

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV materiálového inženýrství

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Degradační chování vybraných plastů kompozitů z
hlediska lomové mechaniky

Ing. Vladimír Mára

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Materiálové inženýrství

Školitel: prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

srpen 2021

Název anglicky: Degradation behavior of selected polymers and composites in terms of fracture mechanics

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu Materiálového inženýrství Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Vladimír Mára

Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Karlovo náměstí 13, 120 00, Praha 2

Školitel: prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Karlovo náměstí 13, 120 00, Praha 2

Školitel-specialista: Ing. Taťána Vacková, Ph.D.

Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Karlovo náměstí 13, 120 00, Praha 2

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti Ústavu materiálového inženýrství, Karlovo náměstí 13, 120 00, Praha 2

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Materiálové inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

předseda oborové rady oboru Materiálové inženýrství

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1. Současný stav problematiky.....	6
1.1 Úvod.....	6
1.2 Degradace kompozitních materiálů.....	6
2. Cíle disertační práce.....	8
3. Metody zpracování.....	9
4. Výsledky.....	12
4.1 Kontrola zkušebních těles.....	12
4.2 Plná a OH tělesa ve výchozím stavu.....	13
4.2.1 Fraktografická analýza výchozího stavu.....	15
4.2.2 Diagnostika výchozího stavu akustickou emisí.....	17
4.3 Zátěžný cyklus OH těles.....	19
4.3.1 Fraktografická analýza zátěžového cyklu.....	19
4.3.2 Diagnostika zátěžného cyklu akustickou emisí.....	20
4.4.1 Fraktografická analýza enviromentálního vlivu.....	22
4.4.2 Diagnostika hydrotermálního vlivu akustickou emisí.....	24
4.4.3 Degradace matrice.....	25
5. Závěry.....	26
Perspektiva pro další výzkum.....	28
Publikace související s tématem disertační práce.....	29
Tematické publikace v databázích WOS a SCOPUS.....	29
Tematické publikace v jiných databázích.....	29
Literatura.....	30
Anotace.....	34
Summary.....	34

1. Současný stav problematiky

1.1 Úvod

Kompozitní materiály jsou pro letectví vyráběny na základě norem o letové způsobilosti, tzv. leteckých předpisech. Jsou zde uvedeny hlavní požadavky na letovou bezpečnost a jsou také základem pro vývoj nových letadel, součástí, zařízení a leteckých materiálů. V souladu s normami musí konstruktér stanovit předpokládané provozní podmínky letadla společně s jeho letovými parametry, na jejichž základě se určují limitní provozní podmínky společně letovými charakteristikami, ovladatelností a charakteristikami stability. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou v tomto ohledu pevnost a únava [1]. Pevnostní požadavky stanovují dle norem mezní podmínky, které určují pevnost draku letadla a jeho součástí. Již od počátku hraje bezpečnost v komerčním letectví klíčovou roli. Pro její dodržení se při návrhu konstrukcí vychází z tzv. přípustných vlastností materiálu, které se berou v úvahu pro namáhání navrhované součásti. Jsou odvozeny z vlastností kompozitního materiálu, které zohledňují nejhorší možné podmínky, se kterými může přijít do styku. Mezi tyto podmínky patří nízké a vysoké teploty, vliv vlhkosti a agresivních kapalin, případně jejich kombinované působení. Podmínky také pokrývají materiálové údaje polotovaru, které stanovují limitními tolerance. Použití vláknového kompozitního materiálu je pak stanoveno na základě jeho pevnostních a tuhostních charakteristik za výše zmíněných podmínek, ke kterým se dále řadí rázové a vrubové vlivy. Obzvláště přítomnost vrubu, např. ve formě spojovacího otvoru pro nýt, je kritickým faktorem, kdy pevnost kompozitu může být významně snížena.

1.2 Degradace kompozitních materiálů

Degradací materiálů se rozumí procesy, které vedou k postupným a trvalým zhoršení materiálových vlastností. Zhoršení vlastností má za následek snížení celkové životnosti a spolehlivosti součásti či konstrukce. Ke zhoršení, resp. degradaci vlastností součásti může dojít již při samotném procesu výroby nebo v rámci provozní činnosti. Kompozitní materiály mají v porovnání s kovovými materiály některé degradační procesy společné (např. creep nebo únava), ale ve většině případů se ale u kompozitů vyskytují zcela jiné druhy. Označují se jako procesy stárnutí a lze je rozdělit na chemické, fyzikální a mechanické. [2, 3] U kompozitů na bázi epoxidových pryskyřic se setkáváme v rámci degradačních procesů s vlivy okolního prostředí (vlhkost, teplota, UV záření), které jsou doprovázené chemickými změnami (hydrolyzou) a také s degradací vyvolanou mechanickým zatížením. [4–8]

Při provozu letecké techniky je kompozitní materiál vystaven vlivu degradace viditelným UV zářením, která způsobuje rozrušení kovalentních vazeb polymerů. V povrchové vrstvě dochází ke změnám barvy a jejímu zkřehnutí. [8] Dlouhodobé působení záření způsobuje dodatečné vytvrzení matrice a mírný nárůst pevnosti, ale následně vlivem degradace povrchu dochází k poklesu pevnosti, vzniku povrchových trhlin a poklesu drsnosti povrchu. [9, 10] Dalším negativním účinkem je vliv vlhkosti, která je v polymerních kompozitech neprospěšná v jakékoliv formě. [11] Nejvíce zasaženou složkou je obvykle matrice a fázové rozhraní vlákno/matrice [12, 13]. Na degradaci fázového rozhraní má vliv i typ vlhkosti, kdy slaná voda má větší degradační účinek, než standardní voda. [14] Pokud je materiál vystaven jejímu krátkodobému působení, nedojde k absorpci velkého množství. [14] Všechny polymerní matrice v závislosti na polaritě absorbují vlhkost, ale liší se od sebe množstvím, které jsou schopny absorbovat a dopadem, jakou vlhkost má na jejich vlastnosti. [18, 19] Voda je v matrici absorbována buď formou molekulárního roztoku, kdy se vodík váže na polární skupiny v molekule a nebo se vlhkost omezuje na volný objem ve formě děr a mikroutin. Důsledkem je u epoxidových pryskyřic pokles teploty skelného přechodu vlivem její plastifikace a pokles Van der Waalsových vazeb mezi řetězci, což vede ke ztrátě její tuhosti a k celkovému poklesu pevnosti kompozitu [14].

Pro bezpečný návrh leteckých konstrukcí a součástí jsou používány materiálové vlastnosti odvozeny od vlastností laminátu, u kterého se bere v úvahu jeho provoz při nejhorsích možných podmínkách. Mezi tyto podmínky patří i nízké a vysoké teploty (+80 až -55°C). [16, 17] Samotné nízké teploty mají vliv na nárůst pevnosti v tahu, k čemuž dochází vlivem zpevnění matrice. [18] Mezifázová rozhraní indukují zbytková pnutí, která způsobují vznik mikroskopických trhlin na rozhraní, které koalescencí tvoří makrotrhliny, což vede k oddělování vláken od matrice. [19] Dále klesá hodnota interlaminární smykové pevnosti vlivem zpevňující se matrice a klesá i odolnost proti nárazu (impaktu). [20] Z časového hlediska nemá krátkodobé vystavení nízkým teplotám zásadní vliv na pevnost [21] a to samé platí i v případě zvýšených teplot. [22] Pevnost a tuhost výrazně klesá až s dosažením teploty skelného přechodu matrice. [7] Dlouhodobou expozicí dochází k dotvrzení matrice, jejímu zkřehnutí a štěpení makromolekulárních řetězců. Matrice degraduje ve formě úbytku hmotnosti, který narůstá s teplotou. Tyto změny zřetelně ovlivňují vlastnosti kompozitu, kdy např. štěpení má za následek pokles T_g a zkřehnutí matrice snižuje pevnost mezifázového rozhraní vlákno/matrice. [23]

V případě, že se k vlhkosti přidá vliv teploty (nízké či vysoké), dochází k tzv. hydrotermálnímu účinku, který má za následek agresivní degradaci mechanických vlastností a to obzvláště u kompozitů s polymerní matricí. Hydrotermální síly společně se zbytkovým pnutím mohou být dostatečně velké na to, aby zapříčinily porušení laminátového kompozitu. [24] Dopad na vlastnosti polymerního kompozitu lze rozdělit na dvě části: pokles teploty skelného přechodu matrice a vznik napětí vlivem hydrotermální expanze, což má výrazný dopad na procesy porušování a změny vlastností. [14] Při zvýšených teplotách dochází v uhlíkovém kompozitu k nárůstu výskytu laterálních trhlin a také k jejich šíření na delší vzdálenosti, než je tomu za běžných podmínek. [25] Dále dochází k degradaci matrice, mezifázových vazeb a změně v lomovém chování. [15, 26] Tlak vznikajících par vytváří trhliny v matrici, které indukují rozsáhlé delaminace. [27] S nárůstem teploty klesá tuhost kompozitu vlivem oddělování vláken od matrice, pokles interlaminární smykové pevnosti a lomové houževnatosti [25, 28].

Největší vliv na vlastnosti, provozuschopnost a celkovou životnost mají dva faktory a to vlhkost a zvýšená teplota. Tento hydrotermální účinek je v současné době považován jako nejnebezpečnější provozní prostředí. Méně pozornosti je věnováno nízkým teplotám, které mají nezanedbatelný dopad na materiálové vlastnosti. O hydrotermálním účinku vlhkosti a nízkých teplot existuje v současné době velmi málo informací. V případě sklem vyztužených kompozitů dochází k poklesu vlastností se zvyšujícím se expozičním časem, ale v případě uhlíkových vláken nejsou dostupné zdroje, které by se této problematice věnovaly. [29]

2. Cíle disertační práce

V případě kombinace vlhkosti a nízkých teplot mohou mít změny mechanických vlastností, lomového chování či fázových přeměn potenciálně větší vliv na mezní stav materiálu, než je tomu v případě hydrotermálního vlivu za zvýšených teplot. Výzkum tak může přinést cenné informace pro letecký průmysl, kde se kompozitní materiály stávají čím dál tím více dominantnějším materiálem. Pro studium synergického účinku vlhkosti a nízkých teplot na polymerní kompozitní materiál vyztužený uhlíkovými vlákny byly autorem vytyčeny následující cíle práce:

- 1) Za teploty pod bodem mrazu vystavit mechanickému namáhání uhlíkové kompozitní skladby s absorbovanou vlhkostí a popsat degradaci jejich vlastností. Kombinace těchto podmínek nebyla dosud v rámci vláknových kompozitů hodnocena.

- 2) Stanovit vliv vlhkosti a teploty pod bodem mrazu na potenciální změny v procesech porušování a lomovém chování kompozitních skladeb.
- 3) Analyzovat možnost využití akustické emise pro monitorování průběhu zatěžování kompozitních skladeb vystavených účinku hydrotermální expozice. V těchto podmínkách nebyla metoda akustické emise dosud použita.

3. Metody zpracování

Pro účely studia hydrotermálního vlivu byl vybrán dlouho-vláknový uhlíkem vyztužený kompozit s reaktoplastickou maticí Hexcel HexPly 8552. Jedná se o vysoce houževnatou aminovou pryskyřici, která je vyztužena AS4 12K uhlíkovými vlákny na bázi PAN. Výsledný laminát byl vyroben ve dvou variantách o rozdílném počtu jednotlivých vrstev: laminát 181 o tloušťce 2,97 mm s uložením vrstev [45, -45, 0, 45, 45, -45, -45, 90, 90, -45, -45, 45, 45, 0, -45, 45] a laminát 361 o tloušťce 6,32 mm s uložením vrstev [45, 0, -45, 0, -45, 45, 0, -45, 90, 45, 45, 90, -45, 0, 0, -45, 45, 45, -45, 0, 0, -45, 90, 45, 45, 90, -45, 0, 45, -45, 0, -45, 0, 45]. Důvodem této volby je jeho použití na konstrukční prvky v leteckém průmyslu. Jedná se o součásti, které jsou mechanicky namáhané a současně jsou v průběhu provozu vystavené enviromentálním vlivům. Na základě literární rešerše byly zvoleny enviromentální podmínky, kterým bude kompozitní materiál vystaven, a to ve formě vlhkosti a nízkých teplot. Pro praktický dopad degradačního účinku byl přidán další faktor - vliv koncentrátoru napětí ve formě otvoru. Využití otvorů je v letectví široké a jedná se tak o integrální součást konstrukcí. Jejich přítomnost v konstrukci vytváří vrubový účinek, kdy na jeho okraji dochází ke kumulaci napětí, což má výrazný vliv na snížení pevnostních vlastností. Hydrotermální působení může toto místo a jeho okolí ještě více oslabit a potenciální degradace tak může zapříčinit předčasné katastrofické selhání konstrukce. Pro zjištění vlastností a chování materiálu ve výchozím stavu byla vyrobena tahová zkušební tělesa opatřená příložkami dle standardu ASTM D3039 [30, 31] o rozměrech 25×2,97×325 mm a 25×6,32×325 mm pro skladbu 181 a 361. Ze zkoušky byla vyhodnocena mez pevnosti R_m , mez kluzu R_e , Poissonovo číslo μ a modul pružnosti v tahu E . V další fázi byl teoreticky hodnocen vliv otvoru na pevnostní vlastnosti kompozitu. Pro získání základních informací o chování materiálu s otvorem při jednoosém tahu byly výsledné hodnoty plných těles (R_m , R_e , E , μ) použity jako vstupní data pro numerickou simulaci metodou konečných prvků (MKP), která byla provedena v parametrickém modeláři Solid Edge ST10. V programu byl vytvořen model tzv. Open-Hole (OH) zkušebního tělesa s

kruhovým otvorem uprostřed dle ASTM D5766 [32]. Na modelu byla vytvořena síť s velikostí elementu $n = 2,85$ mm. OH těleso bylo modelováno jako jednoduší kompaktní materiál, kdy nebyla uvažována jak skladba laminátu tak ani jeho jednotlivé vrstvy či jejich orientace. Provedená lineární statická analýza simuluje jednoosý tah s hlavním napětím ve směru uložení $[0^\circ]$ vrstev. Pro praktické posouzení vlivu otvoru byla na základě standardu ASTM D5766 [32] vyrobena OH zkušební tělesa pro zkoušku tahem o rozměrech $38,1 \times 2,97 \times 325$ mm a $38,1 \times 6,32 \times 325$ mm pro skladbu 181 a 361. Pro obě skladby byla vyrobena sada zkušebních těles s kruhovým otvorem s odstupňovanými průměry 4, 6 a 8 mm. Výsledné pevnostní hodnoty OH těles byly následně porovnány s teoretickými hodnotami vypočtenými pomocí lomových kritérií dle *Whitneyho* a *Nuismera*.

Pro absorbování vlhkosti za monitorovaných podmínek byla sada OH zkušebních těles umístěna do klimatické komory Mercier CLIMACELL, kde byla vystavena působení relativní vlhkosti 85 % a teplotě 70°C . Měření množství vlhkosti bylo provedeno dle standardu ASTM D5229 [33]. Množství vlhkosti bylo stanoveno na základě měření změny hmotnosti pomocí analytických vah KERN ABT 120-4M (přesnost 0,1 mg). Pro tento účel byly pro obě skladby vyrobeny tzv. travel vzorky o rozměrech 50×50 mm. Absorpce vlhkosti byla sledována na základě procentuální změny vlhkosti ΔM a změny hmotnosti. Z výsledných absorpčních křivek bylo určeno maximální množství absorbované vlhkosti M_{max} a čas potřebný pro saturaci vlhkostí. Dále byla určena difuzivita vlhkosti D_z a průběh absorpčních křivek byl porovnáván s Fickovým teoretickým modelem. Dopad hydrotermálního vlivu byl posuzován na základě změn mechanických vlastností, které byly měřeny pomocí zkoušky jednoosým tahem. Pro tento účel byl vytvořen zátěžový cyklus, který zjednodušeně imituje namáhání konstrukční součásti za jejího provozu. Konstrukce vychází ze standardu ISO 18249 [34]. Cyklus se skládá ze zatížení tělesa na určitou procentuální hodnotu z maximální dosažené pevnosti ve výchozím stavu, výdrž na této hodnotě po dobu 300 s a poté odlehčení na nulovou hodnotu. Následuje opakované zatížení, kdy se maximální hodnota zatěžující síly navyšuje o 20 %. Zatěžování a odlehčování probíhalo rychlostí $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ s prodlevou 10 s mezi jednotlivými cykly. Hydrotermálního vlivu bylo dosaženo umístěním environmentální komory WEISS ENET do pracovního prostoru zkušebního zařízení. S ohledem na reálný provoz leteckých materiálů byly zkoušky provedeny za teplot -55°C . Čas potřebný pro temperování těles byl určen na základě teoretického výpočtu dle Kutateladzeho [35].

Pro posouzení environmentálního vlivu na procesy porušování byla všechna zatěžování materiálu monitorována pomocí akustické emise s využitím

univerzálního diagnostického systému DAKEL-XEDO. Na povrchy zkušebních těles byly ve dvojicích umístěny piezoelektrické snímače IDK-09 PZT třídy 200. Výsledná data z mechanických zkoušek byla následně korelována s AE daty. Každý snímač byl opatřen předzesilovačem o zesílení 35 dB. Snímače byly fixovány cyanoakrylátovým lepidlem AXIA R21 MP2. Pro vyhodnocení dat byla použita vždy pouze jedna dvojice snímačů, kdy druhá plní záložní roli, aby se předešlo případné ztrátě dat vinou např. poruchy funkce jednoho ze snímačů, či ztrátě akustické vazby mezi povrchem a snímačem. Na základě literární rešerše byl naměřený signál AE analyzován na základě následujících metod:

1. Hodnocení parametrů AE (průměrné a kumulativní hodnoty)
2. Statistická nehierarchická metoda K-means
3. Spektrální analýza vlnového záznamu
4. Lokalizace zdrojů emisních událostí AE

Pro hodnocení procesů porušování byly použity následující **parametry AE**: emisní události, překmity (množství signálu, které překročí prahovou hodnotu), průměrná frekvence překmitů, amplituda signálu, délka trvání emisní události a doba jejího náběhu. Opakovaným zatížením materiálu se v rámci AE předpokládá existence Kaiserova a případně Felicity jevu. Kaiserův jev vzniká detekcí AE při prvním zátěžném cyklu a po odlehčení dochází znovu k detekci až po překročení předchozí maximální zátěže. Tento jev obecně platí pro všechny kovové materiály, ale u ostatních typů materiálu může být jeho existence pouze částečná. Po opakovaném zatížení může docházet k tzv. Felicity jevu, kdy k aktivitě signálu AE dochází při hodnotách nižších, než je předchozí maximum [36–38]. Parametr délky trvání v závislosti na průměrné frekvenci překmitů byl zpracován pomocí nehierarchického algoritmu k-means. Analýza využívá metody nejmenších čtverců, kdy jsou data tříděna do shluků na základě jejich vlastností. Bod je přiřazen do takového shluku, k jehož středu má nejmenší vzdálenost. Pro analýzu **vlnového záznamu** byla zvolena Fourierova transformace signálu (FFT). Dále byla vyhodnocena **lineární lokalizace** emisních událostí mezi snímači S1-S2 a S3-S4. Tato metoda se používá v případě, že jsou délkové rozměry analyzované součásti větší, než rozměry příčné [36, 39]. Pro úspěšné vyhodnocení lokalizace je nezbytná znalost rychlosti šíření vln na povrchu kompozitního materiálu. Pomocí zařízení Hommel tester T-1000 bylo provedeno měření drsnosti na obou stranách zkušebních těles a následně byl proveden Hsu-Nielsenův test [37], kdy na povrchu materiálu byla zlomena grafitová tuha o průměru 0,5 mm a tvrdosti 2H, což vyvolalo simulovanou událost AE. Test byl proveden jak na hladké straně (H) mezi snímači S1 – S2, tak na drsné straně (D) mezi S3 – S4. Získané časy detekovaných událostí

byly použity pro výpočet rychlosti šíření vln pro jednotlivé povrchy. Pro lineární lokalizace byly použity vždy průměrné hodnoty pro jednotlivé typy povrchů, tzn. $3\,912\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro hladkou a $2\,909\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pro stranu hrubou.

Dopad hydrotermální expozice na lomové chování byl analyzován pomocí fraktografického rozboru s použitím světelné a elektronové mikroskopie. Základní makroskopické pozorování lomových ploch bylo provedeno světelným stereomikroskopem Nikon SMZ 1500 a digitálním mikroskopem Olympus DSX 1000. Porušení vzniklé uvnitř těles bylo hodnoceno metalografickými výbrusy, kdy vzorky byly fixovány do epoxidové pryskyřice, broušeny na brusných papírech do zrnitosti P1000, předleštěny pomocí $3\ \mu\text{m}$ diamantové suspenze a doleštěny $0,05\ \mu\text{m}$ koloidní Al_2O_3 suspenzí. Snímky mikrostruktur byly pořízeny světelnými mikroskopy Carl Zeiss NEOPHOT 32 a OLYMPUS DSX 1000. Detailní fraktografická analýza byla provedena řádkovacími elektronovými mikroskopy JEOL JSM 5400 a JEOL JSM 7600-F. Pro pozorování byly lomové plochy napařeny tenkou vrstvou 99,98% Cr vakuovým napařovacím systémem JEOL JEE 4X.

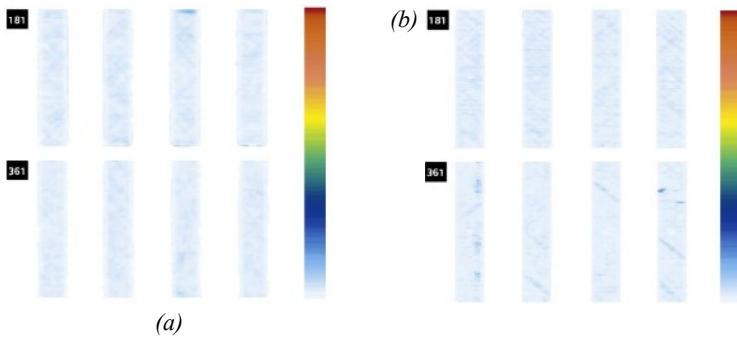
Hydrotermální vliv zasahuje primárně matici a její vlastnosti mají zásadní dopad na chování a mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. Z tohoto důvodu byly analyzovány potenciální změny vlastností matrice pomocí dynamické mechanické analýzy. Změna T_g v závislosti na absorbované vlhkosti a teplotě byla měřena pomocí DMA analýzy, která byla provedena na zařízení Tritec 2000. Zkouška probíhala dle podmínek stanovených standardem D 7028-07 [40] módem jednobodově vetknutého nosníku na zkušebních tělesech o rozměrech $45\times 8,1\times 3,1\text{ mm}$ (laminát 181) a $45\times 8,1\times 6,2\text{ mm}$ (laminát 361). Pracovní prostor byl kapalným N_2 ochlazen na teplotu $-55\text{ }^\circ\text{C}$, což odpovídá pevnostním zkouškám.

4. Výsledky

4.1 Kontrola zkušebních těles

Za účelem detekce potenciálních vad uvnitř materiálu byla zkušební tělesa kontrolována pomocí automatizovaného imerzního systému s defektoskopem OLYMPUS Omniscan MX2. Bezkontaktním skenováním byly vyhotoveny mapy, jejichž barevné spektrum určuje závažnost přítomných defektů. Z výsledných snímků pracovních částí plných o OH těles bez vlhkosti (viz obr. 1a) je patrné, že ani v jednom případě se v materiálu nevyskytují vady, které by měly nepříznivý vliv na průběh zkoušky. Dokládá to přítomnost pouze barvy nejnižší intenzity v celé skenované oblasti. V případě OH těles nasycených vlhkostí (viz obr. 1b) je patrný

lokalizovaný výskyt vad v povrchových $[45^\circ]$ vrstvách, případně na okraji těles. [41–43]



Obr. 1: C-sken pracovních částí zkušebních těles: (a) Plná a OH tělesa bez vlhkosti, (b) OH tělesa s absorbovanou vlhkostí [41, 42]

4.2 Plná a OH tělesa ve výchozím stavu

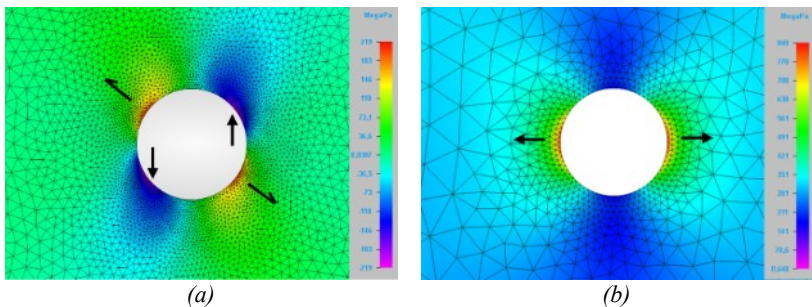
Pro plná a OH zkušební tělesa ve výchozím stavu - RT (room temperature) byla provedena zkouška jednoosým tahem. Dle ASTM D3039 [30] bylo makroskopicky vyhodnoceno vzniklé porušení. Plná tělesa vykazují více druhů porušení (M) ve formě delaminací (L) a porušení pod úhlem (A). Skladba 361 se navíc porušuje viditelnými laterálními trhlinami (L). Obě dvě skladby se porušují rozsáhle (G) a na více místech (M), dále v horní části (T) a v okolí příložek (W). Obdobný průběh je pak možné pozorovat i u OH těles. Z výsledných hodnot, ze které vyplývá, že u obou skladeb dochází k výraznému poklesu mechanických vlastností. Pevnost kompozitního materiálu klesá o přibližně 30-40 % u skladby 181 a o 39-43 % u skladby 361. U deformace je patrný vyšší pokles u skladby 361 (40-47%), zatímco u skladby 181 je přibližně poloviční (9-23%). Pokles tuhosti je v obou případech stejný, tzn. 25-29 % [44]. Otvor a jeho vliv na vlastnosti kompozitního materiálu byl dále hodnocen pomocí lomových kritérií dle *Whitneyho* a *Nuismera*. Experimentálně získaná data byla porovnána s výpočty, ze kterých byly získány kritické hodnoty bodového kritéria d_0 a kritéria průměrného napětí a_0 . Průběh poklesu poměru napětí σ_N/σ_0 v závislosti na velikosti vrubu je u obou skladeb obdobný. Pro skladbu 181 jsou výsledné kritické hodnoty pro šíření trhliny vyšší, než je tomu v případě skladby 361 a obdobně je tomu i u citlivosti materiálu na vrub α_g , která je i v případě skladby 181 vyšší. Vliv velikost trhlín je lépe patrný po výpočtu

teoretické hodnoty faktoru intenzity napětí K_Q . Pro velké hodnoty délek trhlin se blíží asymptoticky ke konstantní hodnotě $K_{Q\infty}$. Tabulka 1 uvádí hodnoty získané ze zkoušky tahem společně s lomovými kritérii.

Tabulka 1: Výsledné hodnoty vlastností materiálu Hexcel HexPly 8552 [43]

Typ skladby	R_m (MPa)	E (GPa)	μ (-)	ϵ_{max} (-)	d_0 (mm)	a_0 (mm)	K_Q (MPa·m ^{-1/2})		α_g^b (-)
							d_0	a_0	
181	N	418	34,5	0,47	1,5	4,0	32,7	41,0	1,50
	OH R2	295							1,28
	OH R3	265							1,16
	OH R4	249							1,08
361	N	736	53,8	0,46	1,0	3,0	51,9	66,2	1,53
	OH R2	452							1,28
	OH R3	429							1,18
	OH R4	419							1,14

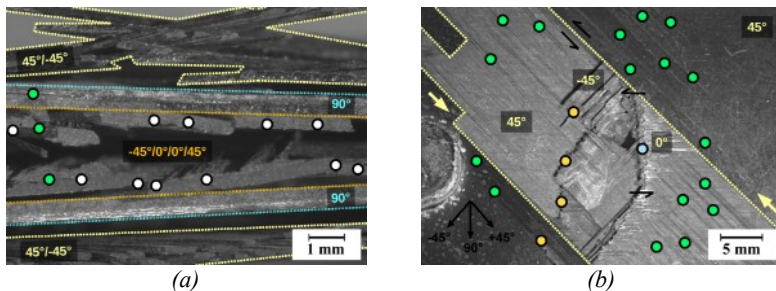
Numerickou MKP analýzou byla hodnocena odezva OH tělesa na mechanické zatížení s cílem jejího využití jako pomocného nástroje pro určení kritického místa, kde pravděpodobně dojde k primárnímu porušení tělesa. Na základě výsledků je patrné, že zatížením kompozitního tělesa jednoosým tahem dochází k indukování smykové složky napětí na okraji otvoru (viz obr. 2a). Na protilehlé straně dochází ke generování tlakové složky napětí, která působí ve stejném směru, jako je hlavní zátěžná síla. Dle předpokladu dochází k největšímu přetvoření v oblasti otvoru, což potvrzuje Von Misesova hypotéza (viz obr. 2b), která zobrazuje oblast s nejvyšší hodnotou energie přetvoření na okraji otvoru. Přetvoření působí v kolmém směru vůči působícímu hlavnímu napětí.



Obr. 2: Výsledky MKP analýzy v okolí otvoru kompozitního OH tělesa:
(a) Distribuce smykového napětí, (b) von Misesova hypotéza

4.2.1 Fraktografická analýza výchozího stavu

U plné skladby 181 se odděluje pouze část horní $[45^\circ]$ vrstvy, okolo které se vyskytují v nízké míře a delaminace, které se šíří podél vláken. V případě skladby 361 je porušení v oblasti lomu rozsáhlejší a s vyšším výskytem delaminací. Na vrstvách u povrchu jsou viditelné charakteristické stupně a lomové pásy vzniklé porušením přilehlých $[\pm 45^\circ]$ vrstev v důsledku působícího smykového napětí [41, 42]. Boční pohled na okolí lomu skladby 181 odhaluje extenzivní oddělování povrchových vrstev a tvorbu trhlin v matrici. Rozhraní dvojic vrstev $[90^\circ/\pm 45^\circ]$ zůstávají převážně neporušené, zatímco na povrchu je oddělování $[45^\circ/-45^\circ]$ vrstev rozsáhlé. V matrici těchto vrstev vznikají mezi vlákny laterální trhliny a trhliny šířící se pod úhlem 45° vůči hlavnímu napětí. [42] Jejich propojováním pomocí delaminace se odděluje část svazku vláken, čímž vzniká kaskádovitě řada segmentů. Uprostřed tělesa dochází k tvorbě extenzivního oddělování vlivem delaminací. Od lomu tělesa se dále šíří rozsáhlá delaminace mezi nosnými $[0^\circ]$ a přilehlými $[\pm 45^\circ]$ vrstvami. V případě skladby 361 je v oblasti lomu patrné rozsáhlé porušení v horní třetině zkušebního tělesa. Zde se nacházejí vrstvy $[-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$, které se porušují postupnou tvorbou segmentů. Z oblasti segmentů se šíří delaminace podél hlavní osy směrem k okraji tělesa. Druhá delaminace se šíří ve spodní třetině zkušebního tělesa mezi vrstvami $[-45^\circ/90^\circ]$. Obě delaminace způsobují v tělese rozsáhlá oddělování vrstev.

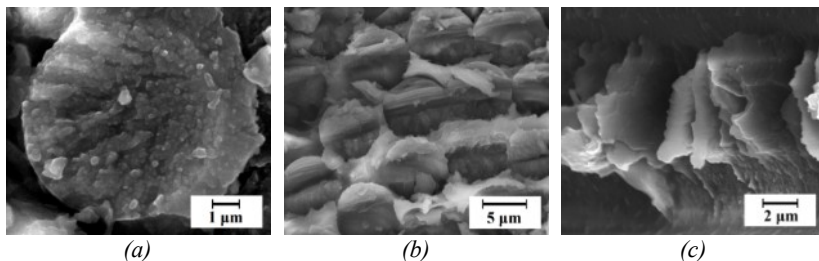


Obr. 3: Příklad fraktografických analýz: (a) Porušení skladby 181 na boku, (b) Rozbor porušení skladby 361 v oblasti čela [● delaminace, ○ trhliny v matrici]

Analýza OH těles v okolí otvoru ukazuje, že k iniciaci porušení dochází na okraji otvoru ve formě delaminací $[\pm 45^\circ]$ vrstev. U skladby 181 je systém porušování vrstev na čele obdobný, jako je tomu u těles plných. Středem zkušebního tělesa se od lomu, stejně jako u plného zkušebního tělesa, šíří delaminace napříč nosnými $[0^\circ]$ vrstvami, ale samotná velikost otvoru nemá na způsob jejího šíření výraznější vliv. Skladba 361 se však stejnou měrou

porušuje pouze částečně, kdy delaminace se v horní $[45^\circ]$ vrstvě šíří podél uložených vláken, ale samotné primární porušení je pod úhlem $\sim 80^\circ$ napříč vrstvami, tzn. ve směru uložení $[90^\circ]$ vláken. U $[\pm 45^\circ]$ vrstev je možné pozorovat tvorbu segmentů na povrchu a ve středu tělesa za doprovodu zvýšeného výskytu laterálních trhlin u vrstev $[45^\circ]$. V porovnání s plným tělesem je porušení v oblasti lomu symetrické. Delaminace mezi vrstvami $[0^\circ]$ se od lomu šíří na kratší vzdálenost se zvyšující se velikostí otvoru. [44]

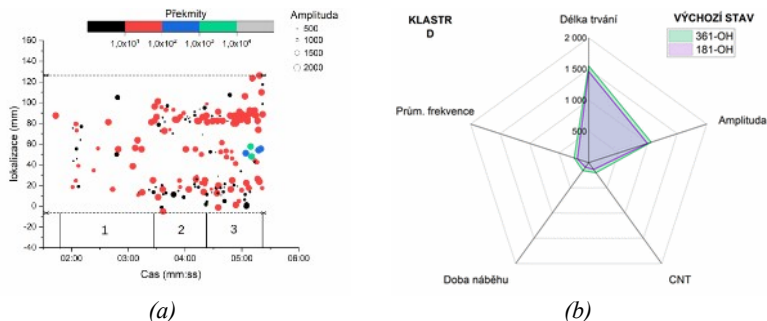
Na počátku procesu porušování se objevují trhliny v matrici, které interagují společně s ostatními mechanismy. Vzniklé trhliny jsou v rámci obou skladeb kohezního typu, což značí vysokou pevnost fázového rozhraní. O vysoké pevnosti také svědčí nízký podíl vytažených vláken na $[0^\circ]$ vrstvách. Na lomové ploše těchto vláken se formují radiály, což je typický znak tahového porušení a trhlina se šíří skrz vlákna (viz obr. 4a). Lomové plochy $[0^\circ]$ vrstev jsou u plných těles kompaktní a reliéfní, zatímco v případě OH těles (převážně v rámci skladby 181) je stupňovitost nižší a je možné pozorovat vyšší množství kohezních trhlin. Vrstvy $[\pm 45^\circ]$ se jak u plných, tak u OH těles porušují mikrovybočením vláken a na lomové ploše vznikají charakteristické stupně (viz obr. 4b). V rámci obou skladeb a obou typů těles je část $[90^\circ]$ vrstev v místě porušení roztřepená a na lomové ploše dochází v místě delaminovaných vláken k formování hrotů (viz obr. 4c). Plastická deformace matrice je v okolí vláken výrazná ve všech případech. [42, 44] Analýza povrchových $[\pm 45^\circ]$ vrstev s využitím SEM odhalila u obou skladeb výrazné mikrotočení matrice. Na lomové ploše je patrný vznik hrotů a říčkovitosti vlivem plastické deformace matrice. Tyto charakteristické znaky ukazují, že tvorba porušení je indukována trhlínami v matrici, které se šíří ve směru kolmém na uložená vlákna. Rozhraní $[45^\circ/-45^\circ]$ se následně odděluje interlaminárním smykovým napětím, čímž se na lomové ploše vytvářejí hroty, které dále fungují jako iniciační místo pro šíření dalšího porušení. [43]



Obr. 4: Příklad fraktografie výchozího stavu: (a) radiály, (b) mikrovybočená vlákna, (c) hroty v okolí delaminovaných vláken

4.2.2 Diagnostika výchozího stavu akustickou emisí

Z korelace kumulativních hodnot překmitů s daty získanými z pevnostních zkoušek vyplývá, že na základě aktivity parametru je možné získané průběhy rozdělit na tři ohraničené oblasti. Přechod z jedné oblasti do druhé je vždy iniciován změnou v chování sledovaného parametru [42, 45]. Přítomnost otvoru výrazně mění chování parametru v průběhu zatěžování tělesa. U skladby 181 začíná iniciace až při vyšší deformaci, zatímco v případě skladby 361 začínají změny v chování parametru při nižších hodnotách deformací. Z výsledků byly vyhodnoceny průměrné hodnoty zátěžné síly a deformace, při kterých vzniká nová oblast, ve které kumulativní překmity mění výrazně své chování. Z výsledků je patrné, že vrubový účinek otvoru u skladby 181 tyto prahové hodnoty zvyšuje, zatímco u skladby 361 naopak klesají. **Lokalizace emisních událostí** a jejich klasifikace na základě množství překmitů a velikosti amplitudy doplňuje předchozí korelaci kumulativních překmitů. Tímto způsobem hodnocení vznikají 4 základní druhy shluků překmitů ●+●+●+● (viz obr. 5a). Barva je dána jejich množstvím, zatímco velikost závisí na hodnotě amplitudy. Korelací s pevnostními zkouškami se získává přehled o míře a závažnosti vznikajícího porušení v monitorované oblasti. Z výsledků vyplývá, že prvotní porušení reprezentují převážně překmity typu ●+●, jejichž množství a velikost postupně narůstá se zvyšujícím se zatížením. V případě vzniku závažnějších defektů se objevují shluky překmitů ●, které mají vysokou amplitudu. Poslední stupeň shluku o vysoké amplitudě ● se vyskytuje pouze lokálně při vzniku kritického porušení, což dokládá jeho přítomnost v místě finálního lomu, který nastává u OH těles uprostřed v místě vrubu, zatímco u těles plných k němu dochází u okraje monitorovaných oblastí. V rámci analýzy metodou **k-means** byla provedena klasifikace délky trvání emisních událostí [μ s] pomocí průměrné frekvence překmitů [$\text{Hz}/1\text{AE hit}$], díky čemuž vznikají výrazně ohraničená pásma shluků (tzv. klastrů). Pro každou skladbu existují dohromady 4 klastry, které jsou označené písmeny A-D . [44] U skladby 181 se klastry C-D se vyskytují od prvotní iniciace porušení až po finální lom tělesa. Po překročení 50% maximálního zatížení vzniká druhá dvojice klastrů A-B, jejichž aktivita s postupem deformace klesá. U skladby 361 převládají klastry C-D, které jsou přítomné po celou dobu od iniciace porušení, zatímco klastry A-B se objevují až po překročení hodnoty 90% maximální zátěže.



Obr. 5: Příklad hodnocení akustickou emisí: (a) lineární lokalizace emisních událostí skladby 361 OH, (b) porovnání klastru D skladeb 181 a 361

Vrubový účinek otvoru má u OH těles výrazný dopad na výsledné grafické závislosti. Skladby 181 a 361 jsou charakterizovány lineárním nárůstem signálu. Aktivita klastřů C-D je stejná jako u těles plných, zatímco klastry A-B se objevují až po překročení hranice 85% zatížení. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do paprskových diagramů, s jejichž pomocí je možné hodnotit vliv otvoru. Omezené množství dat zapříčiňuje vysoký rozptyl výsledných hodnot, což je patrné např. při porovnání plných a OH těles v rámci klastru A, kdy výsledné plochy jsou rozdílného charakteru. V případě velkého množství dat (klastř C) vznikají plochy, které mají v rámci plných a OH těles shodnou charakteristiku. Shoda dále platí i v případě porovnání skladby 181 a 361 mezi sebou a to jak u plných, tak i u OH těles. Vzhledem ke shodě v případě dostatečného množství dat je možné usuzovat, že pro každý klastř vzniká unikátní plocha (platí pro klastry B, C a D). Tvar plochy je shodný v rámci obou skladeb a liší se pouze velikostí, kdy u skladby 181 jsou průměrné hodnoty celkově nižší (viz obr. 5b). Velikost je dále ovlivněná přítomností otvoru, který průměrné hodnoty v jednotlivých klastrech také snižuje. Výsledné frekvence jsou v souladu s fraktografickou analýzou, kdy v klastrech dochází k tvorbě trhlin v matici (47 kHz), oddělováním vláken (135-150 kHz), delaminací vláken od matrice (250 kHz) a porušením spjatá s vlákny, tzn. lomy vláken při 375 kHz, případně a jejich vytahování z matrice (435 kHz). U plné skladby 181 se trhliny v matici nacházejí v klastrech C+D, delaminace v klastrech A+B+D, oddělování vláken v klastrech B+C a vlákna se porušují pouze v klastru A. Zatímco u skladby 361 vznikají trhliny v matici pouze v klastru D, delaminace vznikají ve všech čtyřech klastrech A+B+C+D, vlákna se oddělují pouze v klastru B a k porušení vláken dochází v klastrech A+B. Hodnoty frekvenčních pásem OH těles jsou z části podobná tělesům plným. [44]

4.3 Zátěžný cyklus OH těles

Zátěžový cyklus (ZC) OH těles nemá z makroskopického pohledu vliv na vznikající poškození. Vlivem přítomného otvoru dochází k poklesu vlastností u obou druhů skladeb. Oproti standardní zátěži je pokles pevnosti u skladby 181 nižší (20-35 %), zatímco u skladby 361 je výraznější (40-50%). Pokles deformace je u skladby 181 podobný standardní zátěži (7-27 %), zatímco u skladby 361 jsou výsledné deformace nižší (33-44 %). V případě lomových kritérií dochází vlivem zátěžného cyklu k nárůstu kritických hodnot pro šíření trhliny v rámci obou skladeb, zatímco citlivost na vrub a_g u skladby 181 klesá, u skladby 361 hodnoty narůstají. U faktoru intenzity napětí $K_{Q\infty}$ dochází pro obě kritéria k mírnému nárůstu/poklesu u obou skladeb řádově v jednotkách s výjimkou bodového kritéria d_0 u skladby 361, kde došlo k výraznému nárůstu hodnoty o cca 13,5 %.

4.3.1 Fraktografická analýza zátěžového cyklu

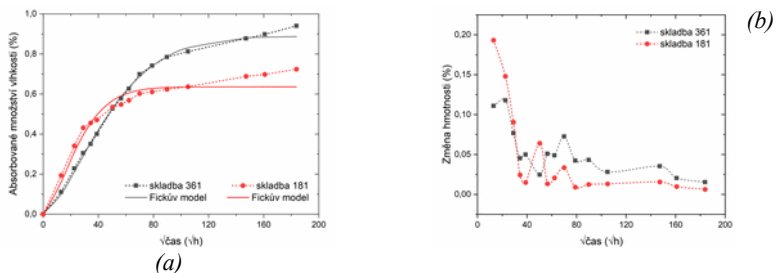
Systém porušení vrchních vrstev na čele je u obou skladeb stejný, jako je tomu v případě standardního zatěžování. Povrchové vrstvy $[45^\circ/-45^\circ]$ se částečně oddělují, v případě skladby 181 je to ve směru uložených vláken, zatímco skladba 361 se porušuje pod úhlem $\sim 80^\circ$ skrz vrstvy. Iniciace porušení je v okolí otvoru ve formě trhlin mezi svazky vláken a delaminací, které koalescencí vytvářejí rozsáhlá porušení šířící se do zbytku tělesa. U skladby 181 se povrchové vrstvy $[45^\circ/-45^\circ]$ porušují rozsáhle pomocí segmentů. Oproti standardní zátěži je tvorba segmentů ve vnitřních vrstvách méně rozsáhlá a rozhraní skladeb $[90^\circ/45^\circ]$ zůstává z větší části bez porušení a zachovává si svoji soudržnost. Porušení povrchových vrstev je u skladby 361 minimální. Vnitřní $[-45^\circ]$ vrstvy se porušují extenzivně pomocí segmentů, zatímco ve vrstvách $[45^\circ]$ je možné pozorovat velké množství laterálních trhlin. Vrstvy $[\pm 45^\circ]$ se oddělují rozsáhlými delaminacemi na rozhraních se sousedními vrstvami, zatímco vrstvy $[90^\circ]$ a jejich rozhraní si zachovávají soudržnost. Významné fraktografické rysy zůstávají oproti standardní zátěži zachovány. Vzhledem ke zvýšenému množství laterálních trhlin ve $[\pm 45^\circ]$ vrstvách jsou výsledné segmenty výrazně menší velikosti, čemuž odpovídá i menší velikost stupňů na lomové ploše. U obou skladeb je patrný nárůst porušení vláken v $[90^\circ]$ vrstvách. Výsledné lomové plochy vláken jsou členité, ale bez výrazných morfologických rysů. Vlákna se porušují převážně ve směru kolmém na svoji osu.

4.3.2 Diagnostika zátěžného cyklu akustickou emisí

V případě **kumulativních překmitů** vzniká v průběhu nárůstu zatížení signál AE, který má v rámci skladby 181 skokový nárůst, zatímco u skladby 361 je přírůstek lineární. Z průběhů je patrné, že dochází ke Kaiserovu jevu, kdy aktivita signálu roste až při překročení maximální hodnoty předchozího zatížení. Z prahových hodnot vyplývá, že velikost vrubu prahové hodnoty snižuje. Také v rámci **lineární lokalizace** je u cyklické zátěže patrná změna ve způsobu porušování. Pro každý cyklus je vygenerováno pouze jedno pásmo. U obou skladeb dochází k postupnému nárůstu signálu, kdy v prvních dvou cyklech se objevuje pouze malé množství překmitů s nízkou amplitudou ●+●. U třetího cyklu dochází k nárůstu překmitů ●+● a je možné pozorovat prvotní výskyt zvýšeného množství s vysokou amplitudou ●. Ve finální fázi je v monitorované oblasti patrná převaha překmitů s vysokou amplitudou ● společně s izolovanými zdroji zvýšeného množství překmitů o maximální amplitudě ●, které se soustředí do okolí koncentrátoru napětí. [43] V případě **k-means** analýzy se klastry C+D generují, stejně jako u standardní zátěže. Klastry A a B se u skladby 181 objevují až v rámci posledního cyklu, zatímco u skladby 361 vznikají už u třetího cyklu. Výsledné plochy z parametrů jsou pro obě skladby stejné jako v případě standardní zátěže. Z výsledných hodnot vyplývá, že změnou způsobu zatížení dochází k nárůstu průměrných hodnot jak u skladby 181. [128] Výsledná frekvenční spektra z **FFT analýzy** jsou pro jednotlivé klastry obdobná, jako u OH a plných těles.

4.4 Hydrotermální expozice

Množství absorbované vlhkosti ve zkušebních tělesech bylo hodnoceno na základě úbytku hmotnosti. Následující obrázek (viz obr. 6a) ilustruje absorpční křivky vlhkosti a jejich porovnání s teoretickým Fickovým modelem společně se změnou hmotnosti za 33 800 h (viz obr. 6b). [43]



Obr. 6: Kondicionování OH těles: (a) absorpční křivky, (b) úbytek hmotnosti [43]

Z výsledných křivek je patrné, že v laminátu 181 je v okamžiku vyjmutí z komory absorbované množství vlhkosti 0,94 %, zatímco u laminátu 361 je obsah vlhkosti 0,87 %. Průběhy dále ukazují, že v obou případech nebylo po daném čase dosaženo maximálního nasycení kompozitního materiálu, což potvrzují rostoucí křivky absorbovaného množství vlhkosti a klesající křivky postupného úbytku hmotnosti. [43]

Z výsledných hodnot vyplývá, že vlhkost proniká pomaleji do laminátu 181, ale vzhledem k jeho menší tloušťce a nižšímu počtu vrstev dochází k jeho rychlejšímu sycení vlhkostí (viz. tabulka 2). [43]

Tabulka 2: Difuzivita a absorpce vlhkosti travel vzorků [43]

Skladba 181			Skladba 361		
M_{\max} (%)	D_z ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$t_{\text{teoreticky}}$ (h)	M_{\max} (%)	D_z ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$t_{\text{teoreticky}}$ (h)
0,94	$2,0 \times 10^{-7}$	11 045	0,87	$2,56 \times 10^{-7}$	21 670

Při porovnání OH těles se zátěžovým cyklem v rámci makroskopického hodnocení porušení po zkoušce je patrné, že dochází k částečné změně systému porušování. Primární porušení zůstává v okolí otvoru (M), v případě skladby 181 jsou pod úhlem (A), zatímco u skladby 361 se jedná pouze o polovinu tělesa, druhá část je laterální (L). U obou skladeb je patrné zvýšené množství delaminací a laterálních trhlin. Porušení zůstává lokalizované v měřené oblasti (G) a je uprostřed tělesa (M). Dále bylo provedeno měření tvrdosti dle Barcola a změřena drsnost povrchových vrstev. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tabulka 3). Mezi skladbami nebyly naměřeny výraznější rozdíly a proto jsou dále uvedeny průměrné hodnoty pro výchozí stav (RT) a stav po expozici (ENV). Z výsledků je patrné, že vlivem expozice dochází k nárůstu Ra, ale klesá výška nerovnosti Rz. Dále také dochází k poklesu tvrdosti přibližně o 6 %. [43]

Tabulka 3: Výsledky měření tvrdosti a drsnosti povrchu [43]

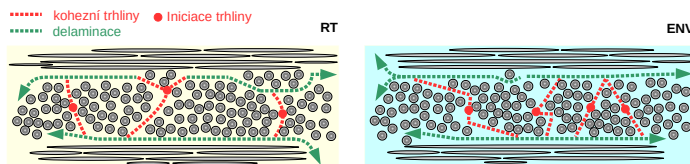
Stav	Hladká strana			Drsná strana		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Barcol (-)	Ra (μm)	Rz (μm)	Barcol (-)
RT	$0,20 \pm 0,05$	$2,50 \pm 0,55$	$80,0 \pm 1,2$	$9,0 \pm 2$	54 ± 11	$74,0 \pm 1,6$
ENV	$0,39 \pm 0,04$	$2,41 \pm 0,31$	$75,0 \pm 1,0$	$9,8 \pm 0,6$	$47,5 \pm 2,4$	$70,0 \pm 1,3$

Z hlediska pevnostních charakteristik dochází po hydrotermální expozici ke změnám v rámci meze pevnosti a maximální deformace. V případě meze pevnosti dochází v porovnání s RT zátěžným cyklem (OH-ZC) k jejímu nárůstu, kdy u skladby 181 se jedná o 4% a u skladby 361 o 5 % . Oproti tomu hodnoty maximální dosažené deformace oproti RT stavu klesají u skladby 181 o 10,7 % a u skladby 361 o 16,8% . [43]

4.4.1 Fraktografická analýza enviromentálního vlivu

U skladby 181 je systém porušení horních vrstev podobný RT tělesům, kdy se odděluje pouze část horní [45°] vrstvy okolo které je ale možné v tomto případě pozorovat zvýšený výskyt delaminací. Skladba 361 se porušuje v okolí otvoru podobným způsobem, jako RT tělesa. Původní textura na povrchové vrstvě se vytrácí a více se zviditelňuje směrovost uložených [45°] vláken. Mění se i systém porušování vrchních vrstev, kdy je na lomové ploše patrné hladké oddělení horní [45°] vrstvy a na odhaleném povrchu spodní [-45°] vrstvy jsou částečně viditelné stopy po vláknech. [43]

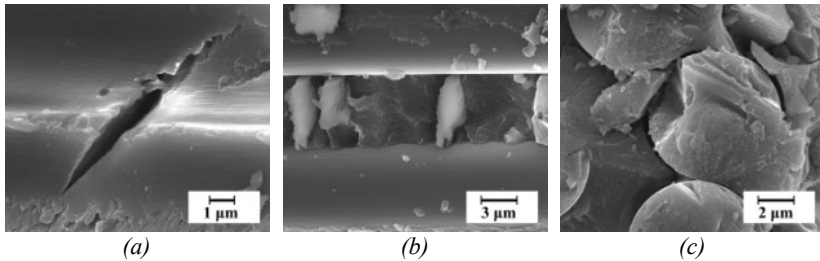
Vlivem enviromentální expozice dochází v povrchových [±45°] vrstvách skladby 181 k extenzivní tvorbě segmentů, u kterých je patrná změna způsobu šíření trhlin (původně laterálních). Ty se šíří dvojím způsobem, buďto má výsledná trhlina charakter písmena „Z“ a nebo se trhliny střídavě šíří pod úhlem ±45° výsledný segment je trojúhelníkovitého tvaru „Δ“. [43]



Obr. 7: Schéma změny vzniku segmentů po hydrotermální expozici [43]

Rozhraní vrstev [±45°/90°] si zachovává soudržnost a zůstává neporušené a bez viditelného výskytu trhlin v matici či delaminací. Samotné vrstvy [90°] jsou porušeny minimálně Uprostřed tělesa dochází ke zvýšenému vzniku laterálních trhlin, kdy obzvláště ve skladbách [-45°/+45°] se nacházejí oblasti s lokálně zvýšeným množstvím trhlin. Ve větší vzdálenosti od lomové oblasti se ve vrstvách [0°] a [-45°] formují rozsáhlé dutiny o velikosti ~1,5 mm. napříč [-45°] vrstvami. U skladby 361 dochází k výrazné změně v lomovém chování. V bočním pohledu se polovina skladby porušuje pod úhlem 90°, zatímco zbylá část pod úhlem ~45°. Obdobně jako u skladby 181 vznikají ve větší vzdálenosti od lomu dutiny o velikosti cca 5 mm. V případě iniciace v

okolí otvoru se vytvářejí laterální trhliny v matrici, které jsou doprovázené interlaminárními delaminacemi mezi svazky vláken. Oproti RT vzorkům se v rámci obou svazků nachází v místě otvoru zvýšené množství trhlín a delaminací. Vlivem hydrotermální expozice vzniká v matrici u obou druhů skladeb několik typů trhlín. V okolí vláken se nacházejí rozevřené trhliny pod úhlem $+45^\circ$ (viz Obr. 8a) o průměrné délce $3 \mu\text{m}$. [43]



Obr. 8: Příklad fraktografie hydrotermální exozice: (a) krátká rozevřená trhlina, (b) úbytek hrotů, (c) oddělení v okolí mikrovybočených $[45^\circ]$ vláken

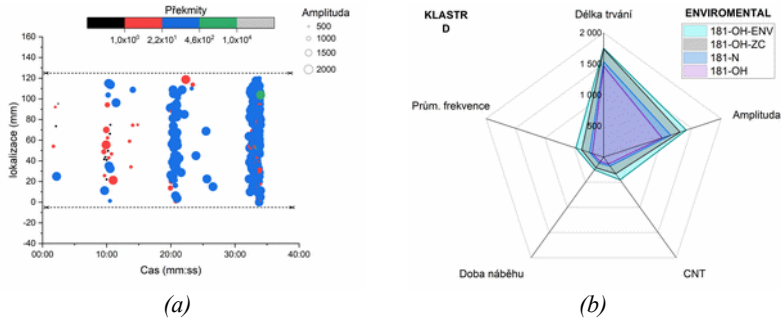
Dalším druhem jsou trhliny působící pod opačným úhlem, které mohou dosahovat délky až $6 \mu\text{m}$ a které koalescencí s $+45^\circ$ trhlínami vytvářejí „V“ útvary podobné chevronům. V okolí trhlín dochází k plastické deformaci matrice s výraznou orientací ve směru uložených vláken a k částečnému odlupování částí matrice. Posledním typem je vznik mikrotrhlinek o rozměrech cca $200\text{--}300 \text{ nm}$, které jsou ve směru uložených vláken, nebo pod úhlem 45° . V okolí stop po vláknech se dále objevují vlivem plastické deformace matrice nové morfologické útvary – hřbety. [43]. Z hlediska změn procesů porušení dochází k úbytku množství hrotových útvarů (viz Obr. 8b), které vznikají při delaminaci vláken a které jsou typickým morfologickým znakem, který doprovází oddělování vláken. Dále dochází k částečnému poklesu adheze matrice k vláknům. Na lomové ploše je tak možné pozorovat vlákna, která jsou buď pouze částečně obalená matricí a nebo jsou vlákna zcela bez matrice. Na povrchu vláken je patrné jemné rýhování (krenulace), které souvisí s vnitřní fibrilární mikrostrukturou vláken. Tyto rýhy jsou následně viditelné ve formě otisku v matrici v okolí delaminovaných $[90^\circ]$ vláken, případně v okolí stop po $[0^\circ]$ vláknech. Co se týče procesu porušování vláken, dochází ve svazcích $[90^\circ]$ vláken k částečným lomům pod úhlem $\sim 30^\circ$, což je důsledkem rozsáhlého mechanismu podélného oddělování. Lomové plochy vláken jsou hladké a na povrchu je viditelná říčkovitost, která charakterizuje směr šíření trhliny. [43] Z hlediska

mezifázového rozhraní dochází k oslabení vazeb mezi vlákny a maticí, což se projevuje v rozsáhlém oddělování vláken od matrice (viz Obr. 8c). Na lomové ploše ubývá stop po vytažených vláknech a nově je možné pozorovat uvolněná vlákna od matrice. Tento jev je patrný převážně ve svazcích s orientací vláken $[\pm 45^\circ]$ a $[0^\circ]$. Při detailním pohledu na rozhraní je patrný otisk krenulace vlákna do matrice. Na vláknech s $[0^\circ]$ orientací se mění topografie lomové plochy, kdy z hlediska morfologie ubývá množství vytažených vláken. Radiály jsou na lomových plochách $[0^\circ]$ vrstev stále patrné, ale vlivem expozice je jejich morfologie méně plastická, povrch je jemný a charakteristické znaky jsou obtížněji rozeznatelné. Z hlediska charakteru porušení mění $[0^\circ]$ svazky svůj mechanismus, kdy oproti RT stavu přestávají být lomové plochy členité a objevují se chevrony. [43]

4.4.2 Diagnostika hydrotermálního vlivu akustickou emisí

U **kumulativních překmitů** dochází v rámci obou skladeb při iniciaci porušení k výrazně vyššímu nárůstu hodnot v porovnání s RT stavem. V průběhu nárůstu zatížení v rámci cyklů dochází k lineárnímu růstu kumulativních hodnot, což je rozdíl oproti RT stavu u skladby 181, kdy byl růst naopak skokový. Exponovaná skladba 361 si zachovává podobný průběh jako v RT stavu. Deformace při výdrži jsou oproti skladbě 181 vyšší, ale v porovnání s RT stavem klesají v průměru o 3-14 %, zatímco u skladby 181 je to dokonce o 9-19 %. Z hlediska prahových hodnot dochází po expozici u cyklů C1-C3 k mírnému poklesu, zatímco u finálního cyklu C4 hodnoty narůstají. Také u **lineární lokalizace** dochází po hydrotermální expozici k částečným změnám. Oproti RT stavu vzniká zvýšené množství překmitů o vysoké amplitudě ● už v prvních cyklech a jejich množství postupně u obou skladeb narůstá. U skladby 181 se od začátku objevují pásma malého množství překmitů s nízkou amplitudou ●+● u kterých s roustoucím zatížením narůstá i jejich amplituda, obzvláště je to patrné u překmitů typu ●. V posledních dvou cyklech jsou v celém průřezu přítomné překmity ● a v závěrečném cyklu se objevuje vysoké množství překmitů o maximální amplitudě ●, převážně v okolí otvoru. Obdobné chování je možné pozorovat i u skladby 361 (viz obr. 9a). V případě **k-means analýzy** dochází vlivem hydrotermální expozice u obou skladeb ke sjednocení tvaru jejich průběhů. Aktivita signálu AE je přítomná již od prvního cyklu a s přibývajícím zatížením dochází k postupnému nárůstu množství signálu AE. Klastr C a D je u skladby 181 přítomný od prvotní iniciace až do porušení součásti, zatímco klastry A a B se vyskytují až ve třetím a čtvrtém cyklu. U skladby 361 je od počátku přítomný pouze klastr D a ostatní klastry A, B, C se objevují až v rámci třetího a čtvrtého cyklu. Výsledné plochy z průměrných

hodnot parametrů AE jsou po expozici pro jednotlivé klastry obdobné, jako v případě RT. Z výsledných hodnot vyplývá, že vlivem expozice dochází k mírnému nárůstu průměrných hodnot a to jak u skladby 181, tak u skladby 361 (viz obr. 9b). Frekvenční spektra z **FFT analýzy** jsou v souladu s analýzami plných o OH těles. Z hlediska hydrotermální expozice nedochází ke změnám hodnot frekvencí v rámci jednotlivých procesů porušení. [43]



Obr. 9: Příklad hodnocení akustickou emisí: (a) Lineární lokalizace emisních událostí skladby 361OH, (b) Vliv hydrotermální expozice na velikost ploch klastru D

4.4.3 Degradace matrice

Z výsledných záznamů vyplývá, že u obou skladeb dochází vlivem hydrotermálního působení k posunu píků ztrátového modulu E'' a fázového posunu $\tan\Delta$ směrem k nižším teplotám. Dále dochází k nárůstu dynamických a elastických charakteristik. U skladby 181 je nárůst hodnot výraznější, zatímco u skladby 361 jsou vzniklé změny podstatně menší. Vlivem hydrotermální expozice klesají u obou skladeb teploty T_g v průměru o $15\text{ }^\circ\text{C}$ ($\sim 8\%$). Samotné hodnoty složek modulů v rámci hydrotermální expozice narůstají, kdy v případě ztrátového modulu E'' a fázového posunu $\tan\Delta$ se jedná u skladby 181 o nárůst téměř pětinasobný, zatímco u skladby 361 je nárůst dvojnásobný. V rámci reálné složky modulu E' dochází u obou skladeb k mírnému poklesu, který je u skladby 181 výraznější.

5. Závěry

Na základě provedeného experimentu zabývajícího se degradací open-hole kompozitních skladeb vlivem působení hydrotermální expozice a ze získaných výsledků lze učinit následující závěry:

- ◆ Absorpce vlhkosti se u analyzovaných skladeb řídí Fickovými zákony, ale po čase 33 800 h nedochází k jejich saturaci, což je důsledkem rozdílné orientace vláken a celkové tloušťky kompozitu. Z hlediska vlastností dochází vlivem expozice k cca 5 % nárůstu meze pevnosti, zatímco maximální deformace klesá až o 17 % u skladby s vyšším počtem vrstev. V povrchových vrstvách dochází ke snížení hodnot tvrdosti a Rz, zatímco Ra narůstá. Expozice dále způsobuje pokles teploty skelného přechodu matrice o 15 %, zatímco její schopnost tlumit vibrace narůstá.
- ◆ U hodnocených skladeb dochází vlivem expozice ke změně v procesech porušování a v lomovém chování. Mění se jak topografie lomových ploch, tak i jejich morfologie. Kompozitní skladby jsou z makroskopického měřítka více kompaktní, ale zvyšuje se míra a rozsah výsledného porušení. Mění se způsob šíření laterálních trhlin v matrici, objevují se kavity a vznikají shluky mikrotrhlin. V matrici vznikají sítě nano a mikrotrhlin, mění se mechanismus plastické deformace a dochází k degradaci mezifázového rozhraní. Na lomových plochách [0°] vrstev se objevují chevrony, zatímco dochází k částečnému zániku původních radiálů. Mění se i způsob porušování [90°] vláken, které se porušují pod úhlem.
- ◆ Akustická emise je vhodnou metodou pro hodnocení environmentálního vlivu, ale jednotlivé přístupy mají rozdílnou citlivost. Kumulativní hodnoty překmitů je možné použít pouze na základě prahových hodnot. Klasifikovaná lineární lokalizace je naopak spolehlivým nástrojem, neboť míra a závažnost vznikajícího porušení je indikována barvou a velikostí detekovaných emisních událostí v rámci jednotlivých fází zatěžování. Kombinací shlukové a frekvenční analýzy nebylo možné spolehlivě identifikovat a odlišit

jednotlivé procesy porušení, které vznikají v průběhu zatěžování, jelikož frekvenční pásma se v rámci jednotlivých klastrů překrývají. V porovnání s výchozím stavem enviromentální expozice zvyšuje průměrné hodnoty parametrů jednotlivých klastrů.

Perspektiva pro další výzkum

Z výsledků vyplývá, že pro hodnocení synergického účinku vlhkosti a nízkých teplot není možné využít pouze jednu analytickou metodu, ale je zapotřebí komplexního přístupu. Pro účely dalšího rozšíření získaných informací ohledně hydrotermálního účinku uvádí autor pro budoucí experimenty následující doporučení:

- ◆ Z hlediska urychlení difúze vlhkosti použít kompozitní materiály s nižším počtem skladeb, nebo případně jednosměrně vyztužené lamináty.
- ◆ Analyzovat hydrotermální účinek už po určitém absorbovaném množství vlhkosti (např. po 20%) a stanovit časovou závislost degradace.
- ◆ Pro navýšení hydrotermálního efektu aplikovat namísto snížených teplot tzv. kryogenní teploty, tzn. teploty od $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nižší.
- ◆ Z hlediska akustické emise hodnotit změny, které nastávají ve vlhčeném materiálu již při samotném procesu ochlazování.
- ◆ Analyzovat účinky hydrotermální expozice v rámci únavových zkoušek a hodnotit jeho vliv na zbytkovou životnost, mez únavy, lomové chování.

Publikace související s tématem disertační práce

Tématické publikace v databázích WOS a SCOPUS

- [43] MÁRA, V., L. MICHALCOVÁ, M. KADLEC, J. KRČIL a P. ŠPATENKA. The effect of longtime moisture exposure and low temperatures on mechanical behavior of open-hole Cfrp laminate. *Polymer Composites* [online]. 2021, 42(7), 3603-3618. ISSN 1548-0569. Dostupné z: doi:10. 1002/pc.26082
- [44] MÁRA, V.; KRČIL, J.; MICHALCOVÁ, L.; ČIŽMÁROVÁ, E. The failure of carbon fiber reinforced composite analyzed by acoustic emission In: *Defect and Diffusion Forum*, vol. 405, 205-211, 2020. ISSN 10120386. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.405.205
- [45] MÁRA, V.; KRČIL, J.; ČERNÝ, M. Analysis of behavior of composite material during loading tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, **726**, 012007. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/726/1/012007

Tématické publikace v jiných databázích

- [41] MÁRA, V. Vznik a rozvoj porušení ve vláknovém kompozitu na bázi uhlíku vlivem vnějšího namáhání In: *Nové alternativy v materiálových aplikacích*. Jindřichův Hradec: Epika, 2018. p. 4-10. ISBN 978-80-7608-018-8.
- [42] MÁRA, V. Damage Analysis of Fiber Reinforced Composites using Acoustic Emission In: *Studentská tvůrčí činnost 2017*. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017. pp. 1-5. ISBN 978-80-01-06143-5.
- [38] MÁRA, V.; ČIŽMÁROVÁ, E. Composite NDT Testing In: *Novel Biomaterials in Regenerative Medicine*. Jindřichův Hradec: Epika, 2016. p. 225-231. ISBN 978-80-88113-69-0.
- [31] ČIŽMÁROVÁ, E.; MÁRA, V. Composite Materials Test Methods In: *Novel Biomaterials in Regenerative Medicine*. Jindřichův Hradec: Epika, 2016. p. 211-224. ISBN 978-80-88113-69-0.

Literatura

- [1] ZAGAINOV, G. a G. LOZINO-LOZINSKI. *Composite Materials in Aerospace Design*. 1. vyd. New Delhi: Springer, 2012. ISBN 978-94-010-4254-3.
- [2] KOŘÍNEK, Z. *Počítačová podpora, kompozity* [online]. 2005. Dostupné z: www.volny.cz/zkorinek/
- [3] CHUNG, D. *Composite Materials: Science and Applications*. 2. vyd. New York: Springer, 2012. ISBN 978-1-84882-830-8.
- [4] HARRIS, B. *Composite Materials*. 2. vyd. London: Institute of Materials, 1999. ISBN 1-86125-032-0.
- [5] EHRENSTEIN, G. *Polymerní kompozitní materiály*. 2. vyd. Praha: SCIENTIA, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] DIETER, G. E. *SM Handbook Volume 21: Composites*. 1. vyd. Cleveland: ASM International, 2001. ISBN 978-0-87170-703-1.
- [7] GHOLAMI, Mehran, Abdul Rahman Mohd SAM, Jamaludin Mohamad YATIM a Mahmood Md TAHIR. A review on steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **47**, 301–310. ISSN 0950-0618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.049](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.049)
- [8] PASTORELLI, Gianluca, Costanza CUCCI, Oihana GARCIA, Giovanna PIANTANIDA, Abdelrazek ELNAGGAR, May CASSAR a Matija STRLIČ. Environmentally induced colour change during natural degradation of selected polymers. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2014, **107**, 198–209. ISSN 0141-3910. Dostupné z: [doi:10.1016/j.polymdegradstab.2013.11.007](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.11.007)
- [9] LU, T., E. SOLIS-RAMOS, Y. YI a M. KUMOSA. UV degradation model for polymers and polymer matrix composites. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2018, **154**, 203–210. ISSN 0141-3910. Dostupné z: [doi:10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.004](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.06.004)
- [10] LU, Tianyi, Euripides SOLIS-RAMOS, Yun-Bo YI a Maciej KUMOSA. Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2016, **131**, 1–8. ISSN 0141-3910. Dostupné z: [doi:10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025)
- [11] TSAI, Y. I., E. J. BOSZE, E. BARJASTEH a S. R. NUTT. Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites. *Composites Science and Technology* [online]. 2009, **69**(3), 432–437. ISSN 0266-3538. Dostupné z: [doi:10.1016/j.compscitech.2008.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.11.012)
- [12] PIPES, R. *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*. 3. vyd. Florida: CRC Press, 2003. ISBN 1-58716-100-1.

- [13] CHAWLA, K. *Composite Materials: Science and Engineering*. 3. vyd. New York: Springer, 2012. ISBN 978-0-387-74364-6.
- [14] MENG, M., M. J. RIZVI, H. R. LE a S. M. GROVE. Multi-scale modelling of moisture diffusion coupled with stress distribution in CFRP laminated composites. *Composite Structures* [online]. 2016, **138**, 295–304. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2015.11.028
- [15] MA, Yan, Shanshan JIN, Masahito UEDA, Tomohiro YOKOZEKI, Yuqiu YANG, Fumitake KOBAYASHI, Hiroaki KOBAYASHI, Toshi SUGAHARA a Hiroyuki HAMADA. Higher performance carbon fiber reinforced thermoplastic composites from thermoplastic prepreg technique: Heat and moisture effect. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018, **154**, 90–98. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.07.060
- [16] BREUER, U. P. *Commercial Aircraft Composite Technology*. 1. vyd. Švýcarsko: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-31918-6.
- [17] CABRNOCH, B. Rozdíly v přístupech při kvalifikaci materiálů a konstrukcí v letectví a kosmonautice. *Časopis Transfer*. nedatováno, **2019**(32), 21–24. ISSN 1801 - 9315.
- [18] SURENDRA KUMAR, M., Neeti SHARMA a B.C. RAY. Microstructural and Mechanical Aspects of Carbon/Epoxy Composites at Liquid Nitrogen Temperature. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* [online]. 2009, **28**(16), 2013–2023. ISSN 0731-6844. Dostupné z: doi:10.1177/0731684408090717
- [19] OKAYASU, Mitsuhiro a Yuki TSUCHIYA. Mechanical and fatigue properties of long carbon fiber reinforced plastics at low temperature. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* [online]. 2019, **4**(4), 577–583. ISSN 2468-2179. Dostupné z: doi:10.1016/j.jsamd.2019.10.002
- [20] PAPA, Ilaria, Antonio LANGELLA a Valentina LOPRESTO. CFRP laminates under low-velocity impact conditions: Influence of matrix and temperature. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2019, **59**(12), 2429–2437. ISSN 1548-2634. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1002/pen.25102
- [21] AL-SHAWAF, Ahmed. Influence of fibres' stiffness on wet lay-up CFRP/steel joints' behaviour under subzero exposures. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, **73**, 61–71. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2014.02.013
- [22] MALLICK, P. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2007. ISBN 978-0-8493-4205-9.
- [23] FAN, Wei a Jia-lu LI. Rapid evaluation of thermal aging of a carbon fiber laminated epoxy composite. *Polymer Composites* [online]. 2014, **35**(5), 975–984. ISSN 1548-0569. Dostupné z: doi:10.1002/pc.22743

- [24] SETHI, Sanghamitra a Bankim Chandra RAY. Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2015, **217**, 43–67. ISSN 0001-8686. Dostupné z: doi:10.1016/j.cis.2014.12.005
- [25] MENG, M., M. J. RIZVI, S. M. GROVE a H. R. LE. Effects of hygrothermal stress on the failure of CFRP composites. *Composite Structures* [online]. 2015, **133**, 1024–1035. ISSN 0263-8223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2015.08.016
- [26] MARÍN, L., E. V. GONZÁLEZ, P. MAIMÍ, D. TRIAS a P. P. CAMANHO. Hygrothermal effects on the translaminar fracture toughness of cross-ply carbon/epoxy laminates: Failure mechanisms. *Composites Science and Technology* [online]. 2016, **122**, 130–139. ISSN 0266-3538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2015.10.020
- [27] WOLFRUM, J, H DINNEBIER a T KÖRWIEN. Rapid high temperature loads on dry and moist carbon fibre epoxy composite materials. *Journal of Composite Materials* [online]. 2014, **48**(28), 3513–3520. ISSN 0021-9983. Dostupné z: doi:10.1177/0021998313511352
- [28] WALTER, H., H. SHIRANGI, E. DERMITZAKI a et AL. Study on the effect of moisture and elevated temperature on the fracture properties of visco elastic polymers. In: *12th International Conference on Fracture 2009. Proceedings. CD-ROM*. 2009, s. 1775–1783. ISBN 978-1-61738-227-7.
- [29] RAY, B. C. Effects of crosshead velocity and sub-zero temperature on mechanical behaviour of hygrothermally conditioned glass fibre reinforced epoxy composites. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2004, **379**(1), 39–44. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2003.11.031
- [30] *ASTM D3039 / D3039M-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. B.m.: ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.
- [31] ČIŽMÁROVÁ, E. a V. MÁRA. Composite Materials Test Methods. In: *Novel Biomaterials in Regenerative Medicine*. Jindřichův Hradec: Epika, 2016, s. 225–231. ISBN 978- 80-88113-69-0.
- [32] *ASTM 5766 - Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. B.m.: ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.
- [33] *ASTM D5229 / D5229M - 14 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*. B.m.: ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.
- [34] *ISO 18249 - Non-destructive testing - Acoustic emission testing - Specific methodology and general evaluation criteria for testing of fibre-reinforced polymers*. B.m.: ISO 2015, Switzerland. 2015.

- [35] KUTATELADZE, S. S. a V. M. BORIŠANSKIJ. *Průručka sdílení tepla*. 1. Praha: SNTL, 1962. ISBN 04-019-62.
- [36] ŠMÍD, R. a M. KREIDEL. *Technická diagnostika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [37] ČSN EN 1330-9. *Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí*. B.m.: UNMZ. 2009.
- [38] MÁRA, V. Composite NDT Testing. In: *Novel Biomaterials in Regenerative Medicine*. Jindřichův Hradec: Epika, 2016, s. 225–231. ISBN 978- 80-88113-69-0.
- [39] MIX, P. *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. 2. vyd. New Jersey: Wiley, 2005. ISBN 0-471-42029-8.
- [40] *ASTM D7028 - 07(2015) - Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA T_g) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA)*. B.m.: ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.
- [41] MÁRA, V. Vznik a rozvoj porušení ve vláknovém kompozitu na bázi uhlíku vlivem vnějšího namáhání. In: *Nové alternativy v materiálových aplikacích*. Jindřichův Hradec: Epika, 2018, s. 4–10. ISBN 978-80-7608-018-8.
- [42] MÁRA, V. Damage Analysis of Fiber Reinforced Composites using Acoustic Emission. In: *Studentská tvůrčí činnost*. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017, s. 1–5. ISBN 978-80-01-06143-5.
- [43] MÁRA, V., L. MICHALCOVÁ, M. KADLEC, J. KRČIL a P. ŠPATENKA. The effect of longtime moisture exposure and low temperatures on mechanical behavior of open-hole Cfrp laminate. *Polymer Composites* [online]. 2021, 42(7), 3603-3618. ISSN 1548-0569. Dostupné z: doi:10. 1002/pc.26082
- [44] MÁRA, V., J. KRČIL, L. MICHALCOVÁ a E. ČIŽMÁROVÁ. The Failure of Carbon Fiber Reinforced Composite Analyzed by Acoustic Emission. *Defect and Diffusion Forum* [online]. 2020, 405, 205–211 [vid. 2021-02-14]. ISSN 1662-9507. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.405.205
- [45] MÁRA, V., J. KRČIL a M. ČERNÝ. Analysis of behavior of composite material during loading tests. *IOP Conference series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 726, 012007. ISSN 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/726/1/012007

Anotace

V rámci předkládané práce byl hodnocen vliv enviromentálních podmínek ve formě vlhkosti a nízkých teplot na degradaci vlastností u uhlíkem vyztuženého laminátu s epoxidovou maticí Hexcel HexPly 8552. Hydrotermální účinek byl hodnocen v rámci dvou kompozitních skladeb s otvorem o rozdílném počtu vrstev a to na základě prostupu vlhkosti do materiálu, změn vlastností (drsnot, pevnost, tvrdost, deformace), lomového chování a procesů porušování. Kompozitní lamináty byly vystaveny působení relativní vlhkosti 85 % a teplotě 70 °C po dobu 33 800 hodin. Následně byl při -55 °C zkoumán účinek nízkých teplot na vlastnosti a lomové chování při kvazi cyklickém namáhání. Průběh pevnostních zkoušek byl monitorován metodou akustické emise a dopad degradace byl hodnocen na základě vybraných emisních parametrů a provedených fraktografických analýz. Hydrotermální účinek má významný dopad na snížení houževnatosti materiálu a v důsledku degradace matrice a oslabení mezifázového rozhraní dochází ke změnám v morfologických znacích a procesech porušování.

Summary

In this work, the influence of environmental conditions on the properties degradation of carbon fiber reinforced polymer composite Hexcel HexPly 8552 was studied. Hydrothermal effect was analyzed on the two types of open-hole composite laminates with different number of plies. Evaluation was based on the moisture diffusion, changes of materials properties (surface roughness, strength, hardness, deformation), fracture behavior and damage processes. The composite laminates were conditioned in 85% humid air at 70 °C for 33 800 h and the effect of low temperatures on quasi-cyclic tension properties and fracture behaviour was investigated. The impact of degradation was further analyzed with acoustic emission method with usage of selected parameters and performed fractographic analysis. The hydrothermal effect has a significant effect on reducing the materials toughnens. Hygrothermal effect has significant impact on materials toughness reduction and the damage mechanisms and characteristic morphologic features are changing due to the matrix degradation and weakened fiber/matrix interface.