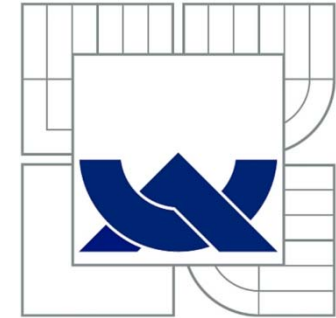




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

 **ENERGETICKÝ ÚSTAV**
Odbor termomechaniky a techniky prostředí



OPTIMALIZACE BRAMOVÉHO PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI ZA POMOCI NUMERICKÉHO MODELU TEPLOTNÍHO POLE

25. 09. 2012

Brno, Česká Republika

Autor práce:

Ing. Tomáš MAUDER

Školitel:

prof. Ing. František KAVIČKA, CSc.

Školitel specialista:

doc. Ing. Josef ŠTĚTINA, Ph.D.

OBSAH

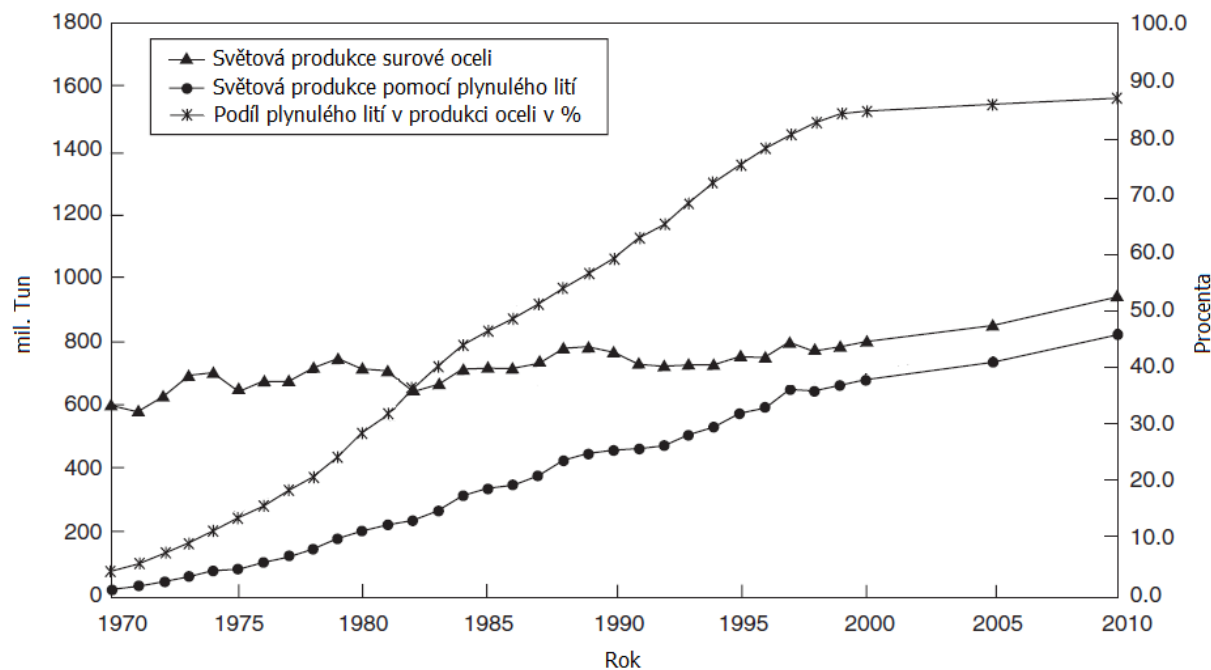
- ❖ Motivace
- ❖ Princip a popis plynulého odlévání oceli
- ❖ Numerický model teplotního pole a jeho verifikace
- ❖ Optimalizace provozu plynulého lití
- ❖ Výsledky

MOTIVACE

- ❖ Zvýšení kvality litých bram při zachování vysoké produktivity výroby
- ❖ Eliminace vad (trhliny, praskliny)
- ❖ Optimální řízení procesu
- ❖ Optimální řízení v případě nestandardních situací
- ❖ Návrh úprav licí tratě

PLYNULÉ ODLÉVÁNÍ OCELI

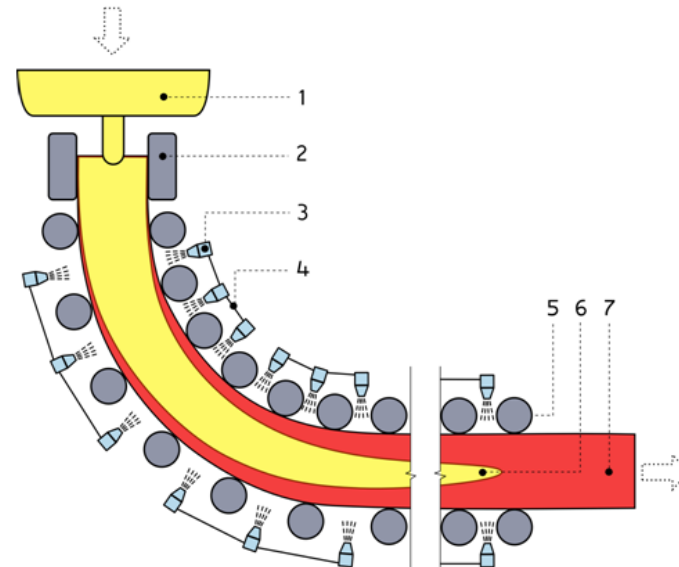
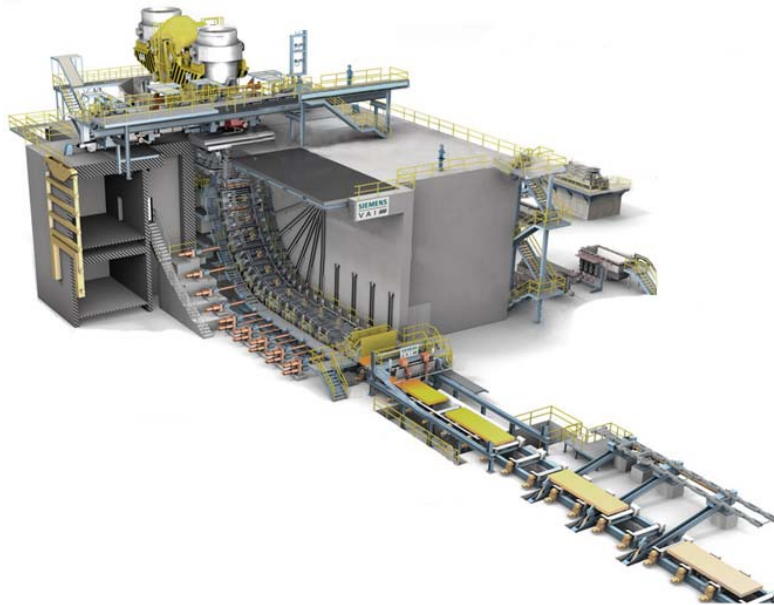
- ❖ První zařízení 1920, industrializace 1947
- ❖ Podíl produkce oceli na ZPO dnes cca 97%
- ❖ Zvýšení produktivity a kvality oceli
- ❖ Možnost odlévat speciální druhy ocelí



BRAMOVÉ ZPO

- ❖ Polotovar obdélníkového typu (1530 x 250)
- ❖ Výroba plechů
- ❖ 3 chladící zóny

- 1 - mezipánev 2 – krystalizátor 3 - tryska
- 4 – chladící okruh 5 – vodící válec
- 6 – tekutý kov 7 – ztuhlý kov



NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

✧ Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \nabla [\lambda(T)\nabla T] + \mathbf{v}\nabla [\rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \nabla [\lambda(T)\nabla T] + \mathbf{v}\nabla [\rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T)\Delta(T) + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

Fourierova-Kirchhoffova rovnice

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \nabla [\lambda(T)\nabla T] + \mathbf{v}\nabla [\rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T)\Delta(T) + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

$$\dot{Q} = \rho(T)L\frac{\partial f_s}{\partial \tau} \quad f_s = \frac{T_L - T}{T_L - T_S} \quad f_s = 1 - \left(\frac{T - T_S}{T_L - T_S}\right)^2$$

NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

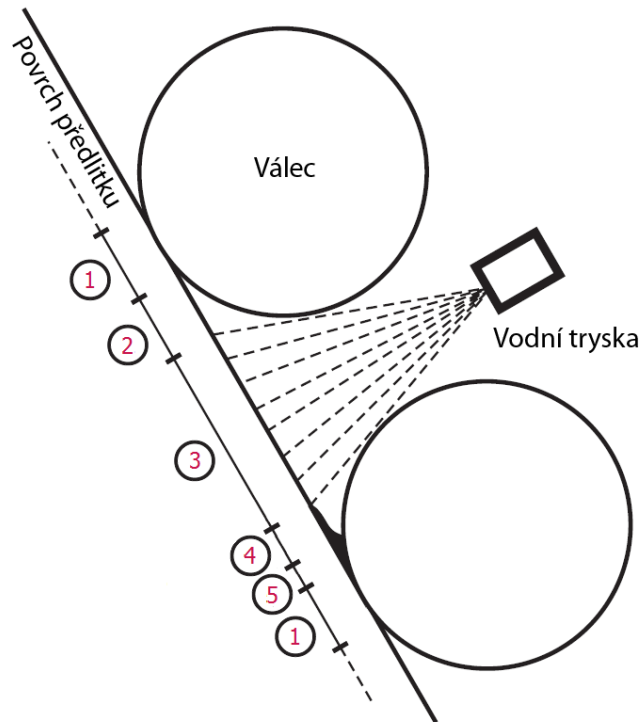
◊ Podmínka počáteční a podmínky okrajové

$$T(x, y, z, \tau = 0) = T_p(x, y, z)$$

$T = T_{casting}$	hladina oceli (na začátku ZPO)
$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$	rovina symetrie a v místě konce ZPO
$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \dot{q}$	v krystalizátoru a místě styku předlitku s válci
$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = htc(T_{surf} - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon (T_{surf}^4 - T_{\infty}^4)$	v sekundární a terciární zóně

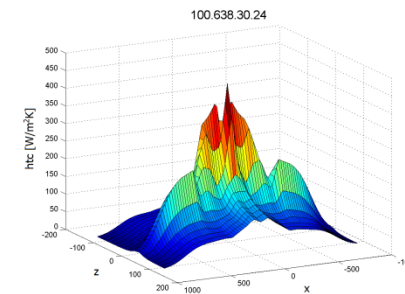
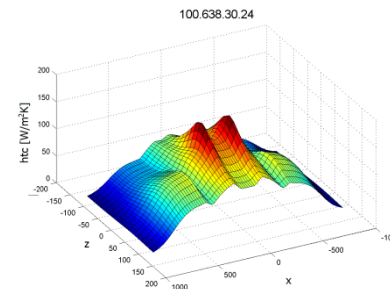
NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

❖ Oblast sekundárního a terciárního chlazení



$$\dot{q} = \frac{\pi \frac{l}{2} d (htc_{rol} (T_{rol} - T_{\infty}) + \varepsilon_{rol} \sigma (T_{rol}^4 - T_{\infty}^4))}{S} + \dot{q}_{ak} + \dot{q}_{tr}$$

$$\dot{q} = htc (T_{surf} - T_{\infty}) + \varepsilon_{surf} \sigma (T_{surf}^4 - T_{\infty}^4)$$



$$\dot{q} = htc_{nat} (T_{surf} - T_{\infty}) + \varepsilon_{surf} \sigma (T_{surf}^4 - T_{\infty}^4)$$

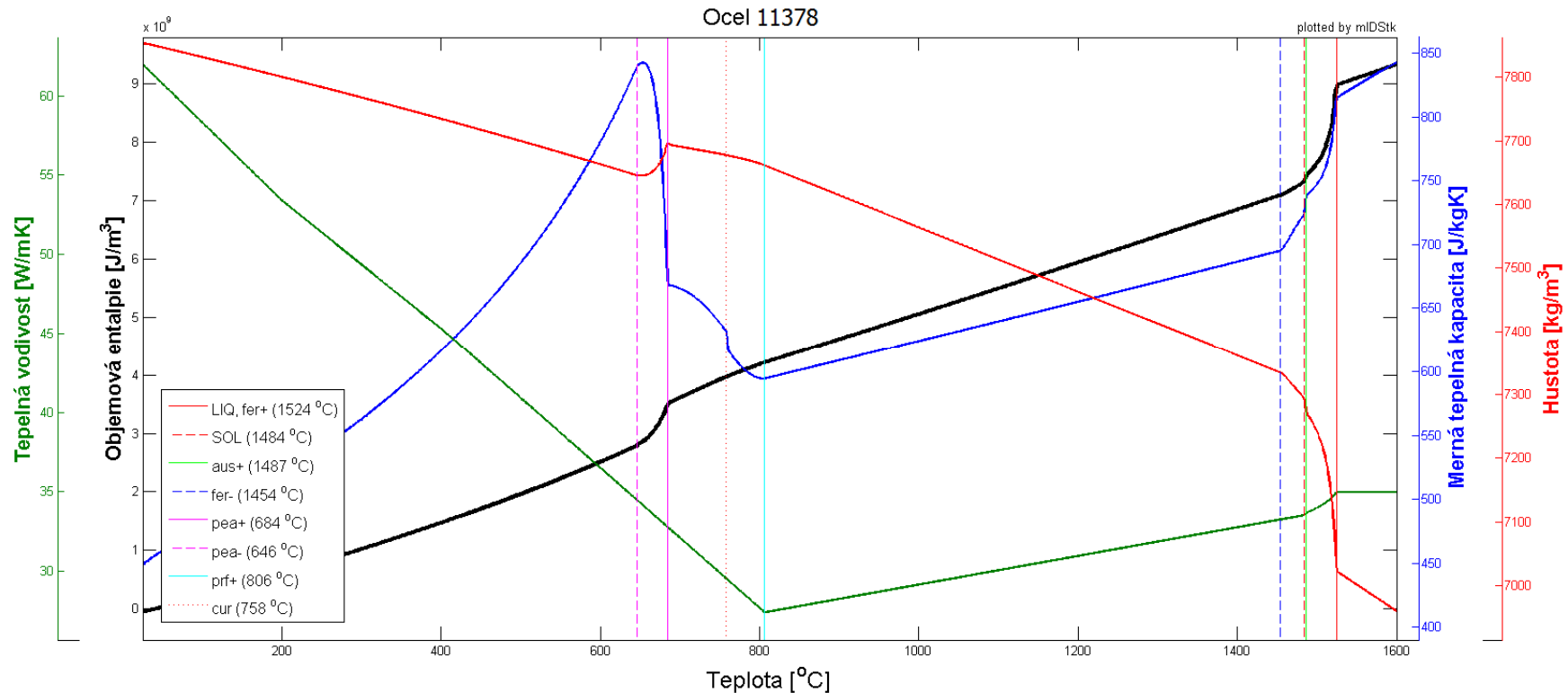
$$htc_{nat} = 0,84 (T_{surf} - T_{\infty})^{1/3}$$

NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

Termo-fyzikální vlastnosti oceli

Program IDS

$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T) \Delta(T) + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

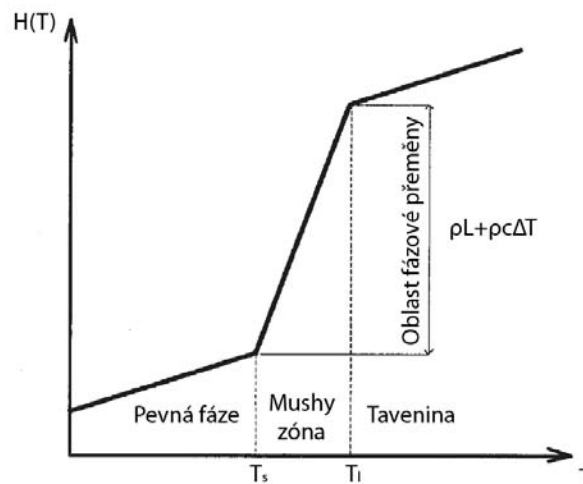


NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

Modelování fázové přeměny

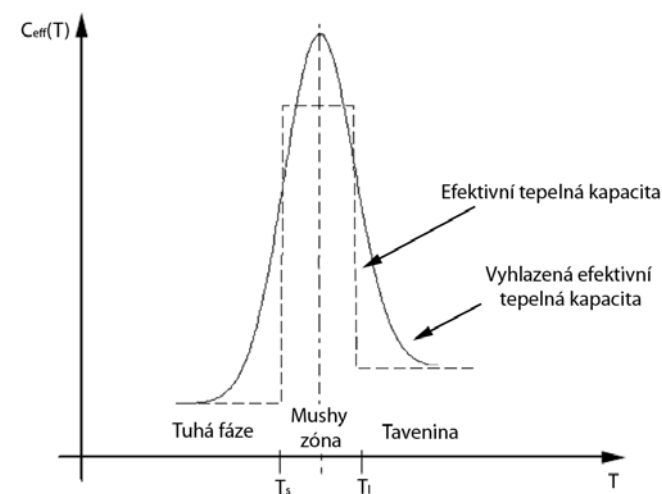
$$\frac{\partial}{\partial \tau} [\rho(T)c(T) T] = \lambda(T)\Delta(T) + \frac{\partial}{\partial z} [v_z \rho(T)c(T) T] + \dot{Q}$$

Metoda entalpie



$$H(T) = \int_0^T \left[\rho(\xi)c(\xi) - \rho(\xi)L \frac{\partial f_s}{\partial T} \right] d\xi$$

Metoda efektivní tepelné kapacity



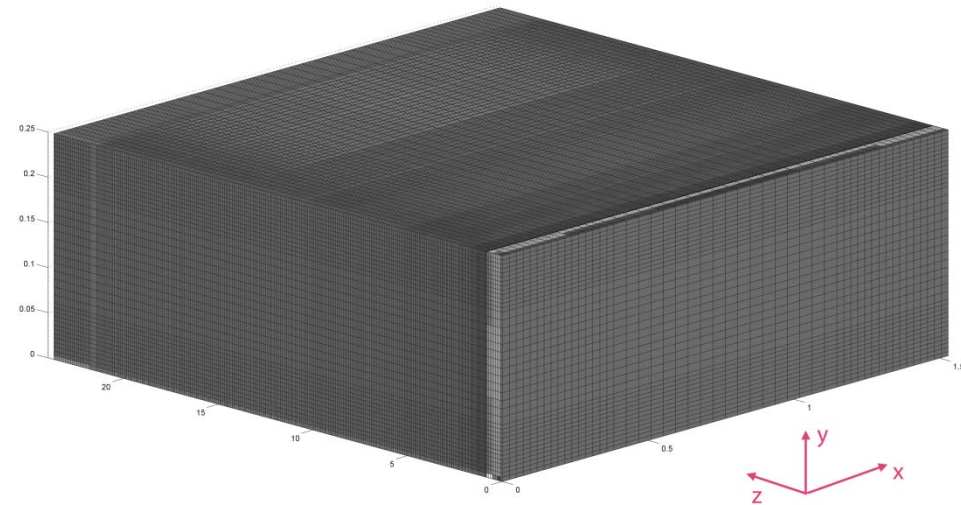
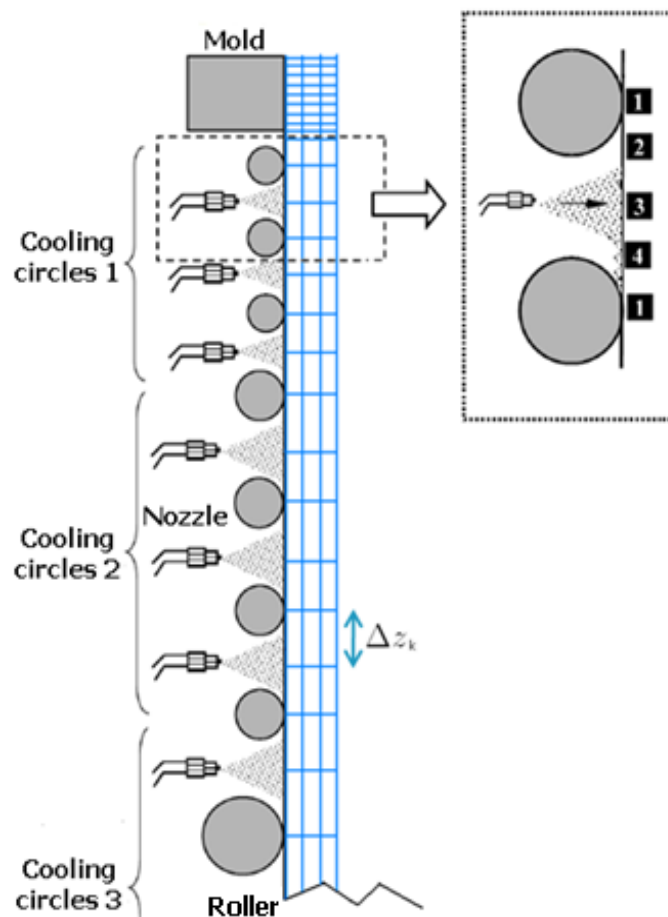
$$c_{eff}(T) = \frac{\partial H}{\partial T} = \rho(T)c(T) - \rho(T)L \frac{\partial f_s}{\partial T}$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \lambda(T)\Delta(T) + v_z \frac{\partial H}{\partial z}$$

$$c_{eff}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T)\Delta(T) + c_{eff}(T)v_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

NUMERICKÝ MODEL TEPLITNÍHO POLE

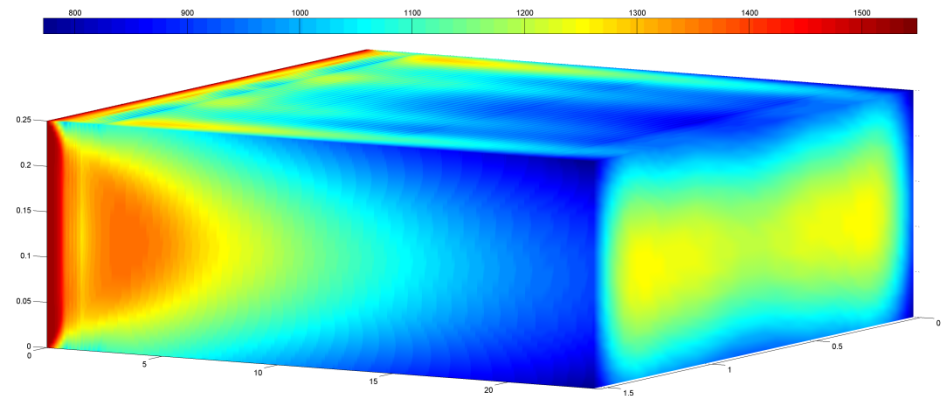
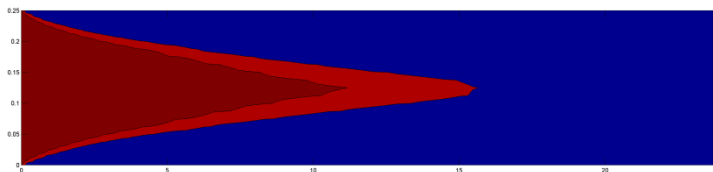
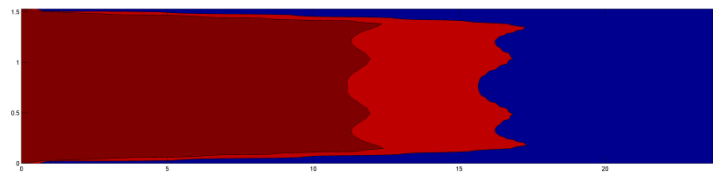
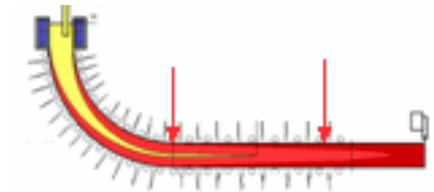
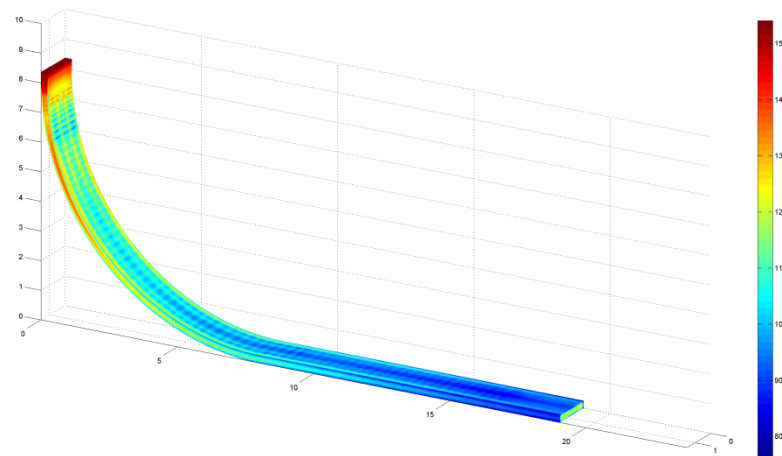
Diskretizace výpočetní sítě



Délka krystalizátoru	900 mm
Rovná část krystalizátoru	460 mm
Hladina oceli od horní hrany krystalizátoru	0 - 200 mm
Tloušťka produkované bramy	145 mm, 180 mm, 250 mm
Šířka produkované bramy	800 - 1600 mm
Velký rádius	8 000 mm
Část rovné klece	8 500 mm
Vzdálenost od konce klece po pálicí stroj	2 000 mm
Počet stavitelných segmentů	12
Počet nezávislých regulačních okruhů sekundárního chlazení	13
Pyrometr 1	7 segment (12677 mm)
Pyrometr 2	11 segment (20909 mm)

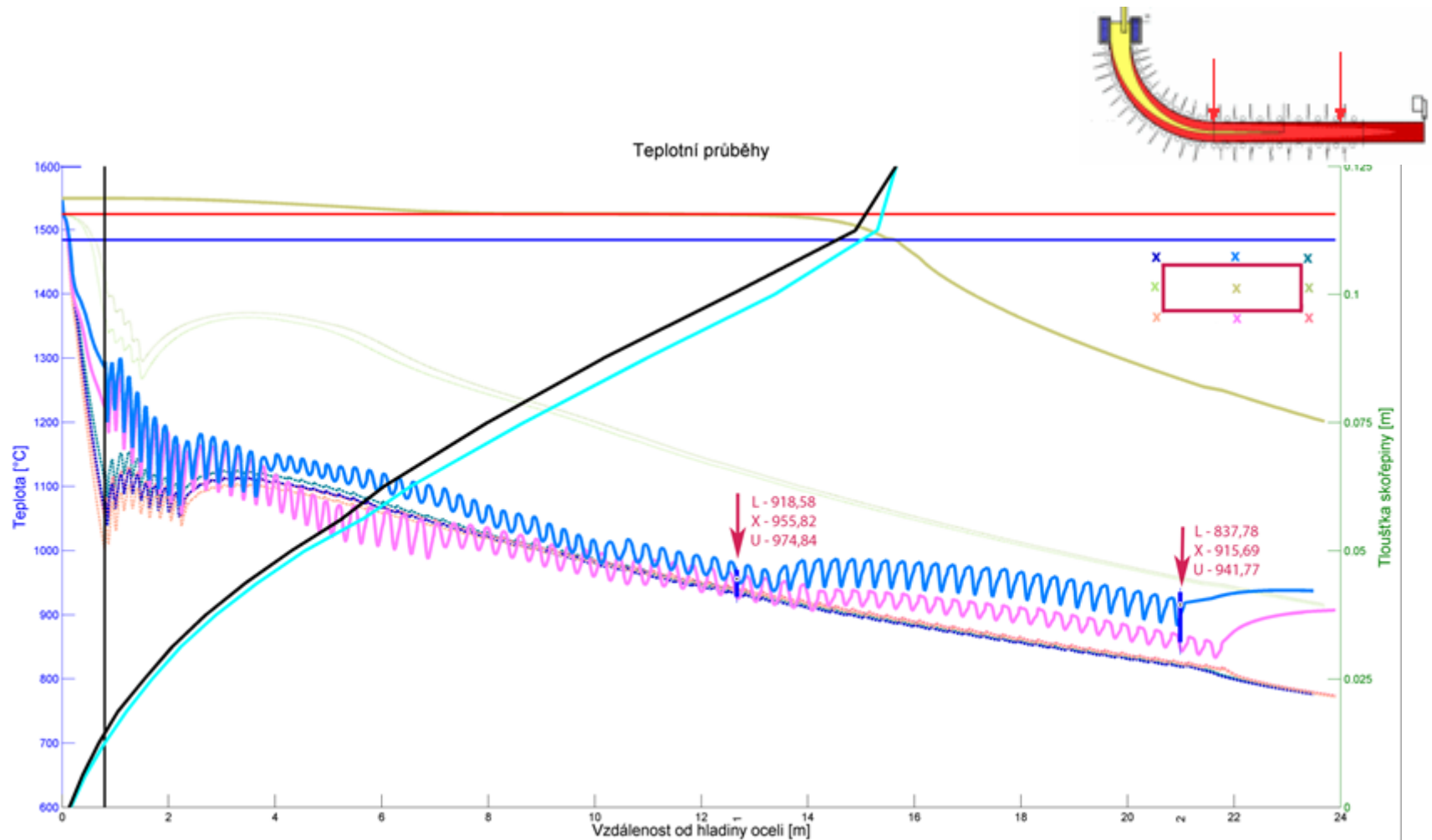
NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

🌀 Výsledky num. modelu a jeho verifikace



NUMERICKÝ MODEL TEPLOTNÍHO POLE

❖ Výsledky num. modelu a jeho verifikace

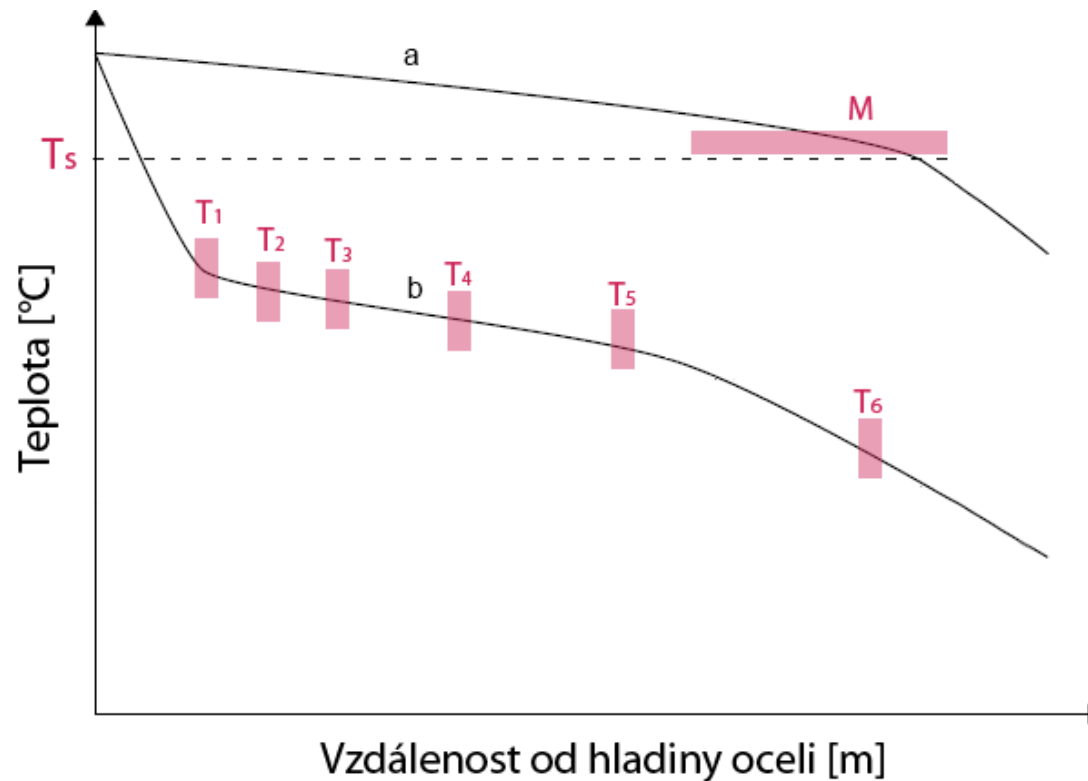


ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

- ❖ Kvalita předlitku je ovlivněna teplotní historií
- ❖ Algoritmus pracuje s ovlivňováním teploty povrchu jednotlivými tryskami
- ❖ Pracuje s výstupem numerického modelu
- ❖ Iteračně upravuje vstupy numerického modelu (licí rychlost, průtoky v sekundární zóně)
- ❖ Základem algoritmů je heuristická optimalizace

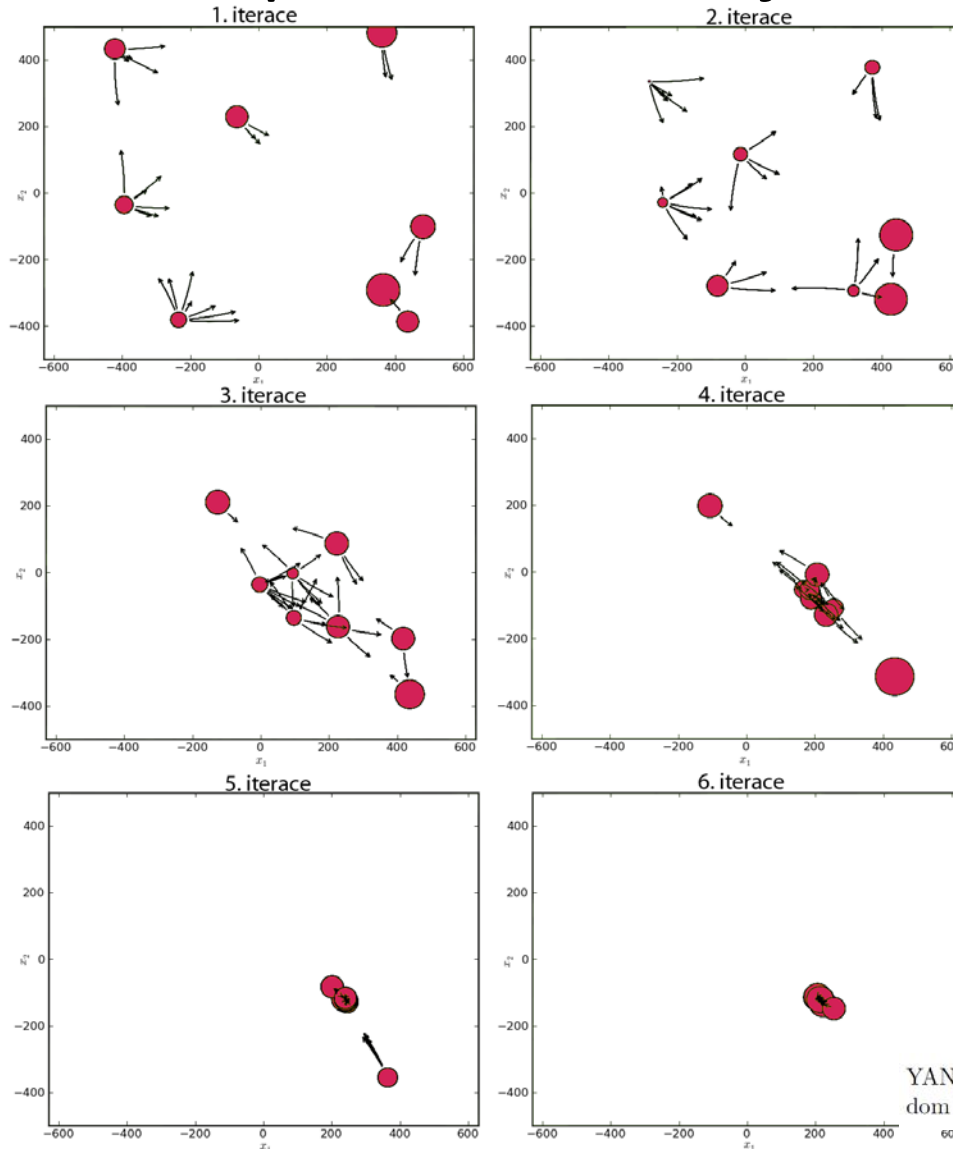
ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && v_z \\ & \text{subject to} && T_{i(\min)} \leq T_i^n \leq T_{i(\max)} \quad \forall i, n = t_f, \\ & && T_{i-1}^n \geq T_i^n \geq T_{i+1}^n \quad \forall i \in [2, \dots, p-1], n = t_f, \\ & && \dot{m}_{j(\min)} \leq \dot{m}_j \leq \dot{m}_{j(\max)} \quad \forall j, \\ & && M_{\min} \leq M \leq M_{\max}. \end{aligned}$$

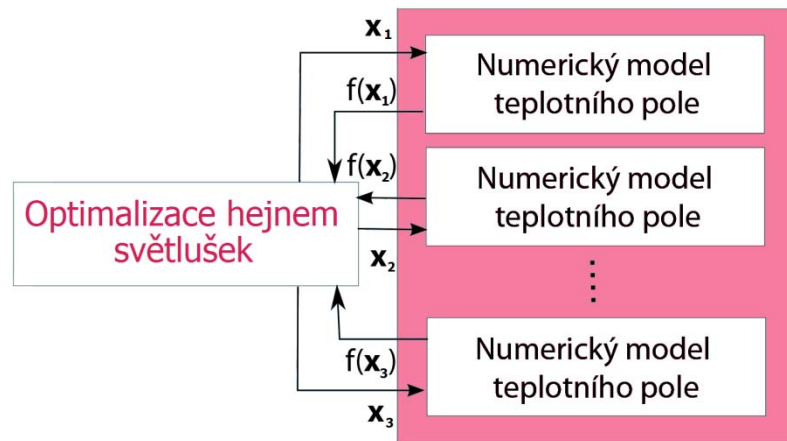


ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

Optimalizace hejnem světlušek

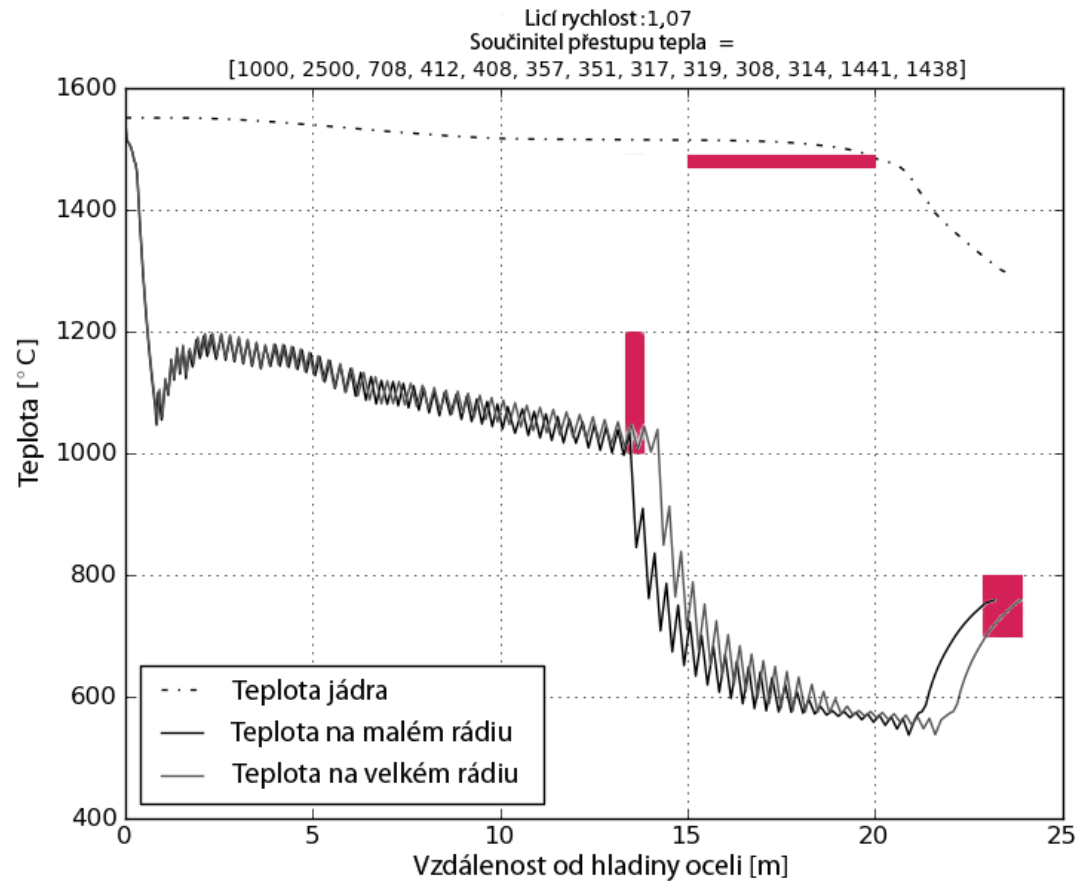


$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j^n - \mathbf{x}_i^n) + \alpha \boldsymbol{\varepsilon}_i$$



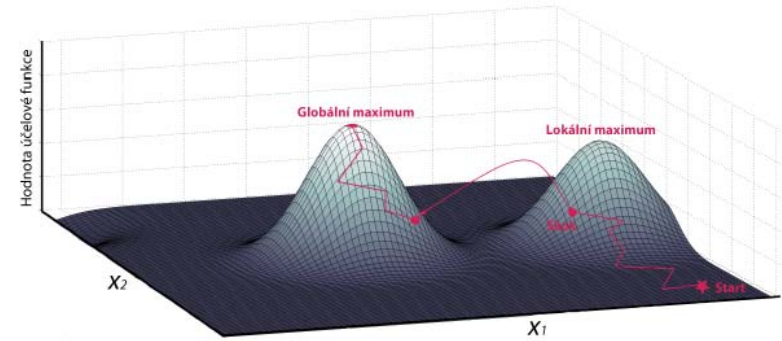
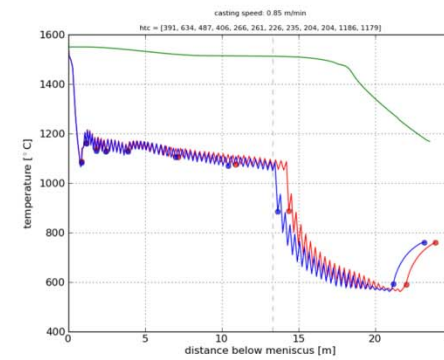
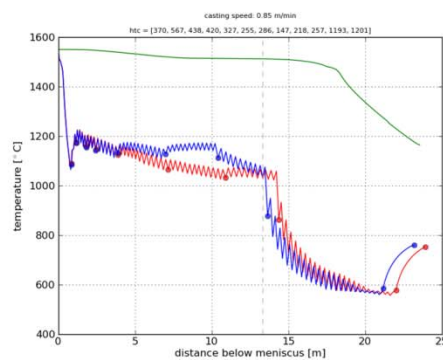
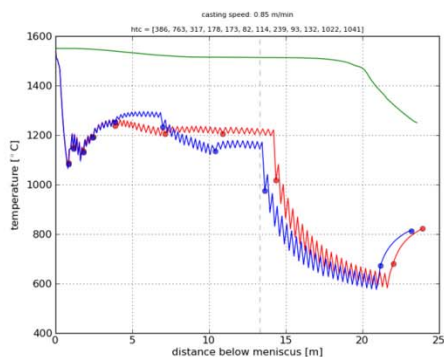
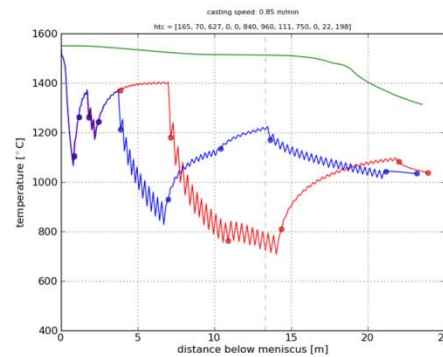
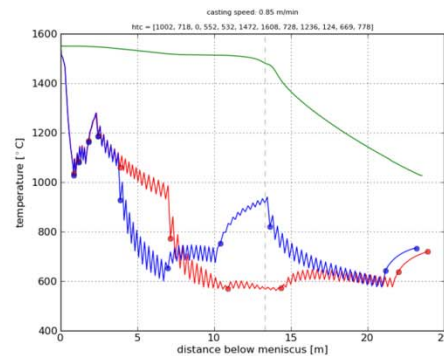
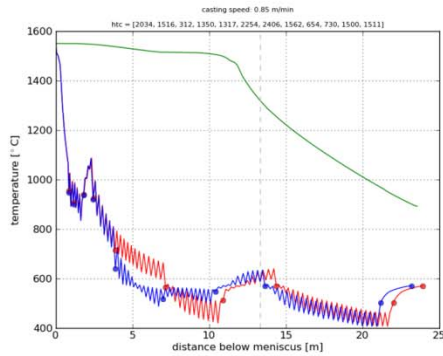
ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

Optimalizace hejnem světlušek



ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

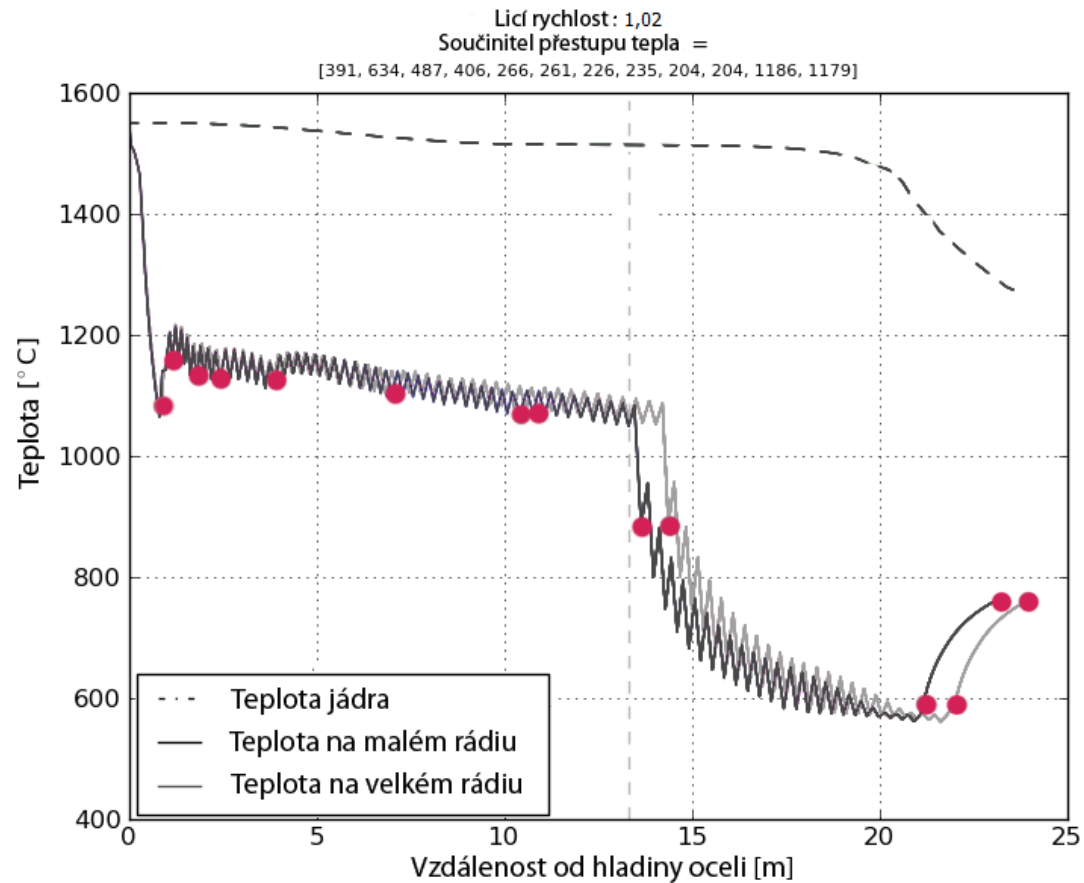
Regulační algoritmus



$$p = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}$$

ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

Regulační algoritmus



ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

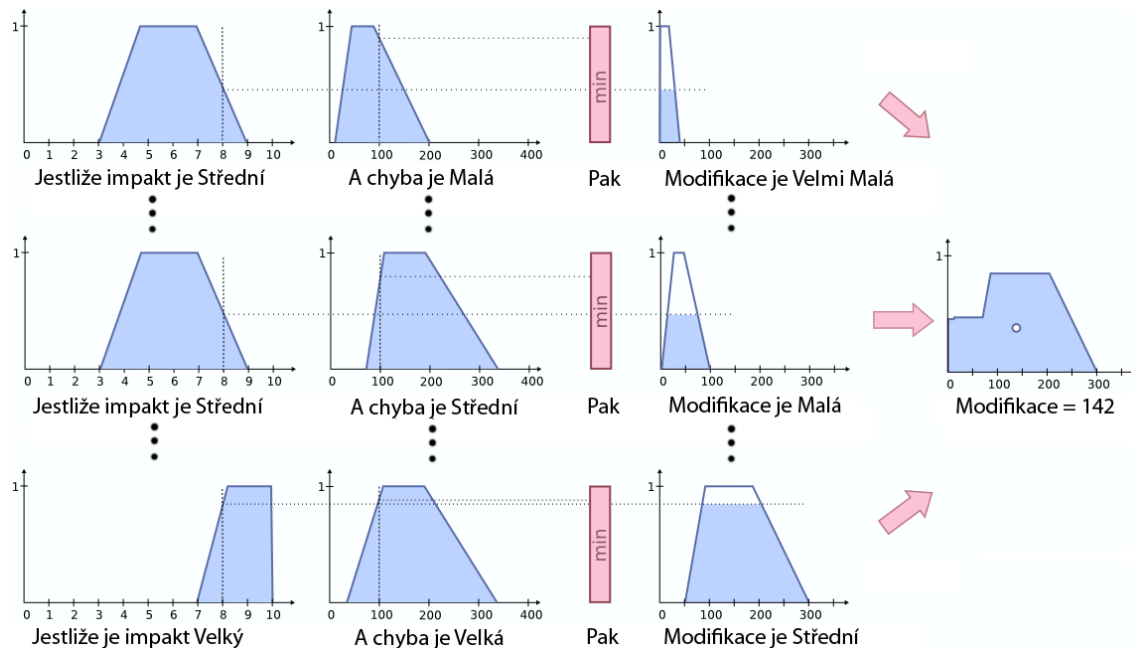
Fuzzy regulační algoritmus

Závislost modifikace chlazení A3 na hodnotě chyby A1 a impaktu A2

A2 / A1	Velmi Malá	Malá	Střední	Velká
Malá	Velmi Malá	Velmi Malá	Malá	Malá
Střední	Velmi Malá	Velmi Malá	Malá	Střední
Velká	Velmi Malá	Malá	Střední	Velká

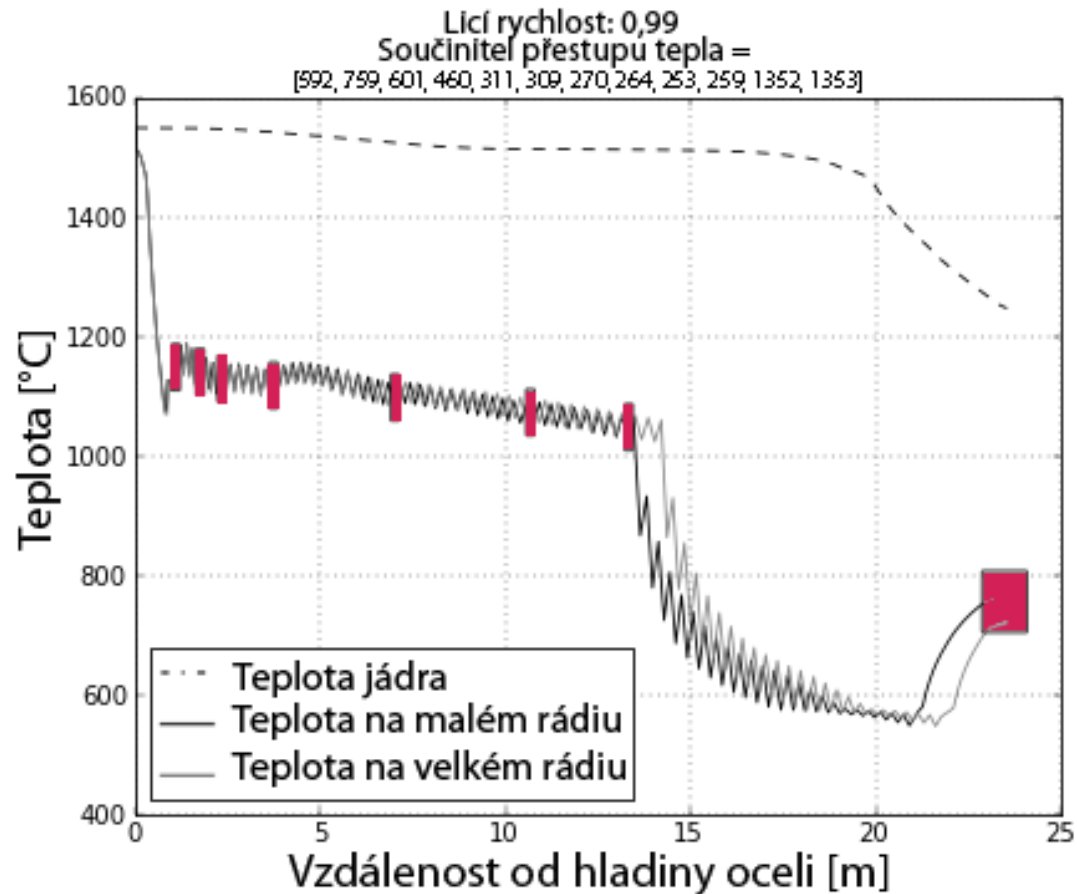
Závislost licí rychlosti A6 na hodnotě celkové chyby A4 a metalurgické délky A5

A4 / A5	Velmi Malá	Malá	OK	Velká	Velmi Velká
Malá	Více	Trochu Více	Trochu Více	Trochu Více	Méně
Střední	Trochu Více	Neměnit	Neměnit	Neměnit	Trochu Méně



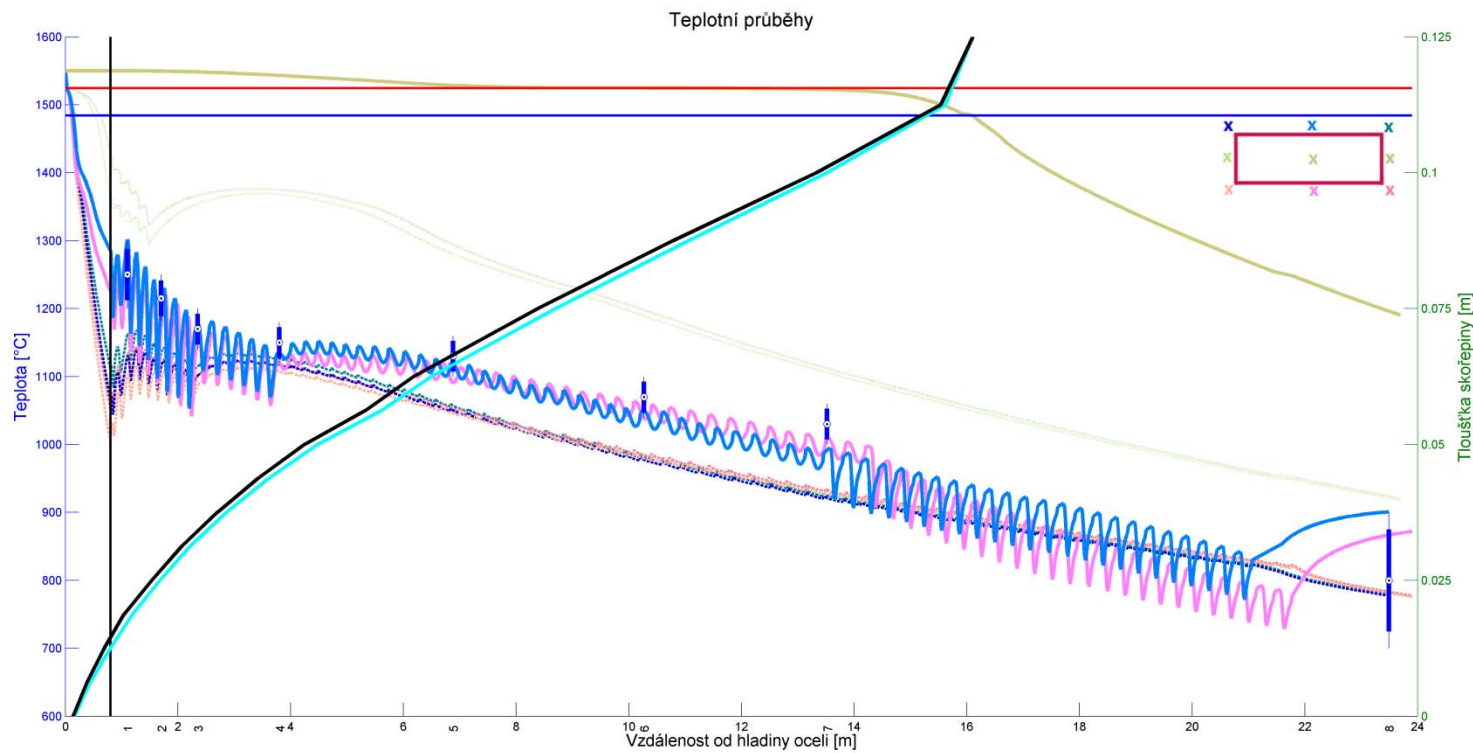
ALGORITMY OPTIMÁLNÍHO ŘÍZENÍ ZPO

🌀 Fuzzy regulační algoritmus



Výsledky

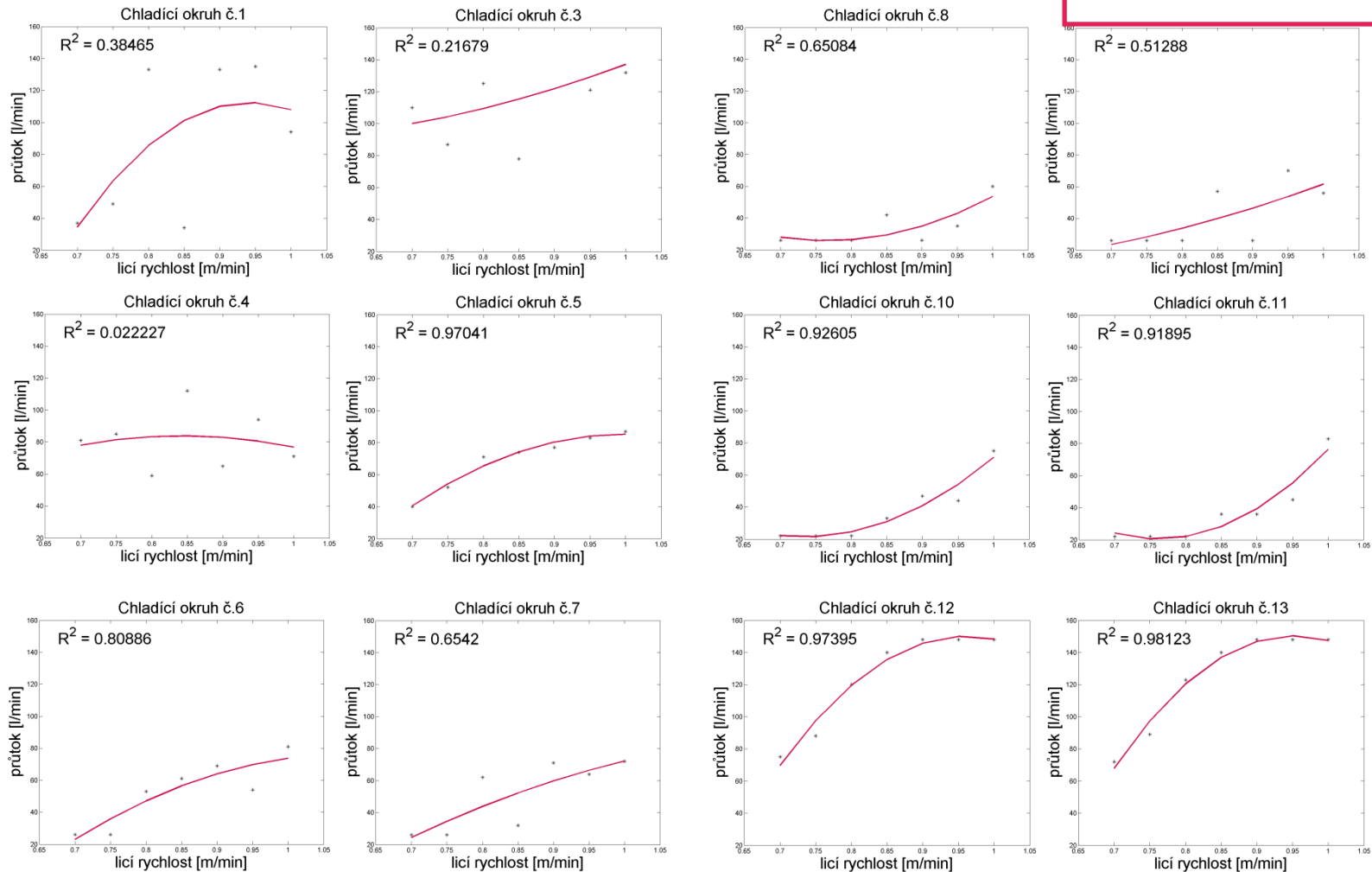
🔍 Nalezení optimálních licích parametrů, pro konkrétní značku oceli



Výsledky

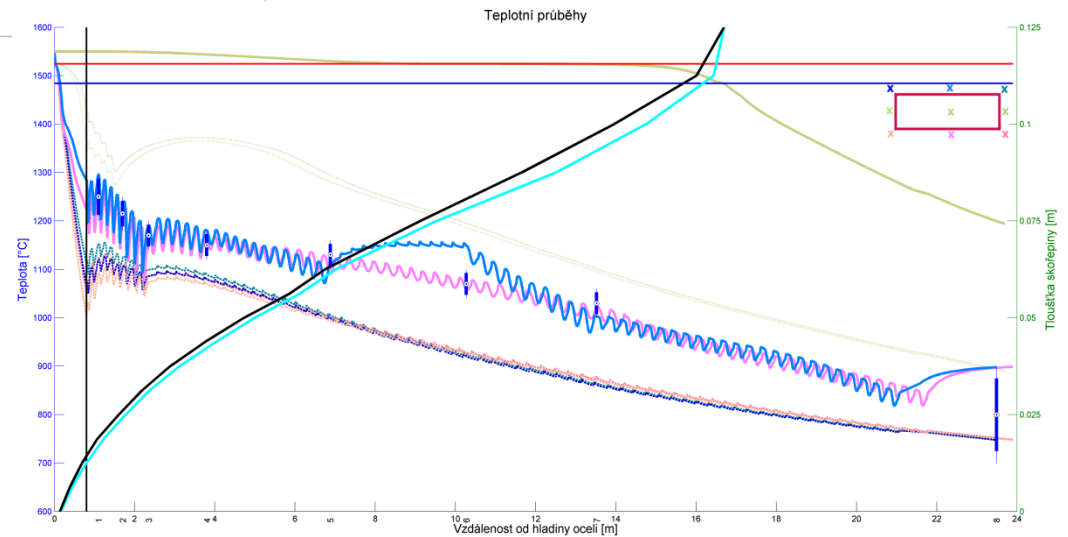
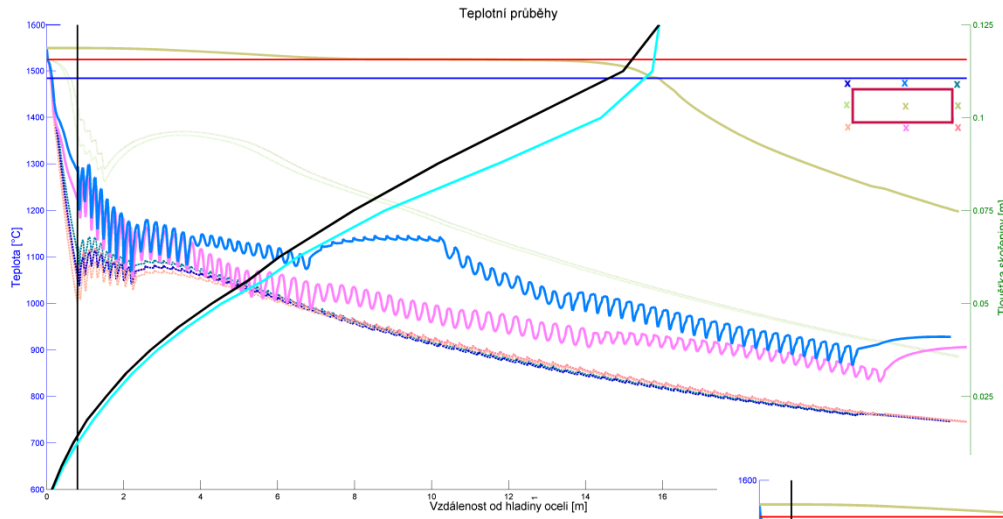
Optimálního vztah mezi licí rychlostí a intenzitou sekundárního chlazení

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2$$



Výsledky

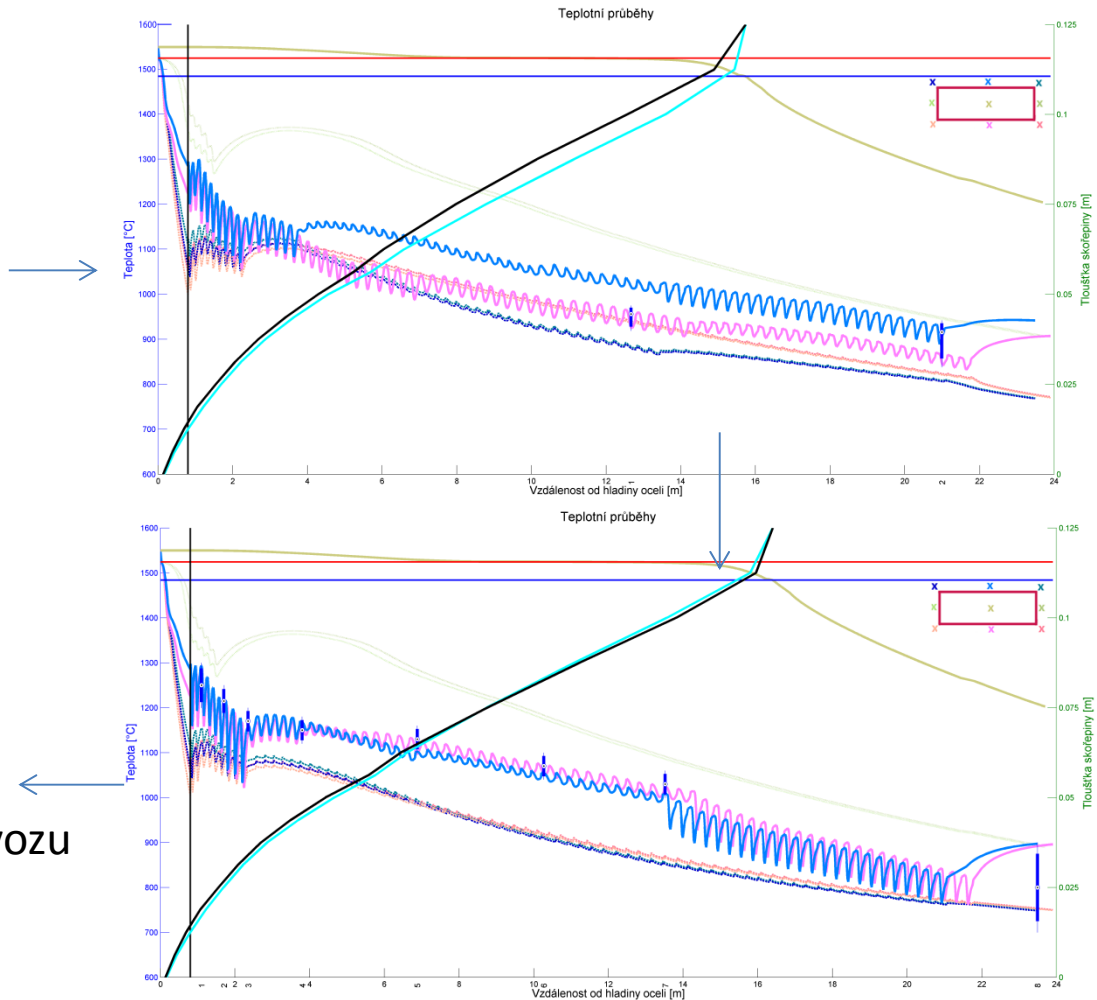
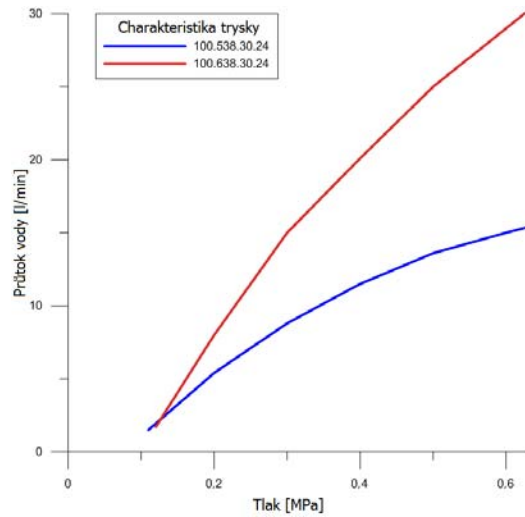
Použití fuzzy regulátoru při nestandardní situaci provozu ZPO



Výsledky

✧ Úprava licí tratě

✧ Výměna trysky 100.638.30.24 -> 100.528.30.24



Tryska se nyní nasazuje v provozu

PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K TÉMATU PRÁCE

◊ Počet publikací cca 60 (12 v WoS)

◊ Počet software dle metodiky RIV 2

◊ H-index podle Web of Science 2

- ◊ MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J.; ŠEDA, M. Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm. *Materiali in tehnologije*. 2011. 45(4). p. 347 - 350. ISSN 1580-2949. (IF(2010)=0,312). Times Cited: 0
- ◊ ŠTĚTINA, J.; KLIMEŠ, L.; MAUDER, T.; KAVIČKA, F. FINAL-STRUCTURE PREDICTION OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS. *Materiali in tehnologije*. 2012. 46(2). p. 155 - 160. ISSN 1580-2949. (IF(2010)=0,312). Times Cited: 0
- ◊ MAUDER, T.; KAVIČKA, F.; ŠTĚTINA, J.; FRANĚK, Z.; MASARIK, M. A MATHEMATICAL & STOCHASTIC MODELLING OF THE CONCASTING OF STEEL SLABS. In *Sborník konference*. Tanger. Hradec nad Moravicí, Tanger Ltd. 2009. p. 41 - 48. ISBN 978-80-87294-10-9. Times Cited: 4
- ◊ STRÁNSKÝ, K.; KAVIČKA, F.; SEKANINA, B.; DOBROVSKÁ, J.; ŠTĚTINA, J.; MAUDER, T. Oscillation Marks and Hooks on the Surface of Concast Slabs and their Relation to Breakout. *Key Engineering Materials*. 2011. 465(1). p. 467 - 470. ISSN 1013-9826. (IF(2005)=0,224). Times Cited: 0
- ◊ ŠTĚTINA, J.; MAUDER, T.; KAVIČKA, F. Heat transfer coefficients beneath the water cooling nozzles of a billet caster. In *18th International Conference on Metalurgy and Materials*. 1. Hradec nad Moravicí, Tanger Ltd. 2009. p. 16 - 23. ISBN 978-80-87294-10-9. Times Cited: 2

◊ Spolupráce na projektech GAČR:

- GA106/08/0606, *Modelling of heat and mass transfer in large systems of massive metal materials during solidification, principal investigator, 2008-2011,*
- GACR 106/09/0940, *Numerical and stochastic model of continuously cast steel slabs: 2009-2011*
- GA P107/11/1566, *Analysis of influence of metallurgical-material and technology parameters of concast steel blanks on their quality and process stability, 2011-13.*
- GAP101/11/1047 *The attenuation of fluid temperature oscillations using latent heat thermal storage, 2011-13*

◊ Řešitel a spoluřešitel juniorských projektů VUT FSI:

- BD13102003(FSI-J-10-8), *Mathematical modeling and optimization in engineering applications 2010*
- BD13002(FSI-J-11-7), *Optimization and numerical modeling in material with phase and structural changes 2011*
- FSI-J-12-22, *Aplikace metod numerického modelování a optimalizace v inženýrských úlohách se změnou skupenství a struktury 2012*

DĚKUJI ZA POZORNOST

