

Studium adheze uhlíkových kompozitů z tkaniny KORDCARBON

Bc. Miroslav Šiška

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav Šiška**
Osobní číslo: **T12452**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Studium adheze uhlíkových kompozitů z tkaniny KORDCARBON**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování rešerše k dané problematice – kompozitní materiály, výztuž, matrice.
2. Adheze a její testování.
3. Výroba zkušebních těles z KORDCARBONU danou zpracovatelskou technologií – ruční laminování (pod vakuovací folií) a jinými technologiemi dle požadavku společnosti.
4. Experimentální testování – statické zkoušky, dynamické zkoušky, zkoušky adheze.
5. Vyhodnocení výsledků práce a stanovení doporučení pro praxi.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

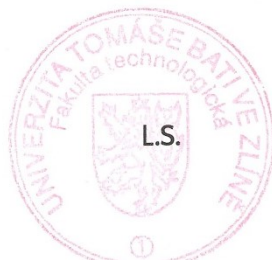
10. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: ŠIŠKA MIROSLAV

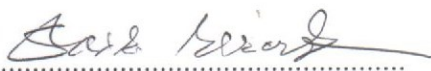
Obor: PI

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 1. 5. 2014

..... 

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

³¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³¹ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem adheze z uhlíkové tkaniny KORDCARBON a vybraných druhů epoxidových pryskyřic. Cílem práce je porovnat uhlíkovou tkaninu na kompatibilitu k více druhům pryskyřic a sledovat změny v mechanických vlastnostech jednotlivých kompozitů se zaměřením na adhezi tkanina-matrice.

Experiment je rozdělen do tří částí, odvíjejících se od mechanických druhů zkoušek.

V závěru jsou výsledky shrnuty a diskutovány s pohledem na další možné směry.

Klíčová slova:

Uhlíková vlákna, epoxidová pryskyřice, adheze, plátno, kepr

ABSTRACT

My thesis deals with the study of the adhesion of the fabric called KORDCARBON and other kinds of epoxy resin. The aim of the thesis is to compare the carbon woven fabric for the compatibility with other kinds of resins, and to observe the changes in the mechanical abilities of particular composites with the focus on the adhesion of fabric-matrix. The experiment is divided into the three parts of the framework according to the mechanical types of tests.

In the conclusion there are summarized the results of the experiment and discussed them from the point of view of other possibilities.

Keywords:

Carbon fiber, epoxy resin, adhesion, plain, twill

Rád bych na tomto místě poděkoval pracovníkům společnosti KORDÁRNA Plus a.s. za možnost práce, podporu, rady a obětavý přístup pro vypracování této studie. Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D., a Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné zkušenosti, obětavý přístup a důležité podněty při vypracovávání práce. Dále kolegovi Bc. Václavu Leciánovi, za spolupráci při tvorbě praktické části. V neposlední řadě patří velké díky mým rodičům za podporu a obětavost ve studiu a mé snoubence za trpělivost, duševní podporu, pomoc a pohodu při práci.

Motto:

Věda bez víry je chromá, víra bez vědy je slepá.

A. Einstein

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	12
1.1 KOMPOZITY Z UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	16
1.1.1 Výroba uhlíkového vlákna	16
1.1.2 Rozdělení vláknových výztuží	18
1.2 MATRICE	19
1.2.1 Epoxidové pryskyřice.....	21
2 MEZIFÁZE	23
2.1 ADHEZE V KOMPOZITECH	23
2.2 DRUHY ADHEZE.....	24
2.2.1 Mechanické zaklínění.....	25
2.2.2 Fyzikální adheze.....	25
2.2.3 Chemická adheze	27
2.3 MĚŘENÍ ADHEZE V KOMPOZITECH	28
2.3.1 Přímé měření adheze	28
2.3.2 Nepřímé měření adheze.....	29
2.3.3 Měření přímo na kompozitech	29
3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 POPIS A CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI	37
5 POPIS PROBLÉMU A POUŽITÉ MATERIÁLY	38
5.1 VLASTNOSTI TKANINY	39
5.1.1 Vazba plátno.....	39
5.1.2 Vazba kepr	39
5.2 VLASTNOSTI EPOXIDOVÝCH PRYSKYŘIC.....	39
5.3 DALŠÍ POMOCNÉ PŘÍPRAVKY	40
6 VÝROBA VZORKŮ A POPIS ZKUŠEBNÍCH STROJŮ	41
6.1 PŘÍPRAVA FORMY	41
6.2 PŘÍPRAVA TKANINY.....	41
6.3 PŘÍPRAVA EPOXIDOVÉHO SYSTÉMU.....	41
6.4 KLADENÍ VRSTEV TKANINY	42
6.5 ÚPRAVA LAMINÁTU NA VZORKY	42
6.6 APLIKOVANÉ NORMY	43
6.7 TECHNIKY MĚŘENÍ	44
6.8 MĚŘÍCÍ STROJE	44
6.8.1 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456	44
6.8.2 Zwick/Roell HIT50P	45
6.8.3 Zwick/Roell HIT230F – padostroj	46
7 VÝSLEDKY A DISKUSE	48

7.1	ZKOUŠKY PRO SOUDRUŽNOST TKANINA-MATRICE	49
7.1.1	Zkouška A1 – ČSN EN ISO 14 130.....	49
7.1.2	Zkouška A2 - ČSN EN ISO 14 129	49
7.1.3	Zkouška A3 - ČSN EN ISO 15 310	53
7.1.4	Zkouška A4 - ČSN 64 0662	54
7.2	ZKOUŠKY PRO STANOVENÍ CHOVÁNÍ PŘI DYNAMICKÉM NAMÁHÁNÍ	57
7.2.1	Zkouška D1 - ČSN EN ISO 8256	57
7.2.2	Zkouška D2 - ČSN EN ISO 6603-2	59
7.3	ZKOUŠKY PRO STANOVENÍ CHOVÁNÍ PŘI STATICKÉM NAMÁHÁNÍ	63
7.3.1	Zkouška S2 - ČSN EN ISO 14125	63
7.3.2	Zkouška S3 - ČSN EN ISO 604	67
7.4	PŘIBLIŽENÍ STRUKTURY POD MIKROSKOPEM	70
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá vlastností soudržnosti v kompozitních materiálech. Chci se orientovat na kompozitní materiály složené z uhlíkové tkaniny a matrice. Konkrétněji se zaměřím na epoxidové pryskyřice, které jsou jedním z druhů matric. Epoxidové pryskyřice jsou zvoleny z důvodu jejich kompatibility k uhlíkovému vláknu a jejich častému používání při výrobě.

Cílem této diplomové práce je zjistit/ověřit jaký vliv má změna epoxidové pryskyřice na výsledné vlastnosti kompozitu se zaměřením na soudržnost tkanina-matrice. Pro naplnění cíle jsem zvolil analýzu odborné literatury v teoretické části práce a empirický postup jako metodu kvantitativního výzkumu v části praktické.

Teoretická část práce se bude zabývat obecným popisem kompozitních materiálů. Zaměří se na výztuže z uhlíkových vláken, jejich výrobu a vlastnosti. Dále se budu soustředit na epoxidové pryskyřice a způsoby jejich adhezí. Další část práce se bude věnovat zpracovatelským technologiím pro výrobu kompozitních materiálů. Empirická část bude zaměřena na využití normalizovaných zkoušek dle platných evropských a českých norem ISO a ČSN. Jsou navrženy možnosti měření přes peel test, h-test, scratch test, pull out test, metodu krátkého nosníku a stanovení pevnosti ve smyku a v rovině.

Toto téma iniciovala společnost Kordárna Plus a.s. jako podpůrnou část jejich nově vzniklé výroby na tkaniny z uhlíkového vlákna. Jelikož kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny patří již delší dobu do mého okruhu zájmu, rozhodl jsem se využít této nabídky spolupráce. Tyto materiály byly v dřívější době využívány jen ve velmi specifických oblastech, avšak technologicky pokrok způsobuje jejich rozsáhlejší komerční dostupnost. Možnost poznat více jejich vlastností, schopností, oblastí využití a způsoby zpracování mě zaujala.

I. TEORETICKÁ ČÁST

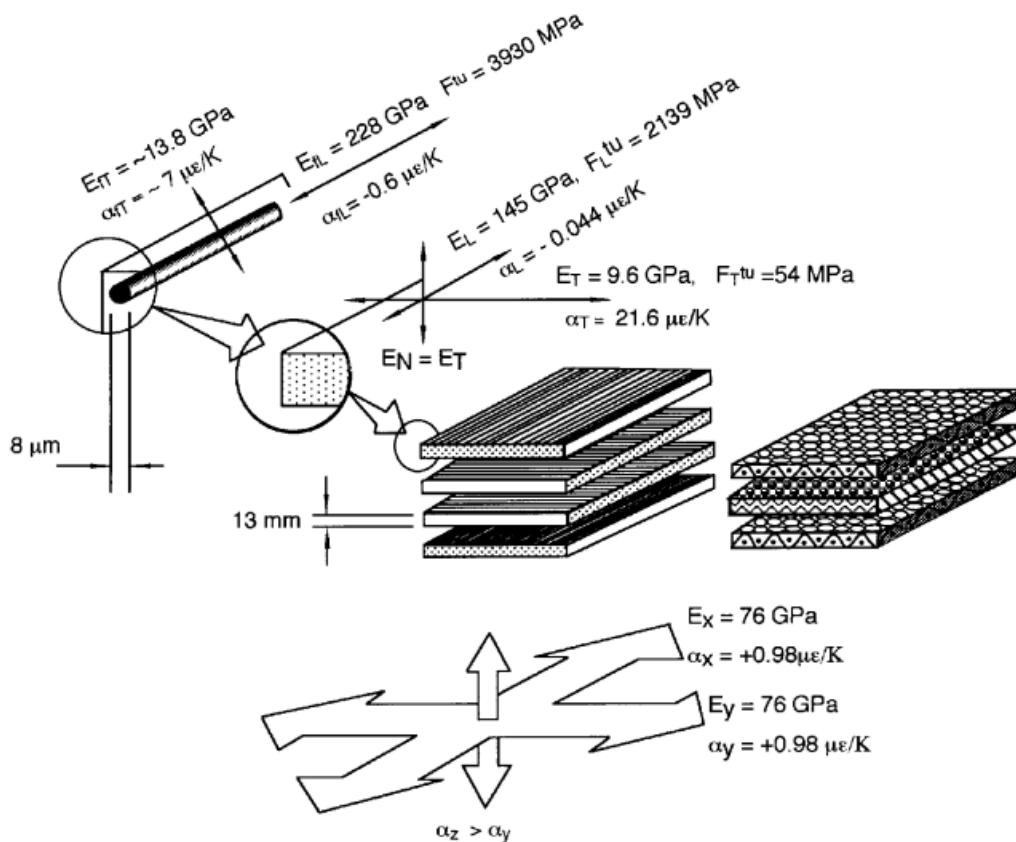
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity představují velmi rozsáhlou skupinu moderních konstrukčních materiálů. Za jejich vznikem stojí trvalá snaha získat materiál s takovou kombinací vlastností, které u materiálů konvenčních získat nelze. Z hlediska použití je můžeme rozdělit na materiály:

- S vysokou měrnou pevností a tuhostí.
- Žárupevné.
- Pro speciální účely. [1]

Obecně definujme kompozity jako heterogenní materiál tvořený kombinací minimálně dvou materiálů, které se výrazně liší svými vlastnostmi v makroměřítku, a jehož vlastností nedosahuje žádná složka kompozitu samostatně, tzv. synergický efekt. Každá složka může být fyzikálně určena a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní zvané mezifáze. [2]

Základní materiálovou složkou kompozitu je matrice, ve které je uložena výztuž-disperze. Tímto mechanickým mísením je způsobeno zvýšení především mechanických nebo fyzikálních parametrů kompozitu [9].



Obrázek 1 Schéma kompozitního laminátu. [10]

Na obrázku 1 je schematicky znázorněno rozložení kompozitního laminátu s výztuží z dlouhých uhlíkových vláken. Lze vidět rozdíl velikostí vlákna k vrstvě, základní vlast-

nosti vlákna, rozměry vrstev a orientace os souřadného systému naznačující ortotropní vlastnosti vrstvy. Toto je obecná struktura pro všechny vrstevnaté lamináty s vláknovou výztuží. Ještě než se práce blíže zaměří na stavbu kompozitů, níže je uveden význam slovních pojmů užívaných v oblasti kompozitů. [1,9]

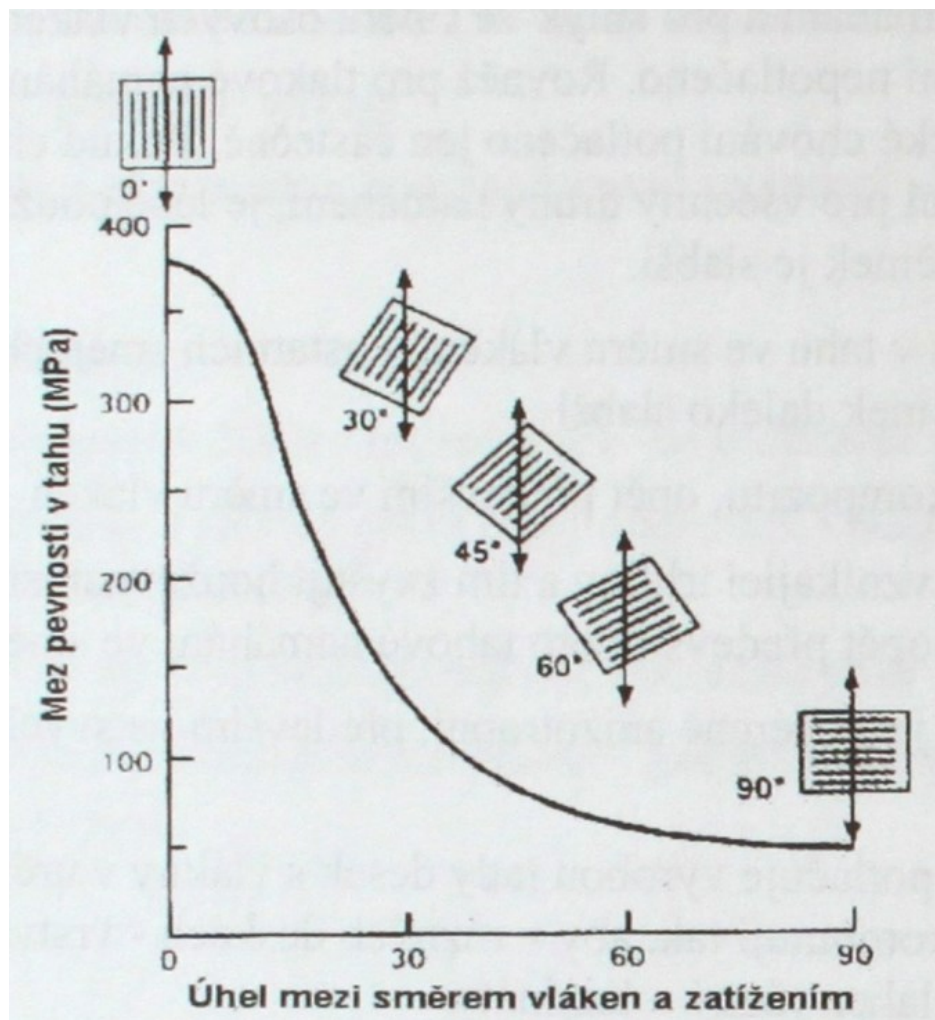
<i>adheze</i>	přilnavost dvou různých materiálů na jejich kontaktních plochách
<i>adsorbce</i>	proces, kdy tekutina vytváří vazby s pevnou látkou
<i>anizotropie</i>	závislost vlastností materiálu na směru zatížení
<i>delaminace</i>	místní rozdělení vrstev laminátu
<i>deplanace</i>	ztráta rovinnosti vrstvy laminátu
<i>disperze</i>	obecnější název pro blíže nespecifikovaný druh výztuže
<i>gelcoat</i>	vrchní vrstva laminátu jako estetický a ochranný povrch bez výztuže, často pigmentovaná část, kvalitnější než matrice
<i>izotropie</i>	nezávislost vlastností materiálu na směru zatížení
<i>koheze</i>	soudržnost molekul nebo iontů vlastního materiálu
<i>kohezivní energie</i>	energie potřebná k oddělení částic vlastního materiálu
<i>kompozit</i>	stavební prvek skládající se z určitého množství vláken a pojiva
<i>laminát</i>	označuje kompozit ve tvaru plošného prvku z jednotlivých rozlišitelných vrstev, který vzniká spojením více lamin nezávisle na stavu výroby nebo formě konstrukčního prvku
<i>lamino</i>	obsahuje jedinou vrstvu výztužné tkaniny v matrici, může vzniknout zesítním prepregu
<i>matrice</i>	materiál pro „ukládání“ vyztužujících vláken, jejímž úkolem je zaručení geometrického tvaru, zavedení a přenos sil, ochrana vláken
<i>membránová napjatost</i>	stav dvouosé napjatosti jedné vrstvy
<i>orientace</i>	směrování k určitému směru (u laminátu vzhledem ke směru vláken)

<i>ortotropie</i>	druh anizotropie vyznačující se třemi vzájemně kolmými rovinami symetrie
<i>pojivo</i>	látka nanášená na rohož, aby ji zpevnila a udržela vlákna v soudržném stavu
<i>porušení mezivláknové</i>	porušení probíhající mezi vlákny, které prochází celou tloušťkou jednosměrné vrstvy
<i>porušení vlákna</i>	porušení, při kterém se poruší velké množství elementárních vláken
<i>pramen</i>	je spojení asi 200 elementárních vláken bez kroucení
<i>prepreg</i>	částečně vytvrzená lisovací hmota (polotovar)
<i>příze</i>	kroucená nebo nekroucená vlákna určená k textilnímu zpracování
<i>smykové napětí adhezni</i>	smykové napětí mezi fázemi
<i>smykové napětí kohezní</i>	smykové napětí vlastního materiálu
<i>synergie</i>	zesilující účinek vlastností je větší, než je prostý součet vlastností jednotlivých složek
<i>rohož</i>	plošná výztuž skládající se z nekonečných nebo sekaných, nahodile orientovaných pramenců vláken spojených pojivem
<i>roving (pramenec)</i>	vzniká sdružením určitého počtu základních pramenů bez jejich kroucení
<i>tkanina</i>	skládá se ze vzájemně se křížících, propletených systémů vláken
<i>vlákno elementární</i>	nekonečné vlákno
<i>vrstva</i>	stavební prvek laminátu
<i>vrstva jednosměrná</i>	vrstva nebo lamino s jednosměrně orientovanými vlákny

Značnou výhodu kompozitní materiály přináší v situaci, kdy je vyžadováno specifických deformačních a pevnostních požadavků tělesa. Neboť vhodnou kombinací složek, se současným využitím vhodné odpovídající výrobní technologie, je možné vyrobit takto nehomogenní anizotropní materiálou strukturu. Oproti klasickým homogenním materiálům je možné zvyšovat zejména měrnou pevnost, tuhost, lomovou houževnatost, odolnost proti

korozi a dále. Nevýhodou pak zůstává komplikovanější výrobní technologie, omezená databáze konstrukčních dat, menší odolnost proti vysokým teplotám atd. Jedná se tak o vlastnosti, které každého vnímavého invenčního konstruktéra zaujmou. [11,12]

Z důvodu toho, že rozmanitost sortimentu kompozitních materiálů je veliká, rozdělují se tyto materiály podle tří kritérií, která se v praxi vzájemně kombinují. Jedná se o matici, disperzi dle tvaru a disperzi dle fáze. Matrice je spojitá složka, která určuje tvar a rozměr kompositu. Matrice může být polymerní, kovová či keramická. Disperzi tvoří fáze pevná, kapalná a plynná. Tvar disperze se z velké části podílí na anizotropii vlastností a dělí se na částicové (destičky, kuličky), vláknové (spojitá, dlouhá nebo krátká vlákna) nebo deskové tvary (obtížně se rozlišují). [2]

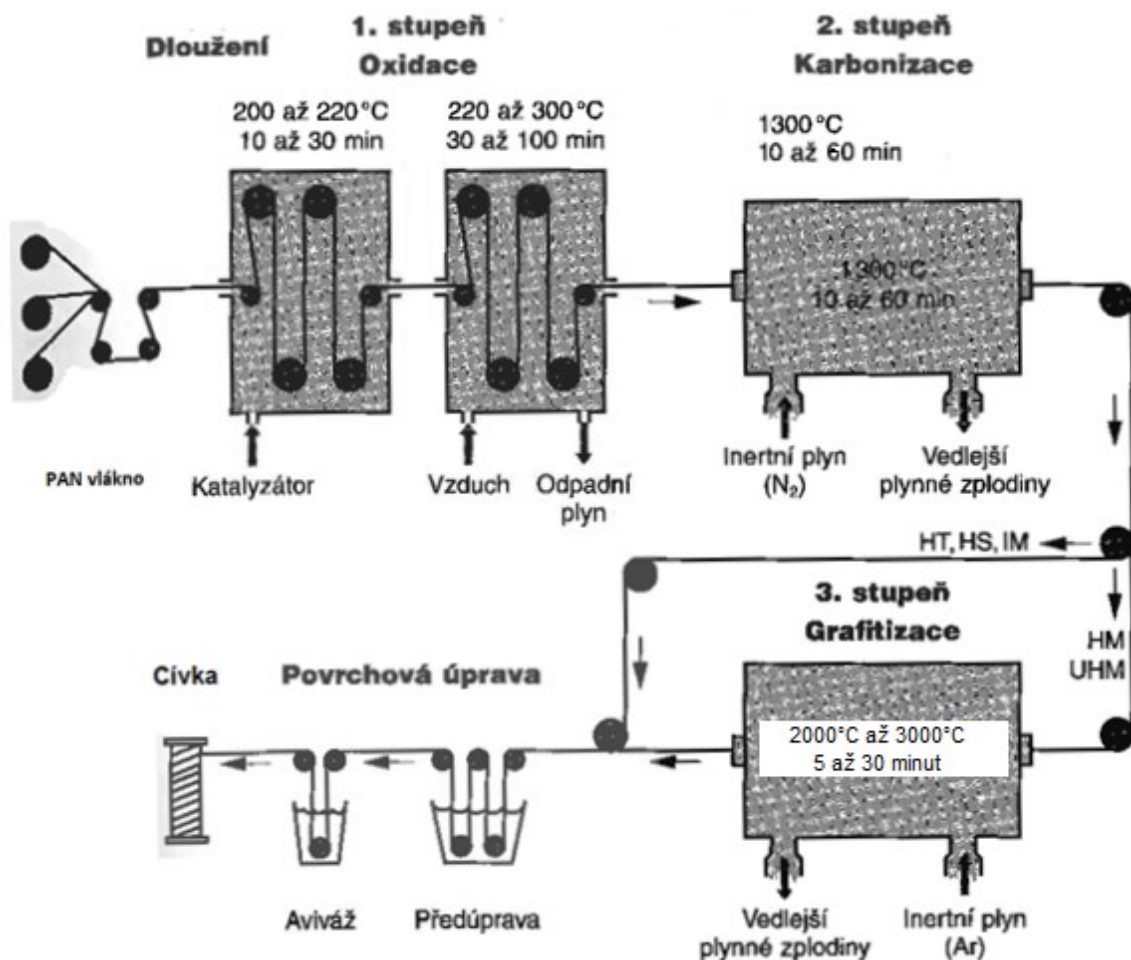


Obrázek 2 Příklad anizotropie pevnosti vláknového kompositu. [2]

1.1 Kompozity z uhlíkových vláken

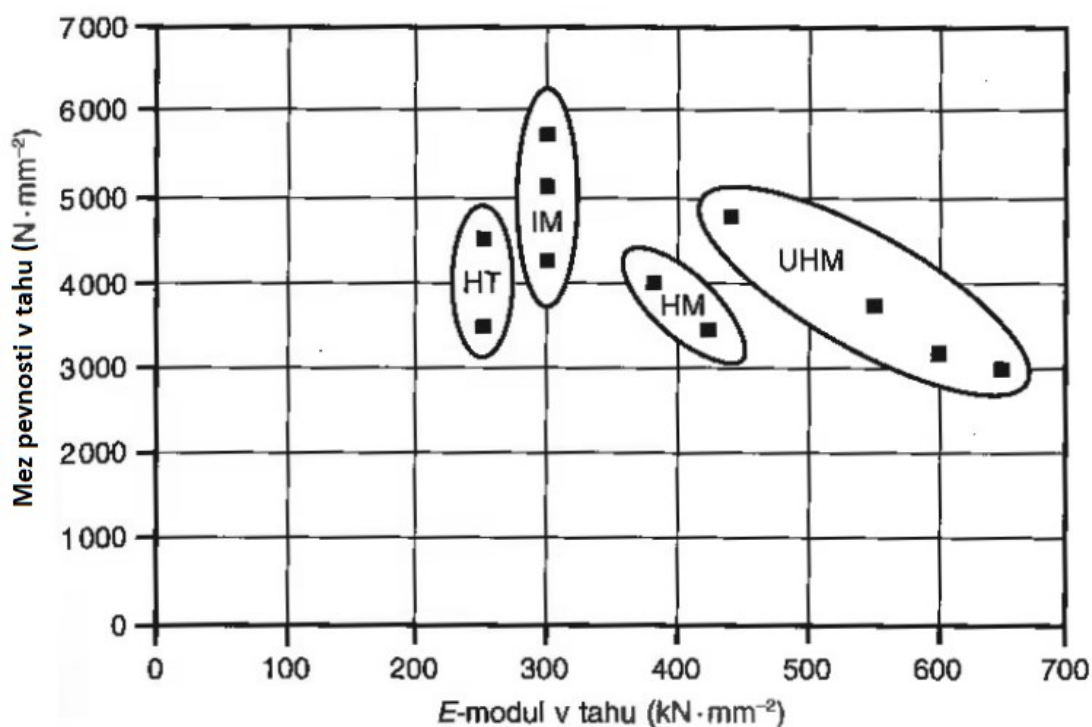
1.1.1 Výroba uhlíkového vlákna

Obecně je výroba kompozitních vláken řazena do pokročilejších výrobních technologií. Výchozí surovina se často diametrálně liší od hotového produktu. U výroby uhlíkových vláken tomu není jinak. Dnes nejčastější způsob výroby je skrze pyrolýzu vláken polyakrylonitrilu (PAN). Tato jsou po zahřátí protahována, aby došlo k požadované orientaci molekul. Následně je potřeba stabilizace karbonizací, která probíhá až 10 hodin v rozmezí 220-230°C. V dalším kroku se v inertní atmosféře při teplotách 1000-1500°C vlákna protahují a pokračuje se v karbonizaci. Tato vlákna se označují jako HS – vlákno (high strenght – vysoká pevnost). Při pokračování ohřevu nad 2500°C opět v inertní atmosféře, a navíc pod napětím, dochází při grafitizaci tvorby struktury podobné grafitu. Tato vlákna se označují jako HM – vlákno (high modulus – vysoký modul). Toto vlákno má menší pevnost, ale vyšší modul pružnosti. Výsledné vlákno má pak značně anizotropní materiálové charakteristiky. [12]



Obrázek 3 Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN. [1]

V současné době moderní výroba již umožňuje různou úpravu vláken podle požadavku zákazníka. A sice vlákna vysokomodulová grafitizovaná, vlákna dutá, vlákna s vysokým modulem pružnosti či nanovlákna.



HT – standardní, IM – středně-, HM – vysoko-, UHM – ultravysokomodulová

Obrázek 4 Rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě). [1]

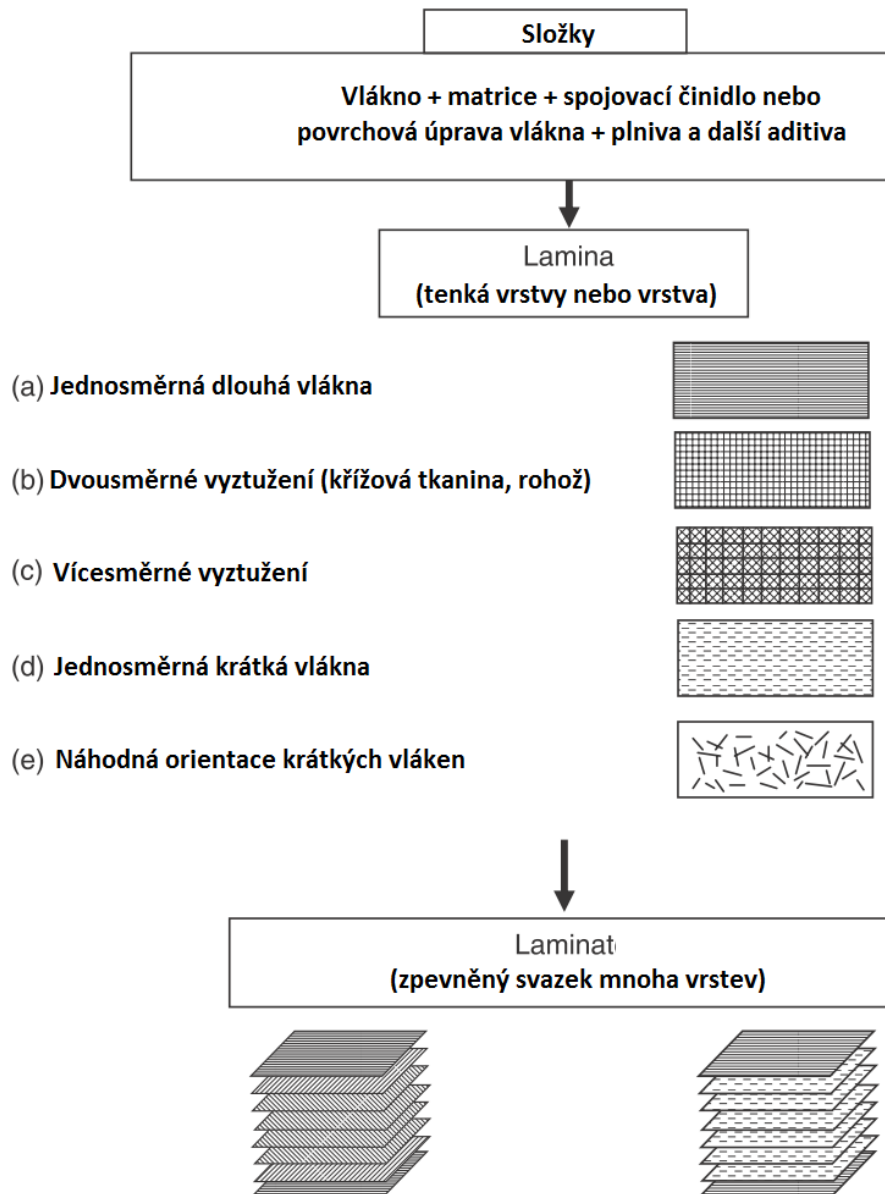
Vyrobené uhlíkové vlákna mají následující vlastnosti. Ve srovnání s vlákny syntetickými, mají uhlíková vlákna progresivní charakter se zvyšujícím se zatížením. Jsou vysoce odolné proti rozpouštědlům, také vysoce odolné proti dlouhodobému dynamickému namáhání, vhodné jako umělé klouby či neodráží radarový paprsek. Následující tabulka uvádí některé další specifické vlastnosti uhlíkových vláken při normální teplotě.

Tabulka 1 Vlastnosti uhlíkových vláken při normální teplotě. [1]

Vlastnost	Vysokomodulový grafit	Vysokopevnostní grafit	Ocel (pro porovnání)
Hustota ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1,90	1,90	7,80
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	390	240	210
Pevnost v tahu R_m [GPa]	2,1	2,5	0,34 – 2,1
Měrný modul E/ρ [$\text{MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3$]	205	126	27
Měrná pevnost R_m/ρ [$\text{MPa}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^3$]	1,1	1,3	0,04 – 0,27

1.1.2 Rozdělení vláknových výztuží

Následující obrázek znázorňuje rozdělení vláknových výztuží v kompozitní struktuře.



Obrázek 5 Charakteristické uspořádání laminátu. [5]

Vlákna vyrobená grafitizací se skládají do pramenců, které se navíjejí do rovingu na cívku. Cívky se poté umístí na tkalcovský stav, na kterém vzniká tkanina. Ta slouží následně k výrobě kompozitu, jenž byl použit v této práci.

Tkanina je plošný výrobek z vláken nebo pramenců uložených pravoúhle v útku a osnově, které působí výztužně ve dvou směrech. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají rozdílné typy křížení vláken, které se nazývají vazby. [1]

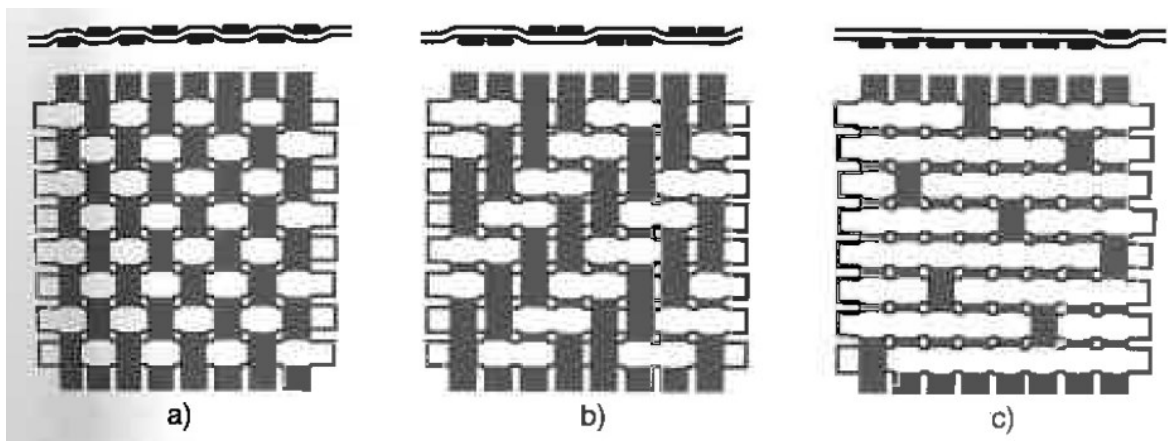
Úpravou vláken v útku a v osnově lze docílit rozdílných vlastností tkanin. Výhodou tkanin oproti jednosměrně orientované výztuži je její snadnější zpracování. [1]

Následující obrázek znázorňuje rozdělení vláknových kompozitů na schematickém pavouku z geometrického pohledu. [12]



Obrázek 6 Klasifikace vláknových kompozitů z geometrického pohledu. [12]

V praxi lze rozlišit tři základní druhy vazeb tkanin, a to vazba plátno - a), vazba kepr – b) a vazba atlasová (saténová) – c).



Obrázek 7 Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [1]

Jednou ze základních charakteristik tkaniny je kromě typu vazby současně gramáž. Ta udává hmotnost tkaniny na metr čtvereční.

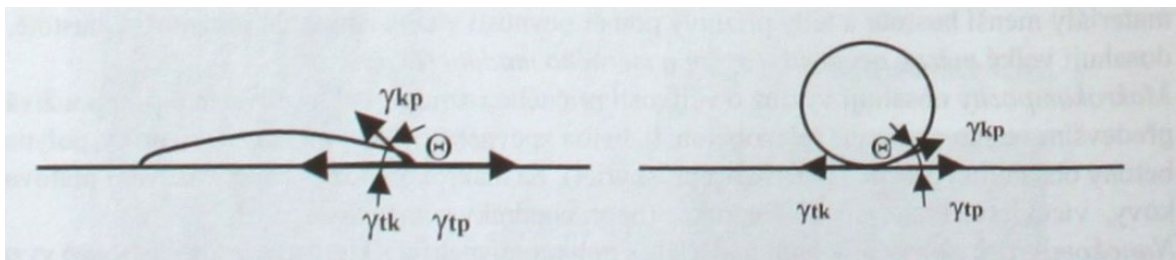
1.2 Matrice

Druhou a stejně důležitou složkou kompozitního systému je matrice. Zajišťuje celistvost kompozitního tělesa. Jejím cílem je na jedné straně perfektní spojení nosné části a na stra-

ně druhé vytvoření obecného vnějšího tvaru, který musí zajistit řádnou funkci tělesa. Důležitou podmínkou je dodržení slučitelnosti materiálových vlastností vláken a matrice pro dosažení optimálních vlastností celého kompozitu. Dalšími hlavními vlastnostmi matrice je zprostředkování zatížení vláken v místech vnějšího zatížení a v místech přerušení vláken. Dále pak mezi vlákny u krátkovláknových kompozitů, mezi vlákny nerovnoměrně zatíženými a také schopnost přemostit trhliny ve vláknech. [12]

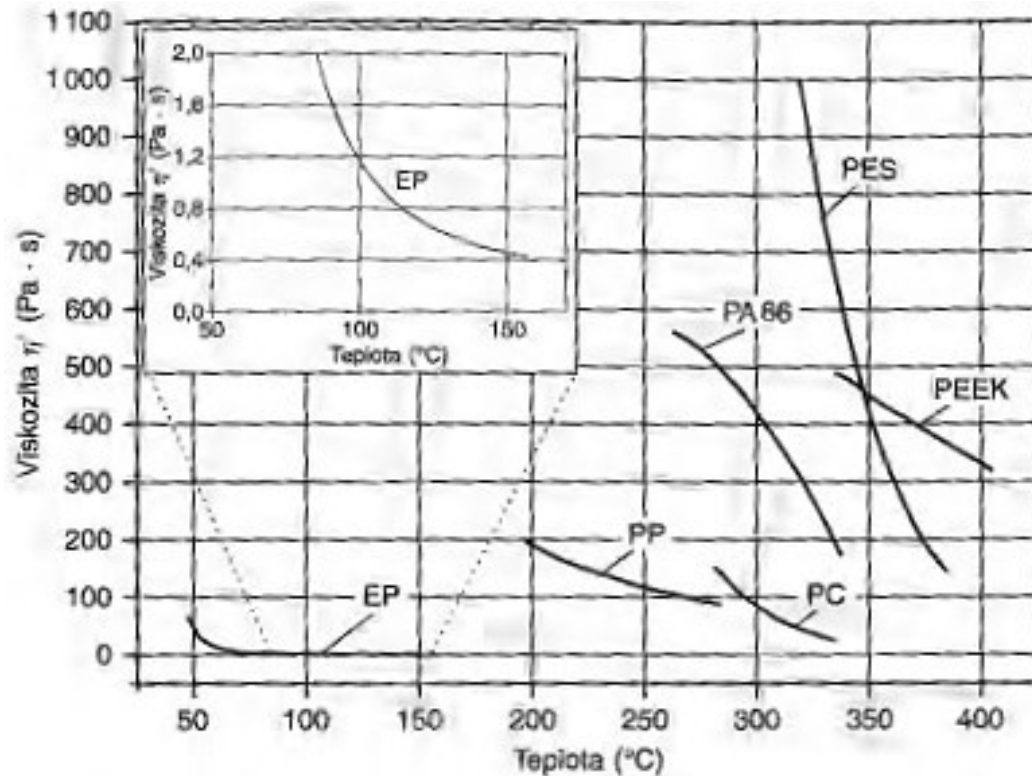
Obecným mechanickým požadavkem na matici je dobrá adheze k výztuži a dobrá mezní tažnost. [12] Zároveň poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší, než je mezní prodloužení výztuže. Tuto vlastnost však splňují pouze matrice kovové a polymerní. [3]

Matrice má za úkol dokonale obklopit výztuž. K tomu je nutné, aby měla co nejmenší povrchovou energii a ve své kapalně fázi dobře smáčela podklad – obrázek 6 vlevo.



Obrázek 8 Znárodnění povrchových energií a kontaktního úhlu. [3]

Dobré prosycení výztuže je zaručeno jen při malé viskozitě matrice, které lze mnohdy docílit využitím přetlaku. [3] Není-li prosycení výztuže dokonalé, výrazně klesají vlastnosti vyrobeného kompozitu. Pro lepší zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice-vlákno, se nanese na vlákno vhodná apretace pro určitý druh matrice. Aby bylo smočení úplné a bez bublin, musí mít matrice určitou viskozitu a povrchové napětí. U polymerních matric rozlišujeme reaktoplastické a termoplastické matrice. Reaktoplastické matrice lze dále rozdělit na polyesterové, epoxidové, vinylesterové, fenolické, metakrylátové a izokyanátové. Nejčastější využití mají nenasycené polyesterové nebo epoxidové pryskyřice, a to z důvodu nízké viskozity při normální teplotě. Z toho plyne snadnější zpracování, smáčení a lepší prosycení vlákna oproti termoplastickým pryskyřicím. Tyto reaktivní pryskyřice se dodávají jako dvousložkové systémy, které vytvrzují smícháním s tvrdidly. Tvrdidla jsou sloučeniny obsahující iniciátory a urychlovače. [1]



Obrázek 9 Viskozity polymerů při prosycování vyztužujících vláken.[1]

V následující tabulce jsou shrnuty základní mechanické vlastnosti typických, a u konstrukčních aplikací vláknových kompozitů převládajících, reaktoplastických matic.

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matic. [12]

	hustota	Modul pružnosti v tahu	Pevnost v tahu	Poměrné prodloužení
	$10^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	GPa	MPa	%
Epoxidová pryskyřice	1,1-1,4	2,1-6,0	35-90	1-10
Polyestery	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85	1-5
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60	1-3
Polyimidy (do 350°C)	1,2-1,9	3,0-3,1	80-190	2-40

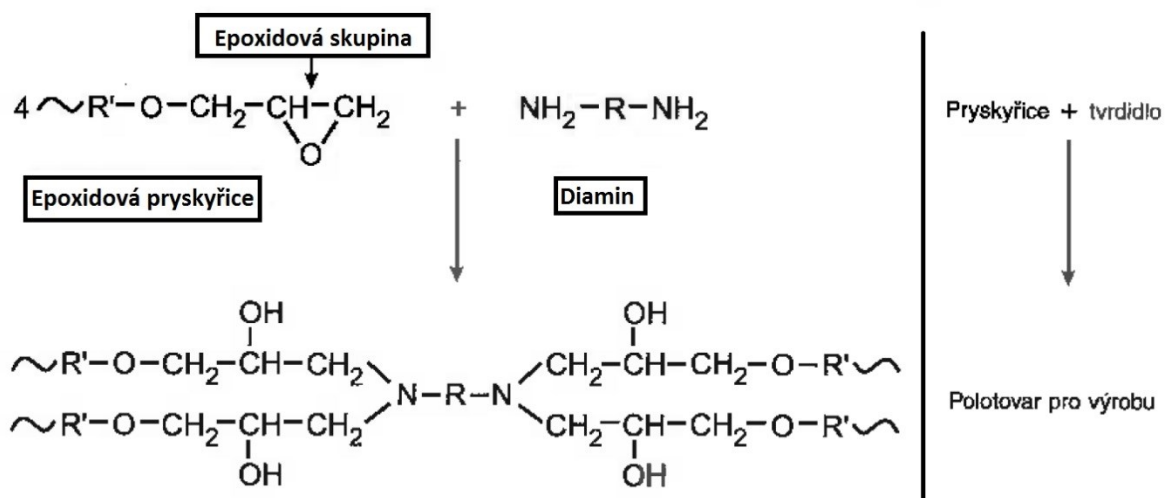
1.2.1 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se řadí do skupiny termosetů a již dlouhou dobu se používají jako polymerní matrice pro uhlíková vlákna. V průběhu jejich vytvrzování, obvykle v přítomnosti tepla a tlaku, termosetická pryskyřice postupně ztvrdne. Tento jev je způsoben polymerací, při které zesílují molekuly polymeru. Je to reakce, která nastává postupně. [4] A tento děj vytvrzení je nevratný. Výhodou těchto reaktoplastů je fakt, že i po zahřátí se nachází v tuhé fázi, která navyšuje jejich odolnost oproti creepu stejně jako vyšším teplo-

tám.[12] Doba potřebná k vytvrzení je udávána výrobcem, mění se podle druhu tvrdidla a je rozdílná pro různé technologické procesy. Lze však změnou urychlovače tuto dobu upravit. Po vytvrzení je možno výrobek odformovat a dokončit finálními úpravami. [4]

Po smíchání pryskyřice s tvrdidlem vznikne směs, u které se stanovuje tzv. gel time, což je čas potřebný pro ztuhnutí směsi do formy gelu. Po překročení tohoto času již začíná směs vytvrzovat.

Následující obrázek znázorňuje polyadiční reakci mezi epoxidovou pryskyřicí a diaminem jako tvrdidlo.

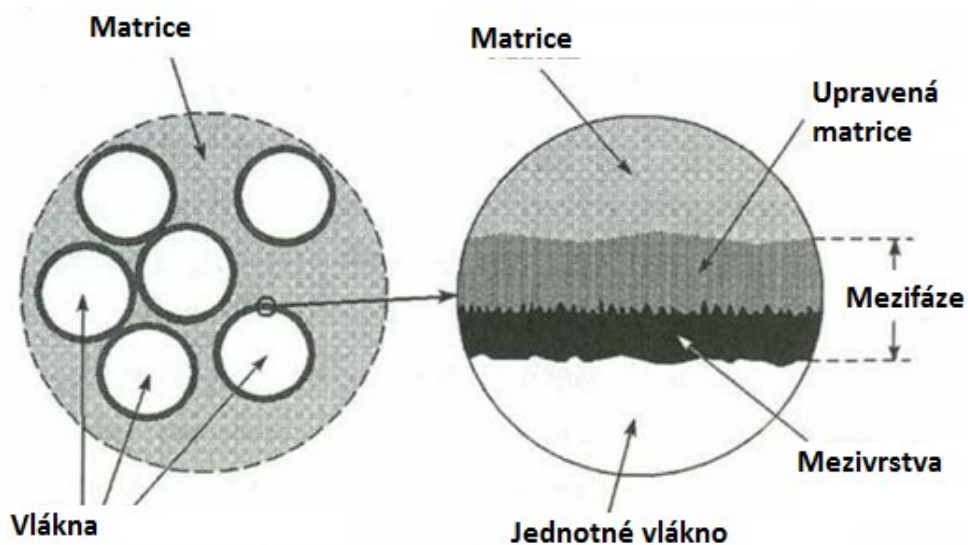


Obrázek 10 Chemická reakce v epoxidové pryskyřici. [4]

Epoxidové pryskyřice se pro své vlastnosti používají nejvíce pro pokročilé kompozity. Oproti polyesterovým pryskyřicím jsou pryskyřice epoxidové dražší a nemají vysokou teplotní schopnost. Existuje však řada výhod pro jejich použití, mezi něž patří například výborná přilnavost k vláknu, nevytváří vedlejší chemické procesy při vytvrzování, velmi malé smrštění při vytvrzování, vysoká odolnost vůči rozpouštědlům a chemikáliím, možnost variability pevnosti a pružnosti, odolnost proti tečení a únavě, dobré elektrické vlastnosti a možnost pryskyřice v pevném nebo tekutém nevytvrzeném stavu. Výhodou je i to, že jsou bez zápachu i během polymerace. Oproti tomu mezi jejich nevýhody patří absorpce vlhkosti, která může způsobit změnu fyzikálních vlastností či změnu rozměru, dále to, že jsou poněkud toxické, obtížně se kombinuje houževnatost s vysokou teplotní odolností, mají vysoký součinitel tepelné roztažnosti a mohou být citlivé na degradaci světlem UV zářením. [10]

2 MEZIFÁZE

Při detailním pohledu na kompozit lze rozlišit matici a disperzi jako základní složky kompozitu specifické svými vlastnostmi. Aby se docílilo kompaktního celku se synergickými vlastnostmi, je nutné tyto základní složky sloučit pomocí hraniční tenké vrstvy, která se nazývá mezifáze. Právě v této oblasti dochází k přenosu napětí mezi složkami a na její kvalitě závisí výsledné vlastnosti. Mezifáze tak zahrnuje mechanické vlastnosti matrice, vláken, mezifáze a adheze. [7]



Obrázek 11 Detailná pohled na oblast mezifáze. [7]

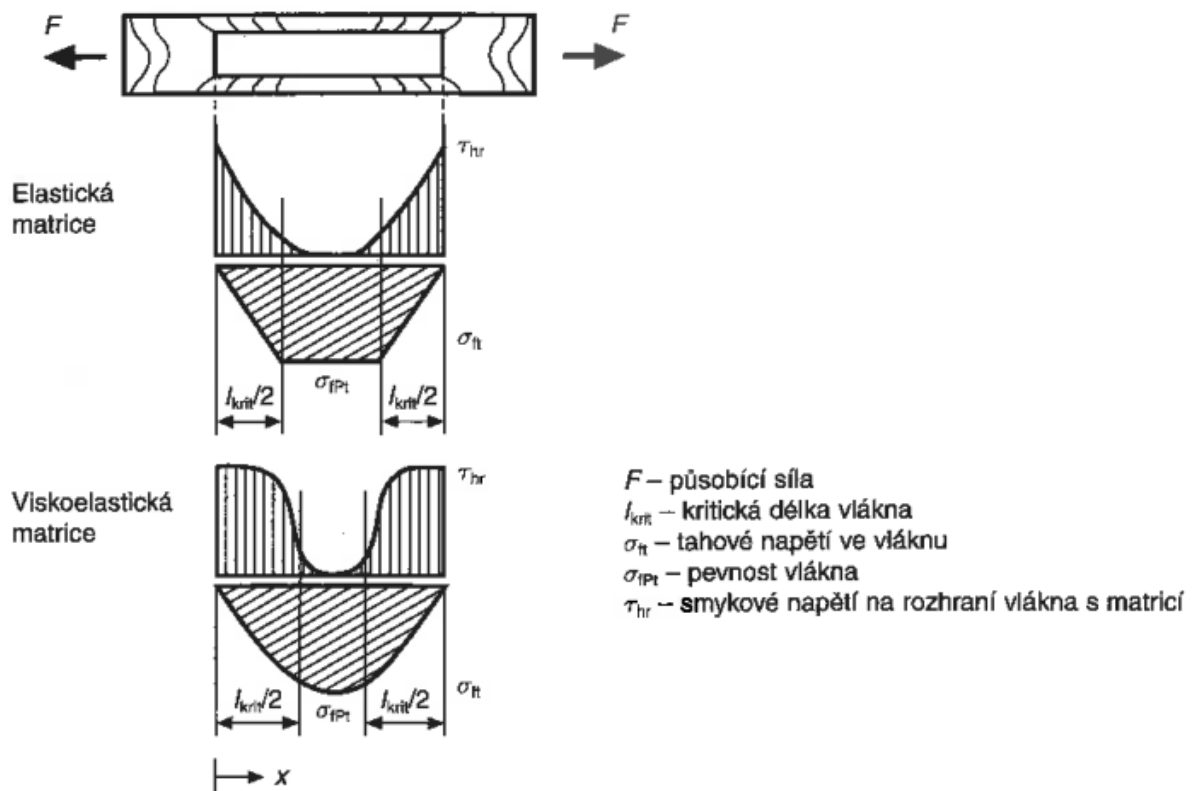
2.1 Adheze v kompozitech

Důvodem zaměření pozornosti na adhezi v kompozitech je skutečnost, že se přímo podílí na vlastnostech výsledného kompozitu. V adhezi se však skrývá soubor mechanismů. Těmi jsou adsorpce a smáčení, elektrostatická interakce, kovalentní vázání povrchu matrice s vlákny, reakční vazby a nevázané interakce. Důležitou roli hraje i morfologie vláken a vzájemné rozptýlení disperze v matici. Jednotlivé vrstvy vrstevnaté stěny však mají nejen odlišné hodnoty mechanických charakteristik, ale i velmi rozdílné hodnoty teplotní roztažnosti. Se změnou teploty si jednotlivé vrstvy vzájemně zabraňují ve vzniku svých teplotních dilatací. Je-li adheze slabá, mohou jednotlivé vrstvy volně dilatovat, a kompozit již v tuto chvíli neplní svou funkci. Znamená to, že pravděpodobně došlo k delaminaci vrstev a ztrátě stability kompozitní stěny. Kvalitní spojení na rozhraní vlákno-matrice je tedy bezpodmínečně nutné. [13]

Z uvedených důvodů vytvořil A. Puck pevnostní kritéria zaměřená na vyztužující účinky. Cílem vyztužení je nárůst pevnosti a tuhosti, jež se docílí právě umístěním výztuže do matrice. Avšak pouze při splnění následujících třech podmínek:

- Vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice.
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice.
- Matrice se nesmí porušit dříve než vlákno. [1]

Obrázek níže ukazuje přenos sil přes rozhraní matrice-vlákno, z kterého je vidět důležitost adhezních sil na rozhraní vrstev v kompozitu. Na průběhu napětí je vidět rozdíl při použití matric o různé elasticitě.



Obrázek 12 Znáornění přenosu zatížení z matrice do vlákna. [2]

2.2 Druhy adheze

Adheze se obecně rozděluje podle základních mechanismů, a to na mechanickou, fyzikální, chemickou, elektrostatickou a difúzní. V kompozitních systémech se největší měrou podílí tři druhy adheze, a to mechanická, fyzikální a chemická. Níže jsou tyto tři druhy více rozvedeny.

2.2.1 Mechanické zaklínění

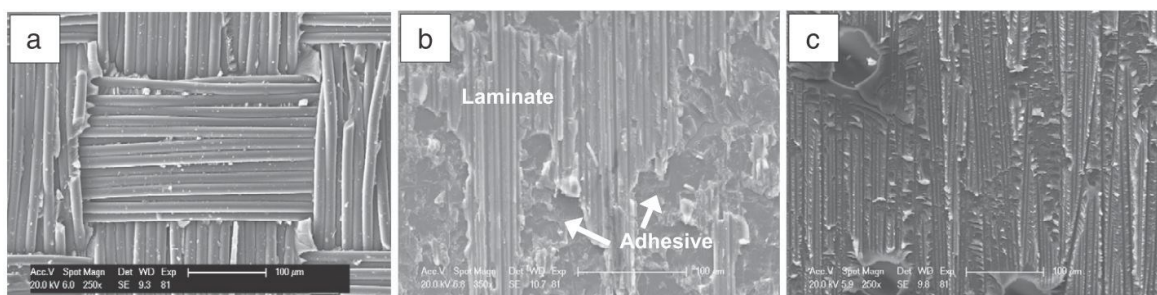
Neexistuje absolutně rovné těleso, a tedy i hraniční plocha mezi matricí a vláknem nebude nikdy dokonale rovná a vždy bude obsahovat různé výstupky a prohloubení. Názorně styčné plochy ukazuje obrázek níže.



Obrázek 13 Znárodnění styčných ploch rozhraní vlákno-matrice. [4]

Při zatížení smykem budou všechny vzájemně zaklíněné plochy bránit rozdílnému pohybu vlákna a matrice, jinak by muselo dojít k jejich ustřížení. Velikost zaklínění roste s drsností a s kvalitou vzájemné adheze. Dále se na rozhraní objevují síly třecí. Tyto mohou být dosti významné, protože rozdílné tuhosti jednotlivých složek následně vyvolají velké tlakové síly. Jestliže se v rámci tahových sil objevuje tendence vzniku mikro dutin, bude jim v kvalitní matrici bránit atmosférický tlak. K posouzení schopnosti zaklínění částice disperze, lze uvažovat koeficient podílu povrchu disperze a její konvexní obálky.

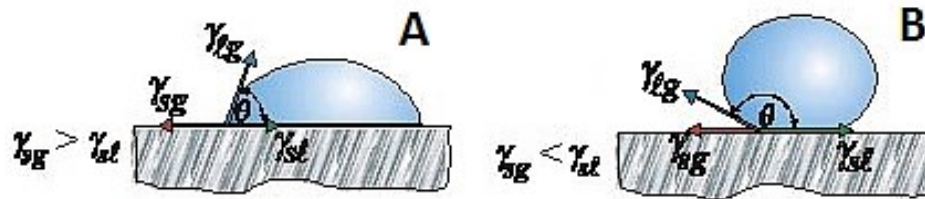
Na následujícím obrázku, který je převzat ze studie úpravy vláken mechanickým způsobem pro zvýšení adheze z důvodu lepení, můžeme pod detailem pozorovat, jaký vliv na výsledný povrch má odtrhová folie – a, opískování – b a úprava vláken plazmatem – c. [14]



Obrázek 14 Pohled na struktury uhlíkových vláken po mechanické úpravě. [14]

2.2.2 Fyzikální adheze

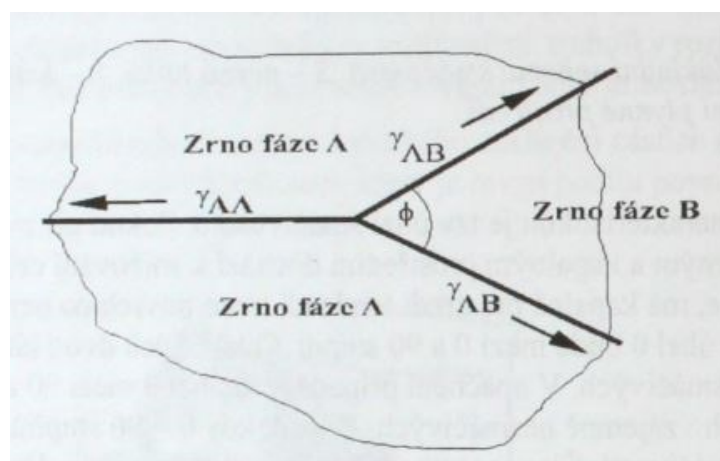
Tento druh adheze souvisí s Van der Waalsovou silou mezi disperzi a rozhraním. Tyto síly působící do vzdálenosti až 0,5 nm mají teoretickou pevnost až 7 GPa. Pokud se podaří dosáhnout horních hodnot pevnosti, lze tuto vazbu považovat za dostatečně pevnou a vhodnou pro rozhraní přijatelné v kompozitních systémech. Tato vazba přímo souvisí se smáčivostí matrice k disperzi. Viz obrázek 7, kde je znázorněno základní schéma smáčivosti.



Obrázek 15 Kapka smáčivé-A a nesmáčivé-B kapaliny na pevném povrchu. [2]

Úhel smáčivosti jednotlivých kapalin je zobrazen na obrázku 13 a charakterizuje, jak se kapka kapaliny rozestírá na pevném povrchu. S klesající hodnotou úhlu menší než 90° se hovoří o vzájemně smáčivých látkách, a takto až k ideální smáčivosti, která představuje stav, kdy kapalina vytvoří souvislou tenkou vrstvu na pevném podkladu. Dokonalá nesmáčivost je pak stav, kdy kapalina vytvoří na pevném povrchu tvar kuličky, která se dotýká povrchu v jednom bodě. Tento stav však platí pouze za předpokladu ideálně hladkého rozhraní. Nerovnosti zmíněné již v předchozí kapitole totiž mění úhel smáčivosti. Aby se došlo korekce přibližující stav k realitě, zavádí se faktor drsnosti. Ten je dán poměrem plochy skutečného povrchu k ploše ideálně hladké. Z toho plyne, že u látek smáčivých se adheze s drsností zlepšuje a naopak. [2]

Zaměřením se na tento stav uvnitř kompozitu lze zjistit, že při tuhnutí matrice již nehraje roli plynná fáze. Rovnováha napětí probíhá pouze mezi matricí a do ní vložených vláken. Lze si všimnout, že je-li úhel smáčivosti pod hodnotou 120° , má fáze tendenci zaplňovat póry. Překročí-li však úhel smáčivosti tuto hodnotu, matrice má naopak snahu zvětšovat póry na rozhraních. [2] Následující obrázek znázorňuje graficky tento popsany stav.



Obrázek 16 Rovnováha povrchových napětí unitř dvou fází v kompozitu. [2]

Z popsaného jevu lze tedy usuzovat, že smáčivost vláken a matrice je pro vyrobení kvalitního kompozitu jedním z hlavních předpokladů. Proto je nutné smáčivost jednotlivých slo-

žek vzájemně porovnávat. K tomuto ověření lze využít způsob znázorněný na obrázku 13. V krajním případě lze smáčivost vylepšit povrchovou úpravou vláken impregnací. [2]

Aby došlo k definování výše popsaného jevu, představme si následující pokus. Máme sadu kapalin, u kterých známe velikost povrchového napětí a plochu pevné látky, u níž zkoumáme povrchové napětí. Následně na tuto plochu nanese kapky jednotlivých kapalin a pozorujeme, zda existuje rozdíl ve smáčivosti mezi kapkami. Z následného experimentu vyplyne, že existuje takové povrchové napětí, které vytváří pomyslnou hranici rozdělující sadu kapalin na dvě části – na ty, které povrch smáčejí a ty, které povrch nesmáčejí. Z toho plyne tzv. kritické povrchové napětí, jež je možné definovat pro každou pevnou látku, a které udává, že všechny kapaliny s povrchovým napětím menším, nám zkoumanou látku smáčejí, a naopak, všechny kapaliny s povrchovým napětím větším nám tuto látku nesmáčejí.

Pro příklad je uvedena tabulka s hodnotami povrchového napětí běžných kapalin v normálních podmínkách a (přibližných) kritických povrchových napětí u pevných látek. [2]

Tabulka 3 Hodnoty povrchového napětí běžných kapalin a látek. [2]

Kapalina	Líh	Olej	Glycerin	Voda	Rtuť
Povrchové napětí γ (N/m)	20	33	64	73	480
Látka	Plast	Sklo	keramika	Kov	Org.látka
Kritické povrchové napětí γ_k (N/m)	20-30	80-100	100-1000	400-2000	500-5000

U kompozitních materiálů převládá použití vláken a tyto obecně mají velmi malou adhezi k matici. Proto se jak na uhlíkových, tak na skleněných vláknech, již ve výrobě upravuje povrchová vrstva pro zvýšení smáčivosti. [2]

2.2.3 Chemická adheze

Chemická adheze vznikající reakcí matrice a disperze může být v kompozitu velmi pozitivním jevem. Tyto vazební síly působící do vzdálenosti až 0,3 nm, mohou totiž dosáhnout teoretické pevnosti až 70 GPa. Lze je uplatnit za předpokladu, že se matrice s disperzí navzájem prolínají. Na rozhraní se přitom vytvoří mezivrstva, jejíž adheze je silná. Dalším předpokladem je stav, kdy se rozhraní vytvoří z chemické sloučeniny vzniklé z reakce matrice a disperze. I přes výhodné vlastnosti této mezivrstvy existují záporné vlivy nepříznivě ovlivňující kompozit. Těmito vlivy může být na jedné straně stav, kdy difúze mezivrstvy

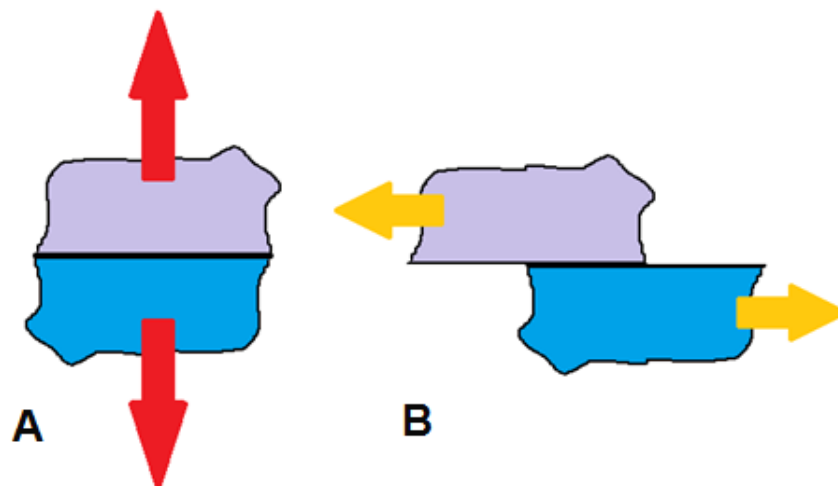
způsobí křehkost s malou pevností, přičemž právě v této vrstvě se začne přednostně šířit porucha. Na straně druhé může vlivem silné difúze nastat poškození větší plochy vlákna, která naopak sníží pevnost tohoto vlákna. Proti tomuto jevu se vláknové kompozity určené do vysokých teplot opatřují difúzní bariérou.

2.3 Měření adheze v kompozitech

Z předchozího uvedeného popisu druhu adhezí lze sledovat závislost kvality finálního kompozitu na kvalitě adheze vytvořené mechanismy při výrobě. Avšak spojitost těchto adhezních sil k příslušným složkám v kompozitu je velmi náročná k reálnému stanovení a kvantifikovatelnému vyhodnocení. Prakticky lze říct, že pro stanovení vlastností rozhraní je třeba určit kritické tečné i normálové napětí v rozhraní, v němž dojde k poruše. Toto však je velmi náročné na změření a následné vyhodnocení. K bližšímu stanovení se rozdělují měřicí metody na přímé měření adheze, nepřímé měření adheze a na měření přímo na kompozitech.

2.3.1 Přímé měření adheze

K tomu, aby bylo možné změřit adhezní napětí pomocí statických zatěžovacích zkoušek, by bylo nutné vyrobit rozhraní rovinné a toto rozhraní zatěžovat tahem v rovině příčné pro stanovení normálového napětí (obrázek 17 A) a v rovině podélné pro stanovení napětí smykového neboli tečného (obrázek 17 B). Toto tečné adhezní napětí však lze také změřit pomocí zatížení tzv. trojbodovým ohybem, kde se toto smykové napětí vytvoří v neutrální rovině ohybu a při překročení jeho kritické hodnoty se laminát poruší delaminací.[7]



Obrázek 17 Znárodnění měření normálového-A a tečného-B adhezního napětí. [1]

2.3.2 Nepřímé měření adheze

V těchto měřeních se nestanovuje přímá hodnota velikosti adheze, ale jen se pomocí srovnávacích metod vyhodnocuje kvalita adheze na rozhraní. [2] Tyto zkoušky jsou však příliš obecné a s jejich výsledky je tak třeba nakládat velmi obezřetně. Proto je pro ilustraci vybráno z velkého množství těchto zkoušek následujících dvou.

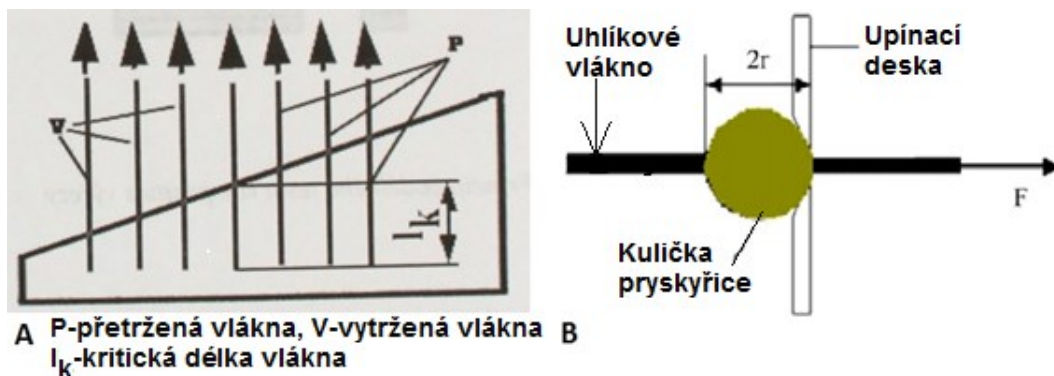
Prvním z nich je Peel test, neboli metoda měření síly odlupu. U této zkoušky je nutné dodržet konstantní poloměr ohybu v průběhu celého měření. U tuhých vzorků se využívá kloubových systémů, u měkkých materiálů se při měření použije speciálního přípravku. Velikost síly potřebné k odloupení v jednotkové délce hranice, je měřítkem adheze. [2]

Druhou zkouškou k měření adheze je možno použít Scratch test. Využívá se v něm geometrie Rockwellova hrotu k vytvoření vrypu do matrice. Test je ukončen ve chvíli, kdy síla působící na hrot utrhne celou vrstvu od podložky. Měření je však nevhodné pro měkké matrice. [2]

2.3.3 Měření přímo na kompozitech

V těchto měřeních dochází k vyvozování takových napěťových stavů, které již mají vypočítatelnou hodnotu o velikosti adheze, i když přímé určení těchto napětí je reálné jen při velkém zjednodušení. Důvodem je to, že jde o měření přímo na reálných kompozitech. [2]

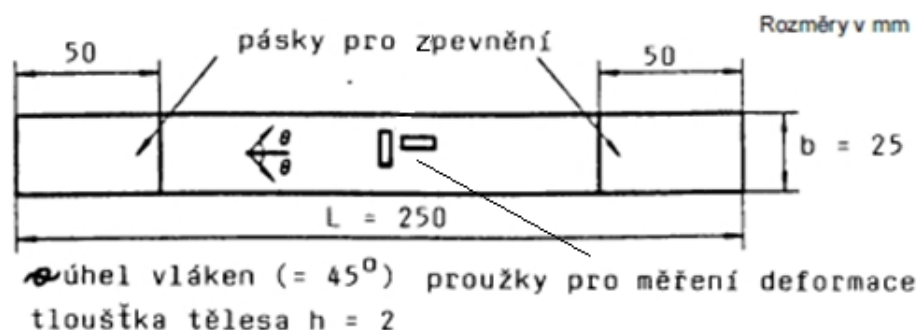
Jednou ze základních zkoušek u vláknových kompozitů jsou tzv. Pull-out testy neboli testy na vytrhnutí vlákna z polymerní matrice. Zkouška podle způsobu provedení umožňuje buď hledání kritické délky vlákna – obrázek 17 A, anebo ji lze zaměřit na stanovení soudržnosti vlákno-matrice – obrázek 17 B. Důležitým měřítkem v těchto typech zkoušky je charakter porušení vláken. [7]



Obrázek 18 Schéma vytrhávacích zkoušek. [2,16]

Následující část textu se zaměřuje na experimentální měření, která jsou realizována v praktické části této práce. Jedná se taktéž o zkoušky měření adheze provedené přímo na kompozitech. Jelikož je tato diplomová práce koncipována pro využití na trhu, spadají následující čtyři zkoušky do sekce mezinárodních norem ISO nebo pod Český normalizační institut. Těmi jsou Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení smykové pevnosti v rovině, Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami, Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky a Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku. Všechny zmíněné zkoušky lze realizovat na trhačím stroji, který odpovídá normě ISO 5893.

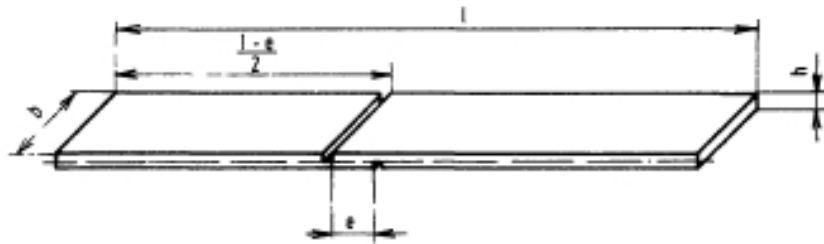
První zmíněnou zkouškou je Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení smykové pevnosti v rovině – ČSN EN ISO 14 129. Lze také dále stanovit křivku smykového napětí v rovině, křivku smykové deformace a smykový modul. Měří se tělesa ze stejnosměrných vrstev s vlákny orientovanými pod úhlem $\pm 45^\circ$ k ose tělesa, za předpokladu, že struktura laminátu je k této ose symetrická a vyvážená. Zkušební těleso o délce 250 mm, šířce 25 mm a o doporučené tloušťce 2 mm, kterou je možné podle potřeby upravit. Takto vyrobený vzorek se zatěžuje tahovou silou v ose tělesa. V první části zkoušky se měří deformace ve směru rovnoběžném i kolmém k ose tělesa, až do 0,05 MPa smykové deformace. Z těchto hodnot deformací se stanoví křivky smykového napětí v rovině, křivky smykové deformace a smykový modul. V druhé části roste hodnota napětí až k porušení tělesa pro vyhodnocení maximální smykové pevnosti v rovině. Norma požaduje minimálně pět zkušebních těles v každém směru. Při této zkoušce těleso v měřené oblasti nepodléhá čistému smyku, protože na něj současně působí kolmé napěťové složky a dochází i k deplanaci. Tyto napěťové složky obecně snižují konečné hodnoty napětí a deformace pod skutečnou hodnotu odolnosti materiálu. [19]



Obrázek 19 Zkušební těleso pro ČSN EN ISO 1429. [19]

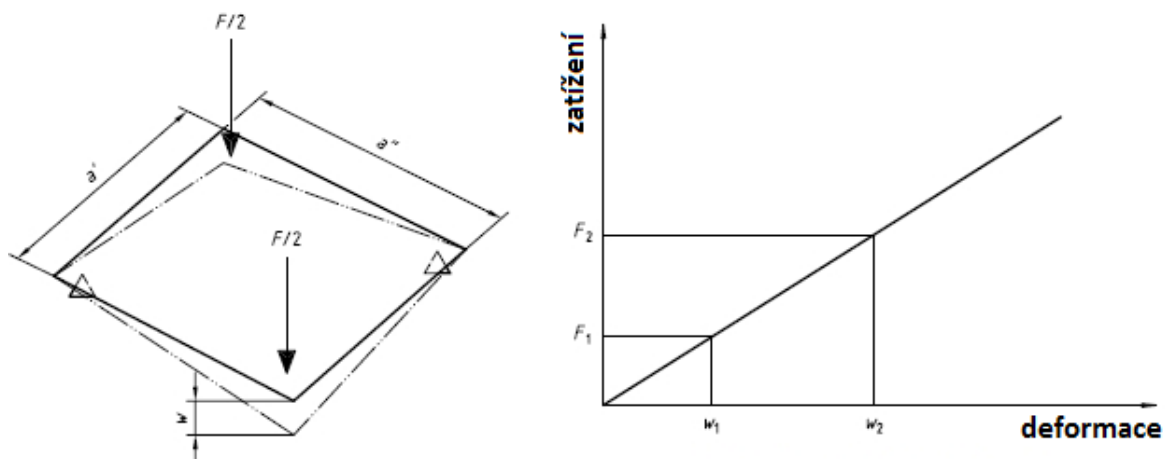
Další zkouška, nazvaná Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů, je platnou normou ČSN 64 0662. Výsledná hodnota napětí v MPa je mezní smykové napětí,

při kterém dojde k porušení zkušební tělesa. Předpokladem je, že smykové napětí je ve smykové ploše rovnoměrně rozloženo. Na zkušebním tělese o délce 205 mm, s šířkou 25 mm a tloušťkou minimálně 3 mm jsou vytvořeny zářezy do poloviny tloušťky o rozteči 12,5 mm. Doporučuje se, aby laminátové desky obsahovaly sudý počet vrstev výztuže. Takto upravené těleso je zatěžováno tahovou silou, až nastane smykové porušení mezi vrstvami výztuže. Ze zjištěné tahové síly se vypočítá pevnost ve smyku mezi vrstvami. Minimální počet zkušebních těles je pět, ve dvou směrech navzájem kolmých. [20]



Obrázek 20 Zkušební těleso pro ČSN 64 0662. [20]

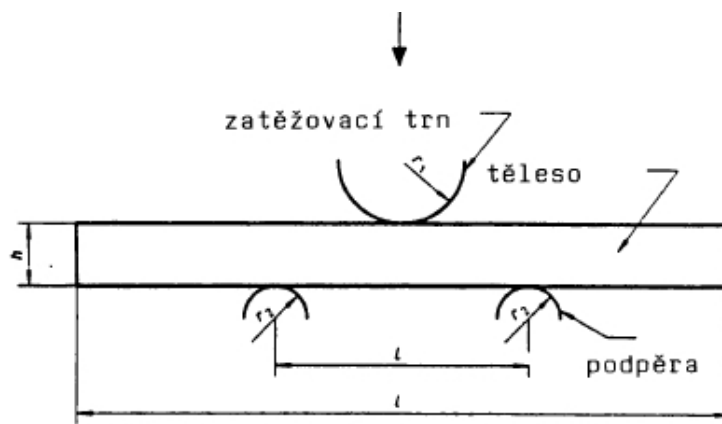
Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky ČSN EN ISO 15310 je třetí zmíněnou zkouškou. Při této zkoušce nedochází k poškození zkušební tělesa. Těleso, ve tvaru čtvercové desky o délce strany 150 mm a tloušťce 2 mm, pro jednosměrná dlouhá vlákna, či tloušťce 4 mm pro zbylé druhy výztuží, je lineárně zatěžováno do poloviny své tloušťky ve dvou protilehlých krajních bodech radiální silou a na zbylých dvou protilehlých krajních bodech je podepřeno. Z takto získané lineární charakteristiky se stanoví smykový modul pružnosti v GPa. [21]



Obrázek 21 Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310. [21]

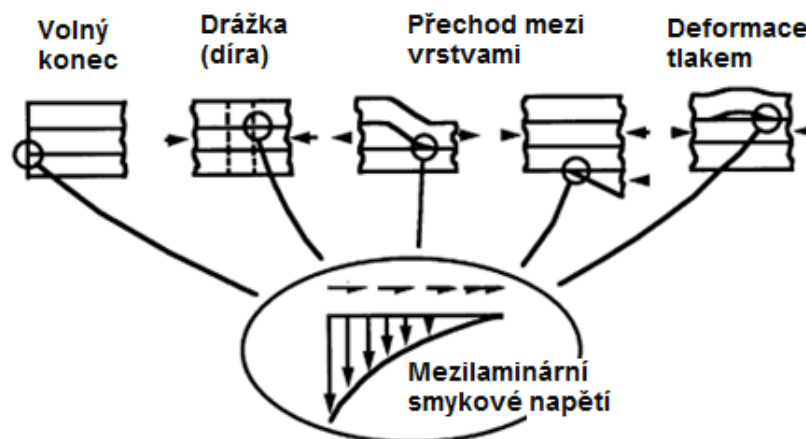
Poslední zkouškou je Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130. Podstatou této zkoušky je zatížení tělesa ve tvaru pravoúhlého hranolu ohybovým zatížením tak, aby došlo ke smykovému mezilaminárnímu

porušení. Těleso uvažujeme jako jednoduchý nosník na dvou podpěrách, zatěžovaný zatěžovacím trnem umístěným uprostřed podpěr. Mezilaminární smykové porušení má být vyvoláno nárůstem poměru mezi smykovým a ohybovým napětím. Ostatní typy porušení nejsou přípustné. Takto získaný výsledek však není absolutní hodnotou, proto se používá termín zdánlivá. Hodnota se vyjadřuje v MPa. Délka a tloušťka tělesa je v poměru 1:10, šířka tělesa je poměrem k tloušťce 1:5, přičemž minimální tloušťka je 2 mm. Tloušťka se případně upravuje, aby došlo k porušení vodorovným smykem. Zkouška vyžaduje minimálně pět zkušebních těles. Doporučená hodnota pro vzdálenost podpěr je pětinašobkem tloušťky tělesa. V nutných případech ji však lze zmenšit. Zatížení tělesa musí být rovnoměrné ve směru rovnoběžném s podpěrami. [22]



Obrázek 22 Znárodnění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130. [22]

Poslední obrázek této kapitoly ukazuje na místa vzniku napěťových špiček mezilaminárního smykového napětí. Na tyto místa je nutné brát zřetel při navrhování výroby.



Obrázek 23 Místa vzniku mezilaminárního smykového napětí. [6]

3 ZPRACOVATELSKÉ TECHNOLOGIE KOMPOZITŮ

Postup výroby z reaktivních pryskyřic a vláken na vytvoření výrobku, se skládá z namíchání matrice, dále prosycení vyztužujících vláken a vytvoření konečného tvaru, ve kterém musí proběhnout vytvrzení celého systému. Technologie zpracování se dělí podle druhu pracovního postupu (manuální, automatizovaný, kontinuální a jiné) a podle způsobu výroby (ruční kladení, vakuová infuze). [1]

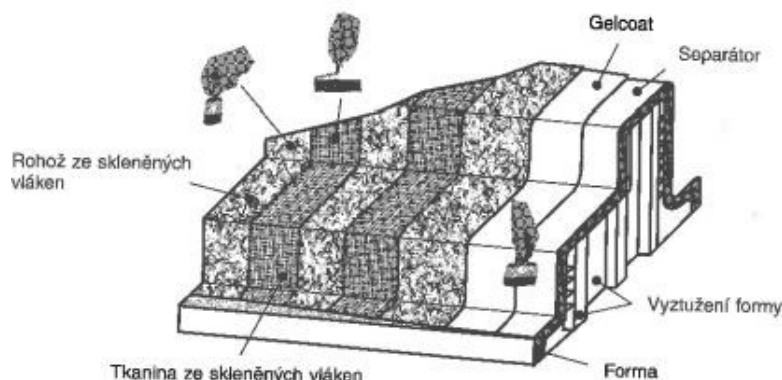
Podle zvoleného druhu materiálu matrice nebo podle druhu výrobku, se odvíjí výrobní technologie. V následující tabulce jsou přehledně shrnuty jednotlivé výrobní technologie. [12]

Tabulka 4 Výrobní technologie kompozitů. [12]

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno, organická matrice	Dlouhé vlákno, kovová matrice	Krátké vlákno
Ruční laminování	X		X
Vakuová infuze	X		X
Lisování v přípravku	X	X	X
Navíjení	X	X	
Válcování tlakem		X	
Nastříkávání			X
Přenos kapalné matrice	X	X	X
Vytlačování		X	X
Tváření tlakem	X	X	
Vstříkávání			X
Prášková metalurgie			X

Technologie ručního laminování patří mezi nejjednodušší a je omezena na kompozity s maticí z polymerních materiálů. Využívají se při ní dva druhy techniky. První tradiční technikou je tzv. mokré kladení, kdy je vlákno prosycováno tekutou maticí přímo ve formě. K nanášení se používá štětec, váleček, stříkací pistole či jiné. Přípravky pro výrobu jsou jednoduché a levné. Nevýhodou je poměrná homogenita struktury a náročnost práce na mzdové prostředky. Druhou a modernější technikou výroby je využití předimpregnova-

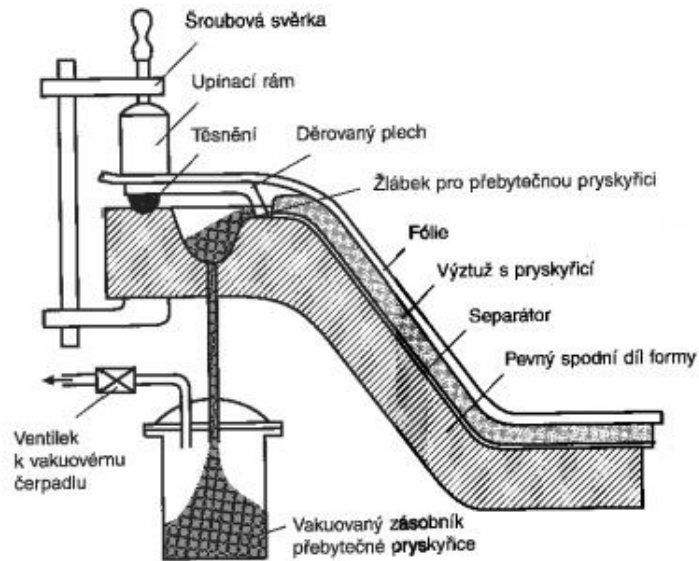
ného jednosměrného vlákna tekutou matricí, včetně tvrdidla již od dodavatele. Tato technologie se nazývá prepreg. K vytvrzení kompozitu pak dochází za zvýšené teploty v autoklávu, mnohdy i s využitím tlaku. [1,12]



Obrázek 24 Schéma ručního kladení. [1]

Aby se dosáhlo vyšší homogenity, byly vyvinuty technologie využívající nízkého tlaku (lisování pomocí vakuového vaku, vakuovaná dvoudílná pevná forma, tlakový vak, lisování v autoklávu a injektážní prosycování výztuže), jelikož se vzduchové bubliny negativně projeví jako mikrovruby snižující mechanické vlastnosti laminátu. [1]

Jedna z nenáročných, a přesto velmi efektivních výrobních technologií je metoda lisování pomocí vakuového vaku (též vakuová infuze). Princip technologie je znázorněn na obrázku. Oproti ručnímu kladení je při výrobě navíc využita porézní separační fólie, kterou se laminát přikryje. Na tuto separační fólii se položí hrubá odsávací tkanina a celá forma se utěsní pomocí fólie a těsnění. Následně se celý systém připojí na podtlakové zařízení. Podle velikosti formy se stanoví čas nutný ke kontrole udržení podtlaku. Po kontrole těsnosti systému se k formě z jedné strany připojí zásobník s pryskyřicí a z druhé strany je opět připojeno podtlakové zařízení. Následně je pryskyřice vtahována a protéká přes tkaninu. Jakmile se pryskyřice dostane do krajních žlábků, vypne se podtlaková pumpa. Atmosférický tlak způsobuje zhuštění materiálu, a v tomto stavu probíhá následné vytvrzení pryskyřice.



Obrázek 25 Schéma vakuové infuze. [1]

Přestože výroba kompozitů je ve své podstatě jednoduchá, dochází i na poli výrobních technologií k výrazným inovacím za účelem zvýšení produktivity, kvality a jakosti finálních výrobků se současným snížením jejich ceny. Často se proto jednotlivé technologie navzájem prolínají a jejich jednoznačné kategorizování je obtížné.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 POPIS A CÍL PRAKTICKÉ ČÁSTI

Cílem této diplomové práce v praktické části je sledovat vliv komerčně dostupných epoxidových pryskyřic na vlastnosti laminátu s uhlíkovou výztuží se zaměřením na soudržnost tkaniny a matrice pomocí experimentálních měření. K porovnání slouží 4 druhy epoxidových pryskyřic, z nichž byly postupně vyrobeny vzorky pro jednotlivá experimentální měření. Všechny vzorky měřené v této práci byly vyrobeny z tkaniny, kterou dodala společnost Kordárna Plus a.s.

Stanovené cíle:

- Návrh a výroba zkušebních vzorků ručním kladením dle ČSN EN 2374.
- Experimentální měření smykové pevnosti v rovině – tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech dle ČSN ISO 14 129.
- Experimentální měření pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů dle ČSN 64 0662.
- Experimentální stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky dle ČSN EN ISO 15 310.
- Experimentální stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku dle ČSN EN ISO 14130.
- Experimentální stanovení rázové houževnatosti v tahu dle ČSN EN ISO 8256.
- Experimentální stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání dle ČSN EN ISO 6603-2.
- Experimentální měření ohybových vlastností dle ČSN EN ISO 178.
- Experimentální měření tlakových vlastností dle ČSN EN ISO 604.
- Vyhodnocení výsledků a diskuse.
- Závěr.

5 POPIS PROBLÉMU A POUŽITÉ MATERIÁLY

Společnost Kordárna Plus a.s. dodala dvě uhlíkové tkaniny CC200. Větší pozornost byla zaměřena na tkaninu s vazbou plátno, zvláště pro její univerzální použití. Některé zkoušky však byly provedeny s tkaninou s vazbou kepr. Byly vybrány jen určité zkoušky s ohledem na spotřebu tkaniny. Je třeba zjistit, jak se změní vlastnosti jednotlivých laminátů při změně matrice. Teoreticky by změna neměla být nikterak zásadní, protože se jednalo o epoxidové pryskyřice. Výsledný laminát by tedy měl mít velmi podobné vlastnosti, neboť větší část vlastností v kompozitu tvoří právě vlákno. Kompozitní materiály jsou však zajímavé svou anizotropií, a právě do této oblasti směřuje tato studie, se zaměřením na adhezi, která se velkou měrou projevuje při smykovém nebo také při tlakovém namáhání laminátu a dalších podobných experimentech.

Vliv tohoto spojení tkanina-matrice, je však do jisté míry dán i výrobní technologií, jakou se výsledný laminát vyrobil. Pro tvorbu vzorků jsem zvolil metodu ručního kladení laminátu. Nevýhodou této metody bývá často nerovnoměrná vrstva matrice a špatné prosycení. Výhodou je ale nízká cena a nenáročnost výroby na přípravky. Jedna ze sad vzorků byla také vyrobena vakuovou infuzí, a navíc s použitím gealcoatu a bez něj.

Uvažujme jednovrstvou laminu a její ortotropní vrstvu s obecnou orientací, smykové přetvoření je pak vázáno na normálová napětí, a naopak. Proto například u laminátové desky s obecnou skladbou stěny, vyvolá účinek normálových sil, kromě normálových složek, deformace referenční plochy i její smykovou deformaci. Vazební tuhost pak dále způsobuje vazbu mezi ohybovými a membránovými efekty laminátové stěny. Membránové síly v referenční ploše tak způsobují i její průhyb a zkroucení, a tedy i deplanaci. Podobně i ohybové a kroutící momenty způsobují kromě zakřivení i normálové a smykové deformace referenční plochy. Což značí, že pouhá tahová síla tohoto laminátu způsobí kromě jeho protažení a kontrakce i zkos, prohnutí a zkroucení referenční plochy. Navíc vazební tuhost nevyplývá pouze z ortotropie jednotlivých lamin, ale také ze způsobu vrstvení laminátové stěny. [13]

V závěru je přidán obrázek z pohledu do řezu laminátu složeného z třinácti vrstev tkaniny s vazbou plátno, kde je vidět, jak se podařilo prosytit desku o tloušťce necelé 4 mm právě při ručním kladení.

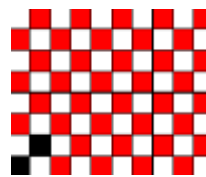
5.1 Vlastnosti tkaniny

Mechanické vlastnosti tkaniny jsou již předem určeny největší měrou právě vlastnostmi použitého vlákna. Společnost Kordárna Plus a.s. používá k výrobě vlákno francouzské značky TORAY s označením FT300B-3000-40B. Toto dosahuje pevnosti v tahu 3805 MPa a modul pružnosti v tahu je 232 GPa.

5.1.1 Vazba plátno

Uhlíková tkanina CC200 **KORDCARBON**; gramáž 200g/m²; s vazbou plátno.

Viz technický list v příloze P I.

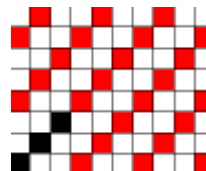


Obrázek 26 Schéma vazby plátno.

5.1.2 Vazba kepr

Uhlíková tkanina CC200 **KORDCARBON**; gramáž 200g/m²; s vazbou kepr.

Viz technický list v příloze P I.



Obrázek 27 Schéma vazby kepr.

5.2 Vlastnosti epoxidových pryskyřic

Pro následnou výrobu laminátů byly použity čtyři druhy epoxidových pryskyřic. Všechny čtyři jsou dostupné na našem trhu a lze je zakoupit. Nejsou to žádné specifické systémy na míru, které by zvýhodňovali výsledný laminát. Všechny pryskyřice jsou zpracovatelné při pokojové teplotě a taktéž při pokojové teplotě vytvrzují. Každý systém má svoje tvrdidlo, protože se jedná o dvousložkový systém. Toto bylo dodáno současně s pryskyřicí. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé laminační systémy označeny velkým písmenem abecedy:

A – Havel L285 + tvrdidlo H285

B – Biresin CR82 + tvrdidlo Biresin CH80-1

C – GRM systém LG 700 + tvrdidlo HG 700

D – Araldit GY 764BD + tvrdidlo H285

Tabulka ukazuje výběr základních vlastností jednotlivých pryskyřic. Další vlastnosti jsou k dispozici v technických listech v příloze P II.

Tabulka 5 Přehled vybraných vlastností pryskyřic.

Vlastnost	Jednotka	Havel L285	Biresin CR82	LG 700	Araldit GY 764BD
Viskozita při 25°C	[mPa.s]	600-900	1600	800-900	300-350
Pevnost v tlaku	[MPa]	120-140	75-130	120-140	110-115
Směšovací hmotnostní poměr		100:40	100:30	100:30	100:40

5.3 Další pomocné přípravky

K výrobě samotných vzorků bylo ještě potřeba následujících pomůcek:

antistatická utěrka

forma (skleněná či kompozitová)

metr (pro naměření tkaniny)

nádobka na pryskyřici (miska z HDPE)

ostré nůžky (pro dělení tkaniny)

papírová (mapovací) páska

papírové ubrousky (pro čištění formy a rukou)

pěnový váleček (na nanášení pryskyřice)

rukavice

voskový separátor (k přípravě formy)

vytlačovací váleček (pro redukci množství epoxidové směsi)

bílá fixa (popis výrobků)

špachtle či plastová stěrka (čištění formy či oddělení výrobku)

štětečky (nanášení pryskyřice)

tabulové nůžky (nastřihání vzorků)

váha s rozlišením ± 1 g

odmašťovadlo – technický benzin (očištění formy)

6 VÝROBA VZORKŮ A POPIS ZKUŠEBNÍCH STROJŮ

6.1 Příprava formy

V první fázi je nutné velice pečlivě připravit formu. K dispozici byla forma kompozitová a dvě formy skleněné. Jelikož díly z uhlíkové tkaniny jsou především a povětšinou pohledové díly, kdy každá nerovnost a vada formy se přímo ukáže na daném výrobku, je třeba důkladně očistit a naseparovat formu. Postup je následovný:

- Očistění od pozůstatků z minulého výrobku (plastovou stěrkou, technickým benzinem)
- Nanesení voskového separátoru
- Čekání vyschnutí vosku
- Vyleštění povrchu (papírové ubrousky)
- Nanášení separátoru se opakuje dle doporučení výrobce (zde 3x s časem 5minut)

Na takto vyleštěnou formu se nalepí mapovací páska dle požadovaného rozměru vzorků. V našem případě byl zvolen vzorek desky o rozměru 300x300 mm. Použitý separátor byl od firmy TR INDUSTRIES - MOLD RELEASE.

6.2 Příprava tkaniny

Dle možností forem byly naměřeny a nastříhány vzorky z tkaniny. Pro snadnější stříhání je možno si vytáhnout z útku či osnovy dané vlákno. Pro rozměr vzorku 300x300 mm je potřeba tkaninu vystříhnout o něco větší. Zde byl čtverec o rozměrech 320x320 mm. S tkaninou je třeba zacházet opatrně kvůli případným nečistotám, prachu či posunutí vazby, které by mohly zůstat na pohledové straně či způsobit vadu. Mapovací pásku lze též využít na olepení konce tkaniny, avšak již ji nepůjde odlepit. Podle počtu vrstev výsledného výrobku se nastříhá tkanina. Pro větší množství výrobků je dobré si udělat nástřížný plán.

6.3 Příprava epoxidového systému

V tomto jednoduchém kroku je třeba zjistit hmotnost veškeré tkaniny a podle velikosti výrobku a jeho tvaru si zvolit patřičný přídavek směsi. Hmotnost epoxidového systému je v poměru 1:1 s hmotností tkaniny. Bezpečnostní koeficient byl v rozmezí hodnot od 20% do 40%. Systém je potřeba dobře rozmíchat a sledovat dobu zpracovatelnosti, kterou stanovuje výrobce laminačního systému.

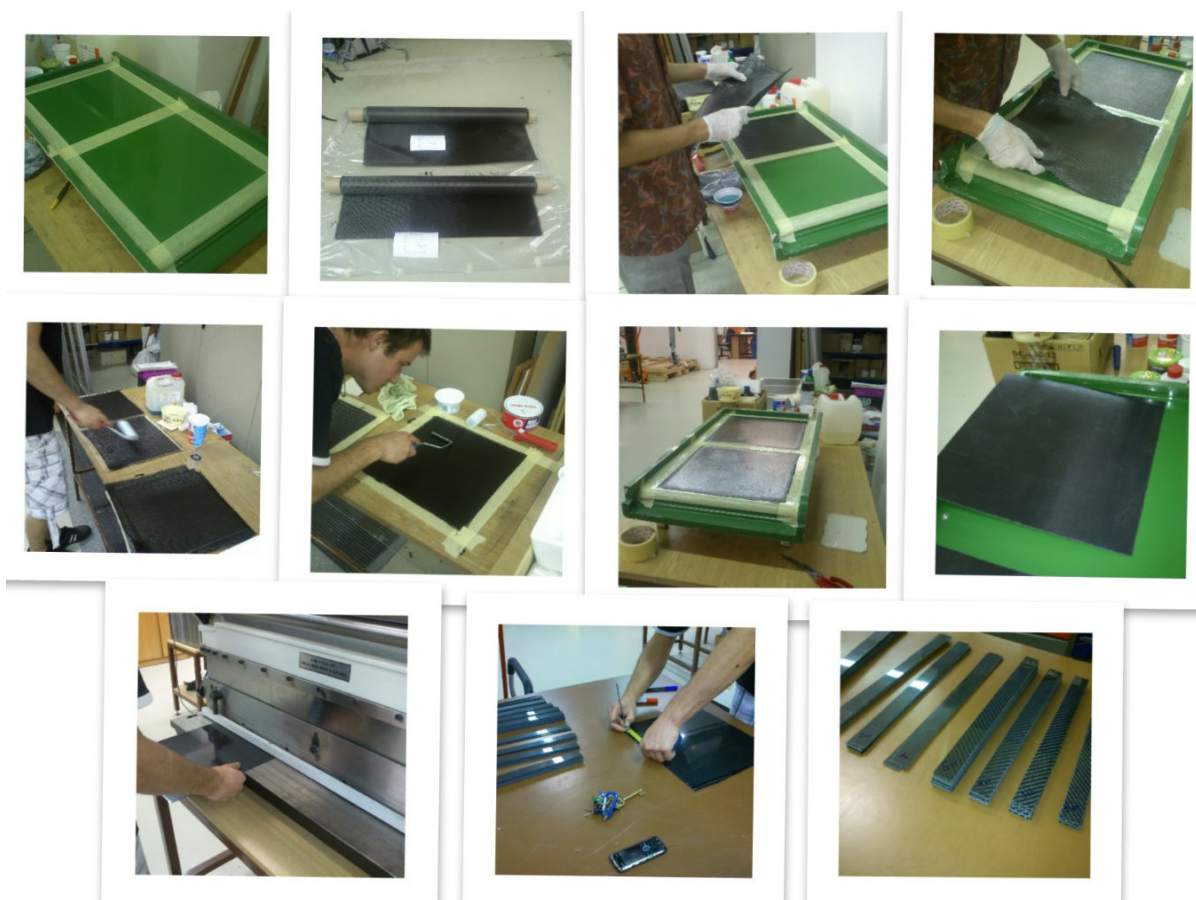
6.4 Kladení vrstev tkaniny

Na připravenou formu se nanese (vylije) rozmíchaná směs. Rovnoměrně se štětečkem či válečkem rozvrství po celé části formy. Do této vrstvy se položí tkanina, která musí doslova „plavat“, aby nedošlo k vadám (vzduchovým bublinám) na pohledové straně. Následně se opět nanese směs a zaválečkuje se. Poté se použije vytlačovací váleček pro srovnání množství pryskyřice. Takto se postupuje až k poslední požadované vrstvě. Tlak na válečky je třeba volit co nejrovnoměrnejší a zároveň je třeba dávat pozor na případné posunutí „plavajících“ tkaniny. Takto vyrobený laminát se nechá vytvrdit a poté se odformuje.

6.5 Úprava laminátu na vzorky

Po vytvrzení, odformování a úpravě okrajů ořezáním, se tyto naměřily a nastříhaly pro potřeby jednotlivých experimentů dle zvolených norem.

Následující obrázek zjednodušeně ukazuje postup výroby od prvního kroku přípravy formy až po hotové vzorky (zleva doprava).



Obrázek 28 Postup výroby vzorků.

6.6 Aplikované normy

Tabulka 6 Přehled použitých norem.

Publikace	Rok vydání	Název	EN	Citace
EN 2374	1991	Letectví a kosmonautika - Výroba zkušebních těles	ČSN EN 2374	[18]
ISO 14 129	1999	Vláknny vyztužené plastové kompozity - Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení smykového modulu a smykové pevnosti v rovině	ČSN EN ISO 14 129	[19]
ČSN 64 0662	1973	Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů	ČSN 64 0662	[20]
ISO 15 310	2006	Vláknny vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky	ČSN EN ISO 15 310	[21]
ISO 14 130	1999	Vláknny vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku	ČSN EN ISO 14 130	[22]
ISO 8256	2005	Plasty - Stanovení rázové houževnatosti v tahu	ČSN EN ISO 8256	[23]
ISO 6603-2	2001	Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška	ČSN EN ISO 6603-2	[24]
ISO 604	2004	Plasty - Stanovení tlakových vlastností	ČSN EN ISO 604	[25]
ISO 14125	2003	Vláknny vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností	ČSN EN ISO 14125	[26]

6.7 Techniky měření

V první části se experiment zaměřuje na vlastnosti ve smyku, kde by se nejvíce měla projevit kvalita adheze tkanina-matrice. Zkoušky k tomu zvolené jsou celkem snáze realizovatelné a jde o měření pevnosti v tahu v rovině [19], pevnosti ve smyku mezi vrstvami [20], stanovení modulu pružnosti [21] a stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti [22].

Ve druhé části se experiment zaměřuje na dynamické namáhání laminátu. Sleduje se velikost síly potřebné k roztržení vzorku – rázová houževnatost v tahu [23] a síla a energie spotřebované na průraz laminátového vzorku [24].

Ve třetí a poslední části měření se experiment zaměřuje na zkoušky statické. Vzorky jsou namáhány na tlak [25], kde mimo jiné můžeme podle druhu deformace stanovit, zda je adheze tkanina-matrice dobrá či špatná. V posledním experimentu pak jde o prostý tříbodový ohyb, [26] kde se z výsledků bude posuzovat jejich ohybová tuhost. Ta, jak z literatury víme, je často jedním ze stěžejních vlastností kompozitních materiálů.

6.8 Měřicí stroje

K experimentům celé práce byly použity měřicí zařízení, a to univerzální zkušební stroj Zwick 1456, Zwick/Roell HIT50P a Zwick/Roell HIT230F.

6.8.1 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456

Na tomto zkušebním stroji byly realizovány všechny zkoušky z první i třetí části experimentu. Vyhodnocované výsledky se liší podle zvolené zkoušky. Jelikož na tomto stroji proběhla větší část měření, neuvádí se zde rozpis vyhodnocovaných veličin.

Tabulka 7 Technické specifikace stroje Zwick 1456.

Maximální zkušební síla	20 kN
Strojová výška	1284 mm
Celková výška	2012 mm
Celková šířka	630 mm
Šířka pracovního prostoru	420 mm
Hmotnost	150 kg



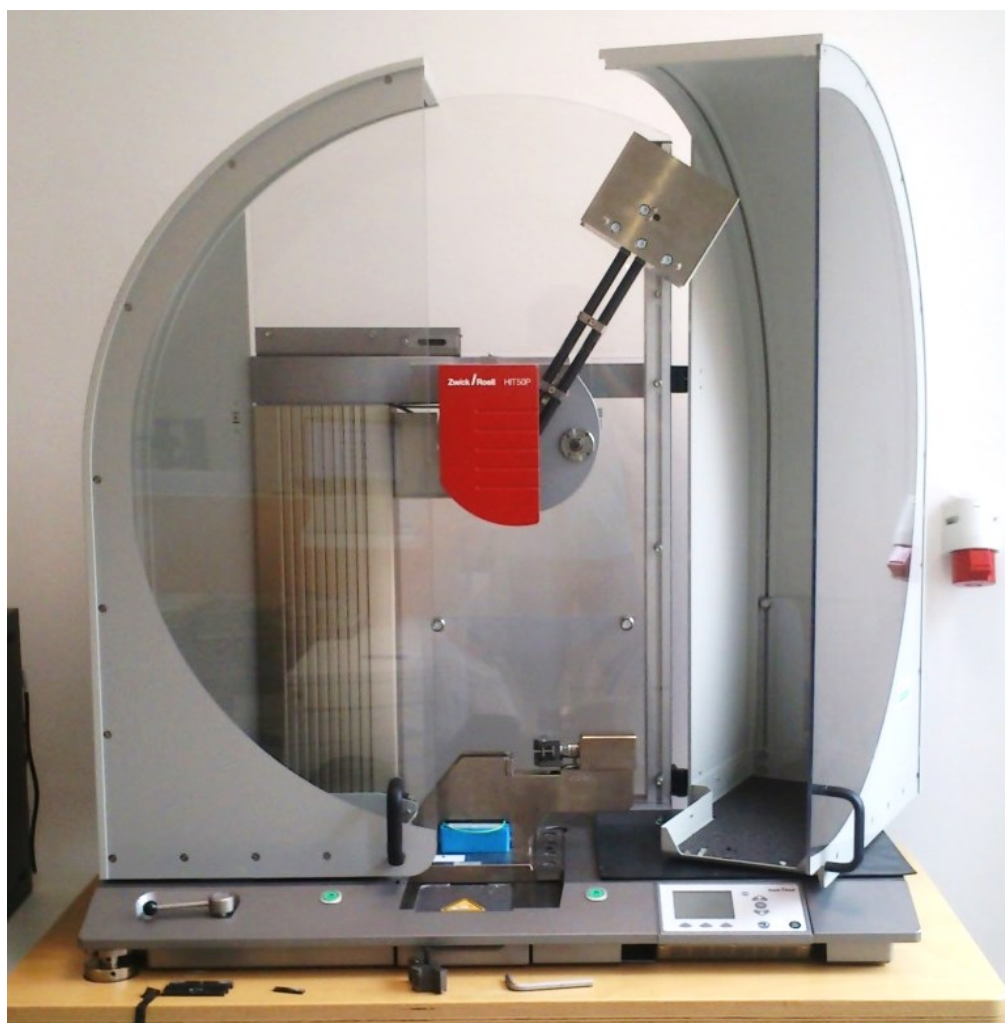
Obrázek 29 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.

6.8.2 Zwick/Roell HIT50P

Další stroj použitý k měření byl také od firmy Zwick. Byl použit k první dynamické zkoušce, a sice k stanovení rázové houževnatosti v tahu. V následující tabulce jsou ve zkratce uvedeny některé parametry stroje.

Tabulka 8 Technické specifikace stroje Zwick/roell HIT50P.

Maximální zkušební energie	50 J
Strojová výška	1170 mm
Celková šířka	1180 mm
Hmotnost stroje	475 kg
Hmotnost kladiva	6,899 kg
Nárazová rychlost	3,807 m/s



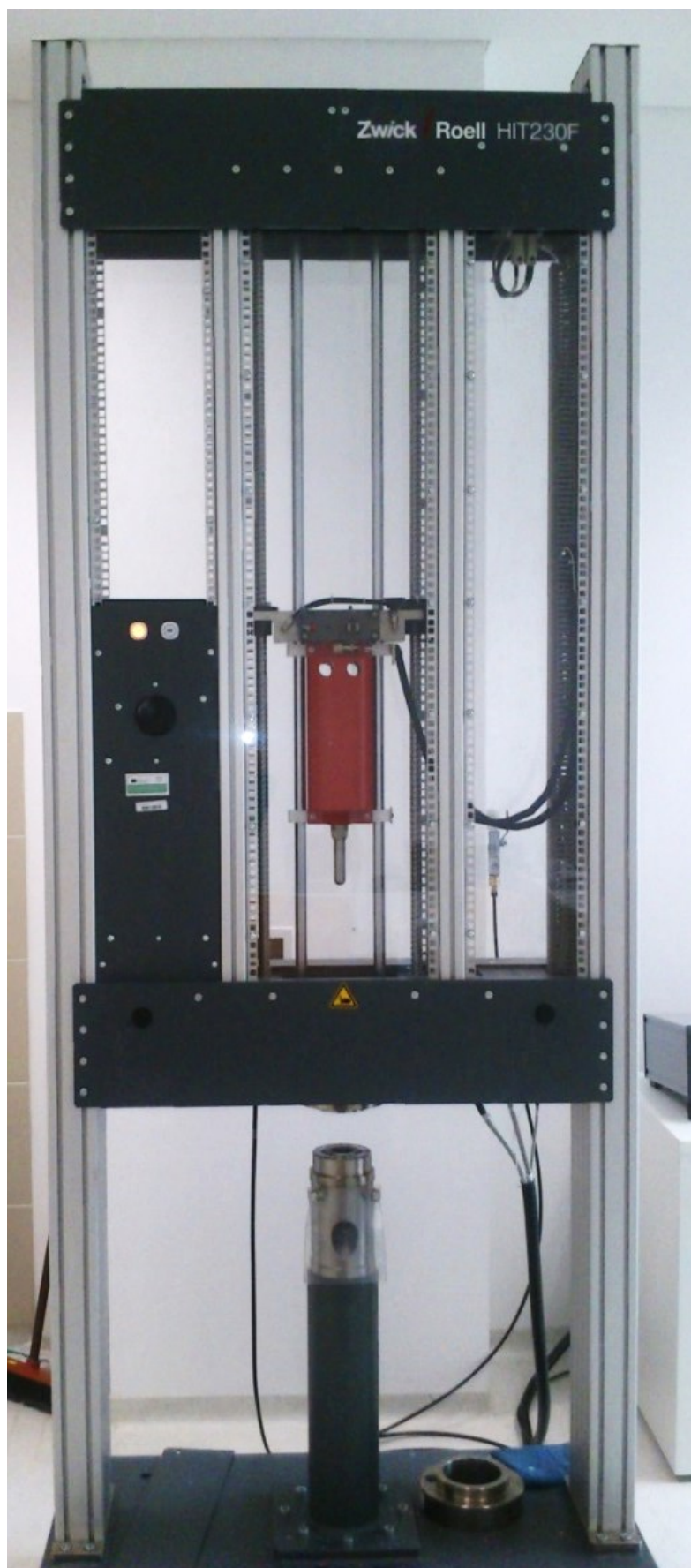
Obrázek 30 Zkušební stroj Zwick/roell HIT50P.

6.8.3 Zwick/Roell HIT230F – padostroj

Na tomto přístroji byla měřena pouze jedna zkouška, a to právě víceosé rázové namáhání dle ČSN EN ISO 6603-2. Výsledky jsou zaměřeny na vyhodnocení veličin popsanych v tabulce.

Tabulka 9 Přehled měřených veličin na padostroji.

Značení	Popis	Jednotky
F	Maximální síla	N
Sm	Prodloužení při maximální síle F	mm
Wm	Energie pod F	J
Pr	Rozdíl poklesu rychlosti po nárazu	%
Fp	Penetrační síla – síla při porušení	N
Ep	Penetrační energie – celková plastická energie	J



Obrázek 31 Zkušební stroj Zwick/Roell HIT230F.

7 VÝSLEDKY A DISKUSE

Na první pohled se může zdát, že výsledky spolu příliš nemusí souviset. Při podrobnějším zkoumání však lze nalézt spojitosti, které se odrážejí průběžně ve všech měřeních. Na začátek je zachována myšlená struktura kompozice výsledků rozdělených podle jednotlivých vlastností testů. Před vlastním shrnutím zkoušek je třeba se seznámit s jejich popisem. Byl vytvořen symbolický zápis pro zjednodušenou a hlavně přesnou identifikaci jednotlivých zkoušek. Symbolika je vysvětlena na příkladu na obrázku níže.

STANDARTA		HLAVNÍ				POMOCNÉ						
norma	-	vazba (p,k)	poč.vrstev (1,2,-,xy)	matrice (A,B,C,D)	tloušťka mm	-	rozměr vz. mm	-	směr utku dle hl osy vzorku °	/	počet vzorků měř.	další poznámky
A2	-	p	8	A	2,7	-	250x25	-	45	/	18	-

A2_p8A2,7-250x25_45/18

A2 – označuje zkratku normy – zde zkouška smykové pevnosti

p – označuje druh použité tkaniny – zde pláno

8 – označuje číslem počet kladených vrstev

A – označuje druh zvolené matrice – pryskyřice Havel L285

2,7 – označuje statistický průměr tloušťky dané série v mm

250x25 – označuje předpokládaný rozměr zkušebního tělesa daný normou

45 – označuje, jak jsou výsledné vzorky řezány vůči hlavní ose tkaniny

18 – označuje počet vyrobených vzorků v sadě

**Pro přehlednost není ve výsledcích uvedena zkratka p – pláno.*

Tímto způsobem byly jednotlivé série označovány a určité části z tohoto značení jsou vždy použity v průběhu celé práce. Pro úplnost uvádí následující tabulka přehled označení kódu jednotlivých norem:

Tabulka 10 Přehled norem a jejich kódové značení.

Název	EN	kód
Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení smykové pevnosti v rovině	ČSN EN ISO 14 129	A2
Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů	ČSN 64 0662	A3
Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky	ČSN EN ISO 15 310	A4

Název	EN	kód
Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku	ČSN EN ISO 14 130	A1
Stanovení rázové houževnatosti v tahu	ČSN EN ISO 8256	D1
Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání	ČSN EN ISO 6603-2	D2
Stanovení tlakových vlastností	ČSN EN ISO 604	S3
Stanovení ohybových vlastností	ČSN EN ISO 14125	S2

U všech výsledků bylo nejprve provedeno jejich zhodnocení, vyloučení extrémních hodnot a následně vytvořeny tabulky a grafy. Normy určují jako hlavní ukazatel pro porovnání jednotlivých souborů měření aritmetický průměr a jeho směrodatnou odchylku. Dle mého názoru takovéto hodnocení není příliš vhodné, jelikož tento aritmetický průměr se posouvá za odlehlými hodnotami. Grafy jsou proto pro porovnání doplněny o hodnoty mediánu.

7.1 Zkoušky pro soudružnost tkanina-matrice

7.1.1 Zkouška A1 – ČSN EN ISO 14 130

Od této zkoušky se očekávalo vyhodnocení mezilaminární smykové pevnosti. Je to zkouška velmi podobná ohybu, jen by při ní mělo být vlivem jiného rozmístění podpěr docíleno mezilaminárního smykového porušení.

Měřením však bylo zjištěno, že mezilaminární smyková pevnost je pravděpodobně větší, než předpokládá norma, neboť k tomuto typu poškození nedocházelo a vzorky se chovaly jako při namáhání prostým ohybem a praskaly uprostřed vlivem tahu. Z toho předpokládáme vysokou míru mezilaminární smykové pevnosti. Vzorek na tuto zkoušku měl šestnáct vrstev tkaniny, při tloušťce 4,7 mm za použití matrice B. Změřeno bylo celkem 10 vzorků, z nichž žádný nevykázal mezilaminární smykové porušení při rozteči podpěr 23,5mm ani menší. Zkouška proto nebyla provedena na dalších pryskyřicích. Mez pevnosti se přiblížila k hodnotě 400 MPa.

7.1.2 Zkouška A2 - ČSN EN ISO 14 129

Experimentální zkoušení vzorků zahrnovalo celkem 6 sad vzorků. Norma požaduje minimálně 5 vzorků z každého směru v sadě. Tedy celkem aspoň 10 vzorků k měření. Byly změřeny všechny druhy pryskyřice z tkaniny plátno a dvě sady pro porovnání z tkaniny s vazbou keprovou. Tyto z pryskyřic B a C.

Podstatou zkoušky je namáhání tělesa o pravouhlém průřezu s vlákny orientovanými pod úhlem $+45^\circ$ k ose na tah. Rozměry tělesa jsou 250x25 mm. Norma stanovuje 16 vrstev tkaniny. Z důvodu úspor materiálu a jeho vysoké pevnosti jsme zvolili jen polovinu. Těleso však nepodléhá čistému smyku, a je proto nutné výsledné hodnoty posuzovat s opatrností. Zkušební těleso totiž podléhá kromě smyku také kolmým napěťovým složkám a dochází k rotaci vrstev a deplanaci. I když jsou tyto složky malé, výsledné hodnoty konečného napětí a deformace jsou nižší, než hodnoty získané vhodnějšími metodami, jako například torzní zkouškou na tělesech ve tvaru trubek. [19]

Následující obrázek zobrazuje roztržené těleso po tahovém zatížení.

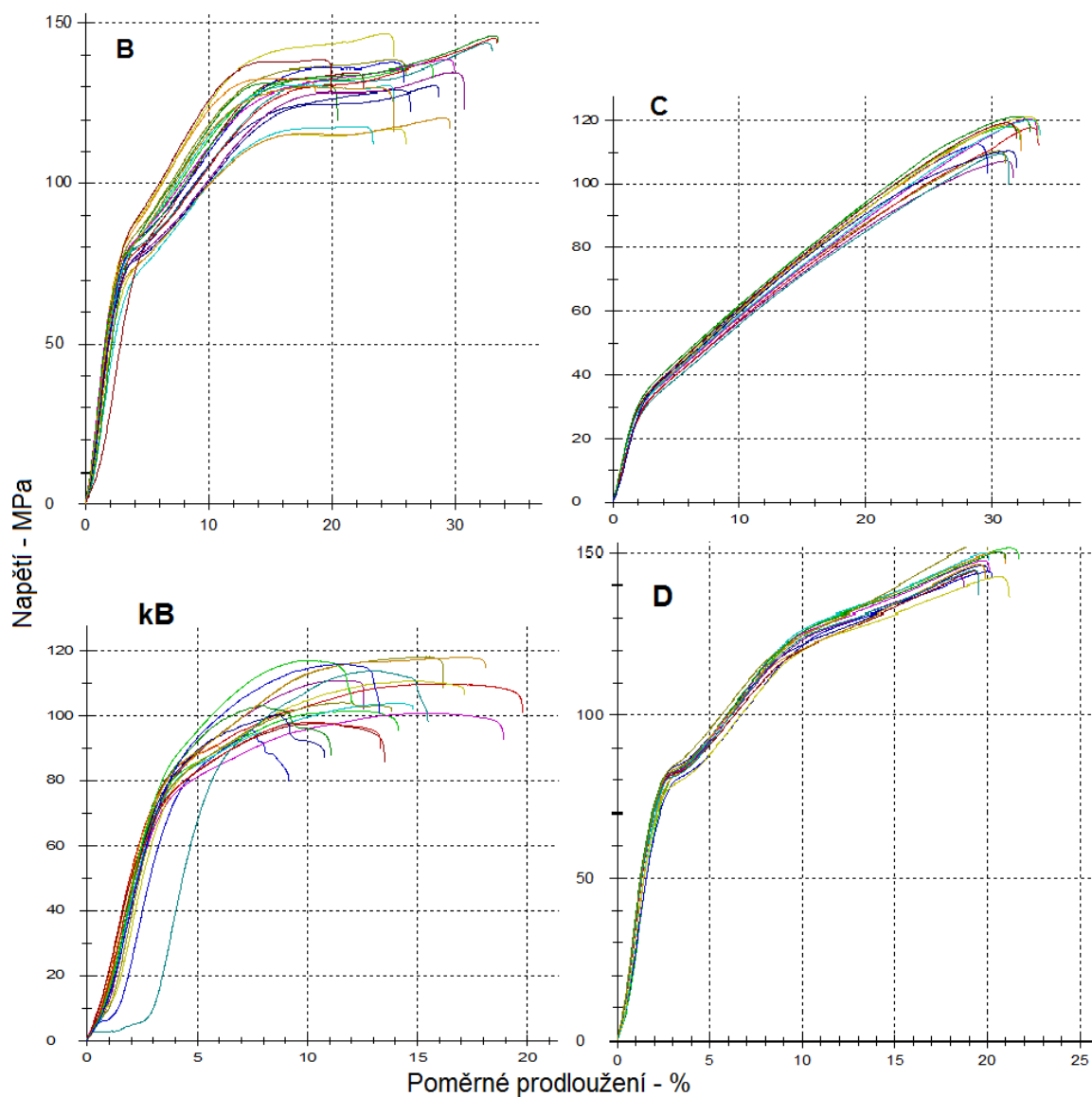


Obrázek 32 Pohled na roztržený vzorek po zkoušce A2.

Z technických důvodů jsme však nemohli realizovat všechny dílčí části celé zkoušky, protože vybavení stroje neobsahuje extenzometry pro měření příčné a podélné deformace. Následující tabulka shrnuje naměřené výsledky.

Tabulka 11 Přehled naměřených hodnot ze zkoušky A2.

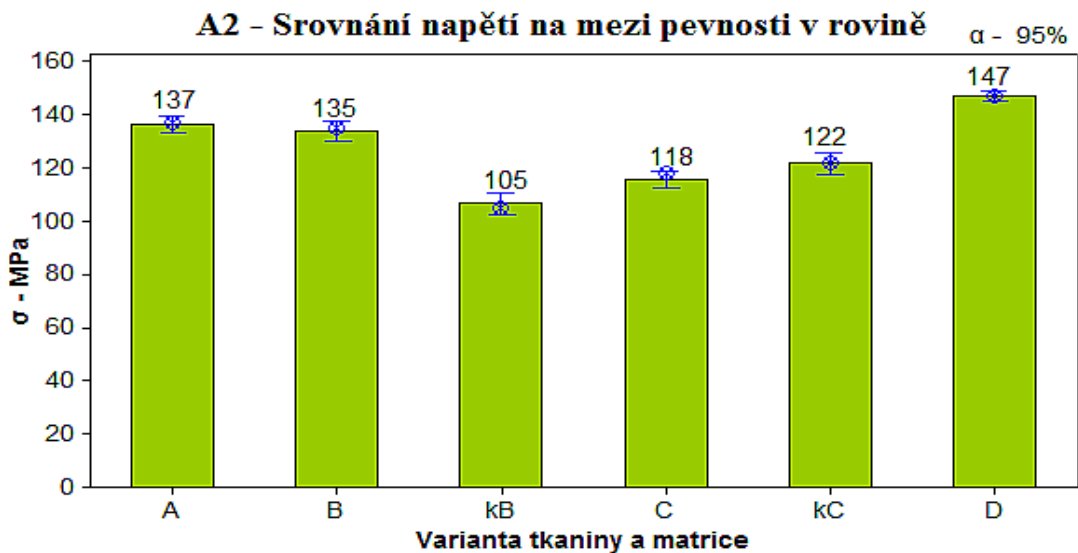
A2_y8X2,7-250x25_45/12						
yX	A	B	kB	C	kC	D
MPa	mez pevnosti v tahu dané struktury - σ					
\bar{x}	132,00	134,00	107,00	116,00	122,00	147,00
s	$\pm 17,30$	$\pm 8,61$	$\pm 8,28$	$\pm 5,08$	$\pm 8,12$	$\pm 3,49$
v	13,14	6,42	7,77	4,38	6,66	2,37
MPa	modul pružnosti v tahu dané struktury - E					
\bar{x}	4140	2710	3020	1490	3140	4310
s	± 435	± 235	± 181	$\pm 57,3$	$\pm 95,2$	± 129
v	10,51	8,65	5,98	3,86	3,03	3,01
%	poměrné prodloužení dané struktury - ΔL					
\bar{x}	17,80	24,80	12,70	31,50	24,10	19,90
s	$\pm 4,90$	$\pm 5,70$	$\pm 3,90$	$\pm 1,20$	$\pm 2,30$	$\pm 0,70$
v	27,66	22,80	31,08	3,92	9,61	3,50
Nmm	práce na mezi pevnosti dané struktury - W					
\bar{x}	333880,91	322599,02	128660,89	308989,15	299314,40	379158,67
s	104781,33	$\pm 84168,64$	$\pm 48192,28$	$\pm 20430,66$	$\pm 44058,80$	$\pm 66845,48$
v	31,38	26,09	37,46	6,61	14,72	17,63



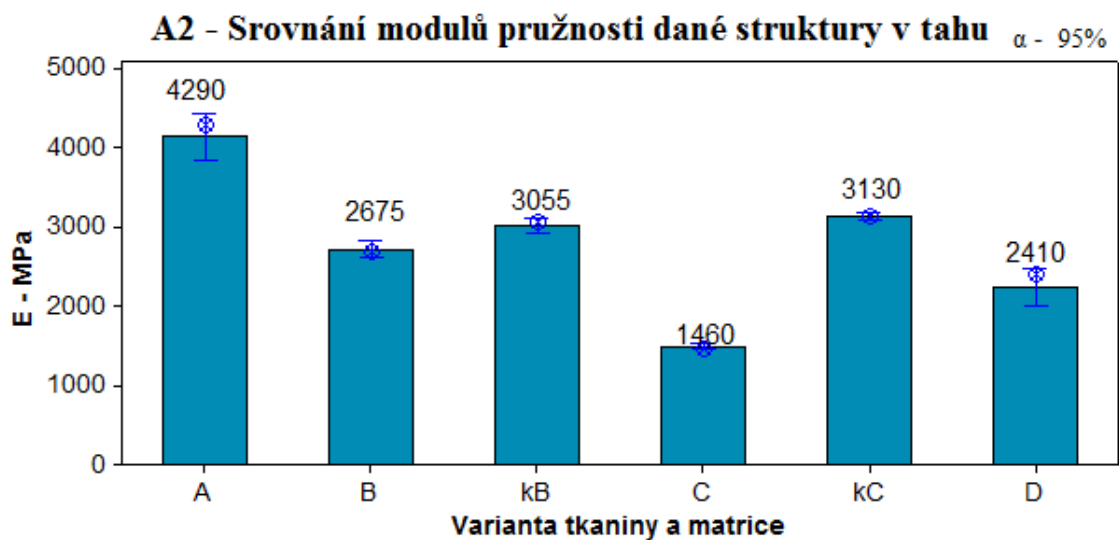
Obrázek 33 Grafické průběhy napětí ze zkoušky A2.



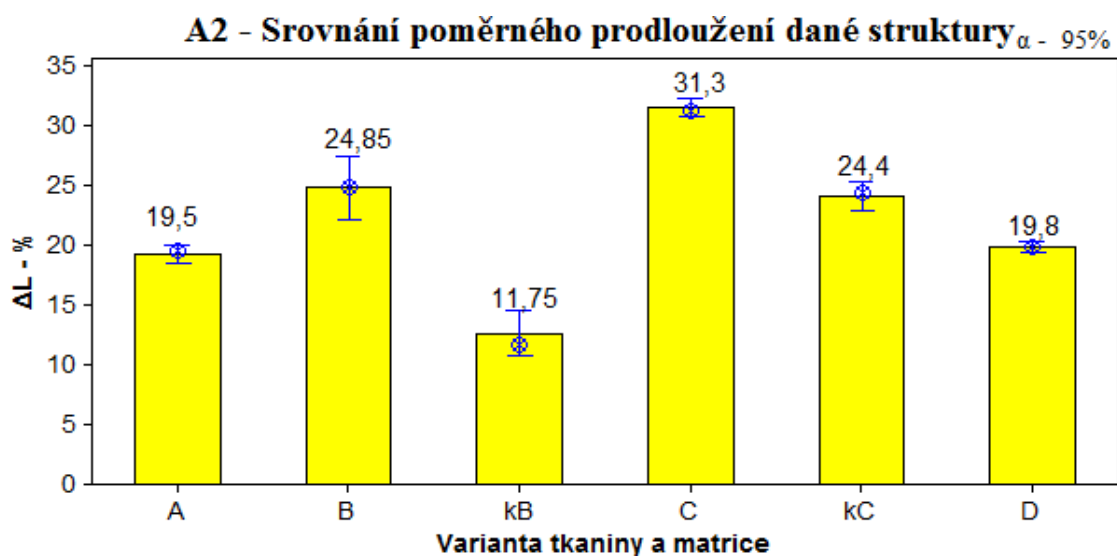
Obrázek 34 Detailní pohled na způsob porušení vzorků při zkoušce A2.



Obrázek 35 Srovnání napětí na mezi pevnosti u zkoušky A2.



Obrázek 36 Srovnání modulů pružnosti dané struktury v tahu u zkoušky A2.



Obrázek 37 Srovnání poměrného prodloužení u zkoušky A2.

Shrnutí zkoušky: Hlavním cílem této zkoušky bylo stanovení smykové pevnosti v rovině. Jelikož nebyly připojeny extenzometry, hodnoty týkající se deformací jsou jen přibližné. Sledujeme rozdílné hodnoty smykové pevnosti, nejen mezi plátnem a keprem, ale i mezi pryskyřicemi. Zaměřme se na pryskyřice B a C. Pozorujeme, že tělesa z B jsou pevnější a křehčí, oproti tomu z C jsou pružnější a houževnatější jak ukazuje i graf modulů pružnosti. Nejlepších výsledků hodnot meze pevnosti v rovině dosáhla pryskyřice D. Zajímavým subjektivními vjevy byla teplota vzorku po přetržení, tato byla vyšší u těles z A a B, a také způsob delaminace a deplanaci u jednotlivých sad těles. Některé vzorky zvláště z B vykazovaly výraznou delaminaci. Vzorky z C zase výraznou deplanaci.

7.1.3 Zkouška A3 - ČSN EN ISO 15 310

Výstupní hodnotou tohoto experimentálního měření je smykový modul pružnosti zkušební tělesa. Je to jediná zkouška, při které nedocházelo k destrukci těles, proto bylo následně využito této desky pro tvorbu dalších vzorků. Podstata zkoušky je v bodovém namáhání tělesa ve tvaru čtverce v každém rohu. Dva body jsou vždy na úhlopříčce desky. Jedna dvojice bodů desku podpírá, druhá dvojice vyvozuje sílu. Tuto metodu lze použít jen pro stejnosměrné tkaniny, a proto byla uplatněna jen u tkaniny plátno u všech druhů pryskyřic. Princip vyhodnocení stanovuje norma. [21]

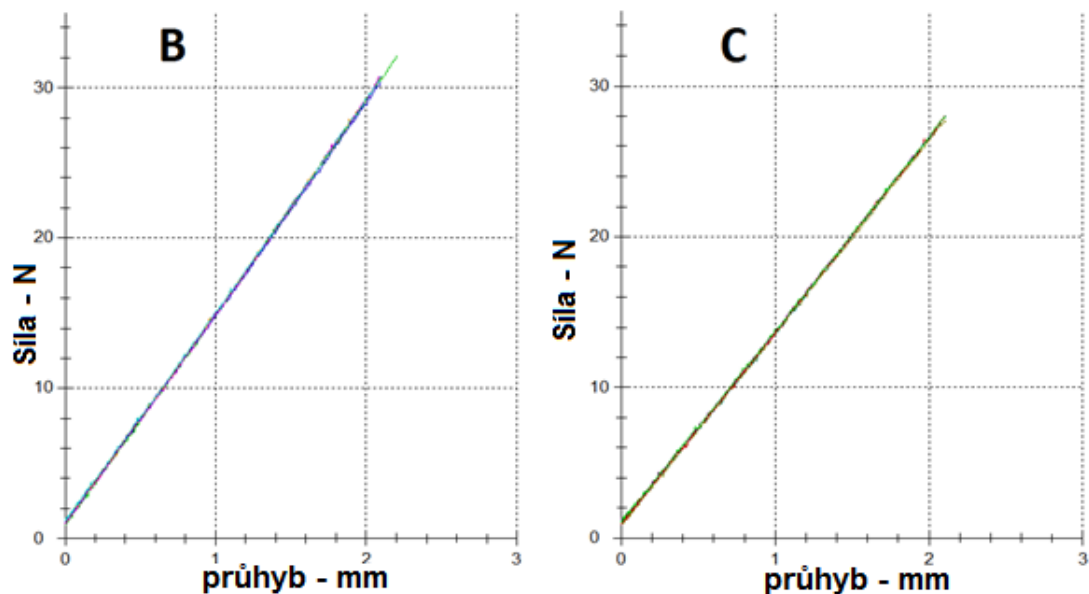
Tabulka 12 Stanovení modulu pružnosti z lineární charakteristiky průběhu zatížení.

	A	B	C	D	
síla při = 0,4	5,98	5,91	5,4	4,3	N
síla při = 1,3	19,44	19,1	17,5	14	N
tloušťka desky	4,05	4,05	4,05	4,7	mm
Modul pružnosti - E	3,12	3,06	2,81	1,44	GPa

Následující obrázek ukazuje pohled na desku při zkoušce stanovení modulu pružnosti metodou torzní desky. Pro objektivnější vyhodnocení byla tato deska vícekrát otočena a následně zatěžována do poloviny její tloušťky.



Obrázek 38 Pohled na experiment při zkoušce A3 ve stroji.



Obrázek 39 Grafický průběh síly při zatížení na desky z B a C.

Shrnutí zkoušky: Následující zkouška nedestruktivně stanovila modul pružnosti ve smyku. Vidíme, že pryskyřice A dosahuje nejvyšších výsledků. Ostatní hodnoty jsou porovnatelné s touto hodnotou. Jen desky z D vykazují menší hodnoty. Předpokládám, že u vzorku D se projevil vliv nehomogenity struktury kompozitu, která vznikla při výrobě v důsledku použití technologie ručního laminování bez využití tlaku.

7.1.4 Zkouška A4 - ČSN 64 0662

Tato zkouška stanovuje mezní smykové napětí pro pevnost ve smyku mezi vrstvami, ke které dojde při porušení zkušební tělesa, za předpokladu, že smykové napětí je ve smy-

kové ploše rovnoměrně rozloženo. Při zkoušce dojde kromě smykového porušení též k určitému podílu odlupování ve vazbě mezi vrstvami. [20]

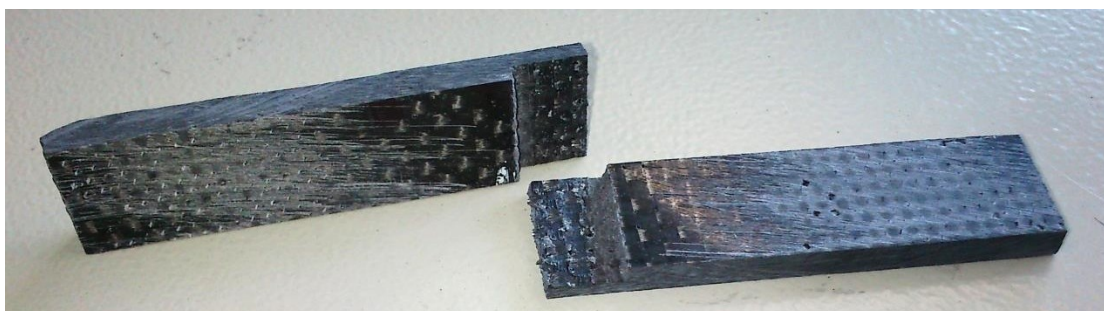
Při této zkoušce bylo změřeno celkem 5 sad vzorků. Byly změřeny všechny druhy pryskyřic z tkaniny plátno a jedna sada z tkaniny s vazbou keprovou z pryskyřice B. Průměrně každá sada obsahovala 8 vzorků. Rozměry tělesa byly po dohodě navrženy na délku 100mm, šířka 14 mm při tloušťce 4 mm. Kromě vzorků ze sady D byly všechny vyrobeny s použitím tlaku, proto jsou označeny červeně.

Modul pružnosti se vyhodnocuje bez použití extenzometru obtížně. Navíc většina těles klouzala v čelistech, i přes zdrsňení upínací plochy brusným papírem, a proto i práce a protažení nejsou správně vyhodnotitelné. Z těchto důvodů nejsou tyto parametry uvedeny.

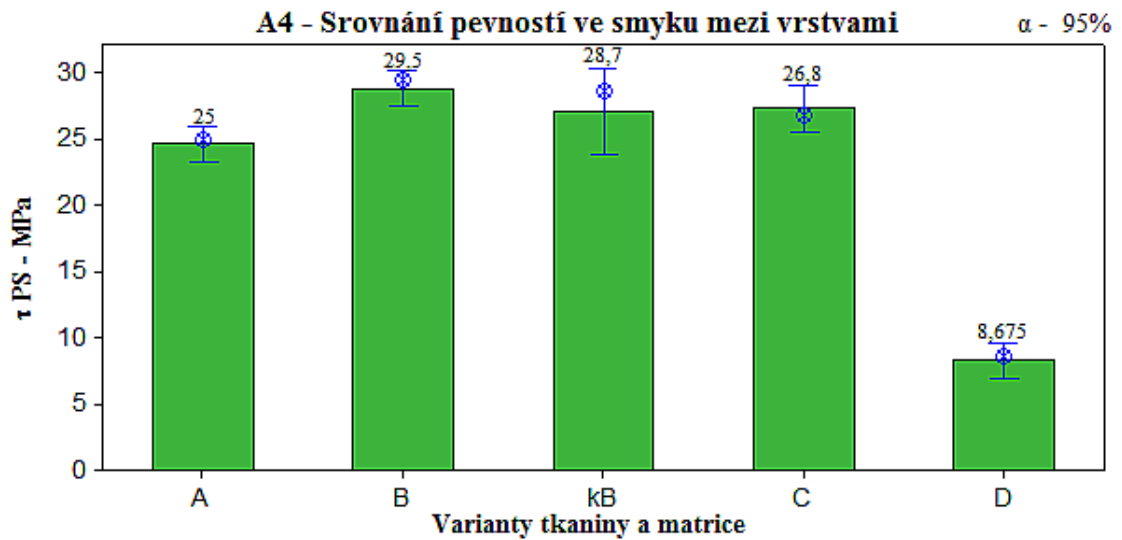
Tabulka 13 Přehled naměřených hodnot pro mez pevnosti ve smyku mezi vrstvami ve zkoušce A4.

A4_y14X4-100x14,5_90/9_drazka fr.2 roztec 8					
γ_X	A	B	kB	C	D
MPa	mez pevnosti ve smyku mezi vrstvami - τ_{ps}				
\bar{x}	24,6	28,7	28,3	27,1	8,28
s	1,93	1,88	2,86	2,39	1,3
v	7,84	6,56	10,13	8,82	15,66

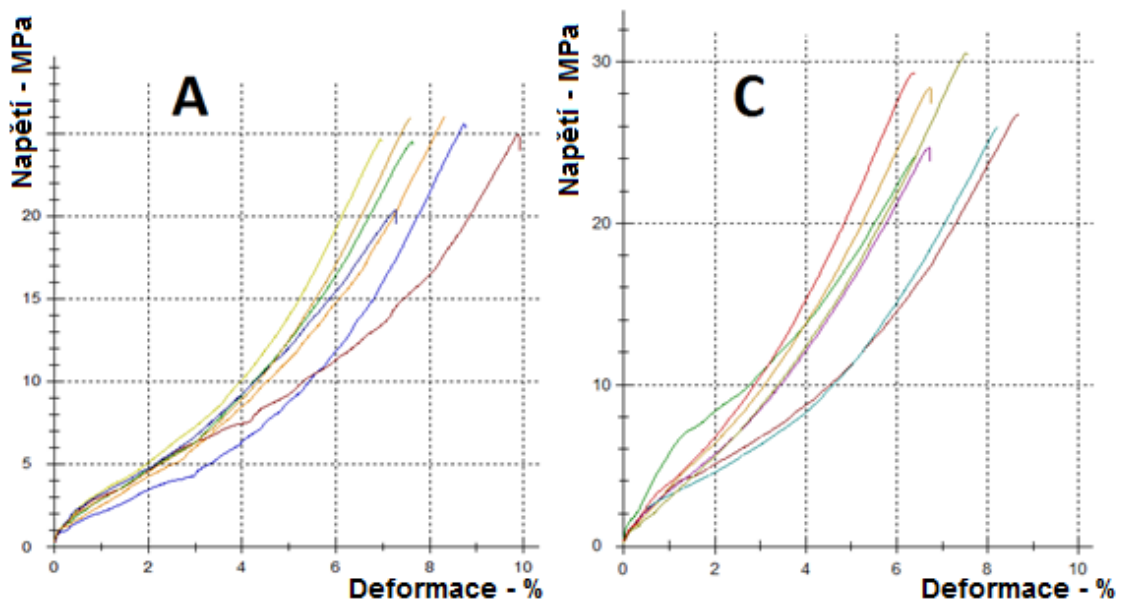
Na obrázku je znázorněno těleso po přetržení. Je vidět použití brusného papíru pro zdrsňení plochy pod upínacími čelistmi a nízký podíl odloupnuté vrstvy.



Obrázek 40 Pohled na porušené těleso po zkoušce A4.



Obrázek 41 Graf srovnání pevností ve smyku mezi vrstvami.



Obrázek 42 Grafický průběh napětí pro pryskyřice A a C ze zkoušky A4.

Shrnutí zkoušky: Ze získaných hodnot usuzují dobrou pevnost vzorků z B. Ani ostatní druhy pryskyřice ale nevykazují výraznější pokles hodnot. Jen vzorky z D opět upozorňují na důležitost výrobní technologie. Mohu tedy poukázat na srovnatelnou míru smykové pevnosti mezi vrstvami pro A, B a C. Také podíl odlupu vrstev nebyl u žádných vzorků výraznější a tělesa se tak porušovala smykem mezi vrstvami.

7.2 Zkoušky pro stanovení chování při dynamickém namáhání

Dynamické zkoušky byly vybrány takové, aby přispěly k objektivnějšímu posouzení rozhraní tkanina-matrice.

7.2.1 Zkouška D1 - ČSN EN ISO 8256

Podstatou této zkoušky je roztržení zkušební tělesa v místě vrubu v nejnižším bodě jediného kmitu kyvadla. Dochází k tahovému rázovému zatížení a spotřebování energie z kmitu kyvadla. Z výsledných hodnot se pak posuzuje křehkost či houževnatost zkoušených těles. Nevýhodou této zkoušky je však horší reprodukovatelnost. Výsledky této zkoušky se nepoužívají jako zdroje dat pro konstrukční výpočty dílů. [23]

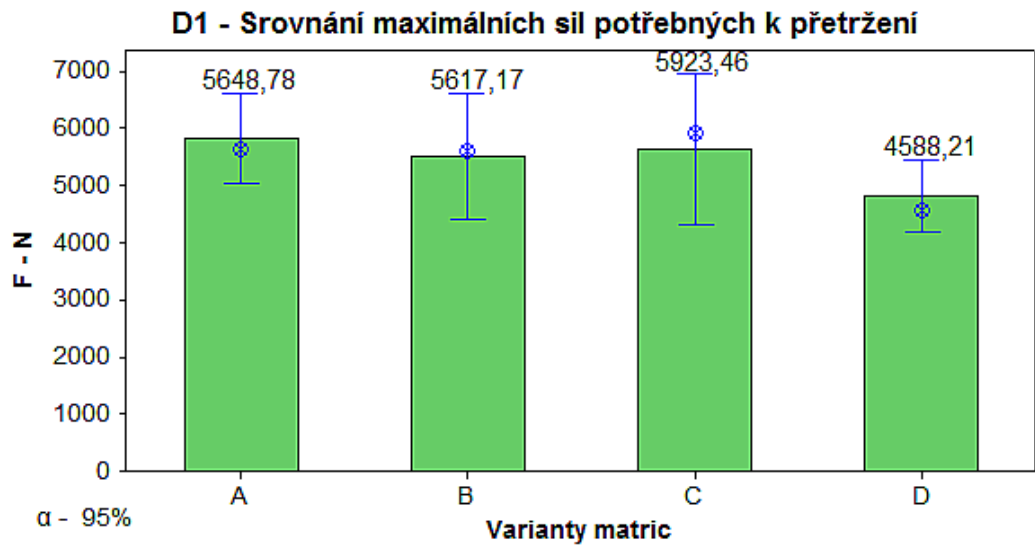
Byly vyrobeny tělesa ze všech druhů pryskyřic a opatřeny vrubem dle požadavku normy. Typ tělesa byl 1, druh zkoušky A. Nominální hodnota vrubu byla zmenšena na tloušťku 4 mm. Protože těleso místo roztržení bylo pouze vytrhnuto z upínače, všechna tělesa byly vyrobeny pouze z plátnové tkaniny. Následující obrázek znázorňuje těleso po zkoušce a tabulka shrnuje vyhodnocované naměřené hodnoty.



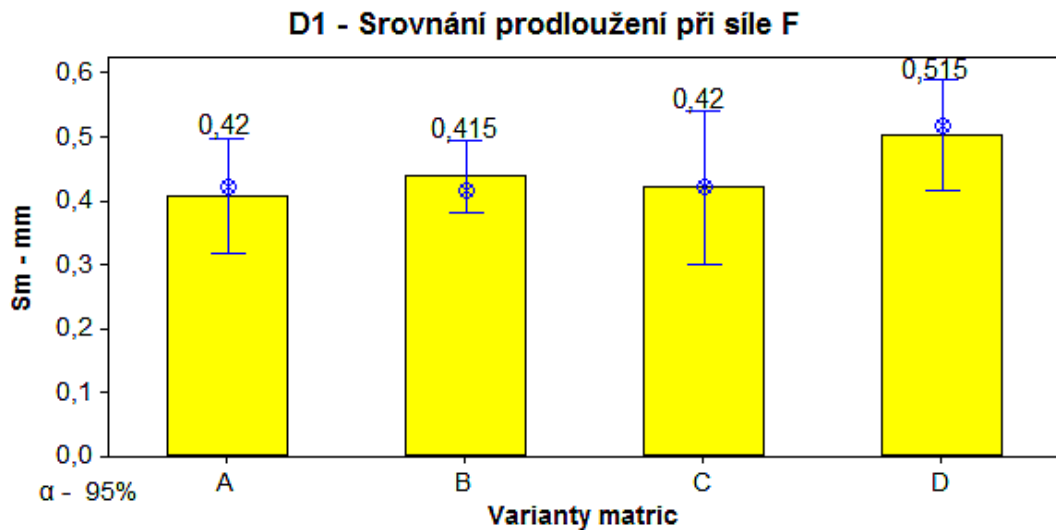
Obrázek 43 Pohled na roztržené tělísko ze zkoušky D1.

Tabulka 14 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku D1.

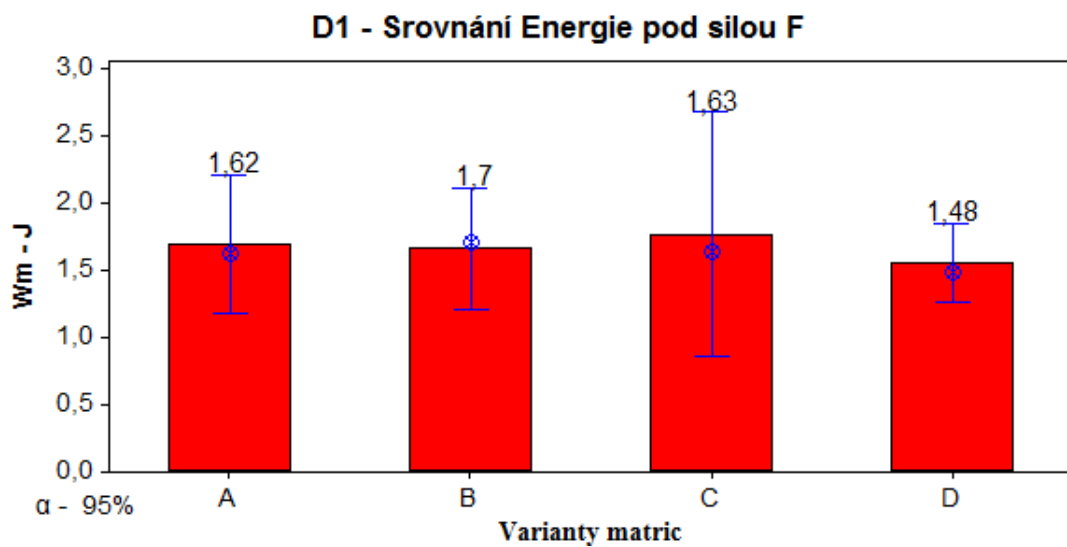
D1_p13X4-80x10_90/vrub tl.4				
X	A	B	C	D
[N]	Maximální síla - F			
\bar{x}	5835,87	5521,45	5645,81	4832,42
s	±858,29	±1052,13	±1060,18	±601,11
v	14,71	19,06	18,78	12,44
[mm]	Prodloužení při síle F – Sm			
\bar{x}	0,41	0,44	0,42	0,5
s	±0,1	±0,05	±0,1	±0,08
v	23,46	12,37	23,03	16,57
[J]	Práce pod silou F – Wm			
\bar{x}	1,16	1,2	1,24	1,18
s	±0,44	±0,37	±0,56	±0,22
v	37,83	30,51	45,03	18,61
[%]	Pokles rychlosti po nárazu – Pr			
\bar{x}	1,41	1,43	1,54	1,21
s	±0,47	±0,37	±0,71	±0,26
v	33,38	25,69	45,98	21,61



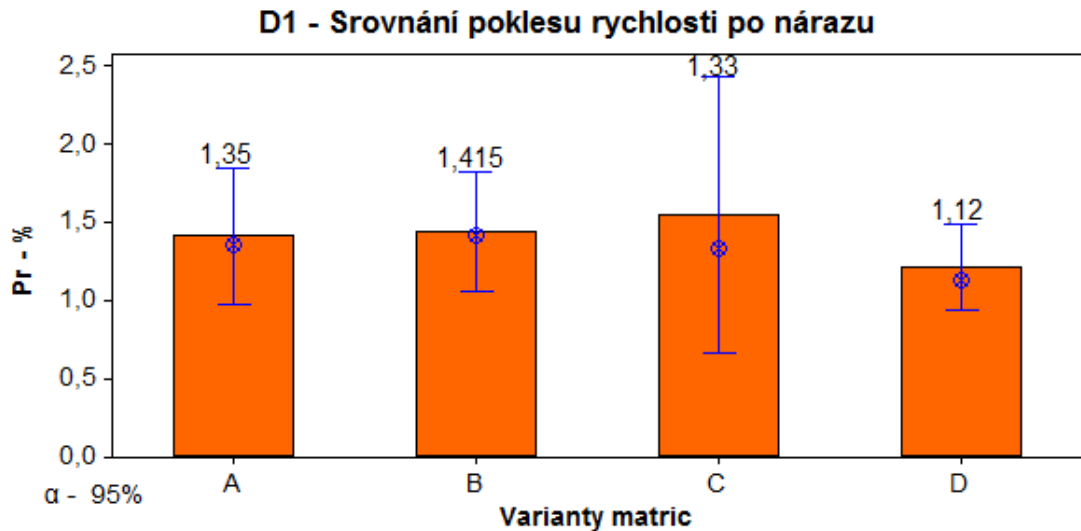
Obrázek 44 Srovnání maximálních sil potřebných k přetržení při zkoušce D1.



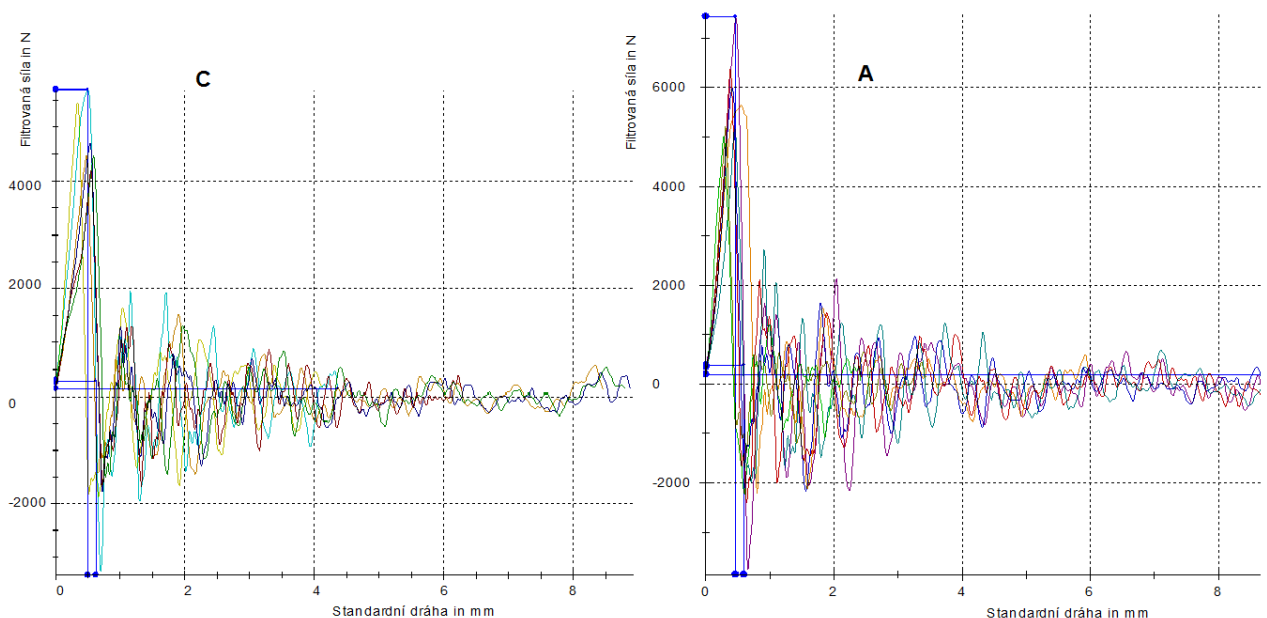
Obrázek 45 Srovnání prodloužení při síle F při zkoušce D1.



Obrázek 46 Srovnání energie pod silou F při zkoušce D1.



Obrázek 47 Srovnání poklesu rychlosti po nárazu při zkoušce D1.



Obrázek 48 Graf průběhu rázové houževnatosti při zkoušce D1.

Shrnutí zkoušky: Z výsledků zkoušky není patrný výrazný rozptyl hodnot a je možné usuzovat, že se všechny vzorky chovaly velmi podobně. Z grafického záznamu filtrované síly je patrný rozdíl změny standardní dráhy, kdy tělesa A i B vykazovala tuto dráhu přibližně o jednu třetinu delší než tělesa z C a D.

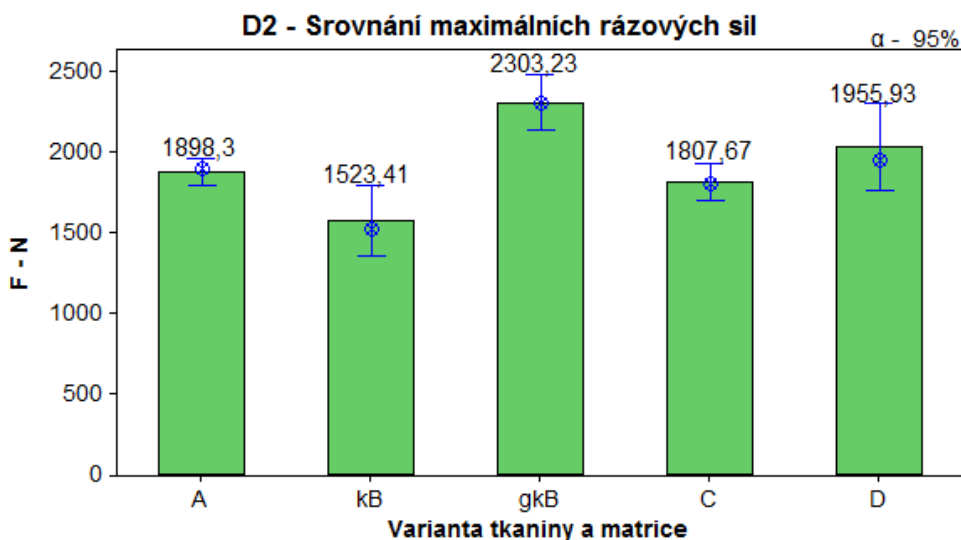
7.2.2 Zkouška D2 - ČSN EN ISO 6603-2

Experimentální měření víceosého rázového namáhání je podstatou této zkoušky. K porušení tělesa dochází vlivem působení biaxiálních symetrických napětí v místě maximálního napětí, tedy teoreticky ve středu zkušebního tělesa. Častým jevem je kruhová trhlinka a následné proražení kruhové části. [24]

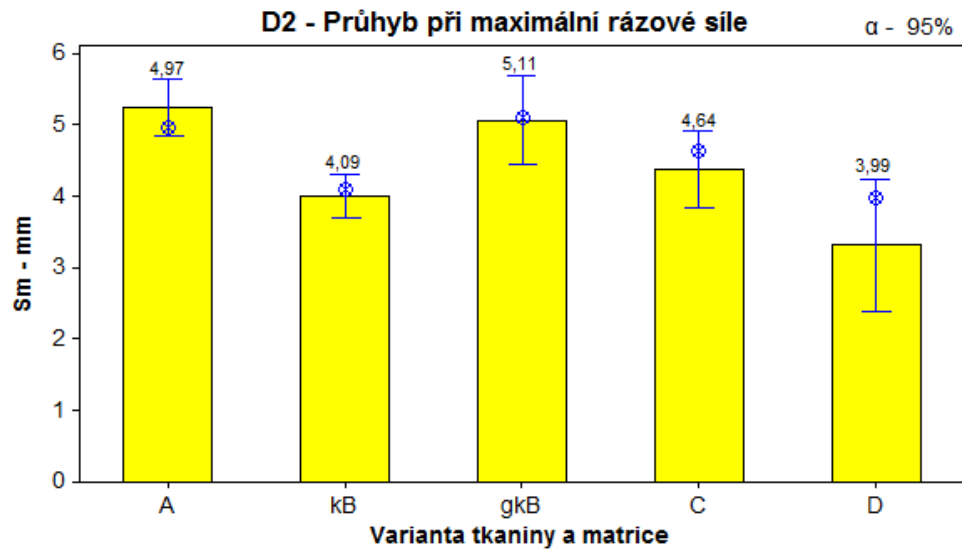
Při zkoušce byla nastavena výška pádu 440 mm, teoretická rychlost 23,17 kg vážícího tlouku byla 2,938 m/s. K měření použité desky, s vazbou plátno, byly vyrobené ručním kladením. Desky s keprovou vazbou byly vyrobeny vakuovou infuzí a jedna ze sad obsahovala ochrannou vrstvu gelcoatu. Následující tabulka shrnuje naměřené hodnoty.

Tabulka 15 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku D2.

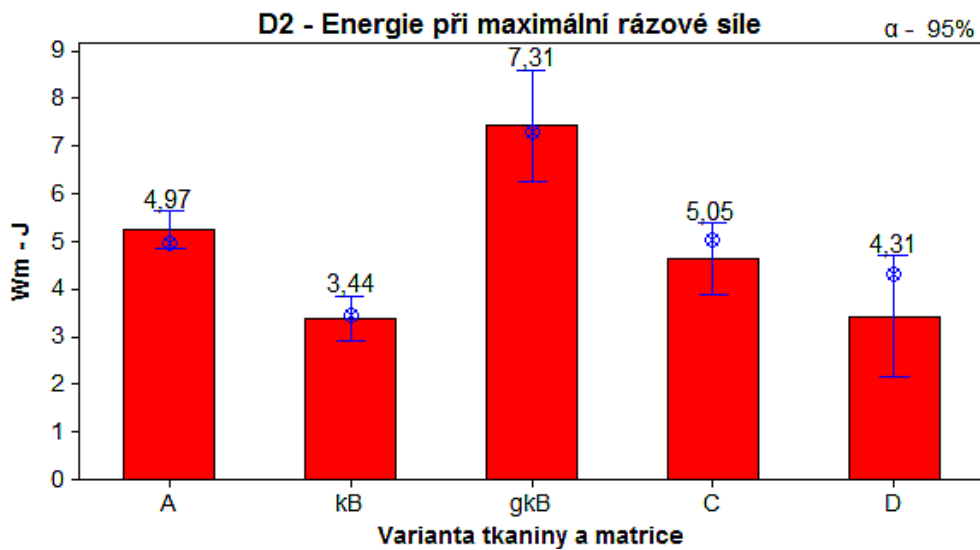
D2_y5X1,8-50x50_90					
yX	A	kB	gkB	C	D
[N]	Maximální rázová síla - F				
\bar{x}	1881,32	1577,22	2310,15	1817,74	2033,26
s	±115,04	±176,01	±136,95	±151,46	±347,64
v	6,11	11,16	5,93	8,33	17,1
[mm]	Průhyb při maximální rázové síle – Sm				
\bar{x}	4,73	4	5,06	4,38	3,32
s	±0,39	±0,24	±0,5	±0,69	±1,21
v	8,21	6,1	9,79	15,71	36,38
[J]	Energie při maximální rázové síle – Wm				
\bar{x}	5,25	3,37	7,43	4,64	3,43
s	±0,54	±0,37	±0,95	±0,99	±1,65
v	10,37	11,1	12,84	21,35	48,08
[%]	Pokles rychlosti po nárazu – Pr				
\bar{x}	3,35	1,99	5,53	2,63	3,04
s	±0,19	±0,22	±0,69	±0,23	±0,46
v	5,73	11,25	12,54	8,65	15,21



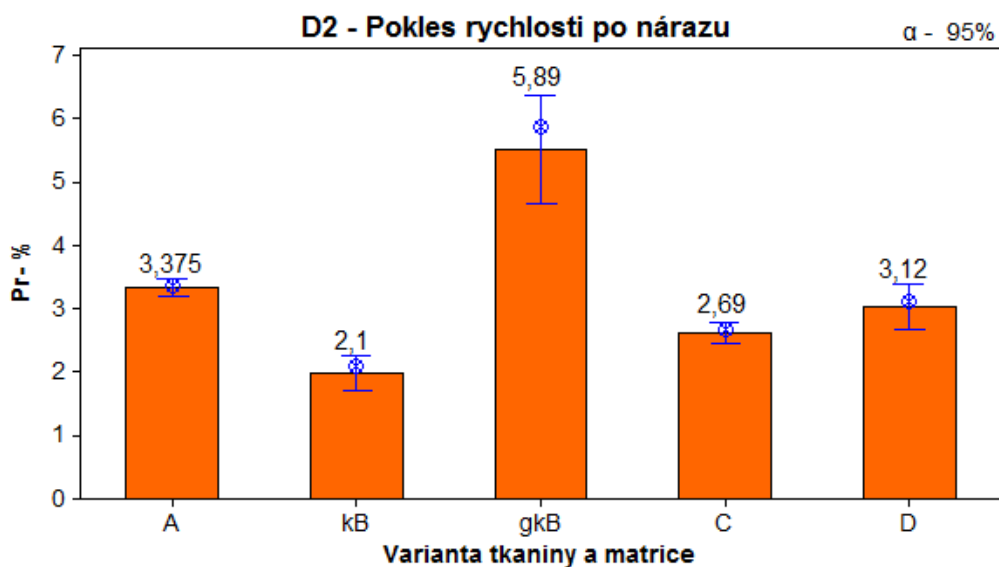
Obrázek 49 Srovnání maximálních rázových sil ve zkoušce D2.



Obrázek 50 Srovnání průhybů při maximální rázové síle ve zkoušce D2.

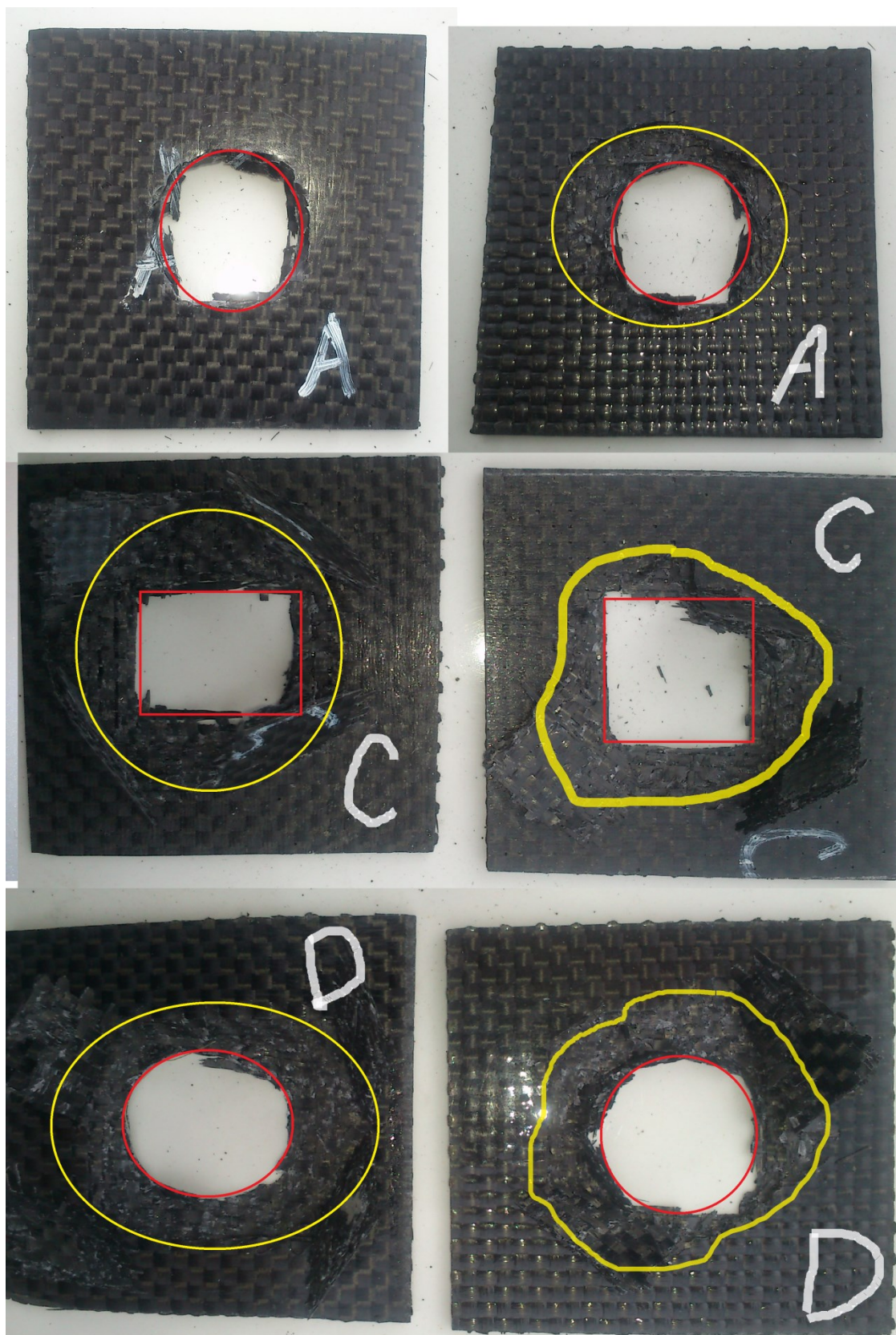


Obrázek 51 Srovnání energie při maximální rázové síle ve zkoušce D2.



Obrázek 52 Srovnání poklesu rychlosti po nárazu ve zkoušce D2.

Následující obrázek poukazuje na rozdílné trhliny ve vzorcích A, C a D. Červeně je zaznačen průraz po tlouku (líc), žlutou čarou je zvýrazněn defekt na druhé straně vzorku (rub).



Obrázek 53 Srovnání desek po průrazu tloukem z A, C, D.

Komentář zkoušky: Zatížení víceosým namáháním poukázalo tyto vlastnosti. U vzorků s použitím vakuové infuze se velmi výrazně projevila vrstva gelcoatu. Potvrdil se její význam, jakožto ochrana výztuže. Neboť ve všech podstatných hodnotách tato sada vzorků zaznamenala lepší výsledky. Například energie potřebná pro průraz vzrostla o více než polovinu. Ostatní sady vzorků vyrobené ručním laminováním vykazovaly sice podobné hodnoty výsledků, ale zato rozdílné způsoby tvorby díry způsobené tloukem. Při pozornějším studování vzorků na obrázku 54 můžeme sledovat, že vzorky ze sady A tvořili zpravidla kruhovou trhlinu a šíření této trhliny bylo podobné přes všechny vrstvy laminátu. Zatímco u vzorků C a D se tato trhlinu s nižší vrstvou zvětšovala a připomínala šíření pod úhlem 45°. Navíc vzorky z C místo kruhové trhliny tvořili trhlinu spíše pravoúhlého tvaru, jakoby kopírovala vazbu tkaniny. Dalším poznatkem může být vliv výroby. Vidíme, že vzorky vyrobené vakuovou infuzí bez vrstvy gelcoat dosahují nejnižších hodnot. Dle mého je to dáno podílem matrice, kdy právě u vakuové infuze dosahuje tento podíl jen 35% než právě u ručního kladení, kde se běžně pohybuje na 60-ti% podílu matrice.

7.3 Zkoušky pro stanovení chování při statickém namáhání

Ze statických zkoušek byly vybrány dvě, aby pomohli k nahlédnutí a popsání spojení tkanina-matrice. Těmi jsou zkouška ohybová, která demonstruje ohybovou tuhost laminátů, což je jeden z důležitých parametrů každého laminátu a zkouška tlakem, která na druhé straně ukazuje kvalitu spojení tkanina-matrice. Zároveň podává pohled na to, jak dokáže matrice udržet vlákna v přímém směru, aby nedocházelo k jejich nestabilitě s následným zborcením, a jakým způsobem proběhne poškození, jestli se vzorek delaminuje nebo ustříhne.

7.3.1 Zkouška S2 - ČSN EN ISO 14125

Pro určení elastických a pevnostních charakteristik při ohybu je nutné počítat s předpokladem lineárního rozdělení normálových napětí po průřezu. Výsledné hodnoty pevnosti v ohybu pak výrazně závisí na rozložení vláken vzhledem k neutrální ose. Zkouška probíhala na třibodovém uložení. Při tomto experimentu se ve zkušební tělese vyskytuje napjatost s maximálním zatížením a také definovaným místem porušení v bodě zatížení – lomem. Proto tedy maximální smykové napětí je vytvořeno uprostřed tloušťky tělesa mezi vrstvami.

Ohybová zkouška byla provedena na čtyřech sadách vzorků. Byly otestovány všechny druhy pryskyřic, avšak u jedné pryskyřice bylo použito tkaniny s vazbou kepr – konkrétně u

pryskyřice B. Výsledné hodnoty mají v první řadě význam srovnávací. Norma poukazuje na druh porušení. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

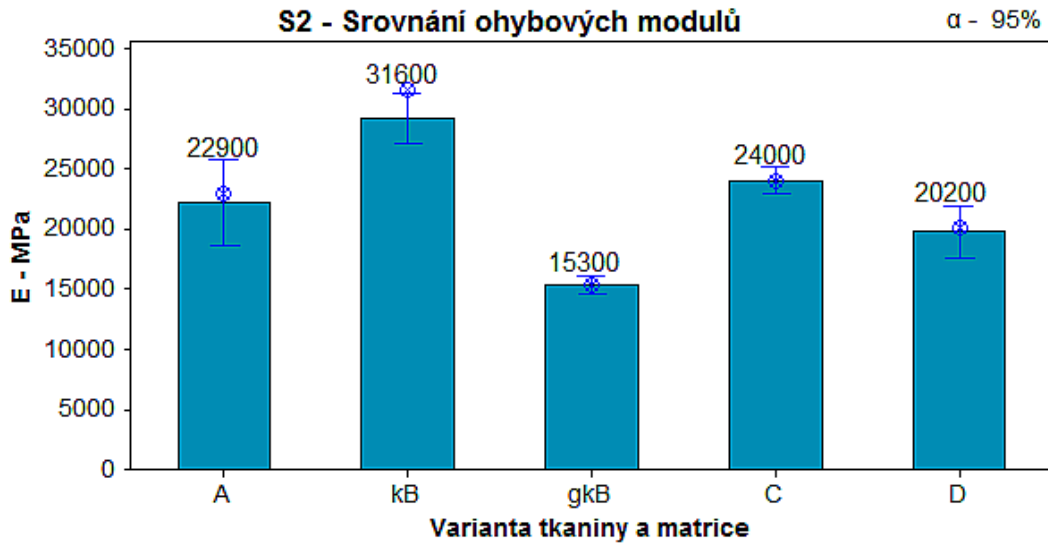
Tabulka 16 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku S2.

S2_y5X1,8-40x20_90/15					
γX	A	kB	gkB	C	D
[MPa]	Ohybový modul - E				
\bar{x}	22200	29100	15400	24100	19800
s	±6500	±4980	±1910	±2230	±3780
v	29,27	17,14	12,41	9,25	19,11
[MPa]	Mez pevnosti v ohybu – σ_t				
\bar{x}	501	640	420	407	481
s	±71,9	±54,1	±33,2	±33	±86,4
v	14,35	8,45	7,91	8,12	17,96
[%]	Průhyb při maximální síle – ΔL				
\bar{x}	1,9	2,1	2,4	1,8	1,7
s	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,3
v	7,71	5,58	6,24	6,83	19,94
[J]	práce na mezi pevnosti – W				
\bar{x}	647,96	853,19	746,79	485,37	521,27
s	±145,54	±92,25	±82,9	±63,54	±187,89
v	22,46	10,81	11,1	13,09	36,05

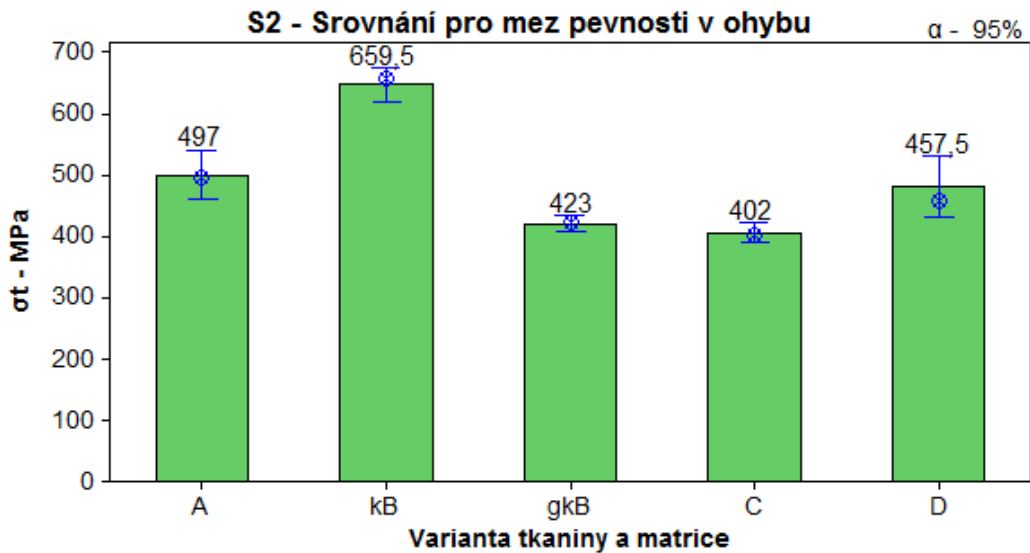
Následující obrázek znázorňuje zatížené těleso při zkoušce trojbodovým ohybem.



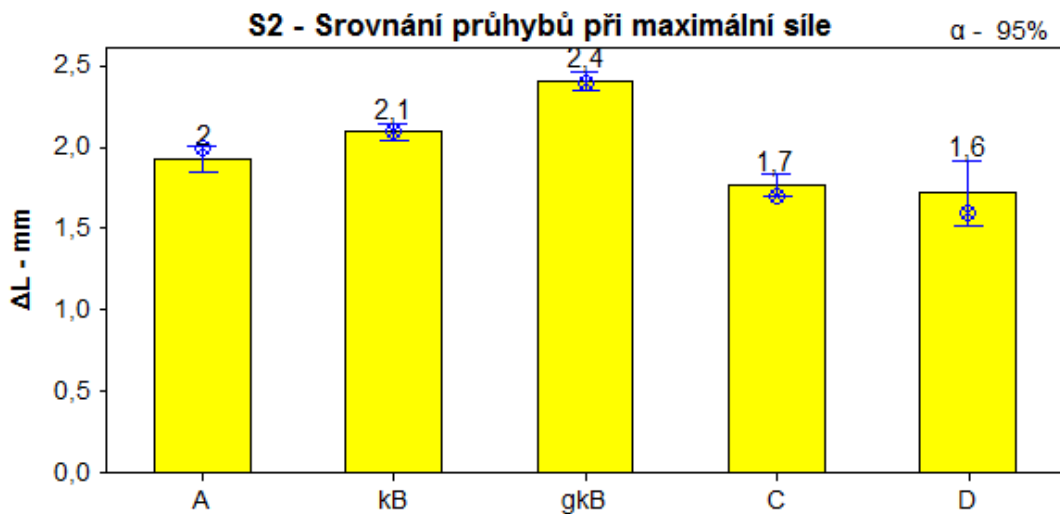
Obrázek 54 Pohled na těleso při zkoušce S2.



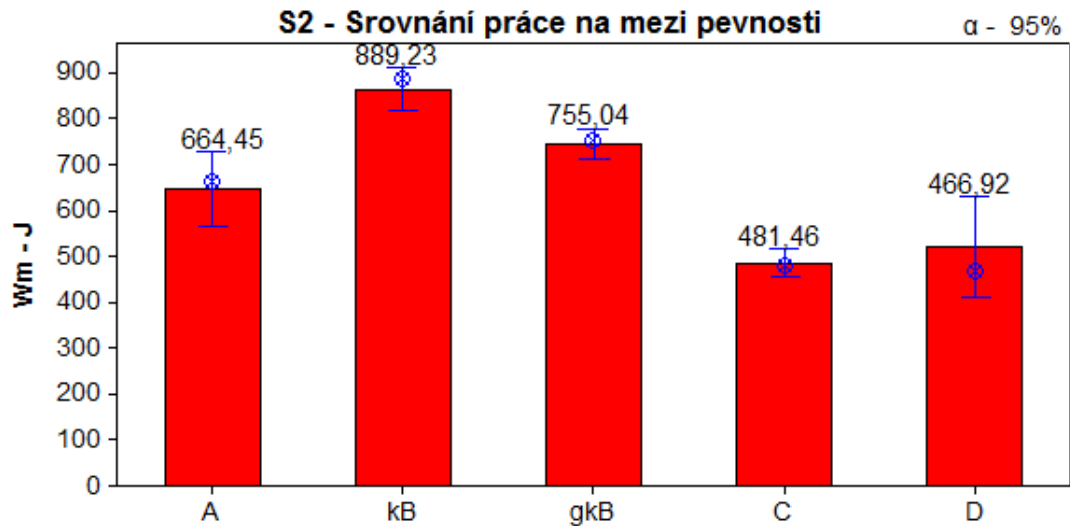
Obrázek 55 Srovnání ohybových modulů ve zkoušce S2.



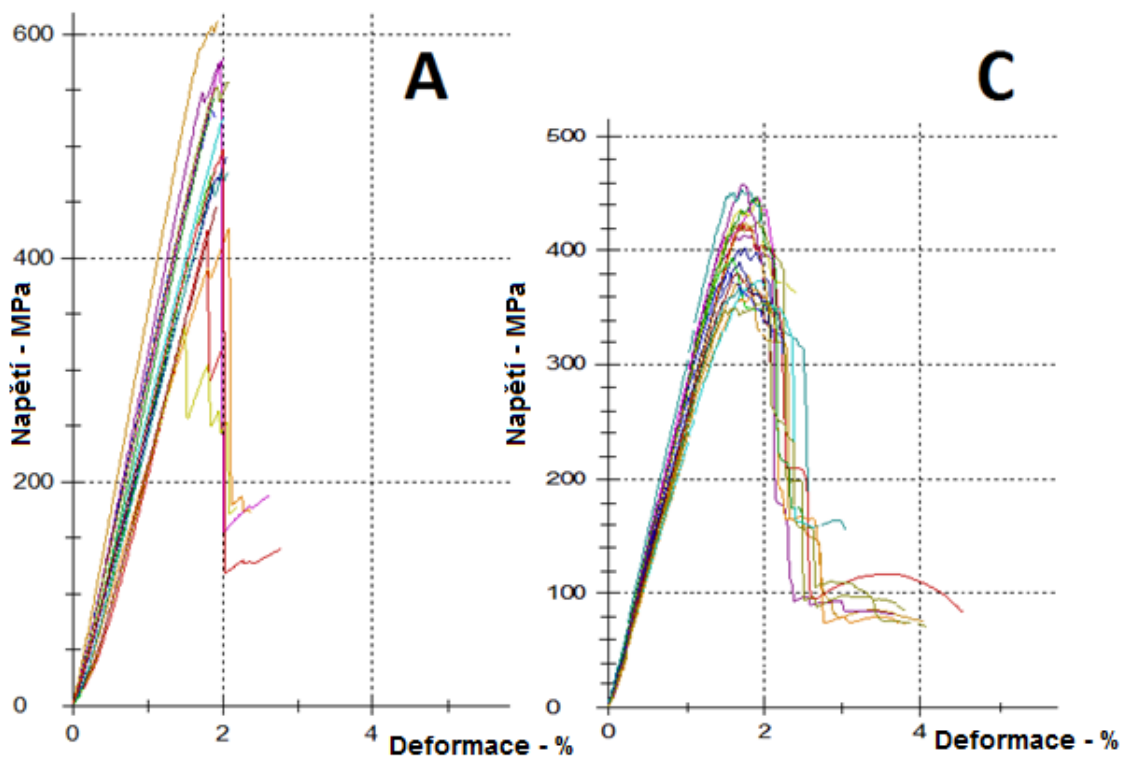
Obrázek 56 Srovnání pro mez pevnosti v ohybu ve zkoušce S2.



Obrázek 57 Srovnání průhybu při maximální síle ve zkoušce S2.



Obrázek 58 Srovnání práce na mezi pevnosti ve zkoušce S2.



Obrázek 59 Srovnání průběhu napětí při průhybu pro A a C ve zkoušce S2.

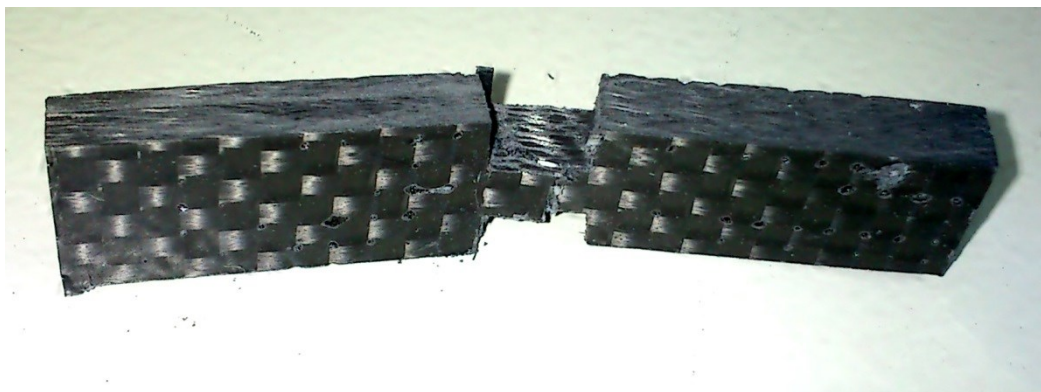
Shrnutí zkoušky: Ohybová zkouška vychází především z rozměru zatěžovaného vzorku. Může se tedy zdát, že vzorky z vrstvou gelcoatu jsou výrazně horší v modulu pružnosti. Je třeba si uvědomit, že neutrální osa se zde více posouvá ke křehčí vrstvě gelcoatu a tato více ovlivňuje výsledný modul. Na druhou stranu stejný vzorek bez této vrstvy vykázal naopak nejlepší výsledky. Pokud bychom uvažovali, že porušením této vrstvy dojde k poškození celého laminátu, je velmi důležité tloušťku této vrstvy správně navrhnout. Obrázek průběhu napětí a deformace srovnává vedle sebe nejlepší a nejslabší vzorky vyrobené ručním

kladením. Na průběhu deformace vidíme u sady A tuhost a křehkost, kdy vzorky dosáhnou maximální pevnosti a poté prasknou. Zatímco u sady C je pravděpodobná větší pružnost a houževnatost vlivem delšího rozmezí deformace, než dojde k porušení. Problém nastane ve chvíli, kdy se podíváme na průhyb při maximální síle. Vzorek A vydržel větší průhyb při větším napětí než vzorky C a D. Avšak největší měrou se zde opět projevil vliv technologie výroby, kdy vzorky takto vyrobené ukazují výhody většího podílu výztuže.

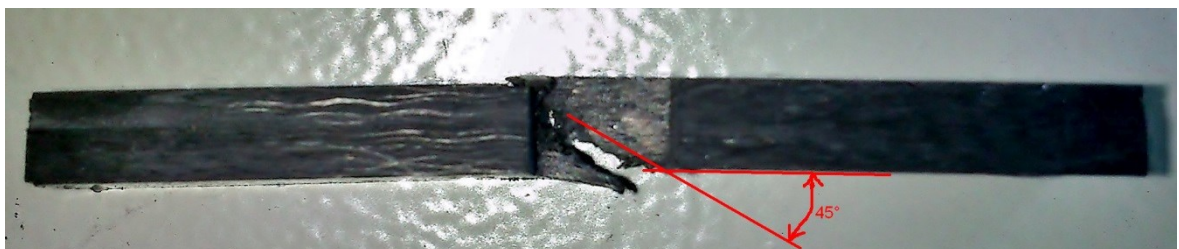
7.3.2 Zkouška S3 - ČSN EN ISO 604

Norma popisuje metody pro stanovení vlastností plastů ze zkoušky tlakem. Zkušební těleso je stlačováno podél své hlavní osy do výskytu lomu nebo do okamžiku, kdy zatížení nebo zkrácení délky zkušebního tělesa dosáhne definované hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso. Metoda umožňuje použít předzatížení zkušebního tělesa, s cílem eliminovat zakřivení závislosti napětí/poměrné stlačení. Modul pružnosti v tlaku lze stanovit výpočtem ze dvou hodnot napětí na křivce nebo lineární regresí mezi těmito dvěma body. [25]

Následující obrázky znázorňují těleso po zkoušce. Je zde vidět krásný příklad deformačního stavu z teoretického modelu mohrovy kružnice, kdy proběhla deformace pod úhlem 45° , což ukazuje na deformaci smykem.



Obrázek 60 Pohled na těleso po zkoušce S3.



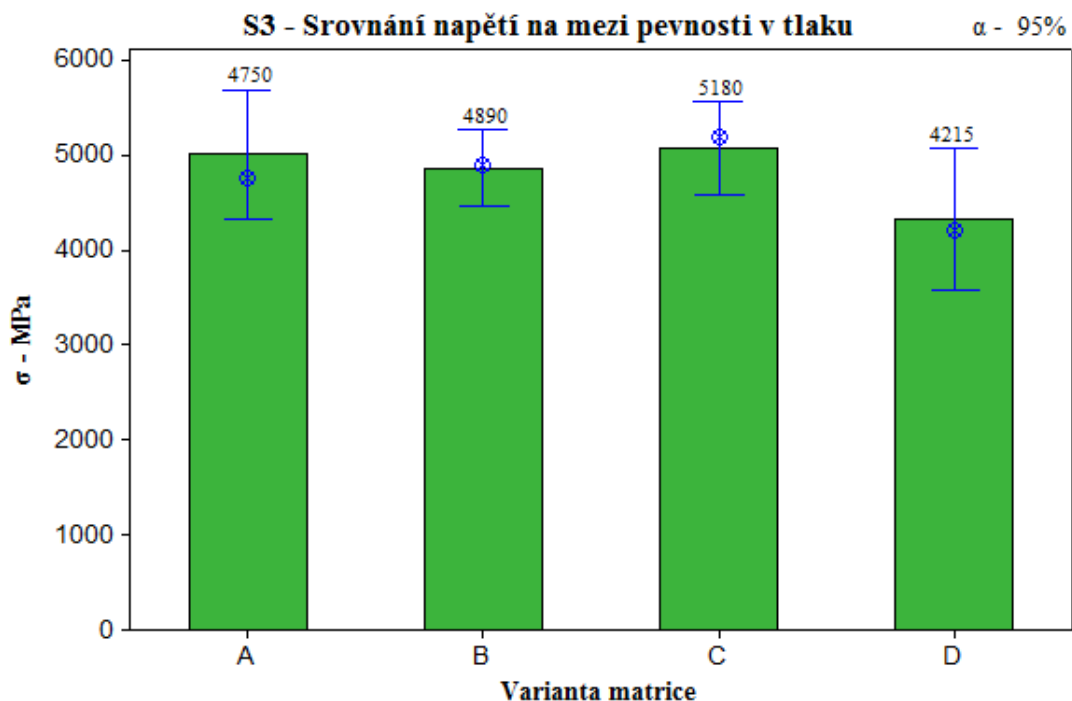
Obrázek 61 Znárodnění lomu na tělese po zkoušce S3.

Tabulka 17 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku S3.

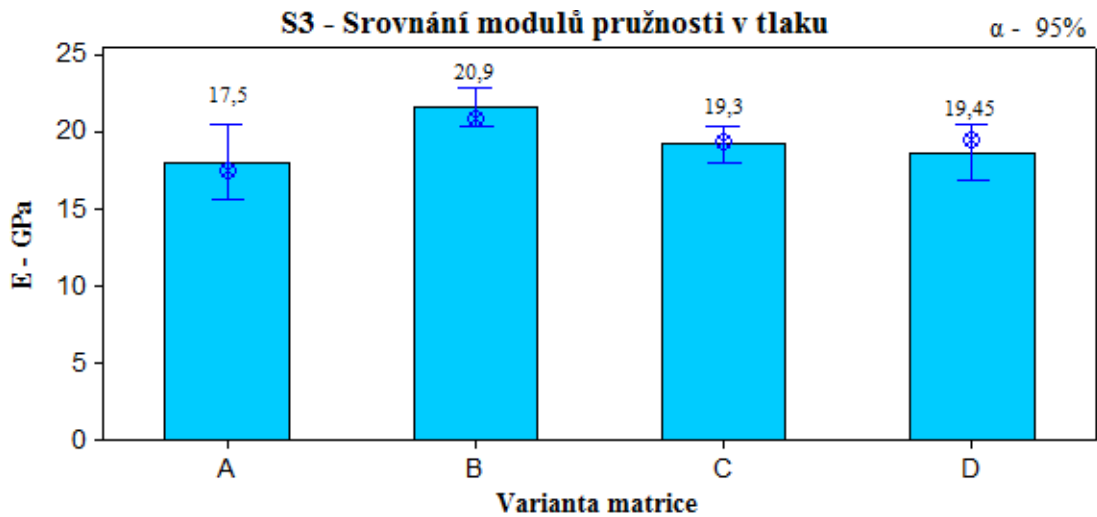
S3_p14X4_50x10_90/8-drazka 6 tl.4

X	A	B	C	D
[GPa]	Modul pružnosti v tlaku- E			
\bar{x}	18,00	21,6	19,20	18,63
s	±2,67	±1,89	±1,52	±1,82
v	14,82	8,75	7,90	17,23
[MPa]	Mez pevnosti v tlaku – σ			
\bar{x}	5010	4860	5070	4340
s	±730	±607	±641	±873
v	14,58	12,49	12,62	20,13
[%]	Deformace při maximálním tlaku – ΔL			
\bar{x}	1,30	0,90	1,00	1,00
s	±0,20	±0,10	±0,20	±0,20
v	17,90	10,23	20,23	21,98
[J]	Práce na mezi pevnosti – W			
\bar{x}	2730,43	1838,99	2013,58	1969,39
s	±889,47	±381,25	±454,13	±747,79
v	32,58	20,73	22,55	37,97

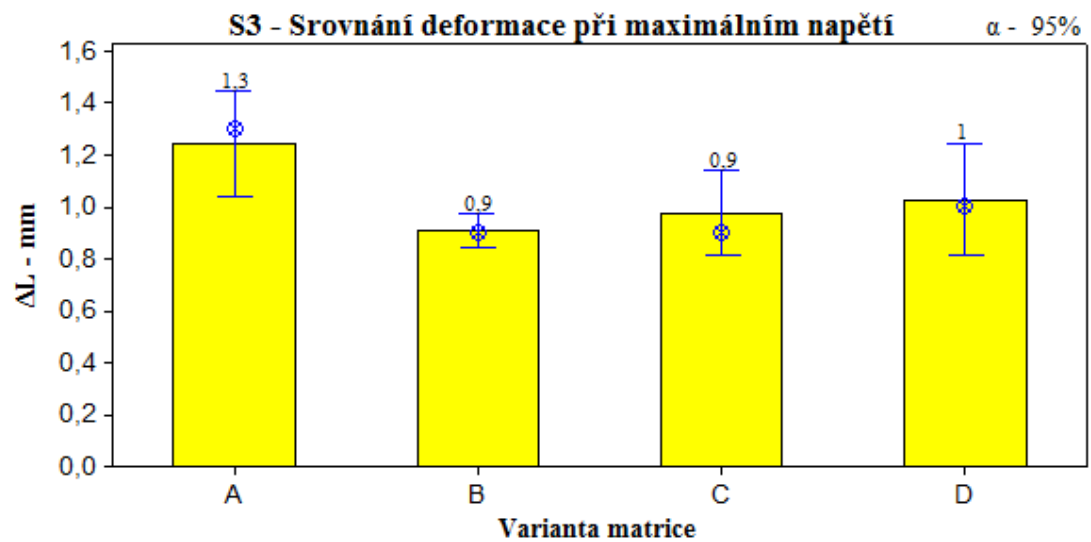
Ve zkoušce byly všechny sady vzorků vyrobeny z tkaniny plátna. Měly frézou vyrobenou drážku pro dosažení vhodného místa porušení a obsahovaly čtrnáct vrstev tkaniny. Výroba byla ručním kladením s využitím tlaku. Proto výsledná tloušťka byla $(4 \pm 0,1)$ mm.



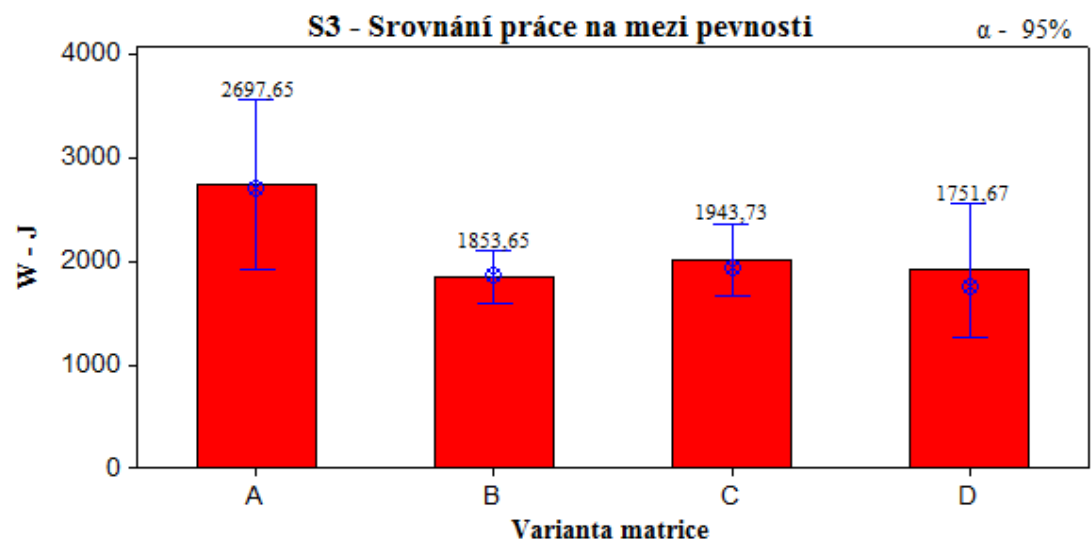
Obrázek 62 Srovnání napětí na mezi pevnosti ve zkoušce S3.



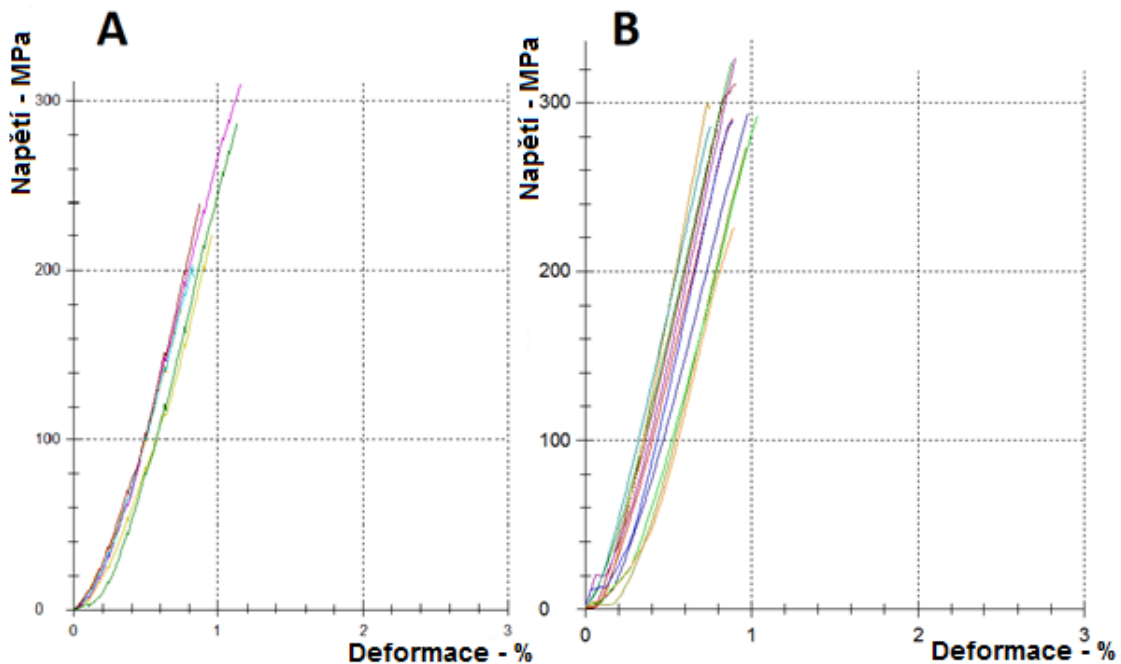
Obrázek 63 Srovnání modulů pružnosti ve zkoušce S3.



Obrázek 64 Srovnání deformace při zkoušce S3.



Obrázek 65 Srovnání práce na mezi pevnosti ve zkoušce S3.

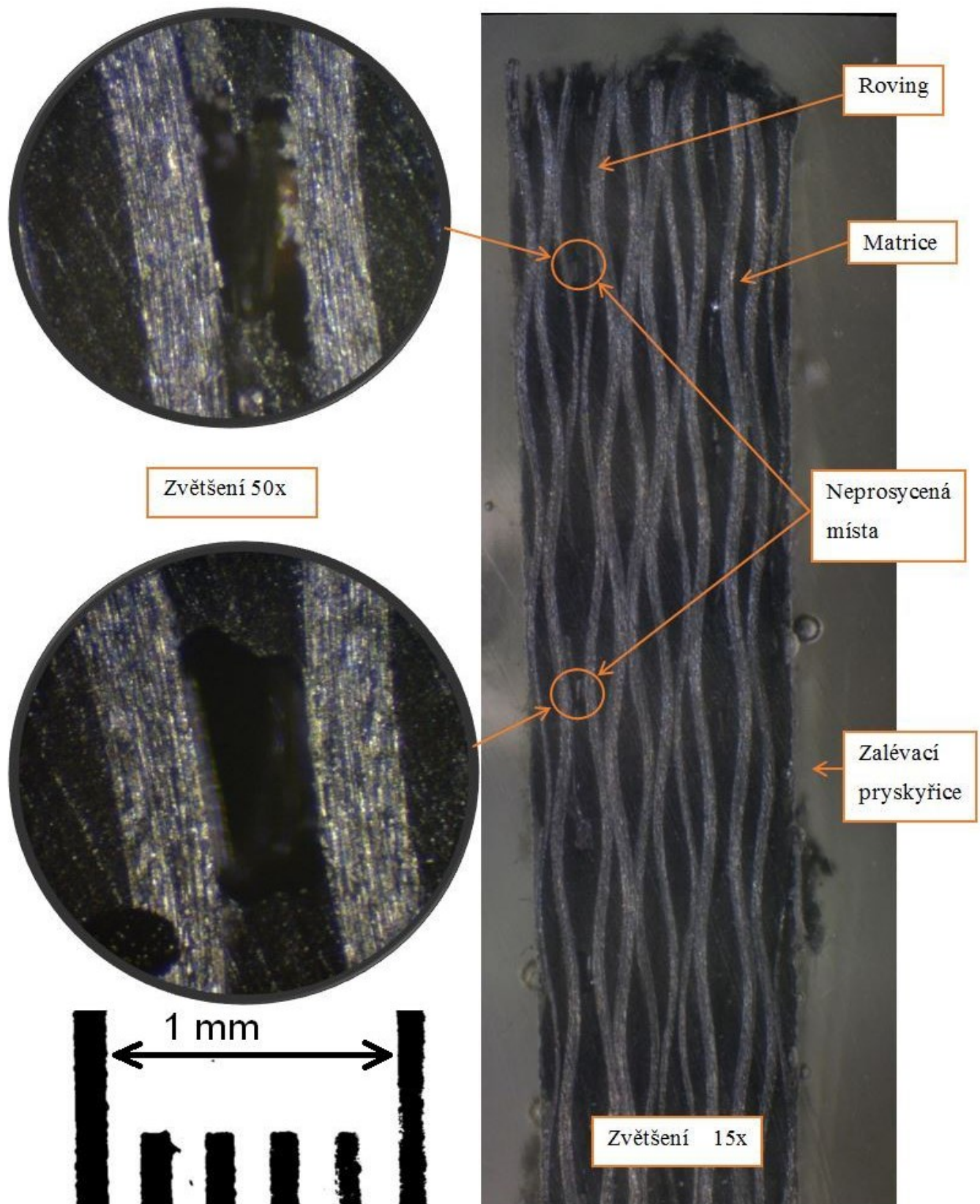


Obrázek 66 Srovnání průběhu napětí pro matrice A a B ve zkoušce S3.

Shrnutí zkoušky: Z výsledků tlakového namáhání pozoruji, že mezi jednotlivými pryskyřicemi není výrazné odchytky. Srovnáním meze pevnosti v tlaku vidíme vyrovnanost jednotlivých sad. Můžeme tedy usuzovat, že všechny pryskyřice dosahují se stejnou tkaninou podobných výsledků ve všech vyhodnocených parametrech.

7.4 Přiblížení struktury pod mikroskopem

V závěru všeho měření byl proveden subjektivní rozbor ručně kladeného vzorku o třinácti vrstvách plátnové tkaniny při pohledu pod mikroskopem Carl Zeiss Jena, vybaveným okulárem Dinocapture 2.0. V rámci možností však byl proveden tento pohled pouze na jeden vzorek. Tento laminát byl vyroben pryskyřicí C. Rozbor se zaměřoval na neprosycená místa. Vzorek zalitý do pryskyřice, který byl následně vybroušen, byl pozorován se zvětšením nejprve 15x, a následně se zvětšením 50x. Byly přiblíženy specifická místa vykazující nějaký defekt. Největší neprosycená místa byla pozorovatelná již pouhým okem. Rozměr původního vzorku byl přibližně 30x3,5mm.



Obrázek 67 Pohled na vzorek při zvětšení 15x s detaily zvětšenými 50x.

ZÁVĚR

Na počátku této práce jsem si ve spolupráci se společností Kordárna Plus a.s. stanovil cíl ověřit, jaký vliv má změna epoxidové pryskyřice na výsledné vlastnosti kompozitu se zaměřením na soudržnost tkanina-matrice. Pro zkvalitnění marketingové propagace nově zavedené výroby tkaniny této společnosti a ověření kvality výroby, jsme chtěli naplnit tento cíl. Bylo využito tkaniny s vazbou plátno a kepr o jednotné gramáži a čtyř druhů komerčně dostupných epoxidových pryskyřic označených velkými počátečními písmeny abecedy (A, B, C, D).

Kompozitní materiály s uhlíkovou výztuží, se vyznačují významně lepšími vlastnostmi v porovnání s jinými druhy výztuže. Je to způsobeno strukturou uhlíkového vlákna, které se zvyšující se hodnotou napětí, zvyšuje svoji hodnotu modulu pružnosti. Je to dáno vlivem přetvoření struktury grafitu ve vlákno meziatomovými silami při tahovém zatížení. Výhody uhlíkových vláken spočívají zejména ve vysoké hodnotě modulu pružnosti, vysoké pevnosti, minimální hodnotě prodloužení. Ale jejich zásadní nevýhodou je jejich křehkost, protože takto nelze v konstrukčních aplikacích použít vlákno samostatně. Přístupuje se proto při zpracovatelských technologiích k udržení vláken pomocí matrice, která má za úlohu fixovat jejich polohu v prostoru. Další vlastností matrice je to, že přenáší ostatní kombinace namáhání, a pak také chrání vlákna před vlivem vnějšího prostředí. Konstrukce těchto kompozitů by tedy měla být taková, aby uhlíkové vlákno přenášelo tahové zatížení, čímž využijeme všech jeho vlastností, zatímco matrice má být uzpůsobena tak, aby pomáhala kompozitní struktuře v přenášení především tlakového namáhání, které ovšem v kompozitní struktuře nebývá osamoceno a tak jde, ve většině případů, o membránovou napjatost.

Z původně navržených měření, po studiu literatury a úvodních pokusech, jsem zjistil následující. Peel-testy, kterými jsem chtěl měřit sílu potřebnou pro odlup, byly z českých norem vyřazeny a u jiné verze národních norem se nepodařilo námi dostupnými technologiemi vyrobit vhodně měřitelné zkušební těleso. Zatímco H-test byl vlivem křehkosti vlákna nerealizovatelný pro správné vyhodnocení, scratch test jsem neuskutečnil z důvodu křehkosti matrice a její malé tvrdosti. Další variantou měření byly testy na vytrhnutí vlákna, od kterých jsem odstoupil, protože výsledky takto získaných měření, jsou příliš vzdálené od reálných hodnot v laminátech. Zkouška pro stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti již mohla poskytnout kvantifikovatelný výsledek týkající se soudržnosti tkanina-matrice, avšak při měření se ukázalo, že ani tato zkouška není vhodná, protože defor-

mace vzorků nevykázala mezilaminární smykové porušení, nýbrž jen deformaci vlivem prostého ohybu. Z toho předpokládám vysokou míru mezilaminární smykové pevnosti vyrobeného laminátu. Z těchto dosavadních poznatků jsem se rozhodl pro změnu přístupu k měření, zaměřenou více na smykové a membránové namáhání, jakožto vhodnější způsob ověření soudržnosti tkaniny a matrice. Tomu odpovídá výsledné zaměření praktické části.

Nyní shrňme výsledky jednotlivých zkoušek, které byly provedeny ve třech částech testů. V první části testů jsem se zaměřil na soudržnost tkanina-matrice. Úvodní zkouška stanovila smykovou pevnost v rovině tahovou zkouškou na laminátech, s úhlem výztuže k hlavní ose $\pm 45^\circ$. Z této zkoušky vyplynulo, že výsledná pevnost není ve všech laminátech přibližně stejná, jak se na počátku očekávalo. Ukázalo se, že volbou druhu pryskyřice lze vyrobit buď pevný a křehký laminát (pryskyřice A, B), anebo naopak laminát pružnější a houževnatější (pryskyřice C, D). V další zkoušce této části měření, jsem se zaměřil na stanovení modulu pružnosti ve smyku. Zde se ukázalo, že výsledné hodnoty jsou závislé na použité výrobní technologii. Jestliže je výrobní technologie stejná, dosahují výsledné hodnoty přibližně stejných čísel. V posledním testu této části bylo vyhodnoceno mezní smykové napětí pro pevnost ve smyku mezi vrstvami. Zde se opět potvrdil vliv výrobní technologie na výsledné hodnoty pevnosti.

V druhé části testů byly provedeny dvě zkoušky zaměřené na dynamické namáhání. První z nich stanovuje rázovou houževnatost v tahu. Zde se neprojevila výrazná odlišnost hodnot výsledků. Ve druhé zkoušce se jedná o víceosé rázové namáhání. V těchto výsledcích naopak se projevilo více vlivů. Jednak se zde ukázala důležitost ochranné vrstvy gelcoat a jednak způsob výroby. Z výsledných hodnot usuzuji, že využití vakuové infuze bez použití vrstvy gelcoat ztrácí význam. Dále se zde zajímavým způsobem projevila změna matrice, a to na způsobu poškození vzorku.

Třetí část testů se věnovala statickému namáhání. I zde proběhly dvě zkoušky. V ohybové zkoušce lze opět ze získaných výsledků usuzovat, že volba pryskyřice má vliv na výsledné vlastnosti laminátu. Z grafických průběhů testů se domnívám, že pryskyřice A a B vytváří pevnější a křehčí laminát, zatímco pryskyřice C a D pružnější a houževnatější laminát. V poslední zkoušce byly lamináty podrobeny tlakovému namáhání. Mezi výslednými hodnotami se neobjevily výrazné odchylky, tudíž předpokládám, že matrice ve všech případech plní svoji úlohu fixovat polohu vlákna v prostoru. Zároveň se naplnily očekávané mechanismy porušení.

Po shrnutí všech výsledků usuzuji, že využití synergického chování kompozitu úzce souvisí s kvalitou soudržnosti mezi vyztužujícími vlákny a matricí. Na této kvalitě se jednak podílí výrobní technologie a jednak volba epoxidové pryskyřice, neboť i pouhou změnou epoxidové pryskyřice lze docílit buď pevnějšího a křehčího laminátu, nebo naopak pružnějšího a houževnatějšího laminátu, na což výrazně poukázaly některé experimenty současně.

Při pohledu na makrostrukturu jsem zaznamenal strukturu kompozitního systému v řezu, byl to kompozit o třinácti vrstvách tkaniny vyrobený technologií ručního laminování s využitím tlaku. Na snímku je možno pozorovat zvlhčené svazky rovingu v matrici a neprosycená místa. Celkově je možno odhadnout výslednou kvalitu výroby. Čím kvalitnější technologie, tím by kompozit měl obsahovat menší množství vnitřních nedokonalostí. Na tomto vzorku je vidět výskyt neprosycených míst v místě, kde se výrazněji přibližují svazky vláken jednotlivých vrstev. Mezi způsoby jak omezit výskyt neprosycených míst se zařazuje využití automatizovaných technologií na polohování tkaniny, využití infuzních procesů nebo využitím prepregu, které se nejčastěji využívají v leteckém průmyslu pro jejich optimální poměr množství matrice na vlákno a právě pouze touto technologií můžeme dosáhnout podíl neprosycených míst menší než 3%. V diplomové práci jsme používali ruční technologie přípravy kompozitní struktury, které se pro svou jednoduchost využívají nejčastěji a můžeme pomocí nich zminimalizovat počet suchých míst zkušenostmi pracovníka a správně nastavenými technologickými podmínkami.

V současné době je využití kompozitů s uhlíkovými vlákny na vzestupu. Jsou zde oblasti, kde jejich nahrazení zatím není možné, pro jejich jedinečné vlastnosti. Dalším směrem, jakým by se mohl zaměřit následný vývoj je dle mého oblast využití prepregů či definování konstrukčních principů. Námětem na pokračování této práce by mohlo být srovnání při teplotních zkouškách, ověřit vlastnosti v cyklickém namáhání nebo porovnat výsledný laminát s hybridní tkaninou či s využitím fenolických pryskyřic. Zajímavým prvkem by mohlo být i úprava tkaniny jako například gama zářením, povrch vláken nebo válcování.

Získané experimentální výsledky jsou významné pro společnost Kordárna Plus a.s. která iniciovala téma moji diplomové práce a stěžejní částí bylo studium vzájemné soudržnosti kompozitní struktury. Výběr matric byl konzultován s výrobcí matric a podléhal jejich vhodnosti a komerční dostupnosti epoxidových systémů, které lze využít v kombinaci s uhlíkovými vlákny.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 80-737-2279-8.
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [4] CHUNG, Deborah D.L. *Composite materials science and applications*. 2nd ed. London: Springer, 2010. ISBN 978-184-8828-315.
- [5] MALLICK, P.K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007, 619 s. ISBN 08-493-4205-8.
- [6] BOUKHAROUBA, Taoufik, Mimoun ELBOUJDANI a Guy PLUVINAGE. *Damage and fracture mechanics: failure analysis of engineering materials and structures*. Dordrecht, The Netherlands: Springer Verlag, 2009, xxv, 611 p. ISBN 9789048126699-.
- [7] *Fracture and damage of composites*. Editor M Guagliano, M Alibadi. Southampton: WIT Press, 2006, 288 s. ISBN 18-531-2669-1.
- [8] WANBERG, John. *Composite materials: fabrication handbook 2*. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2010. ISBN 978-192-9133-932.
- [9] MACHEK, Václav, Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu (4. část): Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [10] HARPER, Charles A. *Handbook of plastics, elastomers, and composites*. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.
- [11] JANČÁŘ, Josef. ÚCHM FCH VUT BRNO. *Úvod do materiálového inženýrství kompozitů*. Brno, 1999.
- [12] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů*. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474. Inovace VŠ oborů strojního zaměření. VUT Brno.
- [13] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.

- [14] GUDE, M.R., S.G. PROLONGO a A. UREÑA. Adhesive bonding of carbon fibre/epoxy laminates: Correlation between surface and mechanical properties. *Surface and Coatings Technology*. 2012, vol. 207, 602-607, s. 602-607. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2012.07.085. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025789721200775X>
- [15] LEE, Jinyong a Lawrence T. DRZAL. Surface characterization and adhesion of carbon fibers to epoxy and polycarbonate. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2005, vol. 25, issue 5, s. 389-394. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2004.11.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749604001289>
- [16] DAI, Zhishuang, Fenghui SHI, Baoyan ZHANG, Min LI a Zuoguang ZHANG. Effect of sizing on carbon fiber surface properties and fibers/epoxy interfacial adhesion. *Applied Surface Science*. 2011, vol. 257, issue 15, s. 6980-6985. DOI: 10.1016/j.apsusc.2011.03.047. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433211004004>
- [17] LIU, Baoying, Zhao LIU, Xiaojun WANG, Gang ZHANG, Shengru LONG a Jie YANG. Interfacial shear strength of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide measured by the microbond test. *Polymer Testing*. 2013, vol. 32, issue 4, s. 724-730. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.03.020. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941813000603>
- [18] ČSN EN 2374. *Letectví a kosmonautika - Výroba zkušebních těles*. Praha: Český normalizační ústav, 1996.
- [19] ČSN EN ISO 14 129. *Vláknny vyztužené plastové kompozity - Tahová zkouška na $\pm 45^\circ$ laminátech pro stanovení křivky smykové napětí/deformace, smykového modulu a smykové pevnosti v rovině*. Praha: Český normalizační ústav, 1999.
- [20] ČSN 64 0662. *Stanovení pevnosti ve smyku mezi vrstvami vyztužených plastů*. Praha: Český normalizační ústav, 1973.
- [21] ČSN EN ISO 15 310. *Vláknny vyztužené plastové kompozity - Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzní desky*. Praha: Český normalizační ústav, 2006.
- [22] ČSN EN ISO 14 130. *Vláknny vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku*. Praha: Český normalizační ústav, 1999.

- [23] ČSN EN ISO 8256. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti v tahu*. Praha: Český normalizační ústav, 2005.
- [24] ČSN EN ISO 6603-2. *Plasty - Stanovení chování tuhých plastů při víceosém rázovém namáhání - Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Český normalizační ústav, 2001.
- [25] ČSN EN ISO 604. *Plasty - Stanovení tlakových vlastností*. Praha: Český normalizační ústav, 2004.
- [26] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Český normalizační ústav, 2003.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	pravděpodobnostní interval věrohodnosti průměrné odchylky
atd.	A tak dále
tzv.	Takzvaně
PAN	Polyakrylonitril
HT	Standardní modulové vlákno
IM	Středně-modulové vlákno
HM	Vysokomodulové vlákno
UHM	Ultravysokomodulové vlákno
EP	Epoxidy
PES	Polyethersulfid
PEEK	Polyaryletherketon
PA66	Polyamid 66
PC	Polykarbonát
PP	Polypropylen
UV	Ultrafialové
Org.	Organická
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
EN	Evropské normy
ČSN	Česká technická norma
\bar{x}	Aritmetický průměr
s	Směrodatná odchylka
v	Variační koeficient [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma kompozitního laminátu. [10]	12
Obrázek 2 Příklad anizotropie pevnosti vláknového kompozitu. [2]	15
Obrázek 3 Schéma výroby uhlíkových vláken z PAN. [1].....	16
Obrázek 4 Rozdělení uhlíkových vláken (ve stavu bezprostředně po výrobě). [1].....	17
Obrázek 5 Charakteristické uspořádání laminátu. [5]	18
Obrázek 6 Klasifikace vláknových kompozitů z geometrického pohledu. [12].....	19
Obrázek 7 Druhy vazeb vyztužujících tkanin. [1]	19
Obrázek 8 Znázornění povrchových energií a kontaktního úhlu. [3].....	20
Obrázek 9 Viskozity polymerů při prosycování vyztužujících vláken.[1]	21
Obrázek 10 Chemická reakce v epoxidové pryskyřici. [4].....	22
Obrázek 11 Detailná pohled na oblast mezifáze. [7]	23
Obrázek 12 Znázornění přenosu zatížení z matrice do vlákna. [2]	24
Obrázek 13 Znázornění styčných ploch rozhraní vlákno-matrice. [4]	25
Obrázek 14 Pohled na struktury uhlíkových vláken po mechanické úpravě. [14]	25
Obrázek 15 Kapka smáčivé-A a nesmáčivé-B kapaliny na pevném povrchu. [2]	26
Obrázek 16 Rovnováha povrchových napětí unitř dvou fází v kompozitu. [2].....	26
Obrázek 17 Znázornění měření normálového-A a tečného-B adhezního napětí. [1]	28
Obrázek 18 Schéma vytrhávacích zkoušek. [2,16].....	29
Obrázek 19 Zkušební těleso pro ČSN EN ISO 1429. [19]	30
Obrázek 20 Zkušební těleso pro ČSN 64 0662. [20].....	31
Obrázek 21 Znázornění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 15310. [21]	31
Obrázek 22 Znázornění průběhu zkoušky ČSN EN ISO 14 130. [22].....	32
Obrázek 23 Místa vzniku mezilaminárního smykového napětí. [6].....	32
Obrázek 24 Schéma ručního kladení. [1].....	34
Obrázek 25 Schéma vakuové infuze. [1]	35
Obrázek 26 Schéma vazby plátno.....	39
Obrázek 27 Schéma vazby kepr.....	39
Obrázek 28 Postup výroby vzorků.....	42
Obrázek 29 Univerzální zkušební stroj Zwick 1456	45
Obrázek 30 Zkušební stroj Zwick/roell HIT50P.	46
Obrázek 31 Zkušební stroj Zwick/Roell HIT230F.....	47
Obrázek 32 Pohled na roztržený vzorek po zkoušce A2.	50
Obrázek 33 Grafické průběhy napětí ze zkoušky A2.	51

Obrázek 34 Detailní pohled na způsob porušení vzorků při zkoušce A2.....	51
Obrázek 35 Srovnání napětí na mezi pevnosti u zkoušky A2.	52
Obrázek 36 Srovnání modulů pružnosti dané struktury v tahu u zkoušky A2.	52
Obrázek 37 Srovnání poměrného prodloužení u zkoušky A2.	52
Obrázek 38 Pohled na experiment při zkoušce A3 ve stroji.	54
Obrázek 39 Grafický průběh síly při zatížení na desky z B a C.	54
Obrázek 40 Pohled na porušené těleso po zkoušce A4.	55
Obrázek 41 Graf srovnání pevností ve smyku mezi vrstvami.	56
Obrázek 42 Grafický průběh napětí pro pryskyřice A a C ze zkoušky A4.	56
Obrázek 43 Pohled na roztržené tělísko ze zkoušky D1.	57
Obrázek 44 Srovnání maximálních sil potřebných k přetržení při zkoušce D1.	58
Obrázek 45 Srovnání prodloužení při síle F při zkoušce D1.	58
Obrázek 46 Srovnání energie pod silou F při zkoušce D1.	58
Obrázek 47 Srovnání poklesu rychlosti po nárazu při zkoušce D1.	59
Obrázek 48 Graf průběhu rázové houževnatosti při zkoušce D1.	59
Obrázek 49 Srovnání maximálních rázových sil ve zkoušce D2.....	60
Obrázek 50 Srovnání průhybů při maximální rázové síle ve zkoušce D2.....	61
Obrázek 51 Srovnání energie při maximální rázové síle ve zkoušce D2.	61
Obrázek 52 Srovnání poklesu rychlosti po nárazu ve zkoušce D2.....	61
Obrázek 53 Srovnání desek po průrazu tloučkem z A, C, D.....	62
Obrázek 54 Pohled na těleso při zkoušce S2.	64
Obrázek 55 Srovnání ohybových modulů ve zkoušce S2.....	65
Obrázek 56 Srovnání pro mez pevnosti v ohybu ve zkoušce S2.	65
Obrázek 57 Srovnání průhybu při maximální síle ve zkoušce S2.	65
Obrázek 58 Srovnání práce na mezi pevnosti ve zkoušce S2.	66
Obrázek 59 Srovnání průběhu napětí při průhybu pro A a C ve zkoušce S2.	66
Obrázek 60 Pohled na těleso po zkoušce S3.....	67
Obrázek 61 Znázornění lomu na tělese po zkoušce S3.	67
Obrázek 62 Srovnání napětí na mezi pevnosti ve zkoušce S3.....	68
Obrázek 63 Srovnání modulů pružnosti ve zkoušce S3.	69
Obrázek 64 Srovnání deformace při zkoušce S3.	69
Obrázek 65 Srovnání práce na mezi pevnosti ve zkoušce S3.	69
Obrázek 66 Srovnání průběhu napětí pro matrice A a B ve zkoušce S3.	70
Obrázek 67 Pohled na vzorek při zvětšení 15x s detaily zvětšenými 50x.....	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vlastnosti uhlíkových vláken při normální teplotě. [1].....	17
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti vybraných polymerních matric. [12]	21
Tabulka 3 Hodnoty povrchového napětí běžných kapalin a látek. [2]	27
Tabulka 4 Výrobní technologie kompozitů. [12].....	33
Tabulka 5 Přehled vybraných vlastností pryskyřic.....	40
Tabulka 6 Přehled použitých norem.	43
Tabulka 7 Technické specifikace stroje Zwick 1456.....	44
Tabulka 8 Technické specifikace stroje Zwick/roell HIT50P.	45
Tabulka 9 Přehled měřených veličin na padostroji.....	46
Tabulka 10 Přehled norem a jejich kódové značení.	48
Tabulka 11 Přehled naměřených hodnot ze zkoušky A2.....	50
Tabulka 12 Stanovení modulu pružnosti z lineární charakteristiky průběhu zatížení.	53
Tabulka 13 Přehled naměřených hodnot pro mez pevnosti ve smyku mezi vrstvami ve zkoušce A4.	55
Tabulka 14 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku D1.....	57
Tabulka 15 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku D2.....	60
Tabulka 16 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku S2.....	64
Tabulka 17 Přehled naměřených hodnot pro zkoušku S3.....	67

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Technické listy tkaniny KORDCARBON

Příloha P II: Technické listy použitých pryskyřic

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST TKANIN **KORDCARBON**



Technická specifikace

Výrobek: Uhlíková tkanina CC 200

Vlákno	Osnova	Carbon HS 3K 200 tex
	Útek	Carbon HS 3K 200 tex
Gramáž	200 g/m ² ± 3%	
Vazba	Kepr	
Šířka tkaniny	120 cm	
Dostava	Osnova	5
	Útek	5
Kompatibilita	Epoxydová pryskyřice	
Balení	100 m	

ISO 9001:2008
ISO 14001:2004



KORDÁRNA Plus a.s. • Velká nad Veličkou č. 890 • 696 74 Česká republika
Tel.: +420 518 312 433 • Fax: +420 518 329 240
kord@kordarna.cz • www.kordarna.cz

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST TKANIN KORDCARBON



Technická specifikace

Výrobek: Uhlíková tkanina CC 200

Vlákno	Osnova	Carbon HS 3K 200 tex
	Útek	Carbon HS 3K 200 tex
Gramáž	200 g/m ² ± 3%	
Vazba	Plátno	
Šířka tkaniny	120 cm	
Dostava	Osnova	5
	Útek	5
Kompatibilita	Epoxydová pryskyřice	
Balení	100 m	

ISO 9001:2008
ISO 14001:2004



KORDÁRNA Plus a.s. • Velká nad Veličkou č. 890 • 696 74 Česká republika
Tel.: +420 518 312 433 • Fax: +420 518 329 240
kord@kordarna.cz • www.kordarna.cz

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÉ LISTY POUŽITÝCH PRYSKYŘIC



Havel L285

Laminating resin L 285 Hardener 500

Characteristics

Approval:	--
Application:	Production of composite structures Boat and shipbuilding Sports equipment Model airplanes Moulds and tools
Operational temperature:	-60°C → +50 - 60°C (-75°F → 120 - 140°F) without heat treatment
Processing:	At temperatures between 10°C and 40°C (50-105°F) All usual processing methods
Special properties:	Extremely good physiological compatibility Good mechanical properties Very short curing times even at low temperatures
Special modifications:	L 285 T: Thixotropic L 285 W: White

Application

Low-viscosity laminating resin system not containing solvents or fillers, intended for processing and curing at room temperature. Suitable for production of parts with glass, carbon and aramide fiber reinforcements featuring high static and dynamic loadability. The pot life is approx. 10 - 15 min. Laminating resin L 285 combined with hardener 500 is distinguished by very short curing times even at low temperatures (good curing is assured at temperatures starting at +10 °C). Non-tacky, high-gloss surfaces are obtained even with unfavorable curing conditions, such as lower temperatures or high relative humidity.

The mixing viscosities have been adjusted such that the resin will not run out of wide-meshed fabrics on vertical surfaces.

Thanks to their excellent adhesive properties, this system can also be used as adhesives for wood, metal, glass, concrete and numerous plastics. The thixotropic modification (e.g. laminating resin L 285 T) is to be preferred for thicker adhesive joints and vertical surfaces. Fillers (e.g. metal powder, talcum, cotton flakes, etc.) may be admixed to obtain special system properties.

Due to the elongation of 4-7%, which is advantageous for use as a laminating resin, the shear strength and peel resistance are somewhat lower than those of our special adhesive resins:

**Adhesive resin L 135 / K2 and
Adhesive resin A 10 / A 20.**

As a general rule applicable to all adhesives, thorough preparation of the intended adhesion surface is a fundamental prerequisite for good adhesion. Parting agent residue and contamination, such as dust, grease or water residue, will prevent effective bonding.

Storage

The resins and hardeners can be stored for at least 12 months in their carefully sealed original containers. The resins and hardeners may crystallize at temperatures below +15°C(60°F). The crystallization is visible as a clouding or solidification of the contents of the container. Before processing, the crystallization must be removed by warming up. Slow warming up to approx. 50 - 60°C (120-140°F) in a water bath or oven and stirring or shaking will clarify the contents of the container without any loss of quality. Use only completely transparent products. Before warming up, open containers slightly to permit equalization of pressure. Caution during warm-up! Do not warm up over an open flame! While stirring up use safety equipment (goggles, eyeglasses, respirator).

Processing details

	Laminating resin L 285 Résine L 285	Hardener 500 Durcisseur 500
Average EP -Value Valeur moyenne EP	0,63	-
Average amine equivalent Equivalent moyen d'amine	-	62

Caractéristiques de mise en oeuvre

Mechanical data of un-reinforced resin

Density Densité	lbs/gal g/cm ³	9,8 - 10 1,18 - 1,20
Flexural strength Résistance à la flexion	psi x 10 ³ N/mm ²	17 - 20 120 - 140
Modulus of elasticity Module d'élasticité en flexion	psi x 10 ³ kN/mm ²	4,8 - 5,1 3,3 - 3,5
Tensile strength Résistance à la traction	psi x 10 ³ N/mm ²	10 - 11,5 70 - 80
Compressive strength Résistance à la pression (Dureté)	psi x 10 ³ N/mm ²	18 - 20 120 - 140
Elongation Allongement	%	5 - 6,5
Impact strength Résistance aux chocs	Nmm/mm ²	40 - 50
Shore hardness Dureté / Shore	D	86 - 90
Water absorption % Absorption d'eau %	24 h 23°C (75°F) 7 d/23°C (75°F)	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Fatigue strength under reversed bending stresses acc. to DLR Brunsw. Tenue à la flexion alternée selon DLR Braunschweig	10% 90%	exp. 2 X 10 ⁶ exp. 2 X 10 ⁶

Données mécaniques de la masse de résine non renforcée

Curing: 24 h at 23°C (75°F) + 15 h at 60°C (140°F)
Durcissement: 24 h à 23°C + 15 h à 60°C.

Representative data according to
WL 5.3203 Parts 1 and 2 of the
German Aviation Materials Manual.

Données représentatives
établies d'après les régulations
WL 5.3203 parts 1 et 2 prises du manuel
sur les matières de l'aviation allemande

Specifications

Laminating resin L 285 Résine L 285		
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm ³ / 25°C	9,85 - 10,26 1,18 - 1,23
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	600 - 900
Epoxide equivalent Equivalent époxy	-	165 - 170
Epoxide value Valeur EP	-	0,59 - 0,65
Colour Coloration selon	Gardner	max 3

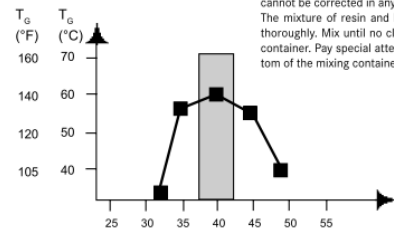
Hardener 500 Durcisseur 500		
Density Densité	lbs/gal / 77°F g/cm ³ / 25°C	8,34 - 8,84 1,00 - 1,06
Viscosity Viscosité	cps / 77°F mPas / 25°C	200 - 350
Amine value Indice d'amine	mg KOH / g	350 - 400
Colour Coloration selon	Gardner	max 5

Laminating resin L 285 - Hardener 500 Résine L 285 - Durcisseur 500	
Max T _g for curing at 18°C (65°F) Max T _g à 18°C durcissement	100 - 110°F 40 - 45°C
Max T _g for curing at 25°C (80°F) Max T _g à 25°C durcissement	120 - 150°F 50 - 60°C
Max T _g for heat treatment at 50°C (120°F) Max T _g à 50°C traitement thermique	140 - 150°F 60 - 65°C

Mixture ratio

Resin L 285 : Hardener 500 Résines L 285 : Durcisseur 500	
Parts by weight Parts de poids	100 : 40 +/-2
Parts by volume Parts de volume	100 : 50 +/-2

Mixing ratio ↔ glass transition temperature



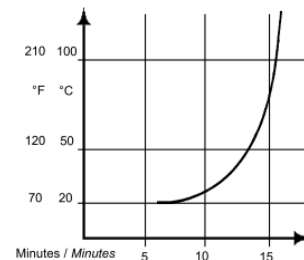
The specified mixing ratios must be observed as exactly as possible. Adding more or less hardener will not effect a faster or slower reaction - only incomplete curing which cannot be corrected in any way. The mixture of resin and hardener must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container.

.....Parts by weight of hardener 500 to
100 parts by weight of laminating resin L 285
Curing: 14 days at 25°C (80°F)

Temperature rise

Quantity: 100 g/20°C (70°F)

The optimal processing temperature is in the range between 20 and 25°C (70-80°F). Higher processing temperatures are possible, but will shorten pot life. A rise in temperature of 10 °C (20°F) will have the pot life. Water (for example very high humidity or contained in fillers) causes an acceleration of the resin/hardener reaction. Different temperatures and humidities during processing have no significant effect on the strength of the cured product. Do not mix large quantities, especially from this highly reactive system. The heat flow from the mixing container is very low, so the contents will be warmed up very fast because of the reaction heat (exothermic resin-hardener reaction). This can cause temperatures >200°C (400°F) which may cause smoke intensive burning of the resin-hardener mixture.



Gel time

Film thickness
1 mm
at different
temperatures

70 - 80°F 20 - 25°C	app. 45 - 60 min. env. 45 - 60 min.
105-115°F 40 - 45°C	app. 20 - 30 min. env. 20 - 30 min.

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÉ LISTY POUŽITÝCH PRYSKYŘIC

Product Data Sheet
Version 09 / 2013

Biresin® CR82 - B Composite resin system

Areas of Application

- For wet lay-up, pultrusion and filament winding processing
- Specialty for applications when curing temperatures of $\geq 75^\circ\text{C}$ can not be implemented

Product Benefits

- Approved by Germanischer Lloyd for the production of components
- One resin (A) with four hardeners (B) with different reactivity
- Uniform mixing ratio of 100 : 27
- The reactivity can be adapted by mixing the hardeners
- Because of optimized mixed viscosity good impregnation and good non draining properties
- Glass transition temperatures up to 80°C dependent on curing conditions

Description

- Basis Two-component-epoxy-system
- Resin (A) Biresin® CR82, epoxy resin, translucent
- Hardener (B) Biresin® CH80-1, amine, colourless to yellowish
- Hardener (B) Biresin® CH80-2, amine, colourless to yellowish (also available in blue)
- Hardener (B) Biresin® CH80-6, amine, colourless to yellowish (also available in blue)
- Hardener (B) Biresin® CH80-10, amine, colourless to yellowish

Physical Data	Resin (A)		Hardener (B)			
	Biresin® CR82	Biresin® CH80-1	Biresin® CH80-2	Biresin® CH80-6	Biresin® CH80-10	
Individual Components						
Viscosity, 25°C	mPas	1,600	50	45	< 10	< 10
Density, 25°C	g/ml	1,11	1,00	0,99	0,95	0,95
Mixing ratio	in parts by weight	100	27			
Pollife, 100 g / RT, approx. values	min	50	80	220	330	
Mixed viscosity, 25°C, approx. values	mPas	740	600	400	390	

Processing

- The material and processing temperatures should be from 18 to 35°C .
- With the hardeners Biresin® CH80-1 and Biresin® CH80-2 demoulding after room temperature curing is possible.
- With the hardeners Biresin® CH80-6 and Biresin® CH80-10 curing at 45°C before demoulding is recommended dependent on components.
- To clean brushes or tools immediately Sika Reinigungsmittel 5 is recommended.
- Additional informations are available in "Processing Instructions for Composite Resins".

Mechanical Data, neat resin specimen at different post curing conditions

Part 1: approx. values after 16 h / 55°C (source: accredited testing institute)

Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®	CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Density	ISO 1183 g/cm ³	1,15	1,15	1,14	1,14
Flexural E-Modulus	ISO 178 MPa	3,500	3,700	3,700	3,600
Tensile E-Modulus	ISO 527 MPa	3,200	3,600	3,400	3,500
Flexural strength	ISO 178 MPa	125	128	131	130
Elongation at maximum flexural strength	ISO 527 %	3,9	4,5	4,7	4,6
Tensile strength	ISO 527 MPa	71	77	76	75
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527 %	3,8	3,8	3,9	3,9
Water absorption	ISO 175 %	0,25	0,21	0,23	0,23

Part 2: approx. values after 16 h / $55^\circ\text{C} + 3 \text{ h} / 70^\circ\text{C}$ (source: accredited testing institute)

Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®	CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Density	ISO 1183 g/cm ³	1,15	1,15	-	-
Flexural E-Modulus	ISO 178 MPa	3,300	3,600	-	-
Tensile E-Modulus	ISO 527 MPa	3,100	3,300	-	-
Flexural strength	ISO 178 MPa	120	131	-	-
Elongation at maximum flexural strength	ISO 527 %	5,2	5,1	-	-
Tensile strength	ISO 527 MPa	68	74	-	-
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527 %	4,1	4,0	-	-
Water absorption	ISO 175 %	0,27	0,22	-	-

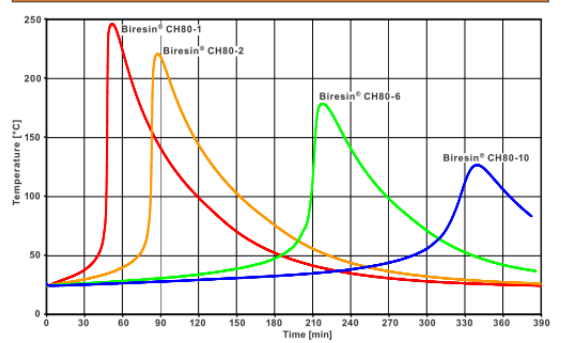
Part 3: approx. values after 16 h / $55^\circ\text{C} + 8 \text{ h} / 70^\circ\text{C}$ (source: accredited testing institute)

Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®	CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Flexural E-Modulus	ISO 178 MPa	-	-	3,400	3,300
Tensile E-Modulus	ISO 527 MPa	-	-	3,300	3,200
Flexural strength	ISO 178 MPa	-	-	126	122
Elongation at maximum flexural strength	ISO 527 %	-	-	5,2	5,2
Tensile strength	ISO 527 MPa	-	-	74	73
Elongation at maximum tensile strength	ISO 527 %	-	-	4,1	4,0

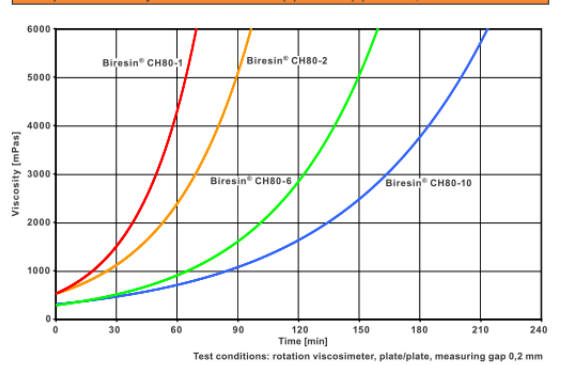
Part 4: approx. values after 12 h / 80°C (source: Sika internal)

Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®	CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10
Density	ISO 1183 g/cm ³	1,15	1,15	1,14	1,14
Shore hardness	ISO 868 -	D 85	D 85	D 85	D 85
Flexural E-Modulus	ISO 178 MPa	2,800	2,800	2,900	2,800
Tensile E-Modulus	ISO 527 MPa	2,900	2,900	2,900	2,900
Flexural strength	ISO 178 MPa	120	123	127	118
Compressive strength	ISO 604 MPa	107	110	110	110
Tensile strength	ISO 527 MPa	78	78	84	82
Elongation at break	ISO 527 %	6,1	6,5	6,4	6,2
Impact resistance	ISO 179 kJ/m ²	68	70	55	56

Development of Exotherm of Biresin® CR82-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 100 g / RT, insulated.



Development of Viscosity of Biresin® CR82-Resin(A)-Hardener(B)-Mixtures, 25°C



Thermal data of neat resin specimen at different post curing conditions

Biresin® CR82 resin (A)	with hardener (B) Biresin®	CH80-1	CH80-2	CH80-6	CH80-10	
Post curing conditions						
Heat distortion temperature	16 h/55°C	ISO 75A °C	69	70	67	68
	16 h/55°C + 3 h/70°C	ISO 75A °C	72	73	-	-
	16 h/55°C + 8 h/70°C	ISO 75A °C	-	-	71	71
Glass transition temperature		ISO 11357 °C	83	90	83	85

Packaging

Individual components	Biresin® CR82 resin (A)	200 kg; 30 kg; 11,1 kg net
	Biresin® CH80-1 hardener (B)	180 kg; 25 kg; 3,0 kg net
	Biresin® CH80-2 hardener (B)	180 kg; 25 kg; 3,0 kg net
	Biresin® CH80-2 hardener blue (B)	20 kg net
	Biresin® CH80-6 hardener (B)	180 kg; 20 kg; 3,0 kg net
	Biresin® CH80-6 hardener blue (B)	20 kg net
	Biresin® CH80-10 hardener (B)	180 kg; 25 kg; 3,0 kg net

Storage

- Minimum shelf life of Biresin® CR82 resin (A) is 24 month and of Biresin® CH80-1 hardener (A), CH80-2 hardener (B), CH80-6 hardener (B) and CH80-10 hardener (B) is 12 month under room conditions ($18 - 25^\circ\text{C}$), when stored in original unopened containers.
- After prolonged storage at low temperature, crystallisation of resin may occur. This is easily removed by warming up for a sufficient time to $50-60^\circ\text{C}$.
- Containers must be closed tightly immediately after use. The residual material needs to be used up as soon as possible.

Health and Safety Information

For information and advice on the safe handling, storage and disposal of chemical products, users shall refer to the most recent Safety Data Sheet (SDS) containing physical, ecological, toxicological and other safety-related data.

Disposal considerations

Product Recommendations: Must be disposed of in a special waste disposal unit in accordance with the corresponding regulations.
Packaging Recommendations: Completely emptied packagings can be given for recycling. Packaging that cannot be cleaned should be disposed of as product waste.

Value Bases

All technical data stated in this Product Data Sheet are based on laboratory tests. Actual measured data may vary due to circumstances beyond our control.

Legal Notice

The information, and, in particular, the recommendations relating to the application and end-use of Sika products, are given in good faith based on Sika's current knowledge and experience of the products when properly stored, handled and applied under normal conditions in accordance with Sika's recommendations. In practice, the differences in materials, substrates and actual site conditions are such that no warranty in respect of merchantability or of fitness for a particular purpose, nor any liability arising out of any legal relationship whatsoever, can be inferred either from this information, or from any written recommendations, or from any other advice offered. The user of the product must test the product's suitability for the intended application and purpose. Sika reserves the right to change the properties of its products. The proprietary rights of third parties must be observed. All orders are accepted subject to our current terms of sale and delivery. Users must always refer to the most recent issue of the local Product Data Sheet for the product concerned, copies of which will be supplied on request.



Further information available at:

Sika Deutschland GmbH
Subsidiary Bad Urach
Stülgarter Str. 139
D - 72574 Bad Urach
Germany

Tel: +49 (0) 7125 940 492
Fax: +49 (0) 7125 940 401
Email: composite@de.sika.com
Internet: www.sika.com



SKOLL KOMPOZIT s.r.o.

Performance
Polymers

Tooling Systems

Víceúčelová laminační pryskyřice

@Araldit GY 764BD 100 hmot. dílů
Tvrdidlo H285 40 hmot. dílů
nebo
Tvrdidlo H286 40 hmot. dílů
 Epoxidová laminační pryskyřice

- Specifické vlastnosti**
- středně reaktivní laminační systém s nízkou viskozitou
 - zpracování při pokojové teplotě
 - vytvrzuje při pokojové teplotě

- Použití**
- Laminační systém pro ruční laminaci

Technické parametry

Vlastnost	Viskozita při 25 °C (mPa.s)	Hustota (g/cm3)	Bod vzplanutí DIN 51758 (°C)	Shladovatelnost 18-25 °C
Araldit GY764BD	690	1,0	>200	3 rok
Tvrdidlo H285 (H286)	60 - 100	0,94-0,97	109	1 rok

Zpracování

Směšovací poměry

Komponenta	Hmotnostní díly	Objemové díly
Araldit GY764 BD	100	100
Tvrdidlo H285	40	42
Komponenta	Hmotnostní díly	Objemové díly
Araldit GY764 BD	100	100
Tvrdidlo H286	40	42

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÉ LISTY POUŽITÝCH PRYSKYŘIC

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Viskozita při 25 °C	mPa.s	500 – 350
Doba zpracovatelnosti 100g směsi při 23 °C	min	40-45 s tvrdidlem H285 100-120 s tvrdidlem H286
Doba vytvrzení při 23 °C	hod	12-16+ s tvrdidlem H285 18-24+ s tvrdidlem H286

+ v závislosti na teplotě okolí a tloušťce laminované vrstvy

Vlastnosti

Po vytvrzení 7 dní při pokojové teplotě nebo 14 hod při 40 °C

Vlastnost	Jednotka	Hodnota
Hustota	g/cm3	1,05
Tvrdost Shore D ISO 686	Shore D	85
Pevnost v tlaku ISO 904	N/mm2	110 - 115
Ohybová pevnost ISO 178	N/mm2	110 - 120
Teplota skleněného přechodu	(°C)	60-85+
Nasákavost 24 hod 23 °C	(%)	0,20 – 0,30
Nasákavost 5 dní/ 23 °C	(%)	0,30 – 0,40

+ v závislosti na teplotě a vlhkosti prostředí

Skladování

Produkt uvedený v tomto datovém listu je nutno skladovat při teplotách 10-30 °C. Této podmínkám odpovídá doba zpracovatelnosti uvedená na obalu.

Bezpečnostní opatření

Pozor!
 Produkty firmy Huntsman Advanced Materials lze zpracovávat bez jakéhokoli nebezpečí, jestliže jsou dodržovány obvyklé postupy při práci s chemikáliemi. Nevytvrzené materiály nesmějí být používány jako lepidlo. Z důvodu zabránění nežádoucí alergické reakce organismu se doporučuje použít gumové nebo plastické rukavice stejně jako ochranné brýle. Po každé práci je nutno umýt si ruce teplou vodou. Nedoporučuje se používat tetřidla. Po umytí ruce ošleďte do papírových (ne lesklých) ubrousků, na jedno použití. Pracovní prostor musí být dobře odvětrán, pracovní místo čistováno. Přesný popis bezpečnostních opatření najdete v příloze „Hygiena práce a zabezpečování produktů“ firmy Ciba Spezialitäten-Chemie GmbH (půh. C-24-2640) stejně jako v bezpečnostních listech jednotlivých produktů. Řád Vam tuto publikaci zasláme.

Ciba Spezialitätenchemie Polymers

Násle technické řady pro zpracování: materiálu odpovídají dleštinu sířou našich znalostí. Přesně neopimujeme na vašem zkušebním materiálu v souvislosti s vašim konkrétním použitím, zkušebními daty. Vašim použitím materiálů je nutno neustále kontrolovat a jele za ně přitím zodpovědní. Zaručujeme bezvadnou kvalitu, odpovídající našim všeobecným podmínkám prodeje a odoání.

Huntsman GmbH
 Brentenunterstrasse 251
 231 – Wien
 Rakousko
 Tel: 0043 1 801 32 0
 Fax: 0043 1 801 32 421

SKOLL KOMPOZIT s.r.o.
 Jarkovcova 1069/12B
 70 00 Praha 7
 CZ

Tel: fax 00420 220 873 550, 551
 E-mail: skollkompozit@skollkompozit.cz