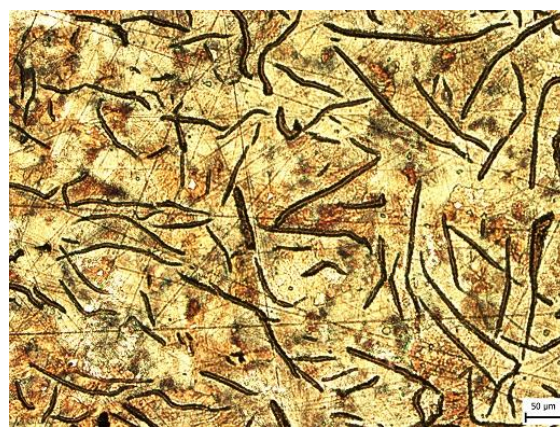
Tab. 5.1.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-200 – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
3	222	210	12	201	205	-4
4	219	205	14	218	182	36
5	220	211	9	205	196	9

Pro metalografické výbrusy byl vybrán vzorek číslo 2 z odlitku s označením 4. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.1.2 a obr. 5.1.3.



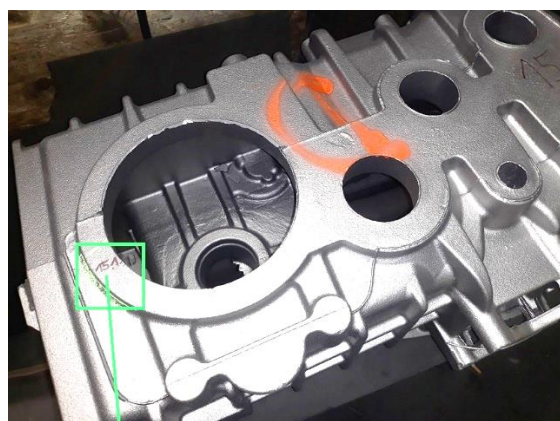
Obr. 5.1.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-200 v litém stavu.



Obr. 5.1.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-200 po tepelném cyklu.

5.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-250

Pro měření vlivu předehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti litiny GJL-250 byla jako zástupný odlitek vybrána skříň převodovky s označením 17 459 665 pro firmu Volvo. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.2.1a a na obr. 5.2.1b. Hmotnost odlitku je 133 kg. Litina se odlévá z vyšší teploty 1460 °C, protože ve vrchní části odlitku jsou tenká žebra, do kterých by chladný kov nemusel zaběhnout. Odlitek je ve formách jeden.



vzorek 1



vzorek 2

Obr. 5.2.1a Odlitek 17 459 665 s vyznačením míst odběru vzorku 1.

Obr. 5.2.1b Odlitek 17 459 665 s vyznačením míst odběru vzorku 2.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 31 mm a ve 2. místě 26 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.2.1. V tab. 5.2.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.2.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-250 – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

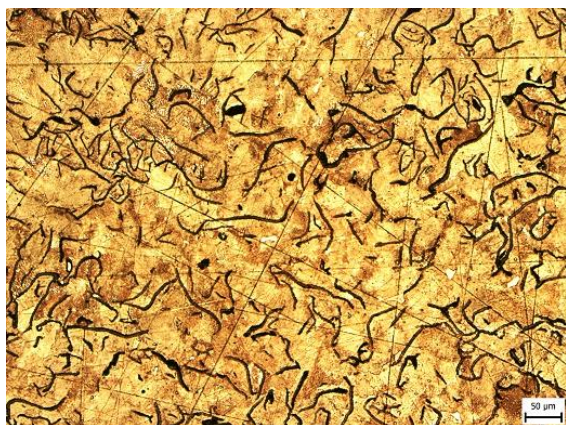
Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
15	203	187	16	217	199	18
16	205	197	8	215	213	2
24	207	202	5	221	218	3

Tab. 5.2.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-250 – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
15	242	<u>174</u>	68	235	<u>194</u>	41
16	235	<u>178</u>	57	225	<u>197</u>	28
24	<u>229</u>	<u>189</u>	40	<u>222</u>	<u>208</u>	14

Podtržené hodnoty byly změřeny po kalibraci Shoreho tvrdoměru.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 2 z odlitku s označením 15. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.2.2 a obr. 5.2.3.



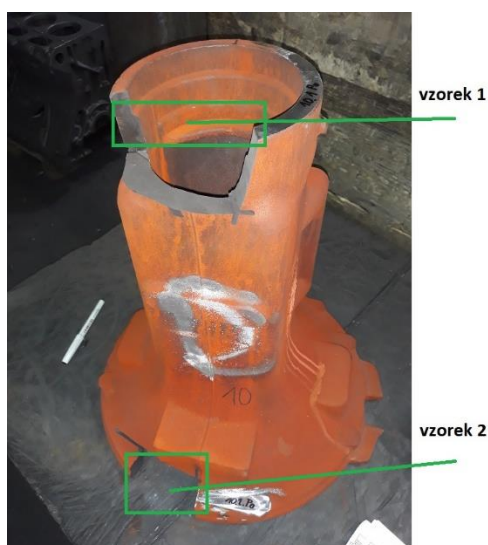
Obr. 5.2.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-250 v litém stavu.



Obr. 5.2.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-250 po tepelném cyklu.

5.3 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300

Pro měření vlivu přehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti bylo jako zástupný odlitek vybráno pouzdro nápravy s označením 2098 417 005 pro firmu ZF Steyr. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.3.1. Hmotnost odlitku je 38 kg. Litina se odlévá z teploty 1430 °C. Odlitky jsou ve formách po čtyřech.



Obr. 5.3.1 Odlitek 2098 417 005 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 15 mm a ve 2. místě 35 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.3.1. V tab. 5.3.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

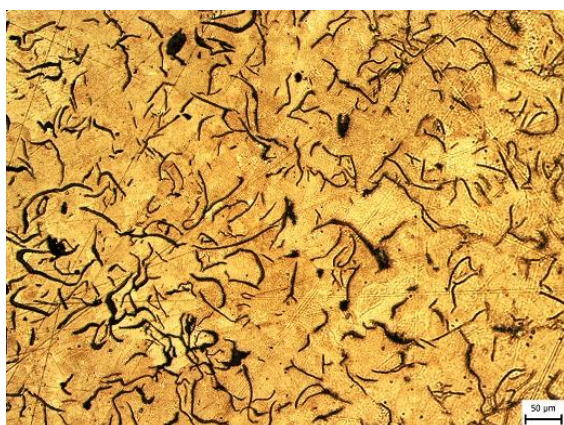
Tab. 5.3.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
9	231	211	20	220	213	7
10	239	217	22	214	209	5
11	214	216	-2	212	207	5

Tab. 5.3.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
9	240	230	10	226	224	2
10	238	221	17	236	221	15
11	230	223	7	220	203	17

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 1 z odlitku s označením 10. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.3.2 a obr. 5.3.3.



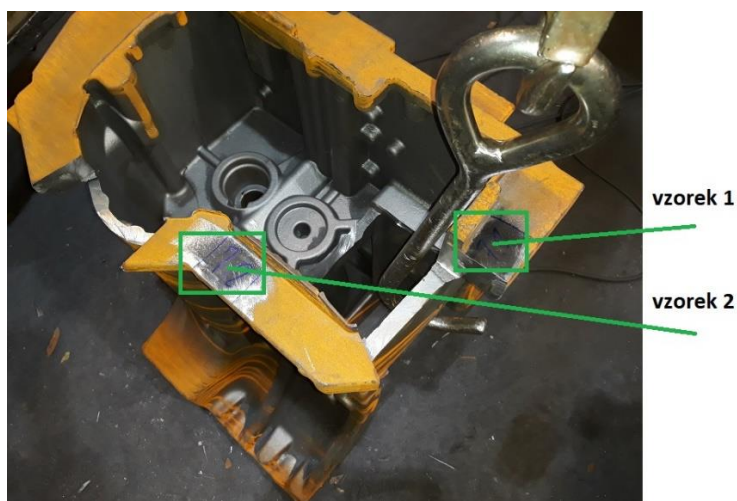
Obr. 5.3.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 v litém stavu.



Obr. 5.3.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 po tepelném cyklu.

5.4 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cu

Pro měření vlivu přehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti byl jako zástupný odlitek vybrán skříňový odlitek s označením 2093 419 025 pro firmu ZF Passau. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.4.1. Hmotnost odlitku je 209 kg. Litina se odlévá z vyšší teploty 1440 °C kvůli tenkým stěnám. Odlitek je ve formě jeden.



Obr. 5.4.1 Odlitek 2093 419 025 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 42 mm a ve 2. místě 27 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.4.1. V tab. 5.4.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.4.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cu – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
6	199	205	-6	214	210	4
7	211	207	4	216	212	4
8	203	204	-1	210	205	5

Tab. 5.4.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cu – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
6	244	205	39	245	203	42
7	240	211	29	264	207	57
8	219	214	5	240	200	40

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 2 z odlitku s označením 7. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.4.2 a obr. 5.4.3.



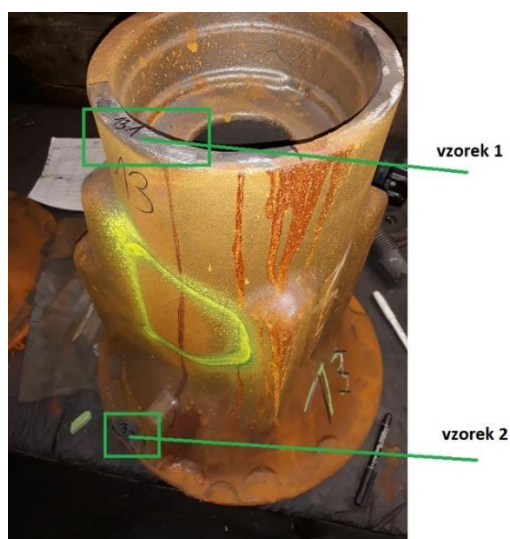
Obr. 5.4.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 Cu v litém stavu.



Obr. 5.4.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 Cu po tepelném cyklu.

5.5 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cr

U litiny GJL-300 Cr bylo pro měření vlivu přehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti vybráno jako zástupný odlitek pouzdro nápravy s označením L 218 181 pro firmu John Deere. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.5.1. Hmotnost odlitku je 74 kg. Litina se odlévá z vyšší teploty 1430 °C kvůli tenkým stěnám. Odlitky jsou ve formě tří.



Obr. 5.5.1 Odlitek L 218 181 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 17 mm a ve 2. místě 36 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.5.1. V tab. 5.5.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.5.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cr – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
12	212	211	1	211	206	5
13	216	202	14	205	209	-4
14	216	204	12	211	206	5

Tab. 5.5.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 Cr – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
12	236	235	1	246	215	31
13	225	211	14	219	202	17
14	226	208	18	220	197	23

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 1 z odlitku s označením 13. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.5.2 a obr. 5.5.3.



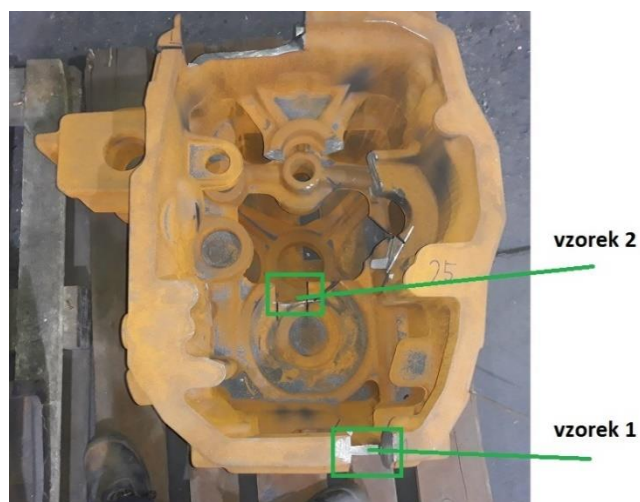
Obr. 5.5.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 Cr v litém stavu.



Obr. 5.5.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 Cr po tepelném cyklu.

5.6 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuCr

U litiny GJL-300 CuCr byla pro měření vlivu přehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti vybrána jako zástupný odlitek skříň převodovky s označením 2099 401 117 pro firmu ZF Steyr. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.6.1. Hmotnost odlitku je 183 kg. Litina se odlévá z vyšší teploty 1440 °C kvůli tenkým stěnám. Odlitek je ve formě jeden.



Obr. 5.6.1 Odlitek 2099 401 117 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 43 až 42 mm a ve 2. místě 12 mm. Místo odběru 2. vzorku je celé obklopeno jádrem. Odlitky s označením 1 a 2 prošly tepelným cyklem v peci společně na jednom roštu. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.6.1. V tab. 5.6.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.6.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuCr – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
1	221	209	12	199	201	-2
2	234	219	15	199	200	-1
25	225	217	8	207	197	10

Tab. 5.6.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuCr – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

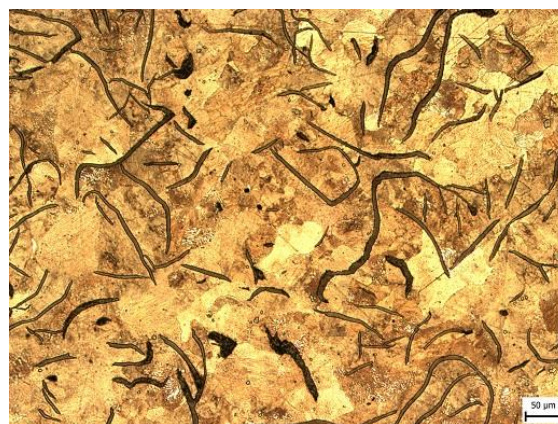
Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
1	213	<u>219</u>	-6	195	<u>199</u>	-4
2	219	<u>218</u>	1	175	<u>197</u>	-22
25	<u>251</u>	<u>215</u>	36	<u>202</u>	<u>208</u>	-6

Podtržené hodnoty byly změřeny po kalibraci Shoreho tvrdoměru.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 1 z odlitku s označením 2. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.6.2 a obr. 5.6.3.



Obr. 5.6.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 CuCr v litém stavu.



Obr. 5.6.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 CuCr po tepelném cyklu.

5.7 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuMo

U litiny GJL-300 CuMo bylo pro měření vlivu předehřevu zavařování za tepla na změnu tvrdosti vybráno jako zástupný odlitek pouzdro zadní nápravy traktoru s označením M 416 150 130 pro firmu Fendt. Odlitek je, včetně vyznačených míst odběru vzorků, na obr. 5.7.1. Hmotnost odlitku je 89 kg. Litina se odlévá z vyšší teploty 1430 °C kvůli tenkým stěnám. Odlitky jsou ve formě po dvojicích.



Obr. 5.7.1 Odlitek M 416 150 130 s vyznačením míst odběru vzorků.

Tloušťky stěny odlitků v místě odběru 1. vzorku byly 14 až 15 mm a ve 2. místě 36 mm. Aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Brinella před a po tepelném cyklu jsou v tab. 5.7.1. V tab. 5.7.2 jsou aritmetické průměry naměřených tvrdostí dle Shorea.

Tab. 5.7.1 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuMo – aritmetické průměry tvrdostí dle Brinella.

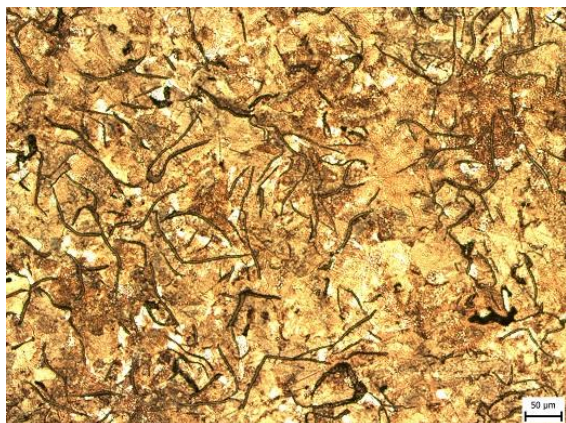
Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	HB před	HB po	Δ HB	HB před	HB po	Δ HB
21	239	233	6	221	224	-3
22	230	214	16	224	223	1
23	241	215	26	224	221	3

Tab. 5.7.2 Výsledky provozního měření u materiálu GJL-300 CuMo – aritmetické průměry tvrdostí dle Shorea.

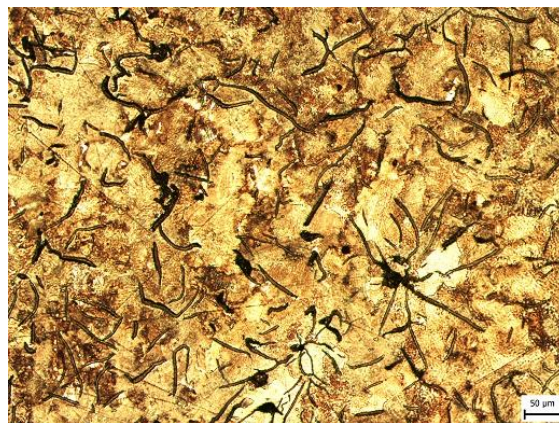
Označení odlitku	Vzorek 1			Vzorek 2		
	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]	Shore před [HB]	Shore po [HB]	Δ Shore [HB]
21	<u>249</u>	<u>234</u>	15	<u>248</u>	<u>228</u>	20
22	<u>253</u>	<u>221</u>	32	<u>235</u>	<u>209</u>	26
23	<u>253</u>	<u>211</u>	42	<u>253</u>	<u>224</u>	29

Podtržené hodnoty (všechny) byly změřeny po kalibraci Shoreho tvrdoměru.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky z místa číslo 1 z odlitku s označením 23. Metalografické výbrusy vzorků před a po tepelném cyklu (leptáno 2% Nital) jsou na obr. 5.7.2 a obr. 5.7.3.



Obr. 5.7.2 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 CuMo v litém stavu.



Obr. 5.7.3 Metalografický výbrus vzorku litiny GJL-300 CuMo po tepelném cyklu.

5.8 Zhodnocení výsledků provozního měření

V provozním měření byla hodnocena tvrdost a její pokles u celkem 21 odlitků. U každého odlitku byla vybrána dvě místa pro změření odběr vzorků a tvrdosti. V tab. 5.8.1 jsou vypočtené poklesy tvrdosti u všech vzorků.

Tab. 5.8.1 Shrnutí výsledků provozního měření.

Detaily		Vzorek 1			Vzorek 2		
Materiál	Označení odlitku	tl. Stěny [mm]	Pokles HB	Pokles Shore [HB]	tl. Stěny [mm]	Pokles HB	Pokles Shore [HB]
GJL-200	3	28	4	12	25	5	-4
	4	28	7	14	25	10	36
	5	28	4	9	25	12	9
GJL-250	15	31	16	68	26	18	41
	16	31	8	57	26	2	28
	24	32	5	40	26	3	14
GJL-300	9	15	20	10	35	7	2
	10	15	22	17	35	5	15
	11	15	-3	7	35	5	17
GJL-300 Cu	6	42	-6	39	27	4	42
	7	42	4	29	27	4	57
	8	42	-1	5	27	5	40
GJL-300 Cr	12	17	1	1	36	5	31
	13	17	14	14	36	-4	17
	14	17	12	18	36	5	23
GJL-300 CuCr	1	42	12	-6	12	-2	-4
	2	43	15	1	12	-1	-22
	25	42	8	36	12	10	-6
GJL-300 CuMo	21	15	6	15	36	-3	20
	22	14	16	32	36	1	26
	23	14	26	42	35	3	29

Zeleně zvýrazněné hodnoty byly vypočteny z hodnot, které byly naměřeny po kalibraci Shoreho tvrdoměru.

U Červeně zvýrazněných hodnot byl výpočet proveden z části z hodnot naměřených před kalibrací a zčásti z hodnot naměřených po kalibraci Shoreho tvrdoměru.

Litina GJL-200 neměla při provozním měření výrazný pokles tvrdosti HB. Tvrdosti dle Shorea vykazují výrazný rozptyl, takže z nich nelze vytvořit jednoznačný závěr.

U litiny GJL-250 se při provozním měření vyskytl výrazný pokles tvrdosti HB pouze u odlitku s označením 15. Na metalografických výbrusech ale nebyly patrné změny. Tvrdosti dle Shorea nelze kvůli kalibraci považovat za směrodatné.

U litiny GJL-300 je patrný výrazný pokles tvrdosti HB u tenké stěny vzorků číslo 1, zatímco u tlusté stěny u vzorků číslo 2 byl pokles tvrdosti HB minimální. U vzorku 1 odlitku s označením 11 byl ale naměřen nárůst tvrdosti o 2 HB. Tento nárůst lze vysvětlit tak, že u odlitku nedošlo k výrazné změně tvrdosti HB a nárůst je způsoben odchylkou měření.

U litiny GJL-300 Cu nedošlo ke změně tvrdosti a poklesy a nárůsty tvrdosti HB budou způsobeny odchylkou měření.

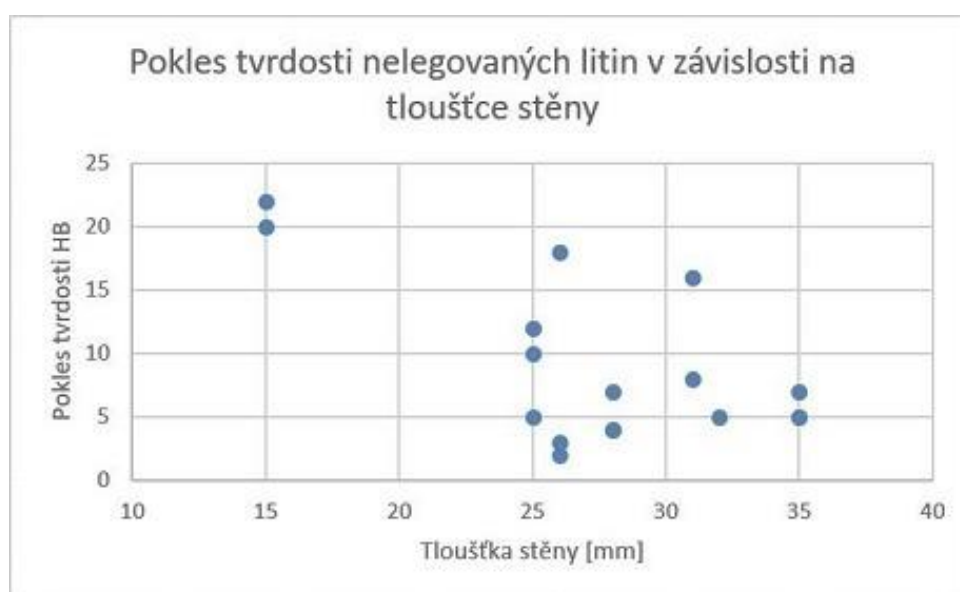
U litiny GJL-300 Cr došlo k mírnému poklesu tvrdosti HB u vzorků s tenkou stěnou. U vzorků s tlustou stěnou nedošlo ke změně tvrdosti a poklesy a nárůsty tvrdosti HB budou způsobeny odchylkou měření. Měření tvrdosti dle Shorea vykazuje velký rozptyl.

U litiny GJL-300 CuCr byl zvýšený pokles tvrdosti HB u vnější hrany odlitku (místo odběru vzorku 1), zatímco uvnitř odlitku (místo odběru vzorku 2) nedošlo k žádné změně. Z naměřené tvrdosti dle Shorea nelze stanovit jednoznačný závěr, protože část hodnot byla naměřena po kalibraci a hodnoty tak mají velký rozptyl.

U litiny GJL-300 CuMo byl zvýšený pokles tvrdosti HB u velmi tenké stěny dvou odlitků, zatímco u tlustých stěn nedošlo k žádné změně. Naměřené hodnoty dle Shorea značí ve všech případech výrazný pokles.

Na metalografických výbrusech všech vzorků provozního měření nebyly patrné výrazné změny struktury. Struktura byla zachována perlitická.

Na obr. 5.8.1 je graf závislosti poklesu tvrdosti dle Brinella na tloušťce stěny odlitku u všech vzorků nelegovaných litin dohromady (litiny GJL-200, GJL-250 a GJL-300). Legované litiny nebyly do grafu zahrnuty, protože legováním je stabilita struktury za zvýšených teplot ovlivněna.



Obr. 5.8.1 Pokles tvrdosti dle Brinella v závislosti na tloušťce stěny všech vzorků.

Přestože je tepelný režim předehřevu u odlitků náhodný a naměřené hodnoty mají velký rozptyl, tak je možné z provozního měření provedeného ve Slévárně Heunisch vyvodit několik závěrů:

1. Maximální naměřený pokles tvrdosti měřené v laboratoři dle Brinella byl 26 HB, ale ve většině případů byl pokles tvrdosti menší než 10 HB.
2. Tloušťka stěny má na pokles tvrdosti významný vliv. Největší poklesy HB byly u nejtenčích stěn a naopak nejmenší poklesy HB byly u stěn nejtlustších.
3. Vyloučíme-li vzorky s velmi malou tloušťkou stěny, tak nejstabilnější byly litiny legované mědí.
4. Hodnoty naměřené Shoreho tvrdoměrem mají velký rozptyl a tvrdoměr obvykle měří hodnoty vyšší, než jsou hodnoty změřené v laboratoři dle Brinella.
5. Po kalibraci mají hodnoty naměřené Shoreho tvrdoměrem většinou menší rozptyl a tvrdoměr měří hodnoty o 10 až 30 HB vyšší, než Brinellův tvrdoměr v laboratoři.
6. Na metalografických výbrusech nebyla pozorována změna struktury vlivem zvýšených teplot.

6 VÝSLEDKY LABORATORNÍHO MĚŘENÍ

Kompletní tabulky s naměřenými hodnotami tvrdosti laboratorního měření jsou v Příloze 9, 10, 11, 12 a 13.

Podíl perlitu byl stanoven dle etalonové řady v normě ČSN 42 0461 na metalografických výbrusech se zvětšením 100x.

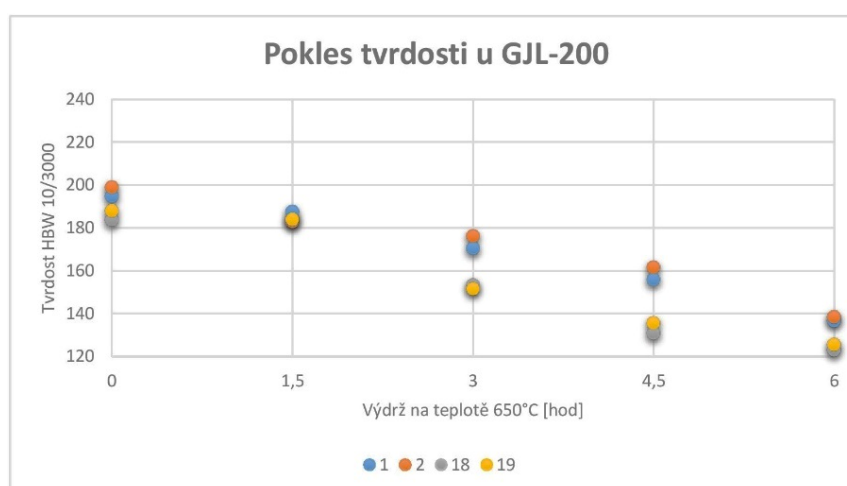
6.1 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-200

V tab. 6.1.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-200 na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.1.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-200 v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíln HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
1	195	188	170	156	137	58
2	199	183	176	162	138	61
18	184	184	153	131	123	61
19	188	184	152	136	126	62

Na obr. 6.1.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



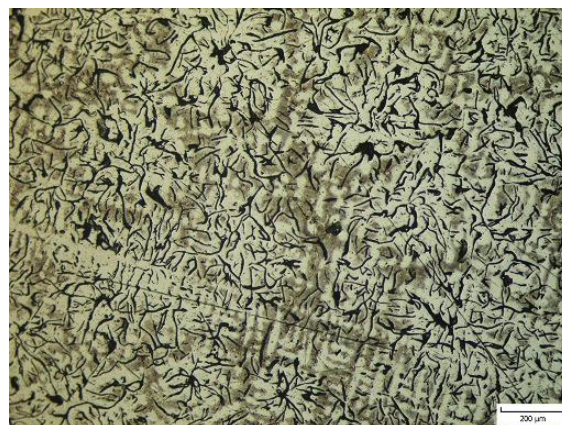
Obr. 6.1.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-200 po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 18. Na obr. 6.1.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.1.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.1.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-200 bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.1.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-200 po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 45 % Perlitu.

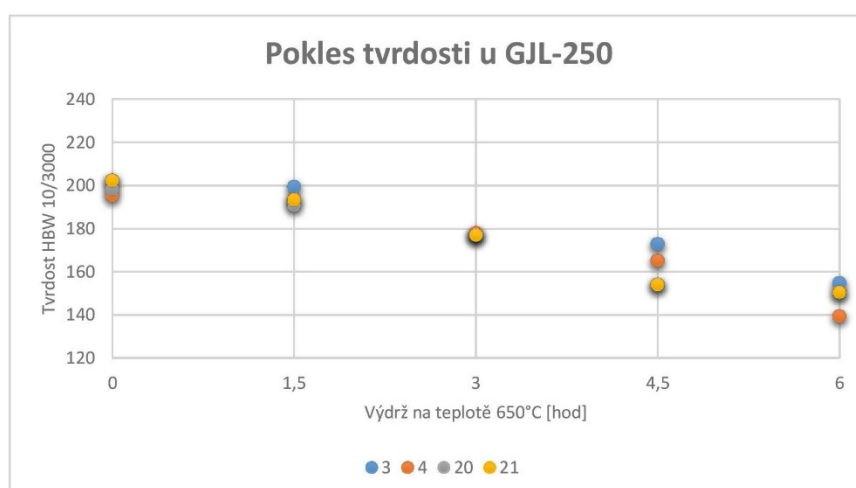
6.2 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-250

V tab. 6.2.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-250 na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.2.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-250 v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

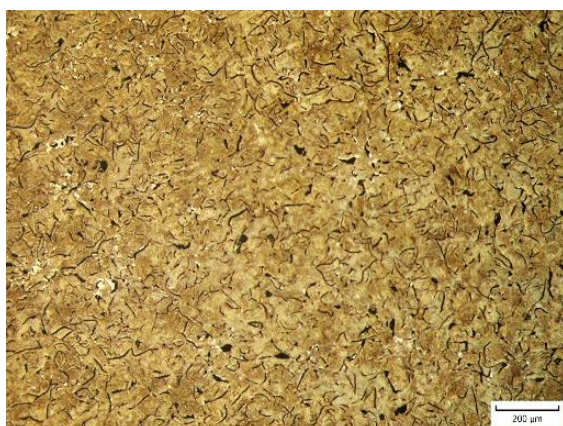
Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
		0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	
3	202	199	177	173	155	47
4	195	194	178	165	139	56
20	198	191	177	154	151	47
21	202	193	177	154	151	51

Na obr. 6.2.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



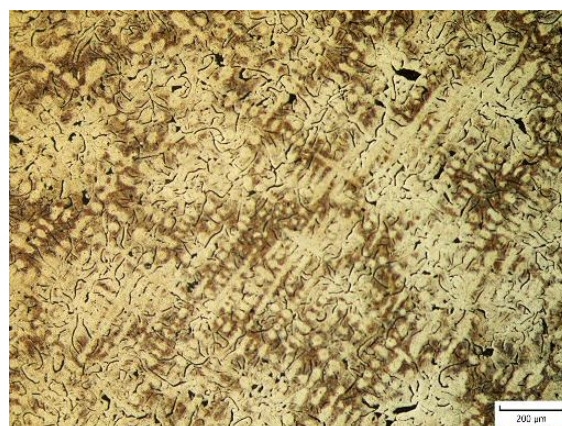
Obr. 6.2.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-250 po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 21. Na obr. 6.2.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.2.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.2.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-250 bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.2.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-250 po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 20 % Perlitu.

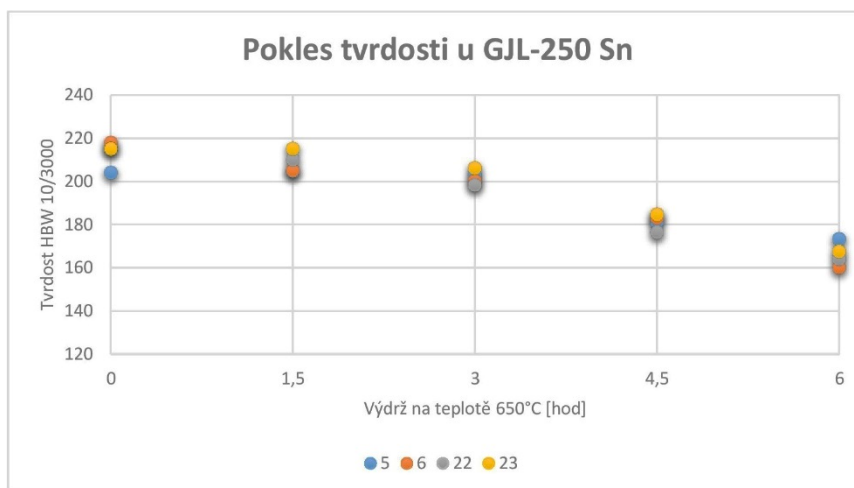
6.3 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-250 Sn

V tab. 6.3.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-250 Sn na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.3.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-250 Sn v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
5	204	205	203	181	173	31
6	218	205	200	183	160	58
22	215	210	198	177	164	51
23	215	215	206	185	168	47

Na obr. 6.3.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.3.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-250 Sn po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 6. Na obr. 6.3.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.3.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.3.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-250 Sn bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.3.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-250 Sn po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 45 % Perlitu.

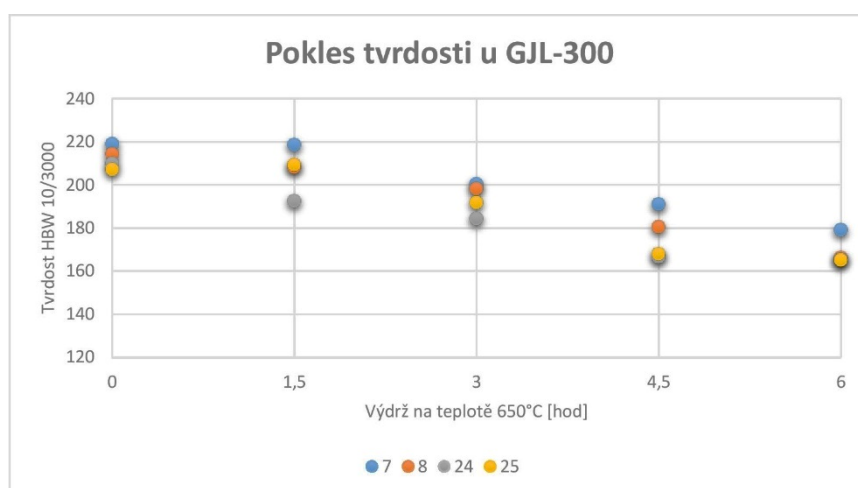
6.4 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300

V tab. 6.4.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.4.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

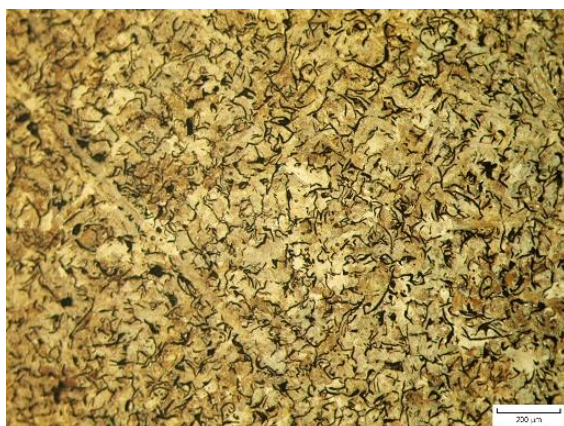
Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
7	219	219	200	191	179	40
8	214	208	198	180	166	48
24	210	193	184	167	165	45
25	207	209	192	168	165	42

Na obr. 6.4.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.4.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 8. Na obr. 6.4.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.4.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.4.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.4.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 45 % Perlitu.

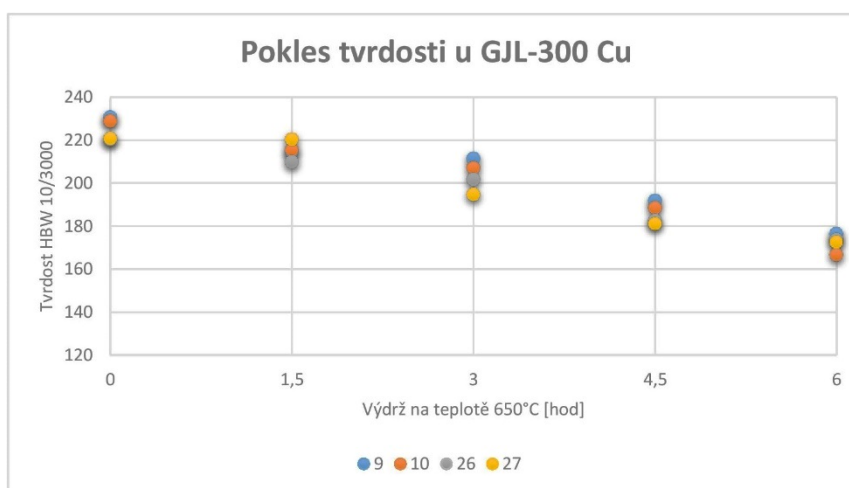
6.5 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Cu

V tab. 6.5.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 Cu na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.5.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 Cu v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
9	231	215	212	192	177	54
10	229	215	207	189	167	62
26	220	210	202	183	174	46
27	221	220	195	181	173	48

Na obr. 6.5.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.5.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 Cu po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 10. U litiny GJL-300 Cu se vyskytl největší pokles tvrdosti a to 62 HB, a proto byly vyhotoveny výbrusy pro všechny vzorky zkušební tyče 10 (u GJL-200 byl také pokles o 62 HB, ale detailněji budou rozebrány legované litiny). Na obr. 6.5.2 až obr. 6.5.6 jsou metalografické výbrusy všech vzorků. Na obr. 6.5.7 je vzorek po 6 hod v peci, ale se zvětšením 400x. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.5.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



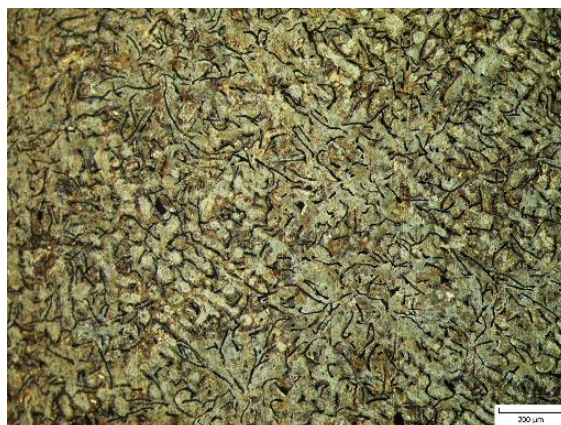
Obr. 6.5.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu po 1,5 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 96 % Perlitu.



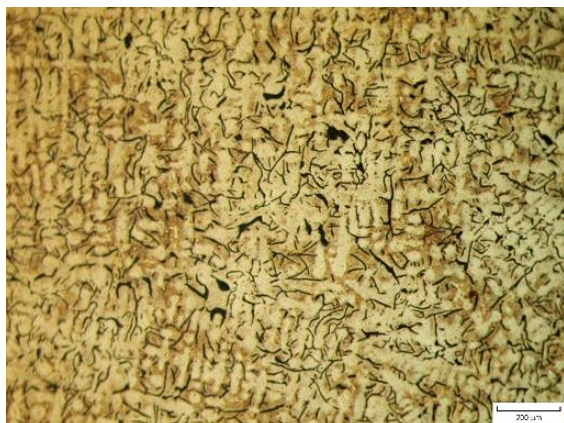
Obr. 6.4.4 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu po 3 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 92 % Perlitu.

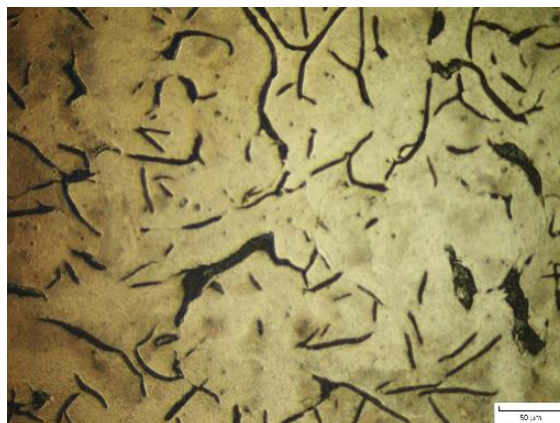


Obr. 6.5.5 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu po 4,5 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 85 % Perlitu.



Obr. 6.5.6 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.



Obr. 6.5.7 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cu po 6 hod v peci při teplotě 650 °C

Struktura: 45 % Perlitu.

Detailní zvětšení.

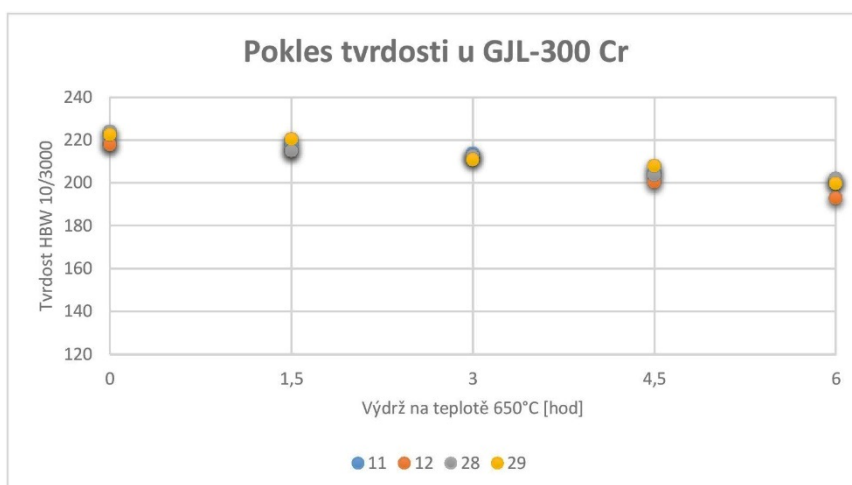
6.6 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Cr

V tab. 6.6.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 Cr na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.6.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 Cr v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
11	218	218	214	205	201	17
12	218	215	213	200	193	25
28	224	215	213	204	202	22
29	223	220	211	208	200	23

Na obr. 6.6.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.6.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 Cr po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 12. Na obr. 6.6.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.6.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.6.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cr bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.6.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Cr po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 20 % Perlitu.

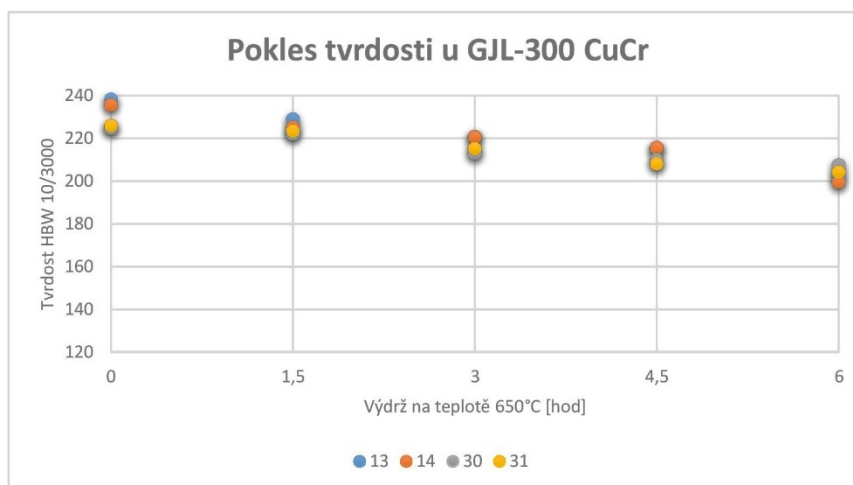
6.7 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 CuCr

V tab. 6.7.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 CuCr na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.7.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 CuCr v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
13	238	229	221	215	202	36
14	236	225	221	216	200	36
30	225	222	213	210	208	17
31	226	224	215	208	204	22

Na obr. 6.7.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.7.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 CuCr po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 13. Na obr. 6.7.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.7.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.7.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 CuCr bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.7.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 CuCr po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 92 % Perlitu.

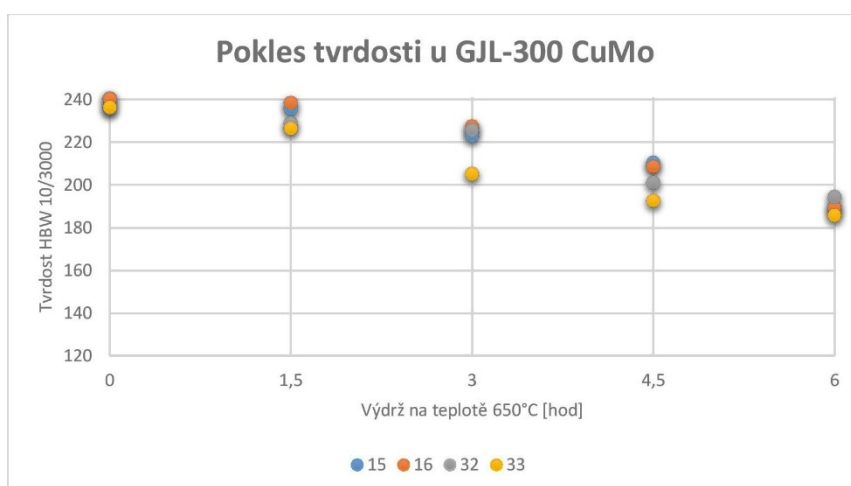
6.8 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 CuMo

V tab. 6.8.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 CuMo na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.8.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 CuMo v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

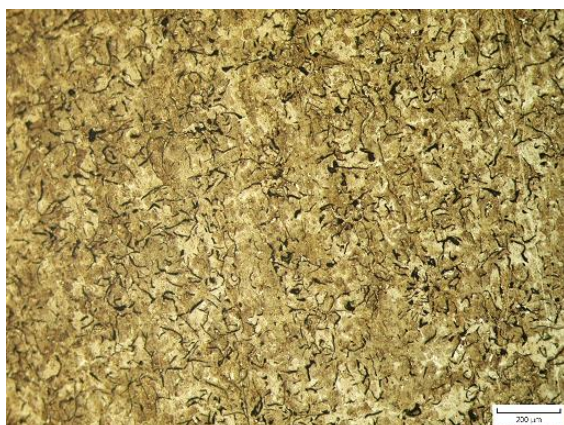
Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
15	240	236	223	210	189	51
16	240	239	228	209	189	51
32	236	229	226	201	194	42
33	236	226	205	193	186	50

Na obr. 6.8.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



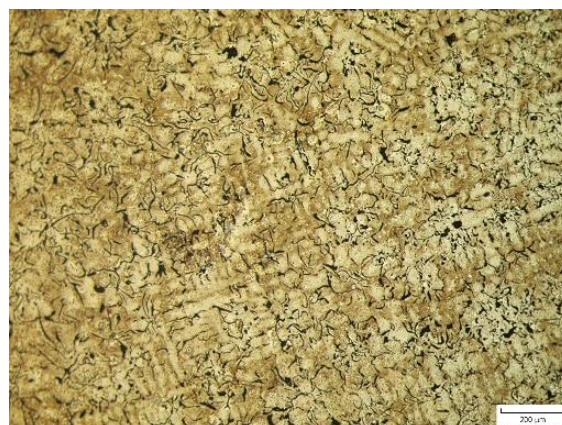
Obr. 6.8.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 CuMo po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 15. Na obr. 6.8.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.8.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.8.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 CuMo bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 92 % Perlitu.



Obr. 6.8.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 CuMo po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 70 % Perlitu.

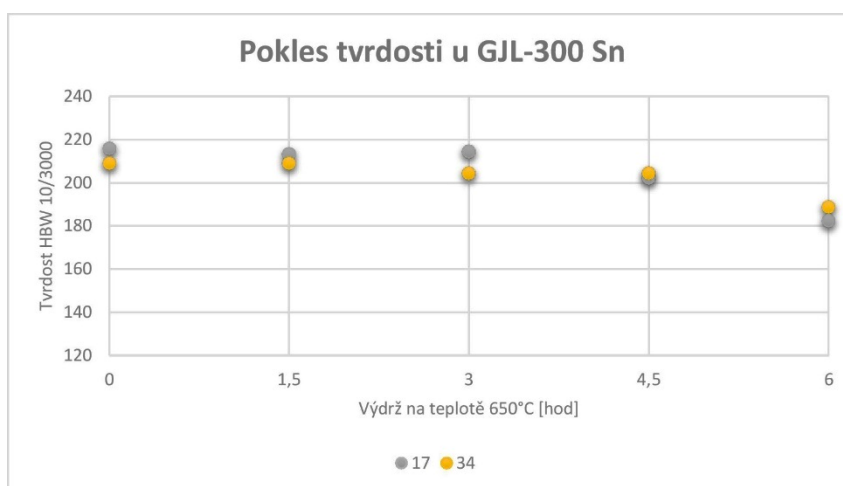
6.9 Výsledky laboratorního měření u materiálu GJL-300 Sn

V tab. 6.9.1 jsou aritmetické průměry výsledků měření poklesu tvrdosti vlivem zvýšených teplot u litiny GJL-300 Sn na Ústavu materiálového inženýrství FSI VUT v Brně.

Tab. 6.9.1 Aritmetické průměry naměřených hodnot tvrdosti u vzorků z GJL-300 Sn v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.

Označení zkušební tyče	Tvrdost dle Brinella HBW 10/3000 na vzorcích $\phi 30/30$ mm při výdrži na teplotě					Celkový pokles HB (rozdíl HB po 6 hod a HB v litém stavu)
	V litém stavu	Při teplotě 650 °C				
	0 hod	1,5 hod	3 hod	4,5 hod	6 hod	
17	216	213	214	202	182	34
34	209	209	204	204	189	20

Na obr. 6.9.1 je graf aritmetických průměrů naměřených hodnot tvrdosti v závislosti na době při výdrži na teplotě 650 °C.



Obr. 6.9.1 Graf poklesu tvrdosti vzorků z GJL-300 Sn po výdrži na teplotě 650 °C.

Pro metalografické výbrusy byly vybrány vzorky ze zkušební tyče s označením 17. Na obr. 6.9.2 je výbrus vzorku bez tepelného ovlivnění a na obr. 6.9.3 je výbrus vzorku, který byl šest hodin v peci při teplotě 650 °C. Pro leptání vzorků byl použit 3 % Nital.



Obr. 6.9.2 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Sn bez tepelného ovlivnění.

Struktura: 96 % Perlitu.



Obr. 6.9.3 Metalografický výbrus vzorku z GJL-300 Sn po 6 hod v peci při teplotě 650 °C.

Struktura: 92 % Perlitu.

6.10 Zhodnocení výsledků laboratorního měření

V laboratorním měření bylo k dispozici 34 zkušebních tyčí od 9 druhů legovaných i nelegovaných litin. Každá zkušební tyč byla nařezána na 5 vzorků. Vzorky byly zahřáty v žíhací peci na teplotu 650 °C a postupně byly vytahovány v 1,5 hodinových intervalech. Poté byla na vzorcích změřena tvrdost dle Brinella a u vybraných vzorků byly provedeny metalografické výbrusy. V tab. 9.10.1 jsou aritmetické průměry tvrdosti všech vzorků od každého materiálu, včetně podílu perlitické struktury.

Tab. 6.10.1 Výsledky laboratorního měření – celkové změny.

Materiál	V litém stavu		Po 6 hodinách v peci při 650 °C		Rozdíl arit. průměru HB – celkový pokles tvrdosti
	Arit. průměr HB	Podíl perlitu [%]	Arit. průměr HB	Podíl perlitu [%]	
GJL-200	192	96	131	45	61
GJL-250	199	96	149	20	50
GJL-250 Sn	213	96	166	45	47
GJL-300	213	96	169	45	44
GJL-300 Cu	225	96	173	45	52
GJL-300 Cr	221	96	199	20	22
GJL-300 CuCr	231	96	204	92	27
GJL-300 CuMo	238	92	190	70	48
GJL-300 Sn	213	96	186	92	27

Litina GJL-200 měla při laboratorním měření jeden z největších poklesů tvrdosti ze všech materiálů. Na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k rozpadu perlitu. Podíl perlitu se snížil z 96 na 45 %.

Litina GJL-250 měla při laboratorním měření výrazný pokles tvrdosti. Na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k rozpadu perlitu. Podíl perlitu se snížil z 96 na 45 %.

U litiny GJL-250 Sn došlo při laboratorním měření k poklesu tvrdosti ve většině případů, ale k výraznému poklesu došlo až po 1,5 hod v peci. Na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k rozpadu perlitu. Podíl perlitu se snížil z 96 na 45 %.

Litina GJL-300 měla při laboratorním měření menší pokles tvrdosti. Na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k rozpadu perlitu. Podíl perlitu se snížil z 96 na 70 %.

Litina GJL-300 Cu měla při laboratorním měření, společně s GJL-200, největší pokles tvrdosti o 62 HB u jednoho ze vzorků. Na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k rozpadu perlitu. Podíl perlitu se snížil z 96 na 45 %.

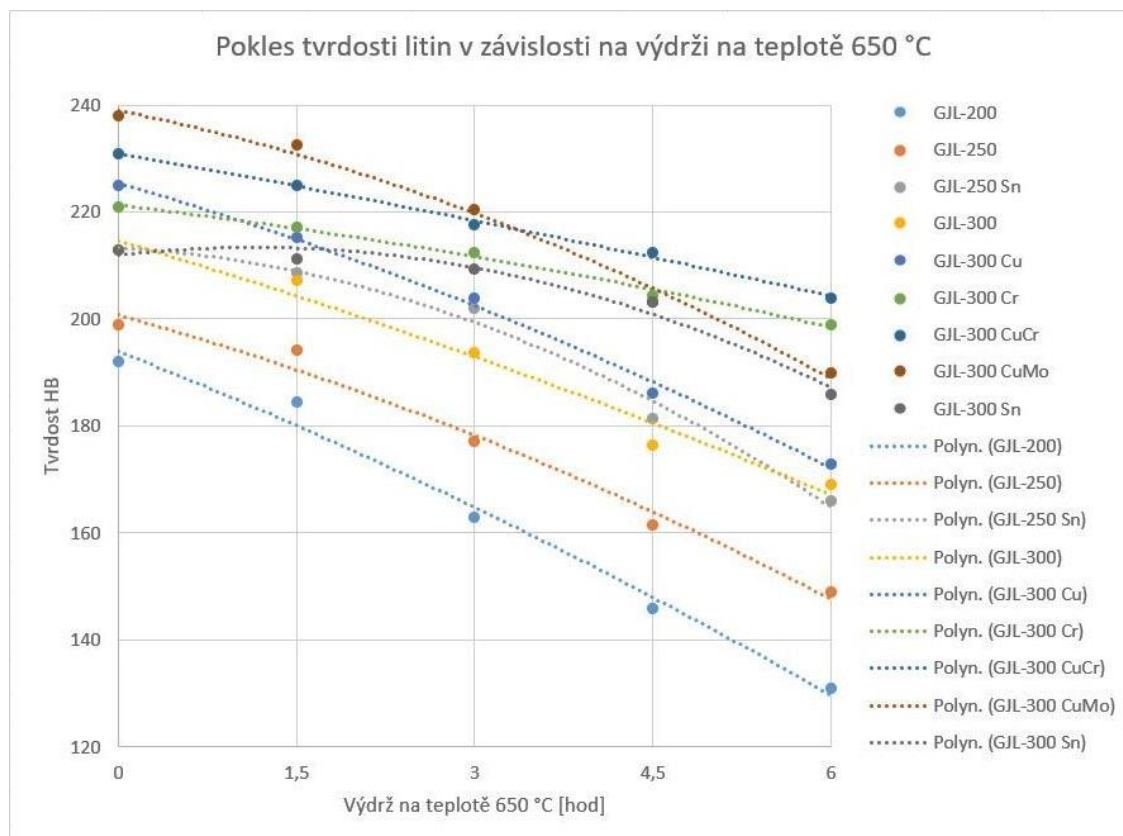
Litina GJL-300 Cr měla při laboratorním měření nejmenší pokles tvrdosti, ale na metalografickém výbrusu je patrné, že došlo k výraznému snížení perlitické struktury. Podíl perlitu se snížil z 96 na 20 %.

Litina GJL-300 CuCr měla při laboratorním měření druhý nejmenší pokles tvrdosti (po GJL-300 Cr), ale na metalografickém výbrusu je patrné, že nedošlo k výraznému snížení podílu perlitické struktury. Podíl perlitu se snížil z 96 na 92 %.

Litina GJL-300 CuMo měla ze všech litin největší průměrnou tvrdost a výrazný pokles tvrdosti, ale na metalografickém výbrusu je patrné, že nedošlo k výraznému snížení podílu perlitické struktury. Podíl perlitu se snížil z 92 na 70 %.

V archivu zkušebních tyčí Slévárny Heunisch byly k dispozici pouze dvě tyče legované litiny GJL-300 Sn, takže nebylo možné provést dostatečné měření jako u ostatních litin. Z laboratorního měření je zřejmé, že litina GJL-300 Sn má vysokou stabilitu struktury, protože k výraznějšímu poklesu tvrdosti došlo až po 4,5 hod v peci. Na metalografickém výbrusu je patrné, že nedošlo k výraznému snížení podílu perlitické struktury. Podíl perlitu se snížil z 96 na 92 %.

Ze všech naměřených hodnot HB byly pro každou litinu vypočteny aritmetické průměry. Na obr. 6.10.1 je graf zobrazující výsledky laboratorního pokusu. Hodnoty jsou proloženy polynomem 2. stupně.



Obr. 6.10.1 Graf závislosti poklesu HB na výdrži na teplotě 650 °C.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla vypsána Slévárnou Heunisch Brno, která se specializuje na skříňové odlitky z litiny s lupínkovým grafitem. Součástí každé výroby je vznik různých vad, které se ale v případě odlitků z litin dají v určitých případech opravit zavařením. Pro snížení pnutí, které může vlivem tepelného ovlivnění odlitku zavařováním vznikat, lze odlitky zavařovat po předehřevu na předem stanovenou teplotu. Ve Slévárně Heunisch se odlitky za tepla zavařují po předehřevu na teplotu 650 °C. Při takto zvýšené teplotě se ale začíná rozpadat perlit, což vede k poklesu tvrdosti v celém odlitku. Tento pokles tvrdosti je těžko predikovatelný, protože na něj mají vliv parametry jako chemické složení litiny, tloušťka stěny odlitku, teplota předehřevu a výdrž na této teplotě.

Pro objasnění poklesu tvrdosti bylo provedeno provozní měření, které se skládalo z měření tvrdosti před a po průchodu odlitků tepelným cyklem zavařování za tepla. Jednotlivé odlitky byly rozděleny podle tříd litin a způsobu legování. Z provozního měření bylo zjištěno:

- Tloušťka stěny má na pokles tvrdosti významný vliv. Největší poklesy HB byly u nejtěsnějších stěn a naopak nejmenší poklesy HB byly u stěn nejtlustších.
- Maximální naměřený pokles tvrdosti byl 26 HB (u tenké stěny litiny GJL-CuMo), ale ve většině případů byl pokles tvrdosti menší než 10 HB.
- Vyloučíme-li vzorky s velmi malou tloušťkou stěny, tak nejstabilnější byly litiny legované mědí a chromem.
- Na metalografických výbrusech nebyla pozorována změna struktury vlivem zvýšených teplot. Struktura zůstala ve všech případech perlitická.

Po bližším zkoumání tepelného režimu jednotlivých odlitků bylo zjištěno, že tepelný režim je u každého odlitku jiný, takže nelze z provozního měření vyvodit jednoznačné závěry. Proto bylo provedeno druhé měření, tentokrát v laboratorních podmínkách.

Laboratorní měření proběhlo na FSI VUT v Brně a skládalo se z tepelného namáhání vybraných vzorků zastupujících materiály odlévané ve Slévárně Heunisch. Vzorky byly umístěny do žíhací pece předehřáté na 650 °C a poté byly z pece v intervalu 1,5 hod vyjímány, přičemž maximálně byly vzorky v peci po dobu 6 hod. Poté byla na vzorcích změřena tvrdost a u zástupných vzorků byl proveden metalografický výbrus. Z laboratorního měření lze vyvodit:

- Průměrně byly největší poklesy tvrdosti u nelegovaných litin, zatímco litiny legované především chromem mají stabilní strukturu za zvýšených teplot.
- Z metalografických výbrusů vyplývá, že u většiny litin došlo k rozpadu perlitické struktury a struktura tak byla po 6 hod tepelného namáhání perliticko-feritická nebo dokonce feriticko-perlitická. Struktura byla stabilizována u litin GJL-300 legovaných cínem nebo mědí v kombinaci s chromem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. *SLÉVÁRNA HEUNISCH BRNO, S.R.O.: NAŠE HISTORIE? ... STRUČNÁ A JASNÁ!* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://www.heunisch-guss.com/cz/podnik/historie.html>
2. *SLÉVÁRNA HEUNISCH BRNO, S.R.O.: STROJNĚ FORMOVANÉ ODLITKY Z MATERIÁLU GJL* [online]. [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://www.heunisch-guss.com/cz/podnik/provozovny/brno.html>
3. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
4. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
5. WALTON, CH.F. *Gray and ductil iron castings handbook*. Cleveland, USA: Gray and ductile iron founders' society, 1971. Library of Congress catalog number 70-165866.
6. ALAGARSAMY, Al. *Ductile iron handbook*. Des Plaines, Ill.: American Foundrymen's Society, c1992. ISBN 08-743-3124-2.
7. Otáhal, V.: *Šedá litina-Monografie*, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2007.
8. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUTIUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
9. ELLIOTT, Roy. *Cast iron technology*. Boston: Butterworths, 1988. ISBN 04-080-1512-8.
10. Základy tepelného zpracování kovů. *Mgr. Jan Hamerník: technická výchova* [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
11. VETIŠKA, Aleš. *Teoretické základy slévárenské technologie: učebnice pro strojní fakulty*. 2., upr. vyd. Praha: SNTL, 1974. Řada strojírenské literatury.
12. *ASM handbook*. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-1-62708-011-8.
13. *Ductile Iron Data for Design Engineers*. QIT-Fer et Titane, 1990.
14. *Vady odlitků ze slitin železa: (klasifikace, příčiny a prevence)*. Brno: MATECS, 1992. Slévárenský bulletin.

15. Otáhal, V.: *Vady odlitků – Atlas vad*, CDRom OtahalConsult, Brno (2008).
16. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7185-3.
17. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
18. CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-720-4456-7.
19. FILIPEK, Szymon. *Predikce mechanických vlastností litinových odlitků pomocí numerické simulace.* Brno, 2017. 46s, 3 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor Slévárenství. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.
20. Zkouška tvrdosti dle Brinella. *ConVERTER: Převody jednotek, fyzikální tabulky, životopisy fyziků a Nobelova cena* [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>
21. Přenosné tvrdoměry Shore: Tvrdost podle Shore. *Měření tvrdosti: Tvrdoměry Rockwell, Brinell, Vickers, SHORE, přenosné, stolní*[online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <http://www.merenitvrdosti.cz/4.-prenosne-tvrdomery-shore.html>
22. Shore durometer. *Wikipedia* [online]. 31 March 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shore_durometer

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ARA	[-]	Anizotermický rozpad austenitu
ČSN	[-]	Česká státní norma
EN	[-]	Evropská norma
FSI	[-]	Fakulta strojního inženýrství
GJL	[-]	Litina s lupínkovým grafitem
IRA	[-]	Izotermický rozpad austenitu
ISO	[-]	Mezinárodní organizace pro normalizaci
REM	[-]	Rastrovací elektronový mikroskop
TOO	[-]	Tepelně ovlivněná oblast
VUT	[-]	Vysoké učení technické

Symbol	Jednotka	Popis
A	[-]	Austenit
A_{1,1}	[-]	Dolní kritická teplota překrystalizace austenitu
A_{1,2}	[-]	Horní kritická teplota překrystalizace austenitu
A_z	[-]	Zbytkový austenit
B	[-]	Bainit
B_f	[-]	Bainit finiš, konec bainitické přeměny
B_s	[-]	Bainit start, počátek bainitické přeměny
CO₂	[-]	Oxid uhličitý
F	[-]	Ferit
FeMn	[-]	Feromangan
FeSi	[-]	Ferosilicium
Fe₃C	[-]	Karbid železa, cementit
G	[-]	Grafit
HB	[-]	Tvrдость dle Brinella
HB_{max}	[-]	Maximální tvrдость dle Brinella
HB_{po}	[-]	Tvrдость po tepelném cyklu

HB_{před}	[-]	Tvrdoost před tepelným cyklem, tvrdoost v litém stavu
M	[-]	Martenzit
M_f	[-]	Martenzit finiš, konec martenzitické přeměny
MnS	[-]	Sulfid manganatý
M_s	[-]	Martenzit start, konec martenzitické přeměny
P	[-]	Perlit
P_f	[-]	Perlit finiš, konec perlitické přeměny
P_s	[-]	Perlit start, začátek perlitické přeměny
Rm	[MPa]	Pevnost v tahu
b_f	[w·s ^{0,5} ·m ⁻² ·°C ⁻¹]	Koeficient tepelné akumulace formy
cem_p	[-]	Perlitický cementit
α	[-]	Železo v modifikaci α, ferit
β	[-]	Železo v modifikaci β
γ	[-]	Železo v modifikaci γ, austenit
δ	[-]	Železo v modifikaci δ

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Vady odlitků – část 1.
Příloha 2	Vady odlitků – část 2.
Příloha 3	Vady odlitků – část 3.
Příloha 4	Chemické složení vzorků laboratorního měření
Příloha 5	Naměřené tvrdosti provozního měření – 1. část
Příloha 6	Naměřené tvrdosti provozního měření – 2. část
Příloha 7	Aritmetické průměry tvrdosti provozního měření a jejich rozdíly před a po tepelném cyklu – 1. část
Příloha 8	Aritmetické průměry tvrdosti provozního měření a jejich rozdíly před a po tepelném cyklu – 2. část
Příloha 9	Naměřené hodnoty tvrdosti laboratorního měření – 1. část
Příloha 10	Naměřené hodnoty tvrdosti laboratorního měření – 2. část
Příloha 11	Naměřené hodnoty tvrdosti laboratorního měření – 3. část
Příloha 12	Naměřené hodnoty tvrdosti laboratorního měření – 4. část
Příloha 13	Naměřené hodnoty tvrdosti laboratorního měření – 5. část

PŘÍLOHA 1: VADY ODLITKŮ – ČÁST 1. [14]

Seznam vad odlitků tříd 100 a 200					
Třída vad		Skupina vad		Druh vad	
Poř. čís.	Náz.	Poř. čís.	Název	Poř. čís.	Název
100	Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti	110	Chybějící část odlitku bez lomu	111	Nezaběhnutí
				112	Nedolití
				113	Vytečený kov
				114	Špatná oprava formy
				115	Přetryskaný odlitek
				116	Omačkání, potlučení, pohmoždění
				117	Nesprávně upálený, odřezaný a obroušený odlitek
		120	Chybějící část odlitku s lomem	121	Ulomená část odlitku za tepla
				122	Ulomená část odlitku za studena
				123	Vyětřpenutí
		130	Nedodržení rozměrů, nesprávný tvar	131	Špatný model
				132	Přesazení
				133	Nevyhovující rozměry
				134	Zborcení, deformace
		140	Nedodržení hmotnosti odlitků		
200	Vady povrchu	210	Přípečeniny	211	Drsný povrch
				212	Povrchové přípečeniny
				213	Hluboké přípečeniny, zapečeniny
		220	Zálupy	221	Zálup na horní ploše formy
				222	Zálup na dně formy
				223	Zálupové síťoví
		230	Nárosty	231	Vyboulení
				232	Odřetí, shrnutí
				233	Utržení, sesutí
				234	Eroze
240	Výronky				
250	Výpotky				
270	Zatekliny	261	Zatekliny způsobené netěsností formy	262	Prasklé jádro
				263	Prasklá forma
				271	Pomerančová kůra
		272	Zvrásnění povrchu		
		273	Neštovice místní a čárové		
274	Okujení, opálení				
275	Krupičky				
276	Dolíčková a kanálková korose				
277	Chemická korose				
280	Vady povrchové ochrany odlitku				

PŘÍLOHA 2: VADY ODLITKŮ – ČÁST 2. [14]

Seznam vad odlitků tříd 300 , 400 a 500					
Třída vad		Skupina vad		Druh vady	
Poř. čís.	Náz.	Poř. čís.	Název	Poř. čís.	Název
300	Porušení souvislosti	310	Trhliny	311 312 313	Povrchové trhliny Podpovrchové trhliny Vnitřní trhliny
		320	Preskliny		
		330	Porušení souvislosti z důvodu mechanického poškození odlitku	331 332	Lom za tepla Lom za studena
		340	Porušení souvislosti z důvodu nespojení kovu	341 342	Zaváření Nedokonalý svar
		410	Bubliny	411 412 413 414 415	Bubliny způsobené kyslíkem Bubliny způsobené vodíkem Bubliny způsobené dusíkem Zahlcený plyn Sítkovité bubliny
400	Dutiny	420	Bodliny		
		430	Odvařeniny	431 432 433	Odvařeniny od formy, jádra Odvařeniny od chladítek a zalévacích předmětů Odvařeniny od vměstků
		440	Staženiny	441 442 443 444 445 446	Otevřené staženiny Vnitřní, uzavřené staženiny Řediny Staženiny od jader nebo ostrých hren formy Povrchové propadliny Plynové staženiny
		510	Struskovitost	511 512	Struskovitost exogenní Sekundární struskovitost
		520	Nežárové vměsky	521 522 523 524 525 526	Zadrobeniny Rozplavený písek Odpadnutý nátěr Oxidické pleny Grafitové pleny Černé skvrny
500	Makroskopické vměsky a vady makrostruktury	530	Makrosegregace a vycezeniny	531 532 533 534	Gravitační odmíšení Makroodmíšení Stvolové vycezeniny Mezerové vycezeniny
		540	Broky		
		550	Kovové vměsky		
		560	Nevyhovující lom		

PŘÍLOHA 3: VADY ODLITKŮ – ČÁST 3. [14]

Seznam vad odlitků tříd 600 a 700					
Třída vad		Skupina vad		Druh vady	
Poř. čís.	Název	Poř. čís.	Název	Poř. čís.	Název
600	Vady mikrostruktury	610	Mikroskopické dutiny	611 612 613	Mikrostaženiny Mikrobubliny Mikrotrhliny
		620	Vněstky		
		630	Nesprávná velikost zrna		
		640	Nesprávný obsah strukturních složek		
		650	Zatvrdlina, zškalka		
		660	Obrácená zškalka		
		670	Oduhličení povrchu		
		680	Jiné odchylky od mikrostruktury		
700	Vady chemického složení a vlastností odlitků	710	Nesprávné chemické složení		
		720	Odchylky hodnot mechanických vlastností		
		730	Odchylky hodnot fyzikálních vlastností		
		740	Nevyhovující homogenita odlitku		

PŘÍLOHA 4: CHEMICKÉ SLOŽENÍ VZORKŮ LABORATORNÍHO MĚŘENÍ

1. série vzorků											
Označení vzorku	Materiál	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Al	%Sn	CE
1	GJL-200	3,45	2,19	0,69	0,059	0,060	0,07	0,08	0,008		4,20
2	GJL-200	3,46	2,00	0,62	0,069	0,085	0,07	0,11	0,004		4,15
3	GJL-250	3,41	1,91	0,65	0,053	0,079	0,08	0,11	0,004		4,06
4	GJL-250	3,38	1,93	0,67	0,052	0,072	0,07	0,11	0,006		4,04
5	GJL-250 Sn	3,40	1,81	0,62	0,047	0,072	0,07	0,09	0,006	0,09	4,02
6	GJL-250 Sn	3,44	1,92	0,72	0,069	0,068	0,07	0,12	0,003	0,10	4,10
7	GJL-300	3,30	1,91	0,86	0,076	0,081	0,18	0,28	0,007		3,96
8	GJL-300	3,37	1,71	0,62	0,083	0,083	0,11	0,10	0,006		3,97
9	GJL-300 Cu	3,27	1,72	0,82	0,097	0,080	0,13	0,33	0,004		3,88
10	GJL-300 Cu	3,27	1,86	0,79	0,066	0,075	0,06	0,33	0,004		3,91
11	GJL-300 Cr	3,33	1,82	0,90	0,057	0,061	0,35	0,90	0,002		3,96
12	GJL-300 Cr	3,30	1,75	0,78	0,060	0,063	0,30	0,10	0,007		3,90
13	GJL-300 Cu Cr	3,30	1,70	0,84	0,072	0,087	0,31	0,47	0,005		3,89
14	GJL-300 Cu Cr	3,27	1,78	0,79	0,063	0,066	0,30	0,50	0,003		3,88
15	GJL-300 Cu Mo	3,33	1,74	0,74	0,061	0,067	0,09	0,60	0,003	0,35	3,93
16	GJL-300 Cu Mo	3,28	1,85	0,81	0,077	0,062	0,09	0,60	0,007	0,30	3,92
17	GJL-300 Sn	3,34	1,82	0,83	0,075	0,091	0,08	0,12	0,004	0,10	3,97
2. série vzorků											
Označení vzorku	Materiál	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Cu	%Al	%Sn	CE
18	GJL-200	3,41	2,14	0,64	0,091	0,066	0,09	0,09	0,004		4,15
19	GJL-200	3,48	2,04	0,59	0,064	0,075	0,08	0,10	0,006		4,18
20	GJL-250	3,39	1,88	0,73	0,071	0,071	0,08	0,09	0,004		4,04
21	GJL-250	3,39	1,85	0,64	0,058	0,085	0,08	0,08	0,004		4,03
22	GJL-250 Sn	3,37	1,81	0,65	0,084	0,080	0,08	0,08	0,005	0,09	4,00
23	GJL-250 Sn	3,38	1,92	0,75	0,078	0,061	0,07	0,08	0,005	0,08	4,05
24	GJL-300	3,28	1,58	0,73	0,079	0,073	0,07	0,11	0,002		3,83
25	GJL-300	3,31	1,69	0,74	0,059	0,092	0,07	0,07	0,003		3,89
26	GJL-300 Cu	3,27	1,65	0,80	0,070	0,061	0,07	0,31	0,002		3,84
27	GJL-300 Cu	3,27	1,75	0,76	0,053	0,075	0,09	0,33	0,003		3,87
28	GJL-300 Cr	3,28	1,61	0,77	0,076	0,076	0,30	0,09	0,004		3,84
29	GJL-300 Cr	3,26	1,74	0,79	0,074	0,067	0,29	0,11	0,005		3,86
30	GJL-300 Cu Cr	3,26	1,73	0,76	0,090	0,068	0,35	0,52	0,004		3,87
31	GJL-300 Cu Cr	3,28	1,68	0,77	0,063	0,071	0,30	0,51	0,003		3,86
32	GJL-300 Cu Mo	3,29	1,72	0,76	0,058	0,060	0,08	0,60	0,004	0,35	3,88
33	GJL-300 Cu Mo	3,33	1,70	0,80	0,072	0,067	0,09	0,66	0,006	0,32	3,92
34	GJL-300 Sn	3,31	1,70	0,76	0,049	0,066	0,08	0,11	0,003	0,09	3,89

PŘÍLOHA 5: NAMĚŘENÉ TVRDOSTI PROVOZNÍHO MĚŘENÍ – 1. ČÁST

Detaily				Vzorek číslo 1					Vzorek číslo 2				
Označení	Materiál	Odlitek číslo/ číslo formy	datum lití	tl. Stěny [mm]	HB před	HB po	Odras před [HBW]	Odras po [HBW]	tl. Stěny [mm]	HB před	HB po	Odras před [HBW]	Odras po [HBW]
3	GJL 200	L217 558/ 65	09.10.2018	28	200	197	225	210	25	197	191	203	207
					203	199	222	211		197	193	201	206
					203	199	218	210		196	191	199	203
4	GJL 200	L217 558/ 30	09.10.2018	28	203	195	215	209	25	197	188	219	182
					204	198	220	202		197	186	216	183
					204	198	222	204		197	186	218	181
5	GJL 200	L217 558/ 60	09.10.2018	28	198	196	216	210	25	194	181	210	197
					203	196	224	210		194	182	203	194
					203	198	221	213		188	176	203	196
15	GJL 250	17 459 665	22.11.2018	31	200	187	242	174	26	215	199	228	192
					204	187	242	176		219	197	243	195
					204	188	242	171		218	202	233	195
16	GJL 250	17 459 665	22.11.2018	31	203	195	244	178	26	212	212	226	198
					204	196	230	181		219	214	223	199
					208	199	232	176		213	212	226	195
24	GJL 250	17 459 665	11.02.2019	32	207	201	227	195	26	221	224	219	201
					207	202	231	182		222	217	199	213
					207	203	231	190		219	212	228	210
9	GJL 300	2098417005/ 06	12.10.2018	15	230	213	244	232	35	219	213	226	222
					232	208	240	230		221	213	221	227
					230	213	235	228		219	214	231	223
10	GJL 300	2098417005/ 43	12.10.2018	15	244	217	240	222	35	213	203	235	225
					235	215	235	217		214	212	240	223
					237	219	238	225		213	213	234	216
11	GJL 300	2098417005/ 76	12.10.2018	15	211	213	229	223	35	211	205	224	201
					215	216	234	225		213	207	221	201
					214	218	228	222		213	208	215	207
Shoreův skleroskop po kalibraci													

PŘÍLOHA 6: NAMĚŘENÉ TVRDOSTI PROVOZNÍHO MĚŘENÍ – 2. ČÁST

Detaily				Vzorek číslo 1					Vzorek číslo 2				
Označení	Materiál	Odlitek číslo/ číslo formy	datum lití	tl. Stěny [mm]	HB před	HB po	Odraz před [HBW]	Odraz po [HBW]	tl. Stěny [mm]	HB před	HB po	Odraz před [HBW]	Odraz po [HBW]
6	GJL 300 Cu	2093419025/ 25	17.10.2018	42	197 198 201	202 207 205	241 250 242	202 203 209	27	216 211 216	210 212 209	238 249 247	201 202 207
7		2093419025/ 21	17.10.2018	42	211 213 211	205 209 207	243 241 236	212 211 211	27	216 216 215	212 213 212	264 257 270	197 207 218
8		2093419025/ 35	09.04.2018	42	200 203 207	204 207 202	222 225 211	221 211 211	27	209 211 211	211 198 206	238 235 247	202 196 202
12	GJL 300 Cr	L218 181	03.10.2018	17	212 212 213	210 212 212	233 239 237	233 234 237	36	212 211 211	209 204 203	243 247 247	211 211 222
13		L218 181	03.10.2018	17	220 223 215	201 201 204	227 225 223	210 215 208	36	205 205 205	213 203 211	215 219 222	201 204 202
14		L218 181	03.10.2018	17	214 217 218	205 199 207	223 225 231	204 204 215	36	212 211 211	203 205 209	220 211 228	199 199 194
1	GJL 300 CuCr	2099401117/ 41	24.09.2018	42	218 226 220	207 210 211	215 213 212	218 220 218	12 mezi jádry	195 200 201	203 201 200	190 202 193	195 201 202
2		2099401117/ 43	24.09.2018	43	232 234 236	215 218 217	217 215 224	219 218 218	12 mezi jádry	198 200 198	199 200 200	180 170 174	196 198 198
25		2099401117/ 34	16.10.2018	42	224 225 226	215 219 218	247 252 255	212 216 216	12 mezi jádry	210 207 205	199 198 195	197 203 206	206 211 208
21	GJL 300 CuMo	M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	15	240 235 240	232 234 232	251 247 249	236 228 239	356 - Š 67 - V	223 218 221	224 226 223	241 259 247	222 235 227
22		M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	14	231 225 235	212 215 215	254 262 244	222 217 225	36 - Š 67 - V	225 223 224	221 224 223	223 247 235	207 210 210
23		M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	14	241 241 240	221 216 207	251 254 254	212 204 216	35 - Š 67 - V	222 228 222	222 223 217	257 245 258	215 230 227
Shoreův skleroskop po kalibraci													

PŘÍLOHA 7: ARITMETICKÉ PRŮMĚRY TVRDOSTI PROVOZNIHO MĚŘENÍ A JEJICH ROZDÍLY PŘED A PO TEPELNÉM CYKLU – 1. ČÁST

Detaily		Vzorek číslo 1						Vzorek číslo 2									
Osnačení	Materiál	Odlitek číslo/ číslo formy	datum lití	tl. stěny [mm]	HB před	HB po	Odraz před [HBW]	Odraz po [HBW]	Rozdíl HB	Rozdíl odraz [HBW]	tl. stěny [mm]	HB před	HB po	Odraz před [HBW]	Odraz po [HBW]	Rozdíl HB	Rozdíl odraz [HBW]
3		L217 558/65	09.10.2018	28	202	198	222	210	4	12	25	197	192	201	205	5	-4
4	GJL 200	L217 558/30	09.10.2018	28	204	197	219	205	7	14	25	197	187	218	182	10	36
5		L217 558/60	09.10.2018	28	201	197	220	211	4	9	25	192	180	205	196	12	9
15		17 459 665	22.11.2018	31	203	187	242	174	16	68	26	217	199	235	194	18	41
16	GJL 250	17 459 665	22.11.2018	31	205	197	235	178	8	57	26	215	213	225	197	2	28
24		17 459 665	11.02.2019	32	207	202	229	189	5	40	26	221	218	222	208	3	14
9		2098417005/ 06	12.10.2018	15	231	211	240	230	20	10	35	220	213	226	224	7	2
10	GJL 300	2098417005/ 43	12.10.2018	15	239	217	238	221	22	17	35	214	209	236	221	5	15
11		2098417005/ 76	12.10.2018	15	214	216	230	223	-2	7	35	212	207	220	203	5	17
	Shoreův skleroskop po kalibraci																

PŘÍLOHA 8: ARITMETICKÉ PRŮMĚRY TVRDOSTI PROVOZNIHO MĚŘENÍ A JEJICH ROZDÍLY PŘED A PO TEPELNÉM CYKLU – 2. ČÁST

Označení	Materiál	Odlietek číslo/ číslo formy	datum liti	Detaily						Vzorek číslo 1						Vzorek číslo 2						
				tl. stěny [mm]	HB před	HB po	Odráž před [HBW]	Odráž po [HBW]	Rozdíl HB	Rozdíl odráž [HBW]	tl. stěny [mm]	HB před	HB po	Odráž před [HBW]	Odráž po [HBW]	Rozdíl HB	Rozdíl odráž [HBW]	tl. stěny [mm]	HB před	HB po	Odráž před [HBW]	Odráž po [HBW]
6		2093419025/ 25	17.10.2018	42	199	205	244	205	205	-6	39	27	214	210	245	203	4	42				
7	GIL 300 Cu	2093419025/ 21	17.10.2018	42	211	207	240	211	211	4	29	27	216	212	264	207	4	57				
8		2093419025/ 35	09.04.2018	42	203	204	219	214	214	-1	5	27	210	205	240	200	5	40				
12		L218 181	03.10.2018	17	212	211	236	235	235	1	1	36	211	206	246	215	5	31				
13	GIL 300 Cr	L218 181	03.10.2018	17	216	202	225	211	211	14	14	36	205	209	219	202	-4	17				
14		L218 181	03.10.2018	17	216	204	226	208	208	12	18	36	211	206	220	197	5	23				
1		2099401117/ 41	24.09.2018	42	221	209	213	219	219	12	-6	12	199	201	195	199	-2	-4				
2	GIL 300 CuCr	2099401117/ 43	24.09.2018	43	234	219	219	218	218	15	1	12	199	200	175	197	-1	-22				
25		2099401117/ 34	16.10.2018	42	225	217	251	215	215	8	36	12	207	197	202	208	10	-6				
21		M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	15	239	233	249	234	234	6	15	356 - \$ 67 - V	221	224	248	228	-3	20				
22	GIL 300 CuMo	M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	14	230	214	253	221	221	16	32	36 - \$ 67 - V	224	223	235	209	1	26				
23		M 416 150 130/ HB2	20.02.2019	14	241	215	253	211	211	26	42	35 - \$ 67 - V	224	221	253	224	3	29				
Shoreův skleroskop po kalibraci																						

PŘÍLOHA 9: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTI LABORATORNÍHO MĚŘENÍ – 1. ČÁST

Označení	Materiál	Měření na vzorku	Tvrdość HBW 10/3000 na vzorcích ϕ 30-30 mm při výdržii na teplotě				
			Bez žihání	Po žihání na 650 °C [hod]			
			0	1,5	3	4,5	6
1	GJL 200	1.	194	188	174	154	136
		2.	197	186	169	159	136
		3.	194	188	168	154	138
		Průměr:	195	188	170	156	137
2	GJL 200	1.	199	183	179	164	134
		2.	199	183	175	164	141
		3.	199	183	174	157	140
		Průměr:	199	183	176	162	138
18	GJL 200	1.	184	185	154	132	122
		2.	185	182	158	133	124
		3.	182	184	148	128	123
		Průměr:	184	184	153	131	123
19	GJL 200	1.	187	184	149	135	123
		2.	189	182	152	135	127
		3.	187	186	154	137	126
		Průměr:	188	184	152	136	126
3	GJL 250	1.	197	200	179	175	152
		2.	203	199	178	169	157
		3.	207	199	174	174	155
		Průměr:	202	199	177	173	155
4	GJL 250	1.	197	190	172	168	143
		2.	196	196	181	159	136
		3.	194	195	181	168	139
		Průměr:	195	194	178	165	139
20	GJL 250	1.	198	193	172	151	150
		2.	200	190	179	158	152
		3.	197	189	180	153	150
		Průměr:	198	191	177	154	151
21	GJL 250	1.	202	194	172	151	150
		2.	202	193	179	158	152
		3.	202	194	180	153	150
		Průměr:	202	193	177	154	151

**PŘÍLOHA 10: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTI
LABORATORNÍHO MĚŘENÍ – 2. ČÁST**

Označení	Materiál	Měření na vzorku	Tvrdość HBW 10/3000 na vzorcích ϕ 30-30 mm při výdržii na teplotě				
			Bez žihání	Po žihání na 650 °C [hod]			
			0	1,5	3	4,5	6
5	GJL 250 + Sn	1.	199	208	207	186	172
		2.	209	204	203	178	175
		3.	204	202	199	180	172
		Průměr:	204	205	203	181	173
6	GJL 250 + Sn	1.	218	205	200	175	157
		2.	216	203	198	185	164
		3.	219	207	203	188	159
		Průměr:	218	205	200	183	160
22	GJL 250 + Sn	1.	214	210	195	177	168
		2.	217	211	201	173	164
		3.	214	210	199	180	161
		Průměr:	215	210	198	177	164
23	GJL 250 + Sn	1.	214	217	204	186	168
		2.	216	215	209	184	168
		3.	215	213	205	184	167
		Průměr:	215	215	206	185	168
7	GJL 300	1.	215	218	197	188	180
		2.	218	219	205	192	180
		3.	224	218	199	194	178
		Průměr:	219	219	200	191	179
8	GJL 300	1.	217	209	200	179	165
		2.	213	210	199	185	167
		3.	213	207	196	178	167
		Průměr:	214	208	198	180	166
24	GJL 300	1.	211	196	186	166	164
		2.	210	195	185	167	166
		3.	210	187	182	167	167
		Průměr:	210	193	184	167	165
25	GJL 300	1.	211	210	192	168	167
		2.	202	208	193	167	165
		3.	209	211	192	169	164
		Průměr:	207	209	192	168	165

**PŘÍLOHA 11: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTI
LABORATORNÍHO MĚŘENÍ – 3. ČÁST**

Označení	Materiál	Měření na vzorku	Tvrdość HBW 10/3000 na vzorcích ϕ 30-30 mm při výdržii na teplotě				
			Bez žihání	Po žihání na 650 °C [hod]			
			0	1,5	3	4,5	6
9	GJL 300 + Cu	1.	228	212	211	189	179
		2.	234	216	214	195	179
		3.	230	216	210	192	172
		Průměr:	231	215	212	192	177
10	GJL 300 + Cu	1.	230	215	208	186	166
		2.	229	217	209	192	163
		3.	228	214	205	188	172
		Průměr:	229	215	207	189	167
26	GJL 300 + Cu	1.	224	211	203	183	174
		2.	219	211	200	181	174
		3.	218	209	202	184	172
		Průměr:	220	210	202	183	174
27	GJL 300 + Cu	1.	218	219	195	184	174
		2.	224	220	196	181	171
		3.	220	221	194	179	172
		Průměr:	221	220	195	181	173
11	GJL 300 + Cr	1.	216	219	213	205	202
		2.	220	217	214	204	201
		3.	218	218	214	205	199
		Průměr:	218	218	214	205	201
12	GJL 300 + Cr	1.	220	213	214	199	192
		2.	215	216	212	201	195
		3.	218	216	212	201	193
		Průměr:	218	215	213	200	193
28	GJL 300 + Cr	1.	223	212	213	204	202
		2.	226	216	212	203	203
		3.	224	217	213	203	200
		Průměr:	224	215	213	204	202
29	GJL 300 + Cr	1.	219	221	212	210	200
		2.	224	221	214	208	202
		3.	225	218	207	207	197
		Průměr:	223	220	211	208	200

**PŘÍLOHA 12: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTI
LABORATORNÍHO MĚŘENÍ – 4. ČÁST**

Označení	Materiál	Měření na vzorku	Tvrдост HBW 10/3000 na vzorcích ϕ 30-30 mm při výdržu na teplotě				
			Bez žihání	Po žihání na 650 °C [hod]			
			0	1,5	3	4,5	6
13	GJL 300 + CuCr	1.	236	229	218	214	200
		2.	238	228	223	215	203
		3.	241	230	221	217	203
		Průměr:	238	229	221	215	202
14	GJL 300 + CuCr	1.	233	226	224	214	197
		2.	240	226	219	218	200
		3.	234	225	219	215	202
		Průměr:	236	225	221	216	200
30	GJL 300 + CuCr	1.	226	221	211	211	208
		2.	227	221	215	211	208
		3.	223	224	214	209	208
		Průměr:	225	222	213	210	208
31	GJL 300 + CuCr	1.	227	224	214	209	207
		2.	225	224	215	208	200
		3.	227	224	217	209	207
		Průměr:	226	224	215	208	204
15	GJL 300 + CuMo	1.	242	231	220	210	188
		2.	239	238	227	212	192
		3.	241	239	223	210	187
		Průměr:	240	236	223	210	189
16	GJL 300 + CuMo	1.	242	241	226	210	187
		2.	242	241	229	209	192
		3.	238	234	228	208	189
		Průměr:	240	239	228	209	189
32	GJL 300 + CuMo	1.	236	225	223	203	194
		2.	234	231	228	198	194
		3.	238	231	227	202	196
		Průměr:	236	229	226	201	194
33	GJL 300 + CuMo	1.	236	228	205	196	187
		2.	238	228	204	194	185
		3.	235	224	205	188	185
		Průměr:	236	226	205	193	186

**PŘÍLOHA 13: NAMĚŘENÉ HODNOTY TVRDOSTI
LABORATORNÍHO MĚŘENÍ – 5. ČÁST**

Označení	Materiál	Měření na vzorku	Tvrdość HBW 10/3000 na vzorcích ϕ 30-30 mm při výdržii na teplotě				
			Bez žihání	Po žihání na 650 °C [hod]			
			0	1,5	3	4,5	6
17	GJL 300 + Sn	1.	216	214	215	202	182
		2.	217	213	214	202	183
		3.	214	213	214	202	182
		Průměr:	216	213	214	202	182
34	GJL 300 + Sn	1.	212	208	207	202	187
		2.	209	210	201	203	190
		3.	207	210	205	208	188
		Průměr:	209	209	204	204	189