

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 670*

*ISSN 1213-4198*

*thesis*  
**?**  
**IS**

*Ing. Tomáš Mauder*

**Optimalizace bramového  
plynulého odlévání oceli  
za pomoci numerického modelu  
teplotního pole**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

**Ing. Tomáš Mauder**

**OPTIMALIZACE BRAMOVÉHO PLYNULÉHO  
ODLÉVÁNÍ OCELI ZA POMOCI NUMERICKÉHO  
MODELU TEPLITNÍHO POLE**

OPTIMIZATION OF SLAB CONCASTING VIA NUMERICAL  
MODEL OF TEMPERATURE FIELD

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

|          |  |
|----------|--|
| OBOR     | Odbor termomechaniky a techniky prostředí  |
| ŠKOLITEL | prof. Ing. František Kavička, CSc.   |
| OPONENTI | prof. Ing. Mária Čarnogurská<br>doc. Dr. Ing. René Pyszko<br>prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc. |

DATUM OBHAJOBY 25. 09. 2012

**Klíčová slova**

Plynulé odlévání, heuristická optimalizace, fuzzy logika, proces tuhnutí, teplotní pole

**Keywords**

Continuous casting, heuristic optimization, fuzzy logic, solidification, temperature field

Disertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69

© Tomáš Mauder, 2012

ISBN 978-80-214-4592-5

ISSN 1213-4198

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Úvod</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1 Plynulé odlévání oceli</b>                              | <b>6</b>  |
| 1.1 Historické aspekty a trendy plynulého odlévání . . . . . | 7         |
| 1.2 Hlavní parametry plynulého lití . . . . .                | 8         |
| 1.3 Kvalita a vady plynule odlévaných bram . . . . .         | 9         |
| 1.4 Pevnost, tvárnost a tažnost oceli . . . . .              | 10        |
| 1.5 Řízení kvality předlitku . . . . .                       | 11        |
| <b>2 Matematický model teplotního pole</b>                   | <b>12</b> |
| 2.1 Počáteční podmínka a podmínky okrajové . . . . .         | 13        |
| 2.2 Termo-fyzikální vlastnosti oceli . . . . .               | 14        |
| 2.3 Program IDS . . . . .                                    | 14        |
| 2.4 Modelování fázové přeměny . . . . .                      | 14        |
| 2.5 Softwarová implementace numerického modelu . . . . .     | 16        |
| 2.6 Verifikace numerického modelu teplotního pole . . . . .  | 17        |
| <b>3 Algoritmy optimálního řízení ZPO</b>                    | <b>20</b> |
| 3.1 Fuzzy regulátor pro optimální řízení ZPO . . . . .       | 21        |
| <b>4 Výmena trysky pro EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s.</b>       | <b>24</b> |
| <b>Závěr</b>   | <b>26</b> |
| <b>Literatura</b>  | <b>27</b> |



# Úvod

Teze disertační práce Optimalizace bramového plynulého odlévání oceli za pomoci numerického modelu teplotního pole se zabývá optimálním řízením procesu plynulého lití oceli. Smyslem optimálního řízení je hledání takových licích parametrů, které zajistí vysokou kvalitu finálního výrobku při vysoké výrobní produktivitě.

Plynulé odlévání oceli je průmyslový proces výroby oceli, při kterém dochází k tuhnutí tekuté oceli do polotovarů připravených k dalšímu zpracování. Z hlediska historie jde o technologii, jejíž provozní nasazení má pouze zhruba 50-ti letou tradici. Přesto je v dnešní době její podíl na světovém trhu dominantní (cca přes 97%).

Základním kamenem matematického popisu procesu plynulého lití je numerický model přenosu tepla a hmoty. Tento model řeší vývin a rozložení teplot se zahrnutím fázových a strukturálních přeměn. Jeho geometrie a parametry odpovídají reálnému zařízení na plynulé odlévání (ZPO) provozovaného ve firmě EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. Díky provozním měřením a historickým výrobním datům je možno představený numerický model verifikovat a tím pokračovat v dalších analýzách.

Obdržení optimálních licích parametrů je zprostředkováno optimalizačním algoritmem, který pracuje s výsledky numerického modelu teplotního pole, při různých vstupních podmínkách. Především jde pak o různé heuristické přístupy, které jsou v práci rozebrány a porovnány. Numerický model teplotního pole je velice flexibilní, např. umožňuje provádět výpočty pro různé značky a třídy ocelí, změnit geometrii ZPO, nebo změnit rozložení okrajových podmínek. Rovněž je flexibilní nastavení parametrů pro optimalizační model, kde může uživatel nastavit různé teplotní intervaly v různých místech ZPO a tím se přiblížit k požadované kvalitě oceli.

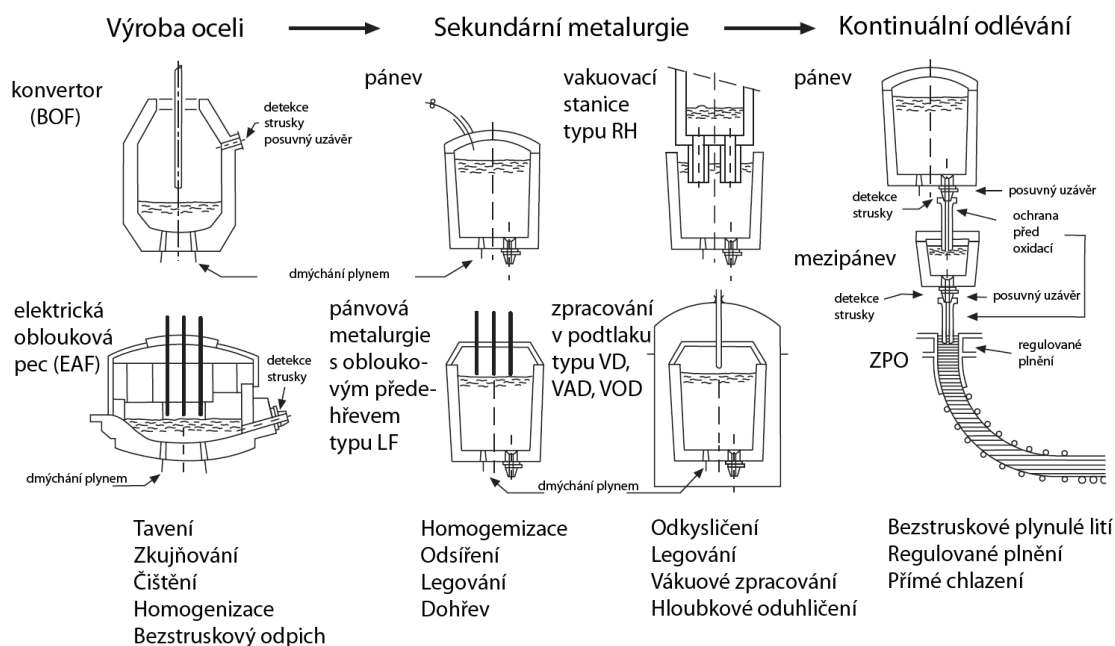
Výsledkem práce je rovněž rozbor věnující se doporučení modifikace licí tratě firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. podle dosažených optimalizačních výsledků.

Závěrem práce je vymezeno zobrazení a přenositelnost výsledků a metod na jakékoli ZPO, zhodnocení dosažených výsledků a další možné směry pokračování práce.

# Kapitola 1

## Plynulé odlévání oceli

Ocel je slitina železa, uhlíku a dalších prvků, které pocházejí ze vsázky, případně se do oceli dostávají záměrně nebo neúmyslně během výroby. Chemickým složením, tepelným zpracováním a způsobem tváření je možné měnit mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti oceli v širokých mezích pro konkrétní technické použití. Výroba oceli dnes nepředstavuje pouze proces zkuňování, tj. snížení obsahu uhlíku v surovém železe, ale složitý pochod výroby železných slitin o předepsaném chemickém složení, případně předepsaných vlastností, kterých se dosahuje řízeným procesem tuhnutí a dalšího metalurgického zpracování. Výrobní linka v podobě dopravy tekuté oceli je znázorněna na obr.1.1.

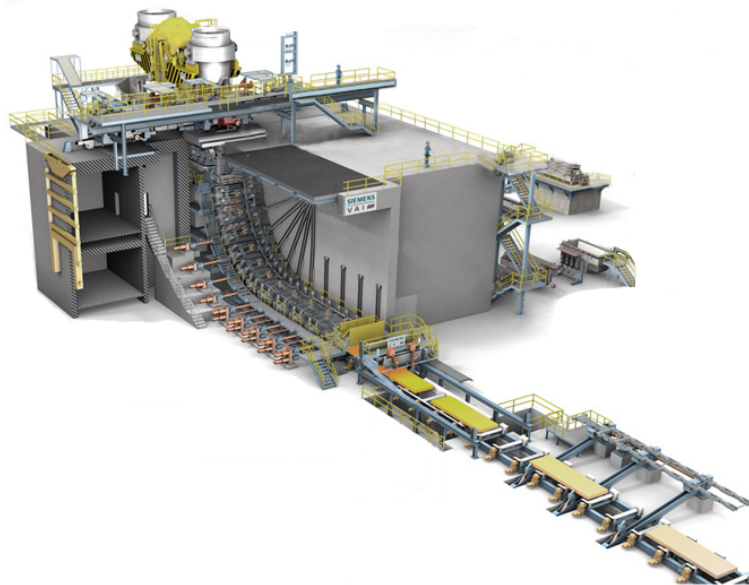


Obrázek 1.1: Výroba a doprava tekuté oceli do ZPO [1]

Plynulé odlévání oceli je moderní progresivní technologie výroby oceli, jejímž produktem je předlitek (angl. strand) jako polotovár k dalšímu zpracování. Jejím předchůdcem je neekonomické lití ingotů do tzv. kokil. Protože plynulé odlévání přineslo zvýšení kvality, produktivity a celkové efektivity oproti předešlým způsobům výroby oceli, stalo se hlavní technologií výroby oceli [1]. Zařízení pro plynulé odlévání (ZPO) je provedeno v několika geometrických variantách [1], [18]. Historicky nejstarším přirozeným tvarem je vertikální ZPO, které odlévalo gravitačně a zaručovalo symetrickou strukturu materiálu. Produktivita těchto zařízení však byla

limitována svou výškou. Další vývoj vedl na radiální ZPO, kde se část předlitku ohýbá a následně rovná. Tento standartní typ ZPO operuje dodnes ve většině provozů. Pro některé speciální kovy a slitiny se používá rovněž horizontální ZPO.

Plynulé odlévání dělíme rovněž podle tvaru finálního výrobku a to na ploché (plechy), které jsou válcovány z bram (angl. slab) a na dlouhé (trubky, kolejnice, dráty, aj.), které jsou zpracovány ze sochorového profilu, válcového profilu (angl. billet), bloku (angl. bloom), nosníkového profilu aj. Bramová ZPO jsou charakteristická tím, že je šířka obvykle několikanásobně větší než tloušťka předlitku. Na obr.1.2 je znázorněn schématický náčrt pro bramové radiální ZPO.



Obrázek 1.2: Schéma radiálního bramového ZPO [3]

Hlavní části zařízení na plynulé lití jsou: pánev (zajišťující dodávku tekuté oceli), mezipánve (sloužící především k rovnoměrnému toku oceli do krystalizátoru i při výměně pánve), krystalizátor (což jsou vodou chlazené měděné desky nebo trubka určující tvar litého předlitku sloužící na tvorbu pevné skořepiny), soustava chladičích trysek (zapojených do jednotlivých okruhů sloužící na rovnoměrný odvod tepla v průběhu lití), soustava vodících válců (udržující ferrostatický tlak tekutého jádra působícího na již ztuhlé stěny předlitku a umožňující u radiálního ZPO změnu směru lití z vertikálního na horizontální), pálící zařízení (které odděluje předlitek na jednotlivé bramy).

Popis procesu plynulého lití můžeme shrnout do následujících vět. Tekutá ocel je z pecí nebo konvektorů přelita do pánve (angl. ladle) (sekundární metalurgie) a dále do stroje na plynulé odlévání oceli, které je složeno ze tří chladičích zón. Ocel nejprve proudí z pánve do mezipánve (angl. tundish) a do vodou chlazené měděné formy nazvané krystalizátor (angl. mould) (primární zóna). Tuhnutí začíná ve formě a kontinuálně pokračuje v sekundární chladičích zóně a prochází tažnými válci. Chlazení je v sekundární zóně tvořeno nejčastěji kombinací vodních a vodovzdušných chladičích tryskových okruhů. Dále následuje terciární chlazení, kde odvod tepla probíhá formou přirozené konvekce a radiace v okolním prostředí, a pálící stroj na řezání bram potřebné délky.

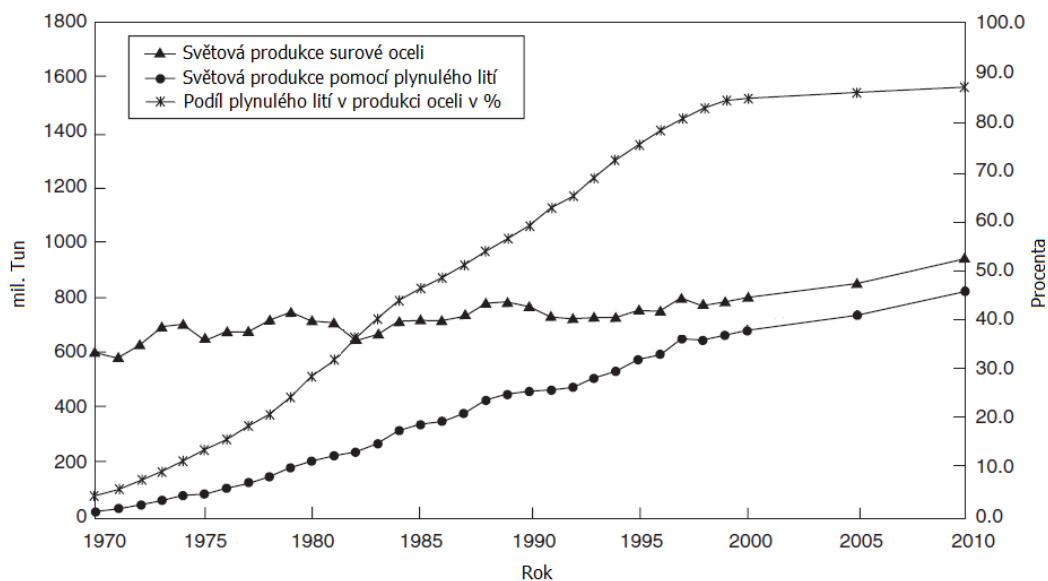
## 1.1. Historické aspekty a trendy plynulého odlévání

Mezi první pokusy o plynulé lití můžeme přiřadit experiment Sira Henryho Bessemera (1813 - 1898) v roce 1856. Šlo o jednoduché zařízení se dvěma válci, které sloužilo na odlévání tenkých



plechů. Na jeho vývoji však dále nepokračoval a podle všeho se spíše zaměřoval na vývoj ocelářství. Jako další implementoval mezipánev a krystalizátor o rozměrech 10×10 palců [1], [3]. V roce 1858 představil švédský podnikatel Goeran Fredrik Goeransson ukázkovou pánev na přepravu tekuté oceli. V dalším roce 1859 Henry Bessemer představil první věž na podávání pánev. Vůbec první konvenční zařízení podobné dnešnímu vertikálnímu ZPO představil v roce 1886 Benjamin Atha (1844 - 1925) v USA. Zařízení obsahovalo vodou chlazený krystalizátor připojený pevně k mezipánvi a jeho uzavření dvěma válci. První ZPO radiálního typu bylo vytvořeno v roce 1920 strojním inženýrem Arthurem McKee a navrženo Johnem T. Rowleym v USA. Toto zařízení odlévalo sochory o rozměrech 45×45 a 75×75 mm [1]. Výroba však trpěla častým přilepováním předlitku na stěny krystalizátoru. V tomto směru přinesl v roce 1933 velký pokrok Siegfried Junghans, německý vynálezce a obchodní manažer, v podobě oscilujícího krystalizátoru. V roce 1951 již operovalo 12 ZPO tohoto typu, po 5-ti v Německu a USA a dva ve Velké Británii.

Mezi lety 1970 – 1983 přišly další vylepšení zvyšující produktivitu a kvalitu lití, jako jsou např. rychlá výměna pánve a mezipánve, nastavitelná šířka krystalizátoru, vodo-vzdušné chlazení, celkové zakrytí tekuté oceli mezi pánev-mezipánev a mezipánev-krystalizátor z důvodu zamezení kontaktu s okolním vzduchem, zapojení elektro-magnetických míchačů, monitorování teplot pomocí termočlánků a pyrometrů a zapojení počítačové techniky do celého provozu ZPO. Zvyšující se podíl výroby oceli na trhu pomocí plynulého lití přinesl rostoucí zájem o vývoj a inovace ZPO. Celkovou světovou situaci potom znázorňuje graf na obr.1.3 od roku 1970 do roku 2010.



Obrázek 1.3: Světový vývoj produkce oceli [1]

## 1.2. Hlavní parametry plynulého lití

*Licí rychlost* je obecně chápána jako rychlost, kterou opouští předlitek krystalizátor. Její velikost je limitována velikostí ZPO a tedy průřezem předlitku, chemickým složením oceli, intenzitou odvodu tepla v krystalizátoru a tedy šířkou utuhlé kůry za krystalizátorem, teplotou přehřátí oceli apod. Licí rychlost přímo ovlivňuje délku tekutého jádra a tedy dobu tuhnutí a kvalitu litého materiálu.

*Doba lití* představuje dobu lití oceli z jedné pánve. Tento údaj potom slouží k synchronizaci

zásobovacího cyklu. Větší pánev znamená větší licí čas.

*Metalurgická délka* je délka počítaná od hladiny oceli v krystalizátoru po místo, kde je již celý předlitek ztuhnut. K přesnému určení metalurgické délky je potřeba použít numerický model teplotního pole. Velikost metalurgické délky nesmí překročit vzdálenost mezi hladinou oceli a polohou dělicího zařízení. Zde se volí rezerva 4 metry, aby byla zajištěna provozní jistota dělení předlitku s plně ztuhlým průřezem.

*Produktivita procesu* plynulého lití se odvíjí od licí rychlosti. Určuje se podle množství odlitých bram či sochorů za jednotku času. Maximalizovat čas provozu je potom optimalizační úlohou plánování a rozvrhování výroby, která např. řeší posloupnosti taveb.

*Licí teplota* je teplota tekuté oceli, která je dodávána do krystalizátoru. Licí teplota má vliv na strukturu odlitého materiálu, protože ovlivňuje tvorbu krystalů v krystalizátoru. Vyžaduje se, aby teplota přehřátí nad teplotou likvidu byla co nejmenší. Z technického hlediska je však prakticky nemožné měřit teplotu přímo v krystalizátoru. Využívá se proto hodnot teplot měřených v mezipánvi, z jejíž hodnoty se přepočítává licí teplota.

*Tavba* je část sekvence lití, která je odlita z jedné pánve. Jedna sekvence je potom souhrn taveb, které jsou lity od začátku spuštění stroje, po jeho poslední odlitý předlitek.

### 1.3. Kvalita a vady plynule odlévaných bram

Kvalita litých bram a sochorů je jedním z nejdůležitějších požadavků finálních spotřebitelů. Ta je zákazníky posuzována dle vlastností v pevném stavu, a to vlastností mechanických (pevnost, tažnost, mez kluzu, atd.), fyzikálních (hustota, pružnost, součinitel tepelné vodivosti, atd.), chemických (korozivzdornost, odolnost v sirovodíkovém prostředí, atd.) či technologických (svařitelnost, prokalitelnost, atd.) [4]. Dosažení požadované kvality je však pro výrobce složité, protože musí tyto vlastnosti predikovat na základě měřených technologických veličin a materiálu v litém stavu. Kvalitu bramy nebo sochoru určuje především charakter její makrostruktury a výskyt jejích vad. Při lití oceli na ZPO vystupuje celá řada technologií, které finální kvalitu ovlivňují, např. elektromagnetické míchání oceli, protiprůvalové systémy, technologie vibrací krystalizátoru, aplikace teplotních modelů, aj.

Vady plynule litých bram se dělí nejčastěji do třech skupin:

- vnitřní vady (mezilehlé trhliny, chyby středové oblasti, aj.),
- povrchové vady (necelistvosti typu trhlín a bublin, porušení spojitosti licí kůry, aj.),
- rozměrové vady (vyborcení, vborcení, kosoúhlost, prohnutí, aj.).

Povrchové vady předlitku jsou na ZPO největším problémem jeho kvality, které způsobují obvykle podstatně větší potíže při jeho dalším zpracování, než vady vnitřní nebo tvarové. Rovněž četnost výskytu povrchových vad je při odlévání předlitku většinou podstatně vyšší, než vad jiného charakteru. Za povrchové vady jsou považovány všechny vady, jež bezprostředně souvisí s povrchem bramy nebo sochoru. Někdy se mezi povrchové vady počítají vady uložené těsně pod povrchem v hloubce 1 až 2 mm. Pod pojmem vnitřní vady všeobecně rozumíme takové defekty struktury, které ve většině případů nepronikají na povrch předlitku. Z tohoto pohledu jsou tedy obtížněji zjištělné. Mezi rozměrové vady řadíme nedodržení technických požadavků na délku, šířku a tloušťku bramy. Rovněž sem řadíme úchyly tvaru a polohy příčného řezu.

## 1.4. Pevnost, tvárnost a tažnost oceli

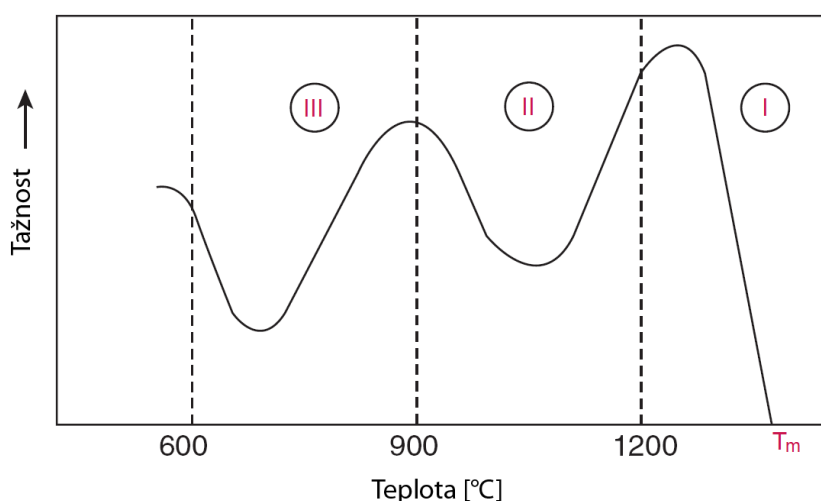
Když je tekutá ocel lita do krystalizátoru, začne vznikat první utuhlá vrstva tzv. skořepina. Teplota, pod kterou začne ocel vykazovat pevnostní a tvárné vlastnosti, se nazývá teplota nulové pevnosti (angl. zero strength temperature (ZST)) a teplota nulové tvárnosti (angl. zero ductility temperature (ZDT)). Tvárnost oceli je závislá na její teplotě a existují teplotní intervaly, pro které je její hodnota malá, např. mikroslitinové oceli mají nejhorší tvárnost přibližně v teplotním pásmu 750 – 925 °C. Tření, dynamika taveniny, vznik napětí v tahu a oscilace krystalizátoru působí negativně na poměrně křehkou skořepinu. Když souhrn těchto napětí a namáhání překročí mez pevnosti v tahu nebo tvárnost skořepiny, začínají se vyskytovat trhliny.

Poté co skořepina opustí krystalizátor a pohybuje se mezi válci v zóně sekundárního a terciárního chlazení, je vystavena velkému kolísání teplot, které způsobují změnu fáze a další mikrostrukturální změny ovlivňující její pevnost a tažnost. Je stále vystavena teplotním deformacím a mechanickému působení v důsledku ferrostatického tlaku, tažení, tření ve válcích, ohybu a rovnání. Všechny tyto účinky vedou ke složitým napěťovým poměrům, které způsobují další deformaci skořepiny. To může vést k zeslabení povrchových vrstev, tvorbě trhlin a k jejich šíření. V nižších částech ZPO je proud taveniny ovládán teplotními a vztakovými efekty roztoku, vyvolanými rozdíly v hustotě tekutého kovu, ke kterým došlo v důsledku mikrosegregací. Toto proudění vede k makrosegregacím a s nimi spřaženým vadám jako jsou porezita podél střednice, trhliny a nežádoucí změny vlastností [6].

Tažnost charakterizuje plastické vlastnosti materiálu a představuje trvalou relativní deformaci (v procentech). Lze jí definovat jako schopnost oceli po překročení meze kluzu se prodlužovat, aniž by docházelo k výraznému nárůstu napětí. Tažnost oceli za vyšších teplot je obvykle měřena tahovou zkouškou provedenou na ohřivaném vzorku, mnohdy vyrobeném přímo z plynule odlité bramy, která se provádí v inertní atmosféře až do lomu. Tažnost  $\psi$  [%] je pak určena porovnáním plochy průřezu lomu  $A_f$  s původní plochou průřezu  $A_o$  vztahem

$$\psi = \left(1 - \frac{A_f}{A_o}\right) \cdot 100. \quad (1.1)$$

Provedené tahové zkoušky odhalily, že existují tři identifikovatelné oblasti teplot, ve kterých má ocel sníženou tažnost a je proto náchylná k tvorbě trhlin (obr. 1.5).



Obrázek 1.4: *Oblasti snížené tažnosti* [1]

Z uvedeného textu vyplývá, že ocel, u níž by bylo možno očekávat, že bude za vysokých

teplot tažná, je ve skutečnosti značně náchylná k tvorbě trhlin. Má-li být zabráněno tvorbě trhlin, je potřeba zacházet s právě tuhnoucí skořepinou s náležitou péčí [6].

## 1.5. Řízení kvality předlitku

Jak plyne z přehledu a rozboru vzniku různých vad, nejvýznamnější parametry odlévání na ZPO jsou ty, které souvisí s odvodem tepla z předlitku. Vznik trhlin a bublin různých typů je způsoben teplotními a napjatostními pochody. Můžeme tedy říct, že správným řízením procesu plynulého lití jsme schopni některé vady minimalizovat a některé dokonce eliminovat. Například udržení vyšší teploty předlitku do místa rovnání nám pomůže zmenšit hodnotu napětí. Rovněž pokles teplot ve směru lití by měl být nerostoucí, tedy např. bez výraznějšího zpětného ohřevu povrchu. Obecně lze konstatovat, že náhlé ochlazení povrchu vede k tahovým přetvořením na povrchu a tlakovým přetvořením v blízkosti fronty tuhnutí. Naopak znovuohřátí povrchu (např. v důsledku snížení odvodu tepla) způsobuje tlaková přetvoření na povrchu a tahová přetvoření v blízkosti fronty tuhnutí. Vzniklá skořepina by měla být tenká a homogenní. Ustálenost procesu plynulého lití bude mít na kvalitu kladný efekt. Stejně tak rovnoměrné chlazení tryskami na povrch předlitku. Předcházet však např. rohovým trhlinám je velice obtížné, protože odvod tepla v rozích předlitku probíhá rychleji.

Požadavky na vysokou kvalitu výroby jdou však proti požadavkům výrobců na zvyšování produktivity. Zvyšování lící rychlosti má totiž negativní vliv na kvalitu oceli, např. zvýšená turbulence taveniny v krystalizátoru, intenzivnější chlazení potom zvyšuje teplotní gradienty v předlitku a teplotní napětí, aj. Zde je tedy nutno učinit takový kompromis, aby se dosáhlo maximální možné produktivity při zachování kvality v dohodnuté toleranci.

Plynulé odlévání oceli je z fyzikálního hlediska sdružený teplotně-mechanický nestacionární problém (angl. coupled thermo-structural problem). Tento problém je popsán parciálními diferenciálními rovnicemi, které obsahují teplotní i mechanické stupně volnosti. Teoreticky se tyto dvě skupiny stupňů volnosti oboustranně vzájemně ovlivňují. Znamená to tedy, že rozložení teplot ovlivňuje mechanickou odezvu kontinua a naopak mechanické charakteristiky kontinua ovlivňují rozložení teplot. Avšak vzhledem k poměrně malým rychlostem deformace, ke kterým v průběhu procesu plynulého odlévání oceli dochází, lze na technické úrovni rozlišitelnosti zavést předpoklad, že v průběhu procesu plynulého odlévání oceli nebudou mechanické děje podstatně ovlivňovat rozložení teplot. Za tohoto předpokladu lze teplotní a mechanické děje od sebe oddělit s tím, že teplotní děje jsou považovány za primární a svým působením sekundárně ovlivňují mechanické děje ve vznikajícím polotovaru [6].

Základním článkem systému na sledování a řízení kvality sochorů a bram je výpočetní model tepelných pochodů po celé délce předlitku, viz kapitola 2. Mezi další často užívané modely můžeme zařadit algoritmy počítající fázový diagram, algoritmy na výpočty termo-fyzikálních vlastností (tepelná vodivost, hustota, entalpie, atd.) závislé na teplotě, model teplotního napětí, optimalizační modely k řízení ZPO, viz kapitola 3, modely na predikci kvality [4] a další.

## Kapitola 2

# Matematický model teplotního pole

Vysoká cena experimentálních zkoušek a obtížnost jejich provedení za provozu ZPO vede výrobce k používání všech dostupných modelovacích nástrojů pro projektování ZPO, odstraňování poruch, řešení nestandardních situací a pro optimalizaci procesu. Jednou možností je využití fyzikálního modelování jako je například použití vodních modelů simulujících tekutou ocel, což umožňuje pochopení procesu proudění taveniny [1]. Komplexnost procesu plynulého lití, které obsahuje mechanické, materiálové a termo-fyzikální problémy, však modelování velice stěžuje. Výrazným nástrojem je, díky rozvoji výpočetní techniky (software a hardware) a numerických metod [12], matematické modelování [19]. Tyto modely potom umožňují navrhnout konstrukci ZPO, optimalizovat řízení procesu, predikovat a minimalizovat počet vad a další [5], [18]. Nicméně, vzhledem ke všem parametrům ovlivňujícím proces je nereálné navrhnout výpočetní model, který by všechny zahrnoval. Je tedy nezbytné učinit rozumný předpoklad a záměrně zanedbat ty parametry, které mají na proces plynulého lití menší vliv. Protože od utváření teplotního pole se odvíjí jak mechanické tak strukturální vlastnosti, můžeme vlivy přenosu tepla a hmoty pokládat za rozhodující [18]. V textu se tedy budeme výhradně zabývat modelem teplotního pole, což je s hlediska termokinetiky nestacionární třírozměrný přenos tepla a hmoty s fázovými a strukturálními přeměnami.

Modely pro predikci rozložení teplot, růstu utuhlé kůry a výpočtu metalurgické délky jsou založeny na řešení Fourierovy-Kirghoffovy rovnice [1], [18]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \nabla [\lambda(T)\nabla T] + \mathbf{v}\nabla [\rho(T)c(T) T] + \dot{Q}, \quad (2.1)$$

kde  $\nabla \equiv \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  je nabla operátor,  $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]$  [m/s] je vektor rychlostí a  $\dot{Q}$  [W/m<sup>3</sup>] je člen zahrnující zdroj skupenských tepel fázové přeměny nebo strukturálních přeměn. Výsledkem řešení rovnice je potom teplota jako funkce času a polohy, tedy  $T(x, y, z, \tau)$ . Předpokladem, že ze všech druhů přenosu tepla je rozhodující vedení, můžeme v rovnici (2.1) uvažovat konstantní složku rychlosti pouze ve směru pohybu předlitku strojem  $v_z$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \nabla [\lambda(T)\nabla T] + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}. \quad (2.2)$$

Tepelná vodivost  $\lambda(T)$  [W/mK] je u heterogenních materiálů rozdílná podle směru. V praxi se však většinou uvažuje kvůli zjednodušení výpočtu materiál homogenní a rovnici (2.2) můžeme přepsat na tvar

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T)\Delta(T) + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}, \quad (2.3)$$

kde  $\Delta \equiv \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$  je Laplaceův operátor. Rovnice (2.2) je napsána v kartézském

souřadném systému. Pro radiální ZPO je vhodné tuto rovnici pro zakřivenou část ZPO transformovat do cylindrických souřadnic

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T)\Delta(T) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \frac{1}{r} v_z \rho(T)c(T) T \right] + \dot{Q}, \quad (2.4)$$

kde  $\Delta(T) \equiv \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ . Poslední člen rovnic (2.1) - (2.4) můžeme vyjádřit pomocí podílu pevné fáze a latentního tepla

$$\dot{Q} = \rho(T)L \frac{\partial f_s}{\partial \tau}. \quad (2.5)$$

Lze však předpokládat, že  $f_s$  je proměnná pouze s teplotou v mushy zóně, tedy rovnici přepíšeme na tvar

$$\dot{Q} = \rho(T)L \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (2.6)$$

## 2.1. Počáteční podmínka a podmínky okrajové

Řešení rovnic (2.1) - (2.4) je silně závislé na fyzikálních podmínkách na okrajích média a na podmínkách při kterých se médium nachází v počátečním čase výpočtu [2], [14]. Počáteční podmínka se dá charakterizovat vztahem

$$T(x, y, z, \tau = 0) = T_p(x, y, z), \quad (2.7)$$

což popisuje rozložení teploty napříč výpočetní doménou. Často se zadává konstantní v celé doméně, např. v případě plynulého lití se uvažuje její hodnota rovna lici teplotě  $T_p(x, y, z) = T_{casting}$ .

V modelu jsou použity tři základní druhy okrajových podmínek přenosu tepla. První podmínka popisuje situaci, kdy je na povrchu předepsána teplota, která může být udržována na konstantní hodnotě  $T_{surf}$  nebo se může v čase její hodnota měnit  $T_{surf}(\tau)$ . Většinou je tato podmínka nazývána podmínkou Dirichletovou nebo podmínkou prvního druhu [2]. Druhá podmínka odpovídá případu známého teplotního toku na povrchu. Stejně jako v prvním případě může být jeho hodnota v čase konstantní  $\dot{q}_{surf}$  nebo proměnná  $\dot{q}_{surf}(\tau)$ . Podmínka je označována jako podmínka Neumannova nebo podmínka druhého druhu [2]. Speciálním případem je tzv. adiabatická stěna kdy je tepelný tok na povrchu roven nule  $\dot{q}_{surf} = 0$ . Tato podmínka je použita v případě izolace povrchu speciálním tepelně izolačním materiálem, nebo pro případ symetrické domény kdy je v ose symetrie nulový teplotní gradient. Třetí okrajová podmínka souvisí s případem, kdy je povrch obtékán jiným médiem s rozdílnou teplotou  $T_\infty$  resp.  $T_\infty(\tau)$  a dochází k ochlazování resp. ohřevu povrchu. Nejčastěji je označována jako okrajová podmínka třetího druhu nebo podmínka Newtonova (Robinova). Do podmínky třetího druhu můžeme rovněž zahrnout složku radiace. Pro zjednodušené výpočty se uvažuje jeho hodnota konstantní, ale ve skutečnosti je jeho hodnota silně ovlivněna povrchovou teplotou  $hTC(T_{surf})$ . Na experimentální měření součinitele přestupu tepla je používá např. tzv. inverzní metoda [14], kdy je co nejbližší k chlazenému povrchu přichyceno několik termočlánků. Inverzně se potom hledá hodnota a rozložení součinitele přestupu tepla pro změřené teploty.

Okrajové podmínky pro výpočet teplotního pole předlitku jsou popsány rovnicemi [18], [10]

$$\begin{aligned}
 T &= T_{casting} && \text{hladina oceli (na začátku ZPO)} \\
 -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 && \text{rovina symetrie a v místě konce ZPO} \\
 -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= \dot{q} && \text{v krystalizátoru a místě styku předlitku s válci} \\
 -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= htc(T_{\infty} - T_{surf}) + \sigma\varepsilon(T_{\infty}^4 - T_{surf}^4) && \text{v sekundární a terciární zóně}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

## 2.2. Termo-fyzikální vlastnosti oceli

Z rovnic (2.1) - (2.4) je zřejmé, že jejich výsledek je přímo ovlivněn termofyzikálními vlastnostmi daného materiálu. Tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě, proto výpočet komplikují [1].

*Tepelná vodivost*  $\lambda$  [W/mK] charakterizuje schopnost látky vést teplo, ať je ve stavu pevném kapalném nebo plyném. V kapalinách nebo plynech uvažujeme o vedení jen v případě, že médium je v absolutním klidu. Tepelná kapacita u kovů je ve srovnání s jinými látkami velká.

*Hustota*  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je podíl hmotnosti daného objemu a jeho velikosti. Hustota homogenních materiálů se dá určit podle vztahu  $\rho = \frac{m}{V}$ . Při procesu lití dochází ke smršťování materiálu a hustota se mění s teplotou.

*Měrná tepelná kapacita*  $c$  [J/kgK] vyjadřuje množství tepla potřebného k ohřátí 1 kilogramu látky o 1 kelvin. Dá se vyjádřit pomocí vztahu  $c = \frac{Q}{m\Delta T}$ . U všech látek se s klesající teplotou měrná tepelná kapacita zmenšuje, tedy ve výpočtu je nutné zahrnout její závislost na teplotě.

## 2.3. Program IDS

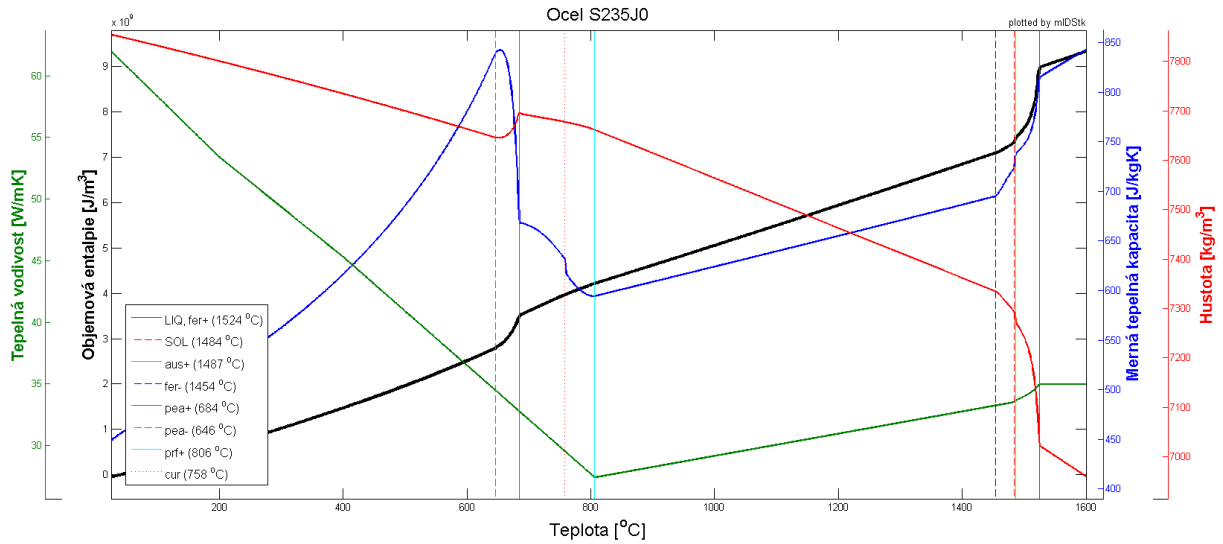
Na výpočet termo-fyzikálních vlastností v dnešní době existují výpočetní software, které numericky počítají segregáční a strukturální pochody. V této práci byl na výpočet termofyzikálních vlastností pro dané chemické složení použit finský software IDS. Ten vznikl již v roce 1984 na finské laboratoři metalurgie technické univerzity v Helsinkách. IDS je založen na kombinaci empirického přístupu a fyzikálních modelů. Model počítá parametry jako je hustota, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, viskozita, entalpie, teplotu likvidu a solidu, aj. Jeho výsledky byly experimentálně ověřovány na mnoha druzích ocelí s různým chemickým složením a byla dosažena dobrá shoda. Více o programu IDS je například dostupné [11].

Na ověření numerického modelu teplotního pole bylo vybráno jedenáct značek ocelí s různým chemickým složením. Jde o vybrané značky odlévané firmou EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. za rok 2011. Klíčem k výběru značek byla především frekvence lití (množství dat) a obsah uhlíku v oceli (nízko (< 0,25 wt%), středně (0,3 - 0,6,t%) a vysoce uhlíkové (> 0,7 wt%)).

Průběhy tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity, hustoty a objemové entalpie je pro vybranou ocel, s chemickým složením podle tabulky 2.1, zachycena na obrázku 2.1 a souhrnně pak v příloze A disertační práce. Z průběhů je vidět nelineární závislost termofyzikálních vlastností na teplotě, především pak v místech, kde dochází ke změně struktury oceli.

## 2.4. Modelování fázové přeměny

V numerickém modelování plynulého lití oceli je nezbytné zahrnutí fázové přeměny ve výpočetním modelu. V průběhu let bylo vyvinuto několik rozdílných technik pro problémy s fázovou



Obrázek 2.1: Průběhy termo-fyzikálních vlastností oceli S235J0

Tabulka 2.1: Chemické složení pro vybrané oceli

| Třída oceli | C wt%  | Si wt% | Mn wt% | Cr wt% | Ni wt% | Mo wt% | Cu wt% | Al wt% |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| S235J0      | 0,1102 | 0,2391 | 0,3854 | 0,0533 | 0,0229 | 0,0323 | 0,0403 | 0,0047 |
| Třída oceli | Nb wt% | Ti wt% | V wt%  | B wt%  |        |        |        |        |
| S235J0      | 0,0009 | 0,0022 | 0,0033 | 0,0000 |        |        |        |        |

přeměnou. Většinou jsou ale tyto metody použité na 1D geometrii a omezené na konkrétní okrajové podmínky. V tomto textu je představena metoda založená na konceptu aproximace řešení bez rozdělení problému na jednotlivé podoblasti. Počítá se tak jedna rovnice pro celou prostorovou doménu problému (pevná fáze, tekutá fáze i mushy zóna).

*Akumulace latentního tepla* (angl. latent heat accumulation) nebo také metoda entalpie (angl. enthalpy method) je postup, kde je do rovnic (2.1) - (2.4) dosazena funkce objemové entalpie  $H(T)$  [J/m<sup>3</sup>] [14], podle vztahu

$$H(T) = \int_0^T \left( \rho(\xi)c(\xi) - \rho(\xi)L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right) d\xi, \quad (2.9)$$

kde úpravou dostaneme výraz

$$H(T) = \int_0^T \rho(\xi)c(\xi) d\xi + \rho(T)(1 - f_s)L. \quad (2.10)$$

Pro jednotlivé fáze má objemová entalpie tvar

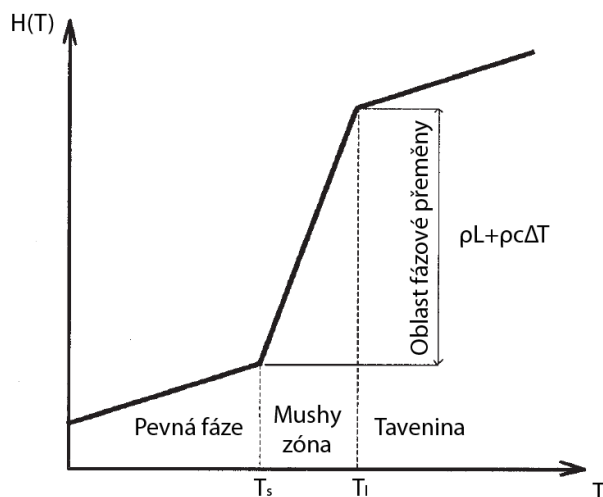
$$H = \begin{cases} \rho(T)c(T)T, & T \leq T_S \\ \rho(T)(c(T)T + (1 - f_s)L), & T_S < T < T_L \\ \rho(T)(c(T)T + L). & T \geq T_L \end{cases} \quad (2.11)$$

Dosazením do rovnic (2.3) - (2.4) dostaneme

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda(T)\Delta(T) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda(T)\Delta(T) + v_z \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \varphi}. \quad (2.13)$$





Obrázek 2.2: *Metoda entalpie* [5]

Při této metodě je entalpie primární proměnná, zatímco teplota je dopočítávána podle vztahů (2.11). Díky tomu je tato metoda použitelná v případě explicitní Eulerovy formule, kdy se dopočítává teplota z entalpie obdržené v minulém časovém kroku. Jsme tedy limitováni délkou časového kroku závislou na jemnosti sítě vycházející ze stability explicitní metody. V případě implicitní Eulerovy formule je přístup entalpie těžko aplikovatelný a její použití by vzhledem k náročnosti řešení implicitně zadané soustavy rovnic nepřineslo žádné větší výhody.

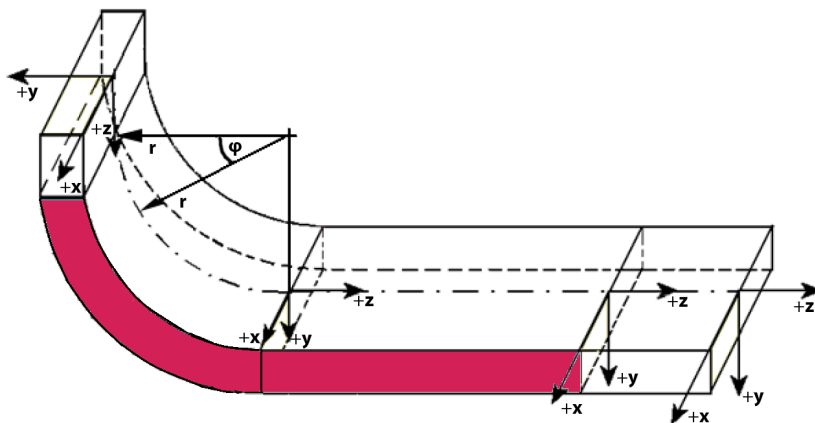
## 2.5. Softwarová implementace numerického modelu

Součástí práce bylo vytvoření původního numerického modelu teplotního pole v matematickém programu MATLAB<sup>®</sup>, který je vhodným numerickým nástrojem a umožňuje výpočet systému rozsáhlých algebraických rovnic. Výhodou programu MATLAB<sup>®</sup> je uživatelsky příjemné prostředí, velký počet doplňkových balíčků (statistický toolbox, optimalizační toolbox, paralelizační toolbox aj.) a rozšířená uživatelská základna. MATLAB<sup>®</sup> je tedy vhodný jako prototypový nástroj na nejrůznější třídy problémů. Další z předností je grafický toolbox, který dokáže vykreslovat několikarozměrné grafy.

Původní model vychází z rovnic (2.3) a (2.4). K modelování fázové přeměny je použita metoda entalpie podle rovnic (2.12) - (2.13). Z hlediska relativně jednoduché geometrie ZPO byla jako diskretizační metoda zvolena metoda konečných diferencí na neekvidistantní výpočetní síti. Souřadný systém je pro tyto rovnice na obrázku 2.3.

Hustota a rozložení sítě má zásadní vliv na výsledné teplotní pole. V ose  $x$  a  $y$  jsou největší teplotní gradienty v blízkosti krajních buněk způsobené intenzivním odvodem tepla z předlitku chladícími tryskami a vodícími válci, proto je zde výpočetní síť hustá. V ose  $z$  je pak rozložení sítě zvoleno podle polohy modelovaného předlitku v ZPO. Konkrétně je síť hustější v oblasti krystalizátoru. V sekundární chladící zóně je uzel přiřazen ke konkrétnímu válci a hustotu sítě ve směru osy  $z$  uživatel volí počtem uzlů mezi válci. Celkový počet uzlů je omezen pouze pamětí počítače a může dosahovat až několika milionů uzlů. Při velmi jemné síti je však časový krok podle kritéria stability velice malý a doba výpočtu se výrazně prodlužuje. Zvláště z hlediska optimalizace modelu, kdy je nutné provést několik vyhodnocení teplotního modelu pro různé parametry lití, je důležité mezi výpočtovým časem a hustotou sítě volit rozumný kompromis.

Aby byla možná verifikace numerického modelu s měřením reálných dat, je tato práce zaměřena právě na Bramové ZPO firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s., od kterého jsou



Obrázek 2.3: Souřadný systém

výsledky měření k dispozici. Tím je dána reálná geometrie pro numerický model podle tabulky 2.2. Protože nejčastěji litý rozměr bramy je 1530x250 mm a je pro tento rozměr nejvíce

Tabulka 2.2: Základní parametry ZPO firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s.

|  |                        |
|--|------------------------|
| Délka krystalizátoru                                       | 900 mm                 |
| Rovná část krystalizátoru                                  | 460 mm                 |
| Hladina oceli od horní hrany krystalizátoru                | 0 - 200 mm             |
| Tloušťka produkované bramy                                 | 145 mm, 180 mm, 250 mm |
| Šířka produkované bramy                                    | 800 - 1600 mm          |
| Velký rádius   | 8 000 mm               |
| Část rovné klece   | 8 500 mm               |
| Vzdálenost od konce klec po pálicí stroj                   | 2 000 mm               |
| Počet stavitelných segmentů                                | 12                     |
| Počet nezávislých regulačních okruhů sekundárního chlazení | 13                     |
| Pyrometr 1   | 7 segment (12677 mm)   |
| Pyrometr 2   | 11 segment (20909 mm)  |

experimentálních výsledků, bude vyhodnocení a verifikace numerického modelu provedena pro tento konkrétní rozměr. Výsledky pro tři vybrané oceli jsou součástí disertační práce a přílohy B disertační práce.

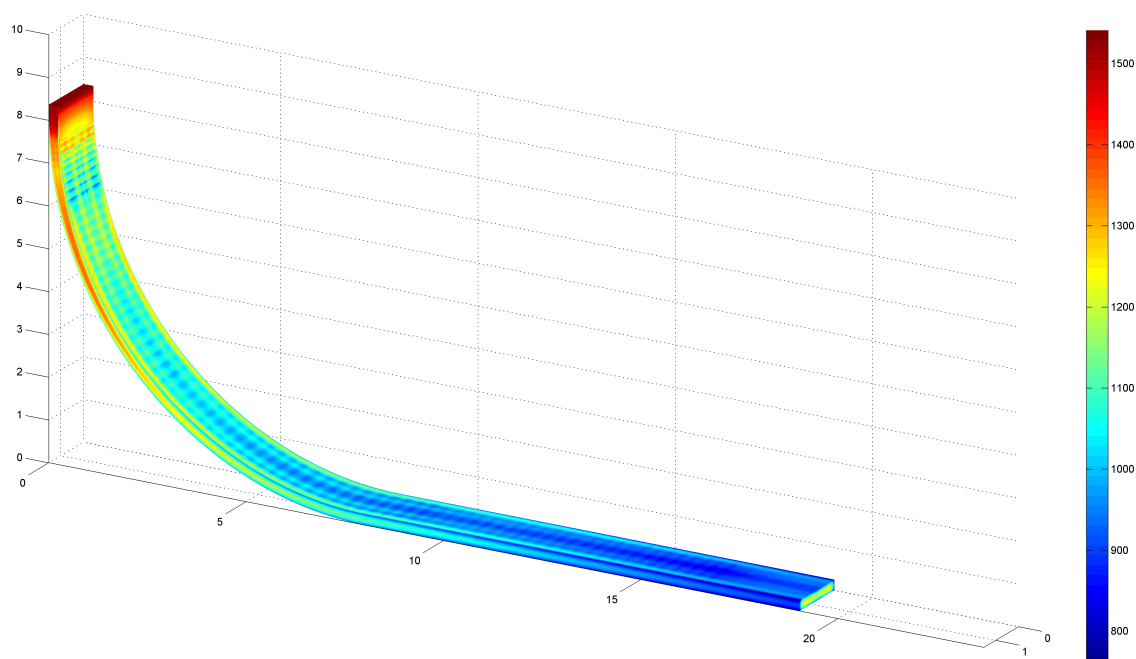
## 2.6. Verifikace numerického modelu teplotního pole

Výsledné grafy numerického modelu, včetně měření pyrometry 1 a 2 umístěných na malém rádiu (tabulka 2.2) jsou na obrázcích 2.4 - 2.7 a v příloze B disertační práce. Pro zobrazení teplotního pole je v práci použito třech typů grafů. Na obrázku 2.4 je znázorněno teplotní pole na povrchu předlitku pro celou 3D geometrii ZPO. Pro lepší názornost je však použit obrázek 2.5, kde je tento graf rozvinutý. Zde můžeme lépe vidět teplotní gradienty a nerovnoměrné rozložení chlazení na povrchu předlitku. Další typ grafu je na obrázku 2.6, kde jsou znázorněny průběhy izolikvidy a izosolidy v podélném osovém řezu předlitku. Z tohoto grafu pak lze snadno odečíst metalurgickou délku. Třetí typ grafu je zobrazen na obrázku 2.7. V tomto grafu jsou znázorněny průběhy teplot v šesti bodech příčného průřezu bramy. Je zde znázorněna teplota likvidu a teplota solidu, oblast krystalizátoru a krabicový diagram pro pyrometr 1 a 2. Rovněž je zde znázorněn růst tloušťky licí kůry jak ze strany malého, tak ze strany velkého rádiu (černá, resp.

modrozelená křivka). V tabulce 2.3 je uvedena třída oceli pro kterou byla provedena simulace (chemické složení podle tabulky 2.1) spolu s průměrnými licími parametry vyhodnocenými statistickým zpracováním více než 1000 uskutečněných taveb, které slouží jako vstupní parametry numerického modelu. Výpočetní síť numerického modelu byla zvolena pro všechny zpracované výsledky  $41 \times 31 \times 1208$ .

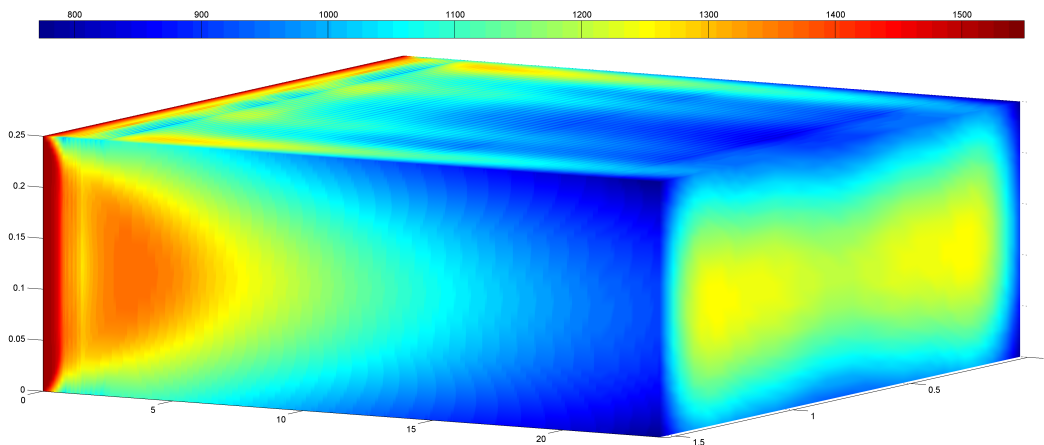
Tabulka 2.3: *Vstupní parametry pro model teplotního pole*

| Třída oceli                        | Licí rychlost<br>m/min | Licí teplota<br>°C | Měrný tepelný tok<br>krystalizátorem - široká strana             |                    |                    |                    |                    | Měrný tepelný tok<br>krystalizátorem - úzká strana             |                    |                     |                     |                     |                     |
|------------------------------------|------------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                    |                        |                    | 3  | 4                  | 5                  | 6                  | 7                  | 8  | 9                  | 10                  | 11                  | 12                  |                     |
| S235J0                             | 0,794                  | 1549               | MR - 659044,4 W/m <sup>2</sup><br>VR - 756810,8 W/m <sup>2</sup> |                    |                    |                    |                    | P - 622590,6 W/m <sup>2</sup><br>L - 715486,4 W/m <sup>2</sup> |                    |                     |                     |                     |                     |
| Průtok vody<br>sekundární<br>zónou | 1<br>70,7<br>l/min     | 2<br>48,1<br>l/min | 3<br>93,7<br>l/min   | 4<br>72,4<br>l/min | 5<br>78,3<br>l/min | 6<br>38,9<br>l/min | 7<br>78,4<br>l/min | 8<br>40,3<br>l/min   | 9<br>51,2<br>l/min | 10<br>29,4<br>l/min | 11<br>38,8<br>l/min | 12<br>49,0<br>l/min | 13<br>78,5<br>l/min |

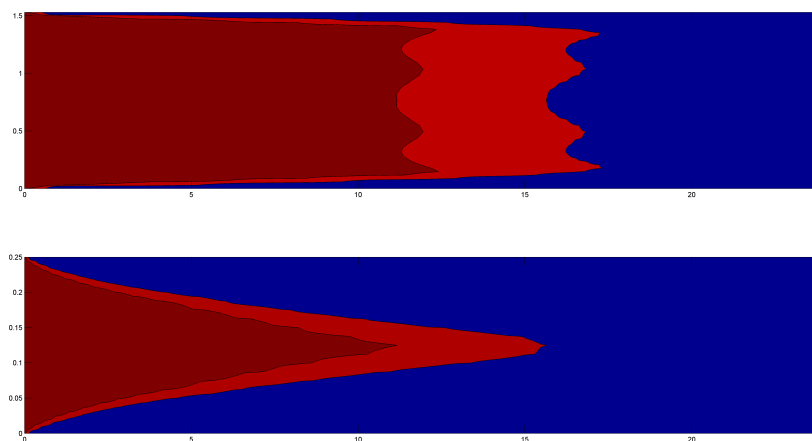


Obrázek 2.4: *Teplotní pole na povrchu předlítka (S235J0)*

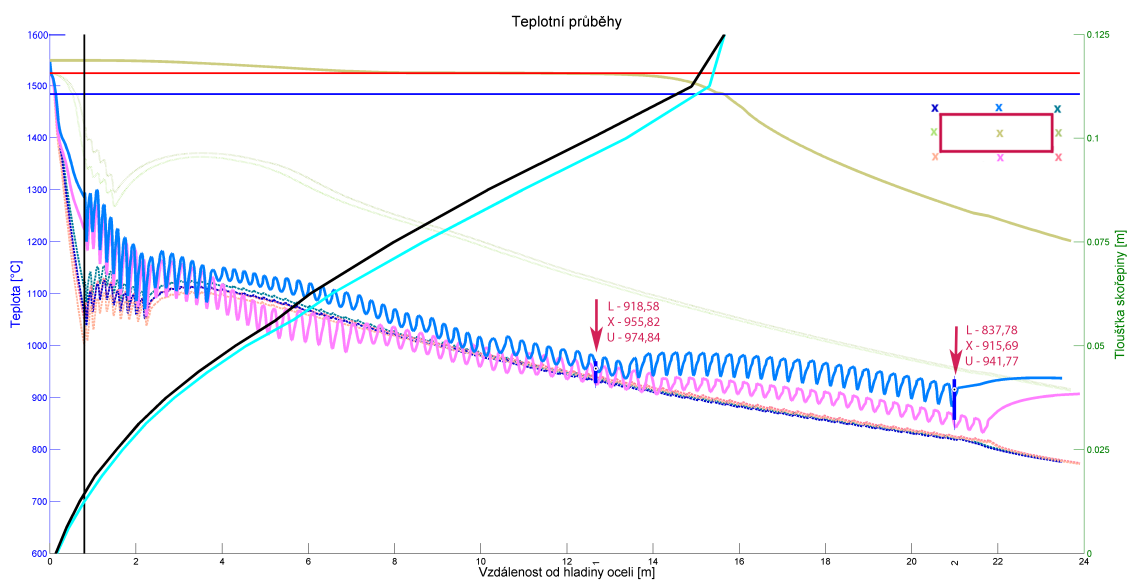
Z obrázku 2.7 je vidět dobrá shoda experimentálního měření pyrometrů a výsledků numerického modelu teplotního pole. Z předložených výsledků vyplývá, že vytvořený numerický model teplotního pole lze použít na simulaci teplotních pochodů při plynulém lití oceli na bramovém ZPO firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. Navíc úpravou geometrie a okrajových podmínek by šel tento numerický model použít i pro další zařízení na plynulé lití. Nicméně by byla vždy nutná jeho verifikace s naměřenými hodnotami.



Obrázek 2.5: Teplotní pole na povrchu předlitku v rozvinutém stavu (S235J0)



Obrázek 2.6: Průběhy izolikvidy a izosolidy (S235J0)



Obrázek 2.7: Teplotní průběhy a tloušťka licí kůry (S235J0)

## Kapitola 3

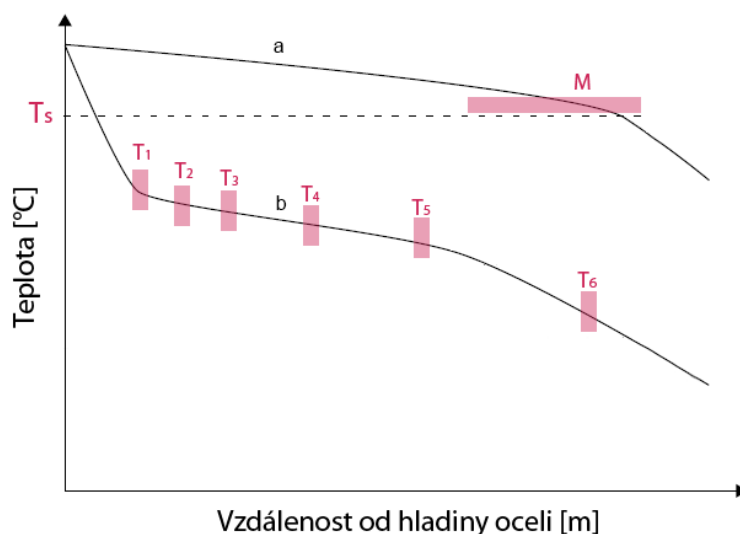
# Algoritmy optimálního řízení ZPO

Snaha optimalizovat, neboli nejlépe řídit výrobní provoz je pochopitelná snad u všech firem, které se výrobou zabývají. Proto i firmy zabývající se plynulým litím oceli vynakládají značné finanční náklady na výzkum pro dosažení nejlepší kvality, nejvyšší produktivity a minimální zmetkovitosti při minimálních výrobních nákladech. Snažit se však optimalizovat řízení plynulého lití přímo v reálném provozu ZPO je z hlediska možnosti vzniku havarijních situací nereálné. Začlenění každé inovace výroby do provozu je potom časově náročné.

Reálnější je využít simulačních a matematicko-optimalizačních metod, jejich výsledky postupně ověřovat a pak teprve začleňovat

do výroby. Optimalizace řízení plynulého lití je v této práci založena na experimentálně ověřeném numerickém modelu teplotního pole. Tento koncept byl již použit různými autory při využití různých optimalizačních technik. Můžeme zde nalézt klasické přístupy matematického programování [9], využití heuristických metod jako jsou např. genetické algoritmy (angl. genetic algorithms) [15], optimalizace mravenčí kolonií (angl. ant colony optimization) [7], optimalizace hejnem částic (angl. particle swarm optimization), světluščí algoritmus (angl. firefly algorithm) [8] a další [16]. Některé optimalizační přístupy jsou rovněž založeny na principu regulace [10], [17]. Nicméně základem těchto modelů jsou zjednodušené numerické modely teplotních polí. Zjednodušujícími předpoklady jsou např. výpočty na 1D nebo 2D numerických modelech, uvažování jednoduchých okrajových podmínek, konstantní termofyzikální vlastnosti oceli, výpočty na „hrubých“ sítích aj. Všechny tyto zjednodušující parametry vystihují reálný proces velice hrubě a nemohou být nasazeny do reálného provozu.

Idea optimálního řízení plynulého lití oceli spočívá v udržování teplotních intervalů (rozmezí)  $\Delta T_1, \dots, \Delta T_i, \dots, \Delta T_p$  v jednotlivých kontrolních místech ZPO (obrázek 3.1). Tyto intervaly by měly být stanoveny tak, aby zaručily pro konkrétní značku oceli dobré materiálové vlastnosti finálního předlitku. Zároveň je z hlediska povrchové kvality příznivý plynulý nerostoucí průběh



Obrázek 3.1: Optimalizační omezení teplotních průběhů a metalurgické délky: (a) teplotní průběh v jádru (b) teplotní průběh na povrchu předlitku,  $T_s$  je teplota solidu [17]

povrchových teplot v oblasti sekundární chladicí zóny. V sekundární zóně chlazení nemůžeme regulovat jednotlivé trysky, ale pouze jednotlivé chladicí zóny. Nerostoucí trend povrchových teplot můžeme řešit podmínkou požadující vždy, aby v bodě  $i$  za každým chladicím okruhem byla teplota menší nebo stejná než v bodě před okruhem  $T_i^n$ . Index  $i$  označuje bod hlídání teploty (kontrolní bod) a index  $n$  časový krok. Pro každý kontrolní bod se stanoví jeho maximální a minimální teplota (dovolené rozmezí teplot). Z hlediska výrobní produktivity jsou požadovány vyšší hodnoty licí rychlosti. Postupujeme tedy tak, že maximalizujeme licí rychlost při dodržování povrchových teplot v jednotlivých rozmezích. Licí rychlost úměrně prodlužuje metalurgickou délku, proto navíc přidáváme rozsah délky, v kterém se může metalurgická délka  $M$  pohybovat (obrázek 3.1). Posledním je technické omezení čerpadel v jednotlivých chladicích okruzích, kdy je průtok vody  $\dot{m}_j$  pro každý okruh limitován svou maximální hodnotou ( $j$  je označuje číslo okruhu). Rovněž je průtok minimální hodnotou, která je určena vlastnostmi trysek. V případě, že průtok tryskou klesne pod danou mez, tryska ztrácí své ostříkové charakteristiky a dochází ke smáčení povrchu předlitku, což je z hlediska kvality předlitku nepříznivé. Licí rychlost je rovněž omezena technologicky svou dovolenou provozní hodnotou, která nelze překročit. Toto omezení proto do modelu nezahrnujeme. Matematický model lze napsat ve tvaru:

$$\begin{aligned}
& \text{maximize} && v_z \\
& \text{subject to} && T_{i(\min)} \leq T_i^n \leq T_{i(\max)} \quad \forall i, n = t_f, \\
& && T_{i-1}^n \geq T_i^n \geq T_{i+1}^n \quad \forall i \in [2, \dots, p-1], n = t_f, \\
& && \dot{m}_{j(\min)} \leq \dot{m}_j \leq \dot{m}_{j(\max)} \quad \forall j, \\
& && M_{\min} \leq M \leq M_{\max}.
\end{aligned} \tag{3.1}$$

K tomuto modelu však musíme přiřadit numerický model teplotního pole. Vzniklý systém představuje úlohu nelineární optimalizace, ve které je počet omezení úměrný počtu výpočtových uzlů numerického modelu. I pro hrubou 3-D síť pak máme více jak  $10^6$  omezení, což je z hlediska klasických optimalizačních metod výpočtově neúnosné. Reálnou možností je oddělení numerického modelu teplotního pole (tzv. black-box) od modelu optimalizačního [15], [7], [20], [8], [10], [17]. Heuristických metod je velké množství. Některé z nich konvergují k optimálnímu řešení pro určitý typ úloh rychleji než ostatní. Proto volba heuristické metody je klíčovým problémem. Drtivá většina těchto optimalizačních algoritmů je založena na iteračním výpočtu účelové funkce. Čím je provedeno více výpočtů, tím více známe chování úlohy a můžeme usuzovat jakým směrem se vydat k dosažení nejlepších hodnot. Výpočtově nejnáročnější je v našem případě numerický model teplotního pole, jehož doba vyhodnocení je závislá na počtu výpočtových uzlů a délce časového kroku. Optimalizační algoritmus potom volá numerický model s různými vstupními parametry, které upravuje podle výsledného teplotního pole. Vhodnost heuristického algoritmu se tedy posuzuje podle počtu vyhodnocení numerického modelu před nalezením výsledku úlohy. Různé optimalizační přístupy byly testovány v pracích [8], [10], [17]. Zde je uveden optimalizační přístup založený na fuzzy regulaci, který je robustní a dokáže nalézt optimální řešení splňující dovolené teplotní omezení v průměru do 50 iterací.

### 3.1. Fuzzy regulátor pro optimální řízení ZPO

V posledních několika letech jsme svědky rychlého rozvoje fuzzy logiky a jejích aplikací [13]. Fuzzy logika představuje schopnost napodobit lidské myšlení, které efektivně využívá spíše přibližný způsob uvažování nežli přesný. Tím můžeme do výpočtu zanést tolerance vycházející z nepřesných a náhodných faktorů. Součástí disertační práce byl vytvořen původní algoritmus na problém optimálního řízení plynulého lití oceli. Jde o heuristický optimalizační algoritmus,

jehož základem je fuzzy regulátor. Vstupem algoritmu jsou teplotní intervaly pro povrchové teploty v určitých místech ZPO. Volba tzv. kontrolních bodů, tedy míst kde se hlídá hodnota povrchové teploty, byla stanovena vždy za každým chladícím okruhem v místě malého a velkého rádiusu. Hlavní pozornost se přitom věnuje malému rádiusu, jehož povrch je při rovnání více namáhán a tedy více náchylný k tvorbě vad.

Optimalizační algoritmus náhodně zvolí parametry lití v předepsaných mezích, pro které je následně spočítáno teplotní pole. V dalším kroku porovná výsledné teploty s předepsanými. Hodnotu jejich rozdílu označíme jako chybu, na jejíž základě algoritmus modifikuje parametry lití. Tyto kroky probíhají opakovaně, dokud není nalezen optimální stav. Rozhodování na změnu chladících intenzit je prováděno pomocí fuzzy logiky. Např. pokud je chyba v kontrolním bodě *velká*, modifikace je také *velká*. Modifikace licí rychlosti je rovněž založena na fuzzy pravidlech. Např. jestliže je celková chyba *malá* a zároveň je metalurgická délka *krátká*, pak modifikace licí rychlosti bude *velká*. Výsledkem je potom algoritmus schopný nalézt optimální parametry lití na konkrétním ZPO pro konkrétní značku oceli. Fuzzy pravidla vycházejí ze vzájemného ovlivnění licích parametrů na povrchové teploty. Fuzzy množinu pracující vzdáleností okruhu od kontrolního bodu označíme jako impakt. Fuzzy pravidla použitá pro modifikaci mají následující formu: *Jestliže chyba je A1 a impakt je A2, pak modifikace je A3*. Tyto pravidla popisuje Tabulka 3.1. Jako defuzzifikační metoda je použita hodnota těžiště výsledné množiny. Navíc jestliže

Tabulka 3.1: *Závislost modifikace chlazení A3 na hodnotě chyby A1 a impaktu A2*

|         |            |            |         |         |
|---------|------------|------------|---------|---------|
| A2 / A1 | Velmi Malá | Malá       | Střední | Velká   |
| Malá    | Velmi Malá | Velmi Malá | Malá    | Malá    |
| Střední | Velmi Malá | Velmi Malá | Malá    | Střední |
| Velká   | Velmi Malá | Malá       | Střední | Velká   |

Tabulka 3.2: *Závislost licí rychlosti A6 na hodnotě celkové chyby A4 a metalurgické délky A5*

|         |             |             |             |             |             |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| A4 / A5 | Velmi Malá  | Malá        | OK          | Velká       | Velmi Velká |
| Malá    | Více        | Trochu Více | Trochu Více | Trochu Více | Méně        |
| Střední | Trochu Více | Neměnit     | Neměnit     | Neměnit     | Trochu Méně |

celková absolutní chyba ve všech kontrolních bodech nepřesahuje daný limit, algoritmus použije modifikaci licí rychlosti. Pravidla pro modifikaci licí rychlosti jsou v následující formě: *Jestliže celková chyba je A4 a metalurgická délka je A5, pak modifikace je A6*. Tyto pravidla popisuje Tabulka 3.2.

#### *Implementace fuzzy regulátoru*

Zvolené intervaly teplot a hodnot impaktů jsou pro tento konkrétní případ popsány v tabulce 3.3. Pro provedení optimalizace zbývá doplnit poslední omezující parametry podle (3.1). Omezení metalurgické délky je voleno v intervalu 15 - 20 m. Hodnoty maximálních a minimálních průtoků v jednotlivých zónách jsou v tabulce 3.4. Grafické výsledky jsou zobrazeny v grafu 3.2 a číselné hodnoty v tabulce 3.5.

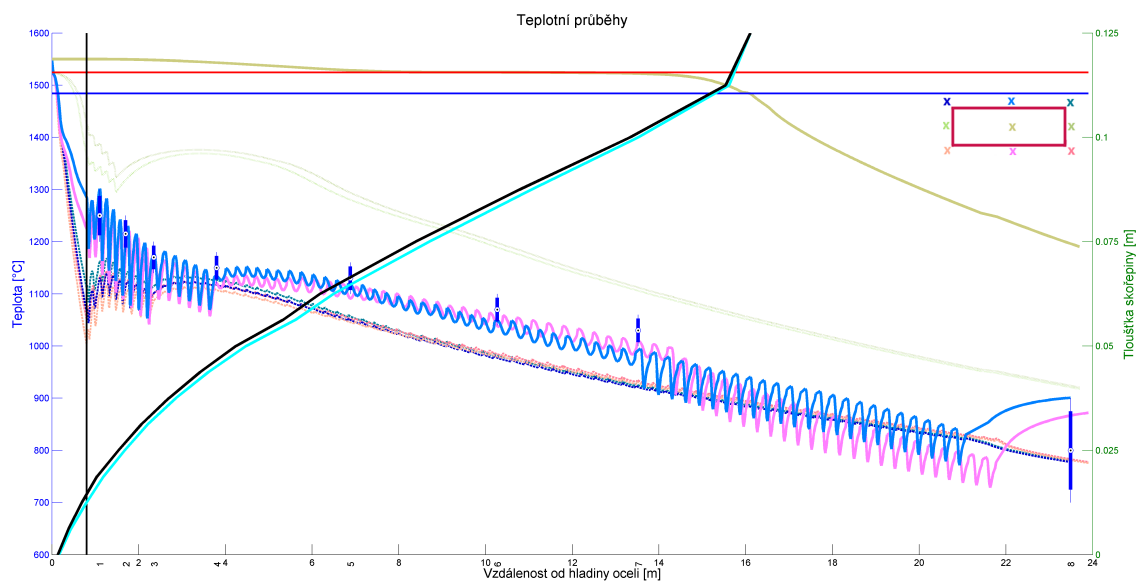
Podle obrázku 3.2 prochází teplotní pole předepsanými intervaly při metalurgické délce blízké hodnotě 20 m, což naznačuje, že se pohybujeme blízko globálního optima. Licí rychlost dosáhla pro zvolené teplotní intervaly 0,79 m/min. Teplotní intervaly pro optimalizační algoritmus byly účelově voleny tak, aby v místě rovnání předlitku bylo dosaženo vyšších teplot. Z výsledků pro testované oceli pak vyplývá, že pro dosažení požadovaných teplotních intervalů je vhodné nastavovat některé chladící okruhy (6, 8 a 9) na své minimální hodnoty. Pokud by v těchto okruzích byla nasazena tryska pracující s menším průtokem, došlo by k lepším regulačním možnostem.

Tabulka 3.3: Zvolené teplotní intervaly pro jednotlivé chladicí okruhy

| Segment/Okruh | 1            | 3            | 4            | 5            | 6            | 7            | 8            | 9            | 10           | 11           | 12         | 13         |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|
| Nahoře<br>°C  | 1200<br>1300 | 1180<br>1250 | 1140<br>1200 | 1120<br>1180 | 1100<br>1160 | -<br>-       | 1040<br>1100 | -<br>-       | 1000<br>1060 | -<br>-       | 700<br>900 | -<br>-     |
| impakt        | 9; 0         | 3; 7         | 3; 7         | 2; 8         | 8; 2         | -            | 8; 3         | -            | 6; 3         | -            | 8; 3       | -          |
| Dole<br>°C    | 1200<br>1300 | 1180<br>1250 | 1140<br>1200 | 1120<br>1180 | -<br>-       | 1100<br>1160 | -<br>-       | 1040<br>1100 | -<br>-       | 1000<br>1060 | -<br>-     | 700<br>900 |
| impakt        | 9; 0         | 3; 7         | 3; 7         | 2; 8         | -            | 8; 2         | -            | 8; 3         | -            | 6; 3         | -          | 8; 3       |

Tabulka 3.4: Maximální a minimální průtoky pro jednotlivé chladicí okruhy

| Okruh     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Minimální | 28,8  | 40    | 51,5  | 38,4  | 50    | 26,4  | 26,4  | 26,4  | 26,4  | 22    | 22    | 31,2  | 31,2  |
| Maximální | 139   | 60    | 171   | 128   | 148   | 112   | 112   | 112   | 112   | 94    | 94    | 148   | 148   |
| průtok    | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min |



Obrázek 3.2: Teplotní průběhy a tloušťka lící kůry (S235J0)

Tabulka 3.5: Výsledné optimální lící parametry pro ocel S235J0

| Průtok vody<br>sekundární<br>zónou | Lící rychlost = 0,79 m/min |       |       |       |       |       | Výsledná metalurgická délka = 19,9935 m |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                    | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                                       | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|                                    | 133                        | 50    | 123   | 94    | 82    | 26    | 30                                      | 26    | 26    | 24    | 24    | 119   | 139   |
|                                    | l/min                      | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min                                   | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min |



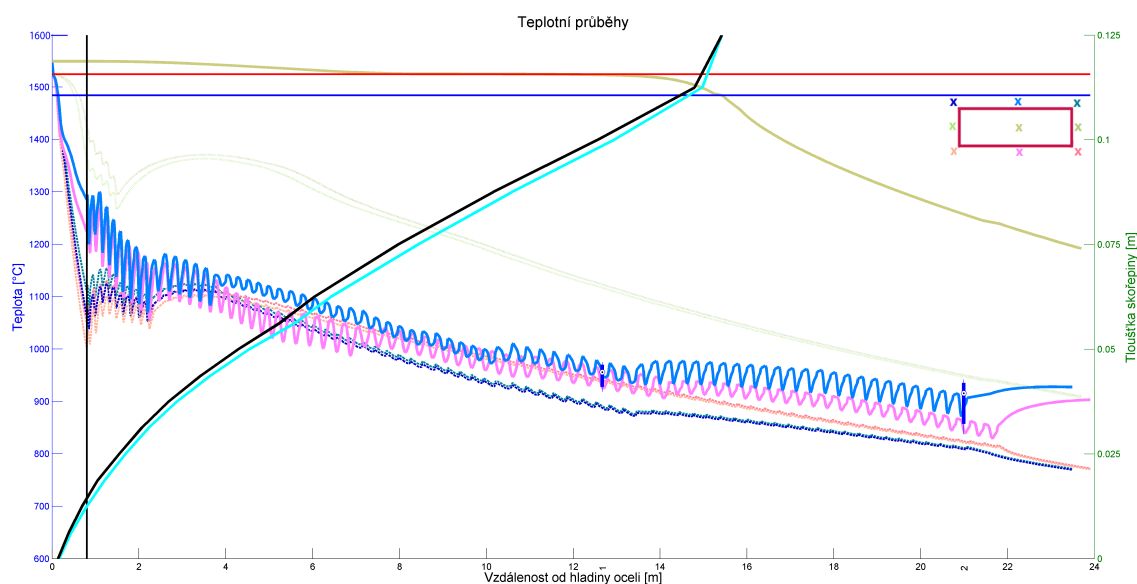
## Kapitola 4

# Výměna trysky pro EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s.

Pomocí kapitoly 3 byla pro firmu EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. navržena optimalizace lící tratě, spočívající ve výměně trysky 100.638.30.24 za trysku 100.528.30.24. Jak ukázaly analýzy, nebylo možné dosáhnout požadovaného zvýšení povrchové teploty na straně malého rádiusu snížením průtoků vody ve stávajících okruzích. Důvodem byly provozní limity průtoků použitých trysek, při jejichž překročení není zajištěná dostatečná atomizace vody. Před novým numerickým výpočtem bylo opět nutné proměření „nové“ trysky Laboratoří přenosu tepla a proudění VUT FSI v Brně, a získání parametrů popisujících intenzitu chlazení. Hlavním smyslem výměny trysky byla vyšší regulační schopnost „nové“ trysky při nižších průtocích vody vzhledem ke stávajícímu stavu. Takto je možné udržování teplot povrchu malého rádiusu před místem rovnání předlitku na vyšších teplotách, a tím dosáhnout kladného efektu z hlediska kvality odlité oceli. V dalším kroku je nutná integrace trysky 100.528.30.24 do numerického modelu teplotního pole.

### *Integrace trysky 100.528.30.24 do numerického modelu teplotního pole*

Pro první porovnávací výpočet numerického modelu s tryskou 100.528.30.24 pro chladicí okruhy malého rádiusu (6, 8 a 10) byl zvolen případ se vstupními parametry podle tabulky 2.3. Výsledky výpočtu jsou na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: *Teplotní průběhy a tloušťka lící kůry*

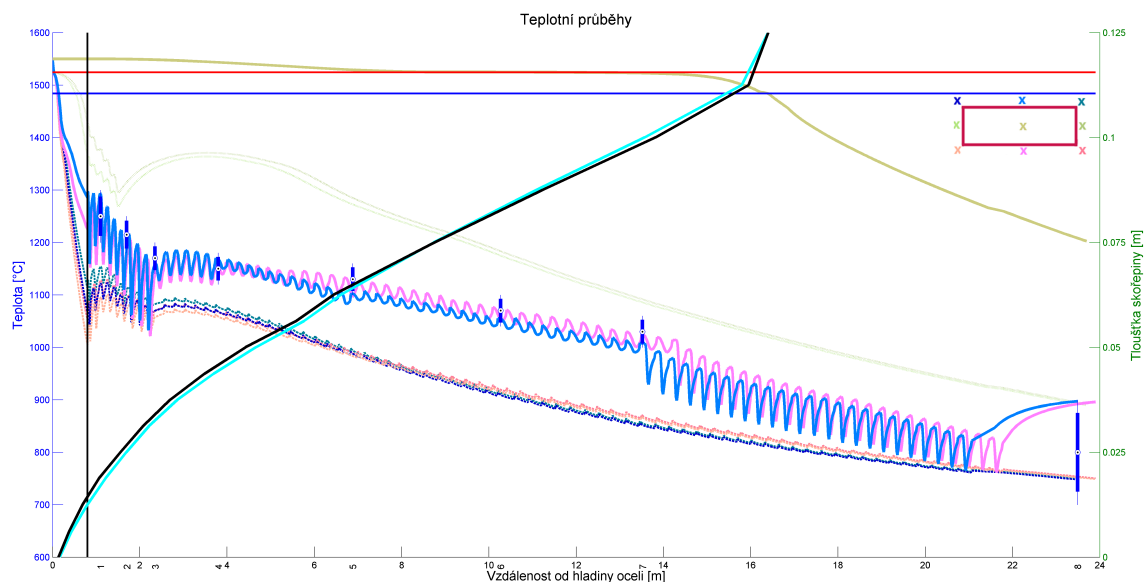
Na první pohled vidíme oproti původním výsledkům 2.7 hladší pokles teplot na vrchním rádiu a rovnoměrnější růst skořepiny. Teplotní průběh na horním povrchu opět prochází naměřenými hodnotami pomocí pyrometrů a můžeme tedy konstatovat, že změna trysky nevedla k výrazným změnám v chování teplotního pole, ale pouze k jeho mírnému zlepšení. To je důležitá informace pro výrobce, protože nemusí měnit zaběhnuté procesy. Posledním krokem je začlenění nové trysky do optimalizačního algoritmu.

#### Optimální řízení ZPO s tryskou 100.528.30.24

Po integraci trysky 100.528.30.24 do numerického modelu teplotního pole můžeme pomocí regulačního fuzzy algoritmu hledat nové parametry řízení ZPO. Výsledky optimalizace jsou v tabulce 4.1 a na obrázku 4.2.

Tabulka 4.1: *Výsledné optimální lící parametry pro novou trysku na ocel S235J0*

|                              | Lící rychlost = 0,80 m/min |       |       |       |       |       | Výsledná metalurgická délka = 19,9110 m |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Průtok vody sekundární zónou | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7                                       | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|                              | 91                         | 50    | 96    | 108   | 52    | 31    | 59                                      | 18    | 26    | 18    | 22    | 122   | 126   |
|                              | l/min                      | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min                                   | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min | l/min |



Obrázek 4.2: *Teplotní průběhy a tloušťka lící kůry*

# Závěr

Pro dosažení vysoké kvality plynule odlévaných ocelových předlitků (bram a sochorů) je nezbytná znalost tepelných pochodů při jejich výrobě. Toho lze dosáhnout numerickým řešením parciálních diferenciálních rovnic vedení tepla v předlitku a přenosu hmoty, spolu s provozními daty z provozů a poloprovodů. V rámci disertační práce byl vytvořen komplexní 3-D numerický model nestacionárního teplotního pole ocelového předlitku v reálné geometrii ZPO zachycující teplotní rozložení při změně fáze. Přesnost řešení parciálních diferenciálních rovnic závisí na znalosti termo-fyzikálních vlastností materiálů a jejich změny s teplotou a na definici okrajových podmínek. Materiálové vlastnosti a jejich teplotní závislost byly stanoveny solidifikačním programem IDS. Definice okrajových podmínek musí být provedena na konkrétní ZPO, v této práci ZPO firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s.

Takto sestavený model byl verifikován ve spolupráci s firmou EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s., která poskytla část archivovaných provozních dat z roku 2011. Numerický model teplotního pole má obecné uplatnění, umožňující jakoukoli jeho modifikaci z hlediska geometrie předlitku, rozložení okrajových podmínek, značek ocelí, termo-fyzikálních vlastností, volby licích parametrů aj. Je tedy aplikovatelný pro každé bramové nebo sochorové ZPO. Samotný numerický model sice dává představu o procesu plynulého lití a rozložení teplot v jednotlivých řezech předlitku, nedává však návod jak minimalizovat vady finálních bram a zlepšit tak kvalitu lité oceli.

Disertační práce předkládá původní optimalizační algoritmus, který je schopen nejenom nalézt řešení úlohy, ale zároveň je efektivní s pohledu výpočtového času. Z prezentovaných algoritmů vyšel nejlépe algoritmus založený na fuzzy logice (nejmenší počet iterací numerického modelu). Ten byl rovněž nasazen na 3-D numerický model teplotního pole, jehož výsledky jsou pro tři vybrané značky oceli v práci uvedeny.

Přínos práce můžeme shrnout do následujících vět. Vytvořený numerický model teplotního pole může díky své obecnosti sloužit k predikci rozložení teplot pro zvolené parametry lití jakéhokoli sochorového tak bramového ZPO. Vytvořený optimalizační algoritmus může sloužit k dosažení lepší kvality ocelových odlitků při maximální možné produktivitě výroby. Dále dokáže např. nalézt optimální vztah mezi licí rychlostí a intenzitou chlazení nebo optimální reakci na vzniklou havarijní situaci. Navíc optimalizační model může posoudit vhodnost použitých trysek a doporučit spolu s experty jejich výměnu popř. jejich konfiguraci. Na závěr celý koncept numerického modelu teplotního pole a optimalizačního algoritmu může být použit k návrhu nových ZPO, k rekonstrukci stávajícího zařízení a jeho modernizaci.

Díleč výsledky práce byly využity v grantových projektech GA106/08/0606, *Modelování přenosu tepla a hmoty při tuhnutí rozměrných systémů hmotných kovových materiálů*, 2008 - 2010, GAČR 106/09/0940, *Numerický a stochastický model plynule odlévaných ocelových předlitků obdélníkového profilu*, 2009 - 2011, GAP107/11/1566, *Analýza vlivu metalurgicko-materiálových a technologických parametrů kontinuálně litých ocelových předlitků na jejich kvalitu a na stabilitu pochodu*, 2011 - 2013, juniorských projektech VUT FSI FSI-J-10-8, 2010, FSI-J-11-7, 2011, FSI-J-12-22, 2012 a projektu ED0002/01/01 - NETME Centre.

# Literatura

- [1] BIRAT, Jean-Pierre, et al. *The Making, Shaping and Treating of Steel: Casting Volume : 11th. EDITION*. ALAN W. CRAMB. Pittsburgh, PA, USA : The AISE Steel Foundation, 2003. 1000 s. ISBN 0-930767-04-7.
- [2] ÇENGEL, Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. New York, USA : McGraw-Hill Companies, 2002. 932 s. ISBN 0-07-245893-3, ISBN-13 978-0072458930.
- [3] FLICK, Andreas; STOIBER, Christoph. Trends in Continuous Casting of Steel - Yesterday, Today and Tomorrow. In *METEC InSteelCon 2011 Proceedings*. Düsseldorf, Germany, TEMA Technologie Marketing AG. 2011. s. 8.
- [4] FRANĚK, Zdeněk. *Vliv tepelných procesů na kvalitu plynule litých Bram a návrh predikce vad*. Ostrava, Czech Republic, 2011. 149 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [5] GONZALEZ, Marcial, et al. Modeling of the Solidification Process in a Continuous Casting Installation for Steel Slabs. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2003, 34, s. 455-473. ISSN :1073-5615.
- [6] HEGER, Jaromír. *Numerická Simulace Technologického Procesu Kontinuálního Odlévání Oceli*. Ostrava, 2002. 41 s. Habilitační práce. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava.
- [7] KORŠEC, Petr, et al. Ant Stigmergy on the Grid: Optimizing the Cooling Process in Continuous Steel Casting. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International*. Greece : IEEE, 2006. s. 8. ISBN 1-4244-0054-6.
- [8] MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J.; ŠEDA, M. Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm. *Materiali in tehnologije*. 2011. 45(4). p. 347 - 350. ISSN 1580-2949.
- [9] MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J.; KAVIČKA, F. Optimal Control of the Continuous Slab Casting Process Based on Mathematical Programming Methods. In *Sborník konference*. 1. Tanger s.r.o. 2010. p. 130 - 135. ISBN 978-80-87294-03-1.
- [10] MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J.; ŠANDERA, Č.; KAVIČKA, F.; MASARIK, M. An Optimal Relationship Between Casting Speed and Heat Transfer Coefficients for Continuous Casting Process. In *METAL 2011 Conference proceedings*. Metal. Ostrava, Tanger. 2011. p. 22 - 27. ISBN 978-80-87294-22-2.
- [11] MIETTINEN, Jyrki. *IDS Solidification Analysis Package for Steels : User manual of DOS version 2.0.0*. Helsinki, Finland : Helsinki University of Technology, 1999. 22 s.

- [12] MINKOWYCZ, W. J.; SPARROW, E. M.; MURTHY, J. Y. *Handbook of Numerical Heat Transfer : Second Edition*. New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2006. 967 s. ISBN 978-0-471-34878-8.
- [13] NGUYEN, H. T.; WALKER, E. A. *A First Course in Fuzzy Logic*. CRC Press, Boca Raton, Florida (1997), Second Edition (1999), Third Edition (2006). s. 392. ISBN 978-0849316593.
- [14] POHANKA, Michal. *Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics*. Brno, Czech Republic, 2006. 142 s. Dizertační práce. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering.
- [15] SANTOS, C. A.; SPIM, J. A.; GARCIA, A. Mathematical Modeling and Optimization Strategies (Genetic Algorithm and Knowledge Base) Applied to the Continuous Casting of Steel. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003, 16, s. 511 - 527. ISSN 0952-1976.
- [16] SPUY, D. deV. Van Der; CRAIG, I. K.; PISTORIUS, P. C. An Optimization Procedure for the Secondary Cooling Zone of a Continuous Billet Caster. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1999, 99-01, s. 49 - 56. ISSN 0038-223X.
- [17] ŠANDERA, Č.; MAUDER, T. Optimization Algorithm for Continuous Casting Process. In *Mendel 2011, Mendel Journal series*. Brno, BUT. 2011. p. 252 - 258. ISBN 978-80-214-4302-0, ISSN 1803-3814.
- [18] ŠTĚTINA, Josef. *Dynamický Model Teplotního Pole Plynule Odlévané Bramy*. Ostrava, Czech Republic, 2007. 105 s. Dizertační práce. Technická univerzita Ostrava.
- [19] THOMAS, Brian G.; BRIMACOMBE, J. Keith. *Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy*. San Diego, California, USA : Academic Press, 1997. Process Modeling, s. 253-279. ISBN 0-12-618920-X.
- [20] WU, Guo-Hua; WU, RONG-Yang. Identification of Convection Heat Transfer Coefficient Parameters Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm in the Secondary Cooling Zone for Steel Continuous Casting Process. In *Computational Intelligence Methods and Applications, 2005 ICSC Congress on*. Istanbul, Turkey : IEEE, 2005. s. 6. ISBN 1-4244-0020-1.

## **Abstrakt**

Tato práce pojednává o optimalizaci provozu zařízení na plynulé odlévání ocelových Bram. Shrnuty jsou zde základní analytické a empirické poznatky o procesu tuhnutí, o numerickém modelování a vybraných optimalizačních technikách. Jsou zde rovněž uvedeny fyzikální podmínky a faktory ovlivňující kvalitu finální oceli, včetně jejich vzájemných vztahů. Základem řešení tohoto problému je vytvoření původního numerického modelu teplotního pole ve verzi off-line a jeho verifikace s reálnými provozními daty. Nadstavbu numerického modelu tvoří optimalizační model, sloužící k optimální regulaci procesu, založený na fuzzy logice. Všestranná využitelnost optimalizačního modelu je demonstrována na několika případech, jako jsou např. nalezení licích parametrů pro dosažení vysoké kvality oceli, reakce na vzniklé havarijní situace, nalezení optimálního vztahu mezi jednotlivými parametry lití, aj. V rámci optimalizačních výsledků je v práci pro konkrétní zařízení na plynulé lití rozbor doporučených změn licí trati za účelem dosažení vyšších povrchových teplot předlitku v místě rovnání. Celý koncept numerického a optimalizačního modelu je natolik obecný, že je možná jeho aplikace na libovolné Bramové či sochorové lití oceli.

## **Summary**

This thesis deals with optimization of the continuous slab casting process. Thesis summarized the basic analytical and empirical findings concerning the solidification process, the numerical modeling and the selected optimization techniques. There are also physical conditions and factors that affect the quality of steel including their relationships. The basis of a solution strategy is the original numerical model of temperature field in its off-line version. The numerical model was verified by the real historical data. The optimization part is based on fuzzy logic implemented above the numerical model. Optimization algorithm is used for optimal control of casting process. Universal usage of optimization model is demonstrated on several cases e.g. finding of optimal casting parameters ensures the high quality of products, the optimal reactions on breakdown situations, determination of an optimal relationship between casting parameters, etc. Optimization results have shown suitable caster modification in order to get higher surface temperature at the unbending point. Whole concept of numerical and optimization model is general and it can be apply in arbitrary slab or billet continuous casting.

## Tomáš Mauder, Ing

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Personal details</b>          |  |
| Address                          | Pod kaštany 16 610 00 Brno, Česká republika  |
| Telephone (work / cell)          | (+420) 54114 3241 / (+420) 724 905 832   |
| E-mail Address                   | ymaude00@stud.fme.vutbr.cz, absurd@seznam.cz   |
| WWW homepage                     | <a href="http://www.fme.vutbr.cz/prdetail.html?pid=86944&amp;lang=0">http://www.fme.vutbr.cz/prdetail.html?pid=86944&amp;lang=0</a>  |
| Nationality                      | Česká republika  |
| Born                             | 10. 08. 1984, Brno-město   |
| <b>Education and Scholarship</b> |  |
|                                  | 2008 – anticipated completion in September 2012  |
| Degree                           | Ph.D. program  |
| Field of study                   | Applied Sciences in Engineering /Applied Mechanics   |
| Institution                      | Brno University of Technology, Technická 2896/2, 616 69 Brno<br>Czech Republic   |
|                                  | 2003 – 2008  |
| Degree                           | Master degree  |
| Field of study                   | Mechanical Engineering / Mathematical engineering  |
| Institution                      | Brno University of Technology, Technická 2896/2, 616 69 Brno<br>Czech Republic   |
|                                  | 08/2006 – 12/2006  |
| Scholarship                      | Erasmus Programme  |
| Field of study                   | Logistic and optimization  |
| Institution                      | Molde University College, Norway   |
| <b>Work experience</b>           |  |
|                                  | 01. 01. 2011 – Current   |
| Job position                     | Junior researcher  |
| Company name                     | Brno University of Technology, Technická 2896/2, 616 69 Brno<br>Czech Republic, division NETME   |
| <b>Field of research</b>         | Optimization and numerical simulation of concasting of steel slab via<br>a numerical model of the temperature field.   |
| Projects                         | co-worker in projects: GA106/08/0606, GACR 106/09/0940,<br>GAR P107/11/1566,<br>Employ on project ED0002/01/01 - NETME<br>Supervisor on junior projects VUT FSI BD13102003(FSI-J-10-8), and<br>BD13002(FSI-J-11-7) |
| Number of publication            | 55   |
| Thomson Reuters h-index          | 2  |
| <b>Skills</b>                    |  |
| PC skills                        | MS Office, Borland-Delphi, Matlab, Gams, MS Visual Basic, Mathcad,<br>Minitab  |
| Language skills                  | English - active spoken and written  |