

pp. 469–474 Paper **#107**

MODELLING OF MICRO AND NANO INDENTATION OF MODERN NICKEL-BASED SUPERALLOYS FOR TURBOFANS

Z. Hrubý¹, J. Plešek², S. Tin³

Summary: Stress and strain distribution underneath various types of indentors – spherical, conical, and Berkovich – can be provided by the finite element method. In the presented work, indentation of isotropic aluminium is introduced as a benchmark problem, in which plasticity and contact algorithms are tested. The knowledge obtained in this way passes on to the real-life indentation processes involving orthotropic materials such as FCC metals (Ni-based alloys) in the context of nonlinear continuum and finite strain elasto-plasticity, including homogenization approach on the material microscale.

1. Úvod

Moderní letecké motory General Electrics pro v současné době zaváděný stroj Boeing 787 Dreamliner představují se svojí vyšší efektivitou, vyšší čistotou, jednodušší konstrukcí na údržbu, montáž a demontáž špičku v daném odvětví a jimi osazená letadla operativnost provozu srovnatelnou pouze s dřívějšími čtyřmotorovými stroji. Špičkových parametrů je dosaženo kromě modifikované konstrukce lopatek vstupní a výstupní části také zvýšením teploty ve spalovacím prostoru. To představuje zvýšené nároky na materiály spalovacího prostoru za vysokých teplot. V současné době se pro uvedené účely používají superslitiny na bázi niklu. Tyto materiály představují široké spektrum použití nejen ve výše uvedené aplikaci.

Řízeným růstem krystalů lze dosáhnout různého objemového množství precipitátů γ' – Ni₃(Al, Ti) – v niklové matrici γ . Tím se výrazně mohou měnit mechanické vlastnosti. Jelikož jsou tyto slitiny poměrně drahé, je vhodné pro zjišťování jejich mechanických vlastnosti a hledání optimálního množství a tvaru precipitátů v matrici použít moderní metody indentace, které jsou mnohonásobně méně náročné na množství testovaného materiálu než klasické mechanické zkoušky. Poměrně jednoduchý princip těchto metod je však komplikován zvýšenou náročností na korektní vyhodnocování výsledků.

Představu o rozložení napětí a deformace může dát například metoda konečných prvků. Modelovány jsou procesy indentace kulovým, kuželovým a Berkovichovým indentorem. Jako referenční a do jisté míry i verifikační model je simulována úloha indentace isotropního mate-

¹ Ing. Zbyněk Hrubý: Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.; Dolejškova 5; 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 053 441; e-mail: <u>zbynek@it.cas.cz</u>

² Ing. Jiří Plešek, CSc.: Ústav termomechaniky AV ČR, v.v.i.; Dolejškova 5; 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 053 213; e-mail: <u>plesek@it.cas.cz</u>

³ Sammy Tin, Ph.D.: Illinois Institute of Technology; 10 West 32nd Street; Chicago, IL, 606 16, USA; tel.: +1.312 567 3780; e-mail: <u>tin@iit.edu</u>

riálu (hliníku). Poznatky jsou poté převedeny do modelování indentace ortotropních materiálů (přesněji pseudoisotropních) jako jsou niklové superslitiny s užitím nelineární formulace mechaniky kontinua a velkých plastických deformací.

2. Modelování indentace isotropních materiálů

Byla provedena sada numerických experimentů modelováním indentace isotropního materiálu. Použita byla aktualizovaná Lagrangeova formulace kontinua a isotropní zpevnění podle

$$\sigma_k = \sigma_{k0} + Q \left(1 - e^{-b \varepsilon_{eff}^{pl}} \right). \tag{1}$$

Studován byl také vliv kvality sítě na řešení a efekt přesíťování s užitím ALE formulace, vliv smykového i objemového zamykání prvků a tzv. hourglass efekt vznikající díky podintegraci matice tuhosti úlohy. V rámci těchto testů byl sledován vliv tření na výsledné zatěžovací a odlehčovací křivky, jak je uvedeno na Obr.1 a) a b).



Obr.1 Vliv efektu tření a), b), srovnání geometrického účinku indentoru c)

Byla zjištěna skutečnost, že i při odlehčování může docházet k dalšímu nárůstu plastických deformací. Bodově stále platí, že materiál přechází z elasticity do elastoplasticity a poté již do rozvinuté plasticity. Protože je však v kontaktu s tělesem stále větší plocha indentoru, poměrově se celkový zplastizovaný objem snižuje vůči celkovému zatíženému objemu. Vlivem uvolnění deformační energie z elasticky zatíženého objemu pak dochází k dalším, byť malým, plastickým deformacím v plastické zóně vlivem stísnění exponovaného zplastizovanému objemu a to ve stejném smyslu jako při zatěžováním samotném. Efekt je patrný na odlehčovacích křivkách v Obr.1 c).

3. Modelování indentace niklových superslitin

Niklové slitiny je možné uvažovat jako ortotropní materiály, které mají v třech vzájemně na sebe kolmých směrech stejné mechanické vlastnosti. Jedná se tedy o zvláštní případ anisotropie zvaný pseudoisotropie. Jejich elastické chování je možné popsat třemi konstantami *E*, *v*, *G*, které jsou však na sobě nezávislé. Elastické konstanty niklových slitin jsou však ve většině případů získávány jako moduly pružnosti v tahu v různých směrech orientace monokrystalu $E_{<100>}$, $E_{<111>}$, $E_{<111>}$. Vzájemný přepočet mezi uvedenými dvěma množinami elastických konstant pomocí rotace konstitučního vztahu do různých směrů krystalografické mřížky je však nejednoznačný. Proto je pro jednoznačný převod konstant nutné změřit také Poissonův poměr ve směrech <100>. Pro elastoplastickou část popisu byla použita Hillova podmínka plasticity.

V realitě se vyskytují v niklové matrici precipitáty kulového tvaru při nízkém objemovém procentu fáze γ ', s rostoucím objemovým podílem mají spíše tvar krychlí. V praxi je velikost precipitátů mnohem menší než velikost indentoru, proto je vhodné při popisu niklových slitin s různým objemovým podílem precipitátů užít homogenizace. Z toho důvodu byla pro simulace zvolena množina vzorků s ideálním rozložením precipitátů v matrici podle Obr.2 a Tab. 1.



a) kulové precipitáty

b) kubické precipitáty

Obr.2 Ideální distribuce precipitátů v matrici

označení	obj. proc. γ'	rozměr precipitátů		
[–]	[%]	[nm]		
kulový tvar				
VF-01r	1	45.5		
VF-05r	5	78.0		
VF-10r	10	98.0		
VF-20r	20	123.0		
VF-30r	30	141.0		
VF-40r	40	155.0		
krychlový tvar				
VF-30a	30	228.0		
VF-40a	40	250.0		
VF-50a	50	270.0		
VF-60a	60	287.0		
VF-70a	70	302.0		

Tab. 1	Objemové	zlomky	precipitátů
	5	~	T T

Byly testovány dva způsoby homogenizace. V prvním případě byly dílčí fáze precipitátů a matrice modelovány jako isotropní materiály a výsledná anisotropie byla dána pouze konfigurací precipitátů v matrici, tyto výsledky homogenizace uvádí Obr.3 a) a b). V druhém případě byly i dílčí fáze modelovány jako ortotropní, příslušné výsledky homogenizace jsou uvedeny v Obr.3 c) a d). Z výsledků je zřejmé, že oproti původním předpokladům nelze použít zjednodušujícího postupu prvního případu. Pro simulaci indentace niklových slitin byly proto použity homogenizované výsledky z Obr.3 c) a d).



Obr.3 Výsledky homogenizace





Jako výsledek numerických simulací jsou uvedeny v Obr.4 výsledky indentací kulovým a konickým indentorem pro různá idealizovaná objemová zastoupení precipitátů.

Bylo potvrzeno, že daný model s užitím Hillovy podmínky plasticity umožňuje popsat změnu kruhového otisku spíše na čtvercový v případě kulové indentace – Obr.5 (Eidel & Gruttmann, 2007).



Obr.5 "Squaring the circle" efekt – kulový indentor – 1% obj. podíl precipitátů

4. Závěr

Byla simulována možnost simulace procesu indentace v komerčním MKP balíku ABAQUS. Na základě uvedených numerických experimentů bylo zjištěno, že i při odlehčování zkušeb-

ních vzorků může docházet k dalšímu plastickému přetvoření. Toto je způsobeno neuniformním rozdělením napjatosti pod indentorem. Výsledkem studie je též fakt, že mimo případ kulového indentoru hraje velikost tření zanedbatelnou roli na celkový výsledek. V případě kulového indentoru díky velkým plastickým tokům pod indentorem toto však neplatí. Aktualizovaná Lagrangeovská formulace s využitím hypoelastického popisu pro Cauchyho napětí a logaritmickou deformaci v programu ABAQUS umožňuje s užitím isotropního zpevnění a podmínky plasticity podle Hilla kvalitativně popsat i jev "squaring the circle", ačkoli není plně termodynamicky korektní.

V navazujících studiích bude simulace procesu indentace isotropních či ortotropních materiálů po doměření nezbytných experimentálních dat sloužit jako validační úloha pro další modely plasticity při velkých deformacích. Z hlediska kombinací materiálových, geometrických i kontaktních nelinearit je úloha modelování indentace unikátní a často pro daný MKP řešič limitní.

5. Poděkování

Příspěvek byl podpořen grantovým projektem GA ČR 101/09/1630 pod výzkumným záměrem AV0Z20760514 a grantovým projektem GA ČR 101/08/H068.

6. Literatura

ABAQUS Online Documentation (2007): Version 6.7-3. Dassault Systèmes.

Bathe, K.-J. (1996) Finite Element Procedures, Prentice-Hall.

Eidel, B. & Gruttmann, F. (2007) Squaring the circle – A courious phenomenon of fcc single crystals in spherical micro indentation, *Computational Material Science*, 39, pp. 172–178.

Fischer-Cripps, A.C. (2004) Nanoindentation, Springer-Verlag New York.

- Hrubý, Z. & Tin, S. (2009) FE-modelling of the indentation processes using orthotropic elastic-plastic material model and its application in Ni-based superalloys, in: *Proceedings of 10th Workshop on Applied Mechanics 2009* (M. Daniel, et al eds.), ČVUT v Praze, Praha.
- Lemaitre, J. & Chaboche, J.L. (1990) *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press.