

Začlenění dynamického modelu BrDSM teplotního pole plynule odlévané bramy do řídicího systému ve VÍTKOVICE STEEL a.s.

Integration of the Dynamic Solidification Model BrDSM of Temperature Field for Continuous Slab Casting to the Control System in VITKOVICE STEEL a.s.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.; prof. Ing. František Kavička, CSc.; doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.; Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.; Ing. Lubomír Klimeš, Ph.D.; Ing. Bohumil Sekanina, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Je popsána originální aplikace on-line verze modelu teplotního pole plynule odlévané bramy cestou paralelizace a integrace modelů. Dynamický model tuhnutí ve své on-line verzi byl úspěšně dlouhodobě začleněn do tříúrovňového řídicího systému ocelárny VÍTKOVICE STEEL a.s. a byl v plném nasazení až do ukončení činnosti tohoto provozu. Použití off-line verze modelu je prezentováno na parametrické studii provozních parametrů (např. vlivu licí rychlosti, teploty přehřátí oceli a vlivu rozměru bramy) na průběh jejího tuhnutí. Je také popsáno využití on-line verze modelu k řízení a optimalizaci sekundárního chlazení s možností řídit rychlost lití a k řízení tzv. soft-redukce profilu bramy mezi přitlačnými hydraulicky stavitelnými válci, která může eliminovat vnitřní vady bramového předlitku. Za pomoci modelů je též řešen provozní problém výměny trysek a nasazení Fuzzy a MPC regulátoru.

Klíčová slova: dynamický model tuhnutí; řídicí systém ocelárny; paralelizace řešení; integrace modelů; optimalizace chlazení; soft-redukce; výměna trysek; Fuzzy regulátor; MPC regulátor; parametrické studie

The paper deals with the original on-line and off-line dynamic solidification model for continuous slab casting process including software parallelization and system integration. Dynamic solidification model (DSM) was successfully integrated and long-term used in the 3-level control system in the company Evraz Vitkovice Steel, a.s. The off-line version of the DSM was used for study of process parameters (e.g. influence of casting speed, casting temperature, slab size, etc., on solidification phenomena). On-line version of the DSM was used for secondary cooling optimization by controlling the casting speed and soft reduction in order to increase the final slab quality. Combination of Fuzzy and Model Predictive Control (MPC) regulation with the DSM ensured smooth nozzle type replacement in the secondary cooling zone.

Key words: dynamic solidification model; casting control system; software parallelization; model integration; cooling optimization; soft-reduction; nozzle replacement; Fuzzy regulation; MPC regulation; parametric study

1. Význam off-line a on-line verze teplotního modelu BrDSM

Nejprve byl za pomoci výsledků provozních měření vytvořen, testován a ověřen off-line model. Umožňuje analyzovat teplotní pole vlastního předlitku při jeho průchodu primární, sekundární i terciární zónou, tedy celým zařízením pro plynulé odlévání oceli (ZPO) s plnou 3D geometrií. Model plně zohledňuje nelinearity úlohy, tzn. závislost termofyzikálních vlastností především materiálu předlitku (oceli) na teplotě, stejně jako závislost okrajových podmínek na teplotě a na dalších vlivech (rychlost posuvu, intenzita ostříku, oscilace krystalizátoru, elektromagnetické míchání atd.). Model je vybaven nejen interaktivním grafickým prostředím pro snadné zadávání vstupních parametrů s následnou automatickou generací sítě, ale také komfortním grafickým výstupem, který umožní zobrazení

teplotního pole ve formě izoterem nebo izoploch v různých řezech, zobrazení časových křivek, zobrazení teplotního pole ve 3D apod. Programový systém založený na tomto modelu má snadné ovládání, aby bylo možno bez problémů měnit potřebné parametry a aby jeho obsluha byla možná zaškolenými pracovníky ocelárny. Provozní obsluha ZPO má k dispozici i manuál a on-line nápovědu. Model tak slouží k okamžitému využití při řešení provozních problémů. Provádí obecnou analýzu vlivu nejrůznějších technologických opatření na utváření teplotního pole předlitku v kterémkoli uzlu ZPO i ZPO jako celku. Tzv. parametrické studie analyzují separátní vliv jednotlivých vstupních technologických parametrů, a to sekundárního chlazení, chemického složení oceli, licí rychlosti, teploty přehřátí, stejně jako všech rozměrů bramy na teplotní pole bramového předlitku. Tyto parametrické studie slouží jednak k ověření správnosti matematického modelu,

jednak k nastavení technologických předpisů pro odlévání na ZPO.

Obecně off-line model dovoluje dále uživateli navrhnout třeba i netradiční soubor či kombinaci technologických zásahů k optimálnímu utváření teplotního pole s cílem komplexně zvýšit kvalitu předlitku při zachování nebo zvýšení produkce. Porovnáním několika navržených variant technologických opatření může uživatel nalézt optimální řešení. Stejně tak off-line verze pomůže pracovníkům ocelárny analyzovat mimořádný stav ZPO včetně etapy zahájení a ukončení lití. Off-line verze může rovněž velice pružně a zasvěceně pomoci vybavit stávající ZPO např. novým systémem chlazení, případně navrhnout zcela nový provoz ZPO. Nevýhodou off-line systému je zejména značná časová prodleva od výskytu mimořádného stavu po identifikaci jeho příčiny a po provedení nápravy a dále pracné off-line zajišťování vstupních údajů pro výpočet.

On-line (dynamický) model, jehož vytvoření nutně předcházela jeho off-line verze, řeší teplotní pole v reálném čase, případně i rychleji, když predikuje budoucí stav. Mnohonásobné zvýšení rychlosti výpočtu teplotního pole předlitku umožňuje nejen využití výkonnějšího výpočetního hardwaru, ale především softwaru. V takto krátkém čase tak lze sledovat vývoj teplotního pole v oblasti krystalizátoru, sekundárního i terciárního chlazení a tyto informace využít pro optimální řízení ZPO jako celku i jednotlivých jeho klíčových uzlů. Dynamický model na základě okamžitého vyhodnocení měřených dat a vypočtených hodnot provede v reálném čase úpravy licích parametrů, zejména licí rychlosti a průtoků vody tryskami v sekundárním chlazení. Později je možno předpokládat úpravy chlazení krystalizátoru, frekvence a amplitudy pohybu krystalizátoru a dalších parametrů. Základní podmínkou realizace byl návrh a zajištění vhodného hardwaru a jeho optimální napojení do stávajícího řídicího systému na ZPO. Funkčnost on-line modelu teplotního pole je totiž podmíněna dostupností on-line vstupních dat, jako je licí teplota, rozměry předlitku, chemické složení lité oceli, licí rychlost, poloha hladiny v krystalizátoru, teplota chladicí vody v krystalizátoru na vstupu a výstupu, průtok vody, nastavení průtoků a tlaku vody v sekundárním chlazení, teploty z pyrometrů v sekundárním chlazení. Tato data poskytuje do modelu BrDSM separátní vyvinutý program se standardním rozhraním. Toto rozhraní je naprogramováno dle aktuálního stavu řízení a je ve zdrojových textech k dispozici odběrateli, aby si mohl při změně řízení interface modifikovat.

Není vhodné, aby teplotní model četl data z technologie přímo, protože technologie, resp. signály z provozních snímačů a dalších provozních terminálů, jsou z hlediska struktury dat heterogenní. Z charakteru dat plyne, že vznikají s různou vzorkovací frekvencí, takže komunikační program musí zajistit sjednocení časové základny, tj. všechna data musí být poskytnuta najednou v ekvidistantním časovém kroku. Dynamický model rovněž obsahuje filtry pro všechny veličiny, které zjistí,

zda je hodnota veličiny platná (zda leží v daném intervalu), a které tyto zjištěné veličiny vhodně zpracují (průměrování, vyhledání maxima apod.).

Základní vyhodnocované výstupní parametry jsou průběh povrchových teplot po celé délce ZPO, tloušťka ztuhlé kůry předlitku při jeho průchodu ZPO, délka a tvar tekutého jádra předlitku, průběh izosolidy a izolikvidy po celé délce ZPO, rozložení teplot (teplotního pole) v libovolném zvoleném příčném nebo osovém podélném průřezu a čase. Tyto parametry model přes zmíněný interface poskytuje nadřazenému řídicímu systému ocelárny do druhé úrovně řízení (odst. 1.2 a obr. 3 dále v textu).

On-line systém dále umožňuje archivaci výpočtu dat reálných taveb (podle velikosti datového skladu se předpokládá minimálně doba jednoho roku) a jejich případné zpětné prohlížení. U taveb s výskytem vad je možno průběh tuhnutí znovu přehrát, off-line systémem znovu simulovat a navrhnout taková technologická opatření (změnu rychlosti, změnu ostřikového plánu atd.), aby se při příštím odlévání obdobné tavby vady již neobjevily.

Práce tedy představuje dynamizaci matematického modelu jak v jeho off-line verzi, tak zejména on-line verzi. On-line model byl po řadu let začleněn do provozu a systému řízení ZPO. Dokazuje to jeho užitečnost pro reálné nasazení a svědčí také o spolehlivosti a robustnosti použitých numerických metod i dalších softwarových částí. Model byl již konkrétně použit pro tyto úkoly:

- výpočet a nastavení konstant řídicího systému ZPO,
- simulování provozu ZPO při nestandardních situacích (např. výpadku části sekundárního chlazení, při nečekaném zpomalení lití),
- plánování údržby stroje nebo jeho konstrukčních úprav,
- využití řady informací, které pomáhají obsluze k operativním změnám v řízení stroje a k predikčním funkcím v systému sledování a řízení kvality,
- přímé řízení licí rychlosti a průtoků vody v jednotlivých zónách sekundárního chlazení.

2. Paralelizace řešení a integrace modelů

Řešení 3D nestacionárního teplotního pole plynule odlévaného předlitku je 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 licí 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

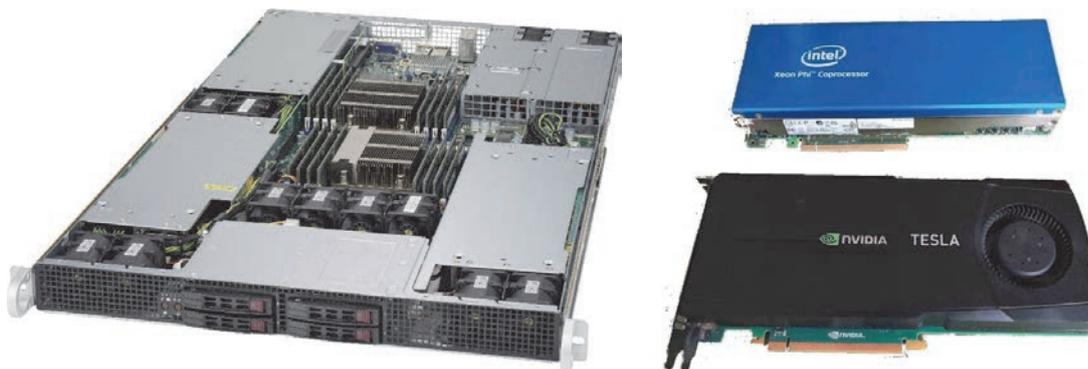
výsledky mohly být využity pro on-line optimalizaci, regulaci a řízení plynulého odlévání. S těmito stále náročnějšími požadavky uživatelů se autor on-line modelu tuhnutí musí vyrovnávat průběžně a intenzivně. Cesty k řešení tohoto problému jsou: vývoj rychlejších algoritmů a optimalizace vlastního programového kódu, zvyšování výkonu procesorové jednotky a v poslední době nejdůležitější využití paralelizace. Právě její využití se jeví jako rozhodující trend, který však řešitele opět vrací k vývoji a optimalizaci algoritmů i programového kódu.

Je třeba si uvědomit, že paralelizací ušetřený čas neroste s počtem jednotek lineárně, protože program brzdí přirozeně sekvenční části programu, které nelze paralelizovat. Maximální možné paralelní zrychlení udává Amdahlův zákon definovaný rovnicí (1)

$$S_z = \frac{1}{(1 - fp) + \frac{fp}{N}}, \quad (1)$$

kde S_z je zrychlení, fp je podíl části kódu, kterou lze provádět paralelně, a N je počet procesorových jader.

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 zde prezentovaný je průkopnický. Byl navržen autorem J. Štětinou, který má zkušenosti s navrhováním a projektováním řídicích a informačních systémů v průmyslové praxi, kde je jako operační systém požadován MS Windows. Z toho jednoznačně vyplynulo, že nasazení clusterů je zcela nevhodné kvůli vysokým pořizovacím a provozním nákladům. Proto návrh paralelizace již na jejím začátku vyústil do volby víceprocesorových PC nebo serverů. První on-line model implementovaný v a.s. VÍTKOVICE 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 softwaru byla celá napsána v jazyku Object Pascal (Delphi).



Obr. 1 Výpočetní server vhodný pro provoz on-line modelů a Intel Xeon Phi, GPU karta NVIDIA

Fig. 1 Computing server suitable for operation of the on-line models and Intel Xeon Phi, GPU NVIDIA card

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 restartován pouze příslušný proces. Aktuální verze softwaru je tvořena jak v jazyce Object Pascal (Delphi), tak i v C/C++ (MS Visual Studio). Plně využívá rozšíření těchto jazyků pro paralelní programování, např. paralelní cykly, což umožňuje maximálně využít 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 [1]. Na obr. 1 je fotografie vhodného

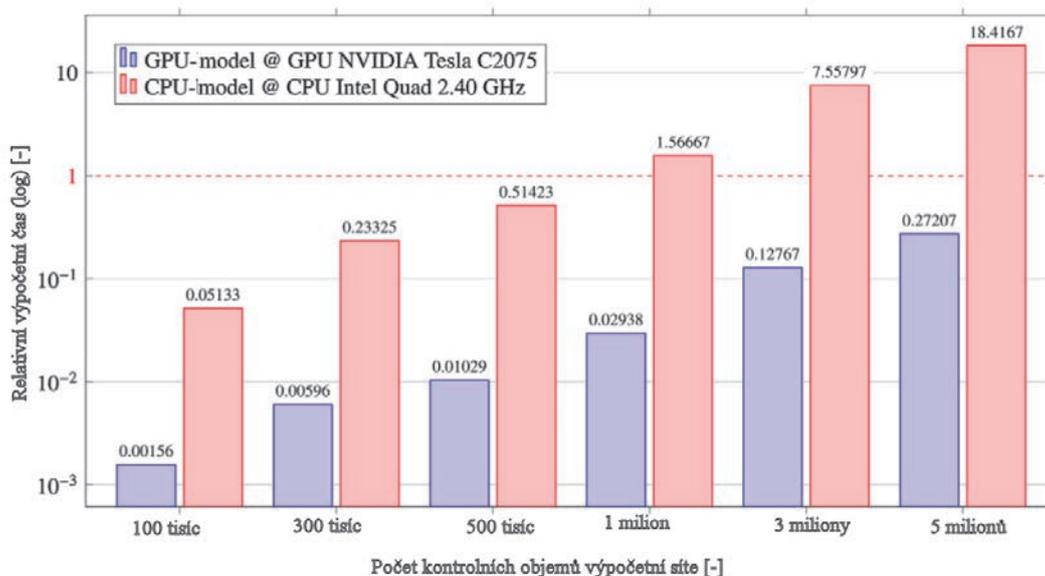
serveru pro provozování on-line modelu včetně regulačních modulů, které budou popsány v odst. 1.3. Server této koncepce lze osadit až dvěma vícejádrovými procesory, a to až s třemi přídavnými kartami NVIDIA Tesla nebo Intel Xeon Phi (v pravé části obr. 1).

Z hlediska využití přídavných výpočetních karet je rozhodující softwarová podpora. Pro práci s výpočetními jádry GPU se používají standardy, jako je např. CUDA (Compute Unified Device Architecture), OpenCL (Open Computing Language) a C++ AMP (C++ Accelerated Massive Parallelism). Všechny tyto standardy jsou šířeny zdarma a podporují více programovacích jazyků [2]. V prvním kroku bylo nutno ověřit, zda současné možnosti těchto vývojových nástrojů dovolí naprogramovat model tuhnutí. Umožnila to dostupnost hardwaru, tj. GPGPU karty NVIDIA Tesla C2075 na pracovišti VUT FSI v Brně, která má 448 výpočetových jader a 6 GB paměti. Potvrdila to zejména již v předešlém článku citovaná disertační práce L. Klimeše [3].

Implementace tohoto 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 umožňuje využít i dostupné karty Intel Xeon Phi. Technologie CUDA i OpenCL mají tu velkou výhodu, že programátora odstiňují od používaného hardwaru. Tím je myšleno, že přenesení programu, např. na jinou výpočetní kartu s jiným počtem jader, nevyžaduje změnu softwaru. Naopak je ale třeba volit algoritmy, které jsou vhodné pro masivní paralelizaci, tj. takové algoritmy, které obsahují co nejvíce vzájemně nezávislých výpočtů. Tak se minimalizuje doba čekání nebo počet případů nutného přepočítávání mezivýsledků.

Aby bylo možné srovnat výpočetní výkon modelu BrDSM (vedle ochranné známky má model i své logo), byla provedena série testů při různém počtu kontrolních objemů výpočetní sítě [4]. Model na bázi CPU běžel na počítači s Intel Core 2 Quad procesorem se čtyřmi jádry 2,4 GHz a 6 GB paměti RAM. Model na bázi GPU byl testován na počítači s GPU NVIDIA Tesla C2075, jehož

součástí je 448 CUDA jader 1,15 GHz a 6 GB paměti RAM. Počet kontrolních objemů se volil od 10^5 (nejhrubší síť) po $5 \cdot 10^6$ (nejjemnější síť), jak je patrné na vodorovné ose v obr. 2. Relativní výpočetní čas, tj. čas výpočtu podělený skutečným časem odlévání, je vynášen na svislou osu v logaritmické stupnici. Graf ukazuje, že např. doba výpočtu numerického modelu s počtem uzlů 10^6 je 1,56krát delší než je reálný čas lití. Na GPU výpočet běží naopak rychleji než je reálný čas lití (čas výpočtu je roven 0,02938násobku reálné doby lití). Je patrné, že GPU umožňuje velmi podstatné zrychlení dynamického modelu ve srovnání s modelem na CPU. Zrychlení modelu se mění v závislosti na hustotě sítě. To znamená, že s rostoucím počtem kontrolních objemů narůstá zrychlení výpočtu a současně se navíc zvyšuje numerická přesnost výsledků. Pro nejhrubší síť s počtem 10^5 kontrolních objemů je model na GPU asi 33krát rychlejší ve srovnání s modelem na CPU (0,05133/0,00156). Podle obr. 2 pro jemnější síť, např. s počtem $5 \cdot 10^6$ kontrolních objemů, je zrychlení už 67násobné (18,4167/0,27207).



Obr. 2 Porovnání relativních časů výpočtu na GPU a CPU [3]

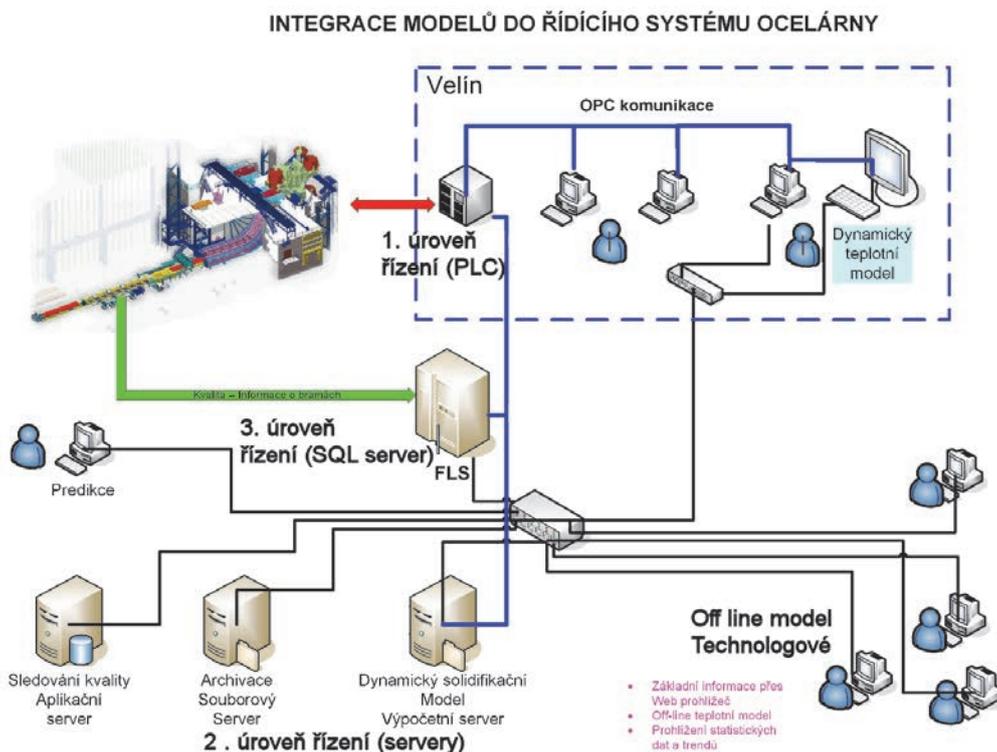
Fig 2 GPU – model benchmarking – relative computational time [3]

Řídicí systém ocelárny VÍTKOVICE STEEL a.s. (obr. 3) se skládá ze tří úrovní. První úroveň řízení (Level 1) zahrnovala PLC a regulátory zajišťující převod měřených veličin na čísla (AD převodníky). Tyto měřené hodnoty se přes komunikační protokol předávaly do druhé úrovně. Na této úrovni byly zajištěny PID regulace nastavených průtoků vody apod. Druhá úroveň (Level 2) byla tvořena PC nebo servery, na kterých je byla realizována vizualizace HMI (Human Machine Interface) měřených dat z úrovně Level 1, dále byla přebírána data z úrovně 3. Kromě vizualizace měřených dat obsahovala základní regulační předpisy. Pokud obsahovala servery, byla v této úrovni zajištěna archivace s možností vykreslování trendů měřených

a počítaných veličin. Nejvyšší, třetí úroveň (Level 3) zahrnovala řízení celé ocelárny. Jeho hlavní součástí byl FLS (systém řízení pánvových pecí). Přes tuto úroveň šly informace o odlévaném profilu, o označení sekvencí a taveb, o chemické analýze oceli, o délce odlitých předlitků atd. Zde prezentovaný model BrDSM je software, který běží na vyhrazeném serveru začleněném do úrovně Level 2. Model přebírá provozní data z OPC serveru (Open Process Control je průmyslový standart pro výměnu dat v průmyslové automatizaci). Proto není závislý na použití konkrétních hardwarových ovladačů. V OPC serveru jsou začleněny i SQL dotazy do systému FLS. Implementace modelu BrDSM také předpokládá začlenění off-line verze BrDSM jako 32bitového

MS Windows programu. Součástí řídicího systému BrDSM je i archivační server, na kterém jsou uchovávána data dílčích výsledků z dynamického modelu s frekvencí 10 s. Mimo provozní parametry ZPO ve VÍTKOVICE STEEL a.s., kterých bylo přibližně 200, se dalších 300 parametrů počítalo modelem. Tato data byla systémem sledování kvality doplňována o data popisující kvalitu bram a plechů z válcovny kvarto 3,5, která zpracovává plynule lité bramy ze ZPO na tlusté plechy. Data o kvalitě bram a

plechů byla základem pro on-line predikci. V aktuální verzi před ukončením provozu bylo možné nastavit i rychlejší přebírání dat po 5 nebo 2 s. Velmi důležité bylo, aby model před jejich využitím zkontroloval platnost shromážděných údajů, tj. ověřil, zda leží v přípustných intervalech, či zda údaje vůbec dorazily. Chybné údaje doplní buď předchozími, platnými nebo tzv. standardními hodnotami a teprve úplné a ověřené údaje byly dynamickým modelem tuhnutí využity pro výpočet.



Obr. 3 Schéma začlenění simulačních modelů do řídicího systému ocelárny

Fig. 3 Scheme of the integration of the simulation models into the control system of the steelworks

3. Řízení sekundárního chlazení a jeho optimalizace

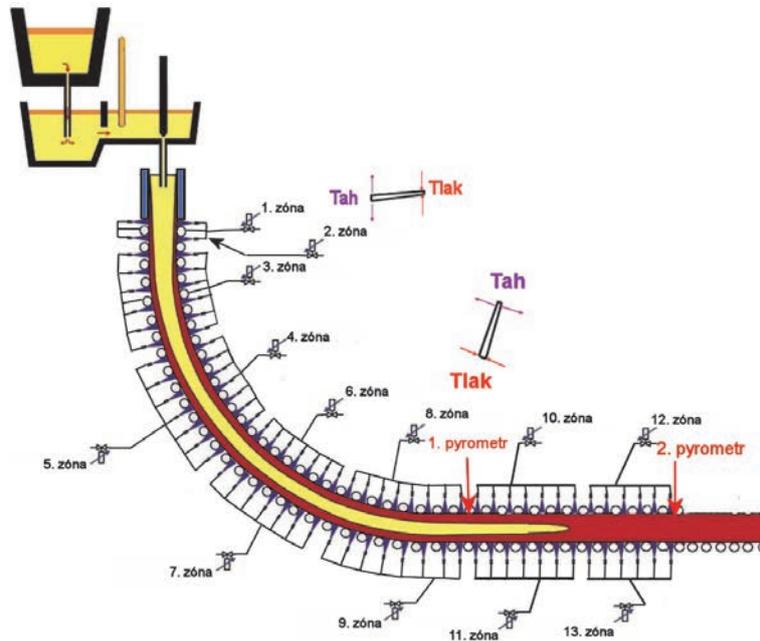
Jednou z nejdůležitějších funkcí on-line modelu tuhnutí je řízení sekundárního chlazení s možností řídit licí rychlosti a řídit redukce profilu (soft-redukce).

On-line model BrDSM, který řídí licí rychlost a sekundární chlazení, doporučuje/nastavuje licí rychlost, průtoky vody a tlak vzduchu v zónách sekundárního chlazení (obr. 4). Proto do něj musí být vložena základní pravidla a požadované hodnoty. Rychlost posuvu bramy má daný obvyklý technologický rozsah, například $0,5 - 1,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Volba z tohoto rozmezí závisí na konstrukci ZPO. Z hlediska výkonu je optimální rychlost co nejvyšší. Je však limitována metalurgickou délkou, tj. vzdáleností vrcholu tzv. kužele tuhnutí (místa posledního tuhnutí v bramě) od horní hrany krystalizátoru. Model musí dále respektovat teplotu přehřátí a množství oceli v mezipánvi.

Pro metalurgickou délku platí přímá úměra: s vyšší rychlostí lití se metalurgická délka lineárně zvětšuje. Za minimální délku lze považovat případ, když vrchol kužele tuhnutí je v místě konce oblouku radiálního zakřivení; za maximálně možnou délku, 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 $900 - 1050 \text{ }^\circ\text{C}$, při výstupu z klece by teploty neměly klesnout pod $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro každou třídu oceli je nutno v souvislosti se vznikem vad definovat optimální teplotní interval, ve kterém by se měla pohybovat teplota povrchu na malém rádiusu v místě rovnání. Stanovení optimální teploty vychází ze změny namáhání licího proudu z tlaku na tah (obr. 4) Ideální je, když je toto místo zároveň monitorováno pyrometrem. Dále je nutno respektovat jak maxima průtoků vody v jednotlivých

zónách, která jsou dána výkonem čerpadel, tak minima průtoků, která jsou dána charakteristikou trysek. Na základě pravidel model sestavuje požadované teplotní

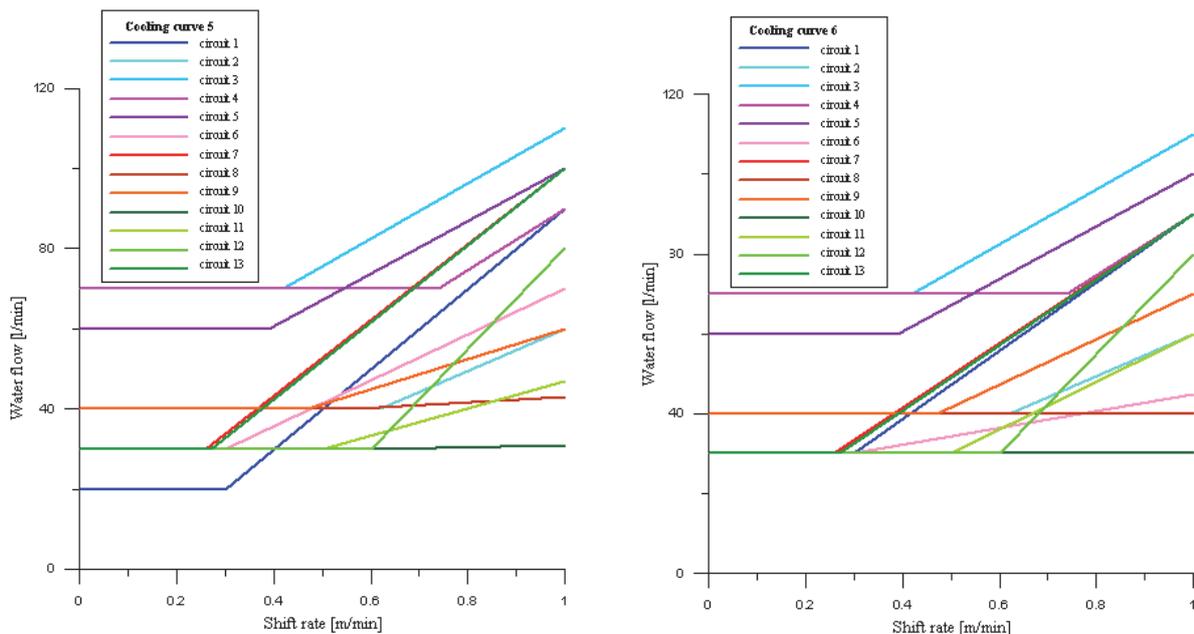
intervaly za jednotlivými zónami a další omezení regulátorů.



Obr. 4 Schéma radiálního ZPO se znázorněním regulačních zón a umístěním pyrometrů
Fig. 4 Scheme of the radial caster with marked control cooling zones and locations of pyrometers

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 (obr. 5). Pro nastavení chladicích křivek lze využít statický off-line model [5, 6]. 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 nestandardních nebo poruchových stavech ZPO.

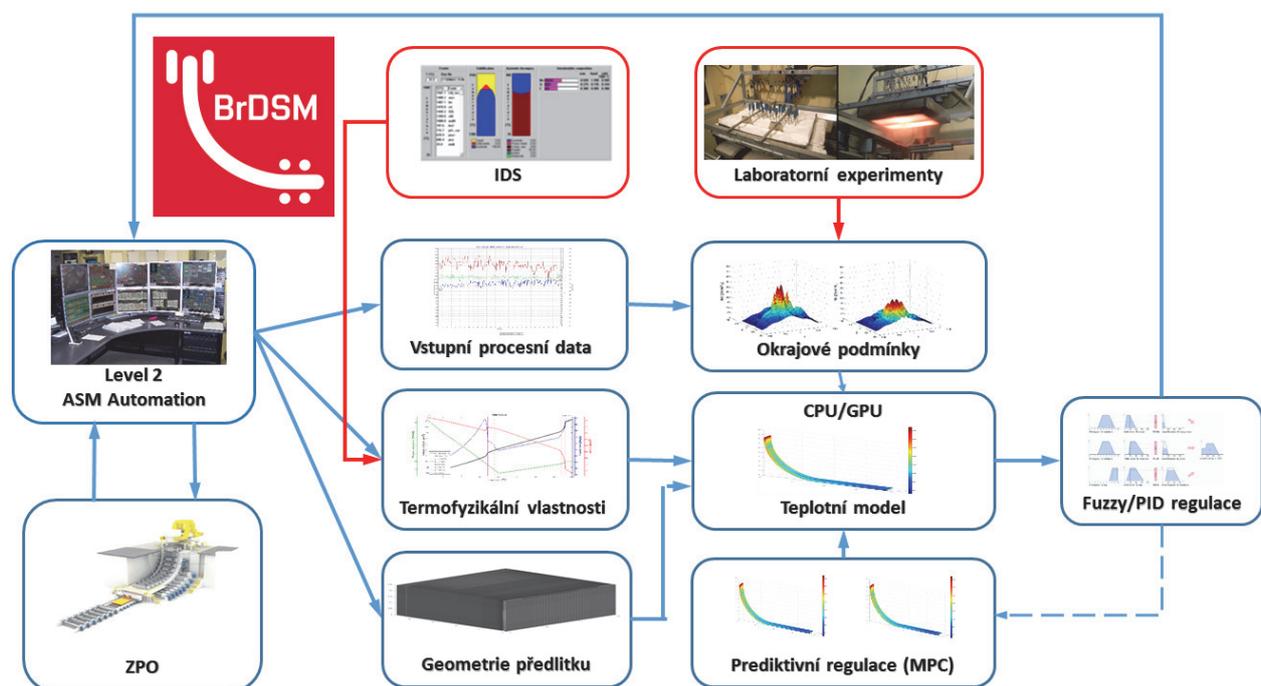


Obr. 5 Chladicí křivky bramy 1530 × 250 mm
Fig. 5 Cooling curves of the 1530 × 250 mm slab

Na obr. 6 je znázorněno blokové schéma, jak začlenit model tuhnutí do řídicího systému ocelárny a jak na základě vypočtených teplot přímo regulovat licí rychlost a průtoky vody v jednotlivých zónách. Z obr. 6 je patrné, že integrace nové generace prezentovaného numerického modelu BrDSM je řešena ve spolupráci s ASM Automation [7] do úrovně Level 2.

Společnost ASM Automation, založená a působící od r. 1999 v Německu, se zaměřuje na poskytování služeb v oblasti průmyslové automatizace. Vyvíjí originální softwarové produkty a nabízí vývoj softwaru na zakázku dle požadavků zájemce. Dodává komplexní řešení průmyslové automatizace, zejména pro slévárny

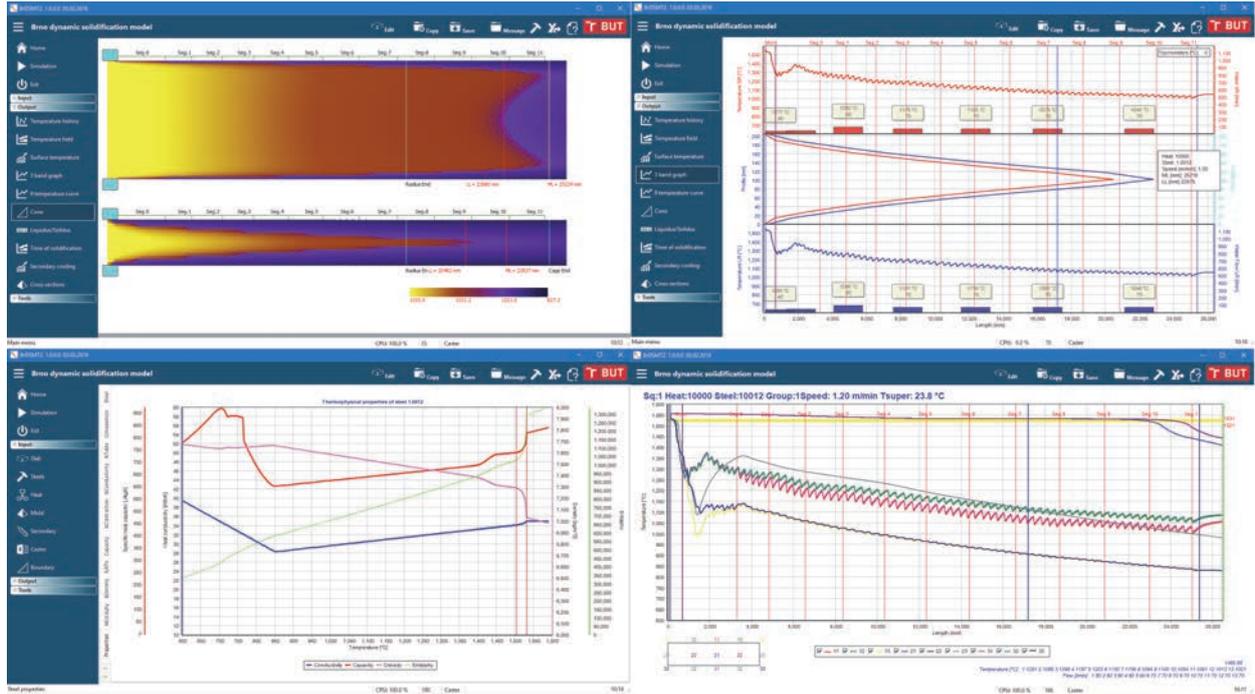
a ocelárny. V roce 2008 společnost expandovala do České republiky. V obou zemích její odborníci ve čtyřech pobočkách poskytují podporu zákazníkům. Vlajkovým produktem firmy je systém "Level 2" pro automatizaci procesů pro elektrické obloukové pece, pánvové pece a pro plynulé odlévání. Level 2 je systém modulární, jehož jednotlivé moduly mohou být upraveny nebo přidány na základě požadavků zákazníka pro realizaci konkrétní zakázky. Uživatelé mohou využít tzv. tenkého klienta Level 2 s nástroji pro automatickou aktualizaci nebo klienta na bázi webovského prohlížeče. Klientská část modelu BrDSM má jednoduchý grafický styl a lze jej také ovládat dotykem. Příklady uživatelského rozhraní jsou uvedeny na obr. 7.



Obr. 6 Schéma regulace sekundárního chlazení
Fig. 6 Diagram of the secondary cooling control

Základním blokem v obr. 6 je stroj pro plynulé odlévání oceli, nad kterým je systém řízení Level 2, v případě prezentovaného modelu BrDSM systém od firmy ASM Automation. Z tohoto bloku je předáváno cca 200 „Vstupních procesních dat“ (teplota oceli v mezipánvi, licí rychlost, skutečné průtoky, teploty a tlaky vody v krystalizátoru, parametry sekundárního chlazení atd.). Dále se předává chemické složení odlévané oceli, podle které blok „Termofyzikální vlastnosti“ přiřadí dané oceli z programu IDS především její tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, hustotu, entalpii a do bloku „Geometrie předlitku“ se předávají základní rozměry bramy, aby proběhlo automatické generování výpočetní sítě. Komunikace mezi bloky je realizována přes stan-

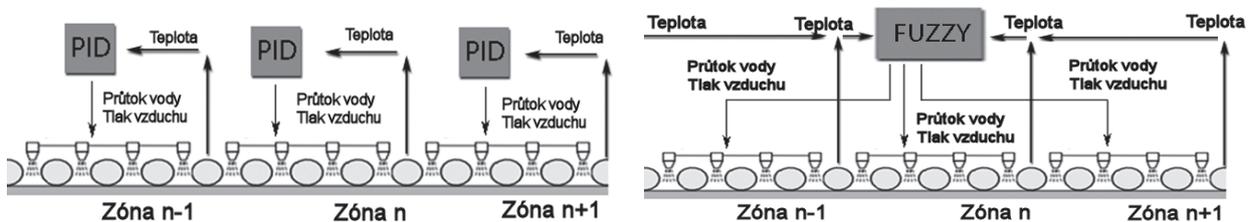
dard OPC. Dalším blokem je vlastní teplotní model (CPU/GPU), který v reálném čase (nebo čase kratším) počítá kompletní teplotní pole bramy v celé její délce, od hladiny taveniny v krystalizátoru až po pálicí stroj. K výpočtu musí být k dispozici okrajové podmínky, jejichž definice byla odvozena ze vstupních procesních dat nebo v případě okrajových podmínek pod chladicími tryskami byla separátně zjištěna laboratorním experimentem a jeho numerickým zpracováním. Dílčím blokem je realizace PID nebo Fuzzy regulátoru, který může být doplněn i blok prediktivního regulátoru (MPC) [7]. Výstupem z bloku regulátoru jsou v reálném čase vypočtené optimální licí rychlosti a průtoky vody.



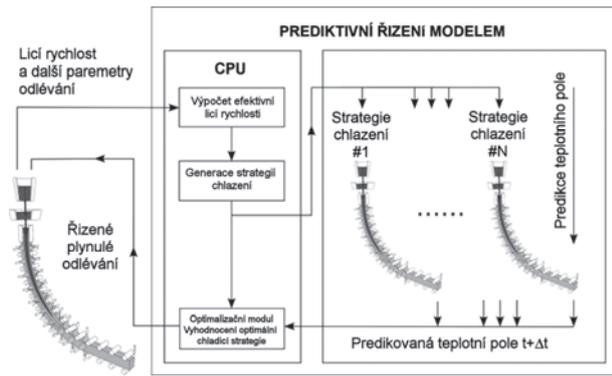
Obr. 7 Moderní grafický interface modelu
Fig. 7 Modern graphical interface of the model

Prvním blokem jsou parametry odlévání, které získáme sběrem skutečných provozních dat a kterých je celkem cca 200 (chemické složení oceli, teplota oceli v mezipánvi, licí 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 bramy v celé její délce, od hladiny taveniny v krystalizátoru až po pálicí stroj. Dálším blokem je teplotní model sekundární zóny počítající v reálném čase teploty na základě vypočtené licí rychlosti a průtoků vody z regulátoru. Do diagramů na obr. 7 jsou začleněné tři varianty regulátoru vyvinuté v současné době: 1. PID regulátor, 2. Fuzzy regulátor, 3. prediktivní

regulátor založený na modelu (MPC) [8], Porovnání základní funkce např. PID a Fuzzy regulátoru je provedeno na obr. 8 [5, 6], ze kterého je patrný jejich 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 fakt, že povrchová teplota ve sledované zóně je ovlivněna i teplotami v zónách předchozích a naopak regulační chyba může být kompenzována zónami následujícími. Poslední realizovanou variantou je prediktivní regulátor, jehož funkční schéma je na obr. 9 [3, 9]. Součinnost tohoto regulátoru umožnila realizaci výpočtu teplotního pole za využití masivní paralelizace pomocí GPGPU, případně karet Intel Xeon Phi.

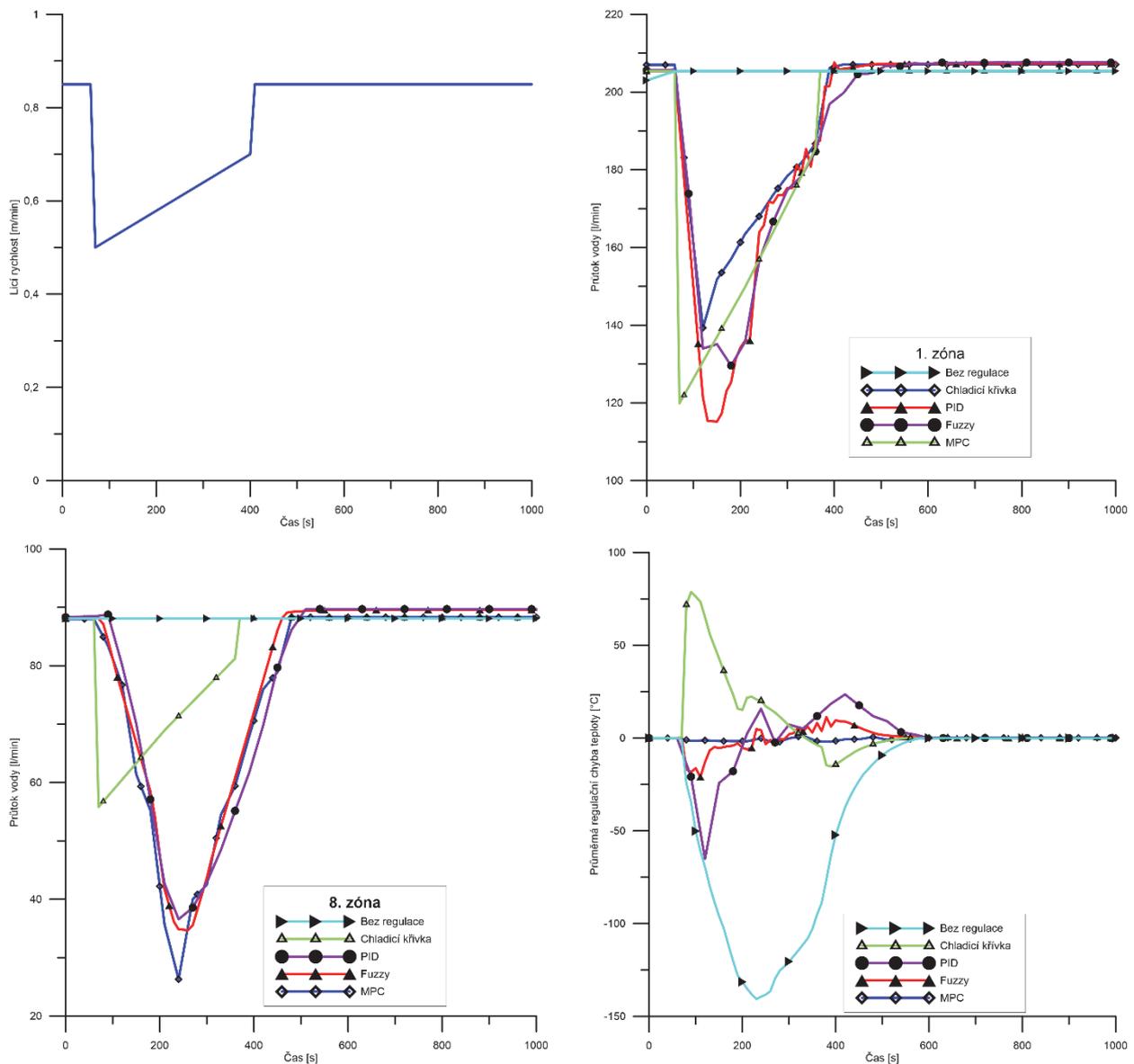


Obr. 8 Porovnání strategie PID a Fuzzy regulátoru
Fig. 8 Comparison of strategies used in the PID controller and Fuzzy controller



Obr. 9 Schéma prediktivního řízení modelem (MPC)
Fig: 9 Diagram of predictive control based on the model (MPC)

Výhoda trojí volby vyvinutého způsobu regulace umožňuje uživateli realizovat typ regulace podle konkrétní složitosti plynulého odlévání a konkrétního výkonu použitého výpočetního serveru. Srovnání schopnosti vyvinutých regulátorů přináší obr. 10. V prvním grafu je vidět průběh dynamické změny licí rychlosti vlivem zásahu protiprůvalového systému. Na druhém a třetím grafu je vidět průběh vypočtených regulačních zásahů, tj. průtoků vody v 1. a 6. zóně. Aby porovnání bylo komplexnější, je znázorněno, jak by vypadal regulační zásah, pokud by byl průtok vody konstantní nebo pokud by se reguloval podle optimální chladicí křivky. Poslední graf umožňuje porovnat kvalitu regulace, zobrazuje průběh průměrné regulační chyby přes všechny okruhy.



Obr. 10 Porovnání regulačních zásahů při dynamické změně licí rychlosti
Fig. 10 Comparison of control interventions at the dynamic change of the casting speed

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 se porovnává PID regulace s Fuzzy regulací,

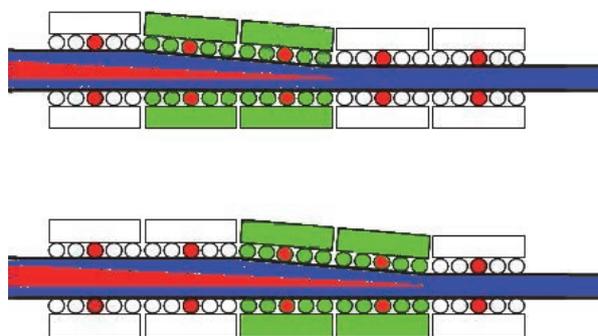
pak kvalita účinku Fuzzy regulátoru je výrazně vyšší, aniž by se znatelně zvýšily nároky na výpočet. Nejvyšší regulaci, prakticky bez regulačních chyb v průběhu celé operace, má MPC regulátor. Těto kvality je však dosaženo na úkor vysokých výpočetních nároků, které jsou nerealizovatelné bez masivní paralelizace.

Výhody Fuzzy regulátoru oproti PID regulátoru ocenila jihokorejská firma POSCO, která si od autorů programu BrDSM objednala simulátor ZPO právě s tímto typem regulátoru. Fuzzy pravidla dovolují mimo jiné, aby se technologům mohla zajistit požadovaná povrchová teplota bramy. Budoucnost pokračujícího vývoje lze spatřovat v tom, že dojde zejména k dalšímu rozvoji MPC regulátoru, který bude především spočívat ve snižování jeho výpočtové náročnosti, a to zejména rozvojem vhodných explicitních optimalizačních metod.

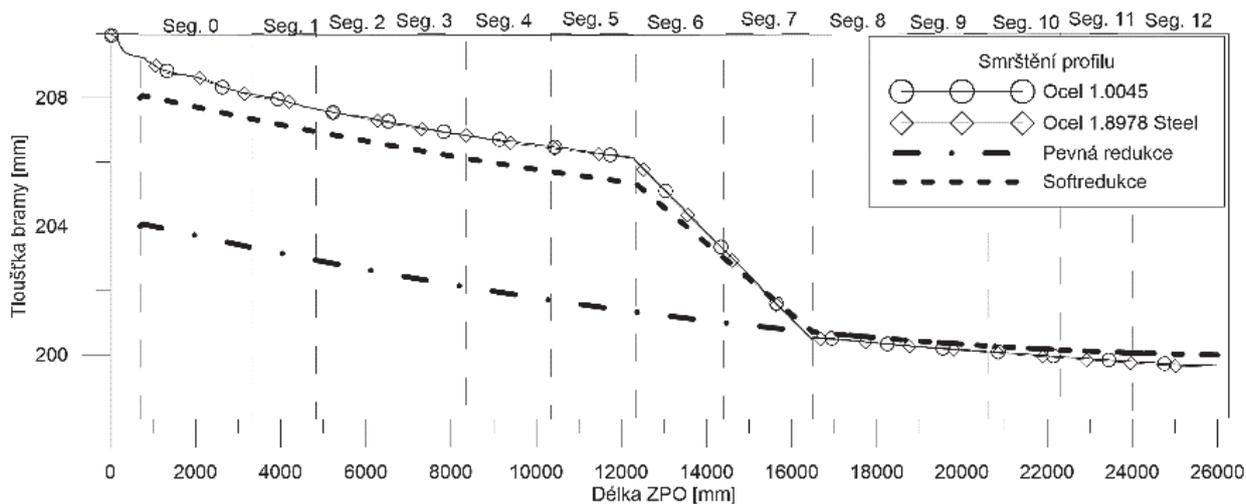
Jak již bylo uvedeno, je vhodné, aby regulace byla verifikována kontinuálním pyrometrickým měřením v místech naznačených na obr. 4. Jednou z funkcí této verifikace může být kontrola sekundárního chlazení. Pokud se totiž výsledky výpočtu teploty i její regulace na požadovanou hodnotu liší od údaje naměřeného, je to většinou způsobeno ucpáním chladicích trubek či trysek nebo jejich jiným poškozením. Regulaci lze ještě doplnit o 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 tvarovaný nejčastěji do malého radiusu obr. 11. Tím se dosahuje

výraznější redukce profilu, než odpovídá tepelnému smrštění předlitku a eliminují se tak vnitřní vady předlitku. Při optimálním nastavení segmentů a pak při on-line regulaci jejich nastavení hraje významnou roli on-line model BrDSM, který dokáže přesně stanovit polohu kužele tuhnutí, a tím určit místo, kde má proběhnout redukce profilu. 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. 12 je vidět průběh nastavení redukce profilu na ZPO s pevnými segmenty a na ZPO se softredukcí. Zároveň je patrná i redukce profilu vlivem teplotního smrštění pro dvě značky oceli. Model výpočtu a řízení softredukcí byl již vytvořen a musí být nyní nasazen a verifikován na reálném ZPO.



Obr. 11 Princip softredukcce
Fig: 11 Principle of the soft reduction



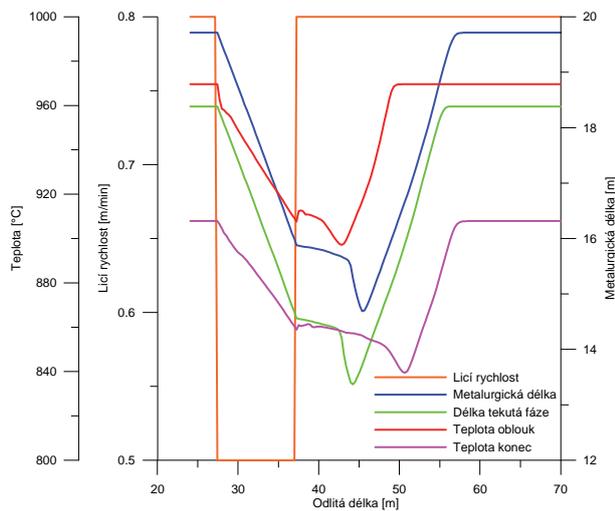
Obr. 12 Porovnání redukce profilu a teplotního smrštění
Fig. 12 Comparison of the profile reduction and the thermal shrinkage

4. Analýza nestandardních stavů ZPO

Význam modelu BrDSM roste v okamžiku nestandardních situací, jako je změna licí rychlosti v důsledku

zásahu protiprůvalového systému, změna licí rychlosti při letmé výměně mezipánve nebo výpadky sekundárního chlazení. Příklady jsou uvedeny pro plynule litou ocelovou bramu o rozměrech 1530 × 250 mm (obr. 13 –

16), nebo 1530×180 mm (obr. 17), oceli 11325 s chemickým složením dle tab. 1. Obr. 13 prezentuje testovací případ skokové změny lící rychlosti z $0,8$ na $0,5$ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a její skokové změny zpět. Takové skokové snížení rychlosti simuluje např. zásah protiprůvalového systému. Zpětný návrat na původní rychlost však ve skutečnosti probíhá pozvolně a právě pomocí dynamického modelu je možné hledat optimální způsob regulace rychlosti a sekundárního chlazení.

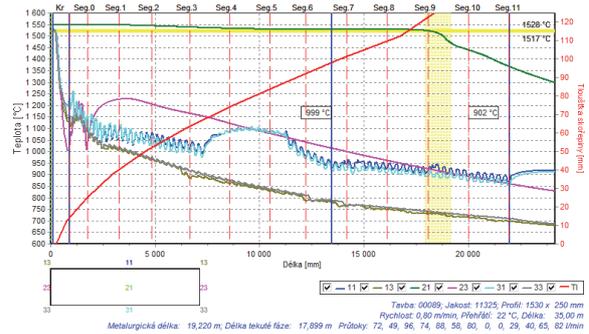


Obr. 13 Simulovaná změna rychlosti a odezva počítaných veličin
Fig. 13 Simulated change of the casting speed and response of the calculated values

Ukázka použití modelu BrDSM k analýze funkce sekundárního chlazení je znázorněna na obr. 14 a 15. Oba obrázky prezentují výsledky simulovaného výpadku chladicí vody (např. výpadek čerpadla) v okruzích 8 a 9, které působí v segmentech 3 a 4 ZPO (obr. 14). Chladicí okruh představuje skupina trysek, segment pěti vodících válců bramy. Pokud by k uvedené poruše došlo, teplotní model poskytuje operátorovi informace, podle kterých se může rozhodnout, jaká opatření je nutno přijmout.

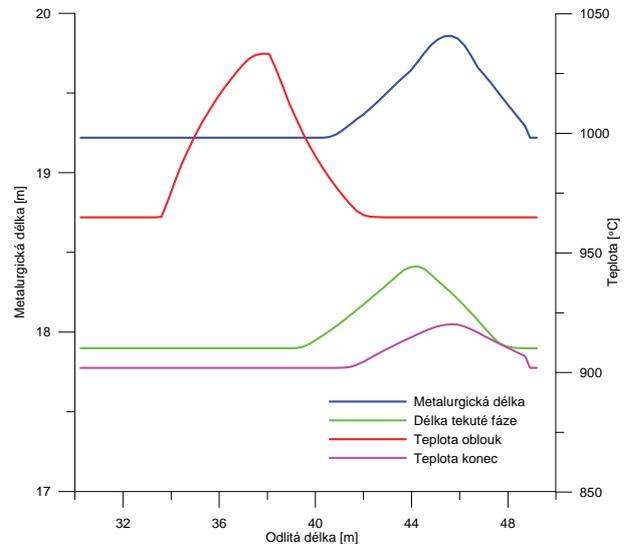
Obr. 16 ukazuje snímané veličiny z další reálné tavby a data z dynamického modelu. Ke konci odlévání je vidět nárůst lící rychlosti jako důsledek poklesu teploty přehřátí.

Na obr. 17 jsou uvedena jako příklad reálná data z dynamického modelu pro odlévání rozměr bramy 1530×180 mm po zásahu protiprůvalového systému, kdy byla snížena lící rychlost z $1,22$ na $0,5$ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ a pak zvýšena zpět na původní hodnotu. Zajímavé je sledovat průběh měřených teplot v místě oblouku a na konci klece, do jejichž hodnot se promítá snížení lící rychlosti. Je zcela patrné, že pomocí teplot vypočtených modelem ve stejných místech, se operátor při řízení chodu stroje rozhoduje snadněji.



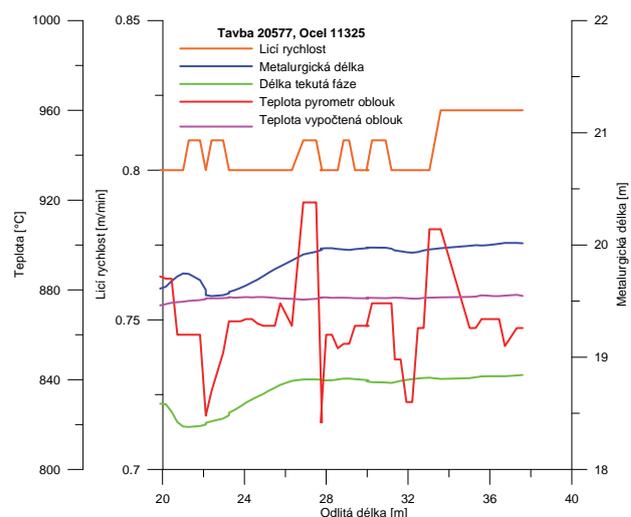
Obr. 14 Výsledky výpočtu při simulovaném výpadku chlazení okruhu 8 a 9

Fig. 14 Calculation results in a simulated failure of the cooling zones 8 and 9



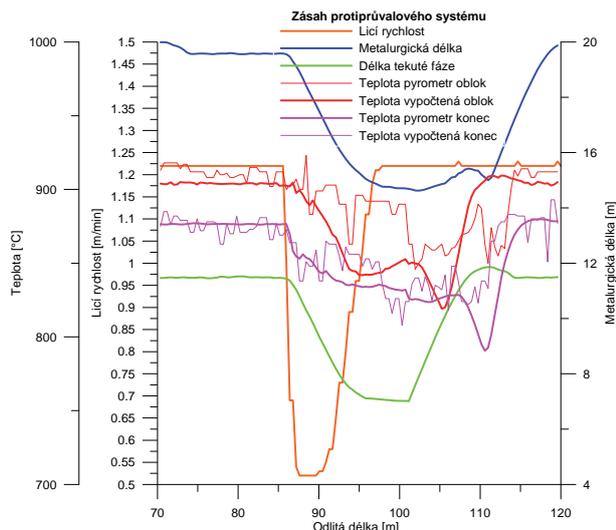
Obr. 15 Průběh vybraných veličin při simulovaném výpadku chlazení okruhu 8 a 9

Fig. 15 Course of the selected variables during simulated failure of the cooling zones 8 and 9



Obr. 16 Ukázka průběhu vybraných veličin u konkrétní provozní tavby 20577

Fig. 16 Course of the selected variables of the specific industrial heat 20577



Obr. 17 Příklad snížení lící rychlosti při zásahu protiprůvalového systému

Fig. 17 Example of the decrease of the casting speed at an intervention of the breakout prevention system

5. Parametrické studie lití ocelových bram

Předchozí odstavce naznačily nasazení originální on-line verze modelu BrDSM. Jako příklad typického použití originální off-line verze modelu je nyní možno uvést již zmíněné parametrické studie, tj. analýzu vlivu jednotlivých vstupních technologických parametrů a vlastností ZPO a vlastností materiálu bramy na výsledné

teplotní pole [4, 10, 11]. Výsledky těchto parametrických studií mohou sloužit k ověření používaných empirických vztahů, k sestavení technologických předpisů pro obsluhu ZPO, k provedení komplexní optimalizace a pro nastavení dynamického modelu při jeho začlenění do systému ZPO. Vzhledem k tomu, že výsledkem modelování je 3D teplotní pole, je třeba k posouzení vlivu chemického složení vybrat takové výstupní parametry, které lze jednoznačně stanovit a porovnávat, případně zvolit grafický průběh srovnávaného výstupního parametru. K tomuto srovnání se jako nejvhodnější jeví maximální metalurgická délka, maximální délka tekuté fáze, povrchová teplota v místě oblouku a povrchová teplota v místě před opuštěním klece sekundárního chlazení. Ke grafickému srovnání byl zvolen průběh teplot stejných bodů příčného řezu po délce stroje a průběh nárůstu lící kůry. Tyto výstupní parametry byly diskutovány v předchozím článku této přílohy. Provedení rozsáhlých parametrických studií bylo umožněno v odst. 1.2 zmíněnou paralelizací kódu, která dovolila zkrátit výpočtovou dobu.

5.1 Studie vlivu chemického složení na výsledné teplotní pole

Pro níže uvedené analýzy a ukázky byla pro každou odlévanou skupinu na bramovém ZPO zvolena jedna značka oceli. Příklad doporučeného složení některých ocelí je uvedeno v tab. 1. Tabulka je doplněna o teplotu likvidu a solidu.

Tab. 1 Vybrané oceli a jejich chemické složení použité pro výpočet (hm. %)

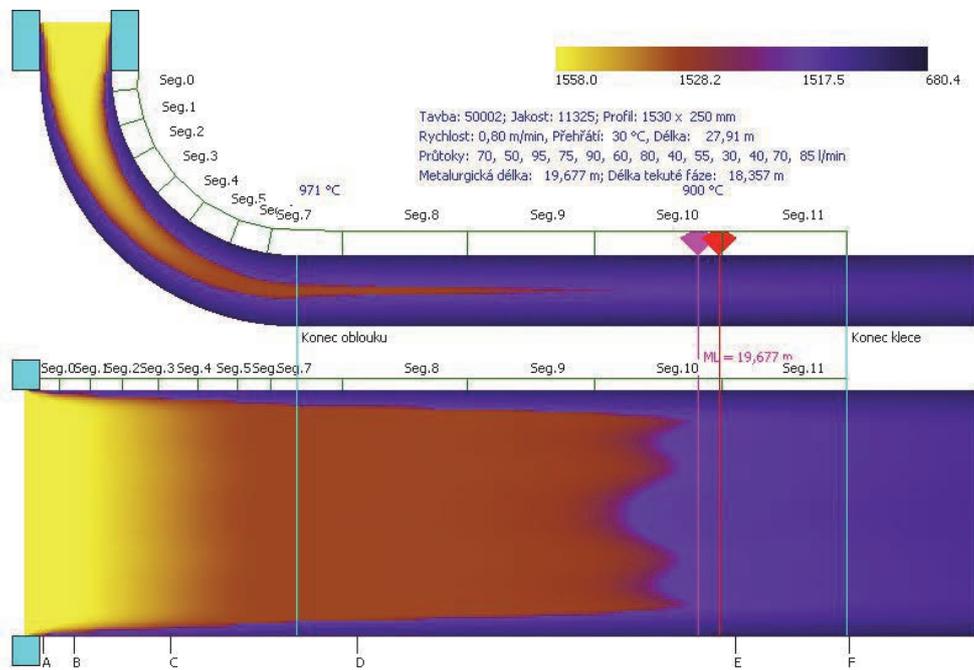
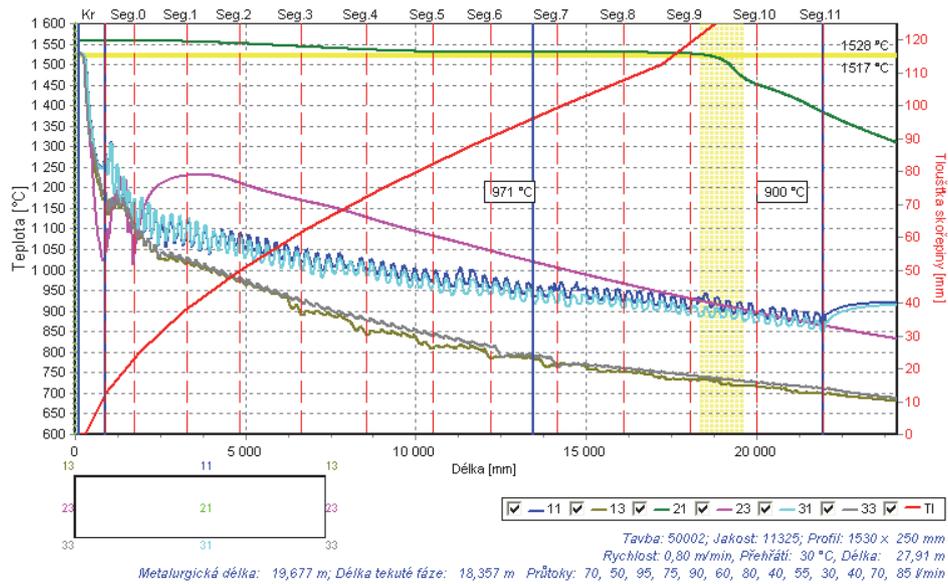
Tab. 1 Selected steel and their composition used for calculation (wt. %)

Hutní označení	Skupina	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Al	Nb	T _{sol}	T _{likv}
11325	2	0,050	0,225	0,025	0,010	0,010	0,150	0,150	0,150	0,040	0,050	0,0025	0,045	0,030	1499,8	1529,8
21026	5	0,150	1,075	0,300	0,0175	0,010	0,150	0,200	0,100	0,040	0,045	0,001	0,040	0,015	1451,4	1514,2
31087	3	0,190	1,450	0,200	0,015	0,010	0,100	0,150	0,100	0,040	0,010	0,001	0,040	0,030	1438,7	1510,6
11500	4	0,270	0,550	0,275	0,015	0,010	0,150	0,150	0,125	0,040	0,050	0,025	0,040	0,030	1423,2	1507,4
13180	6	0,75	1,050	0,250	0,0175	0,010	0,125	0,200	0,150	0,050	0,100	0,050	0,040	0,025	1322,7	1467,7

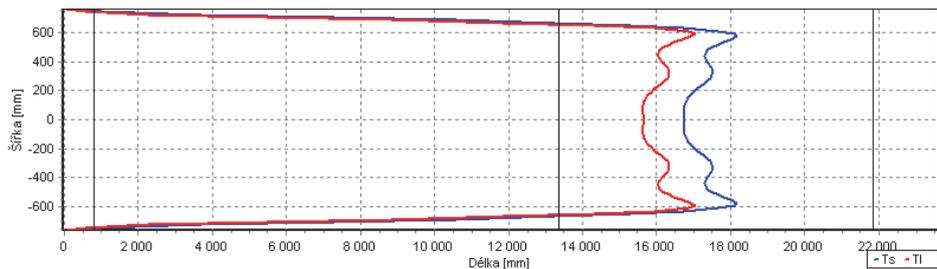
Obr. 18 prezentuje vypočtené teplotní pole pro třídu oceli 11325 ve trojím názorném grafickém provedení. Výpočet se provede a jeho výsledky znázorní i pro oceli z dalších čtyř řádků tabulky. Aby byl vliv chemického složení na teplotní pole lépe analyzován, byly ostatní lící parametry voleny shodně, tj. lící rychlost $0,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, teplota přehřátí $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (přehřátí oceli před litím nad likvidem, který má však u každé oceli jinou hodnotu) a rozměr

$1530 \times 250 \text{ mm}$, stejně jako průtok vody sekundárním chlazením. V praxi se pro každou skupinu oceli volí jiný režim chlazení.

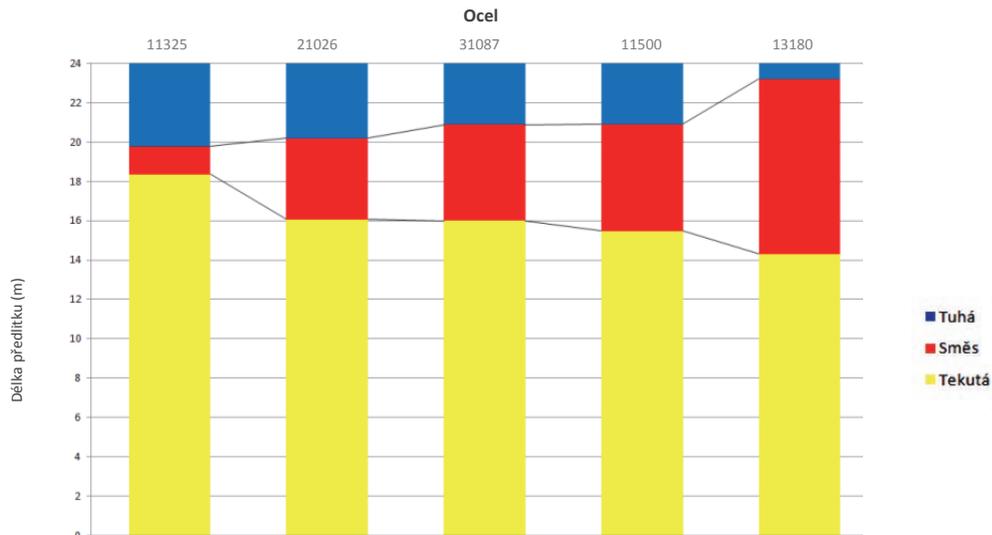
Z obr. 19 a 20 je patrné, že vliv chemického složení na výsledné teplotní pole hodnocené zmíněnými výstupními parametry je výrazný.



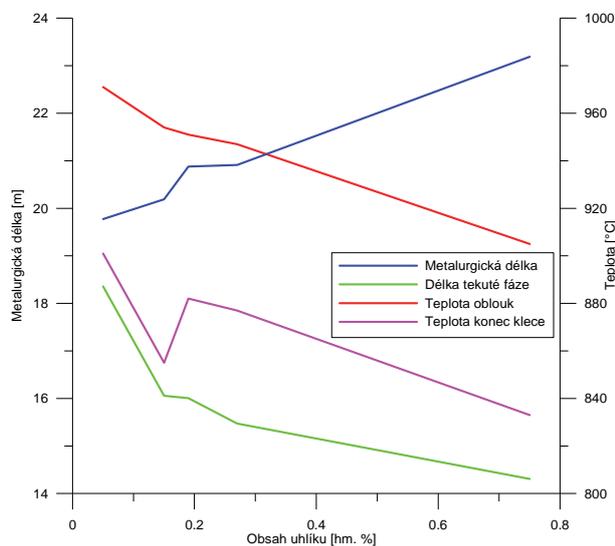
Kužel tuhnutí - Izolikvidus - Izosolidus



Obr. 18 Teplotní pole bramy pro ocel 11325
Fig. 18 Temperature field of slab for steel grade 11325



Obr. 19 Porovnání délky tekuté fáze a metalurgické délky pro různé značky oceli
Fig. 19 Comparison of the length of the liquid phase and of the metallurgical length for the different steel grades

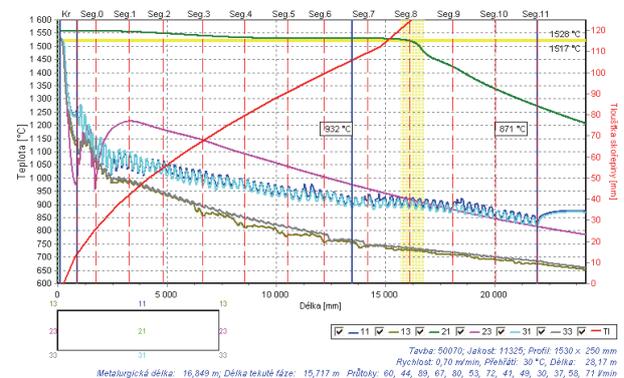


Obr. 20 Vliv chemického složení na výsledné parametry
Fig. 20 Effect of chemical composition on the resulting parameters

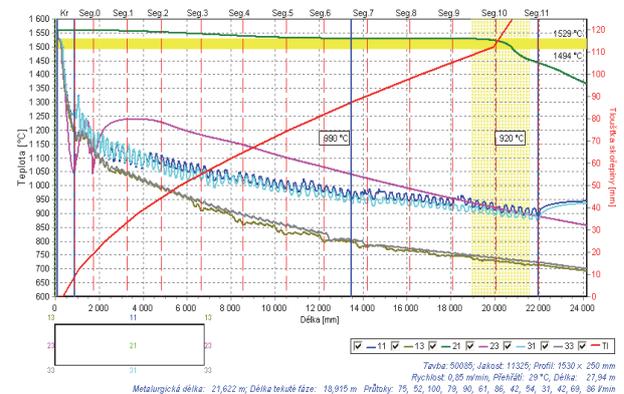
5.2 Studie vlivu lící rychlosti na výsledné teplotní pole

Lící rychlost je základním technologickým parametrem. U výpočtů, jejichž výsledky jsou zde prezentovány pro značku oceli 11325, je uvažován provozní rozsah rychlosti 0,7 až 0,85 m·min⁻¹. Průtok vody zónami sekundárního chlazení je dle technologického předpisu lineárně zvyšován s lící rychlostí. Ostatní vstupní parametry jsou opět ponechány konstantní, tj. především teplota přehřátí 30 °C. Vyšší rychlosti není třeba zkoumat, protože metalurgická délka by překračovala délku klece. Naopak nižší lící rychlosti se používají pouze krátkodobě, např. při nebezpečí vzniku průvalu nebo při letmé výměně mezipánve. Vypočtenou teplotní historii charakteristických bodů příčného řezu uvádí obr. 21 jen pro minimální (0,7 m·min⁻¹) a maximální (0,85 m·min⁻¹) rychlost lící z jejího zkoumaného rozsahu. Sumární graf

na obr. 22 ukazuje zjištěnou přibližně lineární závislost všech sledovaných parametrů (metalurgická délka, maximální délka tekuté fáze, teplota oblouku, teplota na konci klece) na lící rychlosti. Jako optimální se jeví lící rychlost okolo 0,82 m·min⁻¹. Při této rychlosti je povrchová teplota bramy v místě konce oblouku cca 980 °C, při které se vyskytuje nejméně vad v predikčním systému.



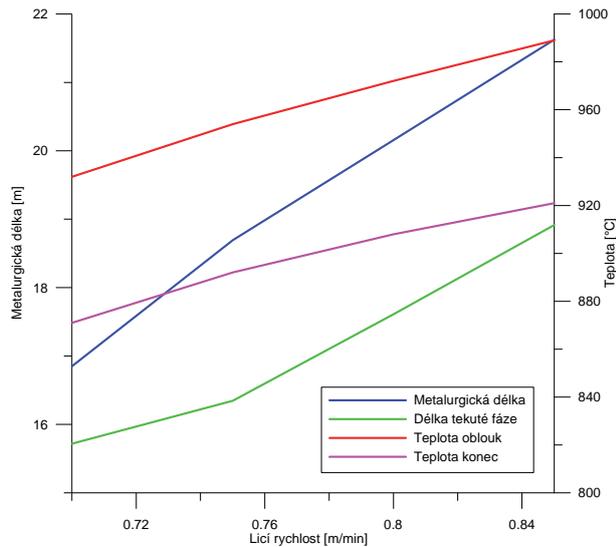
a) 0,7 m·min⁻¹



b) 0,85 m·min⁻¹

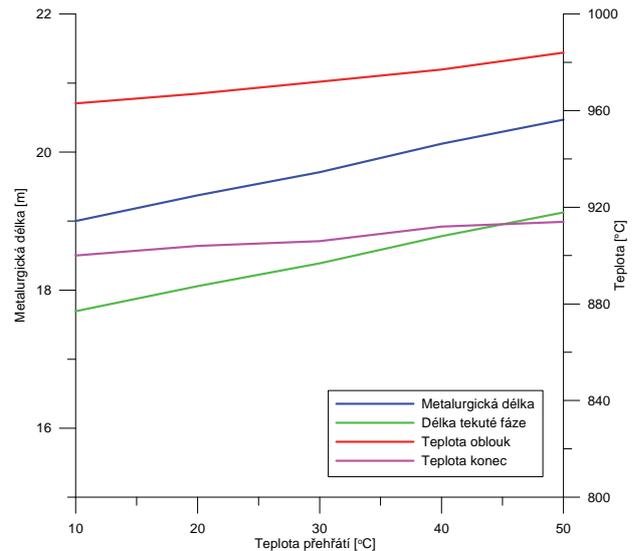
Obr. 21 Vliv lící rychlosti na vybrané parametry, ocel 11325, přehřátí 30 °C

Fig. 21 Effect of the casting speed on the selected parameters, steel 11325, superheating 30 °C



Obr. 22 Vliv licí rychlosti na vybrané parametry, ocel 11325, přehřátí 30 °C

Fig. 22 Effect of the casting speed on the selected parameters, steel 11325, superheating 30 °C



Obr. 23 Vliv teploty přehřátí na metalurgickou délku, ocel 11325, rychlost lití 0,8 m·min⁻¹

Fig. 23 Effect of superheating on the metallurgical length, steel 11325, casting speed 0.8 m·min⁻¹

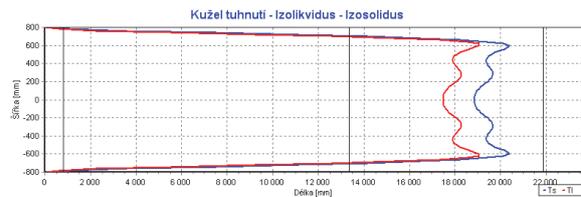
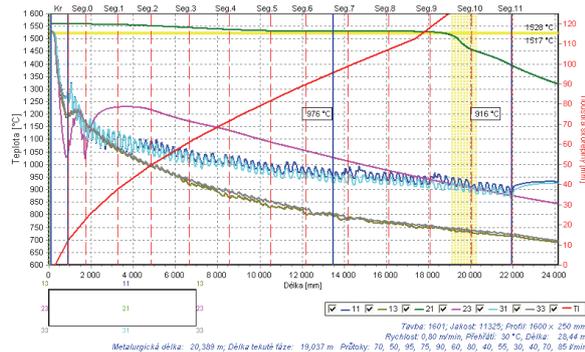
5.3 Studie vlivu teploty přehřátí na výslední teplotní pole

Licí teplota musí vždy být vyšší než teplota likvidy, aby s dostatečnou rezervou zajišťovala dopravu tekuté oceli přes licí trysku z mezipánve do krystalizátoru. Z provozního hlediska je tedy žádoucí zvyšovat licí rychlost se snižující se teplotou přehřátí tak, aby se zajistilo vyprázdnění mezipánve. Pro tento vstupní licí parametr je zde uveden jen souhrnný graf na obr. 23, který ukazuje, jak přehřátí taveniny nad teplotou likvidy ovlivňuje všechny čtyři sledované výstupní ukazatele (licí rychlost je při této analýze konstantní a rovna 0,8 m·min⁻¹). Zaměříme-li se na metalurgickou délku, je patrné, že s klesajícím přehřátím se metalurgická délka i délka tekuté fáze zkracuje, což umožňuje použít vyšší licí rychlost. Toto zjištění je v souladu s požadavkem na zajištění včasného vylití taveniny z mezipánve. Vliv přehřátí na povrchové teploty bramy v jejím oblouku a na výstupu z klece je malý.

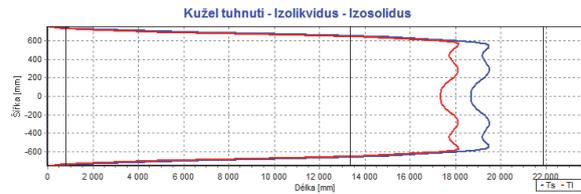
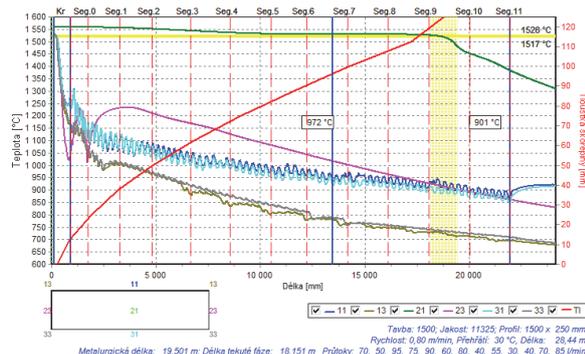
5.4 Studie vlivu šířky bramy na výsledné teplotní pole

Konstrukce krystalizátoru bramového ZPO obvykle umožňují měnit šířku produkovaného polotovaru. U provozovatele VÍTKOVICE STEEL a.s. bylo možno měnit šířku bramy v rozsahu 800 až 1600 mm. Na obr. 24 jsou uvedeny grafické výsledky výpočtu teplotního pole bramy pro šířku bramy v rozmezí 1200 až 1600 mm. Je třeba upozornit, že při změně šířky se nemění konfigurace sekundárního chlazení, což u menších rozměrů vede k přechlazení rohů. V grafech je znázorněn i průběh izolikvidy a izosolidy při pohledu shora. Ukazuje se, že vliv šířky na metalurgickou délku je menší, než by se očekávalo. Podstatně větší vliv se projeví na změně tvaru modré izosolidy v pravé části obr. 24, tj. na tvaru kužele, přesněji řečeno dvojkužele tuhnutí.

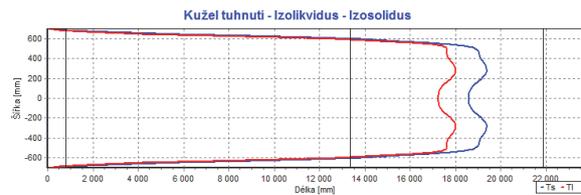
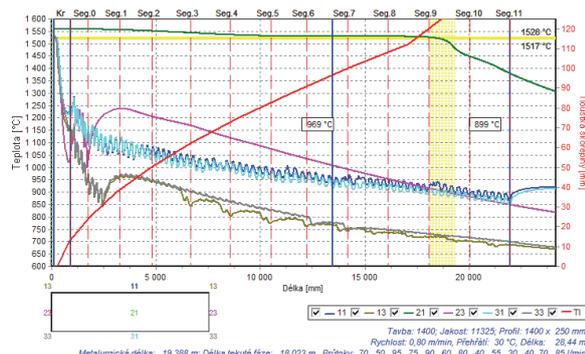
Při mezní šířce bramy 1600 mm jsou její okraje již mimo dosah chladicích trysek. Projeví se to výrazným píkem na křivce izosolidy i izolikvidy při okraji bramy (obr. 24a), což může způsobit vznik vnitřních vad. Ze souhrnného diagramu na obr. 25 je patrné, že nejvíce používaná šířka 1530 mm se jeví z tohoto pohledu jako maximálně přípustná. U bram o menších šířkách je průběh izočar příznivější, jejich frekvencovanější odlévání by však přineslo snížení produkce odlité oceli



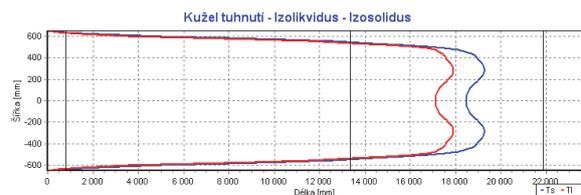
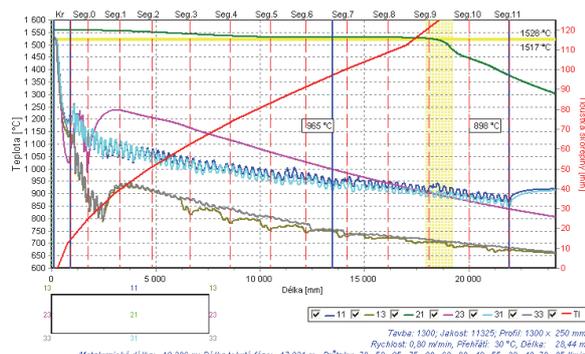
a) šířka 1600 mm



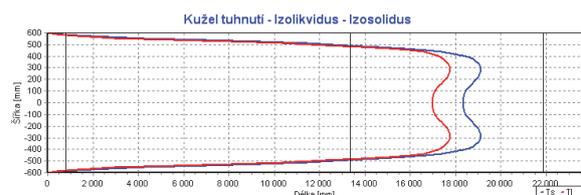
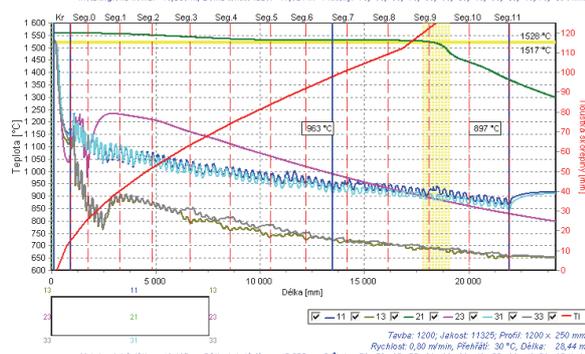
b) šířka 1500 mm



c) šířka 1400 mm

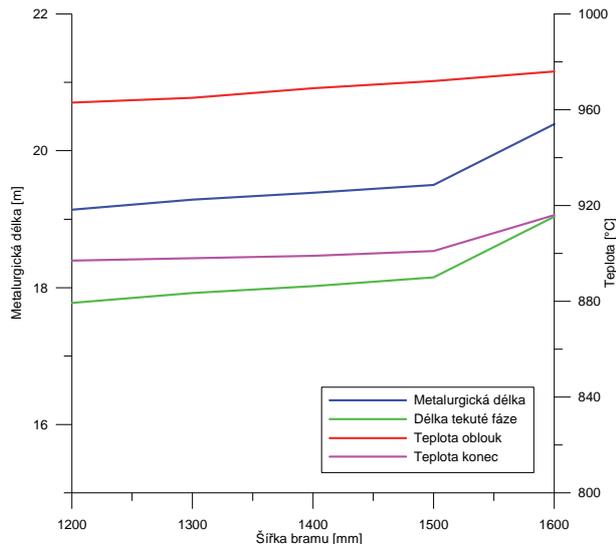


d) šířka 1300 mm



e) šířka 1200 mm

Obr. 24 Teplotní pole bram o šířce 1200 až 1600 mm, ocel 11325, rychlost 0,8 m·min⁻¹
Fig. 24 Temperature field of the slabs of the width 1200 to 1600 mm, steel 11325, speed 0.8 m·min⁻¹



Obr. 25 Vliv šířky bramy na metalurgickou délku, ocel 11325, rychlost 0,8 m·min⁻¹

Fig. 25 Effect of the width of slab on the metallurgical length, steel 11325, speed 0.8 m·min⁻¹

Závěr

Výrazné zvýšení výkonu počítačů ve spojení s rozvojem numerických metod umožnilo vytvořit z matematických modelů silné nástroje pro zvyšování kvality a výkonu při plynulé odlévání. Požadavky na zvyšování výkonu ZPO (tj. více vyrobených předlitků za čas) v poslední době sílí, a to současně s požadavkem nejen na nejvyšší kvalitu polotovárů – předlitků, ale i konečných výrobků, např. plechů. Kromě toho výroba oceli na ZPO musí také pokrýt požadavky na kvalitu nových, pokročilejších vysokopevnostních ocelí, ocelí odolných mořské vodě nebo kyselému prostředí, ocelí pro produktovody, kotlové nádoby, automobilový průmysl aj. 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, které mohou být aplikovány ve verzi off-line nebo on-line. Výpočet off-line verzí modelu trvá delší dobu, než je reálný čas odlévání a slouží pro optimalizaci procesu odlévání při návrhu nebo úpravě ZPO, či při návrhu nebo úpravě vlastní výrobní technologie a jejích parametrů. O tomto modelu se hovoří jako o simulátoru plynulé 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. Model je tedy schopen reagovat na dynamické změny vstupních veličin (např. zásah protiprůvalového systému). 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 plynulé odlévání je ovlivňován mnoha faktory a podmínkami. Vlivy přenosu tepla a hmoty jsou rozhodující a primární, protože od utváření teplotního pole se odvíjejí i vlivy mechanické a strukturní. Hovoří se o numerickém modelu teplotního pole, protože výsledkem numerické simulace je znalost teplot v uzlech výpočtové sítě v čase. Taktéž lze model označit jako makromodel tuhnutí (někdy nazýván jako solidifikační), protože řeší problematiku tuhnutí (změny fáze) na mikroúrovni, tj. řeší tepelné bilance na úrovni buňky výpočtové sítě.

Zde prezentovaný dynamický model BrDSM (Brněnský dynamický solidifikační model), který vznikl na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, je registrován v rámci EÚ pod názvem Brno Dynamic Solidification Models (BrDSM) a pod ochrannou známkou EU 015723893 [12]. Tento program byl od r. 2003 úspěšně nepřetržitě zařazen do řídicího systému ZPO a.s. VÍTKOVICE STEEL, ve kterém byl vyvinut, odladen a před r. 2003 testován. Prokázal, že se jedná o originální a ve světovém měřítku konkurence schopný produkt, který může být po úpravě začleněn po úpravě do řídicího systému kteréhokoli provozu ZPO, včetně zahraničního. V rámci dalšího rozvoje plynulé odlévání ocelí je nanejvýš žádoucí tento program dále rozvíjet. Svědčí o tom zájem především zahraničních ocelářských společností, bez ohledu na to, že původní provoz byl v r. 2015 z rozhodnutí vlastníka z ekologických a ekonomických důvodů zastaven. Příkladem může být jihokorejské POSCO.

Poděkování

Tato publikace vznikla v rámci řešení výzkumných úkolů NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků OP VaVpl v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu NPU I.

Literatura

- [1] REZAUR, R. Coprocessor Architecture and Tools. The Guide for Application Developers. Apress Open, New York (2013) pp. 232.
- [2] SANDERS, J., KANDROT, E. *CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming*, 1st Edition. Addison-Wesley Professional, 2010. 312 s.
- [3] KLIMEŠ, L. *Optimalizace parametrů sekundárního chlazení plynulé odlévání oceli*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 150 s.
- [4] 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. *8th European Continuous Casting Conference ECCC, ASMET*, 2014, s. 266–275.
- [5] ŠTĚTINA, J. *Dynamický model teplotního pole plynule odlévané bramy*. Disertační práce, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, FMMI, 2007.

- [6] MAUDER, T. *Optimalizace Bramového plynulého odlévání oceli za pomoci numerického modelu teplotního pole*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 150 s.
- [7] MAUDER, T., ŠANDERA, C., ŠTĚTINA, J. A Fuzzy-based Optimal Control Algorithm for a Continuous Casting Process. *Materiali in tehnologije*, 46 (2012) 4, 325–328.
- [8] ASM Automation [online]. 2016. 2016: ASM automation [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: www.asmautomation.com
- [9] IVANOVA, A. A. Model Predictive Control of Secondary Cooling Modes in Continuous Casting. In *22nd International Conference on Metallurgy and Materials METAL*, Ostrava: Tanger s.r.o., 2013, s. 1–6. ISBN 978-80-87294-39-0.
- [10] ŠTĚTINA, J. et al. Význam numerického modelu teplotního pole off-line a on-line kontinuálně lité bramy. *Hutnické listy*, 63 (2010) 1, 43–51.
- [11] ŠTĚTINA, J. et al. Optimization of a Concasting Technology via a Dynamic Solidification Model of a Slab Caster. *Materials Science Forum*, (2005) 5, 475–479.
- [12] Continuous Casting: Brno Dynamic Solidification Models [online], 2016: Brno University of Technology [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.continuouscasting.info/PRICM-5>: In 5th Pacific Rim 2004, International Conference on Advanced Materials and Processing PRICM-5, 2-5 Nov. Beijing, China. Processing. 2005, pp. 3831-3834. Materials Science Forum, vols. 475-479, p. 5.

Rentabilita evropských oceláren by v roce 2017 mohla výrazně klesnout

Stahl Aktuell

20.12.2016

Stoupající ceny surovin, zvýšené stavy zásob a očekávaný návrat částečně mimo provoz postavených kapacit v rozsahu 4 mil. tun do provozu by mohly v roce 2017 výrazně snížit rentabilitu oceláren v Evropě. Švýcarská banka UBS očekává, že se v roce 2017 sníží marže v evropských ocelárnách až o 17 %. Výhled pro evropský ocelářský sektor vidí UBS negativní. Postiženy budou podle UBS i největší koncerny ArcelorMittal, Salzgitter, Thyssenkrupp a Voestalpine. Akcie výrobců oceli zařadila UBS do kategorie „prodat“.

Obchod s emisemi: Zpátky na začátek

Handelsblatt

03.01.2017

Reforma obchodu s emisemi se již zdála být uzavřena a „pod střešou“. Nyní ale výbor Evropského parlamentu pro životní prostředí již svázaný kompromisní balíček znovu rozvázal. V loňském roce na podzim se již na pár týdnů zdálo, že se pro plánovanou reformu evropského systému pro obchod s emisemi našel kompromis, se kterým by všichni aktéři mohli žít. Bohužel od chvíle, kdy výbor pro životní prostředí Evropského parlamentu krátce před Vánoci kompromisní balíček znovu otevřel a požadoval změny, začíná debata opět od začátku. Výbor se usnesl, že roční krácení certifikátů zvýší z 2,2 % na 2,4 %. Kromě toho chce výbor 800 milionů certifikátů úplně zrušit a bezplatné přidělování pro průmysl ořezat. Nadto by měly průmyslové podniky v budoucnosti dostávat menší vyrovnání za to, že obchod s emisemi vyžene jejich náklady na energii do výšky. Ministři životního prostředí zemí EU se zatím k parlamentnímu návrhu výboru pro životní prostředí nevyjádřili. Při jejich setkání krátce před Vánoci se nedokázali dohodnout na společném stanovisku. Další setkání se odehraje v únoru 2017. EP bude o návrzích výboru zřejmě hlasovat také v únoru. Hans Jürgen Kerkhoff, prezident VW Stahl, řekl: „Když i naše nejefektivnější zařízení budou zatěžována dodatečnými náklady, pomůže to jen mimoevropské konkurenci s podstatně horší bilancí CO₂“. Ocelářské odvětví varuje, že měřítko a srovnávací ukazatele, podle kterých se poměruje přidělování bezplatných certifikátů, musí být neodkladně změněna. Jsou totiž částečně „technicky nedosažitelná“ a kromě toho se rok od roku zpřísňují.

Vyvinuty nové 12% chromové oceli, více chromu činí ocel teplotně stabilnější

www.process.vogel.de

04.01.2017

Materiály, používané v elektrárnách, zpravidla oceli, ztrácejí při stoupající teplotě pevnost a nevydrží pak zatížení, panující v turbinách a potrubích. Kromě toho se stoupající teplotou je stále agresivnější koroze. Celé generace inženýrů proto pracovaly na dalším vylepšování ocelí, takže dnešní 9% chromové oceli mohou pracovat i při teplotách 615 °C oproti 300 °C před 100 lety. Fraunhofer Institut vyvinul nyní nové 12% chromové oceli pro použití při vysokých teplotách, které jsou až o 30 % pevnější než současné 9% chromové oceli a vydrží v elektrárnách delší dobu vyšší teploty a tlaky.