

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 741

ISSN 1213-418X

Luboš Náhlík

VLIV ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ NA ŠÍŘENÍ TRHLIN

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.

VLIV ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ NA ŠÍŘENÍ TRHLIN

INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON CRACKS PROPAGATION

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU APLIKOVANÁ MECHANIKA



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

Zbytková napětí, lineární elastická lomová mechanika, zbytková únavová životnost, šíření trhlin, směr šíření trhlin, odolnost proti šíření trhlin, numerické modelování

KEYWORDS

Residual stresses, linear elastic fracture mechanics, residual fatigue lifetime, crack propagation, crack propagation direction, resistance to a crack propagation, numerical modelling

OBSAH

Obsah	3
1 Představení autora	4
2 Úvod	7
2.1 Důležité Vztahy LELM.....	7
2.2 Zbytková napětí	10
3 Využití zbytkových napětí v technických aplikacích pro zvýšení odolnosti proti šíření trhlin	12
3.1 Zhouževnatění keramických laminátů vlivem zbytkových napětí.....	12
3.2 Vliv zbytkových napětí na zbytkovou životnost částicových keramických kompozitů	19
3.3 Vliv zbytkových napětí na zbytkovou únavovou životnost vlakové nápravy	22
3.3.1 Stanovení zbytkového napětí vlakové nápravy	23
3.3.2 Stanovení hodnot součinitelů intenzity napětí pro jednotlivé složky zatížení	27
4 Závěr.....	31
5 Využití výsledků v pedagogické praxi	32
6 Použitá literatura	32
Poděkování	35
Abstrakt	36
Abstract.....	36

1 PŘEDSTAVENÍ AUTORA



doc. Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.

*1975 Brno

Ústav fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

Žižkova 22, 616 00 Brno

&

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

Technická 2, 616 69 Brno

Researcher ID: A-6475-2009

Luboš Náhlík získal v roce 1999 vysokoškolské vzdělání (Ing.) v oboru Aplikovaná mechanika na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (FSI VUT v Brně). V letech 1999-2002 absolvoval doktorské studium na téže fakultě pod vedením školitele prof. RNDr. Zdeňka Knésly, CSc., a po obhajobě dizertační práce s názvem *Šíření únavových trhlin v okolí rozhraní dvou elastických materiálů* získal titul Ph.D. v oboru Inženýrská mechanika. Za dizertační práci byl v roce 2002 oceněn cenou rektora VUT v Brně.

V letech 2002 až 2003 absolvoval postdoktorský pobyt na École Centrale de Lille, Villeneuve d'Ascq, Francie. Zde se zaměřoval na numerické modelování elasto-plastické deformace nerezavějících duplexních ocelí. Od svého návratu z Francie v roce 2003 je vědeckým pracovníkem ve skupině *Vysokocyklové únavy* Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i. (ÚFM). Jako vědecký pracovník se odborně pohybuje v oblasti únavy materiálu a lomové mechaniky, zabývá se vývojem metod predikce životnosti komponent, vývoji testovacích metod v oblasti únavy materiálu, kritérii stability trhlin šířících se v materiálech s rozhraním, vývojem metodik stanovení zbytkové únavové životnosti součástí z kovů, polymerů a keramik a popisem parametrů, které tuto životnost ovlivňují. Jako vědecký pracovník publikoval více než 200 prací¹.

Od akademického roku 2003/2004 působí také jako odborný asistent na Ústav mechaniky těles, biomechaniky a mechatroniky (ÚMTMB) FSI VUT v Brně, kde se věnuje vedení cvičení a přednášek v oborech spřízněných s jeho odborným zaměřením: Statika, Pružnost a pevnost I a II. Jako externí vyučující působil také na Ústavu materiálových věd a inženýrství (ÚMVI) a Ústavu konstruování (ÚK) téže fakulty, kde zavedl, společně s doc. Pavlem Hutařem, předmět Únava a lomová mechanika.

V roce 2009 se habilitoval v oboru Aplikovaná mechanika na FSI VUT a pokračoval ve výuce předmětů na ÚMTMB a ÚK FSI VUT v Brně. Ve vyšší míře se zapojil do školení doktorandů (dosud 9 doktorandů obhájilo své dizertační práce). Po vzniku CEITEC PhD school založil, garantuje a vede předmět doktorského studia *Pokročilá lomová mechanika*, a to jak v české, tak anglické podobě. S kolegy z ÚMTMB spolupracuje na náplni předmětu Mezní stavy kovových konstrukcí. Od roku 2010 je členem oborové rady doktorských studijních programů Inženýrská mechanika, Applied Mechanics a Aplikované vědy v inženýrství. Je členem komisí pro státní závěrečné zkoušky všech stupňů studia (ÚMTMB, ÚK) a komisí pro obhajobu doktorských dizertačních a habilitačních prací. Je členem komisí doktorského studia (přijímací, pro státní doktorskou zkoušku, obhajobu dizertačních prací) také na CEITEC VUT.

¹ 101 prací je obsaženo v databázi Web of Science s počtem citací 761 (536 bez autocitací), H-index je 16. V databázi Scopus je obsaženo 138 prací, 930 citací (534 bez autocitací), H-index je 17.

Za ÚFM připravoval projekt CEITEC – Středoevropský technologický institut a od roku 2010 je ředitel organizační jednotky CEITEC ÚFM a členem managementu ÚFM. V rámci organizační jednotky (oddělení) postupně vznikly dvě výzkumné skupiny a projektový tým. V roce 2014 si rozšířil kvalifikaci o certifikát PRINCE2® Foundation in project management, Axelos. V letech 2016-2019 vedl také tzv. velkou výzkumnou infrastrukturu IPMINFRA.

V roce 2017 byl zvolen členem (a v r. 2021 znovu na druhé období) Akademické rady Akademie věd ČR. V této funkci má na starosti zejména problematiku účelové podpory financování VaVaI v ČR a komunikaci s poskytovateli této podpory, a částečně také související legislativu ČR. S touto pozicí souvisí také členství v několika poradních orgánech a pracovních skupinách při AV ČR, MŠMT či Úřadu vlády ČR a v dozorčích radách ústavů AV ČR.

V roce 2021 je jím vedené oddělení rozšířeno také o elektronovou mikroskopii a oddělení dostává název oddělení Experimentálních studií a modelování struktury, přičemž zahrnuje také OJ CEITEC ÚFM, která dále pokračuje v úspěšné spolupráci v rámci centra CEITEC. V roce 2022 je oddělení rozšířeno o další dvě výzkumné skupiny. Výzkumná činnost oddělení se zaměřuje zejména na modelování vlastností materiálů na různých úrovních a charakterizaci materiálů. Experimentální část oddělení zahrnuje elektronovou a optickou mikroskopii, rentgeny, zařízení pro stanovení magnetických, elektrických a dalších fyzikálních vlastností materiálů, laboratoře pro přípravu materiálů, chemické laboratoře, laboratoř 3D tisku polymerů a další.

Jako řešitel či spoluřešitel se podílel na vedení 21 projektů s celkovou dotací více než 300 mil. Kč. Jednalo se o výzkumné projekty GA ČR, GA AV či TA ČR, projekty MŠMT a MPO, projekty z Operačních programů: Výzkum a vývoj pro inovace, Vzdělávání pro konkurenceschopnost a Výzkum, vývoj a vzdělávání. Mezi nejvýznamnější patří projekt č. CZ.1.05/1.1.00/02.0068, CEITEC – Středoevropský technologický institut (2011-2015, spoluřešitel), MŠMT; navazující projekt č. LQ1601, CEITEC 2020 (2016-2020, spoluřešitel), MŠMT; projekt velké výzkumné infrastruktury č. LM2015069, Infrastruktura pro studium a aplikaci pokročilých materiálů – IPMINFRA (2016-2019, řešitel), MŠMT a komplementárního č. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001823 Modernizace infrastruktury pro studium a aplikaci pokročilých materiálů (m-IPMinfra), (2017-2021, řešitel), MŠMT či č. TN01000015 Národní centrum kompetence STROJÍRENSTVÍ, (2019-2022, spoluřešitel), TA ČR.

Je také spoluřešitelem mezinárodního projektu H2020-WIDESPREAD-2018-03 ID: 857124 Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through additive Manufacturing (2019-2022), Evropská komise. Úspěšná realizace projektu č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_027/0008056 Mezinárodní mobilita juniorských výzkumných pracovníků ÚFM, (2017-6/2019, řešitel), MŠMT byla zmíněna v brožuře vydané MŠMT shrnující úspěšnou realizaci OP Výzkum, vývoj a vzdělávání.

V letech 2013 až 2017 byl členem hodnotícího panelu č. 108 Materiálové vědy a inženýrství GAČR. Je členem European Structural Integrity Society (ESIS), České společnosti pro mechaniku či se podílí na hodnocení ERC Advanced grantů. Je členem mezinárodních vědeckých komisí konferencí European Conference on the Structural Integrity of Additively Manufactured Materials, East Europe Conference on AM materials a Applied Mechanics. Podílel se také na pořádání odborných akcí: Applied Mechanics 2005, 2011 a 2017, Workshop on Structural Integrity of Additively Manufactured Materials SIAMM22 (2022), Winter School on Trends on Additive Manufacturing for Engineering Applications (2022) a dalších.

Od roku 2016 je členem Rady instituce ÚFM, členem Sněmu Akademie věd ČR a od roku 2017 členem dozorčích orgánů ústavů AV ČR, členem poradních a monitorovacích komisí při MŠMT a MPO, či členem pracovních skupin při Úřadu vlády ČR. Od r. 2022 je také členem Vědecké rady FSI VUT v Brně.

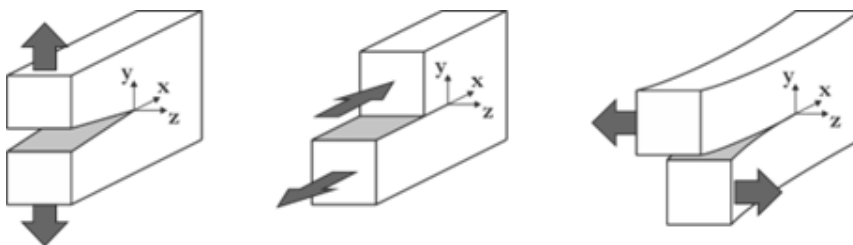
2 ÚVOD

Současné postupy lineární elastické lomové mechaniky (LELM), které mají za sebou více než šedesát let vývoje, umožňují studovat šíření trhlin v různých materiálech, popsat odolnost materiálů vůči šíření trhlin z defektů, odhadnout životnost tělesa (součásti) při kvazistatickém i cyklickém zatěžování, odhadnout velikost přípustné materiálové vady či velikost přípustného poškození při bezpečném zachování funkce součásti, či stanovení tzv. zbytkové únavové životnosti při opakovaném (cyklickém) zatěžování. Lze jich využít při návrhu součástí, kontrole přípustné velikosti defektu, optimalizaci tvaru součásti s ohledem na vznik a rozvoj defektů, i pro zajištění bezpečné dlouhodobé funkce součásti při předpokládané či skutečné existenci defektů či (únavového) poškození. Praktická aplikace postupů LELM kombinuje jak postupy mechaniky pevných látek, tak znalosti z oblasti materiálového inženýrství a testování zkušebních těles s trhlinou, tak numerické postupy využívající nejčastěji metody konečných prvků (MKP). Numerické výpočty jsou potřebné pro stanovení rozdělení napětí v zatížených tělesech i pro stanovení patřičných lomových či dalších parametrů pro posouzení chování trhliny či defektu v tělese.

Předložené teze se zaměřují na příklady, kdy k aplikaci LELM přistupuje i další fenomén, vnitřní zatížení tělesa vlivem tzv. zbytkových (reziduálních) napětí, která mají zásadní vliv na chování trhliny či defektu v tělese, a hrají dominantní roli při hodnocení tělesa s ohledem na jeho provozní bezpečnost. Vzhledem k velikosti a významu zbytkových napětí v ukázaných případech se text tezi částečně věnuje také problematice rozdělení zbytkových napětí v tělesech a postupům jejich stanovení. Uvažovaná zbytková napětí jsou vnesena do těles (součástí) technologickými postupy jejich zpracování ať již nechtěně, jako nedílná součást těchto postupů nebo zcela záměrně volbou vhodných technologických postupů a jejich parametrů, které vnáší potřebné rozdělení zbytkových napětí do těles. Poznamenejme, že teze představují z inženýrského pohledu „kladné“ příklady vlivu zbytkových napětí, tedy příklady, které vedou k navýšení odolnosti těles vůči šíření trhlin. Je ovšem známé, že zbytková napětí mohou sehrát v jiných případech zcela opačnou úlohu.

2.1 DŮLEŽITÉ VZTAHY LELM

Základem LELM je popis pole napětí v okolí vrcholu trhliny, který představuje tzv. ostrý koncentrátor napětí. Složky napětí v okolí vrcholu trhliny mají singulární charakter. V rámci LELM je jednou z nejrozšířenějších a nejpropracovanějších koncepcí koncepce součinitele intenzity napětí $K[MPa\sqrt{m}]$.

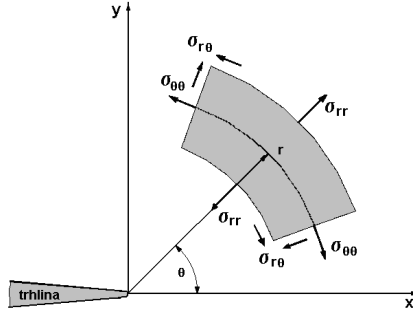


Obr. 1: Základní módy zatěžování tělesa s trhlinou: a) normálový, b) smykový, c) antirovinný smykový [1]

Rozdělení napětí v okolí vrcholu trhliny lze za pomoci součinitele intenzity napětí popsat následovně (např. [1]):

$$\sigma_{ij} = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(i)}(\theta), \quad i = I, II, III, \quad (1)$$

kde σ_{ij} je tenzor napětí, K_i je součinitel intenzity napětí [$MPa\sqrt{m}$], index i značí tzv. zatěžující mód tělesa s trhlinou (viz obr. 1) a r, θ jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny (viz obr. 2).



Obr. 2: Polární souřadnicový systém ve vrcholu trhliny

Ač jsou pro celou řadu konfigurací tělesa s trhlinou či v případě běžných zkušebních těles zpracovány analytické vztahy pro rychlé stanovení velikosti součinitele intenzity napětí v patřičných handboocích, např. [2],[3], v této práci, stejně jako v případě většiny inženýrských aplikací, je předpokládáno numerické stanovení rozdělení napětí v tělese (obvykle za pomoci MKP). Postupů existuje celá řada, viz např. [1].

Znalosti lomového parametru K lze využít, v případě statického zatížení, v tzv. kritériu stability trhliny. Toto slouží k rozhodnutí, zdali nedojde při daném zatížení k nestabilnímu šíření trhliny z uvažovaného defektu a k porušení součásti. Takové kritérium může mít při uvažovaném módu zatížení I tvar [4]:

$$K_I < K_{IC}, \quad (2)$$

kde hodnota K_{IC} je kritická hodnota součinitele intenzity napětí, nejčastěji uvažovaná jako tzv. lomová houževnatost. Znalost parametru K lze využít i v dalších kritériích stability trhliny vycházejících např. z faktoru hustoty deformační energie S [5]. Hustotu deformační energie w lze obecně vyjádřit ve tvaru:

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad (3)$$

kde ε_{ij} je tenzor přetvoření, přičemž samotný faktor hustoty deformační energie S lze vyjádřit jako součin hustoty deformační energie w a vzdálenosti od kořene trhliny r :

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2, \quad (4)$$

kde a_{11}, a_{12}, a_{22} jsou známé funkce úhlu θ a K_I, K_{II} jsou součinitele intenzity napětí pro zatěžovací módy I a II. Veličina S umožňuje dobře pracovat i s tzv. smíšeným módem zatížení, ve kterém dochází ke kombinaci zatěžujících módů. Kritérium stability trhliny má tvar $S < S_C(K_{IC})$. Kritická hodnota S_C je obvykle stanovena z hodnoty lomové houževnatosti.

Z podmínky $S = S_c$ je možné určit počátek šíření trhliny (potřebnou úroveň vnějšího zatížení tělesa), a s využitím podmínek (5), také stanovit směr dalšího šíření trhliny. Trhlina se bude šířit ve směru minimální hodnoty faktoru hustoty deformační energie θ_0 (viz obr. 3), přičemž v okamžiku počátku šíření je hodnota $S = S_c$:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \theta}\right)_{\theta=\theta_0} = 0 \wedge \left(\frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2}\right)_{\theta=\theta_0} > 0. \quad (5)$$



Obr. 3: Směr šíření trhliny θ_0

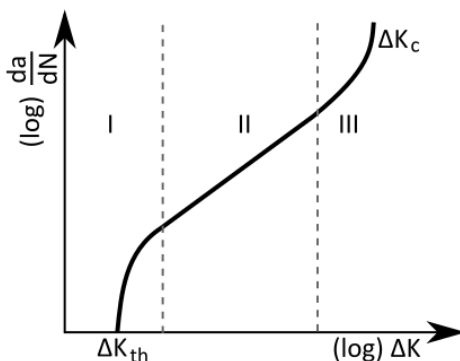
Podobně jako v případě statického či kvazistatického zatížení mohou postupy LELM posloužit také v případě cyklického zatěžování. V tomto případě se obvykle využívá rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK (udává rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou v cyklu). Opět lze stanovit počátek šíření trhliny, který nastane po překročení tzv. prahové hodnoty součinitele intenzity napětí ΔK_{th} , která je materiálovou charakteristikou. Trhlina se tedy bude šířit pro:

$$\Delta K \geq \Delta K_{th}. \quad (6)$$

Lze také stanovit směr dalšího šíření únavové trhliny, např. za pomoci kritéria maximálního tangenciálního napětí (MTS) [6]. Při splnění podmínky (6) se bude únavová trhlina šířit ve směru θ_0 , ve kterém je hodnota tangenciálního (otevíracího) napětí $\sigma_{\theta\theta}$ maximální:

$$\left(\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta}\right)_{\theta=\theta_0} = 0 \wedge \left(\frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2}\right)_{\theta=\theta_0} < 0. \quad (7)$$

V případě cyklického zatěžování je možné stanovit rychlost šíření únavové trhliny v , která je definována jako přírůstek délky trhliny a za jeden zátěžný cyklus, tedy $v = \Delta a / \Delta N$. V tomto případě je zapotřebí znát nejen prahovou hodnotu ΔK_{th} , ale také celou závislost rychlosti šíření únavové trhliny na velikosti rozkmitu součinitele intenzity napětí, viz. obr. 4.



Obr. 4: Typická závislost rychlosti šíření únavové trhliny da/dN v závislosti na velikosti rozkmitu součinitele intenzity napětí ΔK

Existuje řada přístupů, jak popsat rychlost šíření únavové trhliny. Uvedme alespoň jeden z nejpoužívanějších, a to přístup využívaný v software NASGRO, který byl vyvíjen od 80. let minulého století v NASA Johnson Space Center [7]. NASGRO je založený na práci J.C. Newmana [8]. K popisu rychlosti šíření únavové trhliny využívá tento přístup vztahu:

$$v = \frac{da}{dN} = C \left(\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right)^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q}, \quad (8)$$

kde C , n , p , q jsou materiálové parametry, parametr f popisuje míru zavírání trhliny plastickou deformací v okolí jejího vrcholu a parametr R je tzv. parametr asymetrie zátěžného cyklu definovaný jako podíl minimální a maximální hodnoty napětí v aplikovaném zátěžném cyklu.

Vztahu (8) lze využít pro vyjádření přírůstku délky trhliny pro daný počet zátěžných cyklů. Pokud budeme uvažovat oblast stabilního šíření trhliny, tedy oblast I a II v obr. 4, lze velikost přírůstku délky trhliny Δa pro přírůstek zátěžných cyklů ΔN stanovit jako:

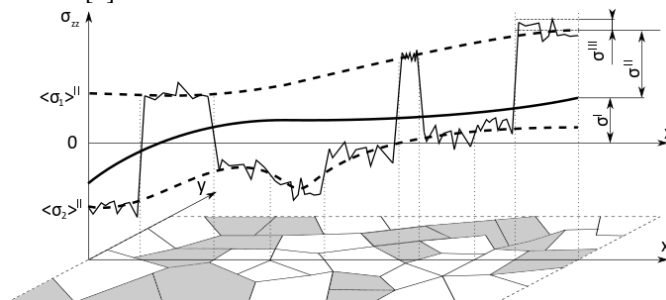
$$\Delta a = C \left(\left(\frac{1-f}{1-R} \right) \Delta K \right)^n \left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p \Delta N. \quad (9)$$

Poznamenejme, že hodnota ΔK je funkcí délky trhliny a , tedy $\Delta K(a)$. Při uvažování reálných zátěžných spekter se vyjadřuje hodnota ΔK nejen pro danou délku trhliny, ale také pro dané zatížení v cyklu. Tomu odpovídá i velikost parametru R , případně f . Za pomoci vztahu (9) můžeme stanovit tzv. zbytkovou únavovou životnost součásti, tedy počet zátěžných cyklů (případně také čas), za který dojde k nárůstu únavové trhliny z počáteční velikosti a_0 (zvoleno např. jako velikost největšího přípustného defektu u nové součásti, či předpokládaná velikost poškození vzniklá při funkci součásti) po nárůst na kritickou hodnotu a_c , kdy dojde k nestabilnímu šíření únavové trhliny a následnému lomu součásti.

Maximální přípustná délka trhliny se ovšem v reálných aplikacích volí kratší tak, aby byla zachována bezpečnost součásti i celého zařízení. Stanovení zbytkové únavové životnosti součásti se v tomto případě využívá k nastavení délky kontrolních (servisních) intervalů tak, aby mezi jednotlivými kontrolami nedošlo k fatálnímu selhání součásti.

2.2 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ

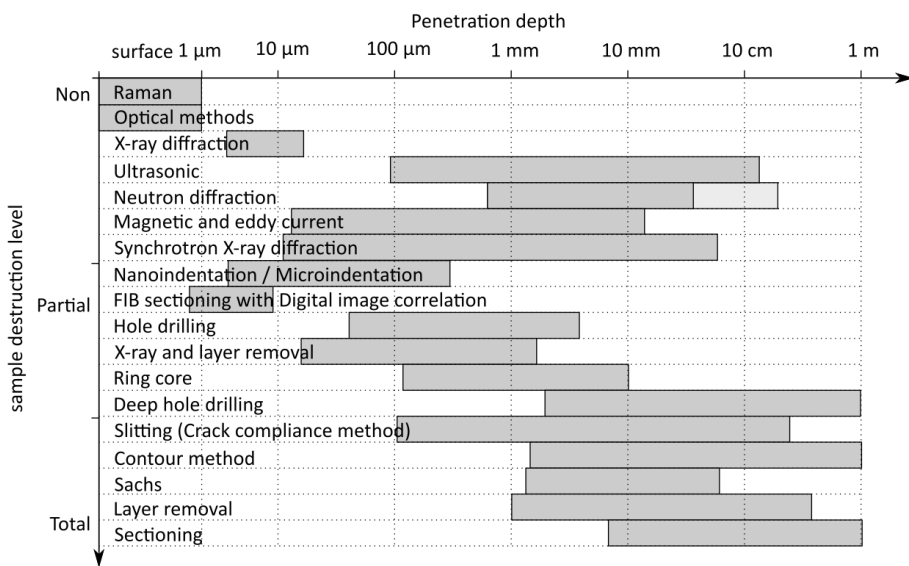
Zbytková napětí lze definovat jako napětí, která zůstávají v materiálu nebo tělese po výrobě a zpracování, i když na těleso nepůsobí vnější síly. Techniky měření zbytkových napětí vždy měří deformaci tělesa a zbytková napětí se pak odvozují pomocí příslušných vztahů a materiálových konstant [9].



Obr. 5: Ukázka různých typů zbytkových napětí ve dvofázovém materiálu [11]

Zbytková napětí se vyskytují na makroskopické i mikroskopické úrovni, přičemž oba typy mohou být v tělese přítomny současně. Makroskopická zbytková napětí, která budou uvažována v této práci (dle literatury [10] označována jako typu I, viz obr. 5), se v součásti mění v rozsahu mnohem větším, než je velikost zrn. Zbytková napětí na mikroskopické úrovni (zbytková napětí typu II a III), která jsou výsledkem rozdílů v mikrostruktuře materiálu, působí na úrovni velikosti zrn (typ II) či na atomární úrovni (typ III).

Zbytková napětí vznikají při většině výrobních procesů zahrnujících deformaci materiálu, tepelné zpracování, obrábění nebo tváření, které mění tvar nebo vlastnosti materiálu. Jejich původ může být způsoben mechanickou deformací (většina obráběcích a tvářecích procesů), tepelným působením (např. po kalení) či může být chemického původu (nitridování). Zbytková napětí mohou být dostatečně velká, aby způsobila lokální poddajnost a plastickou deformaci na mikroskopické i makroskopické úrovni, a mohou vážně ovlivnit vlastnosti součásti. Z tohoto důvodu je vhodná znalost jejich rozdělení v tělese, ať již získaná na základě experimentálních měření nebo na základě numerického modelování. Přehled experimentálních technik vhodných pro stanovení zbytkových napětí je uveden na obr. 6 i s rozsahem, do jaké hloubky pod povrchem tělesa je možné zbytková napětí stanovit. Poznamenejme, že většina technik, vhodných zejména pro větší hloubky pod povrchem je, bohužel, částečně nebo zcela destruktivních a nejsou použitelné např. pro výstupní kontrolu výrobku. Také až na výjimky vyžaduje většina technik drahé experimentální zařízení.



Obr. 6: Porovnání různých metod stanovení zbytkových napětí

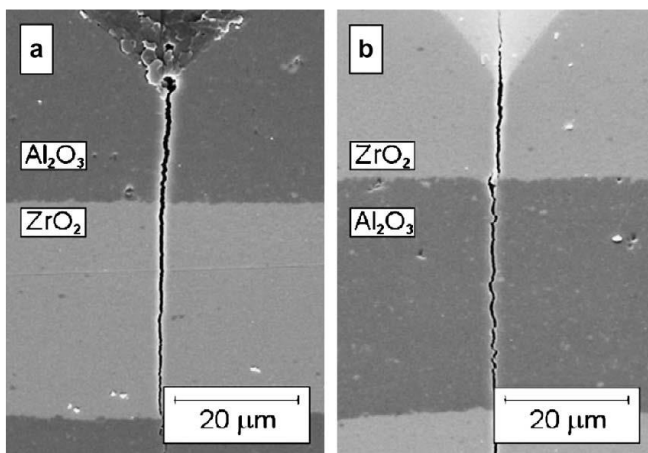
Zbytková napětí mohou vznikat jako následek výše uvedených technologických procesů, anebo mohou být vnášena záměrně tak, aby vytvořila žádoucí rozložení v tělese. Poznamenejme, že tahová zbytková napětí na povrchu součásti jsou obecně nežádoucí, protože mohou přispívat k únavovému selhání součásti. Tlaková zbytková napětí v povrchových vrstvách jsou obvykle výhodná, protože zvyšují únavovou odolnost (neumožňují vznik a rozvoj únavových trhlin nebo únavový proces zpomalují).

3 VYUŽITÍ ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ V TECHNICKÝCH APLIKACÍCH PRO ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI PROTI ŠÍŘENÍ TRHLIN

3.1 ZHOUŽEVNATĚNÍ KERAMICKÝCH LAMINÁTŮ VLIVEM ZBYTKOVÝCH NAPĚTÍ

V posledních desetiletích bylo dosaženo značného pokroku v oblasti zlepšování mechanických vlastností keramických materiálů. Objevily se nové strategie tvorby keramik, s cílem dosáhnout keramických materiálů tolerantních k vnitřním vadám s vyšší tzv. zdánlivou lomovou houževnatostí². Jedním z nejatraktivnějších přístupů je např. vytváření vrstevnatých struktur, které kombinují materiály s různými vlastnostmi. Výsledkem jsou např. keramické lamináty s mechanickým chováním lepším, než odpovídá vlastnostem jednotlivých materiálových složek. Vhodnými postupy lomové mechaniky lze přispět k návrhu takového kompozitu, vykazujícího zvýšenou zdánlivou lomovou houževnatost, vyšší schopnost absorbovat energii, s předvídatelnějším chováním, které zabraňuje náhlému selhání.

K potřebnému efektu se využívá vícevrstevných keramických laminátů (např. na bázi Al_2O_3 a ZrO_2 , viz obr. 7), kde ke zvýšení jejich zdánlivé lomové houževnatosti dochází jak vlivem existence materiálových rozhraní, tak zejména vlivem silných zbytkových napětí. Tato jsou výsledkem technologického procesu spékání materiálu a následného ochlazení z tzv. „stress free“ teploty na teplotu okolí, kde hlavně vlivem rozdílnosti koeficientů teplotní roztažnosti, chemickým reakcím a/nebo fázovým transformacím dojde k vyvinutí silných zbytkových napětí v keramickém laminátu [12].

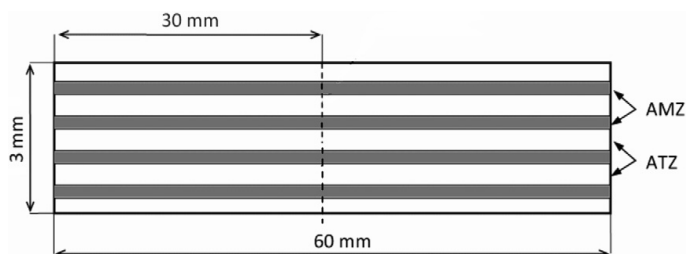


Obr. 7: Ukázka porušení keramického laminátu Al_2O_3 - ZrO_2 indentací (autor H. Hadraba, ÚFM AV ČR) [12]

² Zdánlivá lomová houževnatost není v tomto případě materiálová charakteristika, ale je to hodnota houževnatosti, kterou vykazuje navenek kompozitní těleso. Zdánlivá lomová houževnatost kompozitního tělesa může být velmi rozdílná od lomové houževnatosti jeho jednotlivých materiálových složek. Podílí se na ní mj. vlastnosti materiálových rozhraní či existence zbytkových napětí v kompozitu.

Lomová mechanika umožňuje návrh vhodného složení laminátu s potřebnými tlakovými zbytkovými napětími bránícími porušování laminátu a zvyšujícími zdánlivou lomovou houževnatost tohoto laminátu. Postup přípravy takových kompozitů a jejich typické chování při vzniku trhlin lze nalézt např. v [13]-[16].

O efektivnosti vrstevnaté architektury keramického laminátu svědčí následující příklad. Je uvažován laminát s vrstvami $\text{Al}_2\text{O}_3/5\text{vol.}\%t\text{-ZrO}_2$ (značeno jako ATZ) a $\text{Al}_2\text{O}_3/30\text{vol.}\%m\text{-ZrO}_2$ (značeno jako AMZ), viz obr. 8.



Obr. 8: Schematické zobrazení a rozměry studovaného keramického laminátu

Tloušťka vrstev uvažovaného keramického laminátu je: $t_{\text{ATZ}} = 0,52$ mm a $t_{\text{AMZ}} = 0,1$ mm, přičemž jeho materiálové vlastnosti, které jsou uvažovány v práci [17] shrnuje tab. 1.

Tab. 1: Materiálové vlastnosti keramického laminátu [17]

Materiálová charakteristika	jednotka	ATZ	AMZ
Modul pružnosti v tahu E	GPa	390 ± 5	280 ± 5
Poissonovo číslo ν	-	0,22	0,22
Koeficient teplotní roztažnosti $\bar{\alpha}$ (20-1200°C)	$10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	$9,8 \pm 0,2$	$8,0 \pm 0,2$
Lomová houževnatost K_{Ic}	$\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	$3,2 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,1$
Lomové napětí σ_{f}	MPa	422 ± 30	90 ± 20

Velikost zbytkových napětí lze v tomto případě odhadnout z analytických výrazů [18]:

$$\sigma_{\text{res,AMZ}} = -\sigma_{\text{res,ATZ}} \cdot \rho \cdot \frac{n+1}{n-1}, \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{res,ATZ}} = \frac{\int_{T_{sf}}^{T_0} (\alpha_{\text{AMZ}} - \alpha_{\text{ATZ}}) dT}{\frac{1}{E'_{\text{ATZ}}} + \frac{1}{E'_{\text{AMZ}}} \rho \cdot \frac{n+1}{n-1}}, \quad (11)$$

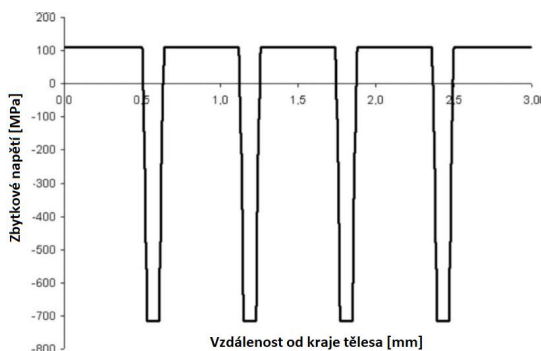
kde $\rho = \frac{t_{\text{ATZ}}}{t_{\text{AMZ}}}$, n je počet vrstev, T_0 je pokojová teplota, T_{sf} (tzv. „stress free“ teplota) je teplota, při které nejsou v materiálu přítomna žádná reziduální napětí, α_{AMZ} , α_{ATZ} jsou koeficienty teplotní roztažnosti jednotlivých materiálů, $E'_{\text{AMZ}} = \frac{E_{\text{AMZ}}}{1-\nu_{\text{AMZ}}}$ a $E'_{\text{ATZ}} = \frac{E_{\text{ATZ}}}{1-\nu_{\text{ATZ}}}$.

O velikosti zbytkových napětí pro danou konfiguraci svědčí tab. 2, kde je uvedeno také porovnání výpočtu z analytických výrazů (10) a (11) s numerickou simulací pomocí MKP [19].

Tab. 2: Velikost zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách keramického laminátu

Numerické simulace (MKP)		Analytické vztahy [18]	
$\sigma_{res,ATZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,AMZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,ATZ}$ [MPa]	$\sigma_{res,AMZ}$ [MPa]
110,11	-715,72	109,95	-715,83

Grafický průběh zbytkových napětí po průřezu keramického laminátu (výsledek numerických simulací uvedený v práci [12]) je vidět na obr. 9.

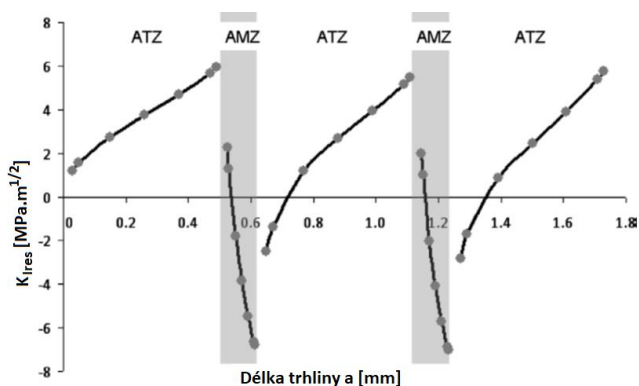


Obr. 9: Distribuce zbytkových napětí napříč řezem keramického laminátu

Za pomoci vztahů LELM lze získat představu o velikosti zdánlivé lomové houževnatosti zmíněného laminátu $K_{apl}(a)$, která odpovídá maximální hodnotě rozdílu mezi lomovou houževnatostí materiálů a hodnotou součinitele intenzity napětí odpovídající zbytkovým napětím pro aktuální délku trhliny $K_{Ires}(a)$:

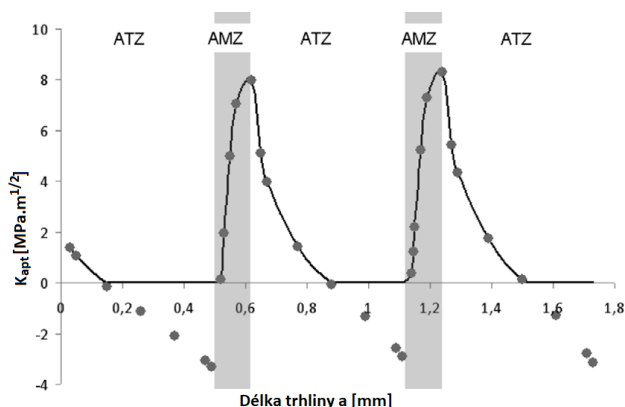
$$K_{apl}(a) = K_{IC} - K_{Ires}(a). \quad (12)$$

Silná zbytková napětí v jednotlivých vrstvách vyjadřuje hodnota $K_{Ires}(a)$, viz obr. 10.



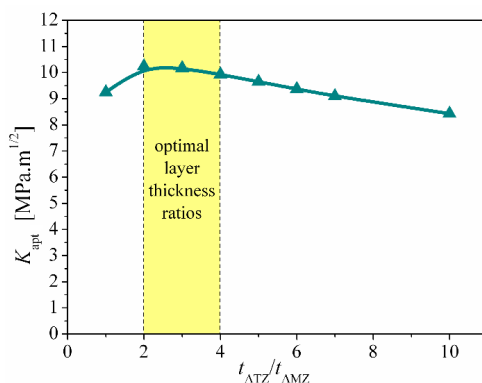
Obr. 10: Hodnoty součinitele intenzity napětí $K_{Ires}(a)$ odpovídající působení zbytkových napětí v keramickém laminátu

Výsledné hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti pro danou délku trhliny vypočítané dle vztahu (12) jsou uvedeny na obr. 11. Poznamenejme, že pro získání hodnot uvedených v grafu bylo využito také speciálních postupů pro určení lomových parametrů na materiálovém rozhraní uvedených v pracích [12], [20] či habilitační práci [21]. Jedná se o případ, kdy dochází ke změně tzv. singularity napětí, a vztahu (1) nelze využít pro popis napětí v okolí vrcholu trhliny. V tomto případě je zapotřebí použít tzv. zobecněné lomové mechaniky a zobecněných kritérií stability trhliny. Tato problematika byla autorem popsána v souboru prací [22]-[25].



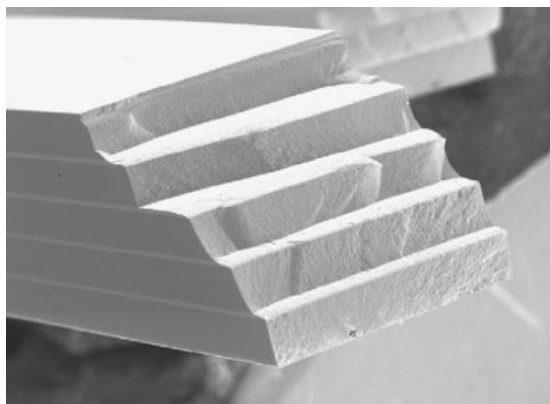
Obr. 11: Hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti napříč několika vrstvami keramického laminátu (plná čára)

Zatímco lomová houževnatost je materiálovou charakteristikou, přičemž pro vrstvu ATZ dosahuje hodnoty $3,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ a pro vrstvu AMZ hodnoty přibližně $2,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, stanovená hodnota zdánlivé lomové houževnatosti keramického laminátu představuje velikost odporu vůči šíření trhliny ve studovaném laminátu. Je to maximální hodnota, kterou laminát vykazuje, tedy v našem případě cca $8,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, viz obr. 11. Je zřejmé, že silná zbytková napětí v keramickém laminátu způsobila nárůst jeho zdánlivé lomové houževnatosti o cca 260% vůči lomové houževnatosti vrstvy ATZ. Tedy vhodnou volbou materiálových vrstev, jejich tloušťkou a zpracováním, lze dosáhnout významného navýšení odolnosti keramického laminátu proti šíření trhlin, což bylo potvrzeno i experimentálně, viz např. [13].

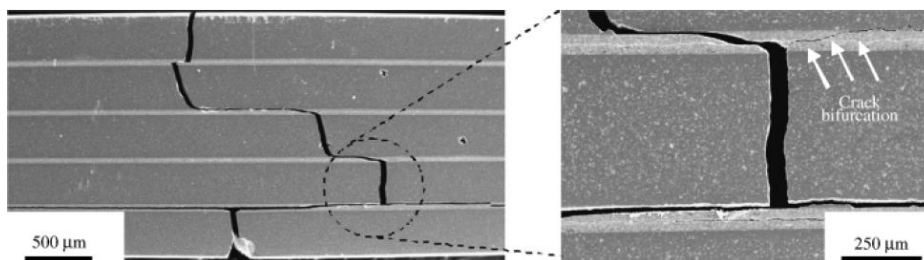


Obr. 12: Stanovení optimálního poměru tloušťky vrstev keramického laminátu s ohledem na velikost zdánlivé lomové houževnatosti

Uvedený postup zvýšení lomové houževnatosti má samozřejmé své limity, které představuje zejména zeslabování „tlakové“ vrstvy za účelem dosažení ještě vyšších tlakových napětí a tím i vyšších hodnot zdánlivé lomové houževnatosti. Omezení je dáno prerozdělením napětí v okolí vrcholu trhliny, kdy efekt rozevření trhliny má větší dopady než velikost tlakových (tedy trhlinu zavírajících) napětí. Má tak smysl zabývat se optimalizací tloušťky vrstev kompozitu s ohledem na získání co nejvyšší hodnoty zdánlivé lomové houževnatosti, což bylo provedeno na podobném materiálovém systému v práci [17], viz obr. 12. Z publikované práce vyplývá, že vhodný poměr mezi vrstvou s tahovým napětím a tlakovým napětím je cca 2:1 až 4:1.

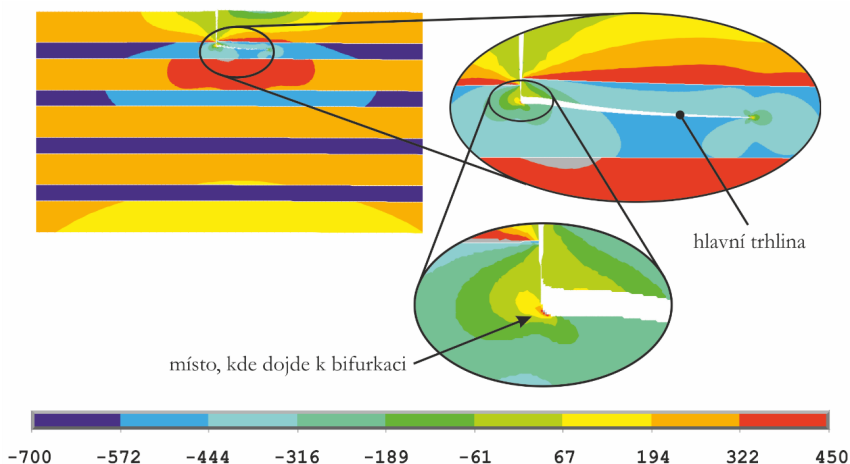


Obr. 13: Typické „schodovité“ šíření trhliny po jednotlivých vrstvách (uvedeno se souhlasem R. Bermeja, Montanuniversität Leoben) [26]



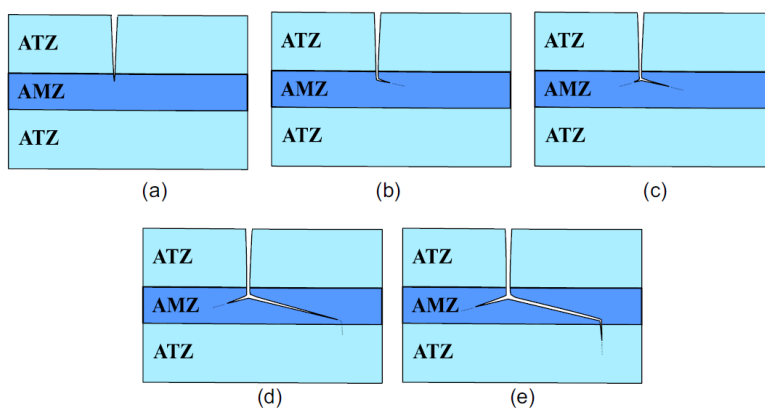
Obr. 14: Bifurkace trhliny v tlakové vrstvě keramického laminátu (uvedeno se souhlasem R. Bermeja, Montanuniversität Leoben) [26]

Zbytková napětí v keramických laminátech vedou také k poměrně komplikovanému mechanismu porušování těchto laminátů, kdy dochází k prudkým změnám směru šíření trhliny, či k jejímu rozdělení (bifurkaci), při současném šíření trhlin z obou jejích vrcholů, viz obrázky 13 a 14. V práci [27] byl popsán mechanismus tohoto porušení keramického laminátu, který je příčinou jeho zhouževnatění. V uvedené práci se podařilo postupy LELM a za pomoci numerických simulací předpovědět lomové chování studovaného kompozitu a popsat jak, a za jakých podmínek, dochází k jednotlivým fázím jeho porušení. Obr. 15 ukazuje rozdělení napětí ve studovaném keramickém laminátu se šířící se trhlinou. Evidentní jsou značná tlaková napětí způsobující prudkou změnu směru šíření trhliny.



Obr. 15: Rozdělení napětí v keramickém laminátu se šířící se trhlinou

Obr. 16 schematicky ukazuje celým mechanismus šíření trhliny získaný na základě numerickým simulací MKP a postupů LELM. Mechanismus se skládá z částí: a) šíření trhliny ve vrstvě s tahovým napětím (zde ATZ) do blízkosti rozhraní s vrstvou s tlakovým napětím (AMZ); b) prudký odklon směru šíření trhliny od původního směru kolmého na materiálové rozhraní. Odklon je způsoben silným tlakovým zbytkovým napětím; c) při jisté délce odkloněné trhliny dochází v tělese k redistribuci napětí a vznikají vhodné podmínky pro iniciaci druhého vrcholu trhliny v oblasti původní náhlé změny směru šíření; d) diagonální šíření obou konců trhliny v „tlakové“ vrstvě do blízkosti dalšího rozhraní s „tahovou“ vrstvou; e) vlivem blízké vrstvy s tahovým napětím dochází k další prudké změně směru šíření trhliny (z jednoho či druhého jejího vrcholu) do směru kolmo na rozhraní, přičemž znovu nastávají podmínky jako v bodě a), a celý děj se opakuje v dalších vrstvách. Popsaným mechanismem pak vzniká „schodišťový“ efekt šíření trhliny v keramickém laminátu a bifurkace trhliny v tlakových vrstvách.



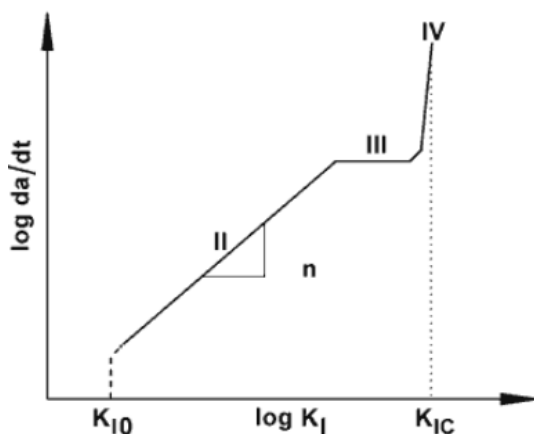
Obr. 16: Způsob šíření trhliny přes jednotlivé vrstvy keramického laminátu získaný na základě numerickým simulací MKP a postupů LELM

3.2 Vliv zbytkových napětí na zbytkovou životnost částicových keramických kompozitů

Zbytková napětí mohou sehrát také významnou roli v případě zbytkové životnosti keramických kompozitů. Za účelem zlepšení mechanických vlastností byly vytvořeny některé druhy částicových keramických kompozitů. Příkladem mohou být tzv. „Low Temperature Co-fired Ceramics“ (LTCC), které jsou používány jako substrát pro výrobu vícevrstevných elektronických obvodů a senzorů, jež se používají v různých typech IT komunikačních zařízení, v medicíně nebo v automobilovém průmyslu [28], [29].

Typická LTCC obsahuje částice z oxidu hlinitého a skleněnou matici. Je charakteristická nízkou slinovací teplotou částic (cca 850 °C) [30]. Vlivem technologie výroby a rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti částic a matrice jsou i v těchto kompozitech přítomna zbytková napětí.

Predikce zbytkové životnosti částicových keramických kompozitů je úzce spjata s porozuměním mechanismu šíření trhliny v daném prostředí. Pevnost materiálů na bázi skla nebo keramiky může degradovat také vlivem prostředí. Životnost těchto materiálů je úzce spojena s fenoménem subkritického šíření trhliny (SCCG, subcritical crack growth), který blíže popsal Wiederhorn v práci [31]. K subkritickému šíření trhliny dochází v důsledku změn chemických vazeb ve vrcholu trhliny. Ve výsledku to znamená, že se trhlina může šířit v materiálu při statickém zatížení, i když je hodnota součinitele intenzity napětí K_I této trhliny menší než hodnota lomové houževnatosti daného materiálu K_{IC} . V závislosti na prostředí, ve kterém se keramika nachází, se významně mění rychlost růstu trhliny, a tím i její zbytková životnost [32]. Typická závislost mezi rychlostí šíření trhliny v technických keramických materiálech a zatížením je uvedena na obr. 17. Křivka je obdobou v-K křivky známé u cyklicky zatěžovaných kovových materiálů, tzv. Paris-Erdoganovy závislosti [1]. Ve výše zmíněné práci [31] je kromě typické závislosti rychlosti šíření únavové trhliny na zatížení popsána také závislost této rychlosti na relativní vlhkosti prostředí, kdy se rychlost šíření trhliny pro oblast II a III v obr. 17 mění pro relativní vlhkost blízkou nule (0,017%) a 100% o více než tři řády, přičemž kritická hodnota (oblast IV) je na relativní vlhkosti prakticky nezávislá.



Obr. 17: Závislost rychlosti šíření trhliny na zatížení v technických keramických materiálech [31]

Rychlost subkritického růstu trhliny lze v oblasti II (viz obr. 17) popsat vztahem:

$$v = \frac{da}{dt} = v_0 \cdot \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n, \quad (13)$$

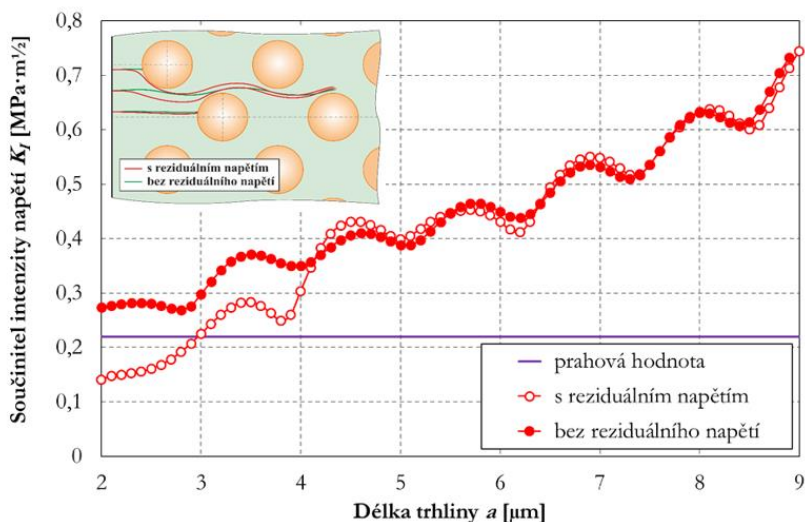
kde a je délka trhliny, t je čas, K_I je součinitel intenzity napětí pro mód zatěžování I, K_{IC} je lomová houževnatost, n je SCCG exponent a v_0 je materiálová konstanta. Exponent n je závislý na materiálových vlastnostech, teplotě a prostředí. Pro většinu keramik je $n > 15$ [32].

Vztahu (13) lze, při jistém zjednodušení, využít ke stanovení zbytkové životnosti keramického kompozitu t_f :

$$t_f = \int_0^{t_f} dt = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{v_0 \left(\frac{K_I}{K_{IC}} \right)^n}, \quad (14)$$

kde a_0 je počáteční délka trhliny odpovídající velikosti předpokládaného defektu, a_c je kritická délka trhliny, při které dojde k nestabilnímu šíření trhliny.

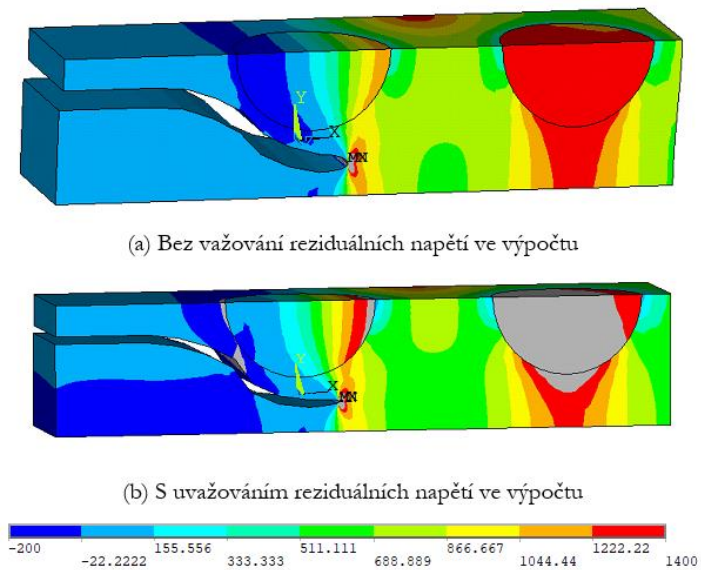
Studie provedená v [33] ukázala na vliv zbytkových napětí zejména v blízkosti povrchu částicového kompozitu, tedy v místech, kde se materiálové vady či mechanické poškození vyskytuje nejčastěji. Bylo ukázáno, že přítomost částic Al_2O_3 sama o sobě zvyšuje odpor proti šíření trhliny v kompozitu oproti šíření trhliny v samotné matici za podmínek SCCG, ale také, že vyvinuté zbytkové napětí v kompozitu, díky rozdílnosti koeficientů teplotní roztažnosti matrice a částic, jednoznačně přispívá ke snížení rychlosti šíření trhliny, či dokonce může snížit velikost součinitele intenzity napětí pod prahovou hodnotu (v porovnání se stavem bez uvažování zbytkových napětí). Trhlina by se z uvažované vady v blízkosti povrchu v tomto případě nemohla šířit.



Obr. 18: Vliv zbytkových napětí na velikost součinitele intenzity napětí v keramickém částicovém kompozitu

Výsledky numerických simulací ukázaly pozitivní vliv zbytkových napětí na snížení hodnoty součinitele intenzity napětí, což dokazuje obr. 18. Pozitivní efekt zbytkových napětí je

účinný do hloubky cca 4 μ m. Ve větších vzdálenostech od povrchu již efekt zbytkových napětí zaniká. Uvedené platí i pro částice jiných tvarů. Byť se jedná o snížení součinitele o několik desítek procent oproti stavu bez uvažování zbytkových napětí, je třeba tato napětí vzít v potaz při odhadu zbytkové životnosti takového kompozitu ve vztahu (14), neboť se obecně hodnota exponentu n v tomto vztahu může u keramických materiálů pohybovat v řádu desítek. Ve studovaném případě bylo $n = 35$. Vzhledem k takto vysokému exponentu se čas do nárůstu trhliny z její počáteční velikosti (či z počátečního defektu) do konečné velikosti může lišit o dva i více řádů při uvažování/neuvažování zbytkových napětí. Podobných závěrů bylo dosaženo i při uvažování kulových částí v 3D numerickém modelu, viz obr. 19.



Obr. 19: Rozložení pole napětí ve vertikálním směru [MPa] spolu s trajektorií trhliny při jejím subkritickém růstu do bodu, kde dojde k jejímu nestabilnímu šíření [34]

Výsledky provedených simulací lze využít k návrhu částicových kompozitů odolnějších proti poškození, jejich materiálové optimalizaci s cílem zvýšit jejich životnost, výpočtu zbytkové životnosti při uvažované distribuci materiálových vad či pro studium vlivu okolního prostředí na rychlost šíření trhliny a rozvoj poškození nebo stanovení zbytkové životnosti při změně okolního prostředí.

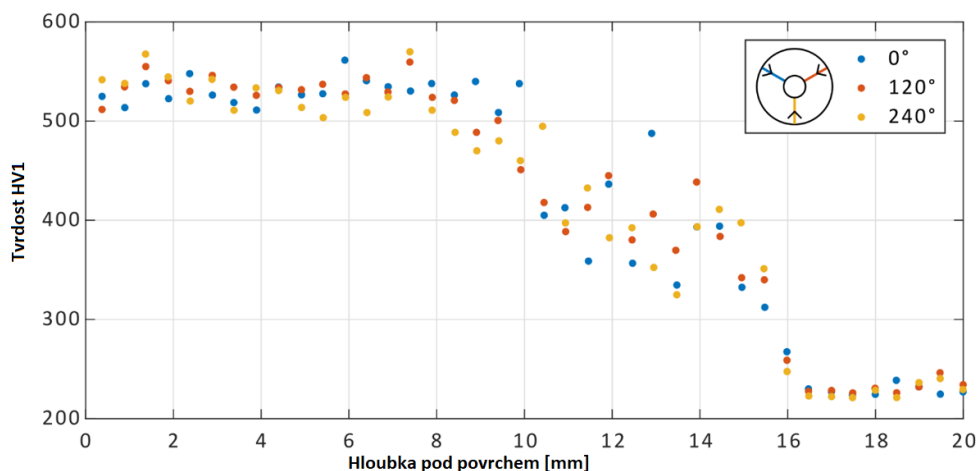
3.3 Vliv zbytkových napětí na zbytkovou únavovou životnost vlakové nápravy

Následující kapitola pojednává o významném vlivu zbytkových napětí na zbytkovou únavovou životnost indukčně kalených vlakových náprav, kde hrají klíčovou roli ve způsobu namáhání nápravy. V tomto případě nejsou zbytková napětí způsobena rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti materiálů, ale fázovou transformací materiálu zakalené části nápravy.

Problematika únavového porušení vlakových náprav je neklasičtějším problémem z oblasti únavy materiálu. Tento problém stál u zrodu celé oblasti únavy materiálu, když A. Wöhler začal v polovině 19. století jako první systematicky testovat vlakové nápravy, s cílem stanovit jejich životnost při cyklickém zatěžování. I když od prvních experimentů A. Wöhlera uběhlo již 170 let, je životnost vlakových náprav stále předmětem intenzivního výzkumu. Dnes již ovšem není cílem poznat základní mechanismy únavového porušování náprav, ale zabezpečit jejich maximální provozní bezpečnost při zachování nízkých provozních nákladů. Tyto náklady ovlivňuje také délka servisních intervalů a nákladnost servisních prohlídek. V současné době technologové hledají způsob, jak pomocí vhodné povrchové úpravy zvýšit tvrdost povrchu a celkovou únavovou odolnost nápravy, protože vhodné rozložení tlakového zbytkového napětí může zabránit vzniku a šíření únavových trhlin. Tím se prodlužuje zbytková únavová životnost nápravy i její provozní bezpečnost [35], [36].

Jednou z perspektivních technologií pro zpracování vysoce kvalitních náprav je indukční kalení, které je možné poměrně dobře řídit. Tato technologie dokáže vyvolat vysoká zbytková napětí (běžně v řádu stovek MPa) v kalené části tělesa. Volba parametrů indukčního kalení je naprosto klíčovou otázkou, protože výsledná mikrostruktura a profil zbytkových napětí by měly zaručit jak dostatečně tvrdý a nárazuvzdorný povrch, tak i vynikající únavové vlastnosti, tj. vysokou odolnost proti vzniku a následnému růstu únavových trhlin.

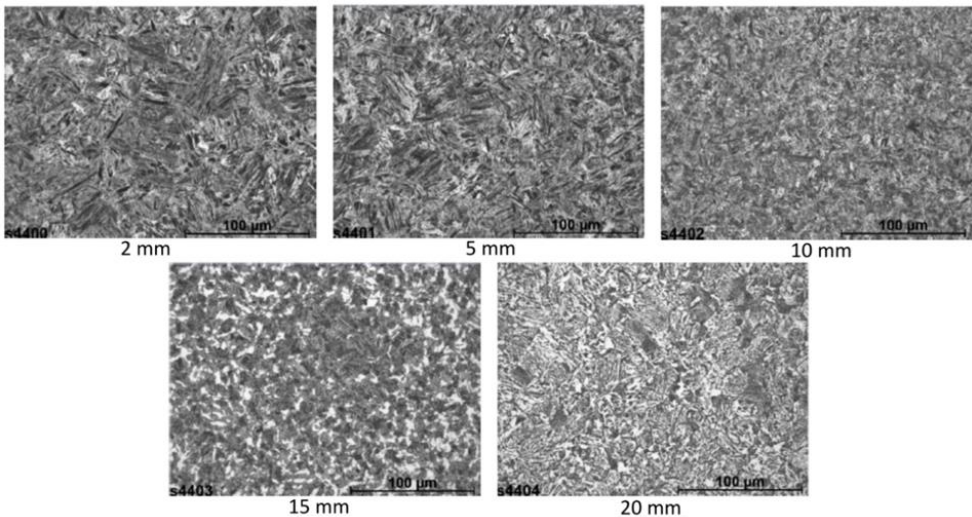
Na obr. 20 je ukázána změna tvrdosti indukčně zakalené nápravy po jejím průřezu. Z obrázku je vidět, že náprava je plně zakalena do hloubky cca 8 mm. V původním stavu se naopak nachází přibližně od hloubky 16 mm. Tabulka 3 uvádí složení mikrostruktury pro různé hloubky pod povrchem, založené na mikroskopickém pozorování, viz obr. 21.



Obr. 20: Závislost změny tvrdosti nápravy na hloubce pod povrchem

Tab. 3: Charakter mikrostruktury indukčně kalené nápravy v závislosti na hloubce pod povrchem

hloubka (mm)	mikrostruktura
0,0 - 7,5	martenzit
7,5 - 10,7	martenzit + bainit
10,7 - 13,6	bainit+ martensit + ferit
13,6 - 16,2	bainit + ferit + martenzit
16,2 a více	bainit + ferit + sorbit (stejná jako před indukčním kalením)



Obr. 21: Změna mikrostruktury indukčně zakalené nápravy v závislosti na hloubce od povrchu nápravy [11]

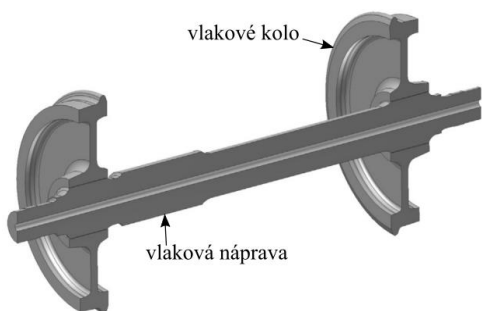
Pro správné nastavení technologie indukčního kalení je nezbytné přesné stanovení zbytkového napětí v železničních nápravách, které představuje základ pro optimalizaci rozdělení zbytkových napětí po průřezu železničních náprav.

3.3.1 Stanovení zbytkového napětí vlakové nápravy

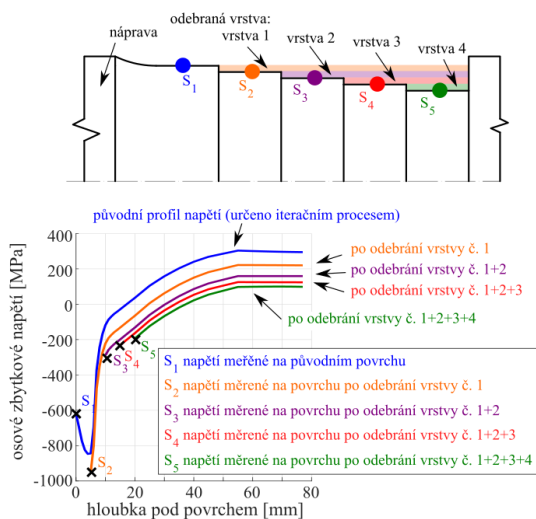
Stanovení zbytkového napětí ve vlakové nápravě představuje nesnadný úkol, a to již vzhledem k rozměrům a váze nápravy. Ještě větší problém představuje potřeba znalosti zbytkových napětí po celém průřezu nápravy, tedy do hloubky okolo 80 mm či více. Toto neumožňuje žádná z nedestruktivních metod stanovení zbytkových napětí, viz obr. 6. Stanovení zbytkových napětí v nápravě se tak stává nejen technicky obtížnou, ale také časově náročnou a drahou záležitostí, při které dojde k destrukci nápravy. Vzhledem ke značné hloubce je zapotřebí speciálních postupů, které kombinují některý ze způsobů stanovení zbytkových napětí s numerickými postupy, tak aby se rozdělení zbytkových napětí dalo stanovit po celém průřezu.

Jedním ze základních postupů je využití tzv. odvrtávací metody, která je schopna stanovit zbytková napětí do hloubky několika milimetrů pod povrchem. Pro větší hloubky je zapotřebí měření opakovat tak, že se vždy odebere povrchová vrstva materiálu a nový povrch se opětovně osadí tenzometrickou růžicí a navrtá. Tímto postupem je možno pokračovat v několika krocích

do potřebné hloubky. Vzhledem k tomu, že při odstranění povrchové vrstvy materiálu dojde k přerozdělení napětí v tělese, je nutné doplnit experimentální měření „výpočetní korekcí“, která využije naměřená data a iteračně stanoví napěťový stav v dané vrstvě, jako by byl „nad ní“ dříve odebraný materiál. V případě vlakové nápravy, viz obr. 22, je tento postup detailně popsán v [36]. Na obr. 23 je vidět aplikace postupu pro stanovení zbytkových napětí na nápravě ve společnosti Bonatrans Group, a.s.

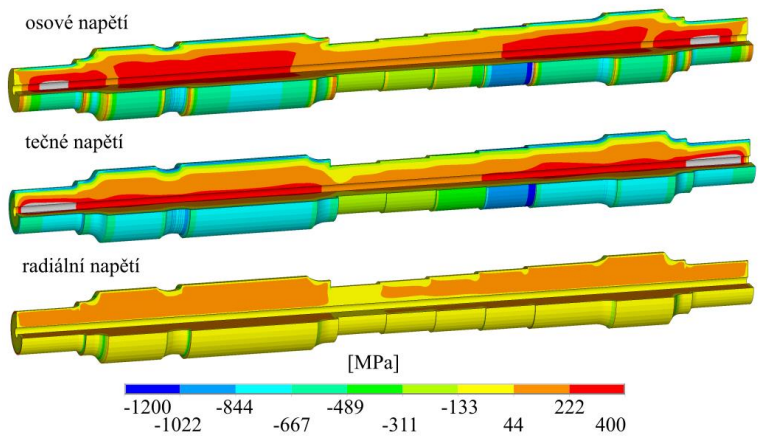


Obr. 22: Vlaková náprava s nalisovanými koly Obr. 23: Odvrtávací hlava VISHAY RS-200

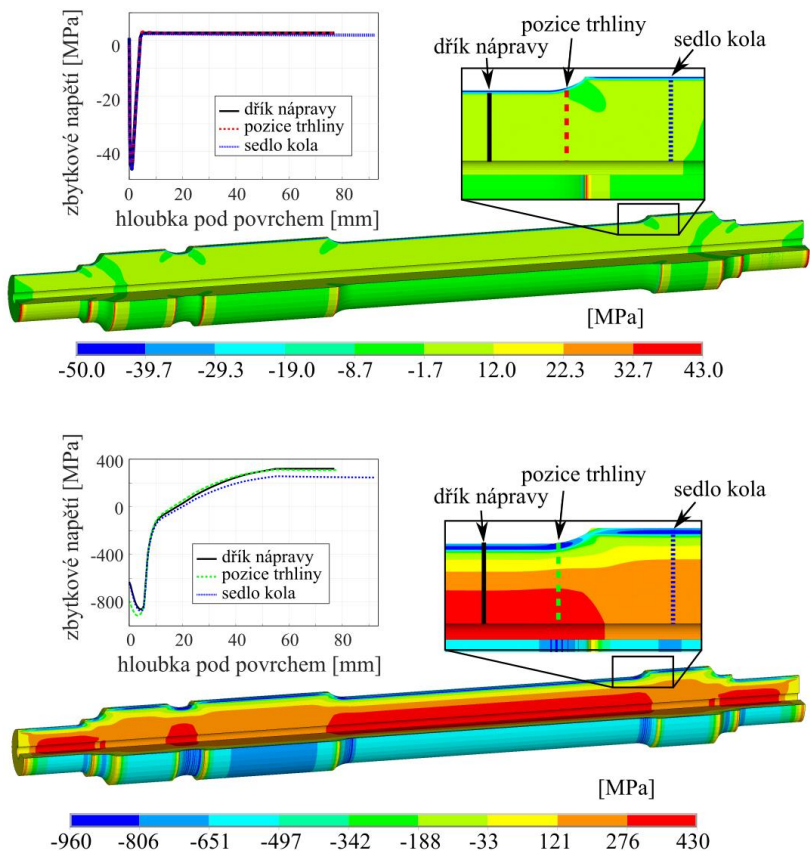


Obr. 24: Hodnoty osového zbytkového napětí po odebrání jednotlivých vrstev materiálu indukčně zakalené nápravy [36]

Obr. 24 ukazuje hodnoty osového napětí na aktuálním povrchu nápravy po odebrání jednotlivých vrstev materiálu (body S_1 až S_5) a přerozdělení osového zatížení po průřezu nápravy po odebrání jednotlivých vrstev materiálu. Na obr. 25 je vidět rozdělení všech složek zbytkového napětí po průřezu nápravy. Jedná se o výsledek iteračního procesu, s cílem stanovit rozdělení zbytkových napětí před odsoustružením jednotlivých vrstev. Vstupem pro numerické simulace byla experimentální data stanovená odvrtávací metodou.



Obr. 25: Výsledné rozložení zbytkových napětí osoustružené nápravy získané iteračně za pomoci několika MKP modelů

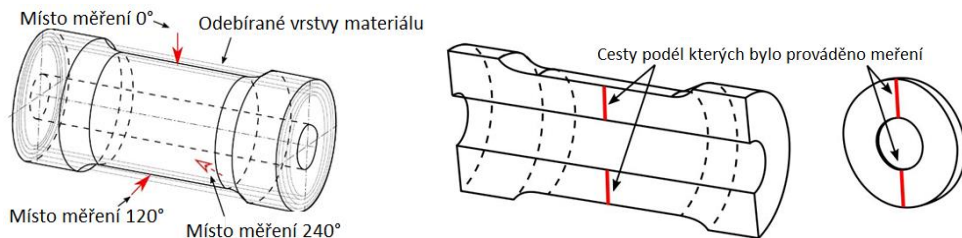


Obr. 26: Rozdělení axiálních zbytkových napětí po průřezu nápravy: standardně kalené (nahore), indukčně kalené (dole)

Na obr. 26 je znázorněno porovnání rozdělení zbytkových napětí standardně kalené a indukčně kalené nápravy. Parametry indukčního kalení byly záměrně zvoleny tak, aby došlo k vyvolání silných tlakových zbytkových napětí (více než 800 MPa) blízko pod povrchem nápravy. Tato napětí „svírají“ případný materiálový defekt nebo vryp na povrchu nápravy a snižují možnost šíření únavové trhliny z takového defektu.

V rámci řešení výzkumných projektů byly patřičně modifikovány a dovyvinuty také další metody pro stanovení velikosti a distribuce zbytkových napětí v rozměrném tělese typu vlakové nápravy, zejména s cílem usnadnit, zrychlit a zefektivnit jejich stanovení. Modifikované postupy, stejně jako jejich aplikace, byly popsány v pracích [37], [38]. Jednalo se o metody založené na kombinaci rentgenové difrakce, dělení/úběru materiálu nápravy a patřičné procedury korekce získaných dat distribuce zbytkových napětí na měřeném povrchu segmentu na jejich původní stav před obráběním nápravy. Proces korekce je založen na iteračních výpočtech MKP modelů rozřezané nápravy či nápravy po provedeném úběru materiálu, viz obr. 27.

Vyvinuté postupy byly aplikovány na stanovení zbytkových napětí na vlakových nápravách ve společnosti BONATRANS GROUP, a.s., přičemž získaná experimentální data byly využita při návrhu nových náprav či úpravě parametrů indukčního kalení.

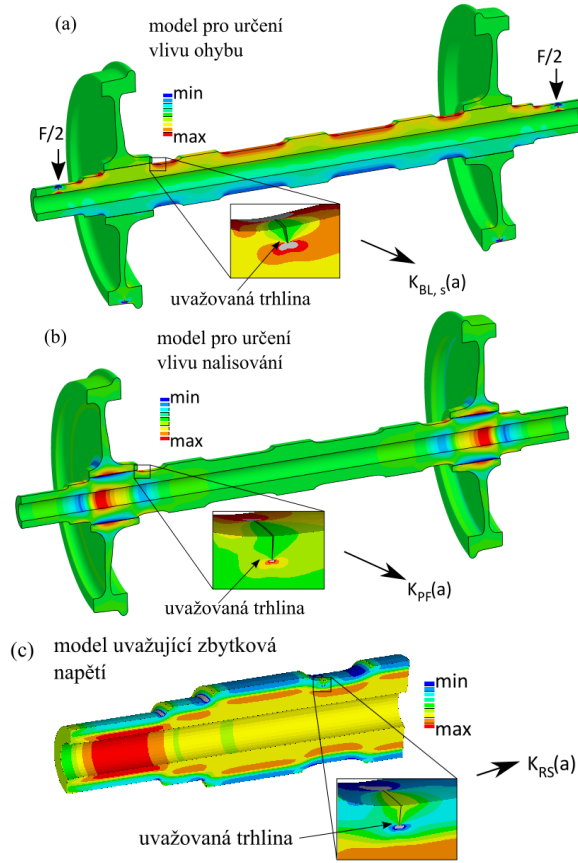


Obr. 27: Další způsoby stanovení zbytkových napětí modifikované pro stanovení zbytkového napětí ve vlakové nápravě: metoda založená na postupném odebírání vrstev materiálu s měřením rentgenovou difrakcí ve třech místech na obvodu nápravy a následnou numerickou korekcí (vlevo), metoda založená na rozříznutí nápravy a vytvoření vhodných segmentů v kombinaci s měřením za pomoci rentgenové difrakce a patřičnou numerickou korekcí experimentálních dat (vpravo)

3.3.2 Stanovení hodnot součinitelů intenzity napětí pro jednotlivé složky zatížení

Celkové zatížení nápravy, v místě předpokládaného vzniku defektu, je dáno jejím ohybem za rotace, který je ovlivněn dynamickými účinky vzniklými nerovnostmi na trati (průjezd zatáčkou, spojení kolejnic, přejezd přes výhybky atd.). Zátěžné spektrum, viz např. [36], ohybového zatížení je třeba stanovit experimentálně a zpracovat (např. pomocí metody *rainflow* [39]) před dalším použitím. Upravená data jsou následně využita v proceduře stanovení zbytkové únavové životnosti.

Další složkou zatížení je statické zatížení od dvojice nalisovaných kol a dříve zmíněné zatížení od zbytkových napětí. Pro každý typ zatížení je v místě předpokládaného defektu provedena tzv. K-kalibrace, tedy stanovení závislosti součinitele intenzity napětí na délce trhliny a . Ukázky výstupů numerických modelů nápravy s trhlinou pro všechna uvažovaná zatížení jsou uvedeny na obr. 28.



Obr. 28: Ukázka výstupů z numerických modelů (zobrazena osová složka napětí) pro výpočet lomových parametrů jednotlivých typů zatížení: a) statické zatížení ohybem, b) od nalisování kol na nápravu, c) zatížením od zbytkových napětí [11]

Pro výpočet zbytkové únavové životnosti je zapotřebí znát minimální K_{min} a maximální K_{max} hodnoty součinitele intenzity napětí v každém cyklu. Při použití LELM je možno využít principu superpozice:

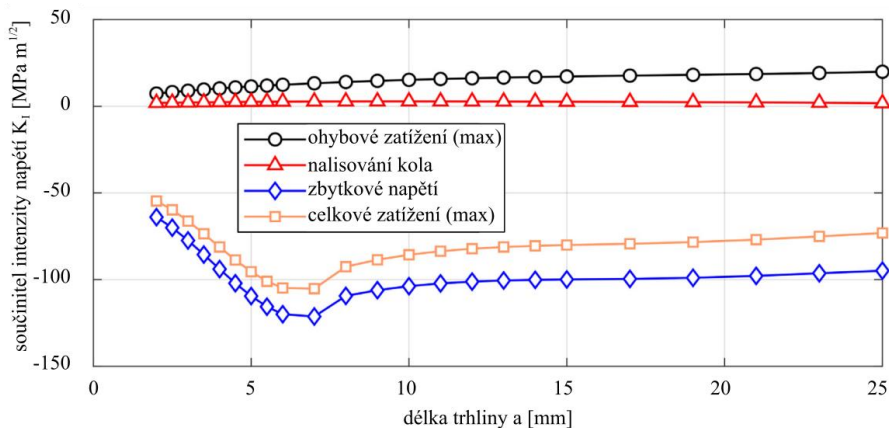
$$K_{min}(a, t) = K_{PF}(a) + K_{RS}(a) - K_{BL}(a, t), \quad (15)$$

$$K_{max}(a, t) = K_{PF}(a) + K_{RS}(a) + K_{BL}(a, t), \quad (16)$$

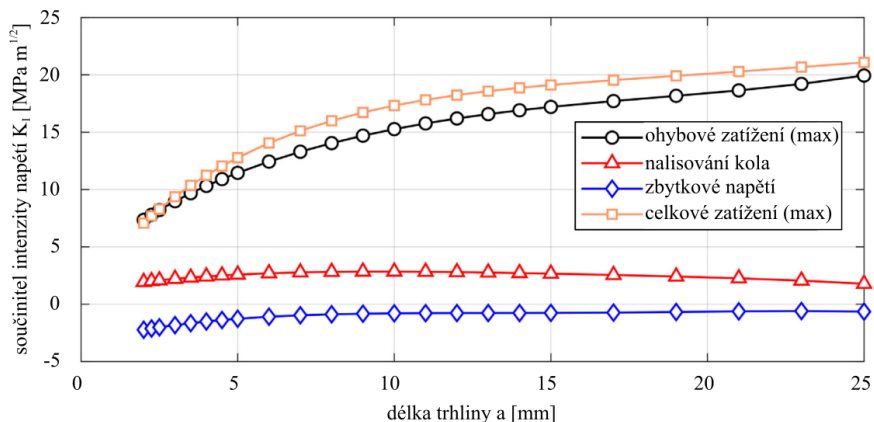
kde $K_{PF}(a)$ je příspěvek zatížení od nalisování kol, $K_{RS}(a)$ představuje vliv zbytkových napětí a $K_{BL}(a, t)$ představuje příspěvek ohybového zatížení uvažovaného zátěžného cyklu. Parametr asymetrie zátěžného cyklu lze s využitím vztahů (15) a (16) stanovit následovně:

$$R(a, t) = \frac{K_{min}(a, t)}{K_{max}(a, t)} = \frac{K_{PF}(a) + K_{RS}(a) - K_{BL}(a, t)}{K_{PF}(a) + K_{RS}(a) + K_{BL}(a, t)}. \quad (17)$$

Výsledky provedené K-kalibrace jsou zobrazeny na obr. 29 pro indukčně kalenou nápravu, a na obr. 30 pro případ klasicky kalené nápravy. Křivka „celkové zatížení (max)“ představuje maximální hodnotu (s uvažováním zátěžného spektra) součinitele intenzity napětí. V případě indukčně kalené nápravy (obr. 29) se tato křivka nachází, pro všechny uvažované délky trhliny, v záporných hodnotách. Tedy trhlina (defekt) je díky silným zbytkovým napětím sevřena a nemůže tak sloužit jako koncentrátor napětí či iniciační místo pro šíření únavové trhliny.



Obr. 29: Velikost součinitele intenzity napětí K_I v závislosti na délce trhliny „a“ pro různé složky zatížení indukčně kalené nápravy



Obr. 30: Velikost součinitele intenzity napětí K_I v závislosti na délce trhliny a pro různé složky zatížení klasicky kalené nápravy

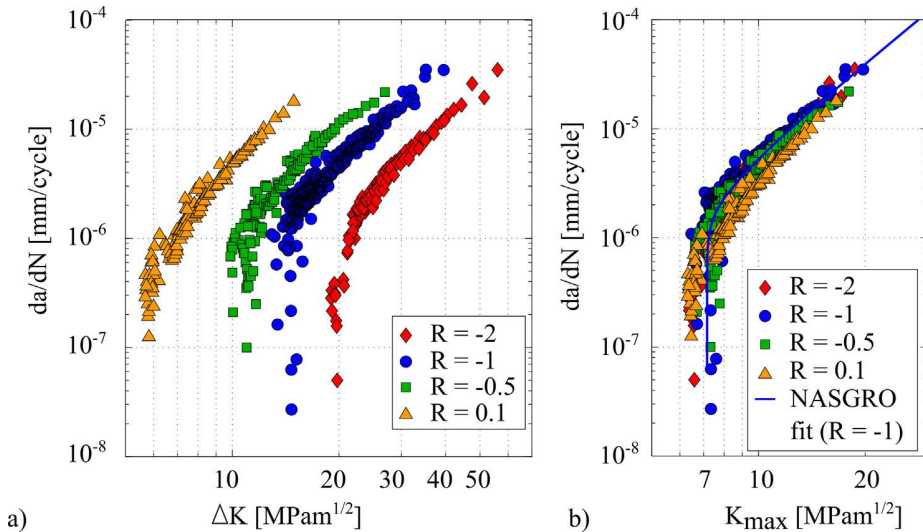
Pro určení zbytkové únavové životnosti je zapotřebí experimentálně stanovit závislost $v-K_I$ pro různé asymetrie cyklu R , viz obr. 31a. Z obrázku je vidět významný vliv R při klasické interpretaci této křivky da/dN versus rozkmit součinitele intenzity napětí ΔK . Na obr. 31b jsou stejná experimentální data uvedena v interpretaci da/dN versus maximální hodnota součinitele intenzity napětí K_{max} . V této interpretaci se dají naměřená data, pro všechny uvažované R , dobře proložit vztahem NASGRO pro $R = -1$ (souměrně střídavý cyklus) ve zjednodušené podobě:

$$v = \frac{da}{dN} = C^*(K_{max})^{n^*} \left(1 - \frac{K_{max,th}}{K_{max}}\right)^{p^*}, \quad (18)$$

kde $K_{max,th}$ je prahová hodnota součinitele intenzity napětí a C^* , n^* a p^* jsou materiálové konstanty získané proložení materiálových dat v obr. 31b výrazem (18). Přírůstek délky trhliny v každém cyklu lze následně stanovit za pomoci následujícího vztahu:

$$\Delta a = C^*(K_{max})^{n^*} \left(1 - \frac{K_{max,th}}{K_{max}}\right)^{p^*} \Delta N. \quad (19)$$

Pro známou konečnou délku trhliny a_f pak můžeme, s využitím vztahu (19), stanovit zbytkovou únavovou životnost nápravy. Ukázka výsledků z takového výpočtu je uvedena v tabulce 4. Zároveň jsou zde uvedena experimentální data získaná při testech v dynamické zkušební společnosti Bonatrans Group, a. s. na nápravách v měřítku 1:1 (viz obr. 32).



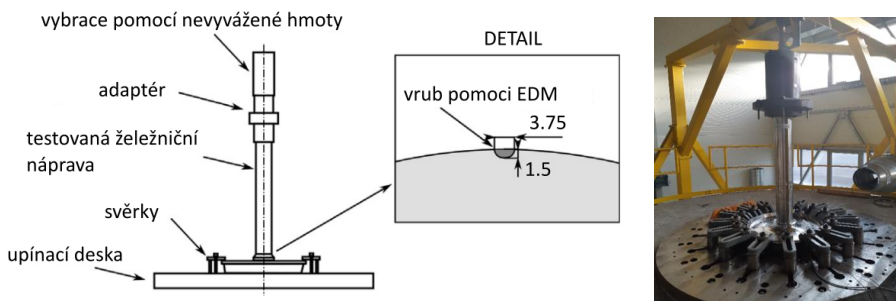
Obr. 31: Experimentálně stanovená rychlost šíření únavové trhliny pro různé parametry asymetrie cyklu R a různé interpretace: a) $da/dN-\Delta K$, b) $da/dN-K_{max}$

Tab. 4: Výsledek experimentálního měření nárůstu délky trhliny z iniciačního vrubu o velikosti a_0 na konečnou délku a_f . Data odpovídají simulaci projezdu přibližně 1,2 mil. km na zkušebním standu (obr. 32). Projezd nápravy je porovnán s numericky odhanutými hodnotami zbytkové únavové životnosti (dle vztahu (19)) s uvážením (sloupec „ZN kalení“) a bez uvážení (sloupec „bez ZN“) zbytkových napětí po klasickém kalení nápravy

náprava číslo	startovací délka trhliny a_0 (mm)	konečná délka trhliny a_f (mm)	experimentální projezd (tis. km)	odhadnutá vzdálenost (ZN kalení) (tis. km)	odhadnutá vzdálenost (bez ZN) (tis. km)
1	2.28	3.05	1 200	185	26
2	2.08	2.70	1 200	497	34
3	2.20	3.00	1 200	217	31

Tab. 4 poukazuje na nutnost zahrnout zbytková napětí do odhadu zbytkové únavové životnosti náprav. Nezahrnutí těchto napětí, při dané aplikaci, znamená řádový rozdíl ve výsledných hodnotách odhadu. Poznamenejme, že v případě indukčně kalených náprav neměla vůbec růst únavová trhlinka z iniciačního vrubu o hloubce v řádu milimetrů, viz data na obr. 29, což bylo experimentálně také ověřeno.

Výše uvedené ukazuje na významný vliv zbytkových napětí na zbytkovou únavovou životnost vlakových náprav. Zbytková napětí mají, při správně zvolených parametrech indukčního kalení, potřebný potenciál zamezit šíření únavových trhlin z povrchových vrypů na nápravě, nebo z materiálových defektů.



Obr. 32: Zkušební únavový stand s nápravou. Vlevo schéma a popis standu s detailem vyjiskřeného iniciačního vrubu v nápravě. Vpravo fotografie únavového standu v dynamické zkušební Bonatrans Group, a.s. umožňující zkoušení náprav v měřítku 1:1

4 ZÁVĚR

Předložené teze ukazují vliv zbytkových napětí na šíření trhlin v tělesech, přičemž je ukázán jejich kladný efekt bránící šíření trhlin v případě využití odpovídajícího technologického postupu, nebo vhodné materiálové kombinace. Představené ukázky využívají postupů lineární elastické lomové mechaniky a numerického modelování za pomoci metody konečných prvků. Teze jsou založeny na poznatcích získaných v rámci řešení výzkumných projektů autora č. KJB200410803 *Zobecnění lineární elastické lomové mechaniky na problémy šíření trhlin v nehomogenních materiálech* (1/2008-12/2010, GA AV), č. GA15-09347S *Role reziduálních napětí v životnosti keramických kompozitů* (1/2015-12/2017, GA ČR) a č. FV40034 *Vývoj nového designu železničních náprav s vysokou provozní spolehlivostí* (1/2019-6/2022, MPO) řešených v rámci skupiny Vysokocyklové únavy Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i.

V představených výsledcích byla ukázána role zbytkových napětí v případě zhouževnatění keramických laminátů, kde se podílejí na velikosti tzv. zdánlivé lomové houževnatosti keramického kompozitu. Byl zde ukázán a vysvětlen mechanismus, jež vede k navýšení množství mechanické energie potřebné k porušení vhodně navrženého keramického laminátu.

Významnou roli hrají zbytková napětí také v případě tzv. podkritického šíření trhliny v částicových keramických kompozitech se skleněnou maticí využívaných v elektrotechnice. Zde mohou částice a vzniklá zbytková napětí omezit možnost poškození kompozitu např. vlivem vlhkosti prostředí, kde s vyšší relativní vlhkostí dochází ke značnému nárůstu rychlosti šíření trhliny. Představené postupy lze využít pro odhad zbytkové životnosti kompozitu nebo pro jeho optimalizaci s ohledem na šíření trhlin z defektů.

Poslední ukázka směřovala do oblasti únavového poškození vlakové nápravy. Zde uvažovaná zbytková napětí byla vyvolána fázovou přeměnou materiálu během procesu kalení. Byl ukázán možný postup jejich stanovení ve vlakové nápravě, a změna jejich velikosti po průřezu nápravy. Velikost tlakových zbytkových napětí v blízkosti povrchu indukčně zakalené nápravy se může pohybovat v řádu stovek megapascalů. Vhodnou volbou technologických parametrů tak lze docílit stavu, kdy tlaková zbytková napětí neumožní šíření trhliny z povrchového vrubu nebo defektu. Tento efekt je například využit v praxi pro prodloužení délky servisních intervalů náprav, při současném zachování či navýšení jejich provozní bezpečnosti.

Zmíněný způsob stanovení zbytkových napětí je jedním ze způsobů jejich stanovení na rozměrném tělese typu vlakové nápravy. V rámci prováděného výzkumu byly vyvinuty další metody stanovení zbytkových napětí, viz například práce [37], [38]. Zbytkovou únavovou životnost vlakových náprav ovlivňují také další fenomény, které byly či jsou zájmem autora studia, viz např. práce [40], [41].

5 VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ V PEDAGOGICKÉ PRAXI

V tezích uvedené, stejně jako další autorovy odborné výstupy, jsou průběžně uplatňovány v pedagogické praxi. Na získaných výsledcích spolupracovala řada studentů magisterského a doktorského studia, a to zejména oboru Aplikovaná mechanika FSI VUT v Brně. Tito studenti vypracovávali své diplomové nebo dizertační práce pod vedením autora na pracovišti ÚFM AV ČR, ve spolupráci s FSI VUT v Brně či CEITEC VUT, a zapojovali se také do řešení výzkumných projektů. Tato dlouhodobá úspěšná spolupráce bude také v budoucnu pokračovat.

Nové poznatky z oblasti lomové mechaniky a únavy materiálu byly či jsou průběžně zařazovány také do kurzů vyučovaných na FSI VUT v Brně (*Únava a lomová mechanika* v rámci magisterského studia) či CEITEC VUT (*Pokročilá lomová mechanika* v doktorském studijním programu), přičemž i tato spolupráce bude dále rozvíjena. Do dlouhodobé spolupráce s FSI VUT v Brně jsou zapojováni také mladší kolegové ze skupiny Vysokocyklové únavy, kteří se podílejí na výuce v rámci ÚMTMB FSI VUT v Brně či na vedení závěrečných prací studentů.

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Anderson, T. L.: Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th ed. 2017.
- [2] Murakami, Y. a kol.: Stress intensity factors handbook, Pergamon Press, 1986.
- [3] Tada, H., Paris, P. C., Irwin, G. R.: Stress analysis of cracks handbook, ASME Press, 2000.
- [4] Kunz, J.: Základy lineární a nelineární lomové mechaniky pro inženýrskou praxi, ČVUT Praha, 2020.
- [5] Sih, G. C.: A special theory of crack propagation. Mechanics of fracture, Noordhoff International Publishing, Leyden, 1973.
- [6] Erdogan, F., Sih, G.C.: On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. Journal of Basic Engineering 85, s. 519-525, 1963.
- [7] <https://www.swri.org/consortia/nasgro>
- [8] Newman, J.C.: A crack opening stress equation for fatigue crack growth. International Journal of Fracture 24, s. 131-135, 1984.
- [9] Kandil, F. A., Lord, J. D., Fry, A. T. a Grant, P. V.: A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection, NPL Report MATC(A)O4, 2001.

- [10] Withers, P.J., a Bhadeshia, H. K. D. H.: Residual stress. Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, vol. 17, no. 4, s. 355–365, 2001.
- [11] Dlhý, P.: Residual lifetime of parts with residual stress. Dizertační práce CEITEC VUT, školitel L. Náhlík, 2022.
- [12] Náhlík, L., Šestáková, L., Hutař, P.: Estimation of apparent fracture toughness of ceramic laminates. *Computational Materials Science*, Vol. 45, s. 653–657, 2009.
- [13] Bermejo, R., Sánchez-Herencia, A.J., Llanes, L., Baudín, C.: High-temperature mechanical behaviour of flaw tolerant alumina-zirconia multilayered ceramics. *Acta Materialia* 55, s. 4891–4901, 2007.
- [14] Hadraba, H., Klimeš, J., Máca, K.: Crack propagation in layered $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ composites prepared by electrophoretic deposition. *Journal of Materials Science* 42, s. 6404–6411, 2007.
- [15] Hadraba, H., Máca, K., Cihlár, J.: Electrophoretic deposition of alumina and zirconia: II. Two-component systems. *Ceramics International* 30, s. 853–863, 2004.
- [16] Bueno, S., Baudín, C.: Layered materials with high strength and flaw tolerance based on alumina and aluminium titanate. *Journal of European Ceramic Society* 27, s. 1455–1462, 2007.
- [17] Náhlík, L., Šestáková, L., Hutař, P., Bermejo, R.: Prediction of crack propagation in layered ceramics with strong interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, s. 2192–2199, 2010.
- [18] Oel, H.J., Fréchette, V.D.: Stress distribution in multiphase systems. Part I. Composites with planar interfaces. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 50, s. 542–549, 1967.
- [19] Šestáková, L.: Hodnocení stability obecných koncentrátorů napětí ve vrstevnatých materiálech. Dizertační práce FSI VUT v Brně, školitel Z. Knésl, 2009.
- [20] Knésl, Z., Náhlík, L., Radon, J.C.: Influence of interface on fatigue threshold values in elastic bimaterials. *Computational Materials Science* 28, s. 620–627, 2003.
- [21] Náhlík, L.: Zobecnění lineární lomové mechaniky na případ trhliny šířící se přes rozhraní dvou materiálů. Habilitační práce FSI VUT v Brně, 2008.
- [22] Knésl, Z., Klusák, J., Náhlík, L.: CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS Part I: A Universal Assessment of Singular Stress Concentrations. *Engineering MECHANICS*, Vol.14, No. 6, s. 399–408, 2007.
- [23] Klusák, J., Knésl, Z., Náhlík, L.: CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS Part II: Stability of Sharp and Bi-Material Notches. *Engineering MECHANICS*, Vol.14, No. 6, s. 409–422, 2007.
- [24] Náhlík, L., Knésl, Z., Klusák, J.: CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS Part III: An application to a crack touching a bimaterial interface. *Engineering MECHANICS*, Vol.15, No. 2, s. 99–114, 2008.
- [25] Knésl Z., Náhlík, L., Bareš, P.: CRACK INITIATION CRITERIA FOR SINGULAR STRESS CONCENTRATIONS Part IV: Applications To Fracture Of Coated Structures. *Engineering MECHANICS*, Vol.15, No. 4, s. 263–270, 2008.
- [26] Bermejo, R., Torres, Y., Sánchez-Herencia, A.J., Baudín, C., Anglada, M., Llanes, L.: Residual stresses, strength and toughness of laminates with different layer thickness ratios. *Acta Materialia*, Vol. 54, s. 4745–4757, 2006.
- [27] Náhlík, L., Štegnerová, K., Máša, B., Hutař, P.: A failure scenario of ceramic laminates with strong interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 167, s. 56–67, 2016.
- [28] Holand, W., Beall, G.H.: *Glass-Ceramic Technology*, 1st ed. American Ceramic Society/Wiley, New York, 2002.
- [29] Imanaka, Y.: *Multilayered low temperature cofired ceramics (LTCC) technology*. Springer, New York, s. 229, 2005.
- [30] Ewsuk, K.G.: Ceramic-filled-glass composite sintering. *Ceramic Transaction*, Vol. 15, s. 279–295, 1990.

- [31] Wiederhorn, S.M.: Subcritical crack growth in ceramics. Fracture mechanics of ceramics, Vol. 2, s. 613-646, 1974.
- [32] Munz, D., Fett, T.: Ceramics: Mechanical Properties, Failure Behaviour, Materials Selection, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [33] Náhlík, L., Majer, Z., Štegnerová, K., Hutař, P.: Lifetime assessment of particulate ceramic composite with residual stresses. Key Engineering Materials, Vol. 754, s. 107-110, 2017.
- [34] Štegnerová, K., Majer, Z., Hutař, P., Náhlík, L.: 3D model of crack propagation in particulate ceramic composite containing residual stresses. Key Engineering Materials, Vol. 754, s. 103-106, 2017.
- [35] Hutař, P., Pokorný, P., Poduška, J., Fajkoš, R., Náhlík, L.: Effect of residual stresses on the fatigue lifetime of railway axle. Procedia Structural Integrity 4, 42-47, 2017.
- [36] Pokorný P., Dlhý, P., Poduška, J., Fajkoš, R. Vojtek, T., Náhlík, L., Grasso, M., Hutař, P.: Influence of heat treatment-induced residual stress on residual fatigue life of railway axles. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 109, článek č. 102732, 2020.
- [37] Dlhý, P., Poduška, J., Pokorný, P., Jambor, M., Náhlík, L., Kajánek, D., Fajkoš, R., Hutař, P.: Estimation of residual stress distribution in railway axles. Engineering failure analysis, vol. 135, článek č. 106142, 2022.
- [38] Dlhý, P., Poduška, J., Pokorný, P., Jambor, M., Náhlík, L., Hutař, P.: Residual stress determination by the layer removal and X-ray diffraction measurement – correction method. MethodsX, vol. 9, článek č. 101768, 2022.
- [39] Endo, T., Mitsunaga, K., Takahashi, K., Kobayashi, K., Matsuishi, M.: Damage evaluation of metals for random or varying loading—three aspects of rain flow method. Mechanical Behavior of Materials. 1. vydání, ed. Norman E. Dowling, s. 371–380, 1974.
- [40] Vojtek, T., Pokorný, P., Kuběna, I., Náhlík, L., Fajkoš, R., Hutař, P.: Quantitative dependence of oxide-induced crack closure on air humidity for railway axle steel. International journal of fatigue, vol. 123, 213-224, 2019.
- [41] Pokorný, P., Vojtek, T., Náhlík, L., Hutař, P.: Crack closure in near-threshold fatigue crack propagation in railway axle steel EA4T. Engineering fracture mechanics, vol. 185, 2-19, 2017.

Poděkování

Rád bych poděkoval kolegyním, kolegům a studentům působícím na Ústavu fyziky materiálů AV ČR, v. v. i., bez jejichž dlouhodobé spolupráce, pracovního nasazení a podpory, by se nedaly realizovat výzkumné aktivity, ani nemohly vzniknout výstupy uvedené v těchto tezích. Zvláštní poděkování patří doc. Ing. Pavlu Hutařovi, Ph.D., který dlouhodobě obětavě vytváří skvělé výzkumné zázemí ve skupině Vysokocyklové únavy.

ABSTRAKT

Tato práce poukazuje na část výzkumu autora, který je primárně orientován na stanovení životnosti těles či materiálů s defekty, a ukazuje jakou pozitivní roli mohou sehrát zbytková napětí při zvyšování odolnosti materiálů či těles proti šíření (únavových) trhlin. Byť se v práci jedná o naprosto rozdílné materiály, keramické kompozity či oceli, a významně se také liší v oblasti své průmyslové aplikace, mají uvedené příklady společné to, že dominantním faktorem určujícím odolnost vůči šíření trhlin není jejich vlastní „materiálová“ odolnost, ale velikost přítomných zbytkových napětí, vzniklých během procesu jejich tvorby či při tepelném zpracování. Zbytková napětí v uvedených případech tvoří dominantní složku zatížení těles, a bez znalosti jejich velikosti a rozdělení nelze korektně predikovat jejich chování.

Práce ukazuje, jak lze vhodným způsobem zmíněného fenoménu využít v případě keramických laminátů, částicových kompozitů se skleněnou maticí či v případě zvýšení únavové odolnosti vlakových náprav. V posledním jmenovaném případě je navíc poukázáno na problematiku stanovení velikosti a rozdělení zbytkových napětí v rozměrných tělesech, kde nelze přímo použít některou z existujících experimentálních technik. Je ukázán postup kombinující experimentální měření s náročnými numerickými výpočty pro získání představy o rozdělení a velikosti zbytkových napětí ve studovaném tělese.

ABSTRACT

This paper highlights a part of the author's research, which is primarily oriented towards the determination of the durability of bodies or materials with defects and shows the positive role that residual stresses can play in increasing the resistance of materials or bodies against (fatigue) crack propagation. Although the materials involved in the work are quite different, ceramic composites or steels, and differ significantly in their industrial application, the examples given have in common that the dominant factor determining the resistance to crack propagation is not their own "material" resistance, but the magnitude of the residual stresses present, developed during their manufacturing process or during a heat treatment. In these cases, the residual stresses are the dominant component of the load of the bodies and without knowledge of their magnitude and distribution it is not possible to predict their behaviour correctly.

This paper shows how this phenomenon can be used in a suitable way in the case of ceramic laminates, glass matrix particulate composites or in the case of increasing the fatigue resistance of train axles. Moreover, in the latter case, the problem of determining the magnitude and distribution of residual stresses in dimensional solids, where some of the existing experimental techniques cannot be used, is highlighted. A procedure combining experimental measurements with sophisticated numerical calculations is shown to obtain an idea of the distribution and magnitude of residual stresses in the investigated body.