ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Oddělení pro vědu a výzkum
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

e–mail: obhajoby@fsv.cvut.cz tel.: 2 2435 8736

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 Mgr. Stanislav Sysala, Ph.D.

e-mail stanislav.sysala@ugn.cas.cz

Aktuálnost tématu disertační práce

komentář: Práce se věnuje matematickému modelování lepeného (vrstveného) skla před a po vzniku trhlin v důsledku kvazistatického a dynamického zatěžování. Jedná se o velice komplexní a náročné téma s řadou praktických aplikací, které ale aspoň stručně mohly být v práci zmíněny. Naopak oceňuji velice podrobné zpracování State of the Art, viz druhá kapitola.

☒ vynikající	☐ nadprůměrný	☐ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Splnění cílů disertační práce

komentář: V úvodu textu chybí sekce, která by se věnovala popisu cílů práce a jejímu vymezení. Také postrádám v závěru sekci popisující přínosy autora, jeho publikace a plnění vytyčených cílů. Přes tyto drobné formální nedostatky je zřejmé, že práce se hlavně věnuje užití phase-field modelů při modelování vrstvených skelných nosníků a desek. Vzhledem k výborné publikační aktivitě autora se domnívám, že cíle disertační práce byly nadprůměrně splněny.

☐ vynikající	☒ nadprůměrný	☐ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Metody a postupy řešení

komentář: Velice oceňuji, že k modelování byla použita phase-field metoda, která vychází z variačních principů, umožnuje hlubší teoretický výzkum nebo zamezuje patologické závislosti numerických výsledků na jemnosti konečněprvkové sítě. Dále byly navrženy metody dimenzionální redukce, které jsou vhodné při modelování skelných desek. Byla provedena validace numerických simulací oproti oproti laboratorním testům. Byl proveden doprovodný stochastický výzkum zaměřený na vliv mikro-defektů na tahovou pevnost, přičemž se vycházelo s dostupných získaných experimentálním výzkumem. V rámci numerické realizace autor vyvinul vlastní, veřejně dostupné kódy ve FEniCSu. Vzhledem k této skutečnosti bych ale v práci očekával podrobnější a přesnější popis použitých algoritmů. Postrádám také numerické simulace s implicitním řešičem představeným v sekci 3.3.2.2.

☐ vynikající	☒ nadprůměrný	☐ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Výsledky disertace - konkrétní přínosy disertanta

komentář: V disertační práci jsou hlavně popsány výsledky publikované v článcích [Schmidt, Zemanová, Zeman, Šejnoha 2020] a [Schmidt, Janda, Šejnoha 2023], viz kapitoly 5 a 7. Dále lze v kapitole 6 nalézt nejspíš doposud nepublikované výsledky na stochastickou analýzu. Mezi

hlavní přínosy uchazeče patří:

1. Ukázání, že phase-field modely s dimenzionální redukcí jsou schopné zachytit šíření puklin a jejich případné větvení při kvazistatickém a dynamickém zatěžování a současně být v rozumné shodě s laboratorními experimenty.

2. Užití moderní konečněprvkové knihovny FEniCS při modelování vrstveného skla.

☐ vynikající	☒ nadprůměrný	☐ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Význam pro praxi a pro rozvoj vědního oboru

komentář: V práci je demonstrováno, jak modifikovat a užít phase-field modelování při validování laboratorních experimentů. Je tedy reálný potenciál, že by navržená metoda mohla být použita v praktických inženýrských aplikacích jako alternativa k dostupným komerčním softwarům, případně inspirovat vývojáře komerčních SW.

☐ vynikající	☒ nadprůměrný	☐ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

komentář: Formální úprava disertační práce bohužel kazí celkový dojem s jinak výborných výsledků studenta. V úvodní kapitole vůbec není popsáno a vysvětleno, jak je práce členěna a jaké jsou cíle studenta. Bez těchto informací čtenář neví, kam autor vlastně směřuje nebo k čemu se váže Appendix, na který jsem nikde v textu neviděl odkaz. Dále texty klíčových kapitol 5 a 7 byly vykopírovány z autorových článků [Schmidt, Zemanová, Zeman, Šejnoha 2020] a [Schmidt, Janda, Šejnoha 2023] a jen velice mírně upraveny. Teoretické výsledky z těchto dvou článků byly sloučeny do kapitol 3 a 4 disertační práce. Vzniklý produkt je podle mého názoru ale nedotažený a místy nesrozumitelný bez občasného nahlédnutí do zmíněných článků. Některé důležité značení není definované, např. zkratka PF-M.

Seznam použité literatury by také potřeboval menší revizi. U některých autorů jsou vypsána celá jména, někde jen první písmena. Citace [63] a [64] jsou duplicitní a autocitace [73] není řazena podle abecedy.

Jazyková úroveň disertační práce je dostačující. Práce obsahuje menší množství gramatických chyb, které ale příliš neovlivňují její čitelnost.

☐ vynikající	☐ nadprůměrný	☒ průměrný	☐ podprůměrný	☐ slabý

Vyjádření k dodržení citační etiky

V práci nedochází k porušení citační etiky, viz také provedena kontrola proti plagiatorství.

Připomínky

V rámci obhajoby disertační práce by mohl uchazeč vysvětlit následující nejasnosti k sekci 3.2.4 (str. 21-22), která podle mého názoru měla být rozepsána podrobněji: Chybí zde informace, jaká časová diskretizace kvazistatické úlohy byla použita při definování Algoritmů 1 a 2. Chybí jakákoliv diskuse o konvergenci Algoritmů 1 a 2, případně o jejich vzájemném porovnání z hlediska počtu iterací či výpočetního času. V případě Algoritmu 1 mohl být více popsán Newtonův řešič (3.14) vůči neznámým posunům, především při použití spektrální dekompozice. Druhé derivace funkcí ψ_e^+ a ψ_e^- totiž existují pouze v zobecněném smyslu a navíc není nejsnazší najít jejich analytický tvar. Konverguje tento Newtonův řešič, když damage proměnná nabývá hodnot blízkých 1? Jsou při řešení (3.14) vůči damage proměnné použita omezení

d_(i-1)≤d_i≤1? Lze použít Algoritmy 1 a 2 i pro variačně nekonzistentní model ze Sekce 3.2.3?

Další připomínky, nejasnosti či doporučení k disertační práci řadím chronologicky, nikoliv podle důležitosti. Tyto připomínky slouží jako zpětná vazba pro uchazeče a nevyžaduji je rozebírat během obhajoby:

Str. 15: V úvodu třetí kapitoly mohlo být zdůrazněno, že sekce 3.1 a 3.2 se věnují kvazistatickému modelu, zatímco sekce 3.3 dynamickému modelu.

Str. 15: V rovnici (3.2) by měla být zahrnuta práce vnějších sil, která je později definována pomocí (3.12).

Str. 16, Remark 3.3: Co se týče řešitelnosti úloh, mohly být u jednotlivých problémů přidány citace na práce, kde se řešitelnost studuje, pokud takové práce existují.

Str. 19: Nejsou definovány množiny U a D, viz (3.13). Domnívám se, že přinejmenším mělo být zdůrazněno, že množina D obsahuje omezení d∈[0,1]. Toto omezení má pak vliv na podmínky komplementarity, viz (3.18), které podle mého názoru nejsou úplně přesně zaspány. Osobně bych doporučoval nejprve provést časovou diskretizaci úlohy (3.13)-(3.15) a teprve pak přejít k odvození související variační nerovnice a ke klasické formulaci úlohy.

Str. 20: Obrázek 3.2 je v disertaci tak trochu vytržen z kontextu. K jeho pochopení je nutné nahlédnout do článku [Schmidt, Zemanová, Zeman, Šejnoha 2020].

Str. 21: V sekci 3.2.3 není upřesněna volba funkcí α(d),g(d). Dále není zde zavedeno značení DF-M, které je pro model (3.20) používáno v článku [Schmidt, Zemanová, Zeman, Šejnoha 2020]. Toto značení se vyskytuje v kapitole 5 této práce bez jakéhokoliv definování.

Str. 23: V textu práce je několika místech doporučeno interpretovat length-scale parametr l_c jako numerický parametr a volit tento parametr na základě velikosti konečných prvků. Pro phase-field modely je ale vyvinuta matematická teorie, která je nezávislá na prostorové diskretizaci. Hlavní výhodou phase-field modelů by tak měla být robustnost výsledků při zjemňování MKP sítě. Doporučil bych proto autorovi vyzkoušet adaptivní zjemňování MKP sítě, přičemž by parametr l_c byl volen podle velikosti konečných prvků pouze na počáteční síti a při zjemňování sítě by se jeho hodnota neměnila. Tím by se mohla ilustrovat robustnost phase-field modelů. Dále bych doporučil vyzkoušet konečné prvky vyššího řádu, které by mohly zamezit případným locking efektům často pozorovaným u P1 nebo Q1 prvků.

Str. 24: Doporučuji kontrolu správnosti formule (3.26) ze dvou důvodů. Za prvé, zápis (u^,d^)∈U×D×I je nesrozumitelný, protože dvojice neznámých patří do trojice množin, které navíc nebyly definovány. Za druhé, Lagrangián L je definovaný v (3.24) pomocí rozdílu mezi kinetickou a potenciální energií. U potenciální energie je tedy znaménko mínus, na rozdíl od kvazistatické úlohy (3.13). Navzdory této skutečnosti se jak v (3.13) tak v (3.26) provádí minimalizace.

Str. 24: Formule (3.29) nelze použít pro implicitní řešič ze sekce 3.3.2.2, protože se tam uvažují jako neznámé i derivace funkce u v každém časovém kroku. Nevidím tedy důvod pro zavedení této abstraktní formule.

Str. 25: V rovnici (3.37) i v článku [Schmidt, Janda, Šejnoha 2023] chybí u prvního a třetího sčítance člen δd.

Str. 26: na 4. řádku shora má být (3.32) místo (3.41). Dále v Algoritmu 3 je dost překlepů. Předpokládám, že místo d_(t+1), u^((i)),u^((i+1)) má být d_(i+1),u_i,u_(i+1) a že for-cyklus má jít přes i∈{1,2,...N}. Nakonec není z textu jasné, jak se volí počáteční hodnoty u_0,u_1.

Str. 26-27: V textu disertace jsem nenašel žádný numerický příklad, ve kterém by bylo použito implicitní schéma ze sekce 3.3.2.2, ani odkaz na některou autorovu práci. Algoritmus 4 navíc potřebuje obdobnou revizi jako Algoritmus 3.

Str. 27: V rámci sekce 3.3 měl být podle mého názoru také rozepsán řešič pro Hertzův kontakt, a to podrobněji než v kapitole 7. Je zvláštní mít popsanou část numerického řešení v třetí kapitole a zbylou část v 7. kapitole.

Str. 29: Uprostřed stránky se píše, že předpokládáme lichý počet skelných vrstev a sudý počet polymerových vrstev. Tento předpoklad mi přijde nadbytečný, a dokonce ani není splněn pro 3-

nebo 7-vrstvé sklo užívané v disertační práci.

Str. 30: Z formule (4.2) a dalších vyplývá, že polymerovou vrstvu modelujeme pomocí lineární pružnosti. Přesto se na několika jiných místech textu detailně píše o vizkoelastickém modelu. Mělo by tedy zde být stručně diskutováno, že při výpočtu vycházíme z aproximace vizkoelastického modelu závislém na čase a teplotě, viz formule (5.1) nebo (7.11). Práce by možná byla přehlednější, kdyby se texty o vizkoplasticitě z kapitol 5 a 7 sloučily a zahrnuly buď do 3. nebo čtvrté kapitoly.

Str. 31: Zdá se, že značení h_i i Δz_i je používané pro tloušťku i-té vrstvy. Pokud tomu tak skutečně je, mělo by se toto značení sjednotit.

Str. 34: Bylo by dobré zdůraznit, že vztahy (4.21)-(4.23) je nutné dosadit do (4.15) a tím získat chybějící rovnice pro uvažovaná neznámá kinematická pole se sudými indexy. Bez této skutečnosti by si čtenář mohl myslet, že (4.15) nepotřebuje a že by tedy výpočet byl nezávislý na materiálových parametrech polymeru. Podobná připomínka platí i pro vztahy (4.31)-(4.33) u Mindlin-Reissnerova modelu desky.

Str. 36: Není jasné, jak se volí hodnota konstanty ψ_{sur}^{+} v (4.38). Jinak v (4.38) chybí u prvního a třetího sčítance člen δd.

Str. 36: Na konci nebo na začátku čtvrté kapitoly mohlo být zmíněno, že se v textu (konkrétně v 5. kapitole) uvažuje i jiná dimenzionální redukce, na základě rovinné napjatosti.

Str. 37: Vzhledem k tomu, že pátá kapitola neobsahuje pouze stručný výtah z článku [Schmidt, Zemanová, Zeman, Šejnoha 2020], ale podstatnou část tohoto článku, bylo by dobré napsat aspoň stručný úvod k této kapitole, vysvětlit její členění a návaznost na předešlé kapitoly. V opačném případě je pro čtenáře lepší si ten článek stáhnout a přečíst celý. Obdobná připomínka se vztahuje i na kapitolu 7.

Str. 38: Pokud tomu správně rozumím, parametr l_c se volí různě pro stejnoměrnou a lokálně zjemněnou síť, a to na základě velikosti nejmenšího konečného prvku, viz konec str. 38. Jak jsem psal výše, doporučil bych přidat ještě experiment s tím, že na lokálně zjemněné síti použijeme stejnou hodnotu l_c jako pro stejnoměrnou sít, viz obrázky 5.3 a 5.4. Cílem experimentu by mělo být ukázat, že výsledky numerických simulací jsou robustní vůči zjemňování sítě a že se při několika zjemněních ustálí. Dále se nabízí otázka, proč nebyly testovány konečné prvky vyššího řádu. Myslím, že SW FEniCS umožňuje vyskládat matice a vektory pro dostatečně širokou třídu konečných prvků.

Str. 41-42: V sekci 5.1.2 mohlo být diskutováno porovnání Algoritmů 1 a 2 na základě počtu iterací či výpočetního času.

Str. 42. Na obrázku 5.7 (i 5.18) vlevo je použito značení, které není kompatibilní s textem disertační práce.

Str. 46: Není mi jasné, zda-li časová proměnná použitá v (5.1) je shodná s pseudo-časovou proměnnou použitou při definici kvazistatické úlohy, tj. jestli modul G obměňujeme v každém časovém kroku.

Str. 57: Je v kapitole 6 uvažován model daný vztahem (3.20)? Byly nebo budou výsledky kapitoly 6 někde publikovány?

Str. 61: V názvu sekce 6.2 bych raději použil „extreme-case analysis“ místo „limit analysis“, což v inženýrské komunitě znamená metodu určování limitního faktoru zatížení.

Str. 71: V 7. kapitole by mohly být stručně představeny modely, které používá komerční SW LS-DYNA, případně některé numerické výsledky získané tímto SW by mohly být porovnány s výsledky ve FEniCSu.

Závěrečné zhodnocení disertace

Výsledky autora považuji i přes výše uvedené připomínky a formální nedostatky za výborné. Stejně tak jeho publikační činnost je výtečná. Proto doporučuji po úspěšné obhajobě udělení titulu Ph.D.

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

Datum: 21. července 2023

Podpis oponenta: .....