

E xperimentální A nalýza N apětí

2004

ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES INDUCED BY THERMOMECHANICAL PROCESSES DURING QUENCHING

ANALÝZA VZNIKU ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ VYVOLANÝCH TERMOMECHANICKÝMI PROCESY PŘI KALENÍ

Vladislav Lang¹, Michal Švantner², Josef Kuneš³

The paper presents a quenching experiment and its numerical simulation. The simulation process consists of two parts. An indirect thermal problem is solved first. Heat transfer during quenching and material thermo-physical properties are the results. Next, the stress analysis is performed based on thermal problem solution. An influence of the mesh density and geometrical approximation (3D model, 2D model, 2D axially symmetrical model) on the final residual stress distribution is determined.

Keywords residual stress, quenching, indirect problem, thermo physical properties.

Klíčová slova zbytková napětí, kalení, nepřímá úloha, tepelně-fyzikální vlastnosti.

Úvod

Kalení patří mezi technologie tepelného zpracování, jehož výsledkem jsou požadované mechanické vlastnosti materiálu. V průběhu kalení dochází ke složitým termo-mechanickým a strukturním procesům, které mohou způsobit trhliny a deformace [1]. Ke zjištění vlivu jednotlivých parametrů na zbytková napětí lze využít numerickou simulaci [2,3]. Simulace spolu s experimentálními výsledky [4] může být použita pro optimalizaci procesů kalení.

V příspěvku je popsán experiment kalení, řešení nepřímé úlohy s cílem zjištění přestupu tepla z materiálu a nelineárních tepelně fyzikálních vlastností. Tepelné vlastnosti materiálu jsou porovnány s hodnotami zjištěnými experimentálně zařízením HotDisk Thermal Constant Analyser [5]. Výsledky tepelné úlohy jsou použity při modelování termo-mechanických procesů během kalení. Numerické výpočty jsou provedeny v MKP systému COSMOS/M [6]. Je zjišťován například vliv velikosti elementů sítě a vliv dvourozměrného zjednodušení úlohy na výsledná zbytková napětí.

¹ Ing. Vladislav Lang: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377634717, e-mail: vlang@ntc.zcu.cz

² Ing. Michal Švantner: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377422102, e-mail: michal.svantner@email.cz

³ Prof.Ing. Josef Kuneš, DrSc.: Západočeská univerzita v Plzni, Výzkumné centrum, Univerzitní 22, 30614 Plzeň, Česká republika, tel.: +420377632223, e-mail: kunes@ntc.zcu.cz

Experiment

Vzorek o rozměrech 150 x 110 a výšce 20 mm vyrobený z oceli (ČSN 16 536) je ohřát na teplotu 820 °C. Po prodlevě 10 minut je vyjmut a položen na kvádr z ledu (obr.1). Vrchní strana vzorku je izolována sibalovou rohoží o tloušťce 10 mm.

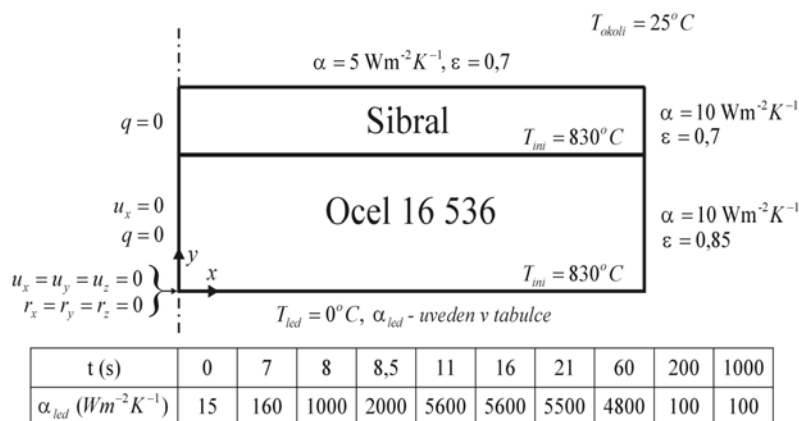
Průběh teploty ve vzorku je měřen šesti plášťovanými termočlánky typu K o průměru 0,5 mm. Ty jsou umístěny ve středu boční strany ve výškách 0, 2, 4, 8, 15 a 20 mm od chlazené strany.



Obr.1: Fotografie průběhu experimentu.

Počítačová simulace

Experiment je vyhodnocen v MKP systému COSMOS/M. Je vytvořen 3D model, 2D zjednodušení (plane strain) a přiblížení pomocí 2D osově symetrického modelu (osa ve středu vzorku). Geometrie, počáteční a okrajové podmínky jsou na obr.2.



Obr.2: Geometrie, počáteční a okrajové podmínky modelu.

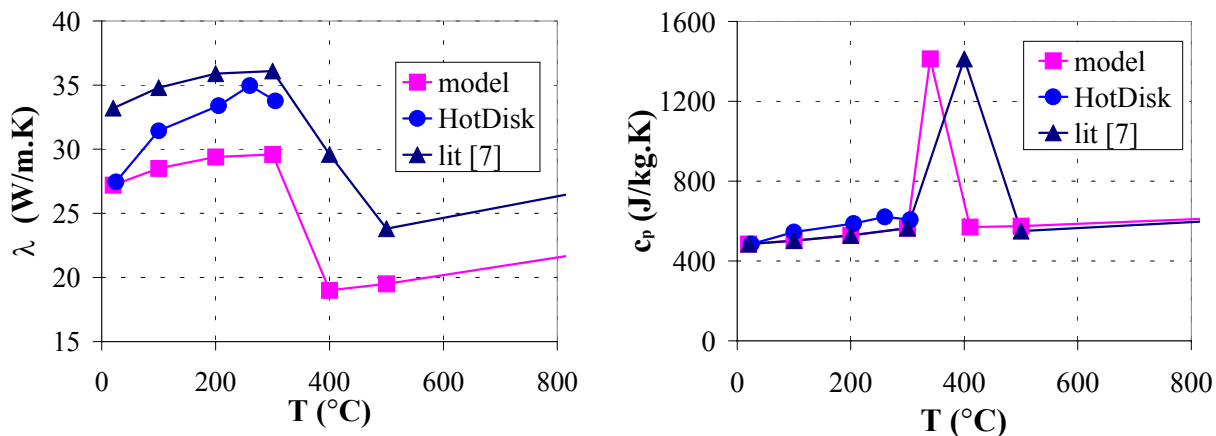
Je řešena nepřímá tepelná úloha s cílem stanovení intenzity přestupu tepla α_{led} a upřesnění nelineárních materiálových vlastností (tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita) vzorku na základě nalezení shody naměřených a vypočtených průběhů teploty. S použitím výsledků tepelné úlohy je provedena simulace tepelně-napjatostní úlohy s analýzou vlivu velikosti elementu sítě, vlivu geometrického zjednodušení úlohy a dalších parametrů.

Výsledky a diskuze

Tepelná úloha

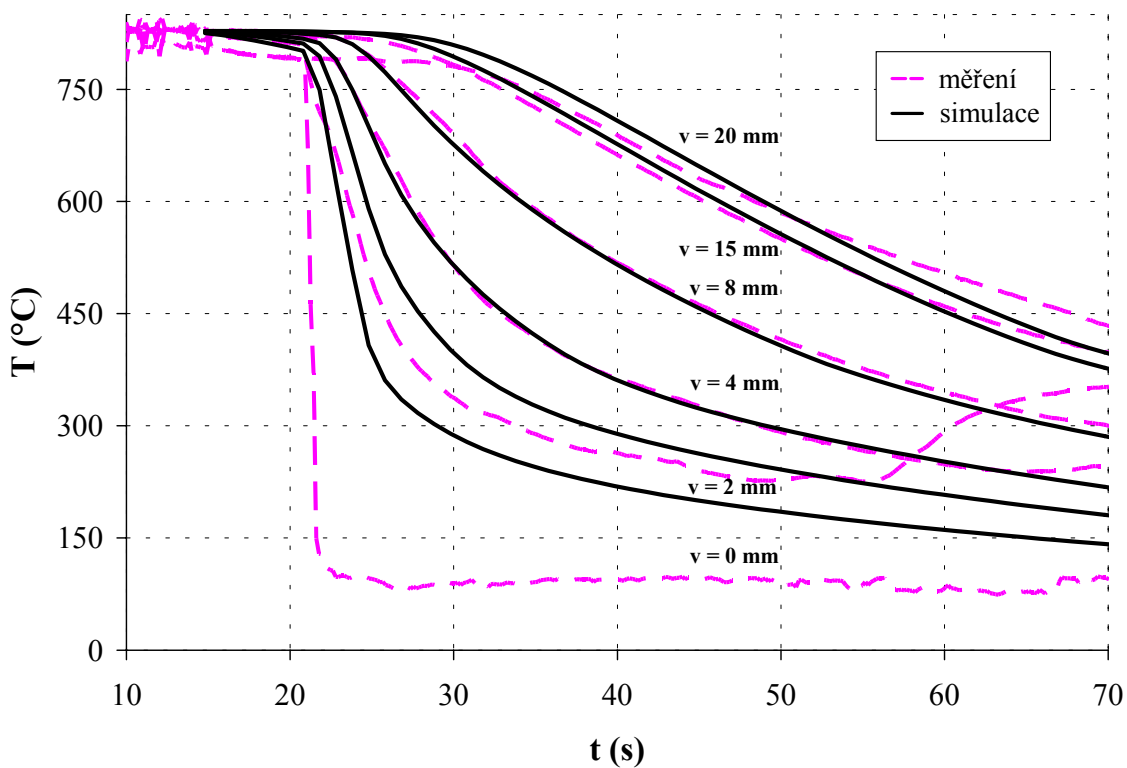
Hodnoty tepelně fyzikálních vlastností zjištěné řešením nepřímé úlohy mají podobný trend jako hodnoty uváděné v literatuře [7] (obr.3). Tepelná vodivost je však přibližně o 20% nižší. U měrné tepelné kapacity se špička odpovídající teplu fázové přeměny posouvá do nižších teplot a její šířka je menší. Hodnoty tepelné vodivosti stanovené zařízením HotDisk Thermal Constant Analyser na zakaleném vzorku při nárůstu teploty přechází od hodnot zjištěných z nepřímé úlohy

k hodnotám uváděnými v literatuře. Hodnoty měrné tepelné kapacity jsou o 10% vyšší oproti tabulkovým.



Obr.3: Zjištěné tepelně-fyzikální vlastnosti oceli 16 536 a jejich porovnání s tabulkovými [7] a naměřenými hodnotami – (a) tepelná vodivost, (b) měrná tepelná kapacita

. Porovnání naměřených a vypočtených průběhů teplot je na obr.4.



Obr.4: Porovnání naměřených a vypočtených teplot vzorku v různých výškách od ledem ochlazovaného povrchu

Tepelně-napjatostní úloha

(1) Je posuzován vliv geometrického zjednodušení úlohy.

Je řešena 3D úloha, 2D řez a 2D rotačně symetrická úloha s osou uprostřed vzorku.. Velikost hrany elementu je 2 mm. Průběh napětí σ_x ($x = 0$) po dochlazení v závislosti na vzdálenosti od povrchu je na obr.5. Průběh napětí získaný 2D rotačně symetrickým modelem je téměř identický s průběhem získaným řešením 3D úlohy.

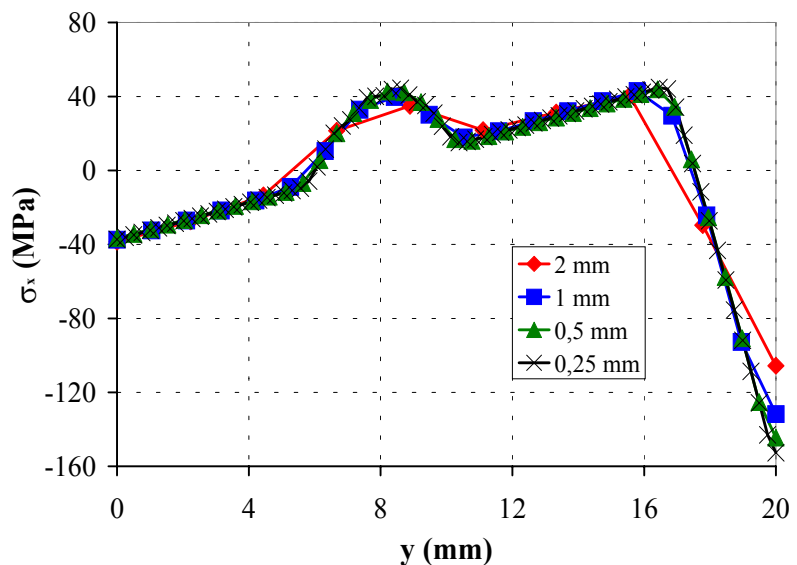
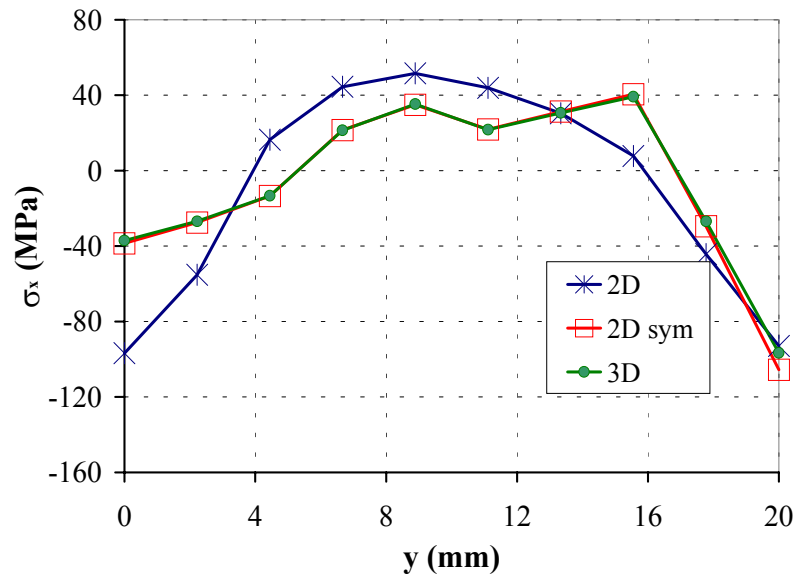
(2) Dále je testován vliv velikosti elementu sítě na průběh napětí σ_x v ose y.

Vliv hustoty sítě (uvažován 2D rotačně symetrický model) se projevuje především na vrchní straně vzorku. Rozdíly mezi variantami hustoty sítě je od 20 do 50 MPa (obr.6). V případě 2D modelu (plain strain) jsou rozdíly po obou stranách a výraznější – jednotlivé varianty se mohou lišit až o 100 MPa.

Na obr.7 je časový průběh napětí v ose y (velikost hrany elementu sítě 0,5 mm)

Největší napětí ve vzorku je především v prvních 3 s, postupně s časem se napětí vyrovnávají.

Zjištěným hodnotám napětí v jednotlivých hloubkách odpovídá průhyb vzorku (posuv krajní části vzorku ve směru osy y) na obr.8. Geometrické zjednodušení má vliv na celkovou deformaci vzorku pouze v první fázi chladnutí, kdy rozdíly mezi jednotlivými variantami činí 10 až 30%. Po dochlazení se průhyby vyrovnávají pro všechny varianty.



Obr. 6: Vliv velikosti elementů sítě na průběh napětí σ_x v ose y po dochlazení.

Závěr

Je vytvořen tepelný a tepelně-napjatostní model chladnutí. Fázové přeměny v průběhu chladnutí materiálu jsou modelovány změnou měrné tepelné kapacity. Hodnoty tepelně fyzikálních vlastností materiálu vzorku zjištěné řešením nepřímé úlohy odpovídají hodnotám uváděným v literatuře. Zjištěný posuv křivky tepelné vodivosti může souviset s rozdílným tepelně-mechanickým zpracováním materiálu.

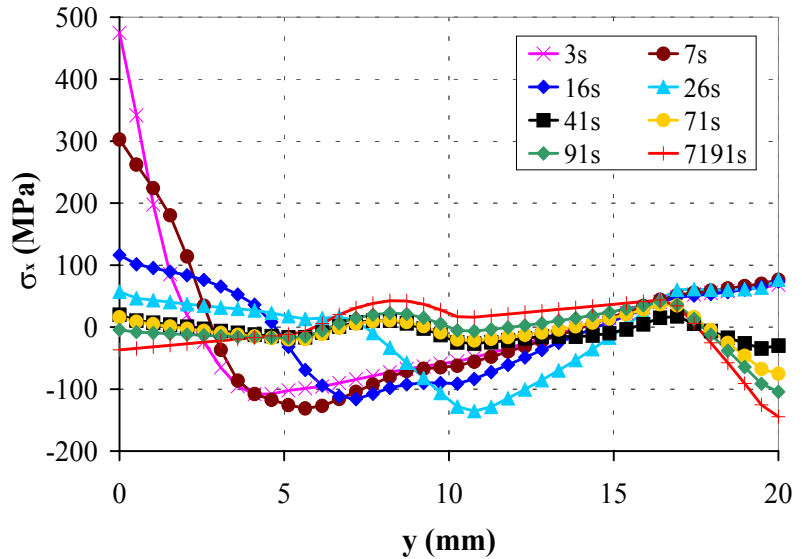
Dále je řešena tepelně-napjatostní úloha. Porovnáním se ukazuje, že 2D rotačně symetrický model je vhodné zjednodušení 3D modelu. Výsledky ukazují, že na krajích vzorku je tahové napětí řádově desítek MPa, které přechází na tlakové uprostřed vzorku. Tyto hodnoty odpovídají výsledkům uváděným v literatuře [4]. V modelu však nejsou zahrnuty procesy související se strukturními změnami v materiálu. Toto zjednodušení může způsobit významnou chybu v vypočtených hodnotách zbytkových napětí. Experimentální zjišťování zbytkových napětí se připravuje.

Poděkování

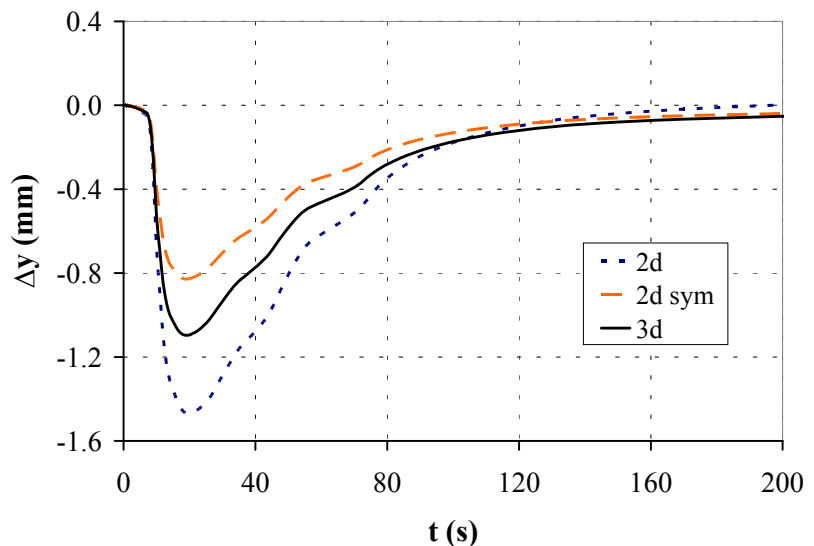
Tento příspěvek vznikl za finančního přispění MŠMT v rámci projektu výzkumu a vývoje LN00B084.

Literatura

- [1] Apelian D.: *Understanding, Control and Optimization of the Quenching Process - Advanced Materials & Processes*, pp. 52-53, March 2001



Obr.7: Časový průběh napětí σ_x v ose y.



Obr.8: Časový průběh posunutí krajní části vzorku ve směru osy y.

- [2] Denis S., Archambault P., Gautier E., Simon A and Beck G.: *Prediction of Residual Stress and Distortion of Ferrous and Non-Ferrous Metals: Current Status and Future Developments* – Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 11, pp. 92-102, February 2002
- [3] Grum J., Božič S. and Županič M.: *Influence of quenching process parameters on residual stress in steel* – Journal of Materials Processing Technology, Vol. 114, pp. 57-70, 2001
- [4] Yazdi S.R., Retraint D. and Lu J.: *Experimental Study of Residual Stress Distributions in Quenched Parts by the Incremental Large Hole Drilling Method and by the Neutron Diffraction* – Journal of Testing and Evaluation, Vol. 28, pp. 282-289, July 2000.
- [5] HotDisk Thermal Constant Analyser: <http://www.hotdisk.se/>
- [6] COSMOS/M: <http://www.srac.com/>
- [7] Kuneš J., Vavroch O., Trkovský V., Čejka F., Maršík M.: *Tepelně fyzikální vlastnosti ocelí, Část 1: Oceli třídy 15 až 19*. Výzkumná zpráva VZVÚ 0477 Škoda Plzeň, 1991