

NETYPICKÝ APROXIMAČNÍ MODEL PROUDĚNÍ OCELI V MEZIPÁNVI

Jan Morávka¹, Karel Michalek²

¹Třinecký inženýring, a.s., ²VŠB – Technická univerzita Ostrava, FMMI, Katedra metalurgie

Abstract

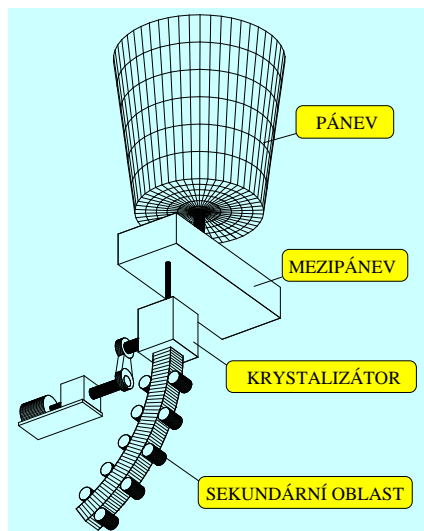
Príspevek popisuje analýzu, návrh a ověření *netypického aproximačního modelu* pro hodnocení přechodových dějů vznikajících při proudění oceli v mezipánvi na zařízení pro plynulé odlévání oceli (ZPO 2) v Třineckých železárnách (TŽ), a.s.

Data byla získána pomocí *numerického modelování* v prostředí CFD programu Fluent a z *fyzikálního modelování* na modelu mezipánve v měřítku 1:3. *Netypický aproximační model* byl realizován v prostředí programu MATLAB. Program (m-soubor) umožňuje stanovování parametrů aproximačního modelu nelineární metodou nejmenších čtverců pro vstupní data z numerického i fyzikálního modelu a rovněž pro data reálně naměřená v provozu.

Na základě výsledků modelování byl sestaven *algoritmus a program* pro řídicí systém v TŽ, a.s., umožňující *minimalizaci* tzv. *směšných oblastí* u sekvenčně odlévaných taveb na provozu ZPO 2 v TŽ, a.s.

1 Úvod

Na *obr.1* je schematicky znázorněno zařízení plynulého odlévání (ZPO). V každé tavně se z *licí pánve* (LP) regulovaně odlévá ocel přes *mezipánve* (MP) - která má většinou více výtokových otvorů (výlevek), či tzv. licích proudů - do vodou chlazených *krystalizátorů*.



V krystalizátoru ztuhne povrchová vrstva oceli a vzniká tzv. předlitka, který dále postupuje do oblasti *sekundárního ochlazování*, kde se pomocí trysek přivádí na povrch předlitku voda v podobě jemné mlhy. Pohyb předlitku je zajištěn tažnými válečky a jeho rovnání u tzv. radiálního ZPO rovnacími válečky [BROŽ aj. 1988].

Obr. 1: Schéma radiálního zařízení plynulého odlévání oceli

V rovinné části je prakticky oblast *terciárního chlazení*, zajišťovaného většinou přirozeným prouděním okolního vzduchu nebo pomocí tzv. termoboxů. Předlitky jsou na konci této oblasti děleny dělicím (pálicím) zařízením na požadované délky, na jejich čela jsou ražena čísla a odsunovacím zařízením

jsou přenášena na chladicí lože.

Úvodem je vhodné zmínit *technologický* a *kybernetický* pohled na problematiku plynulého odlévání oceli v oblasti agregátu *mezipánve* v souvislosti se vznikem, analýzou a snahami o minimalizaci tzv. *směšné oblasti*.

Technologický pohled: Pokud v průběhu sekvenčního plynulého odlévání oceli vznikne situace, kdy následující tavnice obsahuje *odlišné chemické složení oceli*, začne se v MP - při otevření LP - promíchávat ocel aktuální tavnice s ocelí tavnice následující. Tato situace se projeví proměnlivým chemickým složením odlité oceli, které neodpovídá ani předchozí (aktuální) ani následující vyrobené jakosti - vzniká tzv. *směšná oblast*.

Rozsah směsné oblasti na jednotlivých licích proudech je dán především *rozdílností chemického složení* smíchávaných ocelí, dále *hmotností oceli* v MP, *rozdílem teplot* obou ocelí, *režimem naplňování* MP v období tzv. rozhraní taveb, jako i *počtem funkčních* licích proudů, *polohou* výtoku (licího proudu) oceli z MP a *tvarem* MP.

Uvedené přechodové děje mohou mít podstatný vliv nejen na charakter proudění v MP, a tedy i na intenzitu smíchávání původní a nové oceli přiváděné do MP, ale rovněž i na nestabilitu teplot přiváděné oceli do jednotlivých krystalizátorů, což v důsledku může vést ke *zvýšení výskytu vad předlitků* nebo v krajním případě i ke *zvýšení počtu průvalů*.

Snahou všech provozovatelů zařízení plynulého odlévání je verifikovat a minimalizovat její skutečný rozsah. Jednou z možností, jak predikovat rozsah směsné oblasti je samotný, ale velmi náročný, provozní experiment. Mnohem efektivnější se jeví užití metod fyzikálního a numerického modelování (viz dále).

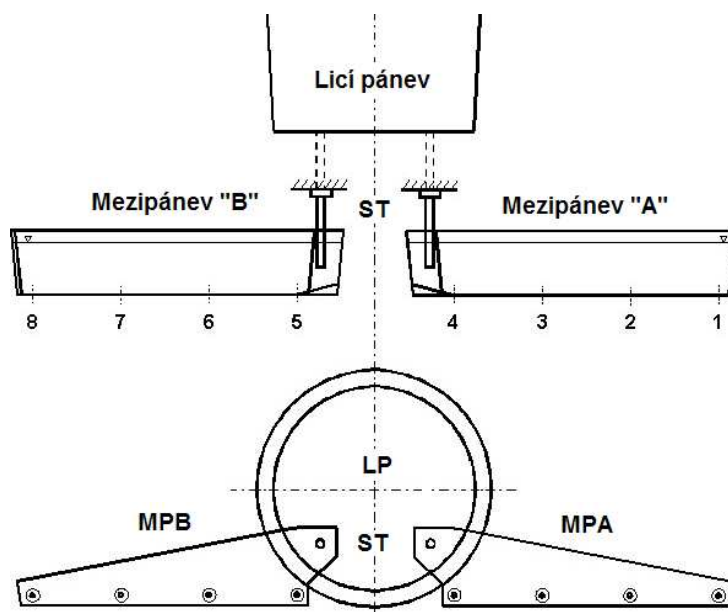
Kybernetický pohled: Z hlediska teorie systémů a teorie automatického řízení (TAR) lze konstatovat, že vznikající přechodové děje v MP jsou důsledkem skokových změn (Heavisideových jednotkových skoků) *koncentrace* (chemických prvků oceli) a případně i *teploty* (*neizotermický* děj) oceli na vstupu do MP (výstupu z LP). MP je z hlediska matematicko-fyzikální analýzy 3D soustavou s rozloženými parametry, z hlediska TAR má charakter integrační soustavy (s různou dynamikou na jednotlivých výlevkách) s regulací hladiny oceli (regulovaná veličina). Hladina oceli je přitom v průběhu tavby regulovaná na konstantní hodnotu a v období rozhraní taveb na nekonstantní hodnoty dané potřebným režimem naplňování a vyprazdňování MP (operátorsko-programová regulace).

Cílem článku je prezentovat jeden *originální postup* deterministické *identifikace* analyzované soustavy pomocí netypického matematického modelu s využitím *aproximace přechodových dějů* změn koncentrace probíhající při *izotermickém*, ale zvláště při *neizotermickém* proudění oceli v MP ZPO oceli. Pro aproximaci a identifikaci byly využity jak *teoretické poznatky*, tak výsledky získané při *numerickém a fyzikálním modelování* vzájemného směšování dvou rozdílných tavenin (s rozdílným *složením a teplotou*) pro podmínky konkrétní mezipánve „B“ na ZPO 2 v TŽ, a.s.

2 Stručný popis ZPO 2 v TŽ, a.s.

ZPO oceli č.2 v TŽ, a.s. lze dle [MICHALEK 2001] stručně charakterizovat jako osmiproudé (2 x 4 licí proudy), radiální, s možností odlévat (v současnosti) čtvercové předlitky (sochory) rozměrů 150 mm.

Pro odlévání se používají dvě čtyřproudé mezipánve (MPA, MPB), které jsou plněny z jedné LP. Dopadové místo (vtoková část, do které je ocel přiváděná pomocí tzv. stínicí trubice - ST) v MP je umístěno *asymetricky* na okraji MP mimo oblast výlevky (licích proudů) č.1 až č.8 – viz *obr.2*:



Obr. 2: Uspořádání osmiproudého ZPO2 v TŽ, a.s.

Z *obr.2* je zřejmé, že půdorysný tvar samotných MP je rovněž *asymetrický*. Jedním z důvodů použití asymetrického tvaru je požadavek dosažení přibližně stejného charakteru proudění nad jednotlivými výtakovými uzly z mezipánve.

Vzhledem k symetrickému uspořádání obou čtyřproudých MP se shodnou konstrukcí teoreticky odpovídají výsledky získané (pomocí numerického a fyzikálního modelování) pro licí proudy č.5 až č.8 (LP5 až LP8) rovněž licím proudům č.1 až č.4. V praxi se ovšem, díky různým provozním „nesymetrickým“ vlivům, výsledky liší – zvláště v oblasti tepelných režimů.

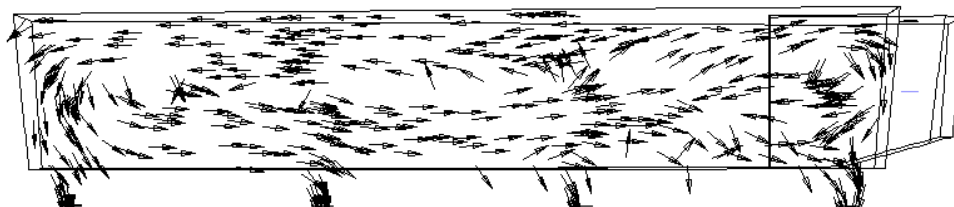
3 Mechanismus neizotermických dějů

Pro lepší pochopení dějů v mezipánvi je vhodné stručně popsat fyzikálně-metalurgický mechanismus neizotermických dějů.

V průběhu vlastního odlévání oceli může nastat situace, kdy z LP do MP vstupuje ocel s jinou teplotou než má ocel v MP. Při smíchávání obou ocelí v MP pak vzniká tzv. *neizotermický přechodový děj* (při stejných teplotách obou ocelí pak probíhá *izotermický děj*). Pokud vstupuje ocel s vyšší teplotou než má ocel v MP, vzniká *kladný* teplotní rozdíl, při *záporném* teplotním rozdílu je tomu naopak. Výsledky fyzikálního a numerického modelování prokázaly [MICHÁLEK 2001], [MICHÁLEK & VLK & PINDOR 2001], [MICHÁLEK & PINDOR & STRÁŠÁK 2001], že obě zmiňované situace mají výrazný vliv na výsledný charakter proudění oceli v MP.

Při *kladném rozdílu teploty* je zpočátku tok řízen *kinetickou silou*. Po zbrždění proudu o dopadovou desku se začne - jako důsledek rozdílných hustot - prosazovat *vztlaková síla*, která usměrňuje proud k hladině v mezipánvi. Proud se dostane nad lázeň s nižší teplotou a pokračuje podél hladiny mezipánve směrem od stínicí trubice, vytváří se tzv. *reverzní* charakter proudění – viz **obr.3**. Postupným smícháváním teplé a studené lázně se snižuje rozdíl teplot a plynule se obnovuje *izotermické proudění*. Tento charakter proudění také omezuje možnost vzniku *zkratového proudění* přímo od stínicí trubice k výlevkám mezipánve.

Proudění při *kladném teplotním rozdílu*, kdy ocel proudí podél hladiny mezipánve, může vytvářet podmínky pro lepší separaci *nekovových vměstků* do krycí strusky. Určitým negativním důsledkem velkého *kladného teplotního rozdílu* je zvýšení možnosti *vad* předlitků nebo i množství *průvalů*.



Obr. 3: Charakter proudění lázně v MP znázorněný pomocí vektorů rychlostí ve vertikální rovině procházející výlevkami z MP v případě neizotermických podmínek (situace cca 200 s po změně teploty přiváděné oceli z 1510 na 1540°C, tj. při kladném rozdílu teplot)

Při *záporném teplotním rozdílu* se vztlakové síly v důsledku vyšší hustoty přicházející oceli projevují opačným způsobem než v případě *kladného teplotního rozdílu*. Charakter neizotermického proudění se *záporným teplotním rozdílem* je velmi nevýhodný. Tok se dostává nejkratší cestou k výlevce. Takový průběh vede ke *zkratovému proudění*, kdy proud kopíruje dno mezipánve a vtéká do výlevky. Vlivem vyšší hustoty nemůže chladnější ocel dosáhnout hladiny mezipánve.

Pro flotaci *nekovových vměstků* budou v tomto případě vytvořeny horší podmínky.

4 Matematicko-fyzikální analýza dějů v mezipánvi

Před samotnou *aproximací* vlastností soustavy a jeho *identifikací*, tj. stanovení struktury a zjištění hodnot parametrů matematického aproximačního modelu, je vhodné provést obecnou matematicko-fyzikální analýzu dějů při proudění kapaliny (oceli) v mezipánvi. Na základě výsledků této analýzy lze odhadnout *strukturu* matematického aproximačního modelu soustavy vhodného pro *parametrickou* identifikaci.

4.1 Fyzikální model tepelných a difúzních dějů

Pro nestacionární šíření (vedení) *tepla* a/nebo proces *difúze* v 3D (tepelně a difúzně) *homogenním* tělese (což je tzv. *soustava s rozloženými parametry*) [KUNEŠ & VAVROCH & FRANTA 1989], [KUNEŠ 1989], [JÍCHA 2001], [MORAVČÍK 1984], platí nelineární Fourierova parabolická parciální diferenciální rovnice (PDR) 2. řádu – tzv. *rovnice vedení tepla* (uvedena v nejjednodušším tvaru):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

kde je t – čas [s],
 x, y, z – bod, prostorová souřadnice, místo v tělese [m],
 u – teplota, koncentrace = $u(t, x, y, z)$ v čase t a v bodě $\{x, y, z\}$,
 a – součinitel teplotní vodivosti (tepelná difuzivita) anebo difúzní koeficient (molekulární difuzivita D) [m^2/s].

Uvedená parciální diferenciální rovnice je – pro případ *oceli* – navíc diferenciální rovnicí s *nekonstantním* koeficientem a , který je výrazně nelineárně závislý jak na *teplotě* oceli T , tak i na jejím *chemickém složení* (zvláště na hmotnostním obsahu uhlíku) C , tj. $a = a(T, C)$:

$$a(T, C) = \frac{\lambda(T, C)}{c(T, C) \cdot \rho(T, C)} \quad (2)$$

kde je T – teplota oceli [K],
 C – chemické složení oceli (hm. obsah uhlíku) [hm. %],
 λ – součinitel tepelné vodivosti (oceli) [W/m·K],
 c – měrné teplo (oceli) [J/kg·K],
 ρ – měrná hmotnost, hustota (oceli) [kg/m³].

Obecně je (a platí to i pro MP na ZPO 2 v TŽ, a.s.) mezipánev 3D (tepelně a difúzně) *nehomogenním* tělesem, čímž se situace ještě více komplikuje.

4.2 Způsoby řešení rovnice vedení tepla

Z předchozího rozboru je zřejmé, že rovnice vedení tepla (rovnici procesu difúze) pro podmínky míchání oceli (s parametry závislými na teplotě a chemickém složení oceli) v asymetrické mezipánvi (3D nehomogenní těleso) nemá exaktní *analytické* řešení. Nabízejí se tedy *přibližné*, *aproximativní* řešení:

- Metoda numerického modelování (NM)** – tj. diskretizací rovnice pomocí *numerických metod* (metody sítí: metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí, metoda konečných objemů), přičemž dojde k převedení PDR na soustavu diferenčních rovnic.
- Metoda fyzikálního modelování (FM)** – tj. vytvořením fyzikálního modelu v nějakém měřítku na základě využití *teorie podobnosti* dějů probíhajících ve skutečné mezipánvi a na jejím modelu, přičemž většinou mají děje na díle a modelu stejnou fyzikální podstatu.
- Metoda Laplaceovy (L) transformace**, která převádí parciální a obyčejné diferenciální rovnice na rovnice algebraické, které jsou snadněji a názorněji řešitelné.

Ad C. Pokud dané těleso (v našem případě MP), ve kterém sledujeme přenos (vedení) tepla (*soustava s rozloženými parametry* charakterizovaná teplotou v prostoru), rozdělíme na n jednotlivých dílčích částí (v daném případě na 4 oblasti odpovídající čtyřem výlevkám MP), pak je lze uvažovat jako případy *soustav se soustředěnými parametry* (vliv polohy v prostoru je tím zanedbán, či „odstraněn“). Po úpravě [ČERMÁK & PETERKA & ZÁVORKA 1968], [SOUKUP 1990] pro změny tepelných toků a teplot na vstupu i výstupu tělesa je možné obdržet systém dvou algebraických Laplaceových (přenosových) rovnic o dvou neznámých, což popisuje tzv. *vícerozměrný systém MIMO(2,2)* (tzn. *Multiple Input – Multiple Output* se dvěma vstupy a dvěma výstupy), který lze graficky znázornit ve tvaru *úplného (oboustranného) π -článku* (čtyřpólu, dvojbranu). Příslušné spojité Laplaceovy přenosy v podélných $\{ G_1(s) \}$ a příčných větvích $\{ G_2(s) \}$ a $\{ G_3(s) \}$ se dají získat řešením rovnic systému ve

tvaru *neracionálních* (nelineárních hyperbolických) L-obrazů. Originály (řešení) pro uvedené obrazy nemají uzavřený tvar, ale pouze otevřený tvar nekonečných (konvergentních) mocninných řad, a proto se používá jejich aproximace výběrem pouze několika jejich prvních členů. Takto získané dílčí přenosy systému MIMO(2,2) pak mají tvar odpovídající sériově (za sebou) řazených jednodukapacitních článků (setrvačné soustavy 1. řádu s jednotkovým zesílením – *Sp1j*) o jejich nekonečném počtu [SOUKUP 1990], což odpovídá popisu soustavy s *rozloženými parametry*. Vhodnou aproximací dílčích přenosů je pak setrvačná soustava 1. řádu s dominantním dopravním zpožděním (*Sp1dj*) [ŠULC & VÍTEČKOVÁ, 2004]:

$$G_1(s) = \prod_{k=1}^{\infty} \frac{1}{T_k s + 1} = \frac{1}{T_1 s + 1} \cdot \frac{1}{T_2 s + 1} \cdots \frac{1}{T_k s + 1} \cdots \approx \frac{e^{-T_d s}}{T_a s + 1} \quad (3)$$

kde je $G_1(s)$ – L-přenos v podélné větvi 1D tepelného, či difúzního systému,
 T_k – časové konstanty dílčích soustav 1. řádu [s], $k = 1 \div \infty$,
 T_d – dopravní zpoždění aproximačního přenosu soustavy [s],
 T_a – náhradní (aproximační) časová konstanta soustavy [s].

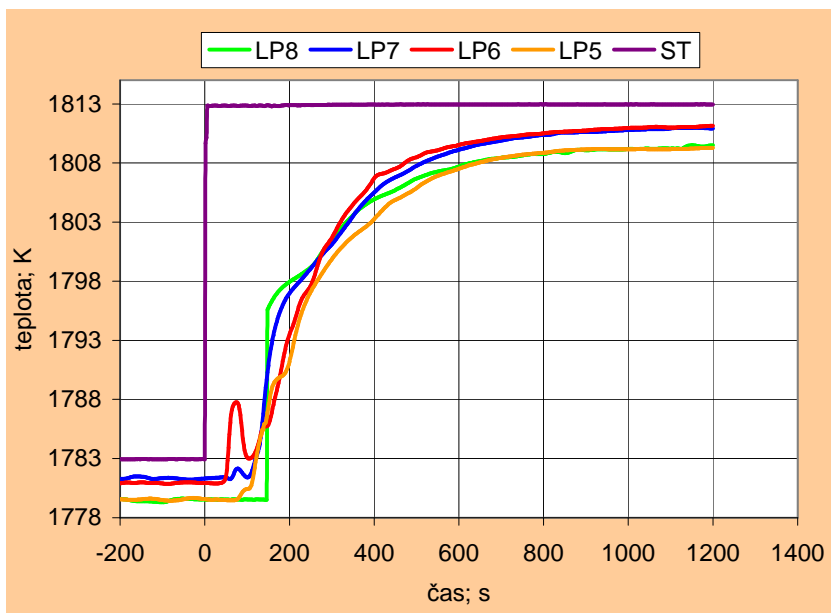
Obecně je řešení parciálních diferenciálních rovnic pomocí L-transformace popsáno např. v [VÍTEČEK 1988], tabulky jsou uvedeny např. v [VÍTEČKOVÁ 1996].

D. **Metoda aproximace časových průběhů veličin modelů** (numerických a fyzikálních) prostřednictvím *statistické nelineární regrese* metodou nejmenších čtverců na vybrané množině vhodných funkcí. Tato empirická metoda je souhrnem, či kombinací předcházejících metod.

5 Numerické modelování procesů v mezipánvi

Simulace přechodových dějů při současné změně *chemického složení* oceli a její *teploty* byla provedena pomocí **CFD** (Computational Fluid Dynamics) **programu Fluent**.

Tyto simulace patří z hlediska provedení výpočtu ve Fluentu mezi náročnější, neboť se musí provádět v režimu *nestacionární úlohy* při řešení příslušných rovnic zachování hmoty, hybnosti, energie a složek.



Obr. 4: Výsledky numerického modelování změny teploty na licích proudech LP5-LP8 po změně teploty oceli na vstupu do MP (ST) pro hmotnost oceli v MP 8 t

Provedení simulací vyžaduje zadání operačních, fyzikálních a okrajových podmínek, mj. i předpokládaných tepelných toků přes stěny mezipánve a hladinu oceli v mezipánvi.

Fyzikální vlastnosti tekuté oceli by měly být zadány v teplotně závislé formě, což v některých případech může být problematické.

Při simulacích byla uvažována čtyřproudá asymetrická MP (MPB) ZPO2 v TŽ, a.s. s hmotností oceli 8 t, 10 t, 12 t a 15 t a licí rychlostí v rozmezí 2,7 až 3,3 m.min⁻¹ pro sochor o rozměru 150 x 150 mm.

Byly modelovány a simulovány *neizotermické* podmínky na vstupu do MP. Při těchto podmínkách byla teplota nově přiváděné oceli stanovena o 30 °C vyšší (kladný gradient) než byla teplota oceli v MP (1510 °C/1540 °C = 1783 K / 1813 K).

Monitorování teplotních změn probíhalo na jednotlivých výstupech z MP. Na **obr.4** je ukázka získaných přechodových charakteristik znázorňujících průběh změn *teploty* na jednotlivých výlevkách (licích prouděch) MP (LP5 – LP8) po změně teploty oceli na vstupu do MP (ST – stínicí trubice) pro hmotnost oceli v MP 8 t.

Nižší teploty na výstupech z MP oproti teplotě vstupující lázně do MP (z LP) jsou zapříčiněny *tepelnými ztrátami* lázně v MP, které byly ve Fluentu definovány příslušnými tepelnými toky přes stěny MP a hladinu lázně v MP. Jak je zřejmé z **obr.4**, pokles teplot je vyšší u krajních licích proudů č.5 (LP5) a č.8 (LP8) - až o 4°C, u vnitřních licích proudů č.6 (LP6) a č.7 (LP7) byl zjištěn pokles cca o 2°C.

6 Fyzikální modelování procesů v mezipánvi

V dalším je popsána metoda fyzikálního modelování, samotný fyzikální model, jeho použití, jako i způsob měření a sběru veličin tohoto modelu.

6.1 Popis metody a fyzikálního modelu

Přechodové děje v mezipánvi lze rovněž simulovat použitím *fyzikálního* modelování (FM), které je založeno na využití *teorie podobnosti* dějů probíhajících ve skutečné mezipánvi a na jejím modelu, přičemž většinou mají děje na díle a modelu stejnou fyzikální podstatu.

Metoda fyzikálního modelování byla již dříve použita při *optimalizaci charakteru proudění* v mezipánvi ZPO2 v TŽ, a.s. Na základě výsledků získaných při tomto výzkumu byla mj. navržena *konfigurace vnitřního uspořádání mezipánve*, která je v současné době provozně využívána

s ověřeným pozitivním dopadem na provozní parametry odlévání oceli, zejména počet průvalů a stabilitu odlévání.

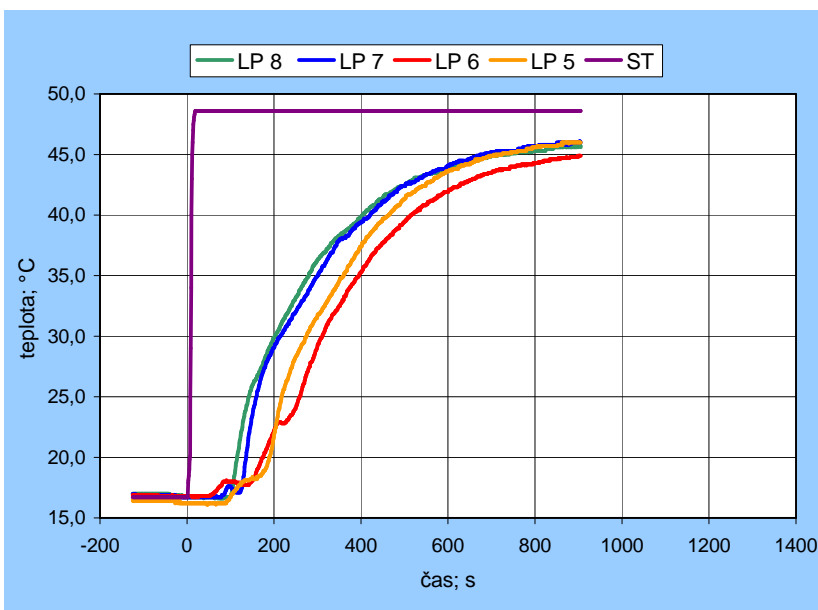


Obr. 5: Pohled na fyzikální model MP s obarvenou vodou

Pro fyzikální modelování byl zhotoven průhledný model mezipánve z organického skla v délkovém měřítku $M_l = 1:3$ ke skutečné provozní mezipánvi "B" (MPB - licí proudy č.5 až č.8) používané na ZPO č.2 v TŽ, a.s. Sestava modelu umožňovala

provést okamžitou změnu koncentrace se současnou změnou teploty vtékající lázně do mezipánve pomocí systému kulových kohoutů. Namísto oceli je v modelu použita (obarvená) voda – **obr.5**.

I v tomto případě byly modelovány a simulovány *neizotermické* podmínky na vstupu do MP. Při těchto podmínkách byla teplota nově přiváděné „oceli“ stanovena o 35 °C vyšší (kladný gradient) než byla teplota „oceli“ v mezipánvi (15°C/50°C). Tento nárůst odpovídal podmínkám simulace pomocí numerického modelování s dodržením podobnosti generovaných vztakových sil v lázni tekuté oceli a vody. Monitorování teplotních změn probíhalo na jednotlivých výstupech z MP.



Obr. 6: Výsledky fyzikálního modelování změn teploty na licích proudcích LP5-LP8 po změně teploty oceli na vstupu do MP (ST) pro hmotnost oceli odpovídající 8 t v reálné MP

Na **obr.6** je ukázka přechodových charakteristik z FM znázorňující průběh změn teploty na jednotlivých výlevkách (licích proudcích: LP5 – LP8) modelu MP po změně teploty „oceli“ na jejím vstupu (ST – stínící trubice).

6.2 Měření a sběr veličin fyzikálního modelu

Průtok kapaliny z pánve do mezipánve byl měřen pomocí přesného *induktivního průtokoměru*. Ve výtokových uzlech mezipánve a rovněž na vstupu do mezipánve byly umístěny *kombinované vodivostně-teplotní sondy* s platinovou elektrodou pro měření vodivosti a s teplotním Ni odporovým senzorem pro měření teplot v rozsahu 0 až 60°C. Tyto sondy kontinuálně a synchronně snímaly vodivost a teplotu modelového roztoku po provedené změně, v měřící ústředně pak byla provedena kompenzace vodivosti na referenční teplotu a přepočteno na skutečnou koncentraci značkovací látky.

Monitorování probíhalo v prostředí SW *ControlWeb*. Získané přechodové charakteristiky pak sloužily pro další hodnocení jednotlivých parametrů proudění.

7 Aproximace a identifikace přechodových dějů v mezipánvi

Pokud uvažujeme na vstupu jednotkový Heavisideův skok změny *koncentrace* (chemických prvků) nebo *teploty* oceli (v technologické praxi se často vyskytuje obojí současně), pak lze úlohu nalezení řešení rovnice vedení tepla definovat jako úlohu deterministické *identifikace* soustavy pomocí vyhodnocování *přechodových charakteristik* [SOUKUP 1990]. 3D soustava MP je zde uvažována jako *dekomponovaná* soustava čtyř 1D podsystémů vázaných na jednotlivé výlevky MP (licí proudy).

Pro *aproximaci přechodových charakteristik* byla použita výše uvedená *empirická kombinovaná metoda*. Tato metoda vychází z přechodových charakteristik veličin (koncentrace, teplota) získaných z NM a/nebo FM.

Strukturální identifikace spočívá v nalezení množiny (tvarově) vhodných funkcí. *Parametrická identifikace* stanovuje parametry aproximačních funkcí pomocí statistické nelineární regrese metodou nejmenších čtverců.

Pro účely řešení problematiky identifikace bylo otestováno *asi 30 aproximačních funkcí*, přičemž pouze 5 z nich vyhovovalo svou dostatečnou přesností aproximace a tyto funkce byly dále používány.

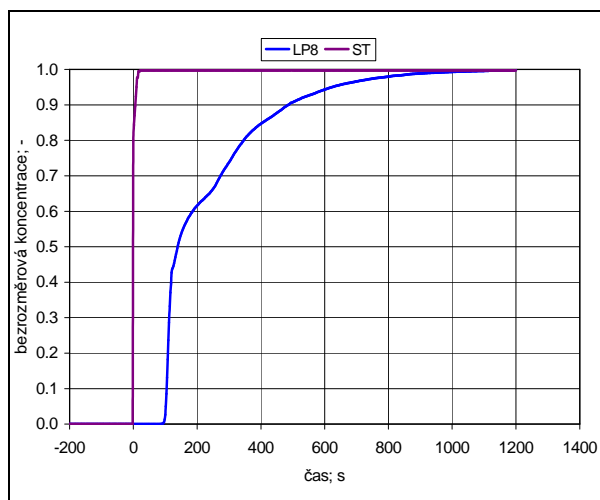
7.1 Netypický aproximační a identifikační model

Při analýze průběhů přechodových charakteristik *teplot* a *koncentrací* chemických prvků oceli z numerického a rovněž z fyzikálního modelu se však v některých případech, a to:

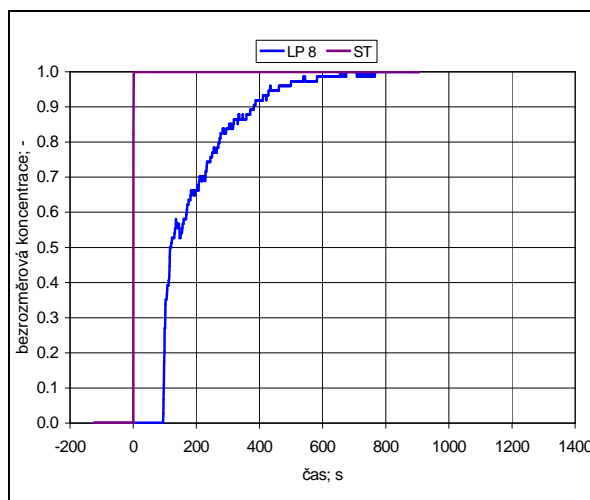
- zejména u *krajních licích proudců*

- a při *neizotermickém* proudění,

vyskytovala určitá *anomálie ve formě nespojitosti* (zlomu) v počáteční části přechodového jevu (po odeznění dopravního zpoždění) – viz **obr.7a,b**, znázorňující přechodové charakteristiky (PCH) bezrozměrové koncentrace na krajním licím proudě č.8 (LP8) získané z numerického (vlevo) a fyzikálního (vpravo) modelu za *neizotermických* podmínek pro hmotnost oceli 8 t v MP:



Obr. 7a: PCH - numerický model



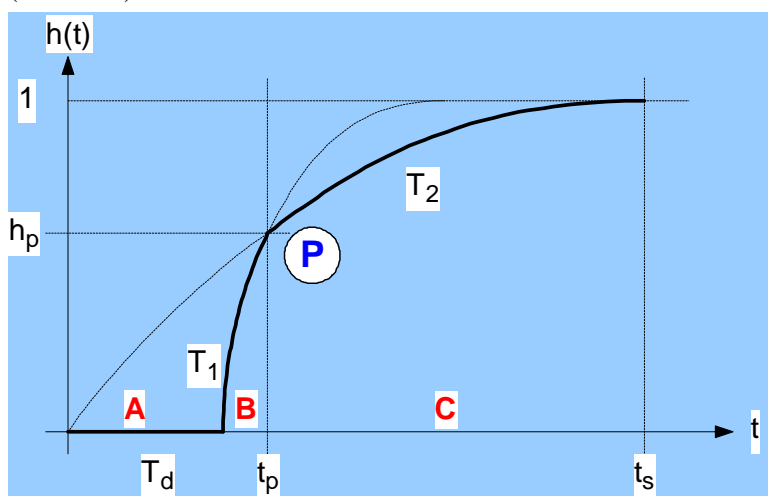
Obr. 7b: PCH - fyzikální model

Protože vybrané aproximační funkce, včetně postupu prezentovaného v [PIEPRZYCA & SOSNOWSKI & KUDLIŃSKI 2003], nedokázaly tuto anomálii postihnout, vyvstala potřeba sestavit další vhodný matematický identifikační (aproximační) model.

Autory tohoto příspěvku byl navržen originální *netypický*, tzv. *dvoustupňový, překryvný, přepínací, kombinovaný, paralelně–sériový, nespojitý* (v derivaci, ale ne v samotné přechodové funkci) *aproximační model* $NSp2dz$ (*n*espojitý model typu *s*oustava *p*roporcionální *ř*ádu s *d*opravním *z*požděním), který umožňuje popsat:

- *dopravní zpoždění* (prodlévku) v počáteční fázi přechodového děje,
- *rychlý počáteční nárůst* koncentrace, či teploty po odeznění dopravního zpoždění,
- *další navazující pozvolný nárůst* (obou) veličin.

Představa vychází z hypotetického modelu MP podle [MICHALEK 2001], obsahujícího *tři* části (viz **obr.8**):



- kde po odeznění *dopravního zpoždění* T_d (způsobeného „pístovým“ tokem oceli),

Obr. 8: Přechodová charakteristika překryvného aproximačního modelu

- dochází na krátkou dobu ke *strmému nárůstu koncentrace* (způsobeného „mrtvým“ objemem oceli, resp. zmenšením celkového objemu MP o mrtvý objem, malá časová konstanta T_1 – čím větší je mrtvý objem, tím menší je časová konstanta),
- který je posléze překryt „zkratovým prouděním“ (působícím od počátku změny koncentrace jako úplné promíchávání celého objemu MP, velká časová konstanta T_2).

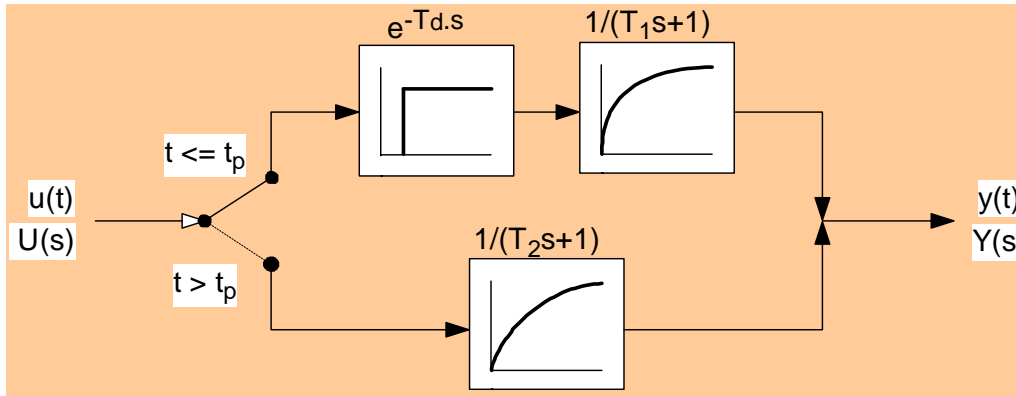
Dalším a jiným vysvětlením fungování modelu by mohla být interakce *přímého* a od stěny odraženého *zpětného*, reverzního toku, či toku *spodního* a *horního* (zvláště v případě neizotermického proudění).

Matematický tvar modelu vychází z průběhu přechodové funkce (tj. z přechodové charakteristiky) znázorněné na **obr.8**. Matematický model přechodové funkce obsahuje 3 časové konstanty T_d , T_1 , T_2 a má tři na sebe navazující části A, B, C (oddělené dopravním zpožděním T_d a *dobou přepnutí*, či překrytí t_p), ve kterých platí následující dílčí podmínky a vztahy – získané např. pomocí literatury [VÍTEČEK 1988], [VÍTEČKOVÁ 1996]:

$$\left\{ \begin{array}{ll} A: t \leq T_d & h_A(t) = 0 \\ B: T_d < t \leq t_p & h_B(t) = 1 - \exp(-(t - T_d)/T_1) \\ C: t > t_p & h_C(t) = 1 - \exp(-t/T_2) \end{array} \right\} \quad (4)$$

Na **obr.9** je přehledné schematické znázornění (blokové schéma) překryvného modelu ve tvaru *paralelně-sériového zapojení* elementárních dynamických členů, umožňující lépe pochopit jeho kombinovanou funkci:

- horní větev - realizuje části A a B, tj. objem s „pístovým“ tokem oceli a „mrtvý“ objem,
- dolní větev - část C přechodové funkce, tj. objem s intenzivním mícháním:



Obr. 9: Schematické znázornění překryvného aproximačního modelu

V bodě přechodu (přepnutí, překrytí) P musí být zachována podmínka spojitosti přechodové funkce (to však neplatí pro její derivaci, čili impulsní funkci, která je v tomto bodě nespojitá) a z ní lze dostat závislost doby přepnutí t_p na všech třech časových konstantách T_d , T_1 a T_2 :

$$P: h_B(t = t_p) = h_C(t = t_p) \Rightarrow 1 - \exp(-(t - T_d)/T_1) = 1 - \exp(-t/T_2), \quad (5)$$

$$\Rightarrow t_p = T_d \cdot \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (6)$$

Z uvedených vztahů a předchozích obrázků je zřejmé, že:

- nový netypický aproximační model je vlastně *kombinací* (složením, překrytím) dvou jednoduchých modelů typu proporcionálních setrvačných soustav 1. řádu (*Sp1*) s/bez dopravního zpoždění (*dz*) a jednotkovým zesílením (*j*), tj. *Sp1dzj*(T_d , T_1) a *Sp1j*(T_2),
- netypický model je *univerzální a flexibilní* pro různé licí proudy a koncentraci i teplotu (v případě neizotermického proudění), přičemž má následující vlastnosti:
 - pro fyzikální realizovatelnost musí platit relace $T_2 \geq T_1$,
 - pro $T_2 > T_1$ je $t_p > T_d$,
 - pro $T_1 \rightarrow 0$ platí $t_p \rightarrow T_d$, pro $T_1 = 0$ je $t_p = T_d$ a uplatní se pouze časová konstanta T_2 , čili překryvný model má vlastně degenerovaný charakter *Sp1dzj*(T_d , T_2),
 - pro $T_1 \rightarrow T_2$ platí $t_p \rightarrow \infty$ a pokud $t_p > t_s$ (doba simulace), pak se uplatní pouze časová konstanta T_1 , čili překryvný model má vlastně degenerovaný charakter *Sp1dzj*(T_d , T_1),

- překryvný model popisuje i případy, kdy $T_d \rightarrow 0$ a pak přechází na modely $Sp2j(T_1, T_2)$ nebo $Sp1j(T_1)$, či $Sp1j(T_2)$.

7.2 Realizace aproximačního modelu v prostředí programu MATLAB

V programu MATLAB (verze 6.1) byly vytvořeny 2 programové soubory (m-soubory typu skripty):

- MPk.m (mezipánev – koncentrace),
- MPt.m (mezipánev – teplota : používaná u neizotermických dějů),
pro *nelineární aproximaci a regresi* přechodových dějů změny *normalizované koncentrace* chemických prvků anebo *teploty* oceli v MP. Oba skripty volají další pomocné m-soubory typu funkce:

- *cti_znaky.m*: načtení datových souborů po znacích a jejich přepis do standardního pomocného datového souboru *data.txt*,
- *pSp1dzj.m*: přechodová funkce setrvačné soustavy 1. řádu s dopravním zpožděním a jednotkovým zesílením *Sp1dzj*,
- *pSp2dzj.m*: přechodová funkce setrvačné soustavy 2. řádu -"-,
- *pNSp2dzj.m*: přechodová funkce paralelně-sériové soustavy -"-,
- *mmf.m*: růstová funkce MMF (autorů Morgan-Mercer-Floding – viz [MELOUN & MILITKÝ 2002]).

Program MPx.m umožňuje realizaci následujících *činností*:

1. *Načtení* textových (ASCII) souborů *.dat (první sloupec relativní čas, další sloupce normalizovaná koncentrace anebo teplota jednotlivých licích proudů),
2. *Zobrazení* časových průběhů koncentrace anebo teploty,
3. *Odhad parametrů* (pomocí metody postupné integrace - MPI a nelineární metody nejmenších čtverců - NMNČ) následujících aproximačních (empirických, či kybernetických *fyzikálně-adekvátních* a *matematických*) modelů přechodových jevů podle výběru:
 - fyzikálně-adekvátní modely (přechodové funkce soustav):
 - Sp1dzj pomocí MPI ve variantě P.Klána [KLÁN 2000] (se zobecněním autora příspěvku pro nekonstantní periodu vzorkování),
 - Sp1dzj pomocí NMNČ,
 - Sp2dzj pomocí NMNČ,
 - NSp2dzj pomocí NMNČ (v příspěvku prezentovaný netypický model),
 - matematický model:
 - růstová funkce MMF pomocí NMNČ.
4. *Výpočet* ukazatelů kvality aproximace a regrese – součtu čtverců reziduí (SSE) a koeficientu determinace R^2 ,
5. *Výpočet* časových charakteristik směsné oblasti pro rozlišovací meze bezrozměrové koncentrace,
6. *Zobrazení* časových průběhů koncentrace anebo teploty, jako i vybraných aproximačních funkcí – ve smyslu *přechodových* charakteristik, *impulsních* charakteristik – tzv. charakteristik RTD (Residence Time Distribution) a *reziduí* aproximace, či regrese,
7. *Uložení* výsledků aproximací do dvou druhů souborů:
 - *číselné* výsledky a komentáře do průběžně doplňovaných *textových* souborů,
 - *grafické* výsledky, tj. zobrazení přechodové i impulsní charakteristiky a reziduí do *grafických* souborů (typu *emf* - Enhanced Windows Metafile, které mají dobré rozlišení, vhodnou velikost písma a přitom úspornou velikost souborů. Jednoduchou změnou ve zdrojovém textu lze však grafy ukládat i do souborů typu *bmp* (bitmapový soubor) a komprimovaných formátů: *png* (Portable Network Graphics), *jpg* a *tiff*).

V příspěvku popisovaná netypická aproximační funkce je v programu definovaná jako *piecewise* (po částech spojitá) *nelineární funkce*, která má charakter neseeparabilního nelineárního kybernetického modelu – viz rovnice (4):

$$y = \begin{cases} (x > T_d & \& \quad x < t_p = T_d \cdot T_2 / (T_2 - T_1)) \cdot (1 - \exp(-(x - T_d) / T_1)) \\ (x > t_p = T_d \cdot T_2 / (T_2 - T_1)) \cdot (1 - \exp(-x / T_2)) \end{cases} ;$$

Pro NMNČ je použita m-funkce *lsqcurvefit.m* z Optimization Toolboxu (vhodná právě pro nelineární aproximaci reálných dat, tzv. data-fitting metoda).

Pozn.: Případně může být použita i funkce *nlinfit.m* ze Statistical Toolboxu, která je však slabší a omezenější s ohledem na konvergenci a regresní diagnostiku. Běžně a klasicky používaná funkce *fminsearch.m* má nejmenší možnosti a největší omezení, takže je z uvedených funkcí nejslabší.

Při odhadu parametrů pomocí funkce *lsqcurvefit* je zobrazován a ukládán také výsledek aproximačního procesu (včetně uvedení počtu iterací, volání funkce a použité numerické metody ve strukturované proměnné *output*) ve trojstavové proměnné (*exitflag*): > 0 : výpočet konvergoval, = 0 : překročen maximální počet volání funkce, < 0 : výpočet nekonvergoval. Ve funkci *lsqcurvefit* je možné pomocí funkce *optimset* nastavit 2 derivační algoritmy, či metody NMNČ: *Gauss-Newtonovou* (default) a *Levenberg-Marquardtovou*. Ve vyšších verzích MATLABu je možné navíc použít velice efektivní metodu *dog-leg* (autor Powell, jako i metodu *double-dog-leg* autorů Dennis & Mei – bližší popis uvedených metod je uveden např. v [MELOUN & MILITKÝ 1994]).

V případě extrémně dlouhého výpočtu, špatných odhadů anebo vyčerpání počtu volání funkce a počtu iterací je možné změnit v souboru MPx.m počáteční odhady a oboustranné omezení parametrů. Další možnosti a doporučení nastavení jsou uvedeny v záhlaví souboru MPx.m (jsou zobrazeny i po zadání základního příkazu *help MPx*).

7.3 Výsledky identifikace netypickým modelem

Netypický aproximační model byl aplikován na *izotermické* a *neizotermické* procesy proudění oceli v MP pro data získaná z numerického modelu v CFD programu Fluent a z fyzikálního modelu pro hmotnosti oceli v MP 8, 10, 12 a 15 t.

Vzhledem ke značnému rozsahu zpracovaných dat jsou v rámci tohoto příspěvku prezentovány pouze výsledky z krajního licího proudu č.8 (LP8), kde v důsledku jeho blízkosti u krajní stěny MP a největší vzdálenosti od vtoku oceli z licí pánve, dochází k nejvýraznější kombinaci jednotlivých typů proudění a tím k nevhodnější aplikaci netypického modelu.

A. Numerický model

Byly simulovány skokové změny koncentrace na vstupu do mezipánve při izotermických a neizotermických podmínkách (tzn. se současným nárůstem teploty oceli z 1783 na 1813 K) při hmotnostech oceli v mezipánvi 8, 10, 12 a 15 t. V **tab.1** jsou uvedeny výsledky provedené aproximace pro licí proud č.8 (LP8) pro *izotermické* a *neizotermické* podmínky.

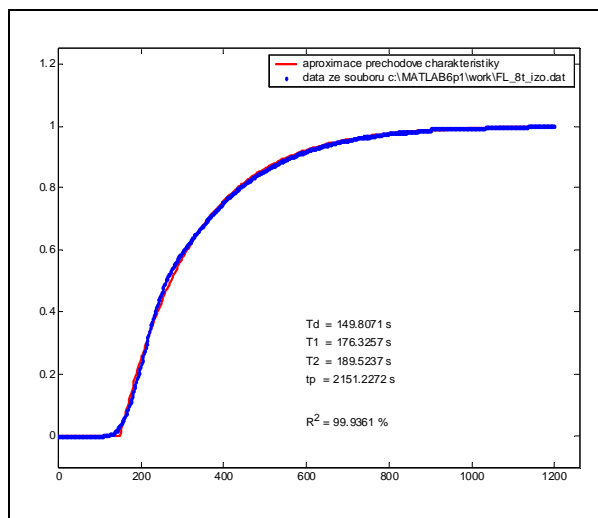
Tab.1: VÝSLEDKY APROXIMACE PŘECHODOVÝCH CHARAKTERISTIK KONCENTRACE Z NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ NETYPICKÝM MODELEM PRO LICÍ PROUD Č.8

Podmínky	Hmotnost oceli v MP [t]	Dopravní zpoždění T_d [s]	Časová konstanta T_1 [s]	Časová konstanta T_2 [s]	Koeficient determinace R^2 [%]
izotermické	8	150	176	189	99,94
	10	92	197	229	99,99
	12	106	175	276	99,98
	15	126	347	407	99,96
neizotermické	8	101	34	213	99,91
	10	74	212	249	99,72
	12	91	251	253	99,82
	15	98	138	362	99,82

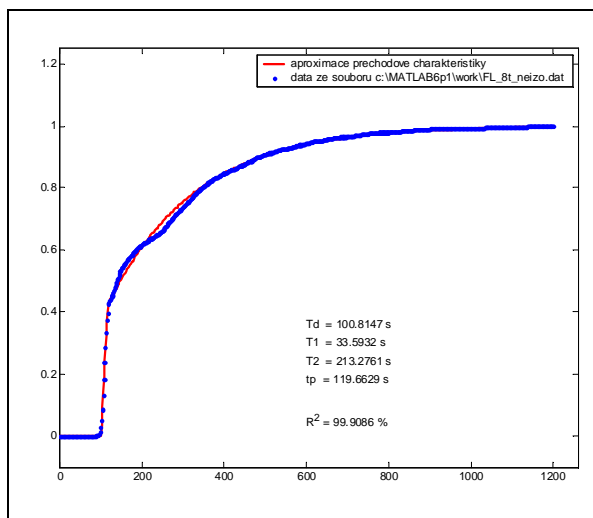
Výsledky aproximačních analýz uvedené v **tab.1** dokumentují mj. výrazný vliv *neizotermických* podmínek v lázni mezipánve, při kterých se v důsledku vznikajících vztlakových sil vytváří tzv. *reverzní* charakter proudění. Tento charakter proudění ve srovnání s izotermickými podmínkami vede k podstatnému snížení hodnot retenčních časů zejména na výlevece č.8, čemuž odpovídá i příslušný

pokles hodnot dopravního zpoždění T_d .

Průběhy příslušných přechodových charakteristik pro hmotnost lázně v MP 8 t a výsledky jejich aproximací jsou uvedeny pro oba druhy podmínek na **obr.10a,b**.



Obr. 10a: NM - izotermické podmínky



Obr.10b: NM - neizotermické podmínky

Oba výše uvedené grafy dokumentují, že vyvinutý netypický aproximační model „je schopen rozpoznat a popsat“ nejen průběh jednoduchých přechodových charakteristik, ale rovněž i složitější případy s rychlým nárůstem koncentrace po odeznění dopravního zpoždění a s jejím dalším navazujícím pozvolným vzestupem. Dosažené hodnoty koeficientů determinace byly ve všech případech (pro všechny licí proudy) větší než 99,7 %, což svědčí o vhodnosti tohoto modelu pro popis uvedených přechodových charakteristik.

B. Fyzikální model

Fyzikální modelování bylo uskutečněno pro podmínky odpovídající hmotnosti oceli v MP 8, 12 a 15 t. Na vstupu do fyzikálního modelu mezipánve byly provedeny skokové změny koncentrace při izotermických a rovněž při neizotermických podmínkách, tzn. se současným nárůstem teploty modelového roztoku z 15 na 50 °C, který odpovídal podmínkám simulace pomocí numerického modelování s dodržением podobnosti generovaných vztakových sil v lázni tekuté oceli a vody.

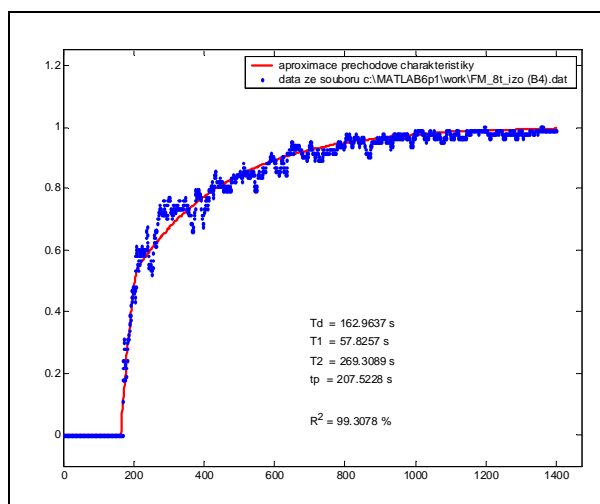
Tab.2: VÝSLEDKY APROXIMACE PŘECHODOVÝCH CHARAKTERISTIK KONCENTRACE Z FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ NETYPICKÝM MODELEM PRO LICÍ PROUD Č.8

Podmínky	Hmotnost oceli v MP [t]	Dopravní zpoždění T_d [s]	Časová konstanta T_1 [s]	Časová konstanta T_2 [s]	Koeficient determinace R^2 [%]
izotermické	8	162	57	269	99,31
	12	116	34	344	99,10
	15	113	66	338	98,77
neizotermické	8	92	32	170	99,73
	12	94	5	173	99,72
	15	104	22	276	96,14

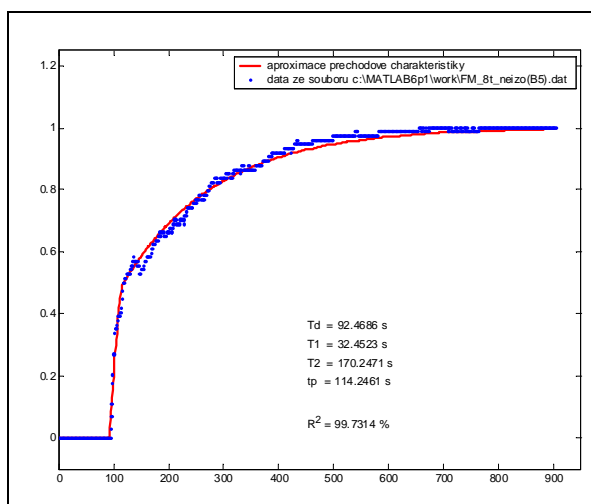
V **tab.2** jsou uvedeny výsledky provedené aproximace pro licí proud č.8 pro *izotermické* a *neizotermické* podmínky.

Rovněž i v případě fyzikálního modelování byl pozorován vliv *neizotermických* podmínek proudění na vznik *reverzního* proudění a s tím spojené snížení hodnot dopravního zpoždění T_d , které bylo vzhledem ke konfiguraci mezipánve nejvýraznější u licího proudu č.8.

Ukázka průběhu příslušných přechodových charakteristik pro hmotnost lázně v mezipánvi 8 t a jejich aproximace pomocí netypického modelu je uvedena na **obr.11a,b**.



Obr.11a: FM - izotermické podmínky



Obr.11b: FM - neizotermické podmínky

Podobně, jako v případě aproximace výsledků z NM, bylo ve všech případech (pro všechny licí proudy) dosaženo vysokých hodnot koeficientů determinace $R^2 > 96 \%$, což opět svědčí o vhodnosti vyvinutého aproximačního modelu i pro výsledky z FM.

8 Závěr

Přechodové děje v mezipánvi zařízení plynulého odlévání oceli jsou spojeny zejména s technologií sekvenčního odlévání oceli a vznikají např. při výměně licí pánve, ve které je ocel s odlišným *chemickým složením*, resp. i s odlišnou *teplotou* než má ocel v mezipánvi.

Složení oceli a její teplota na jednotlivých výstupech z mezipánve po skokové změně (prakticky ve tvaru Heavisideova skoku) na vstupu má tvar *přechodové funkce*. V příspěvku jsou prezentovány možnosti *identifikace* chování proudění oceli pomocí *aproximace přechodových charakteristik*, které byly získány při jejich *numerickém a fyzikálním modelování* pro podmínky ZPO č.2 v TŽ, a.s.

Strukturální identifikace dekomponovaných částí mezipánve (vtok - výtok, licí proud) vycházela z přenosu odvozeného na základě *Laplaceovy transformace* řešení tzv. rovnice vedení tepla a difúze. Pro *parametrickou* identifikaci byla použita *metoda statistické nelineární regrese*.

Pro lepší aproximaci přechodových charakteristik byl navržen původní tzv. *netypický model* (dvoustupňový překryvný model), který respektoval a podchycoval vyskytující se nespojitost v derivaci na počátku přechodového děje.

Dosažené výsledky z aproximace přechodových charakteristik byly použity pro *implementaci* provozního SW *modelu řízení kvality a označování směsných předlitků* na ZPO č.2 v TŽ, a.s. – viz [GRYC & MICHALEK & MORÁVKA aj. 2005].

V současné době je pozornost zaměřena na simulaci provozních stavů, při kterých jsou z různých příčin *zastaveny* některé licí proudy a rovněž na režim tzv. *přepřehování* mezipánve s cílem získat relevantní informace o změně rozsahu směšné oblasti za těchto okrajových podmínek.

Literatura

- [1] BROŽ, L. aj. 1988. *Hutnictví železa*. 1. vyd. Praha : SNTL/ALFA, 1988. 464 s.
- [2] ČERMÁK, J. & PETERKA, V. & ZÁVORKA, J. 1968. *Dynamika regulovaných soustav*. 1.vyd. Praha: Academia, 1968. 437 s.
- [3] GRYC, K. & MICHALEK, K. & MORÁVKA, J. aj. 2005. Modelování vzniku směšné oblasti a možnosti implementace výsledků do systému řízení ZPO. In Sborník přednášek 21. celostátní konference se zahraniční účastí *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli*, Rožnov pod Radhoštěm. Ostrava : Tanger a MARQ, 5.-6.4.2005, s. 105-110. ISBN 80-86840-08-5.
- [4] JÍCHA, M. 2001. *Přenos tepla a látky*. 1.vyd. skriptum FSI VUT Brno : CERM, 2001. 160 s.

- [5] KLÁN, P. 2000. *Moderní metody nastavení PID regulátorů. Část I: Procesy s přechodovou charakteristikou typu „S”*. Automa, 2000, č.9, s.55-57.
- [6] KUNEŠ, J. & VAVROCH, O. & FRANTA, V. 1989. *Základy modelování*. 1.vyd. Praha : SNTL, 1989. 264 s.
- [7] KUNEŠ, J. 1989. *Modelování tepelných procesů*. 1.vyd. Praha : SNTL, 1989. 424 s.
- [8] MELOUN, M. & MILITKÝ, J. 1994. *Statistické zpracování experimentálních dat*. 1. vyd. Praha : PLUS, 1994. 839 s. ISBN 80-85297-56-6.
- [9] MELOUN, M. & MILITKÝ, J. 2002. *Kompendium statistického zpracování dat. Metody a řešené úlohy včetně CD*. 1. vyd. Praha : Academia, 2002. 764 s. ISBN 80-200-1008-4.
- [10] MICHALEK, K. 2001. *Využití fyzikálního a numerického modelování pro optimalizaci metalurgických procesů*. I. vyd. Ostrava : katedra metalurgie, FMMI, VŠB-TU Ostrava, 2001. 125 s. ISBN 80-7078-861-5.
- [11] MICHALEK, K. & VLK, V. & PINDOR, J. 2001. Modelování proudění lázně v mezipánvi za neizotermických podmínek. In sborník přednášek 17. celostátní konference *Teorie a praxe výroby a zpracování oceli*. Rožnov pod Radhoštěm, 2001. s. 204-210.
- [12] MICHALEK, K. & PINDOR, J. & STRÁSÁK, P. 2001. Numerická simulace rozsahu směsné oblasti v plynule odlévané oceli. *Acta Metallurgica Slovaca*, 7, 2001, s. 419-424.
- [13] MORAVČÍK, J. 1984. *Matematika – vybrané části III (Špeciálne funkcie, rovnice matematickej fyziky)*. 1.vyd. skriptum PEDAS VŠDS Žilina : Alfa, 1984. 143 s.
- [14] PIEPRZYCA, J. & SOSNOWSKI, R. & KUDLIŃSKI, Z. 2003. Hybrid Modelling of a Transition Zone in the tundish / Pony Ladle in Continuous Casting. In sborník přednášek 5. mezinárodní metalurgické konference *Continuous Casting of Billets and Modelling of Steelmaking Processes*. Třinec, 21.-23.10.2003. s.311-320. ISBN 80-239-0861-8.
- [15] SOUKUP, J. 1990. *Identifikace soustav*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1990. 160 s.
- [16] ŠULC, B. & VÍTEČKOVÁ, M. 2004. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.
- [17] VÍTEČEK, A. 1988. *Matematické metody automatického řízení (Transformace L a Z)*. Ostrava: skripta FSE VŠB Ostrava, 1988. 156 s.
- [18] VÍTEČKOVÁ, M. 1996. *L- a Z-transformace*. 1. upr. vyd. Ostrava : SsVTSaP/KAKI/Katedra ATR VŠB-TU, 1996. 86 s. ISBN 80-02-01050-7.

Ing. Jan Morávka, Ph.D.,

739 61 Třinec – Staré město, Frýdecká 126, e-mail: jan.moravka@tzi.trz.cz, tel.: 558 53 2192

Prof. Ing. Karel Michalek, CSc.,

708 33 Ostrava – Poruba, 17. listopadu 15, e-mail: karel.michalek@vsb.cz, tel.: 59 732 5213