

EXPERIMENTAL STUDY OF SEMI-SOLID STEEL DEFORMATION

R. Řídký*, J. Petruška*, J. Horský*, P. Kotrbáček*

Summary: *Semi-solid or mushy state processing permits a material to partially solidify before shape making operations. The understanding of material behaviour in the mushy state is critical for better control of various semi-solid processes. The aim of the present study is to experimentally quantify the deformation behaviour of carbon steel in mushy states. Semi-solid specimens under upsetting deformation were evaluated at various forming rates. The temperature of specimens was carefully controlled to keep the solid fraction constant. Based on the experiments, material parameters of the Perzyna's constitutive model are identified. Good correlation between simulated and measured results of the compression force was observed.*

1. ÚVOD

Tváření materiálů je jeden z nejstarších procesů, technologicky zvládnutých již v době, kdy nebyly známy teoretické základy. S rozvojem techniky byly objeveny nové postupy, které umožnily dosažení lepších kvalit výsledného produktu. Existují zde však reálné omezující faktory. Jedním z nich je požadovaná pevnost a odolnost nástroje. Dalším je možnost porušení tvářeného materiálu při velkých deformacích nebo u materiálů špatně tvářitelných. U uhlíkových ocelí se tvářecí teploty blíží až k 1300 °C. Výhodou je nejen malý přetvárný odpor, ale i zjemňování struktury a dynamické změkčování. Avšak stále relativně neznámá je oblast polotekutého stavu kovu. Zde je chování odlišné jak od tekutého, tak tuhého stavu. V teplotním pásmu polotekutého kovu se prostředí mění progresivně od oblasti čistě tuhé (křivka solidu), až po oblast čistě tekutou (křivka likvidu). Tak jak se mění složení těchto dvou fází, mění se reologie materiálu a tím i fyzikální rovnice, které ho popisují.

2. FORMULACE A CÍLE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU

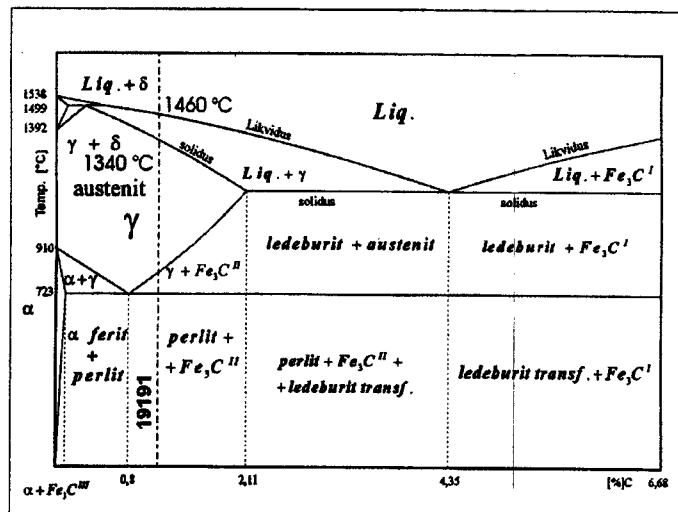
Cílem práce, je prozkoumat chování tvářeného materiálu za teplot pohybujících se v rozmezí mezi křivkami solidu a likvidu (obr.1). Dále pak najít takový matematický model (konstitutivní vztah), který je vhodný pro popis materiálu za tohoto stavu a „naladit“ jeho materiálové konstanty tak, aby dobře popisovaly materiál v polotekutém stavu. Proto byl navržen experimentální program, který má ověřit vliv následujících faktorů:

- vliv obsahu tuhé a tekuté fáze na zatěžovací sílu při tváření,
- vliv rychlosti zatěžování na zatěžovací sílu při tváření.

* Ing. Radek Řídký, Doc. Ing. Jindřich Petruška, CSc.: Ústav mechaniky těles, VUT FSI Brno, Technická 2, 616 69 Brno; E-mail: rridky@email.cz
Ing. Jaroslav Horský, Ing. Petr Kotrbáček: Letecký ústav, Laboratoř proudění a přenosu tepla, VUT FSI Brno, Technická 2, 616 69 Brno

Měření a výpočty budou provedeny nejprve pouze pro jeden typ materiálu. Zvoleným materiálem byla nástrojová uhlíková ocel 19 191. Jedná se o ocel s nízkým obsahem přísad, což umožňuje bližší studium jejích vlastností s pomocí rovnovážného metastabilního binárního diagramu Fe-C. Teplotní interval mezi křivkou solidu a likvidu, pro danou ocel, je 120 °C.

Křivka závislosti síla-poloha při konstantní teplotě a rychlosti zatěžování je výsledkem každého měření. Ta dále slouží jako vstup do numerické simulace (s využitím optimalizačního algoritmu) pro zjišťování materiálových konstant do zvoleného matematického modelu.



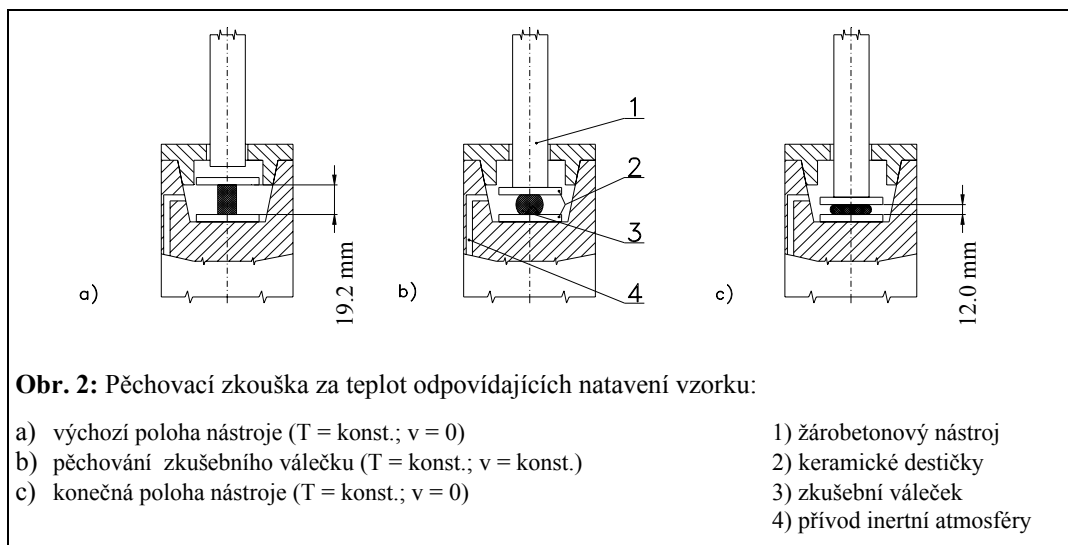
Obr. 1: Diagram Fe-C.

3. EXPERIMENTÁLNÍ METODY, NÁVRH ŘEŠENÍ

V našem případě byly zvoleny dvě základní experimentální metody. První metoda - vpichování tenkého nástroje do oceli v polotekutém stavu („Needle test“), je dobře použitelná při vyšších teplotách, (vyšších obsazích tekuté fáze ve vzorku). Při použití dostatečně tenkého nástroje lze touto metodou simulovat proces vtačování do poloprostoru. Při použití nástroje s větším průměrem zase simulujeme zpětné protlačování. Omezení použitelnosti první metody je dáno hrozícím porušením tenkého nástroje při zvětšujícím se obsahu tuhé fáze ve vzorku.

Druhá metoda - pěchování válečku za vysokých teplot („Hot upsetting test“) je naopak limitována teplotou, při které dosáhne obsah tekuté fáze takové hodnoty, že zkušební váleček není schopen udržet si původní tvar a vlivem gravitace se zhroutí. Tyto dvě metody umožňují studium chování oceli v celém teplotním pásmu mezi křivkou likvidu a solidu.

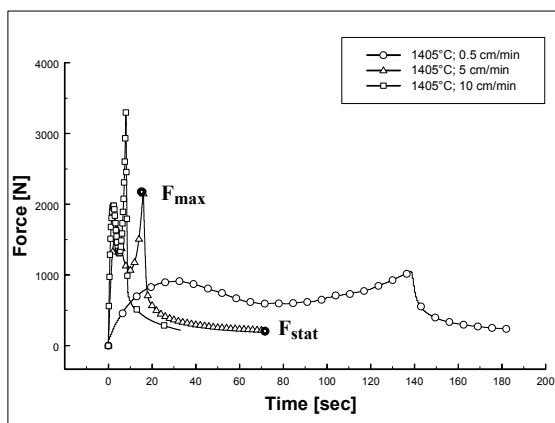
3.1 Pěchovací zkouška



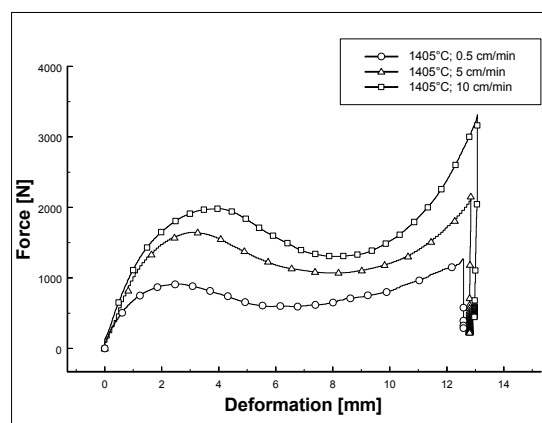
Experimentální vzorek pro pēchovací zkoušku je znázorněn na obrázku 2a). Poměr průměru válečku k výšce válečku odpovídá vztahu $v/d_0 = 1,6$. Zkušební váleček je umístěn na korundové vysoceslynuté keramické destičce s broušeným povrchem. Masivní podpěra pod vzorkem je vyrobena ze žárobetonu, kterým je přiváděna ochranná atmosféra přímo ke vzorku oceli. Tvářecí nástroj je vyroben také ze žárobetonu a přes druhou korundovou destičku zatěžuje zkušební váleček (viz obr. 2b).

Výsledky

Byly provedeny experimenty, které měly zjistit vliv rychlosti zatěžování na sílu potřebnou ke spēchování experimentálního válečku. Byly nastaveny tři různé rychlosti pēchování (0,5 cm/min., 5 cm/min. a 10 cm/min.). viz. obr.3 a obr.4.



Obr.3: Závislost zatěžovací síly na čase za konstantní teploty 1405 °C pro rychlosti zatěžování 0,5; 5 a 10 cm/min.



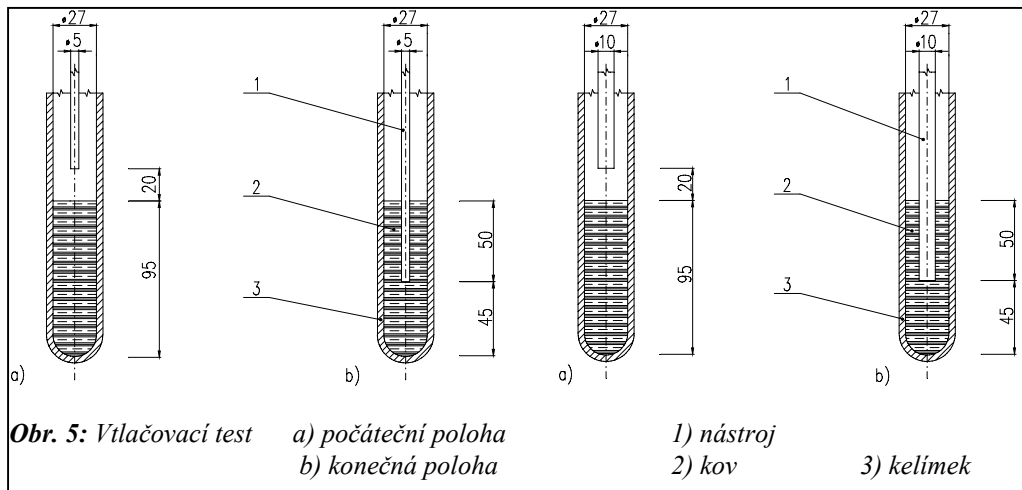
Obr.4: Závislost zatěžovací síly na poloze nástroje během pēchovacího testu při rychlosti zatěžování 0.5, 5 a 10 cm/min.

Při pozorování naměřených závislostí síla-poloha u pēchovací zkoušky je patrné, že velice zajímavým jevem je výrazný pokles síly v průběhu zatěžování. Dalším zajímavým efektem je odpevnění materiálu bezprostředně po ukončení zatěžování kdy síla velmi rychle klesá z maximální hodnoty na zhruba pětinu. Využití tohoto efektu v praxi by mohlo vést ke značnému snížení deformační energie ve srovnání se stávajícími postupy.

3.2 Vpichovací zkouška

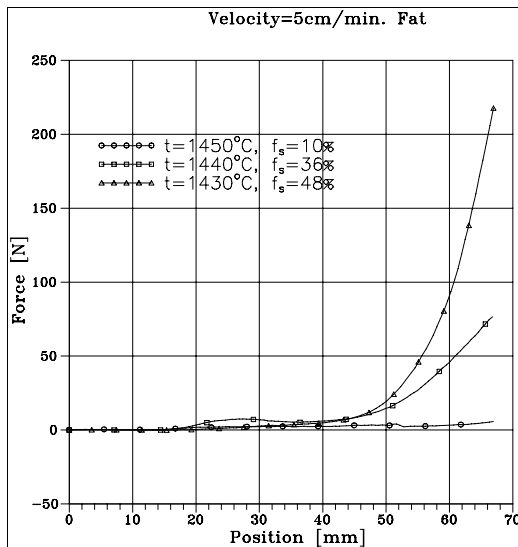
Experimenty jsou prováděny pro dva druhy nástrojů různých průměrů. Průměr prvního nástroje je $d = 5$ mm. Vnitřní průměr kelímku je $D_0 = 27$ mm. Nejmenší pětvoření vnějšího válcového tvaru se dosahuje při poměru $D_0/d > 5-6$ tj. za podmínek kdy se proces pětvoření přibližuje vtačování do poloprostoru. Při volném vtačování je okolní povrch tělesa zcela volný a výchozí polotovar se pětváří tím víc, čím je poměr D_0/d menší. Při tomto volném vtačování je v plastickém stavu jen část kovu pod průtláčnickem v tzv. ohnisku pětvoření, které zasahuje do hloubky až $1/6$ d. [14]

Průměr druhého nástroje je $d = 10.25$ mm. Poměr průměru kelímku k průměru nástroje je tedy $D_0/d < 5$ z čehož vyplývá, že se pochod pětvoření přibližuje zpětnému protlačování. Délka dráhy nástrojů v nataveném kovu je asi 50 mm.

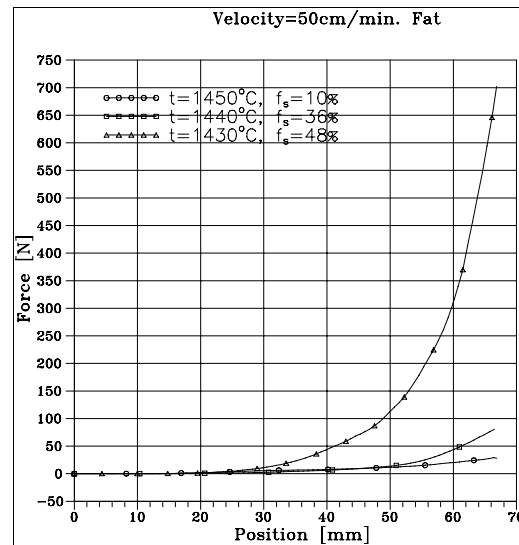


Výsledky

Z uvedených grafů je patrné, že odpor oceli proti vtlačení tenkého nástroje roste s klesající teplotou a po překročení určité hranice solidové fáze ve vzorku také se vzrůstající rychlostí. Přitom výraznější změny v průběhu sil jsou pozorované při změnách teploty. Vliv rychlosti, hlavně při nižších obsazích tuhé fáze ve vzorku, není tak výrazný.



Obr. 6: Graf závislosti sil na poloze nástroje pro různé teploty. Rychlost zatěžování 5 cm/min.



Obr. 7: Graf závislosti sil na poloze nástroje pro různé teploty. Rychlost zatěžování 50 cm/min.

4. VÝPOČTOVÁ ČÁST

Jak je z experimentálních měření zřejmé, není jednoduché popsat chování polotekutého kovu. Velmi významná je vedle závislosti na rychlosti deformace i závislost na teplotě. Pokud materiál obsahuje nízký podíl tuhé části (pod 0.05) pak tento materiál má chování ne-Newtonské kapaliny [6], [7], [8]. Naopak materiál s vysokým podílem tuhé části má nelineární viskoplastické chování.

Pro zjištění chování materiálu byly vytvořeny jednoduché experimentální zkoušky (viz experimentální část). Jeden typ zkoušek se týká zjišťování chování materiálu při vyšším obsahu tuhé fáze (pěchovací test). Druhý typ zkoušek byl vytvořen pro identifikaci chování materiálu při nižším obsahu tuhé části – Test vpichování. Pro výpočtové modelování využijeme konečnoprvkových programů ANSYS a LS-dyna. Důležitou veličinou, která vstupuje do numerického výpočtu je materiál. Pro oba typy zkoušek jsme použili stejný materiál, který je popsán v následující kapitole.

4.1. Materiál

Z experimentu vyplývá, že hledaný materiálový model musí být schopen popsat rozmezí teplot mezi křivkami solidu a likvidu v FeC diagramu.

K popisu chování materiálu s vysokým obsahem tuhé fáze byl použit materiálový model Perzyna [11].

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\gamma} \right)^m \right] \sigma_0(\varepsilon) \quad (1)$$

kde:

σ = mez kluzu,

$\dot{\varepsilon}$ = rychlost plastického přetvoření,

m = exponent zpevnění,

γ = viskozita materiálu,

$\sigma_0(\varepsilon)$ = statická hodnota přetvárného odporu,

Předpokládáme, že statická mez kluzu, zadaná pro danou teplotu a rychlost zatížení, je závislá pouze na plastickém přetvoření. Z výsledků experimentálního měření (při konstantní teplotě 1405 °C pro různé rychlosti) jsme zjistili, že po zastavení nástroje se odrelaxované síly blíží k hodnotě $F_{Stat} = 230$ N (obr.3).

Tento předpoklad jsme využili pro zjištění materiálových konstant. Numerická simulace byla provedena pro teplotu $T=1405$ °C (podíl tuhé části 0.7) a rychlosti 0.5, 5 a 10 cm/min. Ze dvou vybraných rychlostí, v_1 a v_2 jsme zjistili maximální a relaxované síly F_{max1} , F_{max2} , F_{stat1} , F_{stat2} a vypočítaly maximální a statickou hodnotu napětí

$$\sigma_{max1} = \frac{F_{max1}}{S}, \quad \sigma_{max2} = \frac{F_{max2}}{S}, \quad \sigma_{stat1} = \frac{F_{stat1}}{S}, \quad \sigma_{stat2} = \frac{F_{stat2}}{S} . \quad (2)$$

Podobně rychlost přetvoření na konci pěchování

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{v_1}{h}, \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{v_2}{h} . \quad (3)$$

V této rovnici, h je výška zkušební vzorku po stlačení a S je ideální plocha bez tvoření soudečku, vyjádřen z $S \cdot h = S_0 \cdot H_0$.

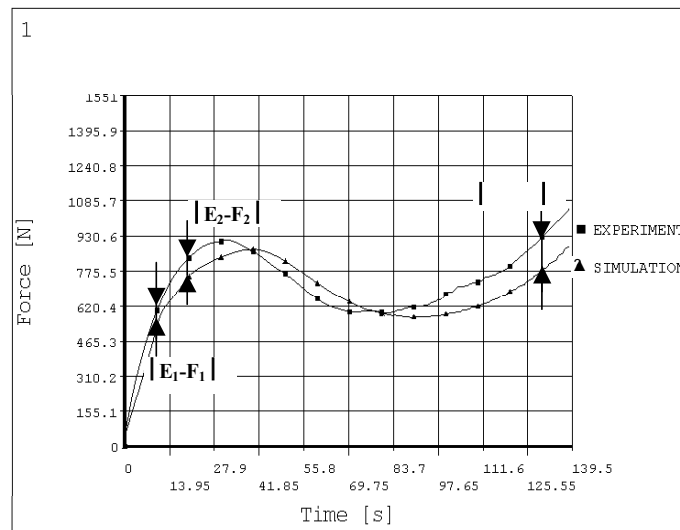
4.2. Identifikace materiálových konstant

Takto zjištěné parametry byly vstupem do optimalizačního algoritmu pomocí něhož jsme naladili křivku statické hodnoty přetvárného odporu $\sigma_0(\varepsilon)$. Ty jsou potom základem k naladění materiálu tak, aby rozdíl výsledků z numerické simulace a z experimentu byl minimální.

Označíme-li síly zjištěné z experimentu písmenem E a síly z numerické simulace písmenem F viz obr.8, pak můžeme formulovat objektivní funkci va tvaru:

$$s = \sum_{i=1}^{k.n} [E_i - F_i]^2 \quad (5)$$

kde, **n** počet bodů ve kterým minimalizujeme odchylku výsledků numerická simulace – experiment a **k** počet realizovaných experimentálních měření pro různé rychlosti.



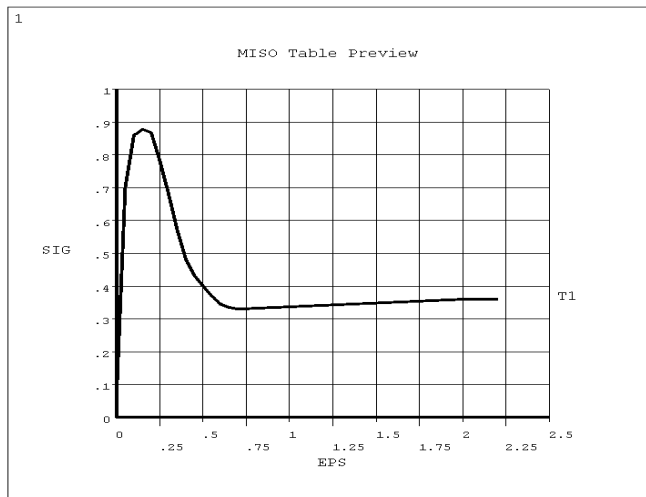
Obr. 8: Minimalizace odchylek výsledků simulace - experiment.

Dalším důležitým parametrem, který jsme museli naladit je součinitel tření. Ten jsme naladili z tvaru deformovaného vzorku a rozdílu od experimentálního měření. Ve výpočtu jsme zvyšovali hodnotu součinitele a výpočet opakovali tak dlouho až deformace (soudečkovitost) byly srovnatelné s experimentálně deformovaným vzorkem.

Po naladění statické křivky $\sigma_0(\varepsilon)$, jsme opětovně provedli výpočet parametrů zpevnění dle rovnice (1) a zadali do optimalizačního algoritmu jako návrhové proměnné. Při zpřesňování parametrů zpevnění jsme už statickou křivku neměnili.

Použitím výše popsané procedury jsme vypočetli následující hodnoty parametrů pro teplotu 1405 °C:

- statická hodnota přetvárného odporu obr.9
- exponent zpevnění $m = 0.35$
- viskozita $\gamma = 3.3 \times 10^{-4}$

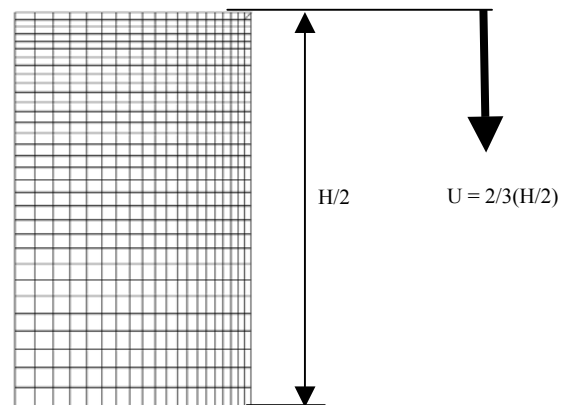
Obr. 9: Statická křivka přetvárného odporu $\sigma_0(\epsilon)$.

4.3 Simulace pčhování

Jak již bylo uvedeno výše, simulace pčhování byla provedena v programu ANSYS.

Při modelování geometrického modelu (dále jen FE modelu) bylo využito rotační symetrie modelu, symetrie okrajových podmínek i zatížení (obr.10). Pro vytvoření sítě byl použit typ elementu **SHELL 183**. Váleček byl deformačně zatížen přes tuhý kontakt. Hodnoty zatížení, sil a času byly převzaty přímo z experimentálního měření.

V předchozí kapitole jsme se zabývali identifikací materiálu. Takto získané parametry jsme zadali do výpočtu a provedli výpočty pro rychlosti zatěžování 0.5, 5 a 10 cm/min.



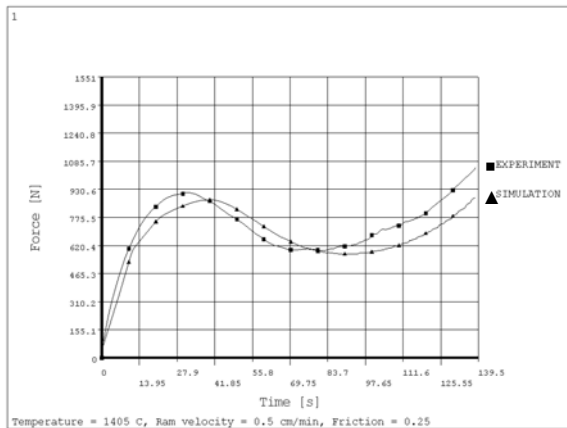
Obr.10 FE model

Výsledky

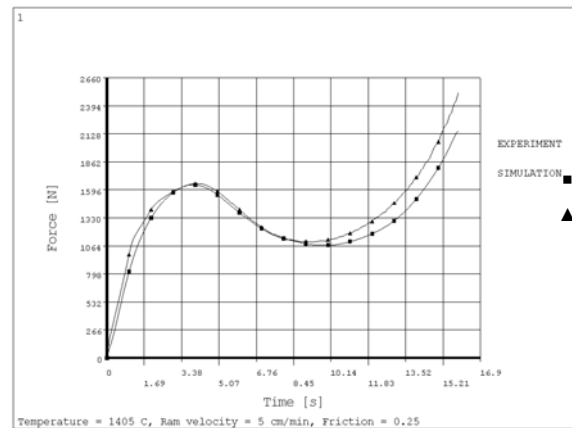
Pčhovací test byl proveden pro tři různé rychlosti zatěžování při teplotě 1405 °C, která u daného materiálu odpovídá 70 % tuhé fáze. Identifikace parametrů materiálového modelu byla provedena na základě minimalizace experimentálních a vypočtených výsledků. V numerické simulaci byl použit matematický model Perzyna. Parametry zadávané do výpočtu jsou:

- statická hodnota přetvárného odporu obr.9
- exponent zpevnění $m = 0.35$
- viskozita $\gamma = 3.3 \times 10^{-4}$

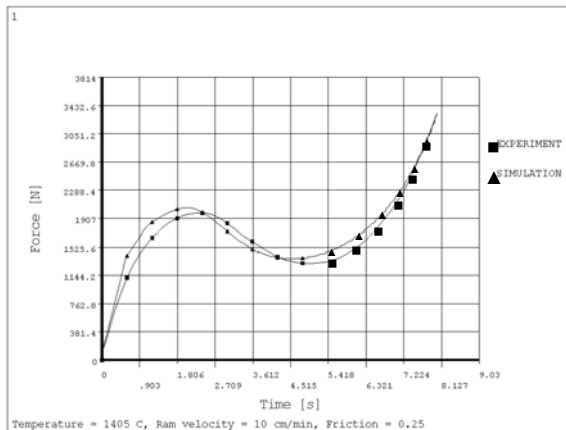
Vhodnost vybraného materiálu a identifikovaných parametrů je vidět na obr. 11 – 13, kde jsou porovnány naměřené a vypočtené síly pro dané rychlosti. Na obr. 14 je možné sledovat průběhy sil, které byly napočítány pro sedm rychlostí zatěžování v intervalu 0.5 a 10 cm/min. Pro rychlosti 0.5, 5 a 10 cm/min. je tento výpočet ověřen také experimentálně.



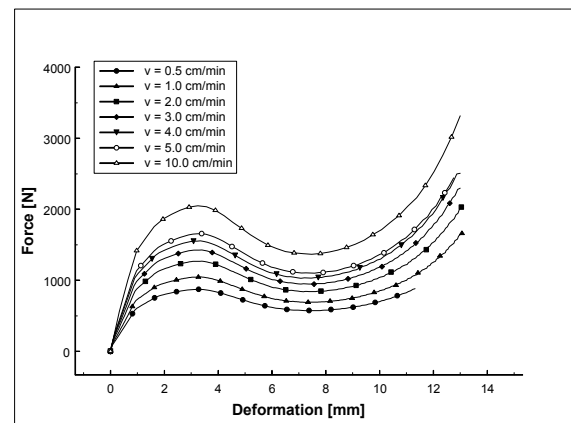
Obr. 11: Výsledná síla $F(t)$ pro rychlost zatěžování 0.5 cm/min.



Obr. 12: Výsledná síla $F(t)$ pro rychlost zatěžování 5 cm/min.



ýsledná síla $F(t)$ pro rychlost zatěžování 10 cm/min.



Obr. 14. Výsledky sil $F(d)$ pro zatěžovací rychlosti 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 a 10 cm/min při konstantní teplotě 1405°C.

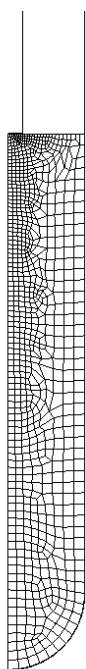
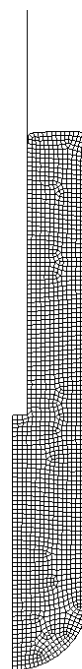
4.4 Simulace vpichování

Protože při řešení daného problému dochází k velkým deformacím konečnoprvkového modelu, není program ANSYS vhodný pro řešení této úlohy. Tento program nemá modul, který by dokázal přegenerovat konečnoprvkovou síť během výpočtu. Proto jsme pro řešení daného problému, využili konečnoprvkový program LS-dyna. Další výhodou tohoto systému je jeho materiálová knihovna, která obsahuje již námi popsaný materiálový model.

Numerická simulace byla prováděna pro nástroj o průměru $d = 5$ mm. Při modelování geometrického modelu jsme opět využili rotační symetrie modelu i zatížení (obr.15).

K identifikaci materiálu jsme opět využili uvedený algoritmus, (4.2. Identifikace materiálových konstant). Statická hodnota přetvárného odporu byla identifikována pro sérii konstantních teplot v intervalu od 1430 °C až po křivku likvidu v Fe-C diagramu (tomu odpovídá teplota 1460 °C).

Nástroj byl deformačně zatěžován a vtlačěn do hloubky 50 mm, viz. obr.5. Součinitel tření byl zadán stejně jako v předešlém případě $f = 0.25$

**Obr.15:** FE model**Obr.16:** FE model po deformaci

Na obr.15 je zobrazen FE model na začátku výpočtu. Parametry generování sítě byly nastaveny tak, aby za daný časový interval přegenerovali deformovanou síť. Na obr.16 je vidět, jak vypadá síť na konci výpočtu po deformaci.

Není jednoduché naladit tento výpočet z hlediska přegenerování konečnoprvkové sítě a z hlediska identifikace materiálových parametrů. Z těchto důvodů nebylo možné v tomto článku uvést srovnání naměřených a vypočtených výsledků pro vpichovací test..

5. PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují Grantové agentuře České Republiky (grant c. 106/01/0188) a grantu COST OC526.20. za podporu projektu.

6. LITERATURA

- [1] Flemings, M. C.: *Behavior of Metal Alloys in the Semi-solid State*, Metallurgical Transactions B, Vol. 22B, (1991), pp. 269-293.
- [2] Flemings, M.C.: *Behavior of metal alloys in the semi-solid state*, Metallurgical Transactions A, 22A (1991) 957-981.
- [3] Horsky, J., Raudensky, M., Kotrbacek, P.: *Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation*, Int. Conf. 6 th Conference on Materials and Technology, November 3-5, (1998), Convention Centre GH Emona, Portorož, Slovenia.
- [4] Joly, P.A., Mehrabian, R.: *The rheology of partially solid alloy*, J. Mat. Sci. 11, (1976), 1393-1418.
- [5] Kang, C.G., Kang, B.S., Kim, J.I.: *An investigation of the mushy state forging process by the finite element method*, J. Mat. Proc. Tech. 80-81, (1998), 444-449.
- [6] Kiuchi, M. and Sugizama, S.: *A New Process to Manufacture Semi-Solid Metals*, in Proceedings of 2nd Int. Conf. on the Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, ed. by S. Brown and M.C. Flemings, (1992), pp. 47-56.
- [7] Kiuchi, M., Sugiyama, S., and Arai, K.: *Study of Metal Forming in the Mushy State*, 1 st Report: Flow Stress and Deformation Behaviour of Alloys in Mushy State, in Proc. 20th Int. Machine Tool Design and Research Conf., (1979), pp. 71-78.
- [8] Kiuchi, M.: *Metal Forming in Mushy State in Plasticity and Modern Metal-Forming Technology*, ed. by T. Z. Blazynski, Chapter 11, (1989), pp. 289-313, Elsevier Applied Science, NY.
- [9] Kotrbacek, P., Horsky, J., Raudensky, M.: *Experimental Study of Steel Behaviour in Process of Mushy State Deformation*, Int. Conf. Continuous Casting of Billets, 21 - 22 Oct. (1997), Trinec, CR, p. 92 -106.
- [10] Laxmanan, V., Flemings, M.C.: *Deformation of semi-solid Sn-15 Pct Pb alloy*, Metallurgical Transactions A, 11A, (1980), 1927-1936
- [11] Perzyna, P.: *Fundamental problems in viscoplasticity*, Advances in Applied Mechanics 9, (1968), 313-377.
- [12] Saunders, N., Miodownik, A.D.: *Calphad*, Elsevier Science Publishing, Amsterdam, 1998.
- [13] Suery, M. and Flemings, M. C.: *Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-solid Dendritic Alloys*, Metallurgical Transactions A, Vol. 13A, (1982), pp. 1809-1819.
- [14] Sundman, B.: *ThermoCalc*, Users Guide, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1997.
- [15] Turng, T.S., Wang, K.K.: *Rheological behaviour and modeling of semi-solid Sn-15% alloy*, J. Mat. Sci. 26 (1991), 2173-2183.
- [16] Yoon, J.H., Im, Y.T., Kim, N.S.: *Finite element modeling of the deformation behavior of semi-solid materials*, J. Mat. Proc. Tech. 113, (2001), 153-159.
- [17] Zavaliangos, A., Lawley, A.: *Numerical simulation of thixoforming*, J. Mat. Eng. Performance 4, (1995), 40-47.