

Recenzované výzkumné články

Experimentální stanovení teplotních a silových poměrů ve válcovací mezeře

Experimental Determination of Thermal Flux and Contact Stresses in the Rolling Gap

Ing. Tomáš Luks¹, prof. Ing. Jaroslav Horský, CSc.¹, Erik Bartuli¹

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

Při modelování technologického procesu válcování, pro predikci životnosti válců nebo při řízení válcovací tratě, hraje klíčovou roli určení teplotních a silových okrajových podmínek ve válcovací mezeře. Mnohdy jsou hodnoty okrajových podmínek stanoveny empiricky na základě zkušeností, případně jsou použity hodnoty přibližné a vycházející z nepřesných měření. Tento článek prezentuje výsledky měření okrajových podmínek ve válcovací mezeře pomocí dvojice nově vyvinutých senzorů.

Ke snímání mechanického napětí na rozhraní válec-provalek je využita metoda měřícího pinu, kdy vrchol měřícího elementu (pinu) je v kontaktu s válcovaným materiálem. Síly působící na pin jsou snímány třiosým piezoelektrickým snímačem sil a přepočteny na kontaktní napětí ve válcovací mezeře. Pro teplotní okrajovou podmínku při válcování zatepla je pracovní válec osazen podpovrchovým teplotním snímačem. Na základě zaznamenaných teplot a pomocí inverzní úlohy vedení tepla jsou vypočteny povrchové tepelné toky. Článek ukazuje konstrukci senzorů jejich implementaci v pracovním válci a záznamy z pilotních měření.

Klíčová slova: válcování; válcovací mezera; tepelný tok; kontaktní napětí; koeficient tření

Boundary conditions in the roll gap play an important role in modelling of rolling processes, in prediction of the roll lifetime period, and at control of rolling mills. Estimations of thermal and mechanical conditions in the gap are not easy; the data can be approximated from indirect measuring methods or extrapolated from different processes. The complexity of rolling process requires direct measuring in the roll gap in order to obtain accurate results.

This article presents measuring of the boundaries condition in the roll gap performed by two new sensors. The contact stresses in the roll gap were measured by a pin, which was in direct contact with the rolled material. The forces on the top of the pin were measured by three axes piezoelectric force transducers and recalculated to the contact stress. Thermal boundary condition in the form of heat-flux was calculated from the subsurface temperature measured in the roll. The temperature sensor contained a thermocouple (type K) placed 0.5 mm under the roll's surface. Heat flux was computed by inverse task where Beck sequential algorithm was used.

The sensors were tested in a small mill inside a 230 mm roll. 29 strips with different rolling parameters were rolled. Thermal results show wider heat-flux curve than the real size of the roll gap. For a proper use the heat flux has to be recalculated for the real size of the roll gap. The result from the force sensor was in some cases influenced by material penetration into the gap around the pin. This was mostly in the hot rolling condition. The result for tangential direction was distorted, but normal stresses in the gap were not influenced too much and they can be used in combination with the heat flux results.

Key words: rolling; roll gap; heat flux; contact stresses; friction coefficient

Zpracování materiálu válcováním představuje nejrozšířenější technologii výroby hutních polotovarů. Tato technologie je vzhledem k velkým objemům výroby poměrně ekonomická. Velká část výrobních nákladů výroby je však soustředěna do obnovy pracovních válců. Proto je každé prodloužení životnosti

válce přínosné a rychle se projeví na snížení nákladovosti. Mezi hlavní faktory ovlivňující životnost pracovních válců patří abrazivní opotřebení povrchu válce a cyklické teplotně-mechanické zatěžování povrchové vrstvy [1].

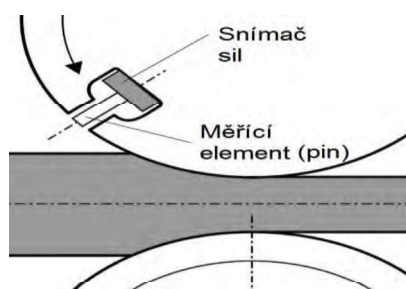
Přesné určení okrajových podmínek těchto procesů je proto rozhodující, a to jak pro modely studující životnost válců, tak pro studium zpracování nových progresivních materiálů, případně i pro řídicí systémy válcovacích stolic.

Experimentální stanovení okrajových podmínek ve válcovací mezeře vyžaduje netriviální metody měření. Použité snímače musí být schopné odolat různým provozním podmínkám. Při válcování za studena dochází ke značnému silovému zatížení. Válcové musí překonat deformační odpor vývalku při nízkých teplotách a dochází k extrémním hodnotám válcovacích sil. Teplotní vliv na povrchové vrstvy válce je minimální. Teplota provalku sice vzroste vlivem mechanického přetvoření, avšak teplotní nárůst je malý. Na druhé straně u válcování za tepla je dominantní teplotní zatížení vyvolávající teplotní gradient a v jeho důsledku i napjatost v povrchové vrstvě válce.

1. Měření sil ve válcovací mezeře

Metody měření s použitím malého měřicího elementu (pinu) patří mezi poměrně staré metody k měření lokální hodnoty mechanického napětí na rozhraní válec-polotovar při tvářecích procesech [2]. Pin představuje vetknutý nosník, který je v kontaktu s provalkem při průchodu válcovací mezerou (obr. 1). Je uložen v pracovním válci tak, aby se při měření nemohl dotýkat stěn díry, ve které je uložen. Deformace pinu, úměrné zatěžující síle, jsou změřeny a přepočteny na kontaktní napětí na rozhraní těles válec-provalek. Ke snímání sil je obvykle použito tenzometrické měření deformace.

S víceosým snímačem sil lze tímto způsobem měřit nejen normálové napětí ve válcovací mezeře, ale také smyková napětí v tangenciálním a axiálním směru.



Obr. 1 Schéma měření lokálního kontaktního napětí ve válcovací mezeře pomocí pinu

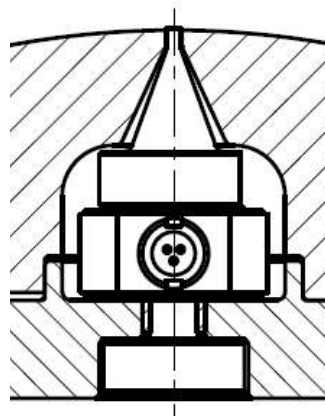
Fig. 1 Scheme of the contact stress measuring in the roll gap by pin-sensor

Použitím tenzometrického měření vznikají protichůdné požadavky na tuhost pinu. Ke zvýšení citlivosti měřicí soustavy je potřeba snížit tuhost pinu (zvýšit deformace), naproti tomu k zamezení kontaktu s okolním materiálem válce je potřeba tuhost zvýšit.

Pro zvýšení citlivosti měření a zvýšení tuhosti bylo u nové konstrukce snímače využito měření sil pomocí piezoelektrického převodníku. Piezoelektrický aktivní

materiál generuje elektrický náboj přímo úměrný mechanickému napětí v materiálu. Vhodným řezem piezoelektrického materiálu je možno docílit citlivosti také na tečné síly, a zkonstruovat tak tříosý snímač sil.

Jako základ senzoru byl zvolen tříosý piezometrický snímač sil KISTLER 9028 s citlivostí $-7,8 \text{ pC/N}$ pro tečné směry x , y a $-3,8 \text{ pC/N}$ pro normálový směr z . Velikost pinu byla na základě výpočtu a konstrukčních omezení zvolena takto: průměr kontraktní části pinu $D = 1,88 \text{ mm}$, délka měřená od snímače 22 mm .



Obr. 2 Schéma senzoru

Fig. 2 Scheme of the sensor

Měřicí část pinu je ve stejné výšce jako pracovní povrch válce a při podobné tuhosti dává měřený signál nezkrácené výsledky. Samotné umístění senzoru v umělé dutině uvnitř válce ovlivňuje tuhost válce v okolí senzoru, a tím i geometrii válcování. Této skutečnosti se nelze zcela vyhnout. Můžeme jen tento vliv zmenšit umístěním dutiny hlouběji pod povrchem.



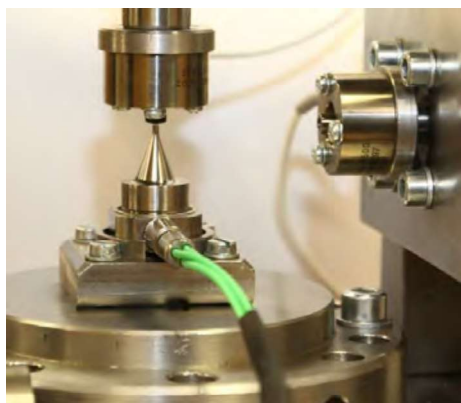
Obr. 3 Pin s předepnutým piezoelektrickým snímačem sil

Fig. 3 Pin and preloaded piezoelectric force transducer mounted on the plate

Konstrukce piezoelektrického snímače sil vyžaduje pro svou správnou funkci předpětí. Toho je dosaženo pomocí matice a šroubu s jemným závitem. Pin, silový snímač a základová deska jsou spojeny (obr. 3) a předepnuty na hodnotu síly doporučenou výrobcem.

1.1 Výpočet sil

Osazený snímač byl před instalací do válce kalibrován. Vršek pinu byl jednotlivě zatěžován v hlavních měřicích směrech a byly současně měřeny výstupní signály pro všechny tři osy. Tímto způsobem byla sestavena matice přenosu $\mathbf{K}$ mezi aplikovanou silou $\mathbf{F}$ a výstupním signálem $\mathbf{O}$ definovaným rov. (1), symbolicky zapsaná rov. (2). Pomocí inverzní matice $\mathbf{K}$ můžeme z výstupního signálu snímače zpětně rekonstruovat sílu působící na pin a eliminovat vzájemné ovlivňování mezi jednotlivými kanály, jak vyjadřuje rov. (3). Tento postup je možný pouze za předpokladu lineárního chování snímače.



Obr. 3 Kalibrace piezoelektrického snímače sil s osazeným pinem
Fig. 3 Calibration of piezoelectric force transducers

$$\begin{bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{O} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{O} \quad (3)$$

Průběh kontaktních mechanických napětí σ_n , τ_x , τ_z ve válcovací mezeře je poté vypočten na základě kontaktní plochy pinu o průměru D a příslušné složky síly F . Napětí σ_n představuje normálové napětí ve válcovací mezeře, τ_x je smykové napětí ve směru válcování a τ_z je smykové napětí ve směru osy válců.

$$\sigma_n = \frac{F_z}{S} = \frac{4F_z}{\pi * D^2} \quad (4a)$$

$$\tau_x = \frac{F_x}{S} = \frac{4F_x}{\pi * D^2} \quad (4b)$$

$$\tau_z = \frac{F_y}{S} = \frac{4F_y}{\pi * D^2} \quad (4c)$$

Z průběhu napětí je možné také podle rov. (5) vypočítat koeficient tření μ podél záběrného oblouku jako poměr normálového napětí σ_n a tečného napětí τ_x ve směru válcování. Průběh μ ve skutečnosti představuje nejen koeficient tření (závislost mezi normálovou a tečnou

složkou síly při pohybu dvou těles), ale také je zde zahrnuta oblast přilnutí, kde je rozdíl rychlostí provalku a pracovního válce nulová a ke tření nedochází.

$$\mu = \left| \frac{\tau_x}{\sigma_n} \right| \quad (5)$$

2. Měření tepelných toků ve válcovací mezeře

Při válcování dochází ke styku dvou materiálů s rozdílnou teplotou. Jednou z metod měření tepelných toků ve válcovací mezeře je osazení provalku sadou termočlánků. Z poklesů teplot lze následně vypočítat tepelné toky na rozhraní [3]. Hloubka umístění termočlánků je však omezena velkými deformacemi blízko povrchu. Záznam teplot z experimentu navíc poskytne data pouze z jednoho průchodu provalku stolicí. Obtížnější je umístění snímačů do válce, kdy je termočlánek umístěn v malé hloubce pod povrchem a povrchové okrajové podmínky jsou dopočítány pomocí inverzní úlohy.

Na základě předchozích zkušeností [4] byl vytvořen teplotní senzor (obr. 4) s termočlánkem typu K měřící teplotu pod povrchem v hloubce 0,5 mm. Termočlánek je umístěn v drážce paralelně s osou válce a zalit niklovou pákou. Teplotní vodivost niklové pájky je podobná teplotní vodivosti oceli a nevzniká tak velké ovlivnění teplotního pole v okolí termočlánku.



Obr. 4 Teplotní čidlo pro zabudování do pracovního válce
Fig. 4 Temperature sensor before installation into the work roll

Po zabudování snímače ve válci je povrch přebroušen speciální odvalovací bruskou k dosažení souvislého povrchu válce. Před měřením je teplotní senzor kalibrován pomocí proudu horké vody z laminární trysky. Kalibrace slouží k upřesnění pozice termočlánku a korekci výrobních nepřesností pro výpočtový model použitý v inverzní úloze.

2.1 Výpočet tepelných toků ve válcovací mezeře

Pomocí změřených podpovrchových teplot válce jsou použitím inverzní úlohy vedení tepla vypočteny časově závislé okrajové podmínky: hustota tepelného toku a povrchová teplota válce. Pro výpočet je použit Beckův

sekvenční přístup [5 – 7]. Metoda používá sekvenční odhad časově proměnných okrajových podmínek a dopředných časových kroků ke stabilizaci výpočtu.

První součet čtverců chyb je vypočítán s použitím f dopředných časových kroků, kdy změřené teploty T_i^* jsou porovnány s vypočtenými teplotami T_i v aktuálním čase m :

$$SSE = \sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i)^2 \quad (6)$$

Teploty T_i jsou vypočteny přímým výpočtem metodou konečných objemů. Tepelný tok q s povrchu q v čase m je možné vypočítat minimalizací rov. (6)

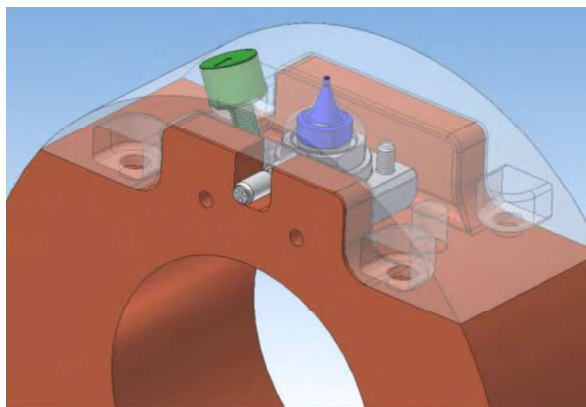
$$q^m = \frac{\sum_{i=m+1}^{m+f} (T_i^* - T_i|_{q^m=0}) \zeta_i}{\sum_{i=m+1}^{m+f} (\zeta_i)^2} \quad (7)$$

kde $T_i|_{q^m=0}$ jsou teploty v místě termočlánku, které byly vypočteny přímým výpočtem za použití dříve vypočtených tepelných toků bez q^m . Parametr ζ_i je citlivost snímače s termočlánkem v časovém indexu i na tepelný tok v čase m . Tento koeficient citlivosti představuje zvýšení teploty v termočlánku na jednotku tepelného toku na povrchu. Koeficient citlivosti snímače je definován jako:

$$\zeta_i = \frac{\partial T_i}{\partial q^m} \quad (8)$$

3. Implementace snímačů ve válci

Dvojice senzorů byla umístěna v testovacím válci zkušební stolice s průměrem válce 230 mm. Pro snazší instalaci senzorů byl válec rozříznut na tři části. Teplotní senzor a pin senzor jsou umístěny ve středové rovině válce, ale navzájem posunuty o 22°. Signály ze senzoru jsou z válce přenášeny bezdrátově pomocí indukčního přenosu dat a uloženy spolu ostatními daty z válcovací stolice v PC.



Obr. 5 Teplotní čidlo a pin senzor – umístění ve válci
Fig. 5 Temperature sensor and pin sensor in the roll

4. Výsledky měření

Na testovací stolici bylo vyválcováno celkem 29 zkušebních tyčí s obdélníkovým průřezem. Šířka tyče byla 30 mm, tloušťka se pohybovala mezi 5 – 10 mm a byla přesně změřena před válcováním. Délka tyče byla přibližně 2 m, což představuje při obvodu válce 0,72 m 2–3 kontakty provačku se senzory v jednom válcovacím průchodu. Zkušební tyče byly směřovány do válcovací mezery tak, aby senzory měřily v polovině šířky tyče. Podrobný rozpis pracovního postupu při experimentu je uveden v článku [4]. Základní parametry válcování pro prezentované experimenty jsou uvedeny tab. 1.

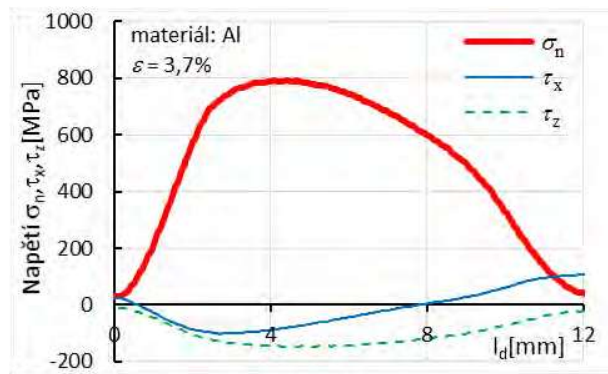
Tab. 1 Parametry válcování
Tab. 1 Rolling parameters

Exp. (mat.)	Vstup. tl. h_0 [mm]	Výstup. tl. h_1 [mm]	Def. [%]	Válc. síla [kN]	Tep. [°C]
C1 Hliník 6060-T6	8,3	8,02	3,7	89	20
C2 Hliník 6060-T6	8,3	7,91	4,7	108	20
H7 uhlíková ocel S235JR	10,3	8,65	16	79	985
H8 uhlíková ocel S235JR	10,3	7,41	28,1	139	986

Obvodová rychlost válce byla $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro všechna měření z tab. 1. Napětí σ_n představuje průběh normálového tlaku ve válcovací mezeře. Smykové napětí τ_x je tečná složka napětí podél obvodu válce. Smykové napětí τ_z je tečná složka napětí ve směru osy válce.

Jednotlivé výsledky v grafech níže jsou vykresleny podél záběrového oblouku. Pozice $l_d = 0 \text{ mm}$ představuje vstup do válcovací mezery.

Teplotní čidlo při válcování za studena vykazovalo jen mírné nárůsty teplot, přibližně $1,5 \text{ °C}$ na otáčku pro experiment C1.



Obr. 6 Distribuce napětí ve válcovací mezeře při válcování hliníku za studena, experiment C1

Fig. 6 Stress distribution in the roll gap during cold rolling of aluminium bar, experiment C1



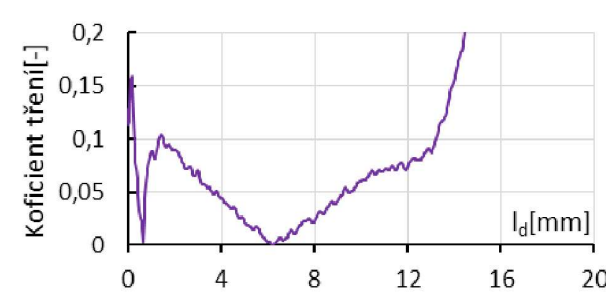
Obr. 9 Distribuce napětí ve válcovací mezeře při válcování uhlíkové oceli za tepla, exp. H7

Fig. 9 Stress distribution in the roll gap during hot rolling of steel bar, experiment H7



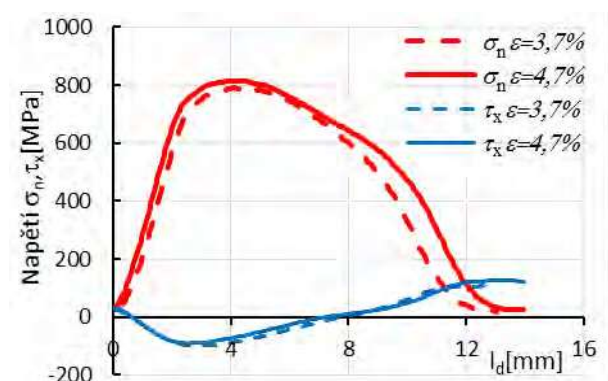
Obr. 7 Distribuce koeficientu tření ve válcovací mezeře v obvodovém směru při válcování hliníku za studena, experiment C1

Fig. 7 Distribution of the friction coefficient in the roll gap for cold rolling of aluminium, exp. C1



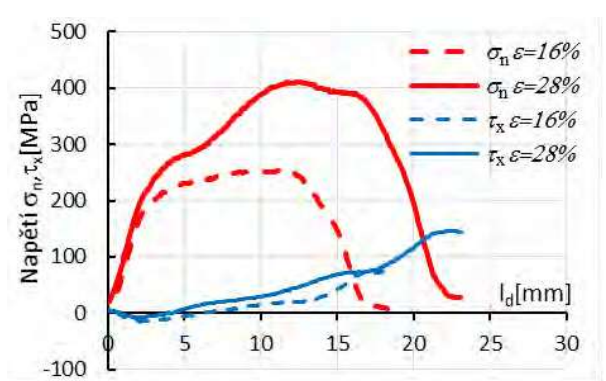
Obr. 10 Distribuce koeficientu tření ve válcovací mezeře v obvodovém směru při válcování oceli za tepla, experiment H7

Fig. 10 Distribution of the friction coefficient in the roll gap for hot rolling of carbon steel, exp. H7



Obr. 8 Distribuce napětí ve válcovací mezeře při válcování hliníku za studena pro různou velikost deformace

Fig. 8 Stress distribution in the roll gap during cold rolling of aluminium bar for different reductions



Obr. 11 Distribuce napětí ve válcovací mezeře při válcování uhlíkové oceli za tepla pro různou velikost deformace

Fig. 11 Stress distribution in the roll gap during cold rolling of aluminium bar for different reductions

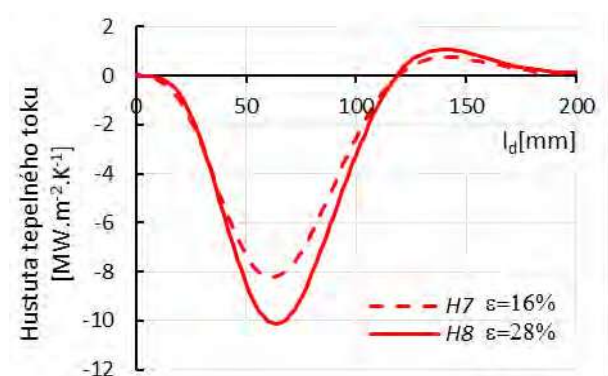
Distribuce napětí ve válcovací mezeře (obr. 6, 8, 9, 11) byla srovnána s teoretickou délkou pásma deformace ve válcovací mezeře rov. (9).

$$l_d = \sqrt{R \cdot (h_0 - h_1)} \quad (9)$$

Tab. 2 Kontaktní délka
Tab. 2 Contact length

Exp. (mat.)	Teoretická kontaktní délka l_d [mm]	Kontaktní délka z pin senzoru l_d' [mm]	Rozdíl $l_d' - l_d$ [mm]
C1 hliník	6,4	10,5	4,1
C2 hliník	7,4	11,4	4
H7 uhlíková ocel	14,0	15,6	1,6
H8 uhlíková ocel	18,6	21,0	2,4

Kontaktní délka pásma deformace odvozena z měření pomocí pinu vykazuje rozdíl asi 4 mm při válcování za studena a 2 mm při válcování za tepla oproti teoretické délce pásma deformace. Toto může být způsobeno nerovnoměrnou deformací pinu a válce vlivem přítomnosti dutiny, kdy se pin dostává do kontaktu dříve než plný válec.



Obr. 12 Válcování za tepla - Hustota tepelného toku ve válcovací
mezéře z inverzní úlohy

Fig. 12 Hot rolling - Heat flux in the roll gap

Vypočtená hustota tepelného toku (obr. 12) působí přibližně na 5x větší ploše válce než je fyzická velikost válcovací mezery (obr. 11). Celkové množství tepla přeneseného přes válcovací mezeru během jedné otáčky válce je však zachováno. Pro korektní použité okrajové podmínky v modelech je proto třeba vypočítat ekvivalentní hustotu tepelného toku působícího na skutečné délce válcovací mezery.

Závěr

Při měření sil docházelo k postupnému zanášení prostoru mezi pinem okolím a k degradaci měření tečných napětí. Tento efekt je patrný zvláště u válcování za tepla, kdy přítomnost oxidů způsobuje postupné zanášení lůžka pro měřicí element (pin). U válcování za studena, které bylo provedeno nejdříve, byla mezera okolo pinu čistá.

I přes jisté komplikace u obou senzorů bylo měření úspěšné. Jednou z výjimečností tohoto měření byla schopnost simultánně měřit podmínky ve válcovací mezéře, teplotní i silové. Aplikace piezoelektrického snímače sil zjednodušilo návrh měření pomocí pinu a vykazovalo skvělou citlivost.

Poděkování

Výsledky tohoto projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) byly získány za finančního přispění MŠMT v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

Literatura

- [1] SPUZIC, S., STAFFORD, K. N., SUBRAMANIAN, C., Wear of hot rolling mill rolls: an overview. *Elsevier Science S. A.*, 1994
- [2] NYAHUMWA, C. The evolution of a cantilever sensor to measure normal and frictional forces in the roll gap during cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, 1996
- [3] PIETRZYK, M., LENARD, J.G. Thermal-mechanical modelling of the flat rolling process, *Springer-Verlag*, New York 1991
- [4] KOTRBACEK, P., RAUDENSKÝ, M., HORSKÝ, J., POHANKA, M., Experimental study of heat transfer in hot rolling, *Revue de Métallurgie - Cahiers d'Informations Techniques* 2006,103(7-8),333-41.
- [5] BECK, J.V., BLACKWELL, B., CLAIR, CH. R. ST., Inverse heat conduction: ill-posed problems. *Wiley-Interscience*, New York 1985.
- [6] RAUDENSKÝ, M., Heat Transfer Coefficient Estimation by Inverse Conduction Algorithm, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, 1993, No. 3, pp. 257-266
- [7] POHANKA, M., HORSKÝ, J. Inverse Algorithms for Time Dependent Boundary Reconstruction of Multidimensional Heat Conduction Model. In: *Seminar of Thermophysics 2007*, Bratislava: October, 2007, Slovakia, pp. 14-23
- [8] LUKS, T., HORSKÝ, J., NILSSON, A., JONSSON, N-G. LAGERGREN, J., Contact stress distribution and roll surface temperatures in the roll gap analyzed with different sensors, *La Metallurgia Italiana*, 2014, 01, 17-23