



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY**

# VADY A VLASTNOSTI MASIVNÍCH ODLITKŮ

**DEFECTS AND PROPERTIES OF HEAVY CASTINGS**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. PETR SOBOTKA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ANTONÍN ZÁDĚRA, Ph.D.**

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie  
Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Petr Sobotka

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:

### **Vady a vlastnosti masivních odlitků**

v anglickém jazyce:

### **Defects and properties of heavy castings**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitku. Jedná se např. o vady typu vycezení nebo lasturových lomů. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovu a slévárenské technologii, ale současně se zaměřit na problematiku odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí pomocí chladítek a na optimalizaci velikosti nálitků.

Cíle diplomové práce:

V provozních podmínkách provést pro konkrétní odlitek analýzu stávající technologie. Na reálném odlitku následně provést pomocí metalografických a strukturně fázových analýz posouzení jakosti materiálu. V případě výskytu vad provést analýzu příčin jejich vzniku. Výsledky provedených prací budou návodem pro případnou změnu postupu výroby daného odlitku.

Seznam odborné literatury:

1. ELBEL, T., aj. Vady odlitků ze slitin železa. Brno: MATECS, 1992. 340 s.
2. LEVÍČEK, P. a STRÁNSKÝ, K. Metalurgické vady ocelových odlitků. Praha: SNTL, 1984. 269 s.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Nakladatelství VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632- 9.
4. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Použití simulace tuhnutí při výrobě těžkých odlitků. Hutnické listy. 2009, roč. LXII, č. 5, s. 81-86. ISSN 0018- 8069.
5. ČECH, J., ZÁDĚRA, A., aj. Vady masivních ocelových odlitků. Slévárenství. 2010, roč. 58, č. 5-6, s. 141-144. ISSN 0037-6825.
6. ŠENBERGER, J., ZÁDĚRA, A., aj. Podmínky tuhnutí těžkých odlitků a jejich vliv na vlastnosti odlitků. Slévárenství. 2010, roč. 58, č. 5-6, s. 136-140. ISSN 0037-6825.
7. KAŇÁK, J. a SAIP, J. Způsoby snižování vlivu stvolových vycezenin na jakost odlitků. Slévárenství. 1984, roč. XXXII, č. 10, s. 420-424. ISSN 0037-6825.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se zabývá zpracováním a interpretací dat získaných ze vzorků odebraných z nálitku odlitku spodního beranu vyrobeného v provozu Vítkovice Heavy Machinery a.s. Zaměřuje se na tuhnutí odlitku a s ním související segregční pochody. Pomocí lineární regrese vyhodnocuje data získané z numerické simulace tuhnutí odlitku v daných místech, chemické složení a mechanické vlastnosti zkoumaných vzorků. V závěru je obsaženo shrnutí dosažených výsledků.

### Klíčová slova

Náletek, masivní odlitek, numerická simulace, celkový teplotní gradient, segregace, odmíšení.

## ABSTRACT

A diploma thesis was objected to a figure analyzing and a figure interpretation of ingot processing. The described figures were obtained from samples which were taking from feeder-heads of ingot of lower ram, produced in Vitkovice Machinery Group. The thesis was focused on ingot solidification and segregation processes which were associated with this procedure. The figures obtained from numeric simulation of ingot solidification in defined places were analyzed using statistic method – linear regression, as well as linear regression was used for evaluation of explored samples, their chemical compositions and mechanical properties. In conclusion all acquired results were summarized.

### Key words

Feeder, solid ingot, numeric simulation, temperature gradient, segregation, exsolution

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOBOTKA, Petr. *Vady a vlastnosti masivních odlitků: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. s., 57. Vedoucí diplomové práce Ing. Antonín Záděra, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vady a vlastnosti masivních odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně 25. 5. 2012

.....  
Petr Sobotka

## **PODĚKOVÁNÍ**

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

**OBSAH**

Abstract .....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah .....	7
1 Úvod.....	8
1.1 Cíle diplomové práce.....	9
2 Stručný popis technologie .....	9
2.1 Výrobní zařízení .....	9
2.2 Obecné podmínky výroby .....	10
3 Problematika tuhnutí odlitku.....	11
3.1 Využití numerické simulace.....	11
3.2 Faktory ovlivňující odvod tepla z nálitku.....	12
3.3 Možnost zamezení odvodu tepla z nálitku .....	13
4 Odběr experimentálních vzorků .....	15
5 Vyhodnocení simulace chladnutí nálitku.....	16
5.1 Podmínky simulace.....	16
5.2 Hodnoty parametrů stanovené ze simulace odlitku.....	17
6 chemické složení materiálu.....	23
6.1 Teoretický rozbor segregace prvků v oceli .....	23
6.2 Výsledky analýzy chemického složení materiálu nálitku .....	27
6.3 Výsledky zkoušek mechanických vlastností nálitku .....	29
7 Vyhodnocení výsledků .....	35
7.1 Porovnání výsledků numerické simulace a chemického složení pro vrstvy P1 až P5.....	35
7.2 Porovnání výsledků numerické simulace a chemického složení pro vrstvy X1 až X5.....	40
7.3 Porovnání výsledků mechanických vlastností a chemického složení .....	43
8 Mikrofraktografické hodnocení lomových ploch.....	46
8.1 Hodnocení vybraných vzorků.....	46
8.2 Závěry z hodnocení lomových ploch .....	53
9 Závěr.....	54
10 Seznam použitých zdrojů .....	56
11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	57

## 1 ÚVOD

Při výrobě masivních ocelových odlitků dochází v průběhu chladnutí a tuhnutí ke vzniku celé řady metalurgických vad souvisejících s dlouhou dobou tuhnutí odlitků. Jedná se např. o vady typu vycezenin nebo lasturových lomů. Výroba masivních odlitků proto vyžaduje věnovat zvláštní pozornost nejen metalurgii kovu a slévárenské technologii, ale současně se zaměřit na problematiku odvodu tepla v průběhu chladnutí a tuhnutí pomocí chladítek a na optimalizaci velikosti nálitku.

Tato práce se zabývá zpracováním a interpretací dat získaných ze vzorků odebraných z nálitku odlitku beranu vyrobeného v provozu VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.

Hrubá hmotnost odlitku beranu je 47 tun, surová cca 80 tun a s ohledem na geometrii a rozměry patří do kategorie masivních odlitků. Výroba masivních odlitků má svá specifika, která je třeba respektovat a přizpůsobit jim technologická řešení i metalurgii tavení kovu. To znamená v celém procesu maximálně možně eliminovat případnou neshodu s dodacími podmínkami zákazníka, protože v opačném případě dochází k velkým ekonomickým ztrátám při opravách odlitku a to jak z hlediska pracnosti, tak i k zvýšené spotřebě materiálu při jejich opravách a zařazení opětovného tepelného zpracování. V případě zvýšeného výskytu vad hrozí nárůst času vymezeného na jejich opravy, a tím nedodržení časového plánu výroby odlitku. To může vést až k penalizaci slévárny za pozdní dodání odlitku.

I přes všechna technologická opatření není možné se zcela vyvarovat některým vadám, zejména těm, které jsou zapříčiněny fyzikálně-chemickými pochody, které jsou úzce spjaty s velmi dlouhou dobou tuhnutí a chladnutí odlitku. Jedná se zejména o segregační pochody, které mohou způsobit značnou chemickou heterogenitu materiálu hlavně v tepelné ose odlitku. Tento problém se dá částečně řešit metalurgickým opatřením, například snížením koncentrace prvků, které mají nízký rozdělovací koeficient, nebo případně obsah prvku udržovat na nejnižší požadované hranici udané normou pro daný materiál, například pro uhlík. Další cesta spočívá ve změně podmínek tuhnutí, a to buď použitím různých izolačních materiálů, nebo protikladem, tj. použitím chladítek. Tím je možné zajistit přenesení takto ovlivněné oblasti do části odlitku, kde nebude na závadu, v ideálním případě do nálitku. Hodnocením vlastností materiálu v různých částech nálitku by mohla být získána data, která by mohla vést ke zmenšení nálitku a tím k úspoře kovu. Snížení předváhy tekutého kovu by mělo přinést jak ekonomický, tak technologický.

Diplomová práce byla prováděna v rámci projektu MPO programu TIP č. FR-TI2/091 „Vývoj technologie těžkých odlitků pro energetiku a všeobecné strojírenství“ který probíhá ve spolupráci s VÍTKOVICE HEAVY MACHINERY a.s.

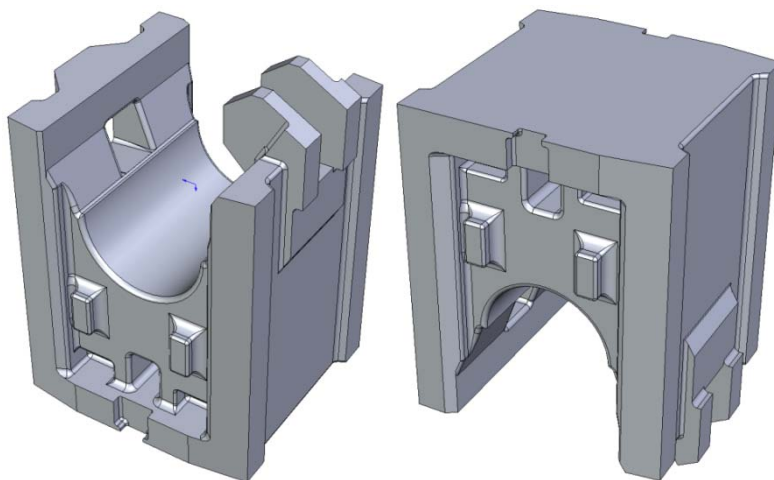


## 1.1 Cíle diplomové práce

V provozních podmínkách provést pro konkrétní odlitek analýzu stávající technologie. Na reálném odlitku následně provést pomocí metalografických a strukturně fázových analýz posouzení jakosti materiálu. V případě výskytu vad provést analýzu příčin jejich vzniku. Výsledky provedených prací budou návodem pro případnou změnu postupu výroby daného odlitku. Práce se zaměřuje na jeden z hlavních problémů, a to je oblast tuhnutí odlitku a s ním související segregiční pochody.

## 2 STRUČNÝ POPIS TECHNOLOGIE

Na *obr. 2.1* je vyobrazen vyráběný odlitek spodního beranu o hrubé hmotnosti cca 80 tun.



Obr. 2.1 odlitek spodního beranu [1]

### 2.1 Výrobní zařízení

Z důvodu masivnosti odlitku a velikosti jeho nálitku je předepsán pro odlitek beranu při zpracování oceli GS 20Mn5 celý cyklus sekundární metalurgie.

Elektrická oblouková pec slouží pouze jako tavící agregát, jehož cílem je rychlé roztavení vsázky, oxidace uhlíku a fosforu kyslíkem. Po dosažení požadované teploty následuje odpich. Z obloukové pece se odpichuje neuklidněná ocel zbavená oxidační strusky. Tato technologie umožňuje dosažení nízkého obsahu vodíku v oceli po odpichu. V pánvi se následně provádí částečná dezoxidace kovu a tvorba nové, silně zásadité strusky.

Pro zajištění teplotní a chemické homogenity je během úpravy kovu dmýchán inertní plyn. Dmýchání probíhá přes porézní tvárnici umístěnou ve dně rafinační pánve. [2]

Zpracování kovu v pánvové peci je často doprovázeno růstem obsahu dusíku a vodíku. Tento nárůst plynů je považován za nežádoucí a odstraňuje se následným zpracováním taveniny procesem VD.

Dosažené obsahy jednotlivých prvků ve zpracovaných tavných jsou uvedeny v *tab. 2.1*.

Při porovnání s hodnotami dané normou je zřejmé, že síra a fosfor jsou výrazně nižší, než připouští norma u tohoto materiálu.

Tímto výrazným snížením koncentrace síry se snažíme zajistit, aby v oceli v místech s největší segregací nebyl překročen obsah síry 0,030%. Uvedená koncentrace je při výrobě oceli na odlitky obvyklá a není zdrojem vad odlitků ani významného snížení mechanických hodnot. Dále je patrný nízký obsah dusíku cca 60 ppm, jehož nízký obsah má umožnit předcházení tvorby lasturových lomů. [3]

Tab. 2.1 Chemické složení kovu v licích pánvích [1]

prvek tavba	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	Al [%]	N [%]
E 51023	0,18	1,37	0,38	0,007	0,003	0,12	0,34	0,13	0,06	0,034	0,006
E 34064	0,19	0,8	0,36	0,02	0,008	0,05	0,02	0,06	0	0,024	0,006

## 2.2 Obecné podmínky výroby

Forma je zhotovena z modelové a výplňové samotuhnoucí furanové směsi, kde pro modelovou směs je použito chromitové ostřívo, které má svojí vyšší žáruvzdorností zamezit, či alespoň snížit počet povrchových vad a zajistit rychlejší odvod tepla. Pro výplňovou směs je použito křemenné ostřívo. Části formy a jádra, které přichází do styku s kovem, jsou opatřeny jakostním nátěrem. Samozřejmostí je provedení odplynění celé formy a odplynění ze známek jader.

Po odlití formy a časové prodlevě následuje vytlučení odlitku z formy a ruční čištění z písku. Čištění po tepelném zpracování od oxidů železa – okují je prováděno pomocí brokového tryskače.

Po tepelném zpracování se dodělavá apretace a odlitek je prorýsován. Dle požadavků zákazníka je odlitek částečně ohrubován. Následují nedestruktivní defektoskopické zkoušky (dále jen NDZ) za pomoci ultrazvuku a kapilární a magnetické metody, kde jsou vyznačeny vady. Označené vady a rozměrové úchytky zjištěné při prorýsování odlitku jsou vydrážkovány, vybroušeny, a pokud vady zasahují pouze do přídavku, mohou být rozbroušeny. Vady, případně chybějící materiál jsou následně opraveny zavařením dle platné WPS. Po opravách je nutné odlitek tepelně zpracovat. Následně je odlitek opět prozkoušen NDZ a případně se celý cyklus opakuje, dokud není uveden do stavu sjednaného v technicko-dodacích podmínkách.

I když se nejedná o legovanou ocel, je z důvodu masivnosti odlitku, a proto i rozměrného nálitku, náliček upalován za zvýšených teplot. Pálení nálitku probíhá na formovně z teploty chladnutí odlitku od teploty 450°C do teploty 250°C, případně po náhřevu na čistírně.

Tepelné zpracování na „jakost“ odlitku - jedná se o náhřev s prodlevami na 250°C a 650°C na vyrovnání teplotních rozdílů až na normalizační teplotu 920°C s následným ochlazováním za pomoci ventilátorů a mlžení na teplotu 250°C. S následným náhřevem a prodlevou na popouštěcí teplotě 560°C. S následným postupným chlazením v peci do 200°C. Dochlazení odlitku probíhá bez řízeného ochlazování až na teplotu okolí.

Při opravách vad po nedestruktivních zkouškách je zařazeno popouštění na teplotu 550°C s obdobným průběhem jako při tepelném zpracování na „jakost“.

### 3 PROBLEMATIKA TUHNUTÍ ODLITKU

Tuhnutí masivních odlitků má svá specifická pravidla a je jedním z nejdůležitějších dějů, které ovlivňují kvalitu vyráběného odlitku. Pokud bude tuhnutí odlitku probíhat příliš nízkou rychlostí, hrozí vznik jak povrchových vad, tak vnitřních vad způsobených segregací prvků.

U odlitku beranů se jeví jako prospěšné zvyšování rychlosti tuhnutí při použití hmotnějších chladítek a zmenšení velikosti nálitku. [4]

Naopak je-li odlitek příliš intenzivně chlazen a nestačí-li se dostatečně homogenizovat jeho teplotní pole, vytvářejí se v odlitku nepříznivé napěťové stavy a hrozí vady typu porušení souvislosti, tzn. trhliny a praskliny.

#### 3.1 Využití numerické simulace

Numerická simulace se již stala uznávaným pomocníkem při analýzách a optimalizacích slévárenské výroby. V rukou technologa se simulační software může stát mocným nástrojem, který mu umožní optimalizovat procesy a maximálně zefektivnit výrobu. [5]

Zvláštní význam má použití simulace při kusové výrobě zejména těžkých odlitků. U těžkých odlitků není možné vyrábět vzorkové kusy, a proto vady jsou opravovány nákladnými čistírenskými operacemi. [6]

Simulační programy predikují určité děje také za určitých předpokladů. Vznik vad je predikován na základě nastavených kritérií. Hodnoty těchto kritérií byly zvoleny za určitých podmínek, za kterých platí. Při používání simulačních programů je proto důležité znát princip práce jednotlivých modulů a zejména je důležitá zpětná vazba. Po odlití formy je důležité sledovat, zda vypočtené (modelované) situace odpovídají skutečnosti. Řadu informací lze získat již při přejímce odlitků na základě defektoskopických zkoušek a výsledků mechanických zkoušek. Nejčastěji se měří teplotní pole v odlitku a ve formě.

Měření teplotního pole v odlitku zejména u masivních odlitků je náročné jak na použitou techniku, tak i ekonomicky. Snadnější je měření teplotního pole ve formě. Ve formě je však podstatně vyšší teplotní heterogenita než v odlitku, proto je důležité přesné umístění termočlánků. Na základě naměřených hodnot se pomocí inverzní simulace „ladi“ program pro konkrétní podmínky. Nejvíce používaná část z modelování je simulace tuhnutí. Při simulaci tuhnutí se modeluje změna teplotního pole v odlitku v časové závislosti od okamžiku naplnění formy. Výsledkem simulace tuhnutí je určení případného výskytu staženin, ředin nebo mikroředin. Získání informací o šířce pásma tuhnutí bez použití simulačních programů je u masivních odlitků velké hmotnosti prakticky nemožné. Z průběhu teplotního pole ve formě lze odhadnout i vznik zapečenin. U masivních odlitků se v místech, kde teplota formy překročí na delší dobu teplotu solidu oceli, vytváří zapečeniny (hluboko penetrovaný kov) i při použití velmi kvalitních formovacích hmot. Specifickou a významnou oblastí jsou segregací pochody, které se projevují u těžkých odlitků, a to nejen v podobě mikrosegregací, ale i makrosegregací. Tyto pochody významně ovlivňují vlastnosti odlitků. U masivních odlitků je použití simulace pro predikci vzniku napětí v odlitku a tím možného výskytu trhlin významný přínos, protože napěťový stav v těchto odlitcích může být velmi složitý. [6]

Dobrá shoda numerického výpočtu s realitou je podmíněna správnou definicí počátečních a okrajových podmínek a zároveň přesnou znalostí termofyzikálních (termo-mechanických) dat použitých materiálů. Bez jakýchkoliv pochyb platí, že pouze přesná data vedou ke korektnímu výpočtu. Programy jako například ProCAST, případně QuikCAST jsou validovány přímo na provozní podmínky jednotlivých sléváren, a tak zaručují maximální efektivnost jejich nasazení. [5]

### 3.2 Faktory ovlivňující odvod tepla z nálitku

- ***Odlitek***

Nejvýznamnější ovlivnění nálitku je způsobeno odlitkem, tzn. jeho geometrií a danou slévárenskou technologií, která by měla zaručovat usměrněné tuhnutí. (zaústění vtokové soustavy, případně ostatní nálitky a chladítka).

- ***Izolační a zásypové materiály***

Zásypové materiály mohou ovlivnit ochlazování nálitku částečným zamezením odvodu tepla sáláním do okolního prostředí. K ovlivnění může dojít při nedostatečném zasypání celého povrchu nálitku, případně při časové prodlevě po odlití při aplikaci zásypového materiálu.

Izolační vlastnosti materiálu, tzn. jejich chemické složení, možná přeměna fázového složení, pórovitost a objemová hmotnost použitých tvárníc. Geometrické vlastnosti izolace, tzn. hlavně její tloušťka, provedení izolace za použití většího počtu izolačních vrstev, záruka správného sestavení izolačních

bloků (cihel) s minimem spár, tzn. dodržení kompaktnosti izolace. Minimalizace možnosti prasknutí izolačních cihel, kde při proniknutí kovu přes izolaci dochází k zvýšenému odvodu tepla.

- **Formovací směsi**

Vlastnosti formovací směsi by se v průřezu formy v případě, že dojde k jejich správnému zhutnění, neměly příliš lišit z hlediska ochlazovací schopnosti, tzn. přibližně konstantní hodnota  $Bf$  (tepelná akumulace formy). Pokud se má dodržet pevnost směsi, není možné při daném dávkování pryskyřice a tvrdidla ochlazovací vlastnosti směsi příliš měnit.

Výplňová i modelová směs je produktem regenerace, případně ostřivem dodaným oživováním. Parametry regenerátu i nově dodávaného ostřiva jsou ve slévárnách patřičně hlídány.

- **Rámy a výztuhy forem, úkladky zajišťující formu proti vztlaku**

Materiály sloužící k výrobě rámu, výztuh a úkladků jsou obvykle oceli, které mají výrazně vyšší tepelnou vodivost než formovací směsi. V tomto případě je důležité jejich správné umístění tak, aby nedocházelo k nežádoucímu tepelnému ovlivnění odlitku.

- **Lidský faktor**

Tento faktor se promítá do všech výše uvedených bodů. Při nedodržení technologické kázně může být proces ochlazování nálitku ovlivněn vůči předpokládanému průběhu ochlazování. Například při přelití nálitků, kdy se kov z nálitku dostane až k úkladku, který je masivní, dochází k velmi intenzivnímu odvodu tepla, což může vést k nežádoucím skutečnostem v podobě velkých staženin pod nálitkovou oblastí.

### 3.3 Možnost zamezení odvodu tepla z nálitku

Pokud vezmeme v potaz výše uvedené faktory ovlivňující odvod tepla z nálitku a ponecháme stávající slévárenskou technologii odlitku, zdánlivě nejjednodušším způsobem snížení odvodu tepla je použití „kvalitních“ izolačních materiálů.

V případě optimalizace teplotních izolací je v simulačním programu použito jako kritérium faktor označovaný „f“, který se též označuje jako faktor zvýšení modulu (MEF – modulus extension factor). Tento faktor udává relativní posun modulu ošetřeného nálitku proti nálitku neošetřenému izolací. [6]

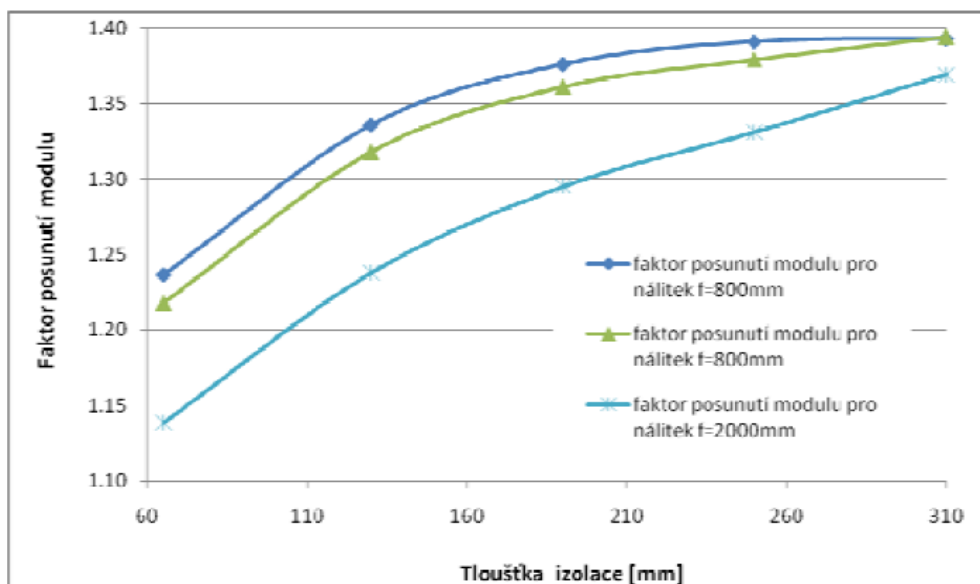
$$M_{izo} = f \cdot M_n \quad (3.1)$$

kde:

$M_{izo}$  - modul izolovaného nálitku

$M_n$  - modul neizolovaného nálitku

Graf na *obr. 3.1* zobrazuje porovnání faktoru posunutí modulu pro velikost nálitků 800, 1000 a 2000 mm. Graf byl stanoven v práci [6] na základě numerických simulací. Z jeho průběhu je zřejmé, že se vzrůstající velikostí nálitku účinek izolace klesá. [6]



Obr. 3.1 Závislost faktoru posunutí nálitku na tloušťce izolace nálitku [6]

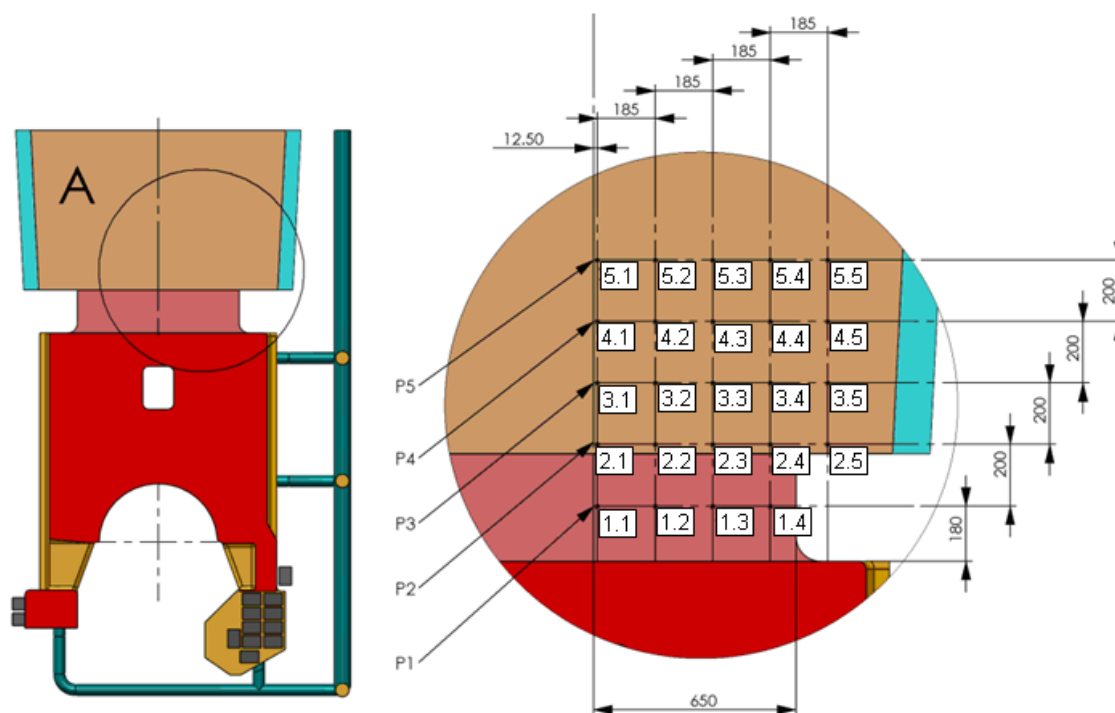
V případě použití izolace u nálitků masivních odlitků může při dlouhodobém působení metalostatického tlaku kovu za vysokých teplot docházet k významným změnám v izolačním materiálu vedoucí ke zhoršené funkci izolačních vlastností. Jak v práci [7] uvádí Tomek, ke změnám může docházet dvěma základními mechanismy, a to změnou fázového složení, tedy tvorbou fází s vyšší tepelnou vodivostí, a dále změnou pórovitosti izolačních tvárnic, na které je založena většina používaných izolačních materiálů. [7]

Doba, po kterou izolace vykazuje dobré izolační vlastnosti, je pouze v první fázi chladnutí nálitků. Dále pak dochází ke ztrátě izolačních vlastností, což bylo zjištěno u všech izolačních materiálů použitých pro masivní nálitky s průměrem větším než 1100 mm. [7]

Z tohoto výsledku je zřejmé, že by mělo dojít k ověření skutečné funkce izolačního materiálu použitého pro daný odlitek, případně počítat s těmito skutečnostmi při simulaci ochlazování a tuhnutí vyráběného odlitku.

#### 4 ODBĚR EXPERIMENTÁLNÍCH VZORKŮ

Z nálitku odlitku spodního beranu byl vyřezán blok materiálu procházející geometrickou osou nálitku. Ten byl tepelně zpracován - normalizace. Z takto zpracovaného materiálu bylo vyřezáno 5 pásů materiálu. První pás byl odebrán z krčku nálitku a zbylé 4 pásy už z nálitku vždy ve stejné výšce nad prvním pásem. Tyto pásy byly ohrubovány a převezeny na VUT. Z těchto pásů byly pásovou pilou vyřezány vzorky, ze kterých byly následně zhotoveny zkušební tělesa pro tahovou zkoušku, vzorky pro měření tvrdosti (Brinell) a analýzu chemického složení materiálu. Na vybraných tahových tyčích bylo po přetržení provedeno mikrofraktografické hodnocení. Vzorky byly odebrány dle rozřezového plánu na obr. 4.1. Vzorky byly označeny dvoumístným číslem (X.Y), kde první číslo značí vzdálenost od odlitku a druhé číslo vzdálenost od tepelné osy.



Obr. 4.1 Rozřezový plán [1]

Pro vyhodnocení dat získaných ze simulace v programu PROCAST byl použit jiný systém značení vzorků. Umístění vzorků je totožné pro oba systémy značení. Vzorky byly rozděleny do vrstev P1 až P5, kde vyšší číslo vzorku v dané vrstvě znamená vzdálenější umístění od odlitku a vzrůstající hodnota čísla u jednotlivých vrstev značí vzdálenost od tepelné osy. Přehledně jsou si odpovídající vzorky uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1 Způsoby značení jednotlivých vzorků

vrstvy	Způsob označení vzorků				
	X1	X2	X3	X4	X5
P1	1	2	3	4	
	1.1	1.2	1.3	1.4	
P2	5	6	7	8	9
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
P3	10	11	12	13	14
	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
P4	15	16	17	18	19
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
P5	20	21	22	23	24
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5

## 5 VYHODNOCENÍ SIMULACE CHLADNUTÍ NÁLITKU

U odlitku spodního beranu byla provedena numerická simulace v programu ProCast. Cílem bylo získat data pro objasnění průběhu ochlazování daného nálitku. Dále tato data zpracovat a určit, jakým způsobem může tuhnutí ovlivnit chemické složení nálitku a vznik možných vad typu ředin a mikrostaženin, a tím jeho mechanické vlastnosti. Je nutné si uvědomit, že tuhnutí nálitku je oproti tuhnutí odlitku značně ovlivňováno jeho funkcí, tzn. je záměrně brzděno, a to jak zaústěním vtokové soustavy, tak i použitím izolačních materiálů, zásypů hladiny nálitku a jako účinné se projevuje u masivních odlitků dolévání nálitku kovem.

### 5.1 Podmínky simulace

Objemový model byl vytvořen na základě postupového výkresu. 3D data byla převedena metodu konečných prvků, na kterou se provedla definice počátečních a okrajových podmínek nutných pro výpočet plnění a tuhnutí odlitku.

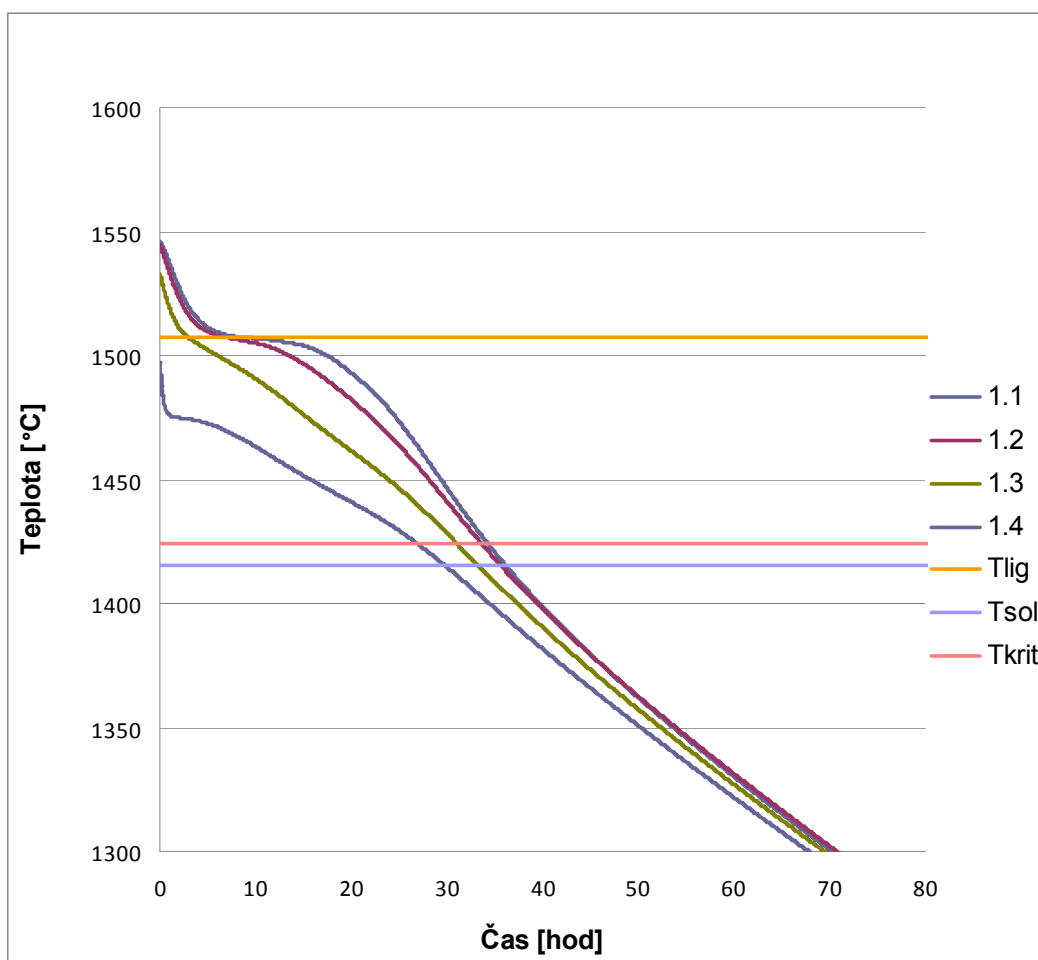
Vstupní data pro numerickou simulaci:

- materiál GS 20Mn5
- lící teplota 1550°C
- teplota likvidu 1508°C
- teplota solidu 1415°C
- forma - furanová směs (modelová směs chromitové ostřívo, výplňová směs křemenné ostřívo)



## 5.2 Hodnoty parametrů stanovené ze simulace odlitku

Ze simulace chladnutí a tuhnutí odlitku beranu byly získány křivky ochlazování pro místa odběru vzorků pro tahovou zkoušku. Příklad křivek ochlazování pro vzorky z první vrstvy nejbliže k odlitku (krčku) je uveden na *obr. 5.1*. V grafu jsou uvedeny křivky chladnutí pro jednotlivá zkoumaná místa v krčku nálitku. Dále je zde vyznačena teplota likvidu a solidu a také kritická teplota, která značí teplotu, po jejímž dosažení již nedochází k dosazování kovu do vznikajících ředin a staženin. Obdobné grafy byly stanoveny i pro místa odběru vzorků z vrstev P2 až P5.



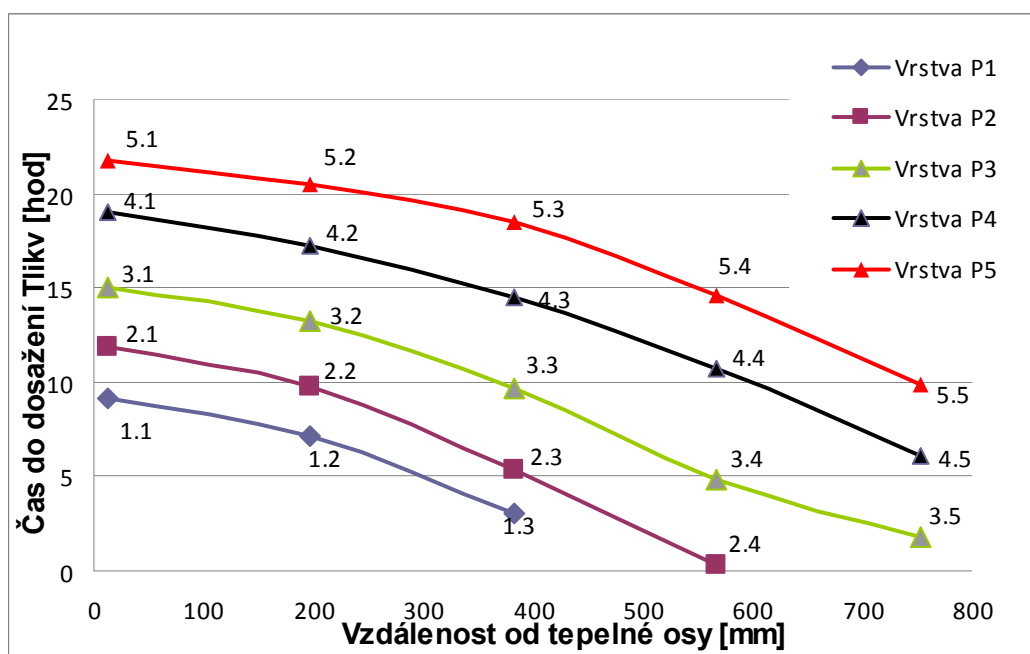
Obr. 5.1 Křivky chladnutí pro místa v krčku nálitku 1.1 až 1.4 [1]

Z křivek chladnutí byly odečteny časy, ve kterých bylo v daném místě (místě provedení tahové zkoušky) dosaženo teploty likvidu i teploty solidu. Výsledné časy jsou sestaveny do *tab. 5.1*.

Tab. 5.1 Čas do dosažení teploty solidu a likvidu

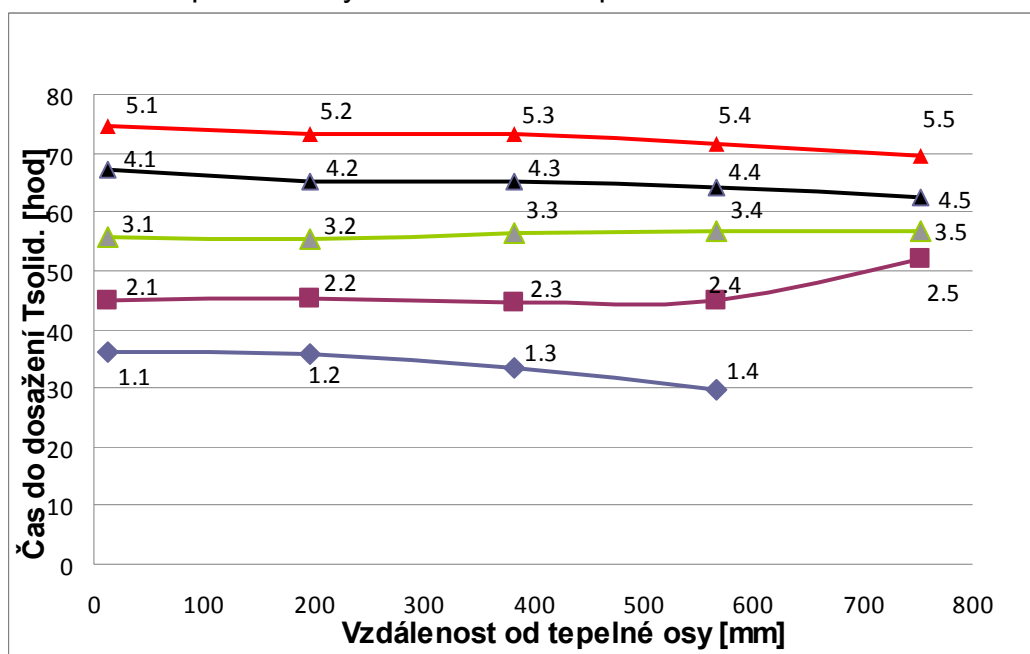
č. vzorku	čas do dosažení $T_{likv.}$ [hod]	čas do dosažení $T_{solid.}$ [hod]
1.1	9,2	36,2
1.2	7,1	35,7
1.3	3,0	33,3
1.4	-	29,8
2.1	11,8	45,0
2.2	9,7	45,4
2.3	5,3	44,5
2.4	0,3	45,0
2.5	-	51,8
3.1	15,1	55,6
3.2	13,3	55,3
3.3	9,7	56,4
3.4	4,8	56,6
3.5	1,8	56,6
4.1	19,1	67,2
4.2	17,2	65,1
4.3	14,4	65,1
4.4	10,7	64,1
4.5	6,0	62,3
5.1	21,8	74,8
5.2	20,5	73,1
5.3	18,5	73,3
5.4	14,6	71,6
5.5	9,9	69,7

Graficky jsou stanovené časy zobrazeny na *obr. 5.2* a *obr. 5.3*. Na *obr. 5.2* jsou vyneseny křivky udávající, za jaký čas bylo dosaženo ve vybraném místě teploty likvidu. Z *obr. 5.3* vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od odlitku dochází na stejném průměru nálitku k prodloužení doby chladnutí. S rostoucí vzdáleností od osy nálitku dochází k většímu odvodu tepla, a tedy i rychlejšímu dosažení teploty likvidu. Ve vrstvě P1 (v krčku) je v tepelné ose nálitku dosaženo teploty likvidu do cca 9 hod. V tepelné ose nálitku 800 nad tímto místem (P5) je doba do dosažení teploty likvidu cca 21,8 hod, a tedy je více než dvojnásobná.



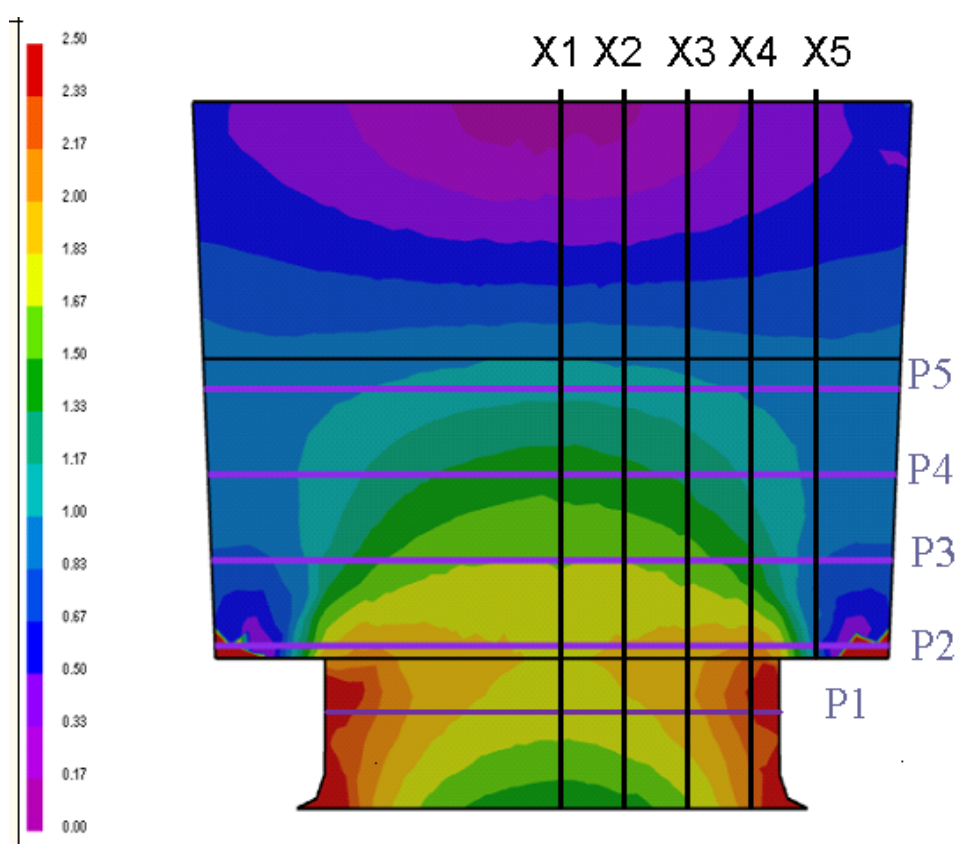
Obr. 5.2 Čas do dosažení teploty likvidu

Na obr. 5.3 jsou vyneseny křivky udávající, za jaký čas bylo dosaženo ve vybraném místě teploty solidu. Z obr. 5.3 vyplývá, že s rostoucí vzdáleností od odlitku dochází k nárůstu doby posledního tuhnutí. Z charakteru je zřejmé, že rozdíly v jednotlivých časech jsou v jednotlivých vrstvách víceméně podobné, tj. že náledek tuhne víceméně v celém objemu najednou. Pouze v povrchových vrstvách náletku dochází k většímu odvodu tepla z náletku, a tedy i nárůstu rychlosti tuhnutí, i když často pouze minimálně. V místě 2.5 dochází k prodloužení doby konce tuhnutí, což pravděpodobně souvisí s prohříváním krčku náletku a zpomalení rychlosti odvodu tepla v místě 2.5.

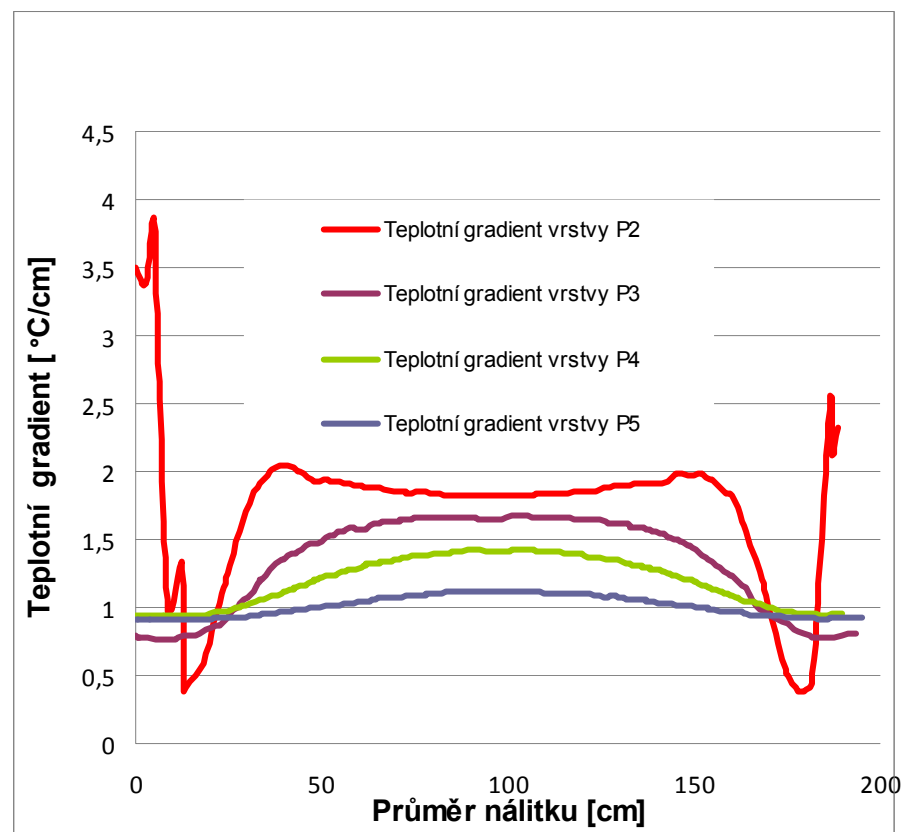
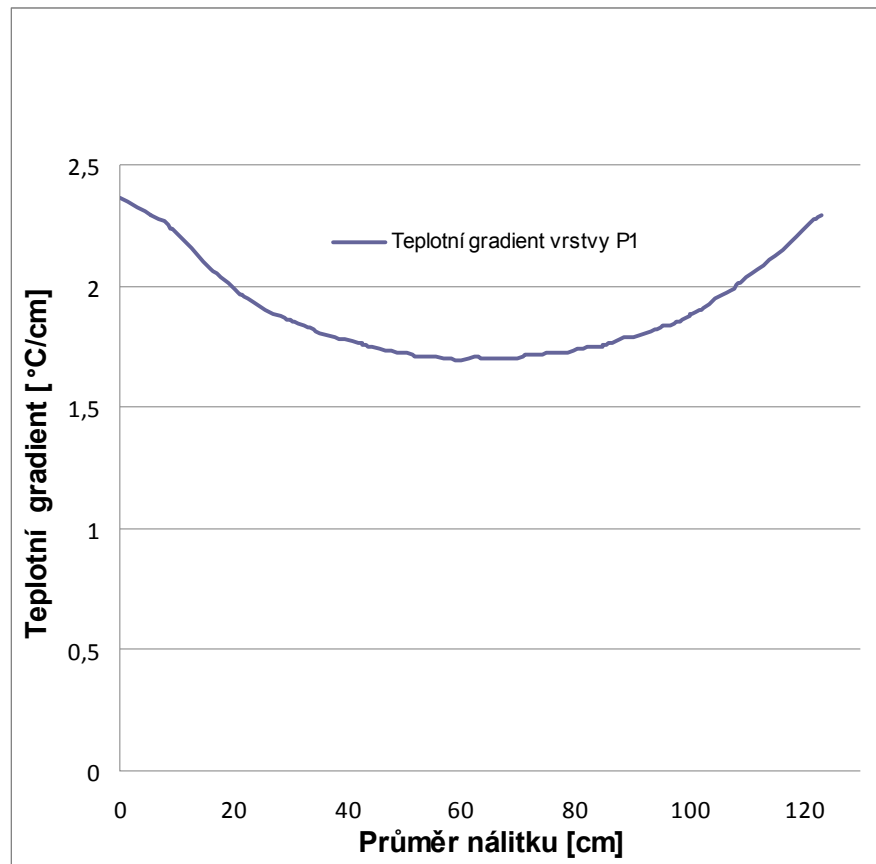


Obr. 5.3 Čas dosažení teploty solidu

Pro vybraná místa byly stanoveny také hodnoty celkového teplotního gradientu pro okamžik dosažení kritické teploty (čas ukončení dosazování kovu). Hodnoty teplotního gradientu jsou uvedeny na obr. 5.4, kde jsou zakresleny vrstvy P1 až P5 a vrstvy X1 až X5. Jak vyplývá z grafického vyjádření celkového gradientu, dochází v místech krčku nálitku k výrazným změnám teplotního gradientu v důsledku čerpání kovu z nálitku a jeho dosazování do odlitku (obr. 5.5). S rostoucí výškou v nálitku dochází k menšímu ovlivnění gradientu a i jeho velikost je nižší. Charakter křivky je s rostoucí výškou od odlitku plošší. Také v místě druhé vrstvy (P2) dochází v důsledku prohřívání krčku nálitku k ovlivnění velikosti i charakteru křivky gradientu (obr. 5.5).



Obr. 5.4 Celkový teplotní gradient v nálitku [1]



Obr. 5.5 Teplotní gradienty pro vybraná místa v nálitku (vrstvy P1 – P5) [1]

Číselně jsou hodnoty celkového teplotního gradientu uvedeny v *tab. 5.2*. Velikost teplotního gradientu je v práci dále použita ke zkoumání vlivu doby tuhnutí na rozsah segregáčních pochodů.

Tab. 5.2 Hodnoty teplotního gradientu pro vybraná místa nálitku [1]

vrstva v nálitku	odpovídající vzorky	Teplotní gradient [°C/cm]
P1	1.1	1,7
	1.2	1,8
	1.3	1,9
	1.4	2,1
P2	2.1	1,8
	2.2	1,9
	2.3	1,9
	2.4	1,8
	2.5	0,4
P3	3.1	1,6
	3.2	1,6
	3.3	1,5
	3.4	1,3
	3.5	1,0
P4	4.1	1,4
	4.2	1,4
	4.3	1,3
	4.4	1,3
	4.5	1,1
P5	5.1	1,1
	5.2	1,1
	5.3	1,1
	5.4	1,0
	5.5	0,9

## 6 CHEMICKÉ SLOŽENÍ MATERIÁLU

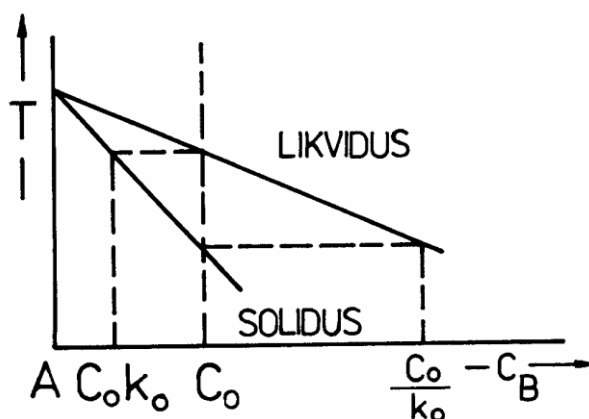
Získané chemické složení vzorků z nálitku koresponduje s chemickým složením tavebních vzorků pouze částečně. Je totiž dále ovlivněno fyzikálně-chemickými pochody, které probíhají v tekuté oceli při tuhnutí, tzn. segregaci prvků.

### 6.1 Teoretický rozbor segregace prvků v oceli

Je proces vzniku nerovnoměrného chemického složení ve výsledné struktuře kovu při nerovnoměrném tuhnutí slitin. Rozlišujeme mikrosegregaci a makrosegregaci. [8]

Segregace je brána jako vada homogenity a struktury odlitku, je výsledkem fyzikálního děje v důsledku selektivního tuhnutí. Původní příčina vzniku segregace spočívá v omezené (rozdílné) rozpustnosti jednotlivých prvků (složek) v tekuté a pevné fázi. [9]

Koncentrační poměry v procesu tuhnutí slitin lze vyjádřit pomocí příslušných rovnovážných stavových diagramů viz obr. 6.1. Existence teplotního rozdílu mezi likvidem a solidem svědčí o tom, že při každé teplotě v tomto intervalu jsou v termodynamické rovnováze pevná a kapalná fáze s odlišným chemickým složením. [8]

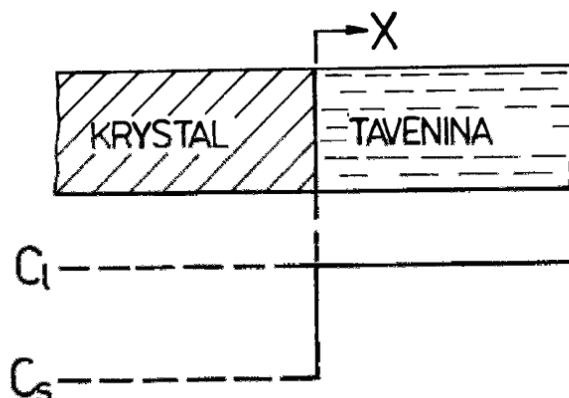


obr. 6.1 [10]

Mírou rozdělování příměsí mezi pevnou a kapalnou fází je rovnovážný rozdělovací koeficient  $k_0$ , který je definován jako izotermický podíl koncentrace solidu  $C_s$  ke koncentraci likvidu  $C_l$  při stacionární krystalizační frontě (6.1).

$$k_0 = \frac{C_s}{C_l} \quad (6.1)$$

Při nulové rychlosti krystalizace je rozdělení přísady v krystalu i v tavenině konstantní a mění se skokově. Schématické zobrazení na obr. 6.2 je uvedeno pro případ  $k_0 < 1$ . [10]



obr. 6.2 [10]

Při známých podmínkách krystalizace je zaváděn efektivní rozdělovací koeficient  $k_e$  který je definován (6.2) [2]

$$k_e = \frac{C_s^o}{C_L^\infty} \quad (6.2)$$

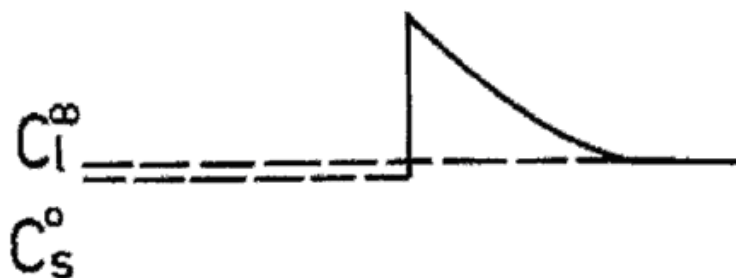
kde:

$C_s^o$  - Koncentrace přísady v pevné fázi na fázovém rozhraní [hmot. %]

$C_L^\infty$  - Koncentrace přísady v tavenině vzdálené od mezifázového rozhraní [hmot. %].

Na obr. 6.3 je patrný vznik koncentrační špičky přísady před krystalizační frontou, která vede ke zvýšení koncentrace přísady v pevné fázi. [10]





obr. (6.3) [10]

Mezi rovnovážným a efektivním rozdělovacím koeficientem existuje vztah (6.3), který již zahrnuje podmínky krystalizace. [2]

$$k_e = \frac{k_o}{k_o + (1 - k_o) \exp\left(-\frac{v \cdot \delta}{D_l}\right)} \quad (6.3)$$

kde:

$v$  - je rychlost postupu krystalizační fronty

$\delta$  - je tloušťka difuzní vrstvy v tavenině při rozhraní tuhé fáze a taveniny

$D_l$  - je difuzní koeficient odměšujícího prvku v tavenině. [2]

Ze vztahu (6.3) je zřejmé, že efektivní rozdělovací koeficient zohledňuje jak rychlost postupu fázového rozhraní, tak tloušťku difuzní vrstvy, která se vytváří na rozhraní tuhé fáze a taveniny. Její tloušťka se pohybuje v rozmezí od  $10^{-2}$  mm pro nucenou konvekci až po 1 mm pro přirozenou konvekci. [10]

### Mikrosegregace

Výsledkem buněčného, ale zejména dendritického růstu je vznik nehomogenit chemického složení, tzn. dendritické mikrosegregace. V mezidendritických prostorech se výrazně koncentrují příměsi s rozdělovacími koeficienty  $k_e < 1$ . Příměsi s  $k_e > 1$  přednostně obohacují osy dendritů. Rozhodujícími faktory při primární krystalizaci z tavenin jsou šířka intervalu tuhnutí  $\Delta T_1$  a rozdělovací koeficient  $k$ , který je mírou segregační schopnosti každé jednotlivé příměsi v základní látce. Šířka intervalu tuhnutí  $\Delta T_1 = T_L - T_S$  pro dané složení tuhého roztoku svědčí o tom, že při každé teplotě v tomto

intervalu existuje dvoufázová krystalizační oblast v termodynamické rovnováze s odlišným chemickým složením. Platí, že čím širší je interval tuhnutí, tím větší bude chemická a strukturní nehomogenita daného tuhého roztoku. V intervalu tuhnutí se v závislosti na kinetice procesu formují velikost a vzdálenost primárních, sekundárních, terciárních i kvartérních dendritických os, jejich chemická mikronestejnorodost tzn. mikrosegregace a v mezidendritických prostorách dochází v důsledku selektivity tuhnutí k hromadění nebo k ochuzování matečné taveniny a tím ke vzniku koncentračních gradientů, známých jako dendritická segregace, které jsou v tuhém stavu měřitelné jako lokální distribuční křivky. [8]

### Makrosegregace

Je výsledkem fyzikálního pochodu během tuhnutí taveniny v rozmezí teplot likvidu a solidu. V závislosti na hodnotě rozdělovacího koeficientu mezi pevnou fází a taveninu příslušného prvku ve slitině dochází během tuhnutí k odměšení (segregaci) tohoto prvku mezi osami dendritu a prostoru mezi dendrity. U masivních odlitků dochází k odměšení v pásmu, či zóně a hovoříme o pásmovém, zonálním odměšení prvků. Takto v odlitcích mohou vznikat vady typu stvolových vycezenin (tzv. A segregace) a mezerových vycezenin (tzv. V segregace). Vada typu stvolové vycezeniny tvoří oblasti zvýšené koncentrace odměšujících prvků, příměsí, nečistot i produktů různých reakcí, které probíhají ve slitině mezi teplotou likvidu a solidu (při tuhnutí) a jsou soustředěny mezi větvemi dendritů. V ocelích obsahují zvýšený podíl síry (S), fosforu (P), uhlíku (C), manganu (Mn), molybdenu (Mo) a jiných příměsí v masivních odlitcích, vytvářejí charakteristické pásy ve tvaru písmena A makroskopických rozměrů. Vada typu mezerové vycezeniny vzniká tím, že nečistoty a odměšené příměsi vyplňují při tuhnutí mezery, prostory i větší dutiny v odlitku, vzniklé z nejrůznějších příčin. Mohou to být vnitřní trhliny, řediny, staženiny (včetně dutin mikroskopických rozměrů). Vycezeniny se nejčastěji vyskytují v osově části masivních odlitků o značné štíhlosti. Jejich podstatu tvoří plošné trhliny, které zaujímají v podélném (osovém) řezu tvar podobající se písmenu V. [2]

Rozdílná rozpustnost příměsí a nečistot v tavenině a v pevné fázi vede v souvislosti s přenosovými jevy k přerozdělování prvků příměsí a nečistot v matici, a tím vznikají při krystalizaci různé segregační mikro i makronehomogenity, které negativně ovlivňují vlastnosti tuhých látek. [8]

Obecně lze říci, že se zvyšující dobou tuhnutí se zvyšuje stupeň pásmového odměšení, zatímco stupeň dendritického odměšení klesá. [9]

*Tab. 6.1* uvádí rovnovážné rozdělovací koeficienty prvků, které byly zjišťovány na vzorkách z taveb a z chemického rozboru nálitku. Z hodnot rovnovážného koeficientu je zřejmé, že všechny zjišťované prvky odměšují do taveniny.

Tab. 6.1 Rovnovážné rozdělovací koeficienty pro vybrané prvky v tavenině Fe [2]

příměs	$k_0$
S	0,06
C	0,13
P	0,13
N	0,28
Si	0,64
Ni	0,69
Mo	0,72
Cu	0,8
Al	0,87
Cr	0,9

K silně až extrémně odměšujícím příměsím v tavenině železa je možno řadit prvky, jejich rovnovážný rozdělovací koeficient menší nebo roven hodnotě 0,15 [1]

V našem případě se to týká síry, uhlíku a fosforu. Síra a fosfor jsou z tohoto důvodu metalurgickým procesem eliminovány a předpokládá se, že i v místech největších segregací by neměly v negativním smyslu ovlivnit kvalitu oceli. U uhlíku se dá předpokládat jeho nárůst směrem k tepelné ose nálitku.

## 6.2 Výsledky analýzy chemického složení materiálu nálitku

Chemické složení bylo stanoveno jak z tavebních vzorků, tak i ze vzorků použitých ke zhotovení tyček pro tahovou zkoušku. Geometrická osa vzorku pro analýzu chemického složení z odlitku odpovídala vždy ose zkušební tyče pro tahovou zkoušku. Chemické složení všech vzorků bylo stanoveno v laboratoři VHM a.s. Chemické složení odlitku ve vybraných místech je uvedeno v *tab. 6.2*.

Tab. 6.2 Chemické složení vzorků z nálitku [1]

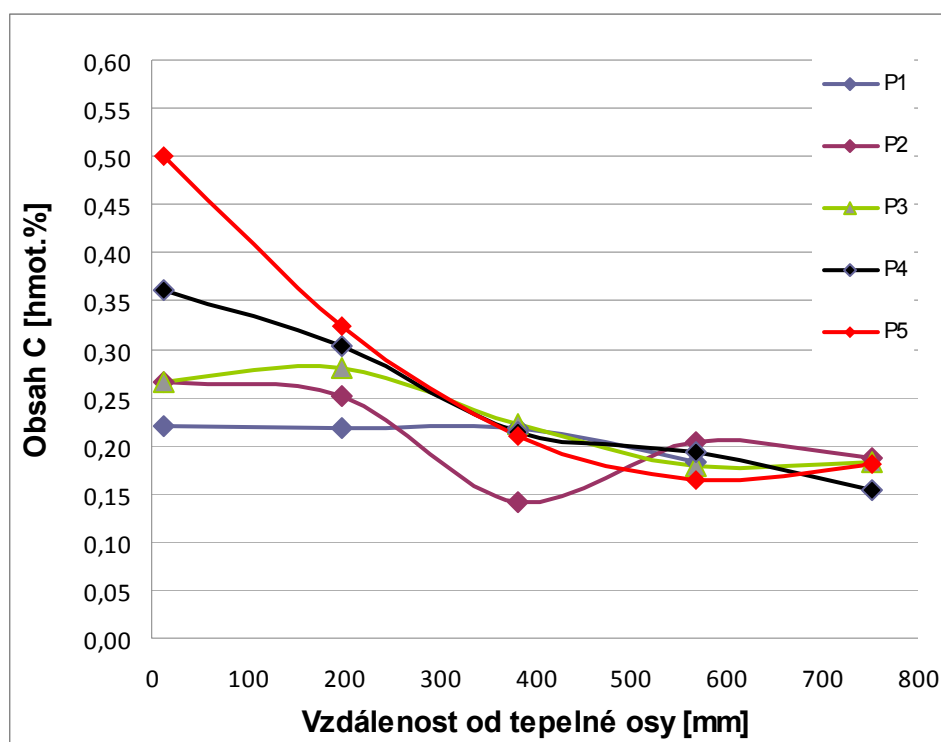
vzorek	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Al- c	%N
1.1	0,221	1,51	0,45	0,009	0,0043	0,15	0,415	0,141	0,040	0,018	0,0116
1.2	0,218	1,40	0,41	0,005	0,0024	0,14	0,391	0,135	0,036	0,018	0,0080
1.3	0,218	1,50	0,45	0,008	0,0022	0,16	0,419	0,143	0,041	0,018	0,0165
1.4	0,182	1,35	0,42	0,005	0,0016	0,14	0,391	0,130	0,036	0,021	0,0074
2.1	0,266	1,50	0,46	0,010	0,0023	0,16	0,422	0,141	0,040	0,019	0,0094
2.2	0,251	1,54	0,47	0,009	0,0026	0,16	0,427	0,145	0,043	0,019	0,0076
2.3	0,141	1,33	0,42	0,005	0,0011	0,14	0,391	0,133	0,036	0,021	0,0106
2.4	0,204	1,37	0,42	0,007	0,0014	0,14	0,387	0,132	0,038	0,021	0,0086
2.5	0,187	1,42	0,45	0,008	0,0013	0,14	0,405	0,132	0,039	0,023	0,0075

vzorek	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Al- c	%N
3.1	0,265	1,58	0,47	0,011	0,0025	0,16	0,437	0,144	0,041	0,018	0,0133
3.2	0,280	1,50	0,44	0,006	0,0019	0,15	0,416	0,139	0,038	0,018	0,0110
3.3	0,222	1,36	0,42	0,006	0,0016	0,14	0,386	0,133	0,037	0,021	0,0081
3.4	0,179	1,32	0,42	0,006	0,0038	0,14	0,378	0,128	0,036	0,020	0,0092
3.5	0,183	1,38	0,43	0,006	0,0026	0,15	0,395	0,132	0,037	0,021	0,0089
4.1	0,361	1,61	0,50	0,013	0,0026	0,17	0,466	0,147	0,043	0,019	0,0134
4.2	0,304	1,50	0,44	0,008	0,0024	0,15	0,415	0,140	0,038	0,018	0,0121
4.3	0,213	1,40	0,43	0,009	0,0019	0,14	0,400	0,137	0,039	0,019	0,0088
4.4	0,193	1,43	0,42	0,008	0,0017	0,14	0,407	0,136	0,039	0,021	0,0072
4.5	0,154	1,36	0,41	0,006	0,0020	0,14	0,384	0,130	0,037	0,020	0,0070
5.1	0,500	1,89	0,61	0,033	0,0069	0,21	0,525	0,168	0,061	0,021	0,0171
5.2	0,323	1,51	0,44	0,008	0,0019	0,15	0,409	0,139	0,039	0,018	0,0121
5.3	0,210	1,44	0,43	0,007	0,0015	0,15	0,398	0,137	0,037	0,019	0,0088
5.4	0,163	1,39	0,43	0,006	0,0012	0,14	0,380	0,131	0,037	0,021	0,0068
5.5	0,181	1,42	0,42	0,007	0,0019	0,15	0,396	0,135	0,038	0,020	0,0075

Porovnáním výsledků chemického složení kovu z pánve a z nálitku lze zjistit, že obsahy všech prvků v nálitku jsou vyšší než v tavebním vzorku s výjimkou obsahu hliníku.

Uhlík je prvek, který bude nejvíce ovlivňovat mechanické vlastnosti nálitku. Příklad změny chemického složení v nálitku je zobrazeno na *obr. 6.4*. Z grafu je zřejmé, že chemické složení v krčku, resp. obsah uhlíku se příliš nemění. S rostoucí vzdáleností od odlitku obsah uhlíku v tepelné ose silně narůstá až na koncentraci 0,5 %, což je více jak dvojnásobná hodnota oproti jeho obsahu v tavebním vzorku.

Zajímavý je průběh křivky ve vrstvě P2 (200 mm nad vzorky z krčku, cca 385 mm nad odlitkem). Vzorek 2.3 obsahuje výrazně nižší koncentraci uhlíku než vzorek 2.4, nebo vzorek 2.5. Jak vyplývá z *obr. 5.2*, dochází ve druhé vrstvě k prohřívání krčku nálitku, což má za následek i změny v podmínkách tuhnutí vyjádřených podmínkami, např. dosažením teploty likvidu a solidu tab. 5.2 a změnám ve velikosti teplotního gradientu *obr. 5.4*. Tyto změny určitě přispívají právě ke změně chemického složení v této části nálitku.



Obr. 6.4 Změna obsahu uhlíku pro měřené vzorky

### 6.3 Výsledky zkoušek mechanických vlastností nálitku

Mechanické vlastnosti byly určovány na přilítném klínu a na vzorcích z nálitku. Z materiálu přilitého klínu byla provedena tahová zkouška a zkouška vrubové houževnatosti. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v *tab. 6.3*.

Tab. 6.3 Výsledky zkoušek mechanických vlastností a normy materiálu [1]

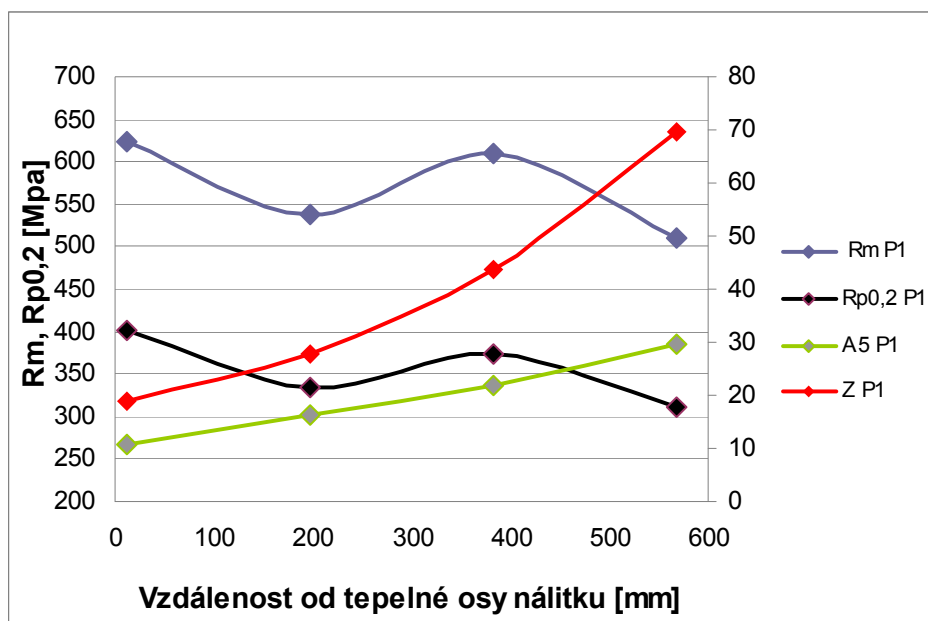
Vzorek	Rp0,2 min.	Rm min.	A5 min.	Z	KV min.	HB
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[J] +20 °C	[-]
Norma	260	480	22		35	
Přilítý klín	307	517	30,2	68,8	86,96,82	158

Jak vyplývá z výsledků zkoušek uvedených v *tab. 6.3* vlastnosti určené při tahové zkoušce i zkoušce vrubové houževnatosti splňují požadavky předepsané pro daný materiál normu. Materiál má při dostatečných pevnostních charakteristikách dostatečně vysokou plasticitu i vrubovou houževnatost. Ze vzorku nálitku po tepelném zpracování byly podle rozřezového plánu na *obr. 4.1* vyřezány vzorky pro tahovou zkoušku. Výsledky tahové zkoušky z vybraných míst nálitku jsou uvedeny v *tab. 6.4*.

Tab. 6.4 Hodnoty získané z tahové zkoušky [1]

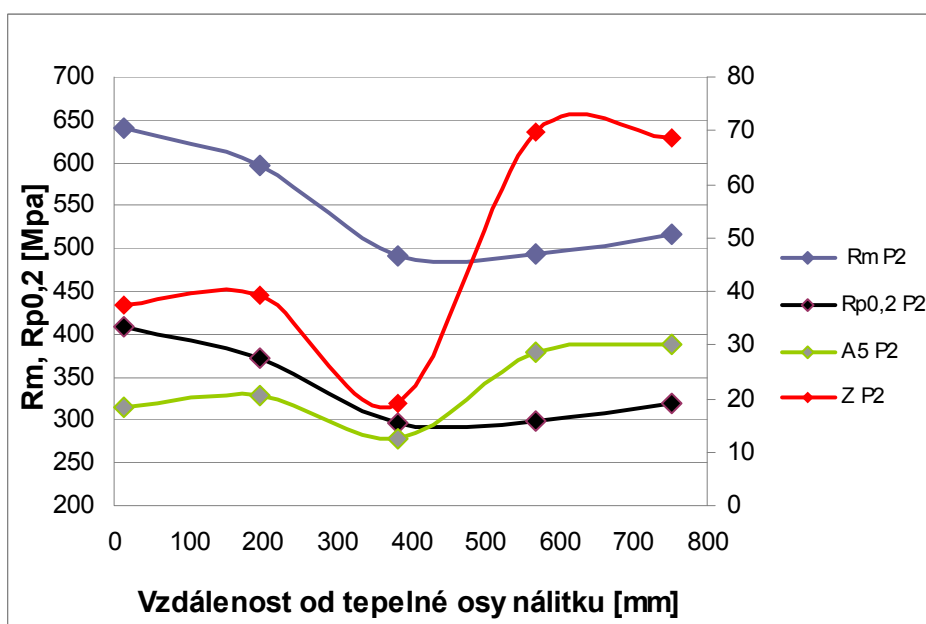
Vzorek	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]	HBW [-] (2,5/187,5)
1.1	402	623	10,8	19,0	184,3
1.2	335	539	16,2	27,8	159,7
1.3	374	610	22,0	43,8	180,0
1.4	312	511	29,6	69,8	162,7
2.1	409	640	18,4	37,6	219,3
2.2	371	597	20,4	39,2	197,3
2.3	297	491	12,6	19,0	161,3
2.4	299	493	28,6	69,8	153,7
2.5	320	516	30,2	68,6	158,3
3.1	458	721	12,2	22,6	241,7
3.2	374	604	20,6	51,0	184,3
3.3	304	507	25,8	65,2	154,7
3.4	290	483	29,6	70,8	154,7
3.5	313	502	26,6	71,9	158,7
4.1	457	648	4,2	9,8	256,3
4.2	386	620	22,0	60,3	181,0
4.3	318	521	13,2	31,1	169,0
4.4	299	495	26,6	73,0	151,7
4.5	321	513	27,4	65,2	149,7
5.1	476	577	0,6	2,0	240,7
5.2	391	637	16,8	26,6	193,0
5.3	341	553	24,8	59,0	174,7
5.4	299	494	27,2	71,9	156,7
5.5	320	517	27,0	66,4	156,3

Průběh charakteristik stanovených při tahové zkoušce v první vrstvě (P1) z oblasti krčku je graficky znázorněn na obr. 6.5 Z výsledků vyplývá, že požadovaných hodnot meze pevnosti i meze kluzu bylo dosaženo ve všech sledovaných průřezích vrstvy P1. S klesající vzdáleností od tepelné osy nálitku dochází k výraznému poklesu plastických vlastností zejména kontrakce i tažnosti. Do vzdálenosti 400 mm od osy nálitku jsou naměřené hodnoty tažnosti nižší, než jsou požadavky udané normou. Obsah uhlíku v prvním vzorku nejvíce vzdáleném od osy nálitku, tzn. vzorek 1.4 (cca 570 mm) byl 0,18 %. V ostatních vzorcích byl obsah uhlíku přibližně stejný a jeho koncentrace činila cca 0,22 %. Největší rozdíl byl zjištěn u obsahu manganu, tj. rozdíl 0,16 % Mn mezi krajním vzorkem a vzorkem z tepelné osy nálitku.



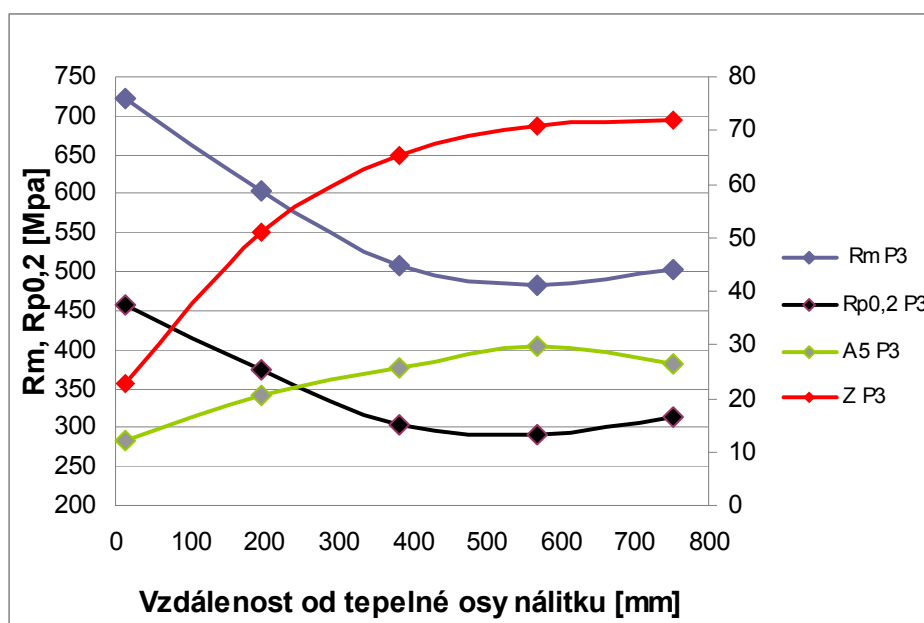
Obr. 6.5 Výsledky tahové zkoušky vrstvy P1

Průběh charakteristik stanovených při tahové zkoušce v druhé vrstvě (P2) z oblasti 200 mm nad vzorkem z krčku nálitku je graficky znázorněn na *obr. 6.6*. Z výsledků vyplývá, že požadovaných hodnot meze pevnosti i meze kluzu bylo dosaženo ve všech sledovaných průřezích vrstvy P2 a dosažené hodnoty jsou zcela srovnatelné s výsledky naměřenými v první vrstvě P1. S klesající vzdáleností od osy nálitku opět dochází poklesu plastických vlastností, ale naměřené hodnoty tažnosti i kontrakce v tepelné ose nálitku jsou přibližně dvojnásobné, než u vzorku v první měřené vrstvě (krčku). Mezním případem je vzorek 2.3, ve kterém bylo naměřeno minimální tažnosti (cca 10%) i kontrakce (cca 20 %) i přesto, že jeho obsah uhlíku je pouze 0,141%. Nízké hodnoty tažnosti ve vzorku 2.3 souvisí s výskytem ředin nebo mikroředin.



Obr. 6.6 Výsledky tahové zkoušky vrstvy P2

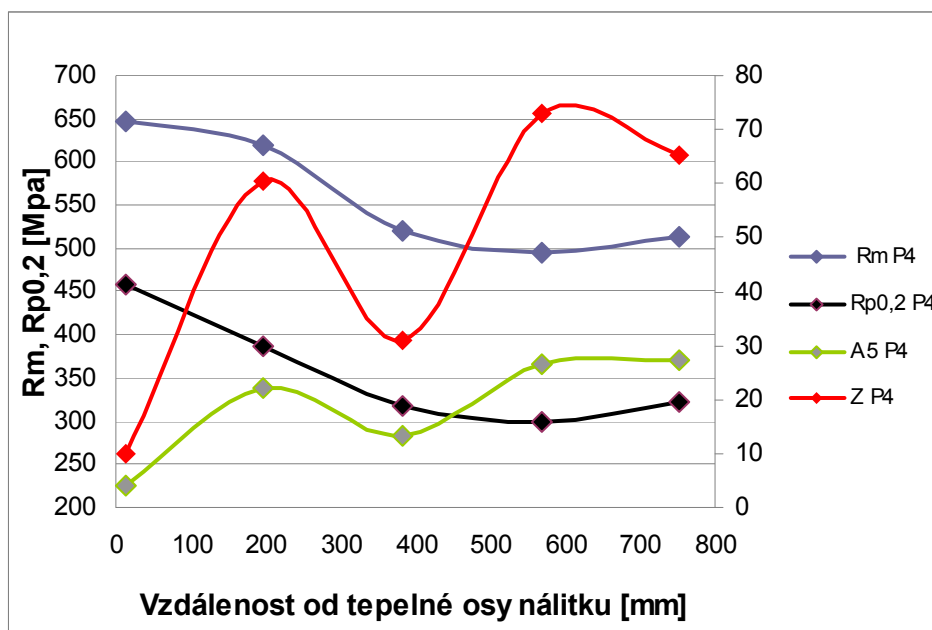
Průběh charakteristik stanovených při tahové zkoušce ve třetí vrstvě P3 z oblasti 400 mm nad vzorkem z krčku nálitku je graficky znázorněn na *obr. 6.7*. Z výsledků vyplývá, že požadovaných hodnot meze pevnosti i meze kluzu bylo dosaženo ve všech sledovaných průřezech vrstvy P3. Dosažené hodnoty jsou výrazně vyšší u vzorků z tepelné osy a to o cca 80-100 MPa pro mez pevnosti a o cca 50 MPa pro mez kluzu, než jsou hodnoty naměřené v první a druhé vrstvě. Uvedená skutečnost souvisí i s tím, že obsah uhlíku je v tepelné ose nálitku cca 0,27 % (vyšší o cca 20% oproti vrstvě P1). S klesající vzdáleností od osy nálitku dochází opět poklesu plastických vlastností. Pokles tažnosti i kontrakce je v průřezu dané vrstvy nálitku plynulý, což nasvědčuje tomu, že nebyly tyto vlastnosti ovlivněny výskytem vad typu ředin a mikroředin. Dosažené hodnoty tažnosti i kontrakce jsou v tepelné ose nižší než ve druhé vrstvě P2. Pokles plastických vlastností je dán růstem pevnostních charakteristik.



Obr. 6.7 Výsledky tahové zkoušky vrstvy P3

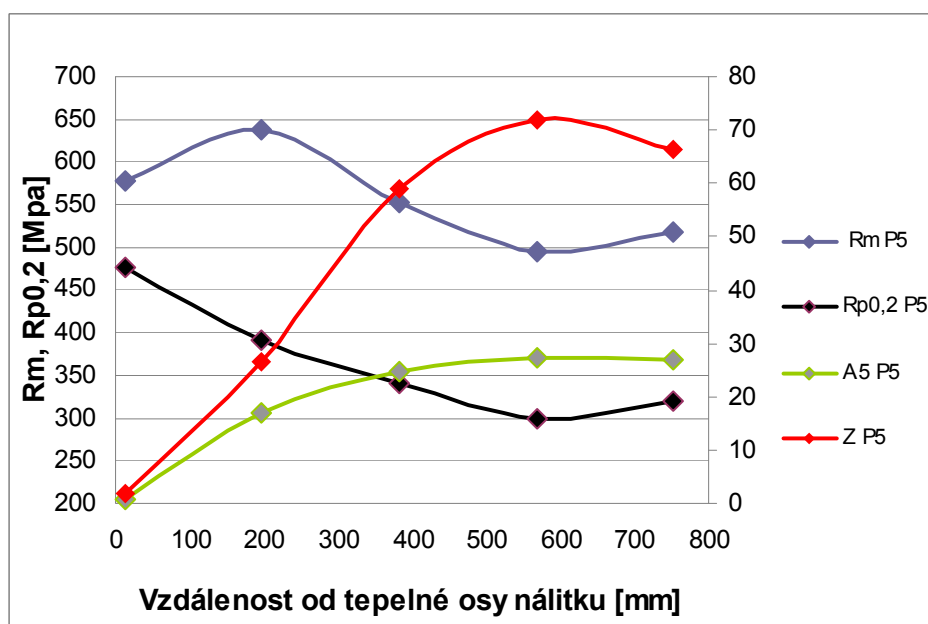
Průběh charakteristik stanovených při tahové zkoušce ve čtvrté vrstvě (P4) z oblasti 600 mm nad vzorkem z krčku nálitku je graficky znázorněn na *obr. 6.8*. Z výsledků vyplývá, že požadovaných hodnot meze pevnosti i meze kluzu bylo dosaženo ve všech sledovaných průřezech vrstvy P4 a dosažené hodnoty jsou srovnatelné s vrstvou P3. Pouze u meze pevnosti dochází k poklesu o cca 70 MPa. Obsah uhlíku je v tepelné ose vrstvy 0,36 % a je tedy již o cca 0,14 % vyšší než ve vrstvě P1. Tento nárůst obsahu uhlíku se projevuje snížením tažnosti na cca 4 % a kontrakce na cca 10 %. Vyšší obsah uhlíku se na růstu pevnostních charakteristik významně neprojevil. S klesající vzdáleností od osy nálitku dochází opět poklesu plastických vlastností. Pokles tažnosti i kontrakce je v průřezu dané vrstvy nálitku plynulý s výjimkou vzorku číslo 4.3, ve kterém došlo k výraznému snížení tažnosti i kontrakce.





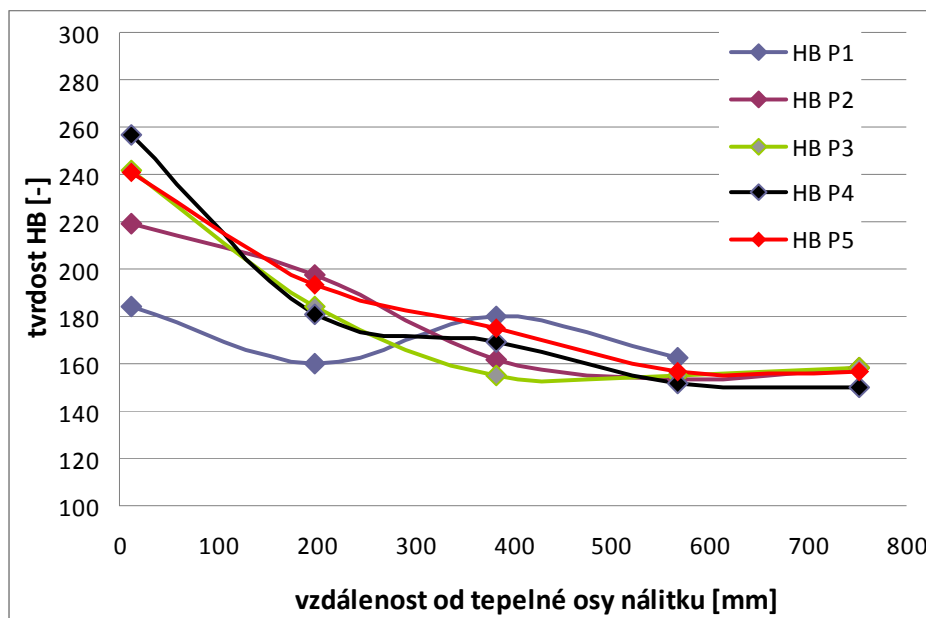
Obr. 6.8 Výsledky tahové zkoušky vrstvy P4

Průběh charakteristik stanovených při tahové zkoušce v páté vrstvě (P5) z oblasti 800 mm nad vzorkem z krčku nálitku je graficky znázorněn na *obr. 6.9*. Z výsledků vyplývá, že požadovaných hodnot meze pevnosti i meze kluzu bylo dosaženo ve všech sledovaných průřezech vrstvy P5. Dosažené hodnoty pevnosti i meze kluzu jsou srovnatelné s vrstvami P3 a P4, pouze u *Rm* dochází v tepelné ose k jejímu poklesu. Obsah uhlíku je v tepelné ose vrstvy P5 0,5 %. Vyšší obsah uhlíku se na růstu pevnostních charakteristik významně neprojevil, jeho vliv byl však výrazný na hodnotách plastických vlastností a to jak tažnosti, tak i kontrakce. Pokles plastických vlastností je v průřezu dané vrstvy nálitku plynulý a klesá až téměř na nulu v tepelné ose, což ukazuje na výrazné zkrěnutí materiálu vlivem segregujících prvků (zejména uhlíku).



Obr. 6.9 Výsledky tahové zkoušky vrstvy P5

Na *obr. 6.10* jsou uvedeny hodnoty naměřené tvrdosti u jednotlivých vrstev v místě odběru vzorku pro tahovou zkoušku. Při porovnání s *obr. 6.4* (změna obsahu uhlíku v průřezu nálitku) je zřejmá podobnost těchto grafů. Zvýšené koncentraci uhlíku odpovídá zvýšená tvrdost materiálu. Nižší hodnoty tvrdosti byly naměřeny zejména v povrchových vrstvách nálitku, kde je obsah uhlíku roven přibližně obsahu v tavbovém vzorku.



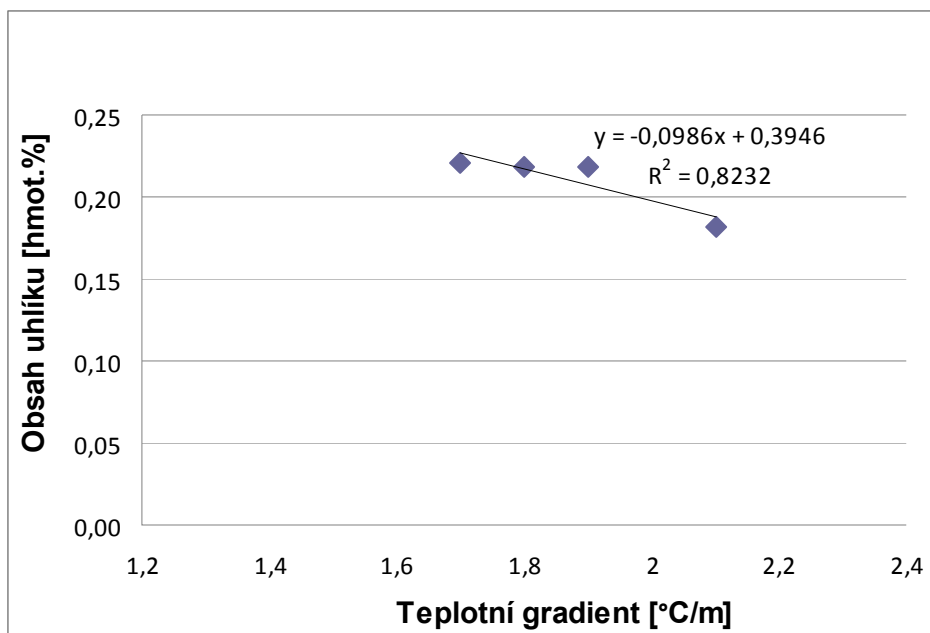
Obr. 6.10 Výsledky zkoušky tvrdosti

## 7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Cílem tohoto porovnání je ověření vzájemných souvislostí mezi podmínkami tuhnutí vyjádřených pomocí celkového teplotního gradientu a obsahem vybraných prvků (uhlíku) po průřezu nálitku.

### 7.1 Porovnání výsledků numerické simulace a chemického složení pro vrstvy P1 až P5

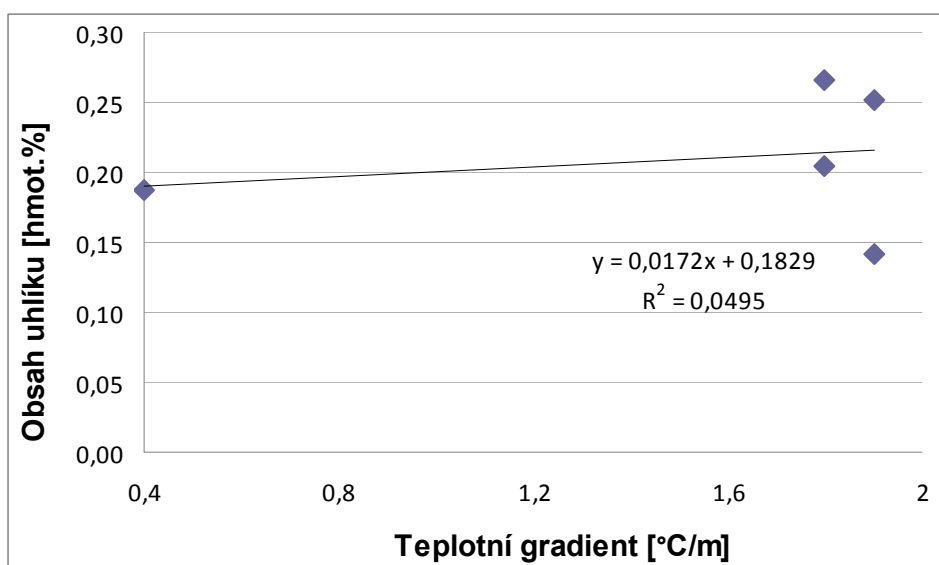
Nejvýznamnějším prvkem v ocelích z hlediska pevnostních vlastností je uhlík. V rámci porovnání závislosti mezi teplotním gradientem a chemickým složením byla proto sledována právě velikost celkového teplotního gradientu a koncentrace uhlíku. Při porovnání byla uvažována lineární regrese. Na *obr. 7.1* je uvedena závislost koncentrace uhlíku na hodnotě teplotního gradientu v první vrstvě nálitku P1.



Obr. 7.1 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě P1

Z uvedené závislosti na *obr. 7.1* vyplývá, že v první vrstvě je závislost mezi podmínkami tuhnutí vyjádřenými velikostmi teplotního gradientu a obsahem uhlíku statisticky významná. Koeficient korelace  $R^2$  je roven 0,823, tj. index determinace R je roven hodnotě cca 0,91.

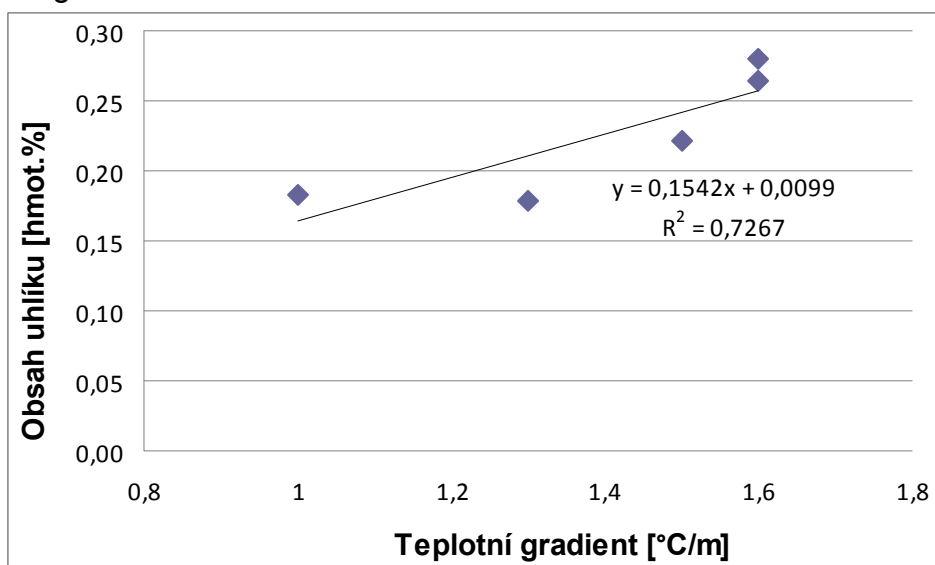
Na *obr. 7.2* je uvedena závislost koncentrace uhlíku na hodnotě celkového teplotního gradientu ve vrstvě nálitku P2.



Obr. 7.2 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě P2

Z uvedené závislosti na obr. 7.2 vyplývá, že na rozdíl od první vrstvy není ve druhé vrstvě závislost mezi velikostí teplotního gradientu a obsahem uhlíku statisticky významná. Tuhnutí ve druhé vrstvě nálitku je významně ovlivněno podmínkami tuhnutí v této vrstvě. Vzorky 2.4 a 2.5 se nacházejí v těsné blízkosti přechodu krčku do nálitku a jsou tak významně ovlivněny prohříváním formovací směsi v místě krčku nálitku a tím prodloužení doby tuhnutí. To významně mění i průběh teplotního gradientu v uvažované vrstvě viz dříve uvedený obr. 5.4. Na rozdíl od ostatních zkoumaných vrstev nálitku není v tepelné ose nálitku hodnota celkového gradientu maximální. V místě vzorků 2.4 a 2.5 dochází ke skokovým změnám ve velikosti gradientu a tedy i porušení vzájemné závislosti těchto dvou porovnávaných veličin.

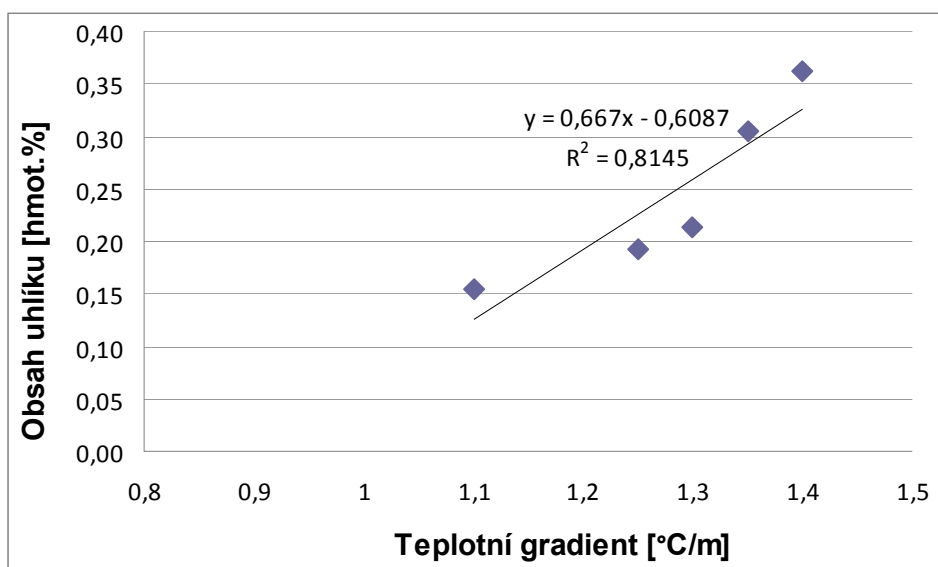
Na obr. 7.3 je uvedena závislost koncentrace uhlíku na hodnotě celkového teplotního gradientu ve vrstvě nálitku P3.



Obr. 7.3 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě P3

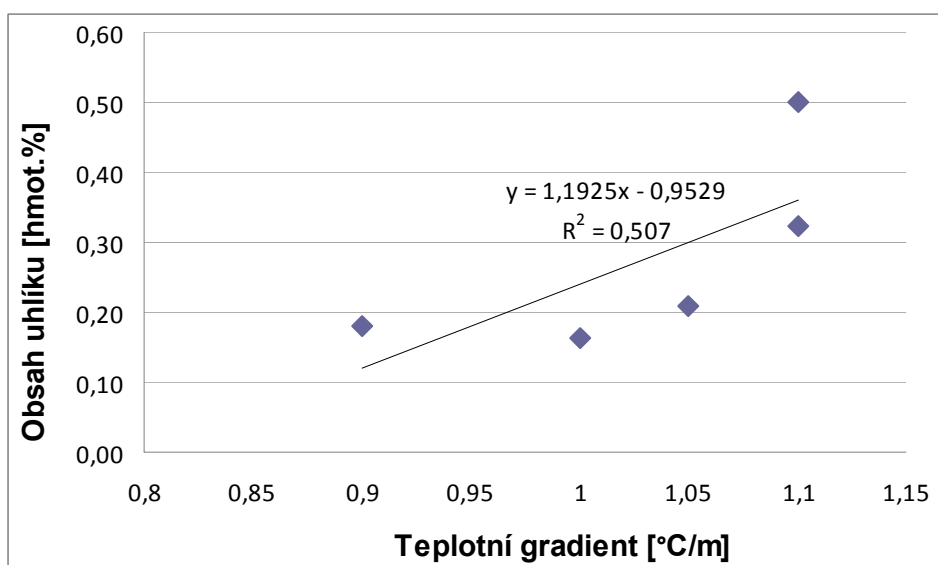
Z uvedené závislosti na *obr. 7.3* vyplývá, že ve třetí vrstvě je opět závislost obsahu uhlíku na hodnotě teplotního gradientu statisticky významná. Koeficient korelace  $R^2$  je roven 0,726, tj. index determinace R je roven hodnotě cca 0,85.

Na *obr. 7.4* je uvedena závislost koncentrace uhlíku na hodnotě celkového teplotního gradientu ve vrstvě nálitku P4. Z uvedené závislosti na *obr. 7.4* vyplývá, že ve čtvrté vrstvě je opět závislost obsahu uhlíku na hodnotě teplotního gradientu statisticky významná. Koeficient korelace  $R^2$  je roven 0,814, tj. index determinace R je roven hodnotě cca 0,90.



*Obr. 7.4* Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě P4

Na *obr. 7.5* je uvedena závislost koncentrace uhlíku na hodnotě celkového teplotního gradientu v páté zkoumané vrstvě nálitku P5. Z uvedené závislosti na *obr. 7.5* vyplývá, že v páté vrstvě není závislost obsahu uhlíku na hodnotě teplotního gradientu příliš statisticky významná. Koeficient korelace  $R^2$  je roven 0,507, tj. index determinace R je roven hodnotě cca 0,71. Z *obr. 7.5* je zřejmé, že v tepelné ose nálitku byl podle očekávání stanoven nejvyšší obsah uhlíku, ale velikost vypočteného celkového teplotního gradientu se vůči vzdálenějšímu bodu od tepelné osy 5.2 nezměnila. V případě, že bychom neuvažovali párové hodnoty gradientu a koncentrace uhlíku v ose nálitku, zvýšil by se koeficient korelace  $R^2$  pouze na hodnotu 0,557, tj. nijak významně. V další analýze tak nebyly dále uvažovány všechny body v profilu P5.



Obr. 7.5 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě P5

Na základě korelací obsahu uhlíku a celkového teplotního gradientu uvedených na *obr. 7.1 až obr. 7.5* byla sestavena rovnice (7.1), která udává závislost mezi obsahem uhlíku v materiálu nálitku na teplotním gradientu v celé zkoumané oblasti nálitku, tj. od 180 mm povrchu odlitku do vzdálenosti 980 mm od povrchu odlitku. Při stanovení rovnice nebyly s ohledem na nízký koeficient korelace uvažovány hodnoty stanovené ve druhé vrstvě nálitku P2.

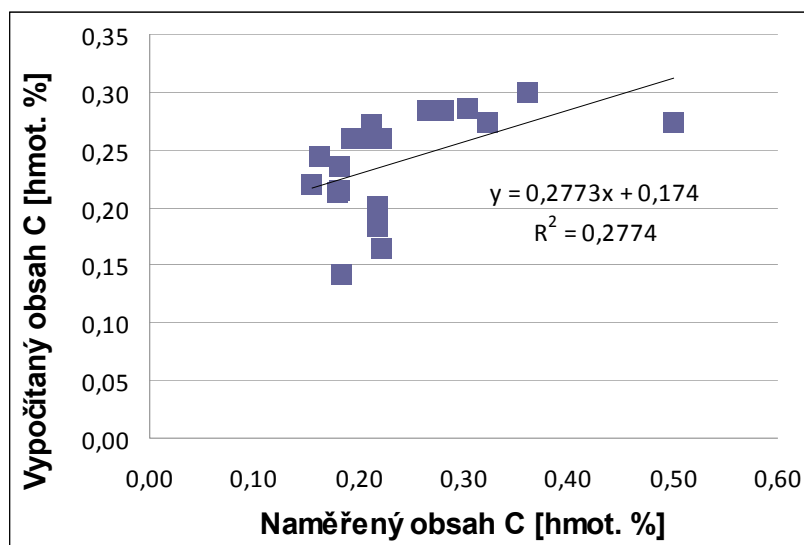
$$\%C = 0,1426 \cdot V \cdot \text{grad}T + 0,152 \cdot \text{grad}T + 0,1123 \cdot V - 0,157 \quad (7.1)$$

kde:

$V$  – vzdálenost od povrchu odlitku [m]

$\text{grad}T$  – teplotní gradient [°C/m]

Rovnice (7.1) byla použita k porovnání vypočtených a naměřených hodnot obsahu uhlíku ve zkoumané části nálitku na základě skutečných hodnot teplotního gradientu a vzdálenosti od povrchu odlitku. Při výpočtu nebyly uvažovány hodnoty ve vrstvě P2, protože zde nebyla závislost teplotního gradientu a obsahu uhlíku statisticky významná. Porovnání bylo provedeno pro 19 párových hodnot naměřené a vypočtené koncentrace uhlíku (*obr. 7.6*). Uvedená závislost na *obr. 7.6* není při 19 měřeních na hladině významnosti  $p = 0,05$  statisticky významná, tzn. vypočtený obsah uhlíku podle rovnice (7.1) není v dostatečně dobré shodě s reálným obsahem uhlíku v daném místě odlitku.



Obr. 7.6 Korelace mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami obsahu uhlíku

Při stanovení rovnice (7.1) byly použity data i z vrstvy P5, ve které nebyla korelace obsahu uhlíku na hodnotě tepelného gradientu statisticky dostatečně významná. Budeme-li uvažovat pouze vrstvy, ve kterých byla tato korelace statisticky významná (vrstvy P1, P3 a P4), získáme rovnici (7.2).

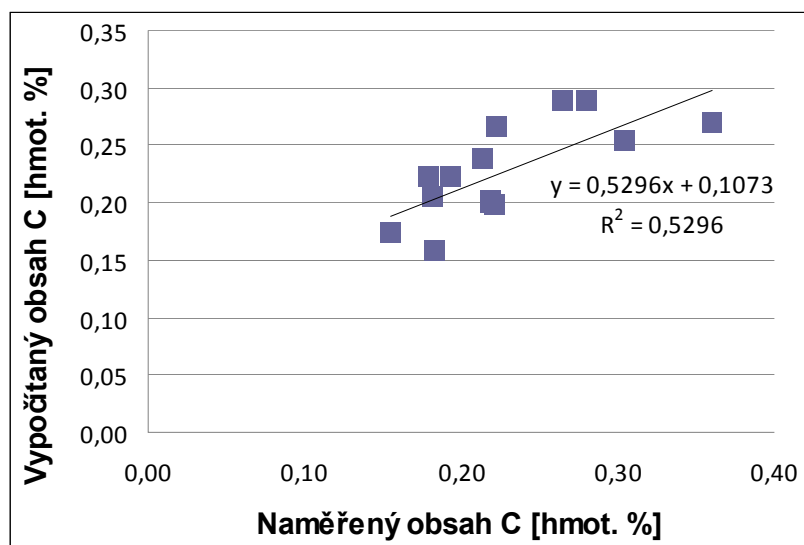
$$\%C = 0,505 \cdot V \cdot \text{grad}T - 0,0765 \cdot \text{grad}T - 0,582 \cdot V + 0,2794 \quad (7.2)$$

kde:

$V$  – vzdálenost od povrchu odlitku [m]

$\text{grad}T$  – teplotní gradient [ $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ]

Po dosazení rovnice (7.2) lze porovnat vypočtený a naměřený obsah uhlíku v těchto třech vrstvách. Grafická závislost je vyjádřena na obr. 7.7. Koeficient korelace  $R^2$  je v tomto případě výrazně vyšší a je roven hodnotě 0,529 a koeficient determinace  $R$  dosahuje hodnoty cca 0,73.



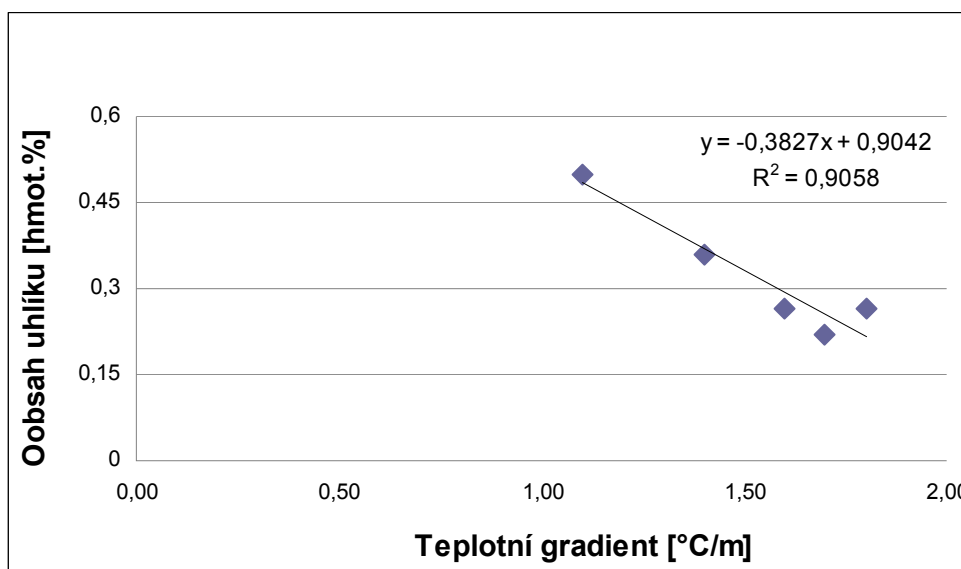
Obr. 7.7 Korelace mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami obsahu uhlíku ve vrstvách P1, P2, P3

Jak vyplývá z provedených závislostí mezi velikostí celkového teplotního gradientu a obsahu uhlíku jsou korelace statisticky významné jen při použití zvláště pro jednotlivé vrstvy. Odvozená rovnice pro celý nálitok (7.1) nemá již dostatečně přesnou korelaci mezi obsahem uhlíku a teplotního gradientu. Použitím pouze vrstev, kde byla tato korelace statisticky významná (P1, P2 a P3) získáme rovnici (7.2) s vyšší těsností shody mezi vypočteným a reálným stavem, ale ztrácíme univerzálnost použití této rovnice na celou sledovanou plochu nálitku.

Segregaci dalších vybraných prvků by bylo možné popsat výše uvedenými jednoduchými rovnicemi. Uvedený postup vyjadřuje způsob, jak lze segregaci pochody v masivních průřezích odlitku popsat na základě statistické analýzy a následně použít k predikci koncentrace uhlíku, nebo jiného libovolně zvoleného prvku.

## 7.2 Porovnání výsledků numerické simulace a chemického složení pro vrstvy X1 až X5

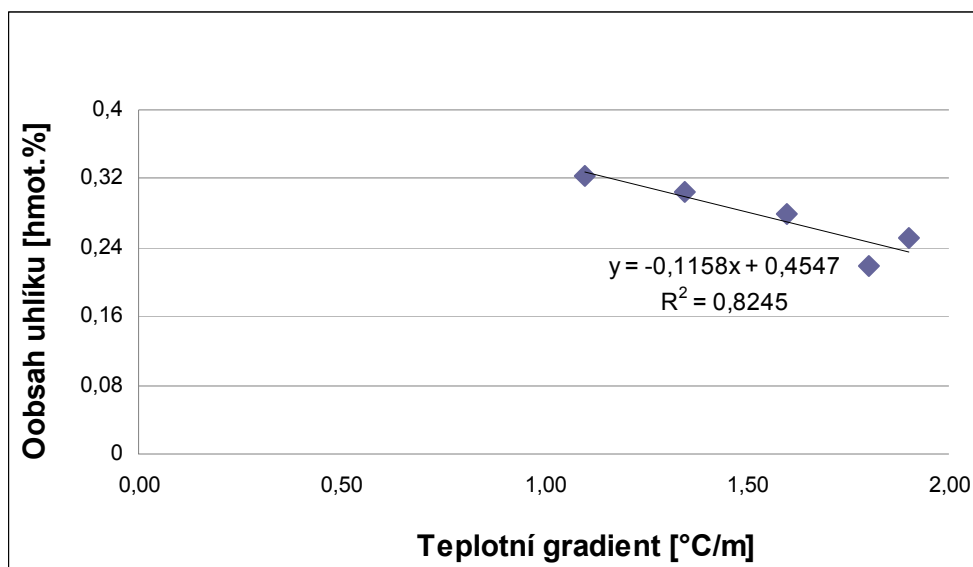
Pro porovnání byly vytvořeny obdobné závislosti mezi teplotním gradientem a procentuálním obsahem uhlíku tentokrát však pro svislé vrstvy X1 až X5. Pro vrstvu X1 byla získána závislost na obr. 7.8, kde byla opět použita lineární regrese pro stanovení vzájemné závislosti zkoumaných veličin. Koeficient korelace  $R^2$  je roven hodnotě 0,9058, tj. index determinace R je roven hodnotě cca 0,95. Můžeme opět konstatovat, že tato závislost je statisticky významná.



Obr. 7.8 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě X1

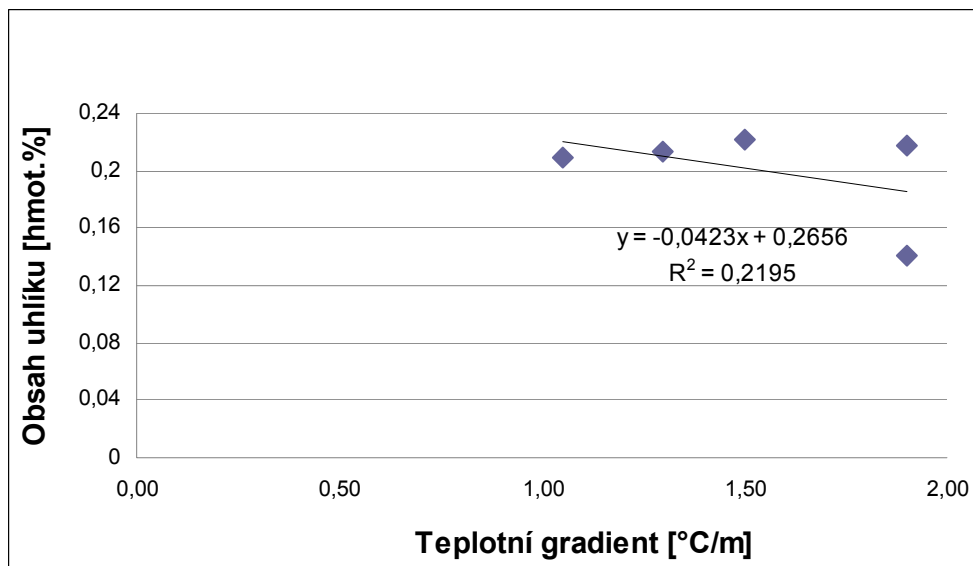
Pro druhou sledovanou vrstvu X2 získáváme závislost na obr. 7.9. Kde je opět patrná statisticky významná závislost, ale je nižší než ve vrstvě X1. Koeficient korelace  $R^2$  je roven 0,8245 a index determinace cca 0,91.



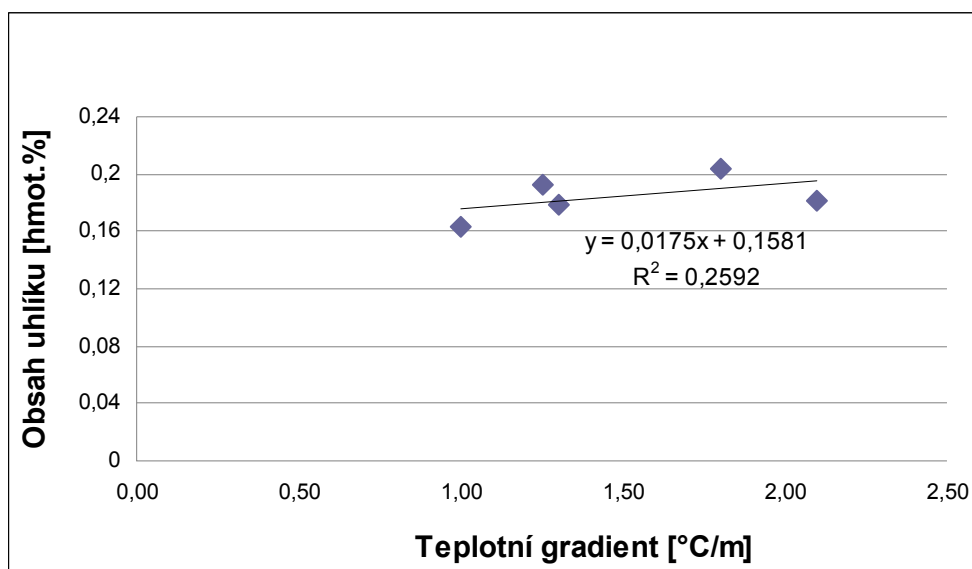


Obr. 7.9 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě X2

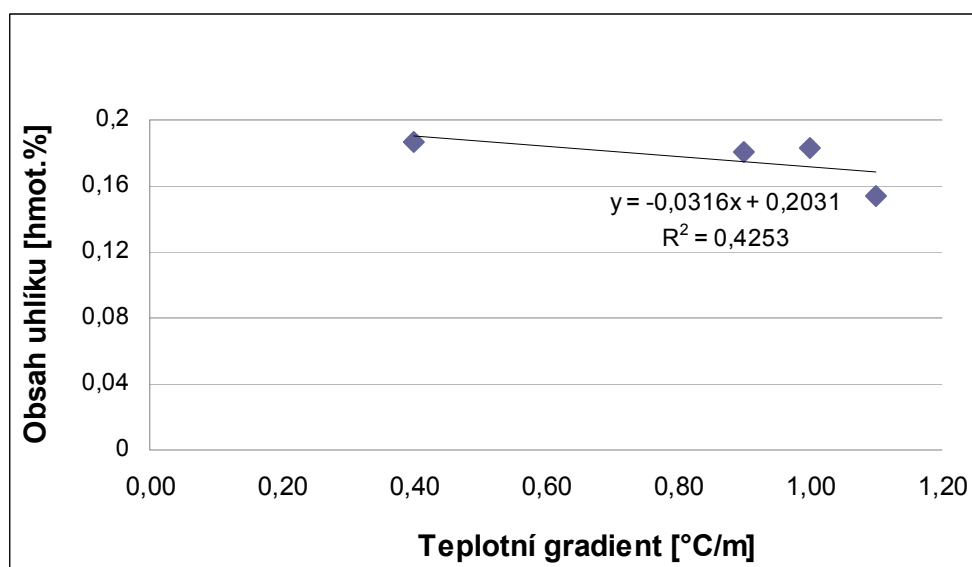
Pro vrstvu X3 byla vypočtena hodnota  $R^2$  rovna 0,2195, pro vrstvu X4 hodnota  $R^2$  rovna 0,2592 a pro vrstvu X5 hodnota  $R^2$  rovna 0,4253. Z čehož vyplývá, že závislosti obsah uhlíku na hodnotě teplotního gradientu nejsou v těchto vrstvách statisticky významné. Tyto závislosti jsou uvedeny na obr. 7.10 – 7.12



Obr. 7.10 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě X3



Obr. 7.11 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě X4

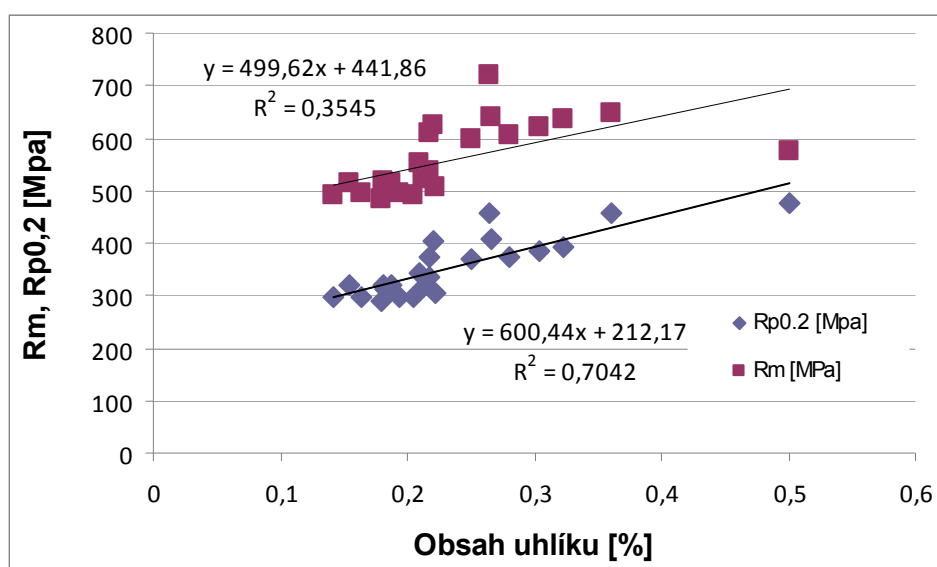


Obr. 7.12 Závislost obsahu uhlíku na teplotním gradientu ve vrstvě X5

Opět můžeme vytvořit rovnici pro zjištění obsahu uhlíku s dostatečnou přesností pouze pro vrstvy, kde byla dosažena vyšší statistická významnost, tedy pro vrstvu X1 z tepelné osy a vrstvu X2 vzdálenou cca 200mm od tepelné osy. Právě tyto vrstvy materiálu jsou zatíženy největší chemickou heterogenitou a tím i největšími rozptyly mechanických hodnot, což je patrné z obr. 6.5 – 6.9. Vrstvy X4 a X5 vykazují takřka konstantní průběh mechanických hodnot na vzdálenosti od odlitku, tzn. pevností i plastické vlastnosti jsou v těchto průřezích téměř konstantní. Pro tyto vrstvy nelze vytvořit rovnici s dostatečnou shodou mezi vypočítaným a skutečným obsahem uhlíku z důvodu nedostatečné korelace mezi obsahem uhlíku a celkovým teplotním gradientem. Pro vytvoření rovnice s dostatečnou shodou by bylo nutné uvažovat více faktorů, příp. jiné faktory, které silněji ovlivňují segregaci příměsi.

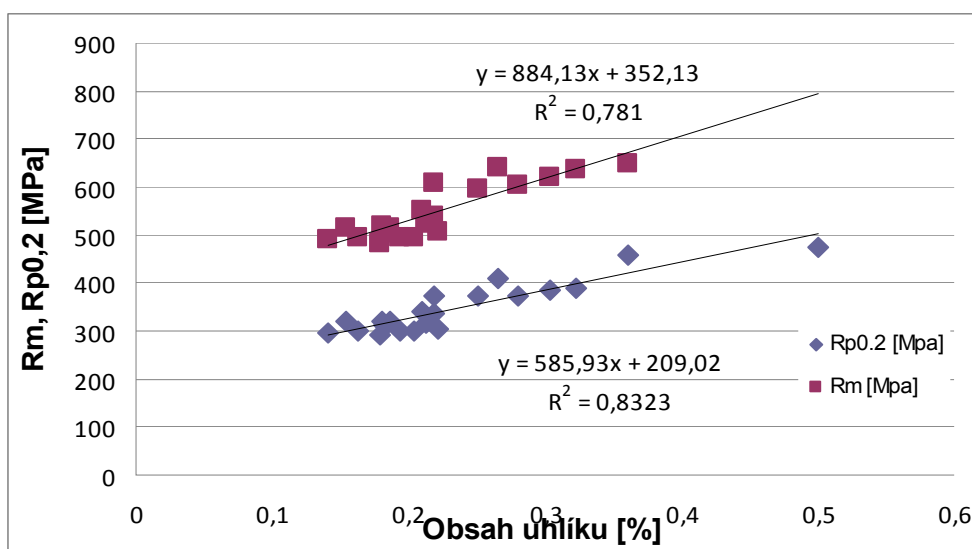
### 7.3 Porovnání výsledků mechanických vlastností a chemického složení

Na výsledné mechanické vlastnosti oceli má největší vliv především obsah uhlíku. Pro další hodnocení byl proto porovnáván vliv obsahu uhlíku na výsledné mechanické vlastnosti při tahové zkoušce a zkoušce tvrdosti. Na *obr. 7.13* je uvedena závislost meze pevnosti a smluvní meze kluzu na obsahu uhlíku. Na grafu jsou vyznačeny body ze všech provedených 24 měření. Z uvedených výsledků je zřejmé, že statisticky významnější byla zjištěna závislost mezi smluvní mezí kluzu a obsahem uhlíku. To pravděpodobně souvisí s tím, že na hodnotě meze pevnosti se více projevuje vliv slévárenských vad typu ředin, které lze také u vzorků z nálitku předpokládat.



Obr. 7.13 Závislost mezi Rm, Rp0,2 a obsahem uhlíku

Na *obr. 7.14* je uvedena závislost meze pevnosti a smluvní meze kluzu na obsahu uhlíku u souboru 22 párových hodnot meze pevnosti, meze kluzu a obsahu uhlíku. Ze souboru naměřených hodnot byly vyloučeny 2 hodnoty od každé charakteristiky. Z hodnot korelačního koeficientu  $R^2$  je zřejmé, že došlo po vyloučení 2 párových hodnot meze pevnosti a obsahu uhlíku k výraznému zvýšení statistické významnosti v uvedené závislosti. Hodnota korelačního koeficientu se zvýšila na hodnotu 0,781, tj. hodnota koeficientu determinace činí cca 0,88. Současně došlo i ke zvýšení statistické významnosti závislosti meze kluzu na obsahu uhlíku (hodnota koeficientu determinace  $R = 0,91$ ). Obě uvedené závislosti jsou tedy statisticky významné a uvedené lineární regrese tak mohou být při znalosti obsahu uhlíku použity k predikci meze pevnosti a smluvní meze kluzu.

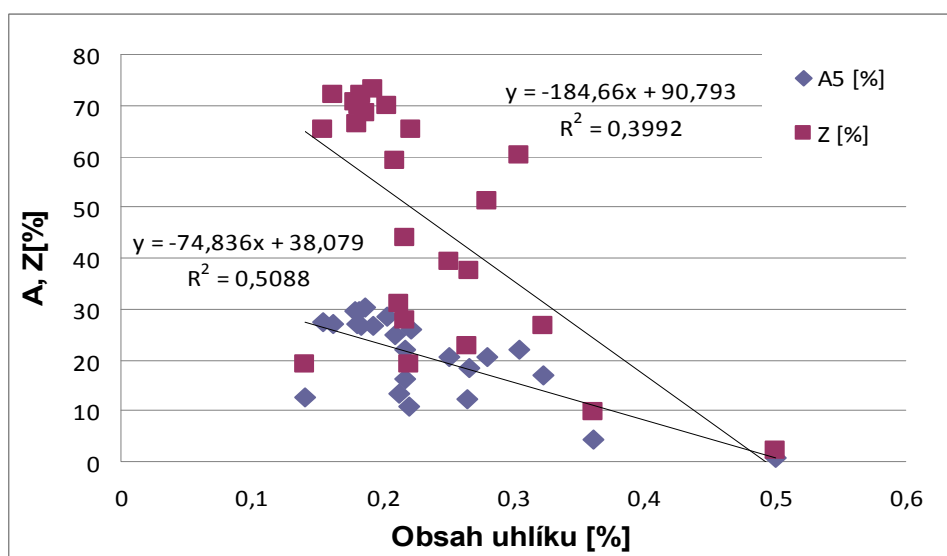


Obr. 7.14 Závislost mezi  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$  a obsahem uhlíku s vyloučením dvou párových hodnot

$$R_m = 884,1 \cdot \%C + 325,1 \quad (7.3)$$

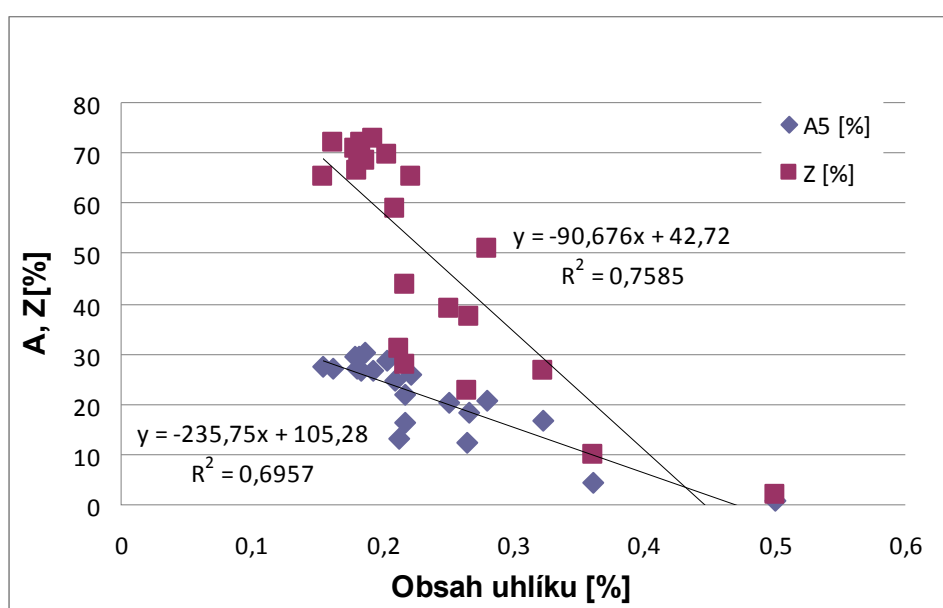
$$R_{p0,2} = 585,9 \cdot \%C + 209 \quad (7.4)$$

Na obr. 7.15 je uvedena závislost tažnosti a kontrakce na obsahu uhlíku. Na grafu jsou opět vyznačeny body ze všech provedených 24 měření. Z uvedených výsledků je zřejmé, že statisticky významnější byla zjištěna závislost mezi tažností a obsahem uhlíku. Je zřejmé, že stanovené závislosti tažnosti a kontrakce na obsahu uhlíku mají nižší koeficient korelace než závislosti meze pevnosti a meze kluzu na obsahu uhlíku. To souvisí s tím, že pevnostní charakteristiky jsou dány zejména strukturou materiálu a nejsou tak ovlivněny množstvím ředin jako plastické charakteristiky.



Obr. 7.15 Závislost mezi  $A$ ,  $Z$  a obsahem uhlíku

Na obr. 7.16 je uvedena závislost tažnosti a kontrakce na obsahu uhlíku u souboru 21 párových hodnot tažnosti, kontrakce a obsahu uhlíku. Ze souboru naměřených hodnot byly vyloučeny tři hodnoty od každé charakteristiky. Z hodnot korelačního koeficientu  $R^2$  je zřejmé, že došlo po vyloučení třech párových hodnot kontrakce a obsahu uhlíku k výraznému zvýšení statistické významnosti uvedené závislosti. Hodnota korelačního koeficientu se zvýšila na hodnotu 0,695, tj. hodnota koeficientu determinace činí cca 0,83. Současně došlo i ke zvýšení statistické významnosti závislosti tažnosti na obsahu uhlíku (hodnota koeficientu determinace  $R = 0,87$ ). Obě uvedené závislosti jsou tedy statisticky významné a uvedené lineární regrese tak mohou být při znalosti obsahu uhlíku použity k předpovědi tažnosti a kontrakce.

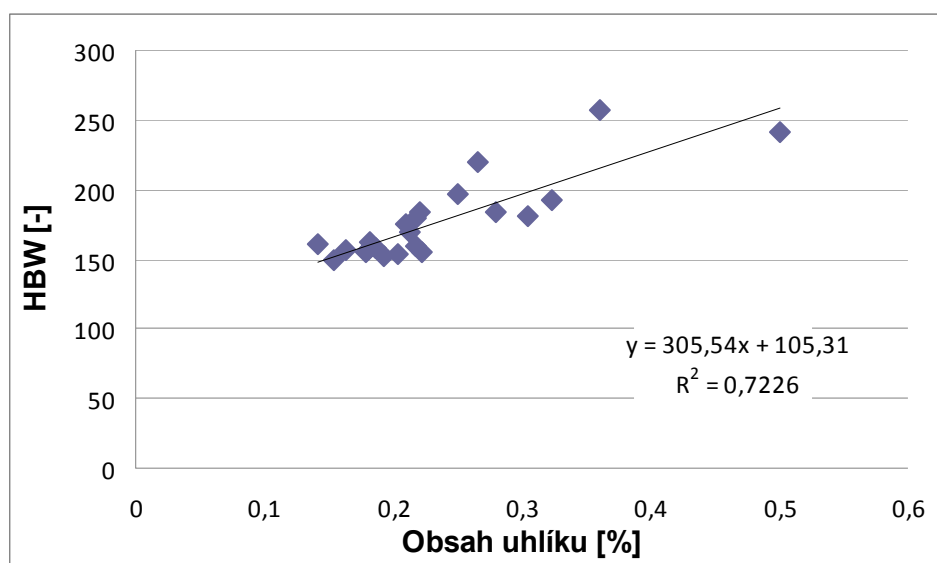


Obr. 7.16 Závislost mezi A, Z a obsahem uhlíku s vyloučením třech párových hodnot

$$Z = -235,7 \cdot \%C + 105,2 \quad (7.5)$$

$$A_5 = -90,67 \cdot \%C + 42,72 \quad (7.6)$$

Podobně jako u vlastností stanovených při tahové zkoušce byla provedena také vzájemná korelace mezi obsahem uhlíku a naměřenou tvrdostí obr. 7.17. Korelace mezi tvrdostí a obsahem uhlíku provedená u 23 párových hodnot (vyloučena jedna hodnota) vykazuje statisticky významnou závislost. Hodnota korelačního koeficientu má hodnotu 0,722, tj. hodnota koeficientu determinace činí cca 0,85.



Obr. 7.17 Závislost mezi tvrdostí a obsahem uhlíku

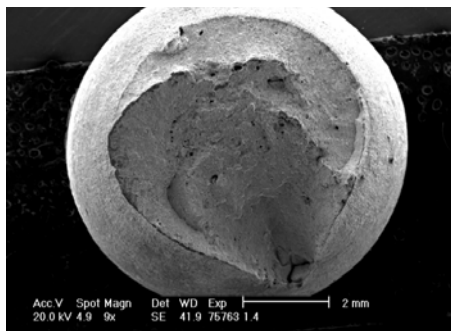
## 8 MIKROFRAKTOGRAFICKÉ HODNOCENÍ LOMOVÝCH PLOCH

Pro posouzení plastických vlastností materiálu a způsobu porušování v závislosti na chemickém složení nálitku bylo provedeno také mikrofraktografické hodnocení lomových ploch u vybraných vzorků pro tahovou zkoušku. Hodnoceny byly vzorky z tepelné osy nálitku v každé vrstvě (P1 až P5) a vzorek z povrchové vrstvy krčku nálitku (1.4). V první vrstvě P1 odebrané z krčku nálitku byly tedy analyzovány dva vzorky, které také pravděpodobně nejlépe odpovídají vlastnostem materiálu v podnálitkové oblasti odlitku. Další vzorky lomových ploch odebraných po výšce nálitku zachycují charakter porušení materiálu s rostoucí výškou v nálitku, tedy materiál s delší dobou tuhnutí a rostoucí chemickou heterogenitou.

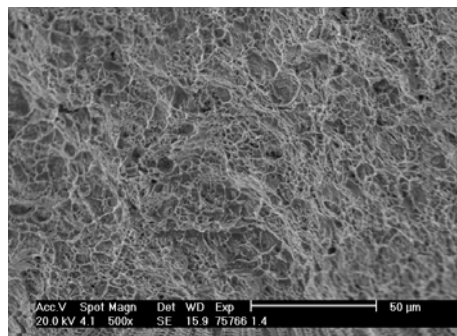
### 8.1 Hodnocení vybraných vzorků

- Vzorek 1.4

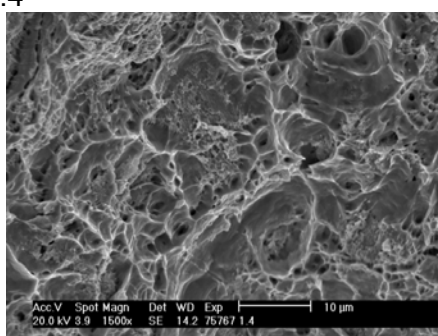
Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo cca 570 mm od osy nálitku cca 180 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliefu lomu vzorku 1.4 je uveden na *obr. 8.1* (75763). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.1*, je v lomové ploše obsažena řada dutin – ředin. I přes poměrně vysoký výskyt ředin byla dosažené plastické vlastnosti při tahové zkoušce vysoké (tažnost 29,6%). Vysoká plasticita materiálu je zřejmá i z významné tvorby krčku tahové tyčky. Lom vzorku 1.4 je tvořen tvárným jamkovým lomem. Charakteristické tvary jsou doloženy na *obr. 8.2* (75766). Detail jamkového lomu je uveden na stejném obrázku *obr. 8.3* (75767).



Obr. 8.1 Mikrorelief lomové plochy vzorku 1.4

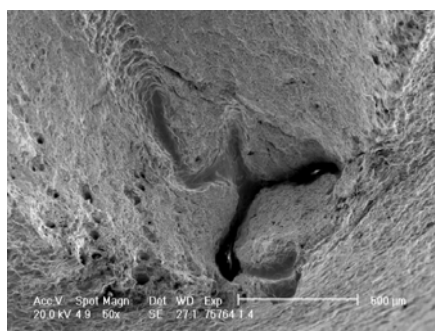


Obr. 8.2 Jamkový lom vzorku 1.4



Obr. 8.3 Detail jamkového lomu vz. 1.4

Na *obr. 8.4* (75764) je znázorněn slévárenský defekt – mikroředina, která je na *obr. 8.1* zachycena ve spodní části vzorku. Zobrazená mikroředina se vytvořila na styku tří zrn, kde došlo rovněž k oddělení zrn.

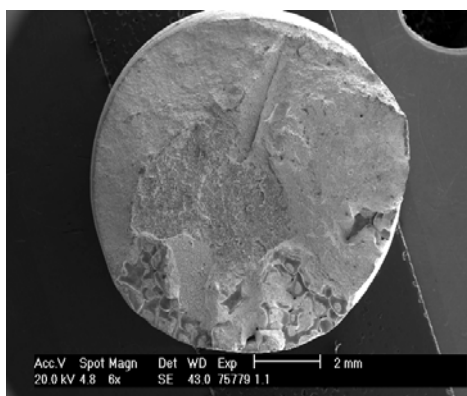


Obr. 8.4 Mikroředina na lomové ploše vzorku 1.4

Lom vzorku 1.4 má vysoké hodnoty tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem, které jsou charakteristické pro tvárné chování a to i přes přítomnost velkého podílu vnitřních slévárenských vad – mikroředin a mikrostaženin. Mikrorelief lomu je v podstatě tvořen pouze jamkovým tvárným lomem.

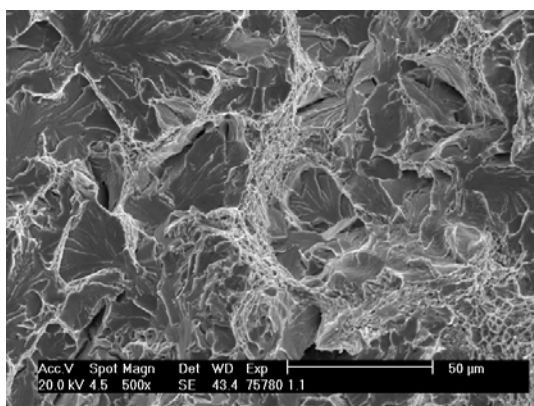
- Vzorek 1.1

Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo z osy nálitku cca 180 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliéfu lomu vzorku 1.1 je uveden na *obr. 8.5* (75779). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.5*, je v lomové ploše obsažena řada poměrně velkých dutin. I v důsledku výskytu těchto ředin byly dosaženy pouze nízké plastické vlastnosti při tahové zkoušce (tažnost 10,9%, kontrakce 19%). Nízká plasticita materiálu je zřejmá i z toho, že je na tyčce pouze náznak tvorby krčku. Lom vzorku 1.1 je tvořen kombinací tvárného a štěpného (křehkého) lomu. Střední osová část je porušena převážně štěpným lomem, povrchové části tyčky jsou porušeny převážně tvárným jamkovým lomem.

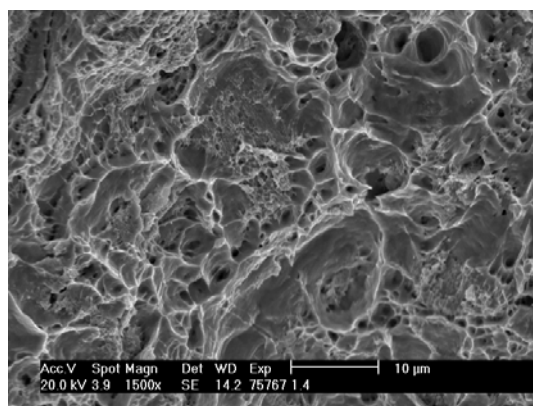


Obr. 8.5 Mikroreliéf lomové plochy vzorku 1.1

Charakteristické tvary minoritně se vyskytujícího štěpného lomu jsou doloženy na *obr. 8.6* (75780). Detail jamkového lomu je uveden na obrázku *obr. 8.7* (75767).



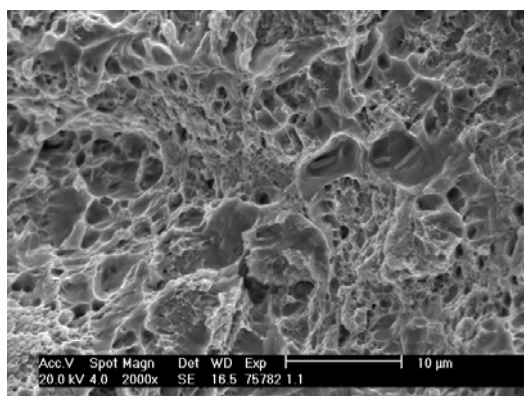
Obr. 8.6 Štěpný lom ve vzorku 1.1



Obr. 8.7 Jamkový lom ve vzorku 1.1

Jak vyplývá ze snímku na *obr. 8.6*, vyskytuje se ve vzorku hodně drobných příčných trhlin, které jsou charakteristické pro materiál v krčku nálitku, kde vzniká trojosý stav napjatosti. Tyto trhliny pak iniciují vlastní porušení souvislosti při tahové zkoušce, čímž snižují plastické vlastnosti materiálu. Na *obr. 8.8* (75782) jsou zachyceny také drobné vměstky, které naznačují, že šíření trhliny se usnadňuje právě v důsledku zeslabování materiálu vměstkami.



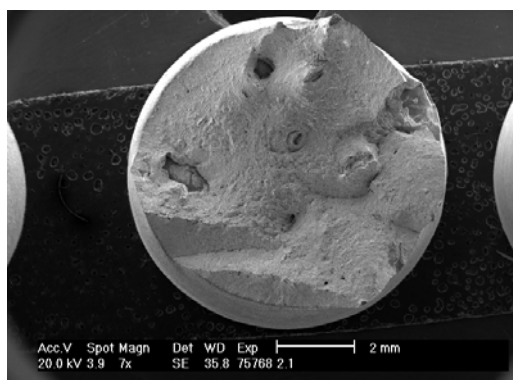


Obr. 8.8 Vměstky v dutinách jamkového lomu ve vzorku 1.1

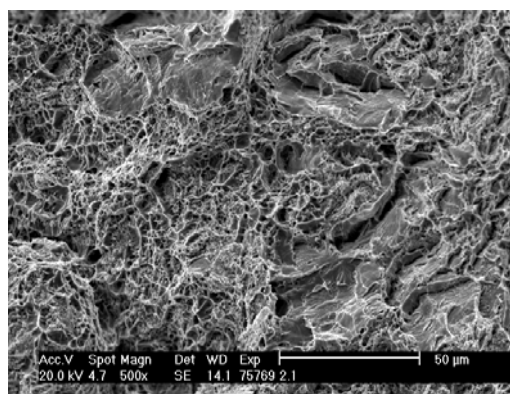
Lom vzorku 1.1 má nízké hodnoty tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem, které jsou již charakteristické pro křehké chování. Obsah uhlíku ve vzorku byl nízký (0,22%) a neměl tak vliv na pokles plastických vlastností. Mikrorelief lomu je tvořen převážně jamkovým lomem s minoritním výskytem štěpného lomu, za přítomnosti velkého podílu vnitřních slévárenských vad – mikroředin a mikrostaženin. Ve vzorku se nacházelo také velké množství příčných lineárních vad – trhlin, které vznikaly už v průběhu tuhnutí vlivem napjatosti v odlitku a nálitku, které patrně nejvíce ovlivnily pokles plastických vlastností. Základní průběh lomu je transkrystalický, zkušební tyč trhací zkoušky vykázala nižší kontrakci, pouhých 19 % a pouze náznaky tvorby krčku.

- Vzorek 2.1

Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo z osy nálitku cca 380 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliefu lomu vzorku 2.1 je uveden na *obr. 8.9* (75768). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.9*, je v lomové ploše obsažena řada poměrně velkých dutin. I v důsledku výskytu těchto ředin byly dosaženy nižší plastické vlastnosti při tahové zkoušce (tažnost 18,4%, kontrakce 37,6%). Nízká plasticita materiálu je zřejmá i z toho, že se na tyčce utvořil pouze menší krček. Lom vzorku 2.1 je tvořen převážně tvárným lomem s lokálním výskytem štěpného (křehkého) lomu. Charakteristické tvary štěpného i jamkového lomu jsou doloženy na *obr. 8.10* (75769).



Obr. 8.9 Mikrorelief lomové plochy ve vzorku 2.1

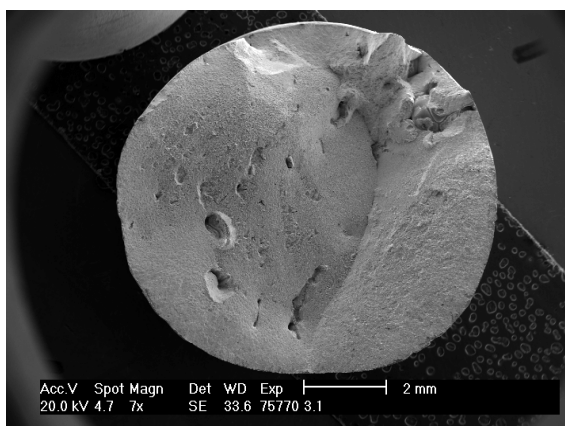


Obr. 8.10 Štěpný a jamkový lom ve vzorku 2.1

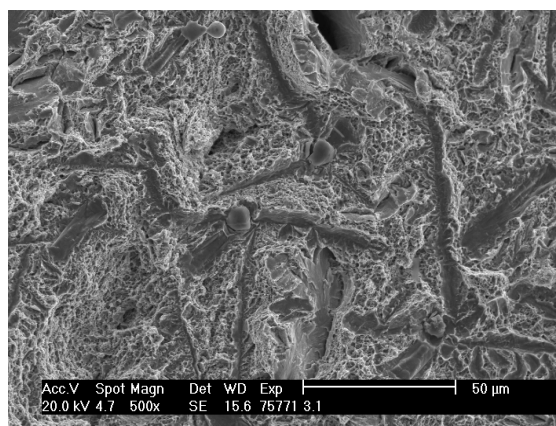
Lom ve vzorku 2.1 vykazuje nižší hodnoty tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem, které jsou již charakteristické pro křehké chování. Obsah uhlíku ve vzorku byl nízký (0,27%). Mikrorelief lomu je tvořen převážně jamkovým lomem (minoritně štěpný lom – fazety), za přítomnosti velkého podílu vnitřních slévárenských vad – mikroředin a mikrostaženin. Na lomové ploše cca 8 dutin makroskopických rozměrů. Lom má členitý charakter a je šířen po těchto vadách – důsledek nižších naměřených plastických vlastností při tahové zkoušce.

- Vzorek 3.1

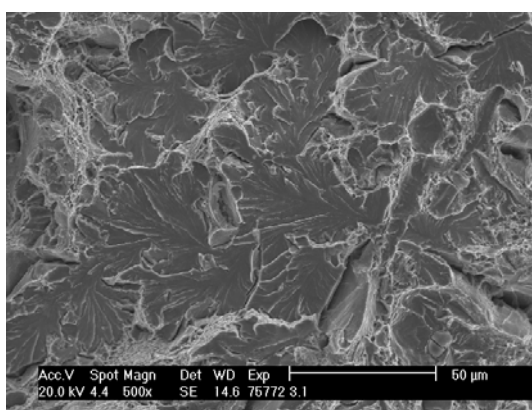
Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo z osy nálitku cca 580 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliefu lomu vzorku 3.1 je uveden na *obr. 8.11* (75770). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.11*, je opět v lomové ploše obsažena řada poměrně velkých dutin. I v důsledku výskytu těchto ředin byly dosaženy nízké plastické vlastnosti při tahové zkoušce (tažnost 12,2%, kontrakce 22,6%). Nízká plasticita materiálu je zřejmá i z toho, že je na tyčce na tyčce utvořil pouze náznak tvorby krčku. Lom vzorku 3.1 je tvořen kombinací tvárného a štěpného (křehkého) lomu, který se tvoří při existenci vysoké chemické i strukturní heterogenity oceli, z níž bylo zkušební těleso odebráno.



Obr. 8.11 Mikrorelief lomové plochy vzorku 3.1



Obr. 8.12 Jamkový lom, štěpný lom vzorku 3.1



Obr. 8.13 Štěpný lom ve vzorku 3.1

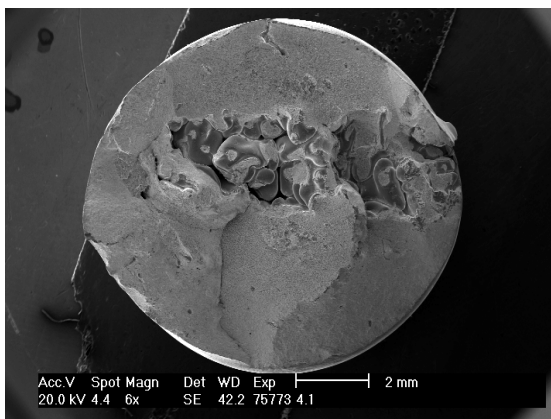
Charakteristické tvary jamkového lomu (*obr. 8.12* snímek 75771) a štěpného lomu jsou doloženy na *obr. 8.13* (75772).

Charakter lomu má na rozdíl od výše uvedených lomů jiný charakter. Vzorky z nižších vrstev nálitku vykazovaly tvárné porušení jamkovým lomem s žádným nebo minoritním výskytem štěpného porušení. Vzorek 3.1 měl lomovou plochu tvořenou již z cca 30% křehkým lomem, s lokálně iniciovaným lomem přes vměstky a přítomný velký podíl vnitřních slévárenských vad – samostatné a také shluky ředin a staženin.

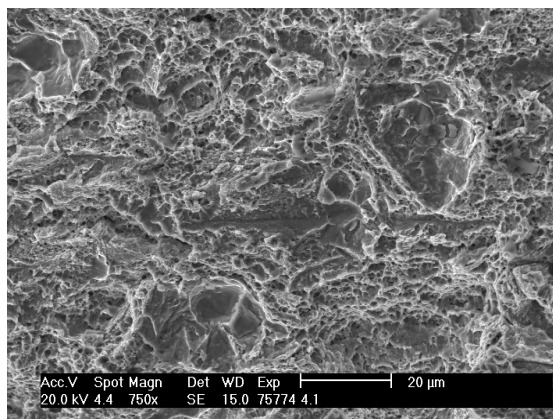
Lom vzorku 3.1 má nízké hodnoty tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem, které jsou již charakteristické pro křehké chování. Obsah uhlíku ve vzorku byl cca 0,27%. Mikrorelief lomu je tvořen jamkovým tvárným lomem a štěpným lomem (fazety), za přítomnosti velkého podílu vnitřních slévárenských vad – mikroředin a mikrostaženin. Od tohoto vzorku (580mm nad odlitkem) lze očekávat, že materiál se v tepelné ose nálitku bude porušovat křehce.

- Vzorek 4.1

Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo z osy nálitku cca 780 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliefu lomu vzorku 4.1 je uveden na *Obr. 8.14* (75773). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.14*, jsou opět v lomové ploše obsaženy makroskopické dutiny. I v důsledku výskytu těchto ředin byly dosaženy velice nízké plastické vlastnosti při tahové zkoušce (tažnost 4,2%, kontrakce 9,8%) a tyčka nevykazuje ani náznak tvorby krčku. Vzorek má již i významně vyšší obsah uhlíku cca 0,36 %. Lom vzorku 4.1 je tvořen kombinací tvárného a štěpného (křehkého) lomu, který se tvoří při existenci vysoké chemické i strukturní heterogenity oceli. Charakteristické tvary jamkového a štěpného lomu jsou uvedeny na *obr. 8.15* (snímek 75774).



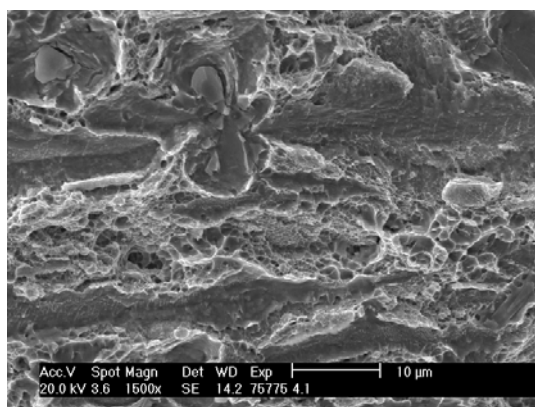
Obr. 8.14 Mikrorelief lomové plochy vzorku 4.1



Obr. 8.15 Jamkový lom a štěpný lom vzorku 4.1

Charakter lomu 4.1 má podobný charakter jako u vzorku 3.1. Podíl křehkého lomu je však vyšší, cca 40%. Vměstky na lomové ploše jsou vyobrazeny na *obr. 8.16*. Rozložení makrostaženin a shluků ředin ve vzorku zřejmě silně působí na stav prostorové napjatosti v poli napětí při zatěžování

zkušební tyče. V oblastech zkušební tělesa, kde budou dominantní tahová jednoosá napětí, bude tendence k tvorbě štěpného reliéfu, naproti tomu v oblastech s tendencí k dvojosému tlaku (k tvorbě krčku) bude sklon k tvorbě jamkového reliéfu. V místě uložení vměstků v matrici dochází k iniciaci křehkého porušení, které během šíření trhliny v konečné fázi porušování přechází v jamkový lom.



Obr. 8.16 Vměstky v lomové ploše vzorku 4.1

Lom vzorku 4.1 má velice nízké hodnoty tažnosti a kontrakce při zkoušce tahem, které potvrzují křehké chování materiálu. Je také nutné si uvědomit, že na křehkém porušení se významně podílí i vyšší obsah uhlíku (0,36%).

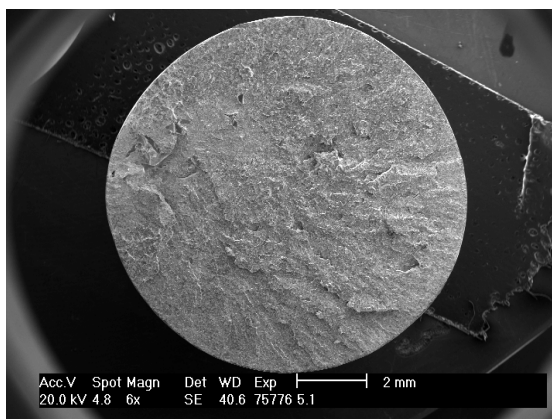
Mikroreliéf lomu je tvořen jamkovým tvárným lomem a štěpným lomem, za přítomnosti velkého podílu vnitřních slévárenských vad – ředin a staženin. Vady typu dutin obsahují často vnější, druhotné nečistoty (vměstky). O velké makroheterogenitě zkušební tělesa svědčí i výskyt štěpných lomů v okolí vměstků a ředin makroskopické velikosti, tak jamkové lomy v okolí jiných staženin rovněž makroskopického rozměru. Křehké porušení zkušební tyče je zřejmé i z toho, že zkušební tyč nevykazuje ani náznak tvorby krčku.

U lomu vzorku 4.1 se vyskytují v kombinaci se štěpným lomem ojedinělé i plošky jamkového lomu, které mají znaky lomu lasturového. Ten se tvoří také jamkovou mikromorfologií, avšak běží po hranicích primárních austenitických zrn. Nitridy hliníku v nalezených ploškách však nebyly nalezeny. Obsah hliníku (celkový) ve vzorku 4.1 činil 0,019%, obsah dusíku cca 134ppm. Přihlédneme-li k dlouhé době tuhnutí a dané koncentraci hliníku a dusíku je vznik lasturových lomů již pravděpodobný.

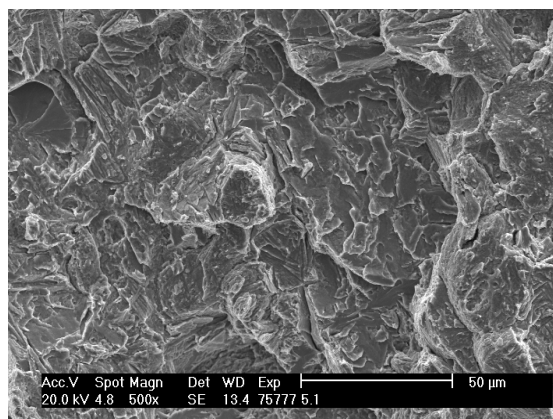
- Vzorek 5.1

Poloha vzorku je zřejmá z *obr. 4.1*. Jedná se o místo z osy nálitku cca 980 mm nad odlitkem (krček nálitku). Mikroreliéfu lomu vzorku 5.1 je uveden na *obr. 8.17* (75776). Jak je zřejmé ze snímku na *obr. 8.17*, nevykazuje tyčka ani náznak tvorby krčku s čímž souvisí i velice nízké plastické vlastnosti při tahové zkoušce (tažnost pouze 0,6%, kontrakce 2%). Vzorek má již i vysoký obsah uhlíku cca 0,50 %. Lom vzorku 5.1 je tvořen štěpným lomem. Charakteristické

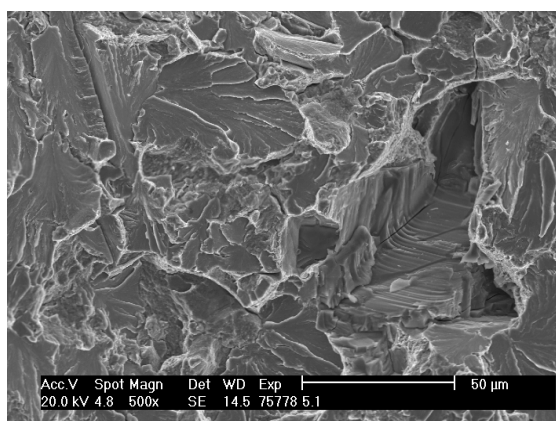
tvary štěpného lomu u vzorku 5.1 jsou uvedeny na *obr. 8.18 a obr. 8.19* (snímek 75777 a 75778). Vzorek neobsahuje velké množství ředin, proto lze příčiny velice nízkých hodnot tažnosti a kontrakce hledat v chemickém složení oceli vzorku (vysoký obsah C) mohou souviset i s chemickou heterogenitou. Výskyt tvárného lomu nebyl v lomové ploše pozorován.



Obr. 8.17 Mikrorelief lomové plochy vzorku 5.1



Obr. 8.18 Štěpný lom vzorku 5.1



Obr. 8.19 Detail štěpného lomu vzorku 5.1

## 8.2 Závěry z hodnocení lomových ploch

Při hodnocení lomových ploch byl zjištěn měnící se charakter porušení s přechodem od jamkového lomu po štěpný lom, tedy od tvárného porušení materiálu po křehké porušení materiálu v závislosti na výšce od odlitku. To vysvětluje sestupnou tendenci plastických vlastností materiálu. U prvních dvou vrstev P1 a P2 je převládající lom tvárného charakteru, který je i pro materiál odlitku požadován, což nám dává jistý předpoklad pro možné snížení výšky nálitku. Z detailů snímků u těchto vzorků je patrný větší obsah dutin způsobený ředinami a mikroředinami. Z tohoto důvodu jsou nižší hodnoty plastických vlastností.

U vrstvy P3 je podíl křehkého porušení cca 30%, který je výrazně vyšší než v předchozích vrstvách. Obsah uhlíku pro tuto vrstvu je cca 0,27 % tedy stejný jako v předchozí vrstvě, ale současně došlo i ke zvýšení obsahu dusíku

na 133ppm. Dusík, resp. jeho koncentrace v kombinaci s obsahem hliníku 0,018% již podle [11] nespĺňuje požadované kritérium součinu  $[\%N] \cdot [\%Al] \leq 2\text{ppm}$ . Při dlouhé době tuhnutí se již může iniciovat vznik lasturových lomů.

U vrstev P4 a P5 narůstá materiálová nehomogenita a podíl křehkého porušení vzrůstá až na hodnotu 100%. Z tohoto důvodu vzorky nevykazují téměř žádné plastické vlastnosti.

## 9 ZÁVĚR

Diplomová práce měla za cíl pomocí provedených zkoušek a měření porovnat a ověřit závislosti mezi podmínkami tuhnutí a výsledným rozložením chemického složení a mechanických vlastností v průřezu nálitku. Práce byla prováděna v rámci projektu MPO programu TIP č. FR-TI2/091 „Vývoj technologie těžkých odlitků pro energetiku a všeobecné strojírenství,“ který probíhá ve spolupráci FSI, VUT v Brně a VHM a.s.

Diplomová práce v sobě zahrnuje kompletní výsledky získané z hodnocení vlastností materiálu nálitku spodního beranu, tzn., jsou zde uvedeny práce i výsledky celého týmu. Některé práce jako dělení nálitku, tepelné zpracování, výroba a přetržení tahových zkoušek nebo analýzy chemického složení byly prováděny pracovníky VHM a.s. Specializované analýzy, např. v oblasti mikrofraktografie, byly prováděny ve spolupráci s vedoucím diplomové práce. Ostatní práce související s odběrem vzorků ve vybraných místech, měřením tvrdosti a interpretací naměřených výsledků jsou již výsledkem mé vlastní samostatné práce.

Teoretický rozbor předložené práce je zaměřen do oblastí, ve kterých byly prováděny i vlastní měření a hodnocení, tj. do problematiky tuhnutí odlitku a segregáčních pochodů. Pro vyhodnocení tuhnutí nálitku byl zvolen celkový teplotní gradient zjištěný při kritériu dosažení 90 % podílu tuhé fáze v daném místě nálitku. Jeho hodnoty (v místech odběru vzorků) byly porovnávány s obsahem uhlíku v naměřených vzorcích. Pomocí lineární regrese byly stanoveny rovnice pro předpověď změny obsahu uhlíku v závislosti na výšce kovu od podnálitkové plochy odlitku. Z důvodu nedostatečné korelace mezi obsahem uhlíku a teplotním gradientem byla stanovena rovnice s vyloučením hodnot naměřených ve vrstvě P2. Koeficient korelace pro takto stanovenou závislost byl pouze 0,277. Na základě tohoto koeficientu nemůžeme stanovit obsah uhlíku s dostatečnou přesností. Závislost stanovená pouze pro tři vrstvy byla již statisticky významnější a koeficient korelace byl 0,530. V této práci docházíme k závěru, že při porovnání teplotního gradientu s naměřeným obsahem uhlíku v celé zkoumané oblasti nálitku nelze předpovídat s dostatečnou přesností výsledný obsah uhlíku. Pro možné určení obsahu uhlíku bude muset být vzato v úvahu více parametrů, které ovlivňují segregaci prvků.

Mechanické vlastnosti oceli jsou nejvíce závislé na obsahu uhlíku. Jeho obsah byl pomocí lineární regrese porovnáván s naměřenými mechanickými hodnotami. Po vyloučení odlehlých pozorování vykazovaly největší závislost

pevnostní charakteristiky, a to mez kluzu s koeficientem korelace 0,832, mez pevnosti s koeficientem korelace 0,781. Tvrdost materiálu v závislosti na obsahu uhlíku byla statisticky významná a koeficient korelace činil 0,723. Plastické vlastnosti vykazovaly podstatně menší závislost na obsahu uhlíku, u tažnosti byl koeficient korelace 0,509, u kontrakce byl koeficient korelace 0,399. Menší závislost souvisí především s výskytem slévárenských vad typu ředin, mikroředin a vměstků.

Z vyhodnocení lomových ploch byl zjištěn měnící se charakter porušení materiálu v závislosti se změnou vzdálenosti od odlitku a to od tvárného porušení po křehké porušení v celém průřezu lomu. Z tohoto pohledu by mělo být zajištěno, aby se v materiálu odlitku neobjevilo nežádoucí křehké porušení. Materiál v prvních dvou vrstvách představuje případnou „rezervu“ pro možné snížení výšky nálitku. Při hodnocení lomových ploch nebyl zjištěn lasturový lom, ale byla nalezena místa s jeho charakterem, ale bez výskytu nitridu hliníku.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZÁDĚRA, A.; ŠENBERGER, J.; KUZMA, Z.; PLUHÁČEK, J.; CARBOL, Z. *Analýza tuhnutí odlitku spodního beranu ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery a.s.* Zpráva 5/11VHM, 2011, S. 11.
- [2] ŠENBERGER, J., aj. *Metalurgie oceli na odlitky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, 2008. 311 s. ISBN 978-80-214-3632-9.
- [3] ŠENBERGER, J.; ZÁDĚRA, A.; KRUTIŠ, V.; KOVÁČ, M.; CARBOL, Z.; PLUHÁČEK, J. Podmínky tuhnutí těžkých odlitků a jejich vliv na vlastnosti odlitků. *Slévárství*, 2010, roč. 58, č. 5- 6, s. 136-140. ISSN: 0037- 6825.
- [4] CARBOL, Z.; BREYER, J.; PLUHÁČEK, J.; ŠENBERGER, J.; ZÁDĚRA, A.; KRUTIŠ, V.; KOVÁČ, M. Zvyšování jakosti těžkých ocelových odlitků ve slévárně Vítkovice Heavy Machinery, a.s. *Slévárství*, 2009, roč. 57, č. 9-10, s. 332-336. ISSN 0037-6825.
- [5] KRUTIŠ, V., KUZMA, Z. Numerická simulace ve slévárenské technologii: [on line]. Vydáno: 2009 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologie>
- [6] ŠENBERGER, J.; ZÁDĚRA, A.; KRUTIŠ, V.; RYBIČKA, P.; CARBOL, Z. Využití simulačních programů při řešení problematiky tuhnutí ocelových odlitků. *In Sborník. Česká slévárenská společnost. Žďár nad Sázavou, 2010, s. 72 – 77. ISBN 978-80-02-02264-0*
- [7] TOMEK, L.; ZÁDĚRA, A.; ŠENBERGER, J.; CARBOL, Z.; VESELÝ, P. Izolace nálitků masivních ocelových odlitků. *In Sborník. Česká slévárenská společnost. Žďár nad Sázavou, 2010, s. 72 – 77. ISBN 978-80-02-02264-0*
- [8] KUCHAR, L., DRÁPALA, J. Příspěvek k teorii segregačních jevů při krystalizaci kovů a slitin. *METAL 2002. Hradec nad Moravicí, 2002, s.12.*
- [9] ELBEL, T., aj. *Vady odlitků ze slitin železa*. 1. vyd. Brno: MATECS. 1992. 339 s.
- [10] ZEMČÍK, L. Fyzikální modely používané při popisu krystalizace kovů a jejich slitin. VUT FSI Katedra slévárství. Brno, 1990, s. 48.
- [11] KÜPFER, R.: Metallurgische a Gießereitechnische Einflussfaktoren bei Rissbildung in Stahlguss Stücken. In.“Mezinárodní slévárenský kongres, září 1964 Amsterdam“. 1964.



**11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

Zkratka/Symbol	Popis	Jednotka
A <sub>5</sub>	Tažnost	%
Bf	Tepelná akumulace formy	W.s. <sup>1/2</sup> .k <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup>
gradT	Teplotní gradient	°C.m <sup>-1</sup>
HB	Tvrdomost podle Brinella	
KV	Nárazová práce	J
MEF	Modulus extension factor (faktor zvýšení modulu)	
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	Mpa
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	Mpa
VD	Vacuum Degassing (vakuové odplynění)	
Z	Kontrakce	%