

Numerická simulace zápusťkového kování vačky

Numerical Simulation of Die Forging of a Cam

Ing. Tomáš Perna; Mgr. Marek Vindyš

MATERIÁLOVÝ A METALURGICKÝ VÝZKUM s.r.o., Regionální materiálově technologické výzkumné centrum, Pohraniční 693/31, 703 00 Ostrava-Vítkovice, Česká republika

Pomocí metody konečných prvků byla v programu FORGE provedena numerická simulace zápusťkového kování vačky z oceli 100Cr6. Proces sestává ze dvou kroků kombinujících symetrický tok kovu vzhledem k osově symetrické části vačky a nesymetrický vzhledem k excentricitě vačkovité části. V obou krocích se hroutí KP-sít' a simulaci je nutno tomu přizpůsobit. Výsledný tvar výkovku proto zůstává nezměněn, což v tomto případě dává přesnou shodu s fyzikálním experimentem. Hodnoty normalizovaného lomového Latham-Cockroftova kritéria dosahují svého maxima přesně v oblasti skutečného kritického místa výkovku. K vylepšení konstrukčního návrhu tvaru vačky by s ohledem na její excentricitu přispěl matematický model studující utváření celkové symetrie vačky v procesu kování.

Klíčová slova: numerická simulace; metoda konečných prvků; zápusťkové kování

By means of the finite element method in the program FORGE, the numerical simulation of die forging of a cam from steel 100Cr6 was performed. The process consists of two steps combining symmetric metal flow with respect to the axially symmetric part of a cam and an asymmetric one with respect to the eccentricity of the part typical for a cap-shape. During both steps, the FE-mesh is collapsing and a simulation must be adapted to such a situation. Thus a resulting shape of the forged piece stays unfulfilled by a metal flow, which partially surprisingly yields a perfect accordance with a reality in this case. The values of the normalized Latham-Cockroft damage criterion reach their maximum exactly in a region of a real critical place of the forged piece. An improvement of a purely designer's approach concerning the whole shape design for a cam is substantially expected by using the mathematical model for studying a process of forming of the whole symmetry of a cam within the process of its forging.

Key words: numerical simulation; finite element method; die forging

Z důvodů nedostatečného zaplnění zápusťky při kování vačky bylo rozhodnuto analyzovat současný stav kovářského procesu na základě numerické simulace procesu, a to zejména vliv tvaru nástrojů. Proces je určen kombinací dvou vzájemně závislých toků kovu: vnitřního vzhledem k osově symetrickému děrování polotovaru a vnějšího v excentrickém směru dávajícímu polotovaru charakteristický tvar vačky. Správné zaplnění zápusťky je podmíněno takovou realizací vnějšího toku, kterou vnitřní tok neruší. Tohoto stavu dosaženo zatím není, což je podrobně zdokumentováno.

1. Numerická simulace kování vačky

Byla provedena numerická simulace pomocí metody konečných prvků (dále MKP) zápusťkového kování vačky v programu Forge NxT 1.0 francouzské firmy Transvalor. Byly simulovány dva na sebe navazující procesy kování. Vstupem do první operace byl válec s podstavou elipsy s velmi malou výstředností (rozměr podstavy $22,3 \times 21,7$ mm, výška 25 mm). Výstupem je polotovar vačky s předkovanou částí vylišovaného středu. Simulace byla zhotovena v plném 3D s rovinou symetrie. Materiálový model deformačního chování byl

použit z databáze programu Forge oceli 100Cr6 ve zjednodušené Spittelově aproximaci platné pro tváření za tepla [1]:

$$\sigma = Ae^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}^{m_3}, \quad (1)$$

kde ε je skutečná deformace, σ přetvárný odpor materiálu, A konstanta konzistence, m_1 teplotní koeficient, m_2 citlivost deformačního zpevnění, m_3 citlivost rychlosti deformace, m_4 koeficient povolování deformace. Teplotní pole vstupního eliptického válce bylo homogenní a bylo nastaveno na teplotu 1000 °C. Součinitel přestupu tepla byl vybrán z předdefinovaných hodnot programu Forge jako střední hodnota pro tváření za tepla $\alpha = 10 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tření mezi tvářeným kusem a nástroji bylo zvoleno z databáze programu Forge určené pro povrchy bez mazání (tření podle zákona Coulomba a Trescy s koeficienty $\bar{m} = 0,8$, $\mu = 0,4$) [2].

V simulaci bylo také sledováno normalizované Latham-Cockroftovo lomové kritérium. Je to nejčastěji používané lomové kritérium, zohledňující zároveň napětové a deformační účinky na pravděpodobnost vzniku lomu. Jeho nejvyšší hodnoty indikují místa

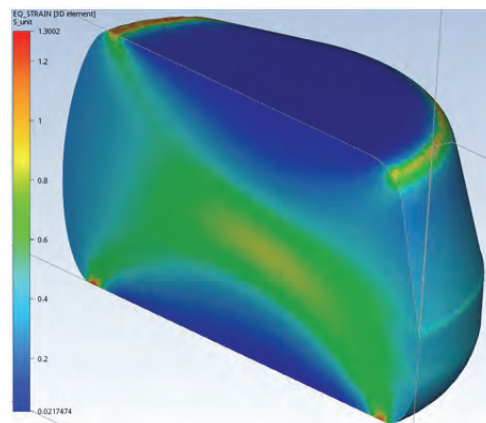
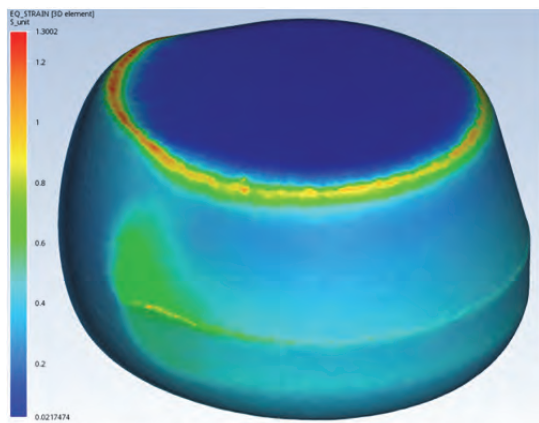
s nejvyšší pravděpodobností porušení materiálu. Je definované vztahem

$$C_{cr} = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (2)$$

kde je σ_{max} nejvyšší z hlavních napětí, $\bar{\sigma}$ efektivní napětí (též napětí Von Mises), $\bar{\epsilon}$ efektivní deformace, $\bar{\epsilon}_f$ hodnota efektivní deformace při lomu.

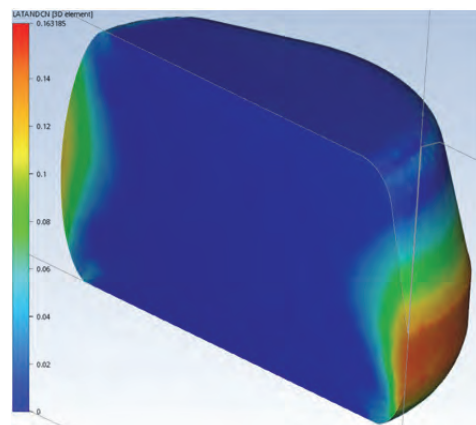
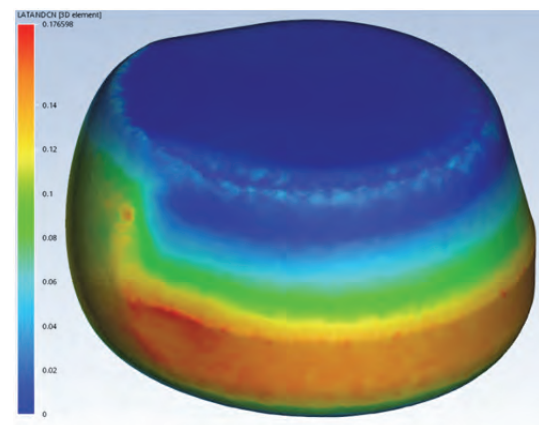
První operace

První kování nebylo simulováno do požadované výšky z důvodu vzniku přeložky a zborcení konečně-prvkové sítě (dále KP-sítě). Výkovek, který je předáván do následující simulace, je cca o 1,5 mm vyšší než ve skutečnosti. Rozložení fyzikálních veličin na povrchu a v příčném řezu výkovku je znázorněno na obr. 1 a 2.



Obr. 1 Rozložení efektivní deformace ve výkovku po 1. kovací operaci; nahoře na povrchu, dole v řezu v rovině symetrie

Fig. 1 Distribution of effective strain in forging after the 1st forging operation; top picture – on surface of the forging, bottom picture – in the symmetry plain section

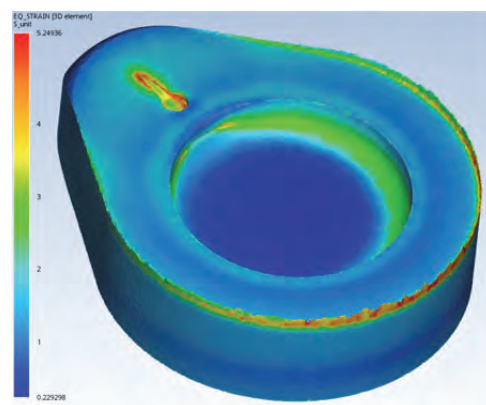


Obr. 2 Rozložení normalizovaného Latham-Cockroft lomového kritéria ve výkovku po 1. kovací operaci; nahoře na povrchu, dole v řezu v rovině symetrie

Fig. 2 Distribution of the normalized Latham-Cockcroft fracture criterion in forging after the 1st forging operation; top picture – on surface of the forging, bottom picture – in the symmetry plain section

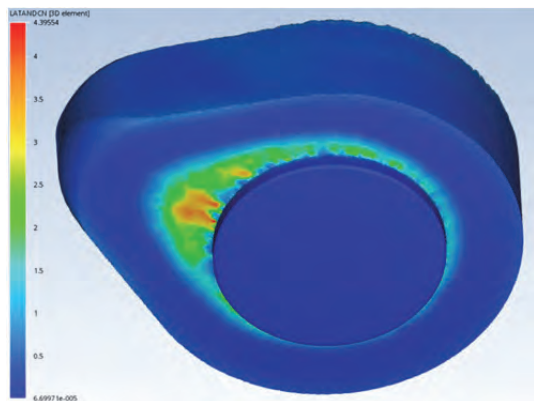
Druhá operace

V závěru druhé operace došlo k extrémnímu napěchování materiálu do vzniklých přeložek a ke zborcení KP-sítě. Proto jsou zde prezentovány výsledky ve dvou stavech: před zborcením, kdy ještě špička výkovku není zcela zaplněná, a finálním, kdy došlo ke zborcení sítě, výkovek má předepsanou výšku, ale hodnoty fyzikálních veličin už nejsou reálně dosažitelné. Rozložení veličin před zborcením sítě je znázorněno na obr. 3 a 4.

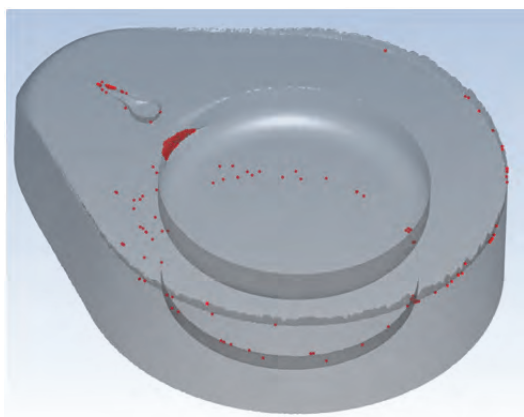


Obr. 3 Rozložení efektivní deformace po 2. kovací operaci

Fig. 3 Distribution of the effective deformation after the 2nd forging operation



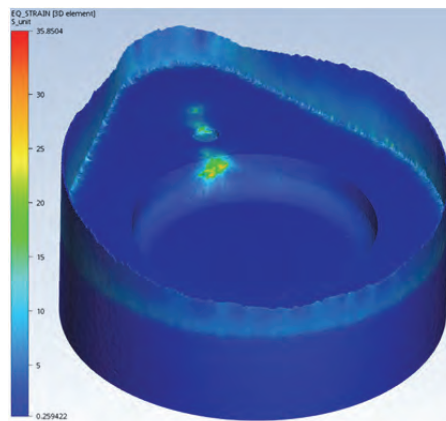
Obr. 4 Rozložení lomového kritéria z pohledu na spodní stranu polotovaru vačky po 2. kovací operaci
Fig. 4 Distribution of the fracture criterion from the view of the underside of the cam blank after the 2nd forging operation



Obr. 5 Zobrazení přeložek po 2. kovací operaci (červeně)
Fig. 5 Image of folds after the 2nd forging operation (red)

2. Shrnutí a závěr

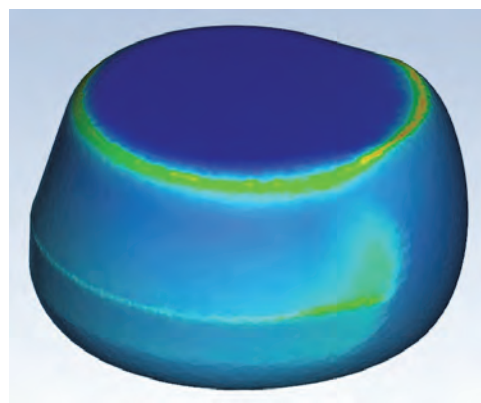
Rozložení fyzikálních veličin (teplota, lomové kritérium, efektivní napětí a stupeň deformace) na povrchu a v příčném řezu výkovku nevykazuje po první kovací operaci žádnou odchylku, která by naznačila nesprávný postup.



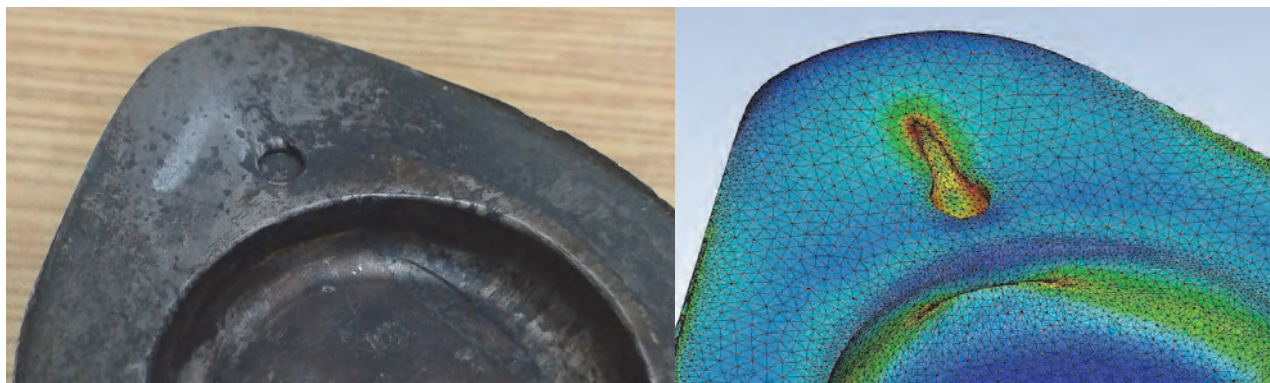
Obr. 6 Rozložení efektivní deformace ve finálním stavu výkovku; přeložky byly kompletně zalisovány.
Fig. 6 Distribution of the effective deformation in the final state of forging; the folds were fully pressed.

Rozložení fyzikálních veličin po druhé kovací operaci vykazuje kritické místo v oblasti přechodu mezi vačkovitou a kruhově symetrickou částí výkovku, kde efektivní napětí a lomová kritéria dosahují nedovolených hodnot (obr. 3 a 4). Toto je doprovázeno vznikem a zalisováním přeložky, která vzniká z toho objemu kovu, který se v oblasti kritického místa nemůže podílet ani na vnějším, ani na vnitřním toku (obr. 5), a zůstává tak nedotčená pro jakoukoliv další deformaci. Kontaktní úloha interakce vnějšího a vnitřního povrchu výkovku je tedy geometricky přeurčená a nelze ji v daném případě úspěšně řešit: výsledný tvar výkovku zůstává nezměněn. To ukazuje i zborcení KP-sítě v tzv. finálním stavu výkovku, kdy je tvar vačky již úplný (obr. 6). Celkově provedená numerická simulace kování vačky velmi dobře souhlasí s fyzikální realitou, jak ukazují porovnání na obr. 7 až 9.

Jelikož vačka se zdá být konstrukčně přesně navržena, tj. excentricita je maximální, přitom však se nezdá, že by svými geometrickými parametry byla geometricky nadlimitní, bude kování velmi citlivé na každou operaci a její geometrické poměry po celém povrchu kovaného kusu.



Obr. 7 Srovnání tvaru výkovku po 1. operaci v simulaci a ve skutečnosti.
Fig. 7 Comparison of the shape of forging after the 1st operation in simulation and in reality

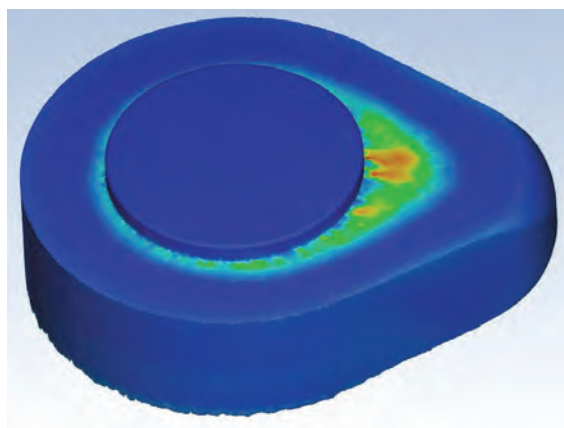


Obr. 8 Srovnání skutečné a simulované přeložky
Fig. 8 Comparison of the real and simulated lap

Toto klade značné nároky na jednoznačné stanovení počátečních podmínek, tj. na ovalitu tyče a na poměr délky a průměru vstupního polotovaru l/d . Zde vidíme možnost, jak pro dané nástroje vyzkoušet několik sobě blízkých poměrů l/d pomocí numerické simulace na FORGE a vymezit ty poměry, pro které je velikost kritického místa mezi kořenem vačky a kruhovým otvorem nejmenší.

Ke korektnímu nastavení parametrů kování tak náročného tvaru by výrazně přispělo i sestavení matematického modelu procesu zahrnujícího Gelejiho

teorii (např. [3]). Šlo by o to, rozpoznat v tomto modelu vztah mezi oběma toky kovu (vnějším, vzhledem k charakteristickému excentrickému tvaru vačky, a vnitřním vzhledem k osově symetrickému otvoru). Z celkové asymetrie úlohy vzhledem k oblasti výronku, studované v rámci algoritmického systému HMM TP-Complex [4], by pak musela vyjít podmínka rovnováhy sil, která je u klasických postupů, jako podle Gelejiho, východiskem. Tím by se otevřela šance popsat korektně oblast kritického místa při kování vačky.



Obr. 9 Paprskovité povrchové útvary odpovídají oblasti s maximální hodnotou lomového kritéria
Fig. 9 The radial surface formations correspond to the area with the maximum values of the fracture criterion.

Poděkování

Tato práce vznikla při řešení projektu č. LO1203 „Regionální materiálově technologické výzkumné centrum - program udržitelnosti“ financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Literatura

- [1] Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter I.A.6. Visco-plastic flow law according to the "Hansel-Spittel" model.
- [2] Forge reference documentation: Part 5: Process data, Chapter III. Friction.
- [3] FOREJT, M. Teorie tváření (návod do cvičení) http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/teorie_tvareni__navody_do_cviceni__forejt.pdf
- [4] PERNA, T. HMM TP-Complex, Copyright.