

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 518

ISSN 1213-418X

Josef Štětina

**SIMULAČNÍ MODELY
PRO OPTIMALIZACI A ŘÍZENÍ
PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

**SIMULAČNÍ MODELY PRO OPTIMALIZACI A ŘÍZENÍ
PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI**

SIMULATION MODELS FOR OPTIMIZATION
AND CONTROL OF THE STEEL CONTINUOUS CASTING

TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2015

KLÍČOVÁ SLOVA

Přenos tepla a hmoty, plynulé odlévání oceli, numerické metody, okrajové podmínky, optimalizace, řízení, sekundární chlazení

KEYWORDS

Heat and mass transfer, continuous casting of steel, boundary conditions, optimization, control, secondary cooling

© Josef Štětina, 2015

ISBN 978-80-214-5267-1

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD.....	5
2 PLYNULÉ ODLÉVÁNÍ OCELI.....	6
3 NUMERICKÝ MAKRO–MODEL TUHNUTÍ.....	8
3.1 ORIGINÁLNÍ MAKRO–MODEL TUHNUTÍ BrDSM.....	9
3.2 PROSTOROVÁ A ČASOVÁ DISKRETIZACE, POČÁTEČNÍ PODMÍNKY.....	10
3.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	13
3.4 TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ODLÉVANÝCH OCELÍ	14
3.5 PŘÍKLADY VYSLEDKŮ	17
4 PARALELIZACE ŘEŠENÍ A INTEGRACE MODELŮ.....	18
5 ŘÍZENÍ SEKUNDÁRNÍHO CHLAZENÍ A JEHO OPTIMALIZACE	21
6 ZÁVĚR.....	25
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	28
ABSTRACT	30

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D. se narodil 29. 6. 1963 v Brně. V roce 1982 složil maturitu na Střední průmyslové škole strojnické v Brně a poté studoval na Strojní fakultě Vysokého učení technického v Brně, obor Dopravní a manipulační technika, specializace Spalovací motory. Diplomovou práci na téma Optimalizace hnacího mechanismu spalovacího motoru obhájil v roce 1987. Vysokoškolské studium zakončil s průměrným prospěchem 1,0. Za to mu byla udělena Cena ministra školství. V roce 1988 nastoupil na studijní pobyt na Katedru spalovacích motorů a motorových vozidel FS VUT v Brně. V roce 1992 nastoupil na Katedru termomechaniky a jaderné energetiky své mateřské fakulty jako asistent a správce počítačové sítě. V současné době pracuje jako docent na stejném pracovišti, které se transformovalo na Odbor termomechaniky a techniky prostředí Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.



V roce 2002 zahájil doktorské postgraduální studium na Katedře tepelné techniky Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Studium ukončil v roce 2007 obhajobou disertační práce „Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy“ a obdržel titul Ph.D. v oboru Tepelná technika a paliva v průmyslu. Na VŠB–TU se v roce 2008 habilitoval, když předložil a obhájil habilitační práci „Optimalizace parametrů lití sochorů pomocí modelu teplotního pole“.

V roce 1990 založil softwarovou firmu specializující se na vývoj software pro automobilový průmysl včetně dodávek měřicí a výpočetní techniky. Uživatelé systémů jsou např. Mendelova univerzita v Brně, Škoda auto a.s., Iveco Czech Republic. a.s.

V průběhu dosavadního působení na FSI vedl výuku v pěti předmětech (Termomechanika, Teorie spalovacích motorů, Seminář aplikované termomechaniky, CAD pro techniku prostředí a Experimentální metody). Byl vedoucím 19 diplomových prací a 43 bakalářských prací. Podílel se na zavedení magisterského studia v oboru Technika prostředí, ve kterém vyučuje od roku 1997. Od roku 2008 je předsedou komise pro SZZ bakalářského oboru Strojírenství. Je spoluautor tří vysokoškolských skript a sedmi elektronických výukových materiálů. Absolvoval dva studijní pobyty na amerických univerzitách (Auburn University, University of Florida) a dva studijní a přednáškové pobyty ve Slovinsku (University of Ljubljana). Spolupráce s univerzitami v Auburn a v Ljubljani vyústila v řešení čtyř úspěšných výzkumných projektů, jejichž byl spoluřešitelem.

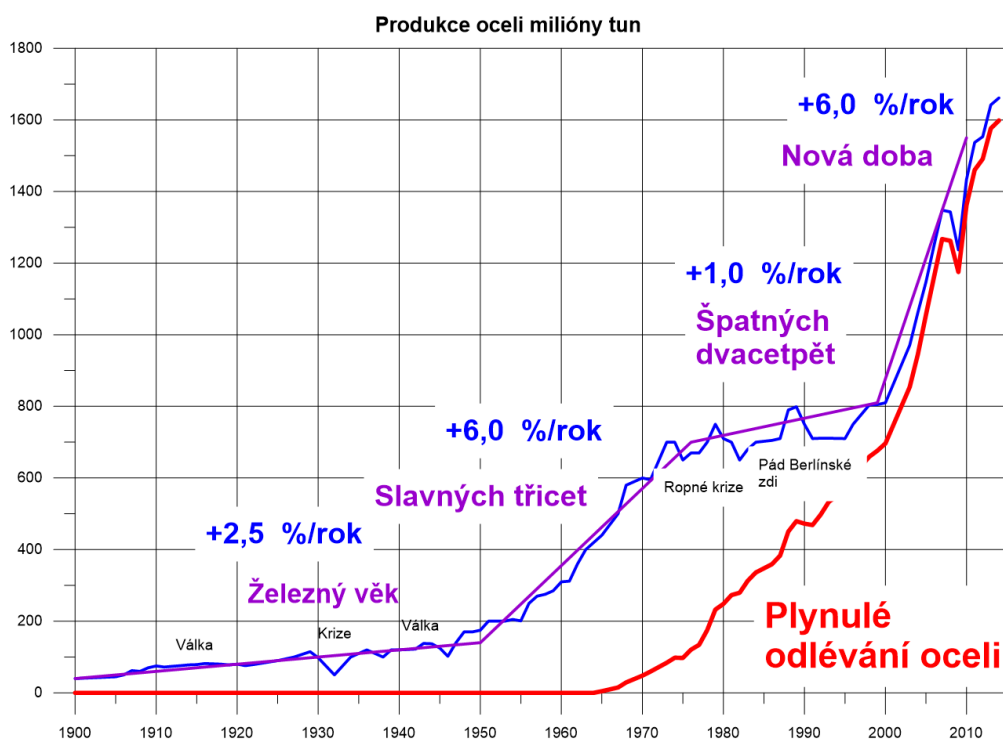
Jeho profesním zájmem je matematická simulace tepelně mechanických systémů, numerické metody pro řešení problémů přenosu tepla a hmoty a zejména s fázovými přeměnami. Další významnou oblastí, kterou se zabývá, je počítačové měření veličin. Je specialistou zejména na programování systémů měření a řízení technologických procesů v hutnictví, automobilovém průmyslu a v technice budov.

Své výsledky publikoval v 18 článcích v časopisech s IF, v 58 publikacích indexovaných v SCI a v dalších 268 příspěvcích uveřejněných v odborných časopisech nebo ve sbornících vědeckých konferencí, především mezinárodních a světových. Vědeckou činnost rozvíjel jako řešitel nebo spoluřešitel více než 28 výzkumných projektů (GAČR, KONTAKT, MPO, EUREKA, COST, U.S. –CZ Science and Technology Program). V rámci aplikovaného výzkumu řešil úlohy např. pro Třinecké železářny, Vítkovice Steel, Železářny Podbrezová, U.S. Steel Košice, POSCO, BMT Medical Technology, Honeywell, Doosan Škoda Power. Každým rokem přednáší pro pracovníky z průmyslu. Jeho kurzem Vybrané kapitoly z termomechaniky prošlo za posledních pět let více než 100 zaměstnanců energetických firem.

1 ÚVOD

Přestože se v posledních letech stále uplatňují nové materiály a v oblasti materiálového výzkumu probíhá bouřlivý rozvoj, lze konstatovat, že ocel zůstává pro konstruktéry i uživatele stále nejdůležitějším i nejatraktivnějším kovovým konstrukčním materiálem. V současnosti i v budoucnosti bude ocel stále porovnávána s plastovými materiály, kompozitními materiály, hliníkem a dalšími kovovými materiály. Je možno konstatovat, že pro ocel toto srovnání vychází velice pozitivně z hlediska ceny, materiálových vlastností, ale také z důvodů ekologických. Je třeba připomenout, že ocel je plně recyklovatelný materiál. Železný šrot se stává celosvětově strategickou surovinou [1]. Ze srovnání např. energetické náročnosti výroby oceli a hliníku a jeho slitin, o kterých se hovoří jako o nástupcích oceli v automobilové průmyslu ve snaze snížit hmotnost vozidel, vyplývá: Při výrobě 1 kg hliníku se spotřebuje 69 kWh energie a vypustí se do ovzduší 16,1 kg CO₂, zatímco při výrobě 1 kg oceli se spotřebuje 6,31 kWh a emitujete 1,65 kg CO₂. Toto srovnání zůstává pro ocel příznivé, i když je známo, že na recyklaci hliníku je potřeba pouze 5 % původní energie, kdežto u oceli je to cca 10 % [2].

Obr. 1 znázorňuje celosvětovou produkci oceli v miliónech tun od roku od začátku 20. století, kde vidíme výrazný nárůst produkce oceli od roku 2000, který dosahuje až 6 % ročně [1]. Je třeba, ale podotknout, že tento nárůst je realizován především v Číně a Jižní Koreji, jejichž produkce již přesahuje 50 %. Zajímavý statistický údaj je kolik vyrobené oceli připadá na jednoho světoobčana, v roce 2000 to bylo 130 kg a v loňském roce již 230 kg.

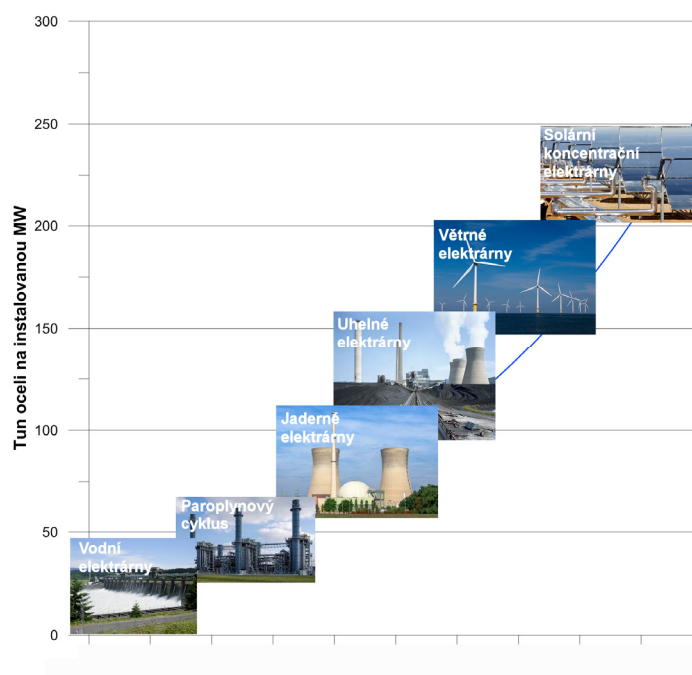


Obr. 1 Světová produkce oceli od roku 1900

Zaujme také pohled na využití oceli jako konstrukčního materiálu v energetice a v automobilovém průmyslu [2]. Z obr. 2 je názorně vidět nárůst spotřeby oceli při stavbě různých energetických komplexů pro zajištění stejného instalovaného výkonu [MW] od nejméně náročné vodní elektrárny až po elektrárny využívající solární a větrnou energii. V automobilovém průmyslu je snaha snižovat hmotnost automobilů. V roce 1970 např. automobil Golf první generace měl hmotnost 750 kg, kdežto Golf 6. generace se přiblížil hmotnosti 1300 kg. Poslední generace automobilu Golf, využívající plechy vysoké pevnosti, má však hmotnost o 100 kg nižší.

Výrobci automobilů odhadují, že vozidla této kategorie budou mít po roce 2020, při zachování současného komfortu a bezpečnosti, hmotnost blízká se 800 kg [2]. Musí však být splněn předpoklad výroby a využití pokročilých vysokopevnostních oceli 3. generace (AHSS), jejichž vývoj právě probíhá a jejichž výroba bude vyžadovat velice přesné řízení procesu odlévání [3].

Výsledky zde prezentovaného výzkumu našly např. uplatnění při optimalizaci výroby oceli pro stavbu konstrukcí a zařízení v příbřežních mořských vodách tzv. „offshore“ a dále při výrobě oceli pro vysokopevné mikrolegované plechy určené pro produktovody a plechy pro kotlové nádoby, určené pro tzv. kyselá prostředí [1].



Obr. 2 Potřeba oceli na postavení instalovaného

2 PLYNULÉ ODLÉVÁNÍ OCELI

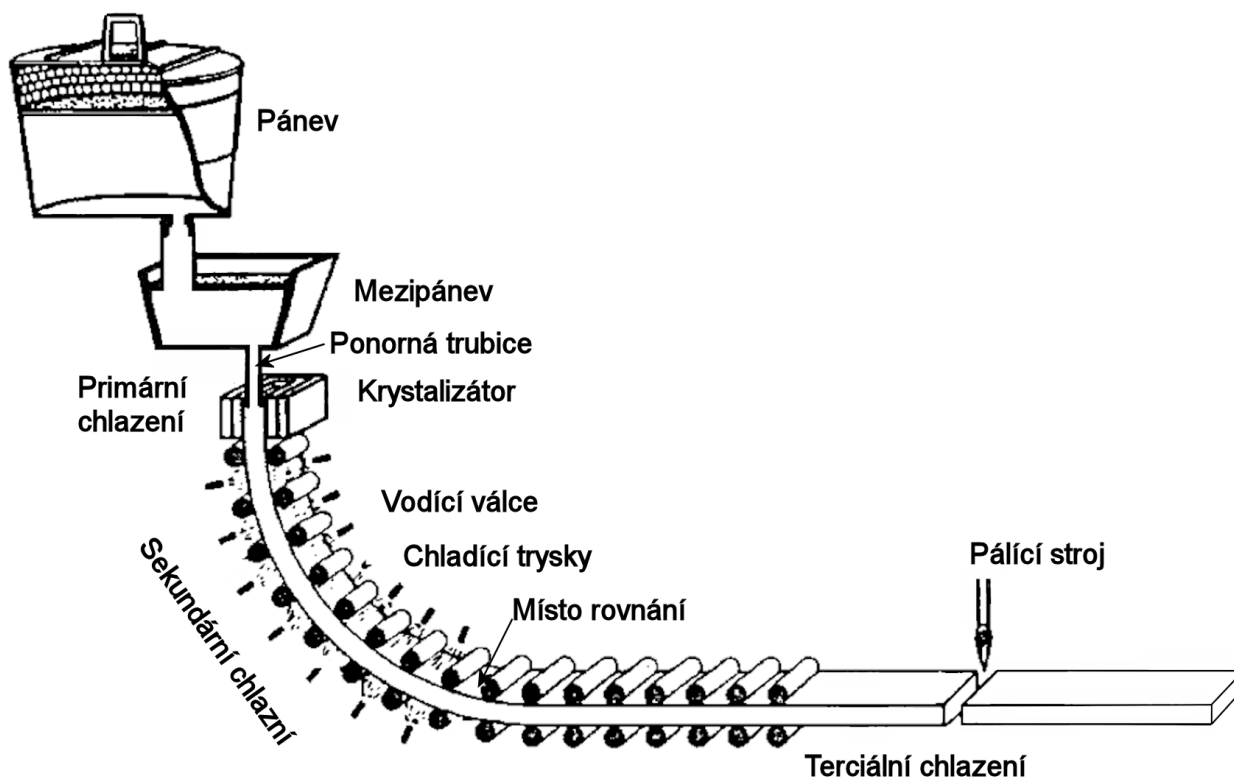
Plynulé odlévání („kontilit“) oceli je moderní a progresivní technologie výroby oceli, kterou se vyrobí 96 % celosvětové produkce [5]. Ta představuje hmotnost cca 1600 milionů tun (obr. 1). Dolní křivka v obr. 1 také dokládá, že plynulé odlévání oceli je relativně mladá technologie, jejíž průmyslové nasazení začalo v šedesátých letech minulého století.

Plynulé odlévání přineslo zvýšení kvality, produktivity a celkové efektivity výroby a stalo se hlavní technologií výroby oceli. Touto technologií se získávají přímo z tekuté oceli polotovary, tzv. předlitky, které jsou vhodné pro válcování a další zpracování. Ocel má jemnější strukturu, vyšší jakost, je stejnorodější. Proti dřívějšímu kokilovému lití oceli se snižují výrobní náklady, zvyšuje se výtěžnost, odpadá kokilový park, licí soupravy, hlubinné pece, blokové a případně i hrubé válcovací tratě.

Zařízení (stroje) pro plynulé odlévání (ZPO) oceli rozdělujeme podle konstrukčního uspořádání na horizontální, vertikální a radiální [6]. Dalším kritériem typu ZPO je tvar odlévaného předlitku. Základní tvary jsou brama (výrazně obdélníkový profil) jako polotovar pro výrobu plechu a sochor (čtvercový nebo kruhový profil) jako polotovar pro výrobu dlouhých výrobků, jako jsou tyče a zejména trubky. Přechodem mezi bramovým a sochorovým ZPO jsou stroje pro odlévání bloků. Posledním typem jsou ZPO na předlitky, jejichž profil se již blíží přesnému tvaru výsledného výrobku, jako jsou tenké bramy nebo I profily. Na obr. 3 je schéma nejrozšířenějšího typu bramového radiálního ZPO, pro které byly sestaveny simulační modely a pro které je v těchto téžích předložena většina jejich výsledků. První bramové ZPO v České republice bylo spuštěno 15. 6. 1995 ve firmě Vítkovice Steel, pro které byla na Energetického ústavu FSI VUT v Brně již v roce 1998 sestavena první verze matematického modelu teplotního pole bramy při jejím průchodu celým ZPO. Tento model se neustále rozvíjí a zpřesňuje a zde je popsána jeho nejaktuálnější verze.

Plynulé odlévání schematicky znázorněné na obr. 3 je nepřetržitý proces (prakticky jedna tzv. licí sekvence se odlévá dny až týdny, sekvence se skládá z taveb, nichž každá představuje obsah jedné pánve), což je zajištěno soustavou pánv a mezipánv. V pánvi se dopravuje tekutá ocel k odlévání a díky otočnému stojanu se operativně vymění za prázdnou. Mezipánve tvoří vyrovnávací

zásobník tekuté oceli. Z ní je tekutá ocel dopravována do krystalizátoru pomocí ponorné trubice. Přítok oceli je regulován tak, aby výška hladiny oceli byla v krystalizátoru udržována na konstantní hodnotě. Krystalizátor, tzv. primární zóna chlazení, je významnou částí stroje. Musí zabezpečit ztuhnutí dostatečně silné kůry oceli tak, aby kůra tvořila pevnou skořepinu uzavírající tekutou ocel po výstupu předlitku z krystalizátoru. Správná funkce krystalizátoru je zajištěna chlazením jeho stěn vodou, materiálem desek krystalizátoru (většinou měděné s poniklovaným povrchem), jeho oscilacemi, které brání „nalepení“ tekuté oceli na stěny krystalizátoru a v neposlední řadě vlastnostmi licího (mazacího) prášku, který vyplňuje mezeru mezi krystalizátorem a tuhnoucí skořepinou. Konstrukce a chování krystalizátoru zásadním způsobem ovlivňují kvalitu předlitku, většina jeho povrchových vad, pokud se vyskytují a musí se odstranit, vzniká právě v krystalizátoru.



Obr. 3 Schéma radiálního plynulého odlévání oceli [6]

Po výstupu z krystalizátoru předlitek prochází řadou segmentů, z nichž každý je tvořen několika dvojicemi válců. V každém segmentu bývá alespoň jedna dvojice válců poháněna, tím je dosaženo vytahování předlitku ze stroje licí rychlostí. Válce musí být na malém rádiu stavitelné tak, aby bylo možno nastavit tloušťku odlévané bramy zahrnující kontrakci profilu podél stroje. Mezi válce jsou na malém a velkém rádiu umístěny chladicí trysky, na boční straně je vodní chlazení pouze v oblasti pod krystalizátorem. Část stroje, ve kterém je předlitek ochlazován vodními nebo vodo-vzdušnými tryskami (nucená konvekce), nazýváme oblastí sekundárního chlazení. V různých místech ZPO jsou používány různé typy trysek. Jejich celkový počet je 2. řádu, proto jsou trysky spojovány do tzv. chladicích zón (okruhů). Standardní počet segmentů je třináct a chladicích zón bývá až dvacet. Po výběhu předlitku z tažných segmentů a tím z tzv. klece ZPO se předlitek prochází oblastí terciálního chlazení, ve které je ochlazován radiací a přirozenou konvekcí. Poslední částí ZPO je pálicí stroj, který dělí předlitek na jednotlivé výsledné bramy [6, 7].

3 NUMERICKÝ MAKRO-MODEL TUHNUTÍ

Výrazné zvýšení výkonu počítačů ve spojení s rozvojem numerických metod umožnil vytvořit z matematických modelů silné nástroje pro zvyšování kvality a výkonu při plynulém odlévání. Požadavky na zvyšování výkonu ZPO (tj. více vyrobených polotovarů za čas) v poslední době sílí současně s požadavkem nejen na nejvyšší kvalitu polotovarů–předlitků, ale i konečných výrobků, např. plechů. Kromě toho výroba oceli na ZPO musí také pokrýt požadavky na nové pokročilejší vysokopevnostní oceli, oceli odolné na mořskou vodu nebo kyselé prostředí, oceli pro produktovody, kotlové nádoby, automobilový průmysl aj., jak již bylo zmíněno. ZPO se musí upravit na zavedení a optimalizaci výroby těchto speciálních ocelí. Všechny tyto požadavky nelze splnit bez nasazení numerických modelů všech tepelně mechanických procesů na ZPO. Tyto modely mohou být aplikovány ve verzi off–line nebo on–line. Výpočet off–line verze modelu trvá delší dobu, než je reálný čas odlévání a slouží pro optimalizaci procesu odlévání při návrhu nebo úpravě ZPO, či vlastní výrobní technologie a jejích parametrů. O tomto modelu se hovoří jako o simulátoru plynulého odlévání. Verze modelu on–line je napojena přímo na provozní technologii, ze které snímá vstupní data. Její výpočet trvá stejnou nebo dokonce kratší dobu než reálný proces. Proto se on–line model často nazývá „dynamický“, protože bývá zařazen přímo do řídicího systému a slouží k výpočtu regulovaných hodnot.

Modely umožní návrh nových strojů a rekonstrukci starých, dokáží identifikovat a kvantifikovat mechanismus vzniku různých defektů a optimalizovat různé provozní podmínky při zvyšování produktivity a minimalizaci vad. Proces tuhnutí oceli při plynulém odlévání je ovlivňován mnoha faktory a podmínkami. Mezi nejdůležitější vlivy patří:

- plné turbulentní nestacionární proudění v komplexní geometrii (vstupní tryska a tekutý kov v předlitku)
- efekt bublin argonu
- termodynamické reakce mezi licím práškem a tuhoucím předlitkem
- přenos tepla mezi tekutým a tuhým práškem na povrchu předlitku
- dynamický pohyb tekuté oceli v krystalizátoru na rozhraní tekutá fáze–mushy zone a mushy zone–pevná fáze zahrnující vliv gravitace, oscilací a licí rychlosti (tzv. mushy zone je ta oblast předlitku mezi krystalizátorem a pálicím strojem, která se nachází mezi teplotou likvidu a solidu dané oceli, tedy v intervalu tuhnutí)
- přenos tepla přehřátí v turbulentním proudu taveniny
- přechodové (směsné) složení oceli při změně třídy oceli
- tepelně mechanická interakce v oblasti menisku mezi tuhoucím meniskem, tuhým práškem, tekutou ocelí
- přenos tepla z povrchu ztuhlé skořepiny do prostoru mezi skořepinou a pracovním povrchem krystalizátoru (zahrnující vrstvy licího prášku a vzduchovou mezeru)
- přenos hmoty prášku při jeho vertikálním pohybu mezerou mezi skořepinou a krystalizátorem
- kontakt ztuhlého předlitku s krystalizátorem a vodícími (tažnými) válci
- vznik krystalů v tavenině
- proces mikrosegregace a makrosegregace
- vznik staženin vlivem teplotní smrštivosti oceli a inicializace vnitřních napětí
- vznik napětí ve ztuhlé kůře vlivem vnějších vlivů jako je tření v krystalizátoru, vyboulením mezi válci, válcováním, teplotní napjatostí
- vznik trhlin vlivem vnitřní napjatosti
- proudění oceli vlivem elektromagnetického míchání a vliv míchání na teplotní pole a primární strukturu (u bramového ZPO se používá elektromagnetická brzda)
- vznik napjatosti vlivem rovnání předlitku v segmentech či v rovnací a tažné stolici

- radiace mezi různými povrchy
- chlazení vlivem konvekce pod vodními či vodo–vzdušnými tryskami
- redukce profilu vlivem redukce tažných segmentů, tzv. soft–redukce.

Vzhledem ke složitosti řešení vlivu všech zmíněných faktorů je nereálné vytvořit matematický model, který by je všechny zahrnoval. Je vhodné tyto faktory rozdělit do tří samostatných oblastí:

- vlivy přenosu tepla a hmoty
- mechanické vlivy
- strukturální vlivy

Vlivy přenosu tepla a hmoty jsou rozhodující a primární, protože od utváření teplotní pole se odvíjejí i vlivy mechanické a strukturální. Hovoříme o numerickém modelu teplotního pole, protože výsledkem numerické simulace je znalost teplot v uzlech výpočtové sítě v čase. Taktéž lze model označit jako makro–model tuhnutí (někdy nazýván jako solidifikační), protože řeší problematiku tuhnutí (změny fáze) na makro–úrovni tj. řeší tepelné bilance na úrovni buňky výpočtové sítě.

Komerční numerické softwarové balíky, které lze použít pro řešení úloh přenosu tepla, jako jsou ANSYS, COMSOL, Fluent a další, nejsou pro modelování plynulého odlévání vzhledem k naznačené složitosti a komplexnosti celého zařízení příliš vhodné. Do programu je totiž nutné zahrnout generování okrajových podmínek a mnoho dalšího, aby bylo možno provést příslušnou simulaci. Lze jich využít jen možné pro modelování jen některých z dílčích jevů vyjmenovaných výše a následně přenesení výsledků do parametrů makro–modelu tuhnutí.

Proto většina simulačních nástrojů pro řešení plynulého odlévání oceli je speciálně vyvinuta pouze pro tyto účely. Podle dostupných informací lze jednoznačně konstatovat, že zde popisované simulační 3D nestacionární modely vyvinuté na Energetickém ústavu FSI VUT v Brně, jsou srovnatelné např. s komerčním produktem Dynacs 3D firmy PRIMETALS Technologies (sdružení firem Siemens VAI Metals a Mitsubishi Hitachi Metals Machinery) a modely vyvíjenými na univerzitě Aalto v Helsinkách pod názvem DYN3D. Většina dalších komerčních softwarů, které jsou používány v praxi, používají jednodušší 2D model s pohyblivými řezy (tzv. 2D slice model), které zanedbávají přenos tepla ve směru liti, což způsobuje nezanedbatelnou chybu.

3.1 ORIGINÁLNÍ MAKRO–MODEL TUHnutí BRDSM

Bude zde předložen nástin makro–modelu tuhnutí vyvíjeného na pracovišti autora. Název modelu je připraven k registraci pod ochrannou známkou BrDSM (Brno Dynamic Solidification Model). Bližší popis jeho podstaty uvedl autor již ve své disertační a habilitační práci. Navázali na něj i jeho doktorandi ve svých disertačních pracích.

Tuhnutí a chladnutí předlitku při jeho průchodu ZPO je z hlediska termokinetiky případ 3D nestacionárního přenosu tepla a hmoty v soustavě předlitek–krystalizátor–okolí resp. předlitek–okolí (v sekundární a terciární zóně). Jestliže se v soustavě zanedbá přenos hmoty a ze tří základních druhů přenosu tepla se v soustavě za rozhodující považuje vedení, pak je problém popsán Fourier–Kirchhoffovou rovnicí (1) [8, 9]. Zavedeme souřadný systém celého předlitku podle obr. 4. Osa z je zároveň směr odlévání (směr pohybu předlitku strojem).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + \rho c w \frac{\partial T}{\partial z} + \dot{Q}_{source} \quad (1)$$

V rovnici T představuje teplotu, t čas, ρ hustotu, c měrnou tepelnou kapacitu, k_{eff} efektivní tepelnou vodivost, w rychlost pohybu předlitku o rozměrech jeho elementárního objemu x , y , a z , \dot{Q}_{source} [W.m⁻³] je objemový tepelný tok „z vnitřního zdroje“ při uvolňování latentních tepel fázové přeměny nebo strukturálních přeměn oceli. Efektivní tepelná vodivost je uměle zvýšený

součinitel tepelné vodivosti oceli, která má teplotu vyšší než je teplota solidu T_s , aby se postihl zvýšený přenos tepla v tavenině resp. mushy zóně způsobený tepelnou konvekcí v elementárním objemu předlitku. Tímto způsobem lze snadno postihnout i vliv elektromagnetického míchání, pokud je na ZPO instalováno. Pro stanovení lze využít empirický vztah

$$k_{eff}(f_s, k_s, k_l, m \geq 1) = f_s k_s + m(1 - f_s) k_l \quad (2)$$

kde m je konstanta s obvyklým rozsahem $m \in \langle 1, 8 \rangle$, f_s je hmotnostní podíl ztuhlé fáze v daném v elementu, k_s tepelná vodivost oceli pod teplotou solidu a k_l je její tepelná vodivost nad teplotou likvidu T_l [8].

Nejpoužívanějšími metodami pro řešení této rovnice s členem vnitřních zdrojů jsou: metoda entalpie, metoda efektivní kapacity, metoda teplotního zotavení (temperature recover) a metoda sledování fronty (front tracking). Metoda efektivní kapacity má jako hlavní výhodu přímý výpočet neznámé teploty, nevýhodou ve srovnání s metodou entalpie je horší numerická stabilita a nižší přesnost. Její využití je vhodné spíše pro zahrnutí vlivu latentních tepel při strukturálních přeměnách, které jsou řádově menší než latentní tepla při fázovým přeměnách. Metoda teplotního zotavení využívá opět funkci objemové entalpie s latentními tepley a bez latentního tepla. Jako jediná je vhodná pro řešení úloh tuhnutí čistých kovů tuhoucích za konstantní teploty ($T_l = T_s$). Metoda sledování fronty fázové přeměny se jeví jako velmi perspektivní při řešení problémů tuhnutí (krystalizace) včetně predikce struktury a včetně přesného určení rozhraní tekuté a tuhé fáze, rozsahu „mushy“ zóny a rozsahu tuhé fáze. Na rozvoj této metody byla získána podpora od GAČR a na roky 2015-17 získán projekt „Adaptivní front tracking metoda pro paralelní řešení problémů se změnou fáze“, jehož je autor hlavním řešitelem. Souhrnně lze konstatovat, že přestože je zde prezentována metoda entalpie a pro většinu praktických nasazení solidifikačních modelů byla použita, je výpočetní jádro zrealizováno i pro ostatní metody tak, aby vždy mohla být vybrána ta nejvhodnější [10].

Na základě dlouhodobých zkušeností a testování všech metod je tedy řešení plynulého odlévání oceli upřednostňována metoda entalpie [14]. Při jejím použití se rovnice (1) transformuje do tvaru

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} + w \frac{\partial H}{\partial z} = \nabla \cdot [k_{eff}(T) \nabla T] \quad (3)$$

kde je $H(T)$ funkce objemové entalpie [$J \cdot m^{-3}$], která je definována vztahem

$$H = \int_0^T \left(\rho(\xi) c(\xi) - \rho(\xi) \Delta H \frac{\partial f_s}{\partial \xi} \right) d\xi, \quad (4)$$

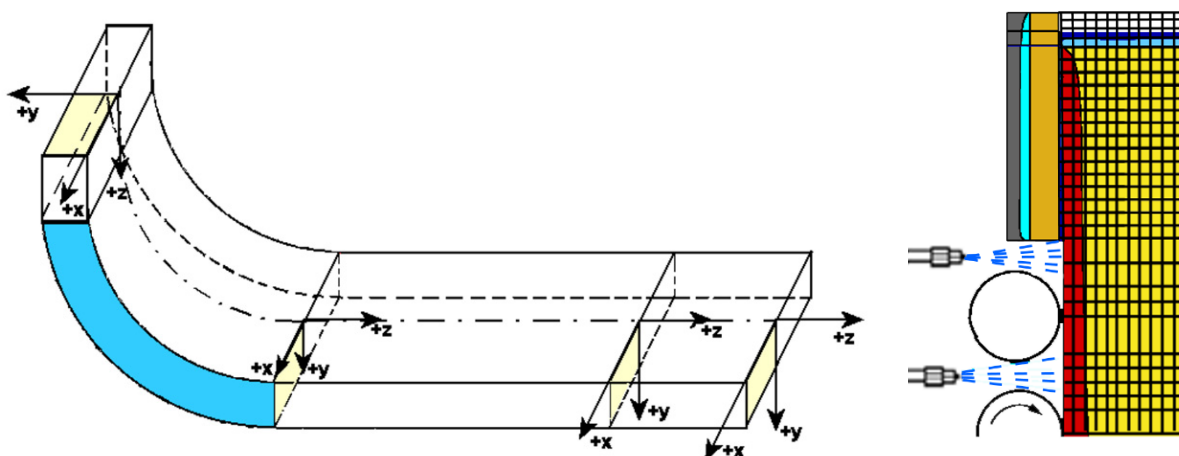
Při praktické realizaci je funkční závislost entalpie na teplotě nahrazena tabelovanými hodnotami (viz kap. 3.4).

3.2 PROSTOROVÁ A ČASOVÁ DISKRETIZACE, POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

Pro řešení parabolických diferenciálních rovnic (1) se používají různé numerické metody, jako jsou metoda konečných prvků, metoda konečných objemů, metoda konečných diferencí (síťová metoda), metoda kontrolních objemů, metoda hraničních prvků a tzv. bezsíťové metody. Vzhledem k tomu, že od začátku vývoje prezentovaného modelu byla snaha co nejefektivněji a důsledně řešit 3D soustavu v reálné geometrii s vědomím silné nelinearity řešené rovnice zapříčiněnou závislostí termofyzikálních vlastností na teplotě, byla pro řešení zvolena metoda kontrolních objemů. Principem je rozdělení tělesa na tzv. kontrolní objemy, které mohou být různých velikostí i tvarů dle aktuálního požadavku uživatele na hustotu sítě a tím na přesnost řešení. Po rozdělení řešené oblasti na kontrolní objemy se pro každý objem sestaví rovnice

energetické bilance. Právě aplikace základního fyzikálního zákona zachování energie umožňuje průběžné rozšiřování a zpřesňování modelu o další fyzikální jevy.

Schéma řešené oblasti s vyznačením souřadných systémů je na obr. 4, který naznačuje, že je řešena pouze polovina příčného řezu vzhledem k symetrickému odvodu tepla z bramy obdélníkového profilu podél celé osy z , od hladiny taveniny v krystalizátoru až po pálicí stroj. Uživatelsky lze však model přestavit na řešení celého příčného řezu, např. v případě nějaké nestandardní situace, která vede na nesymetrické okrajové podmínky. Oblast oblouku může být řešena i v cylindrických souřadnicích podle volby uživatele. Výsledky jsou vždy zobrazovány pro celý předlitek a rozvinutý oblouk. Výpočtová síť (obr. 5) je generována automaticky a to s možností dvou režimů. První používá ekvidistantní výpočetní síť, tj. uživatel změní pouze počet uzlů ve směru osy x , y a z . U druhého režimu je síť neekvidistantní, takže více respektuje umístění klíčových uzlů stroje ve směru osy z . Např. se uzel sítě volí do místa kontaktu válce s předlitkem nebo do středu plochy ostříkované chladicí tryskou. Uživatel potom volí počet uzlů mezi těmito uzly pevnými. Dalším problémem je, že hladina oceli v krystalizátoru není konstantní a může kolísat v rozsahu okolo 100 mm. Všechny výsledky teplotního pole předlitku (obr. 9) jsou zobrazovány od horní hrany krystalizátoru, jelikož je výpočetní síť pevná, je změna hladiny oceli uvažována v modelu v krocích odpovídajících rozměru elementu ve směru osy z (obr. 4) [11, 12].



Obr. 4 Schéma celé řešené oblasti s vyznačením souřadných systémů a detail sítě v oblasti krystalizátoru a 0. segmentu

Model teplotního pole se změnou fáze musí vždy řešit nestacionární případ, když se termofyzikální vlastnosti oceli i okrajové podmínky mění v čase. Proto je nutno řešit i otázku časové diskretizace. Pro časovou diskretizaci lze požit tyto přístupy: jednoduchý explicitní (Simple Explicit SE), jednoduchý implicitní (Simple Implicit SI), Crank-Nicolsonovo schéma, Hopscotch, Alternating Direction Implicit (ADI), Time-splitting [13, 14]. Všechny tyto metody byly testovány jak z hlediska stability řešení, jeho přesnosti, tak i z hlediska vhodnosti paralelizace právě pro řešení transformované Fourier Kirchoffovy rovnice (3). Zatím se stále potvrzuje, že nejvhodnější je právě nejjednodušší explicitní metoda. Jak je všeobecně známo, je tato metoda podmíněně stabilní. Proto je nutné podle aktuálně provedené prostorové diskretizace a podle aktuální lici rychlosti stanovit velikost časového diskretizačního kroku tak, aby nedošlo k oscilacím řešení. V modelu je implementována metoda automatického stanovení počátečního časového kroku s jeho adaptivními změnami v průběhu výpočtu. V software je implementována kontrola vzniku oscilací.

Základní rovnicí, která při tomto přístupu počítá neznámou objemovou entalpii [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$] kontrolního objemu (obr. 5) v čase $t+\Delta t$, je rovnice (5)

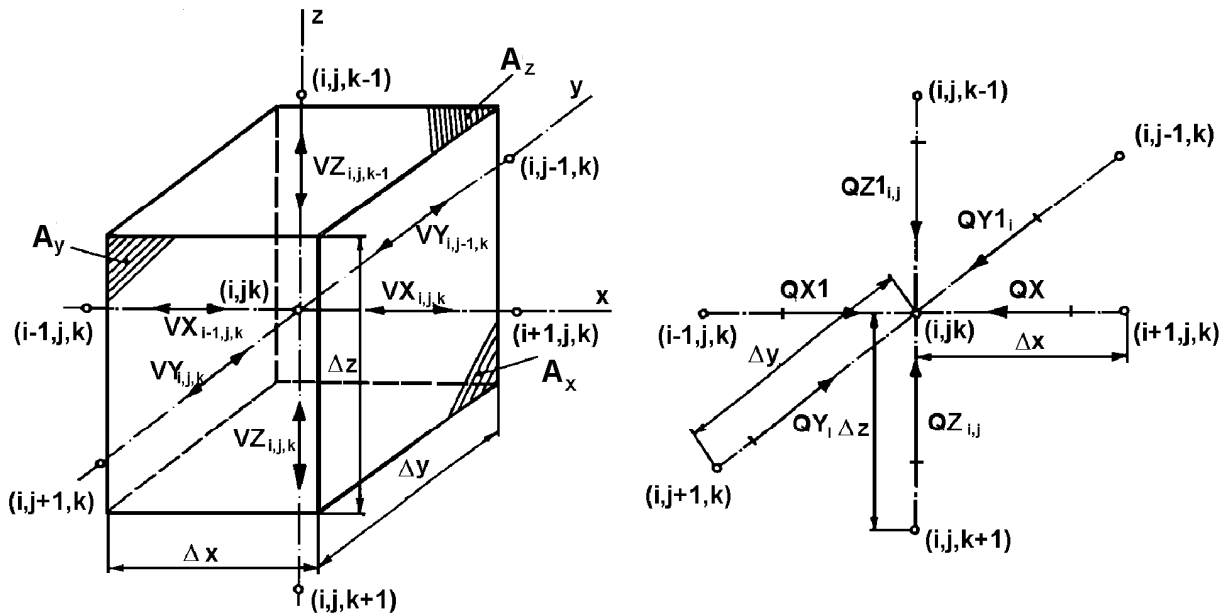
$$H_{i,j,k}^{(t+\Delta t)} = H_{i,j,k}^{(t)} + (Qz1_{i,j} + Qz_{i,j} + Qy1_i + Qy_i + Qx1 + Qx) \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (5)$$

Qx , Qy a Qz , jsou tepelné toky protékající ve směru hlavních os obecným kontrolním objemem (obr. 5):

$$Qx = k_{eff\ i} \frac{A_x}{\Delta x} (T_{i+1,j,k}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) \quad Qx1 = k_{eff\ i-1} \frac{A_x}{\Delta x} (T_{i-1,j,k}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) \quad (6a)$$

$$Qy_i = k_{eff\ j} \frac{A_y}{\Delta y} (T_{i,j+1,k}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) \quad QY1_i = k_{eff\ j-1} \frac{A_y}{\Delta y} (T_{i,j-1,k}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) \quad (6b)$$

$$Qz_{i,j} = k_{eff\ k} \frac{A_z}{\Delta z} (T_{i,j,k+1}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) - A_z w H_{i,j,k}^{(t)} \quad Qz1_{i,j} = k_{eff\ k-1} \frac{A_z}{\Delta z} (T_{i,j,k-1}^{(t)} - T_{i,j,k}^{(t)}) \quad (6c)$$



Obr. 5 Schéma tepelné bilance obecného uzlu (i,j,k) výpočtové sítě

Jak je z rovnice (5) patrné, v každém časovém kroku je vypočtena nová hodnota entalpie. Pro výpočty členů odpovídajících tepelným tokům je třeba znát i hodnoty teplot z předcházejícího časového kroku. Proto je nutno pro každý kontrolní objem a pro každý časový krok hodnotu entalpie převést na teplotu. Je tedy třeba znát funkční závislost objemové entalpie na teplotě (obr. 8). Jedná se o časově nejnáročnější operaci výpočtu, proto pro vyhledávání byly vyvinuty velmi rychlé algoritmy, jejichž implementace umožnila již v roce 2003 simulovat teplotní pole předlitku v reálném čase, a to i na počítačích kategorie PC.

Dalším krokem je stanovení počáteční podmínky pro start výpočtu. Je třeba si uvědomit, že při zahájení odlévání je nejprve naplněn ocelí krystalizátor. Po ztuhnutí kůry dostatečné tloušťky po celém obvodu profilu u dna krystalizátoru je předlitek postupně vytahován pomocí zátky na tažné segmenty. Vzhledem k použité explicitní metodě je třeba zahájit výpočet na celé výpočetní síti a nastavit v každém uzlu teplotu lití (licí teplota $T_{licí}$), což je teplota oceli v mezipánvi. Tato počáteční podmínka pro všechny výpočtové uzly se kryje s definicí okrajové podmínky 1. druhu na hladině krystalizátoru (viz 7a). Vypočtené teploty v místě, kam se ještě předlitek neposunul, není zobrazována a oblast v místě zaváděcí zátky je přepočítávána zvláštním modulem.

3.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky v různých místech řešené soustavy jsou popsány rovnicemi 7a až 7e [15]. Podmínka 2. druhu reprezentuje nulový tepelný tok v rovině symetrie (yz) předlitku (7b). Někdy se proto nazývá podmínka adiabatická. Na stěnách krystalizátoru je použita okrajová podmínka 3. druhu, vyjádřená rovnicí (7c), ve které konstanty a , b jsou stanoveny samostatným modelem prostupu tepla mezi skořepinou tuhnoucí oceli a chladicí vodou protékající krystalizátorem nebo přímo z provozních dat při odlévání, kdy známe průtok vody a rozdíl teplot vody na vstupu a výstupu z krystalizátoru. Délka krystalizátoru je L_K .

$$T = T_{lici} \quad (7a)$$

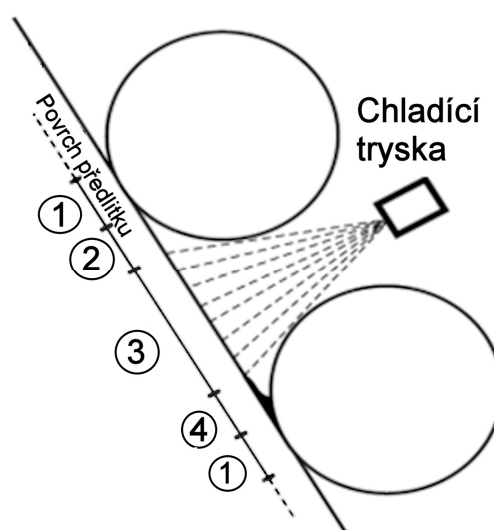
$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (7b)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = a - b \sqrt{\frac{L_K}{w}} \quad (7c)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \left[h_{ic} + \sigma_o \varepsilon (T_{povrch}^2 + T_{okoli}^2) (T_{povrch} + T_{okoli}) \right] (T_{povrch} - T_{okoli}) \quad (7d)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = 11513,7 T_{povrch}^{0,76} w^{-0,2} (2\theta)^{-0,16} \quad [16] \quad (7e)$$

Pro modelování předlitku je stěžejní oblast sekundárního chlazení (obr. 3). Na obr. 6 je zobrazen detail okrajových podmínek v této oblasti. Číslem 1 je označena oblast kontaktu s válcem, pro kterou platí okrajová podmínka definovaná rovnicí (7e), ve které T_{povrch} je teplota povrchu předlitku, w je lící rychlost (rychlost posuvu předlitku), θ úhel kontaktu válce s povrchem. Pravá strana rov. (7e) vyjadřuje hustotu tepelného toku přiváděného z povrchu předlitku do válce. Jeho hodnota se při dostupnosti provozních dat koriguje na základě úvahy, že tento tepelný tok musí být odveden jednak povrchem válce do okolí a jednak chladicí vodou, která chladí ložiska nebo celé válce. Oblast 3 je část povrchu předlitku ochlazovaná chladicí tryskou. Okrajová podmínka pro tuto oblast je popsána rovnicí (7d). Do ní je integrován vliv nucené konvekce charakterizované součinitelem přestupu tepla h_{ic} a vliv radiace, která závisí na Stefan-Bolzmanově konstantě σ_o a emisivitě ε , rovnice (8). Ve vztahu je T_{povrch} teplota povrchu předlitku a T_{okoli} je teplota okolí, v tomto případě teplota vody tryskající z trysky. Je třeba připomenout, že do tohoto vztahu je třeba dosazovat teploty v [K]. Oblast 2 je mezera mezi oblastí č. 1 a 3, ve které se uvažuje přirozená konvekce a radiace opět popsána rovnicí (7d), tentokrát s hodnotou součinitele přestupu tepla h_{ic} danou rovnicí (9) [17]. Oblast 4, která se vyskytuje pouze na horním povrchu předlitku (na tzv. malém radiusu), způsobuje, že horní povrch předlitku je při stejné intenzitě ostříku jako na spodním povrchu ochlazován více, vlivem ulpívání stékající vody. Ta zvyšuje přestup tepla včetně zvýšeného odvodu tepla do válce.

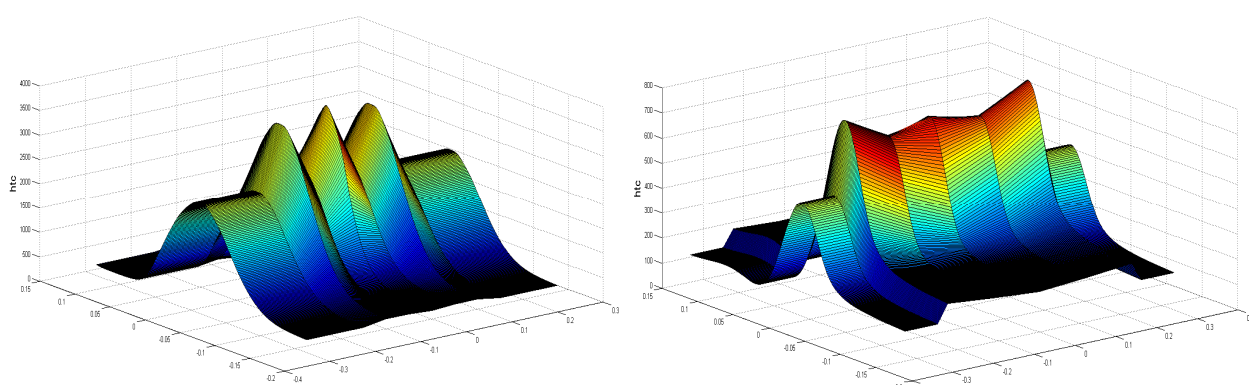


Obr. 6 Okrajové podmínky v oblasti sekundárního chlazení

$$\varepsilon = \frac{0,85}{1 + e^{(42,68 - 0,02682T_{povrch})^{0,0115}}} \quad (8)$$

$$h_{tc} = h_{nat} = 0,84(T_{povrch} - T_{okoli})^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Nejintenzivnější a rozhodující odvod tepla z chladnoucího předlitku v oblasti sekundárního chlazení probíhá pod vodními nebo vodovzdušnými tryskami. U vodních trysek je regulovanou veličinou průtok vody tryskou a u vodovzdušných průtok vody a tlak vzduchu. Pro stanovení okrajových podmínek je tedy nutné najít vztah mezi průtokem vody případně tlakem vzduchu a součinitelem přestupu tepla v rovnici (7d). V této oblasti je navázána úzká spolupráce s Laboratoří přenosu tepla a proudění VUT FSI v Brně [20], která se dlouhodobě věnuje experimentálnímu stanovení součinitelů přestupu tepla a jejich rozložení pod tryskami. Na obr. 7 jsou zobrazeny naměřené a zpracované průběhy součinitelů přestupu tepla pro dva rozdílné typy vodovzdušných trysek používaných u moderních bramových ZPO.



Obr. 7 Naměřené rozložení součinitele přestupu tepla pod vodovzdušnými chladícími tryskami

Rozložení součinitele přestupu tepla je funkcí $h_{tc\ x,z} = f(V_{x,z}, p_{air}, w, T_{povrch\ x,z})$, kde $V_{x,z}$ je hustota vody dopadající na povrch, p_{air} je tlak vzduchu, w je ličí rychlost a $T_{povrch\ x,z}$ je teplota povrchu v daném místě. V literatuře je pro tuto funkci řada empirických vztahů, jejichž komplexní přehled je v [19]. Z těchto vztahů a z experimentálních měření trysek uložených v databázi modelu byl vytvořen empirický algoritmus, který vyhodnocuje součinitele nucené konvekce pod tryskou. Je třeba zdůraznit, že právě rozložení tohoto součinitele způsobuje výraznou nelinearitu úlohy a komplikuje regulaci sekundárního chlazení. Jednou z příčin silné nelinearity je závislost součinitelů přestupu tepla na teplotě povrchu předlitku. Proto je třeba se zmínit o tzv. Leidenfrostově teplotě [19]. Je to povrchová teplota, při které se výrazným způsobem mění charakter přestupu tepla. Souvislá parní vrstva, vytvořená na povrchu při vysokých teplotách, je rozrušena a součinitel přestupu tepla skokem narůstají. Tomu stavu odpovídají i výrazně intenzivnější poklesy povrchové teploty při průchodu předlitku pod chladící tryskou.

Závěrečnou částí chlazení předlitku je terciální oblast chlazení, kde je předlitek chlazen přirozenou konvekcí a radiací. Okrajová podmínka je opět popsána rovnicí (7d), do které se dosazuje emisivita stanovená z rovnice (8) a součinitel tepelné konvekce stanovený z rovnice (9). Za teplotu okolí se pokládá teplota vzduchu v ocelárně [17].

3.4 TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ODLÉVANÝCH OCELÍ

Termofyzikální vlastnosti ocelí patří mezi důležité parametry vstupující do numerických modelů, které řeší teplotní pole předlitku. Při aplikaci avizované metody entalpie vyplývá z Fourier–Kirchhoffovy rovnice, že utváření teplotního pole předlitku procházejícího ZPO, ve kterém dochází k fázové a strukturálním změnám, přímo ovlivňují tyto termofyzikální vlastnosti: objemová entalpie, měrná tepelná kapacita, součinitel tepelné vodivosti a hustota (měrná

hmotnost) oceli. Pro stanovení teplotní závislosti těchto termofyzikálních parametrů ocelí se v prezentované simulaci tuhnutí využívá solidifikační model Interdendritic Solidification Model IDS. Je to simulační nástroj pro solidifikaci oceli zahrnující fázové změny, který umožňuje stanovit závislost základních termofyzikálních vlastností na teplotě pro danou značku oceli s konkrétním chemickým složením a pro požadované parametry ochlazování. Solidifikační model IDS je tzv. „gray box“, tj. kombinuje empirické nebo semiempirické submodely s fyzikálně koncipovanými (fundamentálními) submodely [21]. Model IDS byl a je dále vyvíjen na Technické univerzitě v Helsinkách. Model IDS se skládá ze dvou hlavních submodelů pro simulaci interdendritické solidifikace (řeší solidifikaci od teploty likvidu po teplotu 1 000 °C, (tj. např. po vznik feritu nebo austenitu) a pro simulaci rozpadu austenitu v tuhém stavu (řeší solidifikaci od teploty 1000 °C do teploty 25 °C (tj. po vznik proeutektoidního feritu, cementitu, perlitu, bainitu a martenzitu) [17, 19]. Kromě uvedených hodnot termofyzikálních vlastností oceli a fázových zlomků poskytuje model IDS také teploty významných událostí, které během solidifikace nastanou. Z pohledu aplikovatelnosti na plynulé odlévání oceli se jedná zejména o teploty solidu a likvidu. Model IDS umožňuje rovněž stanovit rozpustnost vodíku a dusíku v oceli.

Na základě katalogu ocelí [22] a dlouholetých provozních zkušeností a dat z provozu Vítkovice Steel byla autorem sestavena databáze ocelí, která obsahuje více než 300 ocelí, pro které jsou pro jejich typické chemické složení uloženy termofyzikální vlastnosti vypočtené programem IDS. Po zadání skutečného chemického složení jsou tyto parametry pomocí empirických vztahů přepočteny pro mushy zónu a zóny strukturálních přeměn, které jsou zejména ovlivněny odchylkou chemického složení od typických hodnot. V případě, že daná ocel v databázi není, jsou použity parametry oceli s nejbližším chemickým složením.

V reálném ZPO se odlévají až sta rozdílných značek ocelí, takže pro všechny značky by bylo obtížné nastavit optimální lící a další technologické parametry, např. požadované povrchové teploty předlitku, doporučený interval metalurgické délky aj. Z tohoto důvodu se oceli třídí do skupin, obvykle podle obsahu uhlíku, pro které se používají stejné podmínky odlévání.

Příklady ocelí začleněných do jedné ze skupin s jejich typickým chemickým složením jsou uvedeny v Tab. 1. Na tuto tabulku navazuje obr. 8, který porovnává teplotní závislosti základních termofyzikálních vlastností vstupující do výpočtu modelu tuhnutí. Z obrázku je patrná jejich silná nelinearita vůči teplotě, se kterou se musí model při řešení vyrovnat.

Tab. 1 Typické chemické složení ocelí dané skupin

Třída	Značka	Sk.	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	Nb	T _s	T _l
1.0045	S355G8	1	0,011	1,550	0,450	0,075	0,025	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000	0,000	0,375	0,020	1443,6	1514,1
1.8978	L555MB	2	0,050	1,600	0,300	0,150	0,010	0,250	0,150	0,250	0,000	0,000	0,015	0,350	0,055	1466,0	1516,2
1.8834	S366ML	3	0,140	1,600	0,500	0,035	0,025	0,000	0,300	0,000	0,200	0,100	0,050	0,020	0,050	1428,8	1507,1
1.1283	C98D2	4	0,980	0,600	0,200	0,020	0,025	0,100	0,100	0,100	0,0200	0,000	0,000	0,010	0,000	1312,5	1454,9

Chemické složení oceli významně ovlivňuje náchylnost dané oceli ke vzniku vad, konkrétně k tvorbě trhlin a intenzivních segregáčnických jevů v předlitku. Přestože role jednotlivých prvků a hlavně jejich kombinací není vždy zcela jednoznačná, lze v poněkud obecné rovině zmínit základní trendy vlivu některých prvků, zvláště uhlíku, na sklon odlévaných ocelí k vadám.

Podle obsahu uhlíku se oceli v odborné literatuře obvykle rozdělují do čtyř skupin. První skupinu tvoří oceli s obsahem C < 0,08 %, druhou oceli s obsahem C 0,08 až 0,15 %. Tyto oceli nemají větší problémy s vnitřní kvalitou, ale naopak vykazují velmi nerovný a zvlněný povrch předlitku. Oceli s obsahem 0,10 až 0,15 % mají nejnižší tažnost ve vysokoteplotní zóně, což znamená, že tyto oceli mají i největší sklon k tvorbě trhlin v předlitku. Některé práce uvádějí, že největší sklon k tvorbě trhlin mají oceli s obsahem 0,17 až 0,24 % C.

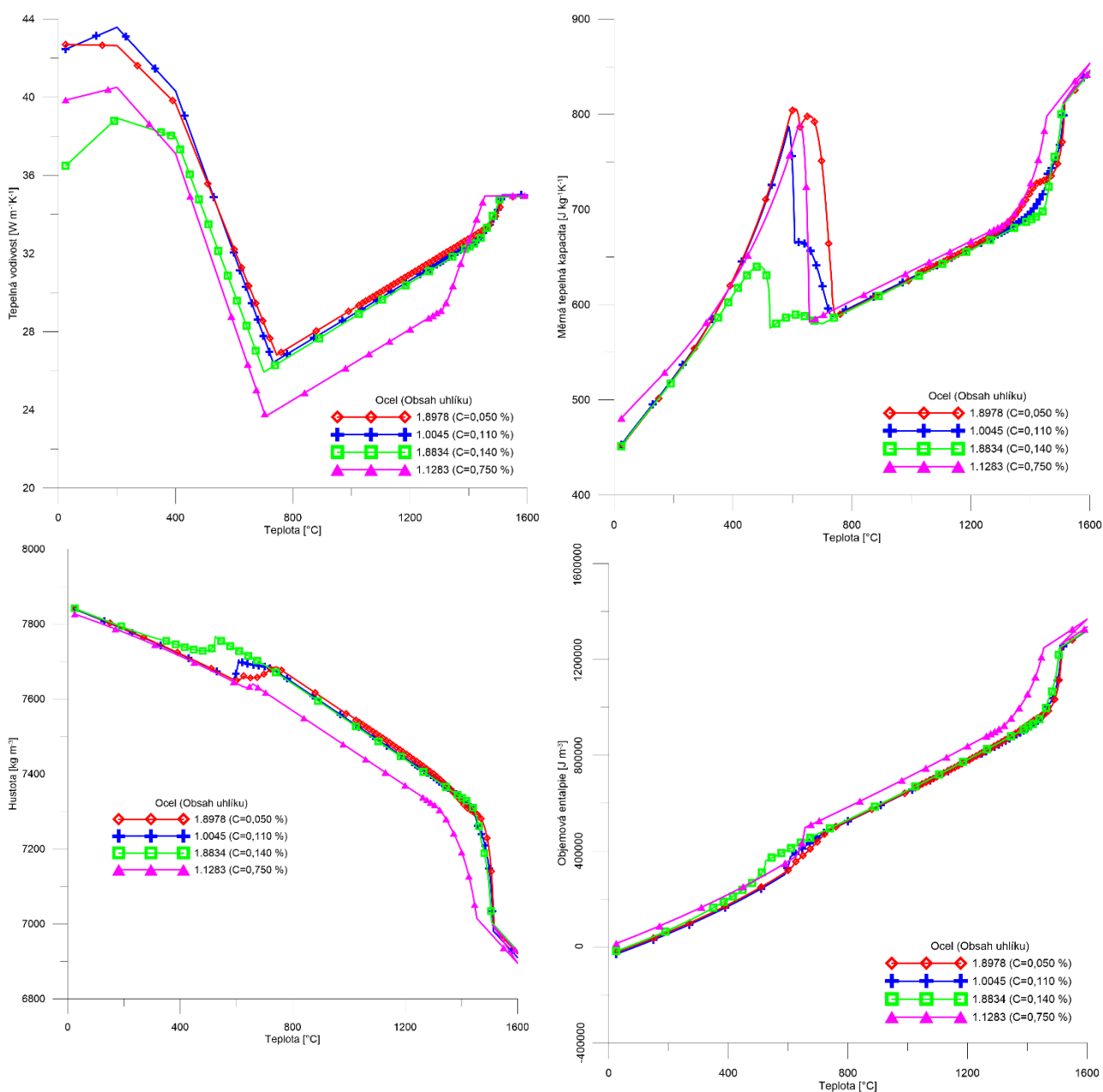
Chování ocelí s obsahem C kolem 0,10 % lze vysvětlit peritektickou reakcí a vzájemným vztahem delta a gama transformace. Při tomto obsahu uhlíku dochází k největšímu nelineárnímu

smršťování oceli a k časté tvorbě velké vzduchové mezery mezi povrchem předlitku a stěnou krystalizátoru. Tepelný tok z předlitku do krystalizátoru je minimální. Se snižujícím se obsahem C (pod 0,08 %) teplota transformace delta - gama postupně klesá a maximum smrštění se posouvá dále od menisku oceli v krystalizátoru.

Třetí skupinu tvoří oceli s obsahem C 0,15 až 0,50 %, které jsou na ZPO nejlépe odlévatelné. Se stoupajícím obsahem C nad 0,15 % se díky peritektické reakci smršťování oceli zmenšuje, větší část tekuté oceli transformuje přímo na gama fázi, zmenšuje se velikost vzduchové mezery a dochází k tvorbě "hladkého" povrchu předlitku.

Čtvrtá skupina, s obsahem C > 0,50 %, je charakteristická tvorbou dlouhé kolumnární zóny, což je obvykle spojeno s větší tvorbou vnitřních, zvláště středových vad. Na druhé straně vykazují předlitky z těchto ocelí velmi rovný a hladký povrch.

Mimo tyto základní skupiny se často definují skupiny pro oceli speciální, jak bylo zmíněno v úvodu, např. pro oceli vysokopevnostní (HSLA), či pokročilé vysokopevnostní (AHSS).



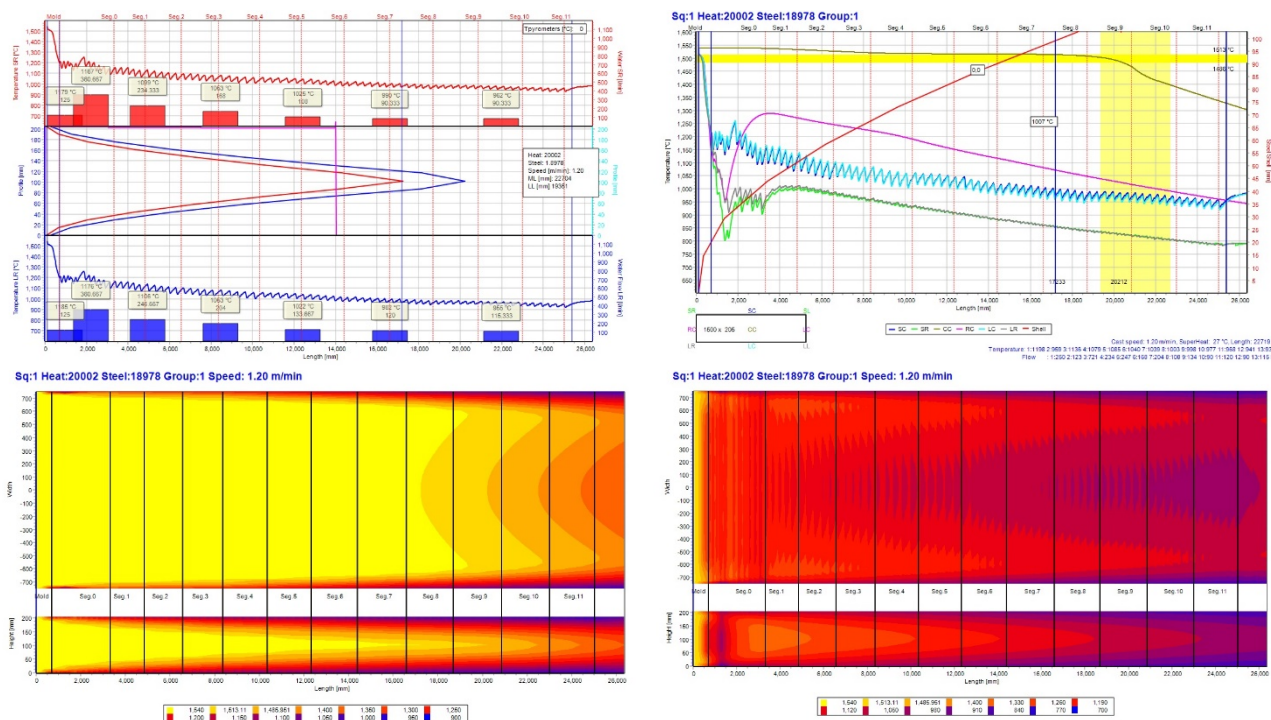
Obr. 8 Závislost termofyzikální vlastností typických ocelí dané skupiny na teplotě

3.5 PŘÍKLADY VÝSLEDKŮ

Při řešení problémů plynulého odlévání pro řadu oceláren autor této přednášky získal komplexní představu o tom, jaké výsledky a v jaké podobě uživatelé očekávají. Nejvíce zkušeností získal při spolupráci s ocelárnou Vítkovice Steel. Základem je grafické zobrazení teplotního pole v reálném čase, které do jednoho obrázku integruje co nejvíce informací. Příklady grafů uživatelského rozhraní jsou na obr. 9, všechna znázornění jsou pro běžné radiální bramové ZPO (rozměr profilu 1500×200 mm) s třinácti chladicími zónami (obr. 14). Kvůli přehlednosti jsou grafy zobrazovány s rozvinutým obloukem radiálního zakřivení. První graf na obr. 9 nahoře vlevo zobrazuje průběh teploty na horním povrchu předlitku (malý rádius) spolu s průtoky vody jednotlivými chladicími zónami na tomto povrchu působícími. Ve střední části je průběh izolidy a izosolidy v rovině podélného osového řezu předlitkem. Jedná se vlastně o zobrazení jednoho z nejdůležitějších parametrů získaného teplotním modelem, tj. metalurgické délky. Je to délka kužele tuhnutí od hladiny oceli v krystalizátoru po vrchol kužele (bod konce tuhnutí celého předlitku). Ve spodní části je průběh teploty na dolním povrchu (velký rádius) spolu s průtoky vody jednotlivými chladicími zónami na tomto povrchu působícími.

Nahoře vpravo je jedno z nejnázornějších zobrazení. Každá křivka zde zaznamenává historii teploty kteréhokoli uživatelem zvoleného bodu příčného řezu při jeho průchodu celým ZPO. Zde jsou zvoleny body typické. Souřadnice 0 je hladina v krystalizátoru, souřadnice 26 metrů je poloha pálicího stroje. Křivka, která vychází z počátku souřadné soustavy a má měřítko v grafu zcela vpravo, znázorňuje nárůst ztuhlé kůry.

Poslední dva grafy v obr. 9 zobrazují teplotního pole ve formě izotermických ploch: vlevo dole v rovině podélných osových řezů brámu přes její delší a kratší rozměr profilu, vpravo dole v rovině horního povrchu a pravého bočního povrchu brámy.



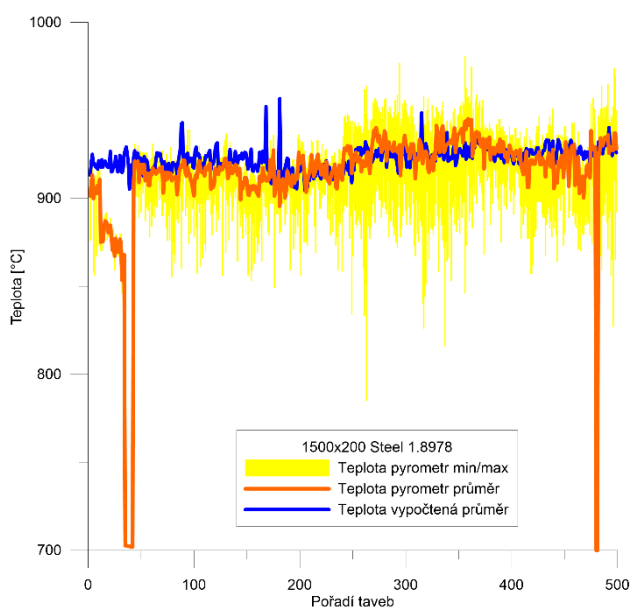
Obr. 9 Grafické zobrazení výsledků teplotního pole

Tvorba a vývoj makro-modelu tuhnutí byl po celou dobu provázen rozsáhlými provozními měřeními přímo na ZPO (především v a.s. Vítkovice Steel) tak, aby bylo možno výsledky modelu verifikovat. Termočlánky se měřily teploty ve stěnách vodou chlazených krystalizátorů, měření povrchových teplot předlitku při jeho průchodu ZPO se prováděla pyrometry. Dále byla prováděna

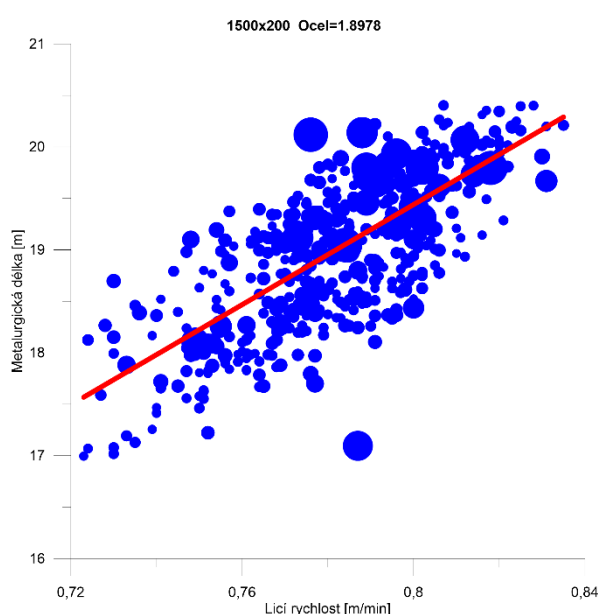
měření povrchových teplot pomocí zapichovacích termočlánků za pálicím strojem. Mezi nejnáročnější experimentální měření patří určení metalurgické délky. Zde byla použita metoda vzhazování olověných pouzder do taveniny v krystalizátoru, která pak byla ukončena vyhodnocením metalografického rozboru příčného řezu bramy [11, 12]. Lepších a přesnějších výsledků se dosáhlo pomocí radioaktivní indikátorů místo olověných pouzder.

Zkušenosti autora ověřily potřebu, aby každé ZPO vybavené on-line modelem tuhnutí, bylo vybaveno pyrometrickým měřením nejlépe v místě konce oblouku, tj. v místě začátku rovnání předlitku. Pokud to není možné, tak alespoň na konci sekundárního chlazení. V obr. 10 je srovnána průměrná teplota měřená pyrometrem během celé tavby (odpovídá odlití jedné pánve, tj. po dobu přibližně 20 minut) s průměrnou teplotou vypočtenou modelem ve stejném místě.

Dále je možno teplotní model využít pro statistické sledování měřených a vypočtených veličin. Ukázka takového zpracování výsledků je na obr. 11, znázorňující závislost metalurgické délky na lící rychlosti. Každý kroužek, zde odpovídá jedné tavbě a jeho poloměr odpovídá jedné směrodatné odchylce. Operátor prakticky hned po skončení tavby vidí, zda se jednalo o typickou tavbu nebo zda tavba byla zatížena nějakou provozní odchylkou.



Obr. 10 Porovnání průměrné naměřené a vypočtené teploty



Obr. 11 Závislost metalurgické délky na lící rychlosti

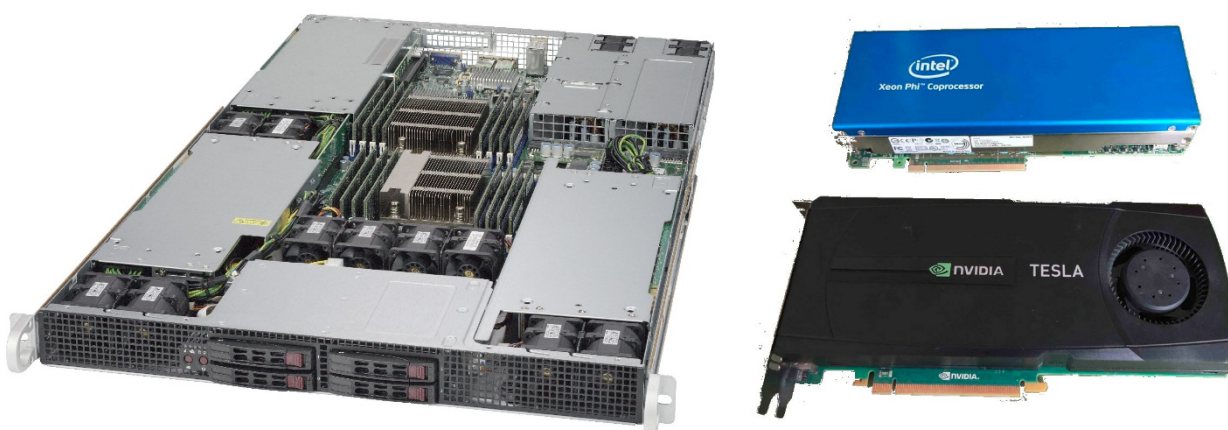
4 PARALELIZACE ŘEŠENÍ A INTEGRACE MODELŮ

Řešení 3D nestacionárního teplotního pole plynule odlévaného předlitku je tedy výpočetně velmi náročná úloha s vysokými požadavky na výpočetní techniku. Zejména požadavky na velkou přesnost modelu a tím vysokou hustotu sítě (přijatelně využitelná síť obsahuje minimálně 10^6 kontrolních objemů), stejně jako zároveň zvyšující se lící rychlost u moderních ZPO, vede při použití explicitního schématu k velmi malému časovému kroku řešení. Pro simulaci daného času lití z toho vyplývá, že je třeba provést 10^9 dílčích výpočtů. Současně je třeba vyřešit teplotní pole v co nejkratším čase (v reálném čase nebo i v čase kratším než reálném), aby výsledky mohly být využity pro on-line optimalizaci, regulaci a řízení plynulého odlévání. S těmito stále náročnějšími požadavky uživatelů se autor on-line modelu tuhnutí musí vyrovnávat průběžně a intenzivně. Cesty k řešení tohoto problému jsou: vývoj rychlejších algoritmů a optimalizace vlastního programového kódu, zvyšování výkonu procesorové jednotky a v poslední době nejdůležitější využití paralelizace. Právě její využití se jeví jako rozhodující trend, který nás však opět vrací k vývoji a optimalizaci algoritmů i programového kódu.

Je třeba si uvědomit, že paralelizaci ušetřený čas neroste s počtem jednotek lineárně, protože program brzdí přirozeně sekvenční části programu, které nelze paralelizovat. Maximální možné paralelní zrychlení udává Amdahlův zákon

$$Sz = \frac{1}{(1 - fp) + \frac{fp}{N}} \quad (10)$$

Kde Sz je zrychlení, fp podíl části kódu, kterou lze provádět paralelně a N je počet procesorových jader. Autor předkládaných tézí získal praktické zkušenosti s hardwarovým řešením pro paralelizaci úloh při řešení projektu FRVŠ „*Superpočítačová laboratoř-cluster PC-pro simulaci úloh mechaniky*“. Univerzální programy pro řešení úloh mechaniky těles tedy i přenosu tepla, jak komerční tak i open source, jsou dostupné v paralelních verzích pro nasazení na clusterech. Podle dostupných informací žádný z komerčních solidifikačních modelů pro on-line řízení plynulého odlévání oceli není řešen jako paralelní z pohledu vlastního numerického řešení, takže přístup autora je průkopnický. Má tedy zkušenosti s řešením řídicích a informačních systémů v průmyslové praxi, kde jsou jako operační systém požadovány MS Windows. Z toho jednoznačně vyplynulo, že nasazení clusterů je zcela nevhodné kvůli vysokým pořizovacím a provozním nákladům. Proto návrh paralelizace vyústil již na počátku do volby víceprocesorových PC nebo serverů. První on-line model implementovaný ve Vítkovici Steel byl v roce 2003 provozován na pracovní stanici se dvěma procesory Intel Xeon. Software byl koncipován jako vícevláknový, kdy výpočetní model, výpočet okrajových podmínek, sběr dat a zobrazení měl samostatné vlákno. Tato verze software byla celá napsána v jazyku Object Pascalu (Delphi).



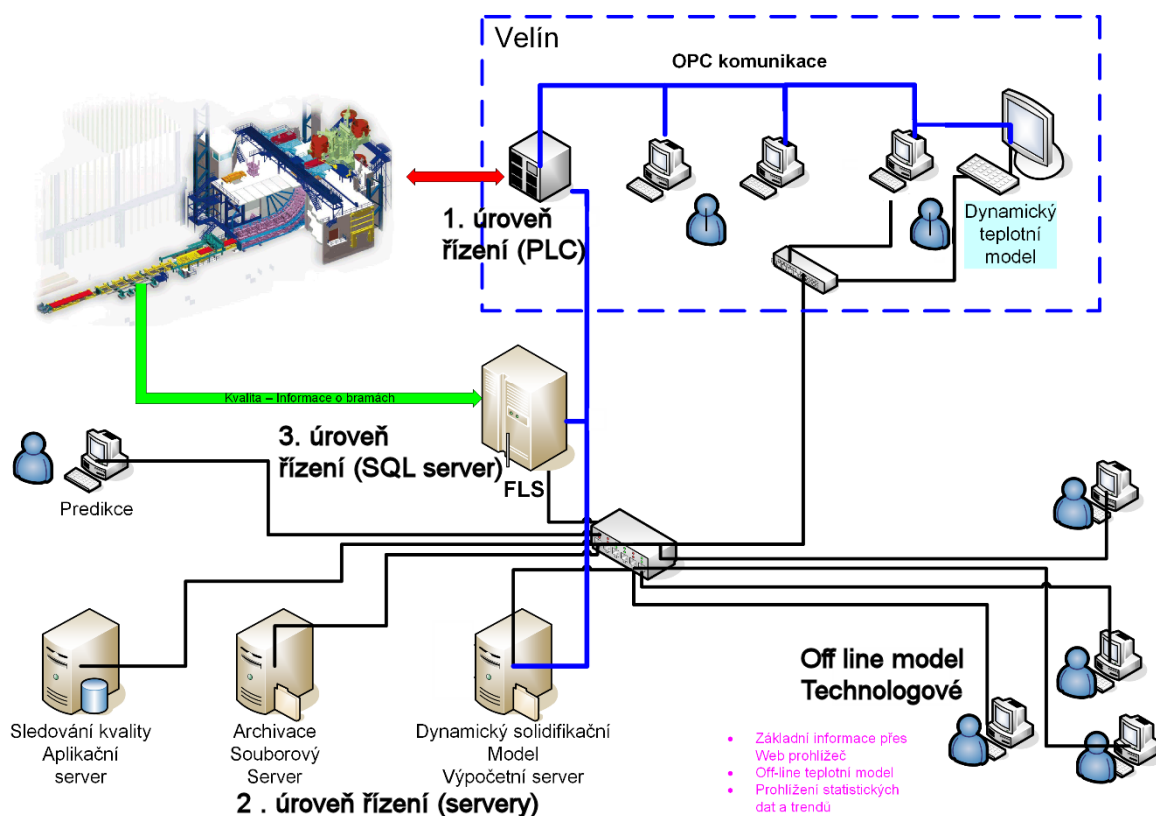
Obr. 12 Výpočetní server vhodný pro provoz on-line modelů a Intel Xeon Phi, GPU karta nVidia

Další možností paralelizace kódu modelu bylo využití vícejádrových procesorů, např. dnešní procesory Intel Xeon mohou mít až 16 fyzických jader a dvojnásobek virtuálních. Z pohledu vývoje modelu tuhnutí je to jen posun evoluční. Vlákna byla nahrazena samostatnými procesy, které pracují se samostatným paměťovým prostorem. Tím je zvýšena celková spolehlivost a v případě havárie může být restartováno pouze příslušný proces. Aktuální verze software je tvořena jak v jazyce Object Pascalu (Delphi), tak i v C/C++ (MS Visual Studio). Plně využívá rozšíření těchto jazyků pro paralelní programování např. paralelní cykly, toto umožňuje využít maximálně aktuálně dostupný hardware.

Jako revoluční posun a pokrok je využít k výpočtům výkonu grafické karty. S touto možností přišla firma Nvidia, později reagovala i firma AMD, k možnosti výpočtů na grafických kartách Xeon Phi se přihlásila i firma Intel [22]. Na obr. 12 je fotografie vhodného serveru pro provozování on-line modelu, včetně regulačních modulů popsanych v kap. 5. Server této koncepce lze osadit až dvěma vícejádrovými procesory až s třemi přídatnými kartami Nvidia Tesla nebo Intel Xeon Phi (v pravé části obr. 12).

Z hlediska využití přídavných výpočetních karet je rozhodující softwarová podpora, pro práci s výpočetními jádry GPU se používají standardy, jako jsou např. CUDA (Compute Unified Device Architecture), OpenCL (Open Computing Language) a C++ AMP (C++ Accelerated Massive Parallelism), Všechny jsou šířeny zdarma a podporují více programovacích jazyků [23]. V prvním kroku bylo nutno ověřit, zda současné možnosti těchto vývojových nástrojů dovolí naprogramovat model tuhnutí. Na pracovišti k tomu dostupnost hardware tj. GPGPU karty Nvidia Tesla C2075 na pracovišti, která má 448 výpočetových jader a 6 GB paměti. Prokázala to zejména autorem vedená disertační práce [19], která vznikla pod vedením autora. Implementace takto komplexního numerického modulu pomocí CUDA je unikátní a zatím nebyla jinými autory publikována. V současné době je model tuhnutí paralelizován i pomocí technologie OpenCL, která umožní využít i dostupné karty Intel Xeon Phi. Je třeba zdůraznit velkou výhodu technologií CUDA i OpenCL, které programátora odstiňují od používaného hardware. Tím je myšleno, že přenesení programu, např. na jinou výpočetní kartu s jiným počtem jader nevyžaduje změnu software. Naopak je, ale třeba volit algoritmy viz kapitol 3, které jsou vhodné pro masivní paralelizaci. Vhodné jsou takové, které obsahují, co nejvíce vzájemně nezávislých výpočtů. Tak se minimalizuje, čekání nebo nutnost přepočítávání mezivýsledku.

INTEGRACE MODELŮ DO ŘÍDÍCIHO SYSTÉMU OCELÁRNY



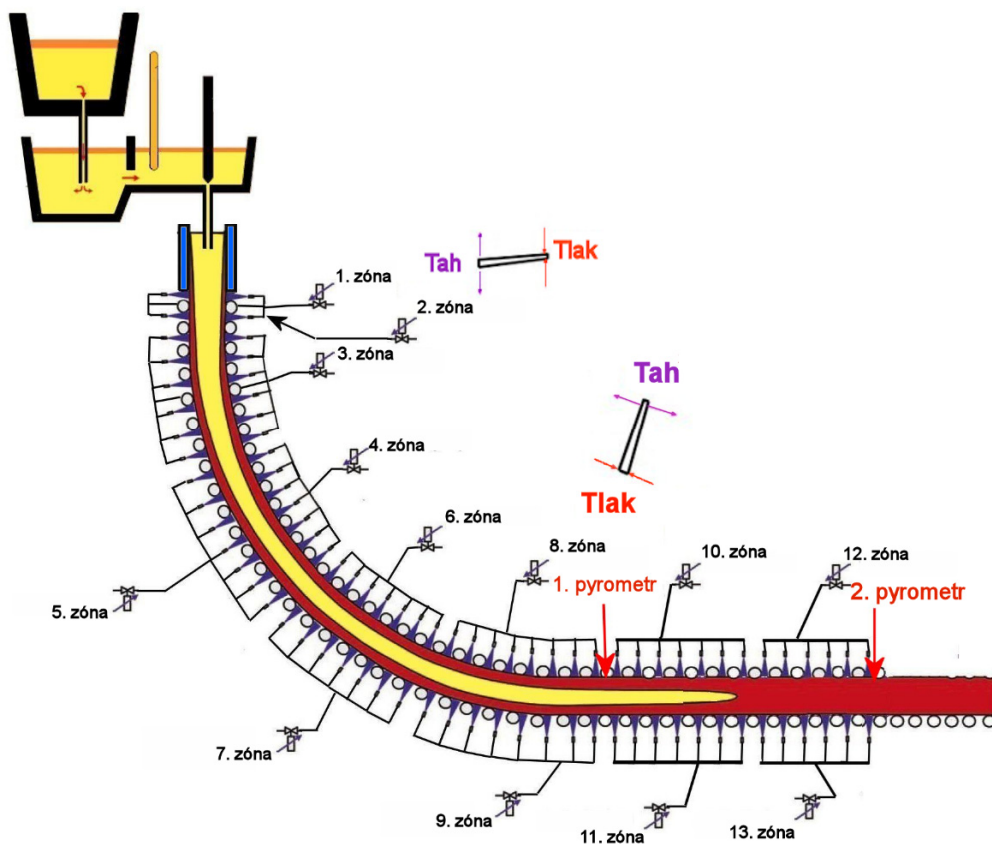
Obr. 13 Schéma zařazení simulačních modelů do řídicího systému ocelárny

Řídicí systém ocelárny Vítkovice Steel (obr. 13) se skládá ze tří úrovní. První úroveň řízení (Level 1) zahrnuje PLC a regulátory zajišťující převod měřených veličin na čísla (AD převodníky). Tyto měřené hodnoty se přes komunikační protokol předávají do druhé úrovně. Na této úrovni jsou zajištěny PID regulace nastavených průtoků vody apod. Druhá úroveň (Level 2) je tvořena PC nebo servery, na kterých je realizována vizualizace HMI (Human Machine Interface) měřených dat z úrovně Level 1, dále jsou přebírána data z úrovně 3. Kromě vizualizace měřených dat obsahuje základní regulační předpisy. Pokud obsahuje servery, je v této úrovni zajištěna

archivace s možností vykreslování trendů měřených a počítaných veličin. Nejvyšší třetí úroveň (Level 3) zahrnuje řízení celé ocelárny, jeho hlavní součástí je FLS (systém řízení pánvových pecí). Přes tuto úroveň jdou informace o odlévaném profilu, o označení sekvencí a taveb, o chemické analýze oceli, o délce odlitých předlitků atd. Zde prezentovaný on-line Dynamický solidifikační model (BrDSM) je software, který běží na vyhrazeném serveru začleněném do úrovně Level 2 (obr. 13). Model přebírá provozní data z OPC serveru (Open Process Control je průmyslový standart pro výměnu dat v průmyslové automatizaci), díky tomu není závislý na použití konkrétních hardwarových ovladačů. V OPC serveru jsou začleněny i SQL dotazy do systému FLS. Implementace BrDSM také předpokládá začlenění off-line verze BrDSM jako 32 bitového MS Windows programu [11]. Součástí řídicího systému je i archivační server, na kterém jsou uchovávána data dílčích výsledků z dynamického modelu s frekvencí 10 sekund. Mimo provozní parametry ZPO, kterých je přibližně 200, se dalších 300 parametrů počítá modelem. Tato data jsou systémem sledování kvality doplňována o data popisující kvalitu bramb a plechů z válcovny. Ty jsou základem pro on-line predikci. V aktuální verzi je již možno nastavit i rychlejší přebírání dat po 5 nebo 2 sekundách. Velmi důležité je, aby model před jejich využitím zkontroloval platnost shromážděných údajů, tj. ověřil, zda leží v přípustných intervalech, či zda vůbec dorazily. Chybné údaje doplní buď předchozími platnými, nebo tzv. standardními hodnotami a teprve úplné a ověřené údaje jsou dynamickým solidifikačním model využity pro výpočet.

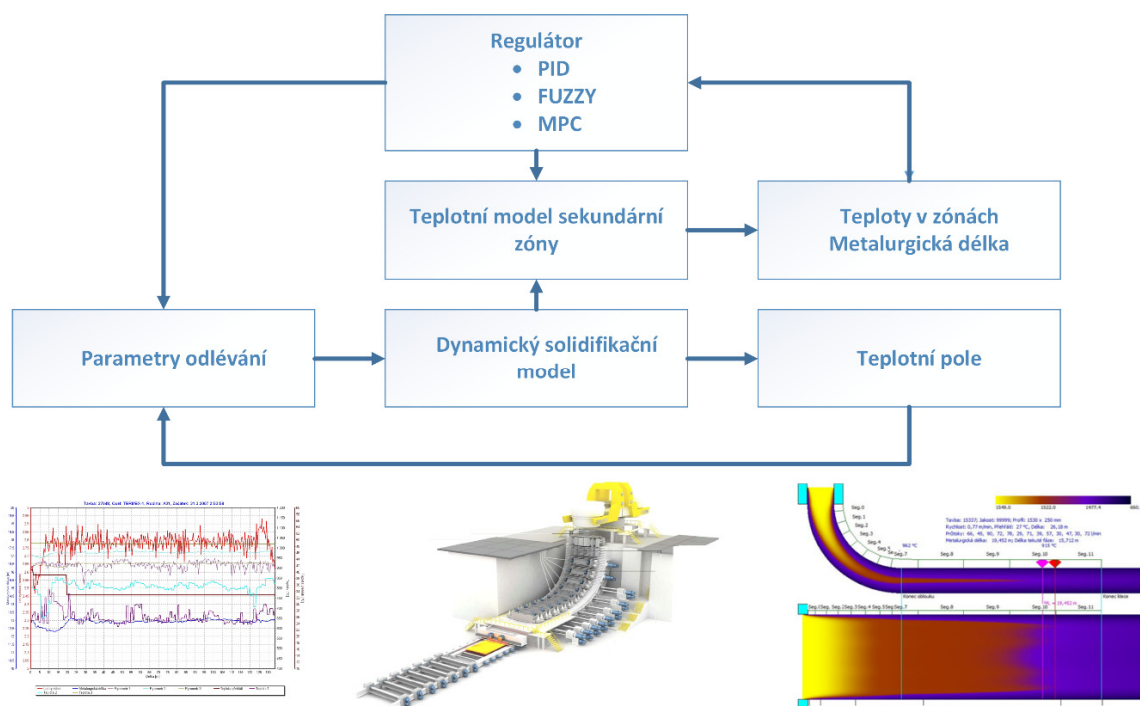
5 ŘÍZENÍ SEKUNDÁRNÍHO CHLAZENÍ A JEHO OPTIMALIZACE

Jednou z nejdůležitějších funkcí on-line modelu tuhnutí je řízení sekundárního chlazení s možností řídit licí rychlosti a řídit redukce profilu (soft-redukce).



Obr. 14 Schéma radiálního kontilitu s označením regulačních zón a umístěním pyrometrů

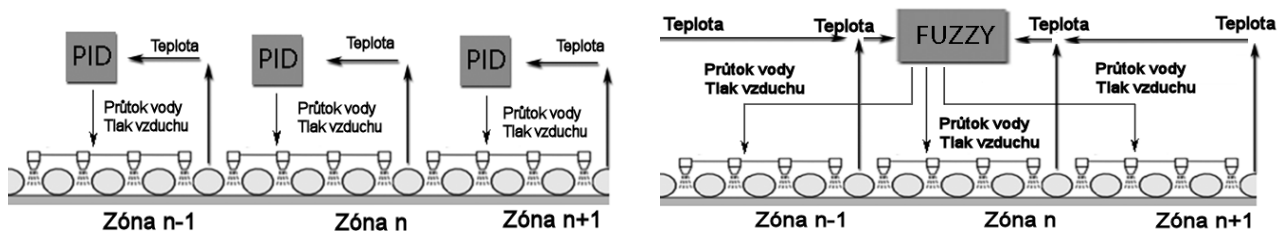
O on-line modelu BrDSM, který řídí lící rychlost a sekundární chlazení, se může hovořit jako o dynamickém modelu tuhnutí. Model doporučuje/nastavuje lící rychlost, průtoky vody a tlak vzduchu v zónách sekundárního chlazení. Proto do něj musí být vložena základní pravidla a požadované hodnoty. Lící rychlost (rychlost posuvu předlitku) má daný obvyklý technologický rozsah, např. 0,5 – 1,5 m/min. Volba z tohoto rozmezí závisí na konstrukci ZPO, z hlediska výkonu je optimální rychlost co nejvyšší. Je však limitována metalurgickou délkou. Model musí dále respektovat teplotu přehřátí a množství oceli v mezipánvi. Pro metalurgickou délku platí přímá úměra, s vyšší rychlostí lití se lineárně zvětšuje metalurgická délka. Za minimální délku lze považovat případ, kdy vrchol kužele tuhnutí je v místě konce oblouku radiálního zakřivení, za maximálně možnou, když je vrchol kužele na výstupu z klece ZPO. Pro sekundární chlazení platí, že povrchové teploty předlitku by měly mít stále klesající průběh – tj. vždy na konci každé chladicí sekce příslušného okruhu by měla být teplota nižší než na jejím začátku. V místě konce oblouku by se teploty povrchu předlitku měly pohybovat v rozmezí 900 – 1050 °C, při výstupu z klece by teploty neměly klesnout pod 800 °C. Pro každou třídu oceli lze v souvislosti se vznikem vad definovat optimální teplotní interval, ve které by se měla pohybovat teplota povrchu na malém rádiu v místě rovnání, toto je způsobené změnou namáhání z tlaku na tah viz obr. 14. Ideální je, když je toto místo zároveň monitorováno pyrometrem. Dále je nutno respektovat jednak maxima průtoků vody v jednotlivých zónách, která jsou dána výkonem čerpadel a jednak minima, která jsou dána charakteristikou trysek. Na základě pravidel model sestaví požadované teplotní intervaly za jednotlivými zónami a další omezení regulátorů.



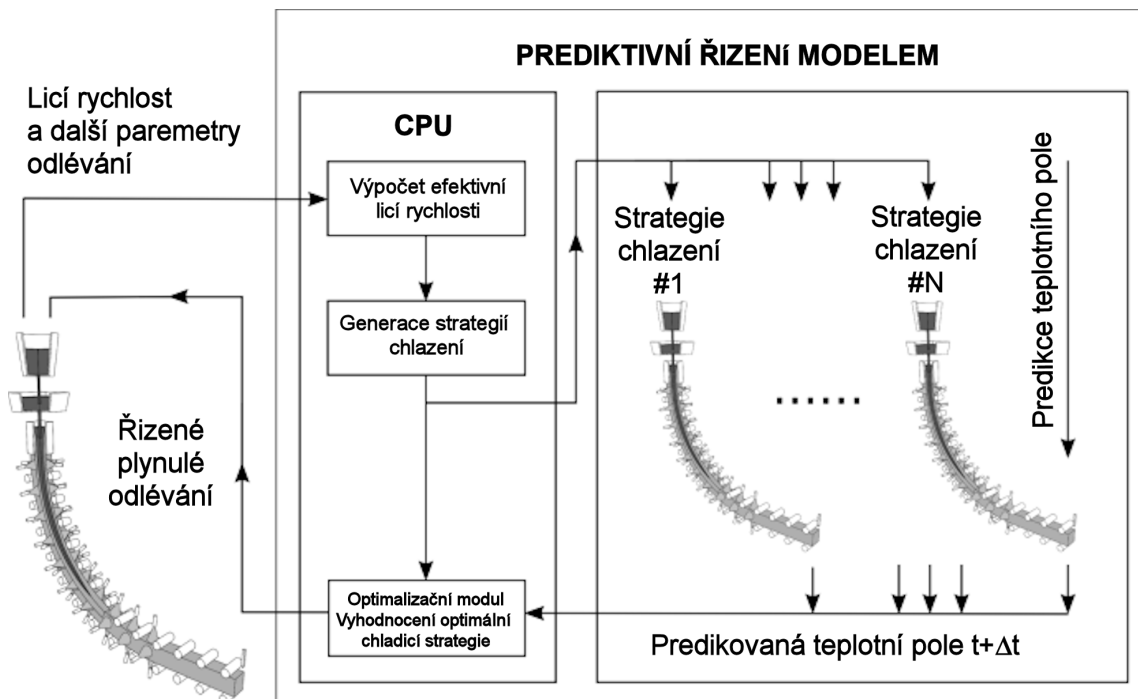
Obr. 15 Schéma regulace sekundárního chlazení

V současné době je nejčastěji používaný způsob regulace sekundárního chlazení pomocí tzv. chladicích křivek, které staticky definují závislost mezi rychlostí lití a průtokem vody v příslušné zóně. Nejčastěji je tato závislost pouze lineární. Pro nastavení chladicích křivek lze využít statický off-line model [18, 25]. Koncept chladicích křivek dává dobré výsledky, pokud nedochází ke změnám lící rychlosti. To ovšem neodpovídá praxi, kdy se lící rychlost mění po zásahu tzv. protiprůvalového systému nebo při výměně mezipánve či při jiných poruchových stavech ZPO. Na obr. 15 je schéma, jak začlenit model tuhnutí do řídicího systému ocelárny a jak na základě vypočtených teplot přímo regulovat lící rychlost a průtoky vody v jednotlivých zónách. Prvním

blokem jsou parametry odlévání, které získáme sběrem skutečných provozních dat a kterých je celkem cca dvě stě (chemické složení oceli, teplota oceli v mezipánvi, lící rychlost, skutečné průtoky, teploty a tlaky vody v krystalizátoru, parametry sekundárního chlazení atd.). Sběr dat je realizován přes standard OPC a pomocí SQL dotazů do databáze FLS (Furnace Ladle System). Dalším blokem je vlastní dynamický model, který v reálném čase počítá kompletní teplotní pole v celém předlitku. Dílčím blokem je teplotní model sekundární zóny počítající v reálném čase teploty na základě vypočtené lící rychlosti a průtoků vody z regulátoru. V současné době jsou vyvinuty tři varianty regulátoru: 1) PID regulátor, 2) Fuzzy regulátor, 3) Prediktivní regulátor založený na modelu [27]. Porovnání základní funkce např. PID a Fuzzy regulátoru je na obr. 16 [18, 25], ze kterého je patrný základní rozdíl. PID regulátor reguluje každou chladicí zónu samostatně bez vazeb na další zóny, zatímco fuzzy regulátor pracuje na základě zadaných impaktů chladicích zón na žádanou teplotu. Regulace pomocí fuzzy regulátoru zohledňuje to, že povrchová teplota za danou zónou je ovlivněna i zónami předchozími a naopak regulační chyba může být kompenzována zónami následujícími. Poslední realizovanou variantou je prediktivní regulátor, jehož funkční schéma je na obr. 17 [19, 26]. Součinnost tohoto regulátoru umožnila realizaci výpočtu teplotního pole za využití masivní paralelizace pomocí GPGPU případně karet Intel Xeon Phi.



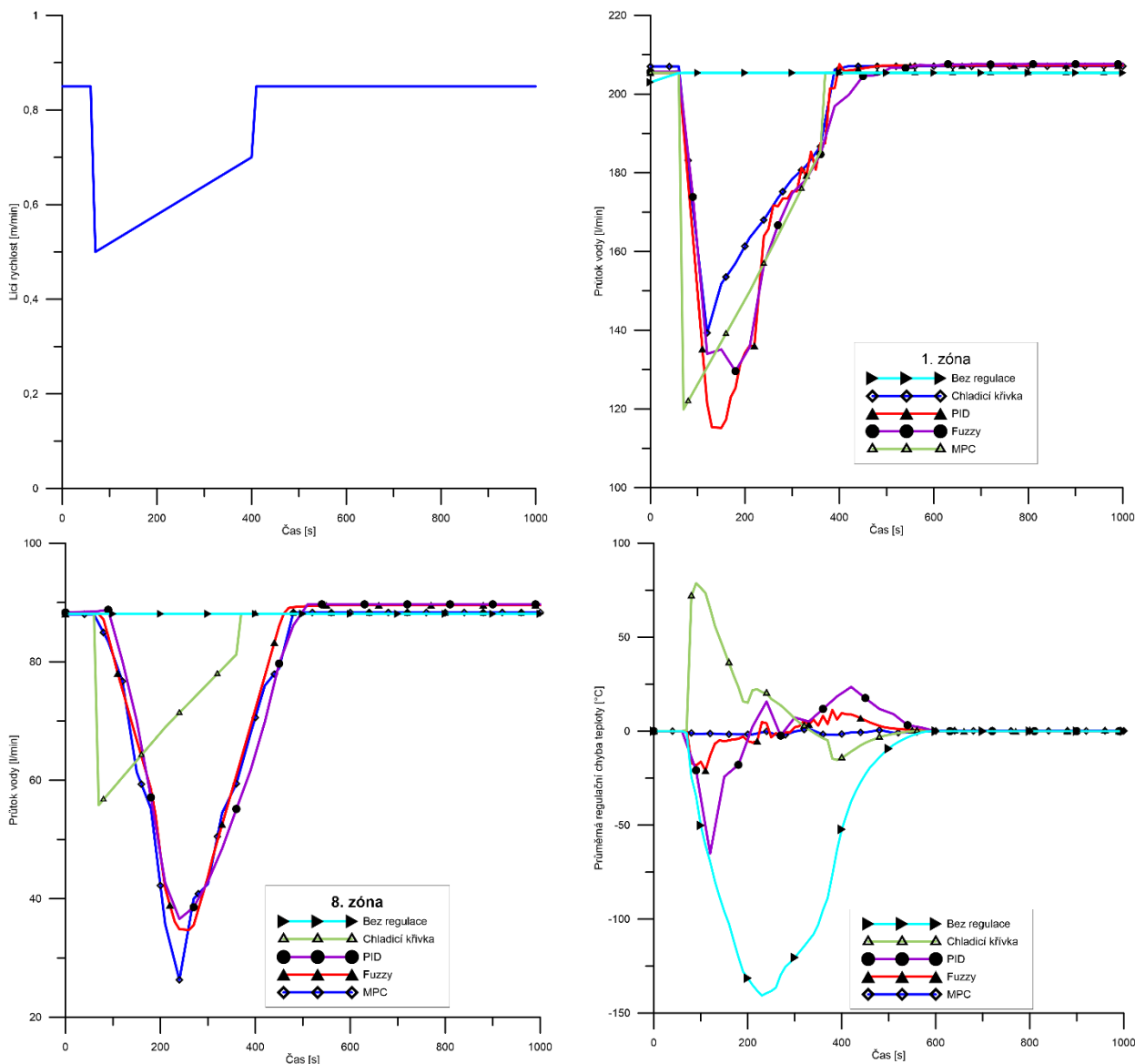
Obr. 16 Porovnání strategie PID a Fuzzy regulátoru



Obr. 17 Schéma prediktivního řízení modelem (MPC)

Výhoda trojí volby vyvinutého způsobu regulace umožňuje uživateli realizovat typ regulace podle konkrétní složitosti plynulého odlévání a konkrétního výkonu použitého výpočetního serveru. Ukázka porovnání schopností vyvinutých regulátorů je na obr. 18. V prvním grafu je vidět

průběh dynamické změny lící rychlosti vlivem zásahu protiprůvalového systému. Na druhém a třetím grafu vidíme průběh vypočtených regulačních zásahů, tj. průtoků vody v 1. a 6. zóně. Aby porovnání bylo komplexní, je znázorněno, jak by vypadal regulační zásah, pokud by byl průtok vody konstantní nebo pokud by se reguloval podle optimální chladicí křivky. Poslední graf nám umožňuje porovnat kvalitu regulace, zobrazuje průběh průměrné regulační chyby přes všechny okruhy.



Obr. 18 Porovnání regulačních zásahů při dynamické změně lící rychlosti

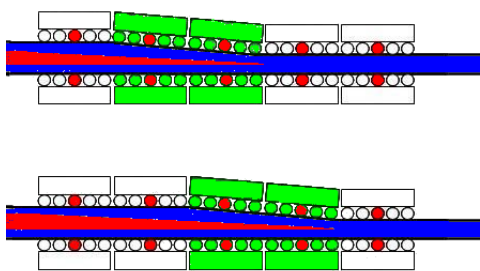
Z průběhu křivek je patrné, že pokud se průtoky vody neregulují, dochází k výraznému podchlazení předlitku, naopak koncept chladicích křivek vede k nárůstu teplot. Jestliže porovnáváme PID regulátor s fuzzy regulátorem, je vidět, že kvalita regulace fuzzy regulátorem je výrazně lepší bez výrazně vyšších výpočetních nároků. Nejlepší regulaci, prakticky bez regulační chyby v průběhu celé regulace, má MPC regulátor. Tato kvalita je však vykoupena vysokými výpočetními nároky, které jsou nerealizovatelné bez masivní paralelizace.

Výhody fuzzy regulátoru oproti PID ocenila jihokorejská firma POSCO, která si objednala simulátor ZPO od autora těchto tezí, s tímto typem regulátorem. Další výhodou je snadnější zavedení požadavků technologů na požadované povrchové teploty díky fuzzy pravidlům. Budoucnost další vývoje autor vidí zejména v rozvoji MPC regulátoru, který bude zahrnovat

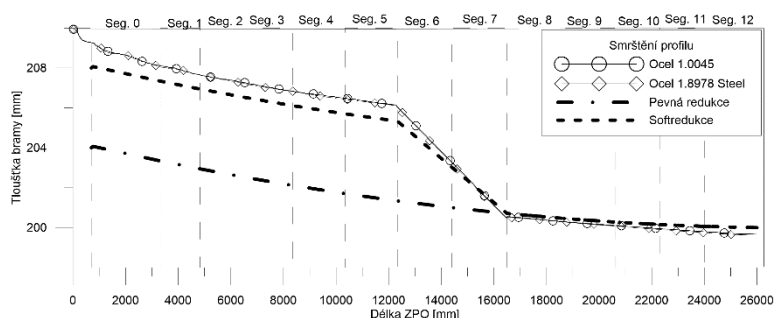
snížení jeho výpočtové náročnosti zejména rozvojem vhodných explicitních optimalizačních metod.

Jak již bylo uvedeno, je vhodné, aby regulace byla verifikována kontinuálním pyrometrickým měřením v místech naznačených na obr. 14. Jednou z funkcí této verifikace může být kontrola sekundárního chlazení. Pokud se totiž výsledky výpočtu teplotního pole i regulace na požadovanou hodnotu liší od měřených pyrometry, je to většinou způsobeno zanesením nebo poškozením chladicích trysek. Lze to doplnit os sledování skutečných charakteristik trysek a o jejich on-line srovnání s hodnotami katalogovými. Regulátor zároveň tedy může predikovat potřebu údržby sekundárního chlazení.

ZPO, které je vybaveno tzv. softredukcí, má hydraulicky stavitelnou pozici válců v segment, nejčastěji na malém radiusu obr. 19. Tímto se dosahuje výraznější redukce profilu, než odpovídá tepelnému smrštění předlitku a tím pádem se eliminují vnitřní vady předlitku. Při optimálním nastavení a pak při on-line regulaci nastavení segmentů hraje významnou roli on-line model tuhnutí, který dokáže přesně stanovit místo, kde má docházet redukci profilu tj. určit polohu kužele tuhnutí. Jelikož poloha kužele tuhnutí úzce souvisí s licí rychlostí a intenzitou sekundárního chlazení musí být řízení softredukcí, licí rychlosti a sekundárního chlazení propojeno regulačními algoritmy. Na obr. 20 vidíme průběh nastavení redukce profilu na ZPO s pevnými segmenty a na stroji se softredukcí. Zároveň můžeme vidět redukci profilu vlivem teplotního smrštění pro dvě značky oceli. Model výpočtu a řízení softredukcí byl vytvořen a nyní se čeká na možnost jeho verifikace při nasazení na reálné ZPO.



Obr. 19 Princip softredukcí



Obr. 20 Porovnání redukce profilu a teplotního smrštění

6 ZÁVĚR

Rozvoj stručně popsanych simulačních modelů pro optimalizaci a řízení plynulého odlévání oceli na pracovišti autora téží je úzce spjat s provozem ocelárny Vitkovice Steel. V tomto provozu bylo 15. 9. 1995 spuštěno první bramové ZPO na území České republiky. Již v roce 1998 autor vytvořil první numerický off-line model 3D teplotního pole při tuhnutí oceli. Využití modelu bylo v té době omezeno výkonem osobních počítačů. Simulace nestacionárního teplotního trvala přes 12 hodin, než model výpočet po dosažení stacionarity zastavil. Dalším milníkem byl rok 2003, kdy byl vytvořen první numerický on-line model 3D teplotního pole, který byl v témže roce instalovaný v provozu a je od té doby jednou ze součástí informačního, optimalizačního a řídicího systému Vitkovice Steel. Díky nárůstu výkonu PC, hlavně však díky optimalizaci vlastního kódu modelu autorův on-line model simuloval teplotní pole již v reálném čase lití, stacionární stav byl dosažen za méně jak 20 minut. Tato první úspěšná průmyslová realizace umožnila spolupráci a realizaci modelů v off-line nebo on-line verzi postupně v U. S. Steel Košice, Trineckých železárnách, Železárnách Podbrezová. Dále se uskutečnilo několik realizací v Asii, které vyvrcholily aktuální dodávkou simulátoru plynulého odlévání s fuzzy regulací sekundárního chlazení třetímu největšímu světovému výrobcu oceli - Jihokorejské firmě POSCO. Během této spolupráce vznikla řada společných publikací s pracovníky ocelářských provozů.

Souběžně se zmíněným aplikovaným a smluvním výzkumem vždy probíhal i výzkum základní. Od roku 1998 byl autorem nepřetržitě řešen alespoň jeden projekt GAČR, zabývající se aplikací modelů tuhnutí a teplotních polí v technologických procesech. Za klíčový je možno označit projekt „Numerický a stochastický model plynule odlévaných ocelových předlitků obdélníkového profilu“, který rozšířil řešení technologie plynulého odlévání o modely posuzující kvalitu předlitků a její predikci. V současné době je hlavním řešitelem projektu „Adaptivní front-tracking metoda pro paralelní řešení problémů se změnou fáze“, který se orientuje na aktuální problematiku rozvoje nových numerických metod pro řešení fázových změn vhodných pro výpočetní prostředky s vysokou paralelizací. V rámci výzkumu probíhá dlouhodobá spolupráce s pracovníky Slezské univerzity v Opavě Obchodně podnikatelské fakulty v Karviné a Vysoké školy báňské - TU Ostrava Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství, která také vyústila v řadu společných publikací, výzkumných projektů i smluvního výzkumu.

V současné době v rámci rozvoje úsporné, ekologické energetiky, je vysoce aktuální problematika akumulace tepla či chladu. Jednou z možných technologií je využití materiálu se změnou fáze (PCM). Vyvinuté modely tuhnutí pro plynulé odlévání oceli je možno adaptovat právě pro řešení úloh s PCM a tím optimalizovat či řídit jejich využívání při akumulaci tepla a chladu v různých aplikacích.

Autor od roku 2008 přednáší předmět Termomechanika, což je jeden z klíčových předmětů bakalářského studia na VUT FSI v Brně. Do přednášek aktivně zařazuje hlavní poznatky a výsledky, stejně jako zkušenosti, které nabyl při řešení projektů základního i aplikovaného výzkumu či při spolupráci s průmyslovými podniky. Od začátku této výuky je úspěšný ve snaze problematiku termodynamiky a přenosu tepla co nejvíce studentům přiblížit a zpopularizovat. Seminář aplikované termomechaniky, který jako nepovinný předmět navrhl a zavedl v roce 2008, je stále jedním z nejlépe studenty hodnocených předmětů. Ukázky praktického nasazení teplotních modelů do průmyslu nejvíce studentům přiblíží teorii. S tematikou plynulého odlévání vedl také několik diplomových a bakalářských prací, ale především dvou disertačních prací, které jeho doktorandi již velice úspěšně obhájili a zůstali na mateřském pracovišti na post-doktorských pozicích. Pod vedením autora tak vznikla velice aktivní výzkumná skupina zaměřená na numerická řešení technologických procesů, především hutnických a slévarenských a na aplikace materiálů se změnou fáze. Zvládá tvorbu numerických modelů tuhnutí (teplotních modelů), optimalizaci, řízení a regulaci s využitím masivní paralelizace. Všechny tyto činnosti chce dále rozvíjet. Tato skupina se například jako jediný zástupce akademických pracovišť České republiky představila svými výsledky na dvou nejvýznamnějších světových ocelářských kongresech: ECCO 2014 – 8th European Continuous Casting Conference [28] a The METEC and 2nd European Steel Technology and Application Days (ESTAD) [29]. Přednášky vzbudily široký ohlas mezi pracovníky oceláren, ale i konkurenčních pracovišť, jako jsou vývojové týmy PRIMETALS Technologies (Siemens VAI), Danieli a SMS Demag.

Hlavními směry autorova dalšího výzkumu budou nové numerické metody vhodné pro masivní paralelizaci tak, aby bylo možno v reálném čase modifikovat makro model tuhnutí a rozšířit jej o modul, který bude predikovat tvořící se primární strukturu, vznik jejích případných vad a zajistí její optimalizaci. Dalším zamýšleným modulem bude řešení tepelně – mechanického namáhání tuhoucích a chladoucích soustav, současné době řešeno jako disertační práce pod jeho vedením. V oblasti aplikovaného výzkumu je orientace ještě jasnější – implementace modelu do vysokorychlostního bramové ZPO a pro plynulé odlévání umožňující změnu profilu za provozu. Tyto aplikace vyžaduje rozvoj zejména časových diskretizačních schémat a metod s adaptací výpočtové sítě v průběhu výpočtu.

Poděkování

Poděkováním patří prof. Ing. Františku Kavičkovi, CSc. za to, že mne přivedl k tématice plynulého odlévání oceli, dále mému výzkumnému týmu, bez kterého by nebyly dosaženy tyto výsledky výzkum a vývoje. V neposlední řadě patří poděkování mojí rodině za její bezmeznou trpělivost.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Dahmen, B., Economical and flexible tailor-made solutions for the production of new steel grades, In METEC & 2nd ESTAD 2015 Proceedings. 1. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2015. s. 1-8. ISBN: 978-3-00-049542- 7
- [2] Sulaiman H. Steel in automotive industry– the view from the supply chain, In METEC & 2nd ESTAD 2015 Proceedings. 1. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2015. s. 1-8. ISBN: 978-3-00-049542- 7
- [3] Bleck, W. New Methods in Steel Design, . In METEC & 2nd ESTAD 2015 Proceedings. 1. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2015. s. 1-8. ISBN: 978-3-00-049542- 7
- [4] Fischer, L., Well-proven continuous casting technology and favorable new products, Sborník příspěvků The 8th European Continuous Casting Conference ECCO 2014. Leoben, Austria: Austrian Society for Metallurgy and Materials, 2014. s. 266-275. ISBN: 978-3-200-03664- 2
- [5] Flick, A., The future of continuous casting: challenges and opportunities, Sborník příspěvků The 8th European Continuous Casting Conference ECCO 2014. Leoben, Austria: Austrian Society for Metallurgy and Materials, 2014. s. 266-275. ISBN: 978-3-200-03664- 2
- [6] Irving, W. R., Continuous casting of steel. The Institute of Materials, 1993. ISBN 0 901716537.
- [7] Birat, J. P., 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.
- [8] Louhenkilpi, S.: Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes, kapitola Continuous casting of steel. Elsevier, 2014, s. 373–434. ISBN 978-0-08-096988-6.
- [9] 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.
- [10] Stefanescu, D. M., Science and Engineering of Casting Solidification, Second Edition, Springer Science, 2009. 412 s. ISBN 978-0-387-74609-8
- [11] Stetina, J., Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy. Dizertační práce., TÚ-VŠB Ostrava, Ostrava 2007
- [12] Stetina, J., Optimalizace parametrů lití sochorů pomocí modelu teplotního pole Habilitační práce., TÚ-VŠB Ostrava, Ostrava 2008
- [13] Tavakoli, R., Davami, P., Unconditionally stable fully explicit finite difference solution of solidification problems, Metallurgical and Materials Transactions B, 38 (2007) 1, 121-142
- [14] Swaminathan, C.R., Voller, V.R., A general enthalpy method for modelling solidification processes, Metallurgical Transactions B, 23 (1992) 5, 651-664
- [15] Sadoun, N., Si-Ahmed, E.K., Legrand, J., On heat conduction with phase change: Accurate explicit numerical method, Journal of Applied Fluid Mechanics, 5 (2012) 1, 105-112
- [16] Zhang, J., Chen, D., Wnag, S., Long, M., Compensation control model of superheat and cooling temperature for secondary cooling of continuous casting, Steel researcher 82 (2011) 3
- [17] Hardin, R. A., Liu, K., Kapoor, A., Beckermann, C. A transient simulation and dynamic spray cooling control model for continuous steel casting. Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, ročník 34, c. 3, 2003: s. 297–306. ISSN 1073-5615.
- [18] Mauder, T., Optimalizace bramového plynulého odlévání oceli za pomoci numerického modelu teplotního pole. Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 150 s.
- [19] Klimeš, L., optimalizace parametru sekundárního chlazení plynulého odlévání oceli. Dizertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 150 s.

- [20] 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.
- [21] Miettinen, J., Louhenkilpi, S., Kytönen, H., Laine, J. IDS: Thermodynamic–kinetic–empirical tool for modelling of solidification, microstructure and material properties. *Mathematics and Computers in Simulation*, ročník 80, c. 7, 2010: s. 1536–1550. ISSN 0378-4754.
- [22] Bringas, J. E., Handbook of Comparative World Steel Standards Third Edition ASTM International 2004. ISBN 0-8031-3042-2
- [23] Sanders, J., Kandrot, E. CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming. První vydání. Boston: Addison-Wesley Professional, 2010. 312 s. ISBN 978-0131387683.
- [24] Chakroun, I., Melab, N., Mezmaiz, M., Tuytens, D., Combining multi-core and GPU computing for solving combinatorial optimization problems, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73 (2013) 12, 1563-1577
- [25] Mauder, T., Šandera, C., Štětina, J. A fuzzy-based optimal control algorithm for a continuous casting process. *Materiali in tehnologije*, ročník 46, c. 4, 2012: s. 325–328. ISSN 1580-2949.
- [26] 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 ECCO, ASMET, 2014, s. 266–275. ISBN 978-3-200-03664-2.
- [27] 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.
- [28] Štětina, J., Mauder, T., Klimeš, L., Masarik, M., Operational experiences with the optimization of secondary cooling. In Proceedings of the 8th European Continuous Casting Conference ECCO 2014. Leoben, Austria: Austrian Society for Metallurgy and Materials (ASMET), 2014. s. 1181-1190. ISBN: 978-3-200-03664- 2.
- [29] Štětina, J., Klimeš, L., Mauder, T., New Challenges in Modelling and Secondary Cooling Control of Continuous Steel Casting. In METEC & 2nd ESTAD 2015 Proceedings. 1. Dusseldorf: Steel Institute VDEh, 2015. s. 1-8. ISBN: 978-3-00-049542- 7.

ABSTRACT

The thesis of the lecture deals with the increasing trend of the world production of steel as a strategic construction material. A continuous casting machine (caster) has been used as a modern and perspective technology in steel production since 1980. The products of continuous casting are steel blanks of various sizes and profiles. The ever increasing demand for not only the quantity but in recent years primarily the quality of the steel blanks can no longer be met without numerical modeling of the processes that take place in the caster. The numerical models are used for optimization of the casting processes and where it possible also for their control.

The presented numerical model addresses the development of the temperature field in a steel blank passing through the caster. The physical conditions and the factors that influence solidification of steel in the caster and the overview of the main approaches to numerical simulation of solidification and their comparison are presented in the thesis. The thesis also introduces the physical conditions and the factors that influence the solidification process, the most significant of which were included in the original macro-solidification model for the temperature distribution in a blank. The temperature field in a blank during the casting process is obtained by the solution of the transient 3D enthalpy balance equation with the control volume method. The brief description of the model includes the spatial and temporal discretization, the importance of thermo-physical properties of steel and the determination as well as the specification of the boundary conditions in various parts of the caster, especially under the cooling nozzles.

The thermo-physical properties of typical steels including their dependence on temperature are compared in the thesis. Examples of the simulation results and their comparison with the pyrometer measurements of the surface temperature of the strand at the control point of the caster are presented. A close cooperation in numerical simulations of the steel continuous casting process was established with Vitkovice Steel steelworks, where the author's software continuously operates in the online mode in the control room of the slab caster. The software controls and optimizes secondary cooling as a key part of the caster and it also controls the casting speed (speed of the blank moving through the caster).

The importance of the task parallelization in order to achieve the real-time computation of the temperature distribution in the blank is explained in the thesis together with the concepts of massive parallelization and GPGPU. The software frameworks for massive parallelization, such as CUDA, OpenCL and C++ AMP are addressed. The concept of the control and information system in a steelwork and the way of incorporation of the integrated dynamic model of solidification in that concept is outlined. A significant attention is given to the control of the secondary cooling system where three different types of controllers, namely PID, fuzzy and predictive, are presented. This is to ensure a correct process procedure: real process → input data → numerical analysis → control/optimization → correction of process.

In conclusion, the examples of industrial cooperation, utilization of research results in education and the opportunities for further development of the numerical model are presented, including the possible use of the model in simulations of thermal energy storage systems with phase change materials.