



Katedra mechaniky

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
VLIV STRUKTURY POVRCHU LEPENÝCH
KOMPOZITŮ NA JEJICH SMYKOVOU
PEVNOST**

Lukáš Horák

Vedoucí práce: Ing. Jan Krystek Ph.D.

Plzeň 2020

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím práce Ing. Janem Krystekem Ph.D. a s použitím literatury a pramenů uvedených v této práci.

V Plzni, 30. června 2020

Lukáš Horák

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval mému vedoucímu práce Ing. Janu Krystkovi Ph.D., za příkladné vedení a za čas který mi věnoval během celého studia a za všechny cenné rady, které jsem dostal při psaní této práce.

Dále bych také rád poděkoval své rodině za neustálou podporu při celém studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá experimentálním vyšetřením smykové pevnosti lepeného spoje kompozitu v závislosti na struktuře povrchu. Struktura povrchu byla ovlivněna výrobním procesem kompozitního materiálu. V práci je detailní popis výroby daných vzorků, včetně popisu použité technologie prosyčování výztuže. Dále práce obsahuje vyšetření kohezivních vlastností použitého lepidla pomocí módů porušení, mód I a mód II.

Abstract

This bachelor thesis is focused on experimental investigation of shear strength of adhesive joint of the composite material depending on surface structure, which was influenced by manufacturing process of the composite material. The thesis contains detailed description of manufacturing process of the given samples including description of used reinforcement impregnation technology. Furthermore, the thesis contains examination of cohesive properties of the used adhesive using failure modes, mode I and mode II.

Obsah

1	Úvod	1
2	Lepené spoje	2
2.1	Princip lepeného spoje	2
3	Vyšetření kohezivních vlastností	5
3.1	Výroba vzorků	5
3.2	Mód I	6
3.3	Mód II	10
4	Výroba desky	13
4.1	Infuzní vakuová technologie	13
4.2	VAP [®]	13
4.3	Vlastní výroba desky pro zkušební vzorky	13
5	Experimentální stanovení smykové pevnosti lepeného spoje	21
5.1	Výroba zkušebních vzorků	21
5.2	Experiment	22
5.3	Vyhodnocení	25
6	Závěr	30

Seznam obrázků

Obr. 1	Kontakt lepidla s lepeným povrchem [14]	3
Obr. 2	Módy porušení lepeného spoje [14]	3
Obr. 3	Smáčivost adherendu lepidlem [12]	4
Obr. 4	Porušení vzorku podle módu I, II, III [5]	5
Obr. 5	Schéma vzorku pro mód I	8
Obr. 6	Závislost síly na posunutí při DCB testu	8
Obr. 7	Zkouška lepeného spoje pro mód I	9
Obr. 8	Porušené vzorky při mód I	9
Obr. 9	Schéma vzorku pro mód II	10
Obr. 10	Závislost síly na posunutí při ENF testu	11
Obr. 11	Zkouška lepeného spoje pro mód II	12
Obr. 12	Schématický náčrt výroby pomocí technologie VAP [®] [4]	14
Obr. 13	Natočení vrstev	14
Obr. 14	Skladba technologických vrstev	15
Obr. 15	Příprava plochy pomocí separátoru	16
Obr. 16	Příváděcí a rozváděcí hadička	17
Obr. 17	Olepení hadičky těsnící páskou	17
Obr. 18	Nalepená těsnící fólie	18
Obr. 19	Zkouška těsnosti formy	19
Obr. 20	Pryskyřice a tvrdidlo	19
Obr. 21	Výsledná deska	20
Obr. 22	Forma pro lepení přeplátovaných spojů [11]	21
Obr. 23	Schéma vzorku	22
Obr. 24	Tahová zkouška přeplátovaného lepeného spoje	23
Obr. 25	Sada vzorků CC	24
Obr. 26	Sada vzorků CH	24
Obr. 27	Sada vzorků HH	25
Obr. 28	Závislosti síla–posunutí pro sadu CC	26
Obr. 29	Závislosti síla–posunutí pro sadu CH	26
Obr. 30	Závislosti síla–posunutí pro sadu HH	27
Obr. 31	Porušené vzorky	29

Seznam tabulek

Tab. 2	Geometrické parametry vzorků pro DCB test	7
Tab. 3	Kritické energie G_I	7
Tab. 4	Vyhodnocení kritické energie G_I	7
Tab. 5	Geometrické parametry vzorků pro ENF test	11
Tab. 6	Kritické energie G_{II}	12
Tab. 7	Vyhodnocení kritické energie G_{II}	12
Tab. 8	Rozměry technologických vrstev	15
Tab. 9	Parametry vzorků sady CC	23
Tab. 10	Parametry vzorků sady CH	24
Tab. 11	Parametry vzorků sady HH	25
Tab. 12	Smykové pevnosti vzorků	27
Tab. 13	Vyhodnocení tahové zkoušky	28

Seznam označení

Označení	Popis	Jednotky
$2h_0$	tloušťka ENF vzorku měřena na lepené části	[mm]
$2h_A$	tloušťka ENF vzorku měřena v polovině délky	[mm]
$2h_B$	tloušťka ENF vzorku měřena na nelepené části	[mm]
a	délka nelepené části vzorku	[mm]
a_{lep}	délka lepené části	[mm]
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - mezinárodní standardizační organizace	
B	šířka zkušební DCB, ENF vzorku	[mm]
C	označení hladké strany zkušební vzorku	
ČSN	české technické normy	
DCB	zkušební metoda <i>Double Cantilever Beam</i> pro určení lomové houževnatosti módu I	
DP490	Scotch-Weld TM Lepidlo EPX TM DP490	
EN	evropské normy	
ENF	zkušební metoda <i>End-Notched Flexure</i> pro určení lomové houževnatosti módu II	
G_I	kritická energie pro mód porušení I	[J.m ⁻²]
$\overline{G_I}$	aritmetický průměr G_I	[J.m ⁻²]
G_{II}	kritická energie pro mód porušení II	[J.m ⁻²]
$\overline{G_{II}}$	aritmetický průměr G_{II}	[J.m ⁻²]
H	označení hrubé strany zkušební vzorku	
h	tloušťka DCB vzorku měřena ve střední části	[mm]
h_{lep}	tloušťka lepidla	[mm]
L	polovina rozpětí mezi podporami	[mm]
l_0	počáteční měřená délka	[mm]
l_j	počáteční vzdálenost čelistí stroje	[mm]
L_{mat1}	délka materiálu 1	[mm]
L_{mat2}	délka materiálu 2	[mm]
L_t	délka zkušební ENF, DCB vzorku	[mm]
MKP	Metoda Konečných Prvků	
P	kritická hodnota síly při porušení	[N]
$P_{i\max}$	maximální dosažená hodnota kritické síly v sadě	[N]
	CC, CH, HH	
$\overline{P_i}$	aritmetický průměr kritických sil vzorků v sadě	[N]

Označení	Popis	Jednotky
SCRIMP [®]	<i>Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</i> - metoda prosycování výztuže	
T_{mat1}	tloušťka materiálu 1	[mm]
T_{mat2}	tloušťka materiálu 2	[mm]
T_{total}	tloušťka vzorku v místě nanesení adherantu	[mm]
v	rychlost zatěžování posuvu příčnicku	[mm.min ⁻¹]
v_{τ_i}	variační koeficient maximálních smykových pevností vzorků sadách τ_i	[%]
v_{G_I}	variační koeficient G_I	[%]
$v_{G_{II}}$	variační koeficient G_{II}	[%]
VAP [®]	<i>Vacuum Assisted Process</i> - metoda prosycení výztuže	
W_{mat1}	šířka materiálu 1	[mm]
W_{mat2}	šířka materiálu 2	[mm]
W_{mat}	menší z hodnot šířky pásku W_{mat1} , W_{mat2}	[mm]
Δ	korekční člen rotace	[mm]
δ	kritická hodnota posunutí při porušení	[mm]
τ_{CC}	smykové pevnosti vzorků sady CC	[MPa]
τ_{CH}	smykové pevnosti vzorků sady CH	[MPa]
τ_{HH}	smykové pevnosti vzorků sady HH	[MPa]
$\bar{\tau}_i$	aritmetický průměr maximálních smykových pevností vzorků v sadě	[MPa]
$\tau_{i\ max}$	maximální hodnota smykové pevnosti v sadě	[MPa]

1 Úvod

V poslední době bylo možné zaznamenat velký rozvoj polymerních kompozitů. Zejména díky jejich vlastnostem, které se neustále zlepšují. Velký podíl na vylepšených vlastnostech mají výrobní technologie celého kompozitu. Příkladem jsou technologie prosycování výztuže, které znatelně snižují podíl matrice a zvyšují podíl nosné výztuže. U samotných složek kompozitů dochází ke stálému vývoji a obměně materiálů.

Kompozitem obecně chápeme materiál složený alespoň ze dvou odlišných složek, které mají rozdílné mechanické a chemické vlastnosti. Takto definovaný kompozit obsahuje velké množství materiálů od dřeva po vlákny vyztužené polymery. Kompozity již dokáží překonat konvenční materiály v některých oblastech, jako je váha, tuhost, pevnost, cena a další. Z toho důvodu se setkáváme stále s častějším použitím kompozitů na úkor konvenčních materiálů. Dalším důvodem je stále větší znalost materiálových vlastností a schopnost správného návrhu konstrukce.

Predikce porušení polymerních kompozitů je důležitým prvkem při navrhování optimálních konstrukcí s úsporou hmotnosti a ceny. Použití kompozitů v takové míře by bez predikce nebylo možné. Pro navrhování takové konstrukce je také důležité predikovat porušení spoje, který bývá slabší částí konstrukce. Stále častěji jsou využívány spoje lepené, jejich vlastnosti jsou popsány v kapitole lepené spoje. Pro takovou predikci lepeného spoje, je nutné znát kohezivní vlastnosti lepidla. Toto šetření je uvedeno v této práci.

Jak se stále zlepšují vlastnosti kompozitů, stává se radikálním problémem pevnost samotného spoje, který zaostává za pevností zbytku konstrukce. V mnoha oblastech je preferovanou možností spojení kompozitů, lepení. Lepený spoj nenarušuje pevnost materiálu a zároveň nezvyšuje znatelně hmotnost celé konstrukce a zachovává geometrii. Pro vytvoření lepeného spoje s požadovanou pevností je nutné správně zvolit lepidlo, které bude dobře spolupůsobit s daným materiálem. Dále je třeba správně upravit lepený povrch. Povrch je možné upravit různými způsoby, v závislosti na vlastnostech lepeného materiálu a vlastnostech samotného lepidla. První úprava povrchu při výrobě nastává při obtisku formy, nebo odtrhávací tkaniny. Rozdílem v smykové pevnosti těchto dvou povrchů se zabývá tato práce.

Pro takové šetření je nutné vyrobit desku s danými vlastnostmi. V práci je uveden detailní popis výroby desky s použitím technologie prosycování VAP[®]. Tato technologie byla popsána v samostatné podkapitole VAP[®]. Úpravou skladby vrstev oproti tradiční VAP[®] technologii bylo docíleno rozdílné struktury povrchu, která byla nutná pro vyšetření vlivu struktury na smykové pevnosti.

2 Lepené spoje

Lepený spoj se tradičně skládá ze dvou lepených složek (adherendů) stejného nebo různého materiálu, které jsou slepeny vrstvou lepidla. Lepené spoje jsou dále porovnávány se spoji mechanickými z důvodu dobré znalosti vlastností mechanických spojů. Výhody lepených spojů oproti spojům mechanickým je možné vypsát následovně: Rovnoměrné rozložení napětí po větší lepené ploše. Absence poškození materiálu např. vrtáním, kde vzniká slabé místo ve struktuře. Pokud se vrtá do kompozitu je dále nebezpečí delaminace. U lepených spojů nevznikají tepelná pnutí mezi spojovanými částmi, jako je tomu např. u svarových spojů. Při navrhování lepeného spoje s různými materiály adherendu lze počítat s tepelným pnutím a použitím pružného lepidla. Malá vrstva lepidla nepřesahující $h_{lep} = 0,5$ mm, která se v obecných případech používá pro dobré mechanické vlastnosti zaručuje zanedbatelnou kladnou změnu hmotnosti a průřezu. Lepené spoje lze uplatnit v chemicky agresivním prostředí z důvodu vysoké chemické odolnosti a těsnosti spoje. Lepené spoje se vyznačují dobrými tlumícími účinky a vyšší odolností vůči únavě materiálu. [14]

Nevýhodou lepených spojů je náročnost na správnou přípravu a technologický proces lepení, který je náchylný na chybu. Malá chyba v přípravě má výrazný dopad na kvalitu a únosnost spoje. Lepené spoje jsou nerozebíratelné, případná úprava nebo oprava není možná. Špatné provedení vede k nepoužitelnosti výrobku. Lepené spoje mají vůči mechanickým spojům horší tepelnou odolnost. Nеспециализovaná lepidla mají přibližnou teplotní odolnost do 100°C , kde překročení této hranice vede k rychlému snížení únosnosti. [13]

2.1 Princip lepeného spoje

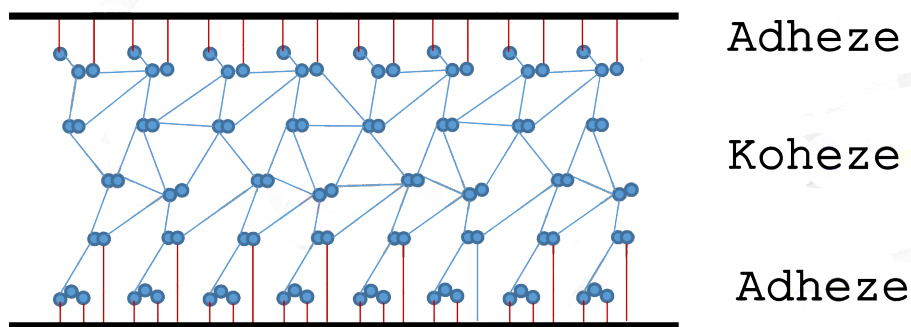
Celková pevnost lepeného spoje závisí na adhezi, kohezi (obr. 1) a smáčcnosti lepeného povrchu lepidlem.

Adhezi rozumíme přilnavost lepidla k lepenému povrchu, kde síla adheze závisí na chemických a fyzikálních silách mezi adherendem a lepidlem. Adhezi rozdělujeme na mechanickou, chemickou, adsorpční a difuzní. [12]

Mechanická adheze vzniká po zatečení lepidla do trhlin, pórů a dutin lepeného povrchu, které zvyšují lepenou plochu a po zatuhnutí lepidla se lepidlo v dutinách zaklíní tzv. patentkový efekt [12]. Mechanická adheze je ovlivněna strukturou plochy, která je tvořena při výrobě nebo pozdější úpravě.

Chemická adheze závisí na vytvoření kovalentních vazeb mezi adherendem a lepidlem. Tato adheze lze uplatnit pouze u materiálů s reaktivním povrchem, nebo chemickou úpravou.

Adsorpční adheze vychází z Van der Waalsových přitažlivých sil (působení

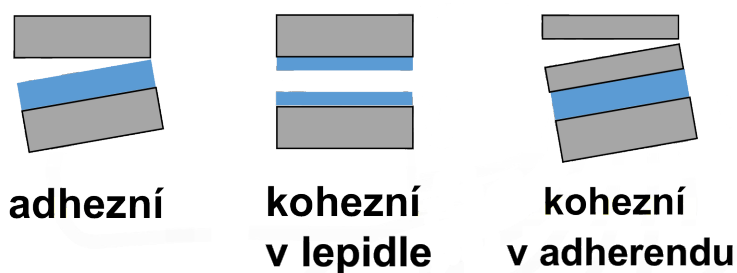


Obrázek 1: Kontakt lepidla s lepeným povrchem [14]

mezimolekulárních sil na styčných plochách). Tyto síly působí na podstatně nižší vzdálenost než je hloubka trhlin a dutin ve struktuře povrchu, proto je potřeba dutiny co nejvíce vyplnit lepidlem. Musí být zajištěné co největší smáčení povrchu adherendu. [9]

U difuzní adheze materiály mezi sebou mohou pronikat (difundovat). Difuzní adheze je uplatňována hlavně u polymerů.

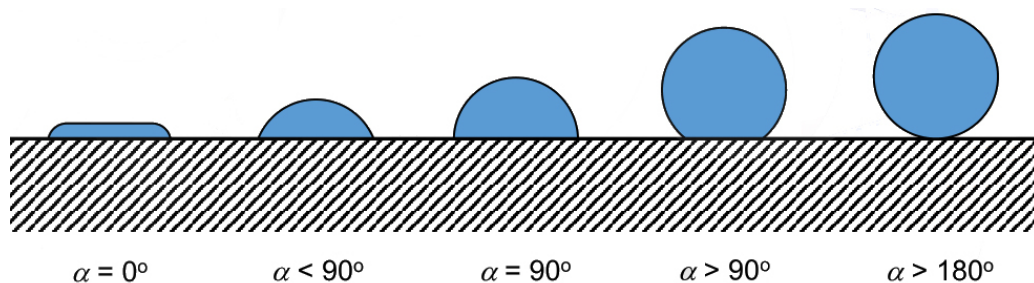
Kohezi rozumíme souhrn soudržných sil, které jednotlivé vrstvy lepidla drží při sobě (vlastní pevnost lepidla). Pokud je koheze vyšší než je adheze, lepený spoj se trhá na hranici lepidla a adherendu (adhezní porušení), dále znázorněno na obrázku 2. [8]



Obrázek 2: Módy porušení lepeného spoje [14]

Pevnost adheze můžeme ovlivnit správnou přípravou lepené plochy, jako je očištění a úprava plochy. Podle materiálu adherendu a typu lepidla volíme doporučené postupy a výrobky na čištění a odmaštění. Úkolem přípravy je dosáhnout maximální adheze lepidla k povrchu. Plochu je možné upravit chemicky, jako je moření povrchu v různých kyselinách nebo mechanicky jako je zdrsňení povrchu pískováním. Vliv těchto úprav je popsán v [11].

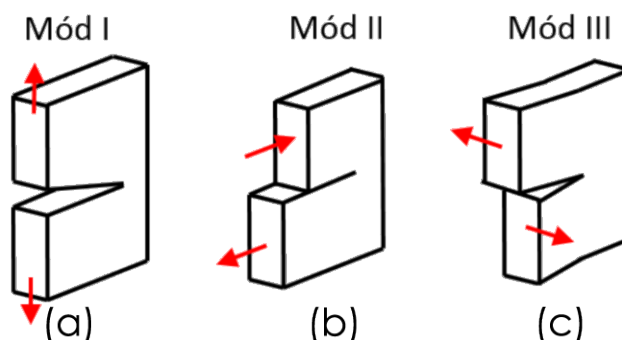
Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout a udržet kontakt s pevným povrchem (adherendem). Pokud lepidlo špatně smáčí lepený povrch, nastává špatné zatečení lepidla do dutin povrchu a jak bylo napsáno výše nastává nedostatečné využití adsorpční adheze. Smáčivost se testuje nanesením kapky tekutiny na lepený povrch a změření velikosti povrchového úhlu. Podle úhlu smáčení zjistíme jak kapalina povrch smáčí (obr. 3). Dobré smáčení kapaliny uvažujeme s povrchovým úhlem menším než 90° , potom povrch nazýváme lyofilní. V opačném případě kapalina špatně smáčí povrch a povrch nazýváme lyofobní. Pokud se hodnota úhlu blíží k nule, kapalina povrch smáčí téměř dokonale. [12]



Obrázek 3: Smáčivost adherendu lepidlem [12]

3 Vyšetření kohezivních vlastností

Pro vyšetření kohezivních vlastností bylo potřeba vypočítat kritické energie módů porušení. Pro výpočet bylo dále nutné experimentálně stanovit kritické hodnoty síly na posunutí na zkušebních vzorcích. Obecné porušení se vyjádří jako superpozice daných módů porušení, těmi je myšleno mód I, mód II a mód III, které jsou zobrazeny na obrázku 4 s naznačenými směry zatížení.



Obrázek 4: Porušení vzorku podle módu I, II, III [5]

Takto získané kritické energie pro módy porušení se používají k predikci kohezivního porušení zkušebního lepidla v metodě konečných prvků (MKP) či jiných numerických metodách.

3.1 Výroba vzorků

Pro dobré vlastnosti vlastní koheze byl jako materiál pro vzorky zvolen prepreg [15]. Z prepregu typu KORDCARBON-CPREG - 200-T-3K-EP1-42-A byla vyrobena deska. Ta byla dále nařezána na menší desky o rozměrech 150 mm x 160 mm za pomoci vodního paprsku. Menší desky byly k sobě nalepeny pomocí lepidla Scotch-WeldTMLepidlo EPXTMDP490, jedná se o dvousložkové epoxidové lepidlo. Nelepená část menší desky, která slouží jako iniciace trhliny na vzorku a_i byla zvolena $a_i = 65$ mm pro mód I a $a_i = 55$ mm pro mód II. Pro zajištění nelepené části proti zatečení lepidla byla použita teflonová páska. Pro dosažení úplné pevnosti spoje bylo nutno spoj tlakově zatížit, v našem případě pomocí svěráku po dobu jednoho týdne. Po zatvrdnutí byly slepené menší desky nařezány pomocí vodního paprsku na prizmatické pásky o rozměrech 150 mm délky a 20 mm šířky. Tento postup byl zvolen, aby bylo zabráněno slepení bočních hran přebytečným lepidlem, které může nezanedbatelně ovlivnit výsledek zkoušky.

Zkušební vzorky pro mód I musely být pro přenos zatížení opatřeny navíc panty, nebo kostkami s otvorem pro čep. V našem případě byly použity ocelové kostky z důvodu jejich možného znovupoužití na zbylých (nelepených) plochách. Kostky byly nalepeny po obou stranách neslepené části vzorku na okrajích pásků jak je znázorněno na obrázku 5. Použité lepidlo bylo stejné jako u lepení desek (DP490). Jelikož se jedná o vzorek s počáteční poruchou nebylo potřeba lepidlo s lepšími kohezivními a adhezivními vlastnostmi pro lepení kostek k páskům.

3.2 Mód I

Mód I je popsán jako rozevírání trhliny. Síly, které způsobují rozevírání působí kolmo na nezatíženou plochu lepidla. Porušení a směr zatížení je znázorněn na obrázku 4a .

Výpočet kritické energie porušení při zatížení podle módu I G_I je založen na tzv. *modified beam theory*. Hodnotu G_I lze získat podle rovnice

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (1)$$

kde P je kritická hodnota síly při porušení, δ je kritické posunutí, B je šířka vzorku, a je délka nelepené části vzorku, Δ je člen pro korekci z důvodu možné rotace vzorku při namáhání.

Geometrické parametry zkušební vzorku jsou znázorněny na obrázku 5. Konkrétní naměřené hodnoty pro všechny zkušební vzorky jsou uvedeny v tabulce 2.

Geometrické parametry vzorků byly změřeny před zkouškou. Veličina a byla měřena z boku od hrany vzorku k viditelné hraně lepidla. Tato veličina byla zkontrolována po zkoušce, změřením délky lepidla na porušeném vzorku. Velký rozptyl této veličiny mohl být z důvodu nerovnoměrného rozlití lepidla jak je vidět na obrázku 8.

Při měření bylo postupováno podle normy ASTM D5528 [2]. Zkušební vzorek DCB (*Double Cantilever Beam*) byl zatěžován s konstantní rychlostí posuvu $v = 2,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Z měření byly získány závislosti síly na posunutí, které jsou zobrazeny v grafu na obrázku 6, kde zelená křivka je aritmetický průměr všech platných zkušebních vzorků.

Z výše uvedených hodnot a pomocí rovnice (1) byly vypočteny hodnoty kritické energie G_I pro všechny vzorky, které jsou uvedeny v tabulce 3. Člen pro korekci rotace Δ byl zvolen nulový z důvodu nezaznamenané rotace při zatěžování.

Z hodnot v tabulce 3 byl vypočítán aritmetický průměr $\overline{G_I}$ a variační koeficient v_{G_I} (tabulka 4).

Tabulka 2: Geometrické parametry vzorků pro DCB test

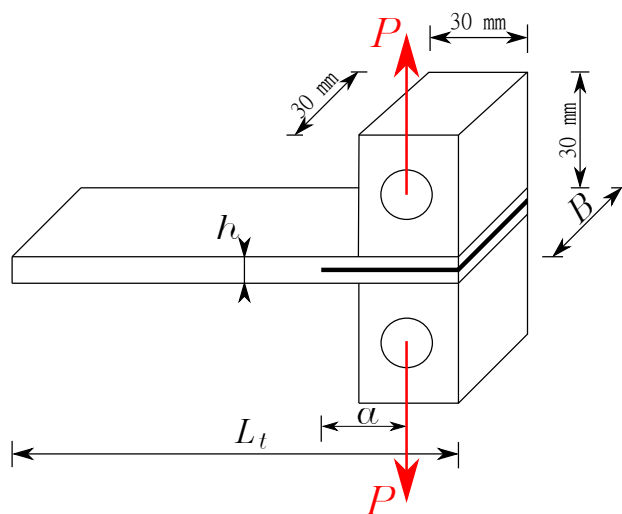
Označení vzorku	L_t [mm]	a [mm]	h [mm]	B [mm]
KC_TW_DCB_01	150,85	69,35	5,06	20,06
KC_TW_DCB_02	150,53	66,51	5,04	20,05
KC_TW_DCB_03	150,59	65,99	5,05	19,98
KC_TW_DCB_04	150,64	60,09	4,98	19,98
KC_TW_DCB_05	150,49	62,50	5,02	20,15
KC_TW_DCB_06	150,56	66,63	5,05	20,10
KC_TW_DCB_07	150,41	56,14	4,94	19,90

Tabulka 3: Kritické energie G_I

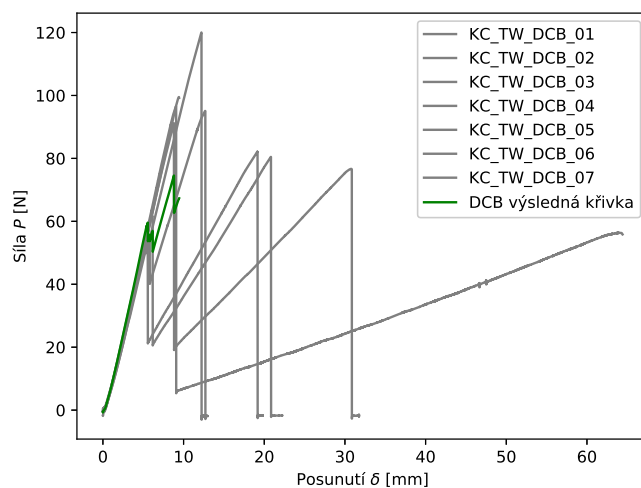
Označení vzorku	G_I [J.m ⁻²]
KC_TW_DCB_01	943,46
KC_TW_DCB_02	1054,49
KC_TW_DCB_03	1788,12
KC_TW_DCB_04	1002,79
KC_TW_DCB_05	1745,49
KC_TW_DCB_06	1877,27
KC_TW_DCB_07	1617,93

Tabulka 4: Vyhodnocení kritické energie G_I

Označení	$\overline{G_I}$ [J.m ⁻²]	v_{G_I} [%]
G_I	1433	27



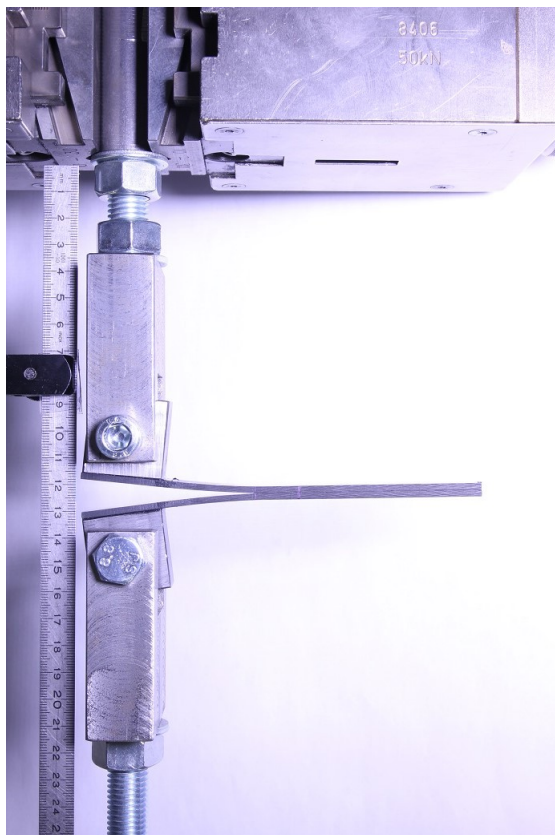
Obrázek 5: Schéma vzorku pro mód I



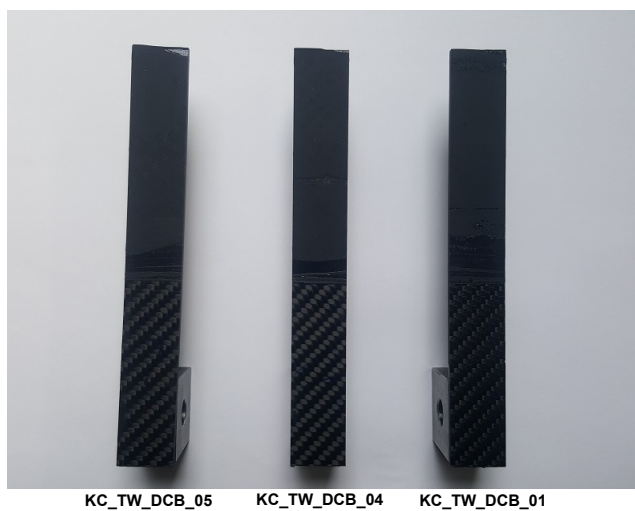
Obrázek 6: Závislost síly na posunutí při DCB testu

Zkouška vzorků byla provedena na zkušebním trhacím stroji Zwick / Roell Z050. Zkouška pro mód I je uvedena na obrázku 7, vzorek na daném obrázku byl zachycen těsně před porušením.

Na obrázku 8 jsou zobrazeny reprezentativní porušené vzorky s nízkou a vysokou kritickou energií.



Obrázek 7: Zkouška lepeného spoje pro mód I



Obrázek 8: Porušené vzorky při mód I

3.3 M3d II

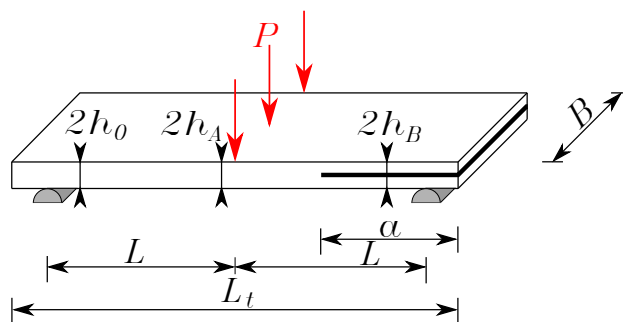
M3d II je pops3n jako smykov3y m3d. S3ly, kter3e zp3sobuj3 smyk p3sob3 rovnob3žn3 pod3ln3 s nezat3ženou plochou lepidla v opa3n3ch sm3rech. Porušen3 a sm3r zat3žení je zn3zorn3n na obr3zku 4b .

Pro v3ypo3et kritick3e energie porušen3 p3i zat3žení podle m3du II byla použit3 rovnice

$$G_{II} = \frac{9a^2 P \delta}{2B(2L^3 + 3a^3)}, \quad (2)$$

kde P je kritick3a hodnota s3ly p3i porušen3, δ je kritick3e posunut3, L je d3lka mezi podporou a osou zat3žení, B je šířka vzorku, a je d3lka nelepen3 části vzorku. Tato rovnice byla použit3 jako aproximace p3vodn3 rovnice v norm3 ASTM - D7905 [3], jak je použit3 v pr3ci [5]

Geometrick3e parametry zkušebn3ho vzorku jsou zn3zorn3ny na obr3zku 9. Konkr3etn3 nam3řen3e hodnoty pro všechny zkušebn3 vzorky jsou uvedeny v tabulce 5.

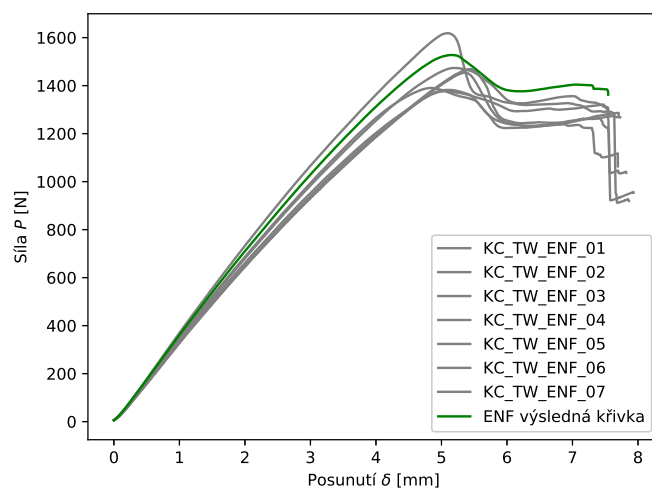


Obr3zek 9: Sch3ma vzorku pro m3d II

P3i m3ření bylo postupov3no podle normy ASTM - D7905 [3]. Zkušebn3 vzorek ENF (*end-notched flexure*) byl zat3žov3n konstantn3 rychlost3 posuvu $v = 1,6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Z m3ření byly z3sk3ny z3vislosti s3ly na posunut3, kter3e jsou zobrazeny na obr3zku 10, kde zelen3 k3r3vka je aritmetick3y pr3m3r všech platn3ch zkušebn3ch vzork3.

Tabulka 5: Geometrické parametry vzorků pro ENF test

Označení vzorku	L_t [mm]	a [mm]	$2h_0$ [mm]	$2h_A$ [mm]	$2h_B$ [mm]	B [mm]
KC_TW_ENF_01	150,05	59,98	4,93	5,10	5,00	20,08
KC_TW_ENF_02	149,95	59,88	4,95	5,08	4,98	20,09
KC_TW_ENF_03	150,06	61,37	4,94	5,12	4,98	20,07
KC_TW_ENF_04	150,01	59,70	4,93	5,08	4,94	20,12
KC_TW_ENF_05	150,02	59,84	4,94	5,05	4,95	19,78
KC_TW_ENF_06	150,08	65,33	4,93	5,08	4,99	20,02
KC_TW_ENF_07	150,09	61,46	4,91	5,09	4,98	20,08



Obrázek 10: Závislost síly na posunutí při ENF testu

Z výše uvedených hodnot a pomocí rovnice (2) byly vypočteny hodnoty kritické energie G_{II} , které jsou uvedeny v tabulce 6.

Z hodnot v tabulce 6 byl vypočítán aritmetický průměr $\overline{G_{II}}$ a variační koeficient $v_{G_{II}}$ (tab. 7).

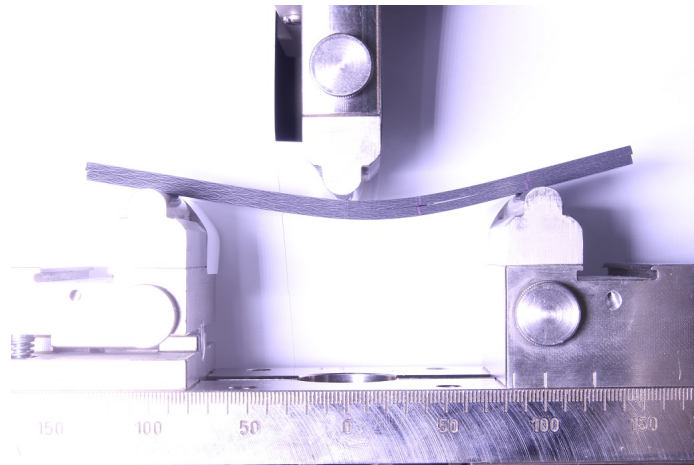
Tabulka 6: Kritické energie G_{II}

Označení vzorku	G_{II} [J.m ⁻²]
KC_TW_ENF_01	7167,68
KC_TW_ENF_02	6260,42
KC_TW_ENF_03	6977,33
KC_TW_ENF_04	6870,70
KC_TW_ENF_05	6133,40
KC_TW_ENF_06	7289,11
KC_TW_ENF_07	6298,26

Tabulka 7: Vyhodnocení kritické energie G_{II}

Označení	$\overline{G_{II}}$ [J.m ⁻²]	$v_{G_{II}}$ [%]
G_{II}	6714	7

Zkouška vzorků byla provedena na zkušebním trhacím stroji Zwick / Roll Z050. Zkouška pro mód II je uvedena na obrázku 11, vzorek na daném obrázku byl zachycen těsně před porušením.



Obrázek 11: Zkouška lepeného spoje pro mód II

4 Výroba desky

Pro vyšetření smykové pevnosti v závislosti na struktuře povrchu bylo potřeba vyrobit zkušební vzorky. Struktura povrchu byla ovlivněna pomocí výrobní technologie. Pro dobré mechanické vlastnosti a dobré spolupůsobnosti s epoxidovým lepidlem byla zvolena uhlíková deska s epoxidovou pryskyřicí [7]. Technologie prosyčování byla použita VAP[®] (Vacuum Assisted Process), pro nízký objem pryskyřice ve výsledném vzorku [16]. VAP[®] je patentovaná technologie prosyčování firmy Airbus. Tato metoda vychází z běžné infuzní metody prosyčování.

4.1 Infuzní vakuová technologie

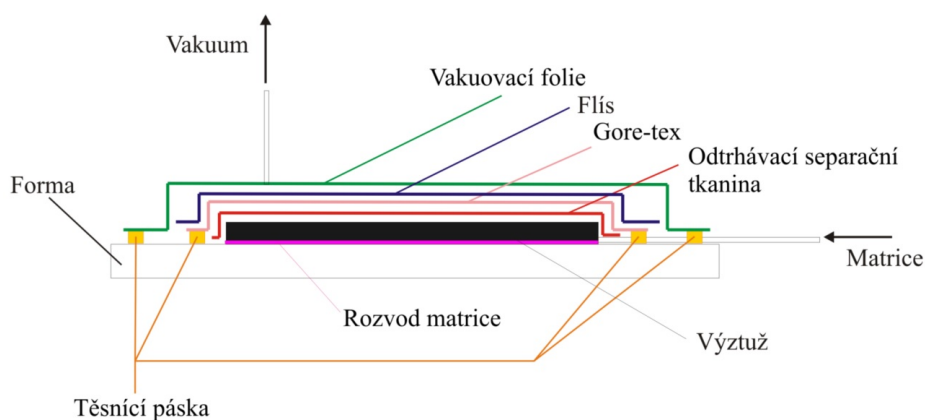
Standardní infuzní vakuová technologie je uzavřená metoda prosyčování výztuže. Veškerý proces probíhá v uzavřené utěsněné formě, z toho důvodu nedochází k odpařování škodlivých látek do okolí pracoviště. Metodika technologie začíná s položením suché výztuže do formy, následně se forma uzavře a utěsní. Vakuová infuze využívá podtlaku vytvořeného pomocí vakuové vývěvy, která z utěsněné formy odstraní vzduch a zároveň začne nasávat pryskyřici ze zásobníku. Pokud je použita pružná fólie jako závěr, fólie se při podtlaku přisaje k výztuži za snížení objemu formy. Tento proces zaručí rovnoměrné rozložení pryskyřice a prosycení všech vrstev suché výztuže. Výhodou je vyšší objemový podíl výztuže a snížení spotřeby matrice výsledného výrobku ve srovnání s běžnými laminovacími metodami.[10]

4.2 VAP[®]

U technologie prosycení VAP[®] oproti infuzní vakuové technologii se na výztuž přidá odtrhávací (separační) vrstva a v našem případě dále i rozváděcí tkanina, jaká je použita například v metodě SCRIMP[®] [1]. Hlavní výhodou technologie VAP[®] je použití *Gore-tex* vrstvy. *Gore-tex* vrstva je utěsněna nad rozváděcí tkaninou, jak je vidět na obrázku 12. Tato vrstva propouští přebytečný vzduch a zachová matici ve formě. Důsledek je snížení podílu vzduchu a zvýšení podílu pryskyřice, která se nedostane přes *Gore-tex*. Následně se na *Gore-tex* pokládá flís pro rovnoměrné odsátí vzduchu. [4]

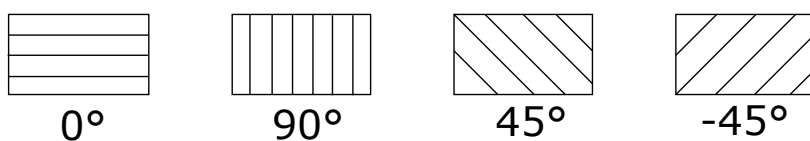
4.3 Vlastní výroba desky pro zkušební vzorky

Deska byla vyrobena z jednosměrné textilie od značky Saertex, která se skládá z vláken TENAX J IMS60 E13 24K. Tato textilie byla použita jako



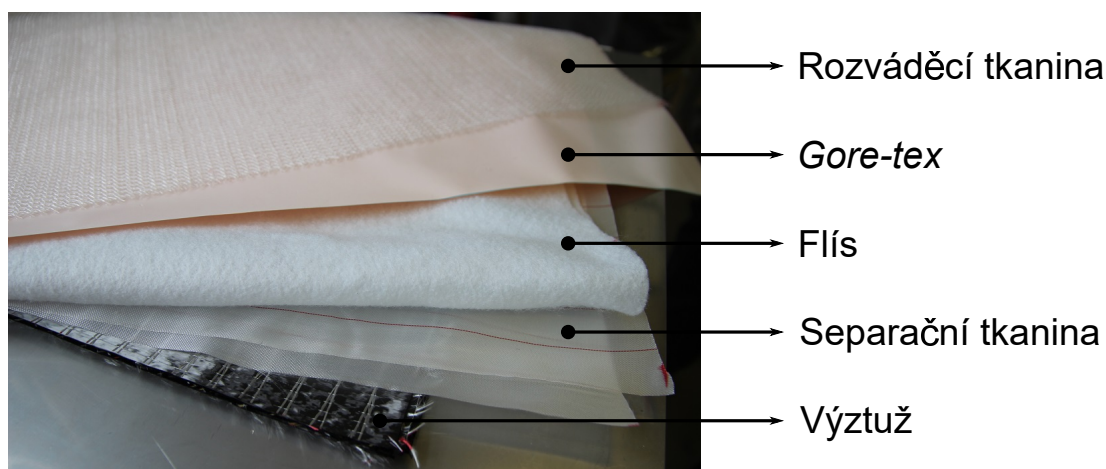
Obrázek 12: Schématický nákres výroby pomocí technologie VAP® [4]

výztuž desky. Pro výrobu bylo potřeba osm vrstev dané textilie s natočením vláken $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ]^s$. Natočení je znázorněno na obrázku 13. Pro udržení jednotného rozměru všech osmi vrstev byla použita předem střížená šablona, podle které byly vrstvy vystříženy.



Obrázek 13: Natočení vrstev

Dále byla nastříhána rozváděcí vrstva, separační vrstva, *Gore-tex* vrstva, flís, vakuovací fólie, všechny byly nastříhány podle rozměrů v tabulce 8. U vakuovací fólie byl dáván pozor na nežádoucí ohyby a trhliny, které by znemožnily použití fólie. Technologické vrstvy s výjimkou vakuové fólie jsou vidět na obrázku 14.



Obrázek 14: Skladba technologických vrstev

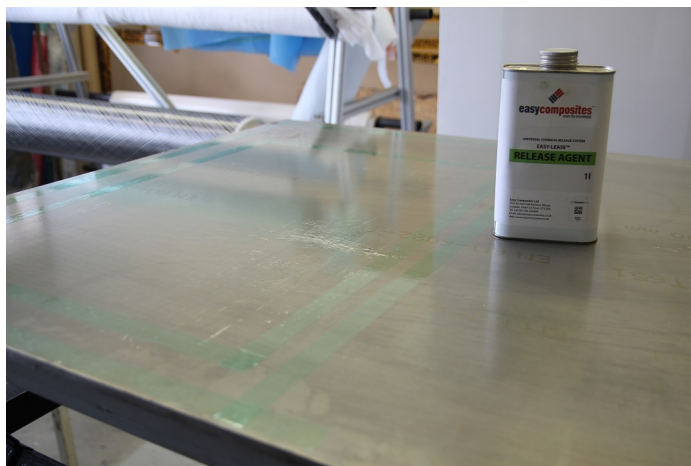
Tabulka 8: Rozměry technologických vrstev

Jméno vrstvy	rozměry [mm]	množství
Výztuž	590x415	8
Odtrhávací	660x440	2
Rozváděcí	660x440	1
<i>Gore-tex</i>	705x485	1
Flís	795x505	2
Vakuová fólie	835x545	1

Pro zachování správného položení výztuže $[0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ]^s$, byly suché vrstvy výztuže nalepeny k sobě pomocí tenké vrstvy lepidla aplikované ve spreji. Suché vrstvy výztuže byly na sebe pečlivě vyskládány v daném pořadí. Poté byla polovina desky zatížena proti vzájemnému posunu a druhá polovina byla postupně po vrstvách slepena. Následně byla dolepena i zbývající (původně jen zatížená) část desky. Prolepení vrstev probíhalo mimo formu.

Dále byla připravena forma. Pro výrobu desky byla forma zvolena jako rovná hliníková deska, která byla vyčištěna a odmaštěna čističem na bázi alkoholu. Poté byly na formě izolepou olepny dva obvody, vnitřní obvod *Gore-tex* vrstvy a vnější obvod vrstvy vakuové fólie. Důvodem olepení bylo pozdější nalepení těsnící pásky na formu, kde nebyl nanesen separátor, který by zabránil nalepení pásky. Dále byl nanesen separátor (*Easy-Lease Chemical Release Agent* od firmy *easycomposites* zobrazen na obrázku 15) pro snadné odebrání výsledné desky z formy. Separátor byl nanesen celkem šestkrát po-

mocí savého materiálu, od kterého bylo požadováno, aby nezanechával vlákna na přípravné ploše. Při nanášení byla aplikována větší vrstva (okem viditelná stopa při nanášení). Každá vrstva byla nanášena novým čistým kusem materiálu. Separátor byl nanášen tak, aby po sobě jdoucí vrstvy byly vždy na sebe kolmé. Mezi nanášením jednotlivých vrstev bylo výrobcem doporučeno 10 minut na zaschnutí separátoru. Doba zaschnutí se může lišit podle teploty v místnosti a typu povrchu.



Obrázek 15: Příprava plochy pomocí separátoru

Po zaschnutí poslední vrstvy separátoru byla na formě odstraněna izolepa a na toto místo byla nalepena těsnící páska. Rohy těsnící pásky byly přelepeny s přesahem na obě strany z důvodu utěsnění.

Dále byly poskládány vrstvy desky do místa vnitřní těsnící pásky. První byla položena výztuž přímo na formu, tento krok byl zvolen pro požadovanou hladkou strukturu jedné strany výsledné desky. Na výztuž byla položena separační vrstva a na ní rozváděcí vrstva.

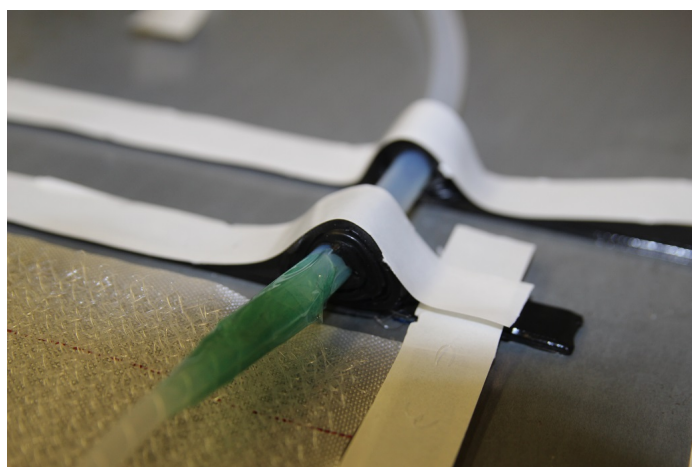
Následně bylo potřeba připravit vedení pro infuzi pryskyřice. Pro přívod pryskyřice do formy byla použita tepelně i chemicky odolná hadička pevnější struktury. Pro rozvod pryskyřice ve formě byla použita plastová rozváděcí spirála (elektrikářská trubice). Spoj mezi těmito dvěma vedeními byl slepen pomocí teplo odolné izolepy a před slepením byla rozváděcí spirála vsunuta do příváděcí hadičky jak je vidět na obrázku 16.

V místě popsaného spoje a konce teplo odolné izolepy na straně přívodu, byla hadička oplepena a utěsněna těsnící páskou. Tím byl dodatečně utěsněn spoj hadičky a rozváděcí spirály. Těsnící páska okolo spoje hadičky a spirály byla slepena s již nalepenou těsnící páskou na formě pro zachování těsnosti *Gore-tex* vrstvy. Konec rozváděcí spirály byl nalepen k rozváděcí vrstvě po-



Obrázek 16: Přívádčí a rozvádčí hadička

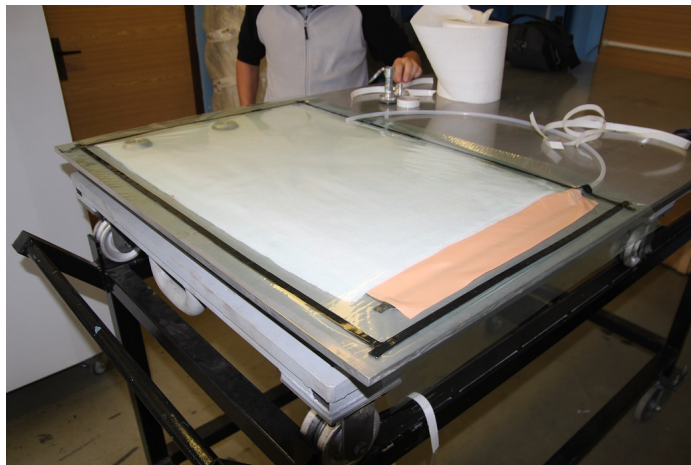
mocí teple odolné izolepy, aby nedošlo k posunutí. V místě protnutí hadičky a těsnící pásky pro vakuovou folii, byla hadička olepena stejným způsobem jako v případě utěsnění místa pro *Gore-tex*. Z důvodu zachování těsnosti vakuové fólie (obr. 17).



Obrázek 17: Olepení hadičky těsnící páskou

Po instalaci přívodu pro pryskyřici byla položena druhá separační vrstva, na kterou byla umístěna *Gore-tex* vrstva. Tato vrstva byla nalepena na těsnící pásku v co nejvíce napnutém stavu. Důvodem bylo zamezení přebytečného množství pryskyřice na vrchní straně desky. Na *Gore-tex* byla položena dvojitá vrstva flísy a na něj spodní část sacího ventilu. Jako poslední byla nalepena těsnící fólie na těsnící pásku obrázku 18. Fólie byla napnuta podobně

jako *Gore-tex* vrstva.



Obrázek 18: Nalepená těsnící fólie

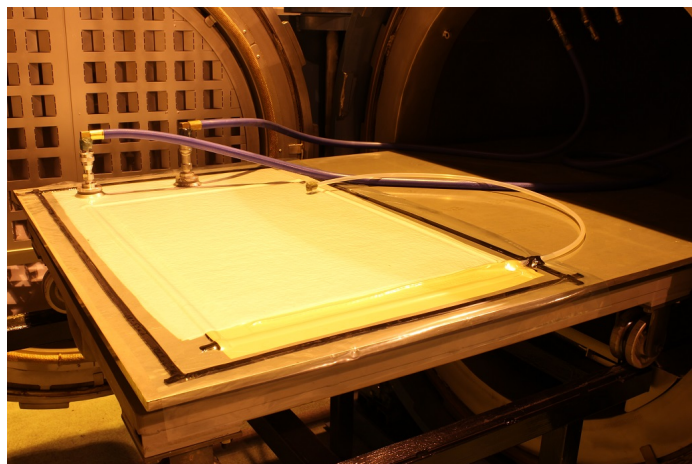
Na místě položení spodní části sacího ventilu byla folie proříznuta z důvodu nasazení vrchní části sacího ventilu a zajištění volného průtoku pryskyřice do formy. Při prořezávání folie byla věnována zvýšená pozornost, aby se vytvořená trhлина na fólii nerozšířila. Prořízlá folie byla držena u sebe a zároveň byla nasazena vrchní část sacího ventilu. Pokud by se folie měla tendenci rozšiřovat, místo porušení na fólii bylo možné olepit izolepou pro zpevnění.

Před ostrým spuštěním vývěvy s pryskyřicí byla vyzkoušena těsnost formy. Sací ventily byly připojeny na hadice od vývěvy v autoklávu, zároveň byla zatěsněná hadička přívodu pryskyřice pomocí izolepy a těsnící pásky. Dále byla spuštěna vývěva a zkontrolována těsnost formy. Úspěšná zkouška je vidět na obrázku 19.

Po zkoušce těsnosti bylo připraveno vedení pryskyřice do formy. Hadička pro přívod pryskyřice byla vedena do nádoby s pryskyřicí přes stojánek. Stojánek byl použit z důvodu vytvoření vertikálního oblouku, kde byly zachytávány přebytečné vzduchové bubliny v matrici. Před upevněním do stojánku byly na přívodní hadičku nasazeny škrťící ucpávky pro pozdější využití.

Následně bylo potřeba připravit matrice. Matrice byla připravena třikrát po 300 g v poměru matrice/tvrdidlo 100/40. Použitá pryskyřice (Havel composites, Epoxidová pryskyřice L285 (MGS)) i tvrdidlo (Havel composites, Tužidlo 287 (MGS)) jsou uvedeny na obrázku 20. Matrice byla připravena do tří nádob. Jako nádoby byly použity plastové kelímky. Po odvážení matrice a tvrdidla do nádoby byla směs důkladně promíchána.

Nádoba s pryskyřicí byla umístěna na váhu z důvodu určení rychlosti sání při infuzi. Do nádoby byla vsunuta hadička pro přívod pryskyřice, která byla



Obrázek 19: Zkouška těsnosti formy



Obrázek 20: Pryskyřice a tvrdidlo

vedena přes stojánek.

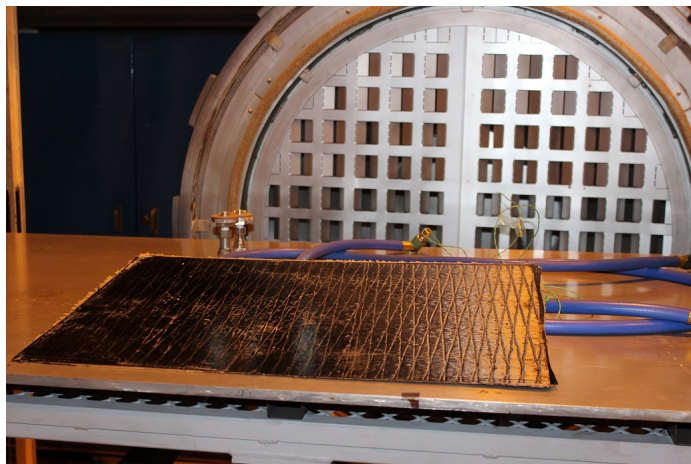
Při zapnutí vývěvy byl dáván pozor na rychlé odsátí matrice na začátku procesu. Matrice byla postupně dolévána do nádoby s přívodem pryskyřice, tak aby se do formy nezačal nasávat vzduch.

Infuze byla ukončena ve chvíli, kdy rychlost sání klesla pod 1-2 gramy za minutu. Celková infuze konkrétní formy byla ukončena přibližně za dvě hodiny.

Po ukončení infuze byly zaškrceny škrtkové závěry na hadičce pro přívod matrice a vývěva byla ponechána dalších 24 hodin v činnosti při pokojové teplotě.

Po dokončení infuze byly sklizeny nepotřebné části (stojánek, nádoby,

atd.) a celá deska byla vsunuta do autoklávu, kde byla ponechána po dobu patnácti hodin při 80 °C. Poté byl autokláv otevřen a při stálém chodu vývěvy byla deska ponechána v autoklávu po dobu jejího vychladnutí. Následně byly strženy technologické vrstvy a deska byla vyjmuta z formy. Výsledná deska byla očištěna a je vidět na obrázku 21.

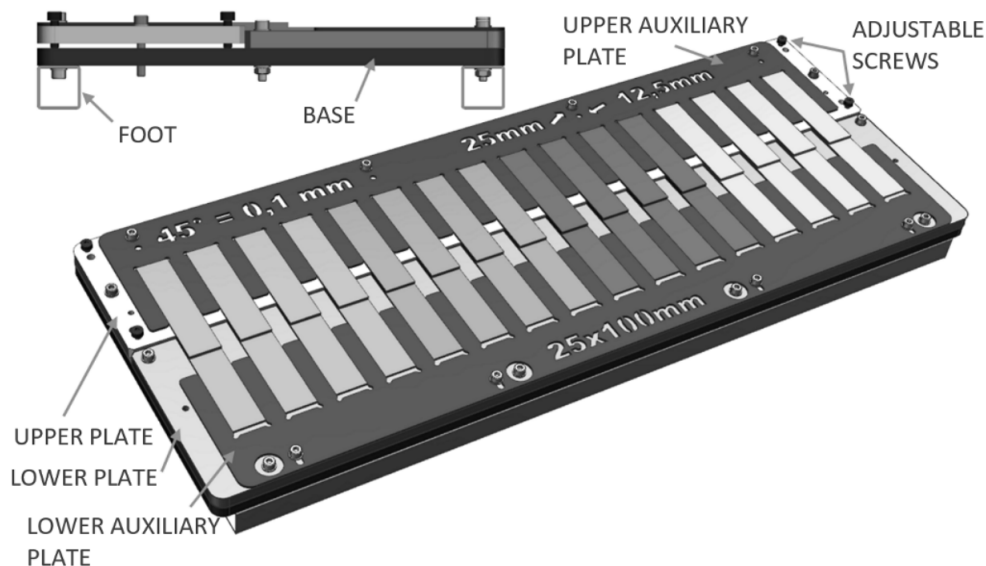


Obrázek 21: Výsledná deska

5 Experimentální stanovení smykové pevnosti lepeného spoje

5.1 Výroba zkušebních vzorků

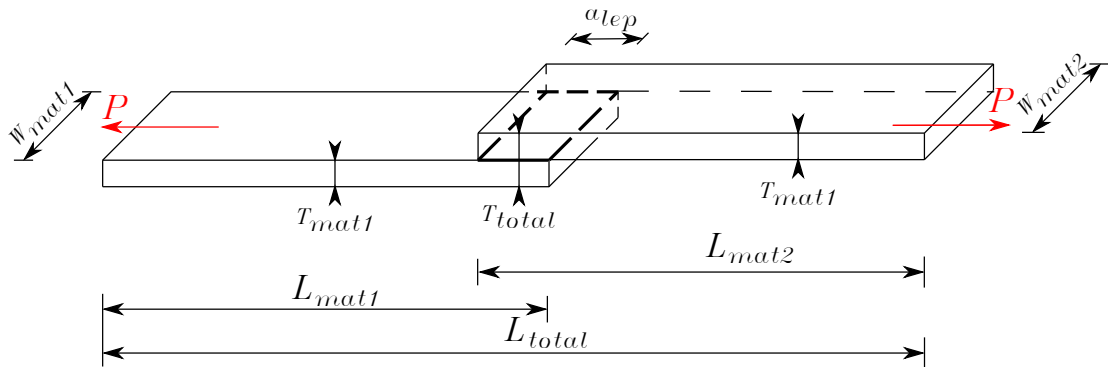
Z vyrobené desky popsané v minulé kapitole byly nařezány prizmatické pásky ve tvaru obdélníku o rozměrech 25 mm šířky a 100 mm délky pomocí vodního paprsku. Pásky byly nařezány z desky tak, že vrchní vrstva pásku měla orientaci 90° vůči své nejdelsí straně. Výsledné pásky byly nalepeny k sobě v kombinacích s různou strukturou povrchu zapříčinenou technologií výroby. Tím byly kombinace hrubá/hrubá (**HH**), hladká/hrubá (**CH**), hladká/hladká (**CC**). Hrubá strana pásku byla brána jako strana, ze které byla stržena odtrhávací tkanina, dále v textu označena jako **H**. Hladká strana pásku byla brána jako strana, která byla v přímém kontaktu s hladkou formou, dále v textu označena jako **C**. Lepeno bylo pomocí lepidla (adherent) Scotch-Weld™ Lepidlo EPX™ DP490. Pro zaručení stejné tloušťky adherentu, stejného rozměru lepené plochy a zaručení rovnoběžnosti a souběžnosti lepených ploch byla použita forma pro lepení přeplátovaných spojů z práce Tomáše Kaliny (obrázek 22) [11].



Obrázek 22: Forma pro lepení přeplátovaných spojů [11]

Před nanesením lepidla byla lepená plocha pásku očištěna a pokud se jednalo o hladkou stranu, plocha byla navíc jemně zdrsňena smirkovým papírem. Po položení všech vzorků do formy byly vzorky zatíženy. Použité dvouslož-

kové lepidlo DP490 bylo nanášeno pomocí ručního aplikátoru a smíšeno pomocí směšné trysky. Vzorky byly ponechány zatíženy po dobu jednoho týdne, z důvodu správného vytvrdnutí do úplné pevnosti lepidla. Při vyjmutí vzorků byly zkontrolovány a případně očiššeny boční hrany od přebyšněného a nežádoucí lepidla, které by mohlo ovlivnit výsledek zkoušky. Schéma slepených pášků, výsledných vzorků je na obrázku 23.



Obrázek 23: Schéma vzorku

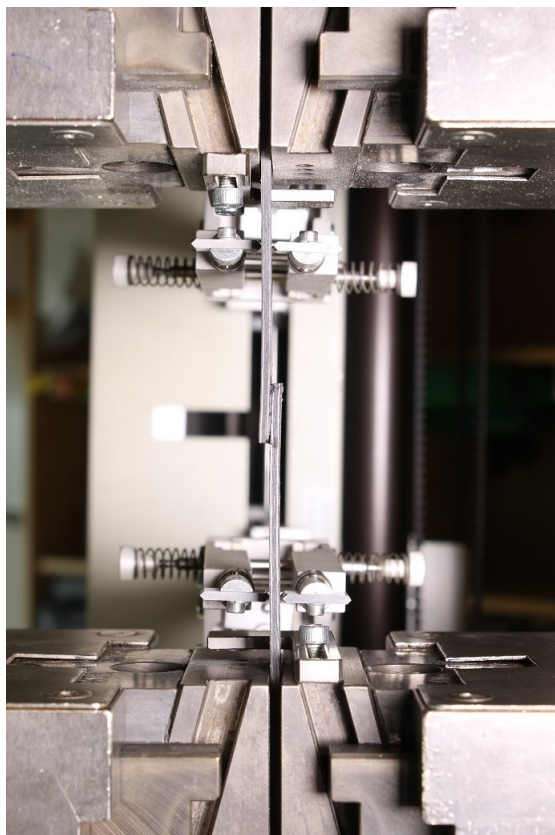
Lepení vzorků bylo provedeno na dvakrát z důvodu omezeného množství možných vzorků ve formě. První byly nalepeny vzorky sady **CH** a vzorky sady **CC** očíslovány 1 až 6. Zbytek vzorků byl nalepen ve druhém lepení.

5.2 Experiment

Při experimentu bylo postupováno v souladu s normou ČSN EN 1465 [6], která je českým ekvivalentem ASTM normy. Pro stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání jednoduchého přeplátovaného spoje byly vzorky zatěžovány tahovou silou, která byla rovnoběžná s podélnou osou zkušební vzorku. Výstupem zkoušky byla křivka závislosti síly na posunutí.

Zkouška byla provedena na zkušebním trhacím stroji Zwick / Roell Z050. Posunutí bylo měřeno jednoosým extenzometrem, počáteční měřená délka byla $l_0 = 80$ mm. Počáteční vzdálenost čelistí stroje byla $l_j = 112,5$ mm. Pro upnutí vzorku byly použity samosvorné čelisti, které umožňovaly vzájemné vyosení tak, aby zatěžování probíhalo v ose lepidla. Pokud bychom neměli k dispozici tyto speciální čelisti, bylo by nutné vzorky na obou koncích dodatečně opatřit příložkami stejné tlouššky jako měli samotné adherendy. Vyosením čelistí bylo zamezeno případně nežádoucímu módu porušení. Zkouška je znázorněna na obrázku 24 těšně před porušením lepeného spoje.

Vzorek byl zatěžován na tah s konstantní rychlostí posuvu příčnicku $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ jak je stanoveno v normě.

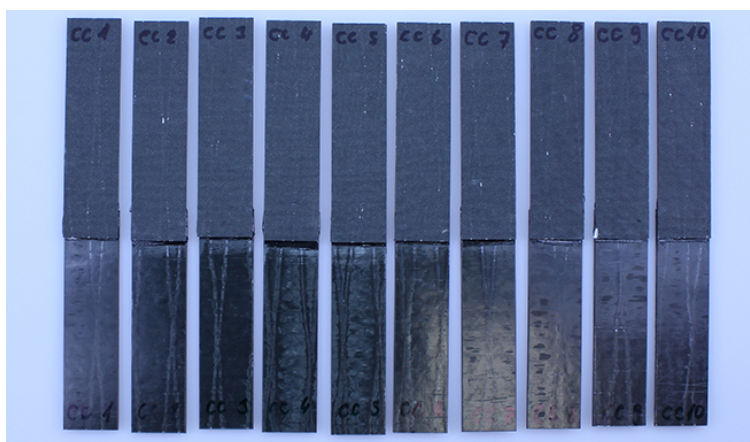


Obrázek 24: Tahová zkouška přeplátovaného lepeného spoje

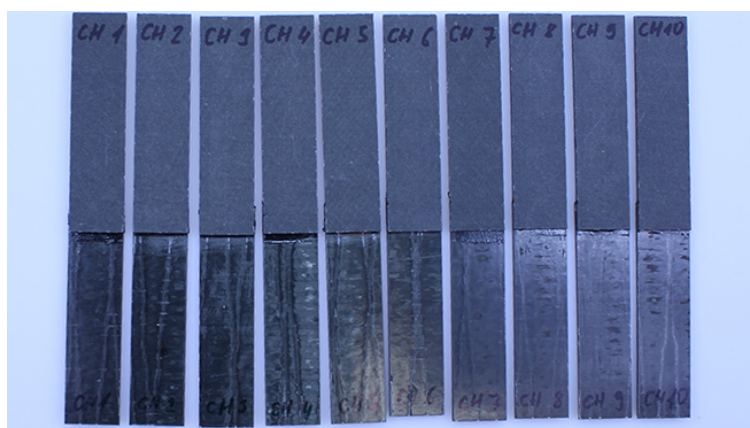
Měřeny byly tři sady vzorků s označením **CC**, **CH**, **HH**. Jednotlivé sady jsou zobrazeny na obrázcích 25 – 27. Rozměry vzorků jednotlivých sad jsou uvedeny v tabulkách 9 – 11.

Tabulka 9: Parametry vzorků sady **CC**

Veličiny	W_{mat1}	W_{mat2}	T_{mat1}	T_{mat2}	T_{total}	L_{mat1}	L_{mat2}	L_{total}	l_j	l_0
Jednotky	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
CC_1	24,97	24,87	2,26	2,29	4,75	100,0	100,0	187,2	112,5	80,0
CC_2	25,07	24,94	2,32	2,28	4,79	100,0	100,0	186,9	112,5	80,0
CC_3	24,89	25,00	2,30	2,28	4,79	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0
CC_4	25,05	24,96	2,31	2,28	4,89	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0
CC_5	25,01	25,09	2,31	2,31	4,88	100,0	100,0	187,2	112,5	80,0
CC_6	24,94	25,10	2,34	2,28	4,84	100,0	100,0	187,1	112,5	80,0
CC_7	25,02	24,98	2,36	2,31	4,79	100,0	100,0	187,3	112,5	80,0
CC_8	24,91	25,13	2,33	2,22	4,76	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0
CC_9	24,99	24,96	2,29	2,27	4,64	100,0	100,0	186,2	112,5	80,0
CC_10	24,94	25,11	2,35	2,31	4,77	100,0	100,0	187,1	112,5	80,0



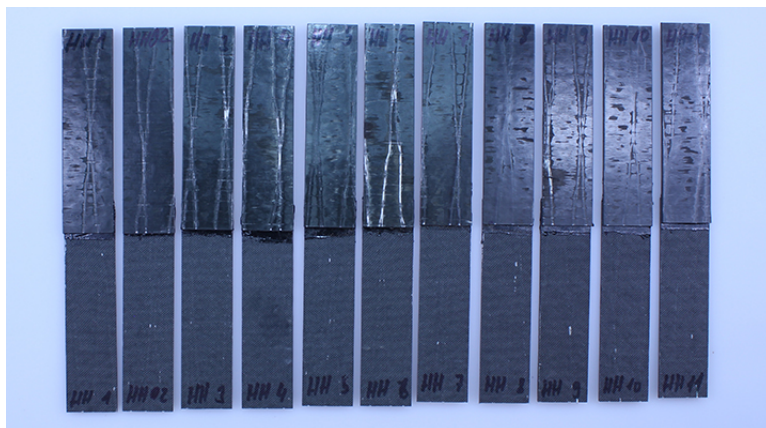
Obrázek 25: Sada vzorků CC



Obrázek 26: Sada vzorků CH

Tabulka 10: Parametry vzorků sady CH

Veličiny	W_{mat1}	W_{mat2}	T_{mat1}	T_{mat2}	T_{total}	L_{mat1}	L_{mat2}	L_{total}	l_j	l_0
Jednotky	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
CH_1	24,97	25,07	2,58	2,31	4,98	100,0	100,0	187,6	112,5	80,0
CH_2	24,98	24,86	2,47	2,32	4,87	100,0	100,0	187,2	112,5	80,0
CH_3	24,92	24,99	2,56	2,34	4,95	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0
CH_4	24,90	24,99	2,50	2,29	4,92	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0
CH_5	25,06	25,06	2,48	2,24	4,87	100,0	100,0	186,7	112,5	80,0
CH_6	24,92	25,04	2,42	2,29	4,88	100,0	100,0	183,8	112,5	80,0
CH_7	25,01	24,86	2,50	2,29	4,98	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0
CH_8	25,01	24,92	2,53	2,30	4,89	100,0	100,0	186,7	112,5	80,0
CH_9	24,99	24,91	2,53	2,33	4,95	100,0	100,0	186,7	112,5	80,0
CH_10	25,08	25,03	2,45	2,33	4,85	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0



Obrázek 27: Sada vzorků **HH**

Tabulka 11: Parametry vzorků sady **HH**

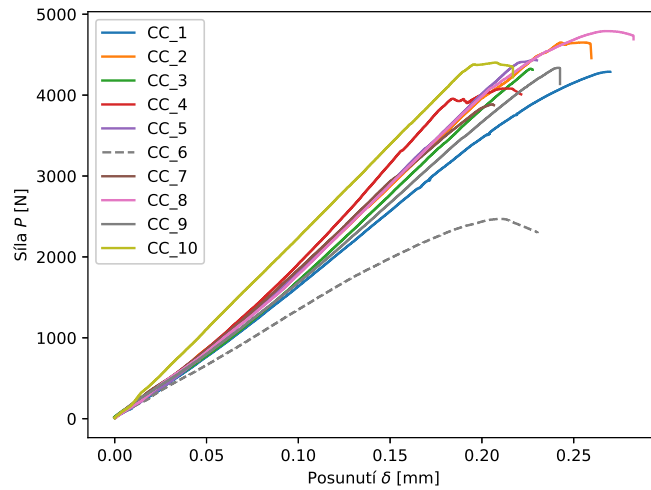
Veličiny	W_{mat1}	W_{mat2}	T_{mat1}	T_{mat2}	T_{total}	L_{mat1}	L_{mat2}	L_{total}	l_j	l_0
Jednotky	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
HH_1	24,93	25,11	2,29	2,28	4,77	100,0	100,0	187,1	112,5	80,0
HH_2	25,02	24,91	2,29	2,31	4,77	100,0	100,0	186,9	112,5	80,0
HH_3	25,04	24,97	2,31	2,20	4,64	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0
HH_4	25,03	25,01	2,28	2,23	4,70	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0
HH_5	25,03	24,95	2,33	2,26	4,72	100,0	100,0	186,7	112,5	80,0
HH_6	24,80	25,04	2,30	2,27	4,87	100,0	100,0	187,1	112,5	80,0
HH_7	25,06	24,95	2,26	2,28	4,81	100,0	100,0	186,6	112,5	80,0
HH_8	25,01	25,04	2,29	2,22	4,60	100,0	100,0	187,2	112,5	80,0
HH_9	25,29	25,05	2,34	2,28	4,72	100,0	100,0	187,0	112,5	80,0
HH_10	24,86	24,96	2,36	2,33	4,70	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0
HH_11	24,94	25,02	2,33	2,35	4,71	100,0	100,0	186,8	112,5	80,0

Naměřená data byla zobrazena do grafů závislosti síly na posunutí ($P-\delta$). Pro sadu **CC** je graf uveden na obrázku 28. Pro sadu **CH** na obrázku 29. Pro sadu **HH** je na obrázku 30.

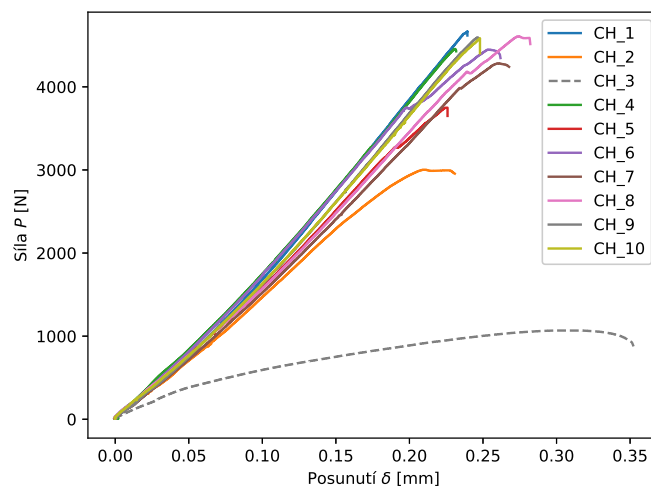
5.3 Vyhodnocení

Z výše uvedených parametrů a naměřených hodnot byly vypočítány smykové pevnosti všech platných vzorků (tab. 12). Vzorky v tabulce vyznačeny červeně, byly vyřazeny z důvodu nedokonalého slepení spoje a rychlého adhezivního porušení. Vyřazené vzorky jsou v grafech (obr. 28-30) vyznačeny šedou čárkovanou čarou. Smyková pevnost byla vypočtena podle vztahu

$$\tau = \frac{P_{max}}{W_{mat} \cdot a_{lep}}, \quad (3)$$

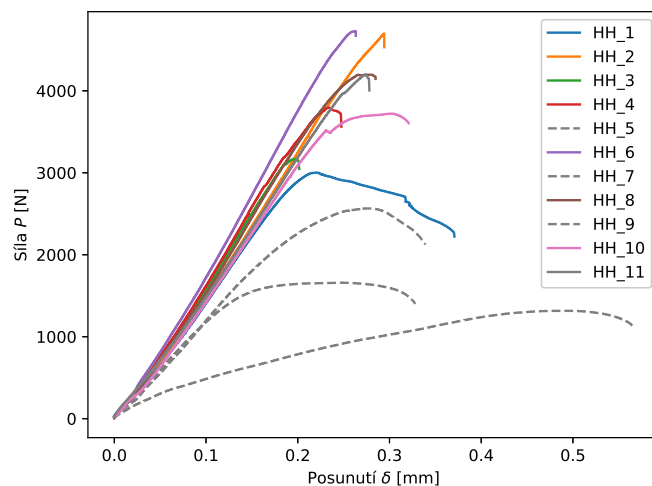


Obrázek 28: Závislosti síla–posunutí pro sadu **CC**



Obrázek 29: Závislosti síla–posunutí pro sadu **CH**

kde P_{max} je maximální dosažená síla namáhání při zkoušce, W_{mat} je menší z hodnot šířky pásku, a_{lep} je délka lepené části, která byla vypočtena z celkové délky vzorku L_{total} a délky jednotlivých pásků $L_{mat1,2}$.



Obrázek 30: Závislosti síla–posunutí pro sadu **HH**

Tabulka 12: Smykové pevnosti vzorků

τ pro sadu CC		τ pro sadu CH		τ pro sadu HH	
Označení	τ_{CC} [MPa]	Označení	τ_{CH} [MPa]	Označení	τ_{HH} [MPa]
CC_1	13,48	CH_1	15,07	HH_1	11,39
CC_2	14,24	CH_2	9,44	HH_2	14,40
CC_3	13,17	CH_3		HH_3	9,62
CC_4	12,58	CH_4	13,56	HH_4	11,50
CC_5	13,86	CH_5	11,25	HH_5	
CC_6		CH_6	11,02	HH_6	14,78
CC_7	12,25	CH_7	13,25	HH_7	
CC_8	14,80	CH_8	13,91	HH_8	13,11
CC_9	12,60	CH_9	13,87	HH_9	
CC_10	13,68	CH_10	14,08	HH_10	11,34
				HH_11	12,76

Vyhodnocení tahové zkoušky všech platných vzorků bylo vyjádřeno v tabulce 13. Kde $P_{i\max}$ je maximální dosažená hodnota kritické síly v sadě, \bar{P}_i je aritmetický průměr kritických sil vzorků v sadě, $\tau_{i\max}$ maximální hodnota smykové pevnosti v sadě, $\bar{\tau}_i$ je aritmetický průměr maximálních smykových

pevností vzorků v sadě, $v_{\tau i}$ je variační koeficient maximálních smykových pevností všech platných vzorků v jednotlivých sadách.

Tabulka 13: Vyhodnocení tahové zkoušky

Označení sady	$P_{i\max}$ [N]	\bar{P}_i [N]	$\tau_{i\max}$ [MPa]	$\bar{\tau}_i$ [MPa]	$v_{\tau i}$ [%]
CC	4791,9	4356,4	14,8	13,4	5,9
CH	4666,0	4266,2	15,1	12,8	13,5
HH	4729,0	3939,5	14,8	12,4	13,1

Při tahové zkoušce sady **CH** bylo pozorováno kohezivní porušení v adherendu na sedmi vzorcích na straně **C** z celkového počtu 9 platných vzorků. Pokud by měření bylo prováděno pouze na sadě **CH**, vyplývala by větší únosnost vzorků s povrchem **H**. Přidá-li se do vyhodnocení sada **CC** a **HH** je možné pozorovat větší naměřenou průměrnou smykovou pevnost $\bar{\tau}_i$ v sadě **CC**. Tento fakt mohl být způsoben menším rozptylem $v_{\tau i}$ než u ostatních sad. Velký rozptyl u sad **HH** mohl být způsoben samotným povrchem strany **H**, která kvůli odtrhávací tkanině má nepravidelnou drsnost po celé straně desky. Nepravidelná drsnost mohla zapříčinit různé rozlití lepidla na každém ze vzorků. Jelikož byl dodržován stejný postup lepení sady **HH** jako u sady **CC**, která byla lepena v první vlně, mohlo být množství naneseného lepidla nedostatečné pro vzorky s nepravidelnou hrubou strukturou.

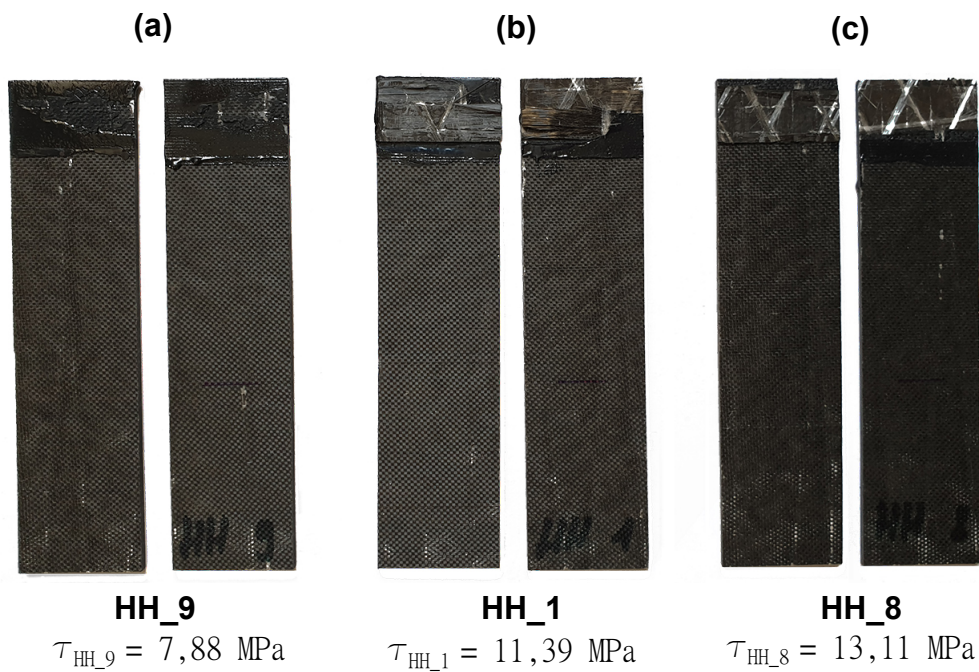
Na obrázku 31 jsou zobrazeny tři typy porušených vzorků, které byly pozorovány při experimentu. Vzorky se liší různými naměřenými silami při porušení.

První pozorovaný typ porušených vzorků je na obrázku 31a, tyto vzorky byly vyřazeny z vyhodnocení. U vzorku **HH_9** je vidět velká část neslepené plochy. Takovéto vzorky měli výrazně jinou směrnici křivky při zatěžování, z tohoto důvodu byly vyřazeny z vyhodnocení. Jako u všech ostatních vzorků i zde bylo pozorováno kohezivní porušení v adherendu, navíc bylo okrajově pozorováno kohezivní porušení v lepidle.

Druhý pozorovaný typ porušených vzorků je na obrázku 31b, u těchto vzorků bylo pozorováno neslepení vzorku na malé ploše. U vzorku **HH_1** byly naměřeny nižší hodnoty síly při porušení, z tohoto důvodu byl přezkoumán spoj. Jak je vidět na 31 (b) spoj nebyl slepen po celé ploše. Proto bylo nutné přepočítat smykovou pevnost na reálně zatěžovanou plochu. Přepočítání plochy bylo provedeno pouze na vzorku **HH_1**. Jinde nebylo možné pozorovat nenalepenou plochu bez odebrání odtrhlé vrstvy od části vzorku,

tento proces by znemožnil rozlišit nenalepenou plochu od kohezivního porušení v lepidle.

Třetí pozorovaný typ porušených vzorků je na obrázku 31c, tyto vzorky byly brány jako modelové příklady bez viditelných vad. Na vzorku **HH_8** bylo pozorováno kohezivní porušení v adherendu na obou částech vzorku.



Obrázek 31: Porušené vzorky

6 Závěr

Tato práce se zabývá vlivem struktury povrchu lepených kompozitů na jejich smykovou pevnost. Struktura povrchu byla ovlivněna technologií výroby. V první kapitole byla popsána teoretická část lepených spojů a teorie lepeného procesu.

V práci byl dále popsán způsob vyšetření kohezivních vlastností pro predikci porušení v MKP. Pro identifikaci bylo potřeba vyrobit zkušební vzorky, které byly pro svojí dostupnost vyrobeny z materiálu prepreg. Kohezivní vlastnosti byly zjištěny pomocí módů porušení, mód I a mód II. Pro mód I byly získány výsledky s variačním koeficientem 27%, pro mód II byly získány výsledky s variačním koeficientem 7%.

Dále byla stanovena smyková pevnost pro kombinace vzorků s různou strukturou povrchu. Pro vyšetření bylo nutno vyrobit zkušební vzorky v souladu s normami uvedených v kapitole. Vlastní experiment byl proveden jako tahová zkouška vzorků. Z této zkoušky byly vyhodnoceny maximální síly ze kterých byla následně vypočteny smykové pevnosti vzorků.

Z části experimentu nebyl zjištěn vliv mezi strukturou povrchu ovlivněnou technologií výroby a smykovou pevností. V experimentu byl pozorován vliv struktury na kohezivním porušení, které se dělo převážně na jedné struktuře. Dále nebylo zaznamenáno zvýšení adhezivní síly mezi lepidlem a adherendem. Adhezivní síly lepidla k adherendu byly ve všech případech vyšší než byly kohezivní síly v adherendu. Z toho důvodu došlo ke kohezivnímu porušení v adherendu.

Použitá literatura

- [1] *An Overview of the SCRIMTM Technology*. prezentace.
- [2] *ASTM - D5528, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*. Norma. 100 Barr Harbor Drive, Conshohocken, Spojené státy americké: ASTM International, 2007.
- [3] *ASTM - D7905, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites*. Norma. 100 Barr Harbor Drive, Conshohocken, Spojené státy americké: ASTM International, 2014.
- [4] Lukáš Bek. “Pokročilé spoje kompozitních komponent”. Dipl. Západočeská univerzita v Plzni, 2019.
- [5] Petr Bernardin. “Spojování kompozitních materiálu s kovem”. Dipl. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [6] *CSN EN 1465, Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. Standard. Praha, Česká Republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologie a státní zkušebnictví, říj. 2009.
- [7] Gottfried W. Ehrenstein. *Polymerní kompozitní materiály*. Scientia, 2009.
- [8] Miroslav Gregor. *Technologie a technika lepení - základní informace*. <https://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>.
- [9] Tomáš Havránek. “Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených spojů”. Dipl. Mendelova univerzita v Brně, 2017.
- [10] *Injektážní a infuzní technologie*. <https://polymer-composites.cz/injektazni-infuzni-technologie/>. Lis. 2017.
- [11] Tomáš Kalina, František Sedláček a Jan Krystek. “Determination of the influence of adherent surface on the adhesive bond strength”. Lis. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815705012>.
- [12] Zdeněk Kruliš. *Lepení polymerních materiálů*. prezentace. Ústav makromolekulární chemie AV ČR v.v.i., 2019.
- [13] Boleslav Lang. “Vliv teploty na pevnost lepeného spoje”. Dipl. Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [14] Ctirad Novotný. *Základní otázky lepení*. prezentace. 2019.

- [15] Ota Sigmund. “Výzkum matric pro prepreg a aplikace”. Dipl. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, květ. 2017.
- [16] VAP® – Components. <https://www.elbeflugzeugwerke.com/en/lightweight-structures/lightweight-technologies/vap-components/>.