

Ing. Jaroslav Čech, Ph.D.
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra materiálů
Trojanova 13
120 00 Praha 2

Posudek disertační práce

Ing. Dušana Zíty
na téma

MODELOVÁNÍ INDENTAČNÍCH PROCESŮ

Předložená disertační práce se zabývá měřením lokálních materiálových vlastností pomocí metody instrumentované indentace. Důraz je kladen na modelování indentačních procesů metodou konečných prvků. Tato technika patří mezi velmi progresivní a nenahraditelné způsoby určování mechanických vlastností materiálů. I v současné době je však třeba samotnou metodiku zdokonalovat a zpřesňovat, aby nedocházelo k chybné interpretaci naměřených výsledků. Z tohoto důvodu vidím téma práce jako aktuální a pro komunitu přínosné.

Simulace metodami konečných prvků jsou v současné době běžně využívány a pro modelování indentačních procesů jsou vhodné, v některých případech dokonce nezbytné, a k prováděným experimentům mohou přinést přidanou hodnotu.

Cílem práce je vytvoření a ověření modelů indentace do tvrdých křehkých materiálů, ze kterých je možné určit materiálové charakteristiky studovaných vzorků (především tvrdost, Youngův modul a lomovou houževnatost). Práce vychází z několika publikací autora, které byly prezentovány na konferencích a otištěny v příslušných časopisech a sbornících konferencí (bez impakt faktoru).

Rešeršní část shrnuje základní pojmy, poznatky a postupy užívané při indentačních měřeních k určení tvrdosti, modulu pružnosti, lomové houževnatosti či práce vykonané indentorem. Další podkapitoly jsou věnovány problematice drsného povrchu a poddajnosti měřicího systému. V samostatné podkapitole je rozebrána metodika výpočtů metodou konečných prvků. Rešeršní část práce je poměrně nepřehledná. Některá témata se opakují vícekrát. Odkazy na literaturu nejsou systematicky řazeny a u některých tvrzení a rovnic nejsou reference uvedeny. To by se u disertační práce nemělo stávat. Řazení a umístění obrázků, tabulek a rovnic v některých případech není postupné a zhoršuje tak orientaci čtenáře. Na některé obrázky a tabulky není v textu uveden odkaz. V práci jsou zaměňovány názvy typů trhlin (Palmqvistovy, radiální, centrální), což vede k nepřehlednosti a nejasnostem ve správnosti použití rovnic pro výpočet lomové houževnatosti, které se pro jednotlivé typy trhlin liší.

Experimentální část práce netvoří stěžejní kapitulu disertace, nicméně k výsledkům by bylo vhodné přidat alespoň minimální komentář s vysvětlením naměřených dat (viz například kapitola 3.4.2, ve které je pouze tabulka bez jakéhokoliv komentáře).

Nosným tématem práce je kapitola modelování indentace do skla, ve které je vytvořen 2D osově symetrický model pro určení základních materiálových charakteristik (plastický modul a mez kluzu). Výpočtově náročnější 3D model je využit k určení lomové houževnatosti z velikosti vzniklých trhlin nebo uvolněné energie. Popis modelů (především sítě) není příliš detailní. Parametry modelů plasticity a podmínky porušení elementu jsou popsány chaoticky (některé veličiny uvedené v rovnicích neodpovídají veličinám v popisu). Jsou popsána pole napětí pod indentorem a výsledky modelů jsou ve shodě s experimentem. Modelování umožnilo určit velikost Youngova modulu mezivrstvy polyvinylbutyralu.

Poslední dvě kapitoly se zaměřují na určení vlivu tuhosti rámu tvrdoměru a vlivu drsnosti povrchu. Jedná se o velmi důležité parametry, které mohou výsledky měření zásadně ovlivnit.

K zásadním formálním nedostatkům patří:

1. Seznam symbolů není kompletní. Některé veličiny nejsou dostatečně vysvětleny.
2. Špatně řazené citace, obrázky a rovnice. Některá fakta nejsou citacemi podložena.
3. Zdvojení některých rovnic a obrázků.
4. Neodborné formulace, které by se v odborné práci neměly objevovat.
5. Nedostatečný popis některých výsledků a obrázků.
6. Obrázek 47 a 48 – při použití formátování nelze určit přesné hodnoty zobrazovaných veličin.

Z faktické stránky mám k práci několik připomínek a otázek:

1. Obrázek 4 – dle měřítka uvedeného v obrázku nemůže diagonála vtisku měřit 260 μm .
2. V práci dochází k zaměňování palmqvistových, radiálních a centrálních trhlin.
3. Ve 2D modelu je používán koeficient tření 0,1, ve 3D modelu 0,2. Proč? Jaké jsou případné rozdíly?
4. V obrázku 34 jsou zkombinovány veličiny ε a ε_p .
5. Vliv velikosti elementu (obrázky 35 a 37) – proměnné nejsou správně zavedeny. Dle zavedeného popisu (a_i/a) by velikost elementu byla přes 7 mm. Nemá být zavedeno obráceně (a/a_i)? Z grafů není patrné, že vliv použitých elementů již neovlivňuje numerické výsledky. Uvedeno je: „Zvýšení počtu elementů v radiálním směru z 10 na 20 zvýší maximální napětí o 2 %.“ – To nelze z obrázku 37 ověřit (nesmyslná data na osách, neznalost velikosti prvků). Je potřeba vysvětlit a opravit.
6. Na str. 59 je uvedeno: „nezajímá nás přesná hodnota napětí na čele trhliny“. Jak je to možné, když model eliminace elementu je založen na velikosti napětí?
7. V popisu Drucker – Praggerova modelu (str. 61): „Parametry K , β , Ψ byly odhadnuty.“ Jak? Na základě čeho?
8. Pokud $G_n^C = G_s^C$ (str. 64), rovnice (59) je nulová a výpočet nedává smysl. Prosím o vysvětlení/opravení.
9. Str. 79: „Oba průběhy jsou téměř lineární.“ Co je tím myšleno? Data v obrázcích 57 a 58 lineární nejsou.
10. Byly hodnoty Youngova modulu vrstvy PVB získané modelováním ověřeny experimentem nebo porovnány s literárními daty?
11. Vliv tuhosti rámu tvrdoměru dle kapitoly 5 je velmi výrazný. Byla korekce aplikována i v modelech v předcházejících kapitolách?
12. Popis modelu kontaktu s drsnými kontaktními plochami (kapitola 6), je poměrně chaotický. Jaké byly rozměry modelu? Nejsou výsledky ovlivněny okrajovými podmínkami? Drsnost je modelována na straně tuhého indentoru. V praxi se dá

předpokládat spíše opak – drsnost povrchu zkoušeného poddajného materiálu. To může dávat jiné výsledky. Proč byl model zvolen takto?

13. Vliv drsnosti na určení hodnot meze kluzu na str. 105-106 (tabulky 13 a 14) jsou výsledky přejaté (chybí citace), nebo výsledky získané autorem (je třeba uvést podmínky testů)? Jedná se o výsledky experimentů, nebo modelování?

Celkově mohu shrnout, že po formální stránce studie obsahuje řadu nedostatků, které by nebylo obtížné odstranit a zbytečně tak snižují dojem práce. Po faktické stránce práce obsahuje řadu tvrzení, která nejsou přesná, či dostatečně vysvětlená. Na druhou stranu se jedná o aktuální téma, kdy metoda konečných prvků může poskytnout přidanou hodnotu k experimentálním výsledkům indentačních zkoušek. Vytyčené cíle práce byly splněny. Jako nejdůležitější výsledky se mi jeví popis postupného rozvoje trhlin v jednotlivých fázích indentačního procesu, z praktického hlediska potom vliv tuhosti rámu měřicího přístroje.

Předkládaná práce splňuje podmínky kladené na doktorské disertační práce a doporučuji připuštění kandidáta k obhajobě.

V Praze, 13. února 2020

Ing. Jaroslav Čech, Ph.D.