

## Posudek disertační práce

Uchazeč Ing. Jaroslav Schmidt

Název disertační práce Brittle fracture of laminated glass structural elements

Studijní program Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel Ing. Tomáš Janda, Ph.D.

Oponent prof. Ing. Jan Eliáš, Ph.D.

e-mail jan.elias@vut.cz

### Aktuálnost tématu disertační práce

komentář: Téma práce je aktuální hned ze dvou pohledů. Z praktického pohledu se věnuje mechanickému chování vrstvených skleněných tabulí, které jsou v moderních budovách používány velmi často. Z pohledu výpočetního detailně popisuje aktuálně velmi žádaný a rozvíjený matematický model známý jako *phase field*. Jedná se tedy o použití vysoce aktuálního modelu za účelem simulací moderních a často používaných konstrukčních prvků.

vynikající     nadprůměrný     průměrný     podprůměrný     slabý

### Splnění cílů disertační práce

komentář: Cíle práce nejsou v textu přímo vypsány, v úvodu je věta stanovující celkový cíl, kterým je (volně přeloženo) numerická predikce chování lepeného skla včetně vývoje trhlin. I přes spoustu srovnání výsledků numerických modelů s experimenty, které vykazují vynikající shodu, je podle mého názoru stále přítomno několik zásadních rozdílů. Odstranění rozporů mezi modelem a experimenty ve vývoji trhlin v jedné vrstvě nebo napříč vrstvami je dosaženo pouze pomocí cílených a z mého pohledu nekonzistentních úprav modelu. Také nutnost změny lomové energie při modelování tahu a ohybu se mi jeví jako problematická, neboť neumožňuje použití pro kombinované namáhání. Zajímavý je také obrázek 6.9, který ukazuje, že materiálové parametry vhodné pro lepené sklo s pěti vrstvami nejsou lehce přenositelné na vrstev sedm. Domnívám se, že celkového cíle tedy nebylo plně dosaženo. To ale nijak nesnižuje práci, spíše to ukazuje na příliš ambiciózní cíl.

vynikající     nadprůměrný     průměrný     podprůměrný     slabý

### Metody a postupy řešení

Komentář: Metody a postup řešení mi připadají nadprůměrné. Použití phase field modelů k simulaci porušení lepeného skla se mi zdá velmi vhodné. Velmi kladně hodnotím i srovnání s experimenty různého druhu.

Po úvodní kapitole následuje popis současného stavu poznání. Týká se hlavně phase field modelů, je podrobný a dobře strukturovaný. Třetí kapitola představuje velmi detailně samotný model včetně časové integrace. Předpokládám, že v této kapitole je naprostá většina převzata z literatury a neobjevují se zde žádné nové postupy. Následuje krátká ale velmi cenná kapitola diskutující redukci prostorového kontinua na pruty, desky nebo stěny. Zde už se jedná o nové výsledky. Pátá kapitola představuje simulace lepeného skla za předpokladu ustálené odezvy. Díky porovnání s experimenty se začínají ukazovat některé jevy, které numerický model není schopen postihnout. V šesté kapitole je patrná snaha o řešení těchto problémů pomocí variability materiálových parametrů. Nakonec je představen transientní model a experimenty porušení

lepeného skla v důsledku nárazu závaží.

Některé metody uvedené v práci mi připadají trochu zavádějící. Například rozšíření modelu o nezávislou počáteční pevnost u dynamických simulací je diskutabilní. Student v podstatě vložil do modelu zcela nový a fyzikálně těžko obhajitelný parametr, jehož hodnotu nastavuje pro různý počet vrstev lepeného skla tak, aby získal přibližnou shodu s experimenty. Také mám dojem, že uvažování viskozity polymerních vrstev je sice v práci popsáno, ale v simulacích se nijak výrazně neprojevuje a nelze tak validovat jeho platnost. Změnilo by se uvažované krátkodobé chování materiálu při použití elastické odezvy polymerních vrstev?

Velmi mě překvapila vysoká variabilita pevnosti. U takto homogenních materiálů bych očekával daleko nižší hodnoty. Díky tomu je kapitola zabývající se variabilitou velmi důležitá. Řekl bych, že oprávněnost závěru, že okrajová vrstva má nižší pevnost než vnitřní vrstvy, může plynout také z mechanismu porušení. Trhlina v okrajové vrstvě si může volit polohu tak, aby se vždy objevila v místech s malou pevností – významně se tak uplatňuje model nejslabšího článku. Naopak ve vnitřních vrstvách je tato volba omezena koncentrací napětí nad již vytvořenými trhlinami, a tak se pevnost statisticky zvětšuje.

vynikající    nadprůměrný    průměrný    podprůměrný    slabý

### Výsledky disertace - konkrétní přínosy disertanta

komentář: Práce shrnuje výzkum publikovaný v několika zahraničních časopisech v kolektivu autorů. U tří článků v časopisech s impakt faktorem je student uveden jako první autor. Výsledky uvedené v práci tedy nejspíše vznikly ve spolupráci s dalšími výzkumníky, ale podíl Jaroslava Schmidta je významný. Publikace v mezinárodních časopisech navíc prokazuje originální myšlenky.

Z mého pohledu je zajímavá jak aplikace phase field modelů na lepené sklo, tak představení různých metod redukce prostorového modelu na prut, desku nebo stěnu. Velmi zajímavé je také srovnání s experimenty, které sice ukazuje nedostatky modelování, ale zároveň naznačuje směry budoucího řešení. Oceňuji kapitolu věnující se náhodnosti materiálových parametrů.

vynikající    nadprůměrný    průměrný    podprůměrný    slabý

### Význam pro praxi a pro rozvoj vědního oboru

komentář: Nezdá se mi, že by prezentované numerické výsledky byly natolik přesvědčivé, že by je bylo možno již nyní použít v praxi. V tomto ohledu jsou nejspíše daleko cennější experimentální data. Na druhou stranu je mi ale z aplikačního pohledu velmi sympatická práce s kinematicky redukovanými modely a jejich srovnání.

I přes své cílení na praktický problém je práce zaměřená více směrem k základnímu výzkumu, kde přispívá hlavně srovnáním různých přístupů k modelování lepeného skla. Nejzajímavější se mi jeví nevyřešené problémy týkající se četnosti trhlín ve spodní vrstvě při ohybu, postupného porušování jednotlivých vrstev při zatěžování, rozporů mezi neupraveným modelem a dynamickými experimenty a vlivu materiálové variability. V práci je patrná snaha o řešení těchto problémů a domnívám se, že vědní obor by na ně v budoucnu měl odpovědět.

vynikající    nadprůměrný    průměrný    podprůměrný    slabý

## Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

komentář: Celá práce je napsána velmi srozumitelně a je dobře strukturovaná. Přece jen je v ní ale několik chyb. Například jsem nikde nenašel, co znamenají zkratky PF-M a 7L-2. Legenda některých obrázků odkazuje na neexistující rovnice, které byly nejspíše součástí původního textu (např. 5.7, 5.8 nebo 5.18), nebo jsou zcela opomenuty popisky obrázků (obr. 7.17 a 7.18). Práce je napsána anglicky, což oceňuji, ale je pro mě těžké zhodnotit její jazykovou úroveň. Zcela jasných chyb jsem našel velmi málo, vět, které by podle mého názoru zasloužily drobné úpravy, už více.

vynikající     nadprůměrný     průměrný     podprůměrný     slabý

## Vyjádření k dodržení citační etiky

Při čtení práce jsem nezaznamenal žádné převzaté části textu nebo myšlenky, které by nebyly řádně citovány. Domnívám se, že v tomto ohledu je práce zcela v pořádku.

## Připomínky

Při odborné rozpravě nad disertační prací by Jaroslav Schmidt mohl zodpovědět některé z následujících dotazů:

1. Nerozumím okrajovým podmínkám v rovnici 3.18. Co přesně tyto rovnice popisují? Vyjadřují, že projekce gradientu poškození kolmo k povrchu je vždy nulová? Je možné volit i jiné okrajové podmínky pro pole poškození? Jaká je uvažovaná okrajová podmínka u úloh s vynucenou symetrií, např. Obr. 5.2?
2. Je možné při statickém zatěžování využít arc-length metodu nebo řízení simulace například pomocí otevření trhliny nebo uvolňování energie? Většina simulací představených v práci probíhá nestabilně, k porušení konstrukce dojde v jednom časovém kroku. Zdá se mi cenné mít k dispozici také nástroje umožňující kontrolované šíření trhliny.
3. Proč je v experimentech a simulacích volen čtyřbodový ohyb? Nevidím žádné výhody oproti třibodovému ohybu, pouze komplikace s větší deformační energií a malým gradientem napětí. Výhodné to může být u studování prostorové náhodnosti, to ovšem není v práci zahrnuto.
4. V příloze A.1 jsou představeny zarážející výsledky, kdy odezva modelu zásadně závisí na parametru  $lc$ . Tento parametr je však v práci prezentován jako libovolně volitelný. Z textu této přílohy mi není jasné, zda je to chápáno jako problém, což bych očekával, nebo ne. Prosim o vysvětlení. Změnily by se výsledky, pokud by se lokalizace od začátku podpořila například lokálně sníženou pevností?
5. Poslední dotaz je trochu obecnější. Jsou-li phase field modely rozšířením lineární lomové mechaniky, měly by vykazovat vliv velikosti při porušení z ostrého zářezu podle lineární lomové mechaniky, tedy závislost nominálního zatížení na velikosti konstrukce s exponentem  $-0.5$ . Je tomu tak? Zároveň by ale měly poskytnout vliv velikosti pro trhlinu šířící se z hladkého povrchu. Tento druh vlivu velikosti se mi vždy zdál poměrně nejasný a výrazně hůře podepřený argumenty a teorií. Je takováto úloha v literatuře diskutována? Poskytují phase field modely v takovémto případě nezávislou nominální pevnost?

## Závěrečné zhodnocení disertace

Předložená disertační práce obsahuje cenné původní vědecké výsledky a Jaroslav Schmidt jí prokázal schopnost samostatné vědecké činnosti. Práci celkově hodnotím jako zdařilou a jednoznačně ji doporučuji k obhajobě.

Doporučuji po úspěšné obhajobě disertační práce udělení titulu Ph.D.  ano  ne

Datum: 18. července 2023

Podpis oponenta:.....

