

STRESS ANALYSIS OF SCALE LAYER FOR DESCALING PROCESS NAPJATOSTNÍ ANALÝZA VRSTVY OKUJÍ PŘI PROCESU ODKUJENÍ

J. Tošovský[§], M. Pohanka^{*}, P. Kotrbáček^{*}

Abstract: The steel hot rolling process is inseparably linked to the oxidation of rolled material at increased temperatures. Hydraulic descaling of a rolled material is a part of all rolling trains. Surface quality after descaling is fundamental for the total surface quality of a roll product. This paper describes experimental methods and a mathematical model used to study the stress and strain analysis of the scale layer. Two kinds of experiments are made to obtain boundary conditions and surface quality. The boundary conditions used for the scale layer model are computed using the inverse heat conduction task from the measured temperature history inside the descaled steel plate. The experiment procedure for the determination of surface quality is used to verify the computed results using the scale layer model. This model uses the finite element method and applies the experimentally obtained boundary conditions needed for the evaluation of tensile stress in a layer of scales and in the basic steel material. The model was developed to understand the process of hydraulic descaling and to get a tool necessary for the optimisation of spraying parameters. The investigated process comprises two aspects - the thermal and the mechanical. The mathematical model enables considering the influence of both aspects that finally determine the surface quality.

Keywords : stress analysis, descaling, temperature analysis, heat transfer, temperature measurement,

1. Úvod

Proces válcování oceli za tepla je neoddělitelně spojen s oxidací válcovaného materiálu za zvýšených teplot. Oxidické vrstvy vznikají jak při ohřevu materiálu v peci, tak při pohybu rozvalku mezi jednotlivými úběry. Hydraulické odstranění okují z válcovaného materiálu je součástí všech válcovacích tratí. Kvalita povrchu po ostříku okují je zásadní pro celkovou kvalitu povrchu vývalku. K poznání procesu odkujení jsou používány jak experimentální metody tak matematické modelování.

Pro studii vzniku napětí ve vrstvě okují byl vytvořen konečnoprvkový model v programovém systému Ansys. Umožňuje nám sledovat působení teplotního a mechanického účinku na vznik napětí ve vrstvě okují a tím i do jisté míry posoudit jejich vliv na výslednou kvalitu povrchu. Model nezahrnuje trhání či částečné nebo úplné odstranění vrstvy okují ze základního ocelového materiálu, jak k tomu dochází v praxi. U modelu je využito experimentálně zjištěných okrajových podmínek.

2. Způsob řešení

Řešení úlohy je rozloženo na tyto základní kroky :

1. Získání okrajových podmínek (povrchové teploty a součinitele přestupu tepla /dále **HTC Heat Transfer Coefficient**/) z teplotního experimentu.
2. Řešení nestacionární teplotní úlohy - soustavě je předepsána určitá počáteční teplota. Účinek chlazení vodního paprsku je modelován předepsáním součinitelem přestupu tepla, který je

[§] Ing. Jiří Tošovský : Ústav mechaniky těles, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic; tel.: +420 5 4114 2869, fax.: +420 5 411402876

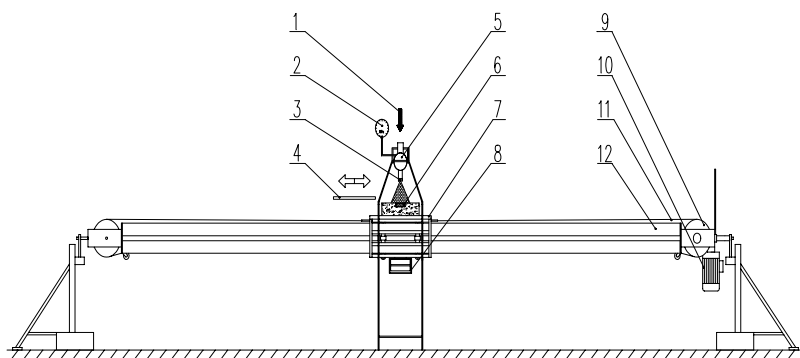
^{*} Ing. Michal Pohanka, Ing. Petr Kotrbáček : Letecký ústav, Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno, Czech Republic; tel.: +420 5 4114 3274, fax.: +420 5 4114 2224

proměnný v čase a teplotou chladicího média. Výsledkem tohoto řešení je časově proměnné teplotní pole. Toto teplotní pole je použito jako okrajová podmínka pro řešení napjatostně-deformační úlohy.

3. Řešení napjatostní úlohy - soustava je zatížena již zmíněným teplotním polem a v určitém časovém intervalu i tlakem vodního paprsku.

3. Experimentální získání okrajových podmínek

Pro měření okrajových podmínek se používá speciálně zkonstruované zařízení (Obr.1), které je 6m dlouhé[1]. Austenitická deska se zahřeje na teplotu 1000°C a poté se chladí průjezdem pod vodní tryskou, která se používá při odkujování. Během průjezdů se měří teplota uvnitř desky a naměřená data se ukládají do datalogeru. Po experimentu jsou data vyhodnocena a z naměřených průběhů teplot se pomocí inverzní úlohy počítají okrajové podmínky.



Obr.1 – Schema zkušebního zařízení 1. přívod chladicího média, 2. manometr, 3. tryska, 4. krycí lišta, 5. rozdělovací potrubí, 6. testovací deska, 7. vedení, 8. dataloger, 9. kladka, 10. elektrický motor, 11. tažné ocelové lano, 12. nosník

3.1. Inverzní úloha pro výpočet okrajových podmínek

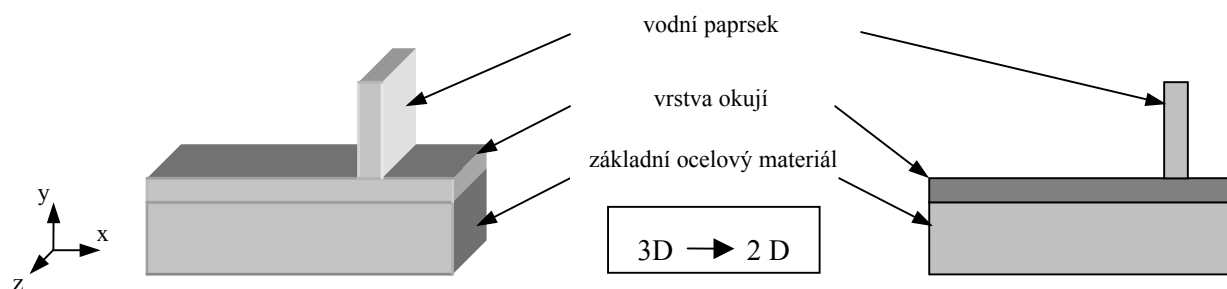
Pro výpočet je použit 2D symetrický model, který zahrnuje celou strukturu použitých termočlánků. Inverzní výpočet je založen na Beckově minimalizačním principu [2]. Pro přímý teplotní výpočet, který je nutný při řešení inverzní úlohy se používá metoda kontrolních objemů [3].

4. Popis modelu

Model je prezentován soustavou složenou z vrstvou okují dané tloušťky ($5\mu\text{m} - 5\text{mm}$) a základního ocelového materiálu. Soustava má zadanou určitou počáteční teplotu, teplotní a deformační okrajové podmínky. Předepsáním HTC a teploty chladicího media (vodní paprsek) na povrch okují dochází k ochlazení povrchu což vyvolá vznik napětí.

4.1. Dimenze modelu

Předpokládáme rovnoměrné rozložení vodního paprsku ve směru osy z (Obr. 2). Tento předpoklad má za následek konstantní hodnoty HTC ve směru této osy pro daný časový krok. Jelikož je HTC konstantní ve směru osy z , jsou pro danou rozlišovací úroveň modelu hodnoty teplotního gradientu nulové. Tímto můžeme přejít z řešení 3-D úlohy na řešení 2-D úlohy.



Obr.2 – Dimenze modelu

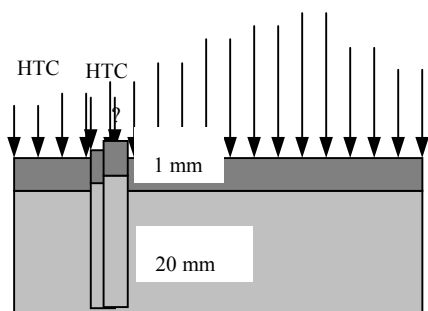
4.2. Geometrie a rozměry modelu

Experimentální desky, na kterých se prováděly měření kvality povrchu po odkujení, sloužily jako podklady pro volbu geometrie a rozměry modelu (Obr 3a).

Z hlediska časové a hardwarové náročnosti výpočtu bylo nutné zjistit vliv délky modelu na napětí. Z tohoto důvodu byly vytvořeny dva modely a to Model A a Model B.

Model A má stejnou délku jako experimentální deska a to 300mm. Konstantní hodnota HTC je v každém časovém kroku předepsána vždy na daný úsek jehož délka je vypočtena součinem rychlosti pojezdu (1m/s) a časovým krokem (0.002s). Hodnota časového kroku je hodnotou, kterou je HTC(t) diskretizován. Z tohoto vyplývá, že u modelu A se hodnoty HTC předepisují v každém časovém kroku na 150 úseků (Obr.3b).

Model B má délku 2mm, která je dána rovněž součinem rychlosti pojezdu (1m/s) a časovým krokem (0.002s). Jedná se o tedy případ, kdy délka modelu je rovna délce úseku, na který je v každém časovém kroku předepsána konstantní hodnota HTC (Obr.3c).



a)

b)

c)

Obr. 3: a) Geometrie a rozměry modelu, b) Předepsání HTC pro Model A, c) Předepsání HTC pro Model B

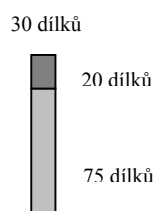
4.3. Typ úlohy, použitý prvek, diskretizace sítě

1. Nestacionární 2D teplotní úloha - prvek PLANE 55 (2D prvek, 1 stupně volnosti - teplota)

Vedení tepla je možné pouze ve dvou směrech a to ve směru osy x a y .

2. Napjatostní 2D úloha - prvek PLANE 42 (2D prvek, 2 stupně volnosti - posuv

U_x , U_y , uvažovaná rovinná deformace).



Obr. 4 – Ukázka diskretizace sítě pro Model B

4.4. Materiálové charakteristiky

1. Okuje - materiálové charakteristiky okují jsou převzaty z lit. [4] viz. Tab.1
2. Ocel - materiálové charakteristiky uhlíkové oceli (0,4 % C) viz. Tab. 2

Tab.1 - Materiálové charakteristiky okují

Název	Označení	Jednotka	Teplotně závislý	Velikost
Hustota	ρ	kg.m^{-3}	ne	5.7E3
Měrná tepelná kapacita	c_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ano	$674.959 + 0.297 \cdot T - 4.367 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$
Tepelná vodivost	λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ano	$1 + 7.833 \cdot 10^{-4} \cdot T$
Modul pružnosti v tahu	E	Pa	ano	$240 \cdot 10^9 (1 - 4.7 \cdot 10^{-4} (T - 25))$
Poissovo číslo	μ	-	ne	0.3
Souč.teplotní roztažnosti	α	K^{-1}	ne	$8 \cdot 10^{-6}$

c_p pro $T \in (600 \div 1100 \text{ } ^\circ\text{C})$, λ pro $T \in (600 \div 1200 \text{ } ^\circ\text{C})$

Tab. 2 - Materiálové charakteristiky uhlíkové oceli (0,4 % C)

Název	Označení	Jednotka	Teplotně závislý	Velikost
Hustota	ρ	kg.m^{-3}	ano	
Měrná tepelná kapacita	c_p	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ano	
Modul pružnosti v tahu	λ	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	ano	
Young's moduls	E	Pa	ne	$2.1 \cdot 10^{11}$
Poissovo číslo	μ	-	ne	0.3
Souč.teplotní roztažnosti	α	K^{-1}	ne	$1.2 \cdot 10^{-5}$

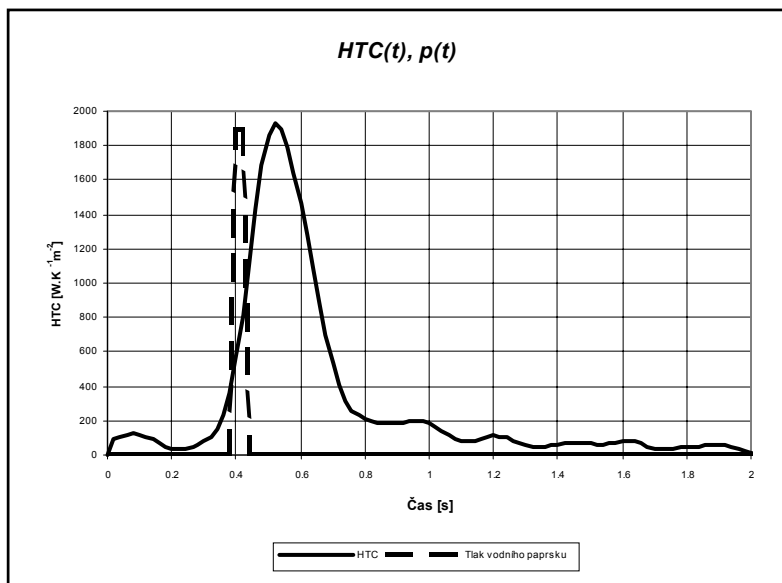
4.5. Okrajové podmínky

1. Počáteční teplota, T_{unif}

$$T_{\text{unif}} = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Zatížení modelu

- Nestacionární teplotní úloha : Soustava je zatížena $HTC(t)$, který je funkcí času (Obr.5). Teplota chladicího media $T_B = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

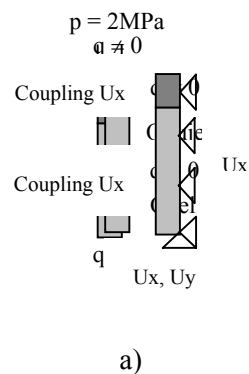


Obr.5 – Průběh $HTC(t)$ a $p(t)$

- Napjatostní úloha : Soustava je zatížena teplotním polem vypočteným v nestacionární teplotní úloze a dále tlakovým impulsem (Obr.5) vyvinutým vodním paprskem na povrch okují (Obr. 6a). Tlak v našem případě působí v čase $t \in (0.406 \div 0.41s)$ a jeho hodnota je $p = 2MPa$.

3. Vazby modelu

- Nestacionární teplotní úloha : Soustava je tepelně izolovaná na stranách s označení $q = 0$, kde je předepsán nulový tepelný tok (Obr.6b). Na straně s označení $q \neq 0$ je předepsáno zatížení soustavy HTC.



Obr.6: a)Zatížení tlakovým impulsem, b)Teplotní okrajová podmínka, c)Deformační okrajová podmínka

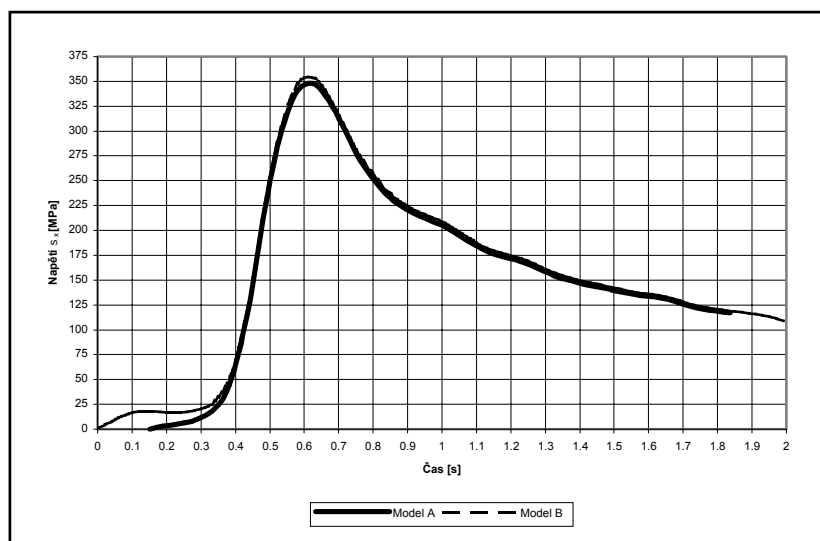
- Napjatostní úloha : Zamezení posuvů U_x tj. posuvů ve směru osy x , je předepsáno v krajních uzlech, které jsou na pravé straně modelu (Obr.6c) . Zamezení posuvů U_x, U_y tj. posuvy ve směru osy x, y , je předepsáno do uzlu, který je v pravém dolním rohu modelu (Obr. 6c).

Krajním uzlům, které jsou na levé straně modelu je předepsán jednotný posuv (Obr. 6c ozn. Coupling U_x). Hodnotu jednotného posuvu počítá programový systém z rovnice rovnováhy při samotném řešení. Jednotným posuvem je posuv U_x , což je posuv ve směru osy x .

5. Výsledky řešení

Při analýze napětí se ukazuje, že jedinou výraznou složkou napětí je napětí σ_x , což je normální napětí ve směru osy x . Ostatní složky napětí σ_y a τ_{zy} jsou z hlediska jejich velikosti vůči napětí σ_x nevýznamné. Průběh napětí σ_y odpovídá přesně průběhu tlakového zatížení vodního paprsku. V našem případě je max. hodnota na povrchu okují $\sigma_{y\max} = 2\text{MPa}$ při hodnotě tlaku vodního paprsku $p = 2\text{MPa}$. Napětí τ_{zy} nedosahuje v žádném místě ani hodnoty 1 MPa.

Z průběhů napětí σ_x (Obr.7) dosažené u Modelu A a Modelu B je patrné, že tyto průběhy jsou téměř identické. Liší se pouze v počáteční fázi což je způsobeno počátečním posunem nanesených hodnot HTC na daném úseku u Modelu A oproti Modelu B. Napětí σ_x je vykresleno na elementu, který je na povrchu okují.



Obr. 7 – Průběh napětí σ_x dosažené u Modelu A a Modelu B

6. Závěr

Byl vytvořen konečnoprvkový model, který při zadání experimentálně změřených okrajových podmínek umožňuje analýzu napětí ve vrstvě okují při hydraulickém odkujení. Model dále umožňuje sledovat vliv teplotního a mechanického účinku na vznik napětí ve vrstvě okují. Nezahrnuje trhání či částečné nebo úplné odstranění vrstvy okují ze základního ocelového materiálu

Z porovnání dosažených napětí mezi Modelem A a Modelem B je patrné, že výpočet napětí neovlivňuje délka modelu. Toto je způsobeno tím, že nedochází k výraznému vedení tepla ve směru osy x . Dominantním směrem pro vedení tepla je tedy osa y , což se projeví na hodnotách napětí σ_x . Můžeme tedy použít pro výpočet napětí Model B, který není náročný na hardware a výpočtový čas je mnohonásobně kratší než u Modelu A.

Na vznik napětí ve vrstvě okují má dominantní vliv teplotní šok způsobený vodním paprskem. Vliv tlaku vodního prasku na vzniklé napětí je vůči teplotnímu šoku nevýrazný.

7. Použitá literatura

- [1] Raudenský, M., Pohanka.- *Combined inverse heat conduction method for highly transient processes*. Advanced Computational Methods in Heat Transfer VII, WIT Press, str. 25-33, 2002.
- [2] Beck, J. V., Blackwell, B. & Clair, C. *Inverse Heat Conduction: Ill-posed problems*, Wiley-Interscience: New York, 1985.
- [3] Patankar, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation: 1980.
- [4] M.Krzyzanowski, J.H.Beynon – *Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing-oxide scale behaviour and composition effects*, Modelling Simul.Mater.Sci.Eng. 8 (2000) 927-945)