



Odborná zpráva projektu TAČR GAMA č. TG01010054-2  
rok 2015

Evidovaná APOLLO 120086

# VÝPOČETNÍ ANALÝZA - KOMPLEXNÍ SYSTÉM DYNAMICKÉHO ŘÍZENÍ KVALITY PLYNULE ODLÉVANÉ OCELI

(Computational Analysis - Complex system of dynamic quality management continuously  
cast steel)

**Autoři:** doc. Ing. Josef ŠTĚTINA, Ph.D.  
Prof. Ing. František KAVIČKA, CSc.  
Ing. Lubomír KLIMEŠ, Ph.D.  
Ing. Tomáš MAUDER, Ph.D.

**Datum:** 30. 11. 2015

## OBSAH

1. ÚVOD .....	3
2. ORIGINÁLNÍ MAKRO–MODEL TUHNUTÍ BRDSM .....	4
2.1. PROSTOROVÁ A ČASOVÁ DISKERETIZACE, POČÁTEČNÍ PODMÍNKY.....	4
2.2. OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	7
2.3. TERMOFYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ODLÉVANÝCH OCELÍ .....	8
3. INTEGRACE MODELŮ.....	10
4. ZÁVĚR .....	12
5. SEZNAM PUBLIKACÍ S TÉMATIKOU PROJEKTU .....	13

## 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.

Výsledky zde prezentovaného výzkumu umožní optimalizaci výroby oceli pro stavbu konstrukcí a zařízení v příbřežních mořských vodách tzv. „offshore“ a dále při výrobě ocelí pro vysokopevné mikrolegované plechy určené pro produktovody a plechy pro kotlové nádoby, určené pro tzv. kyselá prostředí a mnoha dalších aplikací.

## 2. ORIGINÁLNÍ MAKRO-MODEL TUHNUTÍ BRDSM

Je zde předložen nástin makro-modelu tuhnutí, na jehož základě je postaven vyvíjený software. Název modelu je připraven k registraci pod ochrannou známkou BrDSM (Brno Dynamic Solidification Model bude podána v roce 2016). Bližší popis jeho podstaty uvedl autor již ve své v 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). Zavedeme souřadný systém celého předlitku podle obr. 1. 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,  $\rho$  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<sup>-3</sup>] 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  $T_l$ .

Na základě dlouhodobých zkušenosti a testování všech metod je tedy pro řešení plynulého odlévání oceli upřednostňována metoda entalpie. 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.m<sup>-3</sup>], která je definována vztahem

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

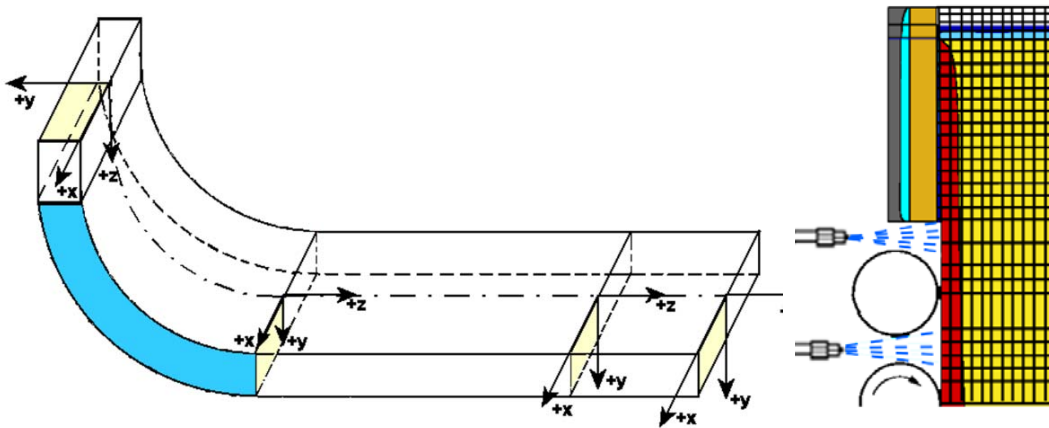
Při praktické realizaci je funkční závislost entalpie na teplotě nahrazena tabelovanými hodnotami.

### 2.1. PROSTOROVÁ A ČASOVÁ DISKRETIZACE, POČÁTEČNÍ PODMÍNKY

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. 1, 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 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 uzly sítě volí do místa kontaktu válce s předlitem nebo do středu plochy ostříkované chladicí tryskou. Uživatel potom volí počet uzlů mezi těmito uzly pevnými.



**Obr. 1** 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 je požit jednoduchý explicitní (Simple Explicit SE) přístup. Jak je všeobecně známo, je tato metoda podmíněně stabilní. Proto je nutné podle aktuálně provedené prostorové diskretizace a podle aktuální lící 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 [ $W \cdot m^{-3}$ ] kontrolního objemu (obr. 5) v čase  $t + \Delta t$ , je rovnice (5)

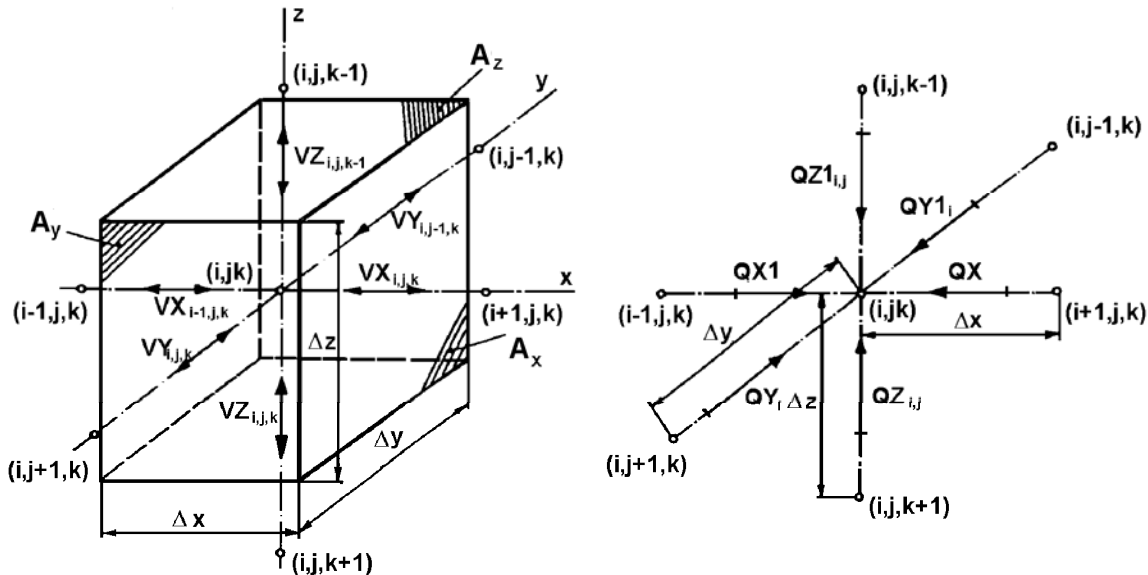
$$H_{v_{i,j,k}}^{(t+\Delta t)} = H_{v_{i,j,k}}^{(t)} + \left( Qz1_{i,j} + Qz_{i,j} + Qy1_i + Qy_i + Qx1 + Qx \right) \frac{\Delta t}{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (5)$$

$Qx$ ,  $Qy$  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. 2** 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. Jedná se o časově nejnáročnější operaci výpočtu, proto pro vyhledávání byly vyvinuty velmi rychlé algoritmy.

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 výpočtetní 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.

## 2.2. OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Okrajové podmínky v různých místech řešené soustavy jsou popsány rovnicemi 7a až 7e. 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  $L_K$ .

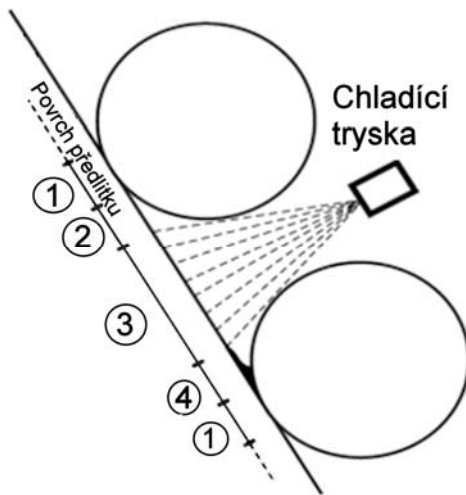
$$T = T_{licí} \quad (7a)$$

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

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

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

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



**Obr. 3** Okrajové podmínky v oblasti sekundárního chlazení

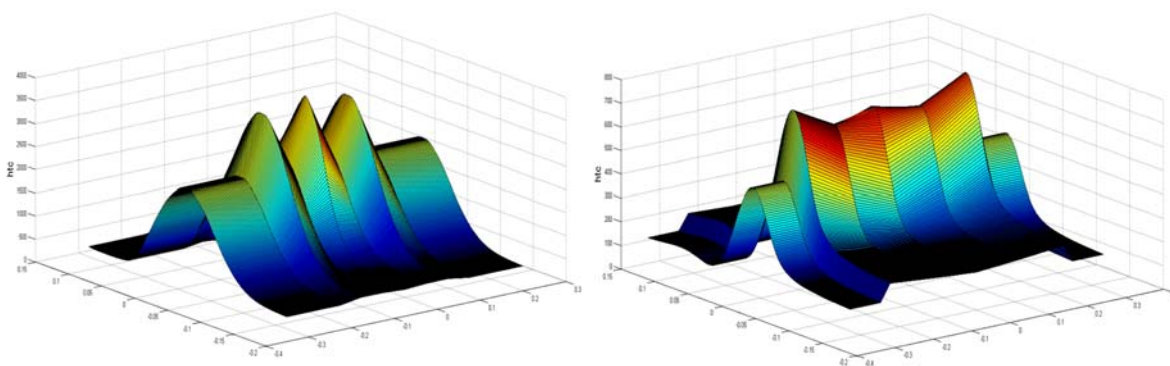
Pro modelování předlitku je stěžejní oblast sekundárního chlazení. Na obr. 3 je zobrazen detail okrajových podmínek v této oblasti. Číslem 1 je označena oblast kontaktu s válcem, pro kterou platí okrajová podmínka definovaná rovnicí (7e), ve které  $T_{povrch}$  je teplota povrchu předlitku,  $w$  je licí rychlost (rychlost posuvu předlitku),  $\theta$  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  $h_{tc}$  a vliv radiace, která závisí na Stefan-Bolzmannově konstantě  $\sigma_o$  a emisivitě  $\varepsilon$ ,

rovnicí (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  $h_{tc}$  danou rovnicí (9). 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.

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

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

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, která se dlouhodobě věnuje experimentálnímu stanovení součinitelů přestupu tepla a jejich rozložení pod tryskami. Na obr. 4 jsou zobrazeny naměřené a zpracované průběhy součinitelů přestupu tepla pro dva rozdílné typy vodovzdušných trysek používaných u moderních bramových ZPO.



**Obr. 4** Naměřené rozložení součinitele přestupu tepla pod vodovzdušnými chladícími tryskami

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.

### 2.3. 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.

Na základě katalogu ocelí 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 chemicky složením.

### 3. INTEGRACE MODELŮ

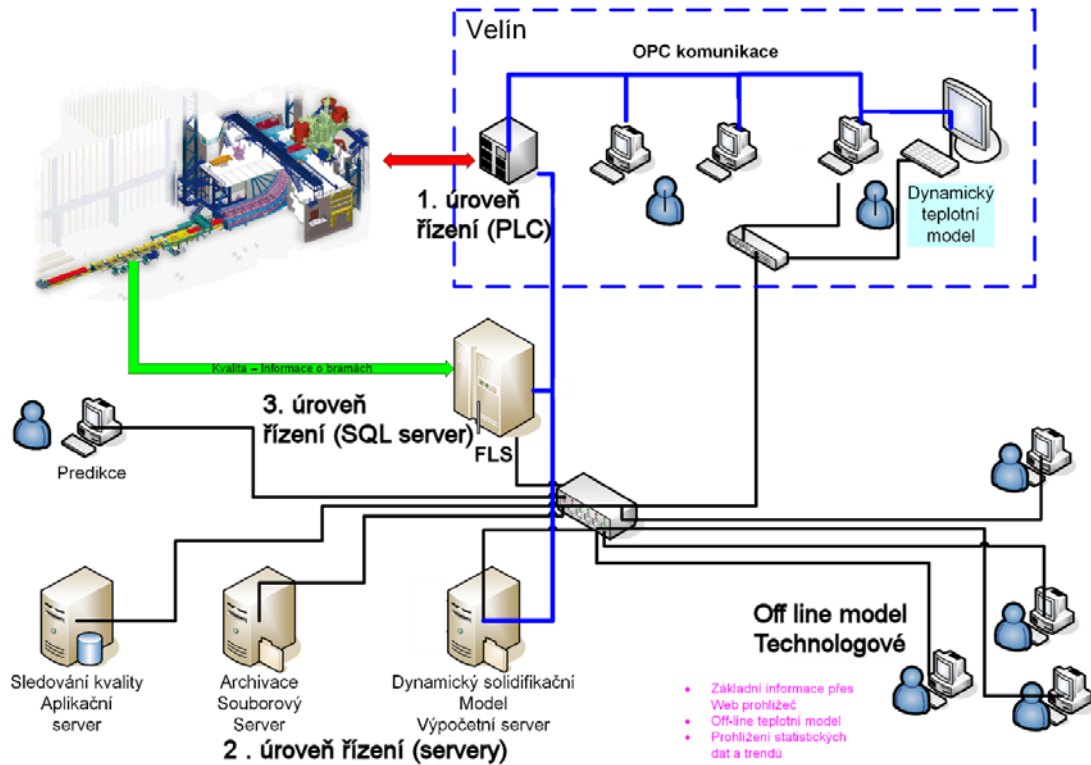
Možností paralelizace kódu modelu bylo využití vícejádrových procesorů, např. dnešní procesory Intel Xeon mohou mít až 16 fyzických jader a dvojnásobek virtuálních. Z pohledu vývoje modelu tuhnutí je to jen posun evoluční. Vlákna byla nahrazena samostatnými procesy, které pracují se samostatným paměťovým 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.



**Obr. 5** Výpočetní server vhodný pro provoz on-line modelů a Intel Xeon Phi, GPU karta nVidia

Řídicí systém ocelárny (obr. 6) 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. 5 a 6). 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. 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 úplně a ověřené údaje jsou dynamickým solidifikačním model využity pro výpočet.

INTEGRACE MODELŮ DO ŘÍDÍCIHO SYSTÉMU OCELÁRNY



Obr. 6 Schéma začlenění simulačních modelů do řídicího systému ocelárny

## 4. ZÁVĚR

Řešitelé projektu 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 a The METEC and 2nd European Steel Technology and Application Days (ESTAD). Přednášky vzbudily široký ohlas mezi pracovníky oceláren, ale i konkurenčních pracovišť, jako jsou vývojové týmy PRIMETALS Technologies (Siemens VAI), Danieli a SMS Demag a na domácí akci METAL 2015. Všechny publikace, které vznikly v roce 2015, jako propagace výsledků řešení tohoto projektu jsou uvedeny v poslední kapitole této zprávy.

Za dosavadní dobu řešení projektu bylo tedy realizováno výpočetní jádro systému, modul výpočtu okrajových podmínek, database termofyzikálních vlastností ocelí a modul řízení sekundárního chlazení.

Pro rok 2016 je podle plánu připravena realizace grafického rozhraní programu, včetně weboské

## 5. SEZNAM PUBLIKACÍ S TÉMATIKOU PROJEKTU

- [1] ŠTĚTINA, J.; MAUDER, T.; KLIMEŠ, L.; KAVIČKA, F. NUMERICAL MODELS AND THEIR INDISPENSABILITY FOR FLEXIBLE CONTROL OF CONTINUOUS STEEL CASTING. In METAL 2015 24th International Conference on Metallurgy and Materials. 1. Ostrava: Tanger Ltd Ostrava, 2015. s. 98-104. ISBN: 978-80-87294-58- 1.
- [2] KLIMEŠ, L.; ŠTĚTINA, J.; MAUDER, T. Steel structure prediction for continuous steel casting by means of a parallel GPU- based heat transfer and solidification model. In Conference Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), Volume x. ASME, 2015. s. 1-8. ISBN: bude doplněno.
- [3] KLIMEŠ, L.; MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J. Comparison of regulation algorithms for secondary cooling of continuous casting process. In Proceedings of METAL 2015. Ostrava: TANGER Ostrava, s.r.o., 2015. s. 39-44. ISBN: 978-80-87294-58- 1.
- [4] KLIMEŠ, L.; MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J. Pokročilé metody řízení provozu stroje pro plynulé odlévání oceli. In Sborník příspěvků odborné konference ŽP VVC 2015. Podbrezová, Slovensko: ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., 2015. s. 41-46. ISBN: 978-80-972091-4- 8.
- [5] MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J. Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic. STEEL RESEARCH INTERNATIONAL, 2015, roč. 86, č. 7, s. 785-798. ISSN: 1611- 3683.
- [6] KLIMEŠ, L.; ŠTĚTINA, J. A rapid GPU- based heat transfer and solidification model for dynamic computer simulations of continuous steel casting. Journal of Materials Processing Technology, 2015, roč. 226, č. 1, s. 1-14. ISSN: 0924- 0136.
- [7] ŠTĚTINA, J.; KATOLICKÝ, J.; RAMÍK, P. CONTROL OF SOFT REDUCTION OF CONTINUOUS SLAB CASTING WITH A THERMAL MODEL. Materiali in tehnologije, 2015, roč. 5, č. 49, s. 725-729. ISSN: 1580- 2949.
- [8] 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.