



Odborná zpráva projektu TAČR GAMA č. TG01010054-2
rok 2014

Evidovaná APOLLO 132070

PILOTNÍ ANALÝZA - KOMPLEXNÍ SYSTÉM DYNAMICKÉHO ŘÍZENÍ KVALITY PLYNULE ODLÉVANÉ OCELI

(Pilot 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: 23. 12. 2014

Brno University of Technology
Faculty Mechanical Engineering
Technická 2
616 69 Brno
Czech Republic
Tel/Fax: +420541143269
Email: stetina@fme.vutbr.cz

OBSAH

1. ÚVOD	3
2. PŘÍPRAVA NUMERICKÉHO MODELU TEPLTNÍHO POLE	4
3. OFF-LIN E A ON-LINE VERZE MODELU	6
4. ZÁVĚR	8

1. ÚVOD

Světová výroba oceli trvale roste. Ocel zůstává pro konstruktéry i uživatele stále nejdůležitějším i nejatraktivnějším kovovým konstrukčním materiálem. Při provozování zařízení pro plynulé odlévání (ZPO) ocelí jako nejmodernějšího a nerozšířenějšího způsobu výroby proto sílí celosvětová snaha o zvýšení jejich efektivity, hospodárnosti, bezpečnosti, spolehlivosti, zvýšení kvality jejich produktů (předlitků), snížení objemů nekvalitní výroby a tím snížení energetické a materiálové náročnosti, snížení množství spalin a tím produkce skleníkových plynů. Při pokračujícím a zvýšeném provozu ZPO a nutnosti jej optimalizovat se již nelze obejít bez použití sofistikovaného systému řízení, jehož základem jsou matematické modely a jejich modulární úprava do komplexního systému; a to nejen nových provozů. Sofistikovaný systém řízení je třeba uplatnit i u stávajících nebo rekonstruovaných ZPO. Nová a rekonstruovaná ZPO umožní systém navíc technicky snáze a časově podstatně rychleji uvést do plného a hospodárného provozu.

Řešení je možné pouze numerickými metodami rozšířenými o metody stochastické k postižení velké řady faktorů, které proces plynulého odlévání ocelí ovlivňují.

2. PŘÍPRAVA NUMERICKÉHO MODELU TEPLOTNÍHO POLE

Komplexní výpočtový aparát bude vycházet z modelu nestacionárního teplotního pole ocelového produktu ZPO nazvaného předlitek při jeho průchodu celým zařízením od hladiny taveniny v krystalizátoru až po pálicí stroj. 3D model musí řešit Fourierovu rovnici nestacionárního vedení tepla ve stěně krystalizátoru a Fourier--Kirchoffovu rovnici nestacionárního přenosu tepla v soustavě předlitek-krystalizátor resp. v soustavě předlitek-okolí po výstupu předlitku z krystalizátoru. Model musí obsahovat automatickou generaci výpočtové sítě (pre-processing), definici okrajových podmínek závislých na teplotě na jednotlivých hranicích sítě (včetně posouzení jejich vlivu na přesnost výpočtu), přípravu termofyzikálních parametrů závislých na teplotě (včetně posouzení jejich vlivu na přesnost výpočtu) a posléze numerický výpočet teplotního pole a rozmanité (především grafické) zpracování jeho výsledků (post-processing). Při výpočtu bude výhodně aplikována explicitní numerická metoda kontrolních objemů, která je podmíněně stabilní, takže do modelu bude implementována kontrola vzniku případných oscilací numerického řešení.

Vzhledem k silné nelinearitě zmíněných rovnic zapříčiněnou závislostí termofyzikálních vlastností i okrajových podmínek na teplotě, bude pro řešení zvolena metoda kontrolních objemů, které mohou být různých velikostí i tvarů dle aktuálního požadavku uživatele na hustotu sítě a tím na přesnost řešení. Pro každý objem se bude vlastně řešit rovnice energetické balance, tedy bude aplikován základní fyzikální zákon zachování energie umožňující průběžné rozšiřování a zpřesňování modelu o další fyzikální jevy.

Výpočtová síť se musí připravit pro dva režimy: ekvidistantní, ve které se bude pouze měnit počet uzlů a neekvidistantní, ve které se uzel sítě bude volit do technologicky klíčového bodu (např. do místa kontaktu předlitku s přítlačným válcem stroje). Uživatel potom volí počet uzlů mezi těmito uzly pevnými. Hladina oceli v krystalizátoru není konstantní a může kolísat. Jelikož bude výpočetní síť pevná, všechny výsledky teplotního pole předlitku budou zobrazovány od horní hrany krystalizátoru. Výpočtová síť umožní provozování modelu v reálném čase, tj. doba výpočtu bude stejná nebo dokonce kratší než reálná doba odlévání.

Vzhledem k navržené explicitní metodě bude třeba zahájit výpočet na celé výpočetní síti a nastavit v každém uzlu lící teplotu, což je teplota oceli v mezipánvi. Tato počáteční podmínka pro všechny výpočtové uzly se bude krýt s definicí okrajové podmínky 1. druhu na hladině krystalizátoru. Vypočtené teploty v místě, kam se předlitek po zahájení lití ještě neposunul, nebude zobrazována. Bude třeba též vyřešit oblast v místě tzv. zaváděcí zátky, uvažuje se o zvláštním modulu.

Model musí postihnout změnu fáze předlitku od stavu kapalného (tavenina), přes kašovitou mezifázi (t.zv. mushy zone) až po fázi pevnou po ztuhnutí, tudíž je třeba modelovat vývin skupenského tepla tuhnutí (krystalizace). Proto bude výhodné zavést funkci entalpie, která skupenské teplo zahrnuje, takže se v každém časovém kroku řešení hodnota entalpie převede na teplotu. Musíme nejen znát závislost entalpie na teplotě pro danou ocel, ale je též třeba vypracovat velmi rychlé algoritmy vyhledávání.

Co se týče definice okrajových podmínek, v rovině symetrie předlitku se bude uvažovat nulový tepelný tok (tzv. podmínka 2.druhu - adiabatická), na stěnách krystalizátoru se použije okrajová podmínka 3. druhu s využitím separátního modelu prostupu tepla mezi ztuhlou kůrou oceli a chladicí vodou protékající krystalizátorem nebo provozních dat získaných na krystalizátoru. Zásadní bude definice okrajové podmínky v oblasti sekundárního chlazení, ve které nejintenzivnější a rozhodující odvod tepla z chladnoucího předlitku probíhá pod vodními nebo vodo-vzdušnými tryskami. U vodních trysek je regulovanou veličinou průtok vody tryskou a u vodo-vzdušných průtoků vody a tlak vzduchu. Pro stanovení okrajových podmínek bude tedy nutné najít vztah mezi průtokem vody případně tlakem vzduchu a součinitelem přestupu tepla. V této oblasti se naváže úzká spolupráce s laboratořmi

přenosu tepla a proudění VUT FSI v Brně, která se dlouhodobě věnuje experimentálnímu stanovení součinitelů přestupu tepla a jejich rozložení pod tryskami. Závěrečnou částí chlazení předlitku po jeho výstupu z tzv. klece ZPO je terciální oblast chlazení, kdy je brama chlazena přirozenou konvekcí a radiací. Uplatní se opět okrajová podmínka 3. druhu.

Pro stanovení teplotní závislosti termofyzikálních parametrů ocelí (tepelná vodivost, tepelná kapacita, hustota, entalpie) se použije model IDS. Je to simulační nástroj pro solidifikaci oceli zahrnující fázové změny, který umožňuje stanovit závislost základních termofyzikálních vlastností na teplotě pro danou značku oceli s konkrétním chemickým složením a pro požadované parametry ochlazování. Solidifikační model IDS je tzv. „gray box“, tj. kombinuje empirické nebo semiempirické submodely s fyzikálně koncipovanými (fundamentálními) submodely. Model IDS byl a je dále vyvíjen na Technické univerzitě v Helsinkách. Kromě uvedených hodnot termofyzikálních vlastností oceli poskytuje model IDS také teploty významných událostí, které během solidifikace nastanou. Z pohledu aplikovatelnosti na plynulé odlévání oceli se jedná zejména o teploty solidu a likvidu.

3. OFF-LINE A ON-LINE VERZE MODELU

Nejprve bude za pomoci výsledků provozních měření vytvořen, testován a ověřen off-line model. Umožní analyzovat teplotní pole vlastního předlitku při jeho průchodu primární, sekundární i terciární zónou, tedy celým ZPO s plnou 3D geometrií, stejně jako ve vybraných stěžejních nebo problematických uzlech ZPO. Model plně zohlední 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 atd.). Model bude vybaven interaktivním grafickým prostředím pro snadné zadávání vstupních parametrů s následnou automatickou generací sítě, stejně jako komfortním grafickým výstupem, který umožní zobrazení teplotního pole ve formě izoterem nebo izoploch v různých řezech, časových křivek, 3D zobrazení teplotního pole apod. Programový systém založený na tomto modelu bude mít snadné ovládání, aby bylo možno bez problémů měnit potřebné parametry a aby jeho obsluha byla možná zaškolenými pracovníky ocelárny. Model bude sloužit k okamžitému využití při řešení provozních problémů, umožní provést obecnou analýzu vlivu nejrůznějších technologických opatření na utváření teplotního pole předlitku v kterémkoli uzlu ZPO i ZPO jako celku. Dovolí dále uživateli navrhovat třeba i netradiční soubor či kombinaci technologických zásahů k optimálnímu utváření teplotního pole s cílem komplexně zvýšit kvalitu předlitku při zachování nebo zvýšení produkce. Stejně tak off-line verze pomůže pracovníkům ocelárny analyzovat mimořádný stav ZPO včetně zahájení a ukončení lití. Off-line verze bude moci rovněž velice pružně a zasvěceně pomoci stávající ZPO např. vybavit novým systémem chlazení či jinak rekonstruovat, stejně jako případně navrhnout zcela nový provoz ZPO. Nevýhodou off-line systému bude 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 bude nutně předcházet jeho off-line verze, bude řešit teplotní pole v reálném čase nebo v čase kratším. Mnohonásobné zvýšení rychlosti výpočtu teplotního pole předlitku umožní nejen využití výkonnějšího výpočetního hardwaru, ale především softwaru. Dynamický model na základě okamžitého vyhodnocení měřených dat a vypočtených hodnot bude moci provést v reálném čase úpravy licích parametrů, zejména licí rychlosti a průtoků vody tryskami v sekundárním chlazení. Základní podmínkou realizace bude návrh a zajištění vhodného hardwaru a jeho optimální napojení do informačního systému na řešeného 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 poskytne do modelu separátní vyvinutý program se standardním rozhraním. Toto rozhraní bude naprogramováno dle aktuálního stavu řízení a bude ve zdrojových textech k dispozici odběrateli, aby si mohl při změně řízení interface modifikovat.

Za základní vyhodnocované výstupní parametry se budou považovat 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 budou poskytnuty řídicímu systému ocelárny do druhé úrovně řízení.

On-line systém dále umožní 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 bude možno průběh tuhnutí znovu přehrát, off-line systémem znovu simulovat a navrhnout technologická opatření k nápravě.

Model může být použit např. 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 využití ve stávajícím predikčním systému sledování a řízení kvality,
- přímé řízení licí rychlosti a průtoků vody v jednotlivých zónách sekundárního chlazení.

4. ZÁVĚR

Řešitelé na základě přípravy pilotní analýzy vytvoří a odladí off-line a on-line model nestacionárního teplotního pole plynule odlévaného předlitku na ZPO a.s. VÍTKOVICE STEEL jako pilotního provozu. Tento model bude modulární, který bude připraven zajišťovat tyto předpokládané funkce:

- návrh, instalace a dodávka hardware serveru, MS server 2012, MS SQL 2012,
- modul rozhraní mezi 1. 2. a 3. úrovní řízení zařízení plynulého odlévání oceli,
- výpočtový modul teplotního modelu teplotního modelu on-line,
- grafické rozhraní on-line teplotního modelu pro zobrazení případně z více proudů ZPO,
- materiálové vlastnosti, databáze cca 200 značek ocelí,
- off-line model (modul krystalizátoru, modul trysek sekundárního chlazení),
- modul prohlížení dat z on-line modelu,
- dynamický modul,
- optimalizační modul.