

Oponentní posudek dizertační práce

Název: Modelování pryžových součástí při zohlednění změn mechanických vlastností způsobených provozními podmínkami

Autor: Ing. Jan Heczko

Školitel: Prof. Ing. Vladislav Laš, CSc.

Konzultant specialista: Ing. Radek Kottner, Ph.D.

Práce je členěna do 9 kapitol, má 108 stran, dále obsahuje 2 přílohy, seznam obrázků, tabulek, zkratk a značení.

V kapitole 1 – Úvodu jsou formulovány cíle dizertační práce:

1. návrh modelu pryže s uvažováním vlivu mikromechanického poškození
2. návrh metody identifikace parametrů modelu
3. určení mezí použitelnosti identifikovaných parametrů

Dále autor představuje vlastnosti pryžových materiálů a jejich široké využití v rozličných aplikacích.

V kapitole 2 je shrnut současný stav poznání zaměřený především na modelování stárnutí pryže a únavového poškození.

Kapitola 3 pojednává o modelování únavového poškození. Je představen použitý konstitutivní model (Ayoub) a na základě uvedených vztahů je odvozen evoluční vztah. V kapitole je dále ukázáno použití homogenizovaného modelu při numerických výpočtech kumulace poškození pro 4 různé případy.

Kapitola 4 se zabývá modelováním chemického stárnutí, přičemž jsou popsány dva přístupy podle Liona a Johlitze a podle Naumann – Ihlemanna, jsou představeny výhody a nevýhody obou modelů.

V kapitole 5 je autorem představen navržený nový model zahrnující vliv únavového poškození a stárnutí pryží, který je kombinací modelu založeném na CDM (continuum damage mechanics) a na dynamickém modelu sítě. Aplikaci modelu ukazuje opět na několika typech zatížení (jednoosá napjatost, relaxace)

Experimentální část je popsána v kapitole 6. Byly provedeny cyklické zkoušky tlakové a dva typy smykových. Dále bylo sledováno stárnutí za pokojové teploty a při zvýšené teplotě.

Kapitola 7 se zabývá identifikací parametrů a zjišťováním použitelnosti modelu, přičemž je proveden numerický experiment.

V kapitole 8 autor posuzuje spolehlivost modelu a meze použitelnosti modelu.

Hodnocení

Práce se zabývá vysoce aktuálním tématem poškozování a stárnutí pryžových materiálů v provozních podmínkách, téma je aktuální, a stanovené cíle byly splněny. Metody, které autor používá, odpovídají nejnovějším poznatkům a postupům v oblasti modelování pryží. Je evidentní, že autor má bohaté zkušenosti s matematickým modelováním i s programováním. Práce je z tohoto hlediska značně rozsáhlá. Výsledkem práce je model a jeho ověření pomocí simulace experimentu. Úprava dizertační práce i jazyková úroveň je velmi dobrá. Některé pasáže textu mohly být formulovány srozumitelněji.

Během řešení doktorand publikoval 4 články v impaktovaných časopisech (2x jako hlavní autor); např. Journal of Solids and Structures je významným periodikem v oblasti mechaniky. Dále je autorem nebo spoluautorem 2 článků v recenzovaných časopisech a řady konferenčních příspěvků.

Z uvedeného vyplývá, že se jedná o náročnou práci, která prokazuje značné znalosti i schopnosti vědecké práce doktoranda.

Dizertační práci doporučuji k obhajobě.

V Liberci dne 3. 12. 2019

doc. Ing. Iva Petříková, Ph.D.

Připomínky formální:

1. Seznam zkratk neobsahuje jednotky.
2. Odkazy na citované zdroje nejsou číslovány od jedné, smíchány dva způsoby citací - abecední řazení podle jmen autorů a řazení podle průběžného číslování.
3. Str. 4: předposlední odstavec, věta Působení teploty, které je obvykle příčinou vratných změn, asi myšleno „nevratných“?
4. Str. 5, 1. odst. „neplněné směsi“, co je tím míněno - přírodní pryž?
5. V Literatuře je uvedena 2x stejná reference [10], [11].

Dotazy:

1. Str. 18, obr. 3.7. Zdeformovaná MKP síť. Jak byl model zatěžován, resp. jak byly nastaveny okrajové podmínky?
2. Str. 27, obr. 3.23. Porovnání zdeformovaných sítí na začátku a na konci. Vysvětlete, jak postupuje deformace v čase (první a poslední cyklus se příliš neliší)?
3. Vysvětlete, jakým způsobem dochází k porušování vazeb mezi molekulami a k vytváření vazeb nových.
4. V čem se modely uvedené v kap. 4 Lion-Johlitz a Naumann-Ihlemann liší?
5. Experiment s použitím „Arcanova vzorku“ není vhodné provádět pro pootočení přípravku o úhel 60° . Jaká je podmínka použitelnosti přípravku?

POSUDEK OPONENTA

na disertační práci Ing. Jana Heczka na téma *Modelování pryžových součástí při zohlednění změn mechanických vlastností způsobených provozními podmínkami*

Hlavním cílem práce je návrh nového konstitutivního modelu pryže, který bere v úvahu vliv jejího mikromechanického poškození cyklickou deformací a stárnutí (oxidace pod vlivem teploty), dále návrh metody jeho identifikace a vymezení použitelnosti. Ke splnění těchto cílů autor provedl obsáhlou a kvalitní literární rešerši aktuálního stavu (99 položek), a to nejen modelů hyperelastických, ale i modelů neelastických efektů u pryže, modelů jejího poškození a použitelných optimalizačních metod. Autor zde používá MKP simulací pro ilustraci některých popisovaných jevů. V kap. 5 pak formuluje souhrnný model popisující uvedené jevy a ilustruje jeho odezvu pomocí vhodných MKP simulací. V kap. 6 se věnuje návrhu experimentů potřebných pro identifikaci parametrů modelu a v kap. 7 výběru vhodných optimalizačních metod. V kap. 8 pak vymezuje použitelnost navrženého modelu.

Zhodnocení významu disertační práce pro obor

Práce se zabývá výzkumem dopadu cyklického namáhání a stárnutí (oxidace) za zvýšené teploty na mechanické vlastnosti pryžových součástí. Jedná se o téma málo probádané a velmi významné z pohledu výpočtového modelování a posuzování mezních stavů pryžových součástí.

Vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Autor přistupuje k řešení problému systémově a logicky; v návrhu nového konstitutivního modelu, který by byl schopen relevantně postihnout vyšetřované jevy, zdůvodněně používá adekvátní metody a propojuje současné poznatky z obsáhlé literární rešerše s experimenty. Cíle stanovené v úvodu práce jsou beze zbytku naplněny.

Stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Výsledkem disertační práce je navržený konstitutivní model schopný popsat dopad vyšetřovaných jevů na chování pryže. Tento model je zjevně osobním přínosem disertanta, který považuji za nadstandardní příspěvek k dané problematice.

Vyjádření k systematické, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Práce je zpracována důsledně systematicky a přehledně, s minimem věcných nedostatků. Formální úprava i jazyková stránka téměř bezchybná. Drobné výhrady oponenta jsou uvedeny níže.

Vyjádření k publikacím studenta

Disertant publikoval výsledky disertační práce jako první autor dvou článků v časopisech s IF, z toho jeden v prvním kvartilu. Dále je spoluautorem dalších 2 článků v časopisech s IF, 2 článků v recenzovaných časopisech bez IF a řady konferenčních příspěvků. Tím významně překračuje obvyklé požadavky kladené na disertační práce na českých univerzitách a dosahuje publikační úrovně, která obstojí minimálně v evropském srovnání.

Věcné nedostatky práce

1. Tvar deformovaného modelu na str. 18 obr. 3.7 neodpovídá okrajovým podmínkám popsaným v rovnici (3.44).

2. Pro rotačně symetrickou součást v př. 4.1 na str. 31 autor používá předpoklad rovinné deformace namísto rotační symetrie, přičemž uvedené zdůvodnění není dostatečné.
3. V kap. 8.3 autor uvádí větu 1 nejen bez důkazu, ale i bez citace zdroje.

Drobné formální nedostatky práce

4. Oceňuji rozsáhlý a přehledně zpracovaný seznam značení, ve kterém však postrádám uvádění jednotek použitých veličin. Jsou uvedeny pouze u univerzální plynové konstanty, kde jsou všeobecně známy, včetně její číselné hodnoty, ale v mnoha případech by pomohly k jednoznačnému určení používané veličiny, např. zda hustota volné energie je vztahována na jednotku objemu nebo hmotnosti.
5. Na str. 17 v rovnici (3.40) není jasné, která z veličin σ , E představuje efektivní hodnotu, zřejmě σ_0 a ϵ_0 , ale tyto symboly nejsou uvedeny v seznamu značení.
6. Zatímco v př. 3.3 na str. 17 jsou uvedeny rozměry řešené oblasti, u př. 3.4 na str. 19 tomu tak není a chybí také jednotky u předepsaného posuvu (3.51) na str. 22.
7. Obrázky 4.9 – 4.12 by měly být barevné, šedá škála neumožňuje kvantitativní porovnání.
8. Aktuální konfigurace Ω z textu je v diagramu na obr. 4.15 označena jako Ω_2 .
9. V rovnici (4.52) je nezvykle bez vysvětlení použit symbol D , zřejmě pro derivaci.
10. V rovnici (4.63) je člen (m_2+1-m_2) , zřejmě půjde o překlep, jinak to nedává smysl.
11. U parametru rozvoje poškození A je ve vztazích (5.31) a (5.38) zřejmě omylem uváděna jednotka Pa .
12. MKP síť zobrazená na obr. 5.6 je dostatečně hustá, ale při zmenšení otvoru na obr. 5.7 tomu již tak není. Vhodnější by bylo při zmenšení otvoru zvýšit hustotu sítě, aby se z kruhu nestal sedmiúhelník způsobující asymetrii výsledků, kterou autor sám komentuje.
13. Ve vývojovém diagramu na obr. 7.1 vede neexistence nerovnostních vazeb na metody nejmenších čtverců s vazbami a naopak, zřejmě se jedná o záměnu. Podobná chyba je asi i v druhé větvi diagramu.
14. Rovnice (7.11) na str. 76 jsou uvedeny bez dalšího vysvětlení, takže jsou stěží srozumitelné, Pomohla by citace původního zdroje, která zde však chybí.
15. Na str. 79 se uvádí jako důležité zjištění, „že hladiny citlivostí v případě relaxační zkoušky a měření trvalé deformace jsou rovnoběžné“, není však uvedeno s čím. Jejich vzájemná rovnoběžnost u obou zkoušek je vyloučena.
16. Tvrzení v kap. 7.4.: „Pro pryže, které byly autorem dosud zkoumány, se vždy potvrdilo, že při identifikaci založené na tahové a tlakové zkoušce dosahuje model dobré shody i ve smyku“ není platné obecně. Autor je si toho zjevně vědom a správně své tvrzení nezobecňuje na všechny pryže a jejich modely, ale i tak toto tvrzení působí v kontrastu s uváděným negativním příkladem kompozitem jako vyslovení hypotézy pro samotnou gumu. To lze ovšem velmi snadno vyvrátit nějakým opačným příkladem, např. pro 9-parametrický model Mooney-Rivlin.
17. V odrážkách v závěrečné kapitole práce (str. 96) používá autor pro veličinu k_R termín parametr reformace, který nebyl předtím v práci ani v seznamu symbolů vůbec používán, čímž ztěžuje pochopení uváděných tvrzení, včetně jejich zdůvodnění.

Celkové zhodnocení

Předložená práce nejen naplňuje, ale zjevně překračuje obvyklé požadavky kladené na disertační práci a prokazuje bez jakýchkoli pochybností schopnost autora přinášet originální vědecké výsledky. Proto jednoznačně doporučuji práci k obhajobě.

Otázky k obhajobě

- 1) Závěry v odrážkách na str. 81 ohledně identifikovatelnosti parametrů modelu nejsou srozumitelně zdůvodněny a tab. 7.1 (str. 84) je nesrozumitelná (chybí např. definice vektoru parametrů modelu). Zdůvodněte podrobně prezentované závěry, včetně tvrzení v kap. 7.4, že „parametry modelu identifikované na základě kombinace relaxační zkoušky a trvalé deformace jsou robustnější než na základě měření tečení“.
- 2) Na str. 75 dokládáte tvrzení, že všechny koeficienty polynomiálního hyperelastického modelu musejí být nezáporné, pouze citací vlastní výzkumné zprávy (v25), která není dostupná na webu. Uveďte zdůvodnění tohoto tvrzení a také zdůvodněte, proč je potom v kap. 8.2 nedodržujete?
- 3) Dokážete zdůvodnit větu 1 na str. 93 a ilustrovat její platnost či neplatnost pro jiné konstitutivní modely gumy?
- 4) Můžete vysvětlit význam nerovnostních vazeb při použití postupu podle obr. 7.1?

V Brně dne 9.12.2019

Prof. Ing. Jiří Burša, Ph.D.

Oponentský posudek na disertační práci

Ing. Jana Heczka

nazvanou:

Modelování pryžových součástí při zohlednění změn mechanických vlastností způsobených provozními podmínkami

Předložená disertační práce je věnována modelování některých důležitých procesů v pryži, které ovlivňují materiálové vlastnosti tohoto významného konstrukčního materiálu. Jedná se o problematiku velmi aktuální s ohledem na široké průmyslové využití pryže a potřeba zvyšování spolehlivosti konstrukcí. Práce je psána česky a v prostředí pracoviště katedry mechaniky FAV ZČU je nepochybně první disertací, která se danému tématu věnuje v takovém rozsahu. Její text je rozčleněn do devíti kapitol včetně úvodu, souhrnu současného stavu poznání a závěru a je doplněn dodatkem, v němž jsou zpracovány některé technické pasáže. Kapitoly 3. až 5. se zabývají modelováním únavového poškození, chemického stárnutí a kombinací obou jevů, tedy cyklickým zatížením doprovázeným stárnutím. Kapitoly 6. až 8. jsou věnovány experimentální práci, metodám identifikace materiálových vlastností a problematice tzv. identifikovatelnosti parametrů modelu s ohledem na experimentální data.

Komentář k jednotlivým kapitolám

Část práce věnovaná únavovému poškození, kapitola 3. se opírá o modely převzaté z literatury, avšak použité se záměrem lépe zohlednit nelinearitu mechanismů poškození při cyklické únavě. Za inovativní lze považovat použití časově dvou-škálového přístupu popisu kumulace poškození. Základem je evoluční vztah (3.12), z něhož lze dále dedukovat počet cyklů do porušení. V práci však chybí jasné vyjádření závislosti tzv. ekvivalentního napětí S_{eq} na parametru poškození D . Pro odvození limitního počtu cyklů se rovnice (3.12) řeší překvapivě s S_{eq} považovaným za konstantu vůči oběma proměnným. Rozdělení cyklů zatěžování na tzv. bloky s indexem i (bloky nejsou definovány) se zřejmě tento rozpor kompenzuje, $S_{eq(i)}$ se mění v následných blocích, není však vysvětleno jak. Podobně se autor vypořádá se závislostí ekvivalentního napětí na poškození při odvozování homogenizovaného modelu. Ve vztahu (3.28) není závislost S_{eq} na poškození vyjádřena. Ačkoliv výsledky ukazují výhody homogenizace cyklického zatěžování a velmi dobrou shodu takto získaných výsledků při konfrontaci s časově náročným přímým výpočtem bez homogenizace, tedy dle rovnice (3.12), postrádám jasné vyjádření algoritmu výpočtu poškození, zmínka v příkladu

3.3 je dle mého mínění nedostatečná. Celá kapitola 3.2 by zasloužila lepší strukturování a více informací o zohlednění flukтуаční části poškození při výpočtu napjatosti.

Ve 4. kapitole jsou uvedeny dva modely chemického stárnutí pryže, v nichž je zohledněn vliv difúze kyslíku a závislost na teplotě, ta je ovšem považována za parametr modelu při jejím rovnoměrném rozložení. V práci chybí hlubší zdůvodnění zavedení vnitřních proměnných q_{CS} a q_R . Rovněž není ozřejmen konstitutivní vztah pro napětí ve vztahu k tlaku p . Zajímavý je model postihující také Mullinsův efekt, jemuž je věnována kapitola 4.2.

Tento model částečně převzatý z literatury je pak východiskem pro souhrnný model poškození o němž pojednává kapitola 5. Souhrnné poškození je součinem tří parametrů $\mu\nu(1 - D)$. Dle tvrzení na str. 36 je model založen na představě jediné polymerní sítě, jejíž vytváření a zanikání jsou popsány evolucemi veličin μ a ν , které jsou ovlivněny koncentrací kyslíku. V popisu modelu není jasně vysvětlena okolnost vzniku nových vazeb ve zdeformované konfiguraci, která by měla být vázána k parametru μ , přičemž o modifikaci tuhosti rozhoduje součin $\mu\nu(1 - D)$, viz vztah (5.5). V příkladech kapitoly (5.2) byla difúze kyslíku zanedbána, autor pracuje jen s nastavenými hodnotami koncentrace kyslíku. Toto zjednodušení ovšem autor kompenzuje v kapitole 5.4, kde se zabývá výpočtem efektivních difúzních koeficientů v materiálu s periodicky distribuovanými trhlinami. Výpočet je založen na metodě homogenizace periodických struktur, je zaveden tenzor difuzivity, avšak chybí makroskopický model a formulace problému difúze v prostředí s trhlinami. Autor se zabýval vlivem velikosti a eliptičnosti inkluzí, resp. trhlín na vypočtené difúzní koeficienty, zkoumal i případy částečného odtržení inkluzí. Vypočtená difuzivita je v dobré shodě s alternativními způsoby výpočtu pomocí analytických vztahů převzatých z literatury.

Experimentálnímu zjištění poškození a stárnutí pryže se autor věnuje v kapitole 6. Tato část je velmi cenným příspěvkem disertace, kde autor prokázal nabyté zkušenosti a značnou míru invence v konstrukci přípravků pro měření s využitím 3D tisku.

Kapitola 7. obsahuje souhrn používaných standardních metod numerické optimalizace, který by bylo vhodnější zařadit do dodatku práce. Autor však v textu pracuje jen s metodou sekvenčního kvadratického programování aplikovanou na problém nejmenších čtverců reziduální funkce. Pojem “deficit identifikovatelnosti” je vágní, chybí jasná definice. Navíc postrádám přesné odkazy na dříve uvedené modely, tedy příslušné stavové úlohy, což v důsledku nepříznivě ovlivňuje srozumitelnost celé této pasáže. Autor dochází ke správnému závěru, že o úspěšnosti identifikace modelu rozhodují vhodně zvolené sady různých experimentů, avšak související obrázky 7.5 a 7.6 ke srozumitelnosti příliš nepřispívají. Argumentace založená na tzv. citlivosti cílové funkce (citlivostí se obvykle rozumí derivaci vůči optimalizačním parametrům) je diskutabilní. Jedná se o vliv příslušné váhy měření v daném čase, ovšem citlivost vyjadřuje diskrepanci mezi výpočtem a měřením pro dané nastavení hledaných parametrů. Výhrady lze mít k zavedení cílové funkce v (7.3) a (7.4), k nejasnému významu některých proměnných a parametrů (význam ε_i , je použit index j , avšak součet přes index t_j , tzv. nezávislá proměnná x_i není vysvětlena: v (7.2) se vztahuje k indexu experimentu i , kdežto v (7.3) a (7.4) k času t_j .) Bylo by zřejmě vhodnější jednoduše zavést dvoj-index ij a použít abstraktní proměnnou x_{ij} konzistentně s vahou w_{ij} a hodnotou měření F_{ij} .

Kapitola 8 věnovaná tzv. spolehlivosti modelu by mohla být součástí předešlé kapitoly

věnované identifikaci modelu. Ačkoliv se jedná o důležitý aspekt identifikace parametrů, chybí přesnější formulace problému a to především v souvislosti s poněkud nejasnou definicí cílové funkce dle (8.3). Mimo jiné není definována proměnná \bar{t} . (V grafech vystupuje protažení λ , které s \bar{t} zřejmě souvisí). Není ani jasné, jak souvisí (8.3) s původní definicí (7.3) a (7.4), které se týkají několika experimentů, zatímco v příkladech v 8. kapitole jsou experimenty jedno-osých tahových zkoušek. Domnívám se, že by bylo vhodnější věnovat pozornost identifikaci s využitím i dalších experimentům, jako jsou smyk, či jiné komplexnější testy s 3D vzorkem. Identifikace parametrů s aspektem spolehlivosti modelu lze chápat jako problém multikriteriální optimalizace, pro níž existuje několik zavedených postupů jako jsou Paretovy množiny, či metody “nejhoršího scénáře” vedoucí na řešení tzv. problému “minimaxu”.

Dotazy a připomínky, k nimž by se měl autor při obhajobě vyjádřit

1. V (3.6) je patrně chyba ve znaménku, v (3.16) chybí závorky. Platí-li (3.4), tj. $Y = -\partial\Psi/\partial D$ (chybně znaménko v (5.7)), a zároveň $\Psi = \Psi(\lambda_i, D)$, jak je v textu uvedeno, pak vztah (3.5) je s těmito předpoklady nekonzistentní.
2. Proč je v (3.13) považováno napětí S_{eq} za veličinu nezávislou ani na poškození, ani na počtech cyklů?
3. Čím je způsoben náhlý nárůst poškození na počátku každého cyklu v obr. 3.5? Bylo by vhodné doplnit průběh deformací v částech vzorku.
4. Byla zkoumána závislost výpočtu rozložení poškození na prostorové diskretizaci ve vzorku, který je podroben neuniformním deformacím? Modely difúzního poškození často zahrnují prostorový gradient poškození. Jak by takové rozšíření modelu ovlivnilo použití metody homogenizace? V literatuře se hojně používají nelokální modely a modely využívající tzv. “phase field modelling” přístup, viz např. práce [Milan Jirásek, Nonlocal damage mechanics, REGC–11/2007, in: Damage and fracture in geomaterials, str. 993–1021]
5. V (4.31) a (4.33) nejsou \mathcal{U} ani \mathcal{C} prostory.
6. V (4.11) má tlak špatné znaménko. Je tlak p funkcí pouze deformací, nebo souvisí explicitně i s koncentrací kyslíku?
7. Proč při řešení úlohy (5.49) zvolil autor nulové podmínky na vnější hranici výpočetní buňky? Toto je v rozporu s výsledkem homogenizace periodických struktur. (Při definici \mathcal{V} je použit prostor $H^2(\Omega_S)$, jedná se o překlep?)
8. Na str. 50 na konci popisu příkladu 5.6 autor uvádí, že tenzor difuzivity K_{ij} struktur s pootočenou eliptickou trhlinou je možné získat jeho pouhou transformací rotací referenčního tenzoru. To však není zřejmé, jestliže by se pootočením měnila vzájemná poloha trhlín v periodické struktuře. Jaké pootočení má autor na mysli ve vztahu k definici periodické buňky?

Celkové hodnocení a doporučení.

Disertační práce Ing. Jan Heczka tvoří rozsáhlý příspěvek k počítačovému a experimentálnímu modelování procesů poškození a degradace pryžových materiálů. Student se věnoval tématu komplexně a vznikla tak ucelená studie na dané téma. Výrazně tak přispívá k rozvoji oboru na pomezí materiálového výzkumu a výpočtových metod v mechanice kontinua. Výsledky práce lze považovat za původní a jsou v závěru práce jasně deklarovány včetně přínosu autora. Ten vychází z relevantních již dříve zavedených modelů, které však modifikuje a rozšiřuje. Modely byly implementovány v dostupném programovém vybavení.

Práce je psána srozumitelně, má logickou výstavbu, již odpovídá řazení jednotlivých kapitol. Po jazykové stránce je text velmi zdařilý a rovněž grafická úprava práce je kvalitní. Autor vychází z relevantních zdrojů a postupů, metod a navazuje na aktuální výsledky v oboru.

Lze vytknout nedostatečné vysvětlení, či absenci definic některých veličin a používaných označení, ačkoliv práce obsahuje seznam značení ve vztahu k jednotlivým podtématům. Autor by také mohl více používat odkazy na vztahy a rovnice v textu již dříve zavedené. Výše uvedené výhrady k obsahu a zpracování jednotlivých kapitol nejsou zásadní a nesnižují celkově pozitivní dojem z předložené disertace. Velmi kladně lze hodnotit všestrannost kandidáta, kterou prokázal nejen v oblasti teoretické, ale také svojí experimentální i programátorskou činností.

Cíle vytčené v disertační práci byly splněny a její vědecký přínos a přínos pro rozvoj vědního oboru jsou zcela nepochybné. Autorova publikační činnost v časopisech s impakt faktorem jasně prokazuje, že se zapojil do odborné komunity a nabyté vědomosti dokáže dále rozvíjet a aktivně samostatně používat k získání nových výsledků. Proto **doporučuji, aby Ing. Janu Heczkoovi byl na základě obhajoby udělen titul “doktor”.**

V Plzni 8.12.2019

Prof. Dr. Ing. Eduard Rohan, DSc.
Katedra mechaniky
Západočeská univerzita v Plzni