

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV METALURGICKÉHO ZPRACOVÁNÍ A SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE NA JAKOST OCELOVÝCH ODLITKŮ

INFLUENCE OF METTALURGICAL TREATMENT AND FOUNDRY TECHNOLOGY ON QUALITY OF STEEL
CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADIM NÁVRAT

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. ANTONÍN ZÁDĚRA Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radim Návrat

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

Vliv metalurgického zpracování a slévárenské technologie na jakost ocelových odlitků

v anglickém jazyce:

Influence of metallurgical treatment and foundry technology on quality of steel castings

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výsledná jakost oceli na odlitky je silně ovlivňována způsobem metalurgického zpracování, použitou slévárenskou technologií oceli, způsobem tuhnutí a konstrukcí odlitku. Je zpravidla hodnocena jak z pohledu povrchové, tak i vnitřní jakosti. V případě neshody se sjednanými podmínkami je nutné provést opravy, které významně zvyšují výrobní náklady. Při návrhu slévárenské technologie se v současnosti používají simulační programy, které umožňují významně eliminovat vnitřní vady typu staženin, pórovitosti apod. Predikci povrchových vad typu sekundární struskovitost však tyto simulační programy neumožňují, nebo pouze okrajově.

Cíle diplomové práce:

U vybraného typu experimentálního odlitku stanovit v provozních podmínkách vliv chemického složení, použitého metalurgického zpracování a dané slévárenské technologie na vnitřní a povrchovou jakost odlitků. Dílčí částí práce je posouzení vlivu filtrace taveniny na strukturně mechanické vlastnosti oceli.

Seznam odborné literatury:

1. LEVIČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. Praha: SNTL, 1984.269 s.
2. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství Vutium, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-36329.
3. ŠENBERGER, J., FORET, R., MALEC, S. Vlastnosti oceli na odlitky vyrobené v kyselé a zásadité obloukové a indukční peci. Slévárenství. 1992, roč. 40, č. 1, s. 3-6. ISSN 0037-6825.
4. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth - Heinemann, 2000. 288 p. ISBN 0 7506 16962.
5. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. Brno: MATECS, 1992. 340 s.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013. V Brně, dne 1.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.,
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo v provozních podmínkách slévárny Třinec stanovit vliv chemického složení, použitého metalurgického zpracování a dané slévárenské technologie na vnitřní a povrchovou jakost u vybraného typu experimentálního odlitku. Dílčí částí práce bylo posouzení vlivu filtrace taveniny na strukturně mechanické vlastnosti oceli.

Klíčová slova

Ocelové odlitky, chemické složení, filtrace, tepelné zpracování

ABSTRACT

The aim of this thesis was to determine the impact of the used chemical composition during metallurgical treatment and foundry technology on the inner and surface quality of experimental casting under operational conditions at Třinec foundry. A minor part of this thesis is focused on the determination of the effect of filtration on mechanical properties of steel.

Key words

Steel castings, chemical composition, filtration, heat treatment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NÁVRAT, Radim. *Vliv metalurgického zpracování a slévárenské technologie na jakost ocelových odlitků: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 75 s., 4 s. příloh. Vedoucí práce. Ing. Antonín Záděra Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv metalurgického zpracování a slévárenské technologie na jakost ocelových odlitků“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Podpis diplomanta

.....
Radim Návrat

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Antonínu Záděrovi Ph.D. za cenné připomínky, rady a konzultace při vypracování diplomové práce.

Děkuji tímto rovněž Ing. Ondřeji Wozniakovi za cenné rady a obětavost při jejich poskytování.

Poděkování patří též slévárně Třinec a.s. ,která umožnila řešení diplomové práce ve svém prostředí a poskytla všechny potřebné podklady.

OBSAH

ABSTRAKT	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
ÚVOD	9
1 VÝROBA A VLASTNOSTI ZKUŠEBNÍHO ODLITKU.....	10
2 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ.....	14
2.1 Vliv obsahu uhlíku	15
2.1.1 <i>Vliv na mechanické vlastnosti</i>	15
2.1.2 <i>Vliv na technologické vlastnosti</i>	15
2.2 Vliv manganu.....	16
2.3 Vliv křemíku.....	16
2.4 Vliv síry.....	16
2.5 Vliv fosforu.....	16
3 OVĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	17
3.1 Použité technologie a podmínky výroby	17
3.1.1 <i>Mechanické zkoušky</i>	18
4 VLIV OBSAHU UHLÍKU A MANGANU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI ODLITKŮ NÁRAZNÍKŮ.....	22
4.1 Použité technologie a podmínky výroby	22
4.2 Analýza mechanických vlastností odlitku.....	23
4.2.1 <i>Vliv obsahu C na hodnoty meze pevnosti Rm</i>	25
4.2.2 <i>Vliv obsahu C na hodnoty vrubové houževnatosti KCU pro -60°C</i>	26
4.2.3 <i>Vliv obsahu Mn na hodnoty meze pevnosti Rm</i>	27
4.2.4 <i>Vliv obsahu Mn na hodnoty vrubové houževnatosti pro -60°C</i>	28
4.3 Shrnutí výsledků a celkové vyhodnocení.....	29

5 VLIV OBSAHU SÍRY A FOSFORU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI**ODLITKŮ NÁRAZNÍKŮ..... 30**

5.1 Analýza mechanických vlastností odlitků.....	30
5.1.1 Vliv obsahu S na hodnoty meze pevnosti R_m	25
5.1.2 Vliv obsahu S na hodnoty vrubové houževnatosti KCU pro -60°C	26
5.1.3 Vliv obsahu P na hodnoty meze pevnosti R_m	27
5.1.4 Vliv obsahu P na hodnoty vrubové houževnatosti pro -60°C	28
5.2 Shrnutí výsledků a vyhodnocení.....	34

6 VLIV FILTRACE NA JAKOST ODLITKŮ 36

6.1 Druhy filtrů	37
6.2 Důležité pojmy ve filtrační technologii.....	38
6.2.1 Porozita filtrů	38
6.2.2 Filtrační kapacita	38
6.2.3 Pevnost (za studena a za tepla).....	39
6.2.4 Tepelná kapacita	39
6.3 Princip filtrace	40
6.4 Licí teploty s použitím filtrů	42
6.5 Návrh a konstrukce vtokové soustavy	42
6.5.1 Umístění vtokové soustavy	42
6.5.2 Výpočet velikosti filtru.....	44
6.6 Vznikající vměšky v ocelových odlitcích	45
6.7 Použití filtrace pro odlitky nárazníků	47

7 VLIV SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE NA JAKOST ODLITKŮ**NÁRAZNÍKŮ..... 48**

7.1 Vliv filtrace na povrchovou kvalitu odlitků	48
7.1.1 Zkouška filtrů	49
7.2 Analýza vlivu filtrace na povrchovou jakost odlitků	49
7.3 Ucpání filtrů ve vtokové soustavě	51
7.4 Analýza ucpaných filtrů.....	52
7.5 Vyhodnocení	55

8 VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA JAKOST OCELOVÝCH ODLITKŮ	57
8.1 Rozdělení postupů tepelného zpracování u nízkoalokovaných ocelí	58
8.2 ARA, IRA Diagramy	58
8.2.1 <i>Perlitická přeměna</i>	60
8.2.2 <i>Bainitická přeměna</i>	61
8.2.3 <i>Martenzitická přeměna</i>	61
9 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ NÁRAZNÍKŮ	62
9.1 Použité technologie a podmínky TZ	63
9.2 Analýza vlivu popouštěcí teploty	66
9.2.1 <i>Vliv popouštěcích teplot na hodnoty meze pevnosti</i>	67
9.2.2 <i>Vliv popouštěcích teplot na hodnoty tvrdostí</i>	67
9.2.3 <i>Vliv popouštěcích teplot na hodnoty kontrakce Z</i>	69
9.3 Shrnutí výsledků a celkové vyhodnocení	70
ZÁVĚR	71
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	74
SEZNAM PŘÍLOH	75

ÚVOD

Výsledná jakost oceli na odlitky je silně ovlivňována způsobem metalurgického zpracování, použitou slévárenskou technologií oceli, způsobem tuhnutí a konstrukcí odlitku. Je zpravidla hodnocena jak z pohledu povrchové, tak i vnitřní jakosti. V případě neshody se sjednanými podmínkami je nutné provést opravy, které významně zvyšují výrobní náklady.

Proto se při návrhu výroby postupuje obezřetně tak, aby byly zabezpečeny veškeré technické podmínky, uvedené v přiložené výkresové dokumentaci a v přiložených technicko-dodacích podmínkách. Je důležité zvolit takovou (vhodnou) technologii výroby, která by zabezpečila požadované množství dodávaných kusů a současně nízkou nákladovost (ekonomičnost) výroby.

V této diplomové práci se v provozních podmínkách Sléváren Třinec sledovaly vlivy metalurgického zpracování a slévárenské technologie na výslednou jakost u konkrétního druhu odlitku.

Počátek výroby tohoto typu odlitku sahá do roku 2011, kdy na základě jednání obchodního úseku Sléváren Třinec a.s. s cílovým zákazníkem z Ruska, obdrželi pracovníci technologie slévárny oceli Třinec úkol, zpracovat poptávkové řízení pro výrobu odlitků „nárazníku“ (Obr.1.1). Hlavním cílem bylo navržení takové technologie, která by vedla k zabezpečení výroby těchto odlitků v podmínkách Sléváren Třinec.

V počátcích výroby se ukázalo, že největšími překážkami plynulé expedice odlitých kusů nárazníků jsou problémy spojené s požadovanými mechanickými hodnotami a hlavně s výskytem povrchových vad na odlitcích. Zmetkování, reklamace a opravy ať už zavařováním, broušením nebo opakovaným tepelným zpracováním byly spojené s růstem nákladů na výrobu těchto odlitků a byly tudíž velmi nežádoucí.

1 VÝROBA A VLASTNOSTI ZKUŠEBNÍHO ODLITKU

Tekutý kov je pro potřeby výroby odlitků nárazníků připravován na 10t elektrických zásaditých obloukových pecích. Vyzdívka pece je tvořena tvárniciemi na bázi magnezitu (MgO).

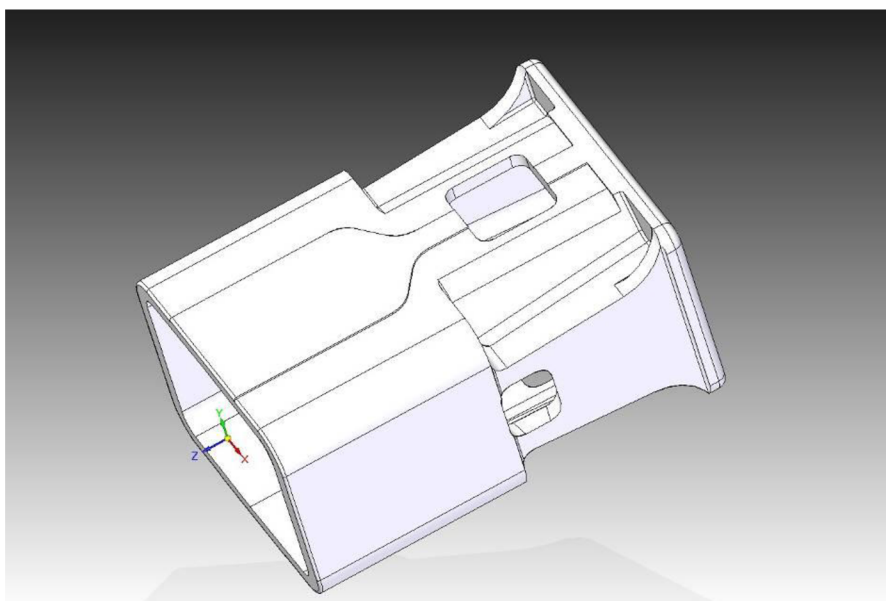
Po natavení se tekutý kov přelije z EOP do přehřátých pánví, které jsou jeřábem převezeny na lící pole.

Odlitky se formují strojně na formovacích strojích FOROMAT. Formovací směs je zpevněna střešením a dolisováním. Na model se nejdříve nasype modelová bentonitová formovací směs a zbytek formovacího rámu je poté doplněn výplňovou formovací směsí.

Odlitky jsou formovány do formovacích ráků o rozměrech 1300 x 930 o výšce 200 mm - spodní rám a 250 mm horní rám. V rámu jsou umístěny vždy 2 odlitky, které se odlévají společnou vtokovou soustavou, každý vždy na dva vtokové zářezy. Vtokový kůl je tvořen šamotovou výlevkou, pod kterou je umístěna rozvodka.

Celková váha surového odlitku je 115 kg. Tekutý kov pro jeden formovací rám tudíž váží $2 \times 115 \text{ kg} = 230 \text{ kg}$ (2 odlitky v rámu).

Odlitek nárazníku (Obr. 1.1) se používá jako tlumící a spojovací zařízení u železničních vagónů. Tomu také odpovídají specifické požadavky pro jeho výrobu a následnou přejímku zákazníkem, které jsou uvedené v technicko-dodacích podmínkách (dále jen TDP).



Obr. 1.1 Odlitek nárazníku

Mezi nejzajímavější a nejdůležitější body, které TDP předepisují patří:

- Požadovaný materiál odlitků: 30GSL-B (chemické složení Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Porovnání obou materiálů pro odlitky nárazníků

Chemické složení pro požadovaný materiál 30GSL-B							
C %	Mn %	Si %	Cr % (max)	Ni % (max)	Cu % (max)	S % (max)	P % (max)
0,25 – 0,35	1,20 – 1,60	0,20 – 0,50	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4

- Minimální mechanické hodnoty odlitku po konečném tepelném zpracování:

Mez kluzu (Re): 490 MPa

Mez pevnosti (Rm): 657 MPa

Tažnost (A₅): 10%

Kontrakce (Z): 20%

Vrubová houževnatost (KCU) při teplotě -60°C: 29,4 J/cm²

Tvrдость: 207 – 255 HB

- Ověření mechanických hodnot je prováděno na přilítých blocích (Obr. 1.2), ze kterých se opracováním zhotoví zkušební tělíska pro stanovení tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti pro - 60°C.

Tyto bloky se přilévají buď přímo na odlitek (nevhodné pro malé odlitky) nebo se odlévají zvlášť do rámu. Bloky jsou označeny čísly, dle kterých se dají přiřadit k jednotlivým tavbám. Odlévány jsou vždy alespoň 3 bloky na každou zkoušenou tavbu. Po vytlučení jsou společně s odlitky zavezeny do pece na tepelné zpracování, aby se docílilo co nejmenších rozdílů v naměřených mechanických hodnotách mezi odlitky a bloky. Následně se ze spodní části bloků uřežou vzorky. Z těchto vzorků se poté vysoustruží zkušební tělesa - tyčky pro mechanické zkoušky (zkouška tahem apod.) Horní rozšířená část bloku slouží jako náliček a je v ní založené z boku atmosférické jadérko.



Obr. 1.2 Přilítý zkušební blok

- Měření tvrdosti je prováděno na předepsaném místě na odlitku (Obr. 1.3), ve vzdálenosti 60 mm od otevřeného okraje odlitku. Předepsaná tvrdost na tomto místě by se měla pohybovat v rozmezí 207 - 255 HB.



Obr. 1.3 Výkres odlitku s místem pro měření tvrdosti

- Na odlitku jsou předlita 3 tělíska (Obr. 1.4). Po provedeném tepelném zpracování (zušlechtění), je nutno jedno přilité tělísko naříznout a ulomit pro vyhodnocení lomu. Vyhodnocení lomové plochy tělíska se provádí vizuálně, dle předepsaných obrázků v TDP. Pro omezení počtu tepelných zpracování je v TDP určeno, že vyhodnocení lomu je nutno provést vždy po provedeném zušlechtění. Toto zušlechtění je možno provést maximálně 2x. Tzn., že na odlitku musí zůstat minimálně jedno tělísko pro ověření kvality samotným zákazníkem.



Obr. 1.4 Tělíska pro vyhodnocení lomových ploch

2 VLIV CHEMICKÉHO SLOŽENÍ

Odlitek nárazníku se svým chemickým složením (Tab. 2.1) řadí mezi nízkolegované oceli [1]. Nízkolegované konstrukční oceli jsou vyráběny nejvíce jako manganové oceli (s obsahem manganu nad 1,2 – 1,8 %) určené pro vyšší namáhání a zejména pro odlitky pracující za nízkých nebo vyšších teplot [2].

Jelikož požadovaný materiál 30GSL-B neměl v ČSN normách odpovídající ekvivalent, musel nejprve technologický úsek Sléváren Třinec navrhnout vhodný materiál pro ověření požadovaných mechanických hodnot nárazníků.

Vybrán byl materiál s obdobným chemickým složením, který je uveden v německých normách (DIN) pod označením GS-30Mn5 (Tab. 2.1).

Tab. 2.1 Porovnání obou materiálů pro odlitky nárazníků

Porovnání obou materiálů pro odlitky nárazníků								
	C %	Mn %	Si % (max)	Cr % (max)	Ni % (max)	Cu % (max)	S % (max)	P % (max)
GS-30Mn5	0,27 – 0,34	1,20 – 1,50	0,60	0,30	0,30	0,30	0,015	0,020
30GSL-B	0,25 – 0,35	1,20 – 1,60	0,20 – 0,50	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40

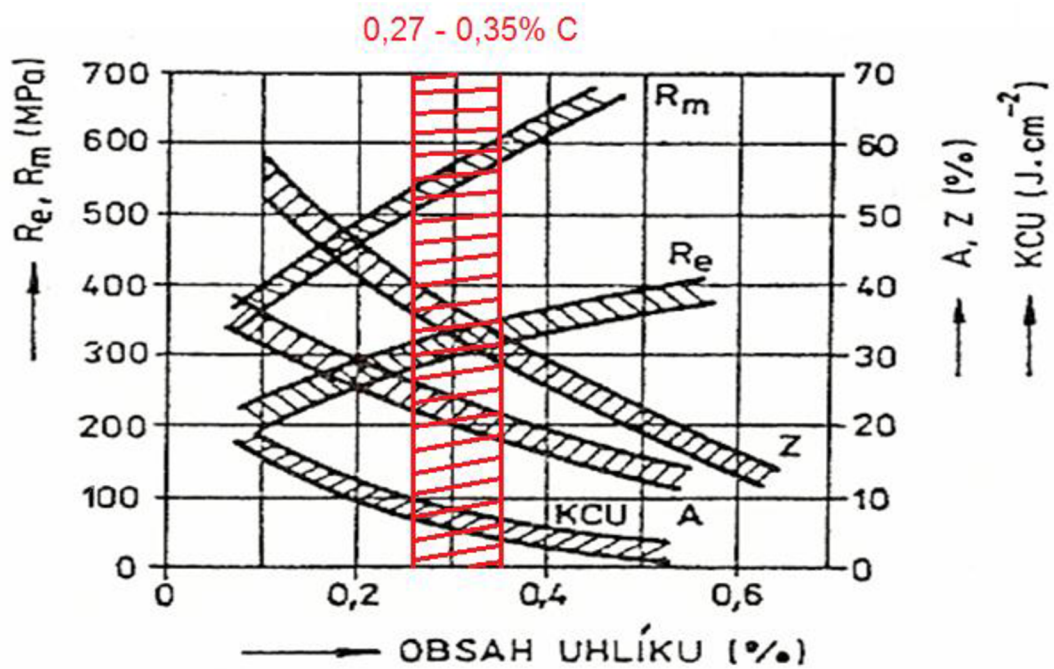
Z tabulky 2.1 je zřejmé, že oba materiály se nejvíce liší v povolených maximálních rozmezích síry a fosforu. Jelikož se u ocelí, u kterých jsou požadovány hodnoty houževnatosti při záporných teplotách snižuje obsah síry až pod 0,015%, [2] dá se předpokládat, že vybraný materiál GS-30Mn5 je právě kvůli svým specifickým požadavkům na hodnotu vrubové houževnatosti (viz kapitola 1) mnohem vhodnější, než materiál 30GSL-B. Naopak protože se stoupajícím obsahem fosforu roste i pevnost odlitků [1], dá se předpokládat, že hodnoty pevnosti by byly vyšší u materiálu 30GSL-B kvůli jeho vyššímu maximálnímu obsahu tohoto prvku.

2.1 Vliv obsahu uhlíku

Uhlík je v oceli z hlediska metalurgie nejdůležitějším prvkem. Každá nelegovaná ocel obsahuje kromě uhlíku i křemík (Si), mangan (Mn), fosfor (P) a síru (S), které získá v průběhu výroby [3].

2.1.1 Vliv na mechanické vlastnosti

Jak můžeme vidět na Obr. 3.1, se zvyšujícím se obsahem uhlíku roste rovněž pevnost a mez kluzu. Klesají naopak hodnoty vrubové houževnatosti, tažnosti a kontrakce [3].



Obr. 3.1 Vliv uhlíku na vlastnosti nízkolegovaných a nelegovaných ocelí [4]

2.1.2 Vliv na technologické vlastnosti

Uhlík nemá prakticky žádný vliv na odolnost proti korozi. Při vyšším obsahu uhlíku se snižuje rovněž houževnatost, svařitelnost, obrobiteľnosť a tepelná vodivost [3].

2.2 Vliv manganu

Mangan tvoří se sírou sulfidy (MnS), které snižují nežádoucí vliv síry. Vyšší obsah manganu zvyšuje mez kluzu, prokalitelnost a mez pevnosti. Mangan dále příznivě působí na tvařitelnost a svařitelnost ocelí [3].

2.3 Vliv křemíku

Křemík není kov a je v ocelích obsažen jako pozůstatek chemického složení železné rudy. Napomáhá dezoxidaci, zvyšuje pevnost a odolnost proti opotřebení. Značně také zvyšuje mez pružnosti. Zvyšuje žáruvzdornost a mez únavy. Mírně zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popouštění, ale snižuje elektrickou vodivost [3].

2.4 Vliv síry

Síra je u nízkolegovaných ocelí na odlitky nežádoucím prvkem, protože snižuje pevnost oceli (při teplotách pod solidem). Těsně pod solidem existuje pásmo teplot, ve kterém má ocel minimální hodnotu pevnosti. V tomto pásmu již nízká napětí vznikající v odlitku při chladnutí vedou ke vzniku trhlin. A síra toto pásmo nebezpečně rozšiřuje [3].

Prvky s vysokou afinitou k síře tvoří se sírou při teplotách okolo 1600 °C sulfidy. Sulfidy (hlavně MnS, FeS) snižují značně houževnatost a kujnost ocelí [3].

2.5 Vliv fosforu

Fosfor je považován za škodlivý prvek, neboť se projevuje hrubnutím při krystalizaci oceli. S železem a jinými přísadami vytváří tzv. fosfidy. Zvyšuje pevnost a odolnost proti atmosférické korozi, ale zároveň zvyšuje i křehkost ocelí za studena i za tepla, která stoupá s obsahem uhlíku [3].

3 OVĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

U zvoleného materiálu GS-30Mn5 bylo kvůli ověření předepsaných mechanických hodnot přistoupeno k odlití zkušební tavby č. 93489 (Tab. 3.1). V této tavbě bylo odlito prvních 20 kusů odlitků nárazníku a také 1 kus zkušebního bloku.

3.1 Použité technologie a podmínky výroby

Z tabulky 3.1 vyplývá, že složení zkušební tavby č. 93489 odpovídá předepsaným požadavkům. U obsahů síry, fosforu a mědi má navíc tavba č. 93489 značné rezervy.

Tab. 3.1 Chemické složení zkušební tavby č. 93489

Chemické složení zkušební tavby č. 93489 – materiál GS-30Mn5								
	C %	Mn %	Si %	Cr % (max)	Ni % (max)	Cu % (max)	S % (max)	P % (max)
GS-30Mn5 předpis	0,27 – 0,35	1,20 – 1,50	0,15 – 0,35	0,3	0,3	0,3	0,025	0,035
GS-30Mn5 t.č. 93489	0,27	1,33	0,43	0,27	0,03	0,04	0,008	0,011

Ze zkušebního bloku této tavby se poté provedla tahová zkouška a speciální zkouška vrubové houževnatosti pro - 60°C (Tab. 3.2). Zkouška tvrdosti se prováděla na každém z odlitků zvlášť (viz kapitola 1).

3.1.1 Mechanické zkoušky

Zkouška tahem:

Zkouška tahem spočívala v deformaci zkušebního tělesa tahovým zatížením. Zkušebním tělesem byla tyč kruhového průřezu, která se získala ze vzorku odebraného z přilitého bloku tavby č. 93489 (viz kapitola 1) po tepelném zpracování (Obr. 3.1).

Deformace probíhala ve zkušebním stroji od firmy FORM + TEST Seidner & Co. GmbH (Obr. 3.2), natahováním vzorku o průměru 13mm předepsanou rychlostí až do porušení. Přitom se zaznamenávala závislost osově tahové síly F na prodloužení tyče L . Z této závislosti se dále podle předdefinovaných vztahů určily hodnoty pevnosti v tahu R_m . A po ukončení zkoušky se dále vyhodnotila ještě tažnost A a kontrakce Z .



Obr. 3.1 Schéma míst pro odběr vzorků z přilitého bloku (viz kapitola 1)



Obr. 3.2 Trhací stroj značky FORM + TEST Seidner & Co. GmBh

Zkouška vrubové houževnatosti:

Zkouška vrubové houževnatosti spočívala ve stanovení nárazové práce potřebné na přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva. Tato práce vztažená na průřez tyče v místě přeražení vyjadřuje houževnatost materiálu. Zvláštností této zkoušky bylo ovšem její provedení pro minusovou teplotu -60°C . Jelikož běžná teplota, při které se zkouška provádí je 20°C . Porovnání získaných hodnot pro obě teploty je v Tab. 3.2.

Z porovnání hodnot vrubových houževnatostí pro tyto dvě odlišné teploty vyplývá, že hodnoty vrubové houževnatosti zřejmě s klesající teplotou rovněž klesají.

Tab. 3.2 Porovnání hodnot vrubové houževnatosti

T[$^{\circ}\text{C}$]	KCU[J/cm 2]
20	40
-60	30

Zkouška tvrdosti podle Brinella:

Zkouška spočívá ve vtlačování vnikajícího kuličky z tvrdokovu o daném průměru (10mm) tvrdoměrem EQUOTIP 2 do povrchu zkušební tělesa a změření průměru vtisku, který zůstane na povrchu zkoušeného tělesa po odlehčení zkušebního zatížení F [5].

Hodnoty tvrdostí byly měřeny podle předepsaných podmínek TDP na tělese odlitku (viz kapitola 1) pro každý odlitý kus nárazníku zvlášť. Hodnoty těchto tvrdostí jsou v příloze 1.

Tab. 3.3 Porovnání předepsaných mechanických hodnot s naměřenými

	požadované hodnoty	naměřené hodnoty
Re [MPa]	490	546
Rm [MPa]	657	650
A5 [%]	10	18,7
Z [%]	20	51,2
KCU3 [J/cm ²]	29,4	30
Tvrdość [HB]	207 - 255	215*

Pozn. * jedná se o průměrnou hodnotu pro 20 ks nárazníků, která sice odpovídá požadované, ovšem z 20 ks nárazníků nevyhovělo požadavkům na hodnotu tvrdosti 5 kusů viz. příloha 1.

Z tab. 3. 3 vyplývá, že u hodnot meze pevnosti Rm a tvrdosti nebylo dosaženo požadovaných vlastností. Naopak naměřené hodnoty meze kluzu Re, tažnosti A a kontrakce Z byly v pořádku. Hodnota vrubové houževnatosti byla rovněž nad požadovanou hodnotou, ovšem rozdíl byl pouze minimální.

Pro docílení požadovaných hodnot meze pevnosti a tvrdosti a zvýšení hodnoty vrubové houževnatosti byla zavedena tato opatření:

Opatření:

- a) Pro zvýšení hodnot **pevnosti** a tvrdostí se přistoupilo k zvýšení obsahu uhlíku a manganu na horní hranici povolenou předepsaným materiálem
- b) Kvůli snížení negativních vlivů na hodnoty **vrubové houževnatosti** - snaha o snížení obsahu síry
- c) Kvůli zvýšení **povrchové jakosti** byla použita filtrace tekutého kovu
- d) Pro zvýšení hodnot pevnosti a **tvrdosti** - změna diagramu tepelného zpracování

4 Vliv obsahu uhlíku a manganu na mechanické vlastnosti odlitků nárazníků

Jak již bylo řečeno, zvýšením obsahu uhlíku a manganu na horní hranice povolené materiálovou normou se předpokládal nárůst hodnot meze pevnosti na odlitcích nárazníku (viz kapitola 2 - vliv uhlíku, vliv manganu). Jako negativní účinek by se měl ovšem projevit snižování hodnoty vrubové houževnatosti.

V rámci diplomové práce byl pro ověření těchto teoretických předpokladů hodnocen vliv zvyšujícího se obsahu uhlíku a manganu na hodnoty meze pevnosti a vrubové houževnatosti.

4.1 Použité technologie a podmínky výroby

Tekutý kov je pro potřeby výroby odlitků nárazníků připravován na elektrických obloukových pecích (viz kapitola 1).

Technologie formování:

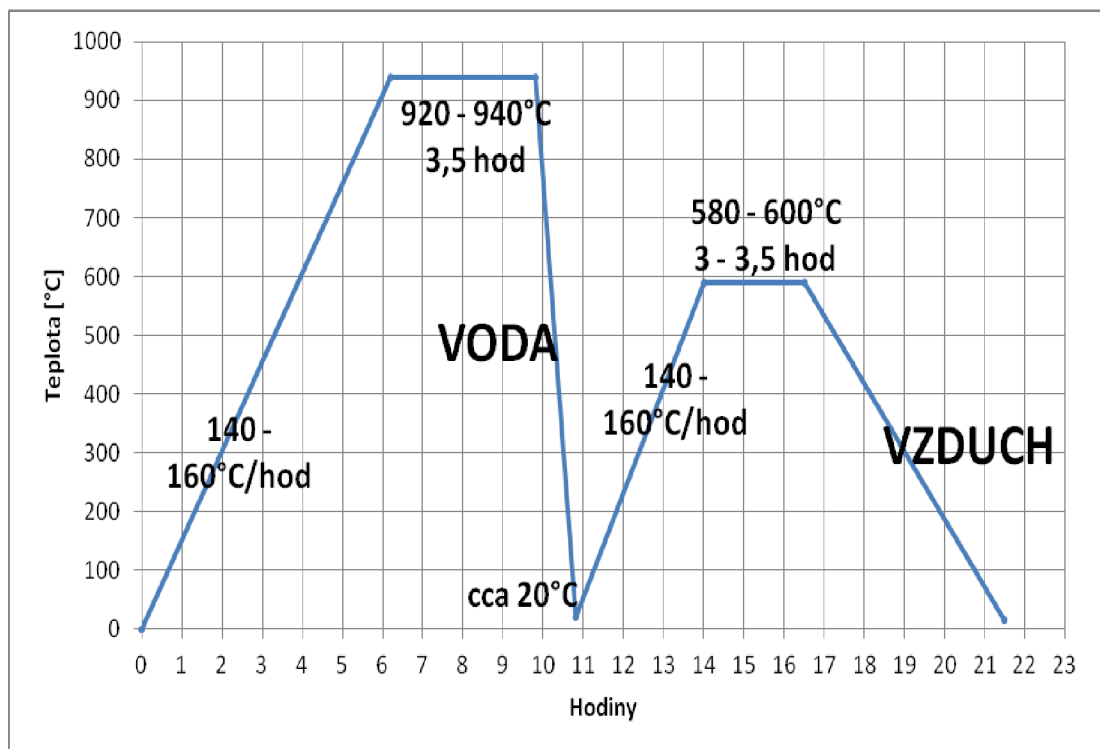
Formovací směs: Bentonitová směs, strojní formování

Počet odlitků ve formě: 2

Formovací rám: 1300 x 930 o výšce 200/250mm

Po upravení chemického složení taveniny, bylo s vyššími obsahy uhlíku nebo manganu postupně odlito celkem 35 taveb i se zkušebními bloky. (chemické složení viz příloha 2).

Odlitky i se zkušebními bloky poté prošly tepelným zpracováním (Obr. 4.1), po kterém se ze zkušebních bloků těchto taveb provedly tahové zkoušky a zkoušky vrubové houževnatosti při teplotě - 60°C (příloha 3).



Obr. 4.1 Průběh tepelného zpracování

Pozn. hodnoty popouštěcích teplot jsou na obr. 4.1 pouze orientační, diagram se v průběhu výroby odlitků nárazníku postupně upravoval a hodnoty popouštěcích teplot byly různé (Příloha 4).

4.2 Analýza mechanických vlastností odlitku

U získaných hodnot mechanických vlastností – meze pevnosti a vrubové houževnatosti se spolu s předchozími hodnotami (získanými u taveb s neupravenými obsahy uhlíku a manganu) provedlo grafické vyhodnocení vlivu obsahu uhlíku a manganu.

U jednotlivých souborů naměřených hodnot meze pevnosti a vrubové houževnatosti, byla vždy pro přehlednost a jednoznačnost určena výsledná střední hodnota a provedena regresní analýza, která nám dává odpověď, zda lze hodnoty meze pevnosti resp. vrubové houževnatosti odhadnout na základě obsahů uhlíku resp. manganu (a s jakou chybou).

Postup regresní analýzy lze shrnout do těchto bodů:

1. Sestrojení bodového grafu a jeho posouzení.
2. Volba typu regresní křivky a výpočet jejich koeficientů.
3. Hodnocení kvality nalezeného řešení.

Hodnocení kvality bylo provedeno za pomoci rovnice regresní přímky a analýzou hodnoty spolehlivosti R.

Hodnota spolehlivosti, tj. koeficient determinace R^2 , udává procento, jakým je rozptyl hodnot závisle proměnné veličiny Y (mez pevnosti nebo hodnot KCU) vysvětlen (ovlivněn) změnami hodnot nezávisle proměnné veličiny X (obsah uhlíku, manganu). Koeficient nabývá hodnot od 0 do 1. Čím je vyšší, tím je nalezený model kvalitnější. Lze tudíž říci, že čím vyšší je hodnota R^2 , tím významnější je vliv obsahu uhlíku nebo manganu na hodnoty meze pevnosti resp vrubové houževnatosti.

$R^2 = 0,1 - 0,3$ málo významný

$R^2 = 0,4 - 0,6$ středně významný

$R^2 = 0,7 - 0,8$ silně významný

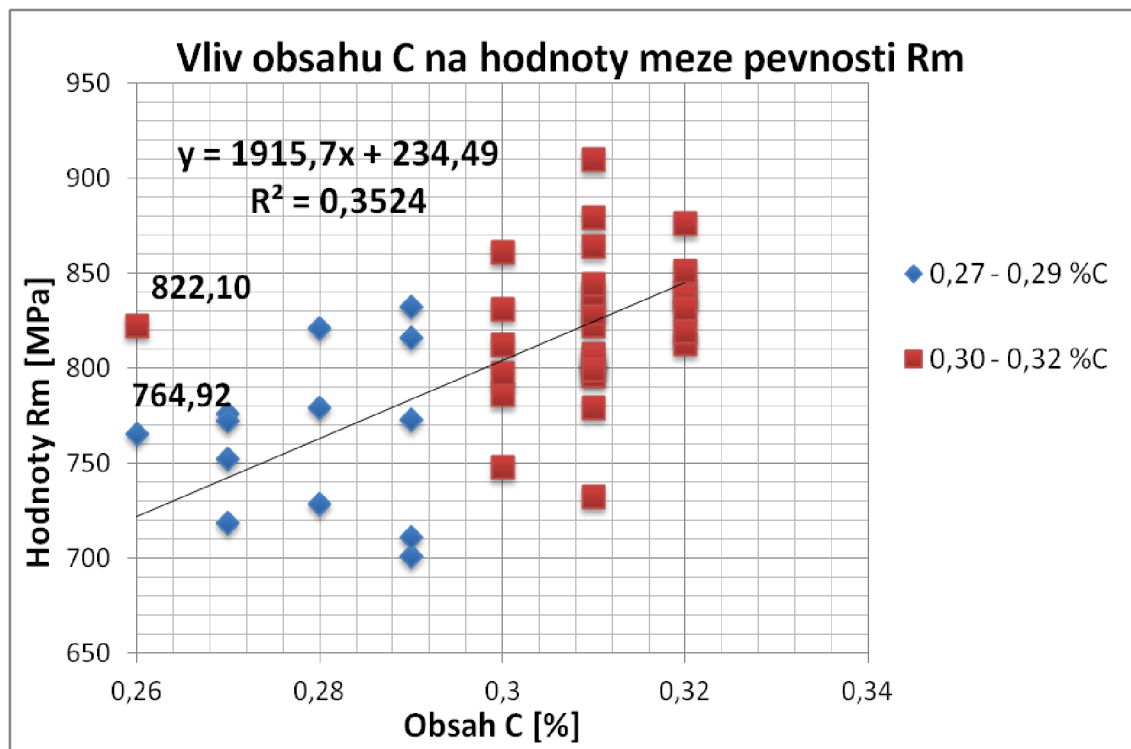
$R^2 > 0,9$ velmi významný.

U grafického hodnocení vlivu uhlíku na hodnoty R_m a KCU byly tavby rozděleny podle obsahu uhlíku do 2 intervalů (viz Graf 4.1, 4.2) s daným rozmezím chemického složení, u nichž byl sledován vliv jednotlivých intervalů na střední hodnotu naměřených hodnot meze pevnosti resp. Vrubové houževnatosti.

4.2.1 Vliv obsahu C na hodnoty meze pevnosti R_m

Grafu 4.1 vyplývá vliv obsahu C na hodnoty meze pevnosti. S rostoucím obsahem uhlíku lze vypočítat i rostoucí střední hodnotu meze pevnosti.

Regresní analýza nám v tomto případě potvrzuje grafické vyhodnocení a můžeme tedy říct, že i nepatrné zvýšení obsahu uhlíku může u tohoto způsobu výroby odlitků nárazníků ovlivnit hodnoty meze pevnosti.

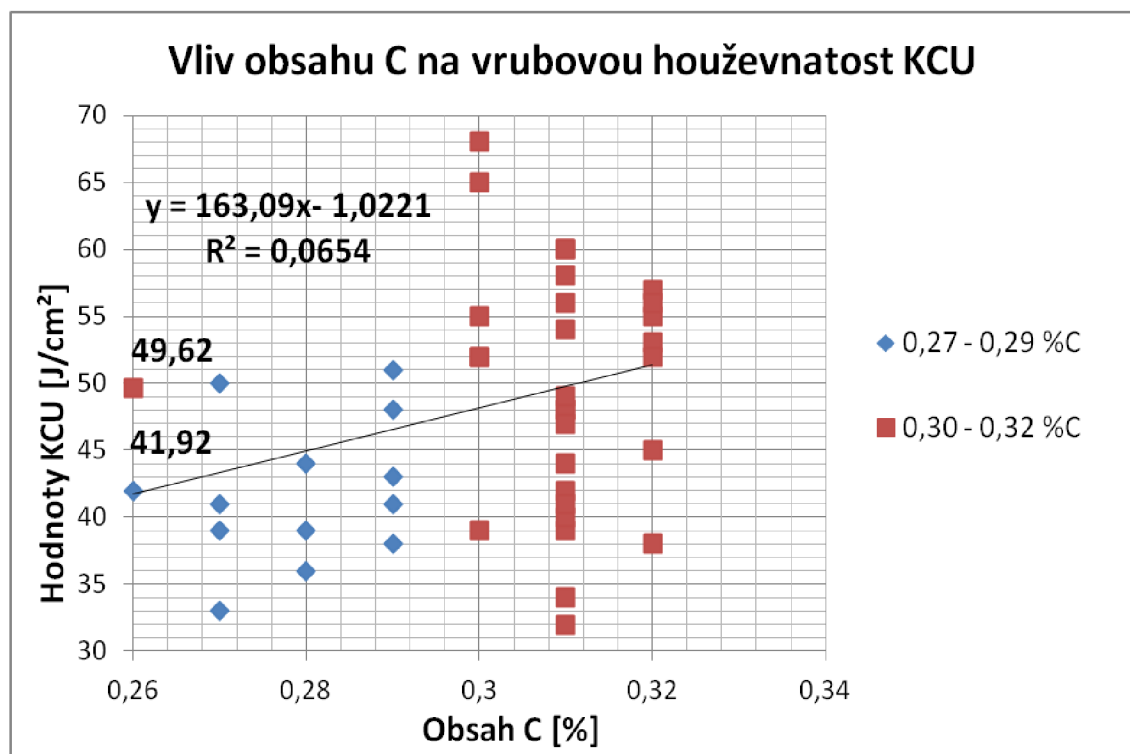


Graf 4.1 Vliv obsahu C na hodnoty meze pevnosti R_m

4.2.2 Vliv obsahu C na hodnoty vrubové houževnatosti KCU pro -60°C

Graf 4.2 nepotvrdil předpoklad, že by měly hodnoty vrubové houževnatosti s rostoucím obsahem uhlíku klesat. Musíme si ale uvědomit, že rozsah zkoumaných pásem obsahu uhlíku není příliš velký, a že účinek na výslednou vrubovou houževnatost mají i další vlivy, jako je změna digramu tepelného zpracování a s tím plynoucí rychlost ochlazování nebo filtrace kovu spojená se snížením vměstků v tavenině. Těmto vlivům se bude tato práce věnovat později.

Z regresní analýzy vyplývá, že zvyšující se obsah uhlíku měl u tohoto způsobu výroby odlitků nárazníků na hodnoty vrubové houževnatosti velmi malý (zanedbatelný) vliv.



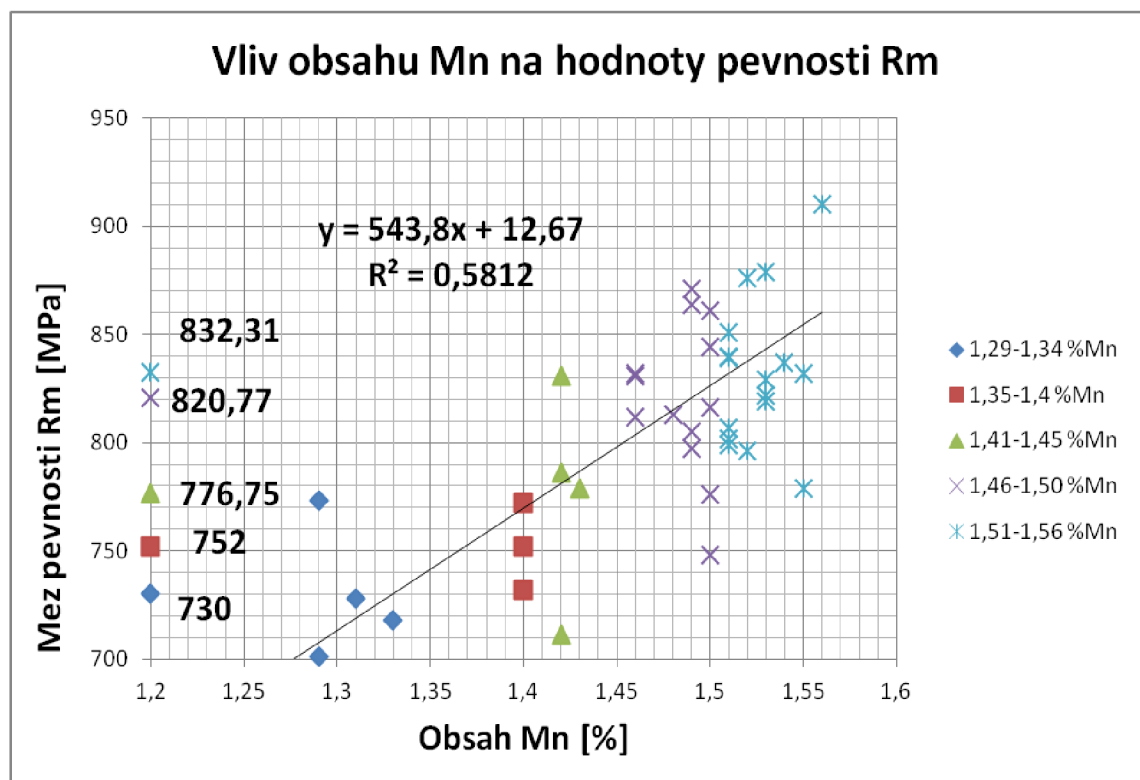
Graf 4.2 Vliv obsahu C na vrubovou houževnatost

4.2.3 Vliv obsahu Mn na hodnoty meze pevnosti Rm

U tohoto měření byly tavby rozděleny podle obsahu manganu do 5 intervalů (viz Graf 4.3) s daným rozmezím chemického složení, u nichž byl sledován vliv jednotlivých intervalů na střední hodnotu naměřených hodnot meze pevnosti.

Jak z grafu 4.3, tak i z výsledků středních hodnot meze pevnosti vyplývá, že se stoupajícím obsahem manganu v tavenině rovněž stoupají i hodnoty meze pevnosti.

Regresní analýza nám v tomto případě potvrzuje grafické vyhodnocení a můžeme tedy říct, že i nepatrné zvýšení obsahu manganu může u tohoto způsobu výroby odlitků nárazníků ovlivnit hodnoty meze pevnosti.



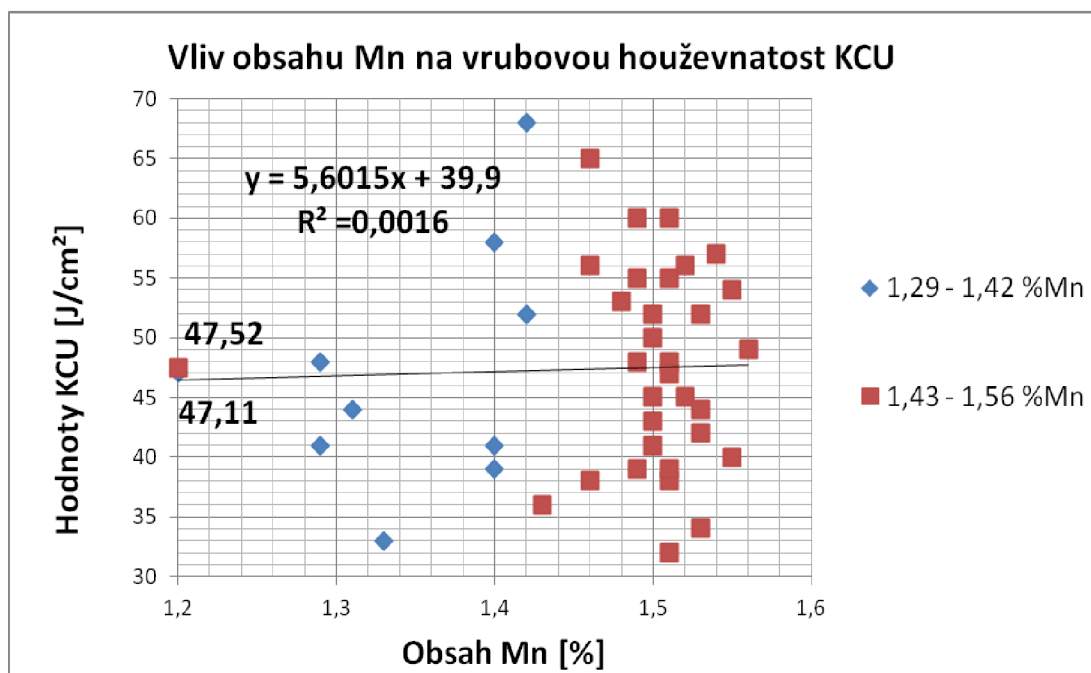
Graf 4.3 Vliv obsahu Mn na hodnoty meze pevnosti Rm

4.2.4 Vliv obsahu Mn na hodnoty vrubové houževnatosti pro -60°C

U následujícího měření byly tavby rozděleny podle obsahu manganu tentokrát pro větší přehlednost a jednoznačnost výsledků do 2 intervalů (viz Graf 4.4) s daným rozmezím chemického složení, u nichž byl sledován vliv jednotlivých intervalů na hodnoty vrubové houževnatosti.

Graf 4.4 nepotvrdil předpoklad, že by měly hodnoty vrubové houževnatosti s rostoucím obsahem manganu klesat. Hodnota vrubové houževnatosti u sledovaného souboru nezávisela na obsahu Mn. Musíme si ale opět uvědomit, že rozsah zkoumaných pásem obsahu manganu nemusí být pro vysledování vlivu na hodnoty vrubové houževnatosti dostačující. A že účinek na výslednou vrubovou houževnatost mají i další vlivy zmíněné výše.

Regresní analýza v tomto případě opět potvrdila grafické vyhodnocení. Zvyšující se obsah manganu měl u tohoto typu výroby odlitku na hodnoty vrubové houževnatosti velmi malý (zanedbatelný) vliv.



Graf 4.4 Vliv obsahu Mn na hodnoty vrubové houževnatosti

4.3 Shrnutí výsledků a celkové vyhodnocení

Z grafického vyhodnocení a z výsledků regresní analýzy (tab. 4.2) vyplývá, že vliv uhlíku i manganu na hodnoty meze pevnosti u odlitku nárazníku (nizkolegovaná ocel) není zanedbatelný a na těchto hodnotách se projeví i minimální změny v obsahu uvedených prvků.

Naopak u hodnot vrubové houževnatosti se projevuje malý interval povoleného chemického složení materiálu u tohoto typu odlitků, který má na hodnoty vrubové houževnatosti malý nebo zanedbatelný vliv. Tento jev je zapříčiněn působením dalších faktorů, které jsou pro zvýšení hodnot vrubové houževnatosti podstatnější.

Tab. 4.2 Shrnutí výsledků experimentu

	Rm	KCU
↗ %C	↑	↓
↗ %Mn	↑	0

Doporučení pro výrobu je tedy zřejmé. Pro účely zvýšení hodnot meze pevnosti se jako správné (u tohoto typu výroby odlitků) jeví zvýšení obsahu uhlíku i manganu na horní hranice povolené materiálovou normou.

Totéž ovšem neplatí u hodnot vrubové houževnatosti. Z experimentu vyplývá, že pro účely zvýšení hodnot vrubové houževnatosti by bylo snížení obsahu uhlíku a manganu v tak malém rozsahu neefektivní. Jako výhodnější se zde jeví možnost dalšího snížení obsahu síry a fosforu.

5 VLIV OBSAHU SÍRY A FOSFORU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI ODLITKU NÁRAZNÍKU

Dalším krokem, který měl tentokrát přispět ke zvýšení a „stabilizaci“ hodnot pevnosti a hlavně vrubové houževnatosti, byla snaha o co možná největší snížení obsahu síry (viz kapitola 2 – vliv síry).

V rámci diplomové práce byl hodnocen vliv snižujícího se obsahu síry a fosforu na hodnoty meze pevnosti a vrubové houževnatosti.

5.1 Analýza mechanických vlastností odlitků

Nejprve byl hodnocen vliv stoupajícího obsahu síry a fosforu na mechanické vlastnosti (**mez pevnosti, vrubová houževnatost pro - 60°C**).

Postup byl obdobný jako u předešlého experimentu, kdy byly naměřeny mechanické hodnoty u všech proběhnuvších taveb (43 taveb) a ze získaných hodnot (R_m , KCU) bylo provedeno grafické vyhodnocení vlivu stoupajícího obsahu síry a fosforu na hodnoty R_m a KCU.

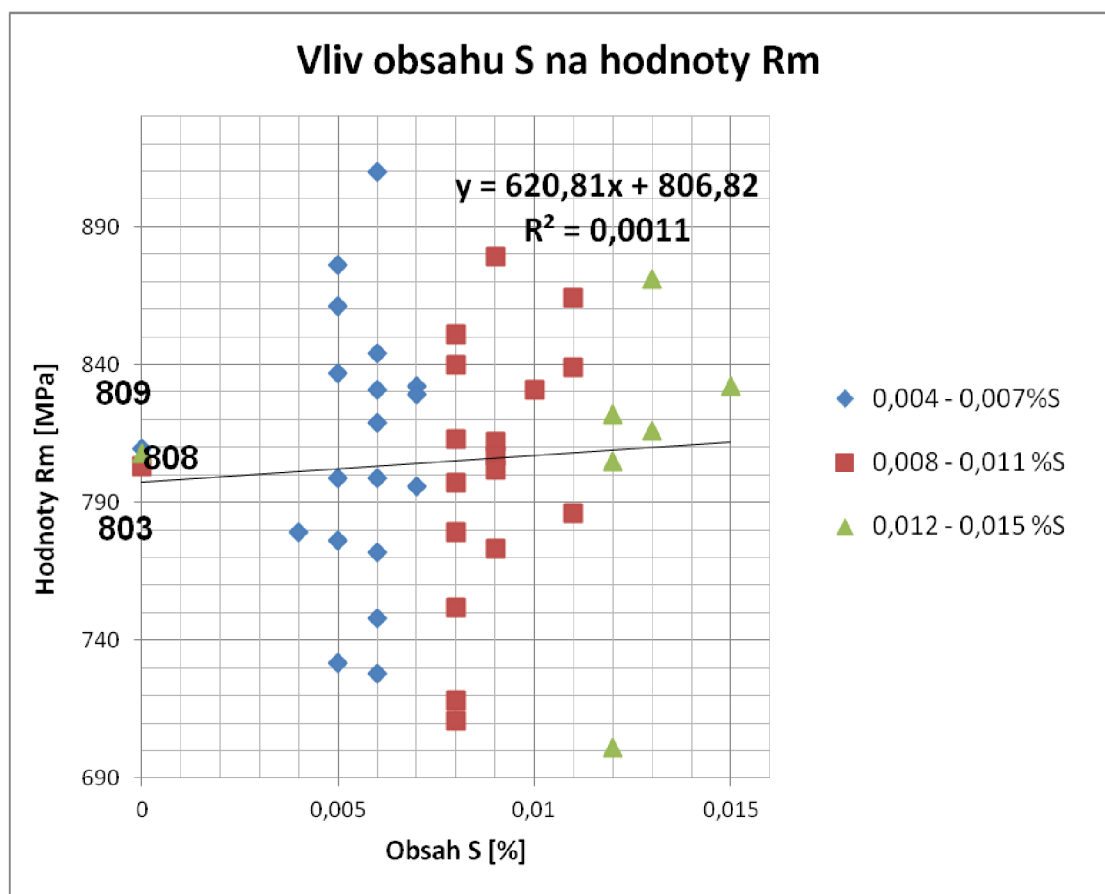
U jednotlivých souborů naměřených hodnot meze pevnosti a vrubové houževnatosti (pro - 60°C), byla vždy pro přehlednost a jednoznačnost určena výsledná střední hodnota a provedena regresní analýza, která nám dává odpověď, zda lze hodnoty meze pevnosti resp. vrubové houževnatosti odhadnout na základě obsahů síry resp. fosforu (a s jakou chybou) – viz popis regresní analýzy výše.

U zjišťování vlivu obsahu síry na hodnoty meze pevnosti a vrubové houževnatosti byly tavby nejprve rozděleny do 3 intervalů s daným rozmezím chemického složení, u nichž byl sledován vliv jednotlivých intervalů na střední hodnotu naměřených hodnot meze pevnosti.

5.2.1 Vliv obsahu S na hodnoty meze pevnosti Rm

Jak z grafu 5.1, tak i z vypočítaných středních hodnot meze pevnosti nevyplývá, že se s rostoucím obsahem síry úměrně snižují hodnoty meze pevnosti. Musíme si ale uvědomit, že rozsah zkoumaných pásem obsahu síry (Graf 5.1) nemusí být pro vysledování vlivu na hodnoty meze pevnosti dostačující. A že účinek na výslednou mez pevnosti mají i ostatní vlivy, které probíhaly současně - zvýšení obsahu uhlíku, zvýšení obsahu manganu a změna diagramu tepelného zpracování.

Z výsledků regresní analýzy rovněž vyplývá, že snižující se obsah síry měl u tohoto typu výroby odlitků na hodnoty meze pevnosti velmi malý (zanedbatelný) vliv.

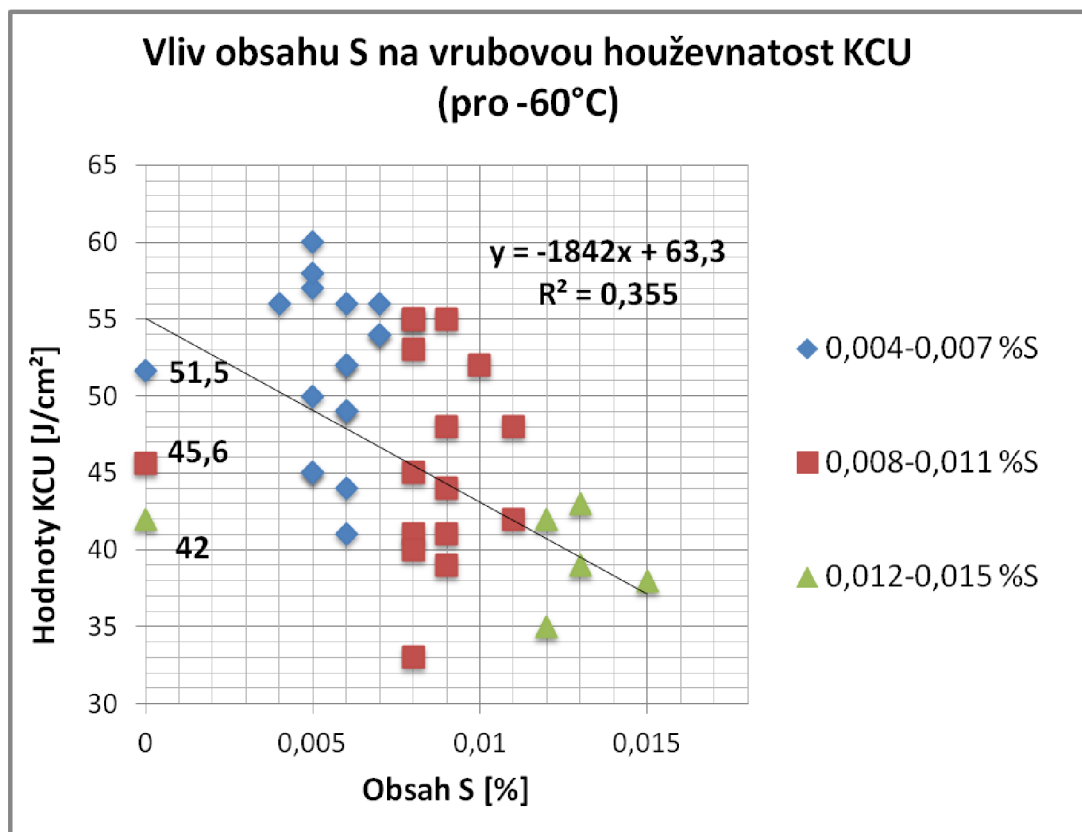


Graf 5.1 Vliv obsahu S na hodnoty meze pevnosti Rm

5.2.2 Vliv obsahu S na hodnoty vrubové houževnatosti KCU pro -60°C

Jak z grafu 5.2, tak i z vypočítaných středních hodnot vrubové houževnatosti vyplývá, že se s rostoucím obsahem síry úměrně snižují hodnoty vrubové houževnatosti.

Regresní analýza nám v tomto případě potvrzuje grafické vyhodnocení a můžeme říct, že i nepatrné snížení obsahu síry může u tohoto způsobu výroby odlitků nárazníků ovlivnit hodnoty meze vrubové houževnatosti.



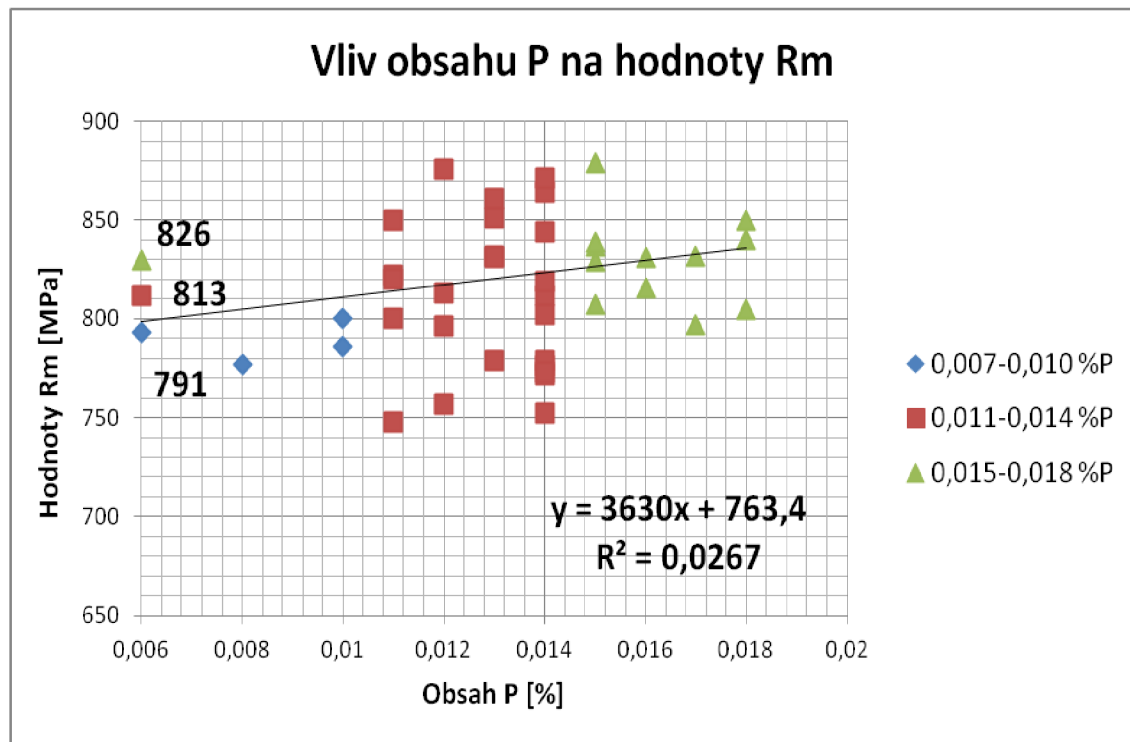
Graf 5.2 Vliv obsahu S na hodnoty vrubové houževnatosti

Při ověřování vlivu obsahu fosforu na hodnoty meze pevnosti a vrubové houževnatosti byly tavby rovněž nejprve rozděleny do 3 intervalů s daným rozmezím chemického složení, u nichž byl sledován vliv jednotlivých intervalů koncentrací na střední hodnotu naměřených hodnot meze pevnosti.

5.2.3 Vliv obsahu P na hodnoty meze pevnosti Rm

Jak z grafu 5.3, tak i z vypočítaných středních hodnot meze pevnosti vyplývá, že se s rostoucím obsahem fosforu úměrně zvyšují hodnoty meze pevnosti.

Z výsledků regresní analýzy ovšem vyplývá, že zvyšující se obsah fosforu měl u tohoto typu výroby odlitku na zvyšující se hodnoty meze pevnosti jen velmi malý (zanedbatelný) vliv.

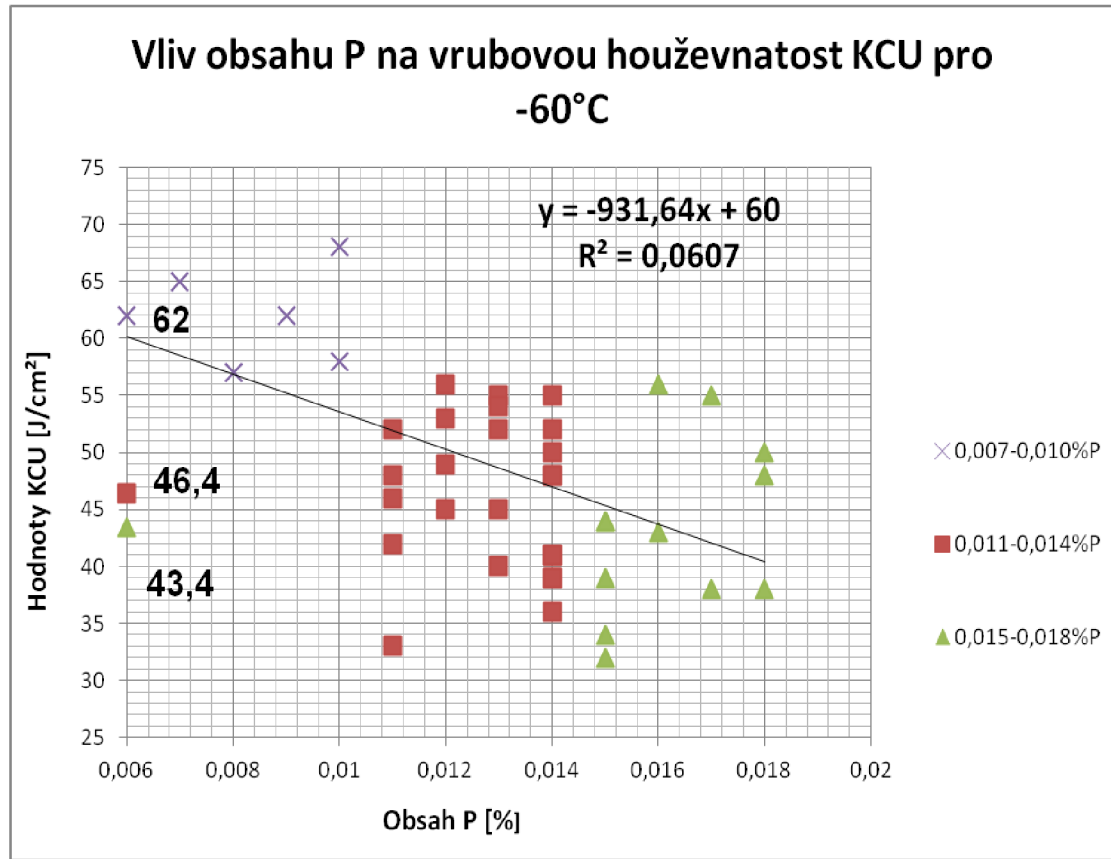


Graf 5.3 Vliv obsahu P na hodnoty Rm

5.2.4 Vliv obsahu S na hodnoty vrubové houževnatosti KCU pro - 60°C

Jak z grafu 5.4, tak i z vypočítaných středních hodnot vrubové houževnatosti vyplývá, že se s rostoucím obsahem fosforu úměrně snižují hodnoty vrubové houževnatosti.

Z výsledků regresní analýzy ovšem vyplývá, že zvyšující se obsah fosforu měl u tohoto typu výroby odlitku na snižující se hodnoty vrubové houževnatosti jen velmi malý (zanedbatelný) vliv.



Graf 5.4 Vliv obsahu P na hodnoty vrubové houževnatosti KCU

5.2 Shrnutí výsledků a vyhodnocení

Tab. 5.1 Shrnutí výsledků experimentu

	Rm	KCU
↗ %S	0	↓
↗ %P	↑	↓

Z grafického vyhodnocení a z tab. 5.1 vyplývá, že obsah síry u tohoto typu výroby odlitku nárazníků (nizkolegovaná ocel) ovlivňuje hodnoty vrubové houževnatosti. Na těchto hodnotách se projeví i minimální změny obsahu zmiňovaného prvku.

U fosforu se sice potvrdil teoretický předpoklad, že se zvyšujícím se obsahem tohoto prvku stoupají i hodnoty meze pevnosti R_m . Ovšem z výsledků regresní analýzy vyplývá, že zvyšující se obsah fosforu měl u tohoto typu výroby odlitku na hodnoty vrubové houževnatosti a meze pevnosti jen velmi malý (zanedbatelný) vliv.

Experiment naopak nepotvrdil, že se s rostoucím obsahem síry úměrně klesají hodnoty meze pevnosti R_m . Tento jev je zapříčiněn působením dalších faktorů, které jsou pro zvýšení hodnot meze pevnosti podstatnější.

Doporučení pro výrobu je tedy zřejmé. Pro účely zvýšení hodnot vrubové houževnatosti se jako výhodné (u toho způsobu výroby odlitků nárazníků z nizkolegované oceli) jeví snížení obsahu síry.

Z experimentu vyplývá, že pro účely zvýšení hodnot meze pevnosti by bylo snížení obsahu síry v tak malém rozsahu neefektivní.

Jako výhodnější se zde jeví možnost zvýšení obsahu uhlíku a manganu.

6 VLIV FILTRACE NA JAKOST ODLITKŮ

Pomocí technologie filtrace můžeme ovlivnit kvalitu odlitků a to zdaleka nejen tu povrchovou. Jedná se však o proces, který bývá v praxi velmi často podceňován. Technologie použití filtrů se na první pohled zdá mnohem jednodušší než například výpočet modulu odlitku či dosazovacích vzdáleností. Vlivem tohoto „ukvapeného“ přístupu filtrace často nepřináší očekávaný přínos a bývá v některých slévárnách zavržována již od prvních zkoušek. Přitom právě nesprávné použití filtrace vlivem neprovedeného výpočtu nebo nedostatečné informovanosti a zkušenosti slévárenského technologa a provozního personálu je drtivou příčinou neúspěchu [6].

Zcela jinou technologii filtrace můžeme uplatnit pro odlitky z ocelí než pro odlitky z litin, jinou pro silnostěnné a jinou pro tenkostěnné tvarově rozlehle odlitky, jinou pro samotuhnoucí směsi nebo pro bentonitové směsi. Samozřejmě, že zcela zásadně také záleží na použité dezoxidaci taveniny, způsobu odlévání apod. [6].

Úspěšné zavedení procesu filtrace do výrobního procesu tedy vyžaduje spoustu zkušeností, technologických změn a ochoty stálého učení se novým věcem. Na druhou stranu však zvládnutí této technologie umožní slévárně výrobu odlitků v kvalitě, kterou nelze bez filtrace dosáhnout. Právě tato vysoká kvalita odlitků a zkrácení výrobních časů na opravy zavařováním v dnešní době čím dál tím více rozhoduje o získání důležitých zakázek [6].

6.1 Druhy filtrů

Na trhu existuje celá řada filtrů pro odlévání kovu. Nejvíce jsou však rozšířeny tyto:

1) Lisované: princip filtrace cezením. Tyto filtry zachycují vměstky větší než je velikost jejich otvorů. Tímto způsobem je možné spolehlivě zachytit jen velké částice a vměstky, které tvoří blány. Výhodou těchto filtrů je relativně nízká cena a poměrně vysoká rozměrová přesnost [6].

2) Pěnové: princip hloubkové filtrace. Tyto filtry umožňují filtraci drobných částic a vměstků v celém svém objemu. Jsou schopny zachytit podstatně menší částice, než jsou jejich póry a pracují na různých principech dle materiálu: [6].

a) SiC filtry – pro filtraci litin jsou používány nejčastěji. Nemají dostatečnou tepelnou a chemickou odolnost pro odlévání ocelí. Jejich princip spočívá převážně v nalepování (adhezi) vměstků na stěny filtrů. Jsou z pěnových filtrů nejlevnější. Mají oproti Zr filtrům nižší tepelnou kapacitu, ale také termolabilitu, průrazovou pevnost a filtrační kapacitu [6].

b) Zirkonové (Zr) – používány pro filtraci ocelí a těžkých litinových odlitků. Jsou výrazně odolnější proti proražení kinetickou energií taveniny a mají výrazně vyšší filtrační kapacitu, ale také tepelnou pohltivost ve srovnání s filtry SiC. Filtrace adhezí a zachycením vměstků pod stěnou buňky filtru. Nižší smáčivost a silnější stěna buňky, než u SiC [6].

c) Uhlíkové – mají nejnižší tepelnou kapacitu a nejvyšší kapacitu filtrační. Jsou předurčeny pro filtraci nejnáročnějších odlitků z oceli a litin. Adhezní schopnost zachycení vměstků nalepením na stěnu buňky filtru je minimální. Jsou téměř nesmáčivé. Filtrují principem zachycení vměstků ve zpětném proudu taveniny pod poměrně masivní stěnou buňky. Proto zachycené vměstky mnohem méně blokují prostor pro průchod taveniny. Tím je zajištěna vysoká účinnost filtrace a zároveň filtrační kapacita [6].

6.2 Důležité pojmy ve filtrační technologii

6.2.1 Porozita filtrů

Volba porozity filtrů závisí na požadovaných vlastnostech filtrace. Některé slévárny preferují vysokou filtrační kapacitu, jiné vysokou účinnost filtrace. Všeobecně platí, že vysoká hustota porozity filtrů (tzv. ppi – počet pórů na lineární palec) a silná stěna jejich buněk zajistí nejvyšší účinnost filtrace – nejčistší taveninu. Na druhou stranu nejvyšší filtrační kapacitu zajistí nízká hustota pórů a nejtenčí stěna buněk filtru. Na „účinnosti“ filtrace přímo závisí nejen základní mechanické vlastnosti, ale také obrobitelnost odlitků. Při vysokých sériích může být právě tento fakt rozhodující pro konečnou volbu dodavatele těchto odlitků [6].

Pro většinu aplikací lze doporučit tyto porozity filtrů:

- Ocel = 10 ppi
- GJS = 10 – 20 ppi
- GJL = 20 – 40 ppi

6.2.2 Filtrační kapacita

Je dána množstvím kovu, který proteče filtrem, než dojde k ucpání nebo významnému snížení průtoku kovu přes filtr. Filtrační kapacita se udává v kg/cm^2 . Požadované množství taveniny, která by měla protéct přes filtr, je dána hmotností odlitku. Kapacita by se neměla filtr od filtru lišit a mělo by být vyloučeno riziko zanesení filtru. To bývalo způsobeno nehomogenitou keramiky filtru. Dnes jsou nevyhovující filtry (zmetky) vyřazeny na základě měření jejich hmotnosti. Jako nejdůležitější faktory ovlivňující filtrační kapacitu můžeme uvést: [6]

- Čistota taveniny
- Chemické složení taveniny
- Způsob dezoxidace
- Vyzdívka pánve
- Způsob odlévání (výlevka nebo hubička)
- Způsob mimopecní rafinace
- Umístění filtru v závislosti na vzdálenosti od vtokového kůlu
- Metalostatický tlak kovu na filtr
- Eroze formovacího materiálu
- Licí teplota

Filtrační kapacity pro různé druhy odlévaných materiálů a filtrů je vhodné počítat dle doporučení výrobce [6].

6.2.3 Pevnost (za studena a za tepla)

Při lití dochází k prudké změně teploty na filtru s roztaveným kovem, proto je důležitým faktorem pevnost za tepla. V důsledku této teplotní změny dochází ve filtru k velkému pnutí, které musí materiál filtru vydržet. Filtr musí také snést prvotní náraz kovu. Ač se to nemusí zdát podstatné i pevnost za studena je důležitá pro dopravu a manipulaci. Díky malé pevnosti za studena by mohlo dojít k odlomení či uvolnění části filtru. To by mohlo být později při lití odplaveno do dutiny formy [7].

6.2.4 Tepelná kapacita

Filtr představuje ve vtokové soustavě nejen hydraulický, ale také tepelný odpor. Pomocí rovnice 6.1 lze vyjádřit množství tepla, které filtr kovu odebere [8].

$$Q_f = m_f \cdot c_f (t_k - t_0) [J] \quad (6.1)$$

Kde:

- m_f hmotnost keramického filtru [kg],
 c_f měrná tepelná kapacita filtru [J/kg.K],
 t_k teplota kovu [°C],
 t_0 počáteční teplota filtru [°C].

V případě, kdyby filtr odebral kovu nadměru tepla, by mohlo dojít k rozdílným vadám způsobených „studeným“ kovem, nebo i k „zamrznutí“ kovu ve filtru [8].

6.3 Princip filtrace

Filtrace zdaleka neslouží jen k zachycení strusky a vměstků. V některých případech se dokonce můžeme setkat s tvrzením, že při odlévání ocelí spodní výlevkou není proč filtrovat, protože nemůže dojít k vniknutí strusky do odlitku. Vzhledem k víru v tavenině při odlévání však dochází ke strhávání strusky z hladiny již v době, kdy je v pánvi ještě několik tun kovu. Také vyzdívka pánve není k tavenině netečná. Její životnost je závislá právě na jejím odtavování. Ne všechny tyto vměstky přitom vyplavou do strusky. Pokud by tomu tak bylo, nebyla by filtrační kapacita v podstatě omezena [6].

Další důležitou vlastností filtrace je totiž zachycení turbulence a přeměna na plnění laminární [9].

Způsob proudění je závislý na rychlosti proudění, druhu kovu, tvaru vtokové soustavy a na změnách směru proudu kovu. Charakter proudění je popsán tzv. Reynoldsovým číslem viz rov. 6.2 [9].

$$Re = \frac{w \cdot D_h}{\nu} \quad [m/s] \quad (6.2)$$

Kde:

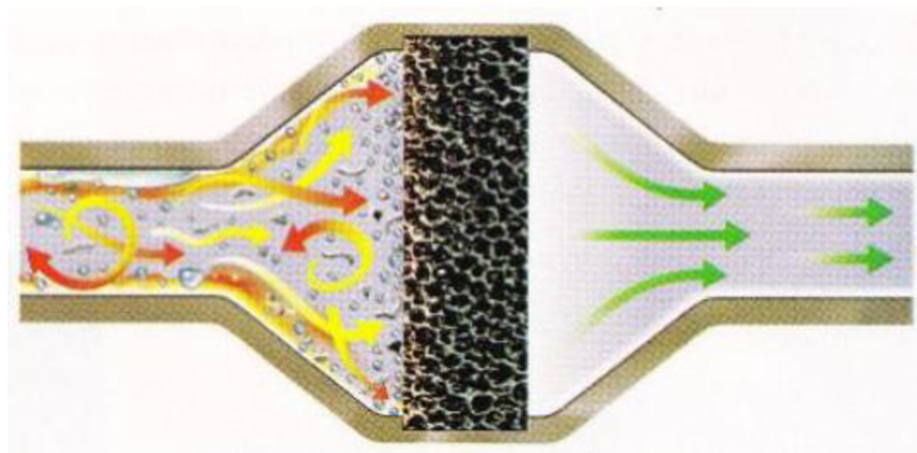
w....rychlost proudění [m/s],

D_h...hydraulický průměr kanálu [m],

ν.....kinematická viskozita kovu [m²/s]

Jestliže se hodnota Re zvýší, zvýší se i víření kovu (tzn. víření je intenzivnější). Je-li $Re < 3000$, je proudění laminární s minimálním nebezpečím eroze. Při $Re > 15\,000 - 20\,000$ je již zcela turbulentní a dochází k víření v celém průřezu kanálu [9].

Bez použití filtru je kov při lití takřka vždy výrazně turbulentní. Zavedení filtru tedy příznivě pomáhá snížit hodnotu Reynoldsova čísla a s ním i rozsah turbulence. Díky podstatně menšímu hydraulickému průměru kanálů filtru, oproti kanálům vtokové soustavy, se zmenší hodnota Re a tím i rozsah turbulence (Obr. 5.1). Např., je-li průměr vtokového kůlu 20 mm a průměr otvoru ve filtru 1 mm, sníží se hodnota Reynoldsova čísla 20 krát. Je pochopitelné, že po určité vzdálenosti od filtru turbulence opět nastává, avšak obvykle v menším rozsahu, než před ním [9].



Obr.6.1 Zklidnění toku tekutého kovu s použitím filtrační technologie [10]

6.4 Licí teploty s použitím filtrů

Zde záleží především na zkušenostech jednotlivých sléváren. V případě použití uhlíkových filtrů s nízkou tepelnou kapacitou u odlévání nálitkem, může toto odlévání probíhat při stejné teplotě jako při plnění těchto odlitek klasickou vtokovou soustavou bez použití filtrů. Filtrujeme-li tvarově náročné a těžké ocelové odlitky s umístěním několika filtrů v šamotové vtokové soustavě, je nezbytné volit licí teplotu vyšší alespoň o 20 - 30°C [6].

Toto zvýšení licí teploty závisí na mnoha faktorech a zkušenosti technologa. Pozor však na neúměrné zvyšování licí teploty ve snaze o dosažení co nejvyšší filtrační kapacity. Pomineme-li ovlivnění homogenity odlitku, žáruvzdornost formovací směsi a zvýšení rizika trhlin, s rostoucí teplotou roste i rychlost reakce kovu s vyzdívkou pánve. Tím se do taveniny dostává ještě více vměstků. Paradoxně se tak může stát, že přehřátím kovu se výrazně sníží průtočná kapacita kovu přes filtry a to i přesto, že je tento teplejší kov tekutější [6].

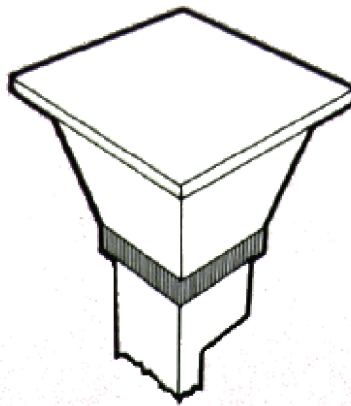
6.5 Návrh a konstrukce vtokové soustavy

6.5.1 Umístění vtokové soustavy

Nabízí se řada možností, jak filtr umístit do vtokové soustavy. Principiálně se rozdělují do dvou skupin:

- a) přímé lití,
- b) nepřímé lití.

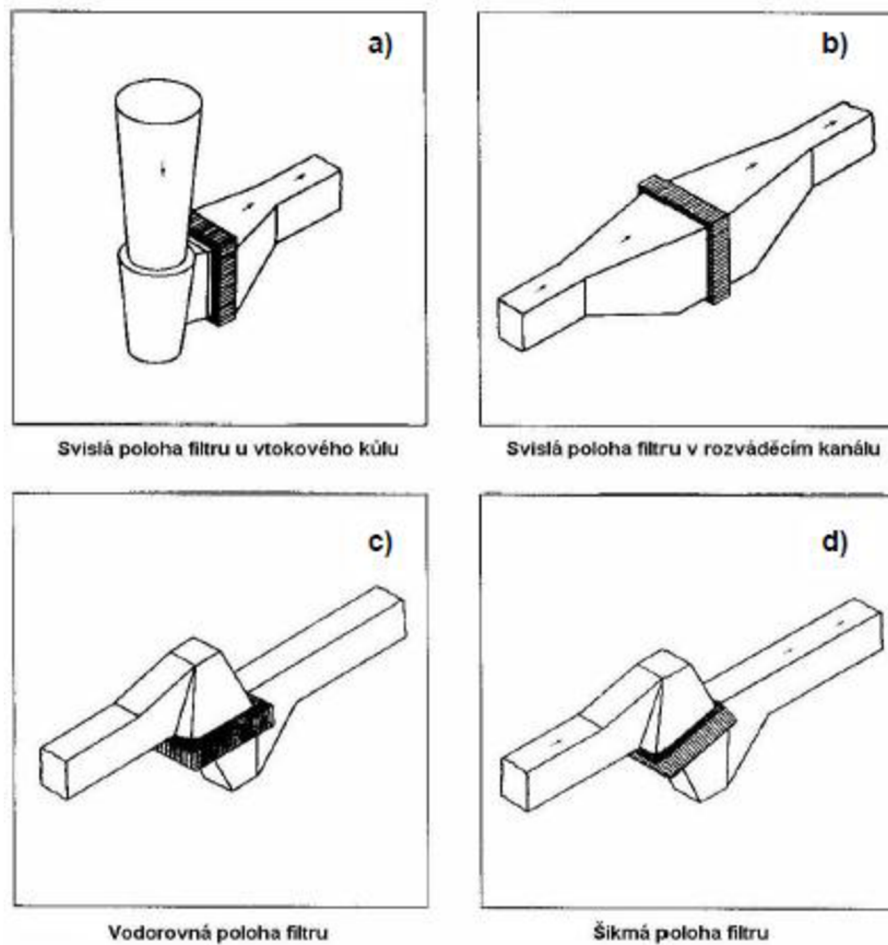
a) Přímé lití – u přímého lití proud kovu dopadá ve vodorovné poloze kolmo na filtr (Obr. 6.2). Způsob takto zavedeného filtru do vtokové soustavy je v praxi často používán, avšak nese sebou riziko prasknutí filtru vlivem dynamického rázu kovu. Čím vyšší vtokový kůl je, tím větší riziko nastává. Je zde možnost použití pouze jednoho filtru ve formě. Tento způsob se používá v případě, když dynamické účinky kovu nejsou příliš velké. Zejména tedy v licích kelímcích, v uzavřených nálitcích s filtrem nebo u filtrů umístěných ve vtokovém trychtýři keramických forem pro přesné lití [7].



Obr.6.2 Umístění filtru u přímého lití [7]

b) Nepřímé lití – filtry mají speciální komůrky ve vtokové soustavě, kde jsou umístěny, aby nedocházelo k přímému namáhání padajícího proudu kovu. Polohy filtru vůči směru proudění kovu jsou: [7]

- kolmé (obr. 6.3 a,b),
- rovnoběžné (obr. 6.3 c),
- šikmé (obr. 6.3 d).



Obr.6.3 Způsoby uložení filtrů vzhledem k jeho poloze [7].

U nepřímého lítí může mít samozřejmě vtoková soustava i několik větví se samostatnými filtry [9].

6.5.2 Výpočet velikosti filtru

Pro určení správné velikosti filtru musí být splněny dvě podmínky: [6]

- filtr nemá být řídicím průřezem vtokové soustavy,
- filtrem musí protéci potřebné množství kovu – přičemž nesmí dojít k ucpání filtru.

Ve vtokové soustavě filtr představuje určitý odpor proti proudění kovu. Odpor, který filtr působí, závisí na poměru jeho plochy k řídicímu průřezu, na tloušťce pórovitosti filtru. Aby se filtr nestal řídicím průřezem, je nutné dbát na to, ab byla jeho průtočná plocha dostatečně velká vůči průřezu kúlu. Velikost plochy filtru ovlivňuje licí dobu. Čím větší plocha je, tím menší vliv bude na licí dobu [5].

Za průtočnou plochu se považuje ta, kterou je kov schopen protéci. Průtočnost s ohledem na velikost filtru lze vypočítat dle vztahu 6.3 : [6]

$$\text{Plocha filtru} = \text{množství kovu} / \text{průtočnost filtru} [\text{cm}^2] \quad (6.3)$$

Kde:

plocha filtru[cm²],

množství kovu ... [kg],

průtočnost[kg/cm²]

6.6 Vznikající vměstky v ocelových odlitcích

Vměstky se vyskytují jak na povrchu odlitku, tak i v jeho objemu. Mohou mít mnoho podob například: [7].

- kompaktní částice,
- blány s malou tloušťkou, ale i s velkými plošnými rozměry,
- osamělé částice,
- shluk do souvislejších tvarů,
- vměstky, které nejsou vázány na mikrostrukturu slitin,
- koncentrace vměstků v mezizrnových prostorech.

Zhoršení mechanických vlastností:

Jelikož je vměstek cizí částice, narušuje kovovou mřížku slitiny. Důsledkem je snížení mechanických vlastností, zejména únavové pevnosti. Důležité je ovšem množství těchto vměstků a jejich velikost, případně i tvar. Velmi negativně působící vměstky jsou ty, které tvoří blány, dále vměstky tvořící síťoví po hranicích zrn a ostrohranné vměstky. Vměstky tvořících blánu porušují strukturu kovu ve velkých plochách a rovněž působí vrubovým účinkem [7].

Bublinatost

Vměstek může chemicky reagovat s kovem za vzniku plynu a způsobí tak bubliny, které se vyskytují jednotlivě, nebo tvoří hnízda. Dalším případem je vměstek sloužící jako vhodný zárodek pro nukleaci bublin během tuhnutí [9].

Z vměstků v oceli převažují oxidy MnO, FeO, SiO₂ a Al₂O₃. Nepříliš pak oxidy Cr, Zr, Ti či další. Převážná většina těchto vměstků pochází z reakce kovu, strusky s vyzdívkou nebo kovu s atmosférou formy. Kvalita a čistota odlitku zde velmi závisí na vyzdívce, jelikož je významným zdrojem vměstků. Je samozřejmé, že chemické složení vměstku závisí na druhu vyzdívkového materiálu [7].

Početné množství nekovových vměstků má původ z reoxidace oceli vzdušným kyslíkem. Při vylévání kovu z pece, na volném povrchu taveniny, transportu, ale i během proudění ve formě dochází k reoxidaci. V ocelích vznikají zejména hlinitanové vměstky díky desoxidací hliníku. Tyto hlinitanové vměstky je možné dobře zachytit filtrací, jelikož mají vysokou teplotu tuhnutí. Jsou tedy při lití v tuhém stavu. Mají-li nízký obsah hliníku, vzniknou oxidy méně reaktivních prvků - obzvláště Si, Mn a Fe. Zda dojde k zachycení vměstků ve vtokové soustavě, je závislé na jejich konzistenci při lící teplotě [11].

Vměstky mívají převážně tavící teplotu blízkou lící teplotě kovu. To znamená, že se díky viskóznímu stavu nalepují na stěny filtru vlivem kapilárních sil [11].

Zmíněná sekundární struska se objevuje zejména ve 2 morfologických typech:

- 1. typ: Jedná se o velké částice tvořené křemičitanem hořečnatým forsteritem, nebo enstatitem, které dále obsahují Fe, v menším množství pak Al, Ca nebo Ti. Sulfidy a částice grafitu jsou rovněž součástí těchto vměstků [11].
- 2. typ: Částice tvoří rozptýlené nebo řetízkové vměstky, které převážně obsahují MgS, MnS. Rozptýleny na jednotlivé částice nebo vzájemně spojené do tvaru shluků, případně řetízků, tvoří sulfidické vměstky. Část vyplave na hladinu kovu v odlitku, kde zhorší kvalitu povrchu horních ploch a část zůstane v objemu kovu. Tímto způsobem se chovají částice sekundární strusky [11].

Sulfidické vměstky jsou malé velikosti, a proto je jejich rychlost k vyplavení malá. Díky tomu nestačí velká část vyplavat na hladinu kovu v lící pánvi. Sulfidické vměstky nemohou být filtrací odstraněny beze zbytku, jelikož vznikají i během chladnutí tekutého kovu ve formě [11].

6.7 Použití filtrace pro odlitky nárazníků

Jak již bylo řečeno, rozhodujícím vlivem pro zavedení filtrace do technologie výroby odlitků nárazníků byly problémy s povrchovou kvalitou odlitků. Vysoký výskyt zadrobenin (Obr. 7.6, 7.7) způsoboval obrovskou pracnost v cidírně při jejich opravách, po kterých bylo navíc nutné opravené odlitky znovu tepelně zpracovávat. Tyto nutné opatření vedly samozřejmě ke značnému snížení ekonomičnosti výroby.

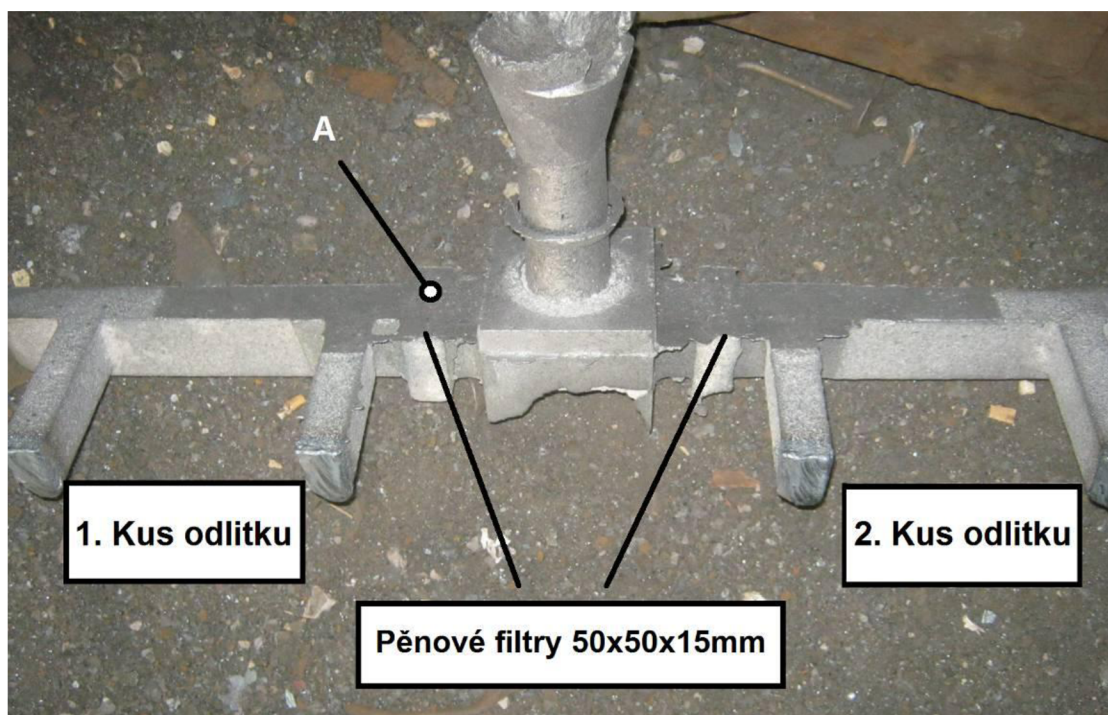
7 VLIV SLÉVÁRENSKÉ TECHNOLOGIE NA JAKOST ODLITKŮ NÁRAZNÍKŮ

V rámci diplomové práce byl pro ověření teoretických předpokladů hodnocen vliv filtrace na povrchovou jakost odlitků nárazníku.

7.1 Vliv filtrace na povrchovou kvalitu odlitků

Před zavedením technologie filtrace do sériové výroby odlitků nárazníku, byl proveden propočet a návrh zkoušky filtrů (viz kapitola 6.5).

Následně byla upravena vtoková soustava odlitků nárazníků, kde se zabudovaly 2 jamky pro umístění pěnových keramických filtrů STELEX PRO (Obr. 7.1).



Obr. 7.1 *Vtoková soustava odlitků nárazníků s filtry

Pozn. * jedná se o pouze o zkoušku filtrů založených mezi šamotové trubky, vtoková soustava pro odlitky nárazníků je patentem Třineckých Železáren a není zde uvedena – pozice filtrů (zde bez jamek) ale odpovídá.

7.1.1 Zkouška filtrů

Odlitek:

Název: Nárazník PMKP

Materiál: 30GSL-B

Teplota lití: 1611 °C

Způsob lití: Vrchní lití - pánev

Specifika: Požadovaná vysoká povrchová jakost odlitku

Technologie formování:

Formovací směs: Bentonitová směs, strojní formování

Počet odlitků ve formě: 2

Formovací rám: 1300 x 930 o výšce 200/250mm

Vtoková soustava: Přímé lití (viz kapitola 5.5)

Filtr: pěnový (keramický) filtr STELEX PRO 50x50x15mm, 10ppi

- Filtr je tvořen z Al_2O_3 a jako pojivo se používá C.

7.2 Analýza vlivu filtrace na povrchovou jakost odlitků

Ihned po odlití byla provedena vizuální kontrola vlivu filtrace na povrchovou jakost odlitků nárazníku Obr. 7.8, 7.9, 7.10, 7.11.

Ze vtokové soustavy odlitku nárazníku, který byl filtrován přes 1 ks pěnového filtru byl následně odebrán vzorek v řezu A filtrem (Obr. 7.1) o velikosti přibližně 10x10x20mm). Ten byl zalisován a na jeho povrchu připraven metalografický výbrus konvenčním postupem, tj. broušením za mokra na brusných papírech a leštěním diamantovými pastami.

Na odebraném vzorku byla následně provedena dokumentace na světelném mikroskopu při 100x zvětšení v leptaném stavu (leptadlo Nital) obr. 7.2 pro vyhodnocení mikrostruktury filtru.

Světelná mikroskopie v leptaném stavu:

Na odebraném vzorku byla hodnocena struktura na čtyřech vybraných místech (Obr. 7.2) o různém chemickém složení (Tab. 7.1).

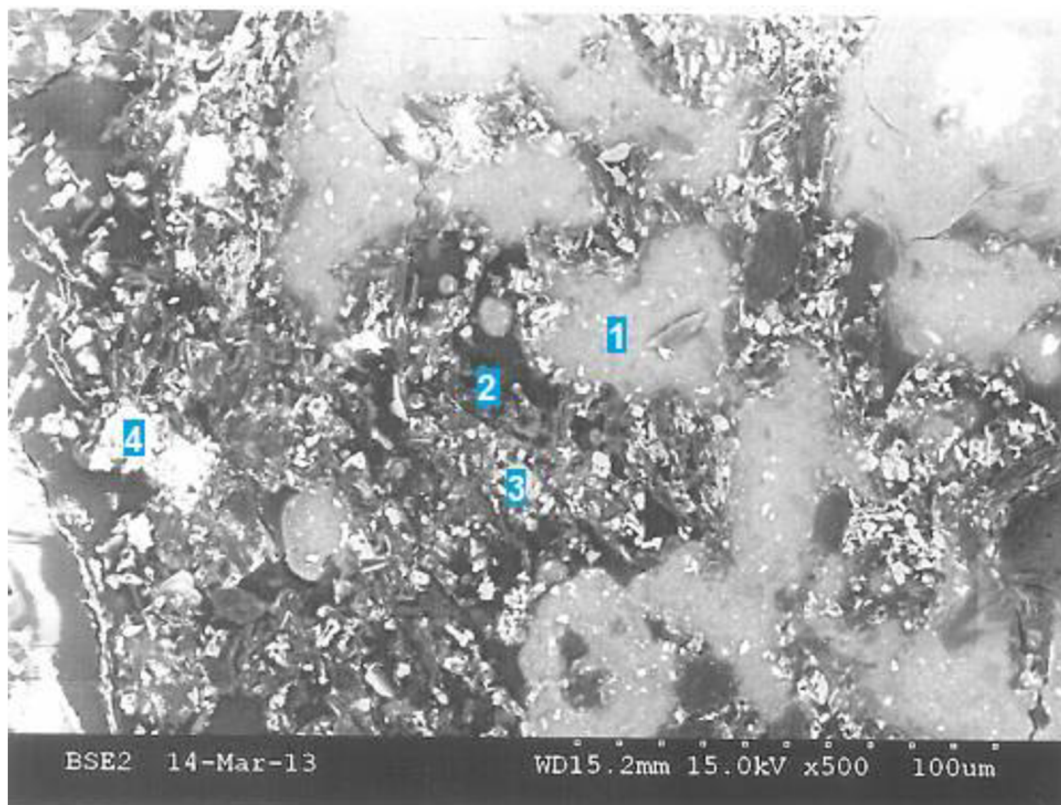
V prvním bodě byla zaznamenána vysoká koncentrace 50,5% Fe (kovová matrice) a 37,2% C (materiál filtru) s největší pravděpodobností se tedy jedná rozhraní ztuhlého kovu a materiálu filtru.

V bodě dva byla zaznamenána vysoká koncentrace uhlíku cca 76 %. S největší pravděpodobností se tedy jedná opět o materiál filtru. Stejně jako v bodě tři, kde byla zaznamenána vysoká koncentrace Al,O,C.

V bodě čtyři byla zaznamenána vysoká koncentrace 75,8% Fe s největší pravděpodobností se tedy znovu jedná o kovovou matici.

Tabulka 7.1 Rozbor filtru

označení místa rozboru	Al	Ca	K	Mn	Fe	O	C
1	0,7	2,3	0	0,6	50,5	9	37,2
2	5,6	0	0	0,1	3,9	14	76
3	54,2	0,2	0,1	0,2	2,4	26	17
4	0,6	0,6	0,7	0,9	75,8	4	17,6



Obr. 7.2 Rozbor filtru

7.3 Ucpání filtrů ve vtokové soustavě

Po úspěšném odzkoušení technologie filtrace se přistoupilo k odlití další tavby č. 95696 (chemické složení viz příloha 2). U této tavby ovšem došlo k ucpání filtrů ve vtokové soustavě, čímž došlo k vyzmetkování celé tavby (Obr. 7.3). Pro zjištění příčiny ucpání filtrů, bylo nutné vyříznout vzorky z ucpaných filtrů a podrobit je analýze.

V rámci diplomové práce byla zjišťována příčina ucpání keramických filtrů značky STELEX PRO – 50 x 50 x 15mm.



Obr. 7.3 Nedolitý kus nárazníku

7.4 Analýza ucpaných filtrů

Ze vtokové soustavy odlitku nárazníku, který byl filtrován přes 1 ks pěnového filtru byl odebrán vzorek o velikosti přibližně 10x10x20mm., Vzorek A, který byl odebrán z řezu B - filtrem (Obr. 7.4) byl následně zalisován a na jeho povrchu připraveny metalografické výbrusy konvenčním postupem, tj. broušením za mokra na brusných papírech a leštěním diamantovými pastami.

Na odebraném vzorku byla rovněž provedena dokumentace na světelném mikroskopu při 100x a 500x zvětšení v leptaném stavu (leptadlo Nital). Pro hodnocení mikrostruktury a vměstků.



Obr. 7.4 Schéma odebraného vzorku



Obr. 7.5 Řez B ucpaným filtrem

Pro hodnocení vzorku B byl zalisován řez z kraje vzorku, v němž byly viditelné zbytky filtru. Byl proveden ještě jeden řez dále, v něm ale nebyly nalezeny žádné částice.

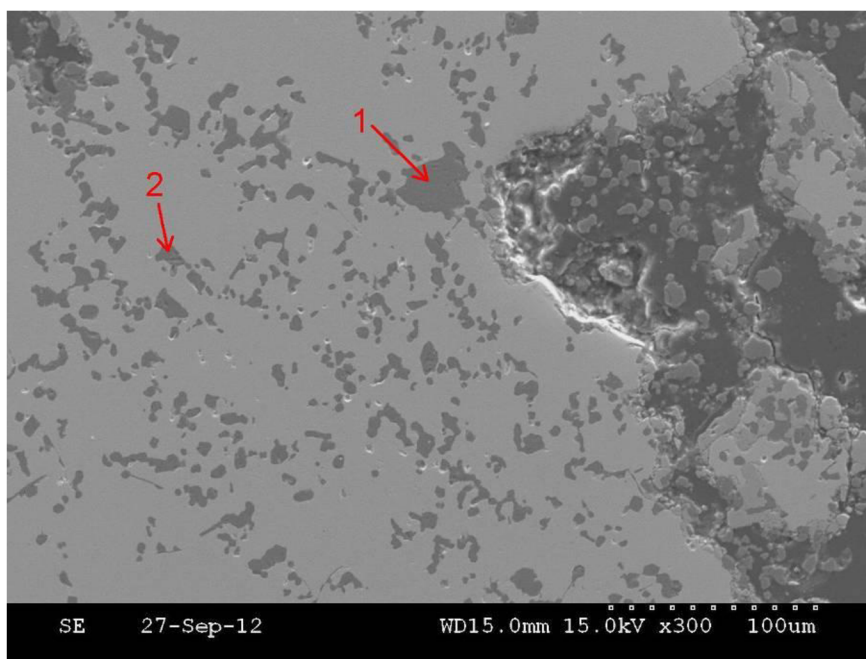
Na celkovém snímku výbrusu (Obr. 7.6) je vidět, že částice filtru jsou vydrolené a kolem nich jsou shluky vměstků – viz Obr. 7.7. Mikroanalýza vměstků je v Tabulce 7.2.

Z tabulky 7.2 vyplývá, že v bodech 1,2,3 a 5 jsou vměstky tvořeny především obsahy Al, Ca, a O – s největší pravděpodobností se tedy jedná o vměstky typu $Al_2O_3 \cdot CaO$ vnášené do taveniny.

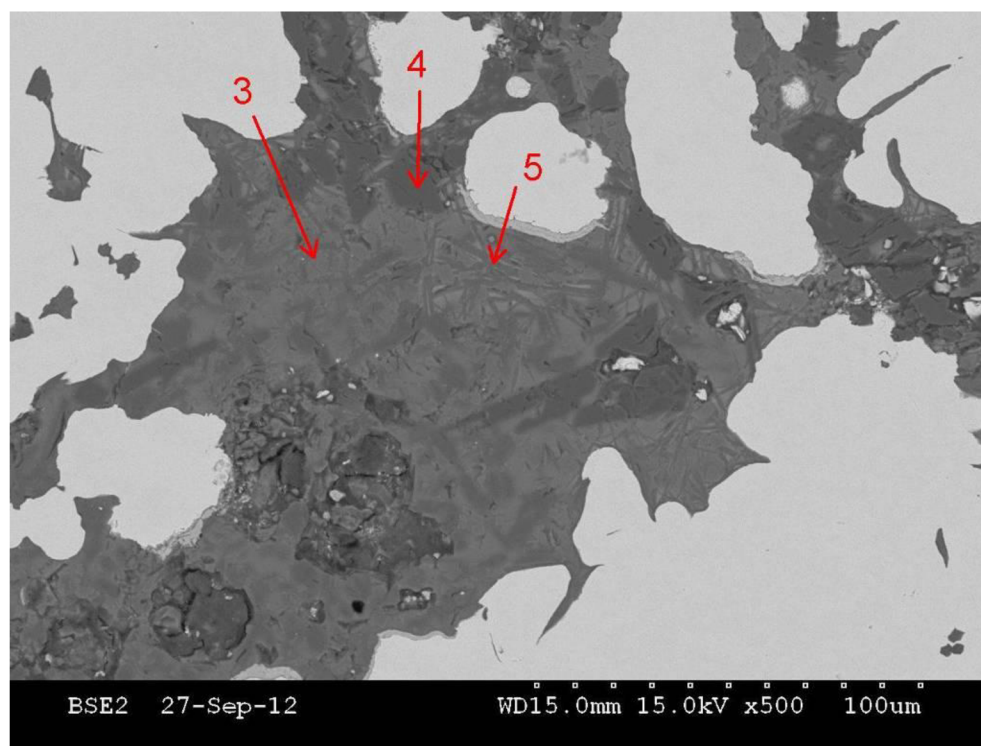
V bodě 4 je výrazný obsah 68,3% Al a 29% O s největší pravděpodobností se tedy jedná o vměstek z dezoxidace taveniny v pánvi.

Tabulka 7.2. Mikroanalýza vměstků:

	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	O
bod 1	0,1	45,8	0	25,1	0	0,1	2,4	27
bod 2	0,7	54,4	0	10,8	0,2	0,2	5,8	28
bod 3	0,8	23,3	17	15,8	1	16,8	1,9	24
bod 4	0,1	68,3	0	0,1	0,3	0,5	1,8	29
bod 5	0	22,4	22,5	22,2	0,5	2	1,5	29



Obr. 7.6 Celkový snímek výbrusu zvětšení 100x



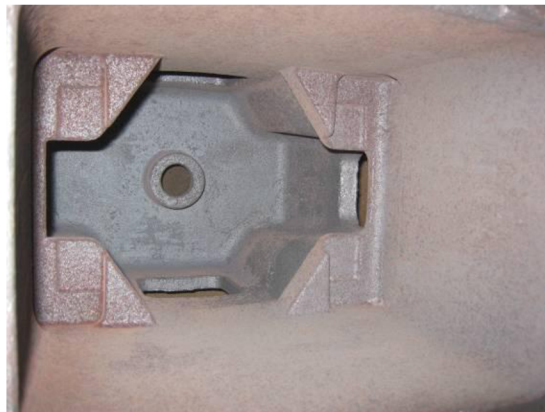
Obr. 7.7 Řez filtrem zvětšení 500x

7.5 Vyhodnocení

Z porovnání obrázků 7.8 a 7.9 – nefiltrovaná tavba a 7.10 a 7.11 – filtrovaná tavba vyplývá, že u odlitých kusů nárazníků přes filtr, byl zaznamenán velký nárůst povrchové jakosti uvnitř odlitku nárazníku. Nárůst byl způsoben jak snížením počtu vměstků tak především zachycením turbulence a přeměny na plnění laminární, jelikož zejména ve vtokovém kúlu, který je součástí vtokové soustavy probíhá velmi intenzivní víření. Toto víření je nežádoucí, jelikož způsobuje erozi stěn formy a oxidaci kovu, jejímž důsledkem je vznik vměstků a značné zhoršení povrchové kvality odlitků. Filtry toto nebezpečné víření zachytily a značně snížili jeho intenzitu.



Obr.7.9 , 7.10 Výskyt zadrobenin a připečenin uvnitř odlitku nárazníku



Obr. 7.11, 7.12 Odlitky nárazníků odlévané přes filtr

Z analýzy ucpaných filtrů vyplývá, že důvodem ucpání filtrů nebyla špatně zvolená technologie (kapacita filtrů), ale vměstky typu $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ vznikající ze strusky a vměstky Al_2O_3 z provedené dezoxidace taveniny hliníkem.

Doporučení pro výrobu je tedy zřejmé. Pro účely zvýšení povrchové jakosti se jako správné (u odlitků nárazníku z nízkolegované oceli) jeví použití filtrační technologie.

Pro předcházení vadám hrozícím během použití filtrační technologie (ucpání filtrů) se současně doporučuje použití argonování tekutého kovu v pánvi přes porézní tvárnici. Jelikož při dmýchání argonu do oceli dochází pomocí tohoto netečného plynu ke strhávání nečistot (jedná se především o stabilní vměstky tvořené oxidem hlinitým) a plynů, které jsou bublinami argonu vynášeny na hladinu.

I ta nejlepší filtrace ovšem nikdy nedokáže zachytit vměstky, které budou vznikat následkem turbulence za filtrem, nebo i endogenní vměstky, které vzniknou až při tuhnutí. Proto jako další opatření, které by mohlo vést ke zvýšení kvality u odlitků nárazníku, se doporučuje nové umístění filtrů ve vtokové soustavě, mnohem blíže k odlitku a také ke zvětšení jejich počtu – (využití obou zářezů vedoucích do odlitku k umístění 2 ks. filtrů).

8 VLIV TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA JAKOST OCELOVÝCH ODLITKŮ

Ocelové odlitky až na výjimky jsou dodávány ve stavu tepelně zpracovaném. Tepelné zpracování dává oceli výsledné finální vlastnosti.

Vedle žíhacích pecí jsou pro speciální způsoby tepelného zpracování nutné chladicí lázně. U žíhacích pecí je rozhodující teplotní pole v peci při předepsané teplotě zpracování odlitků. Při velkých rozdílech teplot v žíhací peci mohou být některé odlitky nevhodně zpracovány. Takové odlitky mohou mít mechanické vlastnosti, které mohou způsobit havárii zařízení, ve kterém jsou použity. Orientačně lze doporučit, aby teplota v žíhací peci při teplotách austenitizace byla dodržena plus mínus 20°C, při teplotách popouštění plus mínus 10°C. To znamená, že mezi nejvyšší a nejnižší teplotou na tepelně zpracovaných odlitcích může být rozdíl maximálně 40 resp. 20°C [3].

V praxi je důležitá i rychlost ochlazování odlitku po výdrži na teplotě v žíhací peci [3].

8.1 Rozdělení postupů tepelného zpracování u nízkolegovaných ocelí

Mezi nejběžnější způsoby tepelného zpracování u nízkolegovaných ocelových odlitků patří zušlechťování odlitků. Zušlechťování odlitků spočívá v kalení a následném popouštění. Kalení je postup tepelného zpracování, při kterém se ocel ohřátá do austenitického stavu ochladí tak vysokou rychlostí, že se získá martenzit, který se vyznačuje vysokou tvrdostí a pevností. Při zušlechťování se martenzitická struktura popouští. Popouštění spočívá v ohřevu martenzitické struktury na teploty nad 500 °C. Martenzit se rozpadá na ferit a globulární cementit. Taková struktura se nazývá sorbit. Dalším zvyšováním teploty rostou částice globulárního cementitu a vzniká struktura zrnitého perlitu [3].

Nízkolegované oceli se zušlechťují kalením na vzduchu, do oleje (v některých případech i do vody) kalící teplota podeutektoidních ocelí je podobná jako teplota normalizačního žíhání. Popouští se na teploty obvykle 600 až 650°C. Výsledkem zušlechťování ocelí je sorbitická struktura. U ocelí, kde se požaduje nižší tvrdost, se popouští až na teploty nad 700°C. Výsledkem je pak struktura zrnitého perlitu [3].

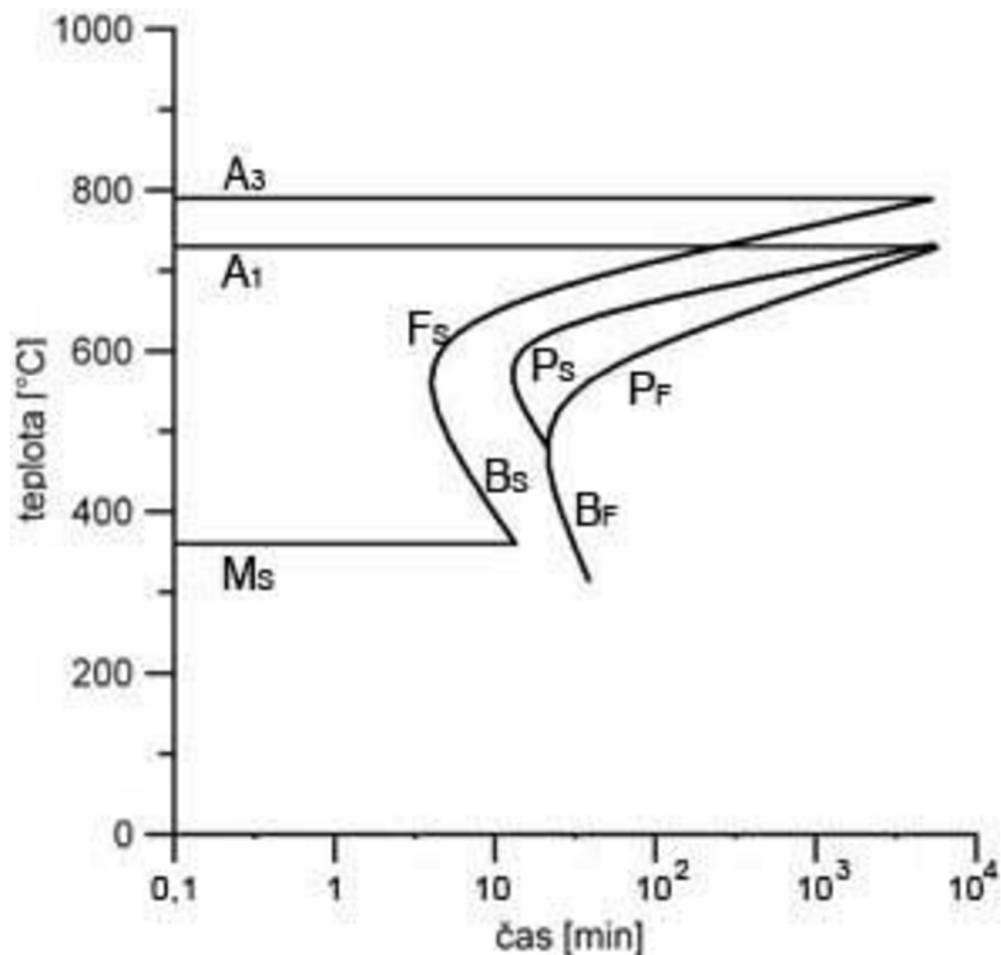
8.2 ARA, IRA Diagramy

Největší význam při tepelném zpracování má rozpad austenitu. Umožňuje totiž kalení a zušlechťování ocelí. Lze ho realizovat dvěma způsoby: [12]

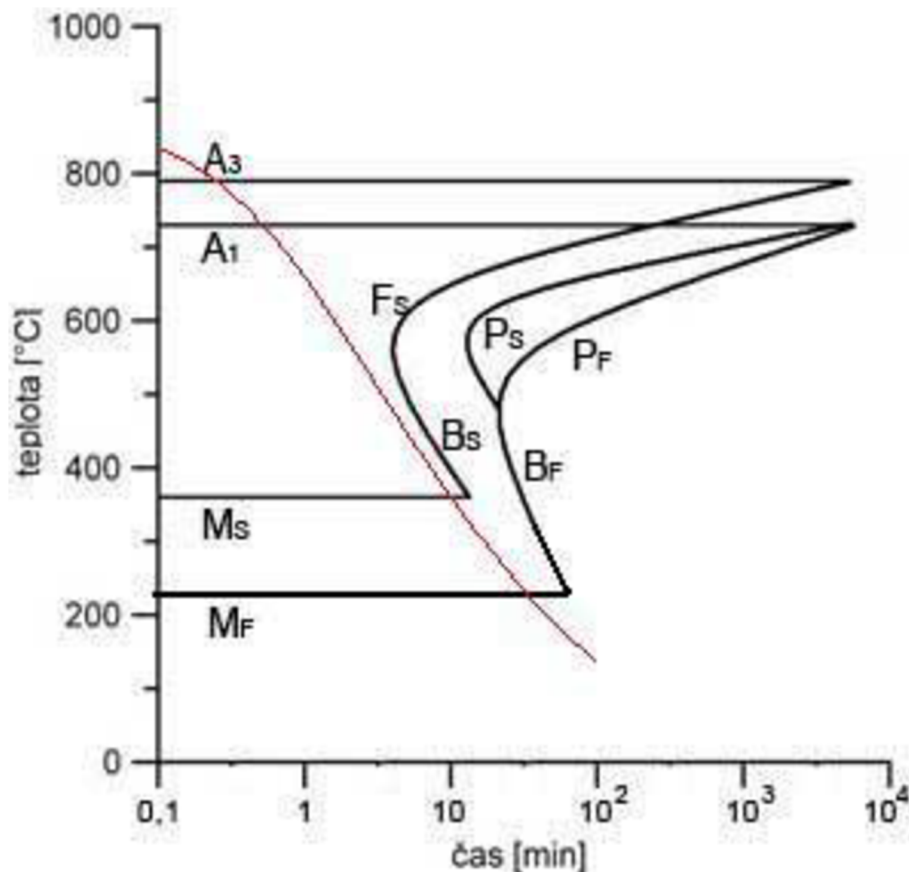
- První způsob spočívá v tom, že slitinu ohřejeme do oblasti austenitu, ponecháme ji na této teplotě tak dlouho, dokud neproběhne úplná austenitizace, a pak prudce ochladíme (teoreticky nekonečně velkou ochlazovací rychlostí) na určitou teplotu. Tu pak udržujeme konstantní (izotermickou) a sledujeme, jak probíhá rozpad austenitu v závislosti na čase. Mluvíme pak o izotermickém rozpadu austenitu (IRA).

- Při druhém způsobu provedeme z austenitizační teploty plynulé postupné ochlazování až na normální teplotu (což je v praxi nejčastější případ) a sledujeme na něm průběh rozpadu. Mluvíme potom o anizotermickém rozpadu austenitu (ARA) [12].

Diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) ukazují průběh přeměny austenitu za konstantní teploty (Obr. 8.1), zatímco diagramy anizotermického rozpadu austenitu (ARA) znázorňují průběh přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování (Obr. 8.2): [12].



Obr. 8.1 IRA diagram



Obr. 8.2 ARA diagram

Oba typy diagramů se skládají ze čtyř oblastí ohraničených křivkami, udávajícími podmínky rozpadu austenitu: oblast stability austenitu a oblasti existence tří produktů rozpadu austenitu. Podle požadavků na strukturu a vlastnosti zpracovávané oceli lze volit příslušnou rychlost ochlazování [12].

8.2.1 Perlitická přeměna

Rozpad austenitu neprobíhá za všech teplot pod A₁ stejně. Za teplot nad nosem křivky rozpadu probíhá rozpad austenitu podle zákonů vzniku perlitu. Čím více se bude teplota rozpadu blížit k teplotě nosu křivky, tím jemnější bude vzniklý lamelární perlit. Naopak čím více se bude teplota izotermického rozpadu blížit k teplotě A₁, tím bude perlit hrubozrnější. Protože v oblasti nad nosem jde o perlitický rozpad, jsou křivky rozpadu obvykle označeny písmeny P_s (počátek podle anglického slova start) a P_f (konec podle anglického finish) [12].

8.2.2 Bainitická přeměna

Pod nosem křivky v důsledku značně snížené difúze probíhá rozpad austenitu odlišně od perlitické přeměny. Čím bude teplota izotermického rozpadu nižší, tím výrazněji vzniká z austenitu ferit, neboť překrystalizace mřížky gama v mřížku alfa se nedá potlačit, a teprve pak difúzními jevy z přesyceného feritu vznikne cementit. V důsledku toho, že ferit vznikající v tomto teplotním intervalu obsahuje navíc uhlík, tvoří takto přeměněný ferit jehlicovité útvary, a to tím výrazněji, čím více se blíží teplota rozpadu k teplotě M_s v diagramu IRA. Struktura, která vzniká právě popsáním rozpadem austenitu za teplot pod nosem křivky, se nazývá bainit. Křivky počátku a konce bainitické přeměny se značí B_s a B_f [12].

Bainitická přeměna se vyznačuje dále tím, že se zejména při nižších teplotách ukončí po určité době, i když zůstane určitý podíl austenitu nepřeměněn. Tomuto podílu nepřeměněného austenitu říkáme zbytkový austenit, který vzhledem ke své malé pevnosti snižuje také pevnost vzniklého bainitu [12].

8.2.3 Martenzitická přeměna

Křivka počátku bainitické přeměny B_s je ukončena teplotou M_s těsně nad $200\text{ }^\circ\text{C}$. Ochladíme-li totiž prudce austenit na teplotu pod M_s , probíhá jeho rozpad zcela odlišně než doposud. Při této teplotě jsou zcela potlačeny difúzní jevy a proběhne pouze přeměna mřížky gama v alfa. V důsledku toho zůstane uhlík uzavřen v mřížce alfa železa. Protože normálně železo alfa v sobě téměř nerozpouští uhlík, vyvolává nutně násilně uzavřený uhlík v mřížce vysoké pnutí, popř. její deformaci, což se navenek projeví vysokou tvrdostí a křehkostí. Takto vzniklá struktura se nazývá martenzit [12].

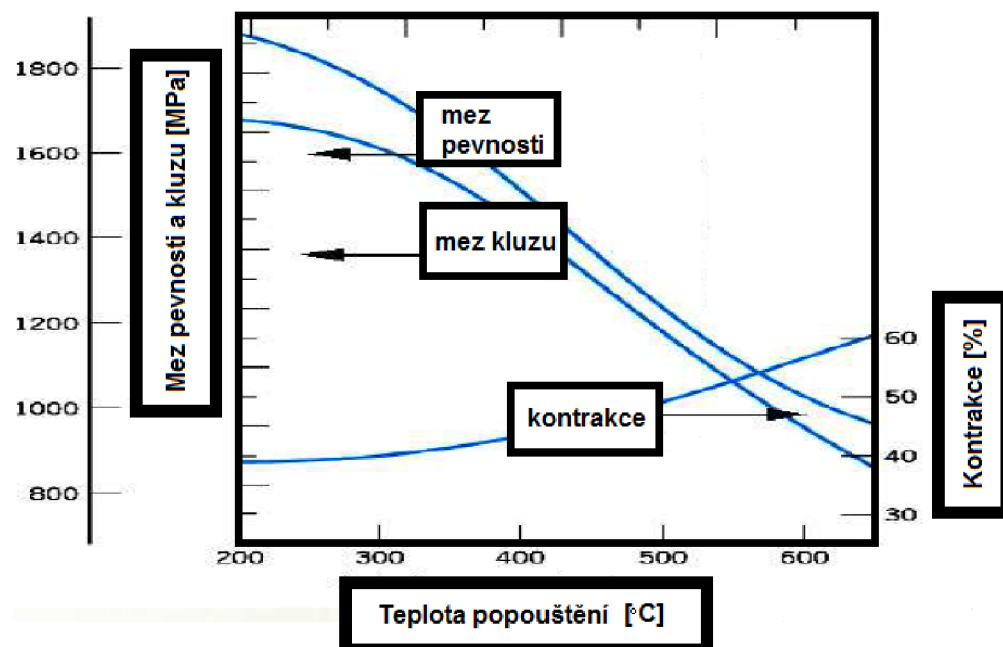
9 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ ODLITKŮ NÁRAZNÍKŮ

Tepelné zpracování odlitků nárazníků je poslední operací, která ovlivňuje jejich vlastnosti. Proto je mu nutné věnovat patřičnou pozornost.

Tepelné zpracování odlitků nárazníků se již od začátku potýkalo s problémem velkého rozptylu při dodržování předepsaných mechanických hodnot. V podstatě vůbec nevycházely tvrdosti odlitků, které se pohybovaly ve velkém rozmezí a v drtivé většině vycházely v oblasti 150 až 230 HB.

Pro zvýšení mechanických hodnot tvrdostí a meze pevnosti (Obr. 9.1) se přistoupilo:

- 1) K úpravě diagramu tepelného zpracování (snížení popouštěcí teploty)
- 2) K zvětšení mezer mezi odlitky v peci, u všech tepelně zpracovávaných odlitků.

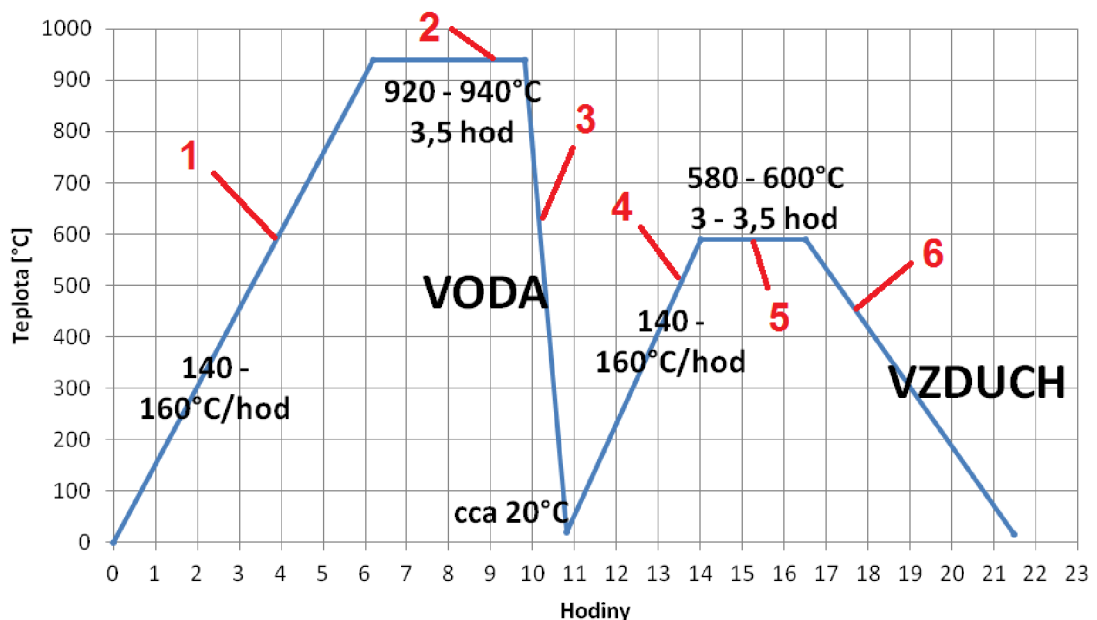


Obr. 9.1 Vliv teploty popouštění na mechanické vlastnosti [12]

V rámci diplomové práce byl pro ověření těchto teoretických předpokladů hodnocen vliv popouštěcí teploty na hodnoty tvrdostí, meze pevnosti a kontrakce u odlitků nárazníků.

9.1 Použité technologie a podmínky TZ

TDP (viz kapitola 1) předepisuje pro odlitky nárazníků tepelné zpracování zušlechtěním (kalení + popouštění). Základem pro zušlechtění odlitků nárazníků je schválený diagram tepelného zpracování (Graf 9.1), který podrobně popisuje celý průběh tepelného zpracování.



Graf 9.1 Diagram tepelného zpracování odlitků nárazníků

Úsek 1: Pomalý Ohřev na teplotu kalení 30 – 70 °C nad A_3 , kdy dochází k rozpuštění struktury feritu a perlitu (Obr. 9.2, 9.3) na austenit.

Úsek 2: Výdrž na této teplotě (homogenizace celého odlitku).

Úsek 3: Ochlazování tak rychlé, aby ve struktuře nevznikal *F* (ferit) a *P* (perlit), ale aby výsledná struktura byla tvořena pouze *M* (martenzitem)

Úsek 4: Pomalý ohřev na teplotu pod A_1 za účelem snížení pnutí, křehkosti a částečného snížení tvrdosti.

Úsek 5: Výdrž na této teplotě.

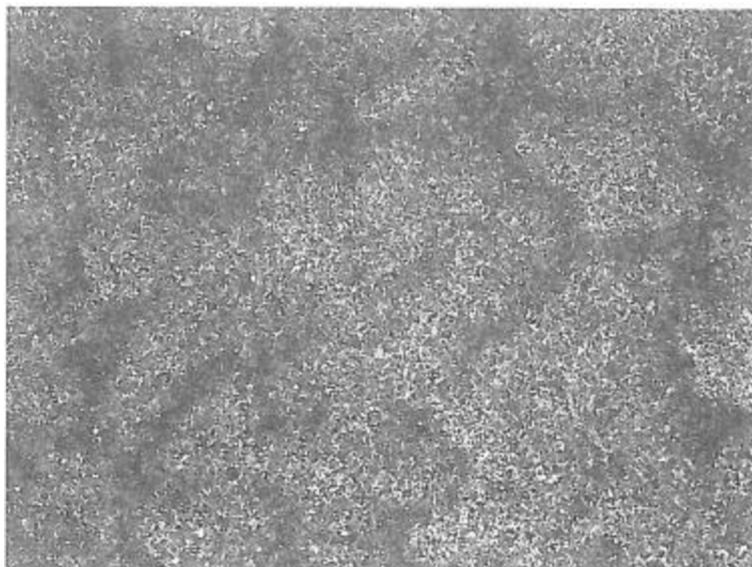
Úsek 6: Pomalé ochlazování na vzduchu - tvorba bainitu (Obr. 9.4, 9.5).



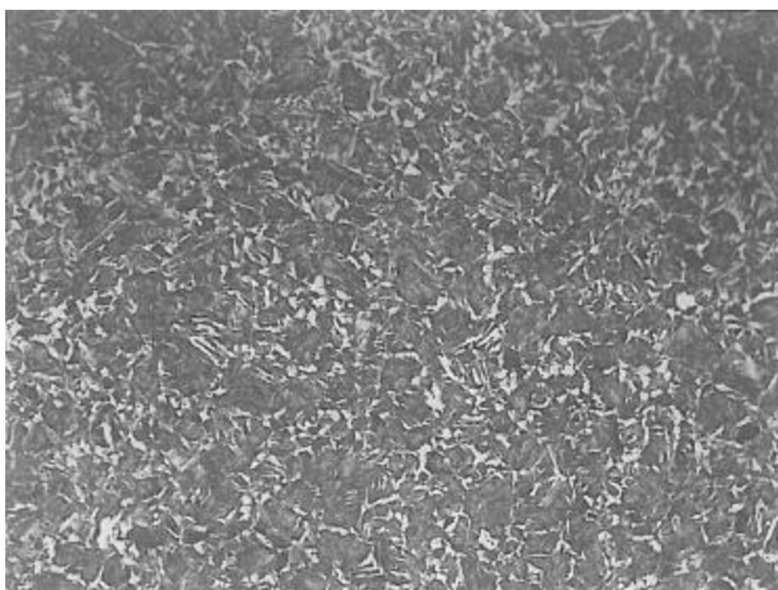
Obr. 9.2 Struktura nárazníků před tepelným zpracováním (bílá fáze ferit, tmavá fáze perlit) – zvětšení 100x



Obr. 9.3 Struktura nárazníků před tepelným zpracováním (bílá fáze ferit, tmavá fáze perlit) – zvětšení 500x



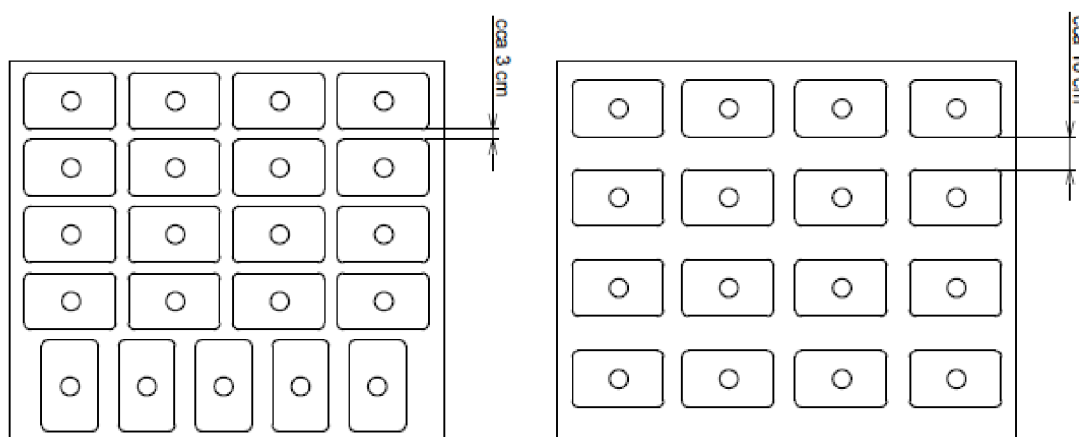
Obr. 9.4 Struktura nárazníků po tepelném zpracování – popouštěný bainit –
zvětšení 100x



Obr. 9.5 struktura nárazníků po tepelném zpracování – popouštěný bainit –
zvětšení 500x

Pro zlepšení hodnot tvrdosti se během celého procesu výroby odlitků nárazníků celkem 7x upravoval diagram tepelného zpracování (konečná verze viz příloha 4). Hlavní změny se vždy týkaly úpravy rozmezí popouštěcích teplot v rozsahu od 500 do 600°C.

Spolu se čtvrtou změnou diagramu tepelného zpracování, se poprvé přistoupilo i ke změnám rozestupů odlitků v peci z původních 3cm na 10cm viz Obr. 9.6, 9.7.



Obr. 9.6, 9.7 Změna uložení odlitků v koších pro TZ

Po každé úpravě popouštěcí teploty bylo tepelně zpracováno několik sérií odlitků i s přilýmy zkušebními bloky, u kterých se zjišťovaly mechanické hodnoty dle TPV (kapitola 1).

9.2 Analýza vlivu popouštěcí teploty

U získaných hodnot mechanických vlastností – meze pevnosti, tvrdostí a kontrakce se provedlo vyhodnocení vlivu popouštěcí teploty na tyto mechanické vlastnosti odlitků nárazníků.

Do jednotlivých grafů, byla vždy pro přehlednost a jednoznačnost umístěna přímka lineární závislosti.

9.2.1 Vliv popouštěcích teplot na hodnoty meze pevnosti

Z Tab. 9.1 vyplývá, že snížení popouštěcích teplot bez úpravy rozestupů v koších pro tepelné zpracování, nemělo na hodnoty meze pevnosti předpokládaný vliv (u prvních tří typů diagramů TZ: body 1,2,3 – by se měly hodnoty meze pevnosti s klesající teplotou popouštění zvyšovat). Zvýšení hodnot meze pevnosti se dostavilo teprve poté, co se změnily současně i rozestupy odlitků (body 4,5,6,7) viz. Obr. 9.6, 9.7.

Tab. 9.1 Vliv klesajících popouštěcích teplot na hodnoty meze pevnosti

Poř. č.	T [°C] *	Rm [MPa]
1	590	650
2	570	655 ↑
3	560	648 ↓
4**	560	750 ↑
5	540	825 ↑
6	530	831 ↑
7	520	840 ↑

Pozn. * jedná se o průměrnou hodnotu předepsaného rozmezí popouštěcích teplot u 7 různých typů diagramů tepelného zpracování. (konečná verze viz příloha 4)

** Současně se snížením popouštěcích teplot, změna rozestupů mezi odlitky.

9.2.2 Vliv popouštěcích teplot na hodnoty tvrdosti

Z grafu 9.1 a z Tab. 9.2 vyplývá, že snížení popouštěcích teplot bez úpravy rozestupů v koších pro tepelné zpracování, nemělo na hodnoty tvrdosti předpokládaný vliv (body 1,2,3 – hodnoty by se měly s klesající teplotou popouštění zvyšovat). Výrazné zvýšení hodnot meze pevnosti se dostavilo teprve poté, co se změnily současně i rozestupy odlitků (body 4,5,6,7) viz. Obr. 9.6, 9.7.

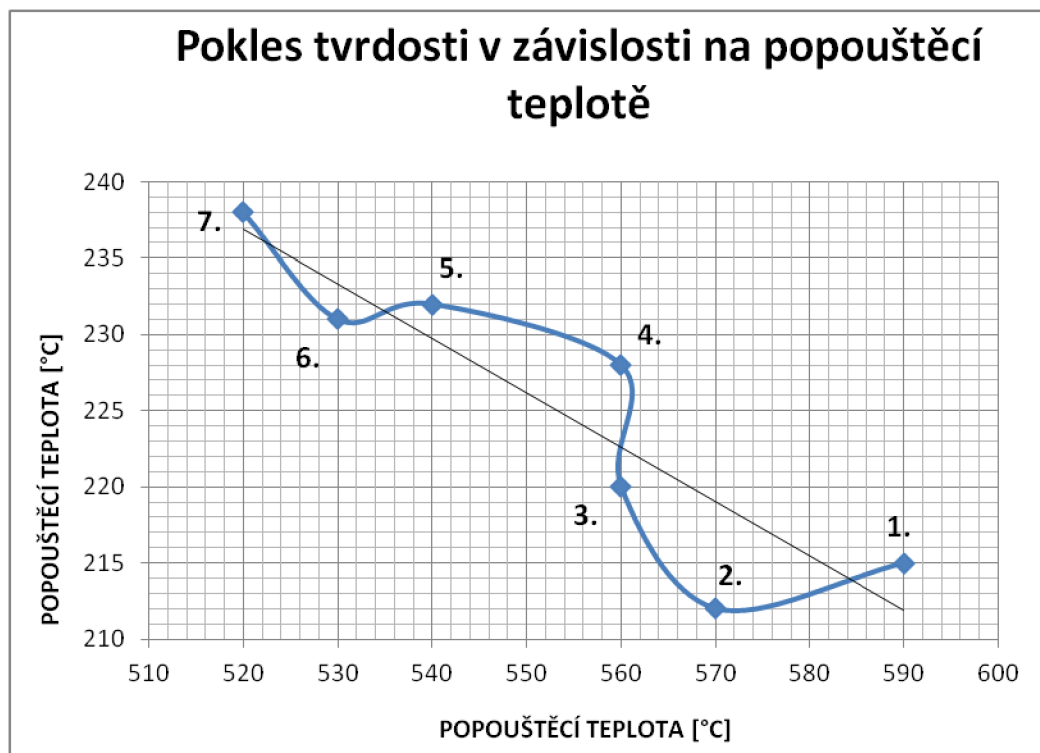
Tab. 9.2 Vliv klesajících popouštěcích teplot na hodnoty tvrdostí

Poř. č.	T [°C] *	HB ***
1	590	215
2	570	210 ↓
3	560	215 ↑
4**	560	228 ↑
5	540	228
6	530	231 ↑
7	520	238 ↑

Pozn. * jedná se o průměrnou hodnotu předepsaného rozmezí popouštěcích teplot u 7 různých typů diagramů tepelného zpracování (konečná verze viz příloha 4).

** Současně se snížením popouštěcích teplot, změna rozestupů mezi odlitky.

*** Jedná se vždy o průměrnou hodnotu u všech tepelně zpracovaných kusů v daném rozmezí popouštěcích teplot



Graf 9.1 Pokles hodnot meze pevnosti v závislosti na popouštěcí teplotě

9.2.3 Vliv popouštěcích teplot na hodnoty kontrakce Z

Z Tab. 9.3 opět vyplývá, že snížení popouštěcích teplot bez úpravy rozestupů v koších pro tepelné zpracování, nemělo na hodnoty kontrakce předpokládaný vliv (body 1,2,3 – hodnoty by se měly s klesající teplotou rovněž snižovat). Výrazné snížení hodnot kontrakce se dostavilo teprve poté, co se změnilo současně i rozestupy odlitků (body 4,5,6,7) viz. Obr. 9.6, 9.7.

Tab. 9.3 Vliv klesajících popouštěcích teplot na hodnoty kontrakce K

poř. č.	T [°C] *	K [%]
1	590	51,2
2	570	53,8 ↑
3	560	53,1 ↓
4**	560	50,3 ↓
5	540	46,2 ↓
6	530	51,3 ↑
7	520	50 ↓

Pozn. * jedná se o průměrnou hodnotu předepsaného rozmezí popouštěcích teplot pro 7 různých typů diagramů tepelného zpracování. (konečná verze viz příloha 4)

** Současně se snížením popouštěcích teplot, změna rozestupů mezi odlitky.

9.3 Shrnutí výsledků a celkové vyhodnocení

Tepelné zpracování odlitků nárazníků bylo nutné, jelikož odlitky měly v litém stavu nevhodnou strukturu (ferit + perlit), která se projevovala nevhodnými mechanickými i technologickými vlastnostmi.

Obecným pravidlem pro kvalitně provedené tepelné zpracování jsou ovšem dobře regulovatelné žíhací pece s vyrovnaným (homogenním) teplotním polem.

Tepelné zpracování odlitků nárazníků se již od začátku potýkalo s problémem velkého rozptylu tohoto teplotního pole v peci, který neodpovídá podmínkám kvalitního zušlechťování odlitků (Rozdíly teplot v peci okolo 80°C).

Právě proto nebyl vliv snižující se popouštěcí teploty tak patrný do doby, než došlo k úpravě rozestupů mezi odlitky (snížení teplotní heterogenity v peci – odlitky při prvním způsobu uložení dlouho zahřívaly „samy sebe“ v důsledku malých mezer v koších pro tepelné zpracování).

Doporučením je tedy snaha zajistit co nejvíce homogenní teplotní pole v pecích pro tepelné zpracování z důvodu zvýšení výrobních výkonů, jelikož moderní a přesné žíhací pece jsou zárukou pro dosažení požadovaných vlastností ocelí již při prvním tepelném zpracování.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo stanovit účinek změn v obsahu chemického složení použitého metalurgického zpracování a dané slévárenské technologie na povrchovou jakost a mechanické hodnoty u vybraného typu odlitku nárazníku v provozních podmínkách sléváren Třinec. Lze konstatovat, že stanoveného cíle bylo dosaženo.

Z grafického a obrazového vyhodnocení vyplynulo, že potřebných mechanických hodnot meze pevnosti a tvrdostí na odlitcích nárazníků se dosáhlo kombinací tří hlavních vlivů. Zvýšením obsahů C a Mn v tavenině na horní hranice povolené materiálovou normou, úpravami digramů tepelného zpracování (snížení popouštěcí teploty) a zvětšením rozestupů odlitků v koši pro tepelné zpracování.

U snahy o zvýšení hodnot vrubové houževnatosti pro mísové teploty se ukázalo, že zvýšení obsahů uhlíku a manganu na horní hranice povolené materiálovou normou není v tak malém rozsahu efektivní.

Jako výhodnější se zde jeví možnost snížení obsahu síry a také zvýšení popouštěcích teplot během tepelného zpracování odlitků spolu se změnou rozestupů odlitků v koši pro tepelné zpracování.

Pro snížení výskytu povrchových vad a zvýšení povrchové jakosti se jako správné (u odlitků nárazníku z nízkolegované oceli) ukázalo použití filtrační technologie. Diplomová práce ovšem doporučuje její používání i se zavedením argonování tekutého kovu pro snížení nebezpečí ucpání filtrů a také nové umístění filtrů – mnohem blíže k odlitku nárazníku.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SOBOTKA, Rudolf. *Ocelové odlitky*. 1. vydání. Ostrava: Moravské tiskařské závody, 1981, 110 s.
- [2] ŠENBERGER, Jaroslav, et al. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vydání. Brno : VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [3] ŠENBERGER, Jaroslav. *Slévárenská technologie - Ocelové odlitky*. 1. vydání. Brno : Svaz sléváren ČR, 2007. 56 s. ISBN 978-80-239-8787-4.
- [4] LOUDA, Petr a Daniela ODEHNALOVÁ. *Nauka o materiálu II*. Studijní text. KMT TU Liberec.
- [5] PTÁČEK, Luděk. *Slévárenská technologie: Nauka o kovech*. 1.vydání. Brno: Svaz sléváren ČR, 2007, 86 s. ISBN 978-80-239-8580-1.
- [6] ČECH, Jaroslav, et al. *Slévárenská technologie II*. 1. vydání. Brno : Svaz sléváren ČR, 2007. 64 s. ISBN 80-87088-00-5.
- [7] ŠÍMA, J. *Filtrace slévárenských slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Tomek.
- [8] LÁNÍK, Boris. *Použití pěnových filtrů při odlévání ocelových odlitků*. Diplomová práce v oboru „Strojírenská technologie“. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. 64 s.
- [9] ROUČKA, Jaromír. *Příručka o filtraci*. Reprocentrum Blansko : Česká slévárenská společnost, Divadelní 6, 657 34 Brno, CR, 2000. 41 s. ISBN 80-02-01389-1.

- [10] *Fuseco* [online]. 2004 [cit. 2011-05-30]. Filtration. Dostupné z WWW: <http://www.foseco.co.uk/uk/products_and_services/non_ferrous_foundry/filtration.php>.
- [11] Vměstky: Atlas vměstků. <Http://otahalconsult.cz/> [online]. Brno [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: http://otahalconsult.cz/wp-content/pdf/Vmestky_makro-mikro_vytah.pdf.
- [12] Konstrukce strojů. <Http://www.konstrukce.webz.cz> [online]. [cit. 2013-05-24]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.webz.cz/sups/matk/19.doc>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
TDP	-	technicko-dodací podmínky
DIN	-	Deutsche Industrie-Norm, německá národní norma
ČSN	-	československá norma
ppi	-	pixely na palec (pixels per inch)
GJS	-	tvárná litina
GJL	-	šedá litina
TZ	-	tepelné zpracování
Re	[m/s]	reynoldsovo číslo
A ₁	-	eutektoidní teplota systému železo – uhlík
A ₃	-	křivka vymežující dolní hranici oblasti stability austenitu při obsahu uhlíku nižším než 0,8%
A _{cm}	-	křivka vymežující dolní hranici oblasti stability austenitu při obsahu uhlíku 0,8 - 2,11%

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Hodnoty tvrdostí naměřené u první tavby (č. 93489) odlitků nárazníků
- Příloha 2 Chemické složení odlitých taveb nárazníků
- Příloha 3 Mechanické hodnoty získané z přilítých bloků jednotlivých taveb
- Příloha 4 Diagram konečného tepelného zpracování

Příloha 1

Hodnoty tvrdostí naměřené u první tavby (č. 93489) odlitků nárazníků

Tavba. 93489	
<u>číslo odl.</u>	<u>tvrdost</u>
25001	238
25002	199
25003	202
25004	224
25005	240
25006	224
25007	238
25008	200
25009	225
25010	204
25011	237
25012	242
25013	227
25014	233
25015	221
25016	243
25017	240
25018	219
25019	203
25020	233

Pozn. červenou barvou jsou označeny nevyhovující hodnoty

Příloha 2

Chemické složení odlitých taveb nárazníků

číslo	%C	%Mn	%Si	%Cu	%S	%Cr	%Ni	%P
93489	0,27	1,33	0,43	0,04	0,008	0,27	0,03	0,011
93623	0,27	1,5	0,42	0,04	0,005	0,1	0,06	0,014
93633	0,27	1,4	0,33	0,05	0,006	0,16	0,04	0,014
93642	0,28	1,43	0,43	0,05	0,004	0,19	0,03	0,014
93669	0,27	1,4	0,41	0,05	0,008	0,2	0,04	0,014
93687	0,28	1,31	0,47	0,05	0,006	0,17	0,03	0,015
93695	0,29	1,29	0,39	0,05	0,009	0,2	0,08	0,014
93709	0,29	1,29	0,35	0,04	0,012	0,11	0,05	0,014
93948	0,3	1,46	0,36	0,04	0,009	0,23	0,03	0,014
93966	0,32	1,51	0,45	0,05	0,008	0,23	0,04	0,018
94065	0,32	1,51	0,34	0,05	0,008	0,27	0,03	0,013
94072	0,3	1,42	0,32	0,05	0,011	0,24	0,06	0,01
94106	0,31	1,52	0,36	0,04	0,007	0,09	0,03	0,012
94136	0,31	1,49	0,36	0,04	0,011	0,26	0,05	0,014
94159	0,29	1,5	0,32	0,04	0,013	0,22	0,03	0,016
94184	0,31	1,51	0,39	0,04	0,009	0,24	0,04	0,015
94201	0,32	1,54	0,36	0,04	0,005	0,17	0,04	0,008
94210	0,31	1,55	0,41	0,04	0,007	0,17	0,03	0,013
94271	0,28	1,49	0,46	0,04	0,013	0,21	0,04	0,014
94291	0,3	1,5	0,44	0,04	0,005	0,26	0,03	0,013
94305	0,32	1,52	0,47	0,04	0,005	0,22	0,07	0,012
94356	0,31	1,51	0,38	0,04	0,005	0,19	0,07	0,018
94362	0,32	1,46	0,41	0,04	0,006	0,27	0,06	0,016
94393	0,3	1,49	0,43	0,04	0,008	0,17	0,04	0,017
94398	0,31	1,51	0,39	0,04	0,009	0,1	0,03	0,014
94470	0,3	1,42	0,35	0,08	0,01	0,27	0,07	0,013
94491	0,31	1,56	0,43	0,05	0,006	0,28	0,04	0,012
94498	0,3	1,55	0,42	0,05	0,007	0,12	0,03	0,01
94509	0,31	1,53	0,46	0,05	0,009	0,23	0,13	0,015
94538	0,31	1,53	0,39	0,05	0,012	0,25	0,04	0,011
94544	0,31	1,53	0,33	0,05	0,007	0,26	0,05	0,015
94581	0,29	1,46	0,26	0,03	0,015	0,23	0,04	0,017
94597	0,31	1,55	0,4	0,04	0,008	0,23	0,06	0,013
94626	0,31	1,51	0,37	0,06	0,011	0,2	0,11	0,015
94639	0,32	1,48	0,37	0,04	0,008	0,2	0,07	0,012
94665	0,31	1,49	0,41	0,04	0,012	0,18	0,04	0,018
94906	0,31	1,5	0,38	0,04	0,006	0,29	0,09	0,014
95696	0,32	1,42	0,33	0,04	0,005	0,25	0,03	0,013
95742	0,3	1,45	0,41	0,05	0,008	0,13	0,03	0,009
95838	0,29	1,42	0,34	0,05	0,008	0,17	0,06	0,011
95917	0,31	1,4	0,44	0,03	0,005	0,15	0,03	0,01
95919	0,32	1,53	0,36	0,04	0,006	0,3	0,04	0,014
96397	0,3	1,5	0,31	0,03	0,006	0,14	0,04	0,011

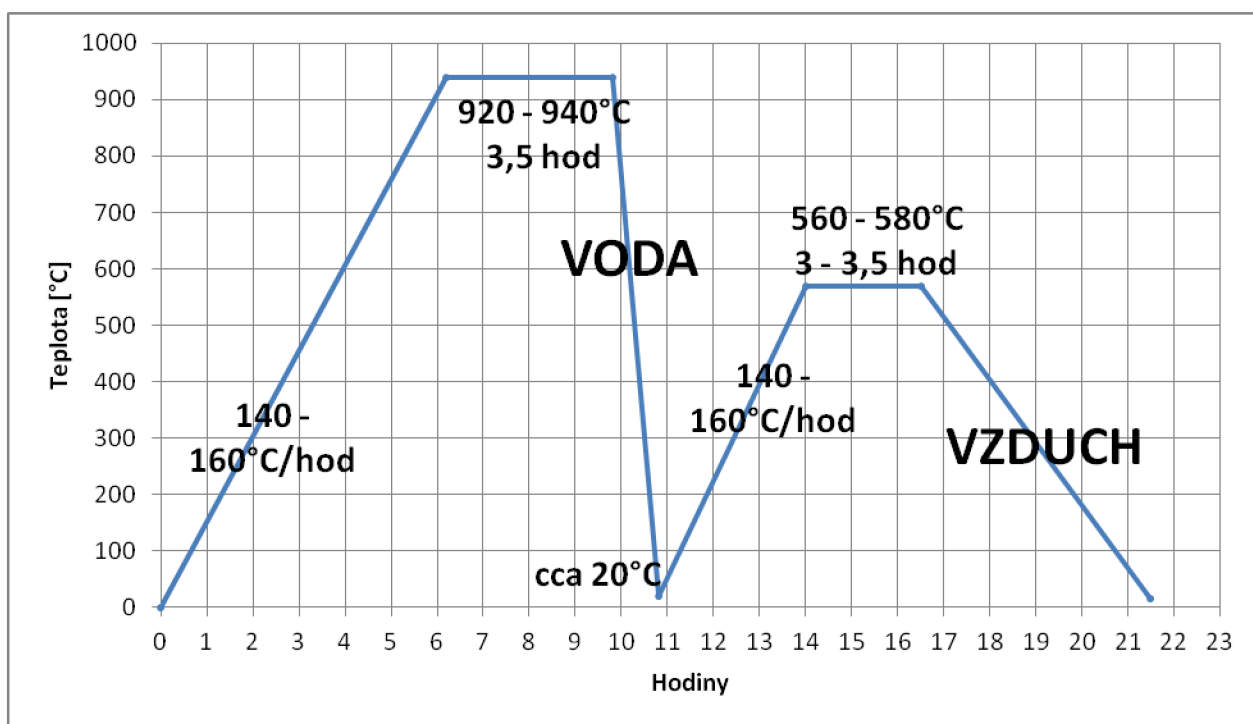
Příloha 3

Mechanické hodnoty získané z přilýých bloků jednotlivých taveb

Tavba	Teplota liti	Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KCU3
93489	1600	546	718	18,7	51,0	33
93623	1622	650	776	18,3	53,1	50
93633	1620	645	772	18,2	54,0	39
93642	1607	642	779	16,4	48,9	36
93669	1610	611	752	19,7	58,8	41
93687	1616	569	728	18,2	52,9	44
93695	1640	636	773	19,0	53,4	41
93709	1620	535	701	18,9	55,2	48
93948	1597	687	812	17,9	50,3	65
93966	1612	746	840	14,9	36,8	38
94065	1636	741	851	15,7	44,5	55
94072	1616	643	786	16,9	52,7	68
94106	1624	633	796	16,2	46,1	56
94136	1617	760	864	18,0	47,0	48
94159	1635	696	816	17,7	48,4	43
94184	1625	688	807	18,6	55,1	39
94201	1610	712	837	19,4	55,4	57
94210	1609	708	832	20,0	54,4	54
94271	1611	776	871	17,5	41,9	39
94291	1617	749	861	16,5	48,9	45
94305	1612	776	876	17,1	46,9	45
94356	1624	643	799	15,4	42,2	60
94362	1619	687	831	14,5	28,4	56
94393	1624	651	797	16,5	40,6	55
94398	1617	652	802	17,5	38,1	48
94470	1620	704	831	10,0	52,2	52
94491	1616	806	910	13,9	45,4	49
94498	1615	X	X	X	X	X
94509	1622	766	879	15,6	46,7	44
94538	1616	700	822	18,0	51,3	42
94544	1616	712	829	16,2	38,2	34
94581	1626	710	832	16,7	51,3	38
94597	1615	643	779	16,0	49,3	40
94626	1617	715	839	15,3	47,3	32
94639	1620	666	813	19,3	53,5	53
94665	1618	679	805	14,5	53,1	60
94906	1611	694	844	15,2	42,1	41
95696	1615	X	X	X	X	X
95742	1600	X	X	X	X	X
95838	1612	532	711	23,6	54,8	76
95917	1608	549	732	22	57,8	58
95919	1617	679	819	16,6	45,2	52
96397	1594	593	748	21,2	52,4	52

Příloha 4

Diagram konečného tepelného zpracování



Hodnoty popouštěcích teplot se pohybovaly od 500 do 600°C