

Prof. RNDr. Michal Kotoul, DrSc.
Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
FSI VUT v Brně
Technická 2, 616 69 Brno

Oponentní posudek disertační práce

Ing. Petra Kubíka

IMPLEMENTACE, KALIBRACE A VYUŽITÍ PODMÍNEK TVÁRNÉHO LOMU V PROGRAMECH MKP

1. Aktuálnost tématu

Tvárné porušení je jedním z nejrozšířenějších procesů poškozování kovových materiálů v podmínkách monotónního zatěžování. Vývoj tvárného porušení je podmíněn rozvojem plastické deformace materiálu a zpravidla vede ke konečnému lomu tělesa. Problém tvárného porušení sehrává významnou roli v průmyslu např. při optimalizaci technologických procesů, stanovení bezpečnosti v automobilovém a leteckém průmyslu, analýze kovových konstrukcí ve stavebnictví atd. Pokročilé modely tvárného porušení obsahují řadu parametrů, jejichž identifikace vyžaduje náročné experimenty výpočtové simulace. Díky značnému pokroku výpočetní techniky a výpočetních metod, zejména MKP, se v současné době modely tvárného porušení využívají již i v technické praxi. Přitom se preferují především tzv. nesvázané modely, kdy rozvoj tvárného porušení neovlivňuje rozvoj plastické deformace a kalibrace modelů se značně zjednoduší. Vzhledem k nedostatku materiálových dat, nepřenositelnosti identifikovaných parametrů na jiné materiály a nedostatku implementací modelů tvárného porušení v systémech MKP je každý příspěvek v dané oblasti velmi cenný. Z tohoto hlediska je téma předložené disertační práce velmi aktuální a současně plně odpovídající vědnímu oboru Aplikovaná mechanika.

2. Cíle disertační práce a jejich splnění

Cílem výzkumu realizovaného v rámci disertace byla analýza a vlastní modifikace stávajících kritérií tvárného porušení, dále implementace vybraných kritérií do explicitního kódu MKP. Nedílnou součástí byla kalibrace vybraných kritérií pomocí vhodných experimentů a aplikace kalibrovaných modelů na simulaci procesů tváření a dělení materiálů. Lze konstatovat, že cíle disertační práce byly splněny.

3. Vyjádření k postupu, konkrétní přínos a použitá metodika řešení

Předložená práce se danou problematikou zabývá na 106 stranách textu a rozčleněného do 9 kapitol a Dodatku obsahujícího výsledky simulace vybraných kalibračních experimentů. Literárních citací je 104. Vlastní publikace doktorand necituje, jejich seznam není v disertaci uveden. Původní výsledky jsou prezentovány v kapitolách 4 (str. 35-38), 5 (str.39-51), 6 (str. 52-64), 7 (str.65-76) a 8 (str. 77-81) a jsou stručně shrnuty v Závěru (str. 82-83).

Po metodické stránce je předložená práce vypracována promyšleně a poskytuje i základní literární údaje a postupy nutné pro splnění cílů. Postup při řešení uvedené tematiky vychází a navazuje na kvalifikovaný literární rozbor současného stavu problematiky a soustřeďuje se na diskusi a řešení čtyřech okruhů problémů.

První se týká porovnání nově navrženého kritéria KHPS s vybranými kritérii z literatury, přičemž identifikace konstant byla provedena pro hliníkovou slitinu ČSN 424203 používané zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Ze simulace vybraných kalibračních testů byl učiněn závěr, že kritérium KHPS výborně predikuje miskový lom válcového hladkého vzorku a válcových vzorků opatřených vrubem.

Druhý okruh problémů se týká porovnání kritéria KHPS a KHPS2 s dalšími vybranými kritérii, přičemž identifikace konstant byla provedena pro uhlíkovou ocel 12050. Součástí kalibračních experimentů byly též pěchovací zkoušky se speciálním typem vzorku (váleček opatřený jamkou), se kterým se dosahuje nízké triviality napětí. Výsledky ukazují, že kritéria KHPS a KHPS2 vykazují velmi dobrou predikci tvárného porušení.

Třetím okruhem problémů je simulace dopředného protlačování za studena oceli 12050 a vzniku centrálních tzv. „chevron“ trhlin. Z výsledků doktorand usuzuje, že pro velmi dobrou shodu simulace s experimentem je potřeba použít kritérium, jehož lomové přetvoření je při rotačně symetrickém tahu v oblasti mezi kritériem KHPS a kritériem, které navrhli Bai a Wierzbicki.

Poslední okruh problémů se týká aplikace navržených postupů kalibrace kritérií pro simulaci stříhání tyčí z oceli 12050 a hodnocení jednotlivých kritérií podle shody simulace a experimentu.

4. Význam pro další rozvoj vědního oboru a praxi

Výsledky disertační práce mají aplikační charakter a představují významný příspěvek k simulaci tvárného lomu vybraných materiálů při zvolených technologických operacích. V této souvislosti je vhodné konstatovat, že předložená disertační práce úspěšně navazuje na tradiční výzkum Ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky v oblasti modelování tvárného porušování se zřetelem na průmyslové aplikace.

5. Formální úprava disertační práce

Po formální stránce má práce požadovanou úroveň a odpovídá standardům. Obrázky jsou dostatečně vypovídající, text je srozumitelný jak z obsahového hlediska, tak z hlediska jazykového. V práci jsem našel jen minimální počet překlepů.

6. Přípomínky a dotazy k práci

- a) Poněkud v práci postrádám popis použitých modelů plastického tečení, předpokládám, že byly použity vždy modely asociovaného plastického tečení.
- b) Z textu usuzuji, že pro popis plastických deformací byl použit model izotropního zpevnění. Proč nebyl použit více realistický model kombinující isotropní a kinematické zpevnění?
- c) Jak se odvodí rovnice (3.76)?
- d) Pracovníci firmy SKODA-JS a.s. a Comtes FHT a.s., se kterými doktorand v rámci disertace spolupracoval, již dříve implementovali některá lomová kritéria tvárného porušení do systému Abaqus. Jakým způsobem byly jejich zkušenosti využity a jak se promítly do vlastní disertace?

- e) Na str. 38, 63 a v příslušných tabulkách se uvádějí odchylky predikovaných a naměřených lomových přetvoření s přesností na setiny procenta. Opravdu je možné s touto přesností pracovat?
- f) Jak jsou kalibrovaná lomová kritéria pro daný materiál přenositelná pro simulaci tvárného lomu obecně zatíženého tělesa obecného tvaru?

7. Teze


Teze poskytují postačující informaci o obsahu doktorské práce.

8. Závěr

Předloženou práci hodnotím kladně. Ing. Petr Kubík prokázal schopnost vědecky pracovat, podílet se na práci týmu, ale i samostatně řešit svěřený problém. Práce splňuje věcné i formální náležitosti kladené na doktorské disertace a proto tuto práci doporučuji k obhajobě a po jejím úspěšném průběhu

**doporučuji udělit panu Ing. Petru Kubíkovi
titul PhD v oboru Aplikovaná mechanika.**

V Brně 2.9.2015



Posudek disertační práce „Implementace, kalibrace a využití podmínek tvárného lomu v programech MKP“ předložené panem Ing. Petrem Kubíkem

Disertant si v předložené práci vytkl za cíl analýzu a případnou vlastní modifikaci stávajících kritérií tvárného porušování materiálů se zaměřením na jejich využívání především v oblasti predikce možného porušování materiálů při počítačových simulacích tváření a dělení materiálů při monotónním zatěžování. Kromě toho se, v souladu s cílem disertační práce, disertant zaměřil na predikční schopnost vybraných kritérií a na náročnost a spolehlivost kalibračního procesu. Vybraná kritéria byla implementována do explicitního kódu MKP. Práce se zabývá simulací tvárného porušování houževnatých kovových materiálů, kdy porušování nastává při velkých plastických deformacích. Porušování materiálu u dvou navržených kritérií bylo realizováno pomocí mazání prvků. Byly provedeny kalibrační experimenty. Velice pozitivní je, že výsledky byly srovnány s protlačky, u kterých došlo ke vzniku typických tzv. chevron cracks defektů.

V rešeršní části práce jsou popsány mechanismy tvárného porušování, mechanismus porušování v oblasti vysokých, nízkých a záporných hodnot triaxiality napětí. Je zde uveden přehled a popsáno 15 kritérií tvárného porušení založených na různých přístupech k poškozování materiálu. Z těchto 15 kritérií je významným výstupem práce autorův návrh dvou nesvázaných kritérií označených KHPS a KHPS2. Všechna uvedená kritéria byla autorem implementována do MKP programu Abaqus/Explicit pomocí uživatelského podprogramu VUMAT. Kritérium KHPS bylo ověřeno pomocí simulace kalibračních experimentů provedených Bao na Al slitině. Pro uvedený materiál vykázalo toto kritérium velmi dobré výsledky v celém rozsahu triaxiality. Protože křivka skutečné napětí – skutečná deformace je potřebná pro výpočtový model, byl popsán postup jejího stanovení. Byla popsána kalibrace kritérií.

V rámci disertační práce byla provedena počítačová simulace a proveden experiment vícestupňového protlačení tyče kruhového průřezu oceli 12050 za studena.

Numerickou simulací kalibračních experimentů byla provedena identifikace konstant osmi uvedených kritérií včetně KHPS a KHPS2. Tato kritéria byla potom použita pro uvedenou simulaci vícestupňového protlačování. V práci je komentován výsledek experimentu ve vztahu k použitým kritériím simulace.

Připomínky a dotazy:

- Str. 13, rov. (3.2) nevyjadřuje 2. Invariant tenzoru napětí, jak je uvedeno ve větě nad rovnicemi, ale redukované napětí HMH , jak je již správně uvedeno na str. 14
- Text k obr. 8.2 není pod obrázkem.

Závěr:

- Téma disertační práce považuji za velice aktuální, neboť otázka spolehlivosti a bezpečnosti konstrukcí závisející na jejich částech může být významně ovlivněna použitým materiálem, jehož mechanické vlastnosti mohou být významně ovlivněny předchozí technologií jeho výroby. Disertační práce je zaměřena právě do oblasti technologie využívající velké plastické deformace.
- Porovnání uvedeného cíle disertační práce a jejího obsahu: Z úvodu tohoto posudku je zřejmé, že cíl práce byl nejen splněn, ale naopak práce byla ještě rozšířena o návrh a odzkoušení speciálního typu zkušební tělesa pro zkoušku tlakem a o simulaci a experiment procesu stříhání kruhových ocelových tyčí. Oceňuji také velké úsilí, které musel disertant vynaložit pro zvládnutí problému v publikované šíři. Přínos disertanta je zřejmý z následujícího odstavce.
- Postup řešení problému považuji za logický s aplikací vybraných kritérií pro predikci plastického porušování a odpovídajícími experimenty. Za přínos pro rozvoj oboru a praxi považuji zkušenosti s kalibrací a aplikací vybraných kritérií. Významný je zejména příspěvek k provádění kalibračních testů v oblasti záporné triaxiality, návrhem a odzkoušením

zkušební tělesa pro pěstovací zkoušky. Významná je i v práci zmíněná autorem vytvořená knihovna zpracovaných skriptů. Ta umožní snadnější využívání počítačových simulací v oblasti porušování materiálů při technologických procesech s velkými plastickými deformacemi. Za nedostatek považuji, že není uvedena adresa její dostupnosti.


- Formální úpravě práce nemám co vytknout. Práce je psána systematicky a přehledně. Je zde bohatá grafická prezentace a komentáře výsledků. Po jazykové stránce je práce psána zajímavě se snahou, aby čtenář získal potřebnou informaci.

Obsah předložených tezí odpovídá požadované struktuře, i když všechny požadované odstavce nejsou uvedeny názvem. Celkově teze čtenáře velmi dobře informují o obsahu disertační práce. V „Závěru“ doporučuji před publikací upravit v prvním souvětí druhého odstavce shodu podmětu s přísudkem.

Za významný považuji také záměr autora pokračovat ve výzkumné oblasti tvárného poškozování materiálů se zaměřením na svázané modely porušování a na cyklické zatěžování při extrémně nízkém počtu cyklů.

Na základě uvedeného doporučuji disertační práci k obhajobě a po úspěšné obhajobě udělení akademického titulu Ph.D.

V Plzni, dne 17.8.2015


prof. Ing. František Plánička, CSc.
Katedra mechaniky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni

