

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 771

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Lubomír Klimeš

**Optimalizace parametrů
sekundárního chlazení
plynulého odlévání oceli**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

Ing. Lubomír Klimeš

**OPTIMALIZACE PARAMETRŮ SEKUNDÁRNÍHO CHLAZENÍ
PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI**

**OPTIMIZATION OF SECONDARY COOLING PARAMETERS
OF CONTINUOUS STEEL CASTING**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
Oponenti: prof. Ing. Miroslav Raudenský, CSc.
doc. Dr. Ing. René Pyszko
Ing. Pavol Buček, Ph.D.
Datum obhajoby: 30. října 2014

Klíčová slova:

plynulé odlévání oceli, numerický model teplotního pole, paralelizace, grafické karty, GPGPU, CUDA, optimální řízení, prediktivní řízení pomocí počítačového modelu.

Keywords:

continuous steel casting, numerical model of temperature field, parallelization, graphics processing units, GPGPU, CUDA, optimal control, model-based predictive control.

Místo uložení práce:

Dizertační práce je dostupná v tištěné podobě na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

© Lubomír Klimeš, 2014

ISBN 978-80-214-5114-8

ISSN 1213-4198

Obsah

Úvod	5
1 Plynulé odlévání oceli: přehled a současný stav poznání	6
1.1 Charakteristika výroby oceli plynulým odléváním	6
1.2 Hutnická výroba oceli	6
1.3 Zařízení pro plynulé odlévání	7
1.4 Hlavní části licího stroje a princip jeho činnosti	8
1.5 Současný stav vývoje metody plynulého odlévání oceli	10
1.6 Současný stav počítačového modelování, optimalizace a optimálního řízení plynulého odlévání oceli	10
2 Cíle dizertační práce	12
3 Matematický model teplotního pole plynule odlévaného předlitku a jeho paralelizace na grafických kartách	13
3.1 Model teplotního pole s fázovými změnami	13
3.2 Počáteční a okrajové podmínky modelu teplotního pole	14
3.3 Geometrické a fyzikální podmínky modelu teplotního pole	14
3.4 Stanovení součinitele přestupu tepla pod chladičí tryskou	15
3.5 Počítačová implementace modelu teplotního pole	15
3.6 Validace a verifikace počítačového modelu	17
4 Optimální řízení sekundárního chlazení pomocí prediktivního řízení	19
4.1 Optimální řízení model-based predictive control	19
4.1.1 Prediktivní řízení pomocí počítačového modelu	19
4.2 Implementace model-based predictive control systému pro řízení licího stroje	20
4.3 Optimální řízení dynamického provozu licího stroje	22
4.3.1 Případová studie s letmou výměnou mezipánve	22
Závěr	25
Seznam použitých zdrojů	28

Úvod

PLYNULÉ odlévání patří v současné době k dominantnímu způsobu výroby oceli. Plynulým odléváním se dnes vyrábí více než 95 % veškeré světové produkce oceli, navíc je tato technologie využívána např. k odlévání slitin hliníku nebo mědi. Požadavky na zvyšování produktivity výroby oceli, její kvality a jakosti a současné nároky na snižování výrobních nákladů vedoucí k posílení konkurenceschopnosti jednotlivých výrobních provozů není možné splnit bez použití numerických modelů teplotních polí plynule odlévaných předlitků a implementace optimalizačních algoritmů. Matematické modely a optimální řízení patří mezi významné nástroje, jak tyto požadavky a trendy uskutečnit.

Dizertační práce se věnuje vývoji a implementaci numerického modelu teplotního pole plynule odlévaného předlitku. Počítačový model je následně použit jako základní kámen prediktivního řídicího systému, který umožňuje optimálně řešit a řídit dynamické stavy během plynulého odlévání, např. průval nebo letmou výměnu mezipánve. Počítačový model teplotního pole byl implementován pro předlitek čtvercového průřezu (sochor). Vytvořený počítačový model, jenž je obecně výpočetně značně náročný, byl navrhnut, vytvořen a masivně paralelizován pomocí implementace v CUDA architektuře, která umožňuje jeho spuštění na grafických kartách (GPU) NVIDIA. Zmíněná GPU implementace umožnila výrazné zrychlení výpočtu modelu a tedy zkrácení jeho výpočetního času. Pro verifikaci a validaci modelu byla použita provozní data z lícího stroje v Třineckých železárnách, pro který byl model nakonfigurován. Implementovaný počítačový model pak tvoří základ prediktivního řídicího systému pro optimální řízení dynamických stavů při odlévání. Pro vývoj a implementaci řídicího systému byl využit přístup *model-based predictive control*, jenž využívá rychlého počítačového GPU modelu pro predikci budoucího tepelného stavu a vývoje předlitku při použití dané řídicí strategie. Činnost vyvinutého řídicího systému je v závěru práce demonstrována na pěti případech dynamických stavů při odlévání, které jsou následně vyhodnoceny a srovnány s běžným řízením podle chladicích křivek.

1

Plynulé odlévání oceli: přehled a současný stav poznání

V současné době je více než 95 % celosvětové produkce oceli vyráběno metodou plynulého odlévání oceli [68]. Plynulé odlévání je dominantní způsob výroby oceli, pomocí kterého je v současné době vyráběno více než 95 % veškeré celosvětové produkce oceli. Řízení provozu lícího stroje a jeho matematické modelování je velmi rozsáhlá a multidisciplinární úloha, kterou v současné době nelze řešit bez použití výkonných počítačů a moderních matematických metod numerického modelování, optimalizace a optimálního řízení. Matematické modelování a optimální řízení provozu lícího stroje patří mezi klíčové úlohy při plynulém odlévání oceli, které významným způsobem ovlivňují produktivitu a kvalitu vyráběné oceli, konkurenceschopnost ocelárny, bezpečnost při provozu lícího stroje a jeho dopad na životní prostředí. Jakost a kvalita produkované oceli významným způsobem totiž závisí na nestacionárním tepelném stavu předlitku během odlévání a způsobu jeho nuceného ochlazování. Současným trendem je modely teplotních polí využívat nejenom pro řízení a sledování provozu lícího zařízení, ale také pro optimalizaci nastavení parametrů zařízení pro plynulé odlévání a jeho optimální řízení.

1.1 Charakteristika výroby oceli plynulým odléváním

Technologický proces výroby oceli lze rozdělit na dva na sebe navazující kroky: (a) zpracování vstupních surovin v podobě ocelářské vsázky pomocí rafinace v tavicích zařízeních a zařízeních pánvové metalurgie a (b) samotný proces odlévání oceli, tj. přeměna taveniny tuhnutím na tzv. předlitky požadovaného tvaru, které jsou určeny pro další zpracování.

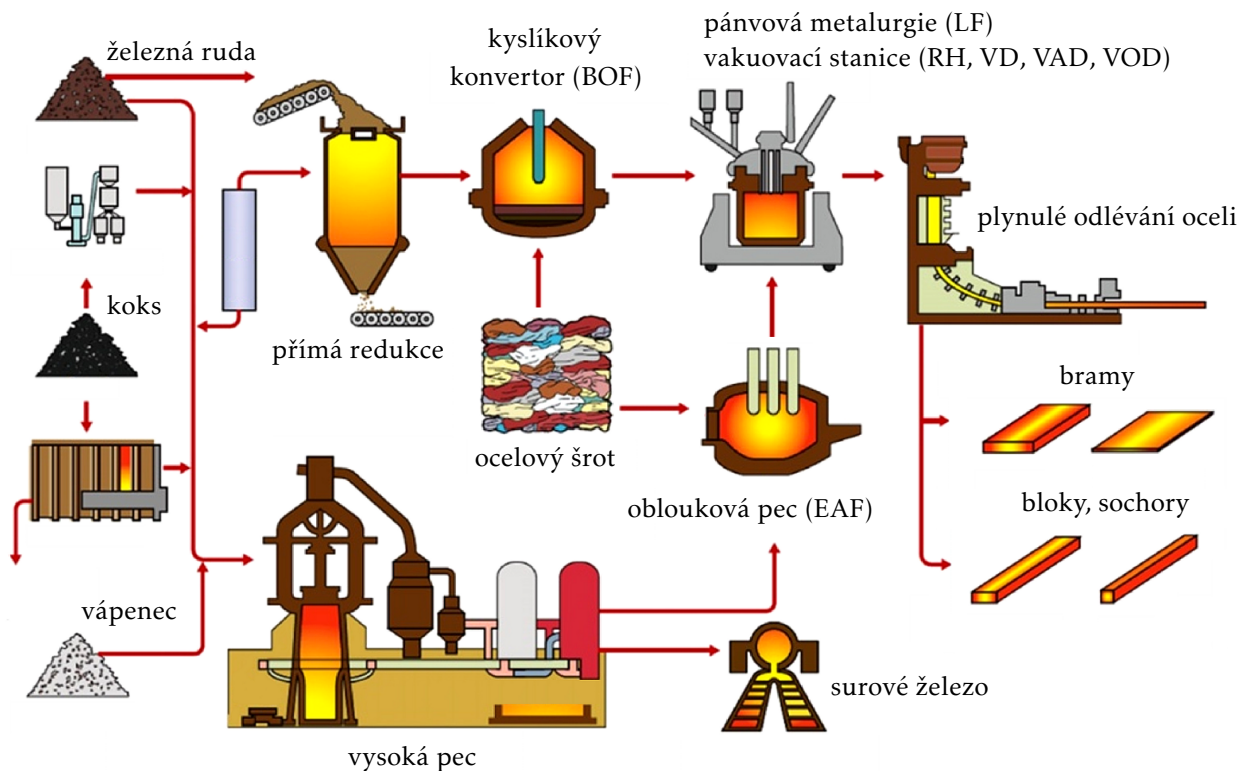
Plynulé odlévání oceli je technologický postup, při kterém je roztavená ocel, tzv. tavenina, postupně transformována v zařízení pro plynulé odlévání na tuhý polotovár požadovaného tvaru (resp. průřezu) a délky, tzv. předlitek, který je následně dále zpracováván na finální výrobky, nejčastěji tvářením za tepla. Charakteristickým rysem metody plynulého odlévání a hlavní odlišností ve srovnání s odléváním oceli do forem na ingoty je plynulost: přestože je roztavená ocel dopravována periodicky v pánvích do mezipánve ZPO, lící stroj umožňuje kontinuálně odlévat předlitek polonekonečné délky, který je ovšem z důvodu manipulovatelnosti a dalšího zpracování periodicky dělen na požadovanou délku [68].

1.2 Hutnická výroba oceli

Nejdůležitější změny a přeměna rudy na kovy probíhají za vysokých teplot a jsou schematicky zobrazeny na obrázku 1.1. Výchozí surovinou pro výrobu oceli je železná ruda, která se zpracovává především ve vysoké peci. Jejím produktem je tekuté surové železo, které se dále sekundární metalurgií [17] zpracovává na ocel zkujňováním. Tento proces probíhá nejčastěji v zásaditém kyslíkovém (Thomasově) konvertoru označovaném jako BOF, který obvykle zpracovává směs tvořenou

$\frac{3}{4}$ surového železa z vysoké pece a $\frac{1}{4}$ ocelového šrotu [69]. Jiným způsobem výroby oceli je využití elektrických pecí, nejčastěji elektrických obloukových pecí označovaných jako EAF, ve kterých je zdrojem tepla elektrický oblouk. Vstupní surovinou pro obloukové pece je obecně ocelový šrot, případně surové železo vyráběné přímou redukcí při teplotách kolem 900 °C [68, 69].

Zpracováním oceli v konvertoru nebo obloukové peci se kromě zkujňování dosahuje rovněž homogenizace a čištění. Zkujněná ocel se dále zpracovává obvykle v pánvových obloukových pecích označovaných jako LF a ve vakuovacích stanicích označovaných jako VD, ve kterých dochází k odsíření, odfosfoření, legování oceli (LF) a odstranění vodíku, dusíku a dalších nežádoucích příměsí (VD) [69]. Produktem sekundární metalurgie je tedy ocel s konečnými parametry, která se cyklicky v pánvích dopravuje do mezipánve zařízení pro plynulé odlévání, jejímž produktem jsou předlitky pro další zpracování.



Obrázek 1.1: Schéma výroby oceli z železné rudy a ocelového šrotu [69].

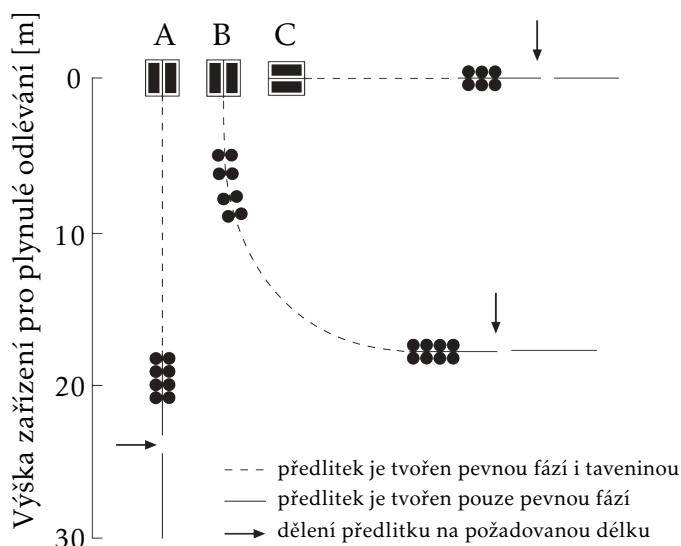
1.3 Zařízení pro plynulé odlévání

Termínem zařízení pro plynulé odlévání (ZPO) je označován licí stroj a jeho příslušenství, který slouží k přeměně taveniny na tuhé polotovary, tzv. předlitky. Hlavní dělení zařízení pro plynulé odlévání je možné provést podle průřezu odlévaného předlitku, tzv. formátu, a podle konstrukčního řešení licího stroje [68, 35].

Formáty předlitků odlévaných na ZPO. Podle osového průřezu odlévaného předlitku, tzv. formátu, se ZPO dělí na (a) *bramové*, (b) *sochorové* a (c) *blokové* licí zařízení [35]. Přestože se jednotlivé typy ZPO odlišují tvarem odlévaného předlitku, hlavní části licího stroje a jejich charakteristika popsané v následující části jsou shodné pro všechny zmíněné typy ZPO. Avšak jednotlivé části se mohou konstrukčně nebo technologicky lišit, např. konfigurací chladících trysek sekundární chladicí zóny z důvodu odlišných požadavků na ochlazování předlitku nebo systémem vodících válců z důvodu odlišně působícího ferostatického tlaku taveniny.

Konstrukční provedení ZPO. Zařízení pro plynulé odlévání je možné členit podle konstrukčního provedení a uspořádání jednotlivých částí lícího stroje na (a) *vertikální*, (b) *radiální* a (c) *horizontální*, viz obrázek 1.2.

Historicky nejstarším konstrukčním řešením je *vertikální* ZPO, jehož hlavní části jsou umístěny na vertikální přímce, tj. svisle pod sebou. Konceptce uspořádání vertikálního lícího stroje vychází z technologie odlévání oceli do kokil a charakteristickým znakem je svislý pohyb předlitku a jeho ochlazování přes přímý vertikální krystalizátor, pod kterým následuje svislá sekundární a terciární chladicí zóna.



Obrázek 1.2: Typy ZPO podle konstrukce: (A) vertikální, (B) radiální, (C) horizontální [68].

U radiálního ZPO, který patří v současné době mezi nejrozšířenější typ ZPO [35], jsou hlavní části lícího stroje umístěny na oblouku, nejčastěji na čtvrtkružnici. Na krystalizátor, který může být zakřivený nebo méně často přímý, navazují sekundární a terciární chladicí zóny, které leží na pomyslné kružnici, jejíž střed je nejčastěji ve stejné výšce jako horizontální osa krystalizátoru.

Nejméně rozšířeným typem je *horizontální* ZPO, u kterého jsou hlavní prvky lícího stroje umístěny na horizontální přímce. Na horizontálních ZPO se odlévají spíše speciální a vysoce jakostní oceli, ale především pak měď a její slitiny [35].

1.4 Hlavní části lícího stroje a princip jeho činnosti

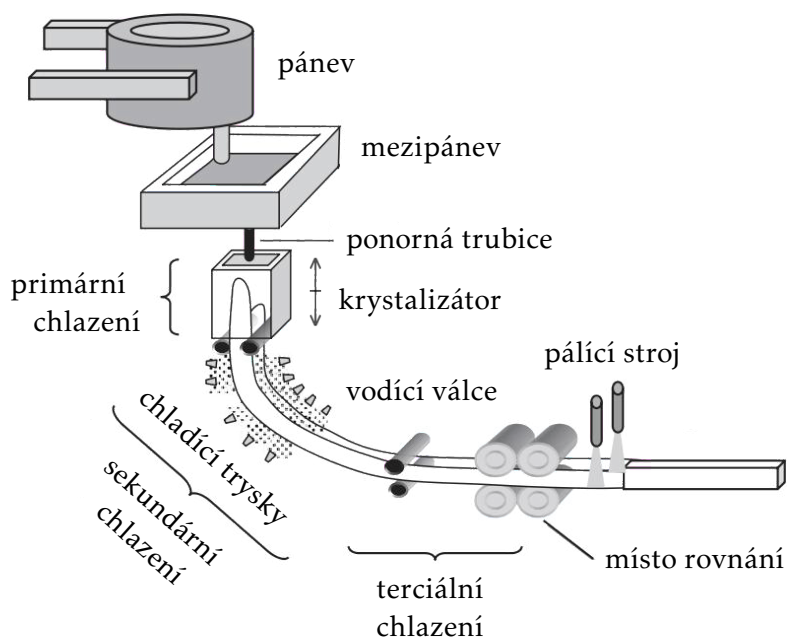
Lící stroj pro plynulé odlévání se obvykle skládá z těchto hlavních částí, viz obrázek 1.3:

Pánev slouží k dopravě roztavené oceli z pece nebo konvertoru do ZPO. Pánve jsou obvykle periodicky dopravovány jeřábem do otočného lícího stojanu, který umožňuje manipulaci s více pánvemi nad lícím strojem tak, aby byl zabezpečen přísun dostatečného množství roztavené oceli do mezi-pánve.

Mezipánev je umístěna pod otočným stojanem s pánvemi, ze kterých přitéká přes stínící trubici roztavená ocel do mezipánve.

Krystalizátor je zařízení umístěné pod mezipánví, ze které je do krystalizátoru přiváděna tavenina pomocí ponorné trubice. Tvar ponorné trubice a především způsob jejího zakončení významným způsobem ovlivňují charakter proudění taveniny v krystalizátoru [49]. Hlavní úlohou krystalizátoru je počáteční odvod tepla z taveniny a vytvoření tuhé slupky na povrchu předlitku. Z tohoto

důvodu se krystalizátor označuje jako primární chlazení (chladicí zóna) [35]. Ztuhlá vrstva na povrchu předlitku musí mít na výstupu z krystalizátoru dostatečnou tloušťku a pevnost, aby zamezila svému protržení vlivem ferostatického tlaku taveniny a naopak umožnila průchod předlitku sekundární chladicí zónou, ve které je předlitek dále ochlazován [14].



Obrázek 1.3: Schéma radiálního sochorového ZPO [48].

Sekundární chladicí zóna s vodícím systémem je umístěna pod krystalizátorem a je tvořena chladicími vodními nebo vodovzdušnými tryskami a vodícím systémem válců. Teplo je v sekundární zóně odváděno z předlitku pomocí chladicích trysek, kontaktem předlitku s vodícími válci nebo jinými částmi vodícího systému, přirozenou konvekcí a radiací do okolního prostředí. Trysky v sekundární chladicí zóně odvádějí z předlitku asi 50 % až 60 % veškerého tepla, které je nutné z předlitku celkově odvést [49]. Sekundární chladicí zóna spolu s krystalizátorem odvádí z předlitku většinu tepla během jeho solidifikace, z něhož je cca 5 % teplo přehřátí, cca 20 % latentní teplo spjaté se změnou skupenství a zbývajících cca 75 % je součet tepel uvolněných během fázových změn v tuhém stavu a citelného tepla [49].

Terciární chladicí zóna s vodícím systémem je umístěna za sekundární chladicí zónou a ochlazování předlitku zde probíhá převážně radiací a v menší míře také přirozenou konvekcí do okolního vzduchu. Terciární chladicí zóna je vybavena systémem vodících válců podobně jako sekundární chladicí zóna.

Tažné stolice a rovnací zařízení jsou dle celkového uspořádání ZPO často součástí sekundární nebo terciární chladicí zóny [9]. Tažná stolice je zařízení skládající se ze systému válců, které jsou poháněny nejčastěji elektromotorem a způsobují nucený pohyb předlitku lícím strojem.

Dělicí zařízení je umístěno na výstupu ZPO a slouží k dělení předlitku na požadovanou délku. V současné době je pro dělení nejčastěji používán kyslíkovo-acetylenový pálící stroj, v minulosti se pro menší odlévané formáty používalo i mechanických nůžek, které však způsobovaly nežádoucí deformace předlitku.

1.5 Současný stav vývoje metody plynulého odlévání oceli

Metoda plynulého odlévání oceli se od doby svého průmyslového rozšíření od 50. let 20. století stala značně vyspělou výrobní technologií. V současné době se rozvoj této metody zaměřuje na vývoj licích strojů, které umožňují odlévat předlitek tvaru, který je blízký tvaru finálního výrobku. Snahou je tedy minimalizace tváření odlitého předlitku (produktu plynulého odlévání) např. válcováním při výrobě hutnických produktů. Zmíněné progresivní metody odlévání a licí stroje se nazývají typu *near-net-shape* [35]. Do uvedené kategorie patří především odlévání tenkých předlitků, v limitním případě odlévání tenkých plechů.

Odlévání tenkých bram, tzv. *thin-slab casting* je v současné době v rychlém vývoji [35]. Podstatou metody je odlévání tenkých bram o tloušťce od 40 mm do 80 mm. Z důvodu zachování produktivity výroby probíhá odlévání tenkých bram licí rychlostí 4–20 m min⁻¹. Výhodami odlévání tenkých bram jsou především nižší energetická náročnost z důvodu menšího tváření (válcování) za tepla a nižší investiční náklady na ZPO. Metoda *thin-slab* odlévání má v současné době četné využití v průmyslovém měřítku.

Odlévání tenkých pásů (plechů), tzv. *strip casting* je druhou hlavní oblastí metod *near-net-shape* odlévání [35]. Principem je odlévání velmi tenkých pásů a plechů, které není nutné dále válcovat za tepla, ale postačuje válcování za studena. Typická tloušťka odlévaného předlitku (pásu, plechu) je od 5 mm do 20 mm (odlévání mezi dva rotující válce), ale je možné dosáhnout dokonce tloušťky méně než 1 mm (odlévání na jeden rotující válec) [35]. Pro dosažení produktivity výroby je nutné odlévat vysokou licí rychlostí 10–40 m min⁻¹. Vlivem vysoké licí rychlosti je nutné použít velmi intenzivní chlazení pro rychlou (okamžitou) solidifikaci oceli, což vede ke vzniku jemné mikrostruktury oceli s malým obsahem segregací. Metoda *strip casting* je v současné době stále ve vývoji a tedy prozatím průmyslově nerozšířená. Avšak několik oceláren využívající tuto metodu pro odlévání uhlíkových a nerezových ocelí lze již nalézt v USA [35].

Současný vývoj se rovněž zabývá kvalitou odlévaných předlitků a snižováním zmetkovitosti. Elektromagnetické míchací zařízení (EMS¹) se v posledních letech stalo běžnou součástí nových licích strojů. EMS je technologie, která umožňuje promíchávat tekuté jádro odlévaného předlitku pomocí elektromagnetických sil indukovaných v tekutém jádru elektromagnetickou indukcí. Hlavním významem elektromagnetického míchání je homogenizace tekutého jádra, která vede k vyšší kvalitě odlité oceli² a lepšímu odvodu tepla z předlitku [35]. Hlavní nevýhodou EMS jsou především vysoké pořizovací náklady.

Metoda *soft reduction* je další stále se rozvíjející a rozšiřující metodou pro zlepšení především středové kvality odlévaných předlitků. Principem *soft reduction* je mechanické stlačení (deformace) předlitku pomocí dvojic protilehlých válců v místě solidifikace posledního zbytku taveniny v jádře předlitku (tj. v oblasti mushy zóny), které umožňuje efektivně zvýšit kvalitu ve středu (jádre) předlitku a redukovat výskyt segregací a porozity [35].

1.6 Současný stav počítačového modelování, optimalizace a optimálního řízení plynulého odlévání oceli

Zvyšovat kvalitu, snižovat náklady a zlepšovat efektivnost a konkurenceschopnost při plynulém odlévání oceli si dnes již nelze představit bez použití metod optimalizace a optimálního řízení. Základem optimalizace jsou pak numerické modely pro řešení teplotních polí odlévaných předlitků, protože není možné zkoumat a ověřovat nastavení licího stroje a dalších vlivů experimentálně přímo během výroby při provozu licího stroje.

¹electromagnetic stirring

²snížení vzniku povrchových i podpovrchových vměstků, snížení výskytu vnitřních vad, zlepšení makrostruktury (sloupcovité × rovnoosé dendrity), snížení výskytu středové segregace a porozity [68]

Počítačové modely z oblasti plynulého odlévání oceli jsou nejčastěji sestaveny použitím v současné době známých a dobře rozvinutých matematických metod, např. metodou konečných diferencí, kontrolních či konečných objemů nebo metodou konečných prvků. V poslední době dochází rovněž k rozšiřování tzv. bezsítových metod. Tyto tzv. mesh-free metody se od všech výše uvedených vyznačují tím, že pro řešení není nutná diskretizace oblasti na elementy či prvky. Tato vlastnost je velkou výhodou, protože tvorba sítě, tzv. meshování, je často jednou z nejobtížnějších a časově nejnáročnějších částí numerického řešení úlohy. Besítové metody místo sítě vyžadují pouze libovolné rozmístění bodů v řešené oblasti a v těchto bodech se pak konstruuje přibližné řešení. Výhodou tedy je snadné hustší rozmístění bodů do míst, kde je nutné zpřesnit řešení (např. v místech s velkými teplotními gradienty), a naopak řidší rozmístění bodů v místech s malou změnou sledované veličiny. Výhodou těchto metod je zmíněná možnost libovolného rozmístění bodů v oblasti bez nutnosti meshování. Další výhodou je také jejich rychlost a efektivnost. Nevýhodou je naopak jejich relativní složitost, náročnější matematická podstata a problémy v souvislosti s okrajovými podmínkami úlohy [32].

Implementací modelů teplotního pole a jejich použití v problematice plynulého odlévání oceli se zabývala řada autorů, viz např. modely solidifikace a teplotního pole plynulého odlévání např. [40, 15, 50, 16, 64], implementace automatického chladicího systému sekundární zóny sochorového ZPO např. [5], model chladicího systému plynulého odlévání např. [43], modelování a optimalizace provozu ZPO genetickým algoritmem [48], numerická analýza sekundárního chlazení ZPO [7], numerická analýza tepelných procesů v krystalizátoru např. [3].

Problematikou optimalizace provozu lícího stroje a implementací optimalizačních algoritmů se rovněž zabývalo velké množství výzkumníků. Pro plynulé odlévání oceli je charakteristické relativně velké množství různých matematických metod a přístupů, které byly s větším či menším úspěchem použity pro optimalizaci provozu lícího stroje. Tyto přístupy zahrnují řízení provozu lícího stroje pomocí numerického modelu např. [43, 4, 16, 65, 55, 23], optimalizace plynulého odlévání použitím genetických algoritmů např. [48, 71, 39], optimalizace metodami umělé inteligence např. [6], optimalizace nastavení sekundární chladicí zóny např. [36, 67], optimalizace procesu soft reduction např. [33], využití fuzzy logiky pro optimalizaci odlévání např. [54, 38], aplikace metod vícerozměrné statistické analýzy např. [70], optimalizace výšky hladiny taveniny v krystalizátoru např. [22], tepelná analýza krystalizátoru pomocí metody konečných objemů a genetických algoritmů [3], optimální chladicí strategie pro lití s různými lícími rychlostmi s využitím metod prohledávání stavového prostoru např. [8], optimální řízení sekundárního chlazení podle lící rychlosti např. [10], optimalizace sekundárního chlazení pomocí prediktivního řízení [21], použití regresního modelu pro optimální distribuci chladicí vody v sekundárním chlazení [66], řízení plynulého odlévání pomocí optimalizace inspirované evolučním vývojem v přírodě [12], optimalizace plynulého odlévání pomocí zpětnovazebního řízení [16] a multikriteriální optimalizace [34].

Stále otevřenou a aktuální problematikou v modelování a řízení plynulého odlévání oceli je výpočetní náročnost počítačových modelů a s tím související řízení a optimalizace provozu lícího stroje v reálném čase. Této problematice a překonání těchto problémů se detailně věnuje tato dizertační práce.

2

Cíle dizertační práce

- Rešerše přístupů matematického modelování teplotních polí plynule odlévaných předlitků.
- Vývoj a implementace počítačového modelu teplotního pole plynule odlévaného předlitku čtvercového formátu podle reálné geometrie licího stroje.
- Zpracování experimentálních dat měření součinitele přestupu tepla pod chladicími tryskami na tzv. teplém modelu a implementace zpracovaných dat do počítačového modelu teplotního pole.
- Zpracování reálných provozních dat z ocelárny a následná validace a verifikace počítačového modelu teplotního pole pomocí těchto dat.
- Vývoj a implementace počítačového systému pro optimální řízení provozu licího stroje se zaměřením na dynamické situace během odlévání.
- Zhodnocení a porovnání dosažených výsledků a závěrů.

3

Matematický model teplotního pole plynule odlévaného předlitku a jeho paralelizace na grafických kartách

V současné době vedou požadavky na zvyšování kvality, snižování nákladů a zlepšení efektivity a konkurenceschopnosti k nutnosti optimálního řízení zařízení pro plynulé odlévání. Toho není možné dosáhnout bez implementace numerických modelů pro řešení teplotních polí odlévaných předlitků, protože není možné zkoumat a ověřovat nastavení licího stroje a dalších vlivů experimentálně přímo během výroby při provozu ZPO. Numerické modely teplotního pole jsou tedy následně využity metodami optimálního řízení a optimalizačními algoritmy pro stanovení optimálních parametrů ZPO při daném stavu zařízení a dalších okolností. Autor dizertační práce své výsledky vývoje a implementace matematických modelů pro plynulé odlévání a jejich použití pro analýzu tepelného chování předlitku při plynulém odlévání publikoval na vědeckých konferencích a v odborných časopisech [27, 24, 28, 59, 29, 30, 56, 58].

3.1 Model teplotního pole s fázovými změnami

Z fyzikálního hlediska se při plynulém odlévání a jeho numerickém modelování jedná o problematiku přenosu tepla a látky v nestacionárním režimu, ve kterém se uplatňuje především mechanismus kondukce [19]. Ostatní mechanismy vedení tepla, tedy konvektivní a radiační přenos, pak hrají roli především v okrajových podmínkách úlohy [19]. Do numerického modelu je navíc nutné zahrnout i vliv fázových změn, ke kterým při ochlazování oceli dochází. Mezi fázové změny patří změny skupenství, tj. přechod z kapalné fáze do pevné, a změny struktury v pevném stavu. Důsledkem těchto fázových změn stavu materiálu je vývin latentního tepla, které významně ovlivňuje celý proces solidifikace odlévaného předlitku [52].

Pro modelování vývinu latentních tepel skupenských a strukturálních změn byla použita metoda entalpie. Objemová entalpie je definována vztahem [52]

$$H(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T \left(\rho c - \rho L_f \frac{\partial f_s}{\partial \theta} \right) d\theta, \quad (3.1)$$

kde ρ je hustota, L_f je latentní teplo fázové přeměny, f_s je zlomek podílu tuhé fáze a T_{ref} je zvolená referenční teplota.

Zavedením objemové entalpie do rovnice vedení tepla a přidáním členu $v_z \frac{\partial H}{\partial z}$ zohledňující pohyb předlitku v licím stroji lze odvodit Fourierovu-Kirchhoffovu rovnici [53, 52], která popisuje teplotní pole odlévaného předlitku v kartézských souřadnicích:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (3.2)$$

kde $T(x, y, z, t)$ je teplota v bodě (x, y, z) a čase t , $H(x, y, z, t)$ představuje entalpii v bodě (x, y, z) a čase t , k je tepelná vodivost a v_z je licí rychlost ve směru lití, tj. osy z .

V případě radiálního ZPO je vhodné Fourierovu-Kirchhoffovu rovnici (3.2) pro obloukovou část transformovat zavedením cylindrických souřadnic (r, ϕ, ω) na tvar

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial \omega} \left(k \frac{\partial T}{\partial \omega} \right) + v_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial \phi}. \quad (3.3)$$

3.2 Počáteční a okrajové podmínky modelu teplotního pole

Protože je rovnice (3.2), resp. (3.3), popisující nestacionární tepelné chování předlitku parciální diferenciální rovnicí druhého řádu, je nutné ke korektní formulaci matematického modelu doplnit rovnici (3.2), resp. (3.3), počáteční a okrajovými podmínkami [19].

Počáteční podmínka. Protože matematický model teplotního pole odlévaného předlitku popisuje nestacionární děj v čase, je nutné pomocí počáteční podmínky [11, 19] $T(\mathbf{x}, t = 0) = T_0(\mathbf{x})$ definovat stav předlitku, tj. teplotu v každém jeho bodě $T(\mathbf{x}, 0)$, v počátečním okamžiku $t = 0$, kdy začínáme proces odlévání a solidifikace předlitku sledovat.

Okrajové podmínky. Pro popis tepelné interakce odlévaného předlitku s okolím se používají okrajové podmínky, které lze kategorizovat do třech základních skupin dle veličiny a mechanismu přenosu tepla, které se v nich uplatňují [11, 2].

- Okrajovou podmínkou *I. druhu*, rovněž nazývanou podmínkou *Dirichletovou* [11, 2], je předepsána teplota na povrchu tělesa ve tvaru $T(\mathbf{x}, t)|_{\text{povrch}} = f(\mathbf{x}, t)$. Tento typ podmínky se v matematickém modelu uplatňuje v okrajové podmínce $T(\mathbf{x}, t)|_{\text{meniskus}} = T_\ell$ předepisující teplotu na menisku, která je rovna lící teplotě T_ℓ .
- Okrajová podmínka *II. druhu*, která je často nazývána podmínkou *Neumannovou* [11, 19], určuje měrný tepelný tok \dot{q} na povrchu tělesa. Podle Fourierova zákona lze tuto podmínku formulovat jako $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \dot{q}(\mathbf{x}, t)$. Speciálním případem je pak tepelně izolovaný povrch, kdy $\dot{q} = 0$. Neumannova okrajová podmínka se v modelu vyskytuje v podmínce $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \dot{q}(\mathbf{x}, t)$ popisující odvod tepla z krystalizátoru. V rovině symetrie předlitku a v místě dělení předlitku na výstupní části lícího stroje pak platí $\dot{q} = 0$.
- Okrajová podmínka *III. druhu*, nazývaná také podmínkou *Newtonovou* nebo *Robinovou* [11, 2], popisuje přenos tepla *konvekcí* na rozhraní povrchu tělesa a pohybující se tekutiny podle vztahu $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T - T_\infty)$.

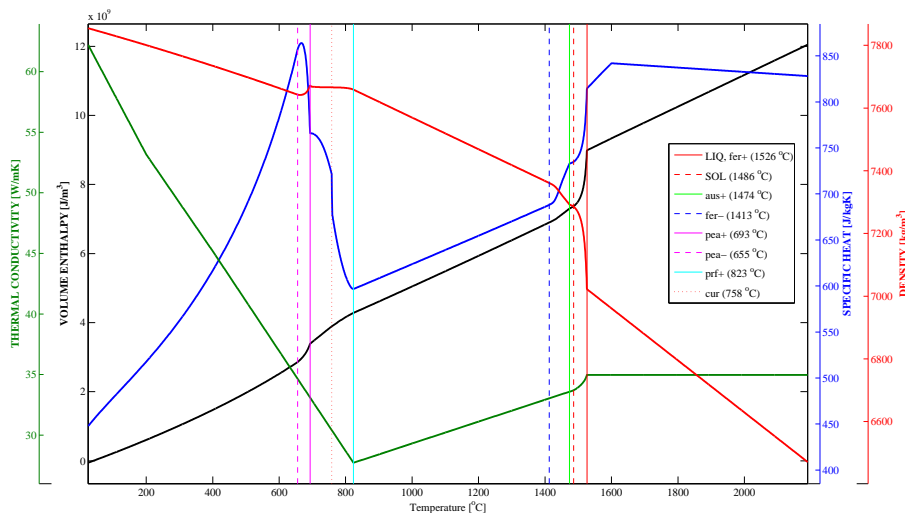
Do podmínky III. druhu se obvykle zahrnuje i přenos tepla z předlitku *radiací* (zářením, sáláním), který je na základě Stefanova-Boltzmannova zákona [19] kvantitativně popsán vztahem $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4)$, kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a ε je emisivita povrchu. Okrajovou podmínku v sekundární a terciární chladicí zóně lze tedy souhrnně zapsat jako kombinaci konvektivního a radiačního mechanismu přenosu tepla: $-k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = h(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_\infty^4)$.

3.3 Geometrické a fyzikální podmínky modelu teplotního pole

Kromě rovnice popisující vlastní děj vedení tepla v předlitku doplněné o počáteční a okrajové podmínky je nutné matematický model teplotního pole odlévaného předlitku dále rozšířit o podmínky geometrické a fyzikální. Souhrnně se podmínky počáteční, okrajové, geometrické a fyzikální nazývají podmínkami *jednoznačnosti* úlohy.

1. *Geometrické podmínky* modelu slouží k definici tvaru uvažovaného tělesa, jeho konkrétních rozměrů a rovněž např. k definici povrchů tělesa pro popis okrajových podmínek. V případě teplotního modelu předlitku jsou geometrickými podmínkami např. odlévaný formát a jeho rozměry, poloměr a délka licího oblouku v případě radiálního ZPO, délka a umístění krystalizátoru, délka sekundární a terciární chladicí zóny, umístění chladicích trysek apod.
2. *Fyzikální podmínky* slouží ke specifikaci fyzikálních, případně termofyzikálních vlastností uvažovaného tělesa. V případě odlévaného ocelového předlitku se jedná např. o teplotní závislost tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity, hustoty a entalpie oceli.

Zmíněné termofyzikální vlastnosti jsou v případě oceli závislé kromě teploty také na konkrétním chemickém složení. Proto je nutné tyto vlastnosti stanovovat pro každou značku oceli zvlášť dle konkrétního chemického složení. Termofyzikální veličiny oceli byly pro účely certifikační práce stanoveny pomocí solidifikačního software IDS, viz ilustrativní obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Závislost termofyzikálních veličin oceli S235JRH na teplotě stanovená použitím software IDS ve verzi 1.3.1.

3.4 Stanovení součinitele přestupu tepla pod chladicí tryskou

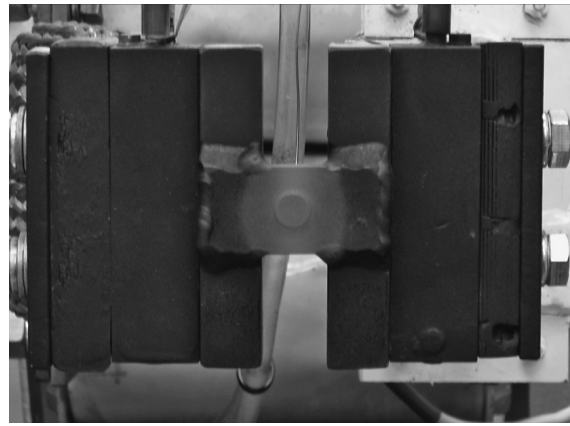
Součinitel přestupu tepla pod chladicími tryskami je možno odhadnout pomocí empirických vztahů nebo provést jeho experimentální měření. Příkladem experimentální metodiky je tzv. teplý model [18], viz obrázek 3.2. Tato experimentální metoda je založena na použití experimentální ocelové desky, ve které jsou v těsné blízkosti chlazeného povrchu instalovány termočlánky. Během experimentu je deska postupně ochlazována pohybující se chladicí tryskou a probíhá časově závislý záznam průběhu teplot z termočlánků. Tyto teplotní průběhy jsou následně vstupem pro numerickou inverzní úlohu přenosu tepla, při které se inverzně stanovuje součinitel přestupu tepla tak, aby bylo dosaženo naměřených teplot. Jinou metodou je využití topného elementu, který je zahříván elektrickým proudem, viz obrázek 3.3. Na základě experimentu se pak stanovuje součinitel přestupu tepla pod chladicí tryskou na podle elektrického proudu, který je potřebný k udržení konstantní teploty topného elementu [44, 45].

3.5 Počítačová implementace modelu teplotního pole

Pro implementaci numerického modelu byla využita masivní paralelizace výpočetního jádra numerického modelu na grafické kartě, tzv. GPGPU. Z implementačního hlediska se jedná o model, jeho



Obrázek 3.2: Teplý model provozovaný v LPTaP na FSI VUT v Brně [18, 46].



Obrázek 3.3: Topný element pro měření součinitele přestupu tepla [44, 45].

části zajišťující preprocessing a postprocessing jsou implementovány v MATLABu, ale vlastní výpočetní jádro modelu je implementováno v programovacím jazyku C++ a zkompileováno CUDA C++ kompilátorem, který zajišťuje jeho spustitelnost na grafických kartách NVIDIA. Paralelizaci modelu na grafické kartě a následným benchmarkingem bylo zjištěno, že paralelizovaný GPU model je mnohonásobně výpočetně výkonnější než CPU verze modelu implementovaná v MATLABu.

Koncepce paralelizovaného modelu zahrnuje řídicí část modelu, která „běží“ na hostu v MATLABu. Řídicí část zajišťuje preprocessing i postprocessing a provádí spuštění výpočetního jádra. Výpočetní jádro modelu je implementováno v CUDA C++, kterým je kód v jazyku C++ využívající speciální CUDA funkce umožňující běh na grafické kartě. Vlastní CUDA jádro (kernel) musí být pro spuštění na grafické kartě zkompileováno CUDA kompilátorem `nvcc`.

Jádro je koncipováno tak, aby provádělo *jednu* časovou iteraci výpočtu. Důvodem je především skutečnost, že je nutné přepočítat okrajové podmínky (zejména součinitel přestupu tepla pod chladicími tryskami), které jsou závislé na teplotě povrchu předlitku. V případě předpokladu konstantních okrajových podmínek by bylo možné implementovat jádro s vnitřním časovým cyklem, tj. výpočtem v čase (např. do stacionárního stavu), aniž by bylo nutné jádro po každé časové iteraci ukončit, což by vedlo pravděpodobně k dalšímu zrychlení výpočtů a ke zkrácení výpočetního času. Tento koncept však nebyl v rámci řešení dizertační práce ověřen ani testován. Řídicí část lze v bodech charakterizovat následujícím výčtem:

1. Proveď dle požadavků uživatele dělení předlitku na $n_x \times n_y \times n_z$ kontrolních objemů. Dle uživatele nastav časový krok Δt .
2. Na hostu načti/zpracuj počáteční podmínku (počáteční teplotní pole) a pro tuto počáteční podmínku načti/zpracuj okrajové podmínky závislé na teplotním poli (součinitel přestupu tepla pod tryskami a přirozené konvekce, emisivitu povrchu). Proveď potřebný preprocessing.
3. Alokuj paměť na grafické kartě metodou `gpuArray()` pro veškeré potřebné proměnné zahrnující teplotní pole, okrajové podmínky a další parametry výpočtu.
4. Překopíruj data z hosta do všech výše uvedených proměnných v paměti grafické karty.
5. Podle počtu kontrolních objemů $n_x \times n_y \times n_z$ a možností zařízení GPU nastav počet bloků `blocks` a jejich velikost `threads`.
6. Pokud tak již nebylo učiněno, zkompilej výpočetní jádro (kernel) kompilátorem `nvcc` pro daný typ zařízení a operační systém.
7. V časovém cyklu spusť v každé iteraci zkompileované jádro na grafické kartě. Každé vlákno mřížky nyní představuje jeden konkrétní kontrolní objem předlitku a s ním spjaté výpočty. Podle požadavků aktualizuj okrajové podmínky a parametry modelu.

8. Po ukončení časové smyčky překopíruj potřebná data z paměti grafické karty do paměti hosta a proveď potřebný postprocessing.
9. Pokud je výpočet u konce, uvolni alokovanou paměť na grafické kartě.

V jádře (kernelu) `kernel.cu` je implementován samotný výpočet teplotního pole metodou entalpie pro všechny kontrolní objemy předlitku. Základním principem výpočtů a programování v CUDA je skutečnost, že jádro je implementováno pouze v jedné verzi, které je ale vykonáváno všemi vlákny. Při výpočtu teplotního pole odlévaného předlitku je zapotřebí iteračně řešit iterační rovnice, které ale mají různý konkrétní tvar dle typu kontrolního objemu (vnitřní, roh, hrana, povrchu v krystalizátoru, povrchu v sekundárním chlazení/terciárním chlazení apod.). Jádro tedy musí obsahovat kód, který zabezpečí jednoznačnou identifikaci počítaného objemu tak, aby byly všechny kontrolní objemy předlitku přepočítány podle odpovídajících vztahů.

Benchmarking GPU modelu. Pro vzájemné srovnání výpočetního výkonu mezi standardním CPU modelem a paralelizovaným GPU modelem byla navržena testovací úloha, která byla modely řešena. Testovací úloha zahrnovala počáteční teplotní pole nastavené na teplotu 1550 °C. Parametry licího stroje byly nastaveny v souladu s licím strojem v Třineckých železárnách pro ocel S275JR. Testovací úloha zahrnovala výpočet stacionárního stavu teplotního pole ze stavu počátečního, který nastal za 28 minut reálného času. Pro benchmarking byla použita GPU NVIDIA Tesla C2075 (448 CUDA jader, každé o frekvenci 1,15 GHz) se 6 GB RAM paměti.

Pro srovnání výpočetního výkonu bylo uvažováno 6 různých hustot výpočetní sítě, tj. počet kontrolních objemů. Nejhrubší síť byla síť o 10^5 kontrolních objemech, nejjemnější uvažovaná síť pak obsahovala 3 miliony kontrolních objemů. Mezi uvedenými mezními hustotami sítě byly zvoleny 4 další o $2 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$, 10^6 a $2 \cdot 10^6$ kontrolních objemech. Přehled uvažovaných výpočetních sítí a výsledky benchmarkingu jsou uvedeny v tabulce 3.1. Z těchto výsledků benchmarkingu je patrné, že grafické karty a paralelizované výpočty GPGPU nabízí ohromný potenciál a výkon pro výpočet matematických modelů teplotních polí. Provedený benchmarking ukázal, že paralelizovaný model umožňuje zrychlit výpočty řádově v desítkách. Toto výrazné zrychlení přináší poměrně nové možnosti využití modelů v ocelárnách, zejména pro real-time aplikace vyžadující iterativní vyhodnocování modelu teplotního pole.

Tabulka 3.1: Benchmarking GPU modelu plynule odlévaného předlitku.

Konfigurace sítě	Výpočetní čas CPU modelu	Výpočetní čas GPU modelu	Zrychlení GPU vs. CPU
$12 \times 12 \times 728$	1 min 24 s	2,13 s	39,4×
$15 \times 15 \times 890$	2 min 39 s	3,55 s	44,8×
$21 \times 21 \times 1\,133$	7 min 5 s	8,11 s	52,4×
$30 \times 30 \times 1\,133$	15 min 33 s	16,75 s	56,9×
$30 \times 30 \times 2\,205$	66 min 27 s	60,08 s	66,5×
$37 \times 37 \times 2\,205$	202 min 59 s	224,24 s	67,1×

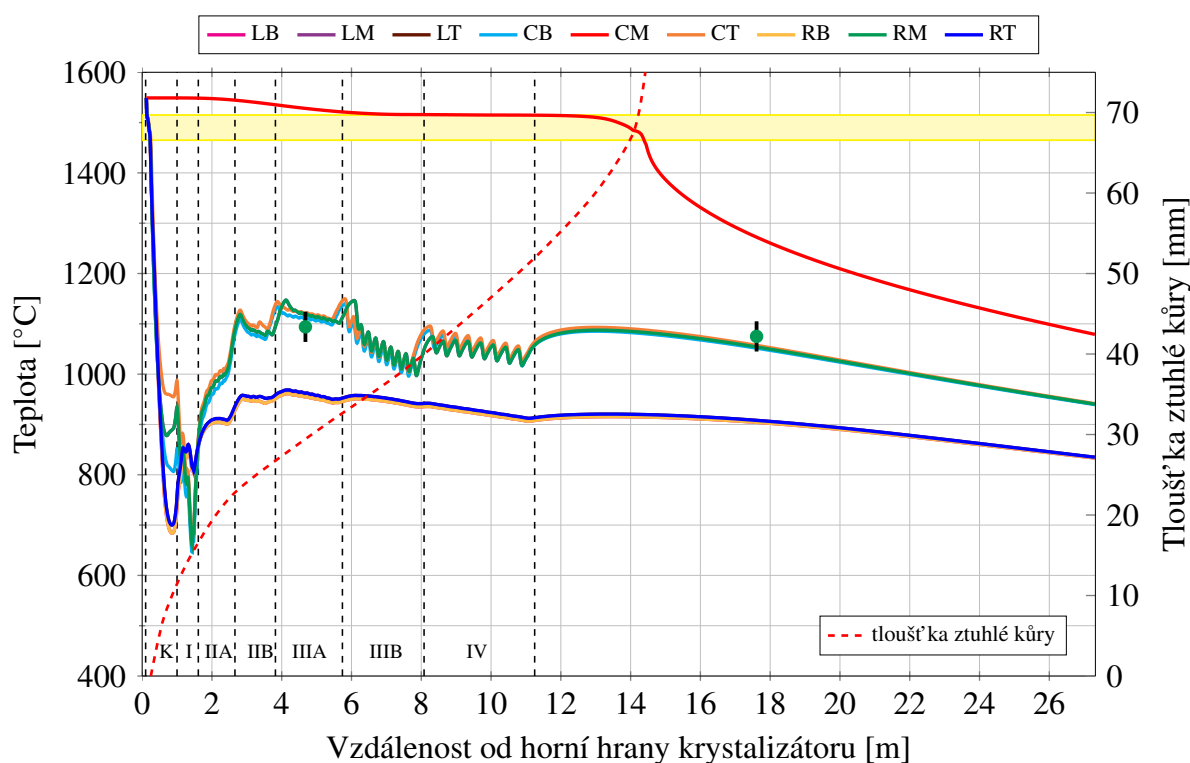
3.6 Validace a verifikace počítačového modelu

Ověření činnosti teplotního modelu bylo provedeno pomocí reálných provozních dat z Třineckých železáren, která byla zpracována: odlévaná značka oceli a její chemické složení podle vzorku odebraného z mezipánve, licí rychlost, licí teplota v mezipánvi, výška hladiny v krystalizátoru, průtok chladicí vody krystalizátorem, teploty vody na vstupu do krystalizátoru a na výstupu z krystalizátoru, průtoky jednotlivými okruhy sekundárního chlazení, teploty měřené pyrometry.

Tabulka 3.2: Parametry lití pro validaci tavby oceli TERMEX-1.

Ocel	Licí rychlost	Krystalizátor			
		Licí teplota	Hladina	Průtok	T_{in}/T_{out}
TERMEX-1	2,78 m min ⁻¹	1 549 °C	120 mm	1 790 ℓ min ⁻¹	33,5/42,1 °C
Průtoky chladicími okruhy sekundárního chlazení [ℓ min ⁻¹]					
Zóna I	Zóna IIA	Zóna IIB	Zóna IIIA	Zóna IIIB	Zóna IV
207,8	154,0	84,4	88,1	74,9	44,8

Pro validaci modelu byly vybrány tři charakteristické značky oceli odlévané v Třineckých želeárnách: nízkouhlíková ocel 9SMN28, středně uhlíková ocel TERMEX-1 a vysokouhlíková ocel K70CAR, pro které bylo k dispozici dostatečné množství dostupných provozních dat z jejich taveb. Pro všechny tavby byla dostupná dvě pyrometrická měření povrchových teplot [42] v ose boční stěny předlitku pomocí dvou pyrometrů umístěných v sekundární chladicí zóně v okruhu IIIA a na výběhu za tažně-rovnací stolicí. Parametry pro ověření modelu použitím tavby oceli TERMEX-1 jsou uvedeny v tabulce 3.2 a vypočítané teplotní pole, resp. průběh teplot po délce stroje včetně vyznačení teplotních intervalů měření pyrometrů jsou zobrazeny na obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Průběh teplot podél předlitku pro tavbu oceli TERMEX-1.

Jak je patrné z výsledků teplotních průběhů, vyvinutý a implementovaný počítačový model poskytuje predikci teplotního pole odlévaného předlitku, která se dobře shoduje s teplotami měřenými pyrometry během taveb vybraných ocelí. Z výše uvedeného tedy plyne, že implementovaný počítačový model teplotního pole poskytuje dobrou a přesnou predikci teplotního pole odlévaného předlitku, která se shoduje s výsledky z provozního měření pyrometry.

4

Optimální řízení sekundárního chlazení pomocí prediktivního řízení

OPTIMALIZACE a optimální řízení se řadí mezi fundamentální nástroje umožňující zefektivnění výrobních procesů. Vyrábět s nižšími náklady, malou zmetkovitostí, s nižší spotřebou energie a surovin při dodržení kvality a jakosti produktů patří k základním snahám výrobců a producentů širokého spektra průmyslové činnosti. Dosažení zmíněných cílů významným způsobem přispívá k prosperitě a konkurenceschopnosti podniku.

Problematika optimálního řízení a provozu ZPO vyžaduje nutnost implementovat techniky optimalizace a optimálního řízení, které při své činnosti využívají numerického modelu teplotního pole. Numerický model lze při optimalizaci provozu lícího stroje považovat za numerický senzor, který nahrazuje experimentální měření.

Pro návrh a implementaci řídicího systému plynulého odlévání pro řešení řízení dynamických stavů při odlévání byl použit přístup optimálního řízení *model-based predictive control* (tzv. prediktivní řízení pomocí počítačového modelu). Nosná část kapitoly je tvořena původními optimalizačními výsledky provozu lícího stroje při dočasných a náhlých změnách lících podmínek, které byly jedním z hlavních cílů dizertační práce.

Autor dizertační práce publikoval výsledky se zaměřením na optimalizaci plynulého odlévání a úpravy konfigurace lícího stroje na mezinárodních konferencích a odborných časopisech [26, 25, 63, 61, 62, 60, 57].

4.1 Optimální řízení model-based predictive control

Práce [20, 21], následná diskuze s autorkou těchto prací a dosahovaný výpočetní výkon vyvinutého velmi rychlého modelu teplotního pole využívajícího pro výpočet grafické karty se staly základní inspirací a východiskem pro vyvinutý řídicí systém prezentovaný v této práci. V této kapitole je stručně popsána implementace vyvinutého model-based predictive control systému. Kapitulu pak uzavírá část 4.3, ve které je prezentována ukázka optimálního řízení provozu lícího stroje použitím vyvinutého prediktivního řídicího systému pro dynamickou změnu letmé výměny mezipánve.

4.1.1 Prediktivní řízení pomocí počítačového modelu

Model-based predictive control – prediktivní řízení pomocí počítačového modelu – patří do skupiny pokročilých řídicích a optimalizačních metod, které nachází široké uplatnění v inženýrských aplikacích, např. viz [51, 47, 41, 37, 31, 13, 1]. Obecně se prediktivní řízení považuje za pokročilejší metodu než využití značně rozšířené PID regulace. Charakteristickým rozdílem mezi prediktivním řízením a PID regulací je časový úsek, který je pro regulaci použit. V případě PID regulace probíhá řízení na základě odezvy řízeného systému na provedené změny na vstupu, tj. PID regulátor řídí podle vývoje systému v minulosti. Naopak prediktivní řízení řídí proces podle odhadu (predikce) reakce, kterou by systém zareagoval na změny na vstupu. Takové chování lze ilustrovat analogií k řízení automobilu: PID regulátor provádí řízení podle pohledu zpět (do minulosti) do zpětného

zrcátka, zatímco prediktivní řízení používá pro řízení čelní sklo automobilu a pohled vpřed (do budoucnosti).

4.2 Implementace model-based predictive control systému pro řízení dynamického provozu licího stroje

Hlavním cílem bylo vytvořit řídicí systém sekundárního chlazení, který bude umožňovat stanovit časově závislé průtoky jednotlivými chladicími okruhy pro dynamické změny licích podmínek. Dynamickými změnami jsou myšleny stavy, při kterých dochází během relativně krátkého časového okamžiku k výrazné změně podmínek odlévání, jenž je charakterizovaná především výraznými změnami licí rychlosti. Mezi tyto dynamické změny lze zařadit např. průval, letmou výměnu mezipánve nebo skokovou změnu licí rychlosti.

Jako model využívaný prediktivním řídicím systémem byl použit vyvinutý a verifikovaný GPU numerický model teplotního pole s geometrií licího stroje v Třineckých železárnách.

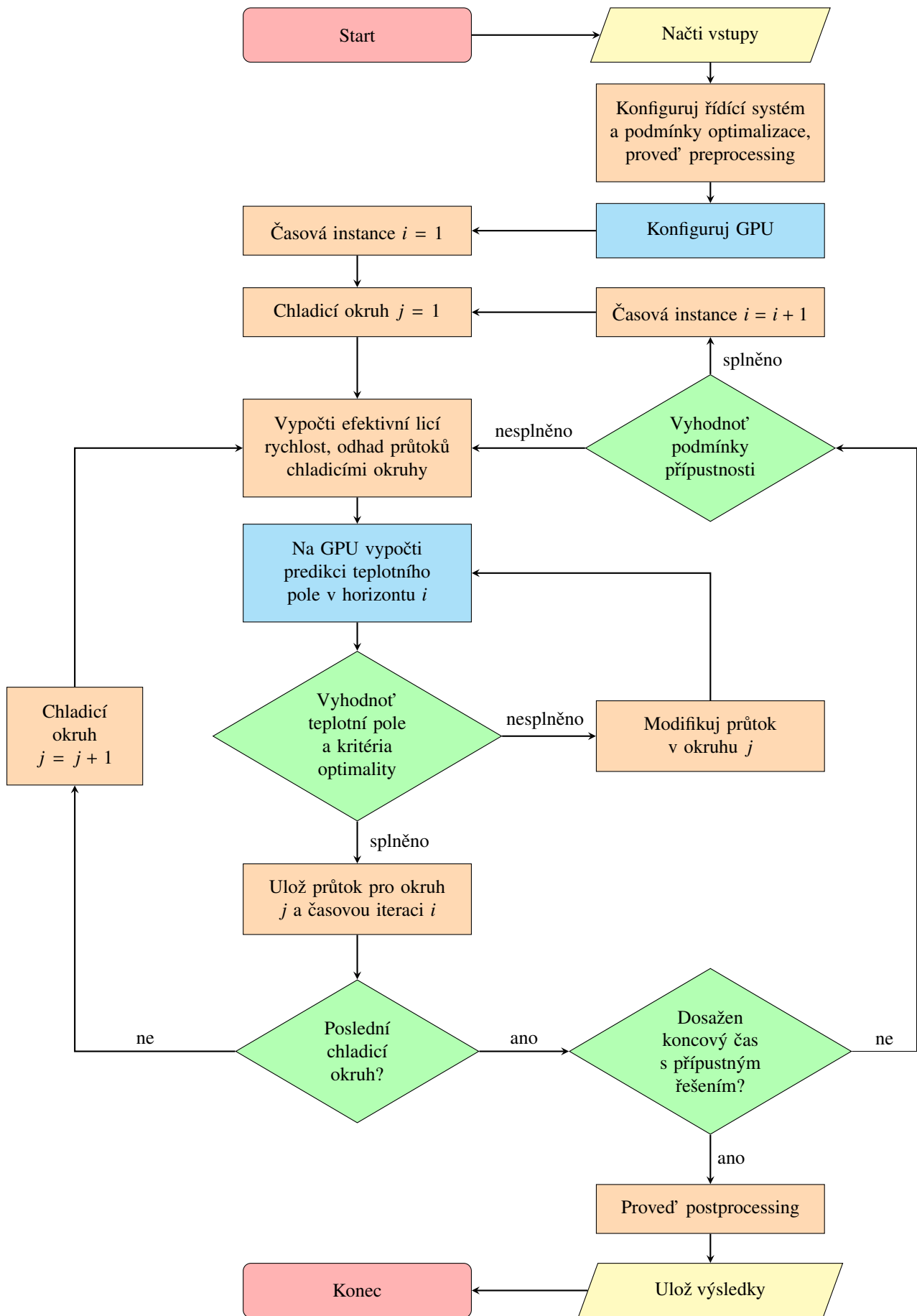
Řídicími veličinami, tj. veličinami, pro které jsou hledány optimální hodnoty v čase, je 6 objemových průtoků chladicí vody v jednotlivých okruzích sekundárního chlazení. Základní otázku, na kterou prediktivní řídicí systém dává odpověď, lze tedy formulovat jako: „Jak by měly být upraveny průtoky v jednotlivých chladicích okruzích sekundárního chlazení během jisté dynamické změny licích podmínek tak, aby teplotní pole předlitku během této změny zůstalo v předem specifikovaném optimálním stavu?“

Řízenými veličinami byly zvoleny průměrné povrchové teploty v jednotlivých okruzích během odlévání. Střední povrchovou teplotou okruhu je zde myšlena střední hodnota z teplot v povrchových kontrolních objemech v ose předlitku náležících do daného chladicího okruhu. Protože se průběh teplot a tedy i středních povrchových teplot na všech čtyřech stěnách předlitku příliš neliší, bylo do řídicího systému implementováno řízení průměrné povrchové teploty pouze na vnitřním oblouku (malém rádiu) předlitku. Povrch vnitřního oblouku lze rovněž označit za povrch nejvíce náchylný ke vzniku povrchových vad a proto je zapotřebí jeho povrchové teploty sledovat a řídit s vyšší pozorností. V případě požadavků však lze rozšířit řízené veličiny o střední povrchové teploty na dalších stěnách předlitku. Snahou řídicího systému tedy je během dynamické změny podmínek odlévání měnit průtoky v jednotlivých chladicích okruzích tak, aby střední povrchové teploty v jednotlivých chladicích okruzích byly totožné s předem definovanými optimálními hodnotami, tzv. set-pointy. Pro definici těchto set-pointů byl použit stacionární stav odlévání před dynamickou změnou, který byl rovněž považován za počáteční stav pro simulaci. V případě požadavku je samozřejmě možné tyto set-pointy a jejich hodnoty měnit, a to i v čase. Set-point se považuje za splněný, jestliže je absolutní velikost rozdílu průměrné povrchové teploty v okruhu a předepsané optimální povrchové teploty v okruhu menší než zvolená tolerance ε .

Omezeními pro řídicí systém jsou omezení (rozsah) velikosti průtoků v jednotlivých chladicích okruzích, omezení (rozsah) povolené metalurgické délky předlitku a omezení (rozsah) povrchové teploty v místě rovnání. V případě požadavků je možné do řídicího systému implementovat další např. technologická omezení.

Podmínky optimality řízení v daném časovém horizontu jsou tedy tvořeny splněním set-pointů s danou tolerancí pro povrchové teploty v jednotlivých okruzích, metalurgické délky v povoleném rozsahu a povrchové teplota v místě rovnání licího stroje v povoleném rozsahu.

Řídicí systém je implementován v MATLABu využívající model teplotního pole předlitku, který je počítán na grafické kartě. Princip činnosti prediktivního řídicího systému pro řízení dynamického provozu licího stroje je zobrazen ve vývojovém diagramu na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Vývojový diagram činnosti model-based predictive control systému pro optimální řízení dynamického provozu licího stroje.

4.3 Optimální řízení dynamického provozu lícího stroje pomocí model-based predictive control systému

Pro demonstraci činnosti navrhnutého a implementovaného model-based predictive control systému pro optimální řízení dynamického provozu lícího stroje bylo zvoleno pět modelových situací:

- (1) pozvolný lineární nárůst lící rychlosti,
- (2) skokový pokles lící rychlosti,
- (3) příznak vzniku průvalu v krystalizátoru,
- (4) odlévání nové tavby a
- (5) letmá výměna mezipánve lícího stroje.

Pro všechny případové studie byla použita středněuhlíková ocel TERMEX-1, pro kterou byl model validován a verifikován. Počátečním stavem předlitku pro optimalizační výpočty byl uvažován stacionární stav tavby. Tento tepelný stav předlitku byl rovněž při řízení dynamických změn považován za optimální stav, pomocí kterého byly stanoveny střední povrchové set-point teploty v jednotlivých chladicích okruzích.

Počítačový model teplotního pole odlévaného předlitku pro účely prediktivního řízení byl nakonfigurován totožně jako v případě jeho ověření a validace na geometrii lícího stroje v Třineckých železárnách odlévající sochory o průřezu 150×150 mm. Cílové set-point povrchové teploty optimálního řízení byly stanoveny ze stacionárního stavu, který byl použit jako počáteční stav simulací.

Řízení chladicích průtoků v okruzích sekundárního chlazení pomocí prediktivního řídicího systému bylo porovnáno s běžným postupem řízení pomocí chladicích křivek, při kterém jsou průtoky regulovány dle lící rychlosti (a teploty přehřátí).

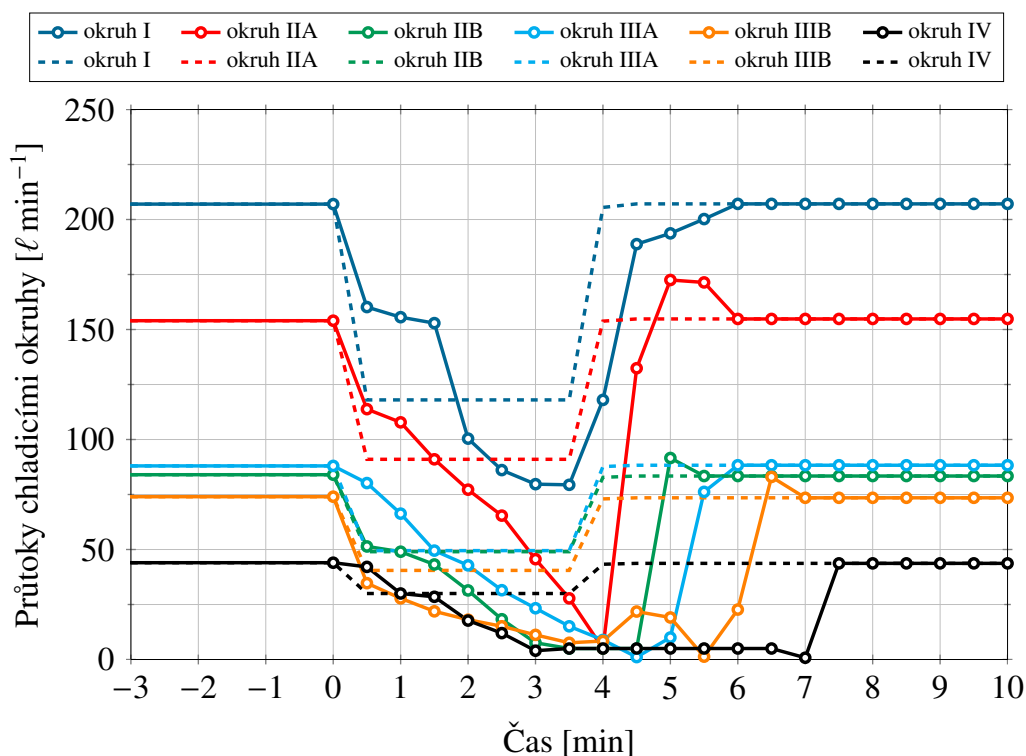
V následujícím oddíle jsou prezentovány výsledky prediktivního řízení pro případ letmé výměny mezipánve. Dosažené výsledky a způsob řízení lícího stroje je následně porovnán s běžným řízením pomocí chladicích křivek.

4.3.1 Případová studie s letmou výměnou mezipánve

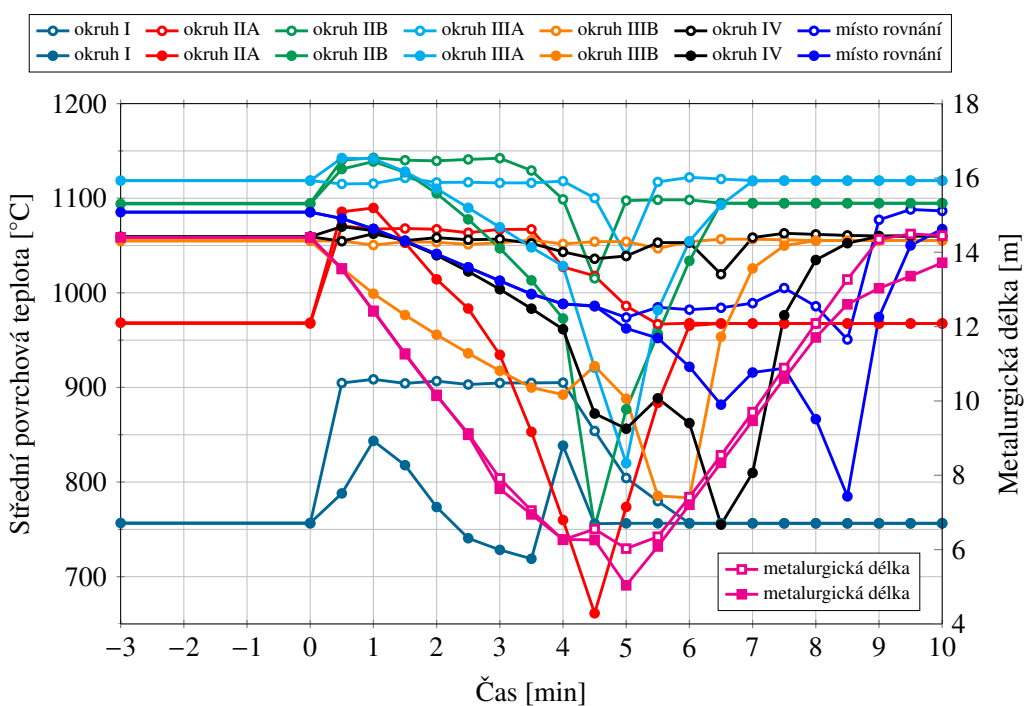
Případová studie je simulací dynamického stavu s letmou výměnou mezipánve o celkovém trvání simulace 15 minut. Při tomto provozním stavu výrazně poklesne lící rychlost na několik minut tak, aby byla umožněna výměna staré mezipánve na novou. Pro tuto dynamickou změnu byl zvolen lineární pokles z lící rychlosti $2,78 \text{ m min}^{-1}$ na $0,5 \text{ m min}^{-1}$ během 10 sekund, následné setrvání na této lící teplotě po dobu 220 sekund a následný lineární nárůst zpět na původní lící rychlost $2,78 \text{ m min}^{-1}$ během 10 sekund. Celková doba změny lící rychlosti během letmé výměny mezipánve tedy činila 4 minuty. Rozsah povolené metalurgické délky byl z důvodu značné dynamičnosti tohoto provozního stavu nastaven na $\langle 6 \text{ m}, 15 \text{ m} \rangle$. V případě letmé výměny mezipánve byla využita dočasná horní relaxace set-pointů pro střední povrchové teploty v okruzích I, IIA a IIB.

Časová závislost průtoků v jednotlivých chladicích okruzích sekundárního chlazení je pro obě metody řízení letmé výměny mezipánve zobrazena na obrázku 4.2. Z obrázku je patrné, že regulace obou metod probíhá odlišně. Při řízení dle chladicích křivek dochází ke změně jednotlivých průtoků pouze během skutečného poklesu lící rychlosti v čase 0–4 min. Naopak regulace v jednotlivých okruzích dle prediktivního řízení probíhá postupně a to se setrvačností úměrné vzdálenosti daného okruhu od krystalizátoru. Rovněž hodnoty průtoků při obou způsobech regulace jsou do značné míry odlišné.

Průběhy středních povrchových teplot v jednotlivých okruzích, místě rovnání a metalurgické délky jsou zobrazeny na obrázku 4.3. Jak je patrné z obrázku, při řízení dle chladicích křivek střední povrchová teplota v okruhu I sice osciluje, nicméně i v případě prediktivního řízení byla povolena



Obrázek 4.2: Srovnání řízení pro studii 5 s letmou výměnou mezipánve prediktivního systému (spojité křivky) a dle chladicích křivek (čárkované křivky): průtoky.



Obrázek 4.3: Srovnání řízení pro studii 5 s letmou výměnou mezipánve pomocí prediktivního systému (křivky s body s bílým středem) a dle chladicích křivek (křivky s plně vybarvenými body): střední povrchové teploty a metalurgická délka.

horní relaxace set-pointové teploty a dočasné zvýšení skutečné povrchové teploty. Nicméně v dalších chladicích okruzích IIA až IV dochází nejdříve (v první minutě od počátku výměny mezipánve) k navýšení středních povrchových teplot (v okruhu IIA dokonce až o cca 120°C), avšak dále následuje prudký pokles ve všech chladicích okruzích IIA–IV. V čase 4,5 min poklesne střední povrchová teplota v okruhu IIA dokonce až na 660°C a v okruhu IIB na teplotu 750°C, které jsou přibližně o 300°C nižší než optimální teploty. Podobné chování lze pozorovat rovněž ve zbývajících chladicích okruzích IIIA (pokles v čase 5 min na teplotu cca 820°C), IIIB (pokles v čase 5,5 min na teplotu cca 780°C) a IV (v čase 6,5 min pokles na teplotu cca 750°C). Naopak při prediktivní řízení sice během výměny mezipánve dochází k dočasnému zvýšení povrchových teplot v některých okruzích dle umožněné relaxace, nicméně teploty se postupně opět ustálí zpět na cílové set-point hodnoty. Teplota v místě rovnání při regulaci podle chladicích křivek výrazně poklesne až na teplotu cca 780°C, naopak při prediktivním řízení je dodržen dolní limit 950°C. Průběh metalurgické délky v čase je u obou způsobů řízení velmi podobný, pouze v nejkritičtějším čase 5 min je metalurgická délka při řízení chladicími křivkami asi o 1 m kratší.

Z výše popsaného tepelného chování předlitku během regulace dle chladicích křivek lze prohlásit tento způsob řízení za jednoznačně nevhodný a nežádoucí. Naopak prediktivní řídicí systém dokázal zaregulovat průtoky tak, že z počátku došlo sice ke zvýšení středních povrchových teplot v některých okruzích, postupně ale toto navýšení teplot vymizelo a ve všech okruzích bylo dosaženo cílových povrchových teplot. Rovněž teplota v místě rovnání a metalurgická délka mají při prediktivním řízení příznivější průběh v čase než v případě řízení chladicími křivkami.

Jak vyplývá z výše uvedeného, vyvinutý prediktivní řídicí systém umožňuje výrazně lepší řízení provozu lícího stroje s dynamickými změnami než řízení pomocí chladicích křivek. Vyvinutý predikční řídicí systém lze tedy považovat za dobrý nástroj pro řízení dynamického provozu lícího stroje.

Závěr

OPTIMÁLNÍ provoz a řízení lícího stroje pro plynulé odlévání oceli je v současné době nemyslitelné bez dokonalého porozumění fyzikální podstaty metody plynulého odlévání, numerických modelů teplotního pole plynule odlévaných předlitků a pokročilých metod optimalizace a optimálního řízení. Optimální řízení provozu lícího stroje patří k základním úlohám, které zásadním způsobem ovlivňují produktivitu výroby oceli, její kvalitu a jakost, konkurenceschopnost ocelárny a bezpečnost její pracovníků a rovněž celkový dopad výroby oceli na životní prostředí.

V rámci dizertační práce byla provedena rešerše metody plynulého odlévání oceli a její počítačové modelování. Základním východiskem matematického popisu plynule odlévaného předlitku je Fourierova-Kirchhoffova rovnice, která je fundamentální částí modelu teplotního pole, který vznikl v rámci dizertační práce. Pro modelování latentních tepel fázových změn bylo použito metody entalpie, především z důvodu její přesnosti a numerické stability. Numerický model plynule odlévaného předlitku byl vytvořen a diskretizační rovnice byly odvozeny pomocí časově explicitní metody kontrolních objemů, která poskytuje přímý fyzikální vhled a kontrolu při odvozování rovnic.

Matematický model teplotního pole a jeho numerické řešení je výpočetně velmi náročnou úlohou, která je dána především velikostí výpočetní sítě, nutností řešit nestacionární vývoj teplotního pole v čase a potřebou přepočítávat termofyzikální veličiny a okrajové podmínky v čase dle teploty oceli. Naopak pro optimalizaci a optimální řízení je vyžadován rychlý počítačový model, aby bylo umožněno provádět výpočty pro řízení a optimalizaci v reálném (pokud možno v co nejkratším) čase. Z uvedeného důvodu byla v rámci řešení dizertační práce provedena rešerše možností zrychlení výpočtu modelu pomocí jeho paralelizace. Jednou z možností je i vysoce masivní paralelizace na grafických kartách, které obsahují velké množství výpočetních jednotek a které jsou optimalizovány pro vykonávání identického kódu s různými daty. Přístup programování na grafických kartách (tzv. *general-purpose computing on graphics processing units*, GPGPU) NVIDIA s využitím výpočetní architektury CUDA byl použit pro implementaci počítačového modelu plynule odlévaného předlitku, čímž vznikl původní vysoce paralelizovaný GPU model. Při srovnání výpočetního výkonu paralelizovaného modelu provádějícího výpočet na grafické kartě a „obyčejného“ modelu počítajícího na CPU je paralelizovaný GPU model řádově v desítkách rychlejší než prostý CPU model.

Výpočetní výkon paralelizovaného GPU modelu byl využit pro vývoj systému pro prediktivní řízení plynulého odlévání oceli, který je prezentován v dizertační práci. Potenciál využití velmi rychlého paralelizovaného GPU modelu je však mnohem širší. Model lze použít pro optimalizační výpočty dalšími řídicími systémy nebo algoritmy, které matematický model teplotního pole využívají. Díky výraznému zrychlení modelu teplotního pole je rovněž možné do vyvinutého modelu zakomponovat i např. model tepelného napětí nebo model struktury, které jsou samy o sobě výpočetně velmi náročné. Existuje tedy realizovatelná možnost couplingu zmíněných modelů tak, že vzniklý model bude schopen počítat pole teplot, tepelného napětí a struktury v reálném čase. Takový model by otevřel další nové možnosti v oblasti řízení a optimalizace, např. s cílem minimalizovat tepelné napětí v předlitku nebo odlévat ocel s předem definovanou a požadovanou strukturou. Široké využití GPU modelu je rovněž i v reálném provozu v ocelárnách, např. pro případové studie, „předpočítávání“ provozních situací apod. Z výše uvedených důvodů a akademických i komerčních možností využití bude autor dizertační práce usilovat o patentní řízení a udělení ochranných patentových práv na vyvinutý GPU model teplotního pole plynule odlévaného předlitku. Tato skutečnost je také důvodem, proč dizertační práce neobsahuje CD se zdrojovými kódy počítačového modelu.

Přestože byl model nakonfigurován a ověřen pro geometrii a parametry lícího stroje v Třineckých železárnách, je možné model snadno adaptovat na libovolný radiální lící stroj odlévající předlitky čtvercového formátu. Větší úpravou je rovněž možné model upravit pro brambové lití. Model

umožňuje simulovat odlévání libovolné oceli, odvod tepla v krystalizátoru je možné pomocí váhové funkce libovolně specifikovat a model umožňuje pracovat s libovolnými chladicími tryskami, ke kterým jsou dostupná data z experimentálního měření, případně je možné použít empirickou definici součinitele přestupu tepla pod chladicími tryskami.

Přesnost numerického modelu je obecně do značné míry ovlivněna přesností vstupů do modelu. V případě modelu plynule odlévaného předlitku jsou jedním ze vstupů termofyzikální veličiny odlévané oceli. Z tohoto důvodu dizertační práce obsahuje základní přehled experimentálních metod a měřících přístrojů, které mohou být využity pro měření veličin ovlivňující teplotní pole předlitku. V dizertační práci je rovněž uvedena analýza zabývající se vlivem odchylek chemického složení na teplotně závislý průběh termofyzikálních veličin a utvářené teplotního pole.

Vyvinutý a implementovaný počítačový model teplotního pole a jeho činnost byly ověřeny pomocí provozních dat a měření povrchových teplot pyrometry na licím stroji v Třineckých železárnách. Pro validaci a verifikaci modelu byly zvoleny tři značky oceli s různým chemickým složením a s odlišným obsahem uhlíku, pro jejichž tavby byl dostatek provozních a experimentálních dat z pyrometrických měření: nízkouhlíková ocel 9SMN28 s obsahem uhlíku 0,07 wt. %, středněuhlíková ocel TERMEX-1 s obsahem uhlíku 0,18 wt. % a vysokouhlíková ocel K70CAR s obsahem uhlíku 0,68 wt. %. Termofyzikální veličiny ocelí byly stanoveny pomocí solidifikačního modelu IDS. Konfigurace a odvod tepla z krystalizátoru v Třineckých železárnách byly převzaty z měření termočlánky na experimentálním krystalizátoru. Součinitel přestupu tepla pod chladicími tryskami v sekundární chladicí zóně a jeho stanovení bylo provedeno na základě provedených experimentů chladicích trysek. Pro uvedené značky ocelí byla zpracována provozní data, pro které byl nakonfigurován model a parametry lití. Následně byly modelem vypočítány stacionární stavy teplotního pole a vzájemně porovnány povrchové teploty získané pyrometrickým měřením a modelem na dvou místech na boku předlitku, ve kterých pyrometrická měření probíhají. Pro všechny tři uvažované značky oceli bylo dosaženo dobré shody mezi pyrometrickým měřením povrchových teplot a teploty vypočítané vyvinutým počítačovým modelem. Tímto postupem byla ověřena správná činnost modelu a jeho validace s verifikací.

Vyvinutý počítačový model teplotního pole byl v poslední etapě řešení dizertační práce použit jako základní stavební kámen při tvorbě řídicího systému pro optimální řízení dynamických stavů provozu licího stroje. Pro návrh a implementaci řídicího systému byl použit koncept prediktivního řízení pomocí počítačového modelu, tzv. *model-based predictive control*. Myšlenkou tohoto přístupu je využít počítačový model jako numerický senzor skutečného licího stroje a pomocí něj predikovat pravděpodobný časový vývoj teplotního pole v budoucnosti na základě zvolené řídicí strategie. Hledání optimální strategie nastavení průtoků v chladicích okruzích probíhá iterativním způsobem v čase, při kterém je nutné opakovaně vyhodnocovat model a počítat predikci teplotního pole. Z tohoto důvodu se jedná o výpočetně náročnou úlohu. Do řídicího systému byl proto s výhodou začleněn vyvinutý velmi rychlý GPU model teplotního pole, který využívá pro výpočet grafické karty. Tímto bylo dosaženo rychlého systému, který dokáže některé situace řešit dokonce rychleji než je simulovaný reálný čas.

Činnost vyvinutého predikčního řídicího systému byla demonstrována na pěti dynamických modelových situacích, ke kterým může při provozu licího stroje docházet. Byla uvažována dynamická změna (1) mírného lineárního nárůstu licí rychlosti, ke které dochází při zrychleném chladnutí oceli v mezipánvi vlivem tepelných ztrát, (2) skokové změny (poklesu) licí rychlosti, ke které může dojít např. při havarijním stavu licího stroje (porucha regulace hladiny v krystalizátoru, porucha otevření pánve při dodávce taveniny do mezipánve), (3) příznak vzniku průvalu v krystalizátoru, při kterém je protiprůvalovým systémem dočasně snížena licí rychlost na přibližně poloviční hodnotu než byla hodnota licí rychlosti před detekcí vzniku průvalu, (4) odlévání nové tavby v sekvenci, při které dochází ke skokové změně licí teploty vlivem nové taveniny dopravené do mezipánve a (5) letmá výměna mezipánve, při které dochází k výraznému poklesu licí rychlosti na

dobu několik minut tak, aby byla technologicky umožněna výměna mezipánve. Pro všechny výše uvedené případy bylo nalezeno optimální řízení průtoků vody v chladicích okruzích sekundární chladicí zóny, které bylo následně okomentováno a zhodnoceno. Pro všechny studované případy dynamických změn bylo rovněž provedeno řízení sekundárního chlazení pomocí chladicích křivek. Vyhodnocením a srovnáním řízení pomocí chladicích křivek a pomocí vyvinutého predikčního řídicího systému bylo zřetelně prokázáno, že implementovaný predikční řídicí systém umožňuje výrazně lepší řízení uvažovaných dynamických stavů než běžně používané řízení pomocí chladicích křivek, které v některých případech vedlo k naprosto nežádoucím tepelným stavům předlitku.

Závěrem lze konstatovat, že všechny cíle dizertační práce vymezené v pojednání ke státní doktorské zkoušce byly plně splněny a v některých ohledech i překročeny, především vyvinutým GPU modelem teplotního pole. Za hlavní přínos považuje autor práce především (1) vyvinutý velmi rychlý paralelizovaný model teplotního pole, který využívá k výpočtu grafické karty a (2) vyvinutý predikční řídicí systém, který umožňuje efektivně řešit optimální řízení dynamických stavů během provozu lícího stroje. Oba výstupy mohou být snadno modifikovány pro libovolný lící stroj čtvercového formátu (po větších úpravách i pro Bramové lití). Z tohoto důvodu u obou výše uvedených výstupů práce současně existuje značný potenciál pro jejich další využití, a to jak v aplikacích se zaměřením na výzkum a vývoj, tak i pro komerčním použití v ocelárnách a hutích. Autor práce má rovněž v úmyslu provést patentní řízení nebo jiný způsob na ochranu práv duševního vlastnictví těchto výsledků. Dílčí výsledky své práce průběžně během celého doktorského studia autor dizertační práce publikoval v příspěvcích na řadě tuzemských i zahraničních konferencí a v odborných vědeckých časopisech, viz [26, 25, 63, 61, 62, 60, 57, 27, 24, 28, 59, 29, 30, 56]. Další činnost autora bude zaměřena na integraci modelu struktury a napětí do vyvinutého modelu teplotního pole, vývoj a modifikace modelu pro neat-net-shape lící stroje, jenž se vyznačují vysokými lícími rychlostmi a další rozvoj predikčního řídicího systému pro řízení provozu lícího stroje.

Autor dizertační práce se během svého doktorského studia rovněž zapojil do řešení související problematiky modelování materiálů s fázovými změnami, tzv. phase change materials (PCM), ve které uplatnil mnohé poznatky a znalosti získané při řešení dizertační práce. V rámci této činnosti byly vytvořeny počítačové modely, které byly následně použity pro analýzy nebo optimalizaci provozu zařízení s PCM, např. solárních kolektorů a tepelných výměníků. Z této a dalších souvisejících činností vznikla řada příspěvků na vědeckých konferencích a publikací v odborných časopisech.

Dílčí výsledky práce byly rovněž součástí řešení projektů, na jejichž řešení se autor dizertační práce během svého doktorského studia podílel: výzkumné projekty GAČR 106/09/0940 *Numerický a stochastický model plynule odlévaných ocelových předlitků obdélníkového profilu*, GAČR P107/11/1566 *Analýza vlivu metalurgicko-materiálových a technologických parametrů kontinuálně litých ocelových předlitků na jejich kvalitu a na stabilitu pochodu*, GAČR 106/08/0606 *Modelování přenosu tepla a hmoty při tuhnutí rozměrných systémů hmotných kovových materiálů*, GAČR P101/11/1047 *Tlumení kolísání teploty tekutiny pomocí akumulace tepla při změně skupenství*, COST OC10051 *Využití materiálů se změnou skupenství pro vyšší efektivnost solárních vzduchových systémů* a juniorských projektů specifického výzkumu interní grantové agentury VUT v Brně FSI-J-13-1977 *Rozvoj numerických metod, paralelizace a optimalizace v problematice tepelných procesů s fázovými změnami*, FSI-J-12-22 *Aplikace metod numerického modelování a optimalizace v inženýrských úlohách se změnou skupenství a struktury*, FSI-J-11-7 *Optimalizace a modelování úloh s fázovými a strukturálními přeměnami* a FSI-J-10-8 *Matematické modelování a optimalizace v průmyslových aplikacích*. Získané dílčí výsledky byly rovněž uplatněny jako řešení projektů výzkumných infrastruktur OP VaVpI ED0002/01/01 NETME Centre a navazujícího projektu LO1202 NETME Centre PLUS. V letech 2011–2013 byl autor práce držitelem stipendia Brno PhD Talent pro doktorské studenty. Autor se rovněž podílel na spolupráci s průmyslovým partnerem Železiarne Podbrezová a ŽP VVC, Slovensko, na studii možností nasazení dynamického modelu teplotního pole do řídicího systému ocelárny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] CASTILLA, M., ALVAREZ, J. D., BERENGUEL, M., RODRIGUEZ, F., GUZMAN, J. L., PEREZ, M. A comparison of thermal comfort predictive control strategies. *Energy and Buildings*, ročník 43, č. 10, 2011: s. 2737–2746. ISSN 0378-7788.
- [2] ÇENGEL, Y., GHAJAR, A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. Čtvrté vydání. New York: McGraw-Hill, 2010. 924 s. ISBN 978-0077366643.
- [3] CHAKRABORTI, N., KUMAR, K. S., ROY, G. G. A heat transfer study of the continuous caster mold using a finite volume approach coupled with genetic algorithms. *Journal of materials engineering and performance*, ročník 12, č. 4, 2003: s. 430–435. ISSN 1059-9495.
- [4] CHANG, Y.-H., ZHANG, J.-Q., Development and Application of Dynamic Secondary Cooling Control Model for Beam Blank Casting Based on FEM. In *Manufacturing processes and systems, Advanced Materials Research*, ročník 148-149, Zurich: Trans Tech Publications, 2011, s. 569–574. ISBN 978-0-87849-201-5.
- [5] CHAUDHURI, S., SINGH, R. K., PATWARI, K., MAJUMDAR, S., RAY, A. K., SINGH, A. K. P., NEOGI, N. Design and implementation of an automated secondary cooling system for the continuous casting of billets. *ISA Transactions*, ročník 49, č. 1, 2010: s. 121–129. ISSN 0019-0578.
- [6] CHEN, W., ZHANG, Y. Z., WANG, B. X. Optimisation of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model. *Ironmaking & Steelmaking*, ročník 37, č. 2, 2010: s. 147–154. ISSN 0301-9233.
- [7] CHO, K.-H., KIM, B.-M. Numerical analysis of secondary cooling in continuous slab casting. *Journal of Materials Science and Technology*, ročník 24, č. 3, 2008: s. 389–390. ISSN 1005-0302.
- [8] CONSTALES, D., KACUR, J., VAN KEER, R. On the optimal cooling strategy for variable-speed continuous casting. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, ročník 53, č. 3, 2002: s. 539–565. ISSN 0029-5981.
- [9] DOLEJŠÍ, Z., JUREČKA, P., MOLÍNEK, J., PŘÍHODA, M., RÉDR, M. *Plynulé odlévání oceli (Poradenská příručka č. 42/1): díl I. Tepelně technické poměry při plynulém odlévání oceli*. Druhé vydání. Praha: Technickoekonomický výzkumný ústav hutního průmyslu, 1989. 383 s.
- [10] DOU, Z., LIU, Q., WANG, B., ZHANG, X., ZHANG, J., HU, Z. Evolution of Control Models for Secondary Cooling in Continuous Casting Process of Steel. *Steel Research International*, ročník 82, č. 10, 2011: s. 1220–1227. ISSN 1611-3683.
- [11] EVANS, L. C. *Partial Differential Equations*. Druhé vydání. Rhode Island: American Mathematical Society, 2010. 749 s. ISBN 978-0821849743.
- [12] FENG, H., CHEN, L., XIE, Z., DING, Z., SUN, F. Generalized constructal optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate. *Energy*, ročník 66, 2014: s. 991–998. ISSN 0360-5442.
- [13] FUENTES, E. J., SILVA, C. A., YUZ, J. I. Predictive Speed Control of a Two-Mass System Driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ročník 59, č. 7, 2012: s. 2840–2848. ISSN 0278-0046.
- [14] GILLES, H. L.: *Making, Shaping and Treating of Steel: Casting*, kapitola Primary and Secondary Cooling Control. 11. vydání. Warrendale: Assn of Iron & Steel Engineers, 2003. ISBN 978-0930767044.
- [15] GONZALEZ, M., GOLDSCHMIT, M., ASSANELLI, A., BERDAGUER, E., DVORKIN, E. Modeling of the solidification process in a continuous casting installation for steel slabs. *Metallurgical and materials transactions B: Process metallurgy and materials processing science*, ročník 34, č. 4, 2003: s. 455–473. ISSN 1073-5615.
- [16] GUO, B.-Z., SUN, B. Numerical solution to the optimal feedback control of continuous casting process. *Journal of Global Optimization*, ročník 39, č. 2, 2007: s. 171–195. ISSN 0925-5001.
- [17] HOLAPPA, L.: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*, kapitola Secondary steelmaking. Elsevier, 2014, s. 301–345. ISBN 978-0-08-096988-6.
- [18] HORSKÝ, J., RAUDENSKÝ, M., Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting. In *Sborník příspěvků 14th Conference on Metallurgy and Materials METAL*, Ostrava: Tanger, s.r.o., 2005, s. 1–8. ISBN 80-86840-13-1.
- [19] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6. vydání. New York: Wiley & Sons, 2010. 886 s. ISBN 978-0470881453.
- [20] IVANOVA, A. A., Model predictive control of secondary cooling modes in continuous casting. In *Sborník příspěvků 22nd International Conference on Metallurgy and Materials METAL*, Ostrava: Tanger s.r.o., 2013, s. 1–6. ISBN 978-80-87294-39-0.
- [21] IVANOVA, A. A. Predictive control of water discharge in the secondary cooling zone of a continuous caster. *Metallurgist*, ročník 57, č. 7-8, 2013: s. 592–599. ISSN 0026-0894.
- [22] JABRI, K., DUMUR, D., GODOY, E., MOUCHETTE, A., BELE, B. Particle swarm optimization based tuning of a modified smith predictor for mould level control in continuous casting. *Journal of Process Control*, ročník 21, č. 2, 2011: s. 263–270. ISSN 0959-1524.
- [23] JANOSCH, E. Plynulé odlévání sochorových a blokových předlitků. *Hutnické aktuality*, ročník 30, č. 10, 1989: s. 1–44. ISSN 0322-8525.

- [24] KLIMEŠ, L., CHARVÁT, P., OSTRÝ, M. Challenges in computer modeling of phase change materials. *Materiali in tehnologije*, ročník 46, č. 4, 2012: s. 335–338. ISSN 1580-2949.
- [25] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J., Challenges in numerical modelling of continuous steel casting - very fast GPU dynamic solidification model and its use in continuous casting control. In *Sborník příspěvků 8th European Continuous Casting Conference ECCC*, ASMET, 2014, s. 266–275. ISBN 978-3-200-03664-2.
- [26] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J. Unsteady model-based predictive control of continuous steel casting by means of very fast dynamic solidification model on GPU. *Materiali in tehnologije*, ročník 48, č. 4, 2014: s. 525–530.
- [27] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J., BUČEK, P. Impact of casting speed on temperature field of continuously cast steel billets. *Materiali in tehnologije*, ročník 47, č. 4, 2013: s. 507–513.
- [28] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J., PARILÁK, L., BUČEK, P., Influence of chemical composition of cast steel on temperature field of continuously cast billets. In *Sborník příspěvků 21. mezinárodní konference materiálů a metalurgie METAL*, Ostrava: Tanger, s.r.o., 2012, s. 34–39. ISBN 978-80-87294-29-1.
- [29] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J., PARILÁK, L., BUČEK, P. Study of thermal behaviour of continuously cast billets. *Engineering Mechanics*, ročník 20, č. 3/4, 2014: s. 237–246. ISSN 1802-1484.
- [30] KLIMEŠ, L., ŠTĚTINA, J., PARILÁK, L., BUČEK, P., Study of thermal behaviour of continuously cast billets. In *Sborník příspěvků 31. mezinárodní konference Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 93–96. ISBN 978-80-214-4529-1.
- [31] LEE, J. H. Model Predictive Control: Review of the Three Decades of Development. *International Journal of Control Automation and Systems*, ročník 9, č. 3, 2011: s. 415–424. ISSN 1598-6446.
- [32] LIU, G. R. *Mesh Free Methods: Moving Beyond the Finite Element Method*. Druhé vydání. Boca Raton: CRC Press, 2009. 792 s. ISBN 978-0849312380.
- [33] LIU, K., ZHANG, J. Numerical analysis of optimum soft reduction amount for continuous casting slab. *Metalurgia International*, ročník 17, č. 4, 2012: s. 14–18. ISSN 1582-2214.
- [34] LOTOV, A., KAMENEV, G., BEREZKIN, V., MIETTINEN, K. Optimal control of cooling process in continuous casting of steel using a visualization-based multi-criteria approach. *Applied Mathematical Modelling*, ročník 29, č. 7, 2005: s. 653–672. ISSN 0307-904X.
- [35] LOUHENKILPI, S.: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*, kapitola Continuous casting of steel. Elsevier, 2014, s. 373–434. ISBN 978-0-08-096988-6.
- [36] MA, H., WANG, Q., LI, Y.-G., LU, Y.-J., HE, S. Optimization on the secondary cooling patterns for wide and thick continuous casting slab corner. *Metalurgia International*, ročník 17, č. 6, 2012: s. 30–34. ISSN 1582-2214.
- [37] MAESTRE, J. M., DE LA PENA, D. M., CAMACHO, E. F. Distributed model predictive control based on a cooperative game. *Optimal Control Applications & Methods*, ročník 32, č. 2, SI, 2011: s. 153–176. ISSN 0143-2087.
- [38] MAUDER, T., ŠANDERA, Č., ŠTĚTINA, J. A fuzzy-based optimal control algorithm for a continuous casting process. *Materiali in tehnologije*, ročník 46, č. 4, 2012: s. 325–328. ISSN 1580-2949.
- [39] MAUDER, T., ŠANDERA, V., ŠTĚTINA, J., ŠEDA, M. Optimization of the quality of continuously cast steel slabs using the firefly algorithm. *Materiali in tehnologije*, ročník 45, č. 4, 2011: s. 347–350. ISSN 1580-2949.
- [40] MENG, Y. A., THOMAS, B. G. Heat-transfer and solidification model of continuous slab casting: CON1D. *Metallurgical and materials transactions B: Process metallurgy and materials processing science*, ročník 34, č. 5, 2003: s. 685–705. ISSN 1073-5615.
- [41] OLDEWURTEL, F., PARISIO, A., JONES, C. N., AJ. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, ročník 45, 2012: s. 15–27. ISSN 0378-7788.
- [42] OMACHT, D., KUBÁNEK, Z., HURNÍK, A., GLOSSMANN, P.: Měření povrchových teplot plynule litého sochoru. Technická zpráva, Třinecké železářny, Třinec, 2005, ZPO 2 – 8. proud.
- [43] PETRUS, B., ZHENG, K., ZHOU, X., THOMAS, B. G., BENTSMAN, J. Real-Time, Model-Based Spray-Cooling Control System for Steel Continuous Casting. *Metallurgical and materials transactions B: Process metallurgy and materials processing science*, ročník 42, č. 1, 2011: s. 87–103. ISSN 1073-5615.
- [44] PŘÍHODA, M., MOLÍNEK, J., PYSZKO, R., VELIČKA, M., VACULÍK, M., BURDA, J. Heat transfer during cooling of hot surfaces by water nozzles. *Metalurgija*, ročník 48, č. 4, 2009: s. 235–238. ISSN 0543-5846.
- [45] PYSZKO, R., PŘÍHODA, M., BURDA, J., AJ. Cooling nozzles characteristics for numerical models of continuous casting. *Metalurgija*, ročník 52, č. 4, 2013: s. 437–440. ISSN 0543-5846.
- [46] RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J. Secondary cooling in continuous casting and Leidenfrost temperature effects. *Ironmaking & Steelmaking*, ročník 32, č. 2, 2005: s. 159–164. ISSN 0301-9233.
- [47] REWAGAD, R. R., KISS, A. A. Dynamic optimization of a dividing-wall column using model predictive control. *Chemical Engineering Science*, ročník 68, č. 1, 2012: s. 132–142. ISSN 0009-2509.
- [48] SANTOS, C., SPIM, J., GARCIA, A. Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm and knowledge base) applied to the continuous casting of steel. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, ročník 16, č. 5–6, 2003: s. 511–527. ISSN 0952-1976.
- [49] SENGUPTA, J., THOMAS, B. G., WELLS, M. A. The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys. *Metallurgical Transactions A – Physical Metallurgy nad Materials Science*, ročník 36A, č. 1, 2005: s. 187–204. ISSN 1073-5623.

- [50] SHEN, H. F., HARDIN, R. A., MACKENZIE, R., BECKERMANN, C. Simulation using realistic spray cooling for the continuous casting of multi-component steel. *Journal of Materials Science and Technology*, ročník 18, č. 4, 2002: s. 311–314. ISSN 1005-0302.
- [51] SIROKY, J., OLDEWURTEL, F., CIGLER, J., PRIVARA, S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *APPLIED ENERGY*, ročník 88, č. 9, 2011: s. 3079–3087. ISSN 0306-2619.
- [52] STEFANESCU, D. M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. Druhé vydání. New York: Springer, 2009. 400 s. ISBN 978-1441945099.
- [53] THOMAS, B. G.: *Making, Shaping and Treating of Steel: Casting*, kapitola Modeling of Continuous Casting. 11. vydání. Warrendale: Assn of Iron & Steel Engineers, 2003. ISBN 978-0930767044.
- [54] TIRIAN, G.-O., FILIP, I., PROSTEAN, G. Adaptive control system for continuous steel casting based on neural networks and fuzzy logic. *Neurocomputing*, ročník 125, č. SI, FEB 11 2014: s. 236–245. ISSN 0925-2312.
- [55] ŠANDERA, V., MAUDER, T., Optimization algorithm for continuous casting process. In *Sborník příspěvků 17th International conference on soft computing MENDEL*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2011, s. 252–258. ISBN 978-80-214-4302-0.
- [56] ŠTĚTINA, J., KAVIČKA, F., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., Transient simulation of temperature field for continuous casting steel billet and slab. In *Sborník příspěvků konference METEC InSteelCon*, Düsseldorf, Německo: TEMA Technologie Marketing AG, 2011, s. 13–23.
- [57] ŠTĚTINA, J., KAVIČKA, F., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., MASARIK, M., ŠAÑA, Z., Optimization of secondary cooling in order to achieve higher surface temperatures at the slab unbending point. In *Sborník příspěvků 21. mezinárodní konference materiálů a metalurgie METAL*, Ostrava: Tanger, s.r.o., 2012, s. 36–41. ISBN 978-80-87294-29-1.
- [58] ŠTĚTINA, J., KLIMEŠ, L., Nové možnosti řízení plynulého odlévání oceli na základě dynamického modelu tuhnutí. In *Sborník odborného semináře ŽP VVC*, Podbrezová: ŽP VVC, 2013, s. 20–21.
- [59] ŠTĚTINA, J., KLIMEŠ, L., MAUDER, T., KAVIČKA, F. Final-structure prediction of continuously cast billets. *Materiali in tehnologije*, ročník 46, č. 2, 2012: s. 155–160. ISSN 1580-2949.
- [60] ŠTĚTINA, J., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., MASARIK, M., Increasing the surface temperature at the slab continuous casting straightening. In *Sborník příspěvků 31. mezinárodní konference Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 217–220. ISBN 978-80-214-4529-1.
- [61] ŠTĚTINA, J., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., KAVIČKA, F. Minimization of surface defects by increasing the surface temperature during the straightening of a continuously cast slab. *Materiali in tehnologije*, ročník 47, č. 3, 2013: s. 311–316. ISSN 1580-2949.
- [62] ŠTĚTINA, J., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., MASARIK, M., KAVIČKA, F., Operational experiences with the secondary cooling modification of continuous slab casting. In *Sborník příspěvků 22. mezinárodní konference materiálů a metalurgie METAL*, Ostrava: Tanger, s.r.o., 2013, s. 34–39. ISBN 978-80-87294-39-0.
- [63] ŠTĚTINA, J., MAUDER, T., KLIMEŠ, L., MASARIK, M., Operational experiences with the optimization of secondary cooling. In *Sborník příspěvků 8th European Continuous Casting Conference ECCO*, ASMET, 2014, s. 1181–1190. ISBN 978-3-200-03664-2.
- [64] ŠTĚTINA, J.: *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*. Dizertační práce, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2007.
- [65] ŠTĚTINA, J., KAVIČKA, F., DOBROVSKÁ, J., ČAMEK, L., MASARIK, M. Optimization of a concasting technology via a dynamic solidification model of a slab caster. *Materials Science Forum*, ročník 475-479, č. 5, 2005: s. 3831–3834. ISSN 0255-5476.
- [66] WANG, B., JI, Z.-P., LIU, W.-H., J.-CH., M., XIE, Z. Application of hot strength and ductility test to optimization of secondary cooling system in billet continuous casting process. *Journal of Iron and Steel Research International*, ročník 15, č. 4, 2008: s. 16–20. ISSN 1006-706X.
- [67] WANG, X. Y., LIU, Q., WANG, B., WANG, X., QING, J. S., HU, Z. G., SUN, Y. H. Optimal control of secondary cooling for medium thickness slab continuous casting. *Ironmaking & Steelmaking*, ročník 38, č. 7, 2011: s. 552–560. ISSN 0301-9233.
- [68] WOLF, M. M.: *Making, Shaping and Treating of Steel: Casting*, kapitola Historical Aspects and Key Technologies. 11. vydání. Warrendale: Assn of Iron & Steel Engineers, 2003. ISBN 978-0930767044.
- [69] YANG, Y., RAIPALA, K., HOLAPPA, L.: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*, kapitola Ironmaking. První vydání. Elsevier, 2014, s. 2–88. ISBN 978-0-08-096988-6.
- [70] ZHANG, Y., DUDZIC, M. S. Online monitoring of steel casting processes using multivariate statistical technologies: From continuous to transitional operations. *Journal of Process Control*, ročník 16, č. 8, 2006: s. 819–829. ISSN 0959-1524.
- [71] ZHENG, P., GUO, J., HAO, X., Hybrid strategies for optimizing continuous casting process of steel. In *Sborník příspěvků IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT*, 2004, s. 1156–1161. ISBN 0-7803-8662-0.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Osobní údaje

Jméno a příjmení **Ing. Lubomír Klimeš**
E-mail klimes@fme.vutbr.cz
Telefon +420 54114 3241
Datum narození 20. 3. 1986

Vzdělání

Datum 2010 – dosud
Stupeň doktorský
Obor Konstrukční a procesní inženýrství
Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Datum 2008 – 2010
Stupeň magisterský
Obor Matematické inženýrství
Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Datum 2008 – 2010
Stupeň magisterský
Obor Laurea Magistrale Ingegneria Matematica
Škola Università degli Studi dell'Aquila, Facoltà di Ingegneria, Itálie

Datum 2005 – 2008
Stupeň bakalářský
Obor Matematické inženýrství
Škola Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Pracovní zkušenosti

Datum 2010 – dosud
Pozice doktorand/junior researcher
Organizace NETME Centre, Vysoké učení technické v Brně
Obor činnosti výzkum a vývoj
Hlavní aktivity numerické modelování tepelných procesů s fázovými změnami, paralelní výpočty, optimalizace a optimální řízení

Projekty spolupráce na projektech GAČR 106/09/0940, P107/11/1566, 106/08/0606, P101/11/1047, COST OC10051, ED0002/01/01 NETME Centre a LO1202 NETME Centre Plus, 4 projekty interní grantové agentury VUT v Brně

Počet publikací 43
h-index dle WoS 3

Ostatní dovednosti

PC znalosti MATLAB, CUDA, C++, Delphi, \LaTeX , Maple, MS Office
Jazyky anglický jazyk: aktivní znalost
německý jazyk: pasivní znalost
italský jazyk: začátečník

Abstrakt

Plynulé odlévání je dominantní způsob výroby oceli, pomocí kterého je v současné době vyráběno více než 95 % veškeré celosvětové produkce oceli. Matematické modelování a optimální řízení provozu lícího stroje patří mezi klíčové úlohy při plynulém odlévání oceli, které významným způsobem ovlivňují produktivitu a kvalitu vyráběné oceli, konkurenceschopnost ocelárny, bezpečnost při provozu lícího stroje a jeho dopad na životní prostředí. Tato práce se zabývá vývojem a implementací numerického modelu teplotního pole plynule odlévaného sochoru a jeho využitím při optimálním řízení dynamického provozu lícího stroje. Počítačový model byl vytvořen a implementován v MATLABu. Z důvodu vysoké výpočetní náročnosti byl model paralelizován pomocí výpočtu na grafických kartách NVIDIA s využitím architektury CUDA. Ověření modelu bylo provedeno na základě provozních dat z Třineckých železáren. Vyvinutý model byl následně použit jako základ prediktivního řídicího systému pro řízení dynamických změn při provozu lícího stroje. Činnost vyvinutého řídicího systému byla ověřena na modelových dynamických situacích, které potvrdily schopnost navrženého řídicího systému optimálně řídit dynamický provoz lícího stroje. Počítačový model teplotního pole a prediktivní řídicí systém byly vytvořeny tak, že je lze modifikovat pro libovolný lící stroj, což umožňuje jejich případné komerční použití.

Summary

Continuous casting is a dominant production technology of steelmaking which is currently used for more than 95% of the world steel production. Mathematical modelling and optimal control of casting machine are crucial tasks in continuous steel casting which directly influence productivity and quality of produced steel, competitiveness of steelworks, safety of casting machine operation and its impact on the environment. This thesis concerns with the development and implementation of the numerical model of temperature field for continuously cast steel billets and its use for optimal control of the casting machine. The numerical model was developed and implemented in MATLAB. Due to computational demands of the model, it was parallelized by means of the computation on graphics processing units NVIDIA with the computational architecture CUDA. Validation and verification of the model was performed with the use of operational data from Trinecke zelezarny steelworks. The model was then utilized as a part of the developed model-based predictive control system for the optimal control of dynamic situations in the casting machine operation. The behaviour of the developed control system was examined by means of dynamic model situations that have confirmed the ability of the implemented system to optimally control dynamic operations of the continuous casting machine. Both the numerical model of the temperature field and the model-based predictive control system have been implemented so that they can be modified for any casting machine which allows for their next commercial application.