



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THERMAL STRESSES IN GROOVED ROLL

L. Vavrečka¹, J. Petruška², J. Horský¹

Summary: *The paper deals with cooling of grooved roll. The aim is to find optimal spray parameters, specify nozzle type, geometrical configuration and feeding pressure to elongate rolls working life. The problem is solved in three successive steps. The first one is a coupled thermo-deformational FE analysis with estimated values of thermal boundary conditions, which helped to make a sensitivity analysis of the problem and suggest perspective changes in the cooling system. During the second, experimental step, real boundary conditions were obtained for selected cooling strategy. In the third step, FE analysis was used again with realistic boundary conditions to evaluate the influence of optimized cooling system on thermal and stress fields in the grooved roll.*

1. Úvod

Príspevek se zabývá návrhem optimální konfigurace chlazení profilového válce pro válcování U-profilů. Cílem optimalizace je prodloužení životnosti válce eliminací nepříznivých stavů napjatosti, které mohou vést ke vzniku trhlin v problematických místech válce. Na základě výkresové dokumentace byl vytvořen ve výpočtovém systému ANSYS teplotně-deformační výpočtový model a byla na něm provedena citlivostní analýza napjatosti v kritických místech pro různé intenzity chlazení. Jako okrajové podmínky byly použity odhadnuté hodnoty součinitele přestupu tepla. Ze všech spočtených variant byla vybrána varianta s nejvhodnějším rozložením intenzity chlazení uvnitř kalibru, minimalizující možnost vzniku trhlin. Ta byla posléze použita jako vzor pro experimentální část, v níž bylo vyvinuto experimentální zařízení, na kterém byla ověřena účinnost nově navrženého uspořádání trysek. Z experimentu byly stanoveny realistické okrajové podmínky. Ty byly opět následně dosazeny do numerického modelu MKP, který dává reálnou představu o vlivu konkrétního studovaného způsobu chlazení na průběh rozložení teplot uvnitř profilového válce. Pomocí získaných údajů byla navržena taková konfigurace trysek, která se jeví jako optimální pro chlazení profilového válce.

¹Ing. Lukáš Vavrečka, Doc. Ing. Horský Jaroslav, CSc.: VUT v Brně, FSI, Laboratoř přenosu tepla a proudění, Technická 2896/2, 616 69 Brno, tel.: 541 143 246, e-mail: vavrecka@lu.fme.vutbr.cz

²Doc. Ing. Petruška Jindřich, CSc.: VUT v Brně, FSI, inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Technická 2896/2, 616 69 Brno, tel.: 541 14 2858. e-mail: petruska@fme.vutbr.cz

2. Výpočtová část s odhadnutými hodnotami okrajových podmínek přenosu tepla

Na základě výkresové dokumentace (obr. 1) byl vytvořen výpočtový model geometrie kalibru. Vzhledem k symetričnosti a periodickému opakování tvaru kalibru na povrchu válce byla detailně analyzována jedna symetrická polovina kalibru, jak je vyznačeno na obr. 1, s odpovídajícími okrajovými podmínkami. Síť MKP použitá pro výpočet je na obr. 2. Řešení bylo realizováno systémem ANSYS jako navazující teplotně-napětový výpočet. Nejprve tedy proběhl výpočet postupného rozvoje teplotního pole v průběhu deseti válcovacích cyklů, z nichž každý zahrnuje cca 43 sekund válcování a 10 sekund válcovací mezery, kdy dochází pouze ke chlazení válce. Celkem tedy výpočtová simulace pokrývá cca 530 sekund válcování. Průběhy spočtených povrchových teplot ukazují, že v posledních cyklech se teploty pohybují v téměř ustálených cyklech mezi špičkovými hodnotami v okamžiku styku s provalkem a minimálními hodnotami při ostřiku během chlazení.

Po teplotní analýze proběhly navazující výpočty teplotní napjatosti, pro které byla vypočtená teplotní pole použita jako vstupní hodnoty. V kritických místech pak byly vyhodnoceny časové změny významných složek napětí.

Aby bylo možno posoudit vliv různých variant chlazení, byl zmíněný úsek deseti válcovacích cyklů o délce 530 sekund řešen ve čtyřech variantách, které se vzájemně liší různou intenzitou chlazení jednotlivých částí povrchu. Uvedené části jsou následující – viz obr. 2: **dno** kalibru, **bok** kalibru a **čelo** přepážky mezi kalibry. Intenzita chlazení byla odlišena odstupňovanou hodnotou součinitele přestupu tepla na jednotlivých částech povrchu, která ve třech stupních vyjadřovala:

- a) chlazení vzduchem
- b) vodní chlazení malou intenzitou – stékající voda
- c) intenzivní chlazení vodním paprskem

Chlazení u jednotlivých variant bylo uvažováno dle tab.1

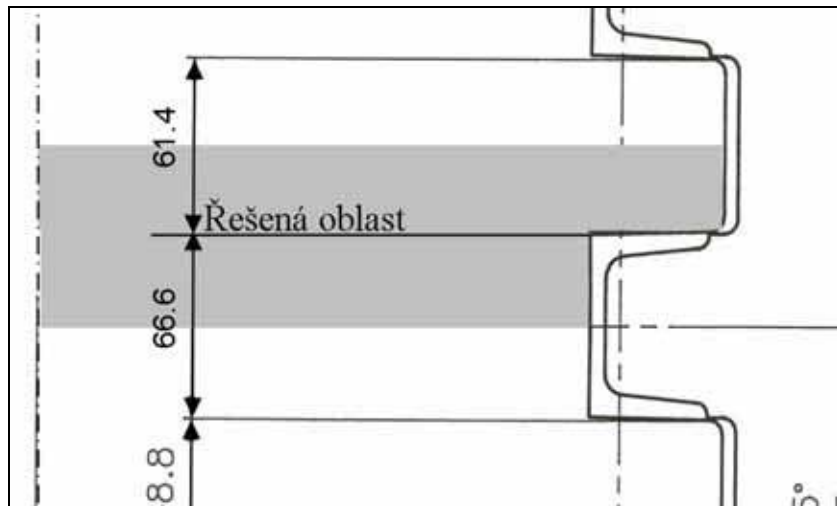
Tab.1 Řešené varianty - chlazení

Varianta č.	dno	bok	čelo
1	c	b	a
2	c	c	a
3	b	c	a
4	b	c	c

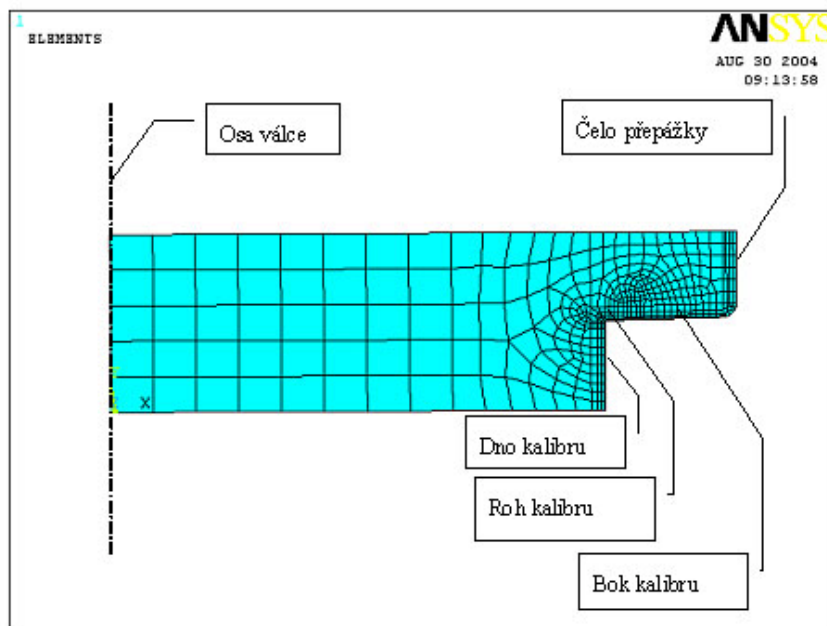
Z tabulky je patrné, že řešené varianty přecházejí od případu 1 s intenzivním chlazením dna k případům s větším chlazením boku kalibru, resp. boku a čela, tedy intenzivní chlazení celé přepážky mezi dvěma kalibry.

Na obr. 3 a, b jsou pro názornost zobrazeny časové průběhy teploty ve významných místech povrchu kalibru v deseti cyklech válcování pro varianty 1 a 4: červeně dno kalibru, fialovou barvou bok kalibru, modře roh kalibru. U všech variant je patrný postupný přechod

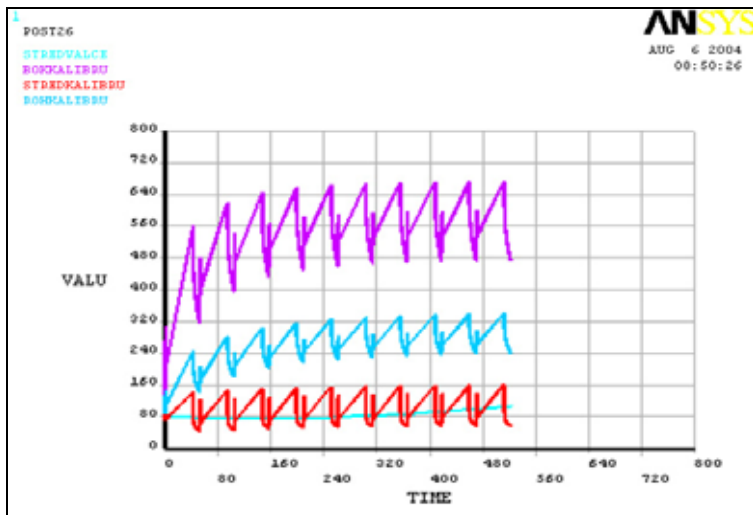
k ustálenému stavu po 5. cyklu. Velký rozdíl se projevuje v teplotě boku kalibru a celé přepážky mezi kalibry u var.1 a 4. Zatímco u 1. varianty je chlazení boku a přepážky nedostatečné a vede k relativně vysoké teplotě přepážky vůči zbytku válce, u varianty 4 se maximální teploty významně snižují jejich lokalizace se přemísťuje do oblasti pod dnem kalibru.



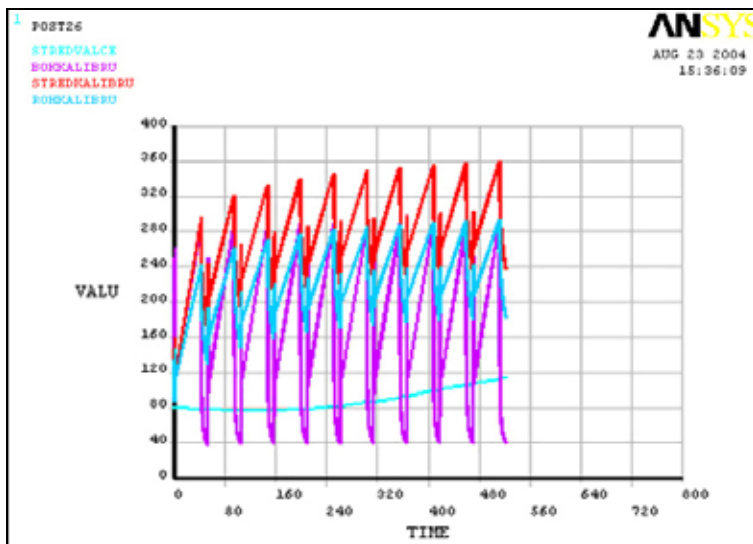
Obr.1 Geometrie kalibru



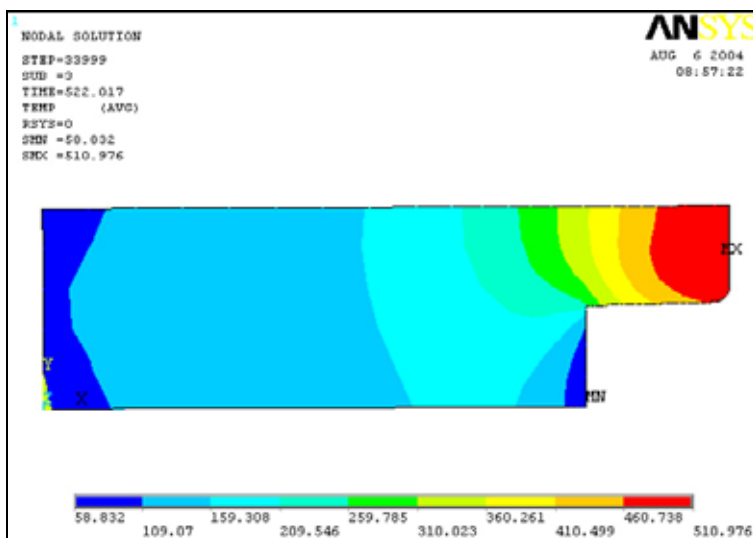
Obr.2 Sít' MKP



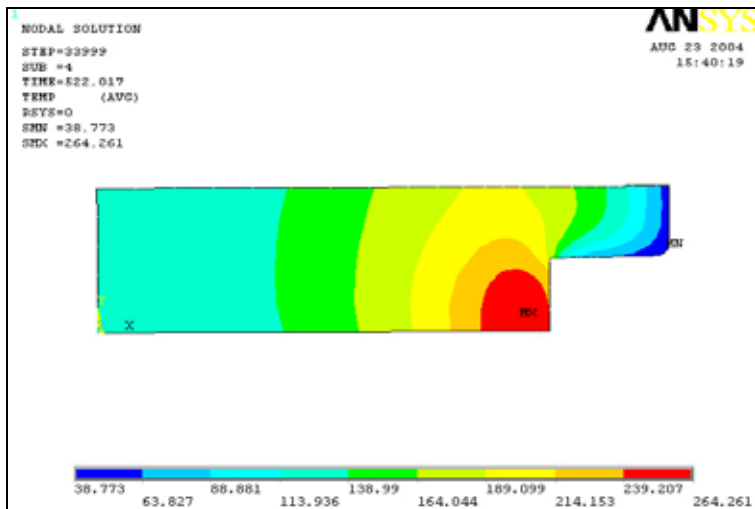
Obr. 3a Teploty [°C] ve významných bodech povrchu prvních 10 cyklech - var. 1



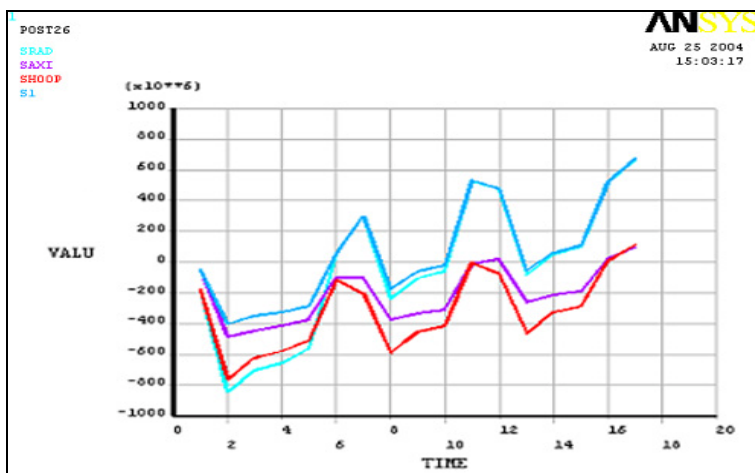
Obr. 3b Teploty [°C] ve významných bodech povrchu prvních 10 cyklech - var. 4



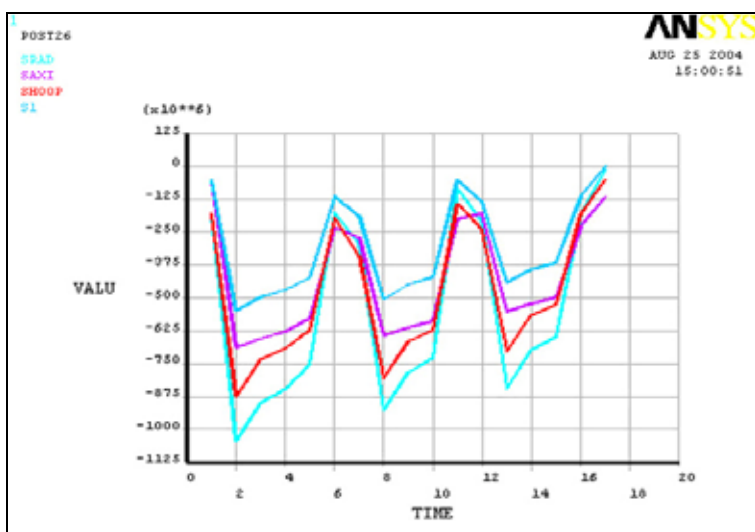
Obr. 4a Rozložení teplot [°C] po 10 cyklu válcování – var. 1



Obr. 4b Rozložení teplot [°C] po 10 cyklu válcování – var. 4



Obr. 5a Složky napětí [Pa] v rohu kalibru: radiální-SRAD, axiální-SAXI, obvodové-SHOOP, max hlavní-S1, varianta 1

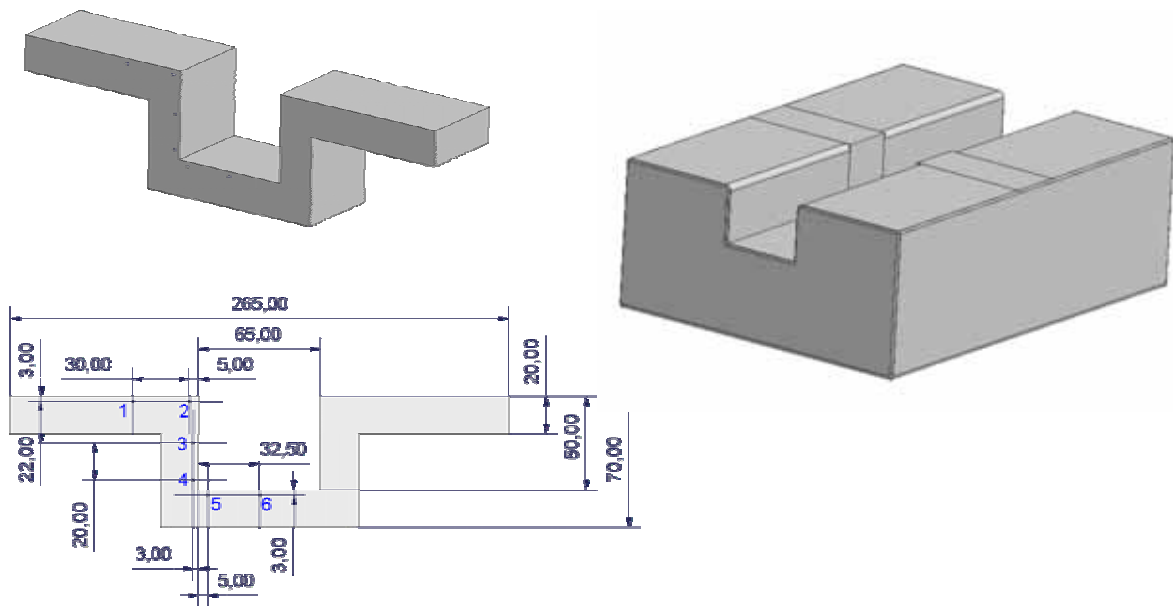


Obr. 5b Složky napětí [Pa] v rohu kalibru: radiální-SRAD, axiální-SAXI, obvodové-SHOOP, max hlavní-S1, varianta 4

Ze získaných hodnot je zřejmý velký rozdíl teplot mezi bokem a středem kalibru u variant 1 a 2 oproti rovnoměrnějšímu rozdělení u variant 3 a 4. Přehřátí přepážky oproti zbytku válce vede v oblasti rohu kalibru ke koncentraci tahových napětí. Ochlazení přepážky pak výskyt tahových napětí v této oblasti zcela eliminuje. Navrhovaný systém chlazení válce by tedy měl přednostně zajistit dostatečně intenzivní chlazení oblasti přepážky mezi kalibry tak, aby nedocházelo k jejímu výraznému přehřívání nad teplotu zbývajících částí válce. Vyšší teplota přepážky totiž generuje v oblasti rohu kalibru významné špičky tahových napětí, které jsou příčinou vzniku únavových trhlin v této oblasti. Z tohoto předpokladu budeme se dále vycházet u návrhu konfigurace trysek v experimentální části.

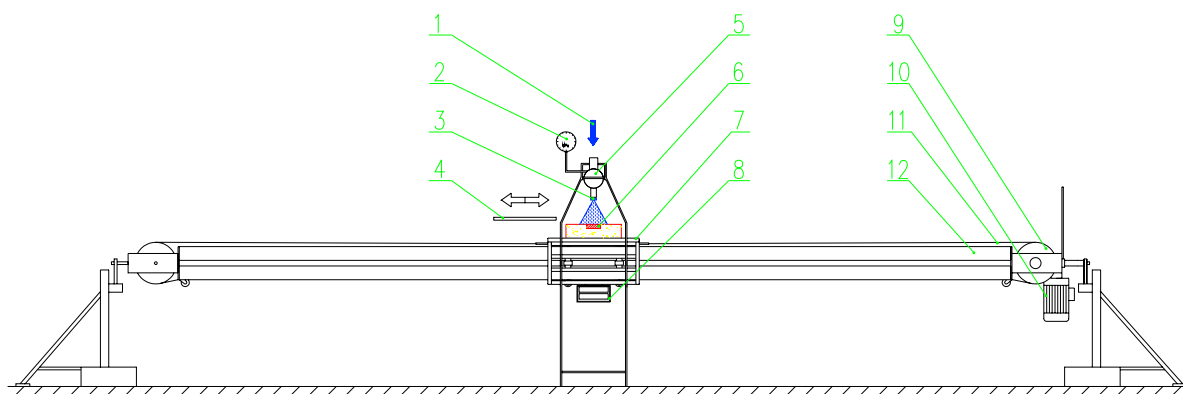
2. Experimentální část

Základ experimentálního zařízení tvoří model kalibru, který je vyroben z austenitické oceli. Základní rozměrové charakteristiky jsou uvedeny na Obr.6. Ve vhodných místech pod ochlazovaným povrchem byly vyvrtány otvory, do kterých jsou zabudovány termočlánky, které indikují teplotu v daném místě. Model kalibru má délku 50 mm. Na čela obou stran byly navrženy plechy a vytvořen uzavřený krabicový tvar tak, aby se dala provést tepelná izolace z neostříkované strany.



Obr. 6 Model kalibru.

Takto sestavený segment byl umístěn na laboratorní stand, který umožňuje pohyb vzorku požadovanou rychlostí pod chladicími tryskami (Obr. 7).



1	přívod chladicího média	7	vozik
2	tlakoměr	8	datalogger
3	tryska	9	poháněcí kladka
4	deflektor	10	elektromotor s převodovkou
5	rozvodná komora	11	tažné lamo
6	testovaný vzorek	12	nosný rám

Obr. 7 Laboratorní stand

Teplotní čidla jsou napojena na datalogger. Před vlastním experimentem je vozík se vzorkem umístěn do krajní polohy a vnější peci ohřát na požadovanou teplotu. Po ustálení teploty je topidlo odstraněno, stand nastaven do ostříkové polohy, spuštěno čerpadlo a odstartován pojezd vozíku. Signály z čidel jsou snímány dataloggerem, který se pohybuje společně se vzorkem.

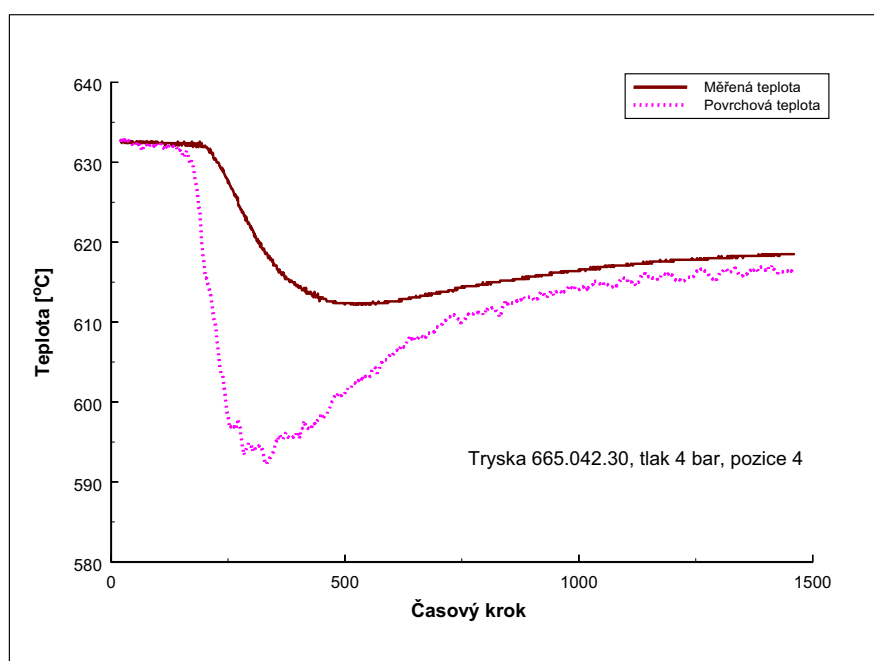
Pro chlazení segmentu U-kalibru bylo navrženo použití dvou trysek orientovaných pod úhlem 45° vzhledem k vodorovné rovině. Byly zvoleny dva typy trysek s různými úhly rozstříku a průtoky.

Výstupem z experimentu je záznam teplot v jednotlivých měřených místech a záznam okamžité polohy pojezdového vozíku. Tyto informace se po přenesení do paměti počítače využívají jako vstupní data pro inverzní úlohu vedení tepla, která řeší okrajové podmínky na teplosměnném povrchu. Typickým výstupem je pak průběh teploty a součinitele přestupu tepla na povrchu tělesa. Příklad výstupu inverzní úlohy je na Obr. 8, kde je vynesena průběh teploty získaný z měření a vypočtená povrchová teplota v sledovaném místě.

Celkově bylo provedeno 6 experimentů pro dva typy trysek a tři tlakové úrovně. Jejich výsledky jsou sumarizovány v Tabulce 2. Jsou zde uvedeny získané hodnoty součinitele přestupu tepla, které pak dále budou využity ve výpočtech MKP simulujících zatěžování a chlazení kalibru.

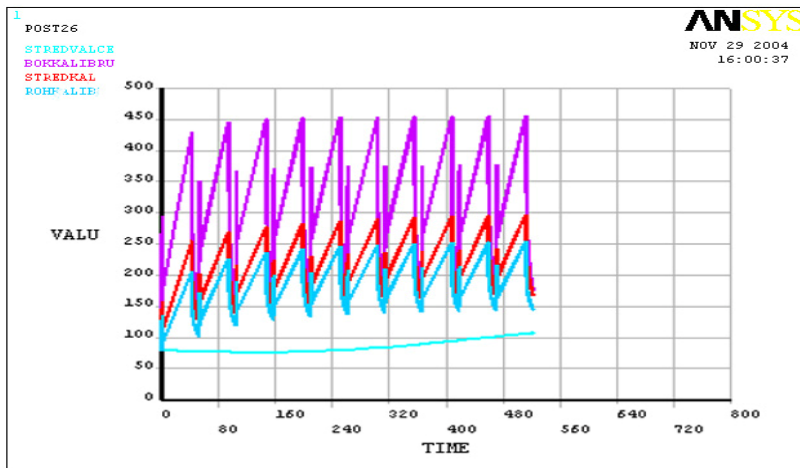
Tab. 2 Hodnoty součinitele přestupu tepla pro jednotlivé pozice a experimenty

Tryska	Tlak vody [bar]	Součinitel přestupu tepla [W/m ² K] na pozici					
		1	2	3	4	5	6
Typ 1	2	1980	5450	4380	10620	14280	2880
Typ 1	4	2160	9360	5880	15600	19920	3360
Typ 1	8	2460	10380	7440	21480	28740	5760
Typ 2	2	4440	16980	8640	12300	29580	4500
Typ 2	4	4860	19320	11220	19500	35700	7800
Typ 2	8	6360	20400	17040	29100	48240	9420

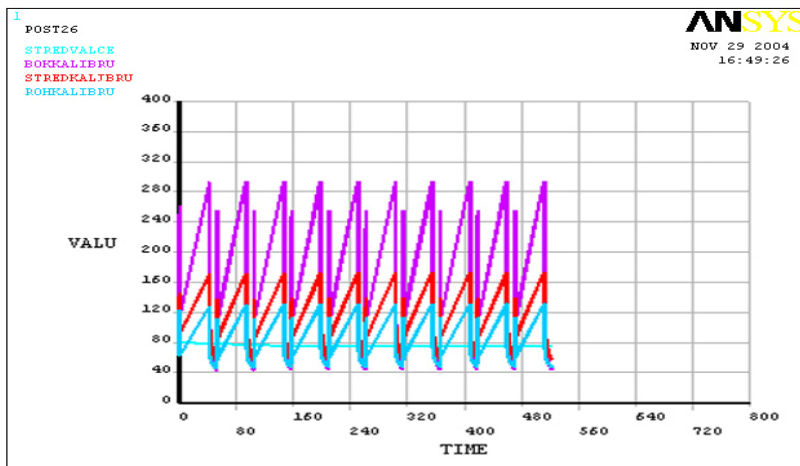


Obr. 8 Příklad průběhu naměřené a povrchové teploty

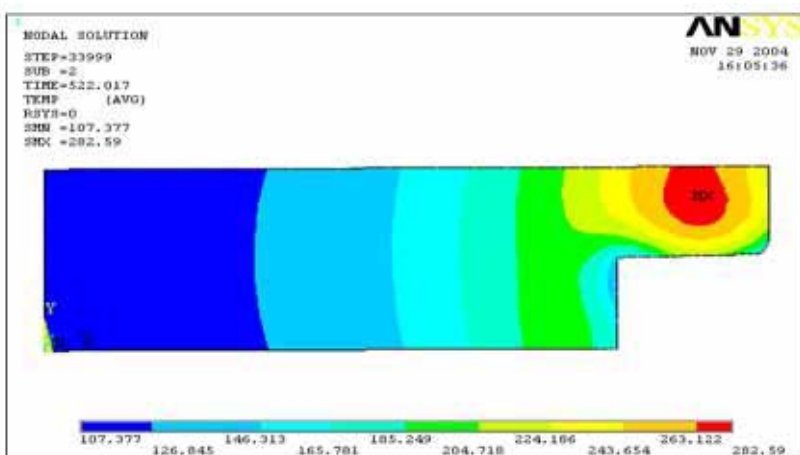
K výpočtu rozvoje teplotního pole a navazujících napětových stavů v průběhu válcování deseti válcovacích cyklů byl použit stejný výpočtový model, popsáný v kapitole 2 (Obr. 2). Změněny byly pouze hodnoty součinitelů přestupu tepla na základě uskutečněných experimentů. Podrobně byly analyzovány dvě varianty podle tab. 2, a to varianta podle prvního řádku tab. 2, označená zde jako varianta 1, a dále varianta 2 podle posledního, šestého řádku tab. 2. Tyto varianty představují krajní meze intenzity chlazení při navržené konfiguraci trysek a provozních tlaků.



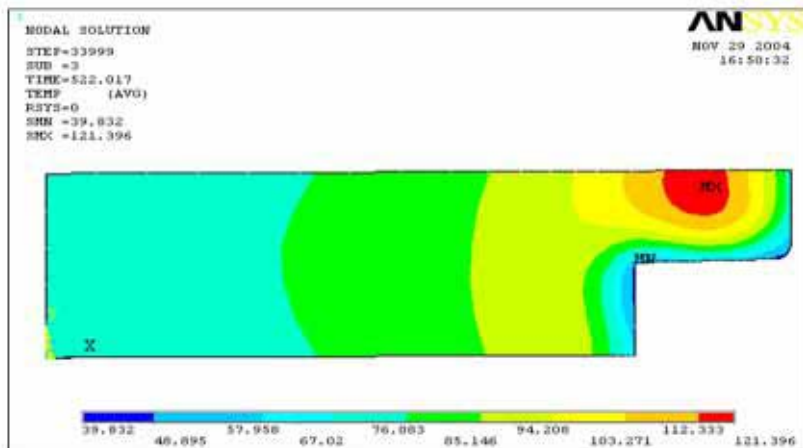
Obr. 9 Teploty [°C] ve významných bodech povrchu prvních 10 cyklech - var. 1



Obr. 10 Teploty [°C] ve významných bodech povrchu prvních 10 cyklech - var. 2



Obr. 11 Rozložení teplot [°C] po 10. cyklu válcování – var. 1

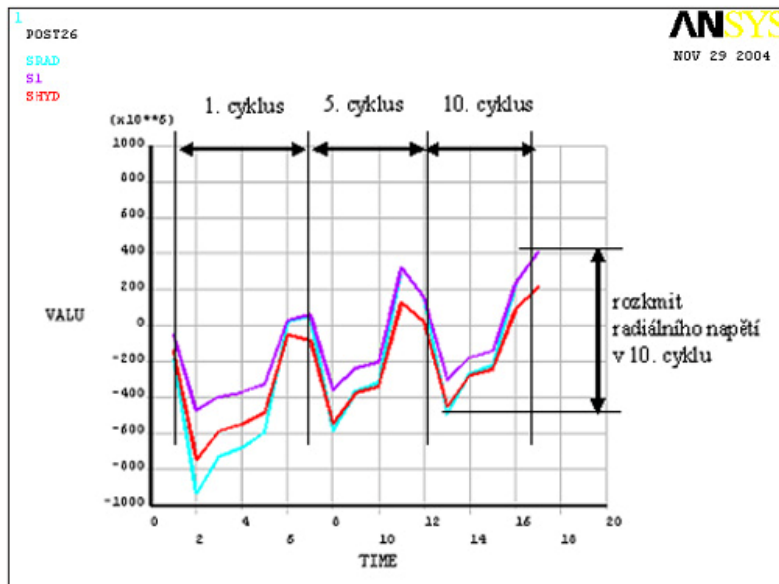


Obr. 12 Rozložení teplot [°C] po 10. cyklu válcování – var. 2

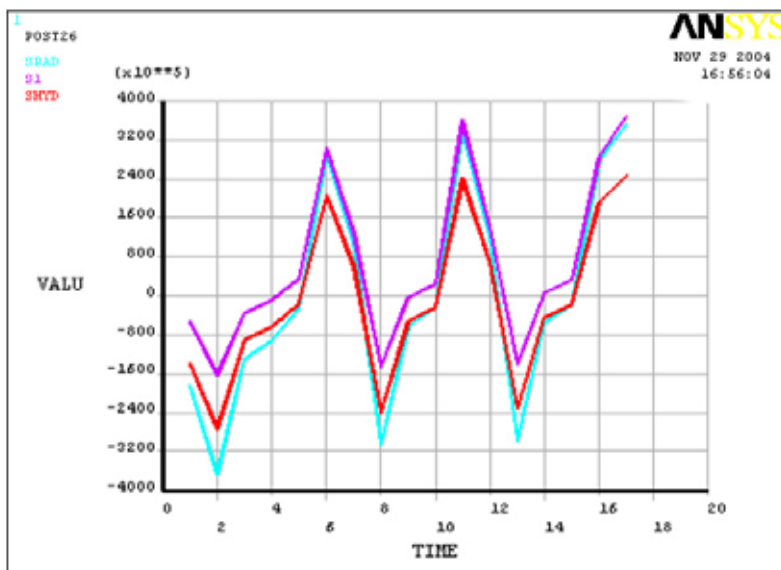
Průběhy významných složek napětí v kritickém místě rohu kalibru jsou uvedeny na obr. 11, 12 a v tab. 3. Je patrné snížení rozkmitu dominantní radiální složky napětí z 880 na 660 MPa u varianty č. 2.

Tab. 3 Radiální napětí [MPa] v rohu kalibru v 10. cyklu válcování

	Var. číslo 1	Var. číslo 2
Max. hodnota SRAD	+400	+360
Rozkmit Δ SRAD	880	660



Obr. 13 Složky napětí [Pa] v rohu kalibru: radiální-SRAD, max hlavní-S1, střední-SHYD, varianta 1



Obr. 14 Složky napětí [Pa] v rohu kalibru: radiální-SRAD, max hlavní-S1, střední-SHYD, varianta 2

Srovnání průběhu teplot ve vybraných místech válce během vyšetřovaného časového úseku deseti válcovacích cyklů je na obr. 9 a 10. Jak je patrné, u druhé varianty (intenzivnější chlazení) jsou špičkové teploty výrazně sníženy – ze 450°C na méně než 300°C. Rovněž ustáleného stavu je dosaženo hned v prvních válcovacích cyklech, zatímco u první varianty i po deseti cyklech ještě pomalu vzrůstá teplota středu válce – chlazení je nedostatečné. U obou variant je však patrná relativně vyšší teplota v oblasti přepážky mezi dvěma kalibry, jak je patrné z obr.11 a 12. Ta způsobuje, jak prokázaly předchozí výpočty, významné namáhání v okolí kritického místa v rohu kalibru.

3. Závěr

Cílem tohoto příspěvku byl návrh optimalizace chlazení kalibrovaného válce. Řešení projektu probíhalo v Laboratoři přenosu tepla a proudění, FSI VUT v Brně. Podnětem k řešení tohoto problému byl vznik trhlin v rozích válců a jejich následné praskání. Postup řešení se skládá ze dvou etap – experimentální a výpočtové. V experimentální části byly provedeny experimenty s různými parametry ostříku – různé trysky a geometrie uspořádání, během nichž byly získány hodnoty součinitele přestupu tepla (HTC) jenž byly použity jako okrajové podmínky do výpočtové části. V této části byla vypočítána teplotní pole ve válci a z nich následně průběhy napětí v celém průřezu. Zvýšený důraz byl kladen převážně na oblast rohu, kde docházelo k praskání díky velkému rozkmitu hodnot napětí. Porovnáním vypočítaných hodnot bylo zjištěno, že maximální hodnoty rozdílu napětí se snížily z 880 MPa u původní konfigurace chlazení na 660 MPa u nově navržené konfigurace. Rovněž byl popřen předpoklad, že je nutno nejvíce vody přivádět na dno kalibru. Z výsledků naopak vyplynulo, že chlazení by mělo být soustředěno na boky a přepážku kalibru. Výsledkem celého optimalizačního procesu chlazení tedy je nová konfigurace chladících trysek navržená tak, aby bylo dosaženo co nejlepšího chlazení a bylo sníženo tepelné namáhání v kritických místech válce a tak zvýšena jeho životnost.

4. Literatura

Janíček, P., Ondráček, E., Vrbka, J.(1992) *Pružnost a pevnost 1*, VUT Brno

Holman, J.P. (1978) *Experimental methods for engineers*. McGraw - Hill Copany, USA

Webster, J.G. (1999) *Mechanical variables mesurement – Solid, Fluid and Thermal*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA