

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

KATEDRA MATERIÁLU A STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



**MECHANICKÉ VLASTNOSTI HYBRIDNÍCH LEPENÝCH SPOJŮ ŘEŠENÉ
EXPERIMENTÁLNÍM PŘÍSTUPEM**

Disertační práce

Studijní program: Speciální technologie
Obor: Jakost a spolehlivost strojů a zařízení
Vypracoval: Ing. Martin Tichý
Školitel: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.
Konzultant: doc. Rajesh Kumar Mishra, Ph.D.

PRAHA 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele prof. Ing. Miroslava Müllera, Ph.D. a konzultanta doc. Rajeshe Kumara Mishry, Ph.D. a uvedl jsem veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Martin Tichý

PODPIS:

DATUM: 18.04.2022

Poděkování

Tímto chci poděkovat svému školiteli prof. Ing. Miroslavu Müllerovi, Ph.D. a konzultantovi doc. Rajeshi Kumaru Mishrovi, Ph.D. za odborné konzultace a vedení při samotných výzkumech a dalších činnostech během studia a následném zpracování disertační práce. Současně chci poděkovat Technické fakultě za podporu výzkumů při studiu skrze Interní grantovou agenturu.

Abstrakt

Disertační práce se zabývá hybridními lepenými spoji, které představují lepené spoje využívající kompozitní vrstvu jako spojovací element pro vytvoření lepeného spoje. Jedná se tedy o modifikaci samotného polymerního lepidla pomocí různých vyztužovacích prvků. Tyto prvky umožňují široké možnosti v ovlivnění výsledných mechanických vlastností kompozitní vrstvy a výsledného hybridního spoje. Častým problémem v technologii lepení je nízká životnost lepeného spoje, tj. stárnutí a cyklické namáhání. Právě odolnost spoje vůči cyklickému namáhání lze ovlivnit díky různým výztužím v hybridním lepeném spoji, a tím zvýšit životnost spoje.

Práce hodnotí mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů s různými 100% bavlněnými tkaninami ve statických a cyklických podmínkách a vliv alkalické povrchové úpravy (NaOH) bavlněných tkanin na mechanické vlastnosti. Biologická vlákna v polymeru se vyznačují nízkou smáčivostí s matricí, což snižuje mechanické vlastnosti. Adhezní vazby obvykle pracují v cyklickém namáhání, které způsobuje nevratné selhání před dosažením maximální pevnosti. Dalším parametrem výzkumu je způsob přeplátování hybridních lepených spojů, kdy byly sledovány jak standardní přeplátované spoje, tak spoje s tvarovou geometrií přeplátování. Výsledky analýzy SEM prokázaly dobrou smáčivost bavlněné tkaniny ošetřené roztokem NaOH v hybridních lepených spojích. Statická zkouška prokázala vliv zpevňujících bavlněných tkanin na pevnost ve smyku proti čisté pryskyřici. Lepené spoje s čistou pryskyřicí neodolaly nízkocyklovým zkouškám a došlo vždy k přetržení před požadovaným počtem zatěžujících cyklů. Vyztužující bavlněné tkaniny odolaly oběma nízkocyklovým zkouškám. Výsledky rozdílu deformace u hybridních lepených spojů potvrdily, že nižší hodnota rozdílu při cyklickém zatěžování pozitivně ovlivňuje následující pevnost ve smyku.

Klíčová slova: přírodní kompozity, únava a lomová mechanika, biologická tkanina, alkalická úprava, tvarová geometrie přeplátování, SEM analýza

Abstract

This dissertation deals with hybrid adhesive bonds, which are adhesive bonds that use a composite layer as a bonding element to form an adhesive bond. Therefore, it is a modification of the polymer adhesive itself by using different reinforcing elements. These elements allow a wide range of possibilities in influencing final mechanical properties of the composite layer and the final hybrid bond. A common problem in bonding technology is the low durability of the adhesive bonds, namely aging and cyclic stresses. It is the resistance of the bond to cyclic stresses that can be influenced by different reinforcements in the hybrid adhesive bond and increase the service life of the bond.

This study evaluates the mechanical properties of hybrid adhesive bonds with different 100% cotton fabrics under static and cyclic conditions and the effect of alkaline surface treatment (NaOH) of cotton fabrics on the mechanical properties. The bio-fibres in the polymer are characterized by low wettability with the matrix, which reduces the mechanical properties. Adhesive bonds usually operate under cyclic stresses that cause irreversible failure before reaching maximum strength. Another parameter of the research is the method of overlapping of hybrid adhesive bonds, where standard overlap bonds and bonds with shaped overlapping geometry were followed. The results of SEM analysis showed good wettability of cotton fabric treated with NaOH solution in hybrid adhesive bonds. The static test showed an impact of the reinforcing cotton fabrics on the shear strength against pure resin. The adhesive bonds with single resin did not resist cyclic tests and bonds failed before the required number of load cycles. Reinforcing cotton fabrics withstood both cyclic tests. The strain difference results for the hybrid adhesive bonds confirmed that the lower value of the difference under cyclic loading positively affects the subsequent shear strength.

Key words: green composite, fatigue and fracture mechanics, biological fabric, alkali treatment, shaped overlapping geometry, SEM analyse

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU POZNÁNÍ	2
2.1	Problematika technologie lepení	2
2.2	Definice hybridního lepeného spoje	3
2.3	Skladba a konstrukce hybridního lepeného spoje na bázi kompozitu	6
2.4	Polymerní lepidla – matrice.....	7
2.5	Vyztužující složka polymerních kompozitů	9
2.6	Mechanismus adheze	12
2.7	Adhezní a kohezní charakteristika.....	14
2.8	Povrchové napětí kapalin.....	15
2.9	Povrchová úprava kompozitních složek	16
2.10	Vliv tloušťky lepené vrstvy	18
2.11	Degradace hybridních lepených spojů.....	20
2.12	Charakteristika hybridních spojů při namáhání	20
3	VĚDECKÉ HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE	23
4	MATERIÁL A METODY	24
4.1	Charakteristika kompozitní vrstvy	24
4.2	Příprava adherendu	27
4.3	Epoxidová matrice	29
4.4	Příprava vyztužující tkaniny	29
4.5	Statické zkoušky hybridních lepených spojů	30
4.6	Nízkocyklové zkoušky hybridních lepených spojů.....	31
4.7	Zpracování naměřených hodnot	33
4.8	Statistické vyhodnocení naměřených hodnot.....	35
4.9	SEM analýza kompozitní vrstvy	35
5	VÝSLEDKY A DISKUZE	37
5.1	Nízkocyklová zkouška hybridních lepených spojů na bázi upravené bavlny a vrstvy epoxidové pryskyřice	37
5.2	Experimentální výzkum vlnovitě přeplátovaných spojů s vyztužující přírodní bavlněnou tkaninou při cyklickém zatížení	50

5.3	Další výsledky v oblasti lepení a kompozitních materiálů	63
6	ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ POZNATKŮ V PRAXI NEBO PRO DALŠÍ ROZVOJ OBORU	66
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI AUTORA	77
	SEZNAM ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Lemový lepený spoj [14].....	3
Obr. 2 Lepený spoj doplněn o mechanický spoj: A: šroubový spoj, B: nýtový spoj, C: bodový svar [2]	4
Obr. 3 Hybridní lepený spoj na bázi lepidla a vyztužující složky [15]	5
Obr. 4 Skladba hybridního lepeného spoje.....	6
Obr. 5 Typy konstrukce lepených spojů [13]	7
Obr. 6 Rozdělení polymerních kompozitů [33,34]	10
Obr. 7 Schéma mechanismu selhání vazby [53].....	15
Obr. 8 Schematické znázornění nízké a vysoké povrchové energie [59].....	15
Obr. 9 Schéma rozložení plastické smykové deformace lepidla na délce přeplátování v závislosti na tloušťce vrstvy lepidla pro (a) nízká vrstva lepidla a (b) vysoká vrstva lepidla [13]	19
Obr. 10 Vznik ohybového momentu u lepeného spoje: a) působení excentrických sil, b) důsledky ohybového momentu [3]	20
Obr. 11 Wöhlerova křivka [16]	22
Obr. 12 Smluvní a skutečný tahový diagram [76].....	23
Obr. 13 Schéma hybridního lepeného spoje s kompozitní vrstvou	26
Obr. 14 Hybridní lepený spoj s tvarovou geometrií přeplátování [17]	27
Obr. 15 Upravený povrch adherendu v tryskací komoře.....	29
Obr. 16 Tvářecí forma pro výrobu tvarové geometrie přeplátování [17].....	30
Obr. 17 Univerzální zkušební stroj LABTest 5.50 ST	32

Obr. 18 Průběh zatížení při nízkocyklové zkoušce	33
Obr. 19 Snímky SEM bavlněné výztužné tkaniny Bjaz: A: Pohled na výztužnou tkaninu (MAG 100 x), B: Povrchová struktura bavlněných vláken neošetřených (MAG 3,00 kx), C: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH (MAG 3,00 kx) [15]	38
Obr. 20 Snímky SEM bavlněné výztužné tkaniny: A: Povrchová struktura neošetřených bavlněných vláken – tkanina Thomas Alan (MAG 5,00 kx) B: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH – tkanina Thomas Alan (MAG 9,00 kx), C: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH – tkanina Bjaz (4,00 kx) [15]	39
Obr. 21 Snímky průřezu hybridního lepeného spoje pořízené metodou SEM: A: dispozice lepeného spoje (MAG 100 x), B: detailní pohled na vrstvu lepeného spoje (MAG 2,00 kx) [15]	40
Obr. 22 Snímky SEM hybridního lepeného spoje – tkanina Bjaz: A: Lomový povrch hybridního lepeného spoje po destrukci (MAG 7,00 kx), B: Průřez nezatíženého lepeného spoje (MAG 2,00 kx), C: Průřez cyklicky zatíženého lepeného spoje (MAG 2,00 kx) [15]	41
Obr. 23 Typy lomové plochy lepených spojů: A: Adhezivně-kohezivní porušení lepeného spoje Bjaz, B: Adhezivní porušení lepeného spoje Thomas Alan	42
Obr. 25 Výsledky pevnosti v tahu ve smyku u lepených spojů s ošetřenými a neošetřenými tkaninami pomocí statické zkoušky [15]	43
Obr. 26 Výsledky deformace lepených spojů s ošetřenými a neošetřenými tkaninami pomocí statické zkoušky [15]	44
Obr. 27 Rozdíl deformace v intervalu 1–1000 cyklů ($\Delta\epsilon$) při cyklickém zatížení [15]	46
Obr. 28 Pevnost ve smyku při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N) [15]	47
Obr. 29 Deformace při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N) [15]	48

Obr. 30 Nízkocyklový průběh zatěžování 5–50 % a 5–70 % pro lepené spoje s tkaninou Bjaz a Tera [15]	49
Obr. 31 Nízkocyklový průběh zatížení 5–50 % a 5–70 % pro lepené spoje s tkaninou Thomas Alan a Erik [15]	50
Obr. 32 Vyhodnocení výsledků tahové pevnosti lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje [17]	53
Obr. 33 Vyhodnocení výsledků deformace lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje [17]	54
Obr. 34 Vyhodnocení výsledků modulu pružnosti lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje [17]	55
Obr. 35 Vyhodnocení výsledků tahové pevnosti lepeného spoje při statickém zatížení a cyklickém zatížení v zátěžovém intervalu 5–50 % a 5–70 % [17].....	56
Obr. 36 Vyhodnocení výsledků deformace lepeného spoje při statickém zatížení a cyklickém zatížení v zátěžovém intervalu 5–50 % a 5–70 % [17]	57
Obr. 37 Viskoelastické chování lepeného spoje s vyztužující tkaninou Erik s rozdílnou konstrukcí spoje při cyklickém zatížení 5–50 % [17]	59
Obr. 38 Viskoelastické chování lepeného spoje s vyztužující tkaninou Tera s rozdílnou konstrukcí spoje při cyklickém zatížení 5–50 % [17]	59
Obr. 39 Snímky SEM: (A): Bavlněná tkanina Erik (MAG 150 x); (B): Detailní pohled na tkaninu – osnovu (bavlněné vlákno) bez alkalické úpravy (MAG 5.00 kx); (C): Detailní pohled na tkaninu – osnovu (bavlněné vlákno) s alkalickou úpravou v 10% roztoku NaOH po dobu 30 minut (MAG 5.00 kx) [17]	60
Obr. 40 Snímky SEM vzorků řezů lepeným spojem: (A): řez Tera-Standard, 0 cyklů (MAG 150 x), (B): řez Erik-WH1, 1000 cyklů v intervalu 5–50 % (267–2674 N) (MAG 150 x), (C): řez Resin-WH2, 0 cyklů (MAG 150 x) [17].....	61
Obr. 41 Snímky SEM příčného řezu lepeným spojem: (A): řez lepeným spojem Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 300 x); (B): řez lepeným spojem Erik-	

WH1, 1000 cyklů v intervalu 5–50 % (267–2674 N) (MAG 1.50 kx); (C): řez lepeným spojem Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 1.50 kx) [17]..... 62

Obr. 42 Snímky SEM příčného řezu testovaného lepeného spoje: (A): příčný řez Resin-Standard (MAG 5.00 kx), (B): příčný řez Erik-WH1, 1000 cyklů v intervalu 5–50 % (267–2674 N) (MAG 5.00 kx), (C): příčný řez Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 1.50 kx) [17] 62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Druhy vláken dle materiálu [autor, 44–48]	11
Tab. 2 Rozdělení vláknových výztuží dle orientace vláken [35]	12
Tab. 3 Parametry hybridního lepeného spoje [80, autor]	27
Tab. 4 Parametry hybridního lepeného spoje s tvarovou geometrií přeplátování	28
Tab. 5 Základní mechanické vlastnosti v tahu oceli S235J0 při teplotě 20 °C [81].....	28
Tab. 6 Orientační chemické složení oceli S235J0 [81]	29
Tab. 7 Výsledky statické zkoušky s ošetřenými a neošetřenými tkaninami v porovnání s čistou pryskyřicí (RESIN) [15]	43
Tab. 8 Výsledky nízkocyklové zkoušky s nižším intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a vyšším intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N) lepených spojů s upravenými tkaninami [15]	45
Tab. 9 Výsledky statických tahových zkoušek na mechanické vlastnosti lepených spojů a statistické vyhodnocení dat (p-hodnota) [17]	52
Tab. 10 Výsledky cyklických zkoušek na mechanické vlastnosti lepených spojů v intervalu zatížení 5–50 % a 5–70 %	56

1 ÚVOD

Disertační práce se zabývá hybridními lepenými spoji, které představují lepené spoje využívající kompozitní vrstvu jako spojovací element pro vytvoření lepeného spoje. Jedná se tedy o modifikaci samotného polymerního lepidla pomocí různých vyztužovacích prvků. Tyto prvky umožňují ovlivnění výsledných mechanických vlastností kompozitní vrstvy a výsledného hybridního spoje. Častým problémem v technologii lepení je nízká životnost lepeného spoje, a to stárnutím a cyklickým namáháním. Právě odolnost spoje vůči cyklickému namáhání lze ovlivnit díky různým vyztužujícím prvkům v hybridním lepeném spoji, a tím zvýšit životnost spoje.

Práce hodnotí vliv různých bavlněných tkanin na životnost lepeného hybridního spoje pomocí výsledných mechanických vlastností hybridních lepených spojů při statických a cyklických zkouškách a vliv alkalické povrchové úpravy (NaOH) bavlněných tkanin na mechanické vlastnosti. Biologická vlákna v polymeru se vyznačují nízkou smáčivostí s matricí, což snižuje mechanické vlastnosti. Adhezní vazby obvykle pracují v cyklickém namáhání, které způsobuje nevratné selhání před dosažením maximální pevnosti. Práce dále hodnotí způsob přeplátování hybridních lepených spojů, kdy byly sledovány jak standardní přeplátované spoje, tak spoje s tvarovou geometrií přeplátování.

Výsledky disertační práce prokázaly vliv zpevňujících bavlněných tkanin na pevnost ve smyku proti čisté pryskyřici při statických zkouškách. Lepené spoje s jednoduchou pryskyřicí neodolaly žádným cyklickým zkouškám. Vyztužující bavlněné tkaniny odolaly oběma cyklickým zkouškám. Výsledky rozdílů deformace u hybridních lepených spojů potvrdily, že nižší hodnota rozdílů při cyklickém zatěžování pozitivně ovlivňuje následující pevnost ve smyku. Výsledky analýzy SEM prokázaly dobrou smáčivost alkalicky ošetřené bavlněné tkaniny roztokem NaOH v hybridních lepených spojkách.

2 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU POZNÁNÍ

Technologie lepení představuje v současné době jednu z perspektivních metod spojování různých materiálů. Lepení různých materiálů nachází uplatnění např. v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu [1, 2]. Dynamický vývoj technologie lepení je dán různými možnostmi, které tento proces nabízí ve srovnání s konvenčními způsoby spojování (svařování, pájení, nýtování atd.). Významnou výhodou lepení je široké spektrum lepených materiálů, nízké náklady a pracnost. Technologie lepení může plnit i podpůrné funkce, jako je těsnění, upínání a upevňování [3, 4]. Výzkumy lepených spojů se zaměřují zejména na pevnost lepených spojů [3–6]. Faktory, které ovlivňují pevnost lepených spojů, jsou fyzikální a chemické faktory (smáčivost, adheze a koheze) [3, 7], technologické faktory (drsnot a struktura povrchu) [8, 9] a konstrukční faktory (konstrukce, rozměry a typ zatížení) [10, 11].

Použití lepených spojů, jako konstrukční prvky v automobilovém průmyslu, se v posledních letech výrazně rozšířilo a přináší mnoho výhod, které v konečném důsledku povedou k nižší hmotnosti vozidel, úspoře paliva a snížení emisí. Hlavními výhodami jsou flexibilita konstrukce, možnost konsolidace dílů a spojování různorodých a/nebo nových materiálů [12]. Dalšími výhodami lepeného spoje jsou vyšší únavová pevnost a nízká hmotnost konstrukce ve srovnání s jinými mechanickými spoji. Lepené spoje jsou lehčí, levnější, odolné proti korozi a porušení. U lepených spojů nejsou nutné obráběcí operace, jako je např. vrtání. Mají pružnější charakter a brání šíření trhlin v lepené vrstvě, to vede k delší únavové životnosti [12].

2.1 Problematika technologie lepení

Zjištění příčin selhání spoje může být někdy obtížné a je jich třeba vzít v úvahu celou řadu [13]. U různých druhů lepených spojů zahrnujících různé materiály je výběr lepidla obtížnější, protože každý lepený spoj vyžaduje odpovídající lepidlo a na trhu není k dispozici univerzální lepidlo na všechny aplikace. Během procesu lepení kovových adherendů je pro dosažení vysoké pevnosti spoje nezbytná úprava povrchu, jako je leptání a odmašťování. [4, 8, 13]

Jedním z problémů při lepení je kontaminace povrchu materiálu. Nesprávné čištění mastnot, olejů a jiných nečistot na povrchu materiálu může potenciálně způsobit selhání lepeného spoje. Jedním z možných zdrojů kontaminace jsou silikonové sedimenty usazené na povrchu, které brání lepení. Při používání silikonů nebo jiných separačních prostředků je třeba dbát na to, aby

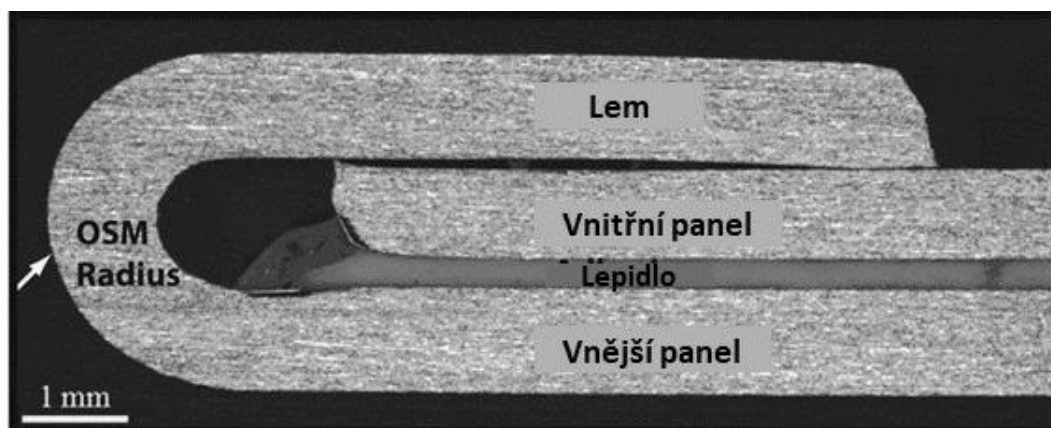
nedošlo ke křížové kontaminaci. Ačkoli chemické ošetření dává předpoklad maximální pevnosti spoje, pokud se ale ošetřený povrch okamžitě nespojí, tak se povrch znečistí a zoxiduje. Pevnost spoje se snižuje zejména v důsledku degradace povrchu lepidla. [4, 8, 13]

Současným trendem jsou stoupající nároky na životnost, a především bezpečnost spoje. Některé aplikace lepených spojů naráží na své maximální přípustné parametry. Z tohoto důvodu se čím dál více objevují řešení, jak lepené spoje modifikovat, aby splnily vyšší nároky na provozní podmínky. K překonání těchto nevýhod lepeného spoje byly navrženy různé typy hybridních lepených spojů kombinací mechanických a chemických složek. [5, 6, 13–17]

2.2 Definice hybridního lepeného spoje

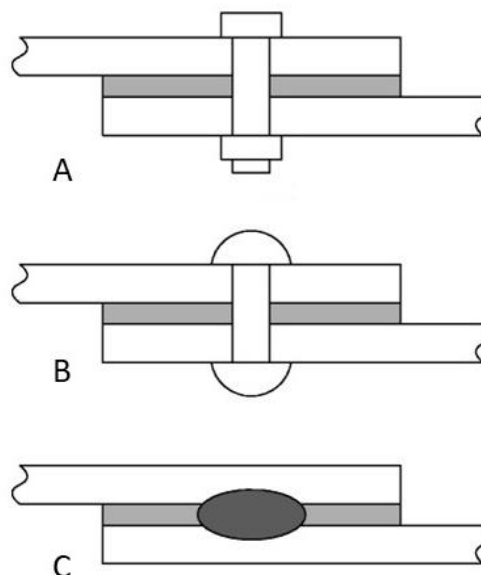
Hybridní lepený spoj je odvozen od standardního lepeného spoje, kdy jsou adhezní vlastnosti spoje modifikovány nějakou další složkou. Jedná se tedy o spojení dvou materiálů pomocí více složek nežli jen lepidla. Mezi tyto modifikující složky lepeného spoje se řadí bodové svařování, nýtování, lemování a šroubové spojování viz obr. 1 a 2. Kombinací tohoto mechanického spoje s lepeným spojem vzniká výsledný hybridní lepený spoj. [14]

Obr. 1 Lemový lepený spoj



[14]

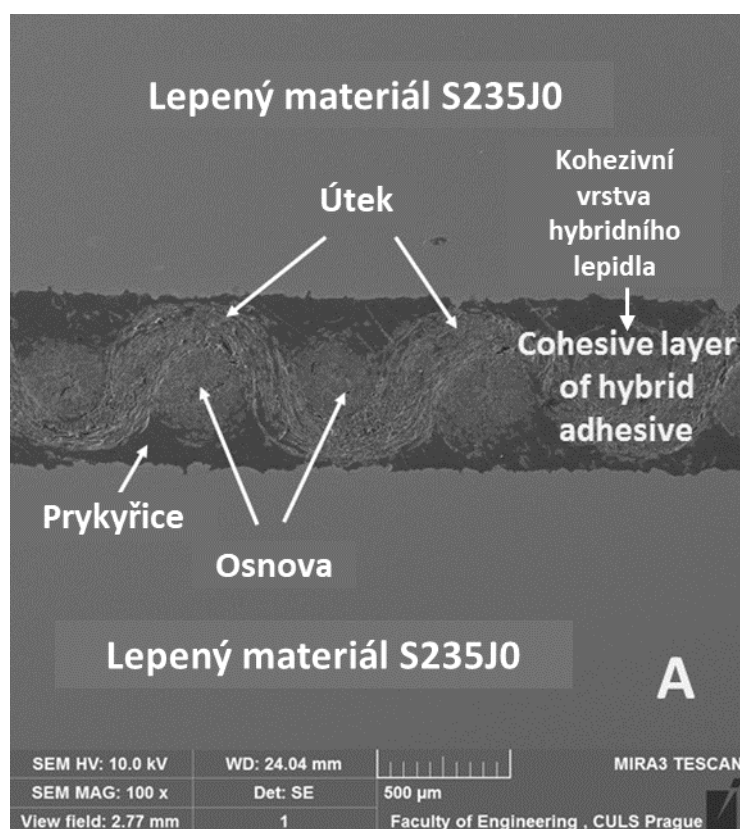
Obr. 2 Lepený spoj doplněn o mechanický spoj: A: šroubový spoj, B: nýtový spoj, C: bodový svar



[2]

Další skupinou hybridních spojů je modifikace samotného lepidla různými vyztužujícími složkami viz obr. 3. Jedná se tedy vytvoření kompozitní vrstvy na bázi lepidla, která spojí adherendy a vytvoří hybridní lepený spoj. Tento typ hybridního spoje byl předmětem výzkumu v disertační práci. Současným trendem v oblasti výzkumu jsou lepené spoje s kompozitní vrstvou, kde se jako plnivo používá biologický materiál [5]. Biologické materiály lze tak použít jako náhradu těch syntetických [5]. V současnosti se klade velký důraz na udržitelnost v průmyslových odvětvích a využití přírodních nebo recyklovaných materiálů [4, 5, 13, 15, 17, 18].

Obr. 3 Hybridní lepený spoj na bázi lepidla a vyztužující složky



[15]

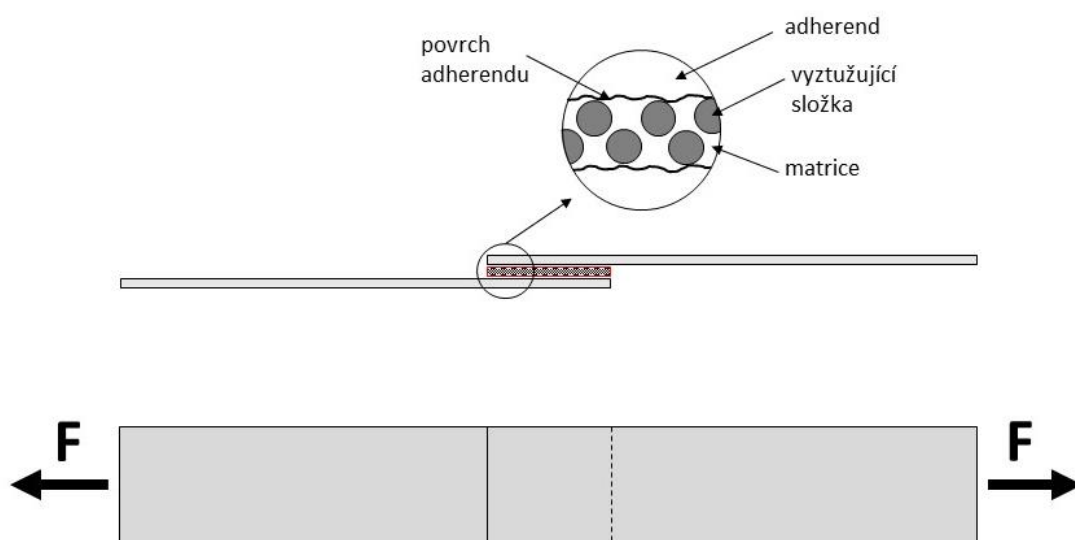
Využití kompozitního materiálu v lepených spojkách má velkou výhodu, jelikož vhodnou kombinací fyzikálních, chemických nebo mechanických vlastností, vzniká vícesložkový materiál, který využívá charakter jednotlivých složek v jedné soustavě. Takto vytvořené kompozitní materiály dosahují parametrů, které lze specifikovat pro použití u konkrétní aplikace. [4, 5, 13, 15, 17, 18]

Základem laboratorního testování lepených spojků pro stanovení mechanických vlastností spoje je zkouška tahem ve smyku jednoduše přeplátovaných těles podle normy ČSN EN 1465 (Lepidla – Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech). Výše uvedená zkouška tahem jednoduše přeplátovaných lepených spojků je nejrozšířenější metodou destruktivních zkoušek napříč obory využívající lepené spoje, dle autorů studie Broughtona, Mera a Hinopoulou z "Centre for Materials Measurement & Technology" [11]. Ve svém experimentu autoři vycházeli z normy BS EN 1465:1995, "Adhesives – Determination of Tensile Lap-shear Strength of Rigid-to-Rigid Bonded Assemblies", která je s normou ČSN EN 1465 totožná.

2.3 Skladba a konstrukce hybridního lepeného spoje na bázi kompozitu

Hybridní lepený spoj na bázi kompozitního materiálu se rozděluje do tří základních fází, tím je matrice, vyztužující složka a adherend viz obr. 4. Matrice ovlivňuje kompozit svými chemickými vlastnostmi. Vyztužující složka ovlivňuje kompozit svými mechanickými i chemickými vlastnostmi. Adherend ovlivňuje kompozit rovněž mechanickými a chemickými vlastnostmi, a to především strukturou povrchu a jeho čistotou.

Obr. 4 Skladba hybridního lepeného spoje



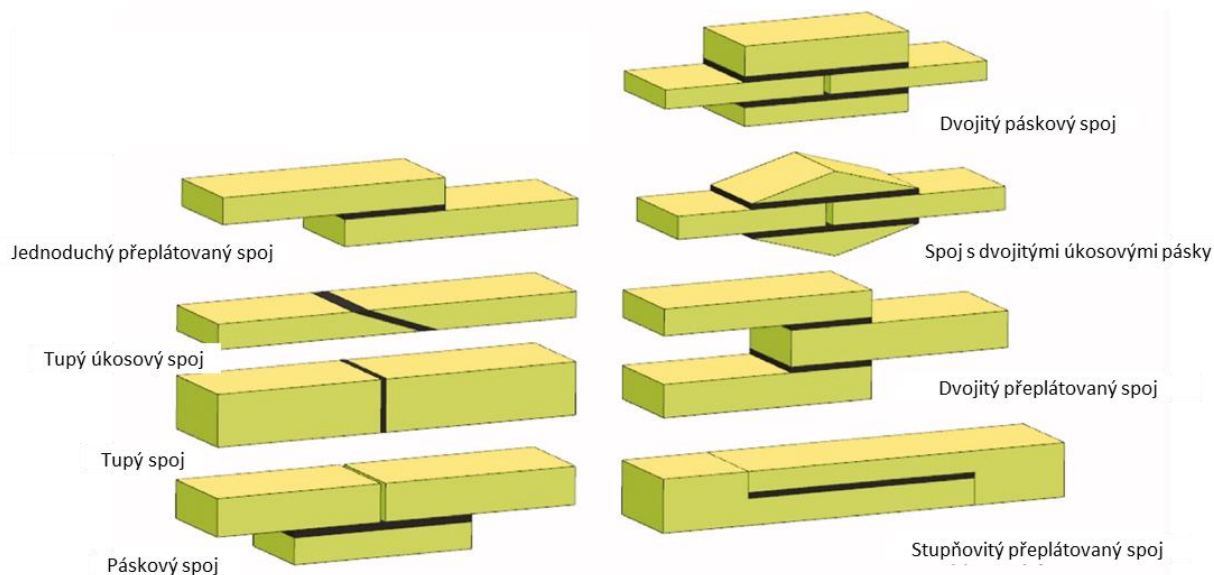
[autor]

Jedním z hlavních předpokladů pro správnou funkci kompozitního systému je tzv. synergický efekt. Synergický efekt definuje správnou interakci mezi rozhraním jednotlivých složek či fází kompozitního systému. Jedná se o mezifázovou adhezi mezi matricí, vyztužující složkou a adherendem. Tyto adhezní vlastnosti ovlivňují výsledný kompozit, což vede ke zlepšení mechanických vlastností [18–20]. Při vysoké adhezi dosahuje kompozit vysoké mechanické pevnosti, oproti tomu nižší adheze umožňuje kompozitu větší mechanickou houževnatost. Tyto principy adheze definuje „Mechanismus adheze“ [21].

2.3.1. Konstrukce lepeného spoje

V technologii lepení se lepidlo nanáší na spojované materiály a poté se spojí [13]. Ze studia literatury vyplývá, že je k dispozici mnoho příkladů podporujících vhodné lepené spoje pro všechny druhy mechanického zatížení [10]. Ke spojení jednotlivých materiálů lze použít různé typy spojů, jako je jednoduchý přeplátovaný spoj, dvojitý přeplátovaný spoj, tupý úkosový spoj, tupý spoj, páskový spoj, dvojitý páskový spoj, úkosový dvojitý páskový spoj a stupňovitý přeplátovaný spoj, jak ukazuje obr. 5. Vhodně zvolený typ spoje závisí na způsobu zatížení, okolním prostředí, požadavcích na funkčnost a na celkové konstrukci daného výrobku.

Obr. 5 Typy konstrukce lepených spojů



[13]

2.4 Polymerní lepidla – matrice

Matrice u hybridních lepených spojů je výlučně tvořena polymerními lepidly. Matrice distribuuje napětí mezi všemi složkami hybridního spoje. Pro dosažení požadovaného synergického efektu je důležitá povrchová energie mezi rozhraním jednotlivých fází. Tato povrchová energie se charakterizuje smáčivostí matrice s povrchem adherendu a vyztužujících složek. Dalším ovlivňujícím faktorem je viskozita matrice pro správnou distribuci vyztužující složky. Pro vytváření lepených spojů se z hlediska viskozity nejčastěji využívají reaktoplasty,

a to zejména epoxidová lepidla, která dosahují dobrých mechanických vlastností, chemické odolnosti a dobré smáčivosti. [7, 22]

2.4.1. Rozdělení polymerních lepidel

Polymerní lepidla (matrice) lze rozdělit na tři základní kategorie dle molekulární struktury polymerů na lepidla reaktoplastická, termoplastická a elastomerní.

Reaktoplastická lepidla nemohou být po vytvrzení tavena. Vytvrzování probíhá chemickou reakcí za pokojové teploty. Díky síťované struktuře polymeru jsou lepené spoje odolné teplotám do 260 °C. Rovněž se vyznačují vysokou pevností a částečnou odolností proti elastické deformaci. Většina lepených spojů se provádí reaktoplastickými lepidly. [7, 22]

Termoplastická lepidla mohou být po vytvrzení roztavena bez zásadní změny vlastností. Ve většině případů se vytvrzení děje vypařením nosného média. Termoplastická lepidla mají nízkou teplotní odolnost, maximálně 90 °C. Jejich hlavní výhodou je možnost spojování různých materiálů bez předchozích povrchových úprav, zejména nekovových materiálů. Nosné médium je tvořené rozpouštědlem nebo vodní emulzí. Nízké tepelné odolnosti lze předejít velmi nízkou vrstvou. [7, 22]

Elastomerní lepidla se vyznačují dobrou houževnatostí a tažností. Jako nosné médium se využívá vodní emulze, která při vypaření spouští vytvrzovací reakci. Mají nižší pevnost, ale zato vynikající flexibilitu. [7,22]

Charakteristika polymerního lepidla je definována následujícími parametry:

- chemické složení;
- molekulární struktura;
- teplota skelného přechodu (pouze u termoplastů);
- viskozita;
- kontaktní úhel smáčivosti;
- tepelná odolnost;
- rozpustnost – ovlivňuje kohezní energii lepidla;
- reaktivita – udává vytvrzovací schopnost lepidla v závislosti na čase a teplotě okolí;
- skladovatelnost;
- vydatnost – udává měrnou spotřebu lepidla na plochu. [23, 24]

Polymerní lepidlo je látka, která spojuje dva a více materiály (adherendy) dohromady pomocí povrchových sil.

Polymerní lepidlo se skládá z pěti skupin:

- pojivo;
- nosné médium;
- katalyzátor a tvrdidlo;
- urychlovač, inhibitory a retardéry;
- modifikátory. [23, 25]

2.4.2. Epoxidové pryskyřice

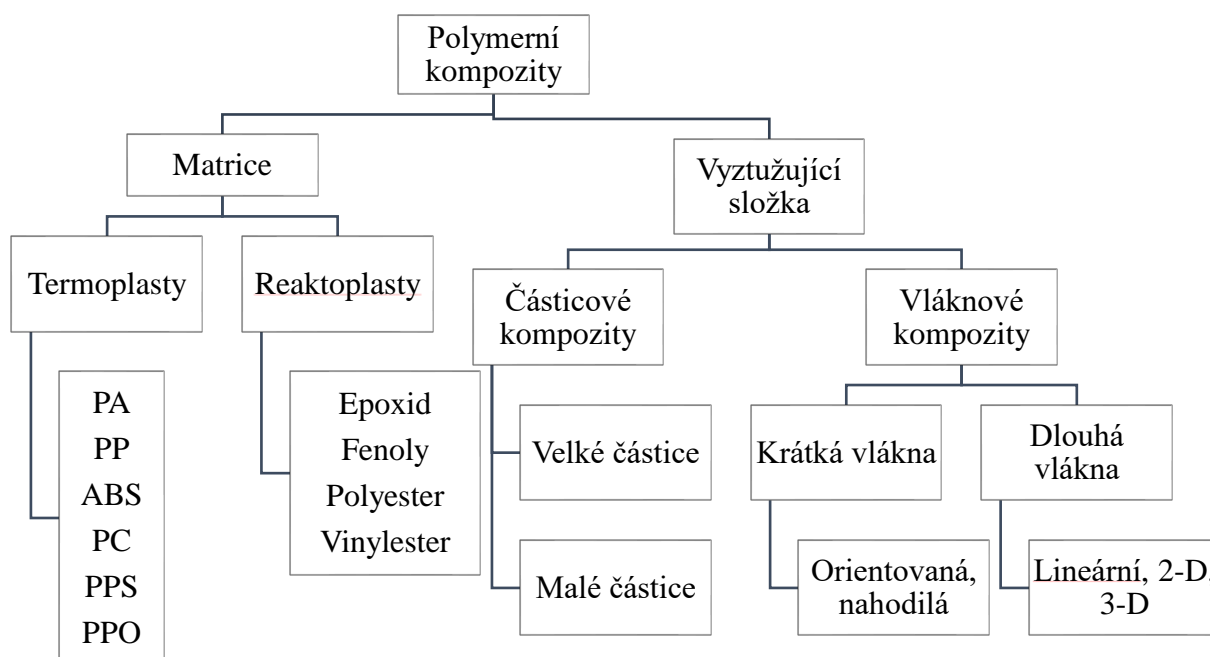
Pro kompozitní systémy se využívají převážně lepidla z kategorie reaktoplastických lepidel. Strukturální epoxidové pryskyřice jsou častým typem komerčních lepidel a jsou vhodné pro technologii lepení [26, 27]. Je to dáno jejich dobrými mechanickými vlastnostmi, chemickou a elektrickou odolností atd. Díky široké škále ve výběru epoxidových pryskyřic lze získat výrobek, který je vhodný pro dané provozní podmínky [28, 29]. Proto se epoxidové pryskyřice používají v mnoha průmyslových odvětvích od konstrukce letadel až po výrobu epoxidových nátěrů [22, 26, 29]. Výrazných změn vlastností epoxidové pryskyřice lze dosáhnout přidáním plniva, resp. výztuže [30–32].

Mezi nevýhody epoxidové pryskyřice patří časově omezená zpracovatelnost. Přidáním tvrdidla do epoxidové pryskyřice se zahájí chemická reakce a je časově omezená doba pro zpracování lepidla. Nejčastěji se doba zpracování u epoxidových pryskyřic pohybuje mezi 20 minutami až 1 hodinou, následně trvá 12 hodin úplné vytvrzení lepidla. Další nevýhodou je potřebná teplota pro vytvrzení a to od 10 °C až do 200 °C dle zvoleného typu epoxidové pryskyřice. [4, 22]

2.5 Vyztužující složka polymerních kompozitů

Vyztužující složka v kompozitním systému, představuje jeho nejdůležitější část. Pomocí vyztužující složky lze významně ovlivnit celkové vlastnosti kompozitu potažmo hybridního lepeného spoje. Tato vyztužující složka se rozděluje do několika kategorií podle tvaru, rozměrů, uspořádání a způsobu kladení výztuže do matrice viz obr. 6. [7, 16]

Obr. 6 Rozdělení polymerních kompozitů



[33, 34]

Obecným problémem u částicové výztuže je nepravidelné rozložení částic v matrici, např. sedimentace v adhezni vrstvě [33]. Vhodnou alternativou je využití syntetických a biologických vláken [33–37]. Specifické vlastnosti vláken, které ovlivnily jejich využití, jsou typ materiálu, orientace vláken, hmotnost a smáčivost s matricí [35–37]. Využití skelné tkaniny v lepených spojích prokázalo významný vliv na pevnost ve smyku [37]. Současný trend v oblasti polymerních kompozitů směřuje k využití biologického materiálu. Vznikají tak nové materiály označované jako biokompozity [38–42]. Biokompozity jsou alternativou pro výzkum v oblasti aplikace biologických vláken [43].

Biologická vlákna z bavlny, sisalu, lnu, konopí a juty jsou nejčastěji používanými vlákny na bázi celulózy v různých průmyslových oblastech viz tab. 1 [44–46]. Tato vlákna jsou vhodnou a levnou alternativou k syntetickým vláknům [47, 48]. Biologická vlákna se používají hlavně v aplikacích s nízkým zatížením, tj. např. v interiérech automobilů jako tlumicí vložky karosářských dílů a různé pohledové prvky, karosářské díly (např. nárazníky), různé kryty atd.

Biologická vlákna se používají především v orientované formě výztuže, tj. tkaniny, nitě a rohože [49].

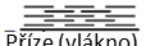
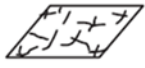


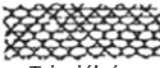
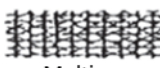
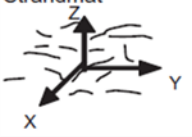





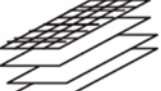


Tab. 1 Druhy vláken dle materiálu

Název vlákna	Zdroj
juta	stonky jutovníku
len	stonky lnu
konopné vlákno	stonky konopí
ramie	stonky ramie
kopřivová vlákna	stonky kopřivy dvoudomé
kenaf	stonky z ibišku konopovitého
sisal	listy agáve sisalové
abaka	listy banánovníku
kokosová vlákna	plody kokosové palmy
kapok	semena vlnovce pětimužného
bavlna	semena bavlníku
vlna (různé druhy)	vlna ze zvířecích srstí

[autor, 44–48]

Kompozitní materiály jsou ovlivněny samotnou vyztužující složkou, ale neméně důležitý je i způsob orientace vláken v matrici viz tab. 2. Jednosměrně orientovaná vlákna v kompozitu tvoří anizotropní materiál, ten dosahuje vysoké pevnosti při zatížení kompozitu ve směru orientace vláken, ale při zatížení kolmo na orientaci vláken je pevnost výrazně nižší. Aby byl kompozitní materiál izotropní, musí být vlákna orientována různými směry tak, aby zatížení působilo vždy ve směru vlákna. Pro dosažení tohoto požadavku se v kompozitních systémech používají tkané textilie, které se kladou v jedné nebo více vrstvách na sebe. V případě vrstvené výztuže musí být jednotlivé vrstvy textilie mezi sebou nahodile nebo preferovaně orientované. Způsob výroby kompozitních systémů je definován normou ISO 8604, která označuje typ kompozitu, typ pryskyřice, typ výztuže, formu výztuže a orientaci výztuže. [16, 35]

Tab. 2 Rozdělení vláknových výztuží dle orientace vláken

Axiála Rozměr		Neaxiální	Mono-axiální	Biaxiální	Triaxiální	Multi-axiální
		1D		 Příze (vlákno)		
2D		 Sekané	 Rovnaná vlákna	 Jednoduchý úplet	 Triaxiální úplet	 Multi-axiální úplet
3D	Lineární prvky	 Strandmat	 3D úplet	 Vícenásobný úplet	 Triaxiální 3D úplet	 Multi-axiální 3D úplet
	Plošné prvky		 Laminovaný typ	 H nebo I nosník	 Voštinový typ	

[35]

Biologická vlákna v polymerním kompozitu se vyznačují nízkou smáčivostí s matricí, což snižuje mechanické vlastnosti kompozitu [50], zatímco samotná vlákna mají relativně dobré mechanické vlastnosti [51]. Nízká smáčivost biologických vláken je dána nežádoucím povrchem, tj. zbytky hemicelulózy, ligninu, pektinu a olejů. Tyto složky obsahují mnoho hydroxylových skupin a dodávají vláknům hydrofobní charakter. Hydrofobní vlákna s hydrofobní matricí (pryskyřicí) vytvářejí nízkou smáčivost, která vede k negativnímu ovlivnění mechanických vlastností polymerního kompozitu. [51–53]

2.6 Mechanismus adheze

Adheze představuje schopnost materiálu spojit dva samostatné povrchy a vytvořit tak spoj. Princip adheze spočívá ve vytváření mechanických, chemických a fyzikálních vazeb mezi jednotlivými povrchy spojovaných těles. Jedná se o tzv. mezifázové síly, které působí při adhezi dvou těles. Adhezní vazby lze definovat dvěma způsoby, a to dle teoretické adheze a experimentální adheze změřené laboratorními zkouškami. Teoretická adheze je definována dle jednotlivých fyzikálních jevů, kterými jsou mechanická, chemická, elektrostatická, absorpční a difuzní teorie adheze. Experimentální adheze je definována pomocí experimentálního měření, kterými jsou měření smáčivosti, kontaktního úhlu a mezifázového napětí. Dále se adheze určuje pomocí destruktivních zkoušek, jako jsou:

- stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav (ČSN EN 1465);
- stanovení odolnosti lepených spojů proti odlupování – Metoda kontinuálního navíjení (ČSN EN 1464);
- stanovení pevnosti v ohybu, 3 a 4 bodový ohyb (DIN 53293). [3, 11]

2.6.1. Mechanická teorie adheze

Princip mechanické adheze spočívá ve struktuře lepeného povrchu neboli drsnosti, kdy lepidlo obtéká povrch adherendu a po zatvrdnutí se lepidlo zaklíní s povrchem adherendu. Pevnost adhezní vazby pak spočívá v mechanickém zajištění lepidla s adherendem. Z toho vyplývá, že lepidlo tvoří silnější vazbu na povrchu s větší drsností. [3, 16]

2.6.2. Chemická teorie adheze

Chemická adheze je založena na vzniku vazeb na rozhraní lepidla a adherendu. Tyto vazby jsou rozděleny na primární chemické vazby a sekundární fyzikální vazby. Primární vazby jsou tvořeny uvnitř polymerního řetězce lepidla, kde sdružují jednotlivé atomy o vazební energii až $640 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Primární chemické vazby se rozdělují na iontové, kovalentní a kovové vazby. Kovalentní vazby vznikají mezi atomy se společnou dvojicí elektronů. Iontové vazby jsou tvořeny elektrostatickou energií, která přitahuje pozitivně či negativně nabitě ionty. Kovové vazby přitahují anionty a volné elektrony. [3, 16]

Zatímco sekundární fyzikální vazby působí mezi polymerním řetězcem lepidla a povrchem adherendu při mezifázové vzdálenosti od 0,3 až 1 nm s vazební energií maximálně $20 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Sekundární vazby se rozdělují na mezimolekulární a Van der Waalsovy vazby. Tyto vazby se dále rozdělují na polární, disperzní a indukční síly. [3, 16]

2.6.3. Elektrostatická teorie adheze

Elektrostatická adheze působí mezi povrchem lepidla a adherendem pomocí elektrostatických sil. Elektrostatické adhezní síly jsou tvořeny na rozhraní elektrické vrstvy lepidla a adherendu. Tyto síly ovlivňují celkovou adhezní schopnost lepeného spoje. [3]

2.6.4. Absorpční teorie adheze

Absorpční adheze se skládá z absorpce plynů povrchem adherendu, primárních chemických vazeb a sekundárních fyzikálních vazeb. [3]

2.6.5. Difuzní teorie adheze

Difuzní adheze nastává pouze u na sebe působících polymerů při teplotě skelného přechodu, kdy vzniká vazba mezi polymerními řetězci při tloušťce mezifázové vrstvy 1–100 nm. [3]

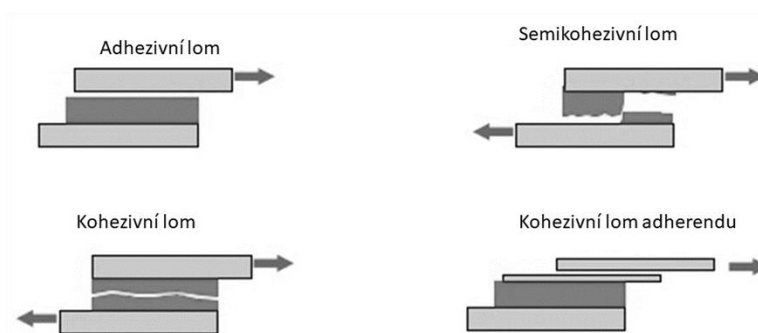
2.7 Adhezní a kohezní charakteristika

Adhezní a kohezní charakteristika u hybridních lepených spojů definuje mikrostrukturu mezi adherendem, vyztužující složkou a lepidlem a jejich adhezivní schopnosti. Tato charakteristika mikrostruktury a jejich dějů se rovněž označuje jako mezifázové rozhraní lepeného spoje [3]. Toto rozhraní může být negativně ovlivněno strukturou povrchu a okolním prostředím, jako je např. nečistota nebo výskyt vzduchu v místě stykové plochy [19]. V případě vyztužující složky to je nízká smáčivost povrchu výztuže v lepidle (matrici) [53]. Pro dosažení silného mezifázového rozhraní jsou vhodné různé povrchové úpravy.

2.7.1. Mechanismus selhání vazby

Selhání vazby nejčastěji nastává z důvodu samotného lepidla nebo při aplikaci lepidla. Jedním ze zdrojů selhání vazby jsou tzv. vnitřní chyby lepidla, mezi které patří vzduchové bubliny, praskliny, prachové částice, nehomogenity v lepidle a v některých případech to mohou být samotné zpevňující částice nebo vlákna důsledkem nedostatečné smáčivosti. Vlivem těchto chyb nastává v lepeném spoji lom. Aby bylo možné tento lom charakterizovat, je rozdělen do kategorií na lom adhezivní, kohezivní a semikohezivní viz obr. 7. Pokud nastane 100% kohezivní lom, je to ideální selhání vazby z toho důvodu, že bylo dosaženo maximální pevnosti lepidla. Při 100% adhezivním lomu je zřejmé, že je hraniční vrstva slabá a nebylo využito maximální pevnosti lepidla. Může to být způsobeno špatnou smáčivostí lepidla, špatně připraveným povrchem nebo špatnou aplikací lepidla. [3, 19]

Obr. 7 Schéma mechanismu selhání vazby



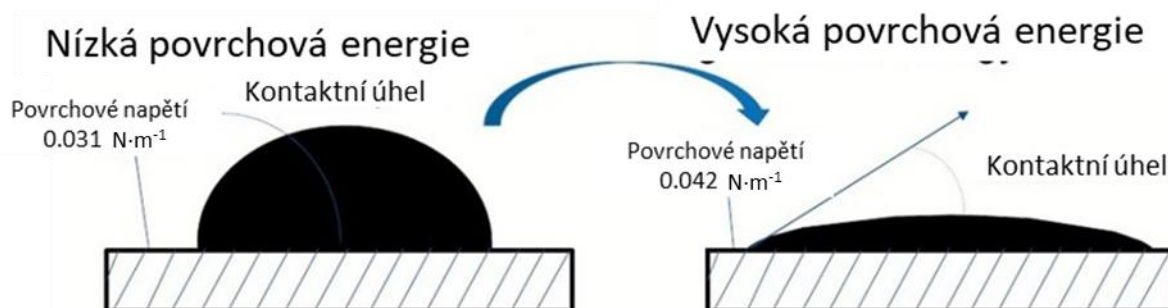
[53]

2.8 Povrchové napětí kapalin

Smáčivost povrchu neboli adheze kapalin k pevným látkám je v současnosti nejpoužívanější metodou pro zjištění výsledné adheze mezi povrchy. Hlavním faktorem pro smáčivost je povrchové napětí kapaliny. Povrchové napětí je tvořeno skupinou mezimolekulárních sil, které sdružuje jednotlivé molekuly. Jedná se o polární, disperzní a indukční síly. Tato soudržnost molekul v kapalině je označována jako koheze. Povrchové napětí vzniká při působení povrchové energie dvou složek na jejich rozhraní, tj. styčná plocha kapalně a pevné látky. Povrchové napětí závisí na rozdílu povrchové energie mezi kapalnou a pevnou látkou. [55–62]

Velikost smáčivosti definuje kontaktní úhel neboli úhel smáčení, který určuje velikost adhezivní vazby mezi lepidlem a adherendem viz obr. 8.

Obr. 8 Schematické znázornění nízké a vysoké povrchové energie



[59]

2.9 Povrchová úprava kompozitních složek

Pomocí úprav povrchu lze ovlivnit smáčivost i mezifázové rozhraní. To má za následek zvýšení adhezních schopností daného povrchu a zvýšení pevnosti celého spoje. Povrchová úprava a čistota stykové plochy je základem kvalitního lepeného spoje. Úprava povrchu musí korespondovat s požadavky lepidla a využít tak jeho maximální schopnosti. Povrch musí být zbaven všech nečistot a nežádoucích vrstev, kterými jsou oxidy, oleje, maziva a nátěry. [54]

2.9.1. Úprava povrchu vyztužujících vláken

Zlepšení smáčivosti, resp. povrchové struktury vláken lze dosáhnout alkalickou úpravou roztokem NaOH [46, 51–62]. Především přírodní vlákna jsou problematická vzhledem k adhezním schopnostem k lepidlu. Je to dáno strukturou povrchu přírodních vláken, který je z chemického hlediska tvořen z celulózy, hemicelulózy, ligninu a zbytek je tvořen pektinem, voskem a dalšími povrchovými nečistotami. Alkalická úprava povrchu vede k odstranění ligninu, hemicelulózy, vosku, olejů a depolymerizaci celulózy [60, 61]. Výsledkem úpravy je zvýšení drsnosti vláken [53]. Tímto se zamezí hydrofobnímu účinku a zvětší se povrchová energie vlákna a zvýší se smáčivost v matrici.

Současná tendence zvyšování podílu výrobků z obnovitelných zdrojů vede ke snaze nahradit syntetická vlákna přírodními. Přírodní vlákna mají řadu výhod, jako je jejich nízká hmotnost (hustota) a cena. Nevýhodou přírodních vláken je nízká adheze k polymerní matrici. To brání širšímu použití přírodních vláken v kompozitech. Nedochozí tak k přenosu zatížení z matrice na vlákna a relativně dobré mechanické vlastnosti vláken nejsou plně využity [53]. Za účelem zlepšení adheze byly aplikovány různé fyzikální a chemické úpravy vláken. Běžnou chemickou úpravou je právě alkalizace, tj. namáčení vláken ve vodném roztoku NaOH. Je to historicky nejstarší metoda používaná ke zlepšení přilnavosti barev k bavlněným vláknům. [51–62]

Molekulární řetězce celulózy vzájemně spojené vodíkovými vazbami mají podobu mikrovláken, která jsou vzájemně vázána hemicelulózou a ligninem a vytvářejí elementární vlákna a svazky. Mechanické vlastnosti přírodních vláken závisí na poměru jednotlivých komponent [53–56].

Volné hydroxylové skupiny celulózy OH způsobují nežádoucí hydrofilní charakter vláken. Díky rozdílné rozpustnosti jednotlivých složek vlákna v roztoku NaOH a schopnosti roztoku

reagovat s hydroxylovou skupinou mohou být alkalizací modifikovány vlastnosti vlákna. Celulóza vlákna je téměř nerozpustná, zatímco hemicelulóza vlákna se naopak rozpouští snadno. Rozpustnost ligninu v roztoku je omezená, vyšší koncentrace a teplota roztoku NaOH pomáhá rozpustnost zlepšit. Rozpouštěním povrchového ligninu se dosahuje dvojího účinku. Povrch vlákna je zdrsňen a současně je ve větší míře umožněna reakce obnažených hydroxylových skupin celulózy. Díky tomuto zesíťování celulózy se zvyšují molekulární řetězce a pevnost mikrovláken. Atomy vodíku ve volných hydroxylových skupinách jsou nahrazeny atomy sodíku z roztoku NaOH. Tím je dosaženo vyšší adheze mezi maticemi a vlákny. Současně dochází ke zmenšení průřezu vláken (smrštění) v důsledku vymizení dutin, a tím se zvyšuje efektivní kontaktní plocha vláken v matici. [53]

Pokud se rozpustí příliš velké množství ligninu, dojde k rozpadu svazků, a tím se zhorší kontaktní plocha pro matici a sníží se samotná pevnost vlákna [52, 61, 62]. Nadměrné působení NaOH může mít za následek zhoršení mechanických vlastností nejen kompozitů, ale i jednotlivých vláken [53].

Při alkalické povrchové úpravě je nutné stanovit vhodnou koncentraci, případně teplotu a optimální dobu sycení vláken v roztoku NaOH pro jednotlivé typy vláken. Alkalická úprava by neměla vést k zásadnímu zhoršení mechanických vlastností vláken. Studium referencí [52, 53, 61, 62] bylo zjištěno, že existuje určitá korelace mezi obsahem ligninu v přírodních vláknech a optimálními alkalickými parametry. Větší množství ligninu způsobuje delší dobu působení a případně je nutná vyšší koncentrace nebo teplota roztoku NaOH. [53]

2.9.2. Úprava povrchu adherendu

Pokud povrch adherendu nedosahuje požadovaných vlastností, je potřeba povrch upravit, a to mechanicky nebo chemicky.

Typy povrchových úprav adherendu:

- mechanická úprava povrchu (tryskání);
- čištění (párkou, ultrazvukem, chemickými rozpouštědly, otřením);
- zlepšení odolnosti proti korozi;
- při nedostatečné smáčivosti aplikace primeru;
- chemické a mechanické povlakování. [19]

2.10 Vliv tloušťky lepené vrstvy

Jedním z parametrů, který ovlivňuje vlastnosti lepených spojů, je tloušťka vrstvy lepidla. Proto je třeba její vliv zkoumat a zohlednit při návrhu lepených spojů. Vliv vrstvy lepidla byl v literatuře zkoumán na základě studia lomů lepených spojů při tahovém a ohybovém zatížení s různou konstrukcí spojů, tj. jednostranně přeplátované spoje, kuželové spoje, spoje na tupo, trubkové spojů na tupo atd. Obecně se ukázalo, že pevnost spojů klesá s rostoucí tloušťkou lepidla [12, 63–65]. Nejvyšší pevnosti se dosahuje při tloušťce vrstvy lepidla v řádu 0,1–0,5 mm [12].

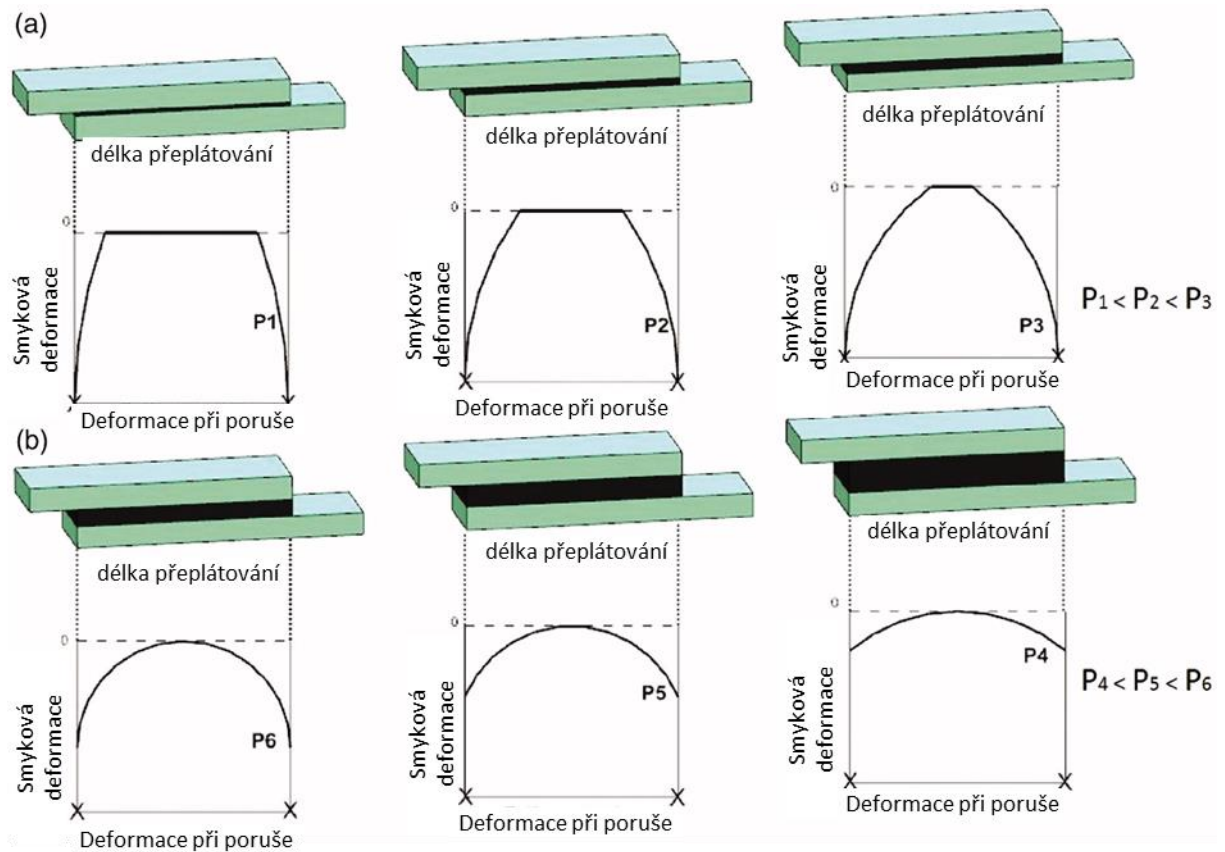
Toto pozorování však není obecně použitelné, protože existují další faktory, jako je typ zatížení, chování lepeného materiálu a typ lepidla, které mohou měnit chování spojů při změně tloušťky vrstvy lepidla. V důsledku toho může být interpretace změn vlastností poměrně složitá.

Banea et al. zkoumali lineární analýzu spojů s proměnlivou tloušťkou lepidla v rozmezí od 0,2 mm do 1 mm [12]. Zjistili, že u spojů o tloušťce 0,2 mm je pevnost při porušení vyšší než u lepidel s tloušťkou vrstvy 0,5 až 1 mm viz obr. 9. U tloušťky lepidla 0,5 mm a 1 mm však bylo pozorováno rovnoměrnější rozložení napětí, které umožňovalo větší rozšíření poddajnosti uvnitř spoje, tzn. lepidlo je plastické při určitém zatížení jako je cyklické namáhání [12].

Při použití jednoduše přeplátovaných spojů je nerovnoměrné rozložení napětí v celé ploše a na okrajích lepeného spoje tzv. špičkové hodnoty napětí viz obr. 9. Výsledkem je hyperbolické rozložení napětí na celkové délce přeplátování. Právě nestejněměrná deformace se projevuje výslednou tloušťkou vrstvy lepidla. U jednoduše přeplátovaného spoje je směr zatížení sil excentrický viz obr. 10. Se zvětšující se tloušťkou vrstvy roste rameno působící síly, které definuje ohybový moment. Ohybový moment vytváří plastické napětí, které způsobuje narušení lepeného spoje. Výsledný ohybový moment vytváří maximální namáhání na hranicích lepené vrstvy. To je příčinou odlupování, šíření trhlin a tím i výsledného snížení pevnosti až do porušení spoje. Několik výzkumů [12, 63–65] zjistilo závislost na tloušťce lepené vrstvy u jednoduše přeplátovaných lepených spojů. Jejich výsledky ukázaly, že s rostoucí tloušťkou lepené vrstvy roste ohybový moment. Tím se sekundárně snižuje pevnost lepeného spoje. Velikost napětí způsobené ohybovým momentem lze snížit nejen zvýšením pevnosti a tloušťky lepeného materiálu, ale i různým konstrukčním uspořádáním. Geometrické parametry lepených spojů jsou podstatné pro konstrukční parametry a stanovení nákladů. Při menší délce přeplátování dochází k porušení lepeného spoje a není plně využita maximální únosnost.

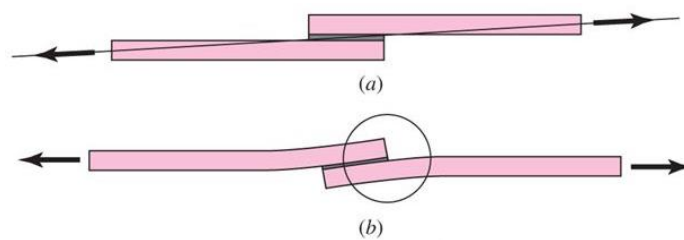
Naopak při použití délky přeplátování nad její optimální hodnotu dochází k větší spotřebě lepidla a současně se zvyšuje celková hmotnost lepeného spoje. Proto je důležité stanovit optimální hodnoty lepeného spoje, které zajistí spolehlivost a optimální náklady. [12, 63–65]

Obr. 9 Schéma rozložení plastické smykové deformace lepidla na délce přeplátování v závislosti na tloušťce vrstvy lepidla pro (a) nízká vrstva lepidla a (b) vysoká vrstva lepidla



[13]

Obr. 10 Vznik ohybového momentu u lepeného spoje: a) působení excentrických sil, b) důsledky ohybového momentu



[3]

Problémem lepených spojů při praktické aplikaci je nepravidelná tloušťka lepené vrstvy, a tedy nedostatečná integrita spoje. Tato slabá integrita spoje může být způsobena špatnou konstrukcí spoje, nedostatečnou technologií nebo nerovnoměrným povrchem lepeného materiálu. Nepravidelná tloušťka lepené vrstvy vede k iniciaci trhlin ve vrstvě lepidla, tím snižuje pevnost spoje a dochází k předčasné poruše. Pro omezení tohoto negativního efektu lze využít různých variant vyztužujících složek, např. ve formě skelné tkaniny [37], které docílí rovnoměrné vrstvy lepidla. [5, 38, 62, 65]

2.11 Degradace hybridních lepených spojů

Nevýhodou lepených spojů je různá odolnost při kombinaci agresivního prostředí a mechanického zatížení. Hlavními podmínkami agresivního prostředí jsou vlhkost a proměnlivá teplota. Různá teplota může ovlivnit mechanickou pevnost lepených spojů. Tepelná degradace epoxidového lepidla ovlivňuje také prodloužení a deformaci při pevnostní zkoušce ve smyku. [66, 67]

Existuje požadavek na vývoj v oblasti lepených spojů a lepidel schopných odolávat vysokým a nízkým teplotám. Tento požadavek je pro konstrukční lepidla problematický, protože jsou většinou na bázi polymerů, které mají relativně nízkou odolnost vůči vysokým teplotám. Ve vývoji chemie však existuje kombinace lepidel, která umožňují lepení za extrémních teplot, např. vulkanizační silikony, vysokoteplotní epoxidy a lepidla na bázi keramiky. [68–70]

Nejdůležitějším faktorem prostředí, který ovlivňuje pevnost lepených spojů, jsou změny teploty. Degradční účinek je způsoben vlivem extrémních teplot na lepený spoj. Teplotní cykly případně způsobují také rozdíl mezi koeficienty tepelné roztažnosti adherendů a lepidla. Tento proces mezi lepidlem a adherendem může způsobit vznik mikrotrhlin na rozhraních lepené vrstvy nebo dokonce delaminaci lepeného spoje. [68]

2.12 Charakteristika hybridních spojů při namáhání

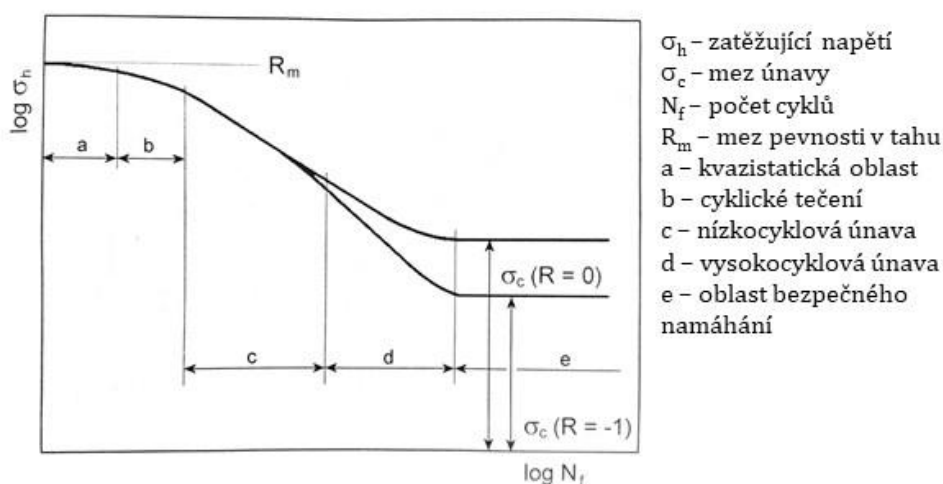
Znalost chování kompozitního systému je nezbytná pro správné navržení hybridního lepeného spoje. Zatížení hybridního lepeného spoje laboratorními zkouškami definuje jeho mechanické vlastnosti. Na základě tohoto testování je možné upravovat vyztužující složku, tj. druh, orientaci, způsob kladení, povrchovou úpravu atd. tak, aby lepený spoj splňoval požadované

podmínky. Výsledkem testování je pak možné definovat hybridní lepený spoj pro konkrétní aplikaci. Pevnost spoje je ovlivněna mnoha faktory, jako je typ lepidla, typ adherendu, délka přeplátování a tloušťka lepené vrstvy.

Provozní podmínky lepených spojů obvykle způsobují cyklické namáhání, tj. cyklickou únavu. Cyklická únavu způsobuje nevratné selhání lepeného spoje před dosažením maximální pevnosti. Samotný proces ovlivňuje konstrukční spoje při relativně nízké hodnotě napětí s delaminací lepené vrstvy a lepeného materiálu, což negativně ovlivňuje životnost spojů [62]. Pevnost a životnost lepených spojů se snižuje již při nízké hodnotě napětí při cyklické degradaci. Toto zatížení, tj. cyklická únavu materiálu, je ve výsledku nejničivější formou mechanického zatížení. Cyklické zatížení lepených spojů představuje v praxi nejčastější příčinu degradace spojů [37]. Pevnost lepeného spoje je ovlivněna nejen použitou vyztužující složkou, ale také přenosem napětí mezi jednotlivými výztužemi a matricí, tj. pokud jsou výztuže dobře smáčeny matricí, pak se napětí mezi matricí a výztuží přenáší efektivně, což výrazně zvyšuje pevnost lepeného spoje. Cyklické zkoušky jsou pro praktické použití lepených spojů nezbytné. [38, 62, 71–74]

Cyklické zkoušky se rozdělují na nízkocyklové a vysokocyklové. Vysokocyklová zkouška sleduje oblast v rozsahu 10^5 až 10^7 zatěžujících cyklů. Zatímco nízkocyklová zkouška hodnotí oblast zatížení v rozsahu 10^2 až 10^4 zatěžujících cyklů. Jednotlivé oblasti únavové zkoušky popisuje Wöhlerova křivka viz obr. 11. Na obr. 11 jsou zobrazeny dvě křivky zatížení, a to pro symetrický střídavý ($R = -1$) a mívivý ($R = 0$) cyklus zatížení. [16, 62, 71]

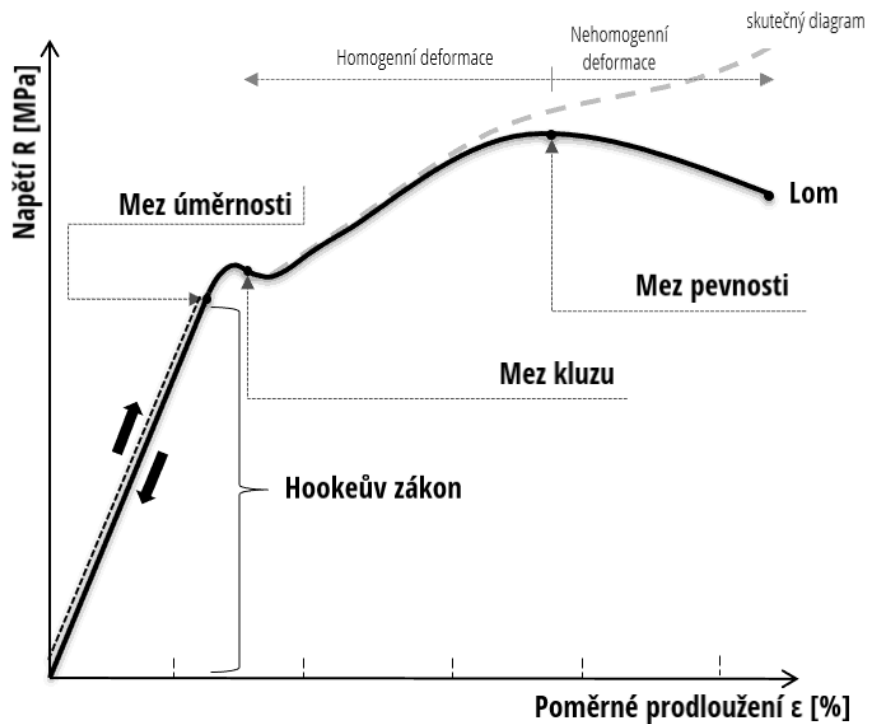
Obr. 11 Wöhlerova křivka



[16]

V případě tahového namáhání (křivka napětí–deformace) popisuje Hookův zákon chování tělesa v pružné oblasti viz obr. 12. V této oblasti je prodloužení tělesa přímo úměrné tahové síle a délce tělesa a nepřímo úměrné ploše průřezu a modulu pružnosti. Až do mezního napětí bude těleso schopno obnovit své rozměry po odstranění zatížení. Při tahových zkouškách se rozdělují tahové diagramy na pracovní (závislost síly F na prodloužení ΔL), smluvní (závislost napětí R na poměrném prodloužení ϵ) a skutečný (závislost napětí σ při reálném průřezu a reálném prodloužení ϕ). Průběh grafu hodnotí sledované veličiny, kterými jsou mez úměrnosti, mez kluzu a mez pevnosti. [75]

Obr. 12 Smluvní a skutečný tahový diagram



[76]

3 VĚDECKÉ HYPOTÉZY A CÍLE PRÁCE

Práce se zabývá modifikací konstrukčních lepidel a vytvořením hybridních lepených spojů. Experimentálním přístupem byl sledován vliv těchto modifikací na výsledné mechanické vlastnosti hybridního spoje. Byly řešeny vazby tří složek hybridního spoje, kterými jsou matrice, vyztužující fáze a adherend. U těchto vazeb budou sledovány jejich mechanické vlastnosti. Hlavním cílem disertační práce bylo zvýšit životnost a bezpečnost lepených spojů pomocí vyztužující tkaniny. Tohoto cíle bylo dosaženo na základě experimentálního výzkumu, kde se hodnotily mechanické vlastnosti a životnost hybridních lepených spojů s různými 100% bavlněnými tkaninami aplikovanými jako výztuž v různých cyklicky namáhaných podmínkách. Druhým cílem bylo hodnotit vliv alkalické povrchové úpravy bavlněné tkaniny na mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů. Biologická vlákna v polymeru se vyznačují nízkou smáčivostí s matricí, což snižuje mechanické vlastnosti lepeného spoje. Všechny tyto parametry dají ucelený výsledek mechanických vlastností při různém zatížení.

Hypotéza 1: Specifické vlastnosti vláken jako typ materiálu, orientace vláken, hmotnost a smáčivost s matricí jsou základními faktory, které ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti hybridního lepeného spoje a jeho využití. Současný trend v oblasti polymerních kompozitů směřuje k využití biologického materiálu. Vznikají tak nové materiály označované jako biokompozity. [34–42]

Hypotéza 2: Vliv povrchové úpravy pomocí roztoku NaOH pozitivně ovlivňuje adhezni schopnosti biologických vláken. [43, 45, 53–58]

Hypotéza 3: Využití biologických vláken jako vhodná alternativa syntetickým vláknům. [41, 46, 47]

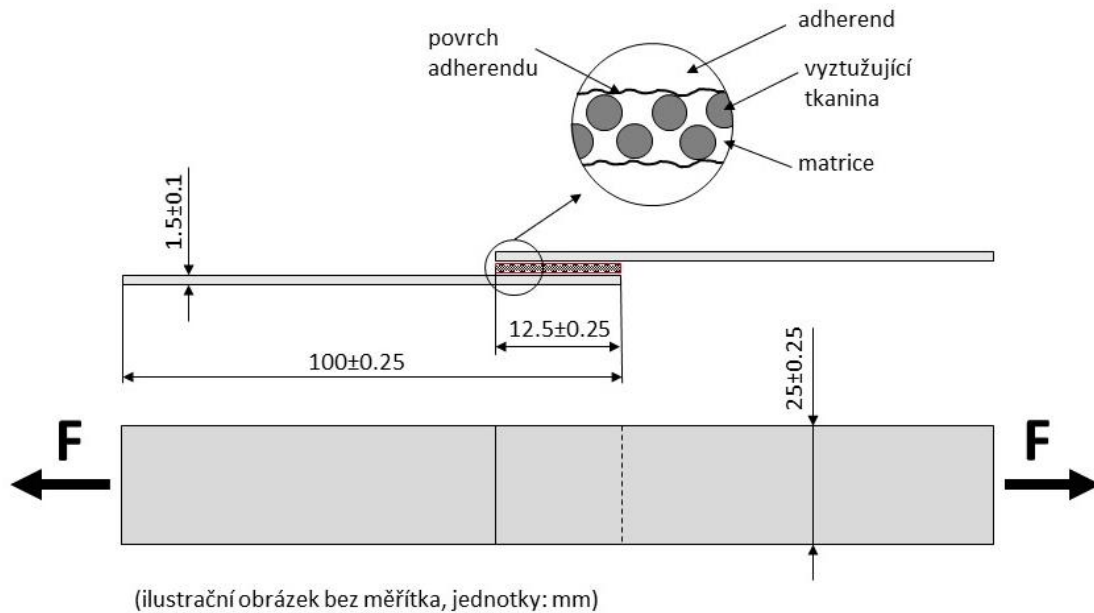
4 MATERIÁL A METODY

Laboratorní testování lepených spojů se provádí pomocí základní zkoušky tahem dle normy ČSN EN 1465 (Lepidla – Stanovení smykové pevnosti v tahu na přeplátovaných spojích). Materiál a metody těchto zkoušek jsou popsány na příkladu jednoho vybraného experimentu „Nízkocyklová tahová zkouška hybridních lepených spojů na bázi upravené bavlny a vrstvy epoxidové pryskyřice“. Předmětem výzkumu v rámci disertační práce byly mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů na bázi bavlny a epoxidu v cyklickém smyku. Lepené spoje byly testovány statickou a nízkocyklovou tahovou zkouškou za účelem vyhodnocení mechanických vlastností (smyková pevnost, deformace) a stanovení životnosti lepeného spoje v reálných podmínkách.

4.1 Charakteristika kompozitní vrstvy

Lepená vrstva hybridních lepených spojů byla složena z různých 100% bavlněných tkanin a jednoho typu epoxidové pryskyřice viz Tab. 3. Tyto dvě složky, kterými jsou matrice a plnivo, vytvořily kompozitní vrstvu. Hybridní lepené spoje byly spojeny kompozitní vrstvou podle ČSN EN 1465, která stanovuje délku přeplátování $12,5 \pm 0,25$ mm. Tloušťka kompozitní vrstvy byla měřena programem Gwyddion, hodnoty jsou patrné z Tab. 3. Na obr. 13 je uvedeno schéma lepeného spoje s rozměry a komponenty spoje jako adherend a kompozitní vrstva.

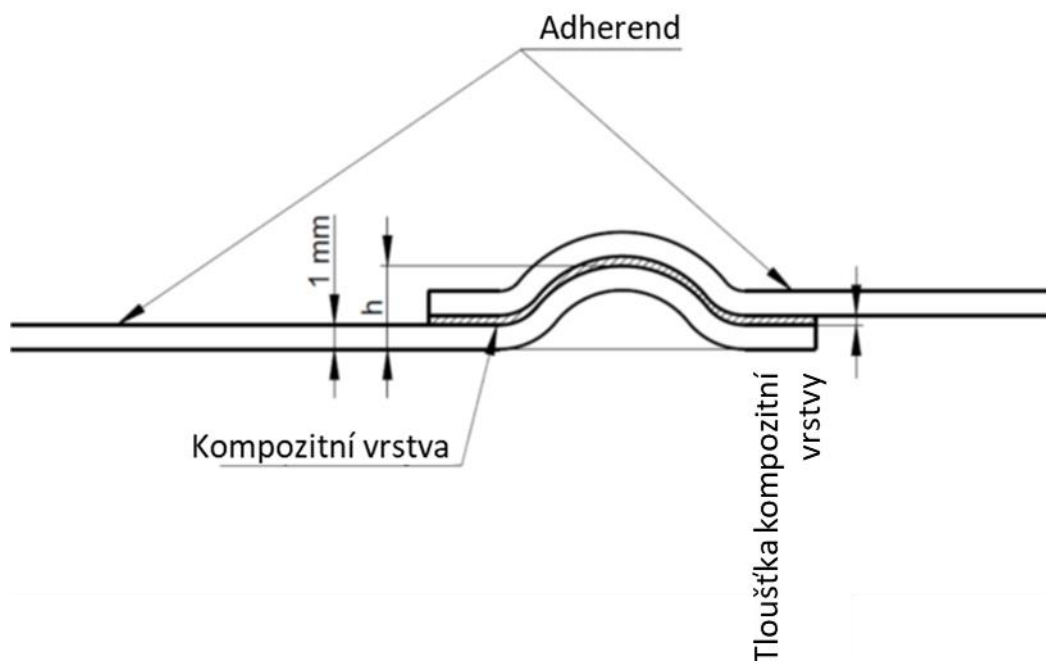
Obr. 13 Schéma hybridního lepeného spoje s kompozitní vrstvou



[autor]

V případě hybridních lepených spojů s tvarovou geometrií přeplátování se také vycházelo z normy ČSN EN 1465 viz obr. 14. Z technologického důvodu nebylo možné vytvořit tvarovou geometrii s přeplátováním 12,5 mm, jak udává norma. Z tohoto důvodu pro dostatečné porovnání výsledků mezi jednotlivými geometriemi přeplátování byla délka přeplátování prodloužena na $29 \pm 1,31$ mm. Z důvodu změny délky přeplátování nebylo možné porovnat jednotlivé výzkumy mezi sebou. Proto musely být měřeny i jednoduše přeplátované spoje s čistou pryskyřicí a kompozitní vrstvou. Výhodou bylo, že pro výzkum byly zvoleny jen ty vyztužující tkaniny, které v předešlém výzkumu prokázaly pozitivní vliv na mechanické vlastnosti.

Obr. 14 Hybridní lepený spoj s tvarovou geometrií přeplátování



[17]

Lepené spoje byly zatíženy staticky závažím o hmotnosti 750 g při teplotě 21 ± 2 °C při relativní vlhkosti vzduchu 45 ± 7 % po dobu 24 hodin pro dostatečné vytvrzení kompozitní vrstvy. Tloušťka kompozitní vrstvy byla opět měřena softwarem Gwyddion ze snímků z elektronového mikroskopu (SEM). Jednotlivé označení vzorků hybridních lepených spojů dle typu geometrie, společně s tloušťkou lepené vrstvy jsou uvedeny v tab. 4. Pro výzkum byly použity lepené spoje s jednoduchým přeplátováním (standard) a dvě tvarové geometrie přeplátování, a to s výškou vlny $h_1 = 2.43 \pm 0.10$ mm (označení geometrie jako WH1) a $h_2 = 4.82 \pm 0.13$ mm (označení geometrie WH2).

Délka přeplátování se měřila pomocí digitálního posuvného měřítka u pěti vzorků. V případě tvarové geometrie nebylo možné měřit délku přeplátování po tváření, proto byla nastavena na hodnotu dle změřené délky jednoduchého přeplátování. Následně se měřila výška tvaru geometrie pomocí dvou měrek a mikrometrického hloubkoměru.

Tab. 3 Parametry hybridního lepeného spoje

Tkanina	Geometrie	Plošná hustota	Osnova (200x50 mm)	Útek (200x50 mm)	Tloušťka kompozitní vrstvy
		$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	N	N	μm
BJAZ	Plátno	145	400	400	530 ± 14
TERA	Plátno	305	950	900	312 ± 14
THOMAS ALAN	Kepr	230	850	500	342 ± 6
ERIK	Plátno	190	850	800	312 ± 14

[79, autor]

Tab. 4 Parametry hybridního lepeného spoje s tvarovou geometrií přeplátování

Typ spoje	Tvar	Tloušťka kompozitní vrstvy (μm)	Charakteristika spoje
RESIN	Standard	33 ± 3	Lepený spoj s čistou pryskyřicí se standardním přeplátováním a s geometrií přeplátování WH1 a WH2
	WH1		
ERIK	Standard	432 ± 12	Lepený spoj s vyztužující tkaninou Erik se standardním přeplátováním a s geometrií přeplátování WH1 a WH2
	WH1		
TERA	Standard	614 ± 9	Lepený spoj s vyztužující tkaninou Tera se standardním přeplátováním a s geometrií přeplátování WH1 a WH2
	WH1		
	WH2		

[autor]

4.2 Příprava adherendu

Adherendem pro hybridní lepené spoje byla konstrukční uhlíková ocel S235J0 (Feron a.s., Praha, Česká republika) o rozměrech 100 x 25 x 1,5 mm podle normy ČSN EN 1465. Lepený povrch adherendu byl mechanicky upraven abrazivem hnědý korund v tryskací komoře a chemicky očištěn v acetonové lázni viz obr. 15. Drsnost ošetřeného povrchu adherendu byla $R_a = 3,68 \pm 0,14 \mu\text{m}$ a $R_z = 11,23 \pm 0,45 \mu\text{m}$ a měřila se profilometrem Mitutoyo SurfTest 301 (Mitutoyo Europe GmbH, Neuss, Německo). Základní mechanické vlastnosti a orientační chemické složení jsou uvedeny v tab. 5 a 6.

Tab. 5 Základní mechanické vlastnosti v tahu oceli S235J0 při teplotě 20 °C

Mez pevnosti	340–470 MPa
Mez kluzu	225–235 MPa
Modul pružnosti	212 GPa
Deformace	24 %

[80]

Tab. 6 Orientační chemické složení oceli S235J0

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	N (%)
≤ 0,17	≤ 1,40	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,55	≤ 0,012

[80]

Obr. 15 Upravený povrch adherendu v tryskací komoře

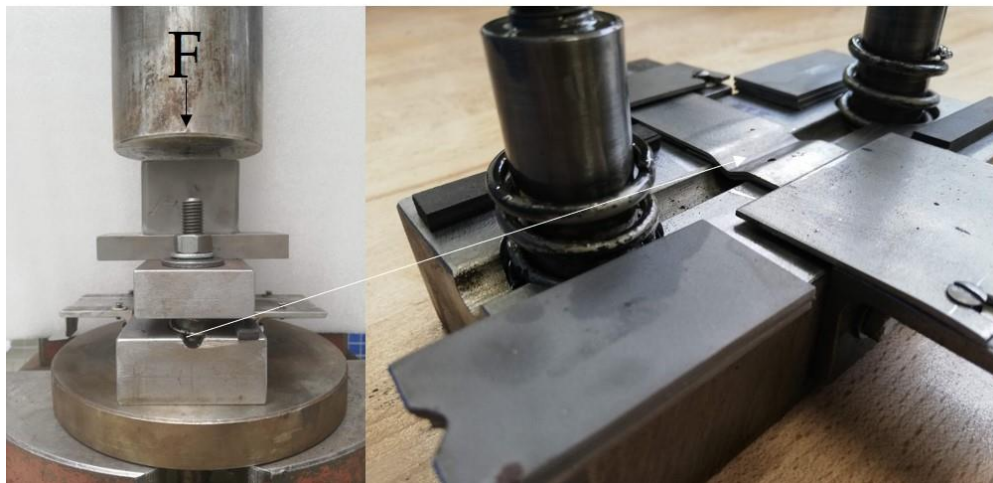


[autor]

Adherend pro přípravu vzorku s tvarovým přelátováním byl upraven tvářením pomocí tvářecí formy viz obr. 16. Do tvářecí formy se vložily dva adherendy s předem definovaným

přeplátováním a následně došlo k prohnutí adherendu při síle lisu 850 N a vytvoření tvarového přeplátování.

Obr. 16 Tvářecí forma pro výrobu tvarové geometrie přeplátování



[17]

4.3 Epoxidová matrice

Matricí byla strukturální epoxidová pryskyřice CHS-Epoxy 324 (Epoxy 1200) s tvrdidlem P11 Havel Composites CZ s.r.o., Svěsedlice, Česká republika) v poměru 100:7 podle materiálového listu epoxidové pryskyřice. Tato epoxidová pryskyřice, ve výsledcích označovaná jako RESIN, se běžně používá jako lepidlo pro lepení kovů. Jako plnivo pro kompozitní vrstvu byly použity různé 100% bavlněné tkaniny (tab. 3).

4.4 Příprava vyztužující tkaniny

Tkaniny vybrané pro účely vyztužení jsou vyrobeny ze 100% rezné bavlny. Jedná se o rezné tkaniny, tzn. nebyly provedeny žádné dokončovací úpravy od výrobce. Vzorky šedých tkanin byly důkladně vyprány v horké vodě (100 °C) pro odstranění zbytků škrobu a dalších reziduí. V prvním výzkumu byly ošetřeny 5% roztokem NaOH po dobu 15 minut. V případě druhého výzkumu to byl 10% roztok NaOH po dobu 30 minut. Předmětem disertační práce je i vliv povrchové úpravy tkanin, proto byly parametry úpravy rozdílné, aby bylo možné sledovat rozdílnou strukturu povrchu vláken a vliv na smáčivost s matricí. Jak je známo, NaOH je čistící

prostředek používaný pro bavlněné tkaniny za účelem odstranění olejů a tuků z povrchu vláken. Toto ošetření pomáhá odstranit nepropustné povlaky na povrchu vlákna, takže je připraveno pro spojení s jakýmkoli lepeným materiálem. Chemická úprava biologického vyztužujícího materiálu je nezbytná pro zlepšení mechanických vlastností pomocí adhezivní pevnosti [52, 55, 76]. Tento účinek vede ke zlepšení mezifázové vazby, tj. lepených spojů uvnitř kompozitní vrstvy [77, 78].

Úprava 100% rezné bavlny byla provedena v těchto krocích:

- máčení tkaniny v horké vodě (100 °C) za účelem odstranění škrobu po dobu 5 minut;
- oplach tkaniny studenou vodou pro odstranění hrubých nečistot;
- máčení tkaniny v 5% vodném roztoku NaOH po dobu 15 minut a 10% roztoku NaOH po dobu 30 minut. Roztok byl připraven z destilované vody;
- vysoušení tkaniny v laboratorní peci při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin [81].

Tkaniny byly rozděleny na dvě skupiny ošetřených a neošetřených vzorků tkanin, které byly použity pro statický test, aby bylo možné vyhodnotit vliv technologie chemické úpravy NaOH. Pro nízkocyklovou zkoušku byla použita pouze skupina ošetřených tkanin dle výsledků statických zkoušek.

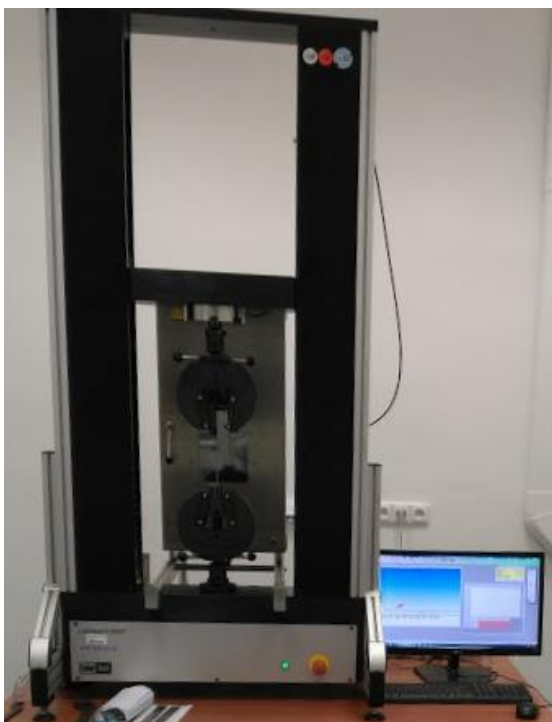
4.5 Statické zkoušky hybridních lepených spojů

Ošetřené a neošetřené skupiny bavlněných tkanin hybridních lepených spojů byly testovány statickou tahovou zkouškou pro stanovení smykové pevnosti. Statická zkouška hodnotila vliv technologie úpravy na mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů. Statickou tahovou zkouškou byly měřeny lepené spoje při rychlosti zatížení $0,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ u 8 vzorků podle ČSN EN 1465. Mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů byly testovány na univerzálním zkušebním stroji LABTest 5.50 ST s měřicí jednotkou AST KAF 50 kN a vyhodnocovacím softwarem Test and Motion (LABORTECH s.r.o., Opava, Česká republika) viz obr. 17. Při statických zkouškách byla stanovena mez pevnosti ve smyku lepeného spoje s čistou pryskyřicí. Dle této „referenční hodnoty“ byly následně nastaveny parametry nízkocyklových zkoušek. Výsledkem statických zkoušek byly mez pevnosti a deformace.

V případě zkoušek s tvarovou geometrií přeplátování bylo nutné provést opětovné zkoušky jednoduše přeplátovaného spoje s čistou pryskyřicí pro stanovení „referenční hodnoty“ pro

nízkocyklové zkoušky, a to z důvodu změny délky přeplátování z 12,5 na 29 mm. Dále se při statických zkouškách měřily mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů s různou výztuží a různou geometrií přeplátování (WH1 a WH2). Výsledkem statických zkoušek byly mez pevnosti, modul pružnosti a deformace. Modul pružnosti byl doplněn oproti prvnímu výzkumu, aby ještě podrobněji popsal chování hybridního lepeného spoje při zatížení.

Obr. 17 Univerzální zkušební stroj LABTest 5.50 ST



[autor]

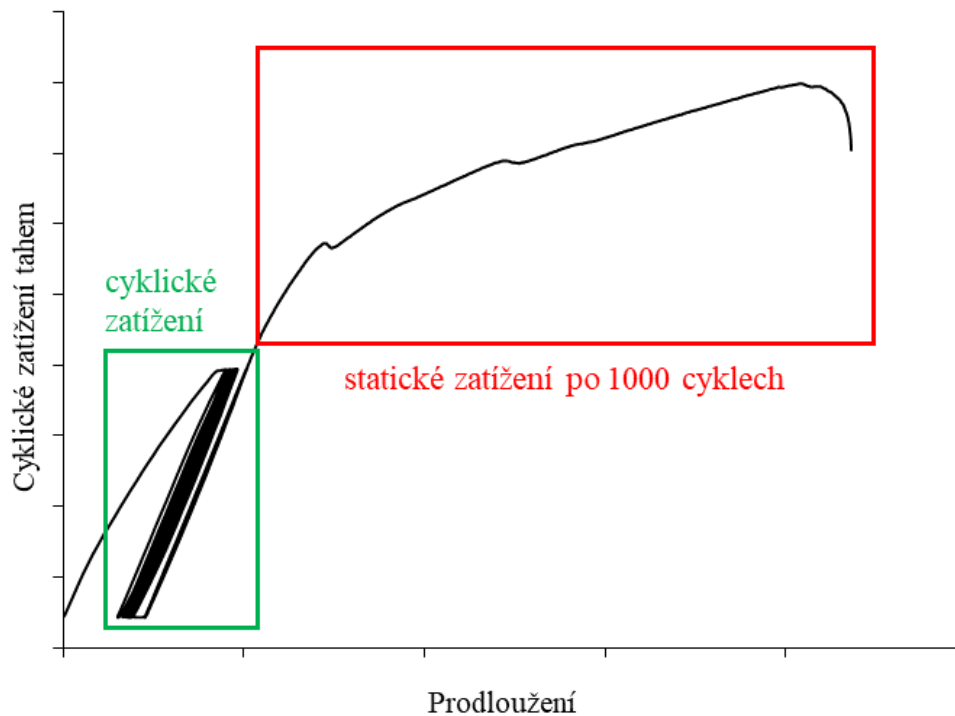
4.6 Nízkocyklové zkoušky hybridních lepených spojů

Po statických zkouškách následovaly nízkocyklové zkoušky. Nízkocyklové zkoušky, také označované jako kvazi-statické zkoušky, hodnotí životnost lepených spojů viz kapitola 2.12. Skupina lepených spojů z upravené bavlny byla použita pouze pro nízkocyklové zkoušky. Metoda nízkocyklových zkoušek byla založena na pevnosti ve smyku ze statické tahové zkoušky čistého lepeného spoje na bázi epoxidové pryskyřice jako referenční hodnota. Tato statická referenční hodnota byla 3902 N (průměrná maximální síla). Při nízkocyklové zkoušce byly lepené spoje zatěžovány v 1000 zatěžovacích cyklech rychlostí zatěžování $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Nízkocyklová zkouška zahrnovala dva různé intervaly zatěžování, tj. nižší interval zatěžování

5–50 % (192–1951 N) a vyšší interval zatěžování 5–70 % (192–2732 N) od statické referenční hodnoty. Tyto dva intervaly byly zvoleny, aby bylo možné výsledky porovnat s dalšími publikovanými výsledky [72, 74]. Dále horní interval 70 % překračuje mez kluzu lepeného spoje, proto je tato oblast zajímavá vzhledem k životnosti spoje. Časové zpoždění na vrcholu zatěžovacího intervalu bylo 0,5 s. Nízkocyklová zkouška byla ukončena, když uplynulo 1000 cyklů, a lepený spoj byl následně staticky zatížen až do porušení při rychlosti zatěžování $0,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ viz obr. 18. Nízkocyklová zkouška byla ukončena, když došlo k destrukci před 1000 cykly. Zkoušená skupina obsahovala 8 vzorků a pokud nízkocyklovou zkouškou neprošel pouze jeden vzorek, byla celá testovaná skupina vyhodnocena jako nevyhovující. Zkoušky byly měřeny za kontrolované laboratorní teploty a vlhkosti. Výsledkem nízkocyklových zkoušek byly mez pevnosti a deformace. Dále to byl rozdíl deformaci mezi 1–1000 cyklem pro stanovení viskoelastického chování.

V případě zkoušek hybridních spojů s tvarovou konstrukcí přeplátování byla metodika zcela totožná s tím, že se pouze změnila referenční hodnota, a tedy i interval zatížení. Referenční hodnota byla 5347 N v závislosti na tom byly nastaveny intervaly 5–50 % (267–2674 N) a 5–70 % (267–3734 N). Výsledkem nízkocyklových zkoušek byly mez pevnosti a deformace. Dále to byl rozdíl deformaci mezi 1–1000 cyklem pro stanovení viskoelastického chování.

Obr. 18 Průběh zatížení při nízkocyklové zkoušce



[autor]

4.7 Zpracování naměřených hodnot

Výstupní hodnotou zkušebního stroji LABTest 5.50 ST při tahových zkouškách byla maximální síla při přetržení F_m , síla na mezi kluzu F_e a maximální prodloužení ΔL . Pro stanovení výsledných parametrů meze pevnosti R_m (4.1), meze kluzu R_e (4.2) a plastická deformace ε (4.3) dle Hookova zákona musela být změřena lomová plocha. U každého vzorku byla přeměřena šířka (b_s) a délka lomové plochy (L_s). Dle délky přeplátování spoje L_0 byla stanovena celková deformace.

$$R_m = \frac{F_m}{S} = \frac{F_m}{L_s \cdot b_s} [MPa] \quad (4.1)$$

$$R_e = \frac{F_e}{S} = \frac{F_e}{L_s \cdot b_s} [MPa] \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{L - L_0}{L} \cdot 100[\%] \quad (4.3)$$

R_m – mez pevnosti ve smyku [MPa]

Re – mez kluzu [MPa]

ε – plastická deformace [%]

F_m – síla při přetržení [N]

F_e – síla na mezi kluzu [N]

ΔL – prodloužení [mm]

L – délka při přetržení [mm]

L₀ – délka přeplátování spoje [mm]

L_s – délka lomové plochy [mm]

b_s – šířka lomové plochy [mm]

S – plocha přeplátování [mm²]

Každá měřená varianta hybridního spoje obsahovala 8 měřených vzorků, aby mohla být stanovena statická významnost. Pro přehlednou prezentaci výsledků byla provedena nejprve základní deskriptivní statistika, tzn. stanovení aritmetického průměru \bar{a} (4.5) a směrodatné odchylky s (4.6).

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad [-] \quad (4.4)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n}} \quad [-] \quad (4.6)$$

\bar{a} – aritmetický průměr

s – směrodatná odchylka

a_i – hodnota parametru zkušební vzorku

n – počet vzorků

Výsledné hodnoty byly zaneseny do tabulky a do grafu. Pro přehlednější popsání jednotlivých modifikací hybridních lepených spojů vůči standardnímu lepenému spoji byl použit procentuální rozdíl sledované veličiny vůči referenční hodnotě. Referenční hodnota byla stanovena vždy na porovnávání parametru u standardního lepeného spoje s čistou pryskyřicí vůči modifikovanému hybridnímu spoji. Výpočet procentuálního rozdílu sledovaného

parametru vůči referenční hodnotě je uveden na dvou příkladech, a to u meze pevnosti (4.7) a deformace (4.3).

$$\Delta R_m = \frac{R_m - R_{m0}}{R_{m0}} \cdot 100 [\%] \quad (4.7)$$

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0 [\%] \quad (4.8)$$

ΔR_m – rozdíl v mezi pevnosti ve smyku [%]

R_m, R_{m0} – mez pevnosti ve smyku modifikovaného hybridního spoje, mez pevnosti ve smyku lepeného spoje s čistou pryskyřicí [MPa] (4.1)

$\Delta \varepsilon$ – rozdíl v plastické deformaci [%]

$\varepsilon, \varepsilon_0$ – plastická deformace modifikovaného hybridního spoje, plastická deformace etalonu, plastická deformace lepeného spoje s čistou pryskyřicí [%] (4.3)

4.8 Statistické vyhodnocení naměřených hodnot

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny analýzou rozptylu, tj. ANOVA F-testem v programu STATISTICA. Statistická hypotéza byla vyhodnocena na hladině významnosti 0,05 mezi etalonem a jednotlivými variantami pokusu. Statistická hypotéza H_0 představuje statisticky nevýznamný rozdíl mezi naměřenými hodnotami ($p > 0,05$). Hypotéza H_1 zamítá hypotézu H_0 a představuje statisticky významný rozdíl mezi naměřenými hodnotami ($p \leq 0,05$). Výsledná hodnota „p“ nesmí překročit velikost 0,05. To označuje, že porovnávaná data nemají mezi sebou statisticky významný rozdíl a nejsou signifikantní. Signifikantní porovnávaná data musí dosahovat p hodnoty na hladině významnosti mezi 0,00 až 0,05.

4.9 SEM analýza kompozitní vrstvy

Kompozitní vrstva hybridního lepeného spoje byla analyzována skenovacím elektronovým mikroskopem (SEM) MIRA 3 TESCAN GMX SE (Tescan Brno s.r.o., Brno, Česká republika), tj. interakce mezi vyztužující tkaninou, maticí a lepeným materiálem. SEM analýzy sledovaly rozdíly mezi neošetřenou a ošetřenou tkaninou 5% a 10% roztokem NaOH. Byla sledována kvalita smáčeného povrchu adherendu a vyztužující tkaniny v epoxidové pryskyřici. Dále byl sledován způsob šíření trhlin. Pro správné pochopení chování všech interakcí byla sledována

kompozitní vrstva nezatíženého vzorku a následně byly sledovány interakce ve vrstvě po zatížení 1000 cykly bez konečného přetržení.

Povrch vzorků byl pro SEM analýzu pozlacen přístrojem Quorum Q150R ES (Tescan Brno s.r.o., Brno, Česká republika) v ochranné atmosféře argonu. Pozlacení povrchu vzorku umožňuje odraz elektronů při analýze v elektronovém mikroskopu. Výstupem SEM analýzy jsou snímky, které obsahují veškeré parametry, při kterých byl snímek pořízen. SEM HV označuje urychlovací napětí při snímání, SEM MAG označuje minimální zvětšení, View field udává skutečný rozměr snímku, WD definuje minimální vzdálenost, Det: SE označuje použitý detektor.

Tloušťka kompozitní vrstvy byla měřena softwarem Gwyddion ze snímků z elektronového mikroskopu (SEM).

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro prezentaci výsledků v oblasti lepených spojů a kompozitních materiálů byly vybrány dva na sebe navazující výzkumy. V práci jsou popsány výsledky z výzkumu „Nízkocyklová smyková zkouška hybridních lepených spojů na bázi upravené bavlny a vrstvy epoxidové pryskyřice“ [15], který byl indexován v Polymers a financován Interní grantovou agenturou TF (2020:31140/1312/3107). Tento výzkum byl vybrán z toho důvodu, že splňuje všechny cíle disertační práce a ze strany výsledků je nejobsáhlejší.

Na tyto výsledky navázal druhý výzkum „Experimentální výzkum vlnovitě přeplátovaných spojů s vyztužující přírodní bavlněnou tkaninou při cyklickém zatížení“ [17], který byl rovněž indexován v Polymers a financován Interní grantovou agenturou (2021:31140/1312/3108). Tento výzkum vychází z poznatků předešlého výzkumu a podle toho specifikuje svou metodiku.

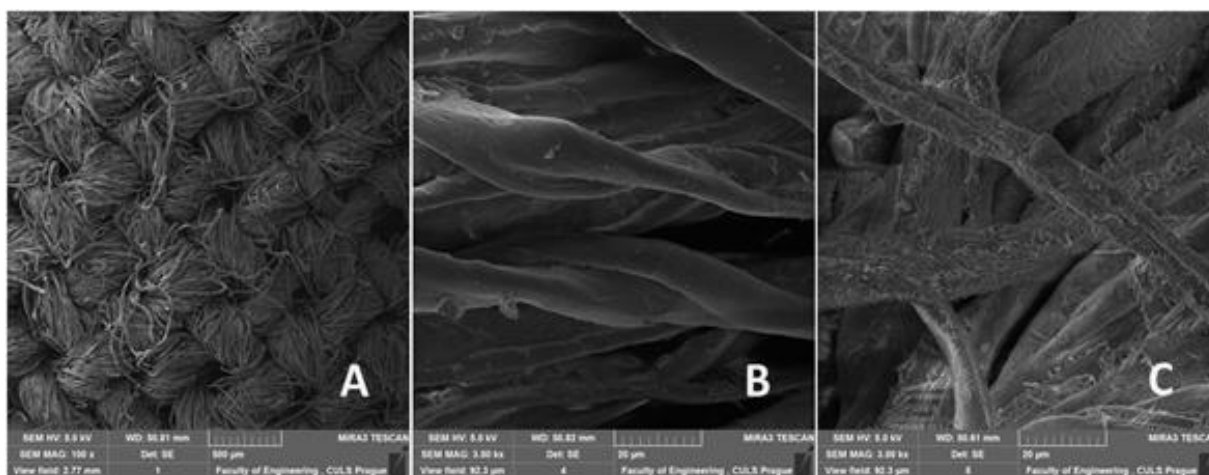
5.1 Nízkocyklová zkouška hybridních lepených spojů na bázi upravené bavlny a vrstvy epoxidové pryskyřice

Hybridní lepené spoje byly testovány na mechanické vlastnosti, tj. tahová pevnost ve smyku a deformace. Výsledky zkoušek jsou rozděleny do tří částí, kterými jsou analýza SEM, statické zkoušky a nízkocyklové zkoušky, při nichž jsou hodnoceny různé faktory. V první části byla popsána struktura kompozitní vrstvy a ošetřených tkanin. Druhá část sleduje, zda mají tkaniny vliv na statické mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů oproti čisté epoxidové pryskyřici. Dále byl zkoumán vliv 5% úpravy NaOH na statické mechanické vlastnosti upravené tkaniny ve srovnání s neupravenou tkaninou. Třetí část sleduje vliv vyztužujících tkanin na životnost lepených spojů pomocí mechanických vlastností hybridních lepených spojů při nízkocyklových zkouškách a porovnává je s výsledky statických zkoušek. Rovněž byl vyhodnocen průběh zatížení nízkocyklové zkoušky u hybridních lepených spojů.

Analýza SEM popisuje strukturu kompozitní vrstvy a upravených tkanin. Výsledky elektronové mikroskopie poukazují na významný rozdíl v povrchu testovaných tkanin upravených a neupravených 5% roztokem NaOH. Obr. 19A znázorňuje pohled na vyztužující tkaninu u kompozitní vrstvy. Obr. 19B a C ukazují snímky povrchu vláken před a po úpravě 5% roztokem NaOH v podélném směru. Je zajímavé, že alkalická úprava vytvořila mikrokrystalické

sloučeniny celulózy ulpívající na povrchu vlákna. Mikrokrystalické sloučeniny poskytují další vazebná místa a zesílené rozhraní pro lepenou vrstvu pryskyřice. Krystaly působí v kompozitu jako třetí fáze a zvětšený mezifázový povrch poskytnutý krystaly zvyšuje mechanické vlastnosti kompozitů.

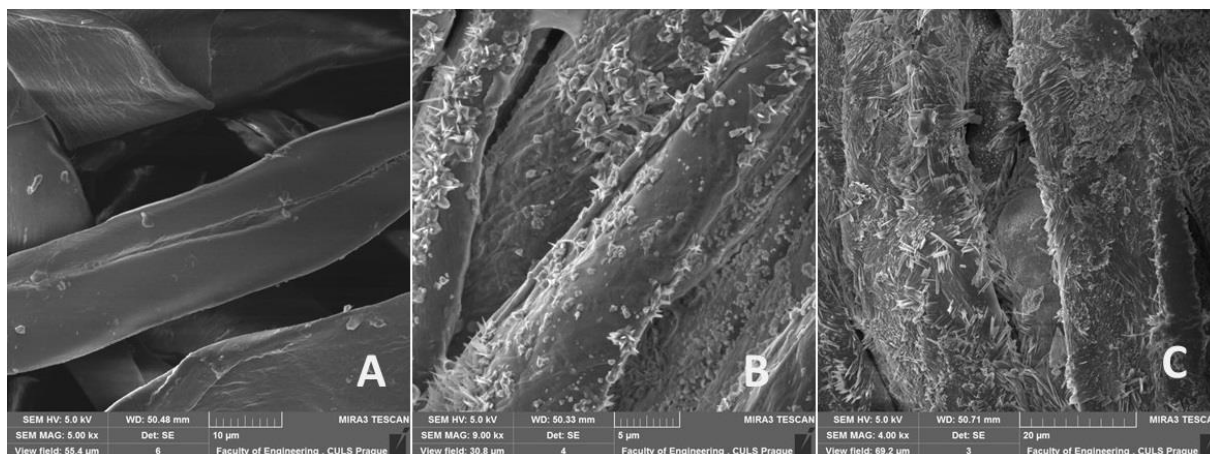
Obr. 19 Snímky SEM bavlněné výztužné tkaniny Bjaz: A: Pohled na výztužnou tkaninu (MAG 100 x), B: Povrchová struktura bavlněných vláken neošetřených (MAG 3,00 kx), C: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH (MAG 3,00 kx)



[15]

Je patrné, že hustota mikrokrystalických částic je vyšší na obr. 20C (Bjaz) ve srovnání s obr. 20B (Thomas). Protože vzorek 1 (Bjaz) je lehčí konstrukce, umožňuje snadnější pronikání alkalického roztoku do mezer přízí a vláken. Proto je zde větší množství mikročástic. Naproti tomu tkanina Thomas je relativně těžší a je utkána keprovou konstrukcí. Na obr. 20A je zobrazena struktura alkalicky neošetřené tkaniny Thomas. V keprové tkanině je obvykle vyšší soudržnost plovoucích přízí (nepropojených segmentů), které způsobují zasekávání. Takové tkaniny jsou méně porézní ve srovnání s plátnem nebo hladkou geometrií v tkaninách. Keprové konstrukce neumožňují tak účinnou infuzi alkálií jako hladké/plátěné konstrukce. To může být důvodem relativně menšího množství krystalů viditelných na povrchu vlákna.

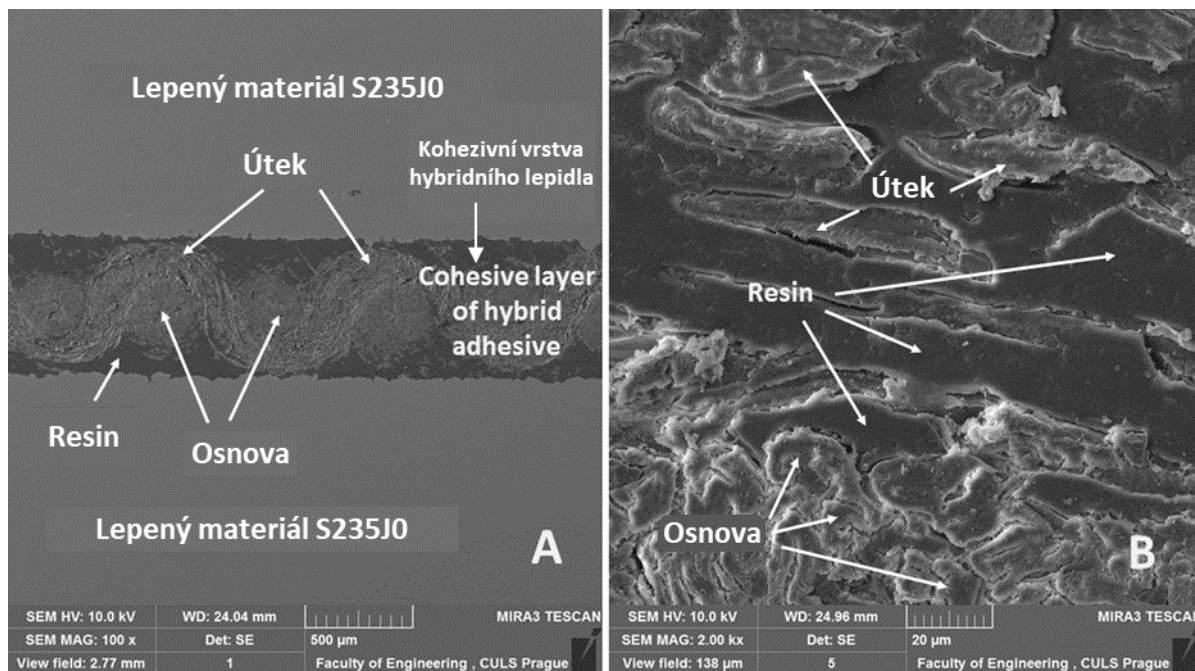
Obr. 20 Snímky SEM bavlněné výztužné tkaniny: A: Povrchová struktura neošetřených bavlněných vláken – tkanina Thomas Alan (MAG 5.00 kx) B: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH – tkanina Thomas Alan (MAG 9,00 kx), C: Povrchová struktura bavlněných vláken chemicky ošetřených 5% roztokem NaOH – tkanina Bjaz (4,00 kx)



[15]

Pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) lze hodnotit kvalitu lepených spojů, tj. interakci lepených a kohezních sil a možnou iniciaci trhlin při cyklickém zatížení. Obr. 21A ukazuje příčný řez hybridním lepeným spojem, který se skládá z lepeného materiálu a kompozitní vrstvy. Na obr. 21A je patrná dispozice hybridního lepeného spoje a jeho rozhraní. Kompozitní vrstva se skládá z tkaniny, která je rozdělena na zatěžovací prvky osnovy a útku. Na obr. 21A je patrná pískovaná struktura spojovaného materiálu. Výsledky ukazují, že adhezní vazba mezi pryskyřicí, osnovou a útkem je v některých místech slabá, tj. vyztužující tkanina není v některých místech optimálně smáčena/impregnována, což může při mechanické zkoušce vést ke vzniku trhlin viz obr. 21B.

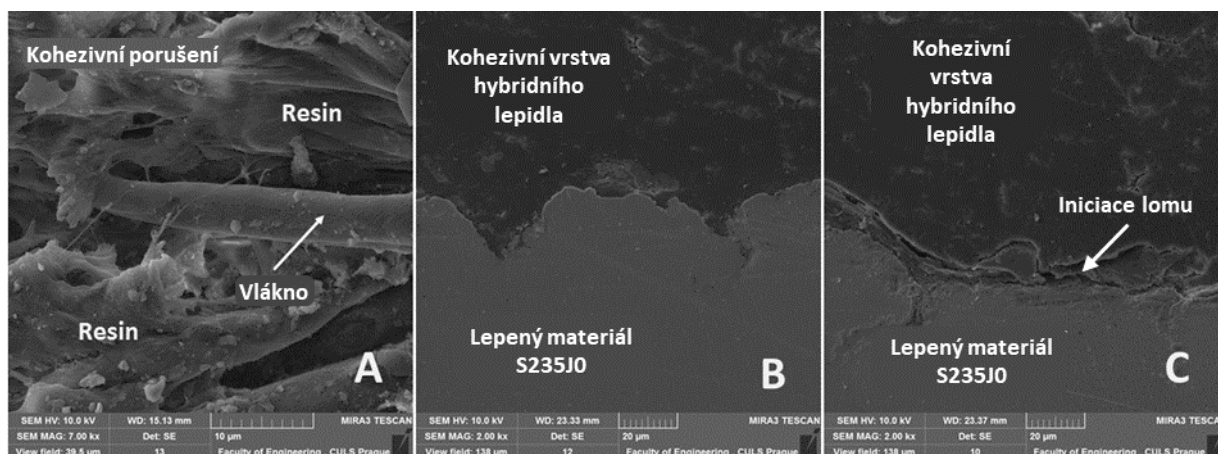
Obr. 21 Snímky průřezu hybridního lepeného spoje pořízené metodou SEM: A: dispozice lepeného spoje (MAG 100 x), B: detailní pohled na vrstvu lepeného spoje (MAG 2,00 kx)



[15]

SEM analýza povrchu lomu prokázala dobrou smáčivost chemicky upravených tkanin (obr. 22A), tj. dobrou interakci s pryskyřicí (Resin). Průřez nezátíženého lepeného spoje je patrný na obr. 22B, kde je zřejmá dobrá smáčivost a dobré adhezní interakce. Průřez zatíženého lepeného spoje po 1000 zatěžovacích cyklech bez následného přerušení je patrný na obr. 22C. Na obr. 22C je patrná iniciace lomu na rozhraní mezi kompozitní vrstvou a lepeným materiálem, která vede k selhání lepidla.

Obr. 22 Snímky SEM hybridního lepeného spoje – tkanina Bjaz: A: Lomový povrch hybridního lepeného spoje po destrukci (MAG 7,00 kx), B: Průřez nezatíženého lepeného spoje (MAG 2,00 kx), C: Průřez cyklicky zatíženého lepeného spoje (MAG 2,00 kx)

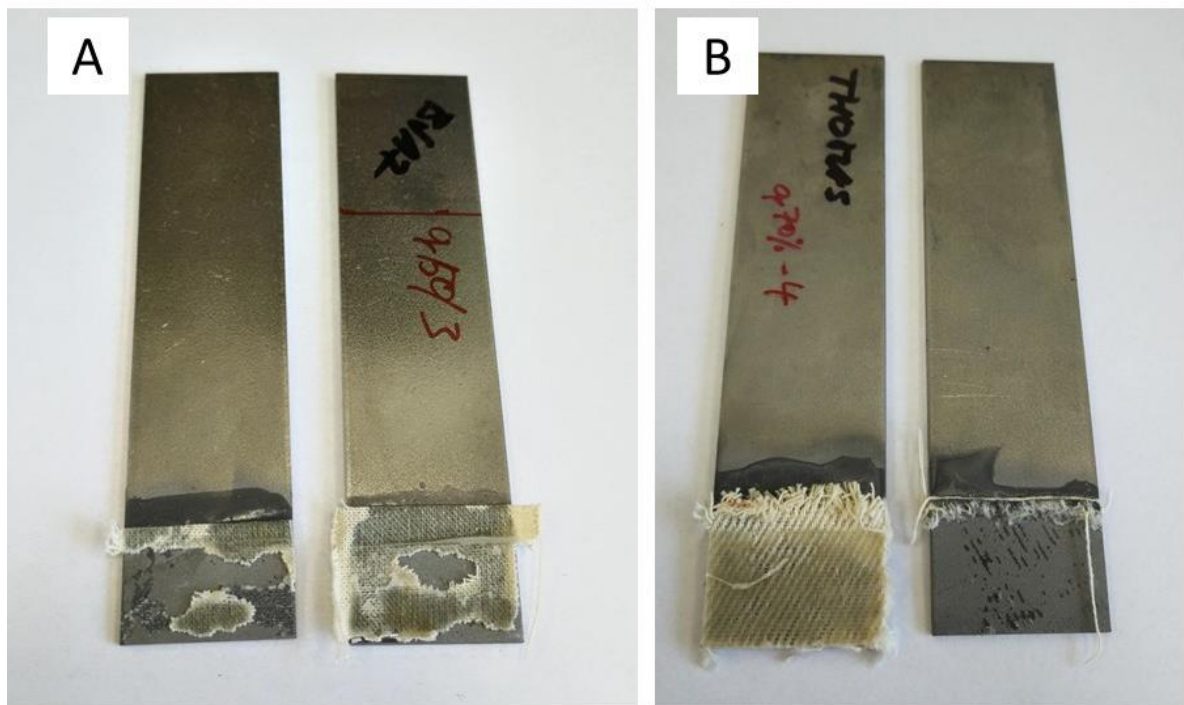


[15]

Významnějšímu uplatnění přírodních vláken v kompozitech brání jejich nízká adheze k polymerní matici, tj. nízké adhezní síly mezi biologickým vláknem a pryskyřicí. Tento deficit lze odstranit alkalickou úpravou vláken, což potvrdily výsledky [82].

Na obr. 23 jsou zobrazeny vzorky po přetržení při nízkocyklové zkoušce v intervalu 5–50 % a 5–70 %. Obr. 23A zobrazuje spoj Bjaz s alkalickou úpravou po přetržení při zkoušce 5–50 %. Lomová plocha vykazuje adhezivně kohezní porušení, tzn. že byla využita pevnost kompozitní vrstvy. Na obr. 23B je zobrazen spoj Thomas Alan s alkalickou úpravou při vyšším zatížení 5–70 %, zde je patrné pouze adhezivní porušení, tzn. že pevnost kompozitní vrstvy nebyla zcela využita.

Obr. 23 Typy lomové plochy lepených spojů: A: Adhezivně-kohezivní porušení lepeného spoje Bjaz, B: Adhezivní porušení lepeného spoje Thomas Alan



[autor]

Výsledky statické zkoušky potvrdily významný vliv všech upravených vláken na pevnost ve smyku a deformaci ve srovnání s hodnotami čisté pryskyřice viz tab. 7. Význam upravených tkanin je uveden v první polovině tab. 7. V druhé polovině tabulky jsou uvedeny výsledky neupravené tkaniny. Srovnání výsledků upravené a neupravené tkaniny potvrzuje pozitivní vliv hydroxidu sodného (NaOH). Tab. 7 také přímo uvádí pro každou tkaninu hodnotu významnosti (p-hodnota) ve srovnání s čistou pryskyřicí (Resin).

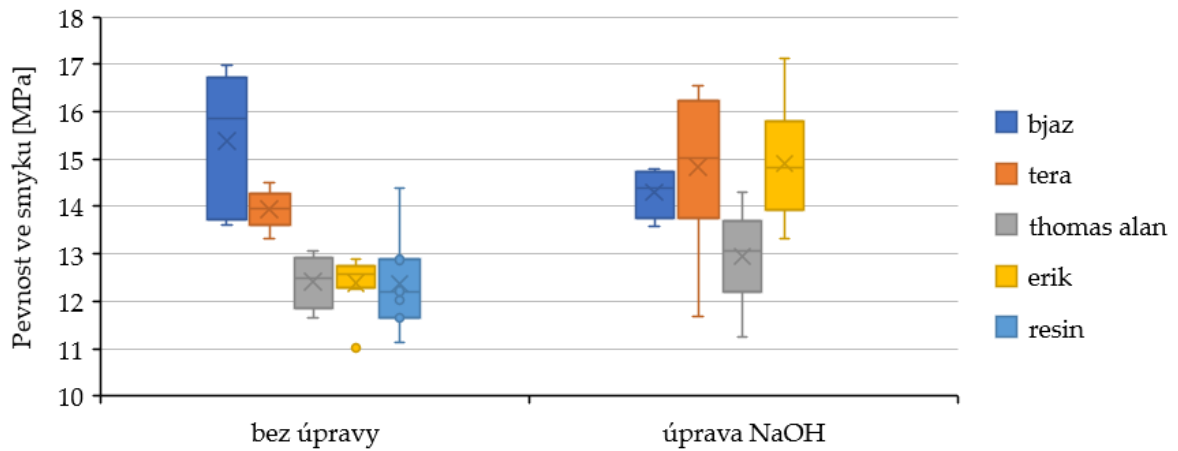
Tab. 7 Výsledky statické zkoušky s ošetřenými a neošetřenými tkaninami v porovnání s čistou pryskyřicí (RESIN)

Hybridní lepené spoj	Statická zkouška tahem		p-hodnota	
	Pevnost ve smyku	Deformace	Pevnost ve smyku	Deformace
	MPa	%		
RESIN	12,02 ±1,29	3,56 ±1,54	-	-
BJAZ	14,30 ±0,45	10,62 ±3,16	0,03	0,00
TERA	15,28 ±1,05	8,66 ±1,77	0,00	0,00
THOMAS ALAN	12,95 ±0,92	7,44 ±1,48	0,03	0,00
ERIK	14,90 ±1,15	13,89 ±3,11	0,00	0,00
BJAZ	15,38 ±1,34	10,50 ±1,98	0,02	0,09
TERA	13,94 ±0,38	9,41 ±1,09	0,16	0,19
THOMAS ALAN	12,42 ±0,55	8,23 ±1,29	0,21	0,30
ERIK	12,39 ±0,55	8,43 ±1,04	0,00	0,00

[15]

Obr. 25 ukazuje pevnost v tahu ve smyku hybridního lepeného spoje s upravenou a neupravenou tkaninou při statické zkoušce. Úprava hydroxidem sodným NaOH v 5% roztoku má pozitivní vliv na pevnost v tahu ve smyku všech tkanin kromě tkaniny Bjaz. Nižší pevnost upravené tkaniny Bjaz proti neupravené nebyla statisticky prokázána. Nízká hodnota u tkaniny Bjaz může být dána nedostatečnou úpravou při přípravě zkušebních vzorků. Nejvýraznější zvýšení pevnosti oproti čisté pryskyřici (Resin) se projevilo u upravených tkanin Erik až o 19 % na $14,90 \pm 1,15$ MPa a Tera až o 21 % na $15,28 \pm 1,05$ MPa.

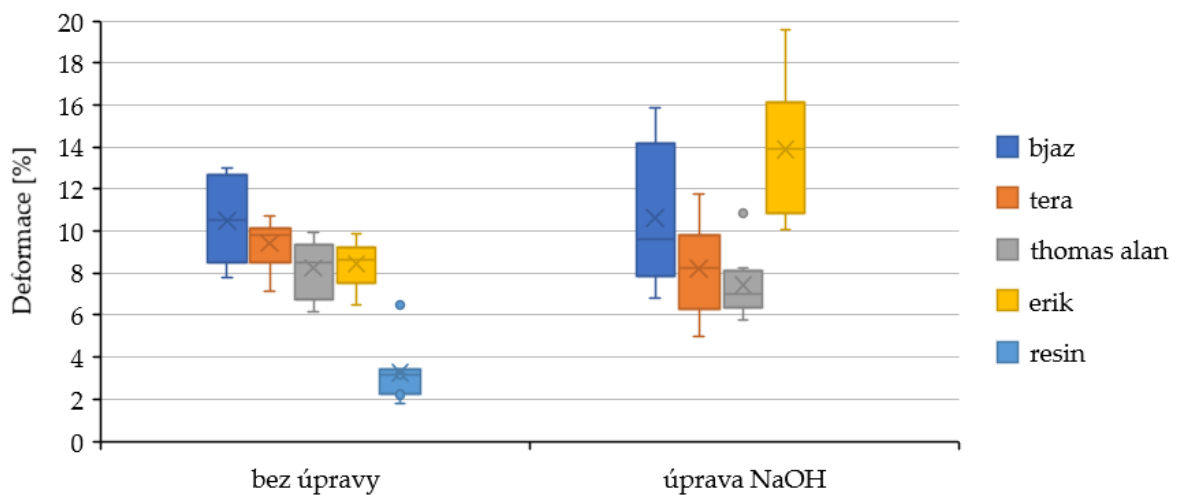
Obr. 25 Výsledky pevnosti v tahu ve smyku u lepených spojů s ošetřenými a neošetřenými tkaninami pomocí statické zkoušky



[15]

Obr. 26 ukazuje deformaci hybridního lepeného spoje s upravenou a neupravenou tkaninou při statické zkoušce. Všechny upravené tkaniny výrazně zvyšují deformaci lepeného spoje oproti Resin viz Tab. 7. Největší nárůst deformace se objevil u tkaniny Erik o 10 % na $13,89 \pm 3,11$ %.

Obr. 26 Výsledky deformace lepených spojů s ošetřenými a neošetřenými tkaninami pomocí statické zkoušky



[15]

Celkové výsledky statické tahové zkoušky potvrdily odolnost hybridních lepených spojů s úpravou hydroxidem sodným v 5% roztoku a pozitivní vliv úpravy tkanin na mechanické vlastnosti hybridního lepeného spoje. Z tohoto důvodu byly upravené tkaniny použity pouze pro následující nízkocyklovou zkoušku. Výsledky nízkocyklové zkoušky s nižším intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a vyšším intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N) jsou uvedeny v tab. 8. Lepené spoje s čistou pryskyřicí neodolaly nízkocyklovým zkouškám s intervalem zatížení 5–50 % a 5–70 % v potřebném počtu cílových zkoušek pro statistickou významnost. Tab. 7 uvádí pevnost v tahu smykem a deformaci, rozdíl deformace v intervalu 1–1000 cyklů ($\Delta\epsilon$), počet dokončených zkoušek a statisticky významný rozdíl (p-hodnota) mezi stejnými hybridními lepenými spoji při statické zkoušce a nízkocyklové zkoušce.

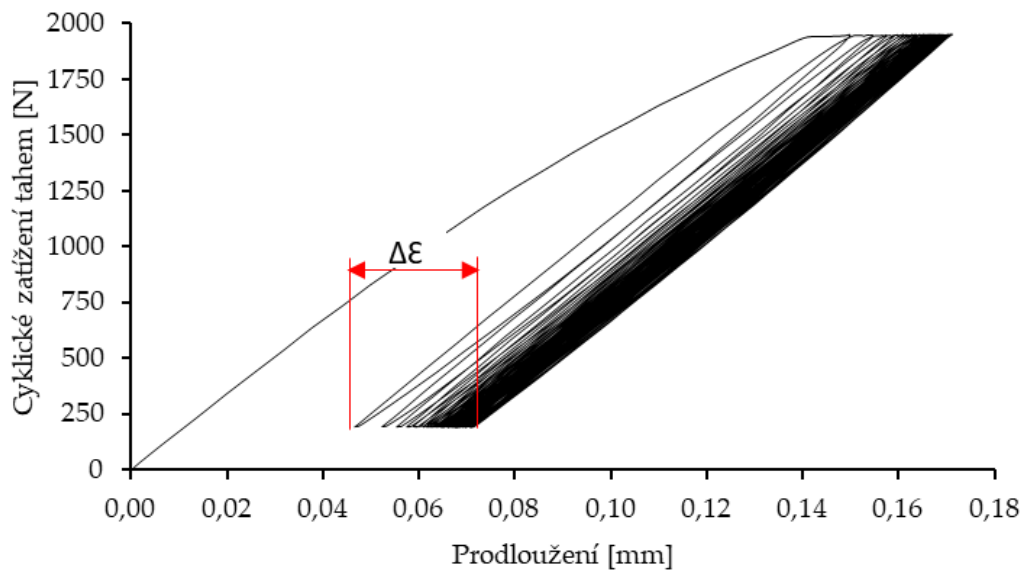
Tab. 8 Výsledky nízkocyklové zkoušky s nižším intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a vyšším intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N) lepených spojů s upravenými tkaninami

Hybridní lepený spoj	Pevnost ve smyku	Deformace	$\Delta\epsilon$ [1–1000 cyc.]	Zkoušky	Pevnost ve smyku	Deformace	
	MPa	%	%		p-hodnoty		
Zatížení 5–50%	RESIN	-	-	-	5/8	-	-
	BJAZ	12,08 ±1,00	8,67 ±2,41	0,37 ±0,20	8/8	0,00	0,11
	TERA	13,61 ±1,08	7,83 ±1,71	0,24 ±0,18	8/8	0,01	0,41
	THOMAS	12,02 ±1,37	7,78 ±1,61	0,19 ±0,05	8/8	0,18	0,71
	ALAN	16,34 ±1,24	10,79 ±1,98	0,28 ±0,16	8/8	0,04	0,04
Zatížení 5–70%	RESIN	-	-	-	4/8	-	-
	BJAZ	11,67 ±1,01	7,81 ±1,08	0,43 ±0,09	8/8	0,00	0,02
	TERA	15,75 ±0,85	9,94 ±1,90	0,35 ±0,18	8/8	0,41	0,25
	THOMAS	-	-	-	4/8	0,00	0,00
	ALAN	16,22 ±1,14	10,63 ±1,92	0,36 ±0,18	8/8	0,06	0,04

[15]

Na obr. 27 je znázorněno nízkocyklové zatížení, kde je zobrazen rozdíl deformace v intervalu 1–1000 cyklů ($\Delta\epsilon$). Rozdíl deformace představuje rozdíl mezi deformací po 1. a 1000. cyklu. Rozdíl deformace závisí na zatížení a prodloužení. Tato hodnota ovlivňuje celkový průběh zatížení a výsledné mechanické vlastnosti. Výsledek prokázal, že rostoucí hodnota rozdílu deformace ($\Delta\epsilon$) negativně ovlivňuje pevnost hybridního lepeného spoje až do jeho porušení.

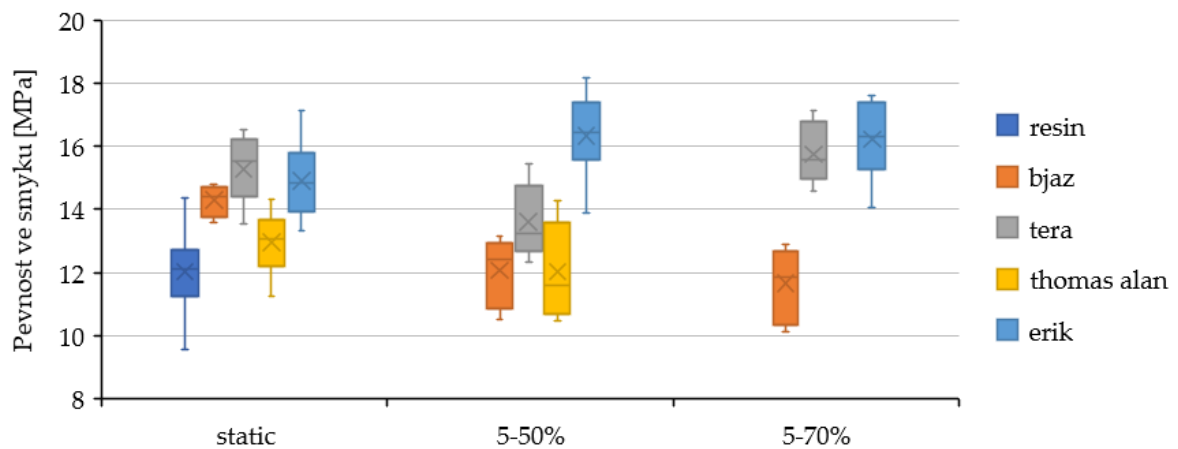
Obr. 27 Rozdíl deformace v intervalu 1–1000 cyklů ($\Delta\epsilon$) při cyklickém zatížení



[15]

Obr. 28 ukazuje výsledky pevnosti v tahu smykem při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N). Z obrázku je patrné statisticky významné zvýšení pevnosti lepeného spoje s upravenou tkaninou Erik při statické zkoušce, hodnoty pevnosti jsou uvedeny v tab. 8. Lepené spoje s čistou pryskyřicí neodolaly nízkocyklovému zatížení. Pevnost lepených spojů s tkaninami klesá při nízkocyklové zkoušce 5 až 50 % s výjimkou tkaniny Erik. Lepené spoje s tkaninou Erik rostou proti statické hodnotě až o 10 % na $16,34 \pm 1,24$ MPa. Lepené spoje s tkaninou Thomas Alan nevydržely nízkocyklovou zkoušku 5 až 70 %. Pevnost lepených spojů s tkaninou Bjaz se při zatížení 5–70 % opět snížila. Pevnost lepených spojů s tkaninou Erik při zatížení 5–70 % byla $16,22 \pm 1,14$ MPa relativně stejná jako hodnota ze zatížení 5–50 %. Pevnost lepených spojů s tkaninou Tera se při zatížení 5–70 % zvýšila proti zatížení 5–50 % na hodnotu rovnou statické pevnosti. Lepené spoje s tkaninou Tera se zvyšují proti statické hodnotě až o 3,1 % na $15,75 \pm 0,85$ MPa. Výsledky nízkocyklové zkoušky na pevnost ukazují, že 100% bavlněná tkanina absorbuje cyklické zatížení s malým poklesem pevnosti, dokonce i se zvýšením pevnosti, tzn. tkanina Erik a Tera mají samozpevňující účinek.

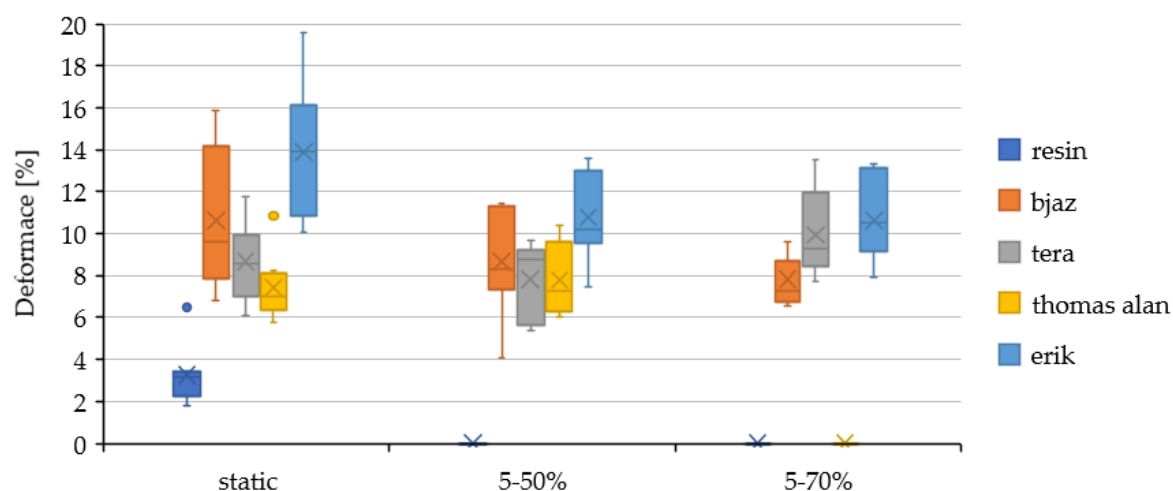
Obr. 28 Pevnost ve smyku při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N)



[15]

Obr. 29 ukazuje výsledky deformace při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N). Deformace lepeného spoje se u všech testovaných tkanin výrazně zvyšuje proti čisté pryskyřici při statické zkoušce. Tkaniny výrazně zvyšují deformaci při statické zkoušce. Tato skutečnost znamená předpoklad pro dobré mechanické vlastnosti při nízkocyklové zkoušce. Deformace adhezivních spojů se při nízkocyklové zkoušce výrazně nezměnila s výjimkou lepených spojů s tkaninou Erik. Deformace lepených spojů s tkaninou Erik se významně snížila až o 2 % při 5–50 % a 5–70 % proti statickým hodnotám spojů s tkaninou Erik.

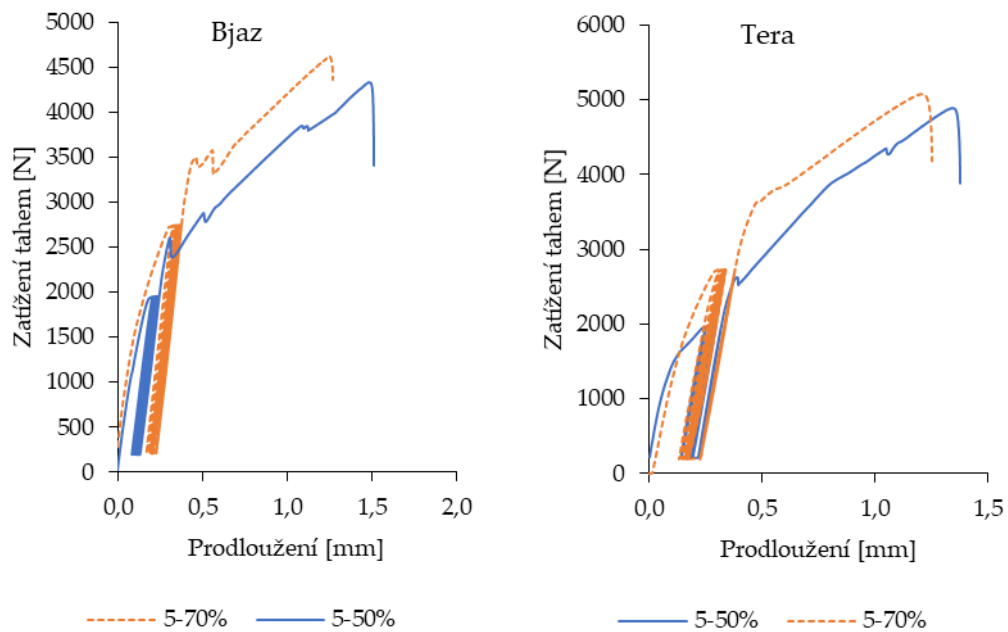
Obr. 29 Deformace při statické zkoušce, nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–50 % (192–1951 N) a nízkocyklové zkoušce s intervalem zatížení 5–70 % (192–2732 N)



[15]

Deformace při nízkocyklové zkoušce je velmi důležitá a může předpovědět následné selhání. Tkaniny zvyšují deformaci lepeného spoje, ale pozitivní účinek zvýšení má své meze. Příliš vysoká hodnota deformace může způsobit rychlý pokles pevnosti nebo selhání lepeného spoje. Rozdíl deformace (obr. 27) je důležitým faktorem, který popisuje průběh deformace. Následující obrázky (obr. 30, 31) popisují průběh zatížení v závislosti na tahovém zatížení a deformaci. Obr. 30 popisuje průběh zatížení lepeného spoje Bjaz při nízkocyklovém zatížení 5–50 % s rozdílem deformace $0,37 \pm 0,20$ % a při nízkocyklovém zatížení 5–70 % s rozdílem deformace $0,43 \pm 0,09$ %. Druhá část obr. 30 popisuje průběh zatížení lepeného spoje Tera při nízkocyklovém zatížení 5–50 % s rozdílem deformace $0,24 \pm 0,18$ % a při nízkocyklovém zatížení 5–70 % s rozdílem deformace $0,35 \pm 0,18$ %.

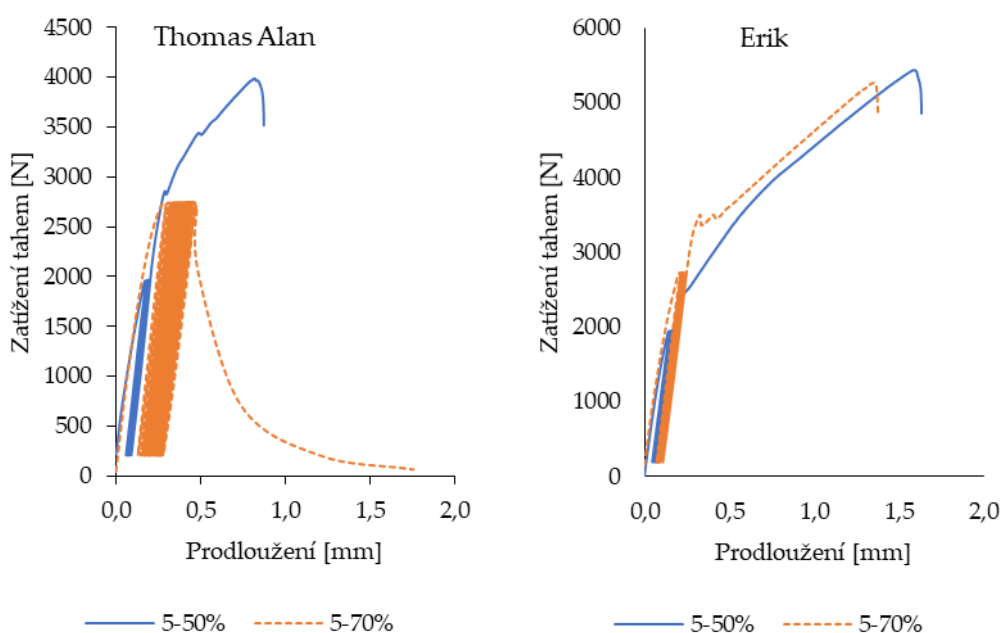
Obr. 30 Nízkocyklový průběh zatěžování 5–50 % a 5–70 % pro lepené spoje s tkaninou Bjaz a Tera



[15]

Obr. 31 popisuje průběh zatížení lepeného spoje Thomas Alan při nízkocyklovém zatížení 5–50 % s rozdílem deformace $0,19 \pm 0,05$ %. Lepené spoje nedolaly nízkocyklovému zatížení 5–70 %. Je patrný vysoký nárůst rozdílu deformace u Thomas Alan. Druhá část obr. 31 popisuje průběh zatížení lepeného spoje Erik při nízkocyklovém zatížení 5–50 % s rozdílem deformace $0,28 \pm 0,16$ % a při nízkocyklovém zatížení 5–70 % s rozdílem deformace $0,36 \pm 0,18$ %.

Obr. 31 Nízkocyklový průběh zatížení 5–50 % a 5–70 % pro lepené spoje s tkaninou Thomas Alan a Erik



[15]

Výsledky rozdílu deformace u lepených spojů s tkaninami Tera a Erik potvrdily, že nižší hodnota rozdílu při cyklickém zatížení pozitivně ovlivňuje následující pevnost v tahu smykem. Celkové výsledky uvádějí hybridní lepené spoje s tkaninami Erik a Tera jako nejodolnější kombinaci. Při zpětném pohledu do Tab. 3 je zřejmé, že hustota tkanin Erik a Tera se liší, ale útek a osnova, geometrie a tloušťka vrstvy jsou podobné. Tkanina Erik měla nejlepší výsledky ve všech podmínkách zatížení s nižší hustotou než Tera. Na druhé straně se proces samo zpevnování objevil u tkaniny Tera, která má nejvyšší hustotu při nízkocyklové zkoušce 5–70 %. To znamená, že správná volba typu tkaniny závisí na podmínkách použití.

5.2 Experimentální výzkum vlnovitě přeplátovaných spojů s vyztužující přírodní bavlněnou tkaninou při cyklickém zatížení

Pevnost lepených spojů závisí na mnoha faktorech, jako je mechanismus adheze, smáčivost, degradace lepidla, struktura lepeného materiálu atd. Dalším důležitým faktorem je konstrukce spoje, a to zejména délka přeplátování, tj. plocha, která přenáší adhezní napětí. Pro zvýšení

pevnosti lepených spojů nelze zvyšovat náhodně tloušťku vrstvy lepidla a velikost jednoduchého přeplátování při praktické aplikaci [13]. Toto omezení je způsobeno rostoucí hmotností, konstrukčním omezením a tvarovou složitostí konečného výrobku. Tato studie se zaměřuje na modifikaci povrchu adherendu pomocí tváření, konkrétně na tvarování adherendů pomocí určitého tvaru přeplátování. Předmětem výzkumu je vytvoření zvlněného profilu adherendu lisováním. Na základě analýzy několika výzkumů [64, 83–88] se vytvořila tvarová plocha s cílem zefektivnit plochu přeplátování pro smáčení lepidla. Vlnitý geometrický tvar lepené plochy měl obvykle pozitivní vliv na pevnost v tahu lepených spojů [83–88]. Výsledky výzkumu však neprokázaly významný vliv geometrie lepeného profilu při použití dvou geometrických tvarů lepeného materiálu. Výrazné zlepšení bylo pozorováno při použití vyztužující bavlněné tkaniny v hybridní lepené vrstvě. To se projevilo zvýšením životnosti lepeného spoje při nízkocyklové únavě, což je zásadní aspekt pro aplikaci lepeného spoje.

Lepené spoje byly zpočátku hodnoceny statickou tahovou zkouškou. Mechanické vlastnosti lepených spojů (Resin, Erik a Tera) a různých konstrukcí přeplátování (Standard, WH1 a WH2) při statických zkouškách jsou uvedeny v tab. 9. Pro výzkum byly použity tkaniny (Erik, Tera) s povrchovou úpravou 10% roztokem NaOH. Vliv změny tvaru spolu s vyztužujícími tkaninami na mechanické vlastnosti je popsán na základě jejich závislosti na obr. 32–34, kde jsou údaje porovnány s výsledkem spoje Resin–Standard.

Tab. 9 Výsledky statických tahových zkoušek na mechanické vlastnosti lepených spojů a statistické vyhodnocení dat (p-hodnota)

Hybridní lepený spoj	Statické zkoušky						
	Tvar	Pevnost ve smyku		Deformace		Modul pružnosti	
		MPa	p-hodnota	%	p-hodnota	MPa	p-hodnota
Resin	Standard	7,38 ±0,22	-	14,30 ±1,88	-	52,46 ±6,65	-
	WH1	3,91 ±0,23	0,00	4,51 ±0,73	0,00	88,96 ±16,02	0,00
	WH2	2,45 ±0,13	0,00	3,92 ±0,54	0,00	63,67 ±8,14	0,01
Erik	Standard	6,53 ±0,38	0,00	8,00 ±1,59	0,00	83,68 ±10,87	0,00
	WH1	5,31 ±0,29	0,00	6,27 ±0,65	0,00	85,18 ±5,29	0,00
	WH2	2,99 ±0,33	0,00	6,69 ±3,12	0,00	52,48 ±17,16	0,50
Tera	Standard	7,12 ±0,74	0,22	12,03 ±2,70	0,07	61,53 ±10,43	0,06
	WH1	4,30 ±0,83	0,00	4,92 ±0,91	0,00	87,61 ±7,91	0,00
	WH2	2,67 ±0,43	0,00	7,16 ±3,14	0,00	44,99 ±19,14	0,19

[17]

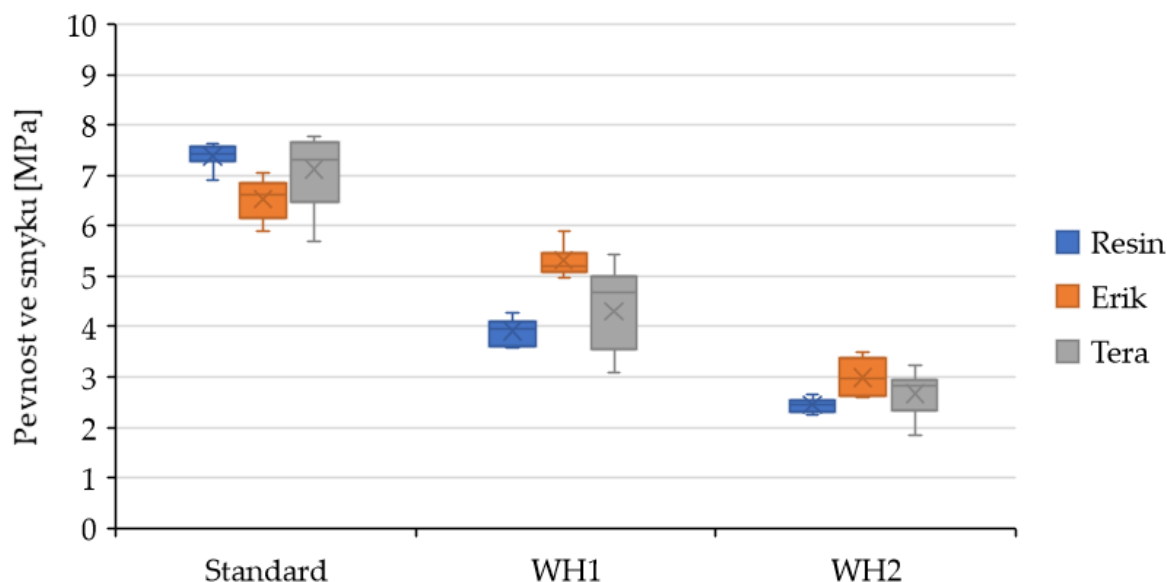
Výsledky statické tahové zkoušky prokázaly poměrně výraznou deformaci $14,3 \pm 1,88$ % u lepeného spoje Resin-Standard, jak je uvedeno v tab. 9. Pevnost lepeného spoje však byla nejvyšší, $7,38 \pm 0,22$ MPa ze všech testovaných vzorků. Změna geometrie ze standardního přeplátovaného spoje Resin-Standard na tvarově přeplátované spoje Resin-WH1 a Resin-WH2 neměla pozitivní vliv na pevnost v tahu při statických zkouškách. Jak ukazuje obr. 32, pevnost Resin-WH1 se snížila o 47 % na $3,91 \pm 0,23$ MPa a pevnost Resin-WH2 se snížila o 67 % na $2,45 \pm 0,13$ MPa.

Pevnost ve smyku Erik-Standard se v porovnání s Resin-Standard mírně snížila o 10 % na $6,53 \pm 0,38$ MPa. Pevnost u Erik-WH1 se snížila o 28 % na $5,31 \pm 0,29$ MPa oproti Resin-Standard. Pokles v tomto případě není tak velký jako u Resin-WH1. Pevnost v Erik-WH2 se snížila o 60 % na $2,99 \pm 0,33$ MPa. Tento pokles byl u vzorku Resin-WH2 o 7 % nižší. Výsledky jasně ukazují, že tkanina Erik pozitivně ovlivnila pevnost v tahu u vzorků Erik-WH1 a WH2, jak je vidět na obr. 32.

Tera-Standard dosáhl při statickém zatížení pevnosti $7,12 \pm 0,74$ MPa, což je o 3 % méně než u Resin-Standard. Je to však statisticky nevýznamné. Pevnost u materiálu Tera-WH1 se snížila o 42 % na $4,30 \pm 0,83$ MPa. Tento pokles byl o 5 % nižší než u vzorku Resin-WH1. Pevnost u vzorku Tera-WH2 se snížila o 64 % na $2,67 \pm 0,43$ MPa, což je o 3 % méně než u vzorku Resin-

WH2. Výsledky ukazují, že tkanina Tera mírně zvýšila pevnost v tahu u Tera-WH1 a Tera-WH2, jak je vidět na obr. 32.

Obr. 32 Vyhodnocení výsledků smykové pevnosti lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje



[17]

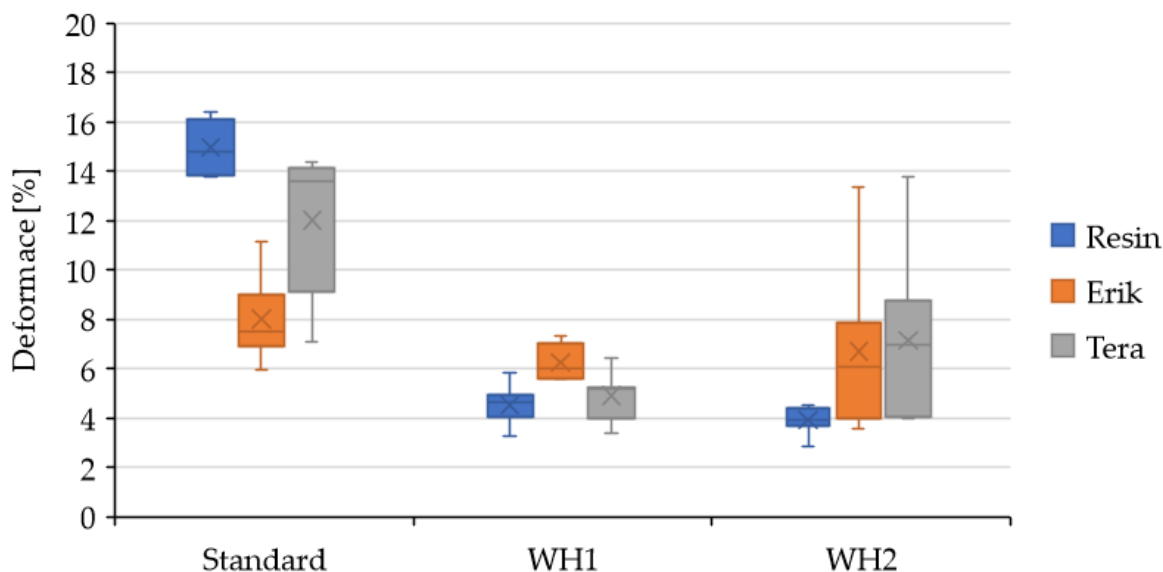
Výsledky statické tahové zkoušky prokázaly poměrně výraznou deformaci $14,3 \pm 1,88$ % u materiálu Resin-Standard, jak je vidět na obr. 33, oproti výsledkům předchozího výzkumu [15]. Silná deformace ukazuje na poměrně nízkou únosnost spoje. Předchozí výzkum rovněž ukázal, že lepený spoj s takto výraznou deformací nemůže odolat cyklickému zatížení [15]. Tato skutečnost byla prokázána cyklickým zatěžováním v intervalech 5–50 % (267–2674 N) a 5–70 % (267–3743 N), kdy lepený spoj s čistou pryskyřicí nevydržel zatížení v žádném z intervalů. Oblast lomu vykazovala adhezně-kohezní strukturu. Výdrž spoje s pryskyřicí nebyla ovlivněna modifikací WH1 a WH2. U vzorku Resin-WH1 se deformace snížila na $4,5 \pm 0,73$ %, jak je uvedeno v tab. 9. U vzorku Resin-WH2 se deformace snížila na $3,92 \pm 0,54$ %. Příliš nízká deformace při střední pevnosti ukazuje na nízkou odolnost spoje při cyklickém zatěžování [15]. Z toho důvodu lepené spoje nevydržely cyklické zatížení.

Deformace u Erik-Standard se pozitivně snížila na $8,00 \pm 1,59$ %. Tento pokles definuje zvýšení tuhosti spoje při zachování pevnosti, a tím i zlepšení odolnosti při cyklických zkouškách, jak ukazují obr. 32 a 33. Deformace u Erik-WH1 pozitivně klesla na $6,27 \pm 0,65$ %. Přestože

konstrukce/geometrie spoje byla změněna, tuhost zůstala zachována, což vedlo k odolnosti spoje při cyklických zkouškách v intervalu zatížení 5–50 %. Erik-WH2 vykazoval vyšší deformaci, $6,69 \pm 3,12$ %, spojenou s nižší pevností, jak ukazují obr. 32 a 33. To ukazuje na nižší odolnost při cyklickém zatížení.

K podobné deformaci došlo i v případě Tera-Standard. Pozorovaná deformace byla $12,03 \pm 2,70$ %, což je hodnota nižší pouze o 2,3 % (statisticky nevýznamné, p-hodnota 0,22) oproti Resin-Standard. Tento malý rozdíl v deformaci způsobil dostatečné zvýšení tuhosti spoje při působení cyklického zatížení, a to jak v intervalu 5–50 %, tak v intervalu 5–70 %. Deformace u Tera-WH1 se pozitivně snížila na $4,92 \pm 0,91$ %, čímž se zachoval optimální poměr mezi pevností a deformací, a tím i tuhost lepeného spoje, jak je znázorněno na obr. 32 a 33. Tera-WH2 vykazoval deformaci $7,16 \pm 3,14$ %. To je poměrně velká deformace spojená s nižšími pevnostmi. To svědčí o nízké odolnosti při cyklickém zatížení.

Obr. 33 Vyhodnocení výsledků deformace lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje

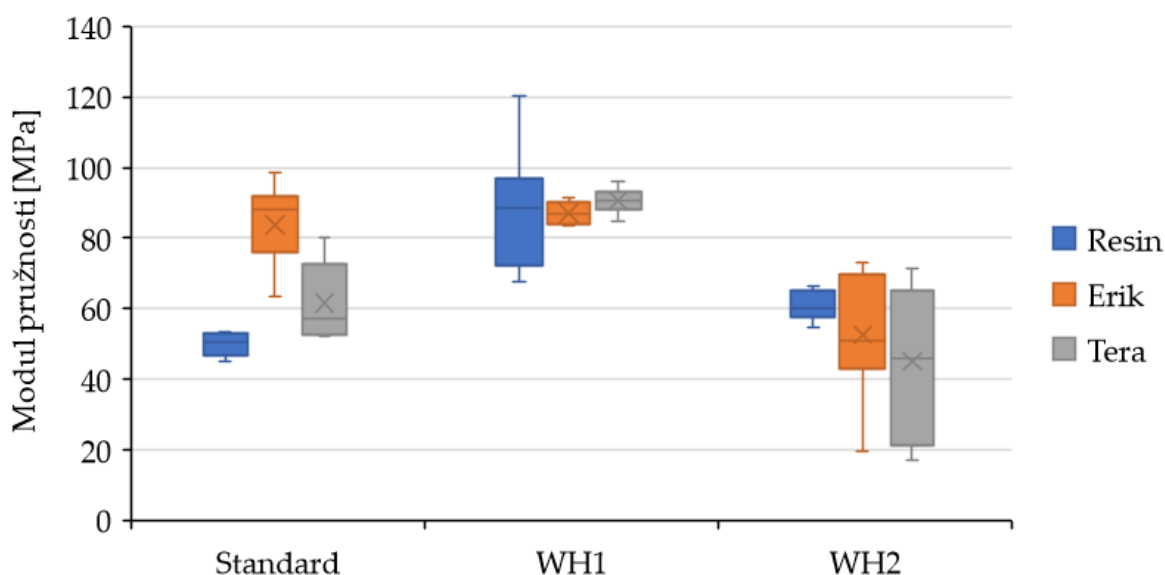


[17]

Obr. 34 ukazuje modul pružnosti u lepených spojů. Vzorek Resin-Standard vykazuje modul pružnosti $52,46 \pm 6,65$ MPa. Modul pružnosti u spoje Erik-Standard se zvýšil na $83,68 \pm 10,87$ MPa. V případě spoje Tera-Standard se modul zvýšil na $61,53 \pm 10,43$ MPa. Vzorky Erik-Standard a Tera-Standard vykazovaly vyšší modul pružnosti a tím i lepší vlastnosti při

cyklickém zatěžování. Spoj Resin-WH1 vykazoval modul pružnosti $88,96 \pm 16,02$ MPa, zatímco spoj Erik-WH1 vykázal $85,18 \pm 5,29$ MPa a spoj Tera-WH1 $87,61 \pm 7,91$ MPa. V případě spoje WH1 ve tvaru vlny bylo prokázáno zvýšení modulu pružnosti. Spoj Resin-WH2 vykazoval nižší modul pružnosti $63,67 \pm 8,14$ MPa. Spoj Erik-WH2 vykazoval modul pružnosti $52,48 \pm 17,16$ MPa a Tera-WH2 vykazoval $44,99 \pm 19,14$ MPa. Spoje ve tvaru vlny WH2 vykazovaly nižší modul ve srovnání se spojem WH1, což by mohlo mít vliv na odolnost a únavové vlastnosti při cyklickém zatížení.

Obr. 34 Vyhodnocení výsledků modulu pružnosti lepeného spoje při statickém zatížení a jejich průběh v závislosti na konstrukci spoje



[17]

Výsledky cyklických mechanických zkoušek lepených spojů s vyztužujícími tkaninami Tera a Erik s různými tvary spojů jsou uvedeny v tab. 10. Výsledky statických zkoušek ukázaly, že Resin-Standard, WH1 a WH2 nevydržely žádnou intenzitu cyklického zatížení. Geometrie ve tvaru vlny u spojů Resin-WH1 a WH2 neměla vliv na mechanické vlastnosti během statické zkoušky tak, aby spoje byly schopny odolat cyklickému zatížení. Výsledkem je, že se ani jeden z tvarových lepených spojů s čistou pryskyřicí neosvědčil během cyklického zatížení v intervalech 5–50 % (267–2674 N) a 5–70 % (267–3743 N).

Erik-Standard odolal cyklickému zatížení v intervalu 5–50 % s mírným nárůstem na $7,13 \pm 0,52$ MPa, jak je znázorněno na obr. 35. Deformace se zvýšila na $12,97 \pm 4,06$ % ve

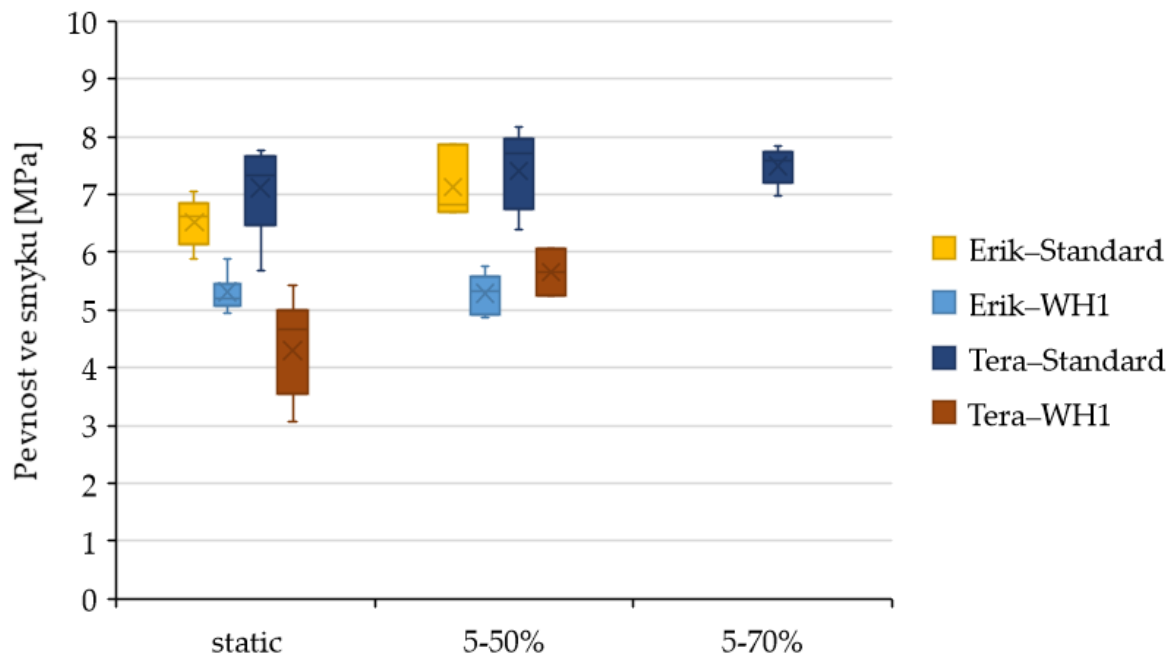
stejném čase, jak ukazuje obr. 36. Zvýšená deformace vede k vyšší odolnosti spoje při cyklickém zatížení. Spoj nedosáhl dostatečně vysokých parametrů, aby vydržel zatížení 5–70 %.

Tab. 10 Výsledky cyklických zkoušek na mechanické vlastnosti lepených spojů v intervalu zatížení 5–50 % a 5–70 %

Lepený spoj	Tvar	Nízkocyklová zkouška (5–50 %)			Nízkocyklová zkouška (5–70 %)		
		Smyková pevnost MPa	Deformace %	Zkoušky	Smyková pevnost MPa	Deformace %	Zkoušky
Resin	Standard	-	-	0/7	-	-	0/7
	WH1	-	-	0/7	-	-	0/7
	WH2	-	-	0/7	-	-	0/7
Erik	Standard	7,13 ±0,52	12,97 ±4,06	7/7	-	-	3/7
	WH1	5,29 ±0,32	5,99 ±0,80	7/7	-	-	0/7
	WH2	-	-	0/7	-	-	0/7
Tera	Standard	7,45 ±0,01	14,15 ±2,82	7/7	7,49 ±0,29	14,76 ±2,41	7/7
	WH1	5,66 ±0,40	6,79 ±0,58	7/7	-	-	0/7
	WH2	-	-	0/7	-	-	0/7
p-hodnota							
Erik	Standard	0,38	0,15	-	-	-	-
	WH1	0,90	0,53	-	-	-	-
Tera	Standard	0,53	0,41	0,37	0,17	-	-
	WH1	0,00	0,17	-	-	-	-

[17]

Obr. 35 Vyhodnocení výsledků tahové pevnosti lepeného spoje při statickém zatížení a cyklickém zatížení v zátěžovém intervalu 5–50 % a 5–70 %

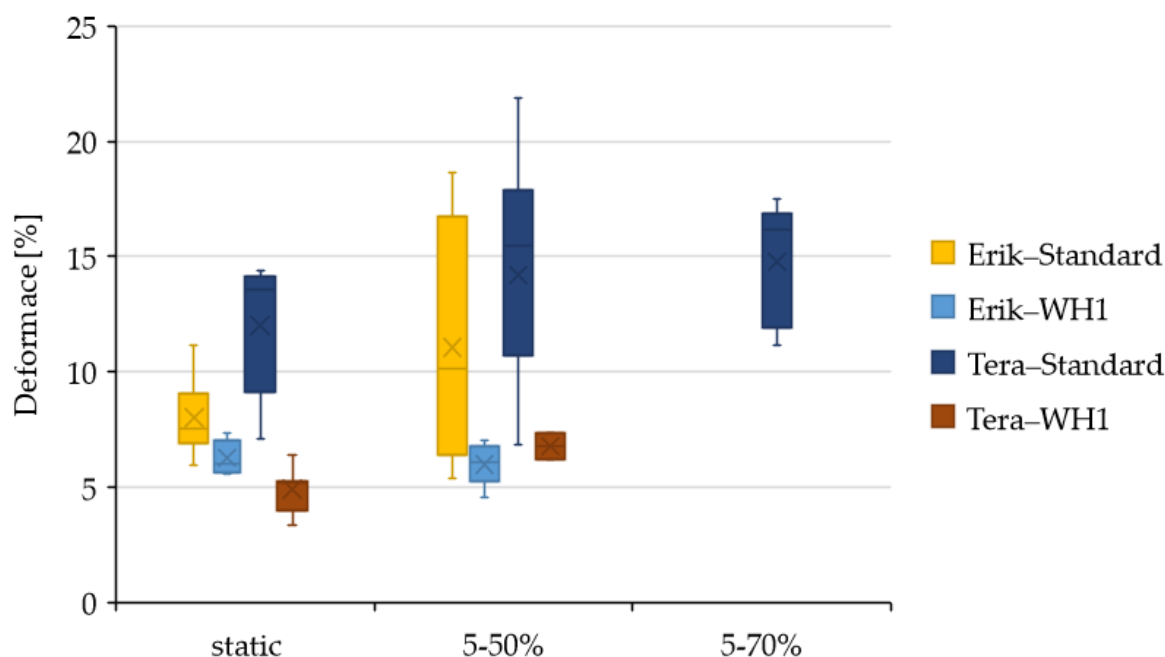


[17]

Erik-WH1 vykazoval pevnost $5,29 \pm 0,32$ MPa a ve srovnání se statickou pevností v tahu se pevnost výrazně nezměnila, jak ukazuje obr. 35. Deformace rovněž nevykazovala významné změny ($5,99 \pm 0,80$ MPa), jak ukazuje obr. 36. Parametry byly dostatečné pro odolnost při zatížení 5–50 %, ale nebyly dostatečné pro odolnost při zatížení 5–70 %. Kvůli nižší pevnosti a vyšší deformaci lepené spoje nevydržely cyklické zatížení. Jak Tera-Standard, tak Tera-WH1 vykazovaly zvýšenou pevnost v tahu při cyklickém zatížení spolu se sníženou deformací. To svědčí o samo-zpevňujícím účinku, jak je znázorněno na obr. 35 a 36. Nárůst pevnosti a deformace nebyl statisticky významný (p-hodnota, tab. 10). To značí, že mechanické vlastnosti lepených spojů při cyklickém zatížení byly zachovány.

Tera-Standard vykazoval pevnost $7,45 \pm 0,01$ MPa a deformaci $14,15 \pm 2,82$ % během 5–50 % cyklického zatěžování. Při 5–70 % cyklickém zatěžování byla ještě vyšší. Nárůst pevnosti nebyl statisticky významný. Byla pozorována pevnost $7,49 \pm 0,29$ MPa spolu s deformací $14,76 \pm 2,41$ %. Pevnost vzorku Tera-WH1 se zvýšila na $5,66 \pm 0,40$ MPa spolu s deformací $6,79 \pm 0,58$ %. Spoj nevydržel cyklické zatížení 5–70 %. Spoj Tera-WH2 nevydržel žádné cyklické zatížení.

Obr. 36 Vyhodnocení výsledků deformace lepeného spoje při statickém zatížení a cyklickém zatížení v zátěžovém intervalu 5–50 % a 5–70 %

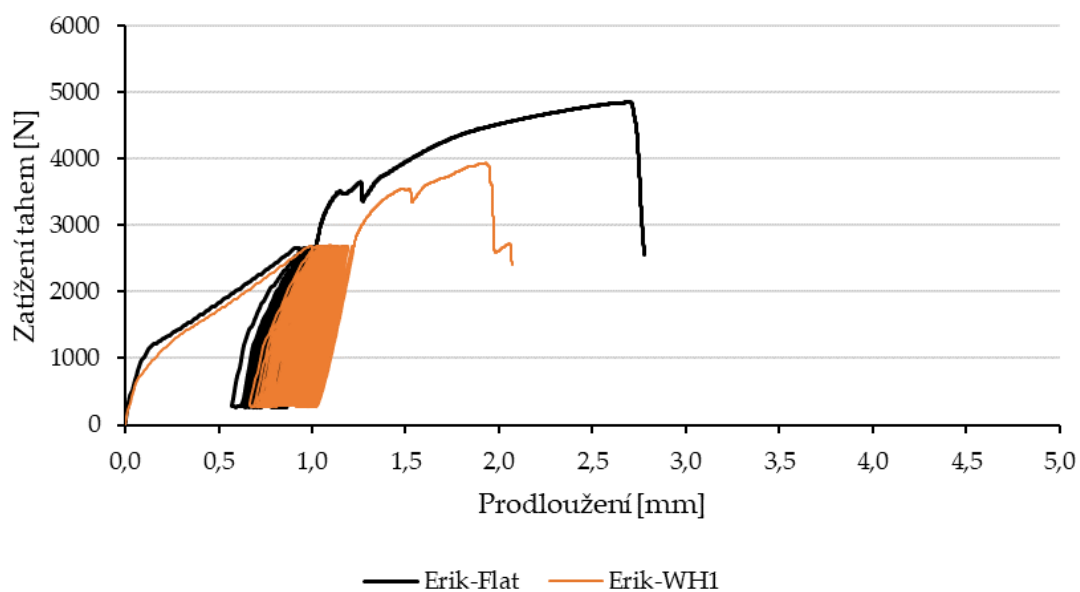


[17]

Z tab. 10 je patrné, že výztuž Erik a Tera pozitivně ovlivnila životnost, a tedy i bezpečnost lepených spojů, zejména u spojů označených jako Standard a WH1, což odpovídá výsledkům z modulu pružnosti. Podobné výsledky, které ukazují zvýšení životnosti a bezpečnosti lepených spojů při cyklickém zatížení vytvořením kompozitní vrstvy lepidla, byly zjištěny i v jiných studiích [38, 37, 71].

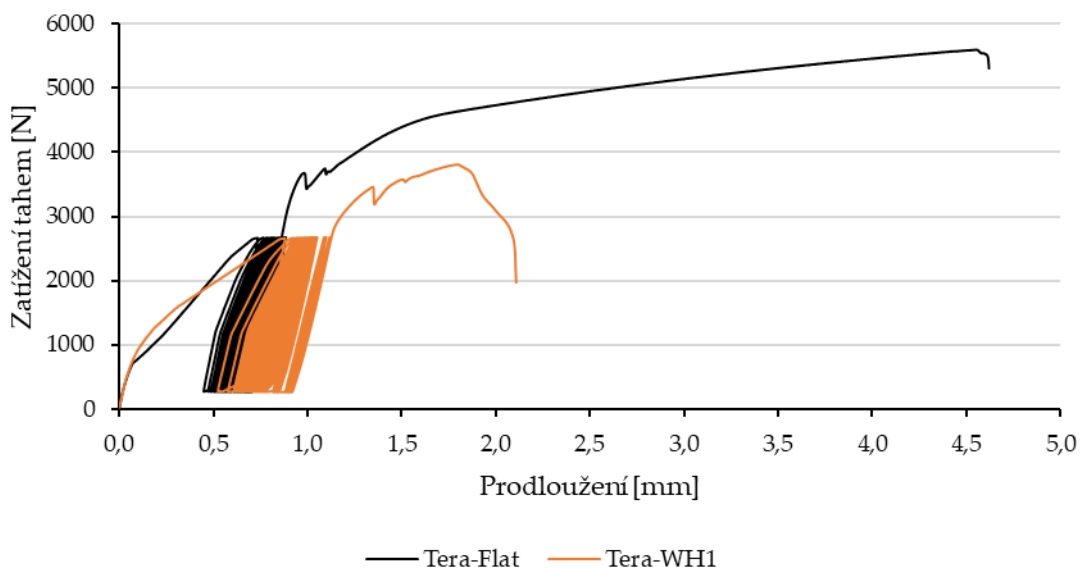
Obr. 37 ukazuje viskoelastické chování (creep) lepidel Erik-Standard a Erik-WH1 při cyklickém zatížení 5–50 %. Zřetelně je na něm vidět prodlužování během cyklického zatěžování odpovídající únavě spoje. Čím delší je prodloužení, tím dříve se spoj přeruší a nevydrží daný počet cyklů (1000 cyklů). Obr. 37 rovněž ukazuje, že u spoje Erik-WH1 došlo k delšímu prodloužení, což má za následek nižší odolnost spoje. Na obr. 38 je znázorněno cyklické zatížení spojů Tera-Standard a Tera-WH1. Chování je podobné jako u Erik-WH1 (obr. 37). Tera-Standard podléhá během cyklického zatížení menšímu prodloužení, což má za následek zvýšenou odolnost pro následné maximální zatížení. Díky této vlastnosti vydržel Tera-Standard cyklické zatížení 5–70 %.

Obr. 37 Viskoelastické chování lepeného spoje s vyztužující tkaninou Erik s rozdílnou konstrukcí spoje při cyklickém zatížení 5–50 %



[17]

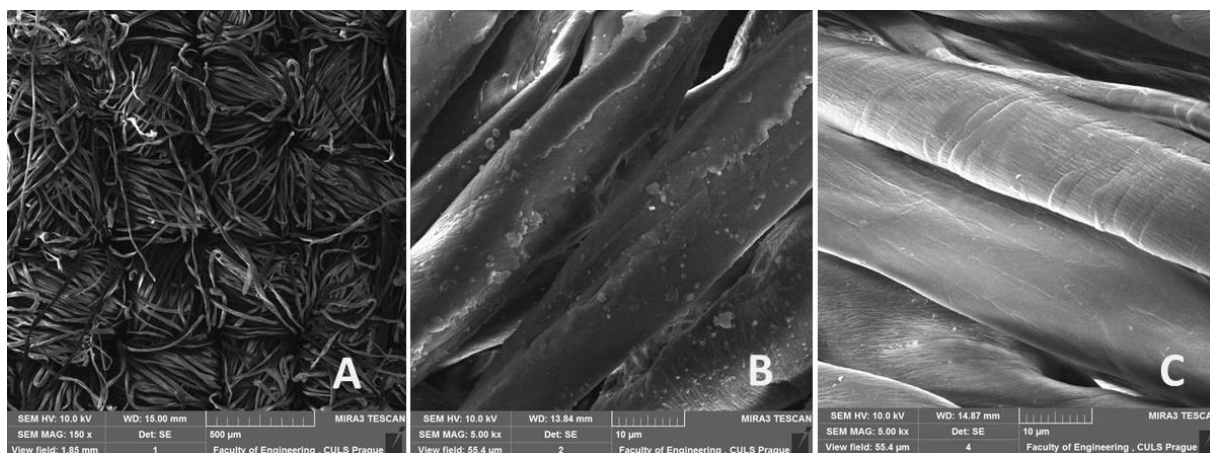
Obr. 38 Viskoelastické chování lepeného spoje s vyztužující tkaninou Tera s rozdílnou konstrukcí spoje při cyklickém zatížení 5–50 %



[17]

Obr. 39A ukazuje mikroskopický pohled na bavlněnou tkaninu Erik, která byla použita jako výztuž v lepeném spoji. Obr. 39B, C ukazují detaily v mikrostruktuře tkaniny Erik před a po alkalickém ošetření. Analýzou snímků ze skenovací elektronové mikroskopie (SEM) bylo prokázáno, že alkalická úprava rozpouští povrchové vrstvy ligninu z bavlněných vláken v tkanině. Obr. 39C rovněž neukazuje žádnou dezintegraci svazků vláken způsobenou ošetřením roztokem NaOH. Dezintegrace vláken v důsledku alkalického ošetření je negativní [53, 89] a může mít významný negativní vliv na mechanické vlastnosti vláken v tkanině [32].

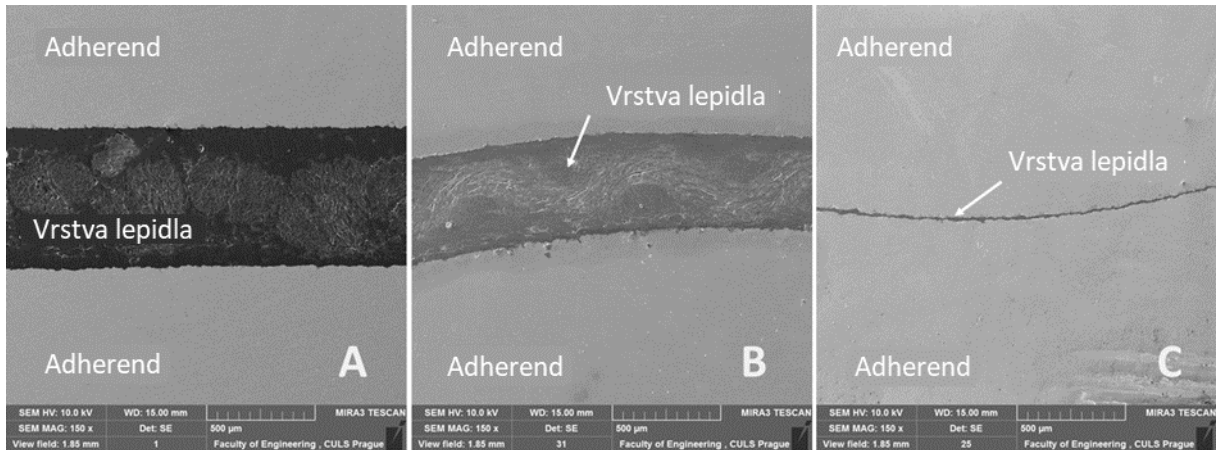
Obr. 39 Snímky SEM: (A): Bavlněná tkanina Erik (MAG 150 x); (B): Detailní pohled na tkaninu – osnovu (bavlněné vlákno) bez alkalické úpravy (MAG 5.00 kx); (C): Detailní pohled na tkaninu – osnovu (bavlněné vlákno) s alkalickou úpravou v 10% roztoku NaOH po dobu 30 minut (MAG 5.00 kx)



[17]

Řez lepenými spoji uvedený na obr. 40 jasně ukazuje rozdíly mezi jednotlivými testovanými variantami lepených spojů. Ukazuje také uspořádání adherendu a lepené vrstvy v lepeném materiálu. Lepená vrstva na Obr 40A, B je kompozitní, skládá se z výztužné bavlněné tkaniny Erik/Tera a pryskyřice (strukturní dvousložková epoxidová pryskyřice). Dále je z něj patrné, že každá varianta experimentu měla jinou tloušťku lepené vrstvy, která je uvedena v tab. 4. Průřezy (obr. 40A, C) ukazují celistvost lepené vrstvy, která nebyla vystavena cyklickému zatížení, a obr. 40B ukazuje lepenou vrstvu vystavenou 1000 cyklům v intervalech 5–50 % (267–2674 N).

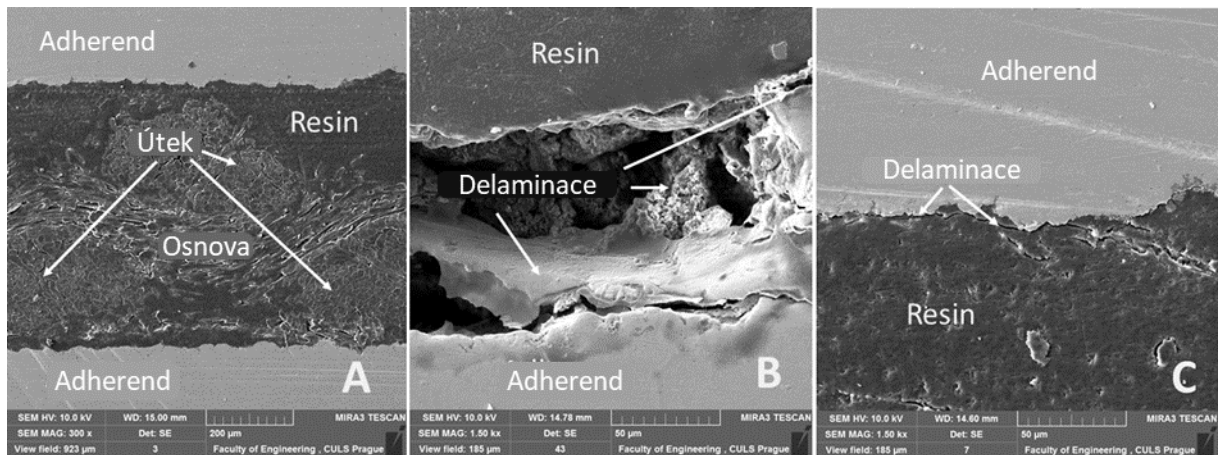
Obr. 40 Snímky SEM vzorků řezů lepeným spojem: (A): řez Tera-Standard, 0 cyklů (MAG 150 x), (B): řez Erik-WH1, 1000 cyklů v intervalu 5-50 % (267-2674 N) (MAG 150 x), (C): řez Resin-WH2, 0 cyklů (MAG 150 x)



[17]

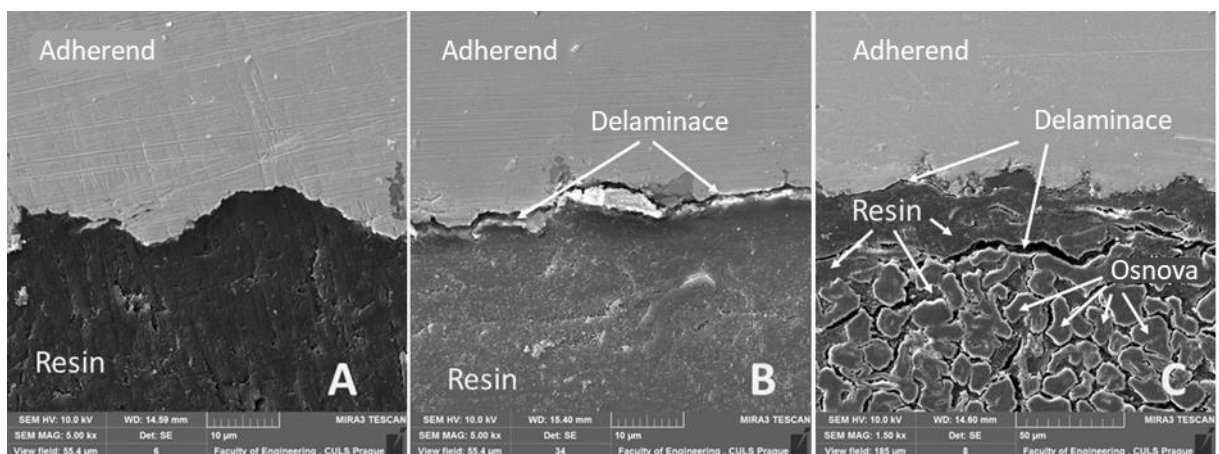
Z příčného řezu lepeného spoje na obr. 41A je patrná osnova a útek tkaniny Tera spojené pryskyřicí. Je zde vidět vzájemná interakce pryskyřice a vyztužující tkaniny tvořené bavlněnými vlákny podél osnova a útku. Obr. 41A–C a obr. 42A ukazují dobrou smáčivost (adhezi) vyztužující tkaniny a povrchu adherendu s pryskyřicí, tzn. byla provedena dostatečná povrchová úprava adherendu a vyztužující tkaniny. To dává základní předpoklad kvality lepených spojů [67–69]. Detailní pohled na obr. 41C ukazuje mírnou delaminaci na hranici lepené vrstvy a adherendu u identických lepených spojů v důsledku cyklického zatížení. Obr. 41B ukazuje zjevnou delaminaci v důsledku cyklického zatížení v lepené vrstvě. Je zde patrné nejen poškození lepené vrstvy, ale také poškození lepeného materiálu. Obr. 41B zobrazuje mimo jiné povrchové porušení samotného adherendu (plech). Při přípravě adherendu tvářením se objevují na povrchu praskliny, které se mohou rozšířit působením cyklického namáhání. Do jaké míry je výsledný spoj ovlivněn nelze specifikovat, jelikož se výzkum nevěnoval struktuře povrchu adherendu po tvářením. Delaminace v jakékoli části lepeného spoje vede k možnému roztržení, a tím k poškození celistvosti lepeného spoje, což vede k jeho porušení [90]. Výsledky výzkumu ukazují, že Tera-Standard po ošetření roztokem NaOH vykazuje zlepšení životnosti lepených spojů při 1000 cyklech v intervalu 5–50 % (267–2674 N) a také v intervalu 5–70 % (267–3743 N), jak je uvedeno v tab. 10.

Obr. 41 Snímky SEM příčného řezu lepeným spojem: (A): řez lepeným spojem Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 300 x); (B): řez lepeným spojem Erik-WH1, 1000 cyklů v intervalu 5–50 % (267–2674 N) (MAG 1.50 kx); (C): řez lepeným spojem Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 1.50 kx)



[17]

Obr. 42 Snímky SEM příčného řezu testovaného lepeného spoje: (A): příčný řez Resin-Standard (MAG 5.00 kx), (B): příčný řez Erik-WH1, 1000 cyklů v intervalu 5–50 % (267–2674 N) (MAG 5.00 kx), (C): příčný řez Tera-Standard, 1000 cyklů v intervalu 5–70 % (267–3743 N) (MAG 1.50 kx)



[17]

Analýza příčných řezů SEM se zaměřila na hodnocení lepených spojů vystavených dynamickému zatížení během cyklických zkoušek. Snímky prokázaly iniciaci mikrotrhlin v lepeném spoji, která vede k delaminaci. Malé trhliny se objevily uvnitř lepené vrstvy viz

obrázek 42C, a také na hranici mezi lepenou vrstvou a lepeným materiálem viz obrázek 42B. lepené spoje, které nebyly vystaveny cyklickému zatížení, nevykazovaly po analýze SEM žádné mikrotrhliny.

Výzkum zahrnoval cyklické tahové zkoušky lepených spojů ve tvaru vlny, aby bylo možné pochopit jejich únavové a provozní chování. Byla provedena řada výzkumů týkajících se lepených spojů s modifikovanými tvary adherendů při statickém zatížení [91, 92]. V praktických aplikacích má však větší význam cyklické zatěžování tvarových geometrií. Praktická řešení zahrnují několik zakřivených prvků, které jsou cyklicky zatěžovány a deformovány. Někdy je nutné vytvářet tvarové spoje, což podstatně snižuje pevnost. Je třeba provést rozsáhlý výzkum s několika dalšími tvary, aby se našla praktická řešení, která vyhovují požadavkům na konstrukci a zároveň vykazují dobré mechanické vlastnosti a životnost.

5.3 Další výsledky v oblasti lepení a kompozitních materiálů

Výsledky disertační práce vychází z vláknových kompozitů, nicméně během doktorandského studia proběhla spolupráce také na dalších výzkumech v oblasti kompozitních materiálů a lepených spojů. Jednou ze studovaných oblastí byly i částicové kompozity. Jednotlivé výzkumy na částicové kompozity jsou ve stručnosti uvedeny níže:

- Modifikace jednosložkového polyuretanového tmelu RPS 45 používaného v automobilovém průmyslu za účelem zvýšení pevnostních vlastností lepeného spoje. Pro zachování elastických vlastností byly jako plnivo použity mikročástice pryžového prášku získaného z procesu recyklace pneumatik. Výsledky mechanických zkoušek prokázaly pozitivní vliv plniva na pevnost vyšší o $42,68 \pm 6,96$ % a prodloužení při přetržení ϵ_b vyšší o $12,2 \pm 20,95$ %. Naopak napětí při mezi kluzu se snížilo. [73]
- Hodnocení mechanických vlastností polymerního částicového kompozitu na bázi zbytků z produkce borovicových semen, tj. šišek. Modifikace lepidla biologickými plnivými může zlepšit jeho mechanické vlastnosti a snížit náklady, což snižuje celkové náklady na výrobu kompozitního systému. Pevnost kompozitu v tahu se zvýšila až o 10,95 % na $34,02 \pm 3,26$ MPa a tvrdost se zvýšila až o 44,94 % na $97,55 \pm 2,63$ H 2,5/961. [93]

- Výzkum vlivu plniva na bázi mletého odpadu z kávových zrn přidaného do dvousložkové epoxidové matrice pro lepení. Byly hodnoceny rozdíly mechanických vlastností lepených spojů s plnivem na bázi mletého odpadu z kávových zrn při statickém a cyklickém zatížení s 1000 cykly při prvním intervalu zatížení mezi 5 až 30 % a druhém intervalu 5 až 70 % statické pevnosti ve smyku. [95]
- Výzkum hybridních lepených spojů s kompozitní lepenou vrstvou při nízkocyklových zkouškách. Jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice a jako plnivo mikročástice vaječných skořápek. Lepené spoje byly vystaveny cyklickému zatížení a byla hodnocena jejich životnost a mechanické vlastnosti. Plnivo pozitivně ovlivnilo životnost lepených spojů při vyšším počtu cyklů nízkocyklových zkoušek, tj. zvýšila se bezpečnost lepených spojů. Viskoelastická charakteristika lepené vrstvy se projevila při vyšších hodnotách zatížení, tj. mezi zatížením 5–70 %. Při nižších hodnotách zatížení, tj. mezi zatížením 5–30 %, se viskoelastická charakteristika nevyskytovala. [74]
- Využití odpadních materiálů z pneumatik v kompozitních materiálech. Cílem výzkumu bylo posouzení možnosti využití pryžového prášku pocházejícího z procesu recyklace pneumatik jako plniva do reaktoplastické matrice aplikované do kompozitních desek vyrobených vakuovou infuzí. Výzkum byl zaměřen na hodnocení opotřebení třením o volně rozptýlené abrazivní částice, tvrdosti a interakce matrice a výztuže pomocí SEM analýzy. Výsledky výzkumu prokázaly pozitivní vliv plniva na zlepšení odolnosti proti opotřebení v závislosti na velikosti aktivního pryžového prášku. [96]

Částicové kompozity mají své uplatnění především ve snížení výsledné ceny kompozitu při zachování mechanických vlastností jako u neupraveného polymeru. Další výhodou částicových kompozitů je především zvýšení otěruvzdornosti. Přestože výzkumy potvrdily pozitivní vliv na mechanické vlastnosti, tak nelze dosahovat takového zvýšení jako u vláknových kompozitů. Z toho důvodu jsou zaměřené hlavní výzkumy pro disertační práci na vláknové kompozity [15, 17].

Další spolupráce byla na výzkumu v oblasti hybridních lepených spojů s geometrickou modifikací tvaru lepeného materiálu a zesílení lepidla skelnými vlákny pro zvýšení pevnosti lepeného spoje v tahu. Lepený materiál (adherend) byl upraven do předem vytvořených úhlů 5°, 10°, 15°, 20° a lepený spoj s úhlem 0° byl považován za etalon. Lepidlo bylo modifikováno skelným vláknem o hmotnosti 80, 110 a 160 g·m⁻². Výzkum prokázal zvýšení pevnosti v tahu

od 4 do 48 % pomocí různých tvarových úhlů adherendu. Výzkum také prokázal zvýšení pevnosti v tahu od 4,8 do 93,7 % vyztužením lepidla skelnými vlákny o různé hmotnosti. Na základě tohoto výzkumu se vytvářely podklady pro výzkum hybridních spojů s tvarovou geometrií [17], který je uveden v disertační práci. [84]

Další spolupráce byla na výzkumu vlivu cyklického degradačního procesu na změny pevnosti ve smyku jednoduchých lepených spojů ve smyku a jejich prodloužení podle ČSN EN ISO 9142. Proces degradace lepených spojů zhoršuje mechanické vlastnosti nejen samotného spoje, ale i lepeného materiálu. Výsledky mechanických zkoušek prokázaly pokles pevnosti v tahu ve smyku lepených spojů po 42 cyklech degradačního procesu o 12,8 až 21,7 %. [94]

6 ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ PRO VYUŽITÍ POZNATKŮ V PRAXI NEBO PRO DALŠÍ ROZVOJ OBORU

Cílem výzkumu bylo zvýšit životnost a bezpečnost hybridních lepených spojů s různými 100% bavlněnými tkaninami aplikovanými jako výztuž v různých cyklicky namáhaných podmínkách. Dalším cílem bylo potvrdit vliv alkalické povrchové úpravy bavlněné tkaniny na mechanické vlastnosti hybridních lepených spojů, a tím přispět k širšímu využití přírodních materiálů v oblasti kompozitů. Práce poukazuje na možnosti technologie hybridních lepených spojů, kdy pomocí přírodních materiálů lze výrazně zvýšit životnost lepených spojů.

Výsledky nízkocyklové zkoušky hybridních lepených spojů na bázi upravené bavlny a vrstvy epoxidové pryskyřice hodnotí, že:

- Analýza SEM prokázala dobrou smáčivost alkalicky upravených bavlněných tkanin 5% roztokem NaOH v kompozitní vrstvě hybridních lepených spojů. Alkalická úprava bavlněných tkanin má rovněž významný vliv na mechanické vlastnosti.
- Statická zkouška prokázala vliv zpevňující bavlněné tkaniny v hybridním lepeném spoji. Nejvýraznější zvýšení pevnosti oproti čisté pryskyřici se projevilo u alkalicky ošetřené tkaniny Erik až o 19 % na $14,90 \pm 1,15$ MPa a tkaniny Tera až o 21 % na $15,28 \pm 1,05$ MPa. Největší nárůst deformace se projevil u tkaniny Erik až o 10 % na $13,89 \pm 3,11$ %.
- Lepené spoje s prostou pryskyřicí neodolaly ani cyklickým zkouškám s intervalem zatížení 5–50 % a 5–70 %. Vyztužující bavlněná tkanina vydržela obě nízkocyklové zkoušky s výjimkou Thomase Alana. Dokonce u lepeného spoje s tkaninou Erik se zvýšila pevnost oproti statické hodnotě až o 10 % na $16,34 \pm 1,24$ MPa. Deformace při nízkocyklové zkoušce je velmi důležitá a může předpovídat následné porušení. Tkaniny zvyšují deformaci lepeného spoje, ale pozitivní vliv zvýšení má svou mez. Příliš vysoká hodnota deformace může způsobit rychlý pokles pevnosti nebo selhání lepeného spoje. Výsledky rozdílu deformace u lepených spojů s vyztužující tkaninou Tera a Erik potvrdily, že nižší hodnota rozdílu při cyklickém zatížení pozitivně ovlivňuje následující pevnost ve smyku.

Druhý výzkum se zabýval cyklickými tahovými zkouškami lepených spojů ve tvaru vlny, aby bylo možné definovat jejich únavové a provozní chování. Pro praktické aplikace je nutné

definovat charakteristiku tvarových geometrií spoje při cyklickém zatížení. V některých případech mají tvarové spoje za následek snížení pevnosti. Je třeba provést rozsáhlý výzkum s řadou různých variant tvarů přeplátování, aby bylo možné nalézt vhodná řešení pro praktická využití, která vyhovují požadavkům na konstrukci a zároveň vykazují dobré mechanické vlastnosti a životnost. Výsledky experimentálního výzkumu vlnovitě přeplátovaných spojů s vyztužující přírodní bavlněnou tkaninou při cyklickém zatížení prokázaly, že:

- Tvarové spoje WH1 a WH2 snižují celkovou pevnost spoje s čistou pryskyřicí při statických zkouškách. U Resin–WH1 se pevnost snížila o 47 % na $3,91 \pm 0,23$ MPa. U Resin–WH2 se pevnost snížila o 67 % na $2,45 \pm 0,13$ MPa. Resin–Standard, WH1 a WH2 nevyhověly cyklickým zkouškám.
- Vyztužující tkanina má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti lepených spojů. Vyztužující tkaniny Erik a Tera nezvýšily celkovou pevnost spoje, ale pozitivně snížily deformaci spoje, a tím zvýšily modul pružnosti a životnost lepených spojů při cyklickém zatížení. Tkaniny Erik-Standard a Erik-WH1 vyhověly při cyklických zkouškách na 5–50 % (267–2674 N). Tera-Standard a WH1 rovněž vyhověly cyklické zkoušce 5–50 % (267–2674 N). Tera-Standard dále prošel cyklickou zkouškou na 5–70 % (267–3743 N).
- Analýza SEM prokázala pozitivní vliv alkalického ošetření (10% vodný roztok NaOH) na povrch tkaniny. Nežádoucí vrstvy ligninu, olejů a tuků byly odstraněny. Analýza SEM ukázala zlepšení smáčivosti vyztužujících tkanin Erik a Tera v závislosti na alkalickém ošetření 10% roztokem NaOH. Analýza SEM rovněž prokázala vznik mikrotrhlin s následnou delaminací v důsledku cyklického zatížení na rozhraní lepidlo/adherend a na rozhraní matrice/výztuž.

Všechny hypotézy disertační práce byly potvrzeny. Byly potvrzeny pozitivní účinky povrchové úpravy roztokem NaOH na smáčivost bavlny v epoxidové pryskyřici. Výsledky disertační práce prokazatelně potvrzují schopnost bavlny, jakožto přírodní tkaniny zvyšovat životnost a bezpečnost hybridních lepených spojů při cyklickém zatížení, a to i při vysokém zatížení.

Problémem při praktické aplikaci lepených spojů je nepravidelná tloušťka lepené vrstvy, tzn. nedostatečná integrita lepeného spoje a tím i zhoršené mechanické vlastnosti. Nepravidelná tloušťka vrstvy může být způsobena technologií lepení nebo nerovnoměrností povrchu materiálů. To vede ke vzniku trhlin právě při cyklickém zatížení a následném porušení spoje. Využitím bavlněné tkaniny v lepeném spoji je možné zajistit pravidelnou tloušťku lepené vrstvy v celém spoji a tím i maximální využitelnost lepeného spoje.

Trend ve využívání vyztužujících složek v lepených spojích je zřejmý už v leteckém průmyslu, kdy se využívají zejména aramidová, uhlíková a skleněná vlákna společně s povlakováním silicovými částicemi [97]. Tyto technologie mají bezesporu násobně vyšší únosnost než v tomto výzkumu hodnocené biologické výztuže. Práce poukazuje na vhodnou alternativu v konstrukci spojů s ekonomickým a environmentálním efektem při splnění podmínek na životnost spoje. Zlepšení mechanických vlastností lepených spojů za využití přírodních materiálů může být výrazným přínosem např. v automobilovém průmyslu, kdy nízkoemisní až bezemisní produkce je v dnešní době velmi diskutované téma. Škoda Auto zahájila v roce 2021 testování ekologických materiálů na voze Octavia, například jako výplně dveří, dekorace přístrojové desky a dalších interiérových dílů [98]. Jako materiál využívá vlákna traviny ozdobnice, kokosová vlákna a rýžové slupky. Škoda Auto má za cíl hledat další možnosti využití těchto nových ekologických materiálů [99]. Na základě Pařížské klimatické dohody se mnoho automobilek společně se Škoda Auto chce stát uhlíkově neutrální společností do roku 2050 [99, 100]. Bude se klást důraz nejen na využívání obnovitelných zdrojů energie, ale také na využívání přírodních a recyklovaných materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BARNES, T. A.; PASHBY, I. R. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part II—adhesive bonding and mechanical fasteners. *Journal of materials processing technology*, 2000, 99.1-3: 72-79.
- [2] SILVA, L. F. M. Design rules and methods to improve joint strength. *Handbook of adhesion technology*. 2011. ISBN 978-3-642-01168-9.
- [3] ADAMS, R. D. (ed.). *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier, 2005.
- [4] PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (ed.). *Handbook of adhesive technology*. CRC press, 2017.
- [5] MÜLLER, M.; VALÁŠEK, P. Composite adhesive bonds reinforced with microparticle filler based on egg shell waste. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2018. p. 012002.
- [6] BAHRAMI, B., et al. Strength improvement in single lap adhesive joints by notching the adherends. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 95: 102401.
- [7] MACHEK, V.; SODOMKA, J. *Nauka o materiálu. 4. část, Polymery a kompozity s polymerní maticí*. B.m.: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 9788001039274.
- [8] KROLCZYK, G.; RAOS, P.; LEGUTKO, S. Experimental analysis of surface roughness and surface texture of machined and fused deposition modelled parts. *Tehnicki vjesnik*, 2014, 21.1: 217-221.
- [9] NIESLONY, P., et al. Surface quality and topographic inspection of variable compliance part after precise turning. *Applied Surface Science*, 2018, 434: 91-101.
- [10] BRESSON, G., et al. Strength of adhesively bonded joints under mixed axial and shear loading. *International journal of adhesion and adhesives*, 2012, 35: 27-35.
- [11] BROUGHTON, W. R. Project PAJ3-Combined cyclic loading and hostile environments 1996-1999. Report no 19. Project PAJ3. 1999.
- [12] BANEJA, M. D.; DA SILVA, L. F. M.; CAMPILHO, R. D. S. G. The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive. *The Journal of Adhesion*, 2015, 91.5: 331-346.
- [13] JEEVI, G.; NAYAK, S. K.; ABDUL KADER, M. Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019, 33.14: 1497-1520.
- [14] STOUDT, M. R., J. B. HUBBARD, J. E. CARSLY, S. E. HARTFIELD-WÜNSCH.

- Characterizing the Hemming Performance of Automotive Aluminum Alloys With High-Resolution Topographic Imaging. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2014, 136(3), 31001. ISSN 0094-4289. Dostupné z: doi:10.1115/1.4027093
- [15] TICHÝ, M., et al. Quasi-Static Shear Test of Hybrid Adhesive Bonds Based on Treated Cotton-Epoxy Resin Layer. *Polymers*, 2020, 12.12: 2945.
- [16] MÍŠEK, B. Kompozity. B.m.: Technický dozorčí spolek - Sekce materiálů a svařování, 2003. ISBN 9788090338609.
- [17] KOLÁŘ, V., et al. Experimental Investigation of Wavy-Lap Bonds with Natural Cotton Fabric Reinforcement under Cyclic Loading. *Polymers*, 2021, 13.17: 2872.
- [18] BARCZEWSKI, M.; SAŁASIŃSKA, K.; SZULC, J. Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties. *Polymer Testing*, 2019, 75: 1-11.
- [19] PARK, S. W.; KIM, B. C.; LEE, D. G. Tensile strength of joints bonded with a nano-particle-reinforced adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009, 23.1: 95-113.
- [20] ESSABIR, H., et al. Bio-composites based on polypropylene reinforced with Almond Shells particles: Mechanical and thermal properties. *Materials & Design*, 2013, 51: 225-230.
- [21] PACKHAM, D. E. (David Ernest). Handbook of adhesion. B.m.: John Wiley, 2005. ISBN 0471808741.
- [22] ÅSTRÖM, B. T. (B. Tomas). Manufacturing of polymer composites. 1. ed. B.m.: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0412819600.
- [23] KOVAČIČ, L. Lепенie kovov a plastov. B.m.: ALFA, SNTL, 1980.
- [24] FIALOVÁ, A. Rozpustnost polymerů – podstatné kritérium pro výběr konsolidačních prostředků. VŠCHT Praha. 2015.
- [25] HABENICHT, G. Kleben Grundlagen, Technologien, Anwendung. B.m.: Springer, 2002. ISBN 3540433406.
- [26] LAPIQUE, F.; REDFORD, K. Curing effects on viscosity and mechanical properties of a commercial epoxy resin adhesive. *International journal of adhesion and adhesives*, 2002, 22.4: 337-346.
- [27] RUGGIERO, A., et al. Friction and wear behaviors of Al/Epoxy Composites during Reciprocating Sliding tests. *Manufacturing technology*, 2015, 15.4: 684-689.

- [28] MIMURA, K.; ITO, H. Characteristics of epoxy resin cured with in situ polymerized curing agent. *Polymer*, 2002, 43.26: 7559-7566.
- [29] PROLONGO, S. G.; DEL ROSARIO, Gilberto; UREÑA, Alejandro. Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, 26.3: 125-132.
- [30] KIM, H. S.; KHAMIS, M. A. Fracture and impact behaviours of hollow micro-sphere/epoxy resin composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, 32.9: 1311-1317.
- [31] AGOUDJIL, B., et al. Correlation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39.2: 342-351.
- [32] PETRÁSEK, S., et al. Mechanical qualities of adhesive bonds reinforced with biological fabric treated by plasma. *Agron. Res*, 2017, 15: 1170-1181..
- [33] POTHAN, L. A., et al. The static and dynamic mechanical properties of banana and glass fiber woven fabric-reinforced polyester composite. *Journal of composite materials*, 2005, 39.11: 1007-1025.
- [34] FOWLER, P. A.; HUGHES, J. M.; ELIAS, R. M. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86.12: 1781-1789.
- [35] MAHERI, M. R. The effect of layup and boundary conditions on the modal damping of FRP composite panels. *Journal of Composite Materials*, 2011, 45.13: 1411-1422.
- [36] LEE, J., et al. Layup optimization of laminated composite patches considering uncertainty of material properties. In: *51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12th*. 2010. p. 2777..
- [37] ZAVRTÁLEK, J., et al. Low-cyclic fatigue test of adhesive bond reinforced with glass fibre fabric. *Agron. Res*, 2016, 14: 1138-1146.
- [38] MÜLLER, M., et al. Material utilization of cotton post-harvest line residues in polymeric composites. *Polymers*, 2019, 11.7: 1106.
- [39] AYRILMIS, N.; BUYUKSARI, U.; DUNDAR, T. Waste pine cones as a source of reinforcing fillers for thermoplastic composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 117.4: 2324-2330.
- [40] BAJRACHARYA, R. M.; BAJWA, D. S.; BAJWA, S. G. Mechanical properties of polylactic acid composites reinforced with cotton gin waste and flax fibers. *Procedia engineering*, 2017, 200: 370-376..

- [41] RUGGIERO, A.; VALÁŠEK, P.; MÜLLER, M. Exploitation of waste date seeds of *Phoenix dactylifera* in form of polymeric particle biocomposite: Investigation on adhesion, cohesion and wear. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 104: 9-16..
- [42] POOLE, A. J.; CHURCH, J. S.; HUSON, M. G. Environmentally sustainable fibers from regenerated protein. *Biomacromolecules*, 2009, 10.1: 1-8..
- [43] AZIZ, S. H.; ANSELL, M. P. The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1–polyester resin matrix. *Composites science and technology*, 2004, 64.9: 1219-1230.
- [44] LU, X., et al. Self-reinforced melt processable composites of sisal. *Composites science and technology*, 2003, 63.2: 177-186..
- [45] KABIR, M. M., et al. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43.7: 2883-2892..
- [46] CHONG, T. Y.; LAW, M. C.; SAN CHAN, Yen. The potentials of corn waste lignocellulosic fibre as an improved reinforced bioplastic composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 2021, 29.2: 363-381.
- [47] JOSHI, S. V., et al. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 2004, 35.3: 371-376..
- [48] MÜLLER, M.; VALÁŠEK, P.; RUDAWSKA, A. Mechanical properties of adhesive bonds reinforced with biological fabric. *Journal of adhesion science and Technology*, 2017, 31.17: 1859-1871..
- [49] MIZERA, C., et al. Mechanical behavior of ensete ventricosum fiber under tension loading. *Journal of Natural Fibers*, 2017, 14.2: 287-296..
- [50] DE MEDEIROS, E. S., et al. Mechanical properties of phenolic composites reinforced with jute/cotton hybrid fabrics. *Polymer composites*, 2005, 26.1: 1-11..
- [51] LI, X.; TABIL, L. G.; PANIGRAHI, S.. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, 15.1: 25-33.
- [52] KOMURAI AH, A.; KUMAR, N. S.; PRASAD, B. D. Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties. *Mechanics of composite materials*, 2014, 50.3: 359-376..
- [53] VALÁŠEK, P., et al. Influence of Alkali Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Coir and Abaca Fibers. *Materials*, 2021, 14.10: 2636.

- [54] RAY, D., et al. Effect of alkali treated jute fibres on composite properties. *Bulletin of materials science*, 2001, 24.2: 129-135..
- [55] NAM, T. H., et al. Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42.6: 1648-1656..
- [56] MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P. Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. I. Hemp fibres. *Journal of materials science*, 2006, 41.8: 2483-2496.
- [57] BOOPATHI, L.; SAMPATH, P. S.; MYLSAMY, K. Investigation of physical, chemical and mechanical properties of raw and alkali treated Borassus fruit fiber. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43.8: 3044-3052.
- [58] CAI, M., et al. Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016, 90: 589-597..
- [59] Zodia Synthetic Paper; [online]. [cit. 06.01.2022]. Dostupné z: <https://zodia.ca/author/zodia/>.
- [60] VARDHINI, K. J., et al. Optimisation of alkali treatment of banana fibres on lignin removal. 2016.
- [61] MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; DRZAL, L. T. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview. *Composite interfaces*, 2001, 8.5: 313-343.
- [62] HAFIZ, T. A., et al. Mixed-mode fracture of adhesively bonded metallic joints under quasi-static loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77.17: 3434-3445.
- [63] MÜLLER, M.; HERÁK, D. Dimensioning of the bonded lap joint. *Research in Agricultural Engineering*, 2010, 56.2: 59-68.ff
- [64] MÜLLER, M., et al. Influence of lapped length on adhesive bond strength. *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Braşov*, 2007, roč. 8, č. 3b(21b), 536-539
- [65] BOUTAR, Y., et al. Effect of adhesive thickness and surface roughness on the shear strength of aluminium one-component polyurethane adhesive single-lap joints for automotive applications. *Journal of adhesion science and Technology*, 2016, 30.17: 1913-1929.
- [66] GODA, Y., et al. Impact strength degradation of adhesive joints under heat and moisture environmental conditions. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2010. p. 29-36.

- [67] BAR-COHEN, Y. (ed.). *High temperature materials and mechanisms*. Boca Raton, FL, USA.: CRC Press, 2014.
- [68] MARQUES, E. A. S., et al. Adhesive joints for low-and high-temperature use: an overview. *The Journal of Adhesion*, 2015, 91.7: 556-585.
- [69] YANG, Y., et al. Bond durability of CFRP laminates-to-steel joints subjected to freeze-thaw. *Composite Structures*, 2019, 212: 243-258.
- [70] QIN, G., et al. Effect of continuous high temperature exposure on the adhesive strength of epoxy adhesive, CFRP and adhesively bonded CFRP-aluminum alloy joints. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 154: 43-55.
- [71] KELLY, G. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints. *Composite structures*, 2006, 72.1: 119-129.
- [72] ŠLEGER, V., et al. Quasi static tests of adhesive bonds of alloy AlCu4Mg. *Manuf. Technol*, 2015, 15: 694-698.
- [73] TICHÝ, M., et al. Effect of rubber powder from waste tyre rubbers on mechanical properties of one-component polyurethane putty. *Agronomy Research*, 2018, 13.1: 1257-1265.
- [74] KOLÁŘ, V., et al. Quasi-static tests of hybrid adhesive bonds based on biological reinforcement in the form of eggshell microparticles. *Polymers*, 2020, 12.6: 1391.
- [75] Matca.cz; [online]. [cit. 11.01.2022]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/zkouska-tahem/>.
- [76] REDDY, N.; YANG, Y.. Properties and potential applications of natural cellulose fibers from the bark of cotton stalks. *Bioresource technology*, 2009, 100.14: 3563-3569.
- [77] VALADEZ-GONZALEZ, A., et al. Effect of fiber surface treatment on the fiber–matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 1999, 30.3: 309-320..
- [78] FAN, T., et al. Surface micro-dissolve method of imparting self-cleaning property to cotton fabrics in NaOH/urea aqueous solution. *Applied Surface Science*, 2017, 400: 524-529..
- [79] Svitap.cz; [online]. [cit. 11.06.2021]. Dostupné z: <https://www.tkaniny-svitap.cz/kcfinder/upload/file/vzorkovnik.pdf> .
- [80] S235J0 STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/142/>

- [81] BUNSELL, A. R. (ed.). *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres*. Elsevier, 2009.
- [82] MYLSAMY, K.; RAJENDRAN, I. Investigation on physio-chemical and mechanical properties of raw and alkali-treated Agave americana fiber. *Journal of Reinforced Plastics and composites*, 2010, 29.19: 2925-2935..
- [83] MÜLLER, M., et al. Research on constructional shape of bond at connecting galvanized sheet of metal. *Manuf. Technol*, 2015, 15.3: 392-396.
- [84] KOLÁŘ, V., et al. Influence of preformed adherent angle and reinforcing glass fibre on tensile strength of hybrid adhesive bond. *Manuf. Technol*, 2019, 19: 786-791.
- [85] YOU, M., et al. A numerical and experimental study of preformed angle in the lap zone on adhesively bonded steel single lap joint. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29.3: 280-285.
- [86] AVILA, A. F.; BUENO, P. O. An experimental and numerical study on adhesive joints for composites. *Composite structures*, 2004, 64.3-4: 531-537.
- [87] CAMPILHO, R. D. S. G.; DE MOURA, M. F. S. F.; DOMINGUES, J. J. M. S. Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29.2: 195-205.
- [88] GRANT, L. D. R.; ADAMS, R. D.; DA SILVA, L. F. M. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International journal of adhesion and adhesives*, 2009, 29.4: 405-413.
- [89] SYMINGTON, M. C., et al. Tensile testing of cellulose based natural fibers for structural composite applications. *Journal of composite materials*, 2009, 43.9: 1083-1108.
- [90] AYATOLLAHI, M. R., et al. Fatigue performance of adhesively bonded single lap joints with non-Standard sinusoid interfaces. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2017, 40.9: 1355-1363.
- [91] HAGHPANAH, B.; CHIU, Shihung; VAZIRI, Ashkan. Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014, 48: 130-138.
- [92] DA SILVA, L. F. M, et al. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29.6: 621-632.
- [93] KOLÁŘ, V.; TICHÝ, M.; MÜLLER, M. Mechanical properties of polymeric composite based on pine seeds production residues. *Manufacturing Technology*, 2019, 19.3, 426-430.

- [94] KOLÁŘ, V. et al. Research on influence of cyclic degradation process on changes of structural adhesive bonds mechanical properties. *Agronomy Research*, 2019, 17.S1, 1062-1070.
- [95] MÜLLER, M. et al. Research of Hybrid Adhesive Bonds with Filler Based on Coffee Bean Powder Exposed to Cyclic Loading. *Manufacturing Technology*, 2020, 20.5, 646-654.
- [96] MÜLLER, M. et al. Research on wear resistance of polymeric composite materials based on microparticles from tyre recycling process. *Manufacturing Technology*, 2020, 20.2, 223-228.
- [97] TSERPES, K. Adhesive bonding of aircraft structures. *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. Springer, Cham, 2020. p. 337-357.
- [98] ŠKODA AUTO sází u svých vozů na ekologické materiály a zkoumá biologické suroviny - ŠKODA Storyboard. [online]. [cit. 28.02.2022]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/tiskove-zpravy-archiv/skoda-auto-sazi-u-svych-vozu-na-ekologicke-materialy-a-zkouma-biologicke-suroviny/?state=OK&aid=ce5bc044-8a55-4388-a78d-08db8ec5310b>
- [99] Životní prostředí | ŠKODA AUTO a.s.. *ŠKODA AUTO Česká republika | Oficiální web ŠKODA AUTO a.s.* [online]. [cit. 28.02.2022]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/o-spolecnosti/zivotni-prostredi?state=OK&aid=ce5bc044-8a55-4388-a78d-08db8ec5310b>
- [100] Do roku 2040 roztočí ekonomiku Cirkulární Česko - Ministerstvo životního prostředí. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 28.02.2022]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/news_20211213_Vlada-schvalila-Cirkularni_Cesko_2040

SEZNAM PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI AUTORA

1. Článek scopus

TICHÝ, M. – MÜLLER, M. – VALÁŠEK, P. – MITURSKA, I. Effect of rubber powder from waste tyre rubbers on mechanical properties of one-component polyurethane putty. *Agronomy Research*, 2018, roč. 13, č. S1, s. 1257-1265. ISSN: 1406-894X.

KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. – **TICHÝ, M.** – RUDAWSKA, A. – HROMASOVÁ, M. Influence of Preformed Adherent Angle and Reinforcing Glass Fibre on tensile strength of Hybrid Adhesive Bond. *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 5, s. 786-791. ISSN: 1213-2489.

KOLÁŘ, V. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. Mechanical properties of polymeric composite based on pine seeds production residues . *Manufacturing Technology*, 2019, roč. 19, č. 3, s. 426-430. ISSN: 1213-2489.

KOLÁŘ, V. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. – VALÁŠEK, P. – RUDAWSKA, A. Research on influence of cyclic degradation process on changes of structural adhesive bonds mechanical properties. *Agronomy Research*, 2019, roč. 17, č. S1, s. 1062-1070. ISSN: 1406-894X.

MÜLLER, M. – **TICHÝ, M.** – ŠLEGER, V. – HROMASOVÁ, M. – KOLÁŘ, V. Research of Hybrid Adhesive Bonds with Filler Based on Coffee Bean Powder Exposed to Cyclic Loading. *Manufacturing Technology*, 2020, roč. 20, č. 5, s. 646-654. ISSN: 1213-2489.

MÜLLER, M. – RUDAWSKA, A. – **TICHÝ, M.** – KOLÁŘ, V. – HROMASOVÁ, M. Research on wear resistance of polymeric composite materials based on microparticles from tyre recycling process. *Manufacturing Technology*, 2020, roč. 20, č. 2, s. 223-228. ISSN: 1213-2489.

2. Článek impaktovaný

AZAM, Z. – JAMSHAD, H. – NAWAB, Y. – MISHRA, R. – MÜLLER, M. – CHOTĚBORSKÝ, R. – KOLÁŘ, V. – **TICHÝ, M.** – PETRU, M. Influence of inlay yarn type and stacking sequence on mechanical performance of knitted uni-directional thermoplastic composite prepregs. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, roč. nevedeno, č. nevedeno, s. 0-0. ISSN: 1528-0837.

TICHÝ, M. – KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. – MISHRA, R. – ŠLEGER, V. – HROMASOVÁ, M. Quasi-Static Shear Test of Hybrid Adhesive Bonds Based on Treated Cotton-Epoxy Resin Layer. *POLYMERS*, 2020, roč. 12, č. 12, s. 2945-2959. ISSN: 2073-4360.

KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. – MISHRA, R. – RUDAWSKA, A. – ŠLEGER, V. – **TICHÝ, M.** – HROMASOVÁ, M. – VALÁŠEK, P. Quasi-Static Tests of Hybrid Adhesive Bonds Based on Biological Reinforcement in the Form of Eggshell Microparticles. *POLYMERS*, 2020, roč. 12, č. 6, s. 0-0. ISSN: 2073-4360.

KAMBLE, Z. – MISHRA, R. – BEHERA, B. – **TICHÝ, M.** – KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. Design,

Development, and Characterization of Advanced Textile Structural Hollow Composites. *POLYMERS*, 2021, roč. 13, č. 20, s. 0-0. ISSN: 2073-4360.

KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. – **TICHÝ, M.** – MISHRA, R. – HRABĚ, P. – HANUŠOVÁ, K. – HROMASOVÁ, M. Experimental Investigation of Wavy-Lap Bonds with Natural Cotton Fabric Reinforcement under Cyclic Loading. *POLYMERS*, 2021, roč. 13, č. 17, s. 0-0. ISSN: 2073-4360.

TUFAIL, M. – JAMSHAD, H. – MISHRA, R. – HUSSAIN, U. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. Characterization of Hybrid Composites with Polyester Waste Fibers, Olive Root Fibers and Coir Pith Micro-Particles Using Mixture Design Analysis for Structural Applications. *POLYMERS*, 2021, roč. 13, č. 14, s. 0-0. ISSN: 2073-4360.

JAMSHAD, H. – MISHRA, R. – ZEESHAN, M. – ZAHID, B. – BASRA, S. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. Mechanical Performance of Knitted Hollow Composites from Recycled Cotton and Glass Fibers for Packaging Applications. *POLYMERS*, 2021, roč. 13, č. 14, s. 0-0. ISSN: 2073-4360.

HAFSA, J. – MISHRA, R. – HUSSAIN, U. – RAJPUT, A. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. Natural Fiber Based Antibacterial, Wound Healing Surgical Sutures by the Application of Herbal Antimicrobial Compounds. *Journal of Natural Fibers*, 2021, roč. , č. , s. 0-0. ISSN: 1544-0478.

MISHRA, R. – JAMSHAD, H. – YOSFANI, S. – HUSSAIN, U. – NADEEM, M. – PETRU, M. – **TICHÝ, M.** – MÜLLER, M. Thermo physiological comfort of single jersey knitted fabric derivatives. *Fashion and Textiles*, 2021, roč. 8, č. 40, s. 0-0. ISSN: 2198-0802.

3. Stat' ve sborníku

MÜLLER, M. – VALÁŠEK, P. – **TICHÝ, M.** – RUGGIERO, A. – D'AMATO, R. Investigation on Polymer Composite Materials Wear Reinforced by Microparticles of *Jatropha Curcas L.* Waste. In *2019 2nd International Conference on Aeronautical, Aerospace and Mechanical Engineering, AAME 2019 26.07.2019, Prague; Czech Republic*. nevedeno: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. s. 0-0.

TICHÝ, M. – KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. – VALÁŠEK, P. Quasi-static tests on polyurethane adhesive bonds reinforced by rubber powder. In *18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 22.05.2019, Jelgava*. Jelgava: Latvia University of Agriculture: nevedeno, 2019. s. 1035-1041.

TICHÝ, M. – KOLÁŘ, V. – MÜLLER, M. STATIC AND DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE FROM TYRE WASTE MICROPARTICLES/EPOXY RESIN. In *PROCEEDING OF 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRENDS IN AGRICULTURAL ENGINEERING 2019 17.09.2019, Prague*. Prague: Czech University of Life Sciences Prague: Czech University of Life Sciences Prague Kamýcká 129, Prague, Czech Republic, 2019. s. 553-559.

MÜLLER, M. – **TICHÝ, M.** – HROMASOVÁ, M. – NOVOTNÝ, J. – RUDAWSKA, A. – KOLÁŘ,

V. Material Reuse of Waste Abrasive Particles from Abrasive Water Jet Technology in the Field of Polymer Particle Composite Systems. In *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials. Lecture Notes in Mechanical Engineering 21.06.2021, Smokovec, Sk. Nový Smokovec*: Springer, Cham, 2021. s. 0-0.

MÜLLER, M. – TICHÝ, M. – MISHRA, R. – KOLÁŘ, V. – HANUŠOVÁ, K. – VALÁŠEK, P. – ŠLEGER, V. – RUDAWSKA, A. Pretreatment of Coir Fibers by Alkali Method Determined For Application in Area of Polymeric Composite Materials . In *Advances in Textile Materials and Processes ATMP-2021 17.11.2021, Kanpur, India*. Karnataka: INSC International Publishers, 2021. s. 12-23.

SEZNAM ŘEŠENÝCH PROJEKTŮ

IGA 2018 - Výzkum mechanických vlastností polymerních kompozitních materiálů řezaných vodních paprskem; **spoluřešitel**

IGA 2019 - Výzkum interakcí kompozitní vrstvy u hybridních lepených spojů; **spoluřešitel**

IGA 2020 - Výzkum mechanických vlastností biokompozitu s geometricky strukturovanými přírodními vlákny; **hlavní řešitel**

IGA 2021 - Experimentální výzkum hybridních lepených spojů s vícevrstvou sendvičovou konstrukcí; **hlavní řešitel**