

Recenzované vedecké články

Využitie počítačového modelovania pri optimalizácii procesu plynulého odlievania ocele v Železiarňach Podbrezová, a. s.

Utilization of Computer Modeling in Optimization of Continuous Casting Process of Steel in Železiarne Podbrezová, a. s.

Ing. Pavol Buček, PhD.; Ing. Karol Ondrejko, PhD.

ŽP Výskumno-vývojové centrum s.r.o., Kolkáreň 35, 976 81, Podbrezová, Slovenská republika

Prezentované koncepty softwarovej podpory na optimalizáciu procesu plynulého odlievania ocele OPTIexpert a OPTIcontrol sa opierajú o solidifikačný model s detailným opisom okrajových podmienok, mapujúci vypočítané a merané veličiny priamo na virtuálny prúd zariadenia plynulého odlievania. Výpočtovo efektívne modely sú geometricky redukované s využitím symetrie modelovanej oblasti a okrajových podmienok. Procedúry nastavovania výpočtov a vyhodnocovania výsledkov sú plne automatizované. Zatiaľ čo koncept OPTIexpert predstavuje nástroj pre statickú optimalizáciu pri ustálených podmienkach, koncept OPTIcontrol predstavuje nástroj pre dynamickú optimalizáciu pri neustálených podmienkach. V simulačnej štúdii OPTIexpert boli vyhodnotené vybrané materiálové vlastnosti s využitím fyzikálnej simulácie spolu s vypočítanými solidifikačnými trajektóriami za účelom previazania mechanizmu tvorby prasklín pri odlievaní vo väzbe na teplotné polia.

Kľúčové slová: plynulé odlievanie ocele; počítačové modelovanie; optimalizácia modelov; fyzikálna simulácia

Numerical modelling of metal processing technology by means of industry-oriented, commercially available software products has been widely used in industrial R&D for many years. A typical software suite fully utilizes processing and data storage power of today's computers and places no principal constraints regarding model complexity of technology in focus. Presented computer modeling frameworks OPTIexpert and OPTIcontrol for optimization of continuous casting of steel rely on solidification model outputs with detailed boundary conditions for one-to-one mapping of computed or measured values onto a virtual strand surface. Computationally efficient models are further geometrically downsized utilizing the symmetry of computational domains and boundary conditions. Model set-up procedures are also fully automated and post-processed to avoid human-induced errors. While OPTIexpert presents a static optimization tool for continuous casting in steady-state conditions, the OPTIcontrol presents a dynamic optimization tool under transient casting conditions. In OPTIexpert case study, selected material properties of a given steel grade are evaluated in physical simulations along with solidification trajectories in order to link the mechanical properties and crack formation mechanisms to the temperature field in a casting strand. The unbending process that occurs within the pinch-roll unit section (TRS_1 – TRS_3) is adjusted to match with the higher ductility temperature region (T_{1H} – T_{2L}) for a given steel grade. This is achieved by manipulating the casting speed (input parameter) while observing the temperature field through the columnar crystal zone (output parameter). Iteratively evaluated temperature fields are then utilized in OPTIcontrol as the references, designed to handle transient control problems, e.g. change of casting speed, temperature, cooling water

Key words: continuous casting of steel; computer modeling; model optimization; physical simulation

Výskum technológie plynulého odlievania ocele v Železiarňach Podbrezová, a. s. (ŽP) predstavuje jedinečnú formu synergie aktivít riešiteľských kolektívov zo Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, Technickej univerzity v Košiciach a ŽP Výskumno-vývojového centra s.r.o. v rámci spoločných pracovísk Kontilab a SimConT. Riešiteľské kolektívy z uvedených inštitúcií sa zaoberajú témami počítačových simulácií procesu plynulého odlievania, fyzikálneho a počítačového modelovania

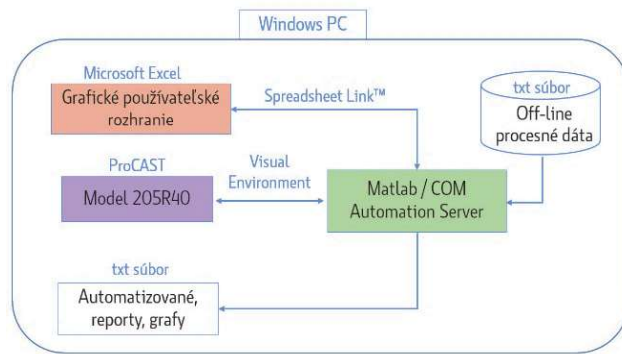
prúdenia ocele v medziapanve, ďalej spracovaním dát a návrhom algoritmov riadenia v procese výroby. Očakávaným efektom spoločného úsilia je širokospektrálna optimalizácia výroby ocele, zameraná na jednotlivé technologické celky, ktorej výsledkom má byť odliatok s vysokou pridanou hodnotou v zmysle jedinečného chemického zloženia, homogenity a čistoty, slovom – vysokej kvality. Jedným z optimalizačných nástrojov procesu plynulého odlievania je výpočtovo efektívny numerický model tuhnutia ocele. Výpočtové modely

predstavujú alternatívu k priamym meraniam povrchových teplôt odliatku, pričom poskytujú pohľad aj na procesy tuhnutia v jeho vnútri. V procese návrhu je však potrebné ich algoritmy verifikovať a v rámci implementácie na zariadenie plynulého odlievania (ZPO) ich výstupy validovať meraniami počas ostrej prevádzky. Napokon je možné tieto modely využívať ako softwarové senzory pri statickej optimalizácii procesu (off-line), alebo v režime dynamickej optimalizácie procesu (on-line). softwarové senzory poskytujú korektné a nezašumené údaje pre aktuálny okamih, ako aj predpoveď ich vývoja v blízkej budúcnosti. Prakticky pri nich neexistujú obmedzenia na výber algoritmov časovej syntézy riadenia pri dynamickej optimalizácii. V odborných publikáciách nájdeme príklady aplikácií riadenia teplotného poľa v zóne sekundárneho chladenia s využitím PID, MPC ako aj fuzzy regulátorov [1]. Tie môžu využívať aktuálnu alebo aj budúcu informáciu o teplote z diskrétného umiestnenia, napr. bezprostredne za zónami sekundárneho chladenia alebo aj z priestorovo ohraničenej oblasti pôsobenia [2]. Softwarové senzory sú spravidla postavené na báze numerického riešenia parabolickej rovnice s časovo závislou okrajovou podmienkou – tepelným tokom. Pri experimentálnej identifikácii okrajových podmienok prirodzene vznikajú rozdiely medzi skutočnými a identifikovanými hodnotami. Z toho dôvodu je žiaduce modely okrajových podmienok priebežne kalibrovateľ pomocou dát z meraní, ktoré sú však obvyčajne nedostupné alebo len riedko rozmiestnené [3]. Dá sa však predpokladať, že s postupným vývojom autonómne pracujúcich technologických celkov sa výrobcom meracej techniky v spolupráci s výrobcami ZPO podarí vyvinúť unikátne riešenia na prekonanie týchto prekážok.

1. Systém OPTIexpert

Solidifikačný model plynulého odlievania ocele v ŽP a. s. je realizovaný v podobe numerického modelu nosného odlievaného formátu 205R40 mm. Z pohľadu softwarovej architektúry je umiestnený v kontexte systému OPTIexpert, vyvíjanom za účelom automatizovaného nastavovania a správy výpočtov (obr. 1). Cieľom systému je rekonštruovať ľubovoľnú teplotnú históriu pre formát 205R40 podľa odlievacieho záznamu za minimálny čas a navrhnuť úpravu množiny procesných parametrov odlievania pre ustálený stav.

Koncept pozostáva zo špecializovaného softwaru pre výpočtové úlohy v zlievarenstve (ProCAST, ESI Group), softwaru pre inžinierske výpočty (Matlab) a správu a spracovanie dát (Microsoft Office Excel). V súčasnej podobe ide o pracovný koncept, postavený na komerčných softwarových prostrediach. Výhodou je, že nie je potrebné verifikovať algoritmy riešenia numerických úloh, ale spoľahnúť sa na prácu profesionálnych vývojárov a ich dlhoročné skúsenosti v odbore. Takto zostáva priestor na budovanie znalostnej databázy problémov spolu s analýzami možných príčin ich vzniku, na laboratórne skúšky a na fyzikálne simulácie dynamických režimov pri odlievaní.

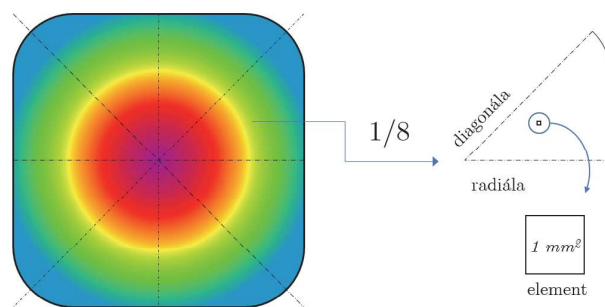


Obr. 1 Architektúra systému OPTIexpert pre vyšetrovanie ustálených podmienok pri plynulom odlievaní nosného formátu 205R40 mm

Fig. 1 OPTIexpert system architecture for investigation of steady-state conditions in continuous casting of square billet 205R40 mm

1.1 Solidifikačný model

Cieľom počítačovej analýzy je upriamiť pozornosť na statické a dynamické veličiny, vyjadrujúce priebeh tuhnutia odliatku v čase a priestore vo forme stavových $X(x, t)$, resp. výstupných $Y(x, t)$ veličinových polí. Je možné ich získať z rozmerovo redukovaného solidifikačného modelu, ktorý pokrýva fázové premeny materiálu bez uvažovania príspevku z termomechaniky tuhej fázy. Formátu odliatku 205R40 zodpovedá maximálna prípustná redukcia rozmerosti vplyvom osovej symetrie, ako aj symetrie okrajových podmienok v tvare 1/8, namiesto pôvodnej 1/1 v priečnom reze (obr. 2). Ďalšia redukcia rozmerosti úlohy nie je možná, čo dobre ilustruje nerovnomerné rozloženie teplotného poľa odliatku v čase, podložené vysokými hodnotami Biotovho čísla (200 – 2000) pre rôzne intenzity ochladzovania.



Obr. 2 Redukcia rozmerosti výpočtovej oblasti vplyvom osovej symetrie odliatku ako aj symetrie okrajových podmienok ochladzovania

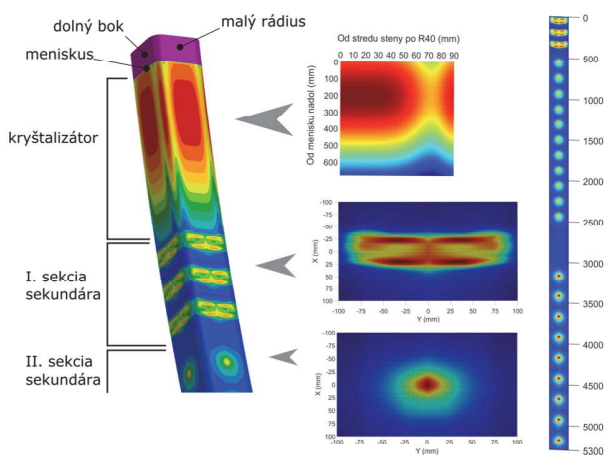
Fig. 2 Dimensional reduction of computational domain due to axial symmetry of the casting as well as boundary condition symmetry.

Model rieši nelineárnu parciálnu diferenciálnu rovnicu vedenia tepla s časovo závislou okrajovou podmienkou – tepelným tokom. Nelinearita je inherentne daná teplotne závislými materiálovými vlastnosťami a okrajovými podmienkami pri súčasnom uvoľňovaní latentného tepla tuhnutia. Vzhľadom na rozmerovú redukciu je možné použiť výpočtovú sieť s veľmi jemným priestorovým rozlíšením ($\sim 1 \text{ mm}^2$), čo dovoľuje presne zachytiť polohu

dvojfázovej oblasti pri zachovaní priaznivých hodnôt výpočtových časov (rádovo minúty).

1.2 Okrajová podmienka

Okrajová podmienka tepelného toku v sebe zahŕňa pôsobenie primárneho a sekundárneho chladenia. Presné vyčíslenie jej pôsobenia na povrchu odliatku má význam pri určovaní relácií medzi kvalitou odliatku a nastavenými technologickými parametrami, resp. pri návrhu automatickej regulácie chladenia na spojitnej oblasti pôsobenia. Na obr. 3 je možné vidieť aplikáciu okrajovej podmienky tepelného toku na odliatku formátu 205R40.



Obr. 3 Aplikácia okrajovej podmienky tepelného toku s vysokým priestorovým rozlíšením na povrchu odliatku formátu 205R40

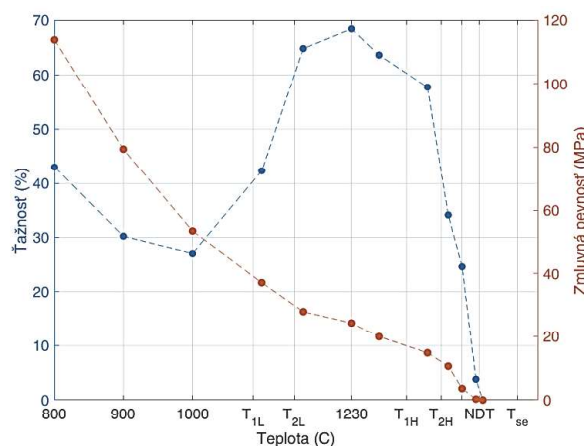
Fig. 3 Application of high-resolution heat flux boundary conditions onto surface of the 205R40 casting domain

Primárne chladenie je možné bilančne stanoviť s ohľadom na kontinuálne meranie oteplenia chladiacej vody pri obtekaní vložky kryštalizátora. Tento údaj figuruje v každom odlievacom zázname. Priestorové rozloženie takto generovaného tepelného toku je už potrebné rozumne odhadnúť alebo naladiť podľa bezkontaktných meraní povrchových teplôt pod kryštalizátorom. Pre tento účel bola v systéme OPTIexpert vytvorená váhová funkcia, ktorá umožňuje zohľadniť zmenu magnitúdy tepelného toku po obvode vložky ako aj v smere liatia, pričom bilančná hodnota celkového výkonu primárneho chladenia zostáva zachovaná. Vo výpočte je ochladzovacia podmienka implementovaná ako mapa čísiel s priestorovým rozlíšením (~1 mm²). Pôsobenie sekundárneho chladenia nie je možné stanoviť bilančne, nakoľko sa jedná o otvorený systém. Vodovzdušný kužel generovaný dýzou sekundárneho chladenia zasahuje žeravý povrch lejacieho prúdu, pričom časť z neho sa odparí (spotrebuje sa) a časť sa odrazí od parnej vrstvy na povrchu odliatku. Odparená voda je odvetraná, pričom nešpecifikovateľné množstvo kondenzuje na konštrukcii a stenách komory sekundárneho chladenia. Kondenzát spolu s odrazenou vodou postupne prepadáva do filtračného zariadenia a vracia sa späť do obehu. V súčasnosti je možné spoliehať sa na laboratórne merania chladiacich účinkov vybraných

typov dýz v starostlivo zvolených pracovných bodoch, medzi ktorými je pre iné pracovné body potrebné namerané hodnoty interpolovať a prepočítavať na tepelný tok. Meranie chladiacich účinkov dýz vykonáva podľa zadania Laboraťor prenosu tepla a proudění Fakulty strojnĳho inženýrství VUT v Brně (ČR) na jednourčelovom experimentálnom zariadení, ktoré fyzikálne simuluje podmienky ostreku odliatku dýzami sekundárneho chladenia. Vyčíslenie jednotlivých mechanizmov ochladzovania zvlášť je užitočné najmä z dôvodu ladenia procesu plynulého odlievania a nie je možné ho vykonať inak ako numericky.

1.3 Expertné analýzy

Systém OPTIexpert je priebežne dopĺňaný dátami z laboratórných experimentov a fyzikálnych simulácií, ktorými sa vypočítané výsledky ďalej spresňujú alebo sa premietajú v reláciách fyzikálnych vlastností materiálu, napr. ťažnosť vs. teplota. V rámci riešenia jednej etapy projektu APVV-14-0244 bola pre vybrané akosti vykonaná plastometrická deformačná skúška za tepla, ktorej výsledok je vidieť na obr. 4. V prípade, že sú pri laboratórnom experimente zadané rovnaké podmienky ako pri plynulom odlievaní, daný experiment sa nazýva aj fyzikálnou simuláciou. Konkrétne podmienky je možné vyčísliť pomocou výpočtov na numerickom modeli. Počítačová a fyzikálna simulácia sa teda navzájom dopĺňajú. Na obrázku je možné pozorovať polohu teploty nulovej ťažnosti NDT pod teplotou solidu T_{se} . Nasleduje vysokoteplotná prechodová oblasť $T_{1H} - T_{2H}$, v rámci ktorej stúpa ťažnosť materiálu spolu so zmluvnou pevnosťou. Nasleduje oblasť najvyššej nameranej ťažnosti s ďalším prudkým prepadom.



Obr. 4. Údaje z plastometrickej skúšky za tepla pre vybranú značku ocele a podmienky ochladzovania

Fig. 4 Data from high-temperature plasticity tests for selected steel grade and cooling conditions

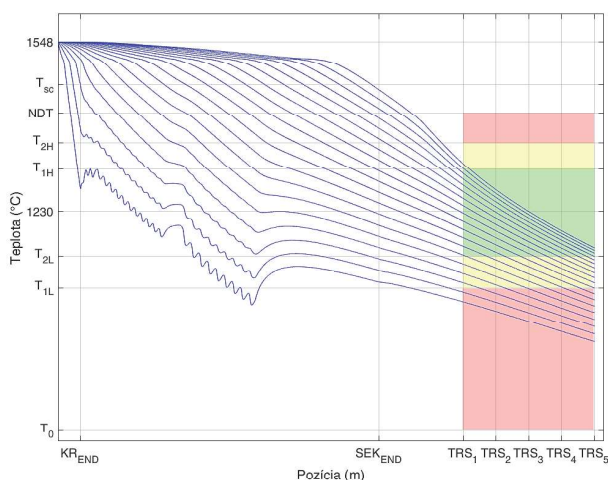
Pri odlievaní na radiálnom ZPO je vhodné oblasť zvýšenej ťažnosti materiálu vysunúť až k ťažným stoliciam, kde zároveň dochádza aj k postupnému rovnaniu lejacieho prúdu.

1.4 Výsledky

Do skupiny štandardných výsledkov plynúcich z výpočtu na solidifikačnom modeli je možné zaradiť veličiny:

- doba fázovej premeny (s)
- teplotný gradient ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}^{-1}$)
- teplotné pole ($^{\circ}\text{C}$)
- relatívny podiel tuhej fázy (-)

Na základe týchto parametrov je možné vyvodit' potrebné závery ku kvalitatívnemu hodnoteniu procesu tuhnutia materiálu. Doba fázovej premeny stanovuje celkový čas danej lokality lejacieho prúdu, strávený v dvojfázovej oblasti, t. j. medzi teplotami likvidu a solidu. Dlhšie časy môžu zvyšovať riziko vzniku trhlín za tepla. Teplotné gradienty sú zodpovedné za teplotné pnutia v objeme materiálu, ako aj za rýchlosť posuvu solidifikačného frontu. Teplotné pole v objeme lejacieho prúdu definuje tvar a dĺžku tekutého jadra. Napokon, relatívny podiel tuhej fázy, ako odvodená veličina, dobre ilustruje polohu dvojfázovej oblasti v reze naprieč odliatkom. V kombinácii s výsledkami z plastometrických skúšok je možné skupinu modelových výsledkov premietnuť aj do reálnych podmienok na ZPO. Napríklad pri stanovovaní optimálnej rýchlosti liatia pre konkrétnu akosť je možné premietnuť údaje z diagramu ťažnosti materiálu (obr. 4) na teplotné pole odliatku v úseku ťažno-rovnacích stolíc (TRS). Obr. 5 ukazuje záznamy z teplôt v oblasti kolumnárných (stĺpovitých) kryštálov pri nižšej rýchlosti liatia po celej dĺžke lejacieho prúdu. Farebne sú vyznačené hranice ťažnosti materiálu zo skúšky ťažnosti za tepla.

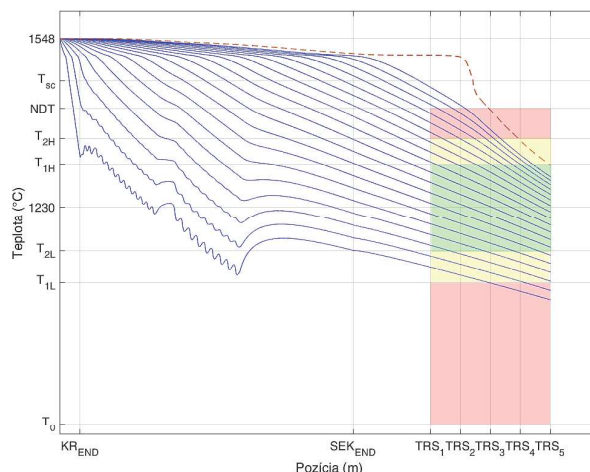


Obr. 5. Záznamy z teplôt v oblasti kolumnárných kryštálov pri nižšej rýchlosti liatia s vyfarbenými úrovňami ťažnosti v oblasti rovnania na ZPO

Fig. 5 Temperature evolution in the columnar zone under the lower casting velocity. Ductility regions of a given steel grade in CCM straightening zone are shown in color

Pozície KR_{END} a SEK_{END} označujú konce primárneho a sekundárneho chladenia. Pozície TRS_1 až TRS_5 označujú polohy ťažno-rovnacích stolíc. Zelený pás predstavuje oblasť najvyššej nameranej ťažnosti, žlté pásy prudko sa znižujúcu ťažnosť, ako to znázorňuje aj obr. 4,

a červené pásy predstavujú oblasti zníženej ťažnosti. Cieľom je zvýšiť rýchlosť liatia tak, aby došlo k prehriatiu stredy odliatku s rešpektovaním technologických obmedzení. Obr. 6 znázorňuje zmenu pomerov po úprave rýchlosti, pri ktorej sa očakáva zníženie rizika pod povrchových prasklín v dôsledku mechanického namáhania pri rovnaní. Prerušovaná čiara označuje priebeh teploty zo stredy odliatku.



Obr. 6. Záznamy teplôt v oblasti kolumnárných kryštálov pri upravenej rýchlosti liatia s vyfarbenými úrovňami ťažnosti v oblasti rovnania na ZPO

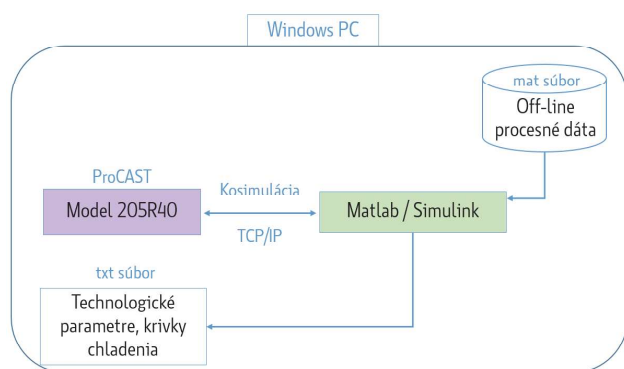
Fig. 6 Temperature evolution in the region of columnar crystals after adjustment of casting speed with colored levels of ductility in straightening area of CCM

Výsledkom analýz sú nájdené teplotné polia vo väzbe na procesné parametre, ktoré predstavujú vstupný údaj dynamickej optimalizácie v systéme OPTIcontrol.

2. Systém OPTIcontrol

Nájdené teplotné polia pri numerických analýzach v systéme OPTIexpert a k nim prislúchajúce technologické parametre je možné považovať za nominálne pracovné režimy ZPO. V ideálnom prípade sa celá tavba (panva) odlieva pri konštantných podmienkach. V skutočnosti je vždy potrebné technologické parametre mierne prispôbovať, nakoľko napr. teplota odlievanej ocele v medzi-panve postupne klesá. K tejto teplote je naviazaná rýchlosť odlievania a k rýchlosti odlievania sú naviazané aj ostatné parametre, ako sú prietoky vody v primárnej a sekundárnej sekcii chladenia. Pri pomalých zmenách technologických parametrov prechádza odliatok kvázirvnovážnymi stavmi. Pre tento spôsob regulácie sa bežne používajú chladiace krivky, ktoré prispôbujú prietoky chladiacej vody k aktuálnej rýchlosti liatia. Pri výraznejších alebo náhlych zmenách nastáva nežiadúci prechodový jav, kedy teplotné pole nie je vo fáze s aktuálnymi technologickými parametrami. Na rýchlu stabilizáciu tohto poruchového stavu v úseku primárneho a sekundárneho chladenia je potrebné poznať skutočný stav, t. j. teplotné pole, a technologické parametre regulovať v priamej väzbe na neho. Ak sa tak nestane, prechodový

jav nebude pod kontrolou a úseky odliate počas tohto intervalu môžu byť preklasifikované do nižšej kategórie kvality. Na kvalifikovaný odhad aktuálneho stavu teplotného poľa sa používajú validované numerické modely ako softwarové senzory. Druhým prípadom môže byť požadovaná zmena teplotného poľa na povrchu odliatku v úseku sekundárneho chladenia, napríklad pri vytváraní novej sady technologických parametrov sekundárneho chladenia. Takto je možné vytvoriť jedinečné relácie medzi teplotným poľom a technologickými parametrami, ktoré umožňujú v konečnom dôsledku definovať kvalitu v priamej väzbe na aktuálne teplotné pole.



Obr. 7 Architektúra systému OPTIcontrol pre vyšetrovanie neustálených podmienok pri plynulom odliavaní nosného formátu 205R40 mm

Fig. 7 OPTIcontrol system architecture for investigation of transient conditions in continuous casting of main casting billet size 205R40 mm.

Na rozdiel od systému OPTIexpert je OPTIcontrol postavený na dynamických modeloch systému primárneho a sekundárneho chladenia s priamym výpočtom akčného zásahu vo väzbe na aktuálne teplotné pole. Systémy chladenia sú modelované v prostredí Simulink® a riadený tepelný systém (objekt) v prostredí ProCAST. Oba modely sú navzájom prepojené medzi-procesným komunikačným rozhraním (TCP/IP), pričom kosimuláciou sa

nazýva beh súbežne idúcich výpočtov (simulácií) v odlišných softwarových prostrediach pri súčasnej výmene užívateľom definovanej množiny dát cez daný komunikačný protokol.

Záver

Numerické modelovanie technologických procesov pri spracovaní kovov s využitím komerčne dostupných softwarových balíkov je v priemyselnej praxi prítomné už mnoho rokov. Vďaka výpočtovej sile a schopnostiam hardwaru a softwaru nekladú dnes spomínané systémy nijaké principiálne prekážky na širokospektrálnu optimalizáciu procesu plynulého odliavania ocele.

Podakovanie

Autori ďakujú slovenskej grantovej agentúre APPV za podporu projektu APVV-14-0244 „Vývoj softvérovej podpory s využitím fyzikálnej simulácie pre optimalizáciu procesov plynulého odliavania ako systémov s rozloženými parametrami pre Železiarne Podbrezová, a. s.

Literatúra

- [1] KLIMES, L., STETINA, J. Unsteady Model-based Predictive Control of Continuous Steel Casting by Means of a Very Fast Dynamic Solidification Model on a GPU. *Materiali in tehnologije / Materials and Technologies*, 48 (2014), 4, 525–530.
- [2] JADACHOWSKI, L., STEINBOECK, A., KUGI, A. State Estimation and Advanced Control of the 2D Temperature Field in an Experimental Oscillating Annealing Device. *Control Engineering Practice*, 78 (2018), 116–128. 10.1016/j.conengprac.2018.06.011, dostupné na <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09670666118301874>.
- [3] PETRUS, B., CHEN, Z., BENTSMAN, J., THOMAS, B.: Online Recalibration of the State Estimators for a System with Moving Boundaries Using Sparse Discrete-in-Time Temperature Measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 63 (2017), 4, 1090–1096. 10.1109/TAC.2017.2736950.

Bezešvé nákrúžky pro letectví a kosmonautiku / Seamless Rings for Aviation and Aerospace

SMS group Newsletter 03/2018, str. 123.

Společnost SMS group dostala kontrakt na dodávku další válcovny nákrúžků od firmy Avic Guizhou Anda Aviation Forging Co., Ltd. Nová válcovna nákrúžků, typ RAW 400(500)/200/(250) – 2500/800 DM, má být postavena v závodě, který je provozován v čínském Anshunu. Výroba je plánována od poloviny roku 2019.

Nová válcovna nákrúžků může válcovat bezešvé nákrúžky o průměru do 2500 mm a maximální výšce 800 mm. Anda plánuje použití válcovny pro výrobu nákrúžků pro tryskové motory, které jsou vyrobeny ze slitin na bázi titanu a niklu a používají se v kosmonautice. Válcovna může být provozována s maximální radiální válcovací silou 500 tun a axiální silou do 250 tun.

Je to již druhá válcovna nákrúžků, kterou firma Anda objednala u SMS group. První válcovna typu RAW 500/400 – 3000/700 byla dodána už v roce 2003.