Experimentální Analýza Napětí 2007

STRAIN-GAUGE MEASUREMENT OF ROLL TORQUES DURING SMALL-SECTION HOT-ROLLING

TENZOMETRICKÁ MĚŘENÍ KROUTICÍCH MOMENTŮ VÁLCŮ PŘI VÁLCOVÁNÍ JEMNÝCH PROFILŮ ZA TEPLA

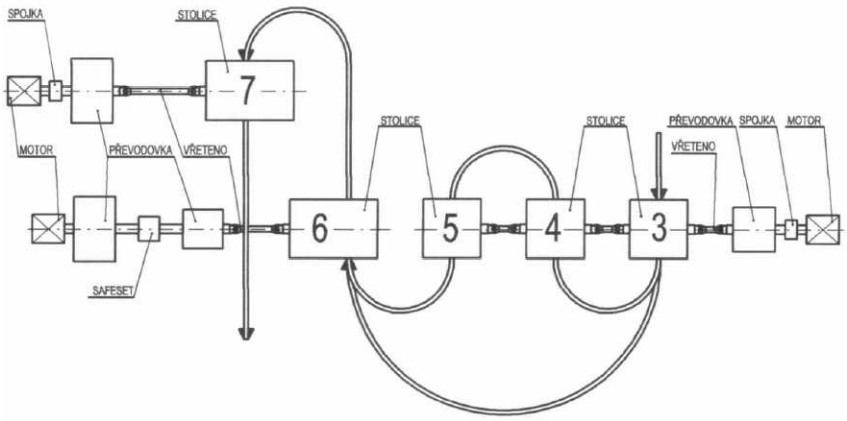
Radim Halama[1], Pavel Macura[2], František Fojtík[3]

Abstract: *The paper describes the possibilities of determination of torques during small-section milling on 6th and 7th stand. The first part deals with the realized strain-gauge measurement on two rolling-mills of the small section production line. The measured course of torques will consequently serve to judge the usability of the driving mechanism of both stands. In case of certain profiles obtained maximums in courses of torques overstepped allowed limit which can be transmitted by safety clutch what caused frequent interruptions in the run of rolling-line. Results for certain profiles shows that it is suitable to perform a new calibration of roller.*

Keywords: *Roll torque, strain-gauge measurement, rolling*

1. Úvod

Článek popisuje možnosti stanovení krouticích momentů při válcování jemných profilů. Na základě požadavků z praxe bylo provedeno měření krouticích momentů na 6. a 7. válcovací stolici hotovního pořadí viz obr. 1 v provozu při válcování za tepla. Měření bylo provedeno pro 7 profilů dle výběru z aktuálního sortimentu zadavatele a bylo realizováno za účelem určení skutečné velikosti okamžitých krouticích momentů na obou válcovacích stolicích. Naměřený průběh krouticích momentů mohl zadavateli následně sloužit k posouzení použitelnosti hnacího ústrojí obou válcovacích stolic.



Obr. 1. Schéma uspořádání válcovacích stolic

[1] Ing. Radim Halama, Ph.D., VŠB-TU OSTRAVA, FS, Katedra pružnosti a pevnosti, Tř. 17.listopadu 15, 708 33 Ostrava, tel.: +420 597323495, e-mail: radim.halama@vsb.cz

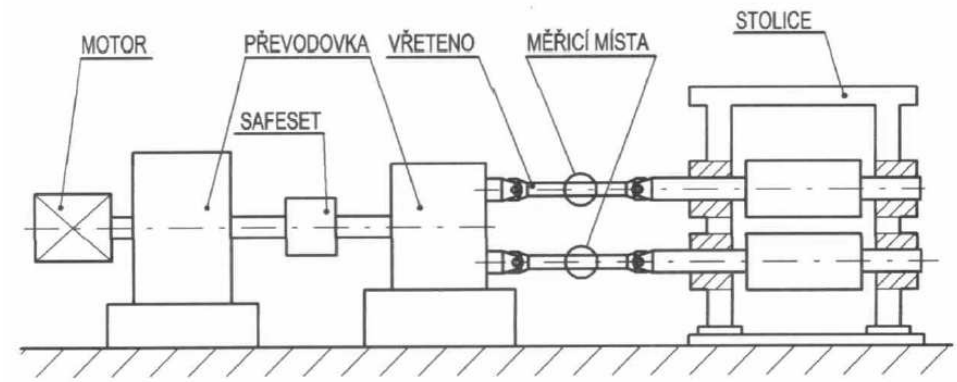
[2] prof. Ing. Pavel Macura, DrSc., VŠB-TU OSTRAVA, FS, Katedra pružnosti a pevnosti, Tř. 17.listopadu 15, 708 33 Ostrava, tel.: +420 597323598, e-mail: pavel.macura@vsb.cz

[3] Ing. František Fojtík, VŠB-TU OSTRAVA, FS, Katedra pružnosti a pevnosti, Tř. 17.listopadu 15, 708 33 Ostrava, tel.: +420 597323292, e-mail: frantisek.fojtik@vsb.cz

2. Způsob měření

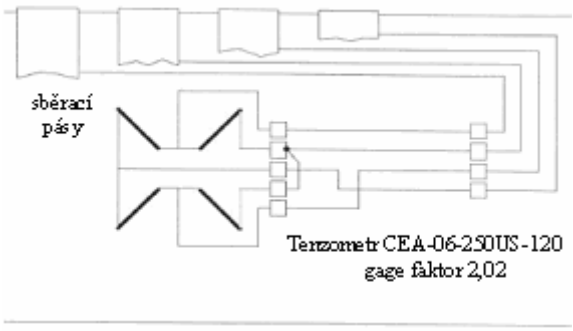
2.1 Umístění a zapojení tenzometrů

Pro měření krouticích momentů byla zvolena tenzometrická metoda s kontaktním přenosem měřených signálů z rotujících součástí. Měření krouticích momentů se prováděla na spojovacích vřetenech mezi převodovkami a válci, aby se zjistilo i případné nerovnoměrné rozložení celkového krouticího momentu na horní a spodní válec válcovací stolice. Měřicí místa na válcovací stolici 6. jsou patrná z obr. 2. Na každé vřeteno byly nalepeny čtyři tenzometry na společné podložce typu CEA – 06 – 250US – 120 od firmy VISHAY. Tenzometry byly zapojeny do plného mostu, čímž byl kompenzován vliv teploty i případného ohybového a tahového namáhání vřetene.



Obr. 2. Schéma 6. válcovací stolice

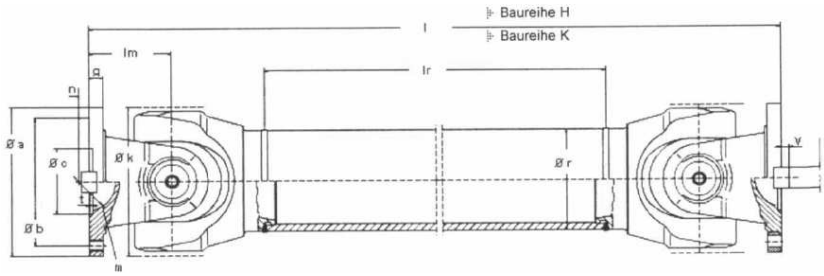
Způsob zapojení tenzometrů je znázorněn na obr. 3. Napájení tenzometrů a výstupní signál z tenzometrického mostu byl z rotujícího vřetene přenášen přes čtyři sběrací kroužky, zalité v připevněném gumovém pásu, a speciální luky z drátů, spojené kabely s měřicí ústřednou.



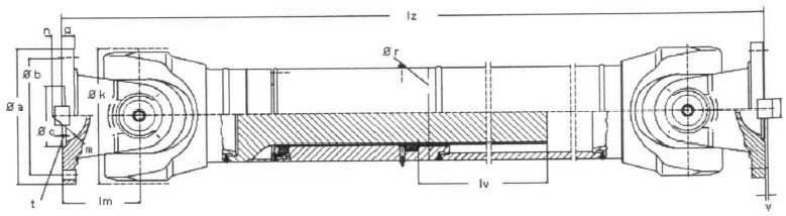
Obr. 3. Zapojení tenzometrů

2.2 Princip kalibrace

Vřetena válcovacích stolic nelze zpravidla mechanicky kalibrovat, proto se provádí měření krouticích momentů na základě teoretických výpočtů podle nauky o pružnosti a pevnosti dle [1]. K těmto výpočtům je nutno znát přesné rozměry vřeten, na kterých jsou tenzometry nalepeny. Válcovací stolice 6. má vřetena typu $WF\ 225.8$ od firmy WOITH, jenž je schématicky znázorněno na obr. 4, válcovací stolice 7. má vřeteno typu $WTL\ 225.8$ rovněž od firmy VOITH znázorněné obr. 5. Vnější průměry obou typů vřeten jsou stejné a rovny $D = 152{,}4\ mm$. Tloušťka trubkových částí vřeten je $t = 14{,}2\ mm$. Vnitřní průměr trubky lze tedy dopočíst, tzn. $d = 124\ mm$.



Obr. 4. Vřeteno typu *WF* 225.8



Obr. 5. Vřeteno typu *WTL* 225.8

Dle specifikace v katalogu výrobce přenese vřeteno *WTL* 225.8 maximální krouticí moment $M_K = 27\ kNm$. Při tomto krouticím momentu je maximální smykové napětí na vnějším povrchu trubky v místě nalepení tenzometrů rovno

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{27.10^6}{3{,}9.10^5} = 69\ MPa, \tag{1}$$

$$W_k = \frac{\pi}{16D}\left(D^4 - d^4\right) = \frac{\pi}{16.152{,}4}\left(152{,}4^4 - 124^4\right) = 390399\ mm^3. \tag{2}$$

Takováto napětí jsou tenzometrickou metodou dobře měřitelná. Ovšem v případě měření krouticích momentů menších než $1\ kNm$, kdy napětí jsou na úrovni $2\ MPa$, je přesnost měření snížená vzhledem k možným šumům.

Tenzometry dle obr. 3 jsou nalepeny pod úhlem 45° vzhledem k podélné ose vřetene, tudíž ve směru působení hlavních napětí a hlavních poměrných deformací. Podle nauky o pružnosti a pevnosti a tenzometrie potom platí mezi krouticím momentem M_k a hlavními deformacemi vztah

$$M_k = W_k \frac{E}{4(1+\mu)}\varepsilon. \tag{3}$$

Pro číselné vyjádření krouticího momentu M_k z rovnice (3) je nutno znát materiálové konstanty vřeten, tedy modul pružnosti v tahu E a Poissonovo číslo μ. Pro zvolené hodnoty, obvyklé u ocelí, $E = 2.10^5 MPa$ a $\mu = 0{,}3$ lze pak z rovnice (3) získat relaci pro výpočet krouticího momentu ze změřených deformací

$$M_k = 3{,}9.10^5 \frac{2.10^5}{4(1+0{,}3)}\varepsilon = 1{,}5.10^{10}.\varepsilon \quad [Nmm]. \tag{4}$$

Při měření byly používány jednotky pro deformace obvyklé v tenzometrii, tzn. mikrostrainy (μS), což jsou $\mu m/m$. V takovém případě přejde rovnice (4) na tvar

$$M_k = 15.\varepsilon\,[Nm] = 0{,}015.\varepsilon\,[kNm]. \tag{5}$$

Při tenzometrických měřeních se ve skutečnosti měří změna elektrického odporu vodičů tenzometrů, viz [1], která je přímo úměrná změně poměrné deformace. V praxi tedy změříme poměrné deformace ve směru nalepení tenzometrů ε a pomocí rovnice (5) vypočteme působící krouticí moment na vřeteno.

2.3 Záznam měřených veličin

Záznam měřených krouticích momentů se prováděl na šestnáctikanálové měřicí ústředně PORT 2000 firmy DEWETRON. Využity byly čtyři kanály, osazené kartami pro tenzometrická měření. Signál z měřicí aparatury byl zpracován pomocí dvou vlastních programů vytvořených v jazyce DASYLAB. První program sloužil ke sledování měřených veličin během instalace a přípravy měření, druhý program umožňoval kromě sledování i záznam měřených krouticích momentů. Sledování i záznam měřených veličin se uskutečnil v souřadnicových systémech s reálným denním časem na vodorovné ose a krouticím momentem (měřeným v kNm) na ose svislé. Záznam v reálném čase umožnil následné srovnání výsledků měření se současným měřením elektrických veličin pohonů válcovacích stolic a z nich vyhodnocených celkových krouticích momentů motorů 6. a 7. válcovací stolice.

3. Výsledky měření

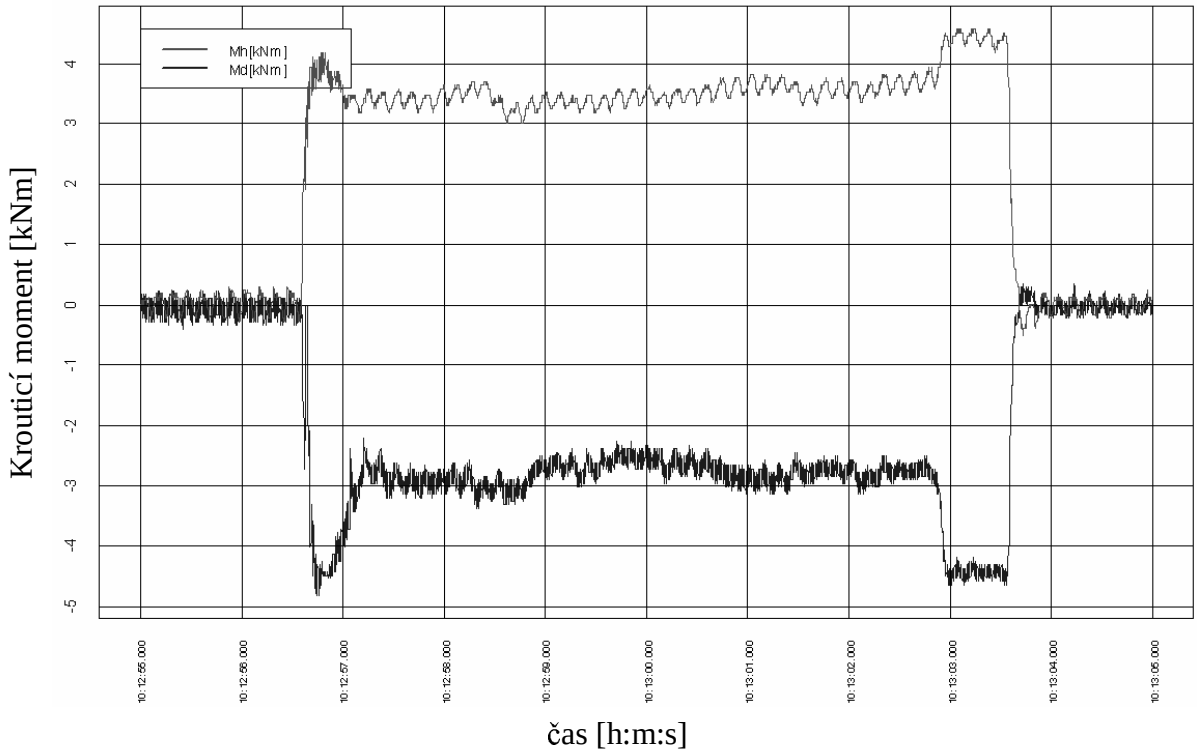
Zadavatelem bylo požadováno měření a vyhodnocení krouticích momentů pro deset válcovaných kusů z každého vybraného sortimentu. Měření bylo provedeno celkem pro 7 různých profilů – 3 ploché profily, 2 čtvercové profily, 1 kruhový profil a 1 úhelník. Výsledky budou prezentovány pouze pro případ válcování čtvercového profilu 20x20 mm. Rozměry a kalibrace válců u daného profilu nebudou vzhledem k přání zadavatele uváděny. Výsledky měření jsou přehledně shrnuty v tabulce 1, ve které jsou válcované kusy označovány pořadovými čísly a časy, ve kterých proběhl nápich do 6. válcovací stolice. Pokud nejdou pořadová čísla přesně za sebou, nebyly provalky s chybějícími pořadovými čísly měřeny. Takovéto označení měřených provalků umožnilo srovnání výsledků měření se současně probíhajícím měřením elektrických parametrů pohonů 6. a 7. válcovací stolice, které prováděla nejmenovaná soukromá firma, přímo na motoru pohonu obou válcovacích stolic. Toto souběžné měření celkového krouticího momentu bylo založeno na měření proudových charakteristik motoru v průběhu válcovacího procesu na obou stolicích.

Provalek		6. stolice						7. stolice					
		Mh [kNm]		*Md* [kNm]		*Mc* [kNm]		*Mh* [kNm]		*Md* [kNm]		*Mc* [kNm]	
		stř.	max	stř.	max	stř.	max	stř.	max	stř.	max	stř.	max
1	10.12.56	3,77	4,67	3,24	4,83	7,01	9,27	2,6	3	1,63	1,88	4,23	4,88
2	10.21.08	3,6	4,7	3,15	5,45	6,75	10,15	2,55	3,1	1,5	1,82	4,05	4,6
3	10.23.38	4	4,8	3,8	5,05	7,8	9,85	2,8	3,25	1,5	1,93	4,3	5
4	10.29.31	3,8	4,7	4,55	5,3	8,35	10	2,75	3,6	1,55	2,35	4,3	5,95
5	10.33.16	3,5	4,1	4,1	5	7,6	9,1	2,86	3,46	1,78	2,35	4,64	5,81
6	10.33.53	3,6	4,7	4,3	5,15	7,9	9,85	2,65	3,15	1,5	2,3	4,15	5,45
7	10.34.26	3,85	4,7	4,15	4,9	8	9,6	2,7	3,1	1,72	2,17	4,42	5,27
8	10.34.57	3,7	4,75	4	4,95	7,7	9,7	2,85	3,2	1,73	2,2	4,58	5,3
9	10.35.31	3,65	4,9	4	4,95	7,65	9,85	2,8	3,3	1,63	2,24	4,43	5,54
10	10.36.03	3,6	4,35	4,1	4,9	7,7	9,25	2,9	3,2	1,7	2,18	4,6	5,38

Tabulka 1 Naměřené hodnoty krouticích momentů pro čtvercový profil 20x20 mm

V tabulce 1 jsou uvedeny vyhodnocené krouticí momenty na všech čtyřech měřených vřetenech, a to jednak jejich střední hodnoty během válcovacího procesu, jednak jejich maximální hodnoty. Tato maxima byla většinou na začátku nebo na konci válcování v důsledku studených konců, někdy se však vyskytla i během ustáleného válcovacího procesu. V tabulce jsou rovněž vyhodnoceny celkové součtové krouticí momenty *Mc* (získané součtem aktuálních hodnot krouticího momentu na horním *Mh* a dolním vřetenu *Md*), a to jak jejich střední hodnoty, tak i hodnoty maximální. Maxima krouticích momentů na spodním a horním vřetenu nenastala vždy ve stejném časovém okamžiku, proto nejsou celkové maximální krouticí momenty prostým součtem maxim horního a spodního vřetene.

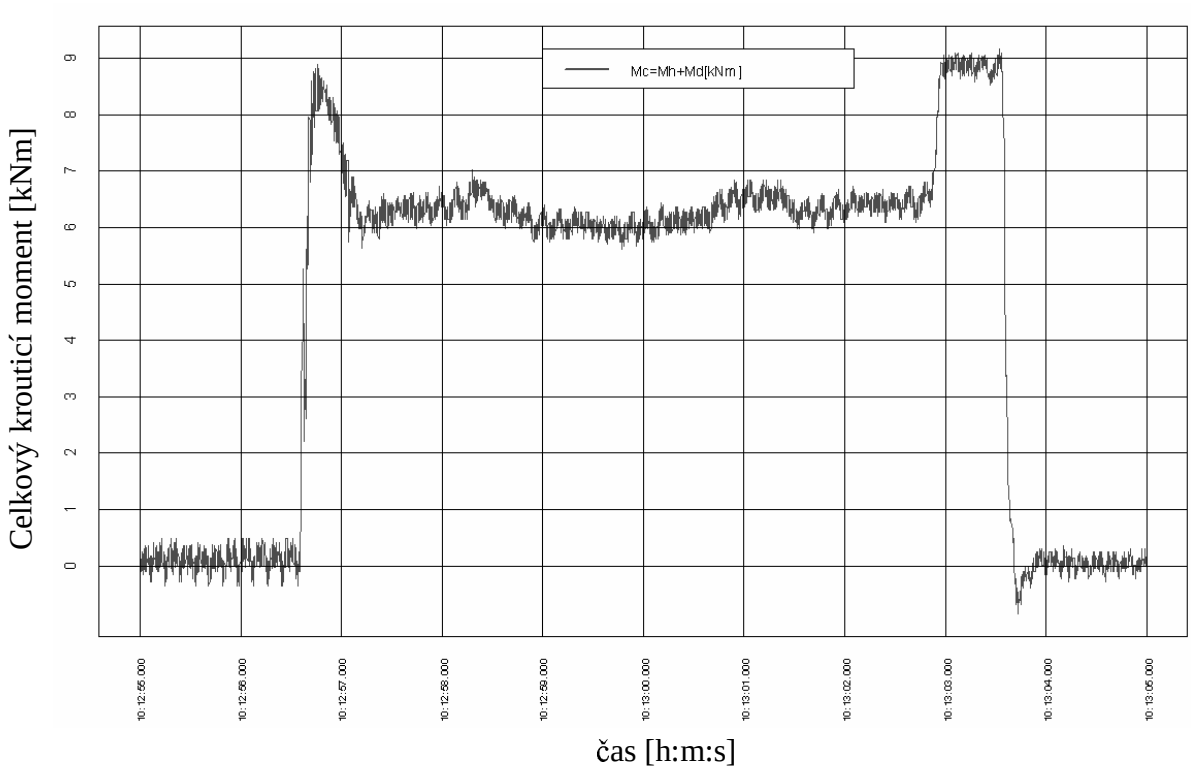
Prezentovaný případ válcování čtvercového profilu 20x20 mm byl vyhodnocen jako nejvíce zatěžující případ pro 6. válcovací stolici, u 7. válcovací stolice byl nejkritičtějším případem profil L 40x3 mm, viz [2]. Změřený průběh krouticího momentu na horním *Mh* a dolním vřetenu *Md*) pro čtvercový profil je vidět na obr. 6.



Obr. 6 Průběh krouticích momentů na horním a dolním vřetenu stolice 6 u provalku 1

V ukázkovém případě je momentové zatížení 6. stolice poněkud větší než u 7. stolice. U všech ostatních měřených profilů vyjma kruhového bylo momentové zatížení 6. stolice menší než u 7. stolice. Velmi zajímavé je zjištěné rozložení krouticích momentů potřebného pro válcování mezi horní a spodní vřeteno. Je patrné, že průběh krouticích momentů byl přibližně stejný co se týče tvaru i velikosti. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena symetričností válcovaného profilu, což je v kontrastu s případem válcování úhelníku [2], kdy bylo horní vřeteno dvojnásobně více zatíženo než dolní.

Průběh celkového součtového momentu (*Mc*), získaného součtem aktuálních hodnot krouticího momentu na horním vřetenu *Mh* a krouticího momentu na dolním vřetenu *Md*, pro prezentovaný případ čtvercového profilu je zřejmý z obr. 7.



Obr. 7 Průběh celkového krouticího momentu u stolice 6 pro provalek 1

4. Závěr

V příspěvku je shrnuta metodika stanovení krouticích momentů v průběhu válcovacího procesu na válcovacích stolicích hotovního pořadí 6 a 7. Výsledky měření po vyhodnocení jednotlivých válcovaných profilů přinesly celou řadu zajímavých údajů o rozložení krouticích momentů na jednotlivých vřetenech během válcovacího procesu na obou válcovacích stolicích. Měření bylo celkově provedeno pro 7 různých profilů. V článku jsou uvedeny průběhy krouticích momentů naměřené u čtvercového profilu 20x20 mm, kdy byl přetěžován pohon 6. válcovací stolice. U 7. válcovací stolice byl shledán kritickým případ válcování úhelníku [2]. Při válcování tohoto profilu docházelo k vypínání pojistné hydraulické spojky tzv. SAFESETU, který chrání pohon válcovací stolice před zničením z přetížení, z čehož plyne, že hodnoty krouticího momentu naměřené při vypnutí SAFESETU překračují dovolenou konstrukční mez a je třeba upravit kalibraci jednotlivých válců.

Protože se u všech měřených profilů jedná o vícenásobné válcování, tedy na několika válcovacích stolicích, bylo by stanovení krouticích momentů pomocí numerických metod velmi obtížné [4]. Důvodem je zejména nutnost implementace nejnovějších modelů plasticity do výpočetního software, např Ansysu [3],. V současnosti již existují přístupy, uvažující vliv anizotropie a nelineárního zpevnění (např. [5]) pro popis napěťově deformačního chování ocelí v plastické oblasti, přesto se stále hledají přesnější matematické modely. Stav poznání v této oblasti dosud nelze považovat za uspokojivý a je tedy výhodné použít experimentální řešení.

Poděkování: Příspěvek byl podpořen grantovým projektem FRVŠ 252/2007/F1/a.

Literatura

[1] Macura, P.: *Experimentální metody v pružnosti a plasticitě*. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2001.

[2] Fojtík, F., Poruba, Z., Halama, R., Macura, P., Hrabec, J.: *Experimentální a numerické stanovení krouticích momentů válců při válcování jemných profilů za tepla*. Proceedings, 8th International Applied Mechanics Conference, 2006.

[3] Halama, R, Fusek, M.: *Modifikace modelu cyklické plasticity s ohledem na multiaxiální ratcheting, část II. Implementace v programu Ansys.* Proceedings, 7th International Applied Mechanics Conference, 2005.

[4] Duan, X., Sheppard, T.: *Three dimensional thermal mechanical coupled simulation during hot rolling of aluminium alloy 3003*. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44, 2155-2172.

[5] Francois, M.: *A general cyclic plasticity model taking into account yield surface distortion for multiaxial ratchetting*. International Journal of Plasticity, 2004, 20, 1817-1850.