

**EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU PRO URČENÍ
ENERGOSILOVÝCH PARAMETRŮ PŘI UVOLŇOVÁNÍ PROVALKŮ
Z MEZERY MEZI VÁLCI**

**EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE CALCULATION MODEL FOR THE
DETERMINATION OF ENERGY-FORCE PARAMETERS AT RELEASING THE
ROLLING STOCKS FROM THE GAP BETWEEN ROLLERS**

Ladislav Hrabec¹

Abstract:

The hot rolling of heavy plates is, from time to time, affected by failures, for example the periods of idleness of electric drives, when a so-called jamming of rolls appears. During this time, the working rolls are subject to considerable heat stress and their destruction may occur. One of possibilities how to prevent losses is „reversing“ from the gap between the rolls using the reverse drive of the rolling mill.

The calculation of torsional moments and rolling forces in the course of the reversing operation relates to forcing the rolls into materials during the failure. The calculation method for the determination of releasing torsional moments and the rolling force, which has been experimentally verified in the laboratory and has been applied to the releasing the „jammed“ rolls of the four-high rolling mill 3,5 m in Vítkovice, joint-stock company, is the content of the contribution.

Použitá označení

h_0	- vstupní tloušťka válcovaného materiálu	[mm]
h_1	- výstupní tloušťka válcovaného materiálu	[mm]
s_0	- mezera mezi válci	[mm]
F	- válcovací síla	[kN]
M	- válcovací moment	[N.m]
K	- tuhost válcovací stolice	[N.m ⁻¹]
R	- poloměr válců válcovací stolice	[mm]
l_d	- délka oblouku záběru	[mm]
ψ	- koeficient ramene výslednice válcovací síly	[-]

¹ Ing. Ladislav Hrabec, Ph.D.

Fakulta strojní - katedra výrobních strojů a konstruování
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
tř. 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba
tel. / fax: 069/699 4600, e-mail: ladislav.hrabec@vsb.cz

Úvod

Odstranit vývalek z mezery mezi válci v případě poruchy přívodu elektrické energie, nebo i z jiných důvodů, je důležitý úkol zejména při válcování za tepla. Může totiž v nepříznivém případě dojít při nesymetrickém tepelném namáhání válce k jeho zlomení.

V praxi lze tento problém řešit různě. Jedno z řešení, které zabezpečí v krátké době uvolnění vývalku z mezery mezi válci, spočívá "ve vycouvání vývalku", tedy v otáčení válců opačným směrem vzhledem ke směru, při němž došlo k poruše. Toto řešení vyžaduje, aby válcovací stolice byla vybavena pomocným pohonem, který bude energeticky napájen z jiného zdroje než pohon válcovací stolice.

Návrh pomocného pohonu však vyžaduje znalost alespoň krouticího momentu, který je nutné přivést k válcům za účelem jejich uvolnění. Úkolem určit velikost tohoto uvolňovacího krouticího momentu výpočtem se zabývá tento příspěvek.

1. Experimentální studium uvolňování vývalku z mezery mezi válci

Práce na experimentální válcovací stolici kvarto s průměrem pracovních válců $\phi 67$ mm byly provedeny za účelem vytvoření si fyzikální představy o válcování, při němž dojde k poruše (1 fáze válcování) a uvolnění válcovaného materiálu z mezery mezi válci se uskuteční otáčením válců v opačném směru (3 fáze válcování). Zkušební válcovací stolice byla vybavena tenzometrickým měřením krouticího momentu na obou válcích a rovněž tenzometrickým měřením válcovací síly na pravém i levém stavěcím šroubu. Experiment byl naplánován tak, že se uskutečnilo celkem 90 měření na vzorcích z hliníkových a olověných pásků širokých od 50 do 90 mm.

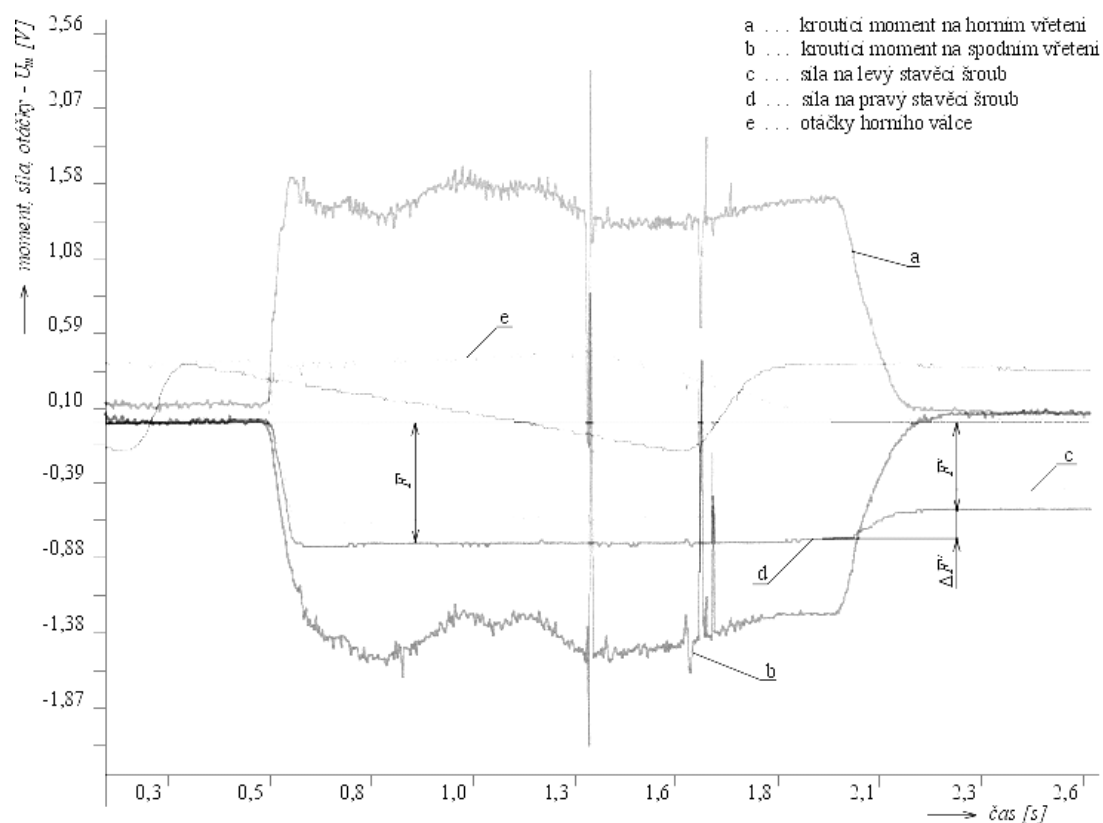
Typický příklad jednoho z provedených záznamů je zřejmý z *obrázků 1.a, 1.b*. Studium všech obdobných záznamů bylo zjištěno:

- během řádného válcování (fáze 1 na *obrázku 2*) naběhly obě síly (na *obrázku 1.a* průběhy „c“, „d“) na určitou hodnotu a zůstaly konstantní (F),

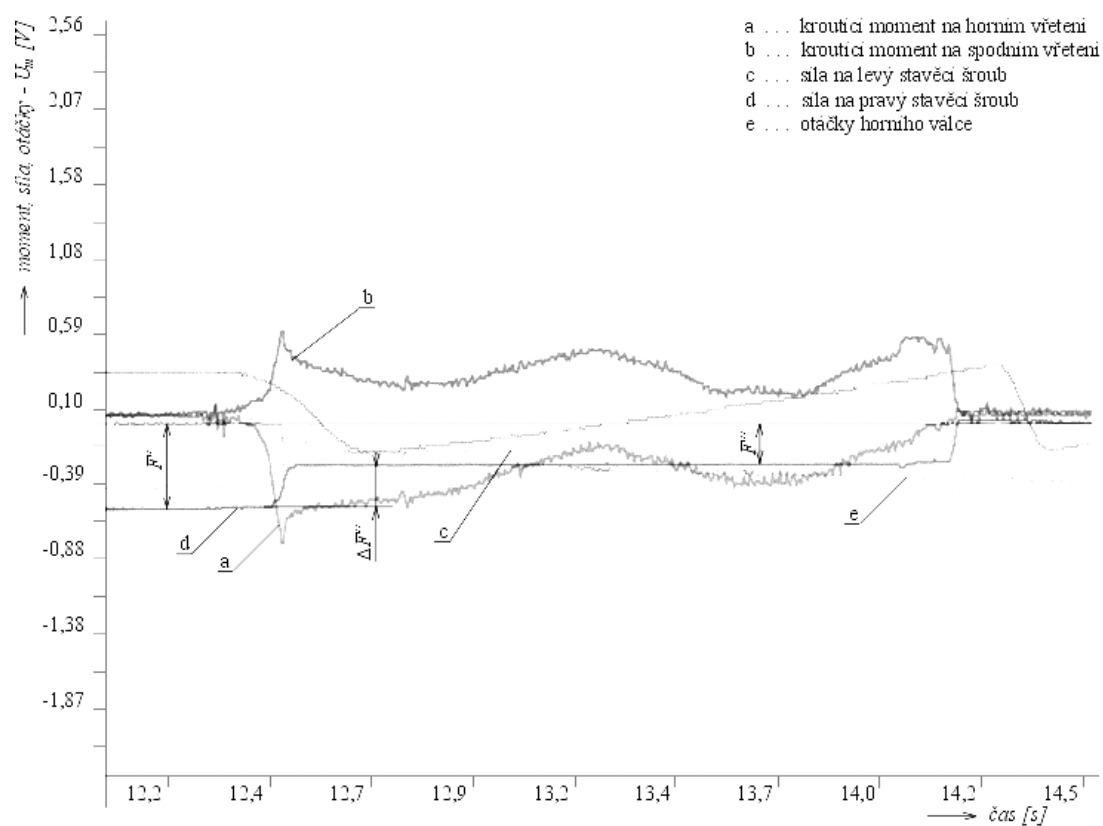
- po zastavení otáčení válců (na *obrázku 1.a* průběh „e“ - otáčky válců) došlo během asi 0,1 sekundy k poklesu válcovacího momentu na nulovou hodnotu a ke zmenšení válcovací síly F na velikost F' , tedy ke změně $\Delta F' = F - F'$,

- poté nastala druhá fáze děje, to je 9 až 11 sekund stání, která mimo jiné souvisela s nutnými operacemi pro reverzaci směru otáčení válcovací stolice. Během této fáze (*obrázek 1.a* a začátek záznamu v *obrázku 1.b*) nedošlo ke změně síly F' a válcovací moment zůstal nulový,

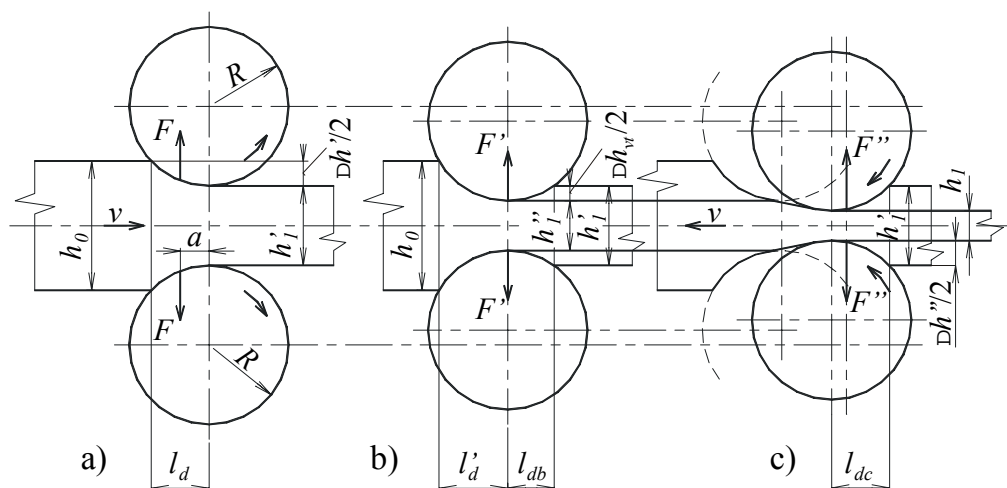
- během třetí fáze probíhalo zpětné válcování – uvolňování válcovací stolice. Z *obrázku 1.b* vyplývá, že během velmi krátké doby (0,04 až 0,05 s) došlo k nárůstu a pak k poklesu válcovacího momentu při zpětném válcování a dále pak ve stejné době k poklesu síly F' (tato svírala válcovaný vzorek po celou dobu stání válcovací stolice) na hodnotu F'' , která se pak opět neměnila až do konce válcování - vyběhnutí vývalku ze stolice. Pokles síly F' činí $\Delta F'' = F' - F''$.



Obr. 1.a Záznam měření prováděného na experimentální stolici



Obr. 1.b Pokračování záznamu měření prováděného na experimentální stolici



Obr. 2 Změny tloušťky materiálu a válcovacích sil v jednotlivých fázích experimentu:
a) fáze 1 - válcování
b) fáze 2 - stání, reverzace směru otáčení válců stolice
c) fáze 3 - zpětné válcování

Diskuse k získaným výsledkům (na základě obrázku 2):

- první pokles válcovací síly F při zastavení stolice o $\Delta F'$ (obrázek 1.a a obrázek 3) souvisí s vtlačení válců do vývalku asi během 0,1 sekundy, což si lze vysvětlit tím, že kontakt válců za rotace s materiálem vyžaduje zejména s ohledem na součinitele vnějšího i vnitřního tření větší sílu F ke změně tloušťky, než je tomu za klidu (válce se neotáčejí – rameno výslednice válcovací síly F' je $a = 0$),

- druhý pokles válcovací síly z hodnoty F' na F'' (obrázek 1.b a obrázek 3) na počátku zpětného válcování souvisí s tím, že během vtlačování válců do materiálu na konci první fáze se zvětšila délka deformační zóny z velikosti l_d na velikost $l'_d + l_{db}$ (viz obrázek 2.b), čímž se zvětšila také styková plocha válců s materiálem. V okamžiku zahájení zpětného válcování dojde opět ke změně délky deformační zóny z velikosti $l'_d + l_{db}$ na velikost l_{dc} (obrázek 2.c), což znamená zmenšení plochy kontaktu válců s materiálem a tedy i zmenšení válcovací síly na hodnotu F'' (za předpokladu, že se nezměnil deformační odpor materiálu) doprovázené současně i změnou tloušťky z h'_1 na h_1 ,

- všechny změny sil souvisí s velikostí válcované tloušťky a také s tím, že stolice se v těchto případech chová jako předepjatá pružina o určité tuhosti,

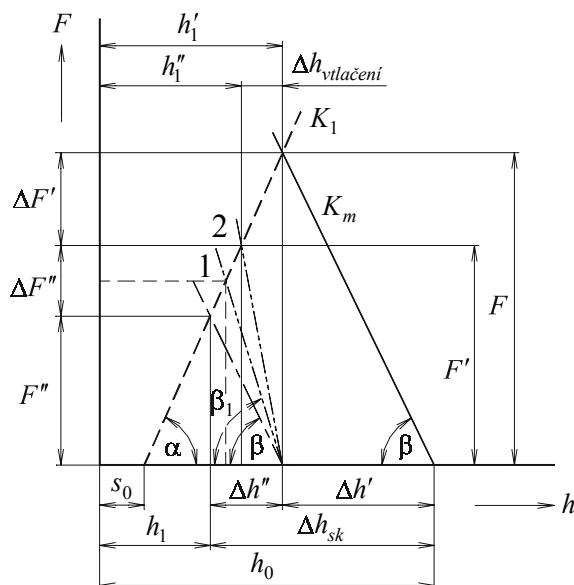
- pro podrobnou fyzikální představu o ději, který probíhá v případě zpětného válcování, je nutné doplnit obrázek 2, který znázorňuje všechny tři fáze experimentu po stránce silové i velikostí válcovaných tlouštěk, řešením rovnic Golovina a Simse (vztahy 1 a 2).

$$h_1 = s_0 + s_{st} = s_0 + \frac{F_1}{K_1} \quad 1$$

$$F_1 = f(h_1) \quad 2$$

2. Matematický model určení sil a kroutících momentů na válcích při uvolňování vývalků z mezery mezi válci zpětným válcováním

Fyzikální představa o tom, co probíhá v jednotlivých fázích válcování a uvolňování vývalku je znázorněno na *obrázku 2.a,b,c*. Tuto představu lze doplnit graficko-analytickým i matematickým řešením s použitím soustavy rovnic 1 a 2. *Obrázek 3* vyjadřuje závislost $F = f(h_1, K_m, K_1)$ a navazuje označením sil i tloušťek provalku na *obrázku 2.a,b,c*. K této fázi a – *obrázku 2.a* se vztahují parametry F , h_1' , $\Delta h'$, k fázi b – *obrázek 2.b* – $\Delta F'$, F' , h_1'' , k fázi c – *obrázek 2.c* – F'' , h_1 , $\Delta F''$ a $\Delta h''$. Ve fázi c, to je při zpětném válcování (vycouvání vývalku), se válcuje tloušťka h_1' na tloušťku h_1 , proto je provedena v *obrázku 3* rovnoběžka s charakteristikou tuhosti materiálu K_m (je závislá na vnějším tření a šíření při válcování, vlivu vnějších zón deformace, stupni deformace, rychlosti deformace a chemickém složení materiálu a také na napěťovém stavu a teplotě materiálu). Z místa, které znázorňuje velikost tloušťky h_1' (viz čerchovanou čáru pod úhlem β), se úběrem získá tloušťka h_1 při válcovací síle F'' , která představuje sílu F' zmenšenou o $\Delta F''$.



Obr. 3 Určení válcovací síly - graf závislosti $F = f(h_1, K_m, K_1)$

2.1. Grafické určení válcovací síly a válcovacího momentu při zpětném válcování

Dvojí na sebe navazující řešení grafické řešení rovnic Golovin-Simsových ve zvoleném měřítku sil a tloušťek znázorněné na *obrázku 3* umožňuje určit velikost válcovací síly a tím i válcovacího momentu při zpětném válcování, jestliže bude předem známa charakteristika tuhosti válcovací stolice K_1 , mezera mezi válci před válcováním s_0 , válcovací síla F , kterou lze vypočítat pro parametry válcování (nebo určit jiným způsobem, např. měřením) a vstupní tloušťka válcovaného materiálu h_0 . Charakteristiku tuhostních vlastností válcovaného materiálu K_m lze nakreslit pro každý případ válcování, známe-li vstupní tloušťku h_0 a vypočteme-li nebo změříme válcovací sílu F .

Dvojím grafickým řešením rovnic 1 a 2 lze tedy získat válcovací sílu při zpětném válcování F'' a také absolutní úběr $\Delta h''$, což je kromě znalosti hodnoty součinitele ramene výslednice válcovací síly $\psi = a/l_d$ a poloměru válců R postačující pro výpočet válcovacího momentu při zpětném válcování M_u , který umožní uvolnit mezeru mezi válci válcovací stolice.

Tento válcovací moment lze určit ze vztahu [2]:

$$M_u = 2 \cdot F'' \cdot \psi \cdot l_{dc} ,$$

kde

$$l_{dc} = \sqrt{R \cdot \Delta h''} \quad \dots \quad \text{délka deformační zóny při zpětném válcování.}$$

2.2. Matematické určení válcovací síly a válcovacího momentu při zpětném válcování

Využitím *obrázku 3* lze psát následující závislosti pro celkový absolutní úběr:

$$\Delta h_{sk} = \Delta h' + \Delta h'' \quad , \quad 5$$

kde

$$\Delta h' = \frac{F}{K_m} \quad \text{a} \quad \Delta h'' = \frac{F''}{K_m} \quad 6$$

Řešením a využitím dalších závislostí odvozených pomocí *obrázku 3* lze určit válcovací sílu i úběr při zpětném válcování:

$$F'' = F \cdot \frac{\Delta h_{sk} - \Delta h'}{\Delta h'} = F \cdot \left(\frac{\Delta h_{sk}}{\Delta h'} - 1 \right) \quad 7$$

$$\Delta h'' = \frac{K_m}{K_1 + K_m} \cdot \Delta h' \quad 8$$

Po dosazení do *vzorce 3* a po úpravách dostaneme:

$$M_u = 2 \cdot K_m \cdot \psi_u \cdot \sqrt{R \cdot \left(\frac{K_m}{K_1 + K_m} \cdot \Delta h' \right)^3} \quad 9$$

Úběr $\Delta h'$ v tomto vztahu lze vyloučit, jestliže určíme dle *vztahu 3* válcovací moment M_v do okamžiku přerušení válcování, to je, když se válcovalo s tímto absolutním úběrem:

$$M_v = 2 \cdot K_m \cdot \psi_v \cdot \sqrt{R \cdot (\Delta h')^3} \quad 10$$

Dělením *rovnice 10* a *9* dostaneme po úpravě výsledný vztah pro určení válcovacího momentu při uvolňování mezery mezi válci válcovací stolice:

$$M_u = \frac{\psi_u}{\psi_v} \cdot \left(\frac{K_m}{K_m + K_1} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot M_v \quad 11$$

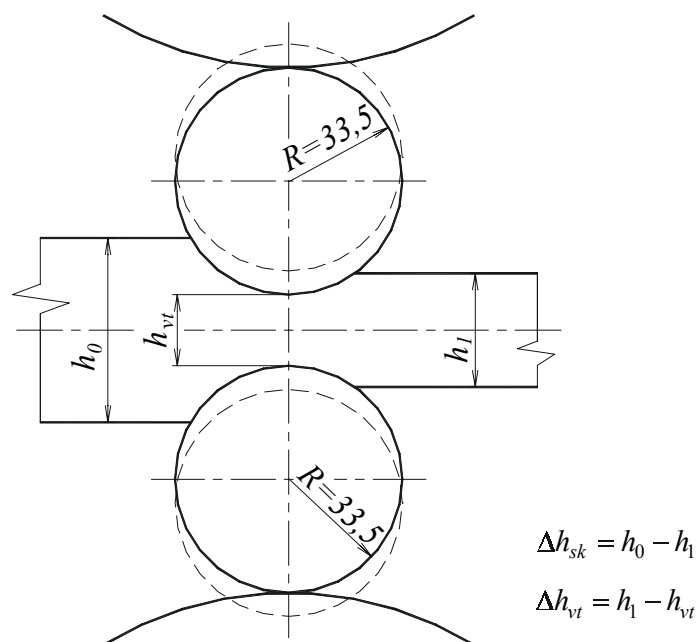
Ze vztahu vyplývá, že moment M_u při uvolňování mezery mezi válci lze určit, známe-li válcovací moment do okamžiku přerušení válcování M_v , charakteristiku tuhosti válcovací stolice K_1 , tuhostní vlastnosti materiálu K_m a poměr součinitelů ramen výslednic válcovacích sil ψ_u / ψ_v . Podrobným studiem tohoto poměru [1] bylo zjištěno, že při válcování za tepla je možné s vědomím zmenšení přesnosti výpočtu maximálně o 4% připustit

$$\frac{\psi_u}{\psi_v} = 1 \quad 12$$

3. Vtlačení válců do válcovaného materiálu po přerušení válcování

V rámci experimentu bylo také samostatně provedeno pokusné válcování na experimentální válcovací stolici kvarto $\phi 67$ mm (obrázek 4) za účelem prokázání vtlačení válců do materiálu v době přerušení válcování. K pokusu byl použit olověný pásek o tloušťce 6 mm a šířce 80 mm pro prvou sérii experimentu a hliníkový pásek o tloušťce 7 mm a šířce 50 mm pro druhou sérii experimentu. Mechanické hodnoty obou materiálů jsou následující:

- olověný vzorek - smluvní mez pevnosti R_m se pohybovala v rozmezí 12 až 13,7 MPa, a hodnota smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ v rozmezí 4,9 až 9,8 MPa,
- hliníkový vzorek - smluvní mez pevnosti R_m se pohybovala v rozmezí 76 až 80 MPa a hodnota smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ v rozmezí 41 až 53 MPa.



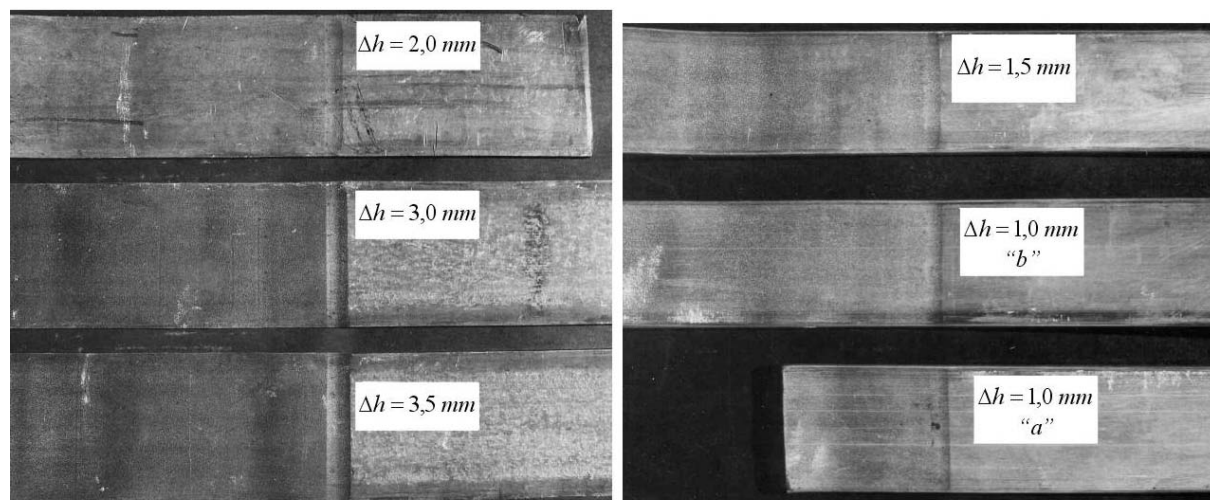
	olovo, tl. 6 mm			hliník, tl. 7 mm		
poznámka				“a”	“b”	
Δh [mm]	2,000	3,000	3,500	1,000	1,000	1,500
h_0 [mm]	5,848	5,842	5,882	7,014	7,012	7,019
h_{vt} [mm]	4,120	3,144	2,642	6,186	6,190	5,738
h_1 [mm]	4,220	3,250	2,840	6,206	6,214	5,794
Δh_{sk} [mm]	1,632	2,592	3,042	0,808	0,798	1,225
Δh_{vt} [mm]	0,100	0,110	0,198	0,020	0,024	0,056

Obr. 4 Vtlačení válců do válcovaného materiálu po přerušení válcování

O průběhu válcování i experimentu dává názorný přehled obrázek 4. U každého vzorku bylo válcování přerušeno přibližně v polovině délky vzorku (po cca 200 mm), pak následovala přestávka v době trvání 5 sekund a poté byly válce pomocí mechanismu stavění uvolněny a vzorek vyjmut z válcovací stolice.

Výsledky měření, které bylo po šířce vzorku prováděno vždy v pěti různých místech, jsou přehledně seřazeny do tabulky, jež je součástí *obrázku 4*. Hodnoty v ní uváděné jsou vždy aritmetickým průměrem ze všech pěti měření po šířce vzorku.

Na *fotografiích 1 a 2 na obrázku 5* je zřetelně vidět vtlačení válců do materiálu během přerušení válcování, a to jak u olověných vzorků pro úběr $\Delta h = 2,0$; $3,0$ a $3,5$ mm (*fotografie 1*), tak i u hliníkových vzorků pro úběr $\Delta h = 1,0$ a $1,5$ mm (*fotografie 2*).



fotografie 1

fotografie 2

Obr. 5 Fotografie vtlačení válců do válcovaného materiálu po přerušení válcování

Experimenty zjištěná skutečnost potvrzuje předpoklad, že při zpětném válcování (fáze 3 na *obrázku 2.c*) se válcuje materiál s úběrem minimálně o velikosti Δh_{vt} (viz tabulka na *obrázku 4*).

Závěr

Výzkumnými pracemi, které byly prováděny pracovníky Katedry výrobních strojů a konstruování fakulty strojní VŠB-TU, byl na základě teoretických a experimentálních prací sestaven grafický i matematický model, který umožňuje navrhnout konstrukci pohonu i elektromotor pro náhradní pohon, případně jiný náhradní zdroj otáčení pohonu pro případ poruchy při válcování, při níž zůstává horký provalek mezi válci.

Poznatky z experimentů a studium výsledků, včetně výpočtového modelu, stejně jako vyhodnocení dvanácti skutečných stehových plánů, umožnily využít získané poznatky pro konstrukční návrh pohonu zařízení pro uvolňování zaseknutých válců stolice kvarto 3,5 m v podniku Vítkovice, a. s..

Literatura

- [1] Pokorný A., Hrabec L. a další, Fyzikální a matematické modelování uvolňování provalku z mezery mezi válci zpětným válcováním, Výzkumná zpráva VŠB-TU Ostrava 1991, str. 5 až 54
- [2] Zjuzin V. I., Tretjakova A. V., Teorie prokatki, Spravočnik vyd. Metalurgija Moskva 1982, str. 271