

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

**.....
podpis autora**

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Michálek	Jméno Martin		
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Hájek, Ph.D.	Jméno Jiří		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh a ověření postupů tepelného zpracování materiálů používaných v energetice dle požadovaných vlastností			

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2016
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM		TEXTOVÁ ČÁST		GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	--	---------------------	--	----------------------	--

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zaměřuje na tepelné zpracování tvárné litiny. Cílem této práce je dosáhnout požadovaných vlastností tvárné litiny po navrženém režimu tepelného zpracování. Navržený režim tepelného zpracování má snížit tvrdost litiny a poměr feritu a perlitu v matici zachovat v požadovaném poměru.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Tvárná litiny, tepelné zpracování, ferit, perlit, GJS – 600, tvrdost, HB 10/3000, kontinuálně lité tyče.

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Michálek	Name Martin	
FIELD OF STUDY	3911T016 “Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Hájek, Ph.D.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design and verification of heat treatment cycle for materials used in energy industry according to required properties		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2016
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY		TEXT PART		GRAPHICAL PART	
----------------	--	------------------	--	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma work is about heat treatment of Ductil iron. The aim of this work is reach required properties of ductil iron after designed heat treatment cycle. The aim of designed heat treatment cycle is reduce hardness of ductil iron and have ferit and perlit ratio in metal matrix in required values.
KEY WORDS	Ductil iron, heat treatment, ferite, perlit GJS – 600, hardness, HB 10/3000, continual cast bars

Obsah

Poděkování	8
1 Úvod	9
2 Strukturní složení litiny	10
2.1 Grafit	10
2.1.1 Tvar grafitu	11
2.1.2 Velikost grafitu	11
2.2 Základní kovová hmota	12
2.2.1 Ferit	12
2.2.2 Perlit	12
2.2.3 Austenit	12
2.2.4 Cementit	12
2.2.5 Ledeburit	12
2.2.6 Martenzit	13
2.2.7 Bainit	13
2.2.8 Fosfidy	13
2.2.9 Sirníky	13
2.2.10 Karbidy	13
3 Jednotlivé prvky v litinách a chemické složení litin	13
3.1 Legury	13
3.2 Nečistoty	14
4 Rozdělení prvků dle vlivu na grafitizaci	14
5 Jednotlivé prvky obsažené v litinách	14
5.1 Uhlík	14
5.2 Křemík	14
5.3 Mangan	14
5.4 Měď	15
5.5 Nikl	15
5.6 Molybden	15
5.7 Chrom	15
5.8 Hořčík	15
5.9 Stopové prvky	15
6 Litiny s lupínkovým grafitem (LLG)	16
7 Tepelné zpracování šedé litiny	16
7.1 Žihání	17

7.1.1	Feritizační žihání	17
7.1.2	Grafitizační žihání	18
7.1.3	Žihání na odstranění zbytkového napětí.....	18
7.1.4	Normalizační žihání	19
7.2	Kalení a popouštění	19
7.2.1	Austenitizace	19
7.2.2	Kalení	20
7.2.3	Popouštění	20
7.2.4	Izotermické kalení	20
7.2.5	Povrchové kalení	20
8	Litiny s kuličkovým grafitem (LKG)	21
9	Tepelné zpracování tvárné litiny	21
9.1	Žihání tvárné litiny	22
9.1.1	Normalizační žihání tvárné litiny	22
9.2	Kalení a popouštění tvárné litiny	23
9.2.1	Izotermické kalení	24
9.2.2	Povrchové kalení tvárné litiny.....	25
9.3	Žihání na snížení zbytkového napětí tvárné litiny	25
9.4	Nové trendy v tepelném zpracování litin.....	25
9.4.1	Zpracování litin za nízkých teplot	26
9.4.2	Hluboké zmrazení (okolo -195°C)	26
9.4.3	Zařízení pro tepelné zpracování za nízkých teplot.....	27
11.	Experimentální program.....	29
11.1	Cíl experimentu.....	29
12.	Charakteristika experimentální materiálu	29
12.1	Výroba tyče kontinuálním litím	29
12.2	Vlastnosti dodaného materiálu.....	30
13.	Tepelné zpracování tvárné litiny	31
13.1	Příprava vzorků pro tepelné zpracování.....	31
13.2	Kontrola dodaného stavu materiálu	32
13.2.1	Chemické složení materiálu metodou GDOS	32
13.2.2	Kontrola tvrdosti a mikrostruktury	34
13.3	Režimy tepelného zpracování	36
13.4	Umístění vzorků v peci	36
13.5	Přehled navržených režimů tepelného zpracování.....	37
14.	Vyhodnocení tepelného zpracování	40

14.1	Odběr vzorků pro metalografický rozbor.....	40
14.2	Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN EN ISO 945 – 1	40
14.3	Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN 420461	41
14.4	Vyhodnocení poměru ferit : perlit dle ČSN 420461	41
14.5	Vyhodnocení poměru ferit : perlit mřížkovou metodou	42
14.6	Hodnocení tvrdosti dle Brinela dle EN ISO 6506 – 1.....	42
14.7	Vzorky č. 2 – 6 vyhodnocení	43
14.7.1	Vzorek č. 2	43
14.7.2	Vzorek č. 3	44
14.7.3	Vzorek č. 4	45
14.7.4	Vzorek č. 5	46
14.7.5	Vzorek č. 6	47
14.7.6	Nedestruktivní kontrola vzorků po tepelném zpracování	48
14.7.7	Shrnutí výsledků z první sady vzorků	48
14.8	Vzorky 7 – 8.....	49
14.8.1	Vzorek č. 7	49
14.8.2	Vzorek č. 8	51
14.8.3	Shrnutí výsledků vzorků č. 7 a 8	52
14.9	Vzorky 9, 10, 11.....	52
14.9.1	Vzorek č. 9	52
14.9.2	Vzorek č. 10	54
14.9.3	Vzorek č. 11	55
14.9.4	Shrnutí výsledků vzorků č. 9 – 11	55
14.10	Návrh finálního cyklu tepelného zpracování	56
14.10.1	Výsledky tepelného zpracování.....	57
15	Shrnutí dosažených výsledků	58
16	Závěr.....	60
17	Použité zdroje.....	61

Poděkování

Chtěl bych všem, kteří jakkoliv přispěli při zpracování mé diplomové práce. Nejvíce bych chtěl poděkovat firmě ARC – heating s.r.o. za poskytnutý experimentální materiál a panu Ing. Vladislavu Fröhlichovi a Jiřímu Pinkerovi za konzultace, rady a připomínky k plánu experimentu. Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Hájkovi Ph.D, který vedl mou diplomovou práci, za trpělivost, cenné rady a připomínky v průběhu tvorby diplomové práce. Ještě patří poděkování paní Ing. Jaroslavě Kastlové, která mi pomohla s korekturou textu.

Tato diplomová práce a provedené analýzy byly realizovány na základě řešení studentského projektu SGS-2016-036 „Analýza, vývoj a modifikace strojírenské technologie v oblasti objemového zpracování moderních materiálů, využívaných v oblasti energetických strojů, dopravních prostředků a souvisejících strojírenských aplikací“.

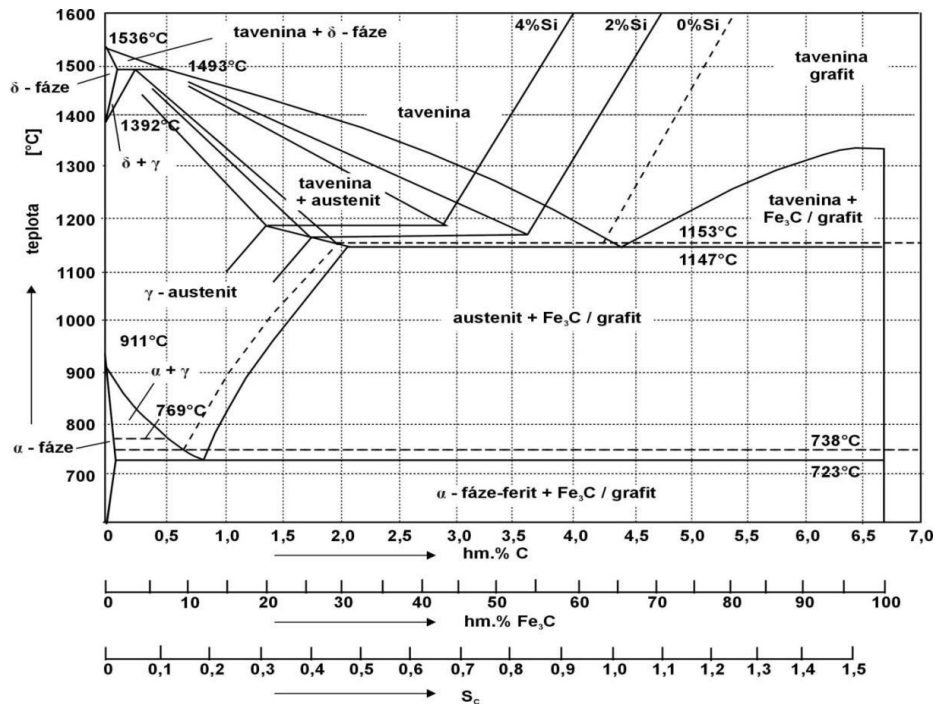
1 Úvod

Tato diplomová práce se zaměřuje na tepelné zpracování šedé a tvárné litiny, které jsou významným materiálem v energetice i automobilovém průmyslu. V energetice se používá tvárná litina například pro obalové soubory na vyhořelé palivo. Litiny obecně mohou být měkké, které se používají spíše pro odlévání výrobků pro dekoraci nebo pro tlumení chvění. Litiny ovšem mohou být i velmi tvrdé například izotermicky kalené litiny (ADI litiny), které jsou odolné proti otěru a jsou velmi tvrdé. O použití jednotlivých druhů litin rozhoduje jejich chemické složení a vliv jednotlivých přidaných legur a jejich kombinací.

V teoretické části této práce budou popsány jednotlivé metody tepelného zpracování šedé a tvárné litiny včetně novějších metod tepelného zpracování. Také budou popsány jednotlivé části, které mohou ovlivnit volbu nebo průběh tepelného zpracování. Ještě budou uvedeny parametry, které mohou ovlivňovat chování tvárné litiny jako je například základní chemické složení litin a vliv jednotlivých strukturních složek. Praktická část práce bude zaměřena na tepelné zpracování tvárné litiny. Kde bude postupně vyzkoušeno několik režimů tepelného zpracování s cílem snížit tvrdost tvárné litiny a zároveň zachovat strukturní složení litiny v zadaném rozmezí.

2 Strukturní složení litiny

Struktura litiny je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou. Litina může tuhnout stabilně podle diagramu Fe – C nebo nestabilně podle diagramu Fe – Fe₃C. Podobně jako ocel i vlastnosti litiny jsou ovlivňovány přísadou legujících prvků. Například, jak je vidět na obrázku 1, vliv obsahu křemíku na polohu eutektického bodu.



Obrázek 1 – Diagram železo - uhlík [1]

2.1 Grafit

Grafit je krystalická forma uhlíku.

Rozlišujeme několik druhů grafitu:

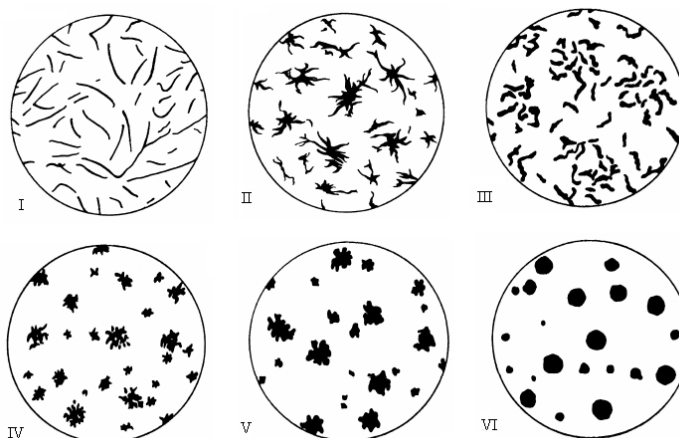
- Eutektický (lupínkový, kuličkový, červíčkovitý), vzniká při tuhnutí eutektika. S austenitem tvoří tzv. Grafitické eutektikum
- Primární, vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických grafitických litin. Má tvar hrubých lupínků. U silnostěnných odlitků může zůstat uzavřen v horních partiích stěn. Primární grafit má nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti litiny.

Grafit vznikající rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování (temperování, žihání na odstranění karbidů), který vzniká v důsledku snižování rozpustnosti uhlíku v austenitu a při eutektoidní transformaci podle stabilního systému se obvykle připojuje k již existujícím grafitům a netvoří zvláštní fázi. [2,5]

2.1.1 Tvar grafitu

Tvar a rozložení grafitu se vyhodnocuje dle normy ČSN EN ISO 945 – 1, která grafit zařazuje do šesti tříd.

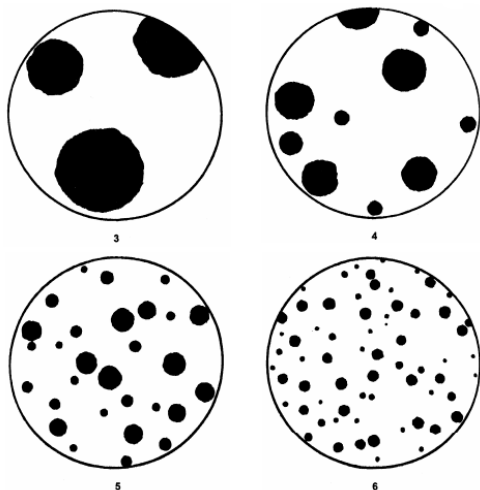
- I – lupínkový grafit
- II – pavoučkový grafit
- III – červíčkovitý grafit
- IV – vločkový grafit
- V – nedokonale zrnitý grafit
- VI – pravidelně zrnitý grafit



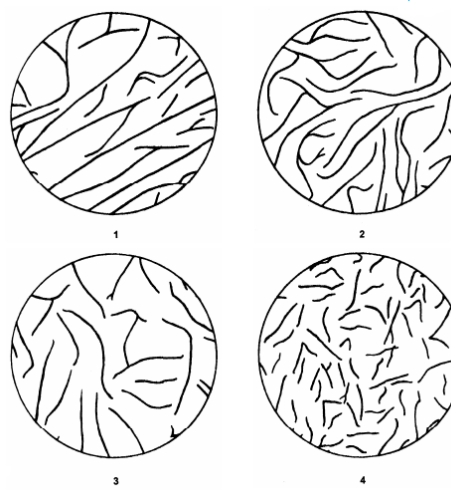
Obrázek 2 – Zobrazení etalonů pro 6 tříd tvaru grafitu [4]

2.1.2 Velikost grafitu

Velikost grafitu se hodnotí metalograficky, opět se pro vyhodnocení používá norma ČSN EN ISO 945 – 1. Měření velikosti grafitu lze provést pomocí etalonů, nebo pomocí měření délky lupínek u šedé litiny a počtem kuliček na mm² plochy výbrusu u litin s kuličkovým grafitem. Velikost grafitu je označována čísly 1 – 8. Pro ilustraci jsou na obrázcích zobrazeny etalony pro lupínkový a kuličkový grafit. Etalony jsou nafoceny při zvětšení 100x. [4,2]



Obrázek 3 – etalony pro velikost grafitu(kuličkový), zvětšeno 100x [4]



Obrázek 4 – etalony pro velikost grafitu (lupínkový), zvětšeno 100x [4]

Z hlediska mechanických vlastností litiny je žádoucí mít ve struktuře grafit jemnozrný, vyloučený ve formě drobných lupínek nebo kuliček.

2.2 Základní kovová hmota

Základní kovovou hmotu v nelegovaných litinách tvoří ferit, perlit, případně ledeburit. Legováním nebo tepelným zpracováním můžou vznikat struktury austenit, martenzit, bainit nebo komplexní karbidy.[2,5]

2.2.1 Ferit

Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního diagramu Fe – C. Pomalé ochlazování součástí podporuje vznik feritu v základní kovové hmotě. Ferit je měkký, tvárný a má relativně nízkou pevnost, je dobře obrobitelný a v litinách je nositelem houževnatosti. Vlastnosti feritu jsou určeny legurami a doprovodnými prvky. Všechny prvky, které zvyšují tvrdost a pevnost feritu mají také vliv na jeho houževnatost. [2,5]

2.2.2 Perlit

Perlit je eutektoid vzniklý rozpadem austenitu podle metastabilního diagramu Fe – Fe₃C. Perlit je tvořený feritem a perlitickým cementitem, který mu dodává větší tvrdost a pevnost než má čistý ferit. Perlit se může v litině vyskytovat ve dvou morfologických formách. (lamelární a globulární)

- Lamelární perlit

Je tvořen lamelami feritu a cementitu, které rostou vedle sebe. Z jednoho austenitického zrna vzniká několik zrn perlitu s rodílnou orientací lamel.

- Globulární perlit

Vzniká sbalením lamel cementitu do globulí při sferoidizačním žhání. Litiny, které obsahují globulární grafit mají lepší obrobitelnost než litiny s perlitem lamelárním. [2,5]

2.2.3 Austenit

V nelegovaných litinách je austenit stabilní pouze při nadeutektoidních teplotách. V litině se vyskytuje v případech legovaných litin, zejména u litin legovaných niklem a jako zbytkový austenit po tepelném zpracování litin. Austenit je měkký, odolný proti korozi a tvárný. [2,5]

2.2.4 Cementit

Je velmi tvrdý (660 až 850HB) a křehký. Při vyšším obsahu ve struktuře se litina stává neobrobitelnou. Cementit se v litinách může vyskytovat v různých druzích.

- Primární – vyskytuje se zřídka a většinou u nadeutektických bílých litin
- Eutektický – jako součást metastabilního eutektika (ledeburitu). Způsobuje velkou tvrdost a neobrobitelnost.
- Perlitický – jako součást eutektika (perlitu), zvyšuje pevnost a plastické vlastnosti litiny. [2,5]

2.2.5 Ledeburit

Vzniká jako eutektikum při tuhnutí litiny v metastabilní soustavě Fe – Fe₃C. Obsahuje 4,3 %C a je tvořen austenitem a ledeburickým cementitem. Ledeburit je jednou ze základních složek bílé litiny. V grafitických litinách se vyskytuje v místech, kde došlo k rychlému odvodu tepla jako tzv. zákalka. [2,5]

2.2.6 Martenzit

Vzniká při bezdifúzním rozpadu austenitu při kalení litin. V některých legovaných litinách může vznikat přímo v litém stavu. Martenzit je velmi tvrdý a křehký. [2,5]

2.2.7 Bainit

Vzniká jako lící struktura u litin legovaných molybdenem a niklem. U nelegovaných litin se vyskytuje po tepelném zpracování. Litiny s bainitickou strukturou mají vysokou pevnost a tvrdost a zachovávají si dobré plastické vlastnosti. [2,5]

2.2.8 Fosfidy

Vznikají v důsledku malé rozpustnosti fosforu v železe a vylučují se na hranici zrn. Mohou se vyskytovat jako fosfidické eutektikum (Steadit). Je velmi tvrdý, křehký a snižuje dynamické vlastnosti litin. Výskyt fosfidů je u litin nežádoucí. [2,5]

2.2.9 Sirníky

Vlivem omezené rozpustnosti síra segreguje na hranicích zrn, kde s železem tvoří sirníky železa. Tyto sirníky výrazně zvyšují křehkost litiny. Tento vliv lze omezit přidáním legujících prvků např. manganu, který vytváří sirník MnS, který se vylučuje uvnitř zrna a po hranicích. [2,5]

2.2.10 Karbidy

Vznikají za přítomnosti karbidotvorných prvků. V nelegovaných litinách je výskyt karbidů nežádoucí, protože zvyšují křehkost litiny a její obrobiteľnosť. Jejich vzniku se zabraňuje zvýšeným očkovaním a u hotových výrobků je možno je odstranit žiháním. [2,5]

3 Jednotlivé prvky v litinách a chemické složení litin

Litiny obsahují vedle železa další základní legury a nečistoty. Základními prvky jsou C, Si, Mn, P a S. Tyto prvky se v určitém množství vyskytují u každé litiny a jejich množství je rozhodující pro vlastnosti litiny. Prvky, které jsou v litině lze rozdělovat podle několika hledisek. Podle vlivu jednotlivých prvků na grafitizaci litiny (grafitizační, antigrafitizační, neutrální) a také podle toho jak ovlivňují složení mikrostrukturu základní hmoty litiny (feritotvorné, perlitotvorné, karbidotvorné, atd.) [2,5]

3.1 Legury

Prvky, které ovlivňují strukturu litiny a vedou ke vzniku strukturních složek, které v nelegované litině běžně nevznikají. Nebo vedou k získání mechanických, fyzikálních a chemických vlastností, které také běžně v nelegované litině nevznikají. Podle účinku na strukturu je rozdělujeme na perlitotvorné (Sn, Cu), karbidotvorné (např. Mn, Cr, V, Mo), austenitotvorné (Ni). [2,5]

3.2 Nečistoty

Obvykle nežádoucí prvky, které se do litiny dostávají ze surovin nebo během tavicího procesu. Mají negativní účinek na vlastnosti litin a jejich obsah má být co nejmenší. (např. olovo, arsen, antimon, telur atd). [2,5]

4 Rozdělení prvků dle vlivu na grafitizaci

Dle účinků na grafitizaci při tuhnutí se prvky dělí na:

- Grafitizační – Si, Al (silně), Ni, Cu, P, Ti
- Anti grafitizační – Cr, V, Mg, Te, Ce, S
- Neutrální – Mn, Co, Zn

Grafitizační prvky podporují tuhnutí podle stabilního systému Fe – C , takže je uhlík vyloučen v podobě grafitického eutektika. Antigrafitizační prvky podporují vznik metastabilního eutektika ledeburitu.

5 Jednotlivé prvky obsažené v litinách

5.1 Uhlík

Uhlík se může během tuhnutí vylučovat jako grafit s různou morfologií. Spolu s křemíkem má největší vliv na vlastnosti litin. Na tvar grafitu má vliv chemické složení a rychlost ochlazování. K dosažení kuličkového grafitu se litina modifikuje hořčíkem. Kuličkový grafit lze získat i modifikací jinými prvky, například ze skupiny kovů vzácných zemin. [2,5]

5.2 Křemík

Křemík je nejvýznamnějším grafitizačním prvkem v litinách a je to proto součástí všech technicky používaných očkovacích přísad, vyjma očkovačů na bázi uhlíku. Při nízkém obsahu křemíku mají litiny sklon k vyloučení karbidů nebo přímo k tvorbě zákalky. Při tuhnutí křemík významně podporuje grafitizaci a také zvyšuje tvrdost feritu. V litinách s kuličkovým grafitem způsobuje zvýšení obsahu křemíku zjemnění struktur a potlačení karbidotvorného účinku hořčíku. Křemík má za následek také zvyšování austenitizační teploty a posouvání eutektického bodu. [2,5]

5.3 Mangan

Mangan jako austenitotvorný prvek snižuje eutektoidní teplotu a při obvyklých koncentracích působí v litinách perlitotvorně, zvyšuje disperzitu perlitu a pevnost a tvrdost litiny. Mangan je do litiny s lupínkovým grafitem přidáván jednak z důvodu jeho vazby na síru (MnS), jednak ke stabilizaci perlitické struktury. Mangan má z běžných prvků obsažených v litině (LLG) nevyšší afinitu k síře. V litinách s kuličkovým grafitem je obsah síry nízký a mangan nemá z hlediska vyloučení síry ve formě sulfidu význam, protože odsiřování probíhá pomocí hořčíku. V těchto litinách může proto být obsah manganu velmi nízký. [2,5]

5.4 Měď

Měď se používá při výrobě litiny jako perlitotvorná přísada. V eutektické litině se rozpouští cca 4% mědi. Při vyšších koncentracích Cu může být nepříznivě ovlivněno vylučování kuličkového grafitu. Tento nepříznivý účinek mědi se projevuje zejména u vysokolegovaných litin, které při jejich vysokých koncentracích vyrábějí pouze jako litiny s lupínkovým grafitem. Měď je mírně grafitizační a středně silný perlitotvorný prvek, který při vyšších koncentracích nebo v kombinaci s dalšími legujícími prvky podporuje vznik austenitické struktury. V poměru s chromem 4:1 (Cu:Cr) se u litiny s lupínkovým grafitem dosahuje perlitické struktury s jemným grafitem. Měď také způsobuje zmenšení mezilamelární vzdálenosti v perlitu. [2,5]

5.5 Nikl

Nikl je austenitotvorný prvek, který rozšiřuje oblast γ a prodlužuje dobu rozpadu austenitu.. Způsobuje zpomalenou transformaci austenitu, což v důsledku potlačuje vznik feritu a naopak podporuje ve struktuře vznik perlitu. Pro tyto účely se nikl přidává do obsahu až 4 %. Při vyšším obsahu niklu (nad 18%) ve struktuře stabilizuje austenit. Litiny s obsahem niklu nad 18% mají při pokojové teplotě austenitickou strukturu. Nikl má nepříznivý vliv na morfologii kuličkového grafitu. [2,5]

5.6 Molybden

Podporuje vznik perlitické struktury, je velmi významným prvkem zvyšujícím pevnost litiny a zlepšujícím stabilitu perlitu i za vysokých teplot. Molyben je používán pro legování litin např. pro odlitky hlav válců dieslových motorů. Příklad Mo v kombinaci s Cr a Ni(Cu) zvyšuje pevnost perlitické základní kovové hmoty a stabilizuje strukturu a vlastnosti litin za vyšších teplot. [2,5]

5.7 Chrom

Je to silně karbidotvorný prvek, který podporuje metastabilní tuhnutí. K potlačení jeho účinků na tvorbu ledeburického cementitu a ostatních karbidů je vliv chromu kompenzován pomocí mědi a niklu. Chrom zvyšuje pevnost a tvrdost litiny, pokud ve struktuře vzniknou volné karbidy, dojde k zhoršení obrobitelnosti. Obecně lze říci, že chrom je v nelegovaných litinách obvykle pokládán za nežádoucí. Jeho význam je zejména v legovaných a vysokolegovaných litinách. Chrom je jednou ze základních legujících přísad v žáruvzdorných, korozivzdorných a ořevzdorných litinách [2,5]

5.8 Hořčík

Hořčík se používá v litinách k modifikaci grafitu. Má velkou afinitu ke kyslíku a k síře. Před modifikací se proto doporučuje udržovat obsah síry v rozmezí 0,01 - 0,02 %. Vyšší počáteční obsahy síry v tavenině vyžaduje použití velkého množství modifikátoru. [2,5]

5.9 Stopové prvky

Stopové prvky a nečistoty se do litiny dostávají zejména ze špatně vytříbeného šrotu. Jejich škodlivý účinek se projevuje tím, že většinou způsobují vik degenerovaných tvarů grafitu.

V litinách jsou prakticky nerozpustné Pb a Bi. Tyto prvky již při koncentraci řádově tisícín procenta $\times 10^{-3} \%$ ruší tvorbu kuličkového grafitu. Tvorbu kuličkového grafitu dále ruší hliník a titan. Při překročení určité koncentrace těchto prvků nastává rychlý pokles pravidelnosti kuliček grafitu. [2,5]

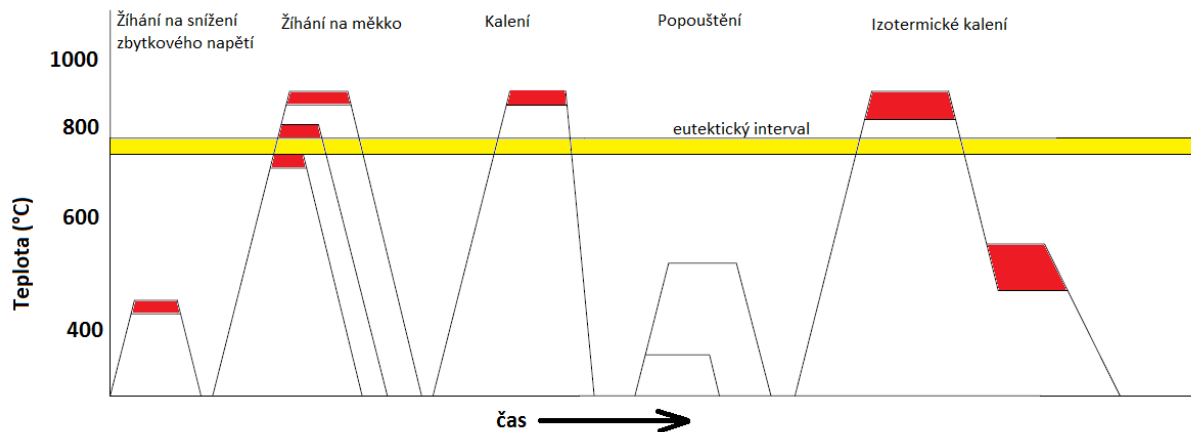
6 Litiny s lupínkovým grafitem (LLG)

Norma ČSN EN 1561 předepisuje pro litiny s lupínkovým grafitem pouze stanovení pevnosti statickou zkouškou v tahu a určení tvrdosti podle Brinella. Pevnost v tahu závisí při vhodně vyloučeném lupínkovém grafitu na obsahu perlitu ve struktuře, množství a velikost grafitu. Obsah perlitu závisí na obsahu perlitotvorných prvků (Mn, Cu, Sn, P,...) a na rychlosti ochlazování. Rychlost ochlazování (tloušťka stěny má významný vliv na pevnost a tvrdost litiny), proto u odlitků litých se stejným chemickým složením mohou být významné rozdíly v pevnosti litiny odlitků v závislosti na rychlosti chladnutí. Ze stejného důvodu mohou být i rozdílné pevnosti litiny v různých místech jednoho odlitku. Příčinou vyloučení karbidů je přítomnost karbidotvorných prvků, zejména Cr a Mn. Na vyloučení karbidů má rovněž vliv rychlost ochlazování a očkování litiny. Pokud se při tuhnutí vyloučí v litině karbidy, je jejich odstranění tepelným zpracováním obtížné. Litiny se nejčastěji dodávají ve stavu tepelně nezpracovaném. Litina s lupínkovým grafitem je velmi citlivá na rychlost ochlazování. [2,4,5]

7 Tepelné zpracování šedé litiny

Tepelné zpracování šedé litiny může měnit základní kov s malým nebo žádným vlivem na tvar a velikost grafitu, který se zformoval po odlití. Mikrostruktura základního kovu může být od feriticko - perlitické až po popuštěný martenzit. Na velikost grafitu má značný vliv pohyb uhlíku během tepelného zpracování. V odlitcích kde jsou jemnější grafitové částice, je difúze uhlíku rychlejší a feritizace nebo normalizace je možné dělat v kratším čase než v odlitcích s velkými grafitickými částicemi.

Dalším parametrem, který ovlivňuje tepelné zpracování je chemické složení. Například křemík snižuje rozpustnost uhlíku a zvyšuje stupeň difúze v austenitu. Vliv jednotlivých prvků na litinu byl rozebrán v kapitolách výše. [2,4,5]



Obrázek 5 – Schéma průběhu několika druhů tepelného zpracování pro šedou litinu [6]

7.1 Žihání

Toto tepelné zpracování pro šedé litiny nejčastější. Žihání se provádí z několika důvodů, ke zlepšení obrobitelnosti, snížení tvrdosti, k rozpuštění eutektických karbidů.

7.1.1 Feritizační žihání

Feritizační žihání lze rozdělit na dva typy podle teploty při jakých jej provádíme. Účelem feritizačního žihání je rozpad perlitického cementitu a zvýšení podílu feritu ve struktuře. Toto žihání může navazovat na grafitizační žihání. [2,4,5]

7.1.1.1 Feritizační žihání za podkritických teplot

Je nutné ohřát odlitek nad teplotu transformace. Jakmile teplota vzroste nad 595 °C je rychlost při jaké se perlitický cementit rozkládá na ferit a grafit mnohem rychlejší a maxima se dosáhne při nižší kritické teplotě cca 760 °C, pro nelegované a nízkolegované litiny. Pro tento způsob žihání se aplikuje výdrž 45 minut až 1 hodina na jeden palec tloušťky součásti (cca 25 mm). Na obrázcích je vidět změna struktury po provedení tohoto žihání. [2,4,5]



Obrázek 6 – šedá litina před (vlevo) a po proběhnutí feritizačního žihání (vpravo)[3]

Pro většinu šedých litin je doporučena teplota pro feritizační žihání v rozmezí teplot 700 až 760°C. Rychlost ochlazování není tolik důležitá při procesu žihání. Je doporučeno pomalé ochlazování odlitků, pokud následuje rovnou žihání na odstranění zbytkového napětí. Pro většinu odlitků se ochlazování volí v okolo 110 °C /h výjimkou jsou velmi složité tvary odlitků, kde by mohlo docházet ke vzniku trhlin.

7.1.1.2 Feritizační žihání při nadkritických teplotách

Toto žihání se volí v oblasti horní kritické teploty nebo mírně nad ní. Při této teplotě dochází k austenitizaci. Žihání je použito, pokud bylo feritizační žihání za podkritických teplot neefektivní vlivem velkého obsahu legur a nízkého obsahu křemíku. Teploty, při kterých žihání provádíme se pohybují v rozmezí 790 – 900 °C. Časy výdrže jsou podobné jako při feritizačním žihání za podkritických teplot. Ale ochlazování musí být pomalé v oblasti transformace okolo 790 až 675 °C. [2,4,5]

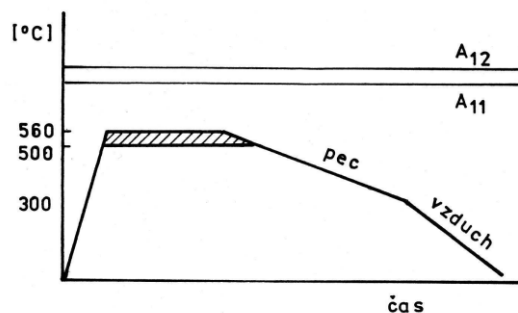
7.1.2 Grafitizační žihání

Pokud mikrostruktura šedé litiny obsahuje velké karbidické částice, jsou nezbytné vysoké teploty žihání. Grafitizační žihání má za účel převést velké karbidy na perlit a grafit. Pro rozpuštění karbidů za rozumné časy musí být teplota žihání minimálně 870 °C. V praxi se volí teplota pro grafitizační žihání v rozmezí mezi 900 – 955°C. Časy výdrže se mohou pohybovat od několika desítek minut až po několik hodin. Záleží, jaký typ karbidu je nutné rozpustit. Rychlost ochlazování závisí na konečném použití litiny. Pokud je účelem rozpustit karbidy, zachovat maximální pevnost a odolnost proti otěru. Odlitky by měli být chlazeny v peci až do žihací teploty (cca 700 °C) a pak chlazeny na vzduchu až do 540 °C. Toto zajistí zformování perlitické struktury. Pokud je vyžadována dobrá obrobitelnost je odlitek chlazen v peci do 540 °C a je pomalu ochlazován v oblasti transformace.

Některé prvky jako uhlík a křemík urychlují rozklad perlitu a karbidů za žihacích teplot. Pokud jsou tyto prvky přítomny v litině v dostatečném obsahu je možné snížit časy žihání. Bylo zjištěno, že perlit se rychleji rozpadá při větším obsahu křemíku v litině. Na druhou stranu některé prvky mohou zpozdit rozklad perlitu už při přidání 0,10 % prvků jsou to například Mn (60%), Ni (30%), Cu (30%), Cr (200), P (30%), které procentuálně prodlužují čas rozpadu perlitu v procentech uvedených v závorkách u jednotlivých prvků. [2,4,5]

7.1.3 Žihání na odstranění zbytkového napětí

Zbytková napětí v odlitcích způsobují deformace odlitků a mohou být příčinou vzniku prasklin. Žihání se provádí za teplot 500 – 560°C, legované litiny za teplot o 50 °C vyšší. Doporučená doba na žihací teplotě je asi 1 hodina + 1 hodina na každý palec tloušťky (25 mm) stěny odlitku. Pak následuje pomalé ochlazování v peci až na teplotu 250 – 300°C, pak se součást ochlazuje na vzduchu. Obrázek zobrazuje průběh teplot v závislosti na čase. [2,4,5]



Obrázek 7 – Průběh tepelného zpracování na odstranění zbytkového napětí. [2]

7.1.4 Normalizační žihání

Normalizace se používá k zajištění mechanických vlastností jako tvrdost a pevnost v tahu. Tento způsob tepelného zpracování je používán také k obnovení vlastností jaké měla litina po odlití a které byly změněny tepelným zpracováním jako například grafitizačním žiháním nebo struktury ovlivněné předehřevem nebo dohřevem při opravách svařováním. Šedé litiny jsou ohřaty na teploty nad transformaci a jsou drženy na teplotě přibližně 1 hodiny na jeden palec maximální tloušťky součásti, pak je ochlazováno na klidném vzduchu až do pokojové teploty.. Rozsah teplot pro normalizaci šedé litiny je v rozmezí 885 až 925 °C. Austenitizační teplota má značný efekt na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti litiny po provedení normalizace. [2,4,5]

7.2 Kalení a popouštění

Kalení a popouštění šedé litiny se provádí k zlepšení mechanických vlastností a odolnosti proti otěru. Tepelně zpracovaná šedá litina má přibližně 5x větší odolnost proti otěru. Kalení v peci nebo v solné lázni může být použito na mnoho typů litiny, může být také použito kalení plamenem nebo indukci. Nelegované šedé litiny musí být austenitizovány po delší dobu aby se austenit nasýtil uhlíkem. S prodlužujícím se časem austenitizace je více uhlíku rozpuštěno v austenitu a tvrdost po kalení stoupá. Kalení probíhá v jednotlivých fázích, které jsou popsány níže. [2,4,5]

7.2.1 Austenitizace

V kalitelné šedé litině je odlitek ohříván na teplotu, která zajistí formování austenitu, výdrž na teplotě dokud se rozpustí určité množství uhlíku a pak následuje kalení, při vhodné rychlosti ochlazování. Teplota, na kterou musí být odlitek ohřán je určená transformačním rozsahem dané šedé litiny. Rovnice k určení transformační teploty A1 je pro nelegovanou šedou litinu dána: $730 + 28 \times (\%Si) - 25 \times (\%Mn)$. V praxi se volí teplota austenitizace při teplotách 95 °C nad vypočtenou teplotu, pro zajištění plné austenitizace odlitku. Překročení těchto doporučených teplot se nedoporučuje, protože se zvyšuje riziko praskání a deformace součásti po kalení. Doporučuje se odlitek na teplotu austenitizace ohřívát stupňovitě aby se předešlo vzniku trhlin. První teplota se volí v okolí teploty žihání pro odstranění zbytkového napětí cca 595 – 650 °C, tento ohřev se volí pozvolný. Pak se doporučuje ohřev na teplotu austenitizace, který již může být rychlejší. [2,4]

7.2.2 Kalení

Kalení do oleje je nejpoužívanější pro odlitky z šedé litiny, rovněž je možné používat pro některé litiny kalení na vzduchu. Nelegované nebo nízkolegované šedé litiny nemohou být kaleny na vzduchu, protože chlazení je pomalé pro vznik martenzitické struktury. Pro vysokolegované šedé litiny je ale chlazení na vzduch dostatečné. Protože jsou kalené odlitky při pokojové teplotě náchylné k prasklinám vyjmají se z kalicí lázně při teplotách okolo 150 °C a jsou ihned popuštěny. [2,4]

7.2.3 Popouštění

Po kalení jsou odlitky většinou popuštěny při teplotách pod teplotou transformace, výdrž je 1 h na každý palec nejtlustší stěny odlitku. [2,4]

7.2.4 Izotermické kalení

Při izotermickém kalení šedé litiny je potřeba ohřát odlitek na austenitizační teploty jako při běžném kalení. Teploty, na které se pro austenitizaci ohřívá, jsou v rozsahu 840 – 900 °C. Čas výdrže na teplotě austenitizace závisí na tvaru a velikosti odlitku. Odlitek je kalen z austenitizační teploty do vyhřáté vany s olejem nebo se solí, kde je odlitek držen na konstantní teplotě dokud se izotermická transformace austenitu nedokončí. Teplota pro izotermickou transformaci se volí v rozsahu 230 až 290 °C. Čas výdrže na izotermické teplotě závisí na velikosti odlitku a jeho chemickém složení. Efekt chemického složení na čas výdrže může být výrazný, protože legury jako nikl, chrom a molybden prodlužují časy potřebné po izotermickou transformaci. Izotermická teplota se volí mezi perlitickým rozsahem a nad martenzitickým rozsahem a struktura je jehlicovitý nebo bainitický ferit a rozdílné množství austenitu v závislosti na transformační teplotě. [2,4]

7.2.5 Povrchové kalení

7.2.5.1 Kalení plamenem

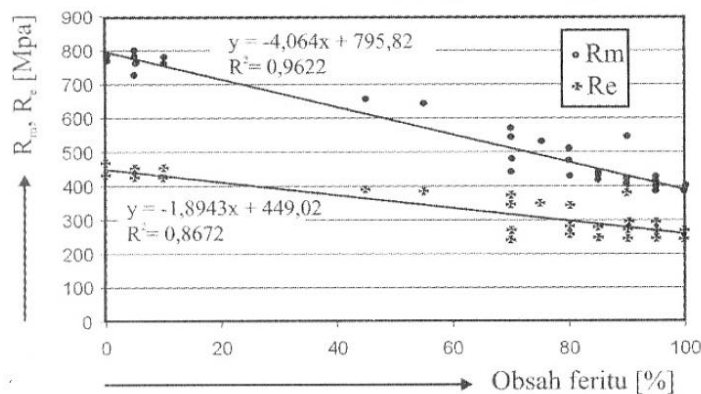
Kalení plamenem je metoda povrchového kalení, která se u šedých litin pro povrchové kalení používá nejčastěji. Po kalení plamenem je odlitek z šedé litiny tvořen tvrdou vnější vrstvou martenzitu s odolností proti otěru a jádro z měkčí šedé litiny, která během tepelného zpracování nepřekročila transformační teplotu A_1 . Všechny litiny ať už legované nebo nelegované mohou být žihány plamenem.

7.2.5.2 Indukční kalení

Odlitky z šedé litiny mohou být povrchově kaleny indukci v případě, že bude velká sériovost a vyplatí se investice do induktorů a zařízení pro indukční kalení. Je doporučeno pro šedou litinu použít krátkého procesu, který jde zajistit pomocí této technologie. Ohřívání odlitků s nízkým obsahem uhlíku na vysoké teploty kalení po dlouhé časy může způsobit rozklad některého volného grafitu, ale také to může způsobit vznik velkého množství zbytkového austenitu v povrchové vrstvě. Doporučená minimální teplota pro šedou litinu je 870 – 925 °C. Deformace po indukčním kalení je menší než při kalení v peci za stejných podmínek. Pro kalení tenkých součástí není deformace problémem, pokud tloušťka kalení není tenčí než 20% z tloušťky stěny odlitku. [4]

8 Litiny s kuličkovým grafitem (LKG)

Litiny s kuličkovým grafitem se vyznačují sférickou formou vyloučeného grafitu. Neočkovaná litina s kuličkovým grafitem má sklon k metastabilnímu tuhnutí. Při vhodné vyloučeném grafitu mají litiny s kuličkovým grafitem pevnostní vlastnosti obvykle vyšší než oceli se stejnou strukturou matrice. Struktura matrice má rozhodující vliv na mechanické vlastnosti litiny. Matrice může být u nelegovaných litin v licím stavu feritická, feriticko-perlitická, a perlitická. S rostoucím obsahem perlitu roste pevnost a tvrdost a klesají plastické vlastnosti a houževnatost. S rostoucím procentem uhlíku mírně klesají, při stejné struktuře matrice, pevnostní a plastické vlastnosti litiny. Vliv struktury matrice na pevnostní a plastické vlastnosti je uveden na obrázku:



Obrázek 8 – Vliv obsahu feritu v matrici litiny na pevnost litiny [2]

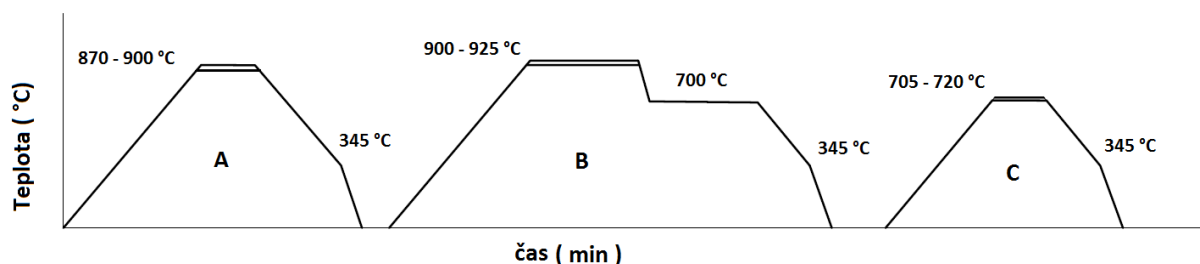
Křemík je v litinách nezbytný pro dosažení požadované struktury již v licím stavu. Křemík substitučně zpevňuje ferit a tím zvyšuje jeho mez kluzu a mez pevnosti. Současně však způsobuje pokles houževnatosti a zvýšení tranzitní teploty. Významný je i vliv křemíku na tepelnou vodivost, kterou snižuje. Podobně jako v litině s lupínkovým grafitem je i v litině s kuličkovým grafitem nežádoucí vyloučení karbidů. U litin s kuličkovým grafitem a vyšší pevností se používají perlitotvorné prvky nejčastěji Cu a Sn, které v litinách netvoří karbidy. V litinách s kuličkovým grafitem se obvykle sleduje obsah uhlíku a křemíku. [4]

9 Tepelné zpracování tvárné litiny

Některé tepelné zpracování je v principu podobné jako u šedé litiny. Na obrázku jsou znázorněny jednotlivé ochlazovací časy pro jednotlivé tepelné zpracování a je naznačeno jaká struktura se bude v litině vytvářet.

9.1 Žihání tvárné litiny

Pokud je požadována maximální houževnatost, dobrá obrobiteľnosť jsou odlitky z tvárné litiny tzv. plně vyžihány. Mikrostruktura je pouze feritická bez obsahu perlitu. Uhlík, který v litině je ve formě grafitických útvarů. Doporučené parametry pro žihání tvárné litiny jsou uvedeny níže:



Obrázek 9 – přehled režimů tepelného zpracování pro feritizační žihání tvárné litiny

- Průběh tepelného zpracování dle režimu A (obrázek č.). Jedná se o doporučený režim tepelného zpracování pro nelegovanou litinu s obsahem 2 až 3 % křemíku bez eutektických karbidů. Výdrž na žihací teplotě je 1 hodinu na každý palec tloušťky (25 mm). Ochlazování v peci 55 °C za hodinu do 345 °C pak ochlazení na vzduchu.
- Průběh tepelného zpracování dle režimu B (obrázek č.). Jedná se o doporučený režim tepelného zpracování pro litinu s obsahem karbidů: Výdrž na teplotě je minimálně 2 hodiny. Ochlazování v peci rychlostí 110 °C za hodinu do 700 °C, výdrž 2 hodiny na této teplotě a ochlazení 55°C za hodinu do 345 °C pak ochlazení na vzduchu.
- Průběh tepelného zpracování dle režimu B (obrázek č.). Jedná se o podkritické žihání pro převod perlitu na ferit. Výdrž na žihací teplotě 1 hodinu na každý palec tloušťky součásti (25mm). Ochlazování 55°C za hodinu do 345 °C následně ochlazení na vzduchu. [4]

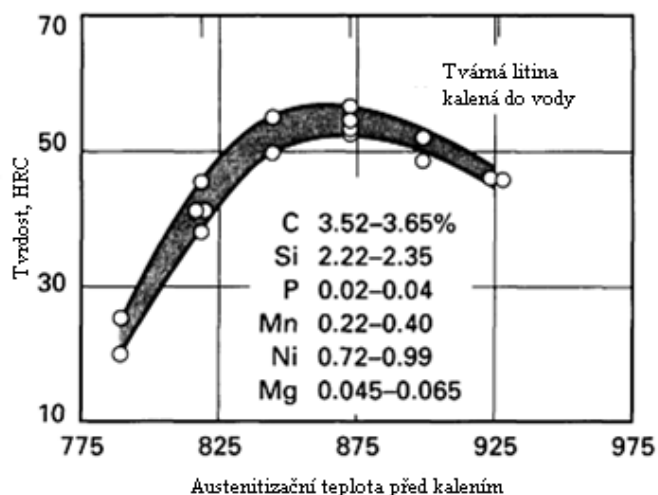
9.1.1 Normalizační žihání tvárné litiny

Normalizační žihání může způsobit zvýšení pevnosti. Mikrostruktura dosažená normalizačním žiháním závisí na způsobu ochlazování odlitku. Při normalizačním žihání vzniká homogenní struktura jemného perlitu, pokud v litině není vysoké množství křemíku a pokud má přiměřený obsah manganu (0,3 až 0,5 % nebo vyšší). Hmotnější odlitky, které vyžadují normalizační žihání a obsahují legující prvky jako například nikl, molybden a více manganu pro větší prokalitelnost k zajištění plně perlitické struktury po normalizačním žihání. Normalizační teplota je obvykle mezi 870 až 940°C. Standartní čas výdrže na normalizační teplotě je 1 hodina pro jeden palec součásti (25 mm) nebo minimálně 1 hodina je dostačující pro některé odlitky. Delší časy výdrže mohou být použity pro litinu s legujícími prvky, které zpomalují difúzi uhlíku do austenitu. Normalizační žihání může být v některých případech doplněno popouštěním nebo žiháním na snížení zbytkového napětí, které vzniká při

ochlazování odlitků na vzduchu. Popouštění po normalizačním žhání se také používá pro zajištění houževnatosti a pevnosti materiálu. Efekt popouštění na tvrdost a pevnostní vlastnosti závisí na složení litiny a tvrdosti, která byla dosažena po normalizaci. Popouštění se obvykle skládá z ohřátí součásti a teplotu 425 °C až 650 °C a výdrže 1 hodinu na každý palec (25 mm) průřezu součásti. [2,4]

9.2 Kalení a popouštění tvárné litiny

Austenitizační teplota 845 až 925 °C se běžně používá pro austenitizaci odlitků před kalením a popouštěním. Jako kalicí médium je preferován olej pro minimalizaci zbytkových napětí a trhlin po kalení. Tvarově složité odlitky mohou být kaleny do oleje při teplotě 80 až 100 °C. pro minimalizaci trhlin. Vliv austenitizační teploty na výslednou tvrdost je přibližně ukázán na obrázku, kdy byla použita krychle 13 mm a kalena do vody z různých austenitizačních teplot. [2,4]



Obrázek 10 – vliv austenitizační teploty na tvrdost litiny po zakalení [4]

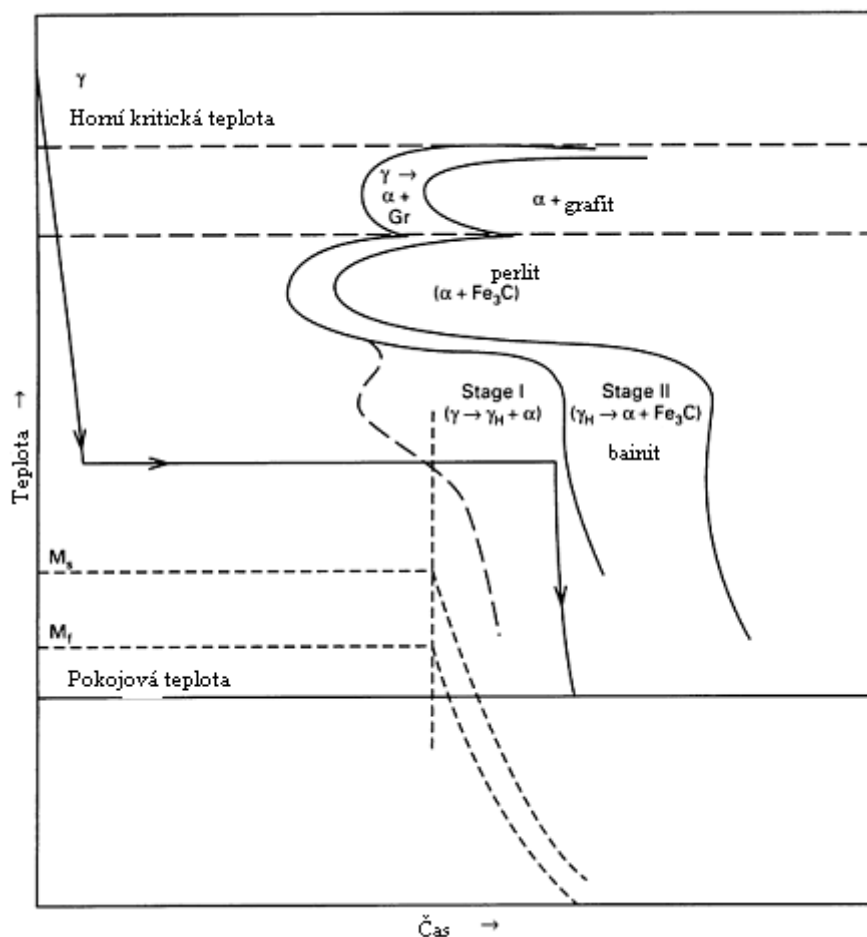
Tento obrázek ukazuje, že největší tvrdosti (55 až 57 HRC) dosahujeme daná litina při austenitizační teplotě v rozmezí 845 až 870 °C. Při teplotách nad 870 °C velký obsah uhlíku v základním kovu způsobí větší procento zbytkového austenitu a proto dojde ke snížení tvrdosti.

Odlitky mohou být popouštěny ihned po zakalení pro odstranění napětí vzniklé při kalení. Teplota popouštění je závislá na tvrdosti, které jsme po kalení dosáhli, obsahu legur a času popouštění. Popouštění v rozsahu 425 °C až 600 °C má za následek pokles tvrdosti. Popouštění tvárné litiny při uvedených teplotách je proces, který se skládá ze dvou stádií. Při prvním stádiu se vytváří drobné karbidy jako je tomu u oceli. Při druhém stádiu probíhá nukleace a růst malých sekundárních grafitických částic na úkor karbidů. Vlivem sekundární grafitizace dojde ke snížení tvrdosti a také se snižuje pevnost v tahu a únavová pevnost. Protože obsah legur má vliv na sekundární grafitizaci každá litina má svůj rozsah teplot pro popouštění. [4]

9.2.1 Izotermické kalení

Když je požadována optimální pevnost a tažnost litiny, může se použít izotermické kalení. Základní kov s izotermicky kaleným stavem má lepší pevnost a tažnost než je možné u jiných druhů tvárných litin. Dosažení těchto vlastností si ale vyžaduje pečlivost pro volbu teploty a času výdrže při austenitizaci a pak při izotermickém kalení. Mangan a molybden mají nejsilnější vliv na prokalitelnost ale také se budou segregovat a usazovat v mezibuněčných oblastech odlitku a podporovat vznik karbidů železa nebo karbidů legujících prvků. Zatímco nikl a měď nemají žádný vliv na prokalitelnost ale segregují se grafitických do nodulí a nevytváří škodlivé karbidy.

Prvek, který nejvíce určuje obsah uhlíku v tvárné litině je křemík, jak roste obsah křemíku pro danou austenitizační teplotu, roste obsah uhlíku v základním kovu. Běžná austenitizační teplota je v rozsahu 845 až 925°C a výdrž na teplotě je přibližně 2 hodiny. Vyšší austenitizační teploty s vyšším obsahem uhlíku zajistí zvýšení prokalitelnosti což má za následek pomalou izotermickou transformaci austenitu. Teplota izotermického kalení primárně určuje finální mikrostrukturu a tedy i tvrdost a pevnost izotermicky kaleného odlitku. [4]



Obrázek 11 – průběh izotermického kalení pro tvárnou litinu [4]

9.2.2 Povrchové kalení tvárné litiny

Tvárnou litinu je možné povrchové kalit plamenem, indukci nebo laserem. Protože je při tomto postupu krátký čas ohřátí, jsou vhodné spíše litiny s perlitickou strukturou. Litiny bez volného feritu ve struktuře reagují téměř okamžitě na ohřev plamenem nebo indukci a vyžadují malou výdrž na austenitizační teplotě k tomu aby byly plně prokaleny. Se středním obsahem volného feritu mohou mít také dostatečnou tvrdost po zakalení, ale zcela feritické matrice typické pro litiny s velkou tažností vyžadují výdrž při teplotě 870 °C aby byly plně prokaleny. Základní struktura jemného perlitu, která je typická po normalizačním žíhání je nejvhodnější pro povrchové kalení a poskytuje dobrou vazbu na tvrzené jádro. Při správné technice a regulaci teploty v rozmezí 845 až 900°C je tvrdost povrchu tvárné litiny s rozdílnou základní mikrostrukturou následující

- Tvárná litina s plně feritickou strukturou, kalená vodou - 35 až 45 HRC.
- Tvárná litina s mikrostrukturou více feritickou (částečně perlitickou) vyžihána na snížení zbytkového napětí před ohřevem, samokalitelná – 40 až 50 HRC
- Tvárná litina s mikrostrukturou více feritickou (částečně perlitickou) vyžihána na snížení zbytkového napětí před ohřevem, kalena do vody – 50 – 55 HRC
- Tvárná litina převážně perlitická – vyžihána na snížení zbytkového napětí, kalená do vody – 58 až 62 HRC.

Při povrchové kalení litiny v odlitém stavu je nezbytný minimální obsah 50 % perlitu v mikrostruktuře. Struktury obsahující méně perlitu mohou být povrchově kaleny s použitím vyšších teplot, ale hrozí riziko vzniku zbytkového austenitu, formování ledeburitu a poškození povrchu. Struktura s více než 50 % perlitu může mít sníženu teplotu kalení na 900 až 925 °C. [4,5]

9.3 Žíhání na snížení zbytkového napětí tvárné litiny

Odlitky z tvárné litiny jsou žihány na snížení zbytkového napětí při teplotách 510 – 610°C. teploty v dolním rozsahu jsou dostatečné pro mnohé odlitky. Teploty v horním rozsahu by měly teoreticky odstranit všechno zbytkové napětí, ale budou mít také vliv na snížení tvrdosti a pevnosti v tahu. Doporučené rozsahy pro žíhání na snížení zbytkového napětí pro různé druhy tvárné litiny jsou:

- Nelegovaná: 510 až 565°C
- Nízkolegovaná: 565 až 595 °C
- Vyskolegovaná: 595 až 650 °C
- Austenitická: 620 až 675 °C

Ochlazování by nemělo do odlitku vnášet další napětí. Odlitky by měli být ochlazovány v peci do cca 300°C 290 °C a pak již je možné ochlazování na vzduchu. [2,4]

9.4 Nové trendy v tepelném zpracování litin

Vlastnosti litiny po tepelném zpracování můžeme ovlivnit ohřevem a ochlazováním odlitku. V posledních letech se začalo používat tepelné zpracování s kryogenním zpracováním. Tento postup není nový, pro nástrojové oceli se tento způsob začal používat již po druhé světové válce. V současné době se zkoumá vliv podchlazení materiálu na další materiály, jako jsou

litiny, měď a hliník. Kryogenní proces lze rozdělit dle aplikované teploty na mělké zmražení (do teploty okolo -80°C) a hluboké zmražení (teplota okolo -190°C). [4,7]

9.4.1 Zpracování litin za nízkých teplot

Při zpracování za nízkých teplot je možné v materiálech pozorovat tyto změny.

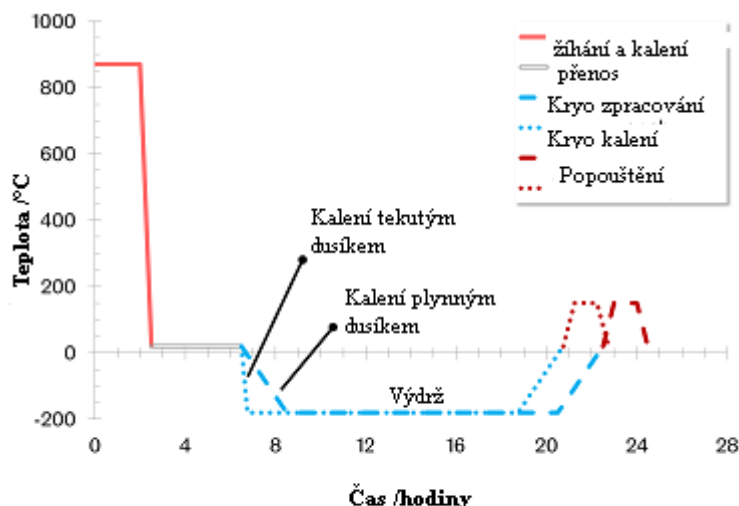
- Snížení zbytkového napětí v materiálu – tento jev vykazují všechny materiály
- Zjemnění krystalické struktury – tento jev vykazují všechny materiály
- Precipitace jemných karbidů eta – jen u ocelí a litin s karbidotvornými prvky
- Odstranění zbytkového austenitu a jeho přetransformace na martenzit. – jen u kalených materiálů. [4,7]

Zpracování litiny s mělkým zmražením (okolo -80°C)

Při zpracování s mělkým zmražením je zajištěno zlepšení houževnatosti a rozměrová a strukturní stabilita. Zlepšená odolnost proti otěru a snížení zbytkového napětí. Obecně se výdrž na teplot pod nulou volí okolo 1 hodiny pro každý palec průřezu odlitku. Po kalení zůstává v litině určité množství zbytkového austenitu a je žádoucí tento austenit před popouštěním transformovat na martenzit. Kalení s následným zmražením bez velké výdrže na pokojové teplotě je nejlepším řešením pro maximální transformaci zbytkového martenzitu. V některých případech se ještě může objevit praskání odlitků. Proto se ve většině případů doporučuje ještě po zmražení provést ihned popouštění. Zpracování litiny se zmražením se používá na odstranění zbytkového napětí, pro vyrovnání drobných strukturních rozdílů a pro přeměnu zbytkového austenitu na martenzit. [7,8]

9.4.2 Hluboké zmražení (okolo -195°C)

Typické hluboké zmražení (kryogenní zpracování) se skládá z pomalého ochlazování cca $2,5^{\circ}\text{C}$ za minutu. Ochlazování probíhá z pokojové teploty až do teploty tekutého dusíku (cca -195°C). Jakmile materiál dosáhne přibližně -190°C je odlitek držen na této teplotě, po dobu přibližně 24 hodin. Na konci cyklu se materiál vyjme z kryogenní komory a ohřívá se na pokojovou teplotu na vzduchu. Na obrázku je znázorněn průběh teploty během kryogenního zpracování. V průběhu ochlazování a cyklu v kryo komoře je teplota kontrolována a teplotní šok materiálu je nežádoucí. Kryogenní zpracování litiny je zatím nepříliš prozkoumáno. Prováděli se testy na izotermicky kalené tvárné litině, která obsahuje po kalení určité množství zbytkového austenitu a také množství zbytkového napětí po kalení. Nejdůležitější je ale jev precipitačního vytvrzení u litiny. Vytvrzení probíhá precipitací submikroskopických karbidů do mřížky. Zkoušky na izotermicky kalené litině dokazují, že na takto zpracované litině stoupá tvrdost a hlavně se zvětšuje odolnost proti otěru v některých případech až 5x, záleží na tvrdosti po kalení. Cyklus pro kryogenní zpracování je uvedený na obrázku. Po kryogenním zpracování se ještě doporučuje provést popouštění. [7,8,4]



Obrázek 12 – průběh tepelného kryogenního tepelného zpracování [4]

9.4.3 Zařízení pro tepelné zpracování za nízkých teplot

9.4.3.1 Vybavení pro zmrazování

Pro tento typ zpracování se používají mechanické mrazicí jednotky s cirkulací vzduchu. Pro teploty zmrazování okolo $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ je zařízení podobné mrazáku, který se běžně používá v domácnostech. Pro větší teploty podchlazení okolo $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ se většinou používá suchý led umístěný v izolovaném zařízení. Okolo suchého ledu a v zařízení je zajištěna cirkulace vzduchu. [7,4]

9.4.3.2 Zařízení pro kryogenní zpracování

Systém tekutého dusíku byl osvojen pro vytvoření kryogenních teplot. Dva systémy jsou popsány níže.

Systém s výměníkem, kde tekutý dusík se čerpá spirálou výměníku a ochlazuje vzduch okolo spirály. Ochlazený vzduch z výměníku je vháněn do komory, kde je pomocí ventilátorů zajištěno jeho rovnoměrné rozptýlení. V některých verzích je ochlazování ještě podpořeno vstřikováním tekutého dusíku přímo do komory.

Systém s přímým vstřikováním tekutého dusíku přímo do komory. U tohoto systému se tekutý dusík vstříkuje přímo do komory. Tekutý dusík je po vstříknutí do komory přes atomární trysku přeměněn na studený plyn. Plyn je možné přivádět k výrobku z jedné, dvou nebo tří stran. Velmi studený plynný dusík se rovnoměrně rozptýlí po komoře vlivem proudění vzduchu, které zajistí ventilátor. V tomto systému spotřebovaný tekutý dusík není možné využít jako pecní atmosféru. Design zařízení je vymyšlen tak aby se tekutý dusík nevstříkl přímo na součást (je možné tak předejít teplotním šokům). [7,4]

9.4.3.3 Kryogenní komory

Kryogenní komory nebo kryo komory jsou dostupné v různých velikostech a konfiguracích. Komory jsou navrženy podle vsázky, ale jsou dva základní typy zařízení, plněné předem nebo plněné horem. Jako všechny zařízení pro tepelné zpracování jsou navrženy podle objemu a složení součástí. Příklad horem a předem plněné kryo komory jsou na obrázcích.



Obrázek 13 – Kryo komora s horním plněním [7]



Obrázek 14 – Kryo komora s předním plněním.[7]

11. Experimentální program

Na začátku experimentálního programu byl dodaný zkušební materiál od firmy ARC – Heating. Materiál použitý v experimentu je tvárná litina GJS – 600 – 3C. Spolu s materiálem byly dodány požadavky na vlastnosti materiálu po režimu tepelného zpracování.

11.1 Cíl experimentu

Cílem experimentu je upravit tepelným zpracováním vlastnosti tvárné litiny GJS – 600 – 3C dle požadavků zákazníka:

- Poměr feritu : perlit – **(60% – 75%) : (40% – 25%)**
- Třída grafitu dle ČSN EN ISO945 -1: **V – VI**
- Tvrdost HBW **165 – 180**

Pro dosažení daných požadavků bylo navrženo několik režimů tepelného zpracování, které jsou podrobně popsány v kapitole 13 (Tepelné zpracování tvárné litiny).

12. Charakteristika experimentální materiálu

Materiál použitý v experimentu je tvárná litina GJS 600 – 3C, která byla vyrobena metodou kontinuálního lití. Matrice této litiny je perliticko – feritická a je tvořena více než 50 % perlitu. Tato litina se dodává tepelně nezpracovaná po odlití nebo je možné jí normalizačně žíhat pro dosažení perlitické struktury. Daná litina neobsahuje žádné výrazné množství legujících prvků. Obsah jednotlivých prvků v experimentálním materiálu je uveden v kapitole 12.2.

12.1 Výroba tyče kontinuálním litím

Tyče, které byly použity v experimentu, se vyrábí metodou kontinuálního lití. Pro tvárnou litinu se používá horizontální kontinuální linka. Schéma linky je zobrazeno na obrázku 15. Do dávkovací pece se nalije tekutý kov z lící pánve. Z dávkovací pece je tekutý kov protlačen přes vodou chlazenou grafitovou formu (pozice 4). Po průchodu grafitovou formou pokračuje tyč po válečkové dráze a postupně je ochlazována na vzduchu. V rýsovací jednotce se označí tyč v místě, kde má být oddělena a v dělicím stroji dojde v tomto místě k jejímu naříznutí. V dolomovací jednotce se tyč dolomí a následně se přenese do transportní bedny.

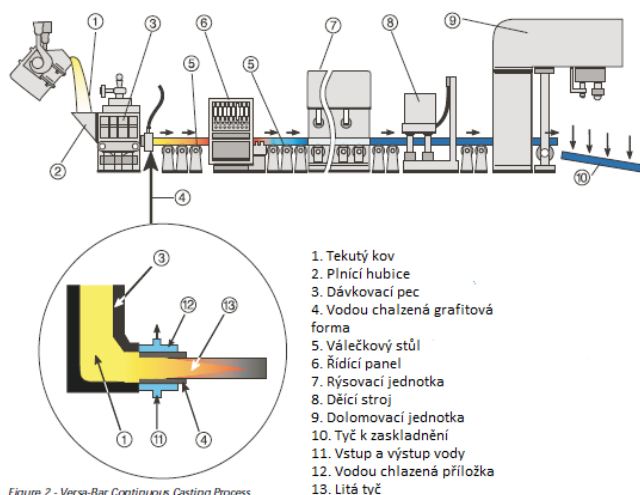


Figure 2 - Versa-Bar Continuous Casting Process

Obrázek 15 – Schéma linky na horizontální kontinuální lití [9]

12.2 Vlastnosti dodaného materiálu

K dodanému materiálu byla přiložena zkušební zpráva dle EN 10204 – 2.2 (originál zkušební zprávy viz příloha č. 1). Vlastnosti dodaného materiálu, dle zkušební zprávy jsou:

Chemické složení:

C	Si	Mn	S	P
3,40 – 3,70	2,50 – 3,00	0,10 – 0,30	0,005 – 0,020	0,015 – 0,080

Mechanické vlastnosti (pro průměr 61- 120 mm):

R _{p0,2} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	Prodloužení (%)	Rozsah tvrdosti (HB)
360	600	2,0	200 – 260

Mikrostruktura:

Tvar grafitu	Perlit (%)
V a VI	více než 50

13. Tepelné zpracování tvárné litiny

Pro experiment se použily dvě tyče o průměru 90 mm a délce 325 mm.



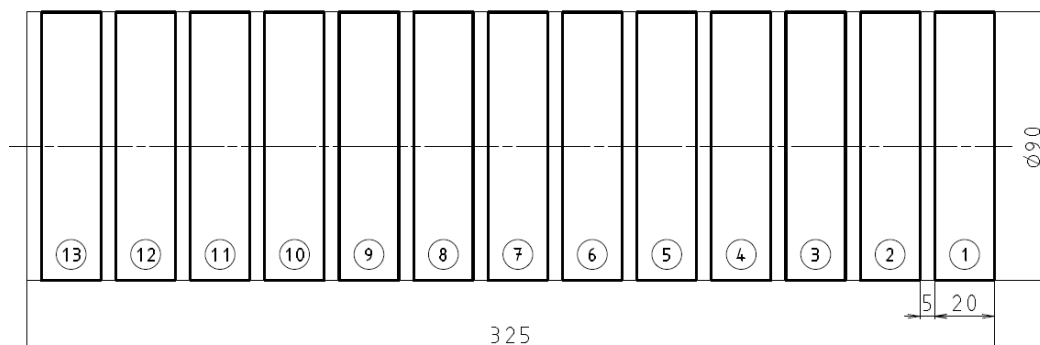
Obrázek 16 – Připravené vzorky o průměru 90 mm pro tepelné zpracování V popředí vzorek o tloušťce 20 mm a v pozadí vzorek o délce 140 mm.

13.1 Příprava vzorků pro tepelné zpracování

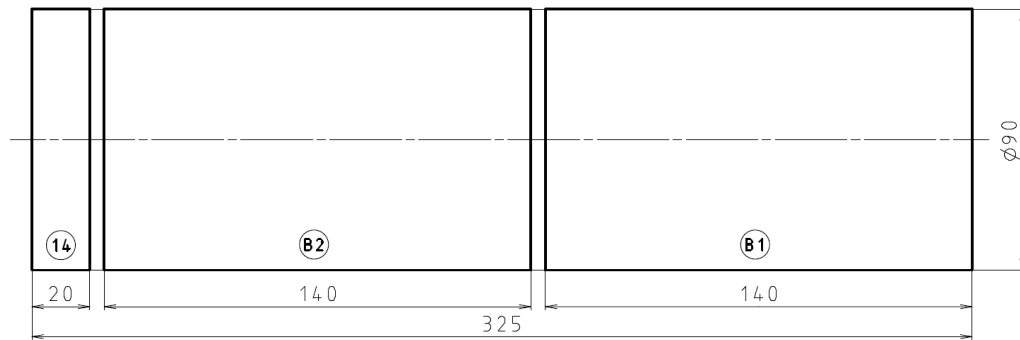
Jednotlivé tyče byly označeny písmeny A a B.

Tyč A byla rozřezána na 13 vzorků. Vzorky č. 1 – 12 byly použity pro zkoušky jednotlivých režimů tepelného zpracování. Vzorek č. 13 byl použit pro kontrolu výchozího stavu materiálu. Rozřez tyče A viz obrázek 17.

Tyč B byla rozřezána na 3 vzorky. Vzorky č. B1, B2, které se použily pro ověření nejvhodnějšího režimu tepelného zpracování. Vzorek č. 14, který se použil pro kontrolu výchozího stavu materiálu. Rozřez tyče B viz obrázek 18.



Obrázek 17 - Rozřez tyče A na jednotlivé vzorky

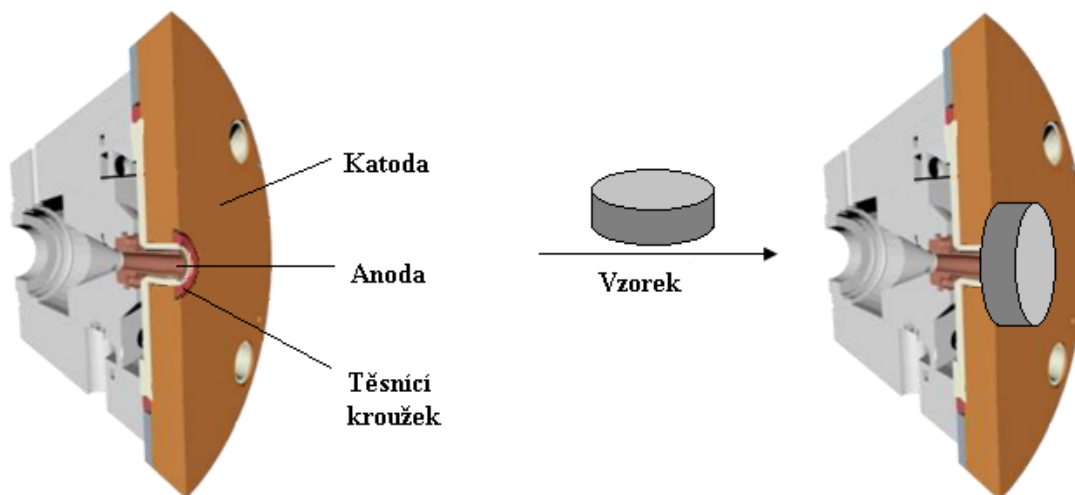


Obrázek 18 - Rozřez tyče B na jednotlivé vzorky

13.2 Kontrola dodaného stavu materiálu

13.2.1 Chemické složení materiálu metodou GDOS

Pro ověření, zda materiál chemicky odpovídá litině GJS 600 – 3C se použila analýza chemického složení metodou GDOS.

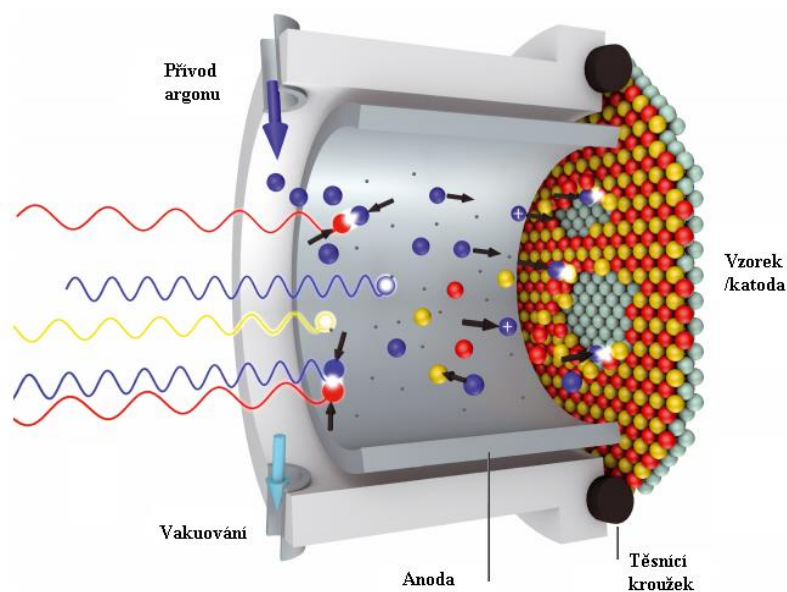


Obrázek 19 – Umístění vzorku a schéma lampy [10]

13.2.1.1 Princip metody GDOS

Zkratka GDOS znamená je plným anglickým názvem Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy. Do češtiny se překládá například jako Optická emisní spektroskopie buzená doutnavým výbojem. Jedná se o modifikovanou metodu optické emisní spektroskopie, která používá Grimmovu lampu. Analyzovaný vzorek je umístěn na prstenci lampy do zdroje doutnavého výboje tak, že je v blízkém kontaktu s katodou, takže se sám stane katodou. Prostor uvnitř lampy je odčerpán a naplněn inertním plynem o tlaku 300 – 1300 Pa. Mezi anodu a katodu je přivedeno vysoké stejnosměrné napětí. Vlivem stejnosměrného proudu

mezi elektrodami se pohybují elektrony z povrchu vzorku směrem k anodě a získávají kinetickou energii. Vlivem neelastické kolize elektrony předají svoji kinetickou energii atomům argonu. Tyto srážky způsobí, že se argon rozštěpí na kationt argonu a další elektrony. Tento lavinový efekt způsobí vzrůst hustoty nosného plynu a způsobí, že původně izolační plyn argon se stává vodivým. Výsledný mix neutrálních atomů argonu a nositelů náboje (kationty argonu a elektrony) jsou nazývány plazmou. Ostřelování povrchu vzorku kationty argonu vyrazí ze vzorku několik jeho atomů, tento proces nazývá odprašování. Vyražené atomy ze vzorku difundují do plazmy, kde naráží do vysoko energetických elektronů. Během kolizí těchto kolizí dochází k excitaci atomů. Při návratu těchto atomů zpět do základního stavu je energie, kterou absorbovali uvolněna ve formě charakteristického záření. Toto záření je pro každý prvek unikátní. Záření vstupuje vstupní šěrbinou do optického spektrometru, kde dopadá na konkávní mřížku a je rozptýleno na jednotlivé spektrální složky. Tyto složky jsou zaznamenány detekčním systémem, kde intenzita jednotlivých paprsků je úměrná koncentraci odpovídajícího prvku v plazmě. Tato metoda je schopná analyzovat i průběh chemického složení v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Kdy vzdálenost od povrchu se stanovuje z doby odprašování. Uvedený popis metody s použitím stejnosměrného proudu se používá pro elektricky vodivé materiály. Pro nevodivé materiály je nutný vysokofrekvenční výboj.



Obrázek 20 – Schéma odprašování jednotlivých atomů ze vzorku při metodě GDOS[10]

13.2.1.2 Analýza chemického složení metodou GDOS na vzorcích

Pro zjištění chemického složení materiálu v dodaném stavu byla provedena analýza chemického složení metodou GDOS na vzorku č. 13.

Chemické složení dle GDOS analýzy, vzorek č. 13 – výchozí stav:

C	Si	Mn	S	P
2,74	2,8	0,158	0,0025	0,0391

Výsledky měření chemického složení metodou GDOS odpovídají zkušební zprávě od dodavatele. Obsah uhlíku je ale nižší než je uvedeno ve zprávě od dodavatele. Obsah uhlíku

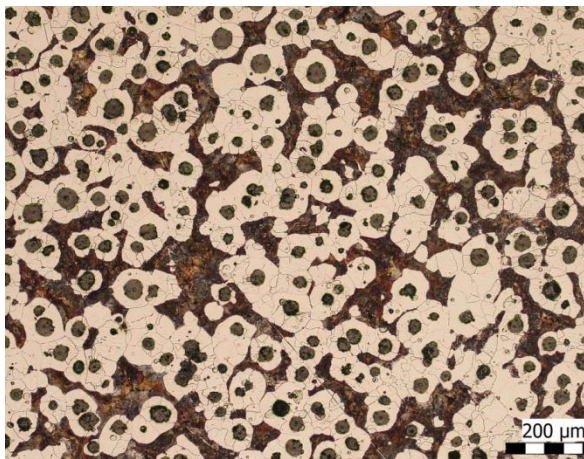
dle zkušební zprávy by měl být 3,4 – 3,7 % uhlíku. Zkušební zpráva je přiložena v příloze č. 1.

13.2.2 Kontrola tvrdosti a mikrostruktury

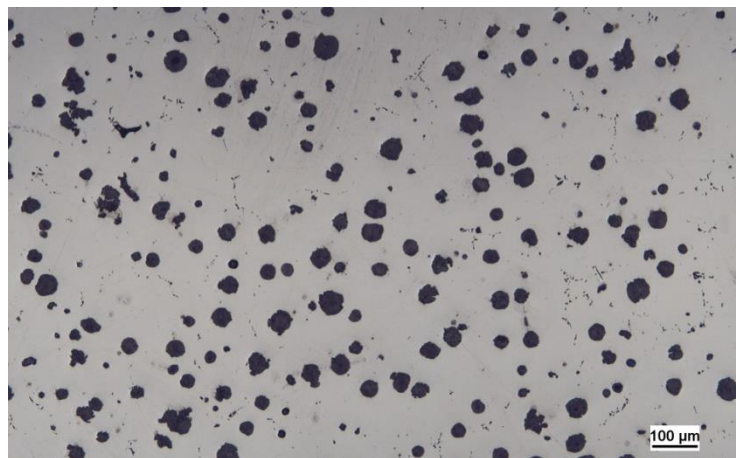
Pro kontrolu tvrdosti a mikrostruktury ve výchozím stavu se použil vzorek č.13 z tyče A a vzorek č. 14 z tyče B. Vzorky byly odebrány z každé tyče proto, že na tyčích nebyla značena tavba materiálu, ani jiné údaje a je možné riziko, že se můžou vlastnosti lišit. Zkoušky tvrdosti a mikrostruktury byly vyhodnoceny metodami, které jsou blíže rozebrány v kapitole 14.

13.2.2.1 Vzorek č. 13 – tyč A – výchozí stav

Vzorek č. 13 byl odebrán z tyče A, která se rozřezala pro účely vyzkoušení různých režimů tepelného zpracování.



Obrázek 21 – zvětšeno 100x leptáno – ferit, perlit, grafit

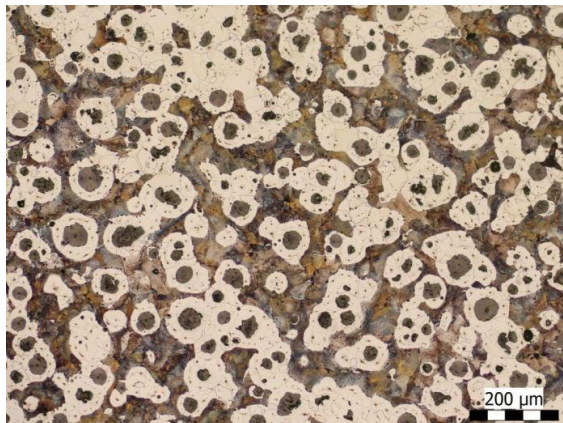


Obrázek 22 – zvětšeno 100x neleptáno – grafit

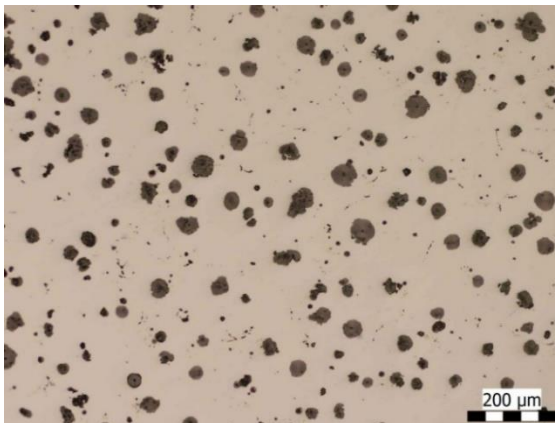
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	69	31
Hodnocení pomocí etalonů	65	35
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	76
	6	556
	7	480
	8	2608
Tvar grafitu	I	3
	II	4
	III	43
	IV	94
	V	520
	VI	3063
Tvrdost HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	198 ± 2,5	bez TZ

13.2.2.2 vzorek č. 14 – tyč B – výchozí stav

Vzorek č. 14 byl odříznut z tyče B, která byla určena pro ověření nevhodnějšího režimu tepelného zpracování.



Obrázek 23 – zvětšeno 100x, leptáno - perlit, ferit, grafit



Obrázek 24 – zvětšeno 100x, neleptáno - grafit

Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	46	54
Hodnocení pomocí etalonů	40	60
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	63
	6	571
	7	486
	8	2480
Tvar grafitu	I	6
	II	4
	III	51
	IV	132
	V	540
	VI	2873
Tvrdość HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	215 ± 1,6	Bez TZ

13.2.2.3 Závěr z kontroly výchozího stavu materiálu

U vzorku č. 13 bylo naměřeno 33 % perlitu ve struktuře. Zkušební zpráva od dodavatele udává obsah perlitu více než 50 %. Tato změna struktury může být způsobena rozdílnou rychlostí ochlazování při výrobě tyče. Při pomalejším ochlazování tyče při výrobě se stihne více perlitu rozpustit, naopak při rychlejším ochlazování se perlit nestihá rozpouštět a je ve struktuře zachován ve větším množství. U vzorku č. 13 byla hodnota tvrdosti HBW $198 \pm 2,5$.

Vzorek č. 14 obsahuje 54 % perlitu a struktura litiny odpovídá údajům ze zkušební zprávy dodavatele. U vzorku č. 14 byla hodnota tvrdosti HBW $215 \pm 1,6$.

Tvrdość litiny v dodaném stavu by se měla pohybovat mezi 200 – 260 HBW. Rozdílná hodnota tvrdosti je dána jiným strukturním složením litiny. Čím více bude ve struktuře litiny perlitu, který je tvrdý, tím větší bude výsledná tvrdost litiny. Vzorek č. 14 obsahuje 54 % perlitu a proto je jeho tvrdost o 16 HBW větší než u vzorku č. 13.

Velikost grafitu je u vzorků č. 13 a č. 14 dle obrazové analýzy velikost 8, při hodnocení dle etalonů se pohybuje mezi velikostí 7 – 8. Grafit se vyskytuje převážně ve tvaru třídy VI.

13.3 Režimy tepelného zpracování

Základní principy feritizačního žihání tvárné litiny:

- **Žihání za podkritických teplot**

Teplota žihání se pohybuje v rozmezí 700 – 750 °C, kdy nedojde k překročení křivky A_1 (vlivem křemíku je křivka A_1 posunuta nahoru). Tento způsob žihání se používá pro litinu s nízkým obsahem legur a s nízkým výskytem karbidů v mikrostruktuře.

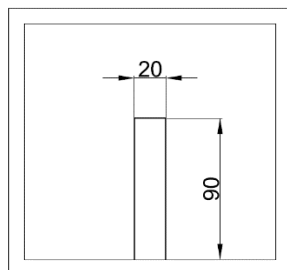
- **Žihání za nadkritických teplot**

Teplota žihání se pohybuje od 800 °C do 950 °C, při této teplotě dojde k austenitizaci. Následně se ochlazuje na teploty 700 – 750 °C a posléze se ochlazuje v peci na 500 – 350 °C pak již ochlazování na vzduchu. Nebo je možné ochlazovat rovnou z austenitizační teploty.

Pro experiment bylo zvoleno 10 různých režimů viz tabulka č. 1 a 2, které obsahují oba způsoby žihání na snížení tvrdosti s různými výdržemi a různými způsoby ochlazování vzorků. Podrobnější popis jednotlivých režimů tepelného zpracování viz kapitola 13.5.

13.4 Umístění vzorků v peci

Vzorky byly zpracovány v peci Nabertherm, model L 08/14. Pec má objem komory 8 litrů a maximální teplota, kterou lze v peci dosáhnout je 1400°C. Vzorky byly umísťovány do středu pece, poloha vzorku v peci viz obrázek 25. Umístění vzorku na výšku bylo z důvodu lepšího přístupu tepla ke vzorku. Tepelné zpracování se provádělo po jednom vzorku.



Obrázek 25 - Poloha vzorku v peci

13.5 Přehled navržených režimů tepelného zpracování

Pro experiment bylo navrženo 10 režimů tepelného zpracování. Přehled jednotlivých režimů je uveden v tabulce 1 a v tabulce 2. V tabulce 1 jsou uvedeny režimy tepelného zpracování pro vzorky č. 2 až 6. V tabulce 2 jsou uvedeny režimy tepelného zpracování pro vzorky č. 7 až 11. U jednotlivých režimů je uveden náčrt průběhu tepelného zpracování, rychlost ohřevu, výdrž na žíhací teplotě a rychlost ochlazování.

U vzorku č. 1 nebyl dodržen čas výdrže na žíhací teplotě, a proto byl z experimentu vyřazen. Místo vzorku č. 1 se provedl stejný režim tepelného zpracování na vzorku č. 6.

Vzorek č.2 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C a výdrž na žíhací teplotě byla 120 minut. Účelem tohoto režimu tepelného zpracování má být zjistit jak se změní tvrdost materiálu, pokud bude struktura litiny z větší části feritická.

Vzorky č. 3,4,5,6 byly vkládány do vyhřáté pece na 700 °C. Lišila se výdrž na žíhací teplotě. Cílem tohoto režimu tepelného zpracování bylo zjistit časovou závislost, jak rychle se perlit v litině rozpouští a vybrat nejvhodnější čas výdrže na žíhací teplotě.

Vzorek č. 7 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C, výdrž na žíhací teplotě byla 50 minut. Ochlazení vzorku bylo 50 °C /hod do 350 °C s následným ochlazením na vzduchu.

Vzorek č. 8 byl ohříván v peci rychlostí 50 °C/hod na 700 °C, výdrž na žíhací teplotě 30 minut a ochlazení rychlostí 50 °C/hod do 350 °C s následným ochlazením na vzduchu. Cílem režimů tepelného zpracování vzorků č. 7 a č. 8 bylo zjistit, jak se změní vlastnosti litiny díky změně rychlosti ohřevu a ochlazování.

U vzorků č. 9,10,11 byly použity režimy tepelného zpracování s teplotou žíhání 900 °C. Cílem bylo vyzkoušet vliv různých výdrží na austenitizační teplotě a různé rychlosti ochlazování.

Tabulka 1

Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
2		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	120 minut od vložení do pece
		ochlazování	Vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
3		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	30 minut od vložení do pece
		ochlazování	Vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
4		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	40 minut od vložení do pece
		ochlazování	Vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
5		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	50 minut od vložení do pece
		ochlazování	Vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
6		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	60 minut od vložení do pece
		ochlazování	Vzduch

Tabulka 2

Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
7		ohřev	rychlý, vkládáno do vyhřáté pece na 700 °C
		výdrž	50 minut od vložení do pece
		ochlazování	50 °C /hod do 350 °C, pak vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
8		ohřev	pomalý ohřev 50 °C /hod
		výdrž	30 minut
		ochlazování	50 °C /hod do 350 °C, pak vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
9		ohřev	pomalý ohřev 50 °C /hod
		výdrž	při 900 °C, 60 minut, při 700 °C, 30 minut
		ochlazování	mezi 900 °C - 700 °C 50°C/hod, ze 700 °C 50 °C /hod do 350 °C, pak vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
10		ohřev	pomalý ohřev 50 °C /hod
		výdrž	při 900 °C, 30 minut, při 700 °C, 30 minut
		ochlazování	Vzduch
Číslo vzorku	Náčrt průběhu tepelného zpracování	Režim TZ	
11		ohřev	pomalý ohřev 50 °C /hod
		výdrž	při 900 °C, 30 minut, při 700 °C, 30 minut
		ochlazování	mezi 900 °C - 700 °C 20°C/hod, ze 700 °C 50 °C /hod do 350 °C, pak vzduch

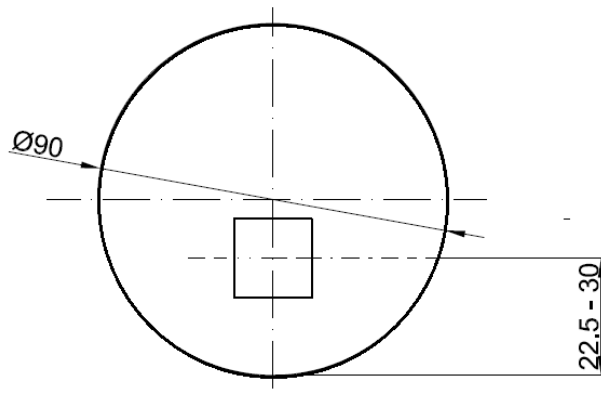
14. Vyhodnocení tepelného zpracování

Pro vyhodnocení výsledků tepelného zpracování bylo rozhodnuto použít následující zkoušky:

Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN EN ISO 945 -1	Kapitola 14.2
Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN 420461	Kapitola 14.3
Vyhodnocení poměru Ferit : Perlit dle ČSN 420461	Kapitola 14.4
Vyhodnocení poměru Ferit : Perlit mřížkovou metodou	Kapitola 14.5
Hodnocení tvrdosti dle Brinela dle EN ISO 6506 – 1	Kapitola 14.6

14.1 Odběr vzorků pro metalografický rozbor

Odběr vzorků pro metalografické hodnocení bylo provedeno v místech viz obrázek 26. Umístění vzorku je dáno z aplikovaných norem, které uvádějí místa pro odběr vzorků v 1/3 až 1/4 průměru součásti nebo její tloušťky. U použitých vzorků bylo zvoleno odebírat vzorky ve vzdálenosti 22,4 až 30 mm od povrchu součásti.



Obrázek 26 – Umístění vzorku pro metalografické hodnocení

14.2 Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN EN ISO 945 – 1

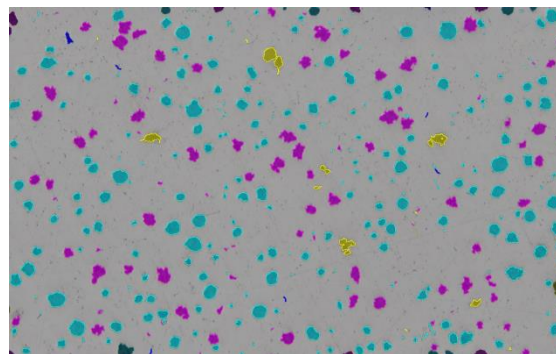
Tato norma využívá pro hodnocení velikosti grafitu a rozložení grafitu etalony mikrostruktury, které se porovnávají s výsledným snímkem mikrostruktury. Snímky mikrostruktury pro vyhodnocení musí být pořízeny při zvětšení 100x. Hodnocení pomocí etalonů je velmi subjektivní a je dobré, když ho provádí jedna osoba a pokud je to možné, tak provést vyhodnocení všech vzorků s co nejmenším časovým odstupem.

14.3 Vyhodnocení velikosti grafitu dle ČSN 420461

Tato norma stanovuje velikost částic grafitu a dle velikosti ho zařazuje do jednotlivých tříd. Odběr vzorků pro metalografické hodnocení dle této normy se provádí v 1/3 až 1/4 tloušťky stěny (průměru) odlitku (viz obrázek 26). Obsah jednotlivých strukturních fází v litině lze provádět lineární, bodovou nebo planimetrickou metodou. Všechny parametry grafitu se určují při stonásobném zvětšení. Zařazení grafitu do jednotlivých velikostních tříd se stanovuje dle tabulky 3.

Tabulka 3 [11]

Označení třídy velikosti grafitu	Velikost grafitu v mikrometrech
1	Nad 1000
2	Nad 500 do 1000
3	Nad 250 do 500
4	Nad 120 do 250
5	Nad 60 do 120
6	Nad 30 do 60
7	Nad 15 do 30
8	Do 15



Obrázek 27 – Naprahování metalografického snímku pro hodnocení velikosti a tvaru grafitu

Vyhodnocení velikosti grafitu bylo provedeno pomocí programu obrazové analýzy. Na nenaleptaném vzorku byla provedena obrazová analýza, která měří průměr jednotlivých částic grafitu. Program spočítá plochu vzorku, která se měřila a celkový počet částic grafitu na uvedené ploše. Proveďte změření průměru jednotlivých částic grafitu a spočte kolik částic grafitu spadá do jednotlivých tříd velikosti grafitu (1 – 8). Výsledná třída velikosti grafitu je ta, která obsahuje největší počet částic grafitu. Měření bylo provedeno na pěti místech na odebraném vzorku a počet částic v jednotlivých místech měření se sečetl a uvedl do tabulky u každého vzorku.

14.4 Vyhodnocení poměru ferit : perlit dle ČSN 420461

Tato norma používá pro vyhodnocení poměru feritu a perlitu etalony mikrostruktury. Vyhodnocení podle etalonů je velmi obtížné, protože etalony jsou velmi hrubě odstupňované. Jinak platí stejná pravidla jako při hodnocení velikosti grafitu pomocí etalonů, nejlépe vyhodnocovat strukturu jednou osobou všechny vzorky s co nejmenším časovým odstupem. Etalony stanovují obsah perlitu a feritu jako 100%. Odečítá se procentuální obsah grafitu ve struktuře a zbytek se bere jako 100 %.

14.5 Vyhodnocení poměru ferit : perlit mřížkovou metodou

Mřížková metoda hodnocení využívá pro analýzu strukturního složení bodovou analýzu. Na metalografický snímek se promítne mřížka o určitém počtu uzlových bodů. Počítá se kolik bodů zasáhne jednotlivé fáze a následně se vypočte kolik procent snímku jednotlivé fáze zaujímají. Výpočet se provádí jako poměr zasažených bodů k celkovému počtu bodů mřížky.

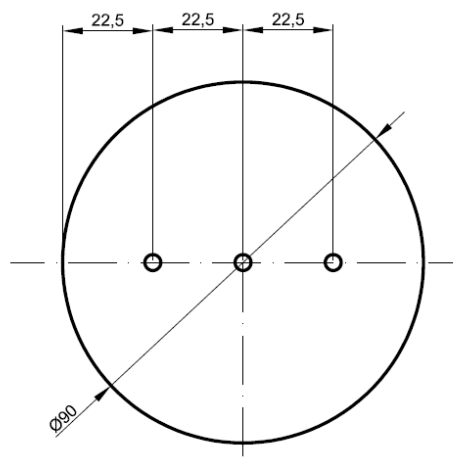
Při hodnocení struktury, které bylo provedeno, se měření provádělo na pěti místech vzorku. Promítnutá mřížka měla celkem 100 bodů a analýza byla provedena při zvětšení 500x. Toto velké zvětšení bylo zvoleno, aby se dobře dalo určit, která fáze protнула uzlové body mřížky.



Obrázek 28 – Příklad promítnuté mřížky pro analýzu strukturního složení - vzorek 13, zvětšeno 500x, leptáno

14.6 Hodnocení tvrdosti dle Brinela dle EN ISO 6506 – 1

Dle normy pro litinu byl zvolen doporučený průměr kuličky 10 mm a zatížení 3000 kg. Označení zkoušky je dle normy HBW 10/3000. Tvrdost dle Brinela byla měřena na třech místech na vzorku. Z výsledných hodnot se vypočetl aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Tvrdost byla měřena před tepelným zpracováním a po tepelném zpracování. Umístění vtisků bylo dle náčrtu na obrázku 29.



Obrázek 29 – Umístění vtisků pro měření tvrdosti dle Brinela

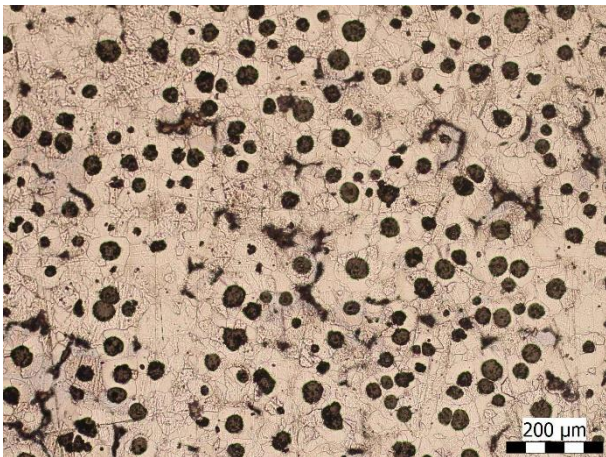
14.7 Vzorky č. 2 – 6 vyhodnocení

U vzorek č. 2 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C a výdrž na žíhací teplotě byla 120 minut. Účelem tepelného zpracování bylo dostat matrici s co nejnižším obsahem perlitu.

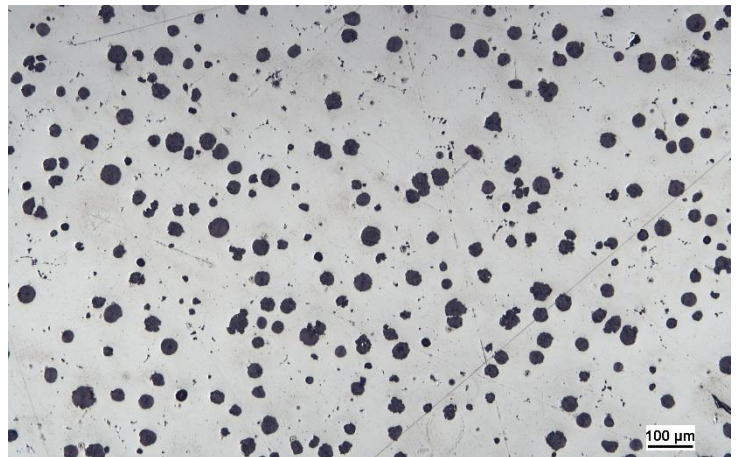
Vzorky č. 3 – 6 byly vloženy do vyhřáté pece na 700 °C lišila se výdrž na žíhací teplotě. Cílem těchto režimů tepelného zpracování bylo zjistit časovou závislost, jak rychle se perlit v litině rozpouští a vybrat nejvhodnější čas výdrže na žíhací teplotě.

14.7.1 Vzorek č. 2

Na vzorku č. 2 byl proveden režim tepelného zpracování s vložením vzorku do pece vyhřáté na 700 °C. Cílem bylo dosáhnout matrici s co nejmenším obsahem perlitu.



Obrázek 30 – zvětšeno 100x, leptáno – ferit, perlit, grafit

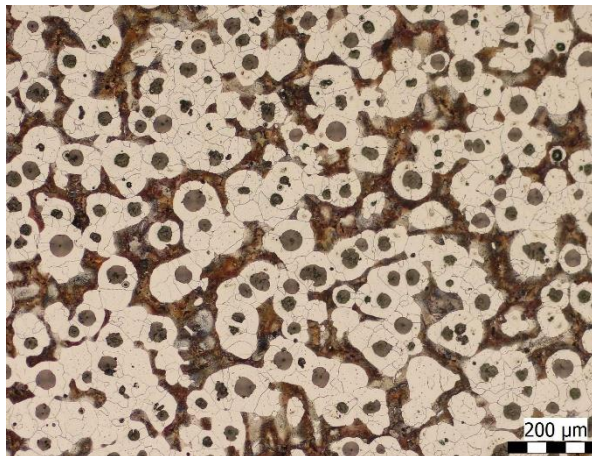


Obrázek 31 – zvětšeno 100x, neleptáno – grafit

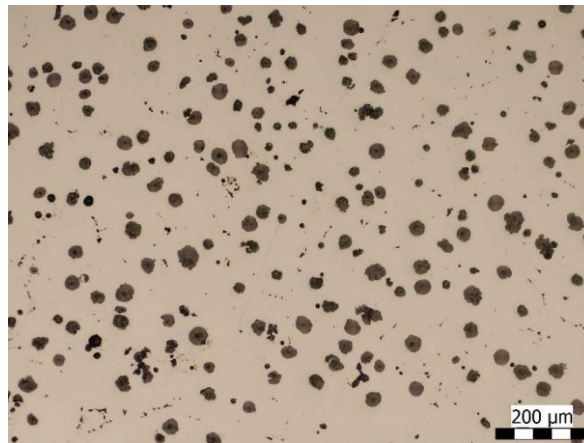
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	96	4
Hodnocení pomocí etalonů	95	5
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	74
	6	722
	7	786
	8	4842
Tvar grafitu	I	12
	II	4
	III	67
	IV	162
	V	875
	VI	5309
Tvrdost HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	199 ± 1,2	167 ± 0

14.7.2 Vzorek č. 3

Vzorek č. 3 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C s výdrží 30 minut. Cílem tohoto režimu tepelného zpracování bylo zjistit, kolik procent perlitu se rozpustí za čas žhání.



Obrázek 32 – zvětšeno 100x, leptáno – ferit, perlit, grafit

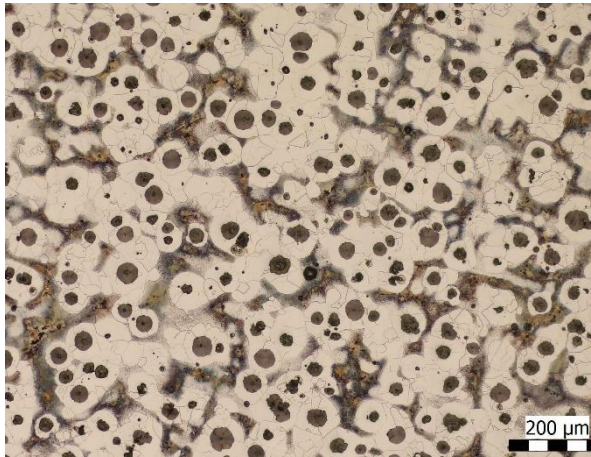


Obrázek 33 – zvětšeno 100x, neleptáno – grafit

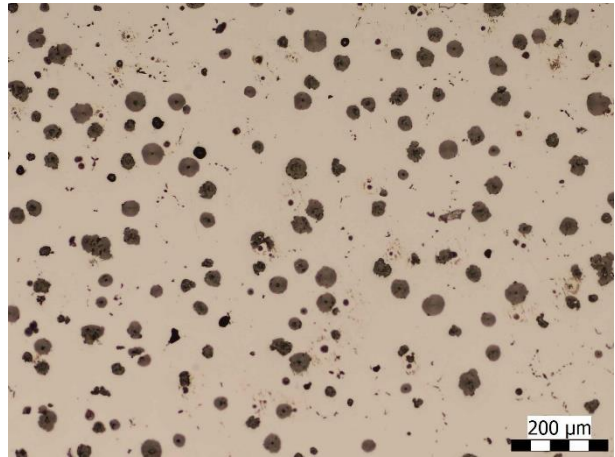
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	34	66
Hodnocení pomocí etalonů	40	60
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	57
	6	731
	7	667
	8	4466
Tvar grafitu	I	5
	II	1
	III	42
	IV	152
	V	804
	VI	4918
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	210 ± 6,3	203 ± 4,3

14.7.3 Vzorek č. 4

Vzorek č. 4 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C s výdrží 40 minut. Cílem tohoto režimu tepelného zpracování bylo zjistit, kolik procent perlitu se rozpustí za 40 minut žíhání.



Obrázek 34 – zvětšeno 100x, leptáno – ferit,grafit

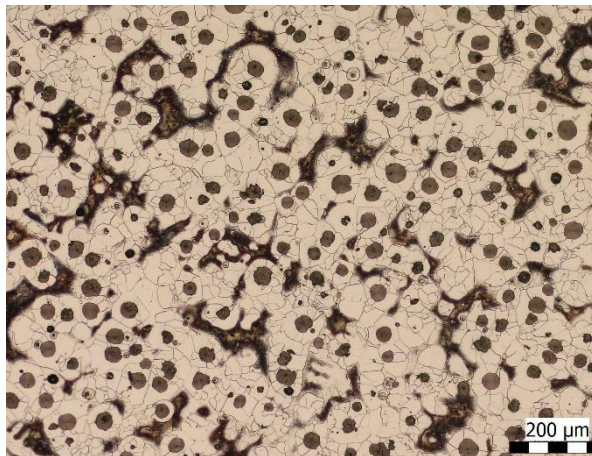


Obrázek 35 – zvětšeno 100x, neleptáno - grafit

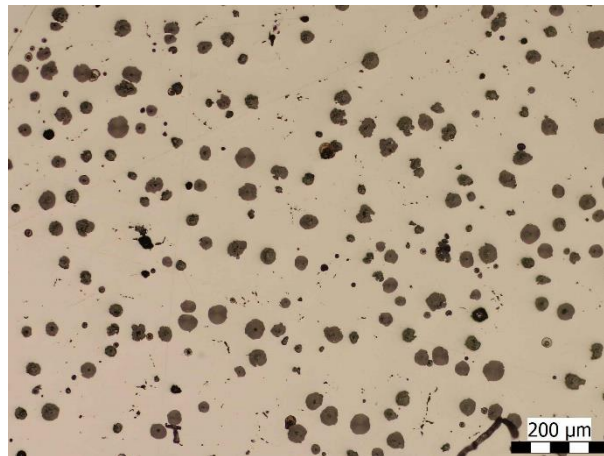
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	56	44
Hodnocení pomocí etalonů	70	30
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	228
	6	679
	7	643
	8	11356
Tvar grafitu	I	37
	II	26
	III	147
	IV	426
	V	1858
	VI	10451
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	211 ± 7,6	187 ± 2,2

14.7.4 Vzorek č. 5

Vzorek č. 5 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C s výdrží 50 minut. Cílem tohoto režimu tepelného zpracování bylo zjistit, kolik procent perlitu se rozpustí za 50 minut žhání.



Obrázek 36 – zvětšeno 100x, leptáno –
grafit,perlit,ferit

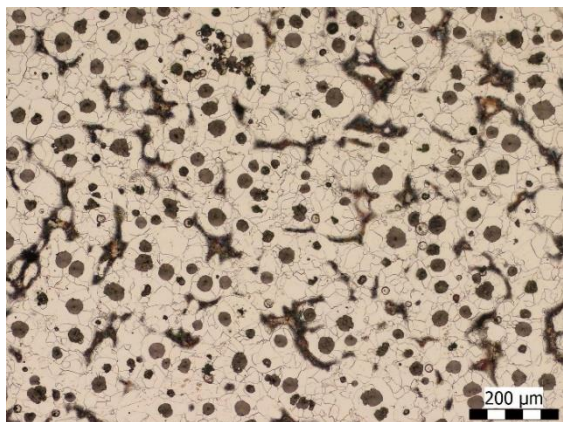


Obrázek 37 – zvětšeno 100x, neleptáno - grafit

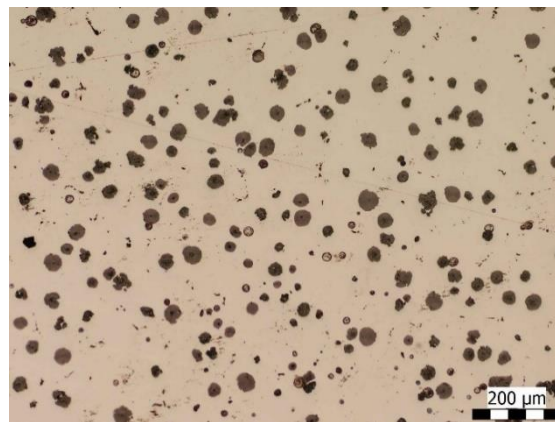
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	73	27
Hodnocení pomocí etalonů	75	25
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	30
	6	671
	7	710
	8	1818
Tvar grafitu	I	4
	II	1
	III	29
	IV	79
	V	423
	VI	2695
Tvrdost HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	203 ± 5,7	179 ± 3,7

14.7.5 Vzorek č. 6

Vzorek č. 6 byl vložen do vyhřáté pece na 700 °C s výdrží 60 minut. Cílem tohoto režimu tepelného zpracování bylo zjistit, kolik procent perlitu se rozpustí za 60 minut žhání.



Obrázek 38 – zvětšeno 100x, leptáno – grafit, ferit, perlit



Obrázek 39 – zvětšeno 100x, neleptáno – grafit

Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	81	19
Hodnocení pomocí etalonů	85	15
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	38
	6	707
	7	645
	8	3461
Tvar grafitu	I	7
	II	1
	III	45
	IV	140
	V	636
	VI	4022
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	204 ± 3,8	174 ± 0,5

14.7.6 Nedestruktivní kontrola vzorků po tepelném zpracování

U první sady vzorků (vzorky č. 2 – 6) byla obava, zda nedojde ke vzniku trhlin po tepelném zpracování. Pro litinu je rychlý ohřev problematický a zvláště u rozměrných odlitků se doporučuje ohřev a ochlazování pomalé. Proto byly ještě vzorky podrobeny nedestruktivnímu zkoušení. Byla provedena zkouška ultrazvukem, kde se jako základ pro kalibraci použil vzorek litiny bez tepelného zpracování (vzorek č. 12). Provedená zkouška ultrazvukem na vzorcích neodhalila žádné trhliny. Také se provedla zkouška magnetická polévací, pro odhalení případných povrchových nebo mírně podpovrchových trhlin. Ani tato zkouška na vzorcích neodhalila žádné trhliny.

14.7.7 Shrnutí výsledků z první sady vzorků

U vzorku č. 2 bylo cílem tepelného zpracování dostat matici s minimálním obsahem perlitu. Po tepelném zpracování bylo ve struktuře dosaženo 4 % perlitu. Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy jako velikost 8 a podle etalonu jako velikost 7. Tvar grafitu byl vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdost po tepelném zpracování klesla z $199 \pm 1,2$ HBW na 167 ± 0 HBW.

U vzorků č. 3,4,5,6 bylo cílem zjistit, jak se mění obsah perlitu s prodlužujícím se časem žíhání.

Vzorek č. 3 byl žíhán 30 minut a po tepelném zpracování není patrná žádná změna ve struktuře ani v hodnotě tvrdosti.

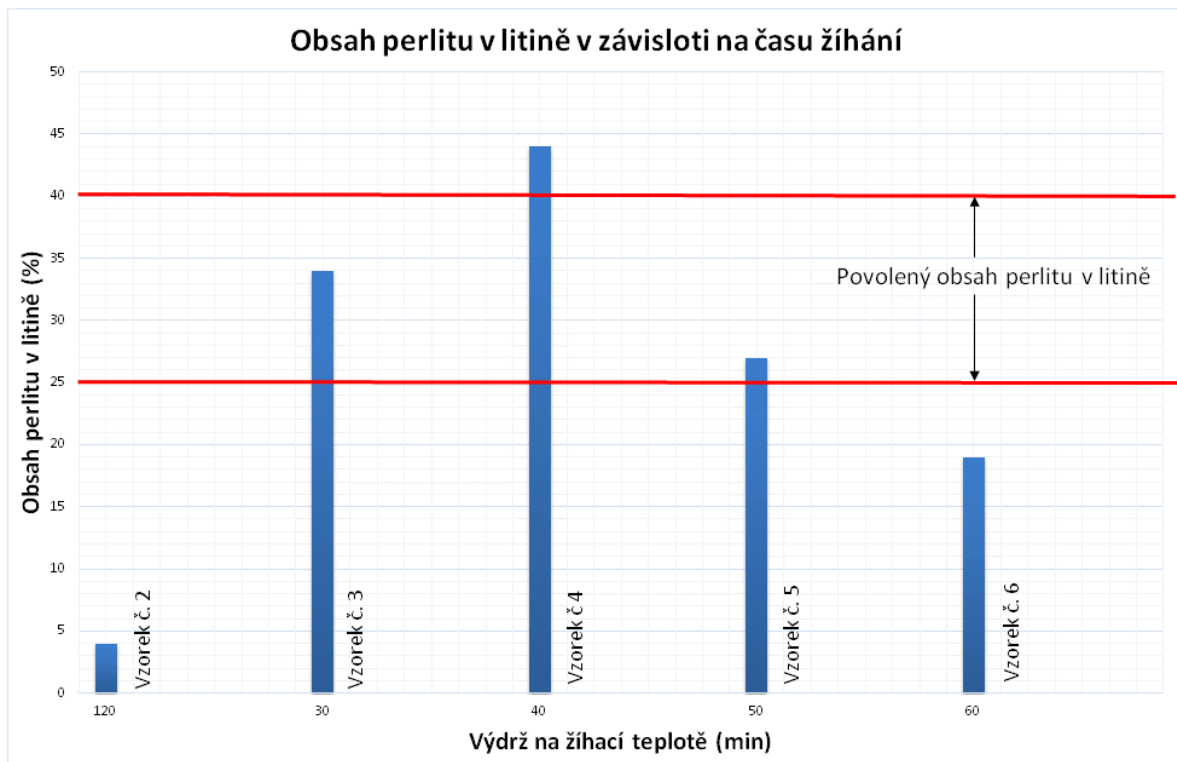
Vzorek č. 4 po tepelném zpracování obsahuje ve struktuře dle mřížkové analýzy 44 % a dle etalonu 30 % perlitu. Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy jako velikost 8 a podle etalonu jako velikost 7. Tvar grafitu byl vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdosti litiny klesla z $211 \pm 7,6$ HBW na $187 \pm 2,2$ HBW.

Vzorek č. 5 splnil všechny zadané parametry. Po tepelném zpracování bylo dosaženo 27 % perlitu ve struktuře. Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy i dle etalonu jako velikost 8. Tvar grafitu vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdost vzorku klesla z $203 \pm 5,7$ HBW na $179 \pm 3,7$ HBW.

U vzorku č. 6 klesl již obsah perlitu v litině pod mezní zadané hodnoty. Po tepelném zpracování bylo dosaženo 19 % perlitu ve struktuře. Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy i dle etalonu jako velikost 8. Tvar grafitu vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdost klesla z $204 \pm 3,8$ HBW na $174 \pm 0,5$ HBW.

Porovnání obsahu perlitu pro vzorky č. 2 – 6 bylo zpracováno do sloupcového grafu viz obrázek 38. Červené čáry na grafu vymezují rozsah obsahu perlitu, který byl požadován zadáním experimentu.

Vzorky byly nedestruktivně zkoušeny, zda se po tepelném zpracování neobjevily trhliny v materiálu. Zkouška ultrazvukem a zkouška magnetická polévací neidentifikovaly žádné vady v materiálu všech dodaných vzorků.



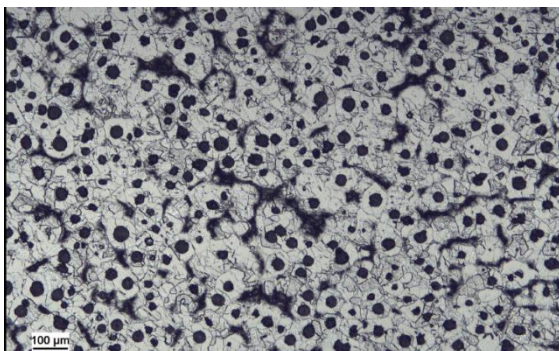
Obrázek 40 – Porovnání obsahu perlitu v litině u vzorků č. 2,3,4,5,6.

14.8 Vzorky č. 7 – 8

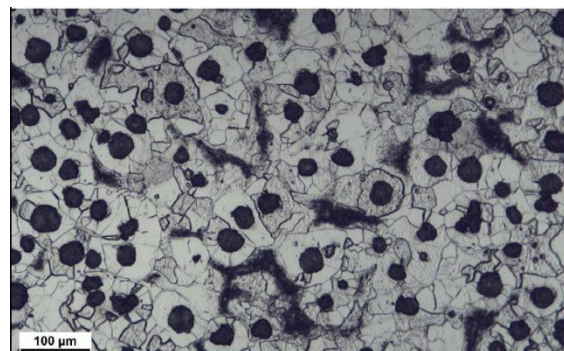
Cílem režimu tepelného zpracování pro vzorky č. 7 a č. 8 bylo zjistit, jak ovlivní rychlost ochlazování a ohřevu vlastnosti dané litiny. Tyto vzorky byly zpracovány v peci Clasik, která umožňovala záznam teploty z prostoru pece. Pro čas výdrže na žhací teplotě se použil čas, který se byl použit u vzorku č. 5, který splnil všechny zadané požadavky.

14.9.1 Vzorek č. 7

Vzorek č. 7 se zakládá do pece vyhřáté na 700 °C, s výdrží 50 minut od vložení do pece. Ochlazovalo se rychlostí 50 °C / hod do 350 °C.

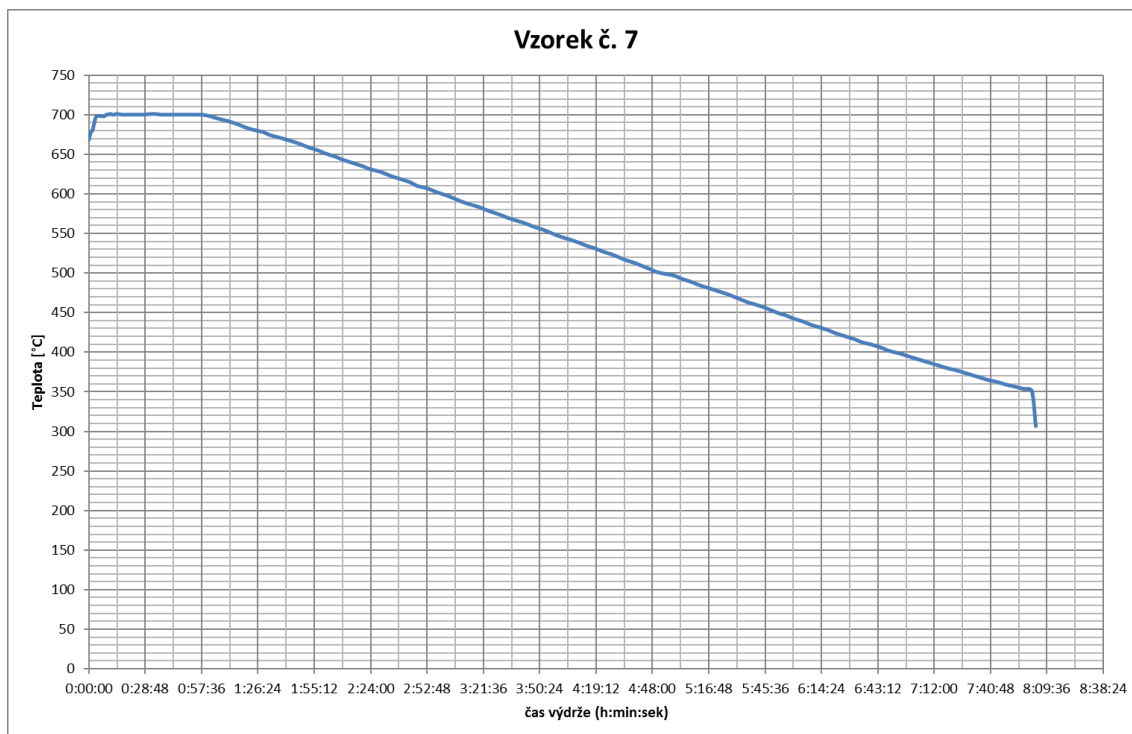


Obrázek 41 - zvětšeno 100x, leptáno



Obrázek 42 – zvětšeno 200x leptáno

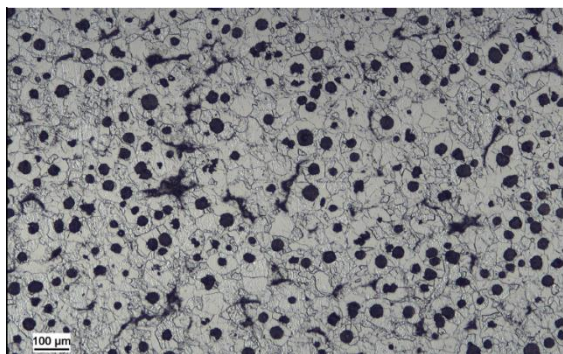
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	72	28
Hodnocení pomocí etalonů	75	25
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	33
	6	507
	7	536
	8	1881
Tvar grafitu	I	2
	II	1
	III	40
	IV	78
	V	541
	VI	2296
Tvrdość HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	205 ± 3,8	172 ± 1,7



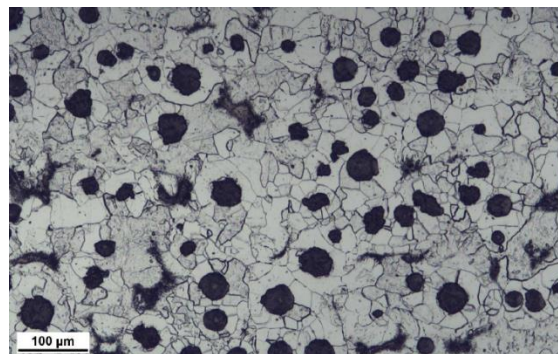
Obrázek 43 – Záznam průběhu tepelného zpracování vzorku č. 7

14.9.2 Vzorek č. 8

Vzorek č. 8 se ohříval rychlostí 50 °C /hod do 700 °C a ochlazení probíhalo rychlostí 50 °C /hod do teploty 350°C.

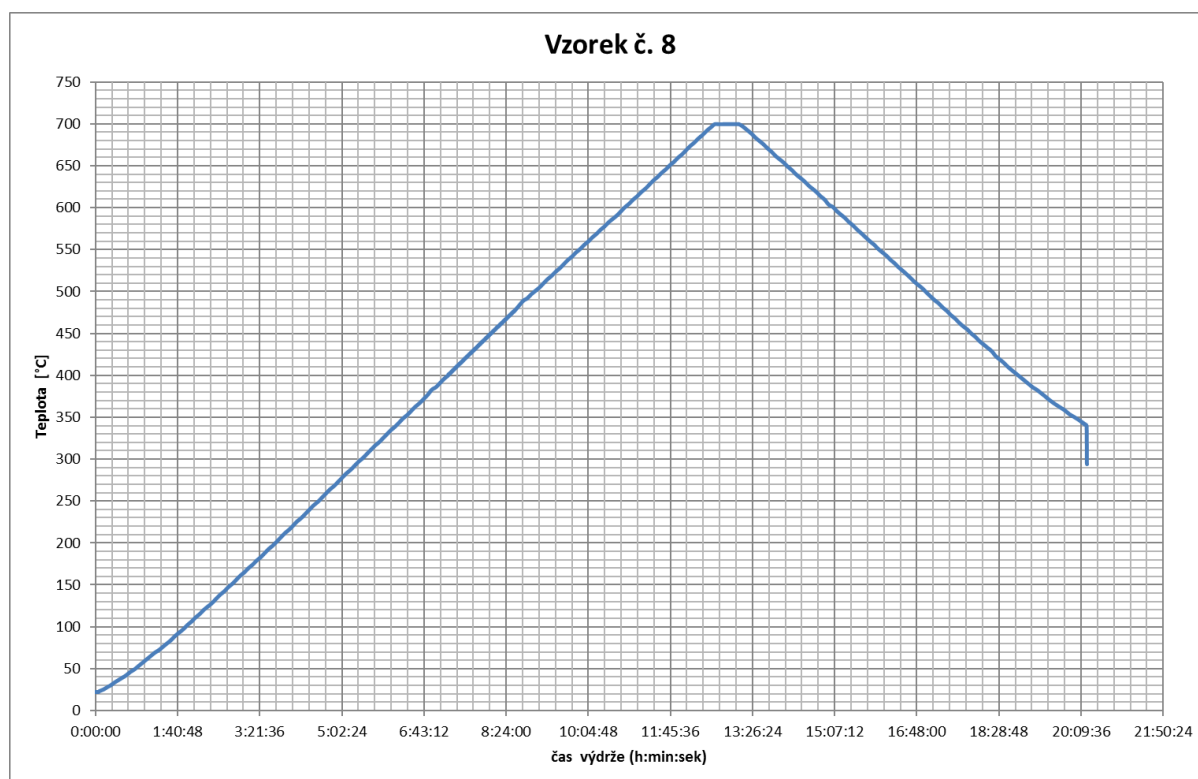


Obrázek 44 – zvětšeno 100x, leptáno



Obrázek 45 – zvětšeno 200x, leptáno

Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	85	15
Hodnocení pomocí etalonů	90	10
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	38
	6	498
	7	566
	8	1824
Tvar grafitu	I	11
	II	0
	III	32
	IV	85
	V	560
	VI	2241
Tvrdość HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	206 ± 7,9	174 ± 1,7



Obrázek 46 – Záznam průběhu tepelného zpracování vzorku č. 8

14.9.3 Shrnutí výsledků vzorků č. 7 a 8

U vzorku č. 7, kde se zvolil stejný způsob ohřevu, jako u vzorku č. 5, bylo dosaženo podobných výsledků u všech parametrů (obsah perlitu, tvrdost, tvar a velikost grafitu). Po tepelném zpracování bylo dosaženo ve struktuře 28 % perlitu, Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy a podle etalonu jako velikost 8. Tvar grafitu byl vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdost po tepelném zpracování klesla na $172 \pm 1,7$ HBW.

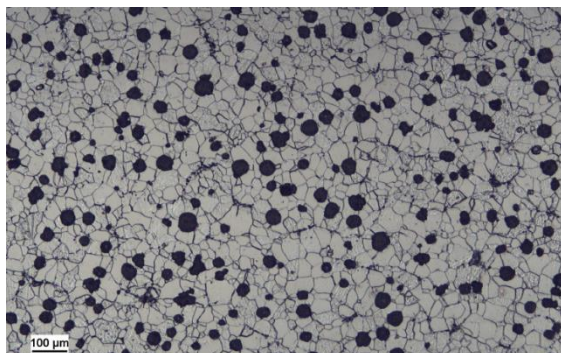
U vzorku č. 8 je nižší obsah perlitu než u vzorku č. 5. Po tepelném zpracování bylo dosaženo ve struktuře 15 %. Velikost grafitu byla vyhodnocena dle obrazové analýzy jako velikost 8 a podle etalonu jako velikost 7. Tvar grafitu byl vyhodnocen dle obrazové analýzy jako třída VI. Tvrdost po tepelném zpracování klesla na $174 \pm 1,7$ HBW. Je to způsobeno tím, že v průběhu ohřevu se již začne perlit rozpouštět. Není tedy nutná tak dlouhá výdrž na žíhací teplotě, jakou jsme uvažovali.

14.10 Vzorky č. 9, 10, 11

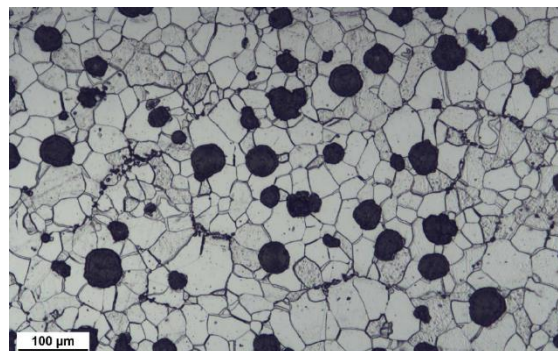
Pro vzorky č. 9 – 11 byly použity režimy tepelného zpracování s použitím nadkritických teplot, které se většinou používá pro litiny s velkým obsahem karbidů nebo vícelegované litiny.

14.10.1 Vzorek č. 9

Vzorek č. 9 byl ohřát na teplotu 900 °C, výdrž pro austenitizaci 60 minut poté ochlazen na 700 °C, výdrž 30 minut a následně ochlazován v peci na 350 °C. Následně ochlazován na vzduchu.



Obrázek 47 – zvětšeno 100x, leptáno

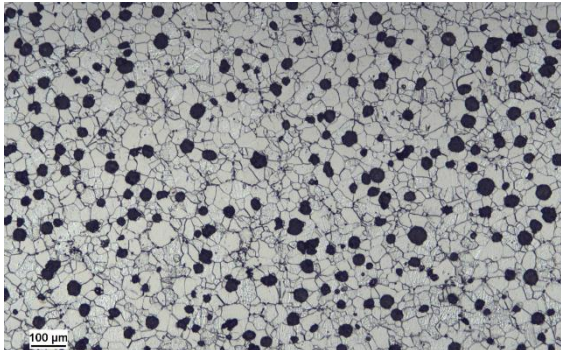


Obrázek 48 – zvětšeno 200x, leptáno

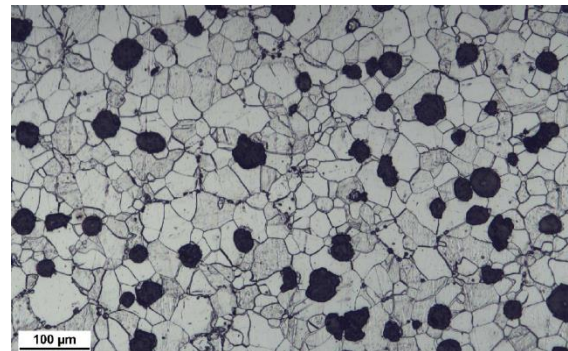
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	100	0
Hodnocení pomocí etalonů	100	0
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	39
	6	535
	7	505
	8	1628
Tvar grafitu	I	2
	II	1
	III	22
	IV	58
	V	384
	VI	2244
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	202 ± 2,5	156 ± 0,5

14.10.2 Vzorek č. 10

Vzorek č. 10 byl ohřát na teplotu 900 °C, výdrž pro austenitizaci 30 minut poté ochlazen na 700 °C, výdrž 30 minut a následně ochlazován v peci do 350 °C. Následně ochlazován na vzduchu



Obrázek 49 – zvětšeno 100x, leptáno

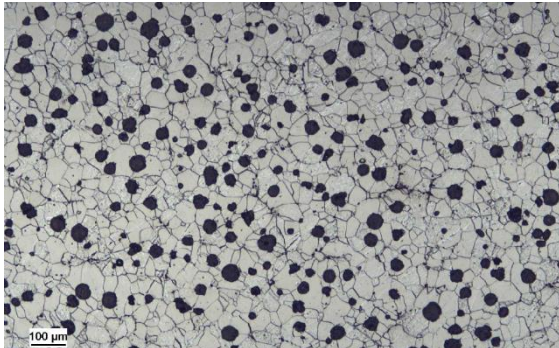


Obrázek 50 – zvětšeno 200x, leptáno

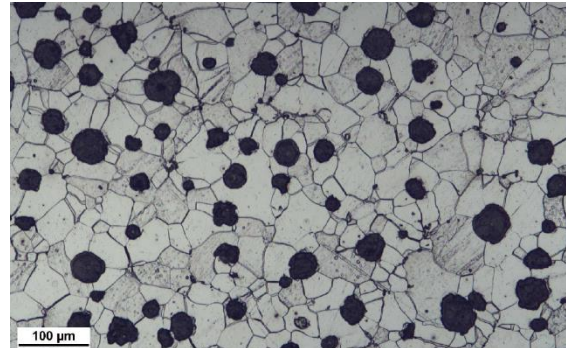
Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	100	0
Hodnocení pomocí etalonů	100	0
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	16
	6	508
	7	993
	8	1873
Tvar grafitu	I	2
	II	0
	III	18
	IV	72
	V	445
	VI	2855
Tvrdość HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	200 ± 2,6	156 ± 0,5

14.10.3 Vzorek č. 11

Vzorek č. 11 byl ohřát na teplotu 900 °C, výdrž pro austenitizaci 30 minut poté ochlazen v peci rychlostí 20 °C / hod do 700 °C. Následovala výdrž na teplotě 700 °C po dobu 30 minut s následným ochlazením v peci na 350 °C. Poté ochlazování na vzduchu.



Obrázek 51 – zvětšeno 100x, leptáno



Obrázek 52 – zvětšeno 200x, leptáno

Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	100	0
Hodnocení pomocí etalonů	100	0
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	20
	6	579
	7	667
	8	1840
Tvar grafitu	I	2
	II	1
	III	18
	IV	44
	V	345
	VI	2696
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	199 ± 1,2	153 ± 0,9

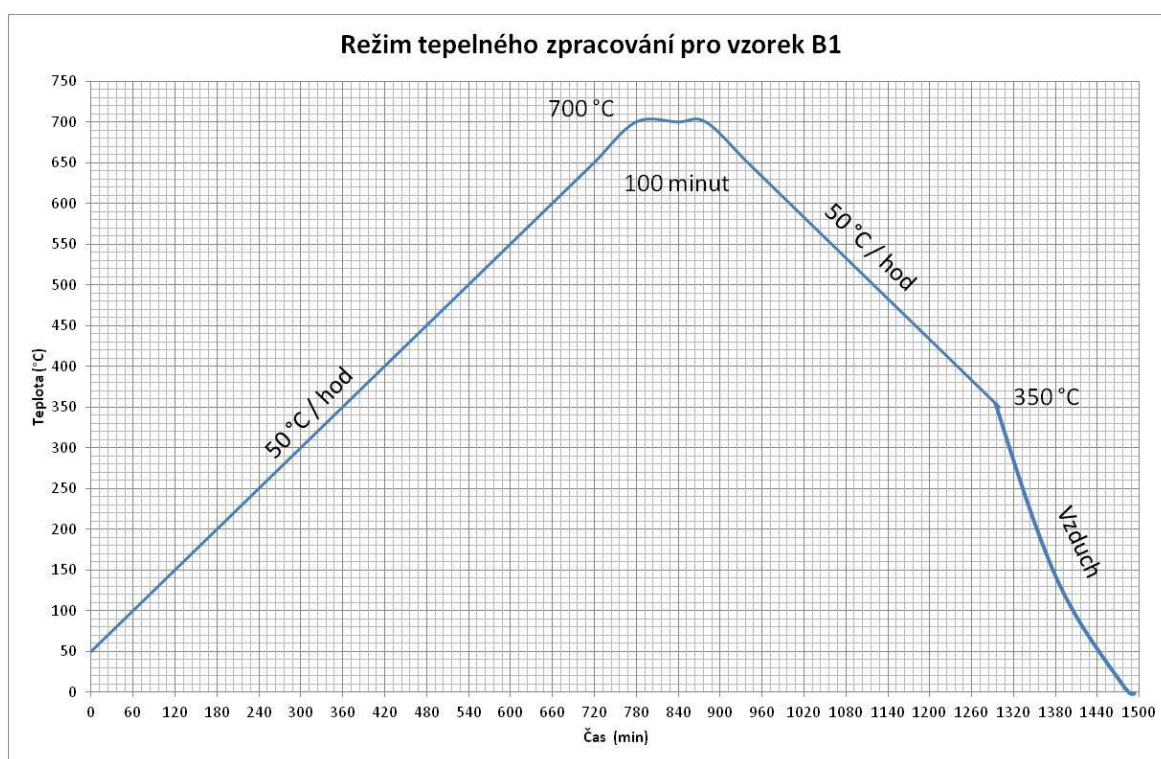
14.10.4 Shrnutí výsledků vzorků č. 9 – 11

U vzorků, kde byl použit režim tepelného zpracování s nadkritickou teplotou byla matrice u všech vzorků plně feritická. Tvrдость byla u všech vzorků okolo 156 HBW, což je nižší, než bylo požadováno zadáním a také je nižší než u vzorku č. 2, kde se vkládalo na 120 minut do

pece vyhřáté na 700 °C. Mezi jednotlivými vzorky nejsou větší rozdíly, které by se dali zjistit použitými metodami. Jen u vzorku č. 9, kde byl delší čas na austenitizaci je patrný o něco větší rozměr grafitu.

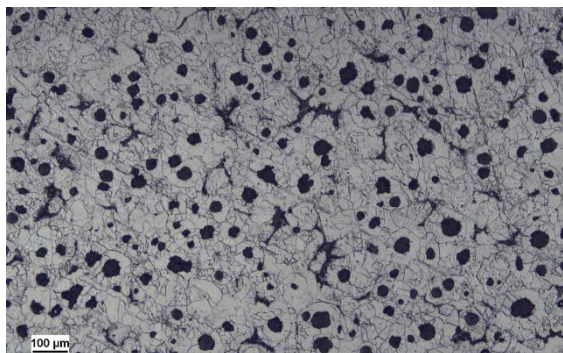
14.11 Návrh finálního cyklu tepelného zpracování

Po důkladném vyhodnocení všech provedených zkoušek na vzorcích byl vyhodnocen jako nejlepší vzorek č. 8, na kterém byl proveden ohřev 50 °C / hod na 700 °C. výdrž 30 minut, ochlazení 50 °C / hod na 350 °C s následným ochlazením na vzduchu. Obdobný režim TZ byl aplikován i na vzorek č. B1 (rozměr vzorku průměr 90 mm a délka 140 mm). Vzhledem k odlišnému jmenovitému rozměru vzorku č. B1 musela být přepočítána doba výdrže na žihací teplotě. Výpočtem byla určena výdrž na požadované teplotě po dobu 100 minut. Navržený režim tepelného zpracování viz obrázek 51

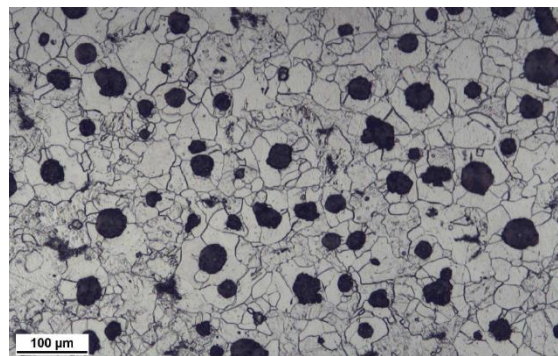


Obrázek 53 – Režim tepelného zpracování pro vzorek č. B1

14.11.1 Výsledky tepelného zpracování



Obrázek 54 – zvětšeno 100x, leptáno



Obrázek 55 – zvětšeno 200x, leptáno

Poměr ferit:perlit	Ferit	Perlit
Pomocí mřížkové analýzy	86	14
Hodnocení pomocí etalonů	88	12
Grafit	Třída	Počet částic
Velikost grafitu	5	42
	6	543
	7	532
	8	1483
Tvar grafitu	I	6
	II	0
	III	27
	IV	62
	V	479
	VI	2027
Tvrдость HBW 10 /3000	Před TZ	Po TZ
	215 ± 1,6	167 ± 1,3

U navrženého režimu tepelného zpracování nebylo dosaženo požadovaného obsahu perlitu ve struktuře. Pro docílení požadovaných vlastností je nutné snížit dobu výdrže na žíhací teplotě alespoň o 20 minut.

15. Shrnutí dosažených výsledků

Požadavky na vlastnosti materiálu po tepelném zpracování byly tyto:

Poměr ferit : perlit	(60 % - 75 %) : (40 % - 25 %)
Třída grafitu dle ČSN EN ISO 945 – 1	V - VI
Tvrдость HBW	165 – 180

U první série vzorků byl měněn jen čas výdrže na žíhací teplotě. Bylo pozorováno, za jaký čas se perlit na žíhací teplotě začne sbalovat do globulí, případně za jaký čas se začne perlit rozpouštět na ferit a přebytečný uhlík začne difundovat do grafitických částic (grafitizace perlitu) a kolik procent perlitu po tepelném zpracování ve struktuře zbyde. Pro první sérii režimů tepelného zpracování (vzorky č. 2 – 6) byl výsledný obsah perlitu v závislosti na času žíhání uveden do grafu viz obrázek 40. Do pásma, které vyhovuje zadanému obsahu perlitu ve struktuře spadají režimy tepelného zpracování u vzorků č. 3 a č. 5. Vzorek č. 3 má nevyhovující tvrdost. Jako nejlepší z první série byl režim tepelného zpracování vzorku č. 5, který byl žíhán 50 minut při teplotě 700 °C. U režimu tepelného zpracování vzorku č. 2 bylo plánováno dostat co nejměkčí strukturu litiny. Z tohoto důvodu byl volen režim tepelného zpracování délku výdrže 120 minut při teplotě 700 °C. Výsledkem byla struktura litiny s obsahem perlitu 4 % a tvrdost litiny se podařilo snížit na 167 ± 0 HBW. I přes nízký obsah perlitu ve struktuře splňuje vzorek č. 2 požadavky na minimální tvrdost litiny.

Pro další zkoušky bylo rozhodnuto použít časy výdrže na žíhací teplotě obdobné jako byla u režimu tepelného zpracování na vzorku č. 5. U režimu tepelného zpracování vzorku č. 7 byla použita žíhací teplota 700 °C a výdrž na žíhací teplotě 50 minut. Zkoumán byl vliv pomalého ochlazování na vlastnosti litiny. Bylo zjištěno, že po tepelném zpracování splňuje vzorek č. 7 požadavky zadání. Pro režim tepelného zpracování vzorku č. 8 se čas výdrže na žíhací teplotě upravil tak, aby byl srovnatelný s časem výdrže na žíhací teplotě jako u režimu tepelného zpracování vzorku č. 5. U režimu tepelného zpracování vzorku č. 8 se zjišťoval vliv pomalého ohřevu a pomalého ochlazování na vlastnosti litiny. Po tepelném zpracování byl obsah perlitu ve struktuře 15 %. Pro dosažení minimálního obsahu 25 % perlitu ve struktuře je nutné čas výdrže na žíhací teplotě snížit alespoň o 10 minut. Při pomalém ohřevu začínají změny ve struktuře litiny již nad 400 °C. Nad touto teplotou se již začíná lamelární perlit sbalovat do globulí a tím již dochází ke změně tvrdosti litiny. Při vyšších teplotách a delším času žíhání již dochází ke grafitizaci perlitu, kdy se perlit rozkládá na ferit a grafit. Respektive uhlík z perlitu difunduje do již vzniklých grafitických částic.


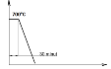
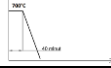
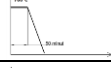


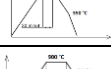
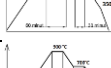
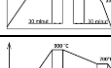


Pro zjištění jakých vlastností může litina dosáhnout pomocí feritizačního žíhání s nadkritickou teplotou (900 °C) byly použity vzorky č. 9 až 11. Jednotlivé režimy tepelného zpracování se lišily pouze rychlostí ochlazování mezi 900 °C a 700 °C a výdrží na austenitizační teplotě. U všech vzorků byla dosažena struktura litiny tvořená jen feritem. Tvrdost čistě feritické struktury je okolo 156 HBW. Pro litinu, která neobsahuje velké množství karbidů ani není legovaná, není vhodné použít feritizační žíhání s použitím nadkritické teploty. Nadkritické teploty se používají proto, že karbidy se rozpouští až při vyšších teplotách. Je nutné zajistit, aby se uvolněný uhlík z karbidů nenavázal zpět ke karbidotvornému prvku, ale difundoval do grafitu. Proto se u těchto režimů tepelného zpracování používá ochlazování rychlostí 50 až 20 °C / hod v rozsahu teplot 900 °C až 600

°C. Legury v litině mohou jednak vázat na sebe uhlík a vytvářet karbidy, ale také zpomalují proces difúze uhlíku z perlitu do grafitu případně stabilizují perlit ve struktuře.

Na vzorku č. B1 se provedl režim tepelného zpracování, který měl nejlepší výsledky. Bylo rozhodnuto pro zpracování vzorku č. B1 použít režim tepelného zpracování obdobný jako byl u vzorku č. 8. Tento vzorek měl pomalý ohřev a pomalou rychlost ochlazování, což je pro aplikaci na tyče většího průměru, případně pro rozměrnější odlitky vhodnější. U vzorku č. 5 se prováděl rychlý ohřev, který může použít u litiny spíše pro součásti o menších rozměrech. Po tepelném zpracování byl obsah perlitu ve struktuře 14 % a tvrdost klesla na $167 \pm 1,3$ HBW. Protože nebyla splněna podmínka minimálního obsahu perlitu ve struktuře, je nutné čas výdrže na žíhací teplotě zkrátit alespoň o 20 minut.

Navržený výsledný režim tepelného zpracování bude mít pomalý ohřev a ochlazování s výdrží na teplotě 700 °C po dobu 80 minut. Přehled výsledků u jednotlivých režimů tepelného zpracování je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4

Číslo vzorku	Tepelné zpracování vzorku	Tvrdost HB 10 / 3000 před TZ	Tvrdost HB 10 / 3000 po TZ	Perlit	Ferit	Velikost grafitu	Třída tvaru grafitu
14	bez TZ	215 ± 1,6		54	46	č. 8	č. VI
13	bez TZ	198 ± 2,5		31	69	č. 8	č. VI
2		199 ± 1,2	167 ± 0	4	96	č. 8	č. VI
3		210 ± 6,3	203 ± 4,3	34	66	č. 8	č. VI
4		211 ± 7,6	187 ± 2,2	44	56	č. 8	č. VI
5		203 ± 5,7	179 ± 3,7	27	73	č. 8	č. VI
6		204 ± 4,2	174 ± 0,5	19	81	č. 8	č. VI
7		205 ± 3,8	172 ± 1,7	28	72	č. 8	č. VI
8		206 ± 7,9	174 ± 1,7	15	85	č. 8	č. VI
9		202 ± 2,5	156 ± 0,5	0	100	č. 8	č. VI
10		200 ± 2,6	156 ± 0,5	0	100	č. 8	č. VI
11		199 ± 1,2	153 ± 0,9	0	100	č. 8	č. VI
B1		215 ± 1,6	167 ± 1,3	86	14	č. 8	č. VI

16. Závěr

V teoretické části této práce byly představeny možnosti tepelného zpracování šedé a tvárné litiny. Popsány byly jak tepelné zpracování klasická (kalení, žíhání, ..), tak také nové trendy v tepelném zpracování (kryogenní tepelné zpracování). Kryogenní tepelné zpracování se nyní velmi používá pro zlepšení vlastností ADI litin.

V praktické části byl experiment zaměřen na navržení režimu tepelného zpracování, po kterém by tvárná litina dosáhla požadovaných vlastností. Experiment byl postupně rozšiřován a byl rozdělen do několika fází. V první fázi byly zkoušeny režimy tepelného zpracování na vzorcích č. 2 – 6. U režimu tepelného zpracování na vzorku č. 2 bylo vyzkoušeno jakých vlastností dosahuje litina s feritickou maticí. Režimy tepelného zpracování pro vzorky č. 3 – 6 měly rozdílné časy výdrže na žíhací teplotě a získali jsme závislost, jak rychle se rozpouští perlit v litině a jak v závislosti na obsahu perlitu klesá tvrdost litiny.

V další fázi byly vyzkoušeny režimy tepelného zpracování u vzorků č. 9 – 11, kde byla použita teplota žíhání 900 °C s pomalým ohřevem a ochlazováním. Rozdíl mezi jednotlivými režimy tepelného zpracování byl v rychlosti ochlazování a použitém času austenitizace. U všech třech režimů tepelného zpracování dochází k transformaci matrice na plně feritickou. Litina s plně feritickou maticí má velmi dobrou obrobitelnost a dobré tlumicí vlastnosti, a proto se používá například na řemenice případně tlumicí prvky.

Poslední fáze byl režim tepelného zpracování pro vzorek č. B1. U této sady bylo cílem použít režim tepelného zpracování, který se bude jevit jako nejlepší a aplikovat ho na součást, která má rozdílný jmenovitý rozměr. Všechny předchozí vzorky byly typu disk (tloušťka 20 mm) a vzorek č. B1 je typu válec (průměr 90 mm). Byl použit režim tepelného zpracování s pomalým ohřevem a ochlazováním s výdrží na žíhací teplotě 100 minut. Výsledná struktura po tepelném zpracování obsahuje 14 % perlitu, což je pod zadanou minimální hodnotu. Proto režim tepelného zpracování, který splní zadané vlastnosti litiny by měl mít výdrž maximálně 80 minut při stejném způsobu ohřevu, ochlazování a žíhací teplotě 700 °C.

17. Použité zdroje

- [1] HAMPL, Jiří. *Metalurgie slévárenských slitin* [online]. První. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2015-12-08]. ISBN 978 - 80 - 248 - 3357 - 6. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf
- [2] ROUČKA, J. *Metalurgie litin*, VUT FSI, vydal PC-DIR Real, s.r.o., Brno, 1998.
- [3] Heat Treating as Volume 4 of the ASM Handbook, ASM International 1991
- [4] ČSN EN ISO 945-1. *Mikrostruktura litin – Klasifikace grafitu vizuální kontrolou*. Praha Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [5] ŠENBERG, Jaroslav, Zdeněk BŮŽEK a Antonín ZÁDĚRA. *Metalurgie ocelí na odlitky*. První. Brno: VUTIUM. ISBN 987-80-214-3632-9.
- [6] HEFRFURT, Klause, Henrik ELMKVIST a Klaus REIF. *Continuous cast iron for innovative parts manufacture*. Odense, Dánsko, 2013.
- [7] LINDE GAS. *Sub-zero treatment of steels: technology/precesses/equipment*. Pullach, Německo, 2002.
- [8] THORNTON, Robert W. a Dr. Tom SLATTER. *Investigating the effects of cryogenic processing on the wear performance and microstructure of engineering materials*. Sheffield, August 2014.
- [9] *Versa Bar: Continuous Cast Iron*. Brazil, USA, 2014.
- [10] GDOS Theorie: Spectruma website. *GDOS Theorie* [online]. 2015 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.spectruma.de/de/gdoes-theorie.html>
- [11] ČSN 42 0461. *Hodnocení metalografické struktury litiny*. Praha, 1975.

PŘÍLOHA č. 1

Zkušební zpráva od dodavatele

Test Certificate



United Cast Bar (UK) Ltd
Spital Lane
S41 0EX Chesterfield Derbyshire

VAT 114 5364 92
Telephone +44 1246 201194
E-Mail



Certification Standard: EN10204:2004, Standard 2.2

Cert No.	CERT049990	Date	02/02/15
Order No.	SORD71184	Cust. Order No.	OBJ1500222
Item No.	600RDO900000	Customer Item ref.	
Item Description	UB 600-3 FOUNDED 90	Length:	3,08M Pieces: 5
Cast Reference	A16C15	Weight	715.19Kg

Chemical Composition (Typical)

% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Mg	% Cu	Other CC
3.40 - 3.70	2.50 - 3.00	0.10 - 0.30	0.005 - 0.020	0.015 - 0.080	0.040 - 0.070		

Mechanical Properties (Typical)

Material Section	0,2 PS% (N/mm2)	UTS (N / mm2)	EL * (%)	HB Method	Hardness Range (HB)
<60 mm	370	600	3.0	10/3001	200 - 260
61mm to 120mm	360	600	2.0		
121mm to 400mm	340	550	1.0		
401mm +	340	550	1.0		

Microstructure (Range)

Graphite type	% Pearlite	% Ferrite	% Carbide	Other Microstructure
V&VI (PREDOMINANTLY)	>50			

This Material Conforms to UCB Grade: UB 600-3
National Equivalent: EN16482:2014 - GJS 600-3C
Signed on behalf of UCB


Quality Assurance Coordinator

Technical Manager
Manufactured in UCB

The products herein have been tested and inspected in accordance with the conditions and requirements of the contract and purchase order and conform to the specifications thereto.