

Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů

Bc. Lukáš Bodlák

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš Bodlák**
Osobní číslo: **T14525**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů**

Zásady pro vypracování:

1. I. Literární rešerše
2. Problematika kompozitních materiálů, rozdělení, základní složky, synergický účinek
3. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů
4. Technologické aspekty orientace výtuzných systémů na výsledné mechanické vlastnosti – polární diagram
5. II. Experimentální část
6. Návrh materiálového složení kompozitních systémů s různým křížením vrstev
7. Výroba zkušebních těles pomocí technologie ruční laminování pod vakuovací fólií, resp. vakuovou infuzí
8. Experimentální testování zkušebních těles dle zvolených norem
9. Zhotovení polárního diagramu pro daný kompozitní systém
10. Vyhodnocení experimentálních výsledků, diskuze
11. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 27. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



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

Příjmení a jméno: LUDÁŠ BONAŘ

Obor: VÝROBNÍ INŽENÝRSTVÍ

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 5.5.2016


.....

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 nevydávalečně 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 výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.

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

²⁾ 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).

²⁾ 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 a užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporů-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 je zaměřena na výzkum vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. V teoretické části práce je vytvořen úvod do problematiky kompozitních materiálů od základního popisu kompozitních systémů, přes popis jednotlivých složek. Dále je tato část věnována popisu nejčastějších technologií pro zpracování kompozitu a v neposlední řadě je část věnována mechanickým vlastnostem a zkoušení těchto vlastností u kompozitních materiálů.

Praktická část se věnuje výzkumu problematiky křížení vrstev u kompozitních systémů. Na vzorcích byly testovány mechanické vlastnosti, které byly vyhodnoceny a zobrazeny pomocí polárních diagramů.

Klíčová slova: Kompozit, systém, matrice, výztuž, křížení, laminát, vrstva, mechanické vlastnosti, zkoušky kompozitu, polární diagram, tah, ohyb

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the influence of stacking sequences on mechanical properties of composite systems. In theoretical part is created an introduction to the topic of composite materials from basic description of composite systems to description of individual components. This section include description of the most using technology for the processing of composite, mechanical properties and testing of the properties of composite materials.

The practical part is devoted to research issues of of crossing layers in composite systems. The samples were tested for mechanical properties were evaluated and displayed using polar diagrams.

Keywords: Composite, System, Matrix, Reinforcement, Crossing, Laminate, Layer, Mechanical Properties, Composite Test, Polar Diagram

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za poskytnuté rady a doporučení, které mi poskytla pro zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanovi Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při měření pro praktickou část mé diplomové práce.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PROBLEMATIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	12
1.1 DEFINICE KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	12
1.2 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2.1 Dělení podle disperzní fáze	13
1.2.2 Dělení podle typu matrice	13
1.2.3 Dělení podle tvaru disperze.....	15
1.3 POPIS ZÁKLADNÍCH SLOŽEK KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	15
1.3.1 Matrice	16
1.3.2 Výztuž	17
1.4 VYUŽITÍ SYNERGICKÉHO EFEKTU	17
1.5 ADHEZE V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH.....	18
1.5.1 Druhy adheze	18
1.5.2 Měření adheze v kompozitech	20
2 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY ORIENTACE VÝZTUŽNÝCH SYSTÉMŮ NA VÝSLEDNÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI	23
2.1 ORIENTACE VLÁKEN V KOMPOZITNÍCH MATERIÁLECH.....	23
2.2 VLÁKNA A JEJICH DĚLENÍ	24
2.2.1 Amorfní vlákna	25
2.2.2 Monokrystalická vlákna	25
2.2.3 Polykrystalická vlákna	26
2.2.4 Polymerní vlákna	26
2.3 FORMA VÝZTUŽE.....	27
2.3.1 Roving	27
2.3.2 Tkaniny	28
2.3.3 Rohože.....	29
3 VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU	30
3.1 RUČNÍ VÝROBNÍ POSTUPY	30
3.2 ČÁSTEČNĚ AUTOMATIZOVANÉ	31
3.2.1 Nízkotlaké technologie.....	32
3.3 PLNĚ AUTOMATIZOVANÉ VÝROBNÍ POSTUPY.....	33
3.3.1 Mokrý lisování	33
3.3.2 Lisování předimpregnovaných lisovacích hmot za tepla	33
3.3.3 Vysokotlaké vstřikování – RTM.....	34
3.4 KONTINUÁLNÍ POSTUPY	34
3.5 SPECIÁLNÍ TECHNOLOGIE	35
4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU	36
4.1 MECHANIZMUS PORUŠOVÁNÍ	36
4.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ	37
4.2.1 Pevnost	37
4.2.2 Tuhost.....	37

4.3	ZKOUŠENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ	38
4.3.1	Statistické předpoklady zkoušek kompozitních materiálů	38
4.3.2	Tahová zkouška	38
4.3.3	Zkouška ohybem	40
5	POLÁRNÍ DIAGRAM.....	43
II	PRAKTICKÁ ČÁST	44
6	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	45
7	NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ	46
7.1	VÝZTUŽ.....	46
7.2	MATRICE	47
7.2.1	Epoxidová pryskyřice.....	47
7.2.2	Vývojová polyuretan-metakrylátová pryskyřice	47
7.3	SKLADBA KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ PRO EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ	48
8	VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU	50
8.1	VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU POMOCÍ RUČNÍ LAMINACE	50
8.2	VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU POMOCÍ RUČNÍ LAMINACE POD VAKUOVACÍ FOLÍÍ	52
9	EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	56
9.1	ZKOUŠKA OHYBEM – METODA TŘÍBODOVÉHO OHYBU	56
9.2	ZKOUŠKA TAHEM	68
10	POLÁRNÍ DIAGRAMY PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY A TEPLoty.....	79
10.1	ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM	79
10.1.1	Vzorek A, B	79
10.1.2	Vzorek C, D	81
10.1.3	Vzorek E, F, G	82
10.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA	84
10.2.1	Vzorek A, B	84
10.2.2	Vzorek C, D	85
10.2.3	Vzorek E, F, G	87
11	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ.....	89
	ZÁVĚR	96
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	98
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	100
	SEZNAM OBRÁZKŮ	102
	SEZNAM TABULEK.....	105
	SEZNAM PŘÍLOH.....	106

ÚVOD

Diplomová práce je zaměřena na vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systému. V teoretické části je popsána problematika kompozitních materiálů, jak se kompozitní materiály dělí, jsou zde popsány jednotlivé složky kompozitního materiálu včetně popisu nejčastěji používaných materiálů. Dále je uvedeno využití synergického efektu a adheze kompozitních materiálů včetně jejího testování. Následující kapitola je věnována výrobě kompozitních systémů, kde jako stěžejní jsou popsány technologie ruční, částečně automatizované a plně automatizované výroby. V další kapitole jsou probrány technologické aspekty orientace výstužných systémů na výsledné mechanické vlastnosti, kam spadá mechanismus porušování a popis zkoušení mechanických vlastností kompozitních systémů, včetně statistických předpokladů testování. Poslední kapitola teoretické části je věnována problematice polárních diagramů, které jsou výstupem praktické části diplomové práce.

Praktická část se věnuje návrhu materiálového složení kompozitního systému, aby bylo možné následným testováním zjistit vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. Následně jsou popsány technologie výroby jednotlivých vzorků včetně technologického postupu. V praktické části, jsou dále uvedeny naměřené hodnoty z experimentálního testování zkušebních těles včetně statistických výsledků měření a grafů získaných testováním. Dále jsou zhotoveny polární diagramy jako výstup této diplomové práce. Poslední kapitola je věnována vyhodnocení výsledků experimentálního testování.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PROBLEMATIKA KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Za kompozitní materiál považujeme materiál, který je složen ze dvou a více druhů materiálů, které se od sebe navzájem liší ve fyzikálním i chemickém složení. Podstatou je spojení dvou a více materiálů za účelem získání nových vlastností, kterých samostatné komponenty nikdy nedosáhnou.[8]

1.1 Definice kompozitního materiálu

Kompozitní materiály neboli zkráceně kompozity jsou moderní technické materiály. Kompozit je název pro heterogenní materiál složený nejméně ze dvou různých materiálových složek, jehož vlastnosti nedosahuje nejen žádná složka kompozitu samostatně, ale mnohdy ani vlastností, které by se daly předpokládat prostým součtem vlastností těchto složek.[1]

Definice kompozitu není jednoznačná a každá instituce nebo publicista ji popisuje jinak. Zde jsou vedeny dvě definice, které nejlépe vystihují pojem kompozitní materiál:

„Kompozitní materiál je kombinace dvou nebo více materiálů (vyztužovací elementy, výplně a spojovací matrice), lišících se v makroměřítku tvarem nebo složením. Složky si v nich zachovávají svou identitu (vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ačkoliv na své okolí působí v součinnosti. Každá složka může být fyzikálně identifikována a mezi ní a dalšími složkami je rozhraní.“ [4]

„Kompozity jsou materiály, ve kterých jsou délkové nehomogenity v rozměrech mnohem větších, než jsou atomární (což nám umožňuje používat pro tyto nehomogenity rovnice klasické fyziky), které jsou ale v makroskopickém měřítku přirozeně (statisticky) homogenní.“ [3]



Obr. 1 Příklad výrobku z kompozitního systému

1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Z důvodu velice širokého sortimentu kompozitních materiálů je nutné k jejich bližšímu popisu a uspořádání použít kritéria, díky kterým lze kompozitní materiály rozdělit do základních skupin a lze je tedy lépe třídit, vyhledávat a zpracovávat. Základní dělení je prováděno na tři hlavní skupiny a následně jejich podskupiny pro detailnější popis materiálu.

1.2.1 Dělení podle disperzní fáze

Nejčastěji aplikovanou disperzí je pevná fáze, ale obecně může být nahrazena i jinou fází a proto je nutné rozdělit kompozitní materiál podle disperzní fáze:

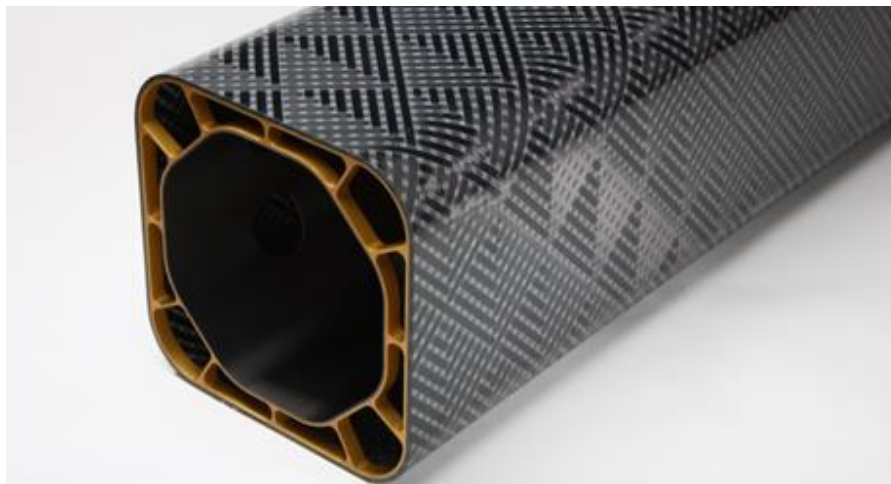
- **Kompozit prvního typu** – obsahuje disperze z pevné fáze, nejčastěji používané v technické praxi díky jejich zpracování a aplikaci.
- **Kompozit druhého typu** – obsahuje kapalnou disperzi, méně používaná disperze, do kterých patří některé pórovité struktury s vyplněnými póry např. mazacím olejem.
- **Kompozity třetího typu** – disperze je zde plynná, patří sem všechny pěnové materiály např. kovové pěny, jedná se o matrici, která není spojitá.[2]

1.2.2 Dělení podle typu matrice

Jde o nejzákladnější dělení kompozitních materiálů pro jeho jednoznačnou vypovídající hodnotu.

- **Kompozitní materiály s plastovou matricí** (Plastic Matrix Composites – PMC)

Základní složkou kompozitního materiálu s plastovou matricí je termoplast nebo reaktoplast tvořící v mnoha případech většinou část kompozitu.[1,2]



Obr. 2 Příklad výrobku s plastovou matricí

- **Kompozitní materiály s kovovou maticí (Metal Matrix Composites – MMC)**

Jedná se o druhou nejčastěji používanou matici pro kompozitní materiál, volba kovové matrice vyplývá především z jejich vlastností. Mezi nejvýznamnější vlastnosti patří elektrická vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smyková pevnost, tvárnost, odolnost proti obrusu, možnost povlakování a odolnost proti povrchovému poškození. Pro kompozity s kovovou maticí se nejčastěji využívá matrice z lehkých slitin hliníku případně hořčíku nebo titanu.[1,2]



Obr. 3 Příklad výrobku s kovovou maticí

- **Kompozitní materiály s keramickou maticí (Cer. Matrix Composites – MCM)**

Keramická matrice je specifická a často aplikována díky své vysoké pevnosti při vysokých teplotách, pro svou malou hustotu a odolnost vůči oxidaci. Velkou nevýhodou tohoto materiálu je jeho křehkost. Pro kompozity s keramickou maticí se nejčastěji využívá matrice oxidů, nitridů nebo karbidů různých prvků jako například hliníku, křemíku a hořčíku.[2]

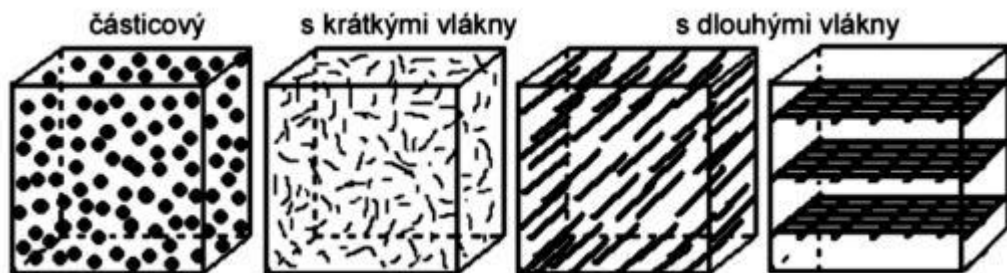


Obr. 4 Příklad výrobku s keramickou maticí

1.2.3 Dělení podle tvaru disperze

Tvar jednotlivých částí disperze se zásadně podílí na anizotropii kompozitního materiálu a také na způsobu interakce mezi matricí a disperzí, proto jsou kompozitní materiály rozděleny podle tvaru disperze do následujících skupin:[7]

- **Částicové** – tvar částice disperze je:
 - Izometrický – kompozit je zpravidla izotropní.
 - Neizometrický – tvar především destiček nebo jehliček a ty mohou být náhodně orientované nebo orientované.
- **Vláknové** – disperze je ve tvaru vláken, zde uvažujeme:
 - Spojitá vlákna – která nejsou uvnitř kompozitu přerušena a ty dále dělíme na jednoosé uspořádání nebo dvojosé uspořádání.
 - Dlouhá vlákna – jsou delší než kritická délka, při lomu se přetrhnou, dále dělíme na jednoosé uspořádání, dvojosé uspořádání a trojosé uspořádání.
 - Krátká vlákna – jsou kratší než kritická délka, při lomu se vytáhnou, dále dělíme na jednoosé uspořádání, dvojosé uspořádání a trojosé uspořádání.
- **Deskové** – kdy matrice i disperze jsou složeny ze vzájemně se střídajících desek, nelze rozlišit co je matrice a co disperze.[7]



Obr. 5 Rozdělení materiálu podle výztuže

1.3 Popis základních složek kompozitního materiálu

Velice významnou vlastností kompozitního materiálu je výrazné makroskopické rozhraní mezi jednotlivými složkami, které kompozit tvoří, a které se u kompozitu nazývají fáze. Tento pojem se, ale zásadně liší při použití v problematice kompozitních materiálů a v oblasti metalurgie kovů, kde nabývá naprosto odlišného významu.

U kompozitních materiálů rozeznáváme dvě základní složky neboli fáze. Základní složkou je matrice, ve které je uložena výztuž, která rozhodujícím způsobem zvyšuje především mechanické nebo fyzikální vlastnosti kompozitního systému.[10]

1.3.1 Matrice

Matrice v kompozitním systému je základní nosnou složkou výztuže. Jedná se o spojitou složku, která zastává funkci pojiva výztuže a zároveň chrání křehká vlákna. Matrice v kompozitním systému je výrazně poddajnější než výztužné vlákno, dále také pevnost v tahu je u všech matric menší než u výztuží a to i o několik řádů. Volba matrice je důležitou problematikou, která má zásadní vliv na budoucí aplikaci celého kompozitního systému. Volba bude záviset také na dalších vlastnostech jako je odolnost proti korozi, elektroizolační vlastnosti, odolnost proti otěru a odolnost proti zvýšené teplotě či ohni. Příklady nejčastěji využívaných matric:[1,11]

- **Polyestery (UP-R)**

Tento materiál je jeden z nejčastěji používaných pro matrice v kompozitních materiálech. Jeho vytvrzování po aplikaci probíhá za zvýšených nebo normálních teplot. Využívá se především díky svým dobrým elektrickým, chemickým i mechanickým vlastnostem a to nejčastěji se skelnými vlákny. Objemové smrštění při vytvrzování se pohybuje v rozmezí od 5 do 9 %. Použití nejčastěji do slabě kyselého prostředí.[19]

- **Epoxidy (EP-R)**

Jejich aplikace je často s lepšími typy výztuží jako je například aramidové nebo uhlíkové vlákno. Výhodou jsou dobré elektrické i chemické vlastnosti. Jako jeden z mála materiálů má výborné elektroizolační vlastnosti a tím se rozšiřuje jeho možnost použití.[19]

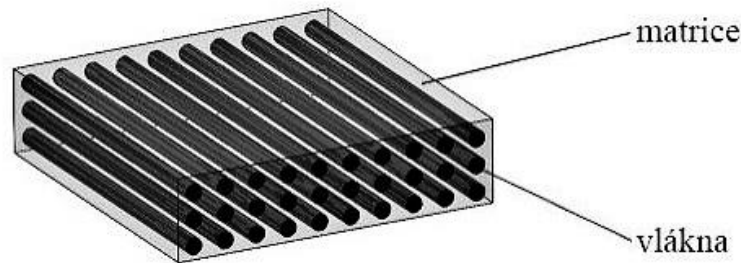
- **Methyl-methakrylátové pryskyřice (MA-R)**

Materiál je nejčastěji používán v kombinaci s uhlíkovými vlákny a díky tomu jsou jeho aplikace především na velice namáhané součásti. Tyto pryskyřice se vyznačují výbornými chemickými vlastnostmi a dále možností přidáním retardérů hoření.[19]

- **Vinylestery (VE-R)**

Tyto pryskyřice se vyznačují dobrou chemickou odolností a to i za zvýšených teplot. Jejich použití je nejčastěji ve spojení se skelnými vlákny. Kompozit, u kterého je jako

matrice použita vinylesterová pryskyřice má dobrou tepelnou i elektrickou izolaci. Maximální provozní teplota je v rozmezí od 90 do 150 °C.[19]



Obr. 6 Schéma uložení vláken v matrici

1.3.2 Výztuž

Výztuž v kompozitním systému zajišťuje především zvýšení mechanických vlastností, jako je pevnost a tuhost. Typ a způsob uložení má zásadní vliv na výsledné vlastnosti celého kompozitního systému. Pro splnění požadovaných vlastností je potřebné dodržet tyto podmínky:[5]

- Vyztužující vlákna musí být v každém ohledu pevnější než matrice.
- Vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než má samotná matrice.

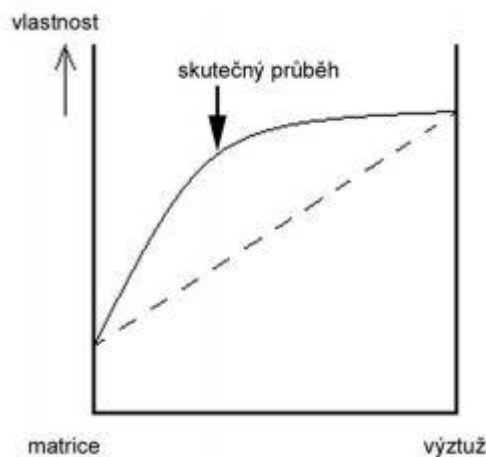
1.4 Využití synergického efektu

Pojem synergický efekt označuje efekt, kdy dochází v kompozitním materiálu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Cílem je připravit kompozitní materiály tak, aby v nich bylo dosaženo co možná nejsilnějšího synergického efektu, a to především u těch vlastností, na kterých nám nejvíce záleží a které preferujeme.[1,2]

Díky synergickému působení pevných a tuhých vláken s poddajnou nebo křehkou kovovou, polymerní nebo keramickou matricí umožňuje vytvářet kompozitní materiály s vysokou pevností, tuhostí a houževnatostí, jejichž vlastnosti přesahují vše, co bylo kdy dosaženo u tradičních materiálů. [2]

Synergický efekt lze také vyjádřit na první pohled nelogickou rovnicí kdy: $1+1=3$. Toto tvrzení ale naprosto přesně vystihuje efekt, kdy spojením dvou i více materiálů dojde k lepším vlastnostem výsledného materiálu a dalo by se hovořit o nejjednodušší

a nejzákladnější definici kompozitního materiálu. Tento jev lze také dobře vysvětlit na grafickém znázornění obr. 7. Kde je možné pozorovat dvě složky kompozitu, matici a výztuž a na ose y vlastnosti kompozitního materiálu. Přerušovaná čára naznačuje sumaci vlastností složek a plná čára skutečný průběh díky synergickému efektu, kdy dojde ke zlepšení výsledných vlastností kompozitního materiálu.[14]



Obr. 7 Znázornění synergického efektu v kompozitních materiálech [19]

1.5 Adheze v kompozitních materiálech

Matrice kompozitu je spojitou fází v celém svém objemu kompozitního materiálu. Disperze, je ale vždy nespojitá fáze a její soudržnost s maticí v kompozitním materiálu závisí v první řadě na možnosti přenosu sil přes rozhraní matrice – disperze, tedy na adhezních silách na tomto rozhraní.[2,14]

1.5.1 Druhy adheze

V technické praxi je možné rozdělit adhezi působící v kompozitním materiálu na tři zdroje adhezních sil na rozhraní.

- **Mechanické zaklínění**

Uvažujme, že styčná plocha mezi maticí a disperzí není nikdy zcela rovna, vždy se na ní nachází různé výstupky anebo prohlubeniny. Při zatížení brání tyto výstupky a prohlubně vzájemnému pohybu matrice a disperze, muselo by dojít k jejich usmýknutí, aby došlo k vzájemnému pohybu. Zaklínění je tím větší, čím je hranice mezi maticí a disperzí drsnější a vzájemný styk dokonalejší.

Mechanické zaklínění podporují:

- Třecí síly, které musí působit na společné rozhraní mezi matricí a disperzí při vzájemném pohybu těchto složek. Tyto síly mohou být velmi značné především v důsledku rozdílných tuhostí matrice a disperze z důvodu vzniku velkých tlakových sil na rozhraní.
- Mikropóry, které vznikají díky působení tlakových sil kolmých na rozhraní nebo mikro dutinami za odtrženými vrcholky rozhraní. Na vznik mikropórů má velký vliv kvalita matrice a vnější atmosférický tlak, který bude jejich vzniku v kombinaci s kvalitní matricí bránit.[2,14]

- **Fyzikální adheze**

Vychází z fyzikální síly mezi částicemi na rozhraní z tzv. Van der Waalsových sil. Tato vazba je schopna působit na vzdálenost 0,3 až 0,5 nm a její velikost odpovídá teoretické pevnosti rozhraní 0,7 až 7 GPa. Pokud je tato vazba dostatečně silná, stačí k dostatečně velkým adhezním silám na rozhraní. Tato síla úzce souvisí se vzájemnou smáčivostí matrice a disperze. Smáčivost dvou látek, ze kterých je jedna kapalná (u kompozitu je to zpravidla matrice) a druhá je tuhá (u kompozitu je tuhá zpravidla disperze), je možné vyjádřit pomocí povrchového napětí nebo povrchové energie.

Základní charakteristikou smáčivosti je tzv. úhel smáčivosti Θ . Pokud při zvětšování povrchu mezi kapalným a pevným prostředím dochází k snižování celkové povrchové energie, má kapalně prostředí tendenci tento povrch co nejvíce zvětšit. To můžeme pozorovat na úhlu smáčivosti Θ , který se bude pohybovat mezi 0 a 90 stupni. V tom případě mluvíme o takových dvou látkách jako o smáčivých. V případě, že úhel smáčivosti Θ je mezi 90 a 180 stupni, pak mluvíme o látkách vzájemně nesmáčivých. Čím je úhel smáčivosti Θ menší, tím jsou látky lépe smáčivé. Pokud se blíží tento úhel nule, vytváří kapalná látka souvislou tenkou vrstvu na pevné látce. Mluvíme tedy o ideální smáčivosti. Pokud tento úhel nabývá 180 stupňů, vytváří kapalná látka na pevném povrchu kuličky, které se dotýkají pevné látky. Jen v jednom bodě tento jev označujeme jako dokonalou nesmáčenlivost.[2,14]

Jelikož nemůžeme uvažovat ideálně hladké rozhraní, musíme zavést faktor drsnosti D , který definujeme jako poměr velikosti skutečného povrchu k velikosti povrchu ideálně hladkého, proto bude vždy D větší než jedna. V tomto případě musí platit:

- u látek smáčivých adhezi drsnost zlepšuje, jelikož se úhel smáčivosti zmenšuje,
- u látek nesmáčivých adhezi drsnost zhoršuje, jelikož se úhel smáčivosti zvětšuje.

- **Chemická adheze**

Na rozhraní matrice a disperze může dojít přímo ke vzniku chemických vazeb, které jsou daleko větší než fyzické nebo mechanické. Chemické vazby mohou působit na vzdálenost 0,1 až 0,3 nm a jejich velikost dosahuje teoretické pevnosti rozhraní 7 až 70 GPa. Chemické vazby lze aplikovat ve dvou případech:

- matrice a disperze vzájemně difundují a na rozhraní vzniká difuzní mezivrstva s velmi silnou adhezí,
- matrice a disperze spolu chemicky reagují a na rozhraní vzniká mezivrstva chemické sloučeniny.

Chemická adheze se jeví jako velice výhodná, může ale způsobit i některé negativní jevy:

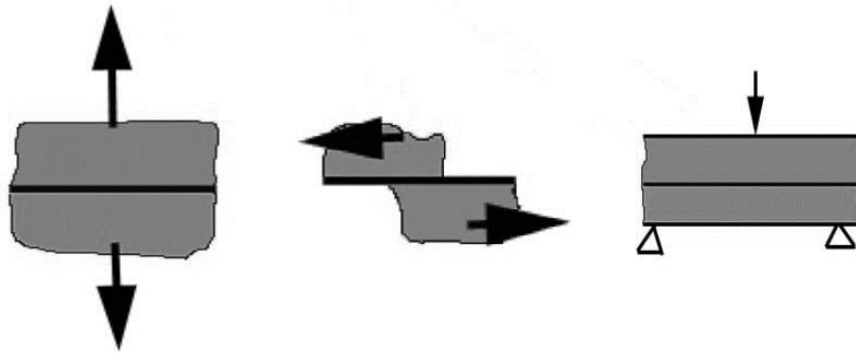
- chemické a difuzní mezivrstvy mohou mít nežádoucí vlastnosti jako je křehkost a nízká pevnost, to vede k porušování kompozitu v této vrstvě,
- při silné difuzi do matrice nebo chemické reakci s matricí může dojít k znatelnému úbytku disperze především u vláknových kompozitů, určených pro aplikace při vysokých teplotách.[2,14]

1.5.2 Měření adheze v kompozitech

Jelikož jsou vlastnosti rozhraní u kompozitních materiálů velmi důležité, je nutné tyto vlastnosti změřit, a to jak vzájemnou smáčivost materiálů matrice a disperze, tak i povrchová napětí. Toto měření je velice složité, a proto existuje mnoho metod, jak zjišťovat přímo adhezní síly na rozhraní. Abychom mohli úplně popsat rozhraní, potřebujeme kritické tečné i normálové napětí rozhraní, při kterém dojde k porušení rozhraní.[2,6]

- **Přímé metody měření adheze**

Pokud lze vyrobit rovinné rozhraní, jsou pro určení adhezního napětí použity statické zatěžovací zkoušky, kde jsou zjišťovány normálové, smykové a tečné adhezní napětí.

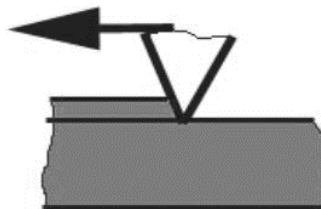


*Obr. 8 Princip přímého měření adhezního napětí
normálové, smykové a tečné*

- **Porovnávací metody měření adheze**

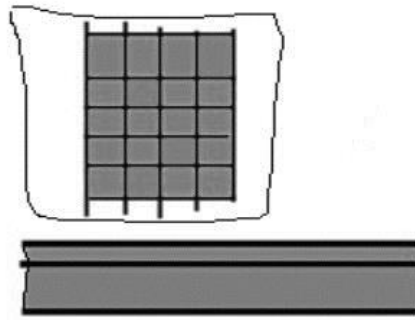
Tato metoda neurčuje přímo adhezní napětí, jen umožňuje porovnávat kvalitu adheze na rozhraní. Používá se několik metod, z nichž tyto jsou nejčastější:

- **Scratch test** – neboli vrypový test se používá k porovnání tenkých vrstev jednoho materiálu na masivním vzorku druhého materiálu. Ve vrstvě je vytvářen vryp, který proniká stále hlouběji a díky posuvu vnikajícího tělesa v ose x dojde až k odtržení celé vrstvy a síla potřebná k odtržení je měřítkem velikosti adheze.



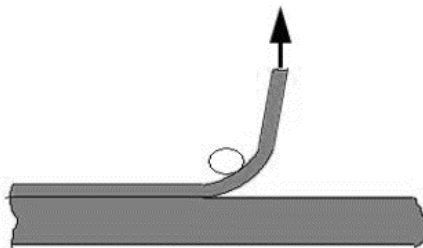
Obr. 9 Princip scratch testu

- **Mřížkový test** – používá se k porovnání tenkých vrstev jednoho materiálu na masivním vzorku druhého materiálu. Do vrstvy se vryje ostrým nástrojem po 10 vrypech ve dvou na sebe kolmých směrech tak, aby byla vrstva zcela proryta. Následně je vrstva přelepena lepicí páskou a stržena. Zkoumá se procento odtržených čtverečků, což je měřítko adheze. [2,6]



Obr. 10 Princip vrypového čtverečkového testu

- **Odlupovací test** – je možné aplikovat, je-li jeden z materiálů méně tuhý a umožňuje značný pohyb. Materiál se odlupuje přes přípravek, který zajišťuje konstantní poloměr ohybu při odlupování. Měřítkem adheze je zde odlupující síla vztažená na jednotku délky.



Obr. 11 Princip odlupovacího testu

- **Měření adheze přímo na kompozitech**

Jedná se opět o porovnávací zkoušky, lze z nich zjistit i adhezní napětí přímo, ale jen za velice jednoduchých předpokladů. Používané jsou čtyři základní metody:

- **Vytrhávací zkouška** – kdy jsou postupně vytrhávána vlákna z kompozitního materiálu
- **Příčný test kompozitního materiálu** – materiál je zatížen tahovou silou ve směru kolmém na vlákno
- **Podélný test s výřezy** – vzorek o speciálním tvaru s výřezy je zatížen tahovou silou ve směru vláken
- **Posouzení podle charakteru lomu** – kvalita rozhraní je posuzována z charakteru lomové plochy. [2,6]

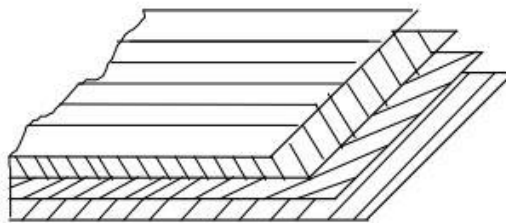
2 TECHNOLOGICKÉ ASPEKTY ORIENTACE VÝZTUŽNÝCH SYSTÉMŮ NA VÝSLEDNÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Na výsledné mechanické vlastnosti kompozitního systému budou mít zásadní vliv především kompozitní výztuže neboli disperze, a to jejich konkrétní druh a orientace těchto vláken v kompozitním systému.[15]

2.1 Orientace vláken v kompozitních materiálech

Pokud chceme dosáhnout dobrých vlastností laminátu, který je vyroben z několika vrstev s jednosměrně orientovanými vlákny, je nutné jednotlivé vrstvy při kladení různě orientovat. Samotnou orientaci těchto vrstev následně zapisujeme kódem, v němž je úhel pootočení vůči hlavnímu směru laminátu označen příslušným znaménkem a číslem udávajícím počet stupňů úhlu.

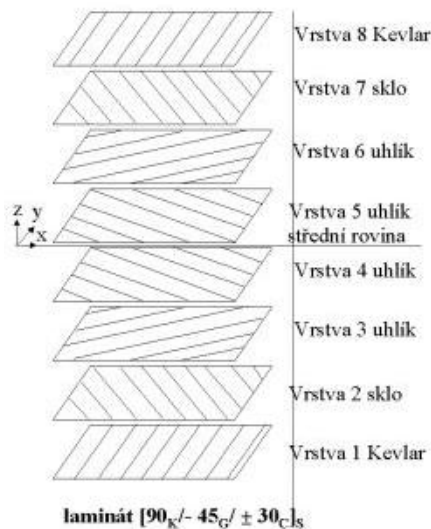
Většina vyráběných laminátů je symetrická vůči střední rovině a obsahuje tedy lichý počet vrstev. Nesymetrický laminát bude obsahovat sudý počet vrstev a lze ho zapsat např. $[90/+\alpha/-\alpha/90]$ a můžeme ho vidět na obr. 12.[18]



Obr. 12 Schéma nesymetrického laminátu[18]

Symetrii zapisujeme pomocí indexu s , a počet opakování skladeb v jednom laminátu indexem n , např. $[(0/\pm\alpha/90)_n]_s$. Za téměř dokonale izotropní skladbu laminátu považujeme tzv. kvazi-izotropní lamináty s popisem $[60/0/-60]$ nebo $[45/0/-45/90]$.

Další variantou je hybridní laminát, ve kterém se střídají vrstvy s různými vlákny, a je tedy nutné doplnit k těmto vrstvám příslušný index, aby bylo možné tyto vrstvy rozpoznat. Příklad indexů pro jednotlivé materiály K- kevlar, G- sklo, B- bór, C- uhlík. Takový laminát je možné vidět na obr. 13.[18]



Obr. 13 Schéma symetrického hybridního laminátu[18]

2.2 Vlákna a jejich dělení

Vlákno je charakterizováno jako těleso o kruhovém průřezu, u kterého je délka dominantním rozměrem a průměr je v porovnání s délkou vlákna takřka zanedbatelný. Průměr vlákna se pohybuje v širokém rozmezí a rozeznáváme čtyři skupiny průměrů:

- Do průměru 100 nanometrů – nanovlákna,
- 0,1 až 1 mikrometrů – mikrovlákna,
- 1 až 10 mikrometrů – střední vlákna,
- Nad 10 mikrometrů – hrubá vlákna.

Pro vlákna je charakteristické, že jejich pevnost v tahu ve směru osy vlákna je výrazně vyšší než pevnost stejného kompaktního materiálu. V technické praxi uvažujeme vlákna, která jsou vzhledem ke svým průřezům dlouhá, a potom je nazýváme dlouhovláknové kompozity, anebo krátká, a ty nazýváme krátkovláknové kompozity.[1,2,22]

Vlákna dělíme především podle struktury:

- Amorfní
- Monokrystalická
- Polykrystalická
- Polymerní
 - Přírodní
 - Syntetická: - z přírodních polymerů
- ze syntetických polymerů

2.2.1 Amorfní vlákna

Amorfní vlákna, nebo alespoň jejich většina, se vyrábí pomocí technologie rychlého tažení z taveniny vytékající z trysek o průměru cca 1 mm. Tento proces se nazývá dlužení, a je prováděn rychlostí až $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Velký vliv na vláknování má viskozita a rychlost změny viskozity s teplotou.[2]

- **Skelná a minerální vlákna**

Většina skelných vláken se vyrábí z tzv. E-skla nebo z křemenného skla, které se vyznačují vysokým elektrickým odporem a dobrými tvárnými vlastnostmi. Hlavní předností skelných vláken je jejich pevnost, která je ovlivněna mnoha faktory, především výrobními a geometrickými. Nevýhodou těchto vláken je však korozní odolnost, především proti vlhkosti.



Obr. 14 Skelné vlákno

- **Bórová vlákna**

Bórová vlákna jsou používána pro svou malou hustotu přibližně $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a velkou pevnost. Nevýhodou však je jeho tuhost a křehkost, které nedovolují jeho tažení do jemných vláken. Tyto vlákna jsou extrémně pevná a tuhá především za běžných teplot.

2.2.2 Monokrystalická vlákna

Mezi nejdůležitější zástupce monokrystalických vláken patří Whiskery, což jsou vláknité kovové monokrystalové o příčném rozměru až 0,1 mm a délky až 100 mm. Vlastnosti Whiskerů mnohonásobně převyšují vlastnosti jiných forem tuhých látek. Pevnost v tahu je uváděna až 14 GPa. Vlákna nemají kruhový průřez, ale jsou šestiúhelníková, čtvercová nebo

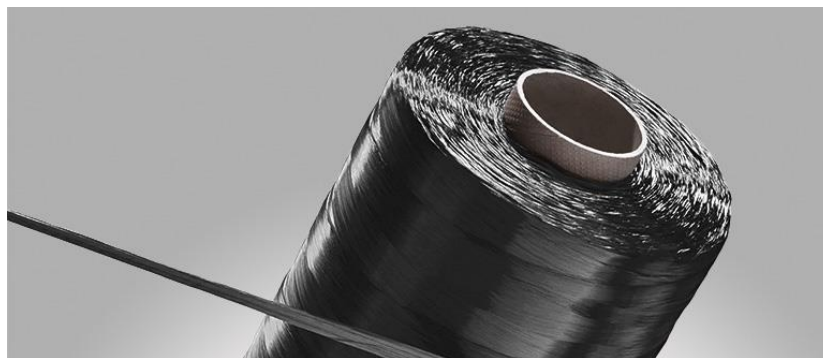
rovnoběžníková. Vlákna mají malý příčný řez, a proto jsou ohebná, takže se při mechanickém míšení s matricí nelámou.[2,12]

2.2.3 Polykrystalická vlákna

Polykrystalická vlákna se používají nejčastěji jako výztuhy kovů a keramiky, mají vynikající tuhost, pevnost a teplotní odolnost. Disponují také vysokým elektrickým odporem za vysoké teplotní vodivosti.

- **Uhlíková vlákna**

Vzhledem k tomu, že uhlík netaje, nemůže být vyráběn standartními postupy jako například kovová nebo skelná vlákna. Proto je nutné tento materiál získávat pyrolýzou organických sloučenin s výjimkou grafitu, který se vyskytuje v přírodním stavu. V technické praxi pod pojem uhlíková vlákna spadají jak vlákna uhlíková, tak i grafitová. Výhodou uhlíkových vláken jsou vysoká pevnost, vysoký modul pružnosti a nízká hustota. Polymer, který je vyztužen uhlíkovými vlákny má hustotu kolem $1,5 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$, a přesto dosahují modulu pružnosti v tahu srovnatelnou s ocelí.[2]



Obr. 15 Uhlíkové vlákno

- **Kovová vlákna**

Kovová vlákna jsou aplikována, jako vyztuž do polymerních, keramických i kovových matric. Vyrábí se z wolframu, oceli, hliníku, slitin titanu, beryllia a mnoha dalších materiálů. Kovová vlákna jsou vyráběna o průměrech desítek μm a jsou poměrně drahé s výjimkou oceli a hliníku.[2]

2.2.4 Polymerní vlákna

Polymerní vlákna nemají tak vysokou pevnost, která by je řadila mezi nejpoužívanější vlákna pro náročné aplikace. Je ale spousta aplikací, pro které jsou vhodná především díky svému poměru mezi pevností a hustotou, která je pouze $1 \text{ g}/\text{cm}^3$. Stejně tak i poměr hustoty

a tuhosti je důležitým faktorem pro jejich volbu. Polymerní vlákna jsou schopna vysokého prodloužení dříve, než dojde k překročení pevnosti. Zásadní nevýhodou polymerního vlákna je nízká odolnost proti tepelnému působení a odolnost proti UV záření. Jsou však odolná vůči chemikáliím.[5]

2.3 Forma výztuže

Samotná vlákna nemají v praxi takřka žádné využití, proto je nutné je uspořádat a vytvořit polotovar pro výrobu kompozitního systému.

2.3.1 Roving

Forma výztuže u vláknitých kompozitu je nejčastěji ve tvaru pramenců navinutých na cívce, tzv. rovingu. Z těchto cívek jsou dále zpracovávány do konečné formy, která je následně aplikována při výrobě kompozitního systému. Roving se vyrábí ze všech druhů vláken, především však ze skelných uhlíkových a aramidových vláken. V podélném směru dosahuje vysoké tuhosti a pevnosti, naopak v příčném se tyto vlastnosti zásadně snižují. Aplikace rovingu je při zpracování pomocí pultruze, kde se v kontinuálním stroji prosycuje pryskyřicí, vytvrzuje a tvaruje do výsledného profilu.[2,5]



Obr. 16 Roving na cívce

2.3.2 Tkaniny

Tkanina je definována jako soubor pramenců či vláken uspořádaných v plošné formě, kde jednotlivé prameny k sobě svírají definovaný úhel nejčastěji 90°. Tkanina je tedy vyztužena ve dvou na sebe kolmých směrech a je vhodná pro širokou škálu aplikací. Hmotností uložených vláken je možné vytvářet nové typy tkanin a získávat tím rozdílné vlastnosti dle potřeb a aplikací. Za základní druhy považujeme tři uspořádání plátnové, keprové a atlasové.



Obr. 17 Uspořádání tkanin

- **Plátnová vazba** – jelikož může docházet ke zvlnění, je vhodná spíše pro jednoduché zpracování. Je však rozměrově velice stabilní a zanechává pouze malý otřep při řezání. I přesto se jedná o jedno z nejpoužívanějších uspořádání tkaniny.
- **Keprová vazba** – zvlnění u této vazby je mnohem menší než u plátnové vazby, proto lamináty s touto výztuhou vykazují vyšší pevnost i tuhost. Je vhodnější pro složitější tvary díky svému uspořádání pramenců, je více ohebná.
- **Atlasová vazba** – vhodná především pro tvarově velmi složité aplikace a pohledové strany výrobku, jelikož toto uspořádání pramenců umožňuje vytvoření hladkého povrchu.[8]



Obr. 18 Vizuální porovnání uspořádání tkanin na výrobku

2.3.3 Rohože

Rohož je plošný polotovar pro výrobu kompozitního systému. Rohož se skládá z pramenců, které jsou ve vrstvách, a jsou spojeny pojivem. Jedná se o polotovar připravený k dalšímu zpracování a je tedy po prosycení pryskyřicí v sušárně vysušen a postoupen dalšímu zpracovatelskému procesu. Rohože s kontinuálním vláknem mají tyto vlákna neuspořádaná a bez orientace. Aby bylo možné rohože nějak rozeznávat, jsou definovány pomocí gramáže.[5,8,20]



Obr. 19 Rohož z kontinuálních vláken

3 VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

Volba výroby kompozitního systému se bude především odvíjet od náročnosti konkrétního vyráběného dílu a také od použitých materiálů jak výztuže, tak i materiálu matrice. Velký vliv na volbu technologie výroby kompozitního systému bude mít také množství vyráběných kusů, tedy zda se bude jednat o malosériovou nebo velkosériovou výrobu. Neméně podstatné pro volbu technologie budou také požadované výsledné vlastnosti jak mechanické, tak i vlastnosti povrchu konkrétního výrobku. V neposlední řadě bude také důležité zvážit rentabilitu celé výroby, což se dnes může jevit jako jeden z důležitých faktorů, který bude volbu výrobního postupu doprovázet.[9,13]

Výztuž bude do procesu vstupovat jako polotovár, který byl předem připravený a bude ve formě vlákna, rohože, multiaxiální tkaniny, anebo ve formě prepregů. Matrice do těchto procesů bude dodávána nejčastěji v kapalné formě.

Jako základní dělení pracovních postupů uvažujeme:

- Ruční výrobní postupy.
- Částečně automatizované.
- Plně automatizované výrobní postupy.
- Kontinuální postupy.
- Speciální technologie.

3.1 Ruční výrobní postupy

Ruční výroba je považována za nejjednodušší pracovní postup a jako takový je vhodný pro malosériovou výrobu, výrobu prototypů a velkoplošné díly. Pomůcky a nástroje pro tento postup jsou levné a jednoduché. Jakost výrobku, který bude vyráběn tímto postupem, je závislá především na použitých materiálech a také na odbornosti a zkušenostech samotného zpracovatele.

Při tomto postupu je výztuž kladena ručně a stejně tak i její prosycování. K prosycování slouží ruční nářadí – válce a štětce. Kvalita práce má v tomto postupu zásadní vliv na výsledné vlastnosti kompozitního systému, je tedy nutné zamezit vzniku vzduchových mezer, které by je degradovaly. Jelikož však tento proces probíhá za atmosférického tlaku, není možné všechny vzduchové kapsy dokonale odstranit.[9]

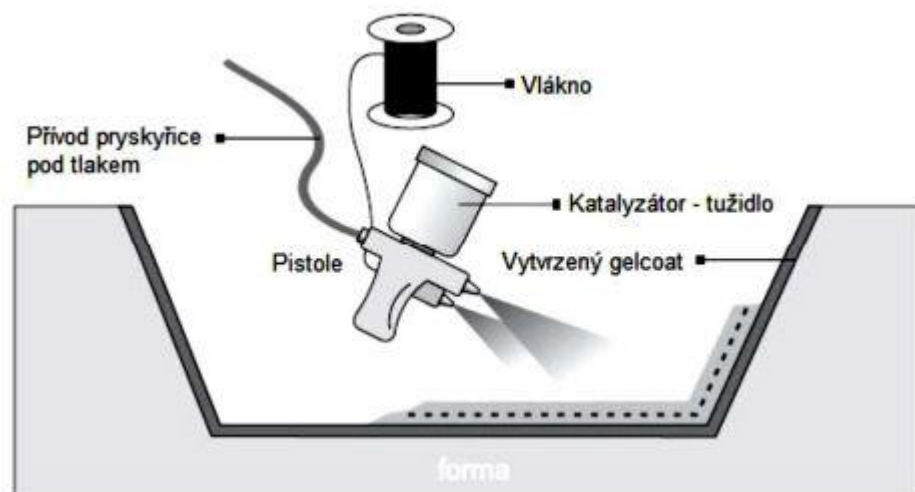


Obr. 20 Schéma ručního laminování

3.2 Částečně automatizované

Za částečnou automatizaci při výrobě kompozitního systému považujeme modifikovanou technologii ručního postupu. Nejpoužívanější je technologie nanášení pomocí speciální stříkací pistole, která je prováděna ručně nebo ji lze do určité míry automatizovat. Postup spočívá ve společném nanášení matrice a sekané výztuže (vlákna o specifické délce). Nejčastěji je tento postup používán při výrobě dílců z pryskyřice a její výztuže. Technologie je vhodná pro malé série velkých a středně velkých dílů, které mají jednoduchý tvar.

Pro tuto technologii stejně jako pro ruční kladení je využíváno jednodílných lehkých forem. Zhutňování je prováděno stejně jako u ručního kladení, a to pomocí válce nebo štětce. Díky použití určité míry automatizace je možné docílit reprodukovatelného rozdělení výztuže a tím i tloušťky výlisku.[9,11]



Obr. 21 Schéma částečné automatizace laminování (stříkání)

3.2.1 Nízkotlaké technologie

Pro dosažení kvalitnějších výlisků jsou vyvinuté určité technologie, které využívají nízkého tlaku k vytvoření lepšího povrchu a homogenity výrobku.

- **Lisování pomocí vakuového vaku**

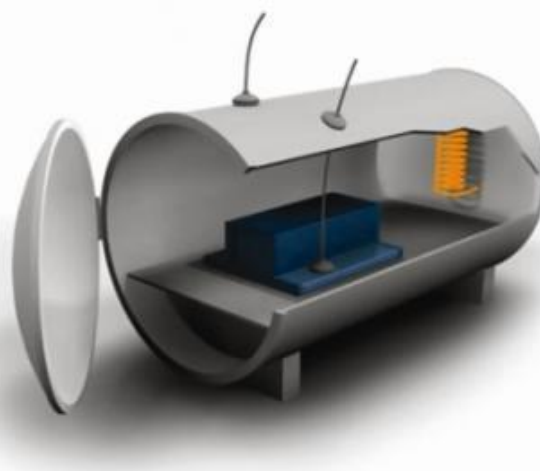
Stejně jako u ručního kladení nebo stříkání se používá jednodílná forma. Laminát se přikryje porézní separační folií, na kterou se položí hrubá odsávací tkanina a forma se utěsní pomocí těsnění a folie. Připojením k čerpadlu se celá forma vakuuje a atmosférický tlak způsobí zhutnění laminátu. Pomocí dvoudílné formy je možné vyrábět výlisky s oboustranným hladkým povrchem.

- **Lisování pomocí tlakového vaku**

Jedná se o technologii s opačným principem, než je vakuový vak. Při této technologii musí být negativní forma uzavřena krytem tak, aby bylo možné dosáhnout ve formě rovnoměrného přetlaku, a to až 0,8 MPa. Při tomto postupu je dosahováno ještě lepších parametrů povrchu než u předchozí technologie.

- **Lisování v autoklávu**

Tato technologie spojuje tlakové lisování a lisování pomocí vakuového tlaku. Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, u které jsme schopni přesně regulovat tlak i teplotu, a tím umožňuje stabilizaci a vytvrzení kompozitních materiálů. Technologie autoklávu je velice finančně i energeticky náročná. Produkty vyrobené tímto postupem jsou vysoce kvalitní a uplatňují se v leteckém průmyslu.[9,13]



Obr. 22 Autokláv[13]

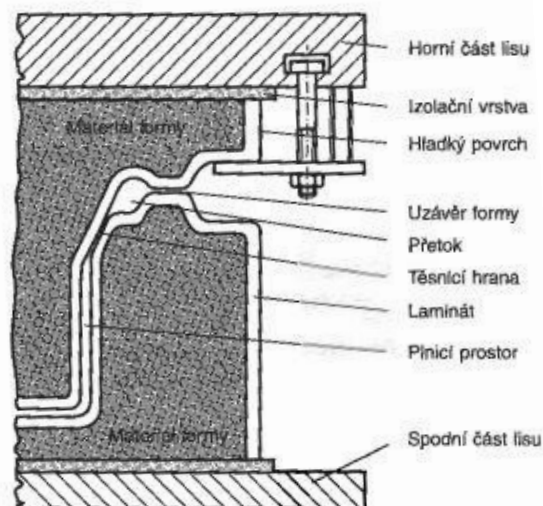
3.3 Plně automatizované výrobní postupy

Tento postup je dělen na technologie prováděné za studena, za tepla a na tzv. mokré lisování. Tyto technologie jsou plně automatizované a výrobek vyjmutý z lisovací formy je již kompletně hotový. Odpadá zde následná operace odstranění přetoků nebo leštění. Značnou nevýhodou je velká počáteční investice do zařízení a nutnost použití ocelových forem. Proto je tento postup vhodný pouze pro velkosériovou výrobu.

3.3.1 Mokré lisování

Při tomto postupu se do formy vloží jednotlivé vrstvy výztuže, nalije se pryskyřice a nástroj se uzavře. Technologie je prováděna bez vstupu tepla (lisování zastudena v rozmezí teplot od 30 do 60 °C) nebo za přívodu tepla ve vytápěné formě (lisování za tepla v rozmezí teplot od 80 do 150 °C). Proces je doprovázen tlakem ve formě, který se pohybuje v rozsahu 0,5 – 2 MPa.

Při mokrém lisování je nutné dodržet přesné rozměry výztuže a je nutné poměrně přesně odměřit množství pojiva tak, aby došlo po uzavření formy k jejímu dokonalému zaplnění.[9,20]



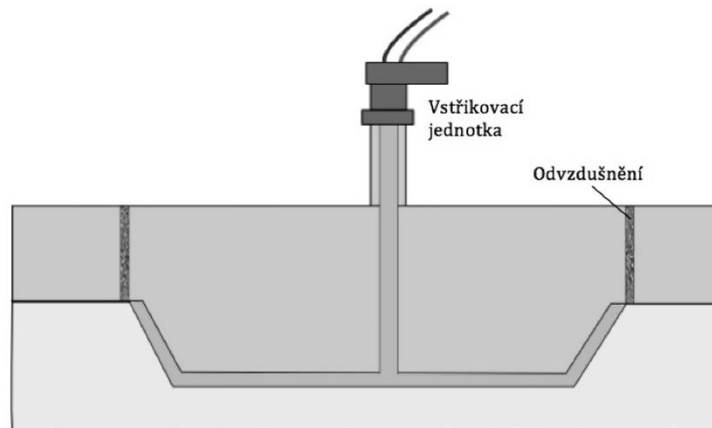
Obr. 23 Schéma mokrého lisování[9]

3.3.2 Lisování předimpregnovaných lisovacích hmot za tepla

Pro tuto technologii je používáno hydraulických lisů a ocelových forem. Vytvrzování je prováděno pomocí vnějšího působení tepla na materiál uvnitř formy. Přívod tepla je prováděn pomocí elektrického ohřevu, olejem nebo parou. Proces se od technologie za mokra liší pouze vstupem tepla do pracovního prostoru.[9]

3.3.3 Vysokotlaké vstřikování – RTM

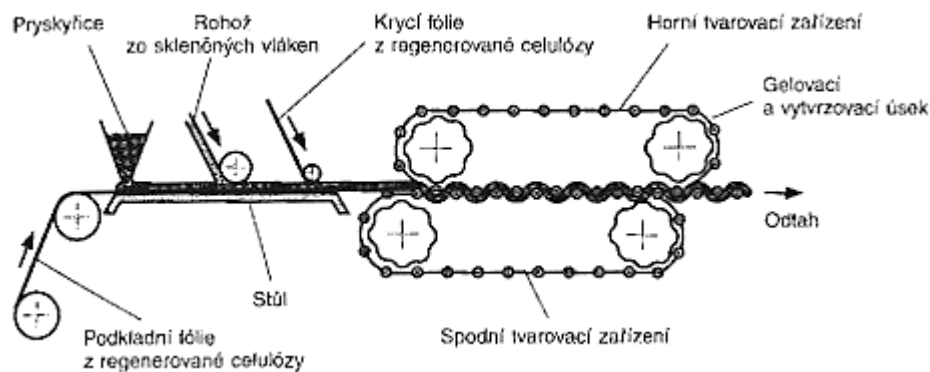
K tomuto postupu je využíváno dvoudílné formy, která se po vložení výztuže uzavře. Pojivo je do dutiny formy vstřikováno pomocí injekční pistole z vysokotlaké pumpy. Pojivo je vstřikováno tak dlouho, dokud nedojde ke kompletnímu prosycení a zaplnění dutiny formy. Poté je výrobek vytvrzen a následně vytažen z dutiny formy. Mezi hlavní výhody této technologie patří vysoká přesnost výrobku s dobrým povrchem na obou stranách.[9]



Obr. 24 Schéma vysokotlakého vstřikování - RTM

3.4 Kontinuální postupy

Za kontinuální laminace se považují postupy, které vytváří příčné nebo podélně zvlněné nekonečné pásy s konstantním průřezem. Na nosnou fólii s vrstvou pryskyřice se nanáší výztuž, kde se prosycuje pryskyřicí a následně překrývá další folií. Dále musí tento pás projít tvarovacím zařízením a také vytvrzovacím tunelem. Poté je pás odtahován a navíjen na cívku.



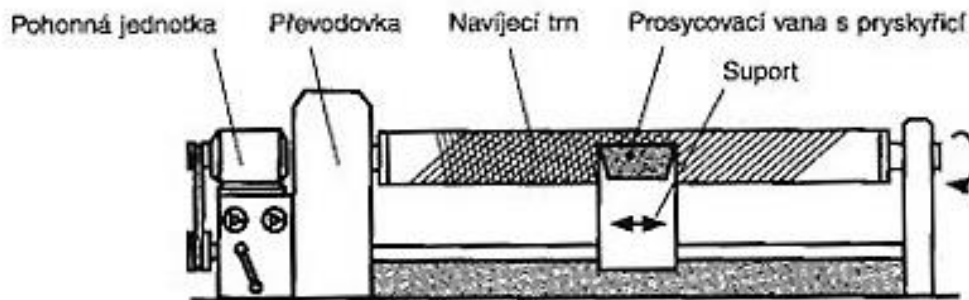
Obr. 25 Schéma kontinuální výroby laminátu[9]

Profily s rozdílným průřezem se kontinuálně vyrábí technologií tažení neboli pultruzí. Orientace vláken u tohoto postupu je dána většinou technologií, však výztuž je rovnoběžná

s podélnou osou profilu. Zařízení pro tuto technologii je finančně, ale i energeticky velice náročné a je také velkých rozměrů, které kladou vysoké nároky na velikost výrobních prostor.[9,20]

3.5 Speciální technologie

Do této skupiny technologií lze zařadit např. navíjení, kdy jsou vyráběna dutá tělesa symetrická k ose rotace. Jedná se o roury, nádrže, tlakové zásobníky a jednoduché rotační prvky. Technologie má vysokou míru reprodukovatelnosti a vysokou přesnost výroby. Při navíjení se spojuje rotační pohyb trnu s dopředným a zpětným pohybem suportu, což umožňuje ukládat pramence prosycené pryskyřicí na trn podle navíjecího trnu.[9]



Obr. 26 Schéma technologie navíjení[9]

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

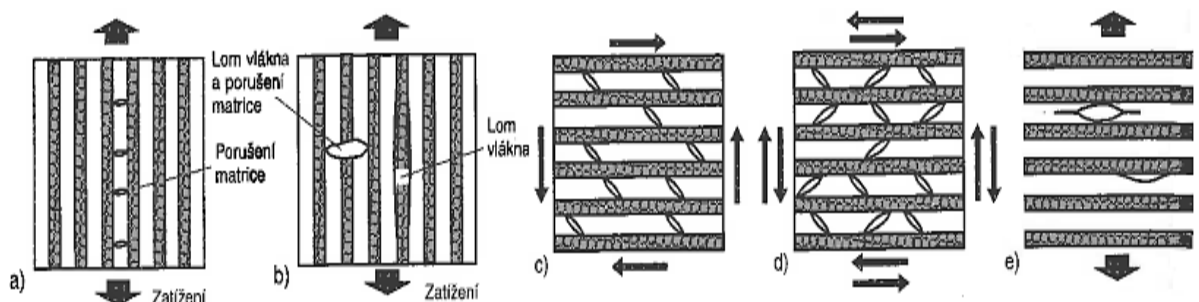
Na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů nemá v porovnání s nevyztuženými plasty až tak zásadní vliv prostředí v době zatěžování. Podmínkami prostředí je uvažována vlhkost vzduchu, agresivní media, teplota a UV záření. Vliv na jejich chování při mechanickém namáhání má především vytvrzení matrice, rozložení plniva nebo vláken, orientace vláken nebo jejich zakřivení a zvláště obsah vláken.

Porušení nebo únavové procesy jsou u kompozitních materiálů mnohem složitější než u homogenních materiálů. U těchto materiálů určuje např. vznik a rychlost šíření jednotlivé trhliny stav poškození, a tím i samotnou životnost materiálu.

Pozorujeme u statických i dynamických zkoušek pevnosti kompozitu lokální poškození různých druhů, které způsobují porušení nosných vláken, a to předchází celkovému lomu materiálu. Zejména ve vrstvách, kde existuje nebezpečí vzniku mezivláknové poruchy. Jedná se např. o zatížení tahem kolmo ke směru vláken nebo smykem pod úhlem 45° , mohou v těchto případech vznikat trhliny. Tyto trhliny se negativně projeví i u vrstev zatížených ve směru vláken. Z toho plyne, že vrstvy s orientací vláken 0° ke směru zatížení samy vykazují vyšší pevnost než stejné vrstvy ve spojení s vrstvami s orientací výztuže 90° ke směru zatížení, ve kterém dochází k prvním poruchám.[9,16,17]

4.1 Mechanismus porušování

U laminátů, které zatěžujeme víceosým namáháním, je větší nebezpečí vzniku mezivláknového poškození než u jednosměrně vyztužených vrstev při namáhání ve směru vláken. Vznik poškození se bude vždy odvíjet od druhu zatížení a lze také očekávat vznik tvorby různých typů trhlín. Nepravidelnosti v uspořádání vláken, vzduchové bubliny a nedostatky v adhezním spojení složek se projevují jako koncentrace protažení a napětí.[17,21]



Obr. 27 Vizualizace vzniku trhlín laminátu

- a) Zatížení tahem podél vláken, vrubový násobný lom
- b) Zatížení tahem podél vláken, lom vláken
- c) Mezivláknové trhliny pod úhlem 45° při smykovém zatížení
- d) Mezivláknové trhliny pod úhlem $\pm 45^\circ$ při střídavém smykovém napětí
- e) Mezivláknové trhliny a odtržení vlákna od matrice v rozhraní při zatížení tahem

4.2 Mechanické vlastnosti kompozitních systémů

4.2.1 Pevnost

Hodnotu pevnosti považujeme za nejjednodušší a nejčastější vyjádření pevnosti běžných materiálů, ale u vyztužených plastů dlouhými vlákny tato hodnota není k jejímu určení dostatečná, neboť její pevnost výrazně závisí na druhu namáhání. Je možné pozorovat, že pevnost v tahu a tlaku je značně rozdílná. U kompaktních homogenních materiálů je pevnost v tahu, (kromě jiného) vlivem počátečních poruch v materiálu, které způsobují koncentraci napětí, menší než pevnost v tlaku, kde jsou např. trhliny schopné přenášet silové zatížení, protože jejich břehy jsou k sobě přitlačovány.

V případě epoxidové pryskyřice, která je jednosměrně vyztužena skelnými vlákny, existuje zřetelná závislost pevnosti v tahu a tlaku na obsahu vláken. Tento jev vzniká v důsledku toho, že matrice není schopna zajistit vláknům dostatečnou oporu proti vybočení. Dalším důvodem je výrazně větší příčná deformace matrice než skelného vlákna, a to díky rozdílnému Poissonovu číslu, které je pro matrici 0,35 až 0,4 a pro skelné vlákno 0,25. Příznivější situace nastává při aplikaci uhlíkových nebo aramidových vláken.[9,16]

4.2.2 Tuhost

U tuhosti na rozdíl od pevnosti znamená uložení tužších vláken do matrice vždy nárůst tuhosti (modulu pružnosti) bez ohledu na to, v jakém směru vlákna probíhají. Jelikož je modul pružnosti stanovován při nízkých úrovních namáhání, neprojeví se u něj snížení pevnosti matrice s příčně uloženými vlákny, které se projevuje až při vyšších napětích.

Modul pružnosti dosahuje své nejvyšší hodnoty ve směru uložení vláken. V závislosti na úhlu mezi směrem zatížení a směrem vlákna dochází k výrazným změnám. Ve směru kolmém k vláknům je jeho hodnota nejnižší, ale i tak je vyšší než hodnota nevyztužené matrice. Rozdílná situace nastane při zatížení smykem, kdy ve směru vlákna je hodnota tuhosti nejmenší, protože se při zatížení více uplatňuje tuhost matrice.[9,16]

4.3 Zkoušení mechanických vlastností kompozitních systémů

Zkoušení kompozitních materiálů je v principu velmi podobné zkoušení homogenních materiálů. Je ale u těchto zkoušek možné najít různé odlišnosti, které jsou způsobeny rozdílnou skladbou materiálu a také zkoumanou hodnotou, a to vše díky anizotropii kompozitního materiálu.[21]

4.3.1 Statistické předpoklady zkoušek kompozitních materiálů

U kompozitních materiálů pozorujeme vykazování větších rozptylů vlastností než u konvenčních materiálů. Proto považujeme statickou analýzu za nezbytnou součást hodnocení mechanických vlastností kompozitního systému. Pravidlem je minimálně pět zkoušek pro jedny zkušební podmínky, kterými jsou například teplota a vlhkost. Při těchto zkouškách se určuje pevnost v tahu a tlaku ve směru vláken, pevnost v tahu a tlaku kolmo k vláknům a pevnost ve smyku.

Pevnost kompozitu je funkcí pravděpodobnosti výskytu nebezpečného defektu. Pro požadovanou přesnost měření Δ je počet měření dán rovnicí:

$$n = u_p^2 \frac{\sigma^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

V rovnici (1) je σ směrodatná odchylka hlavního souboru a u_p je pravděpodobnostní koeficient. Jelikož neznáme směrodatnou odchylku hlavního souboru σ , používáme tedy odhad σ .

$$\sigma^2 = s^2 \frac{n}{n-1} \quad (2)$$

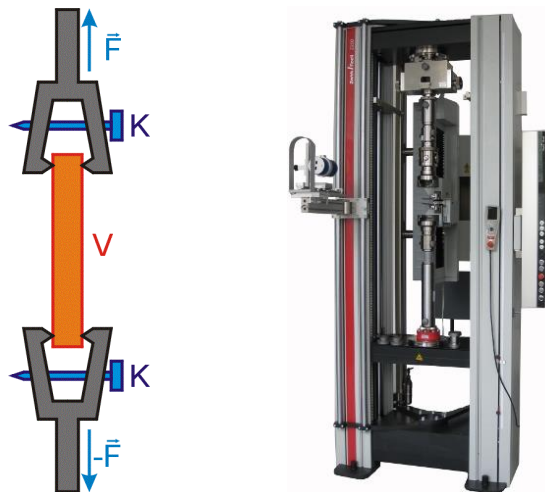
V rovnici (2) je s výběrová směrodatná odchylka a n je počet měření při jejím stanovení. Potřebný počet vzorků je potom dán rovnicí:[18]

$$n \geq u_p^2 \frac{\sigma^2}{\Delta^2} \quad (3)$$

4.3.2 Tahová zkouška

Samotná zkouška a její provedení je obdobné jako u homogenního materiálu. Pro tahovou zkoušku kompozitního materiálu je navrženo mnoho tvarů a geometrií zkušebních těles a je možné je nalézt v příslušných normách ISO, EN, ČSN, DIN, aj. Vzorky jsou obvykle obdélníkového tvaru, ale je možné testovat i jiné.

Zkouška je prováděna na trhacím stroji, do kterého je umístěn vzorek do hydraulických nebo pneumatických čelistí. Na vzorek následně působí síla ve směru jeho podélné osy. Tato síla je postupně zvětšována až do chvíle, kdy dojde ke kritické deformaci a vzorek je přetržen. K přesnému určení podélné a příčné deformace je obvykle používán elektronický průtahoměr. Výstupem tahové zkoušky je modul pružnosti v tahu E [MPa], mez pevnosti v tahu R_m [MPa] a poměrné prodloužení ε . Pokud přístroj není schopen vypočítat tyto hodnoty, lze je jednoduchými výpočty získat z naměřených dat.[7,12]



Obr. 28 Schéma tahové zkoušky a zařízení pro tahovou zkoušku

Po přetržení vzorku je možné vyhodnotit a spočítat mez pevnosti v tahu R_m [MPa], což je smluvní napětí na mezi pevnosti z hodnoty maximálního zatížení F_{Max} [N] a původního průřezu S_0 ze vztahu:

$$R_m = \frac{F_{Max}}{S_0} [MPa] \quad (4)$$

Dále je možné určit tažnost A , která je dána poměrným prodloužením ε [-], vyjádřeným v procentech pomocí vztahu:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 [\%], \quad (5)$$

kde l [mm] je délka vzorku při přetržení a l_0 [mm] je původní nedeformovaná délka vzorku. Youngův modul E [MPa] neboli modul pružnosti v tahu je definován jako poměr napětí a jím vyvolané deformace, a lze vyjádřit vztahem, který vychází z Hookova zákona:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa], \quad (6)$$

kde σ_t [MPa] je napětí v tahu a ε [-] je relativní deformace zkušební vzorku.[7]

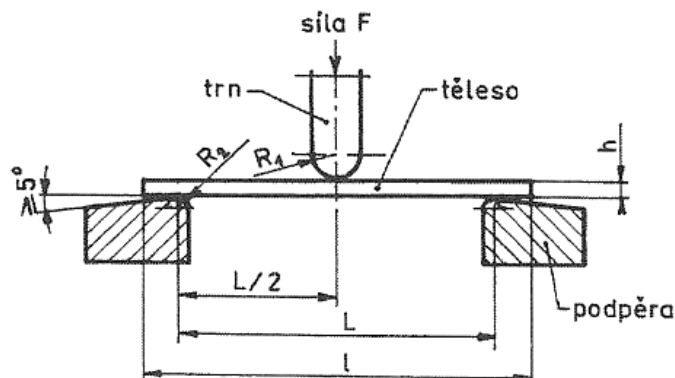
4.3.3 Zkouška ohybem

Ze zkoušky ohybem dostaneme důležité informace, které je možné následně aplikovat při konstrukčních řešeních, kde zatížení vyvolává čistý ohyb. To je stav, který nám popisuje technická teorie ohybu a je nutné se řídit jeho zákonitostmi. Nejčastějším příkladem konstrukce namáhané na ohyb je nosník, který je na dvou nebo více podporách a nese zatížení, které působí v opačném směru, než je uložení. Ohybovou zkoušku také často používáme pro stanovení modulu pružnosti E [MPa] u materiálů, u kterých není možné tento modul určit tahovou nebo tlakovou zkouškou.

Při ohybu je napětí v principu rozloženo tak, že v dolních vrstvách je tahové, a směrem k neutrální ose se zmenšuje a přes nulové napětí se mění v horní polovině průřezu (pod působícím nosníkem) na tlakové. Rozlišujeme tříbodovou a čtyřbodovou zkoušku ohybem.[7,15]

- **Tříbodová zkouška ohybem**

Jedná se o standartní zkoušku ohybem, kde je zkušební vzorek při zkoušce podepřen dvěma podporami na koncích pomyslného nosníku a je konstantní rychlostí zatěžován trnem, který působí uprostřed. Zkouška je prováděna tak dlouho, dokud není vzorek rozlomen, nebo deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty, jejíž velikost je požadována.



Obr. 29 Schéma tříbodové ohybové zkoušky

Výstupem zkoušky jsou ohybové křivky závislosti síly (napětí) na průhybu (deformaci v %). Z těchto křivek se vyhodnocují potřebné charakteristické hodnoty. V průběhu zkoušky je zaznamenávána síla působící na zkušební vzorek a velikost odpovídajícího průhybu vzorku.[23]

Pevnost v ohybu je maximální napětí v ohybu, které zkušební vzorek vydrží během zkoušky. Napětí v ohybu σ_o je napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpor a je vyjádřen vztahem:

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot F_{Max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa], \quad (6)$$

kde F_{Max} [N] je zatěžující síla, l [mm] vzdálenost mezi podpěrami, b [mm] je šířka vzorku a h [mm] je výška vzorku.

Modul pružnosti v ohybu E , získaný z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku, se vyjádří pomocí vztahu:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot P \cdot b \cdot h^3} [MPa], \quad (7)$$

kde P [mm] je průhyb vzorku při zkoušce.[24]

- **Čtyřbodová zkouška ohybem**

Zkušební vzorek je podepřen na svých koncích dvěma podporami. Vzorek je uprostřed zatěžován od nulové hodnoty čtyřbodovým ohybem a to symetricky ke středu tělesa. Při zatěžování zkušebního tělesa se opět snímá závislost síly na průhybu vzorku. Průhyb se měří jako změna polohy středu tělesa vzhledem k nejbližším opěrám. Čtyřbodové uspořádání zkoušky má vyšší vypovídající hodnotu pevnosti ohybu - těleso se poruší ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Protože jsou v této části nosníku při uvedeném zatížení posouvající síly rovny nule, dojde k porušení v oblasti namáhání čistým ohybem. U tříbodového uspořádání zkoušky se vždy jedná o kombinaci ohybu a smyku. Proto je čtyřbodové uspořádání zkoušky vhodnější.[24]

Jsou-li aplikovány dvě síly F [N] ve stejné vzdálenosti x [mm] od podpěr, pak pro čtyřbodový systém platí:

$$M_{Max} = F_{Max} \cdot x [N \cdot mm] \quad (8)$$

Pevnost v ohybu se tedy spočítá pomocí:

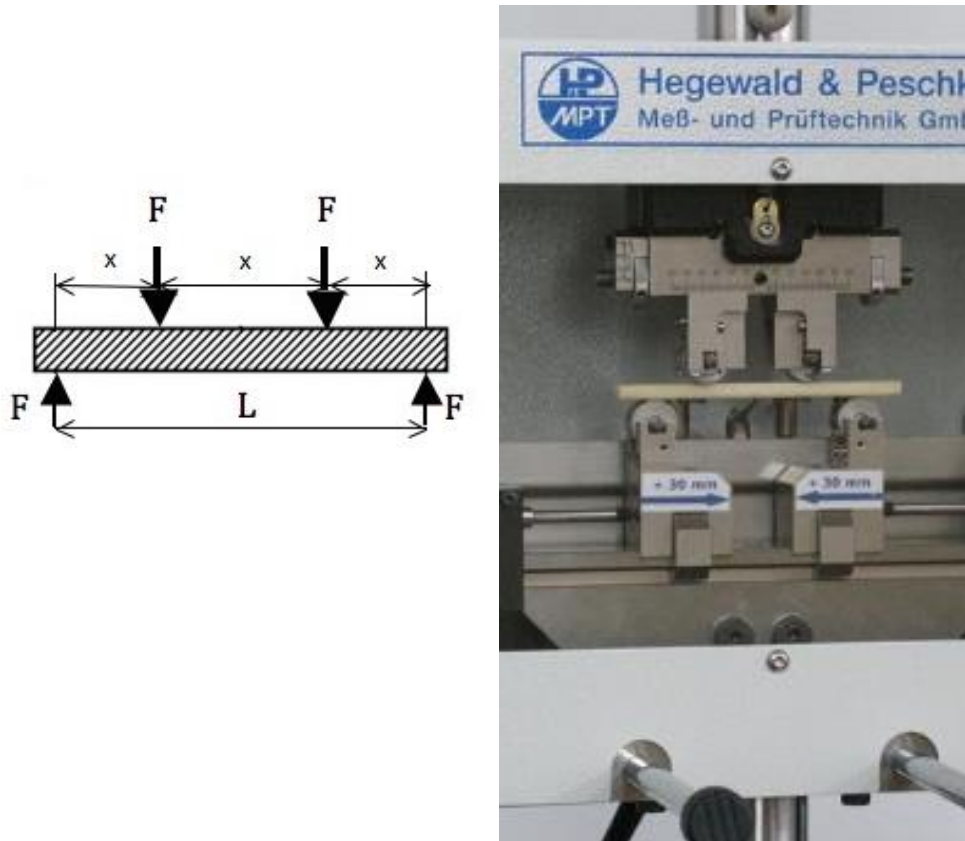
$$\sigma_y = \frac{6 \cdot F_{Max} \cdot x}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (9)$$

Vztahy pro výpočet modulu pružnosti pro čtyřbodovou zkoušku:

$$E_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot x}{b \cdot h^3 \cdot y} \cdot (3 \cdot (2x + b)^2 - 4 \cdot x^2) [MPa] \quad (10)$$

Poté se průhyb y [mm] vypočítá ze vztahu:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot x}{b \cdot h^3 \cdot E_y} \cdot (3 \cdot (2x + b)^2 - 4 \cdot x^2) [mm] \quad (11)$$

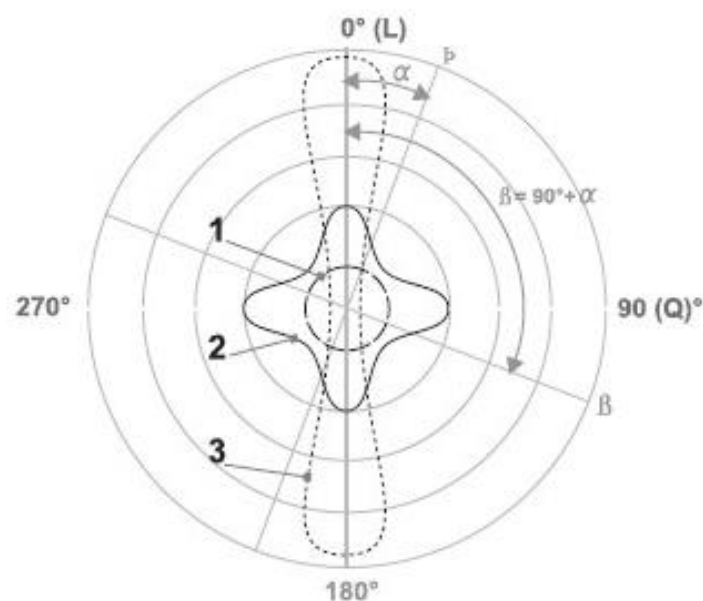


Obr. 30 Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky a zařízení pro ohybovou zkoušku

5 POLÁRNÍ DIAGRAM

Polární graf (diagram) je speciální zobrazení hodnot, které mohou vykazovat cykličnost, nebo u nich záleží na směru. Při konstrukci polárního grafu jsou pro zobrazení jednoho bodu potřeba dva údaje, úhel a velikosti od počátku (středu). Tento druh grafického vyhodnocení se jeví jako vhodný při porovnávání např. pevností v tahu pro různé křížení vrstev u kompozitního systému a bude tedy použit pro výstup této diplomové práce.[25]

Pevnost v tahu v polárním diagramu
Tensile strength - polar diagram



u laminátu/ composite type: 1. rohožového/ mat
 2. tkaninového/ fabric
 3. jednosměrného/ unidirectional

L • podélný směr (u tkaniny směr osnovy)/ longitudinal direction (warp)
 Q • kolmý směr (u tkaniny směr útku)/ orthogonal direction (weft)

Obr. 31 Pevnost v tahu v polárním diagramu[25]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

Na základě poznatků z teoretické části diplomové práce bude praktická část zpracovávána podle následujících cílů. Cílem praktické části je navrhnout a následně vyrobit skladbu kompozitního systému v několika variantách. Systém bude obsahovat vždy jedenáct vrstev a bude symetrický vůči svému středu. Použité materiály budou totožné z důvodu zachování stejných podmínek. Systémy budou následně podrobeny mechanickým zkouškám a jejich výsledky budou porovnány a diskutovány. Mechanické vlastnosti budou zkoušeny pomocí zkoušky tahem a tříbodovým ohybem. Tyto zkoušky by měli potvrdit vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů.

Hlavní okruhy pro dosažení stanovených cílů této práce jsou:

- Návrh materiálového složení kompozitních systémů s různým křížením vrstev
- Popis technologie a postupu výroby zkušebních těles
- Experimentální testování zkušebních těles dle zvolených norem
- Zhotovení polárního diagramu pro daný kompozitní systém
- Vyhodnocení experimentálních výsledků a diskuze

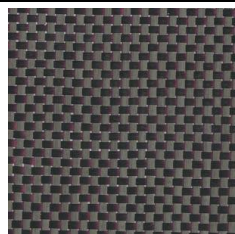

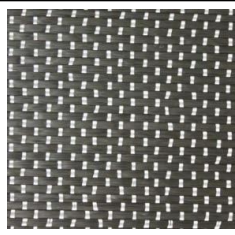
7 NÁVRH MATERIÁLOVÉHO SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH SYSTÉMŮ

Složení kompozitního systému je voleno po konzultaci s vedoucí diplomové práce a s přihlédnutím na dodržení pravidel skladby kompozitních systémů. Pro tuto práci byl zvolen systém složený z jedenácti vrstev, aby bylo možné dodržet pravidla symetrie laminátu, tedy aby skladba byla symetrická kolem osové vrstvy. Další důvod pro volbu jedenácti vrstvého laminátu je dostatečný prostor pro jeho variabilitu, kdy je možné každou vrstvu orientovat jiným směrem. V neposlední řadě byla volba podřízena také limitním podmínkám zkušebních zařízení, které při zkouškách dosahovalo svého maxima i po provedených úpravách.

7.1 Výztuž

Volba výztuže se odvíjela od jejího praktického využití, kdy tento typ výztuže pokrývá velké procento veškeré produkce kompozitních systémů. Má širokou míru uplatnění, je dostupný ve velkém množství plošných hmotností. Pro výrobu a následné experimentální testování vzorků byly zvoleny výztuhy z uhlíkové tkaniny. Technické listy jsou přiloženy v příloze (PI, PII, PIII).

Tab. 1 Uhlíkové tkaniny

Fotka tkaniny	Druh vazby	Plošná hmotnost [g/m ²]	Konstrukce
	Plátňová	200	osnova - 5 útek - 5
	Keprová	280	osnova - 7 útek - 7
	Jednosměrná	160	osnova - 5 útek - 5

7.2 Matrice

Pro výrobu zkušebních těles byly použity dva druhy pryskyřice. Obě jsou určeny pro ruční laminaci a mají rozdílné vlastnosti, které je možné porovnávat. Především se jedná o rozdílné hustoty v kapalném stavu, gely při 25°C a také v neposlední řadě rozdílná cena, která by při jejich volbě hrála důležitou roli.

7.2.1 Epoxidová pryskyřice

Tato pryskyřice je vysoce kvalitní a je certifikována pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Pryskyřice s tužidlem, které výrobce doporučuje. Tato viskózní směs rychle a kvalitně prosytí vlákna. Díky volbě této pryskyřice je snižována hmotnost výrobku a je zvyšována užitková hodnota. Technický list jako příloha P IV.

Tab. 2 Specifikace kapalné pryskyřice a tužidla při 25°C

Vlastnosti	Pryskyřice	Tužidlo
Hustota [g/ml]	1,18-1,23	0,94-0,97
Viskozita [mPa.s]	600-800	50-100
Směšovací poměr v hmotnostních dílech	100	40
Geltime při 25°C [h]	2-3	

7.2.2 Vývojová polyuretan-metakrylátová pryskyřice

Jako druhý materiál matrice je použita vývojová epoxidová pryskyřice s dobrou kompatibilitou k uhlíkovým vláknům. Tato pryskyřice je nehořlavá, má výborné mechanické vlastnosti a má zvýšené interlaminární vlastnosti ve smyku, tlaku a ohybu. Technický list jako příloha P V.

Tab. 3 Specifikace kapalné vývojové pryskyřice při 25°C

Vlastnosti	Vývojová pryskyřice
Hustota [g/ml]	1,18
Viskozita [mPa.s]	200-300
Směšovací poměr v hmotnostních dílech	100
Geltime při 25°C [h]	0,7-1

7.3 Skladba kompozitních systémů pro experimentální testování

Pro experimentální část bylo nutné vyrobit několik kompozitních systémů o rozdílné skladbě materiálové (výztuha, matrice) i rozdílné skladbě vrstev, především jejich orientace. Kompozitní systémy byly vyrobeny rozdílnými metodami, a to metodou ruční laminace a ruční laminace pod vakuovou fólií. Skladba vzorků byla následující:

- **Vzorek A** [0₁₁]

Jedenácti vrstvý systém se stejnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny plátňové o plošné hmotnosti 200 g/m² (tkanina 1). Matrice vývojová polyuretan-metakrylátové pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace pod vakuovou fólií. Značení [0₁₁]. Vzorek byl vyroben z 400g tkaniny, 343g pryskyřice a 137g tvrdidla.

- **Vzorek B** [45₁₁]

Jedenácti vrstvý systém se stejnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny plátňové o plošné hmotnosti 200 g/m² (tkanina 1). Matrice vývojová polyuretan-metakrylátové pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace pod vakuovou fólií. Značení [45₁₁]. Vzorek byl vyroben z 366g tkaniny, 286g pryskyřice a 115g tvrdidla.

- **Vzorek C** [0₁₁]

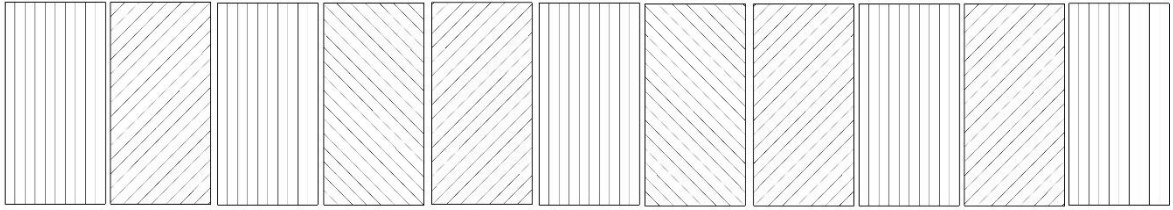
Jedenácti vrstvý systém se stejnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny keprové o plošné hmotnosti 280 g/m² (tkanina 2). Matrice epoxidová pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace pod vakuovou fólií. Značení [0₁₁]. Vzorek byl vyroben z 360g tkaniny, 286g pryskyřice a 115g tvrdidla.

- **Vzorek D** [45₁₁]

Jedenácti vrstvý systém se stejnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny keprové o plošné hmotnosti 280 g/m² (tkanina 2). Matrice epoxidová pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace pod vakuovou fólií. Značení [45₁₁]. Vzorek byl vyroben z 538g tkaniny, 476,5g pryskyřice a 190g tvrdidla.

- **Vzorek E** [(0/45/0/±45/0)₂]_s

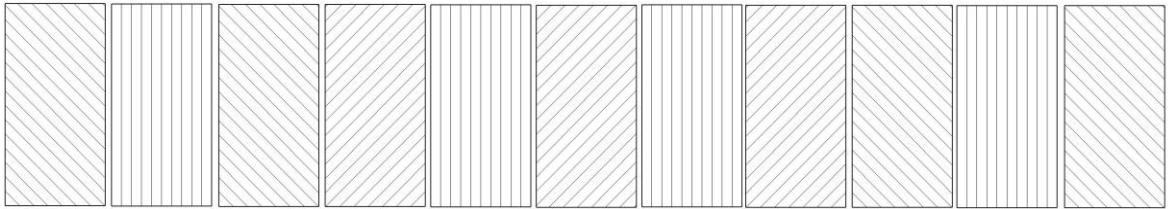
Jedenácti vrstvý symetrický systém s rozdílnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny plátňové o plošné hmotnosti 160 g/m² (tkanina 3). Matrice epoxidová pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace. Značení [(0/45/0/±45/0)₂]_s. Vzorek byl vyroben z 105g tkaniny, 115g pryskyřice a 46g tvrdidla.



Obr. 32 Skladba laminátu vzorku E

- **Vzorek F** $[(45/0/\pm 45/0/45)_2]_s$

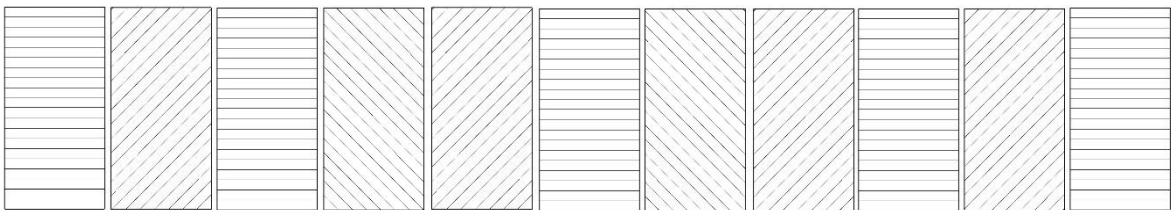
Jedenácti vrstvý symetrický systém s rozdílnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny plátňové o plošné hmotnosti 160 g/m^2 (tkanina 3). Matrice epoxidová pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace. Značení $[(45/0/\pm 45/0/45)_2]_s$. Vzorek byl vyroben z 67g tkaniny, 64g pryskyřice a 26g tvrdidla.



Obr. 33 Skladba laminátu vzorku F

- **Vzorek G** $[(90/45/90/\pm 45/90)_2]_s$

Jedenácti vrstvý symetrický systém s rozdílnou orientací tkaniny ve všech vrstvách. Výztuha z uhlíkové tkaniny plátňové o plošné hmotnosti 160 g/m^2 (tkanina 3). Matrice epoxidová pryskyřice. Metoda výroby pomocí ruční laminace. Značení $[(90/45/90/\pm 45/90)_2]_s$. Vzorek byl vyroben z 105g tkaniny, 115g pryskyřice a 46g tvrdidla.



Obr. 34 Skladba laminátu vzorku G

8 VÝROBA KOMPOZITNÍHO SYSTÉMU

Pro experimentální část této práce bylo nutné vyrobit několik kompozitních systémů, ze kterých bylo následně vytvořeno dostatečné množství zkušebních těles. Tato tělesa byla následně podrobena mechanickým zkouškám dle předepsaných norem. Jak již bylo zmíněno v úvodu praktické části, byly vytvořeny kompozitní systémy složené ze dvou druhů pryskyřic a z uhlíkových tkanin o různé skladbě a plošné hmotnosti. Každý vyrobený kompozitní systém má také jinou skladbu a především orientaci. V každém systému je ale zachováno množství vrstev, tedy jedenáct.

8.1 Výroba kompozitního systému pomocí ruční laminace

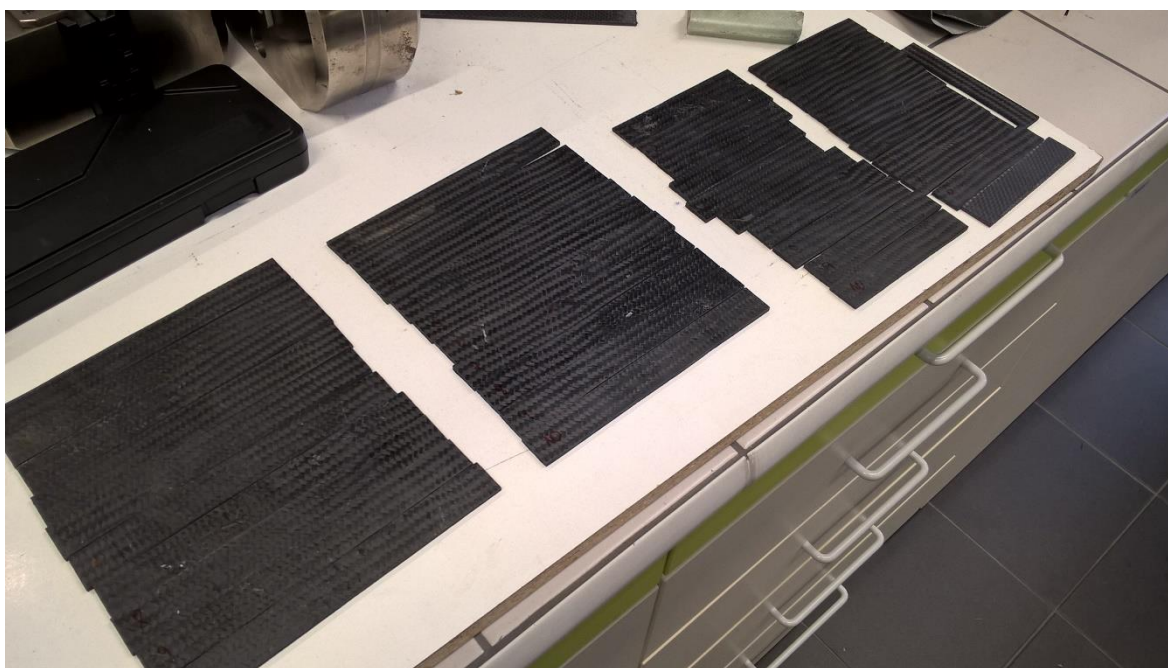
Ruční laminace začíná důkladnou přípravou podložky, která v těchto případech byla skleněná deska. Desku je nutné důkladně očistit a následně nanést separátor v několika vrstvách. Jako separátor byl použit základový vosk. Každá vrstva byla po nanesení rozleštěna, a to se opakovalo ve třech vrstvách. Jako poslední separační vrstva byl použit separátor PVA, který znásobuje spolehlivost, v kombinaci se separačním základovým voskem. Nutnost nanesení separátoru je především z důvodu komfortního odformování výrobku.

Dalším krokem při výrobě kompozitního systému je navážení výztužné tkaniny a podle hmotnosti této tkaniny příprava potřebného množství matrice, v tomto případě pryskyřice s tužidlem. Pro ruční laminaci je vhodné připravit dle druhu tkaniny asi 1,2 násobek hmotnosti výztuže. Poměr pryskyřice a tvrdidla je předepisován v hmotnostních dílech, v tomto případě byl použit poměr 100:40. Obě složky byly důkladně smíchány a připraveny k laminaci.

Jako první vrstva přímo na separační vrstvu byla nanesena pryskyřice pomocí rýhovaného válečku. Na tuto rovnoměrnou vrstvu byla položena první vrstva tkaniny, která byla upravena tak, aby její geometrie byla rovnoběžná s hranami podkladové formy. Tato vrstva tkaniny byla prosycena pryskyřicí opět pomocí rýhovaného válečku až do fáze, kdy je struktura bez vzduchových kapes. Tento postup byl opakován u všech jedenácti vrstev. Po položení a prosycení poslední vrstvy se nechal laminát vytvrdnout za laboratorní teploty 23,6 °C po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byl laminát odstraněn z podložky, orýsován a nařezán na jednotlivá zkušební tělesa, která byla podrobena mechanickým zkouškám.



Obr. 35 Příklad vyrobeného laminátu (ruční laminace) o rozměrech 500mm x 300mm



Obr. 36 Zkušební tělesa připravena pro podrobení mechanickým zkouškám (ruční lam.)

8.2 Výroba kompozitního systému pomocí ruční laminace pod vakuovací folií

Postup při použití technologie vakuové folie je v mnoha ohledech totožný s ruční laminací kompozitního systému. Na začátku výroby je nutné důkladně připravit formu, která v těchto případech byla ve formě skleněné desky. Desku je nutné důkladně očistit a následně nanést separátor, ten byl použit stejný jako při výrobě ruční laminací, včetně postupu jeho aplikace. Separátor slouží k bezproblémovému odformování výrobku.

Stejně jako u ruční laminace byla zvážena tkanina a navrženo dostatečné množství matrice, opět v tomto případě byla použita pryskyřice s tužidlem. Pro použití vakuové folie bylo připraveno množství odpovídající 1,3 násobku hmotnosti výztuže. Poměr pryskyřice a tužidla je předepisován v hmotnostních dílech a v tomto případě pro mnou použitou pryskyřici je výrobcem předepsaný poměr 100:40. Obě složky byly důkladně smíchány a připraveny k laminaci.

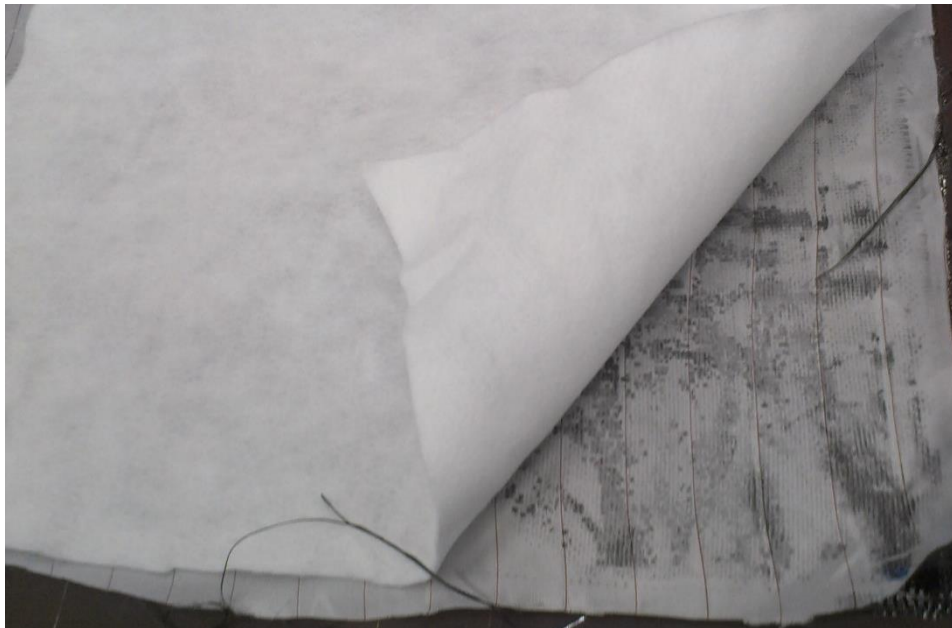
Postup kladení vrstev a prosycování je naprosto totožný s ruční laminací, která byla popsána v předchozí kapitole. Nanášením vrstev byly vytvořeny jedenácti vrstvé systémy, které se lišily v použitých druzích tkaniny, matrice a především orientace tkanin.



Obr. 37 Ručně laminovaný kompozitní systém připravený pro vakuovací fólii

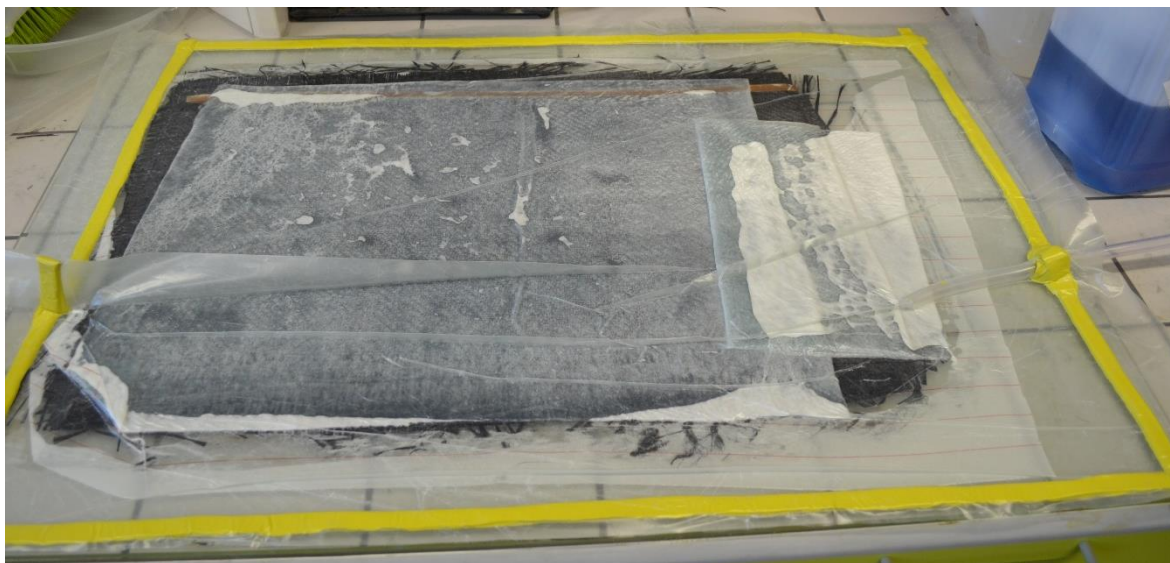
Po ukončení ruční laminace kompozitního systému byla aplikována metoda, která slouží k důkladnému prosycení systému a k odstranění vzduchových kapes, která mohou vznikat při technologii ruční laminace kompozitu. Tato technologie využívá odsátí plynu z prostředí okolo vyráběného systému, který je uzavřen pomocí vakuové fólie.

Na ručně laminovaný systém byla položena odtrhová tkanina ze syntetických vláken. Tato tkanina slouží k oddělení kompozitního systému od ostatních pomocných materiálů, které jsou něj postupně kladeny. V dalším kroku byl obvod okolo vyráběného systému pokryt těsnicí páskou asi ve vzdálenosti 50 mm od krajů formy. Páska je oboustranná a vytváří nepropustný spoj mezi formou a vakuovou folií. Na odtrhovou tkaninu byla umístěna tkanina z netkané textilie, která má velice vysokou propustnost a umožňuje při odsávání plynu rovnoměrné odsátí a také zachycuje pryskyřici, která má tendenci odcházet z kompozitního systému společně s odsávaným plynem.



Obr. 38 Odtrhová a netkaná textilie

Jako poslední vrstva byla použita vakuová folie, což je pružná folie vyrobená z PA a umožňuje vytvořit vakuum v prostředí okolo kompozitního systému. Fólie z PA je vysoce mechanicky, chemicky i tepelně odolná.



Obr. 39 Kompletně za vakuovaný vyráběný kompozitní systém

Celý tento uzavřený systém byl napojen na přepadovou nádobu, ta slouží k zachycení přebytečné pryskyřice, která je odsávána z prostoru formy. Napojení bylo provedeno pomocí hadic a konektorů vyrobených z PE. Vytvoření vakua zajišťovala dvoustupňová rotační olejová vývěva.



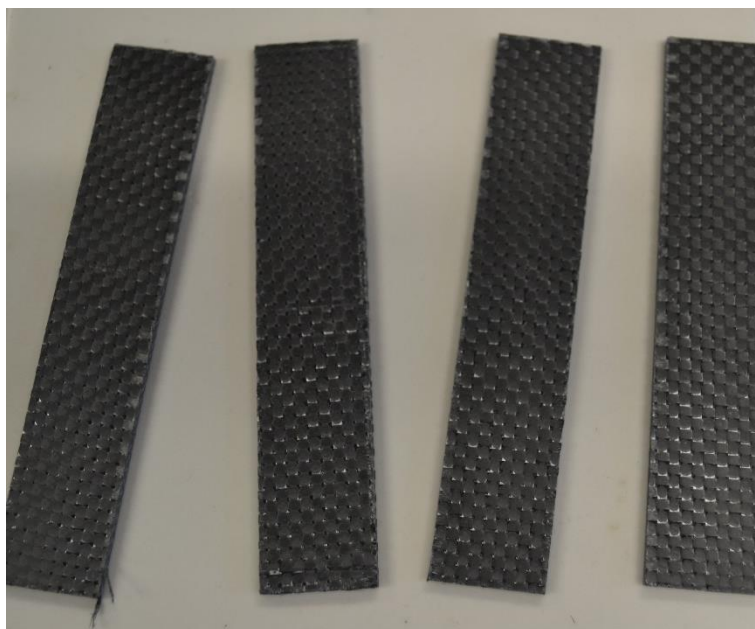
Obr. 40 Za vakuovaný kompozitní systém včetně přepadové nádoby a vývěvy

Po zabezpečení míst, kde vývěva nasávala vzduch z okolí formy, bylo dosaženo vakua v prostoru formy. Tento stav byl vytvářen po dobu 3 hodin. Poté byla forma odpojena od přepadové nádoby a vývěvy a při laboratorních podmínkách došlo k vytvrzení systému po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby by laminát odstraněn z podložky a byl odstraněn

veškerý pomocný materiál, orýsován a nařezán na jednotlivá zkušební tělesa, která byla podrobena mechanickým zkouškám.



Obr. 41 Příklad vyrobeného laminátu (pod vakuovou folii) o rozměrech 500mm x 300mm



Obr. 42 Zkušební tělesa připravena k testování (vak. fólie)

9 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro testování vyrobených zkušebních těles bylo zvoleno dvě mechanické zkoušky. Jako objektivní a vhodná se jevila zkouška ohybem a zkouška tahem. Zkoušky byly prováděny při dvou rozdílných teplotách jednak za laboratorní teploty tedy okolo 24°C a za teploty 60°C. Rozdílné teploty jsou zvoleny pro možné porovnání tepelného účinku na matici, v tomto případě dvě různé pryskyřice s rozdílnými vlastnostmi, aplikovatelností a v neposlední řadě cenou.

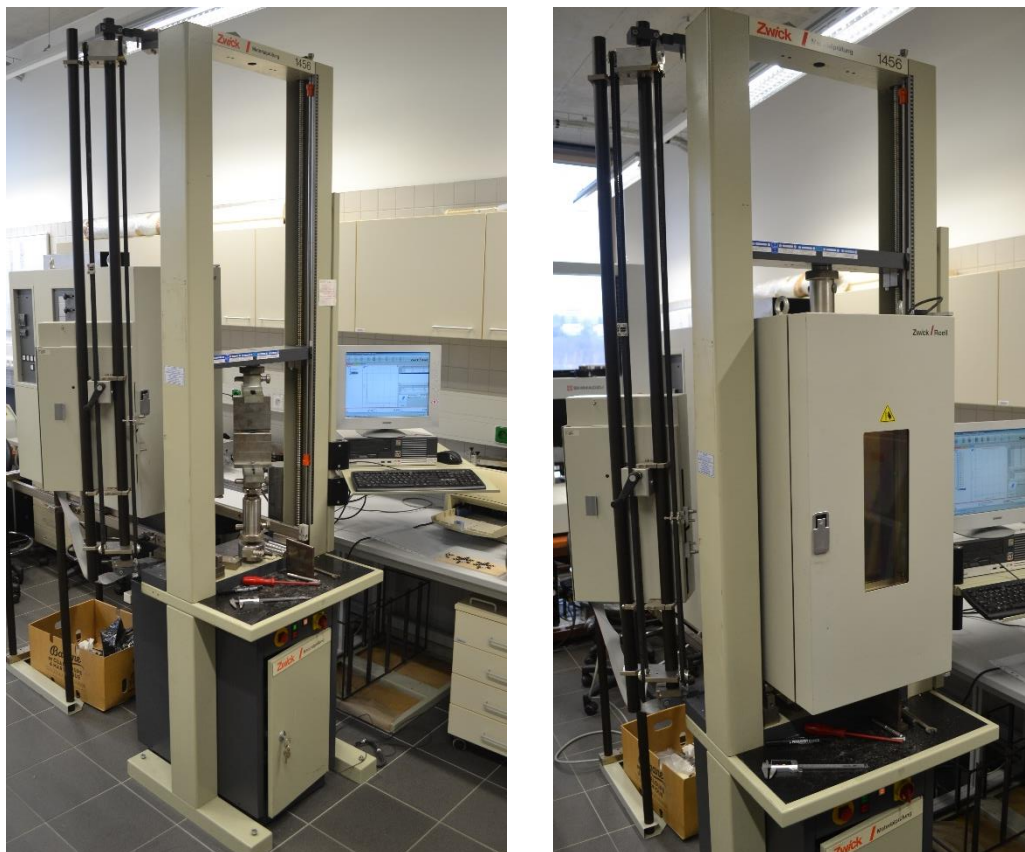
9.1 Zkouška ohybem – metoda třibodového ohybu

Zkouška ohybem byla prováděna podle normy ČSN EN ISO 14 125 třibodovým ohybem. Byla provedena na zařízení ZWICK 1456, které se nachází v laboratoři Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na fakultě Technologické. K vyhodnocení a zachycení zkoušky a jejich dat byl použit software testXpert v7.11. Tento software sám vypočítává a graficky zaznamenává všechny naměřené hodnoty, není tedy do jeho výstupu nijak zasahováno.

Tab. 4 Technická data stroje ZWICK 1456

Technická data stroje ZWICK 1456	
Maximální posuv příčnicku	800 mm/min
Snímače síly	2,5 a 20 kN
Teplotní komora - rozsah	od -80 do +250°C

Zkouška byla provedena na všech vzorcích vyrobených jak technologií ruční laminace, tak i technologií, která využívá vakuovou folii. Zkoušky byly prováděny za laboratorní (pokojové) teploty 24°C a také za teploty zvýšené na 60°C a to v teplotní komoře, kterou zařízení disponuje a je tedy možné teplotu libovolně nastavovat po jednotce °C až do teploty +250°C. Zkušební tělesa dle předepsané normy měli rozměry 100mm x 20mm a tloušťka tělesa byla rozdílná z důvodu použití jiné tkaniny a technologie přípravy. Každý vzorek byl před samotným testováním důkladně změřen a jeho přesné rozměry byly zaneseny do přístroje a sloužili ke zpřesnění výpočtu. Vzdálenost mezi spodními podpěrami byla nastavena na 40 mm a rychlost posuvu příčnicku byla 20 mm/min.



Obr. 43 Zkušební zařízení ZWICK 1456 s teplotní komorou



Obr. 44 Zkušební těleso při zkoušce ohybem

Z dat získaných ohybovou zkouškou byly k vyhodnocení vybrána pouze data vhodná ke zpracování. Jedná se o modul pružnosti v ohybu E [MPa], pevnost v ohybu σ_0 [MPa], maximální prodloužení ε [%] a maximální práce W [Nmm]. Součástí naměřených dat jsou také přesné rozměry jednotlivých zkušebních těles, kdy h [mm] je výška a b [mm] je šířka zkušebního tělesa. Pro vyhodnocení jsou použity statistické veličiny, které následně reprezentují jednotlivý vzorek při vyhodnocení a porovnání všech vzorků. Dále také tyto veličiny slouží pro konstrukci polárních diagramů. Jedná se o aritmetický průměr \bar{x} , směrodatnou odchylku S a variační koeficient v [%].

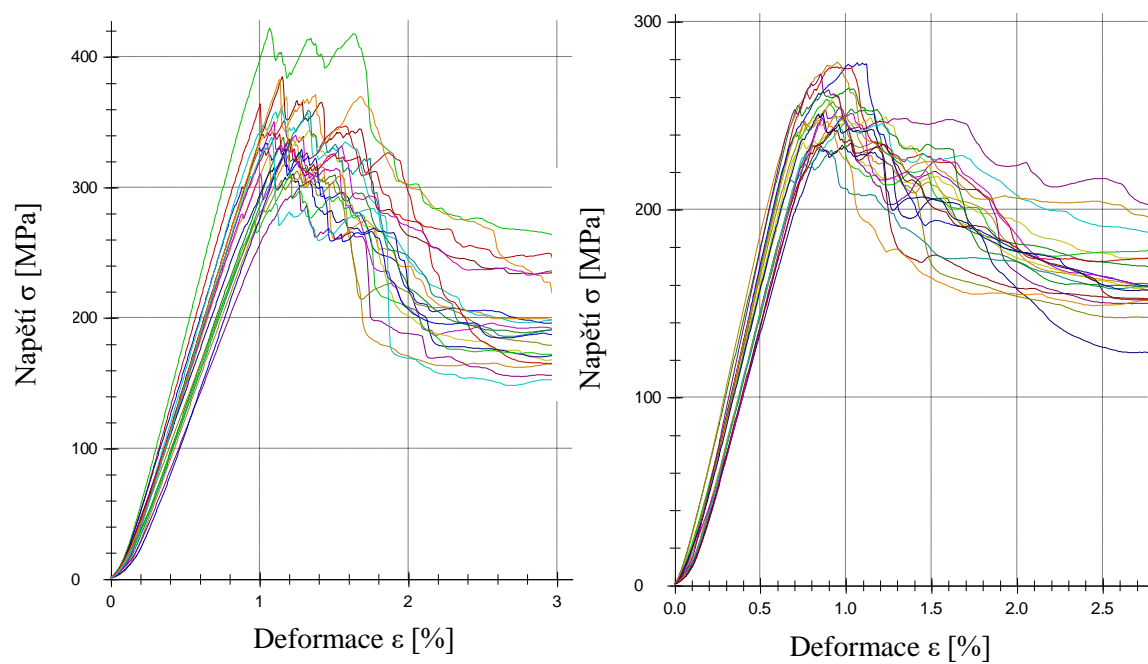
V následujících tabulkách jsou zpracována data ze softwaru testXpert v7.11, jedná se o statistické veličiny. Veškerá naměřená data jsou přiložena jako příloha P VI. Data jsou doplněna o grafické zobrazení průběhu ohybové zkoušky kde na ose x je napětí σ_0 [MPa] a na ose y deformace ε [%]:

Tab. 5 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 24°C

Vzorek A [011]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	29755	346	1,2	432,3	2,54	19,36
S	2402	29	0,1	39,1	0,08	0,29
v [%]	8,07	8,38	8,33	9,04	3,15	1,50

Tab. 6 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 60°C

Vzorek A [011]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	28040	255	0,9	285,4	2,46	19,26
S	2993	14	0,1	34,3	0,05	0,22
v [%]	10,67	5,49	11,11	12,02	2,03	1,14



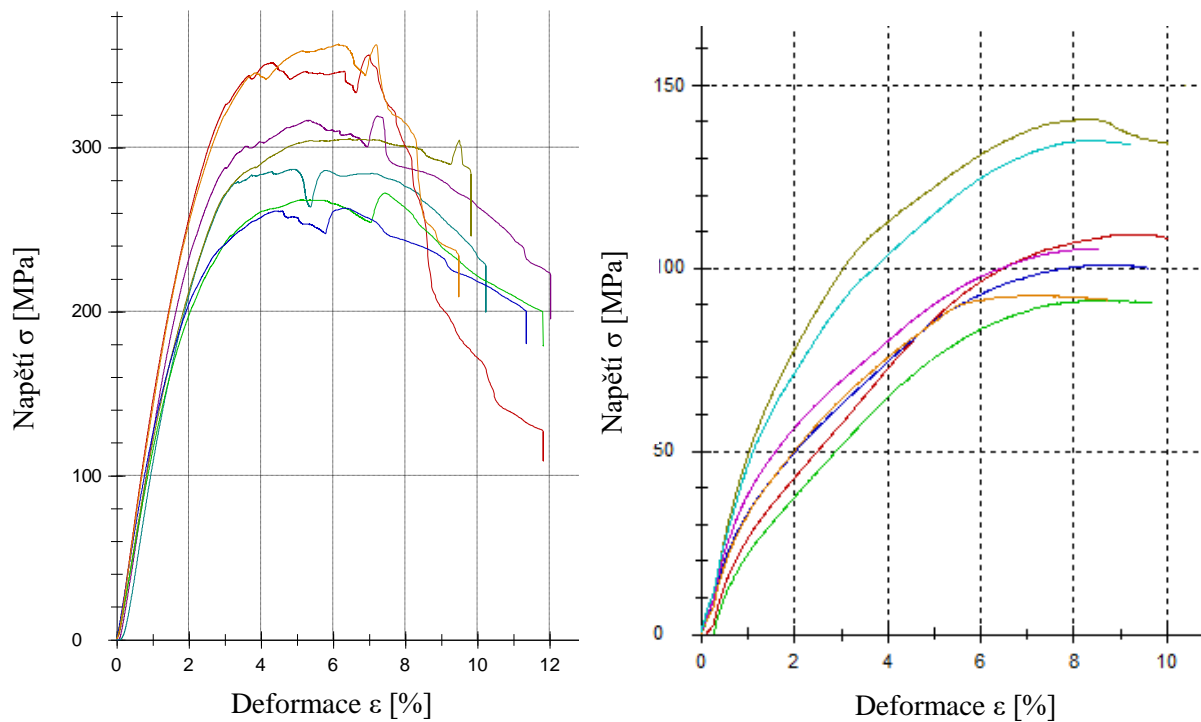
Obr. 45 Graf naměřených dat vzorku A při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 24°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ϵ [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	12193	309	6,5	4012	2,45	19,87
S	1130	28	0,8	456	0,03	0,31
v [%]	9,27	9,06	12,31	11,37	1,22	1,56

Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 60°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ϵ [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	3024	116	8,9	1884,2	2,44	20,04
S	302	16	1,2	663,2	0,06	0,3
v [%]	9,99	13,79	13,48	35,20	2,46	1,50



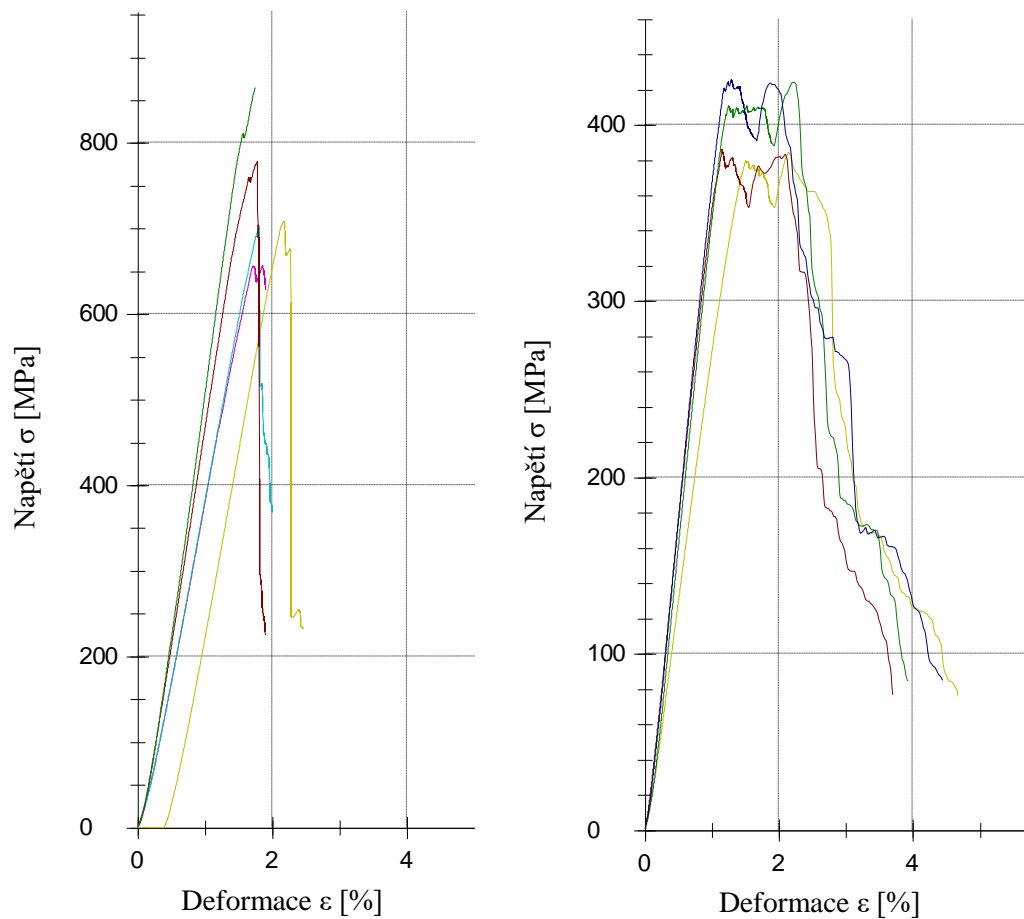
Obr. 46 Graf naměřených dat vzorku B při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 24°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	33140	743	1,9	1487	2,48	19,97
S	3212	72	0,2	74,2	0,06	0,16
v [%]	9,69	9,69	10,53	4,99	2,42	0,80

Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 60°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	31650	406	1,7	1479	2,5	20,02
S	2604	20	0,5	121,6	0,11	0,1
v [%]	8,23	4,93	29,41	8,22	4,40	0,50



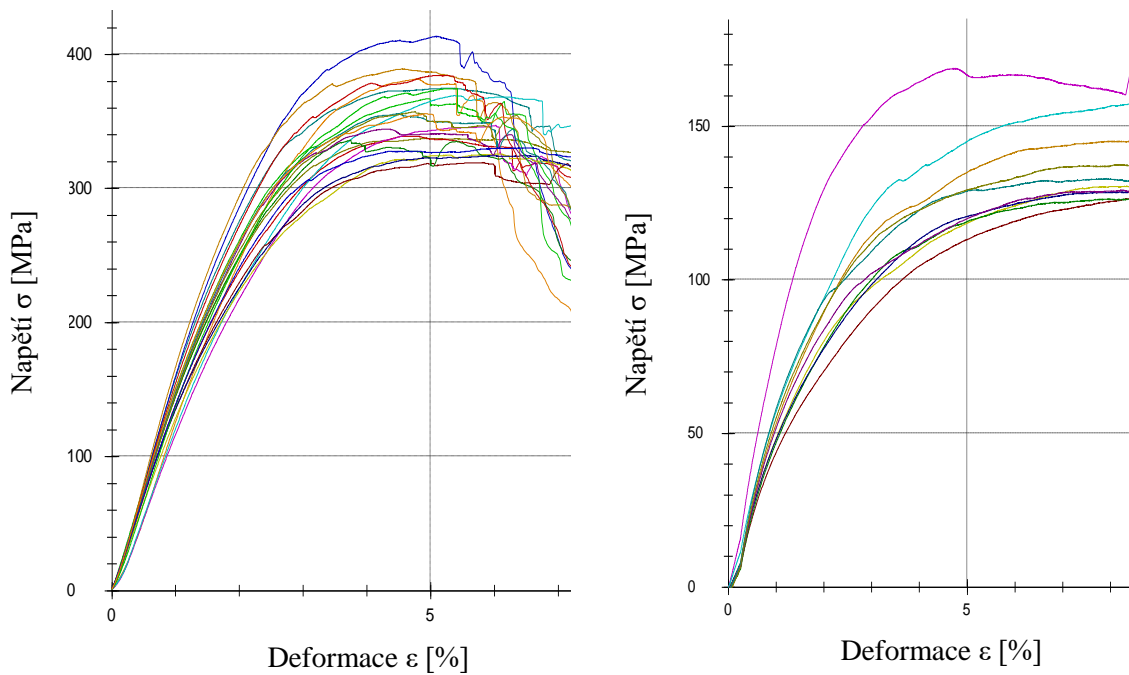
Obr. 47 Graf naměřených dat vzorku C při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 24°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	13080	356	5,2	2727,2	2,66	17,86
S	1269	24	0,7	454,9	0,08	0,57
v [%]	9,70	6,74	13,46	16,68	3,01	3,19

Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 60°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	3868	112	10,9	2739,3	2,69	18,05
S	387	12	0,6	232,1	0,1	0,56
v [%]	10,01	10,71	5,50	8,47	3,72	3,10



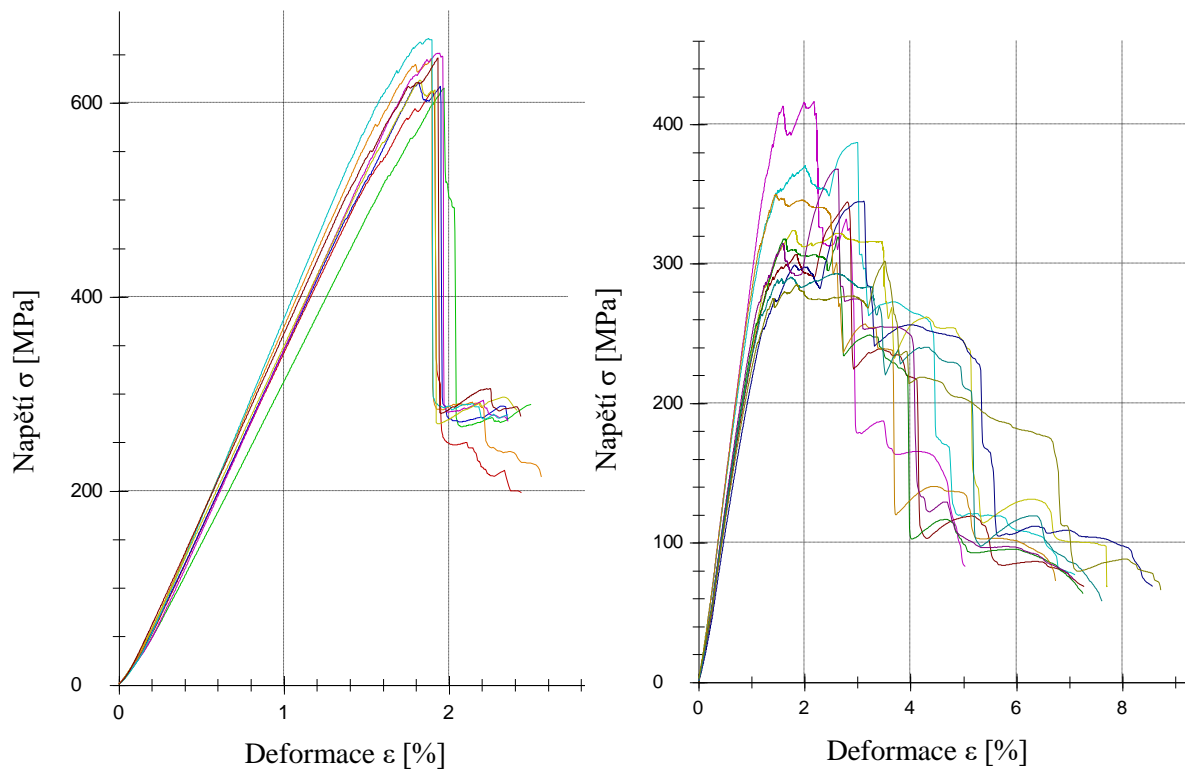
Obr. 48 Graf naměřených dat vzorku D při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 24°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	30812,5	636	1,9	1286,1	2,31	19,73
S	2716	19	0,1	68,2	0,03	0,16
v [%]	8,81	2,99	5,26	5,30	1,30	0,81

Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 60°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	22980	345	2,6	1415,3	2,33	19,56
S	2705	36	0,6	199,8	0,05	0,29
v [%]	11,77	10,43	23,08	14,12	2,15	1,48



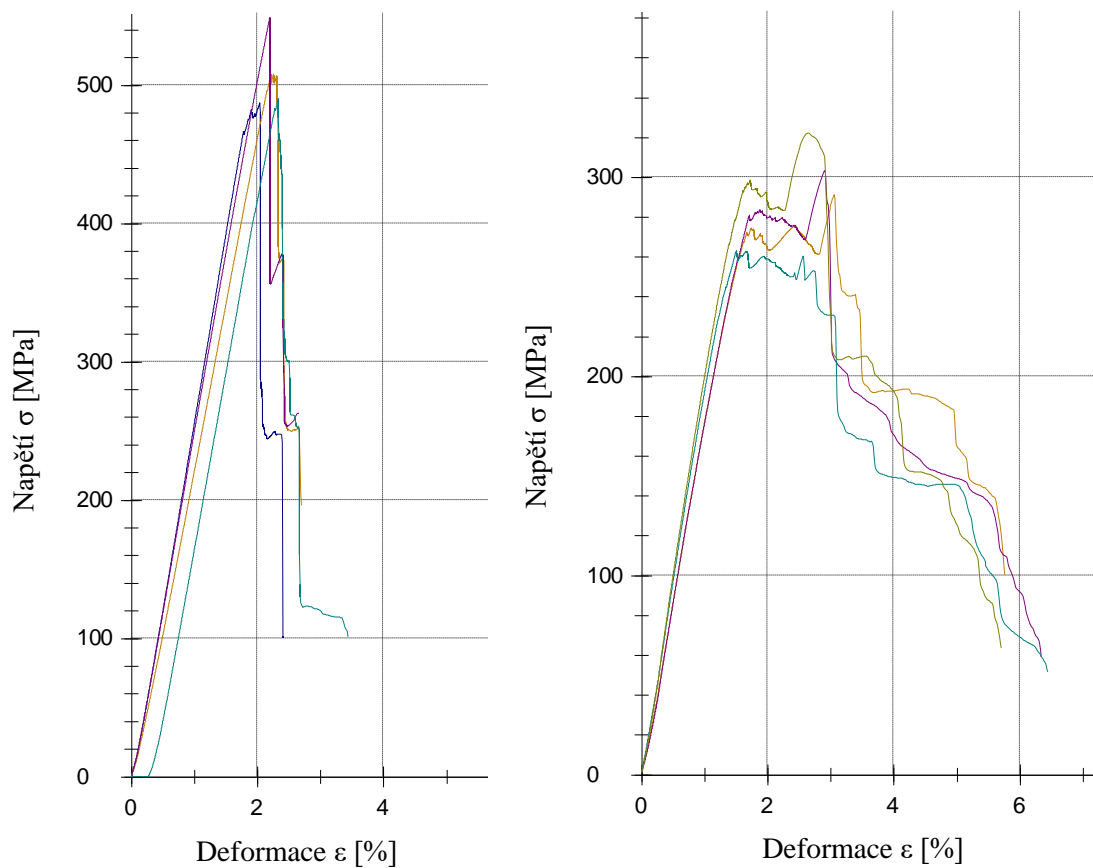
Obr. 49 Graf naměřených dat vzorku E při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 24°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _s	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	22175	509	2,2	1100,3	2,29	19,34
S	1368	25	0,1	73	0,04	0,35
v [%]	6,17	4,91	4,55	6,63	1,75	1,81

Tab. 16 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 60°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _s	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	17025	295	2,5	1263,2	2,25	19,77
S	1537	21	0,6	102	0,03	0,33
v [%]	9,03	7,12	24,00	8,07	1,33	1,67



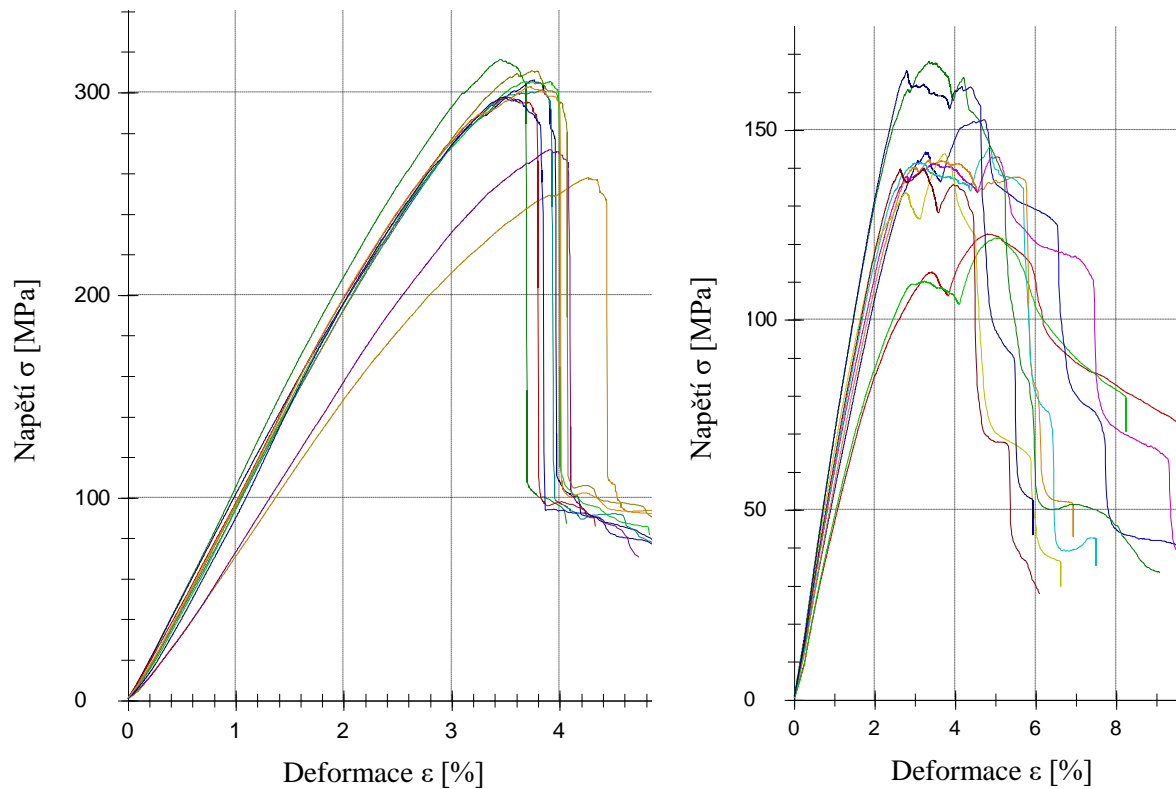
Obr. 50 Graf naměřených dat vzorku F při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 17 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 24°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂ S]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	8242	297	3,7	1275,6	2,28	19,79
S	814	17	0,2	68,8	0,03	0,14
v [%]	9,88	5,72	5,41	5,39	1,32	0,71






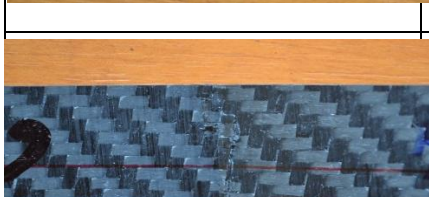

Tab. 18 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 60°C


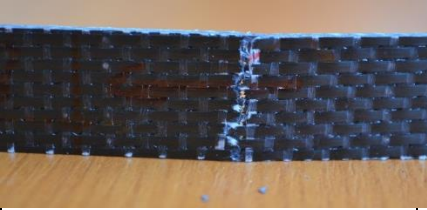

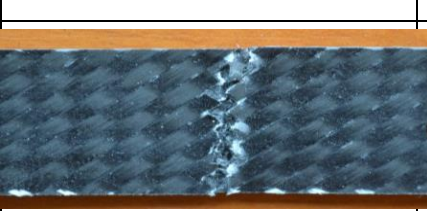


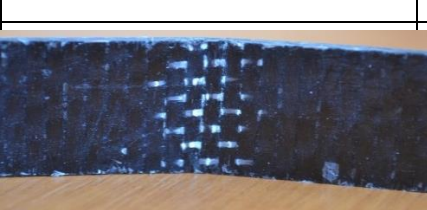
Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂ S]	E [MPa]	σ_0 [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	5095	145	4,1	797,09	2,25	19,8
S	548	14	0,8	191,72	0,03	0,25
v [%]	10,76	9,66	19,51	24,05	1,33	1,26



Obr. 51 Graf naměřených dat vzorku G při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 19 Vzorky po ohybové zkoušce (vzorek A-G)

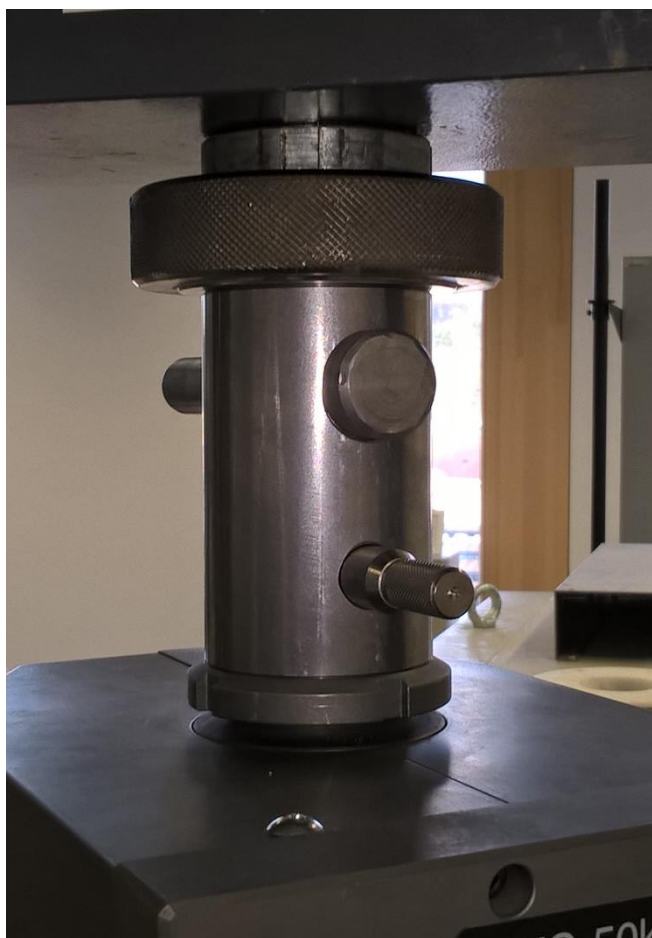
Vzorek po zkoušce ohybem	Označení	Teplota [°C]	Popis
	A [0 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	A [0 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	B [45 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> lom je veden příčně na podélný směr nedošlo k úplnému zlomení
	B [45 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek nebyl deformován až do porušení lom nenastal vzorek byl poddajný
	C [0 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	C [0 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	D [45 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> lom je veden příčně na podélný směr nedošlo k úplnému zlomení

	D [45 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek nebyl deformován až do porušení lom nenastal vzorek byl poddajný
	E [(0/45/0/±45/0) ₂] _s	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	E [(0/45/0/±45/0) ₂] _s	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	F [(45/0/±45/0/45) ₂] _s	24	<ul style="list-style-type: none"> lom je veden příčně na podélný směr nedošlo k úplnému zlomení
	F [(45/0/±45/0/45) ₂] _s	60	<ul style="list-style-type: none"> lom je veden příčně na podélný směr nedošlo k úplnému zlomení
	G [(90/45/90/±45/90) ₂] _s	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	G [(90/45/90/±45/90) ₂] _s	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr

9.2 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla prováděna podle normy ČSN EN ISO 527-1. Byla provedena na zařízení ZWICK 1456, které se nachází v laboratoři Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na fakultě Technologické. K vyhodnocení a zachycení zkoušky a jejich dat byl použit software testXpert v7.11. Tento software sám vypočítává a graficky zaznamenává všechny naměřené hodnoty, není tedy do jeho výstupu nijak zasahováno.

Strojní zařízení bylo téměř totožné jako u zkoušky ohybem. Musela být ale provedena změna uchycení vzorku, jelikož při zkoušce tahem docházelo k vysmeknutí zkušebního tělesa z mechanických sklíčidel a nebylo tedy možné zkoušku provést. Proto za tímto účelem musela být vyrobena redukce pro pneumatická sklíčidla (výkres příloha P VIII). Při jejich použití je možné měřit kompozitní systémy s mnohem větší mezí pevnosti. Redukce zůstává stálým vybavením stroje ZWICK a je dnes používána takřka u všech měření prováděných na tomto zařízení.



Obr. 52 Redukce pro pneumatická sklíčidla

Zkouška byla provedena na všech vzorcích vyrobených jak technologií ruční laminace, tak i technologií, která využívá vakuovou folii. Zkoušky byly prováděny za laboratorní (pokojové) teploty 24°C a také za teploty zvýšené na 60°C a to v teplotní komoře, kterou zařízení disponuje a je tedy možné teplotu libovolně nastavovat po jednotce °C až do teploty +250°C. Rychlost posuvu příčnicku byla 20 mm/min. Zkušební tělesa dle předepsané normy měli rozměry 150mm x 20mm a tloušťka tělesa byla rozdílná z důvodu použití jiné tkaniny a technologie přípravy. Každý vzorek byl před samotným testováním důkladně změřen a jeho přesné rozměry byly zaneseny do přístroje a sloužili ke zpřesnění výpočtu.



Obr. 53 Zkušební těleso při zkoušce tahem

Z dat získaných tahovou zkouškou byly k vyhodnocení vybrána pouze data vhodná ke zpracování. Jedná se o modul pružnosti v tahu E [MPa], pevnost v tahu σ_t [MPa], maximální prodloužení ε [%] a maximální práce W [Nmm]. Součástí naměřených dat jsou také přesné rozměry jednotlivých zkušebních těles, kdy h [mm] je výška a b [mm] je šířka zkušebního tělesa. Pro vyhodnocení jsou použity statistické veličiny, které následně reprezentují jednotlivý vzorek při vyhodnocení a porovnání všech vzorků. Dále také tyto veličiny slouží

pro konstrukci polárních diagramů. Jedná se o aritmetický průměr \bar{x} , směrodatnou odchylku S , variační koeficient v [%].

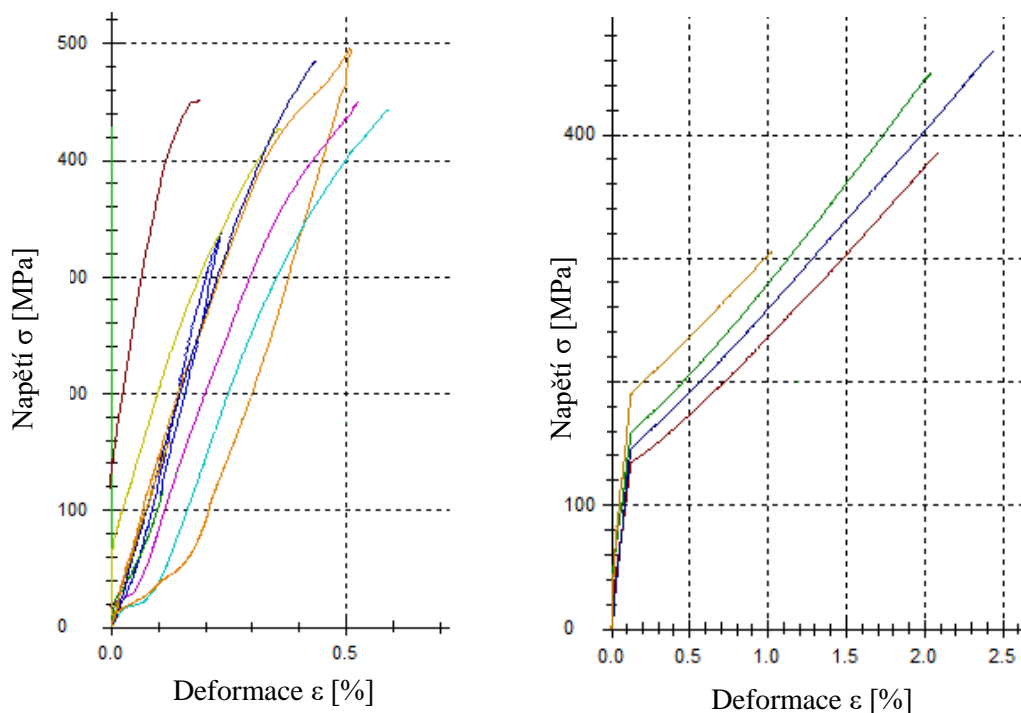
V následujících tabulkách jsou zpracována data ze softwaru testXpert v7.11, jedná se o statistické veličiny. Veškerá naměřená data jsou přiložena jako příloha P VII. Data jsou doplněna o grafické zobrazení průběhu ohybové zkoušky kde na ose x je napětí σ_t [MPa] a na ose y deformace ε [%]:

Tab. 20 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 24°C

Vzorek A [011]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	51780	456	1,1	4634,9	2,48	19,36
S	4413	23	0,2	1716,9	0,05	0,2
v [%]	8,52	5,04	18,18	37,04	2,02	1,03

Tab. 21 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 60°C

Vzorek A [011]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	41225	402	4,4	29718,4	2,55	19,23
S	4622	64	0,4	3000,7	0,05	0,24
v [%]	11,21	15,92	9,09	10,10	1,96	1,25



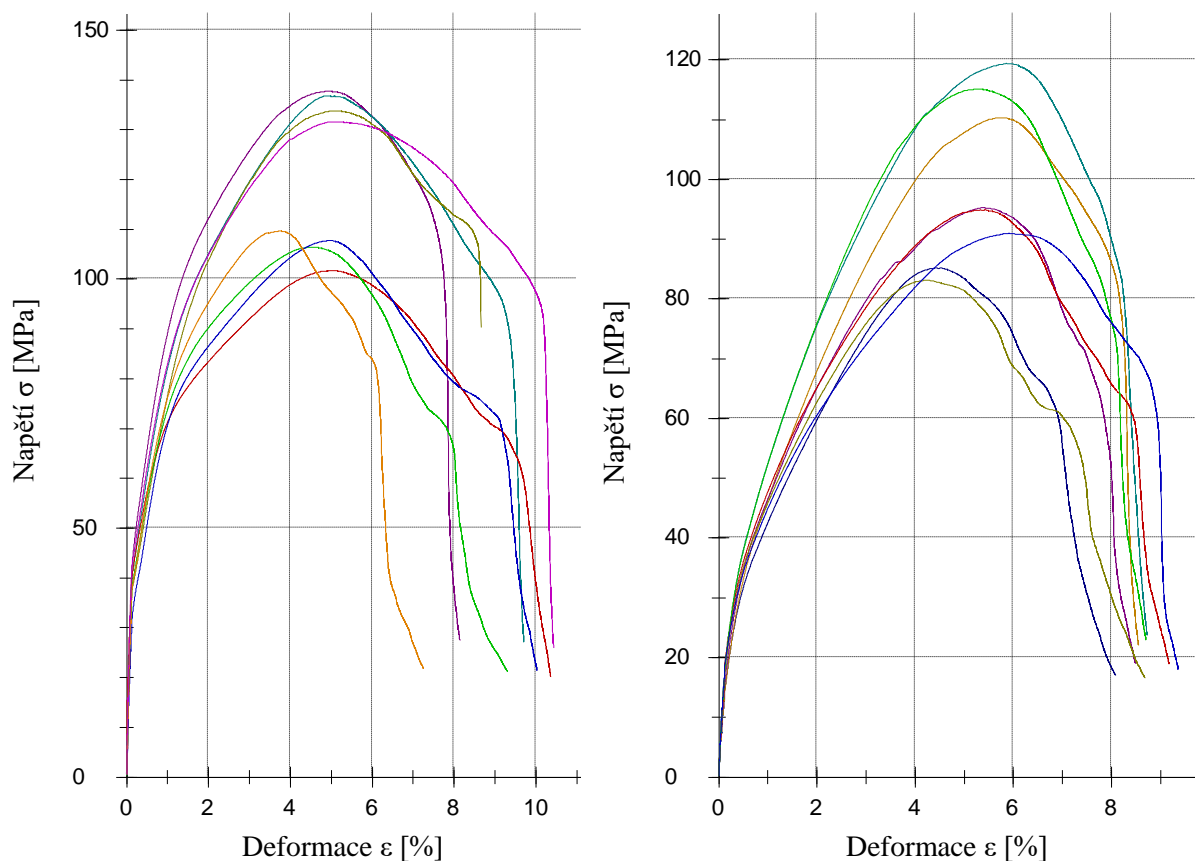
Obr. 54 Graf naměřených dat vzorku A při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 22 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 24°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	12514	121	11,3	25904,4	2,43	19,97
S	436	15	0,5	4597,4	0,06	0,11
v [%]	3,48	12,40	4,42	17,75	2,47	0,55

Tab. 23 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 60°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	4974	99	11,2	24148,3	2,46	19,87
S	546	13	1,4	2421,9	0,09	0,26
v [%]	10,98	13,13	12,50	10,03	3,66	1,31



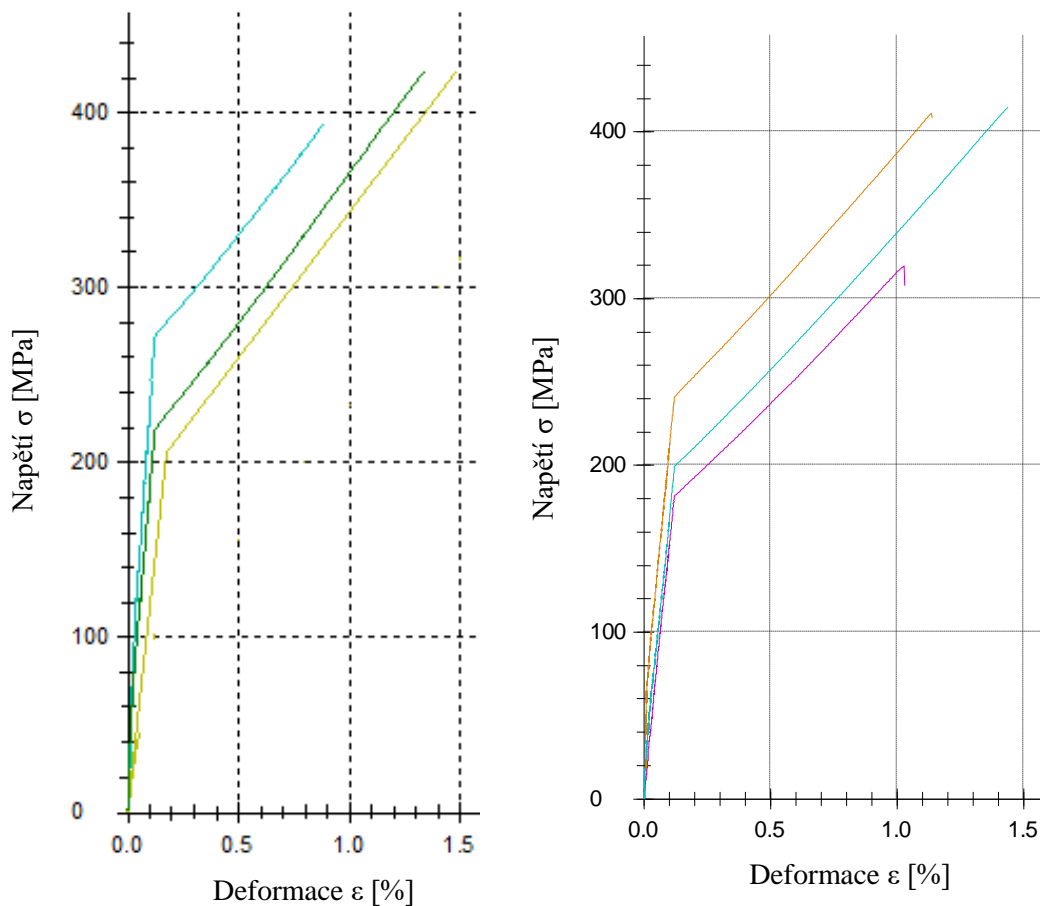
Obr. 55 Graf naměřených dat vzorku B při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 24 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 24°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ϵ [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	64667	422	2,7	21903,8	2,46	19,92
S	4645	22	0,8	3453,9	0,07	0,19
v [%]	7,18	5,21	29,63	15,77	2,85	0,95

Tab. 25 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 60°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ϵ [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	60033	400	2,4	17723	2,54	19,99
S	1837	19	0,4	1424,1	0,1	0,09
v [%]	3,06	4,75	16,67	8,04	3,94	0,45



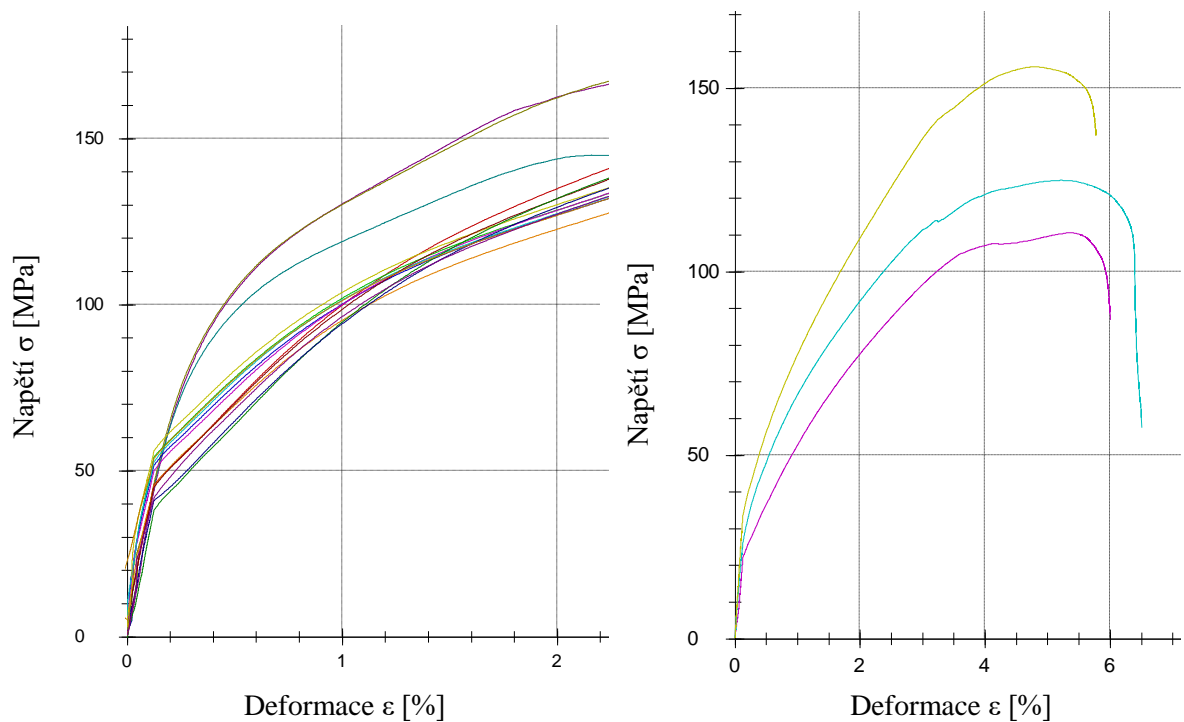
Obr. 56 Graf naměřených dat vzorku C při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 26 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 24°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	15260	160	9,1	21310,03	2,7	17,61
S	1372	9	1,4	3220,19	0,03	0,35
v [%]	8,99	5,63	15,38	15,11	1,11	1,99

Tab. 27 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 60°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	8253	131	11,3	22769,1	2,69	19,58
S	497	19	0,6	975,1	0,04	0,12
v [%]	6,02	14,50	5,31	4,28	1,49	0,61



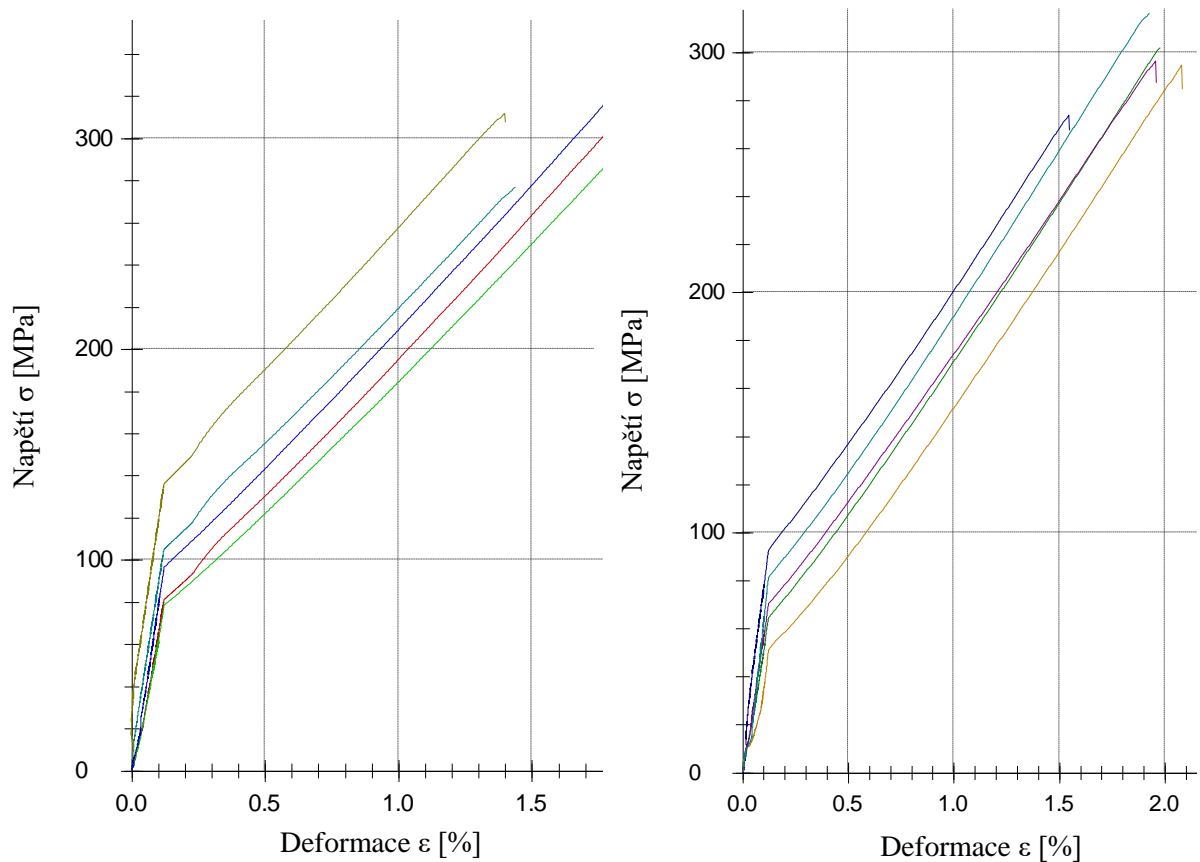
Obr. 57 Graf naměřených dat vzorku D při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 28 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 24°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	30940	313	3,3	15281,7	2,29	19,82
S	3105	19	0,5	2418,7	0,05	0,09
v [%]	10,04	6,07	15,15	15,83	2,18	0,45

Tab. 29 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 60°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	21360	297	3,3	14797,2	2,32	19,64
S	914	14	0,4	1437,3	0,04	0,21
v [%]	4,28	4,71	12,12	9,71	1,72	1,07



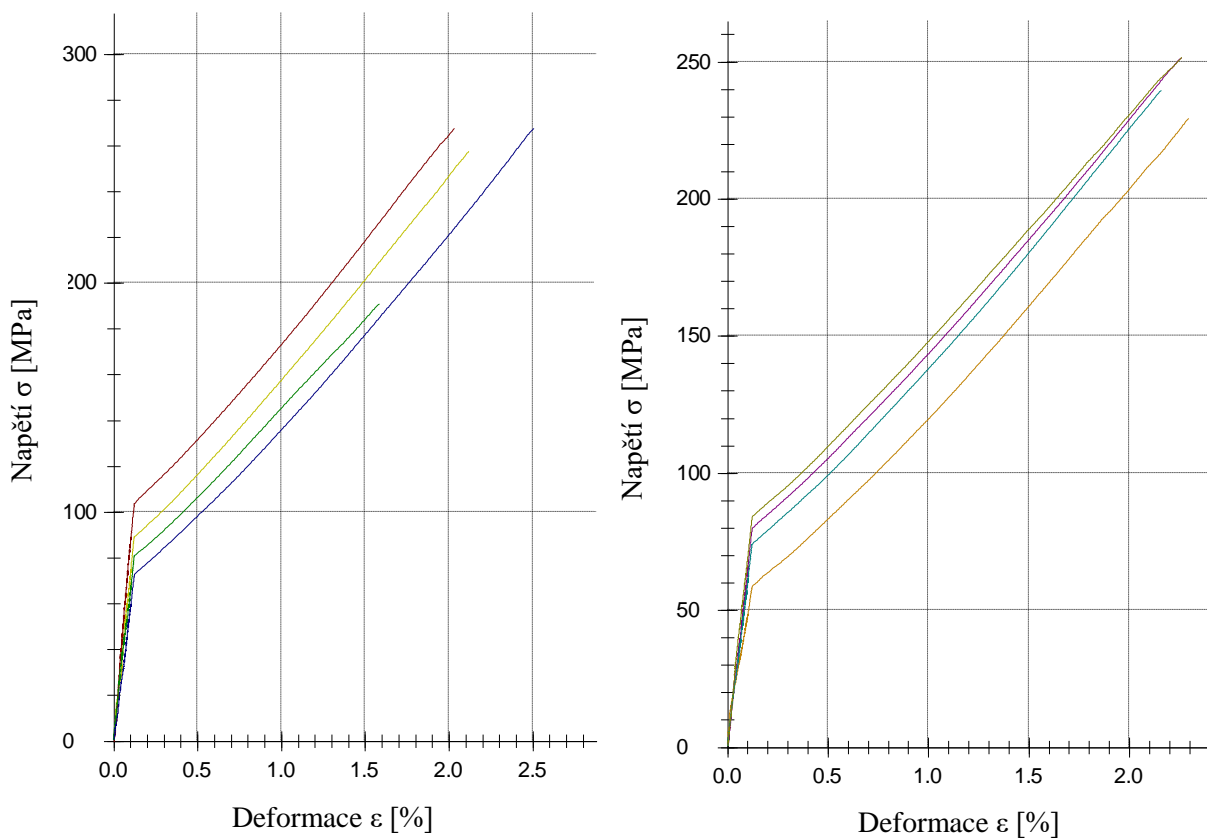
Obr. 58 Graf naměřených dat vzorku E při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 30 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 24°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	28000	246	4,3	14079,6	2,24	19,36
S	2887	32	0,7	3454,9	0,02	0,35
v [%]	10,31	13,01	16,28	24,54	0,89	1,81

Tab. 31 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 60°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\dot{x}	24975	243	4,5	14626,8	2,27	19,38
S	1425	10	0,2	1065,2	0,03	0,54
v [%]	5,71	4,12	4,44	7,28	1,32	2,79



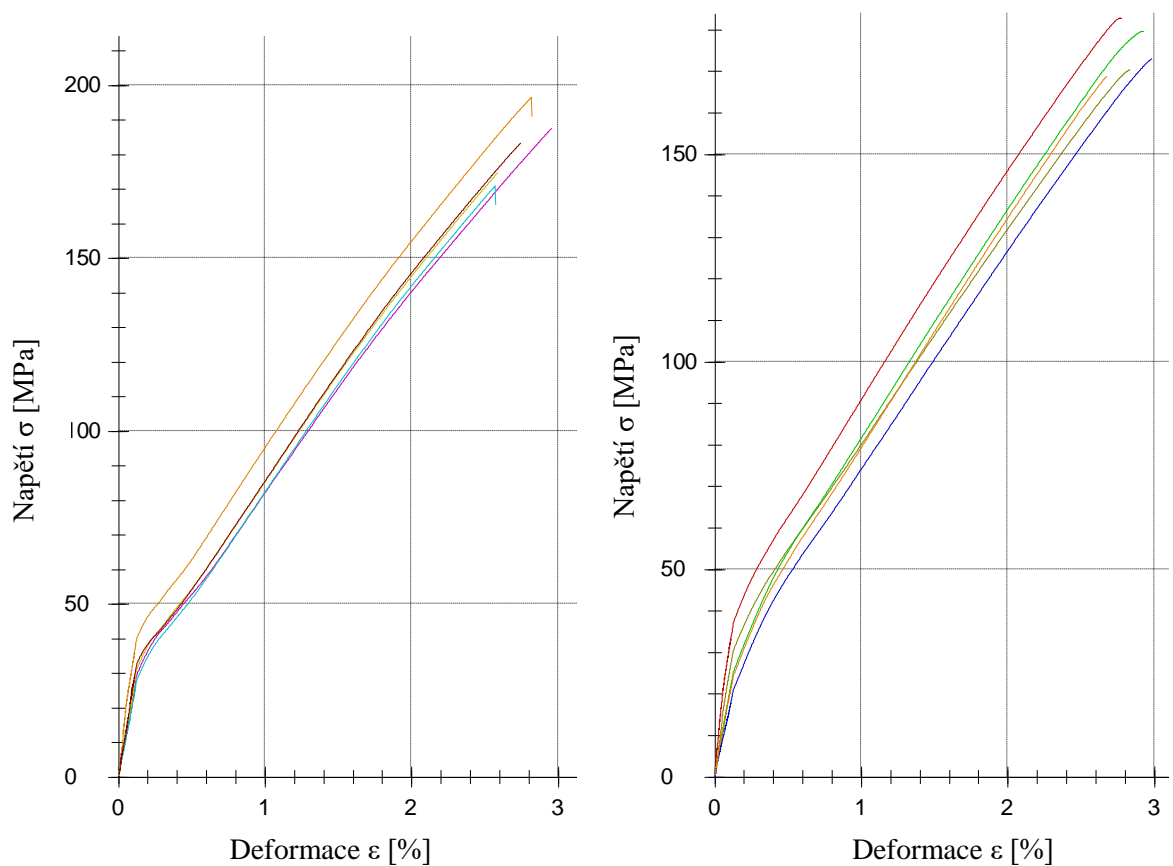
Obr. 59 Graf naměřených dat vzorku F při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 32 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 24°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	10124	183	5	13664,7	2,32	20,14
S	764	9	0,4	1353,3	0,03	0,27
v [%]	7,55	4,92	8,00	9,90	1,29	1,34

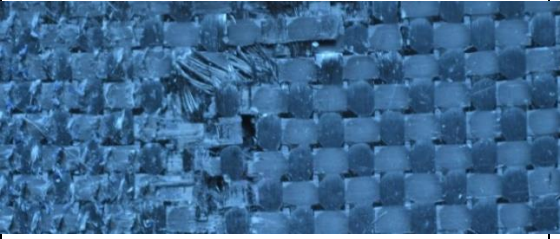
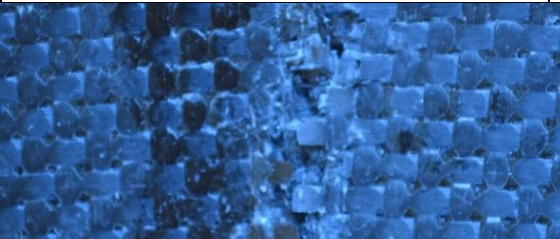
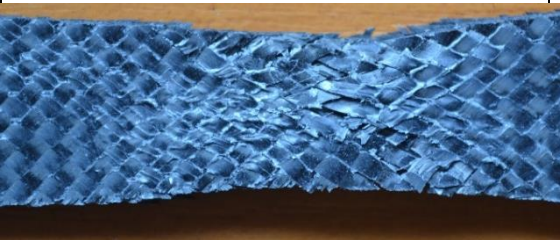

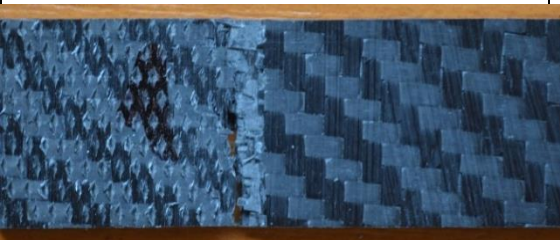

Tab. 33 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 60°C

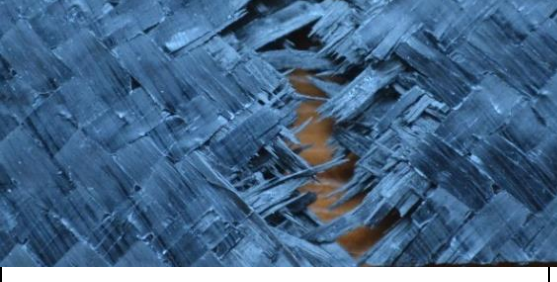
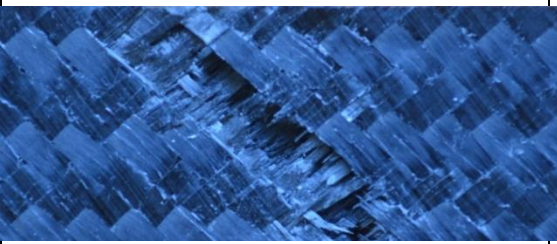

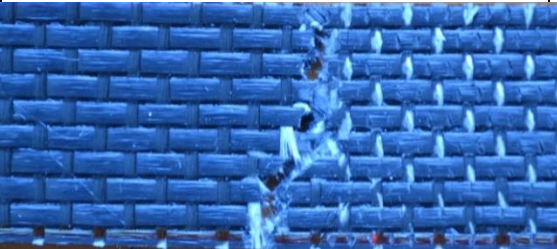

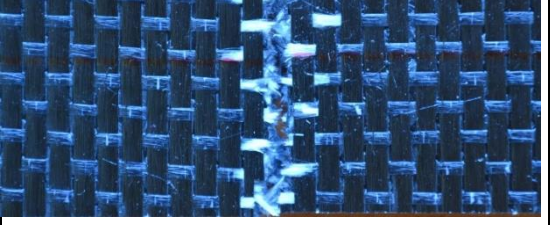
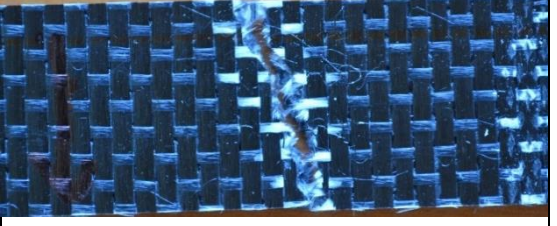
Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ_t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
\bar{x}	8756	175	5	13563,6	2,31	20,2
S	967	6	0,4	817,9	0,06	0,12
v [%]	11,04	3,43	8,00	6,03	2,60	0,59



Obr. 60 Graf naměřených dat vzorku G při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)

Tab. 34 Vzorky po tahové zkoušce (vzorek A-G)

Vzorek po zkoušce tahem	Označení	Teplota [°C]	Popis
	A [0 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden pod úhlem 45° na podélný směr
	A [0 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	B [45 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek nebyl deformován až do porušení u vzorku došlo k velkému prodloužení
	B [45 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek nebyl deformován až do porušení u vzorku došlo k velkému prodloužení
	C [0 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	C [0 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr

	D [45 ₁₁]	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden pod úhlem 30° na podélný směr
	D [45 ₁₁]	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek nebyl deformován až do porušení u vzorku došlo k velkému prodloužení
	E [(0/45/0/±45/0) ₂]s	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	E [(0/45/0/±45/0) ₂]s	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden pod úhlem 30° na podélný směr
	F [(45/0/±45/0/45) ₂]s	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr
	F [(45/0/±45/0/45) ₂]s	60	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden pod úhlem 45° na podélný směr
	G [(90/45/90/±45/90) ₂]s	24	<ul style="list-style-type: none"> vzorek byl deformován až do porušení lom je veden příčně na podélný směr

10 POLÁRNÍ DIAGRAMY PRO JEDNOTLIVÉ VZORKY A TEPLOTY

V této kapitole jsou zpracovány výsledky z předchozích měření, pomocí polárních diagramů. Tyto diagramy jsou tvořeny z hodnot pevnosti v ohybu a v tahu. Hodnoty jsou vyneseny ve směru, ve kterém byly naměřeny. Bylo provedeno měření v podélném směru [L] na vzorcích A, C a E jejich hodnoty jsou na ose odpovídající orientaci vláken, tedy 0° a 180° . Dále bylo provedeno měření v příčném směru [Q] na vzorcích A, C a G jejich hodnoty jsou vyneseny na ose odpovídající orientaci vláken tedy 90° a 270° .

Jako poslední bylo provedeno měření na vzorcích vyrobených s orientací pootočenou o 45° , a to na vzorcích B, D a F tak aby bylo možné zkoumat mechanické vlastnosti v dalším směru. Tyto výsledky jsou vyneseny na osách 45° , 135° , 225° a 315° . Diagramy jsou zhotoveny pro vzorky za laboratorní teploty 24°C a pro vzorky za zvýšené teploty 60°C . Využitím polárních grafů je možné opticky a rychle porovnat výsledky měření v předem určených směrech zatěžování a slouží jako rychlý nástroj pro porovnání jednotlivých orientací.

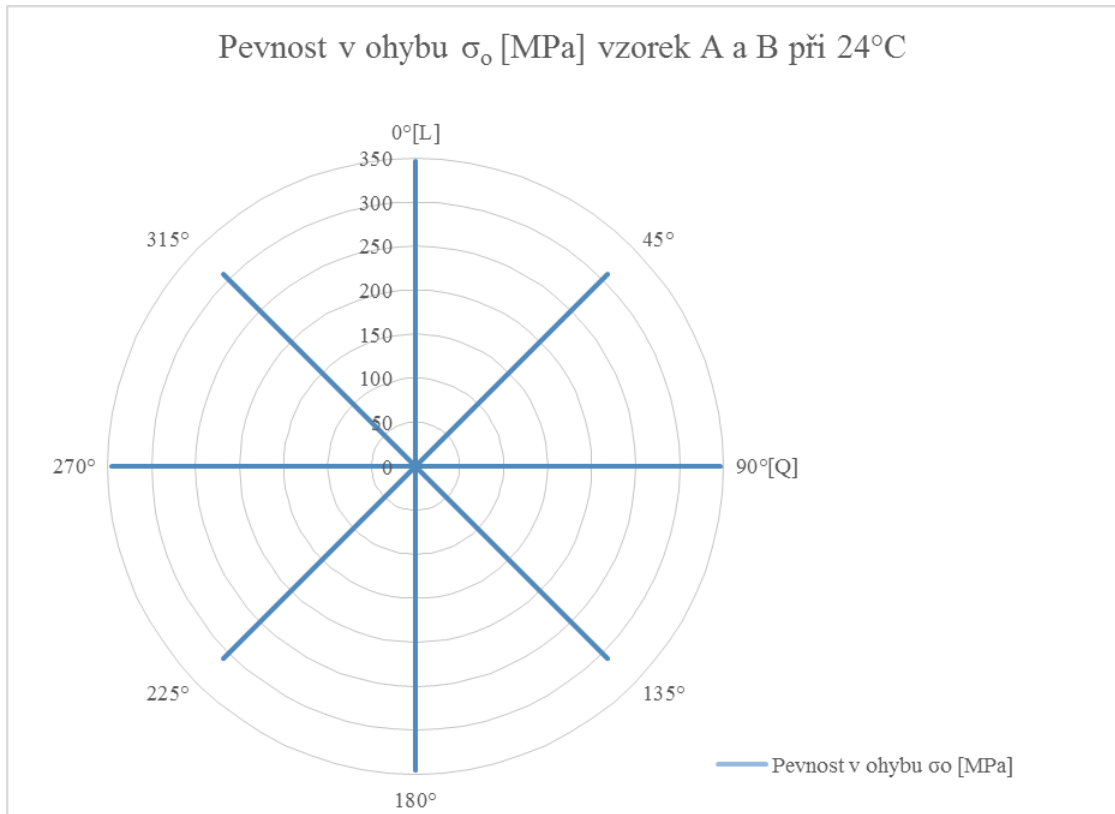
10.1 Zkouška tříbodovým ohybem

V následující kapitole jsou zpracovány výsledky ze zkoušky tříbodovým ohybem, která byla provedena na sedmi sadách vzorků tak aby bylo možné sestavit polární diagram o čtyřech osách. Měření bylo provedeno za laboratorní teploty 24°C a za zvýšené 60°C .

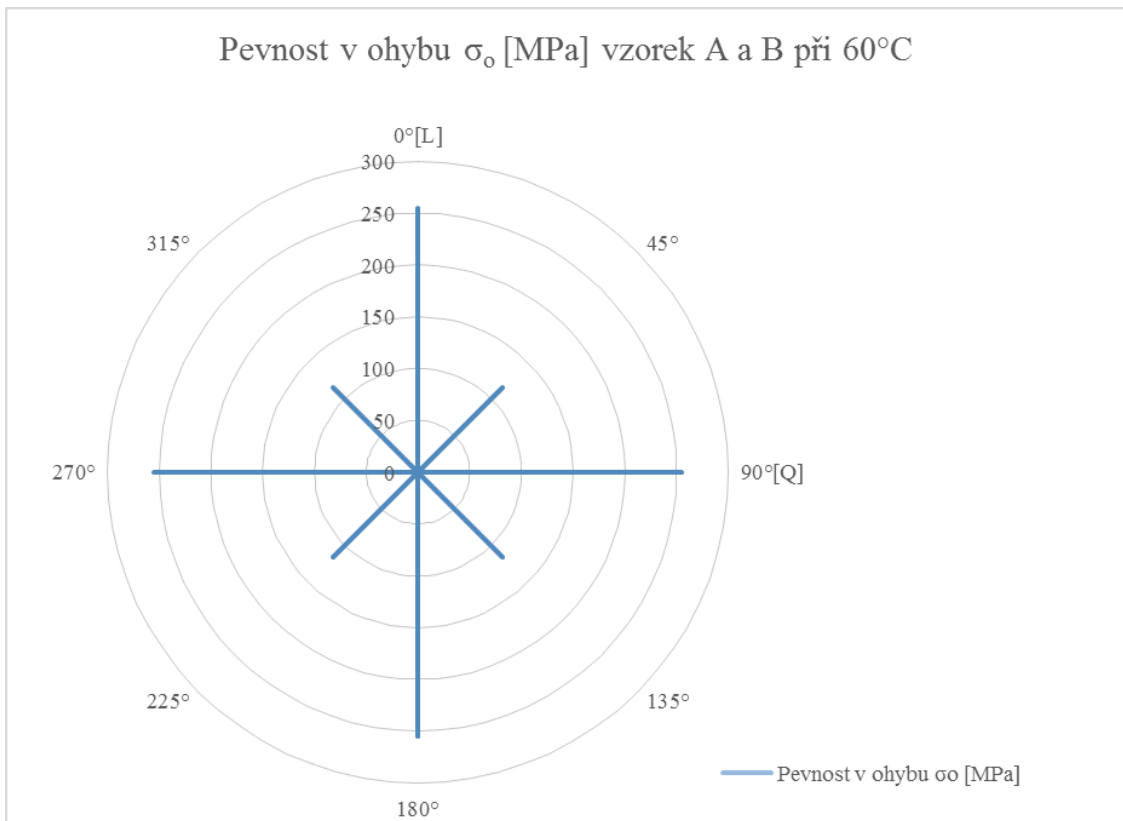
10.1.1 Vzorek A, B

Na vzorcích bylo naměřeno ohybové napětí v podélném [L] a příčném [Q] směru 346 MPa při 24°C a 255 MPa při 60°C . Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo ohybové napětí 309 MPa při 24°C a 116 MPa při 60°C .

Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je značný a dochází tedy k poklesu mechanických vlastností o 24% při zvýšené teplotě v podélném a příčném směru. Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 65%. Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou maticí, která v tomto případě byla vývojová polyuretan-metakrylátová pryskyřice a dále také orientací výztuže, která je shodná ve všech vrstvách kompozitního systému.



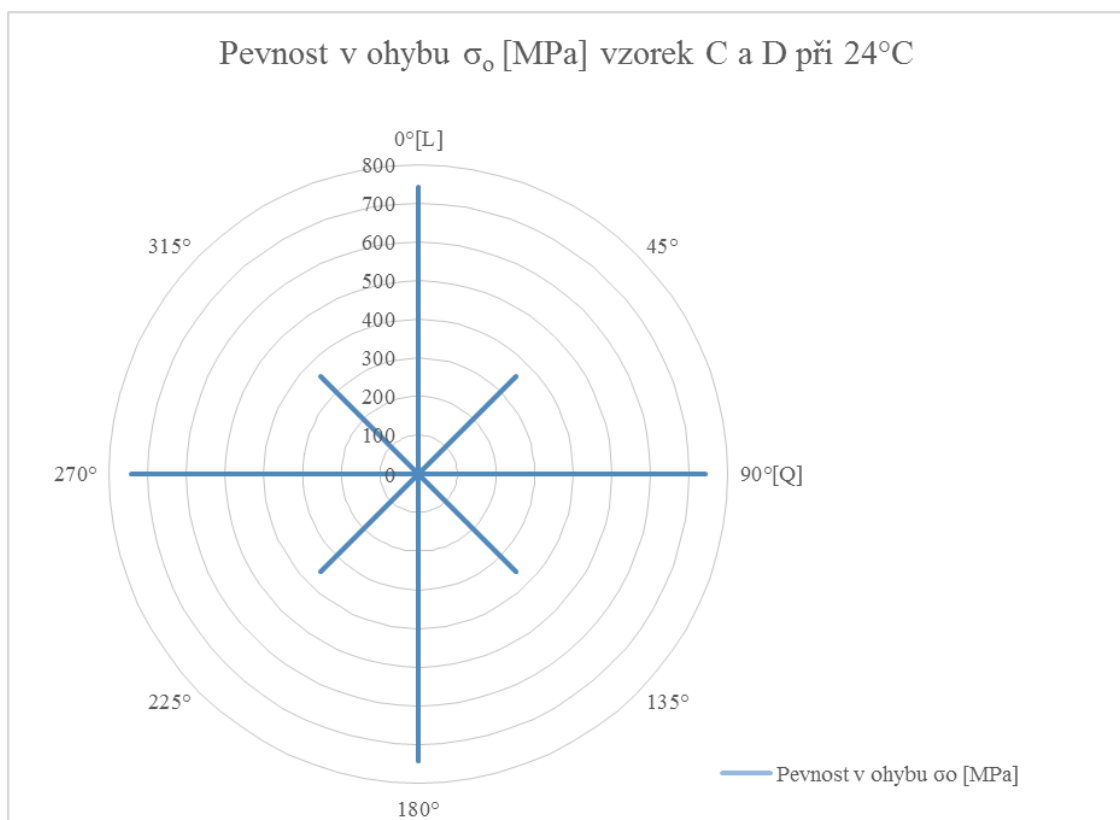
Obr. 61 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek A a B při 24°C



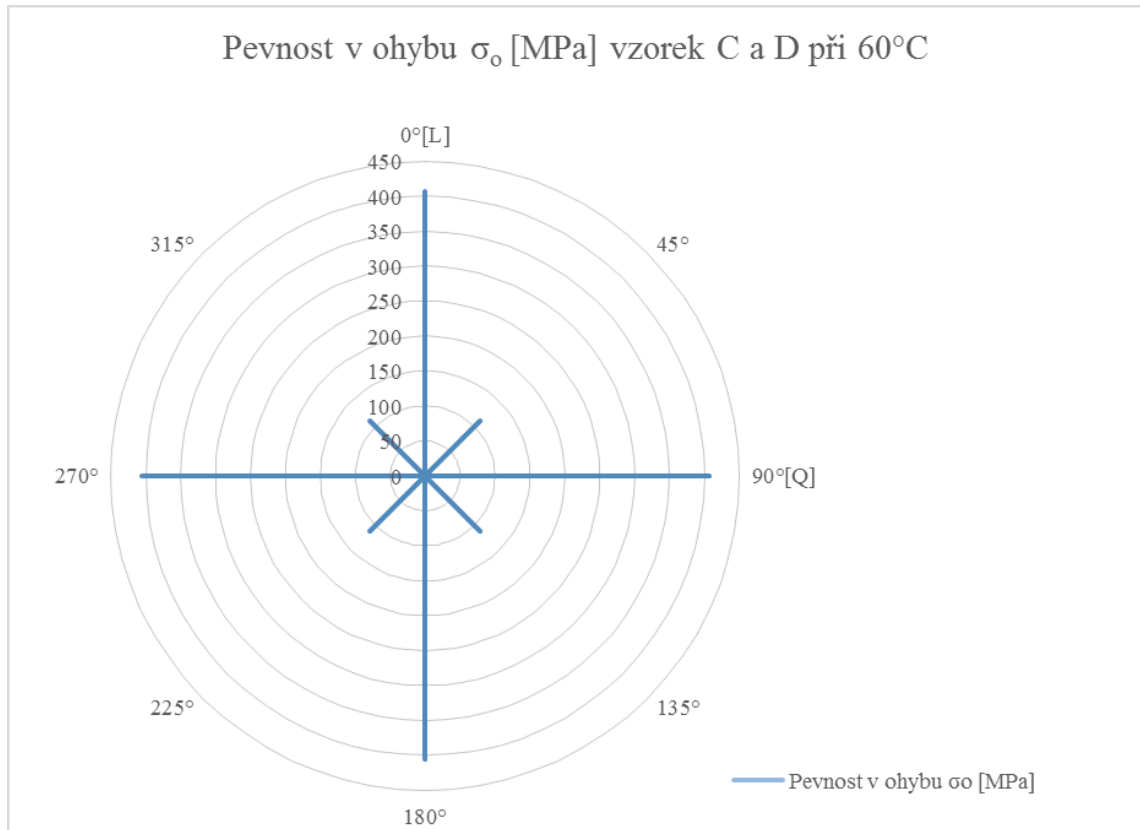
Obr. 62 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek A a B při 60°C

10.1.2 Vzorek C, D

Na vzorcích bylo naměřeno ohybové napětí v podélném [L] a příčném [Q] směru 743 MPa při 24°C a 406 MPa při 60°C. Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo ohybové napětí 356 MPa při 24°C a 112 MPa při 60°C. Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je značný a dochází tedy k poklesu mechanických vlastností o 45% při zvýšené teplotě v podélném a příčném směru. Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 70%. Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou matricí, která v tomto případě byla epoxidová pryskyřice, a dále také orientací výztuže, která je shodná ve všech vrstvách kompozitního systému.



Obr. 63 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek C a D při 24°C

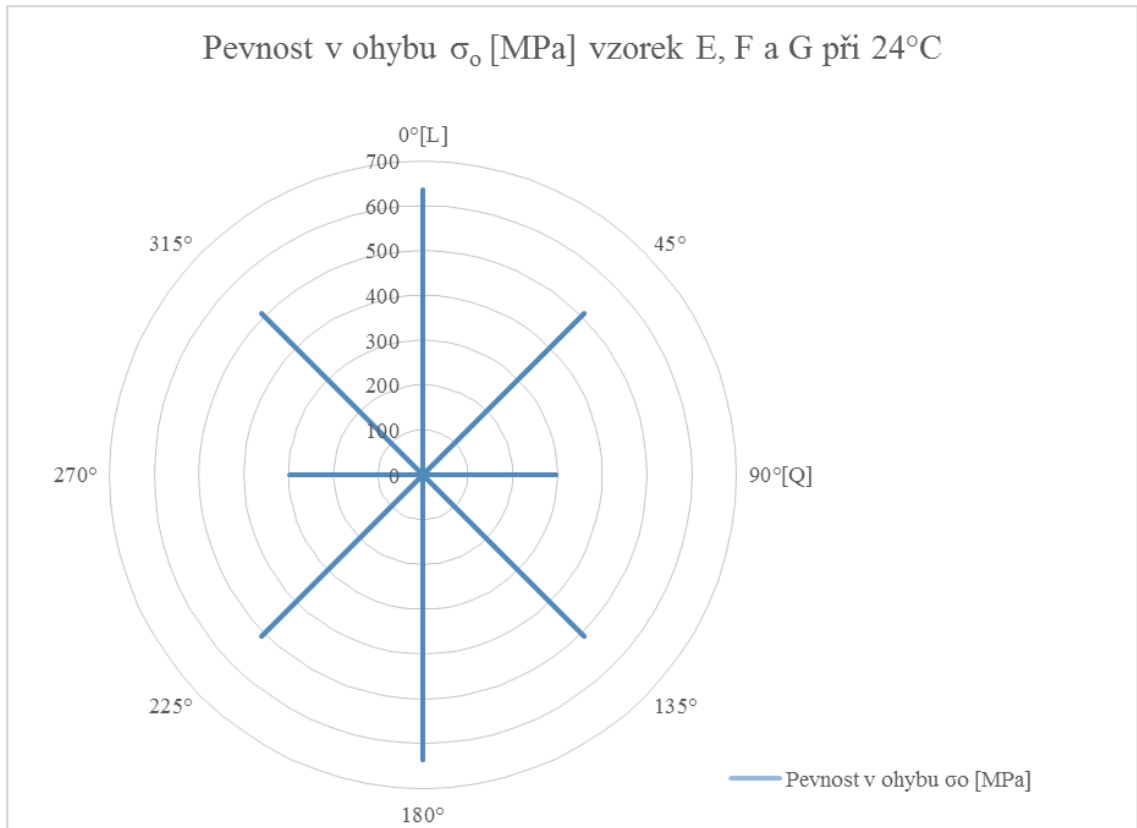


Obr. 64. Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek C a D při 60°C

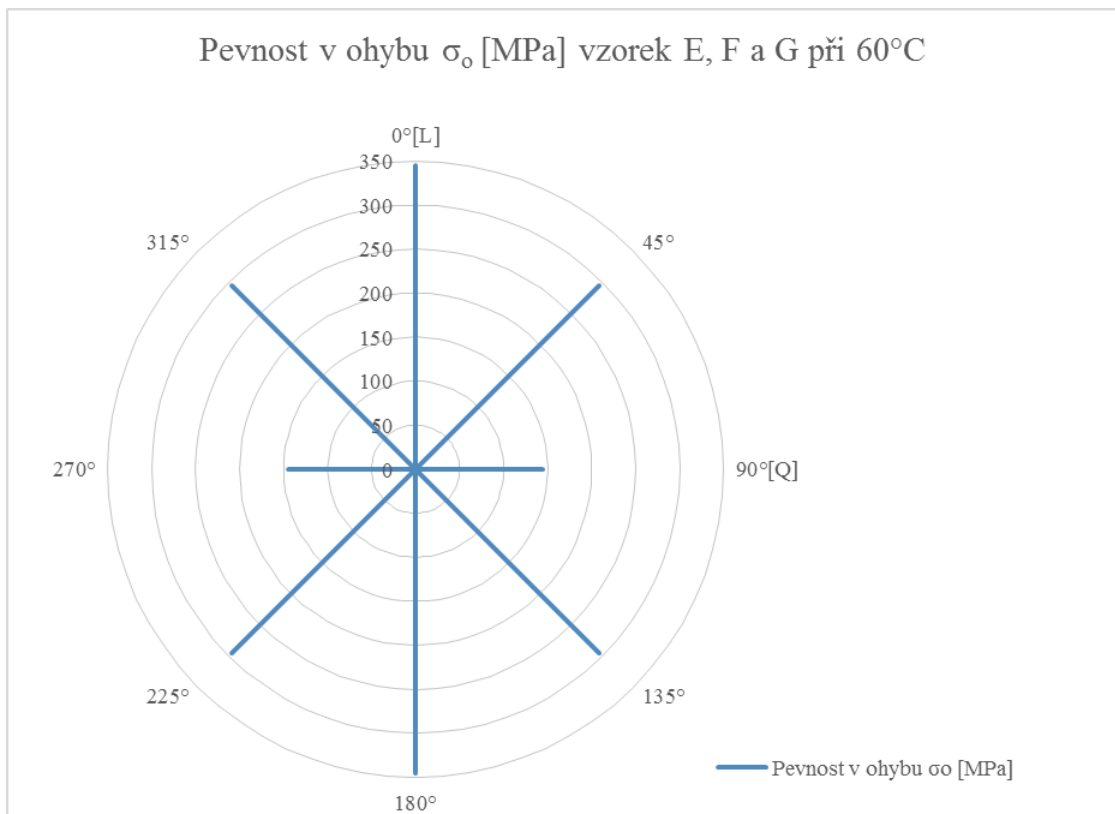
10.1.3 Vzorek E, F, G

Na vzorcích bylo naměřeno ohybové napětí v podélném směru [L] 636 MPa při teplotě 24°C a 345 při 60°C. V příčném směru [Q] 297 MPa při 24°C a 145 MPa při 60°C. Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo ohybové napětí 509 MPa při 24°C a 295 MPa při 60°C. Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je značný a dochází tedy k poklesu mechanických vlastností o 45% při zvýšené teplotě v podélném směru a v příčném směru o 52%. Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 43%.

Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou matricí, která v tomto případě byla epoxidová pryskyřice a dále také orientací výztuže, která je rozdílná ve všech vrstvách kompozitního systému, který byl navržen podle pravidel pro vrstvení a křížení a byl na něm prováděn výzkum vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti. Z těchto zjištěných hodnot lze usuzovat, že pro zvýšenou teplotu je vhodná aplikace kompozitního systému s rozdílnou skladbou vrstev, díky které je možné docílit téměř totožných vlastností i za zvýšené teploty.



Obr. 65 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek E, F a G při 24°C



Obr. 66 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek E, F a G při 60°C

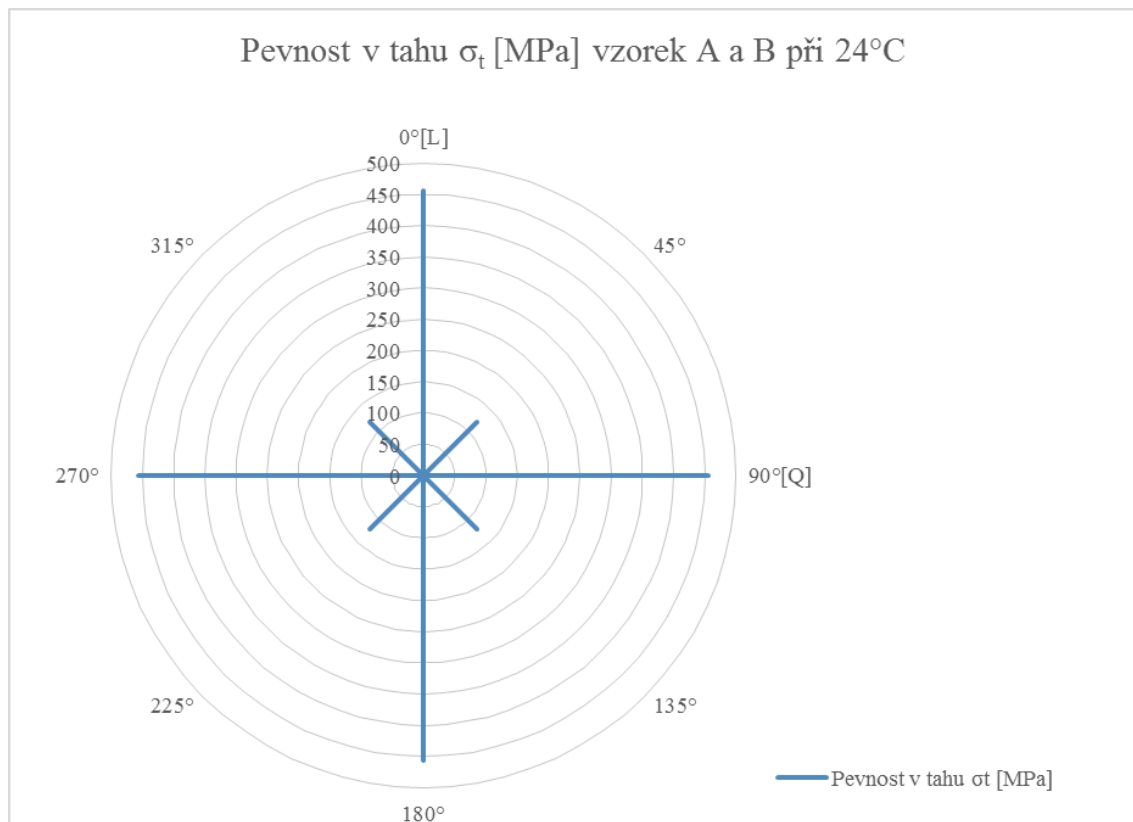
10.2 Tahová zkouška

V následující kapitole jsou zpracovány výsledky tahové zkoušky, která byla provedena na sedmi sadách vzorků tak aby bylo možné sestavit polární diagram o čtyřech osách. Měření bylo provedeno za laboratorní teploty 24°C a za zvýšené 60°C.

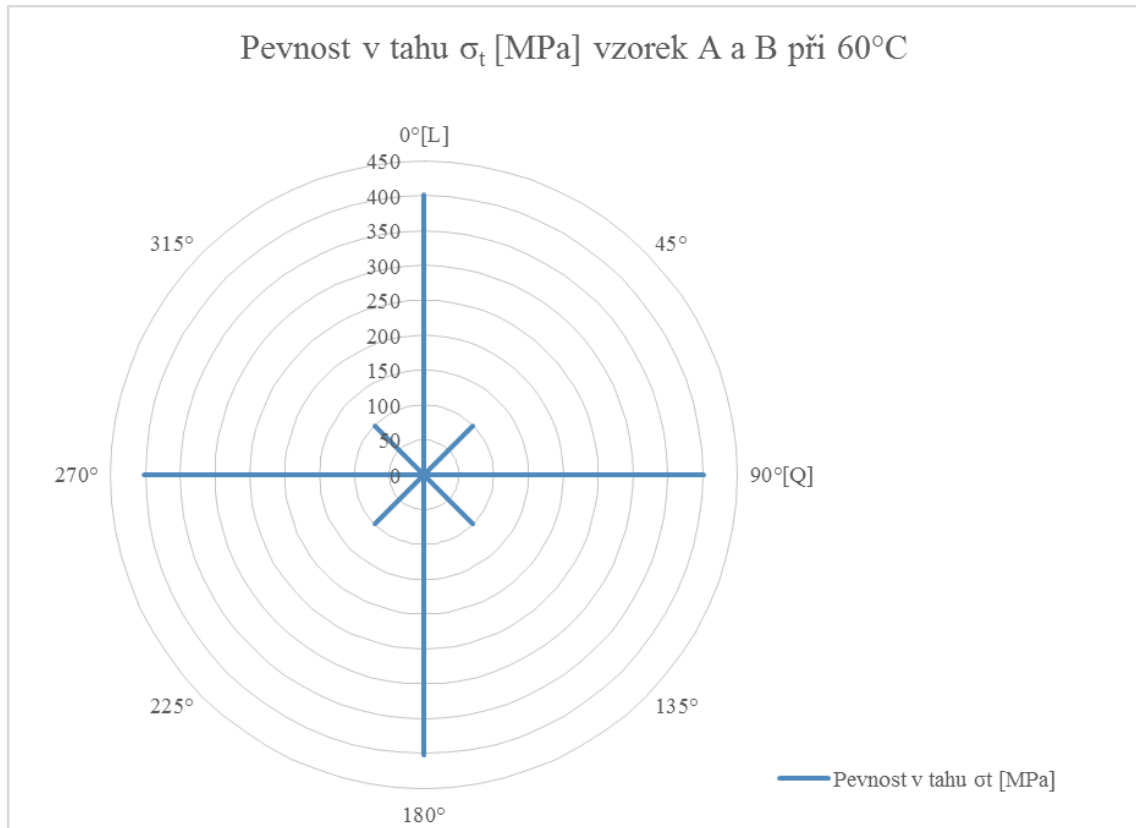
10.2.1 Vzorek A, B

Na vzorcích bylo naměřeno tahové napětí v podélném [L] a příčném [Q] směru 456 MPa při 24°C a 402 MPa při 60°C. Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo tahové napětí 121 MPa při 24°C a 99 MPa při 60°C. Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je značný a dochází tedy k poklesu mechanických vlastností o 12% při zvýšené teplotě v podélném a příčném směru.

Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 19%. Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou matricí, která v tomto případě byla vývojová polyuretanová pryskyřice a dále také orientací výztuže, která je shodná ve všech vrstvách kompozitního systému. Při tahovém napětí nedochází k tak výrazným ztrátám mechanických vlastností z důvodu přenosu sil přímo výztuží a ne matricí.



Obr. 67 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek A a B při 24°C

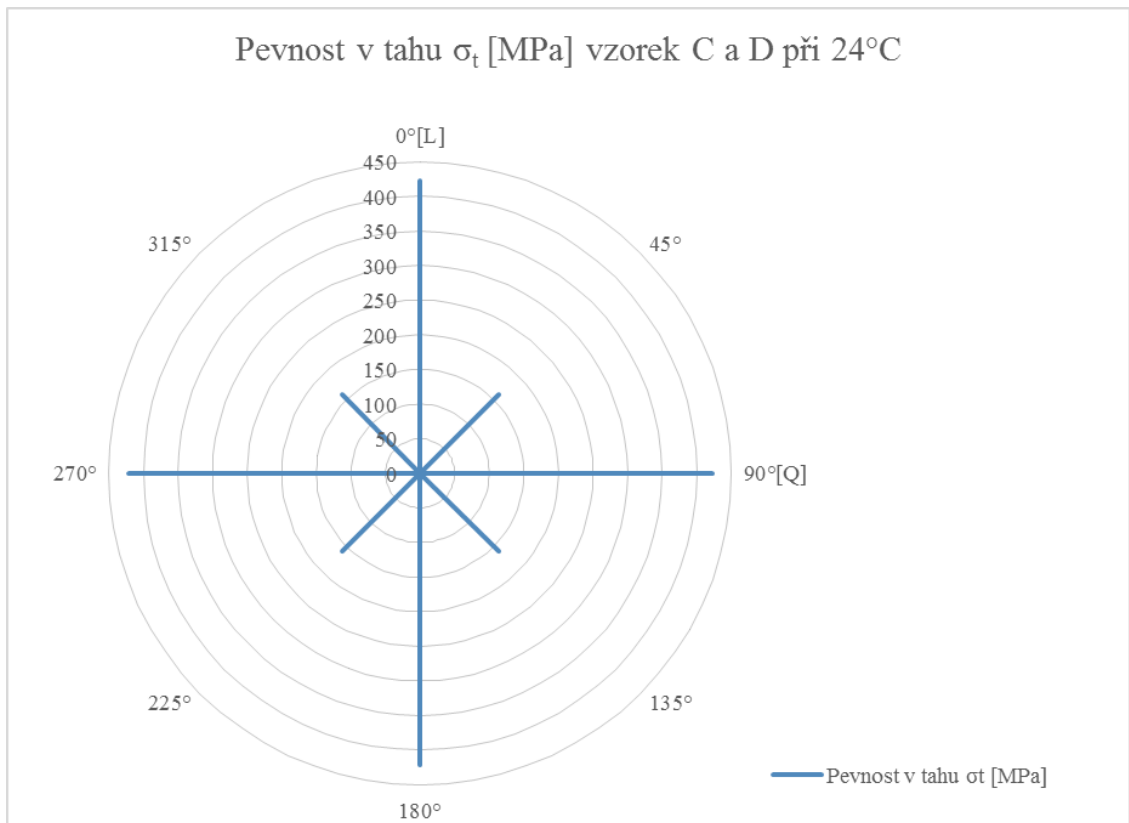


Obr. 68 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek A a B při 60°C

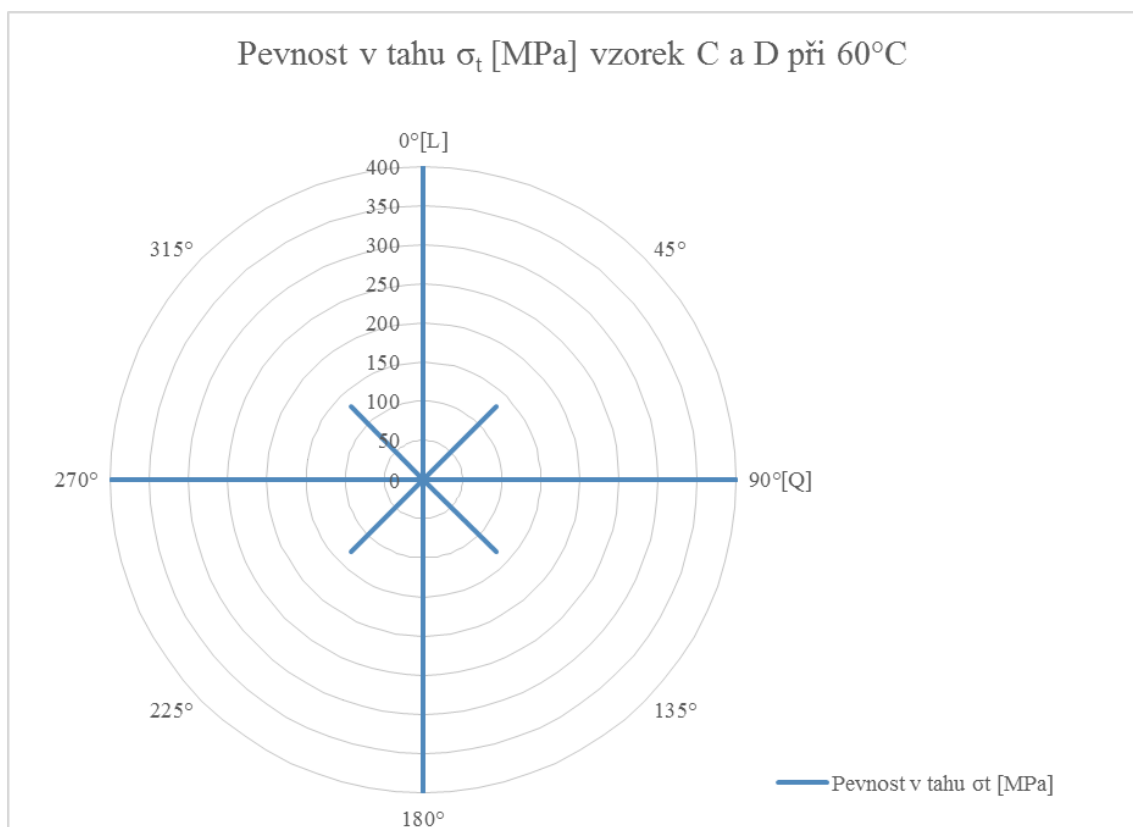
10.2.2 Vzorek C, D

Na vzorcích bylo naměřeno tahové napětí v podélném [L] a příčném [Q] směru 422 MPa při 24°C a 400 MPa při 60°C. Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo tahové napětí 160 MPa při 24°C a 131 MPa při 60°C. Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je značný a dochází tedy k poklesu mechanických vlastností o 6% při zvýšené teplotě v podélném a příčném směru.

Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 19%. Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou maticí, která v tomto případě byla epoxidová pryskyřice a dále také orientací výztuže, která je shodná ve všech vrstvách kompozitního systému. Při tahovém napětí nedochází k tak výrazným ztrátám mechanických vlastností z důvodu přenosu sil přímo výztuží a ne maticí.



Obr. 69 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek C a D při 24°C

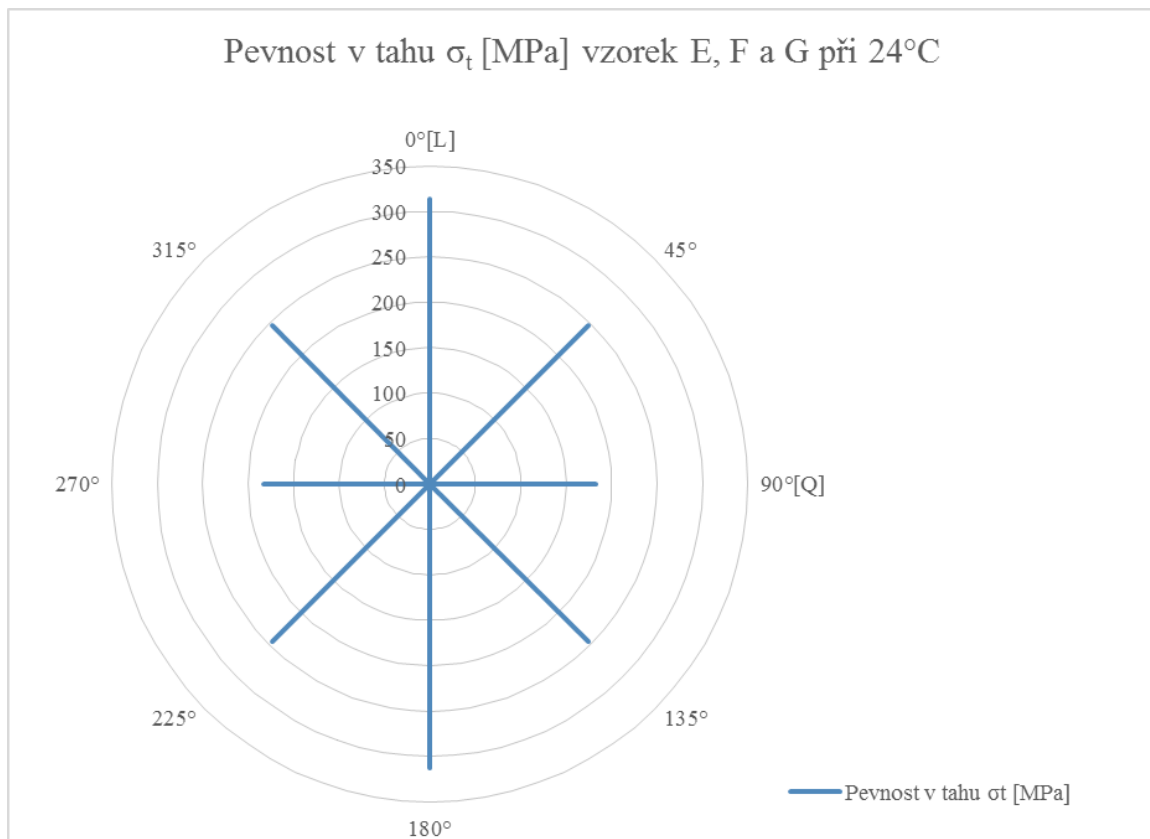


Obr. 70 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek C a D při 60°C

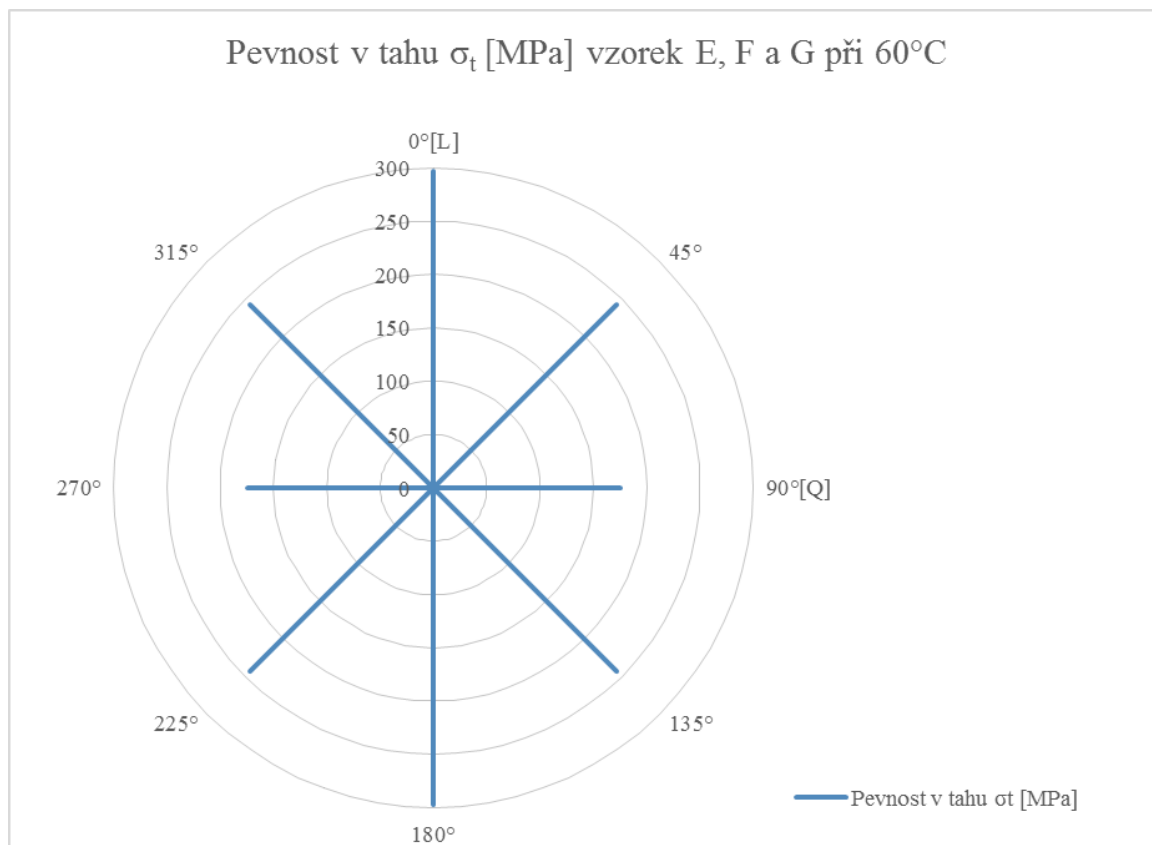
10.2.3 Vzorek E, F, G

Na vzorcích bylo naměřeno ohybové napětí v podélném směru [L] 313 MPa při teplotě 24°C a 297 při 60°C. V příčném směru [Q] 183 MPa při 24°C a 175 MPa při 60°C. Na vzorku vyrobeném pod úhlem 45° bylo ohybové napětí 246 MPa při 24°C a 243 MPa při 60°C. Z těchto naměřených hodnot lze usoudit, že vliv teploty na zvolenou pryskyřici je zanedbatelný ale i přesto dochází k poklesu mechanických vlastností o 6% při zvýšené teplotě v podélném směru, a v příčném směru o 4%. Pod úhlem 45° dochází k poklesu mechanických vlastností o 2%.

Pokles těchto vlastností je způsoben zvolenou maticí, která v tomto případě byla epoxidová pryskyřice a dále také orientací výztuže, která je rozdílná ve všech vrstvách kompozitního systému, který byl navržen podle pravidel pro vrstvení a křížení, a byl na něm prováděn výzkum vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti. Z těchto zjištěných hodnot lze usuzovat, že pro zvýšenou teplotu je vhodná aplikace kompozitního systému s rozdílnou skladbou vrstev, díky které je možné docílit téměř totožných vlastností i za zvýšené teploty.



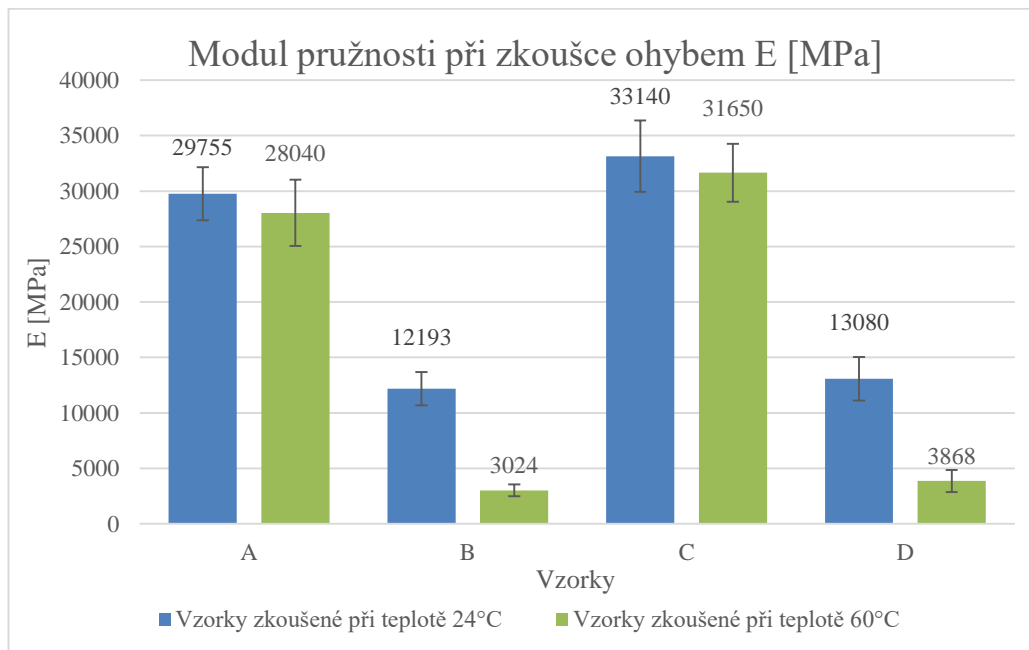
Obr. 71 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek E, F a G při 24°C



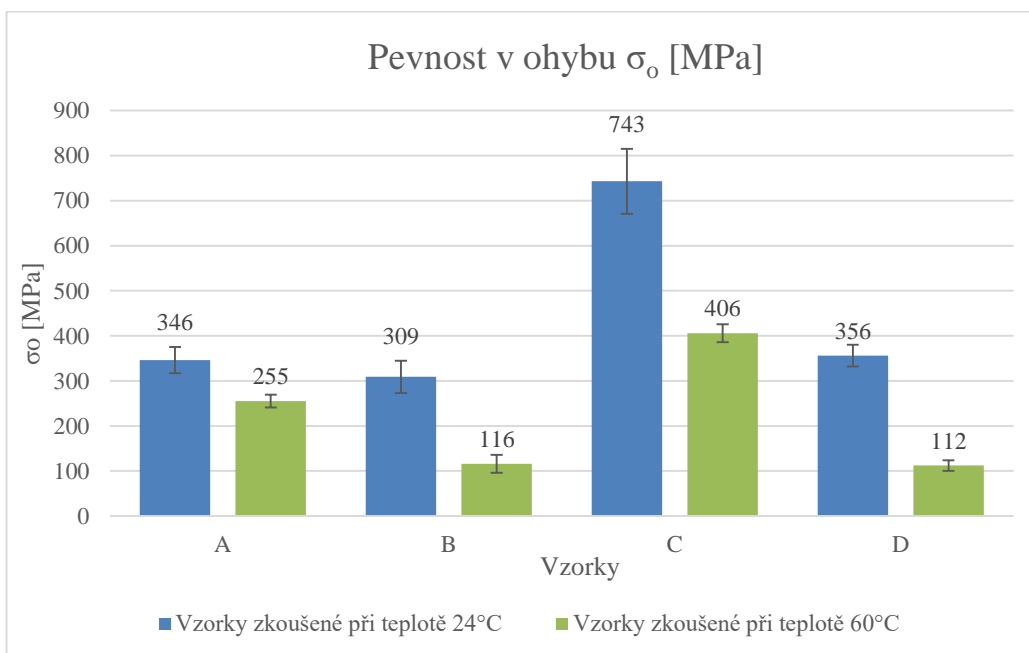
Obr. 72 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek E, F a G při 60°C

11 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ

V následujících grafech jsou shrnuté výsledky naměřené při zkoušce tahem a ohybem. V každém grafu je zanesena hodnota naměřena při laboratorní teplotě 24°C a hodnota naměřena při 60°C.



Obr. 73 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z tkaniny (ohyb)



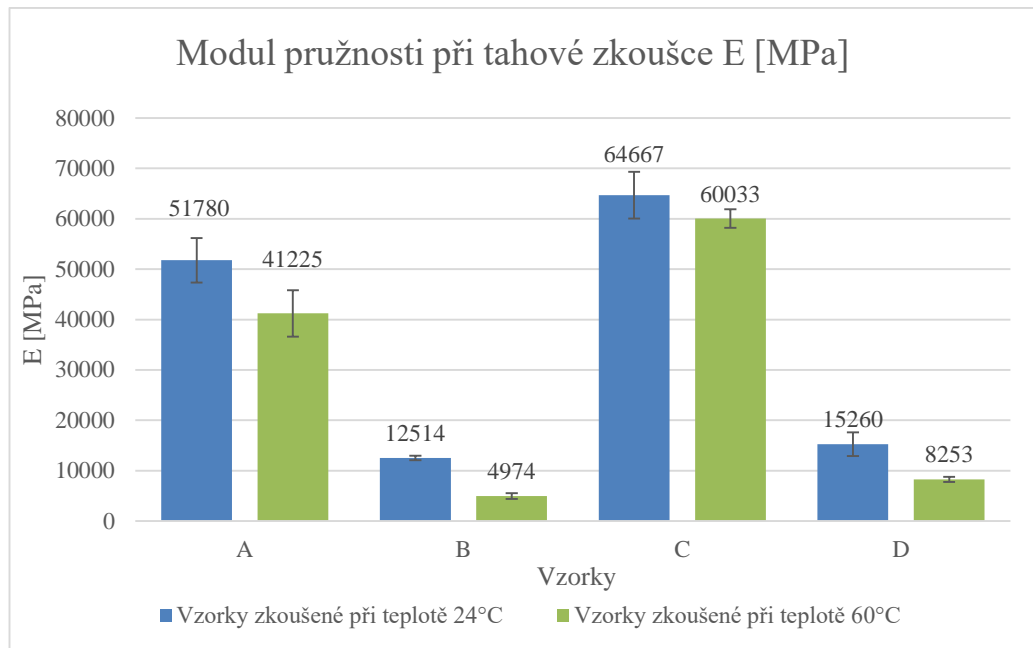
Obr. 74 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu σ_o vzorků z tkaniny

Vzorky A – D jsou porovnávány z důvodu stejné skladby kompozitního systému, orientace tkaniny, počtu vrstev. Jediným rozdílem těchto systému je použitá matrice. Vzorky byly vyrobeny z tkanin s obdobnou plošnou gramáží. Z měření vyplývá, že nejvyšší modul pružnosti $E = 33\,140$ MPa, byl naměřen na vzorku C. Tato hodnota se ani při zvýšené teplotě nijak zásadě nezměnila, i když došlo k jejímu poklesu přibližně o 6 %. U druhého vzorku o stejné skladbě, tedy vzorek A, který byl vyroben z vývojové pryskyřice, byl naměřen modul pružnosti $E = 29\,755$ MPa, i jeho hodnota při zvýšené teplotě klesla přibližně o 4 %. Pokles těchto modulů je zanedbatelný a lze tedy říct, že teplota nemá na kompozitní systém o této skladbě téměř žádný vliv.

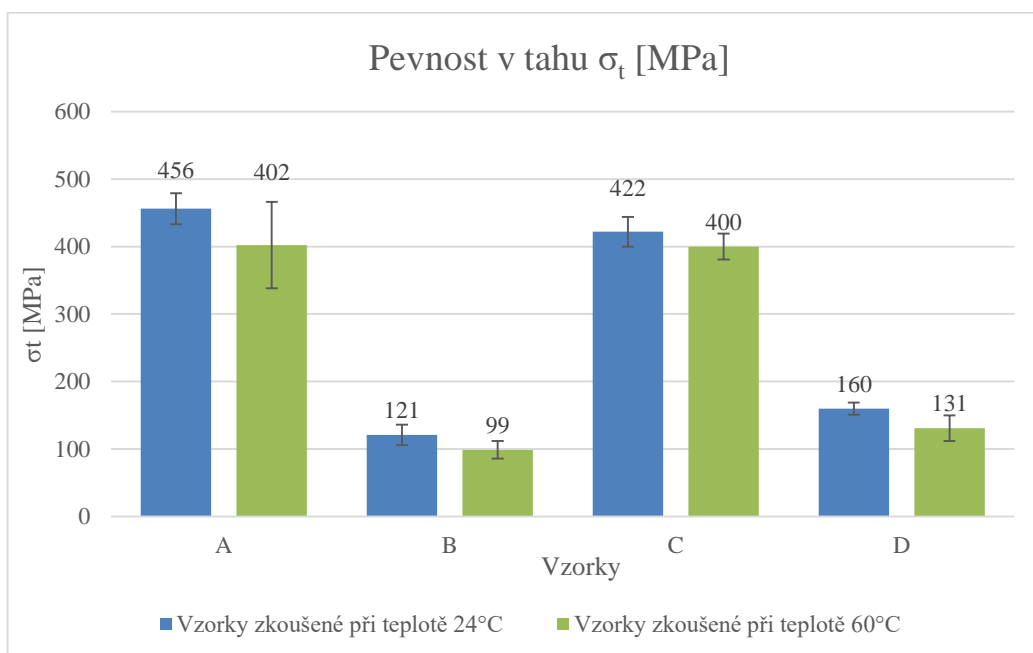
Vzorky B a D byly také orientovány stejně. Byla u nich použita rozdílná matrice. Jejich moduly pružnosti jsou téměř srovnatelné. Modul pružnosti $E = 12\,193$ MPa pro vzorek B a $E = 13\,080$ MPa pro vzorek D. Jejich moduly však výrazně poklesly vlivem teploty přibližně na třetinu hodnoty při laboratorní teplotě. Tento pokles byl způsoben orientací tkaniny a maticí, která při zvýšené teplotě nepodržela strukturu kompozitního systému, přestože výrobce použité pryskyřice v technickém listě deklaruje použití až do 80°C. Vzorky byly tedy poddajné a dosahovaly nízkých hodnot.

Výsledky pevnosti v ohybu σ_o [MPa] vyšly nejlépe pro vzorek C a to 743 MPa. Vlivem teploty tato hodnota klesla na 406 MPa. Důvodem tohoto poklesu byla volba matrice, což v tomto případě byla epoxidová pryskyřice, která za zvýšené teploty ztratila část svých mechanických vlastností. Vzorky A, B a D dosáhly srovnatelných hodnot pevnosti kolem 350 MPa a opět při zvýšené teplotě došlo k jejich poklesu a to téměř na polovinu hodnoty při laboratorní teplotě.

Pro namáhání ohybem má vzorek C lepší mechanické vlastnosti při stejné skladbě kompozitního systému a množství vrstev. Vyšších hodnot dosahuje pouze za laboratorní teploty, při zvýšené teplotě jeho mechanické vlastnosti klesají stejně jako u ostatních vzorků téměř na polovinu.



Obr. 75 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z tkaniny (tah)



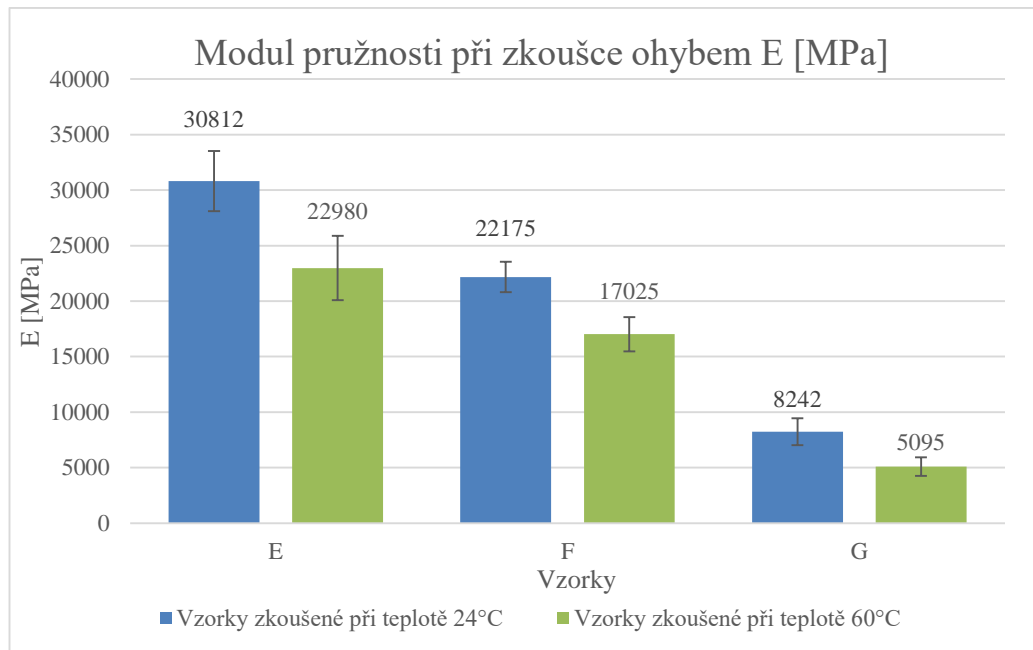
Obr. 76 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v tahu σ_t vzorků z tkaniny

Při tahové zkoušce opět vzorek C dosáhl nejvyšší hodnoty modulu pružnosti $E = 64\,667$ MPa a jeho pokles při zvýšené teplotě byl přibližně o 6 % stejně jako u zkoušky ohybem. U druhého vzorku o stejné skladbě, tedy vzorek A, který byl vyroben z vývojové pryskyřice, byl naměřen modul pružnosti $E = 51\,780$ MPa, ale jeho hodnota při zvýšené teplotě klesla přibližně o 20 %. Pokles tohoto modulu je výraznější a bylo by nutné při aplikaci tohoto kompozitního systému s tímto poklesem počítat.

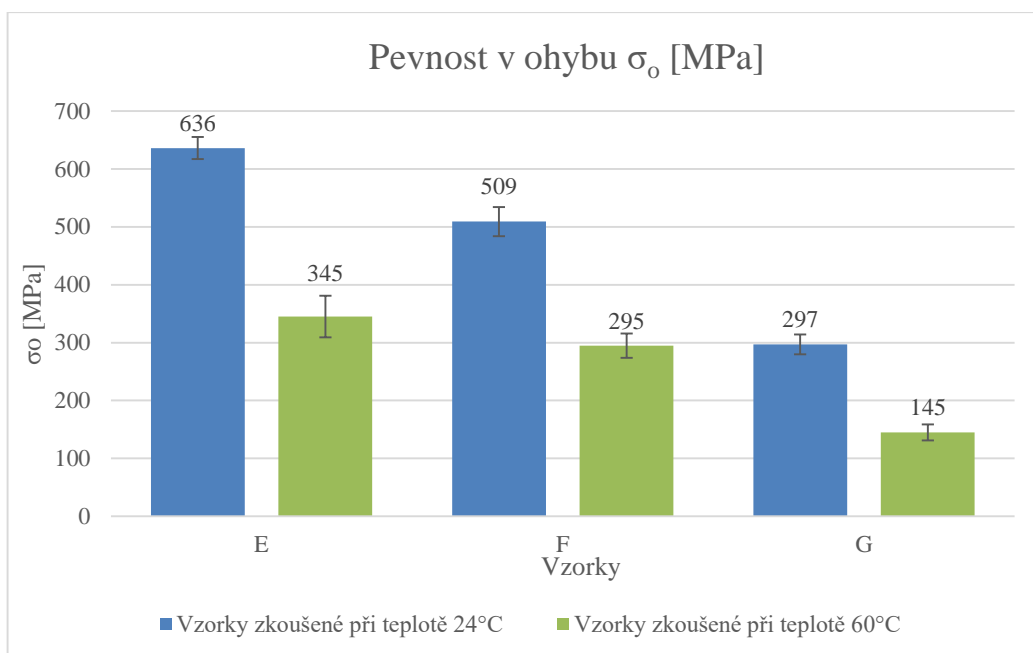
Výsledky pevnosti v ohybu σ_t [MPa] vyšly nejlépe pro vzorek A a to 456 MPa. Vlivem teploty tato hodnota klesla o 15 %. Důvodem tohoto poklesu byla volba matrice, což v tomto případě byla vývojová epoxidová pryskyřice, která za zvýšené teploty ztratila část svých mechanických vlastností. Vzorek C dosáhl hodnoty 422 MPa a za zvýšené teploty poklesla hodnota o 5 %. Výsledky pevnosti v tahu jsou u vzorku A a C téměř srovnatelné, ale pro namáhání tahem se jeví jako lepší vzorek A. Při zkoušce tahem nedošlo u pevnosti v tahu σ_t k výrazným změnám za zvýšené teploty. Vzorek B a D o stejné skladbě a orientaci dosáhl srovnatelných hodnot pevnosti v tahu přibližně 140 MPa a také nedošlo k zásadnímu poklesu těchto hodnot za zvýšené teploty.

Z výsledků těchto zkoušek vyplývá, že vliv na mechanické vlastnosti kompozitních systémů má u vzorků, které mají stejnou skladbu, orientaci, počet vrstev a obdobnou matici, především druh vazby tkaniny, v tomto případě keprová vazba má lepší mechanické vlastnosti při ohybu, jak v podélném směru testování (vzorek C), tak i při orientaci pootočené o 45° (vzorek D). Zatímco pro tah má lepší mechanické vlastnosti vazba plátňová, jak v podélném směru testování (vzorek A), tak i při orientaci pootočené o 45° (vzorek B). Vliv matrice ovlivňuje do jisté míry mechanické vlastnosti, které se projeví v hodnotách modulu pružnosti E. Zde se jako lepší jeví epoxidová pryskyřice.

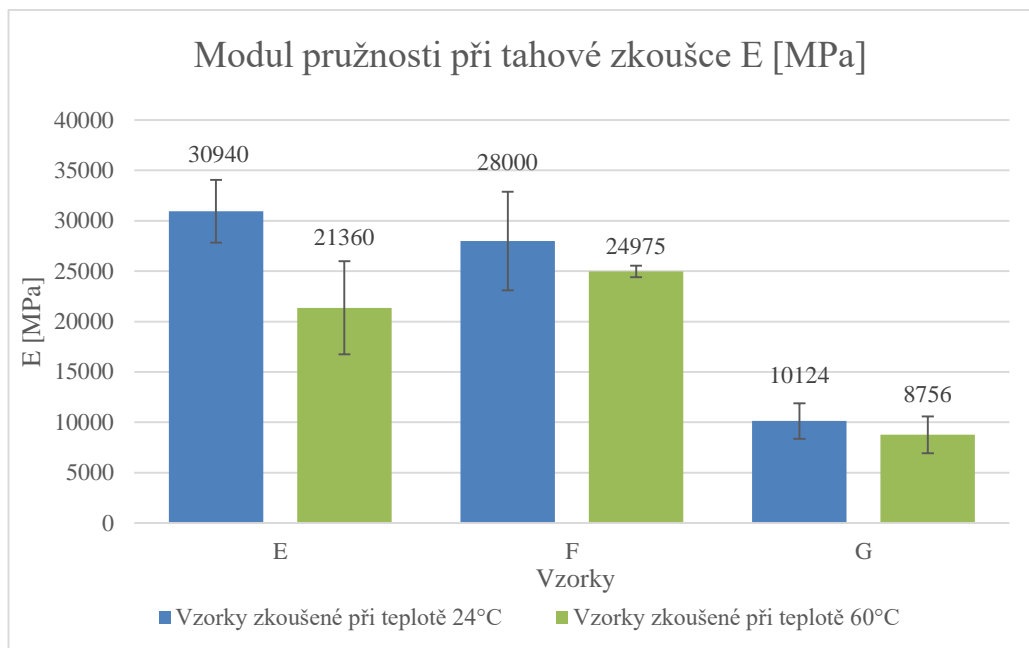
Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti zde lze pozorovat pouze na druhu vazby tkaniny. Keprová vazba dosáhla výrazně nejvyšší hodnoty při zkoušce ohybem, kdy pevnost v ohybu výrazně převýšila hodnoty plátňové vazby. U zkoušky tahem již byly hodnoty plátňové a keprové vazby téměř srovnatelné.



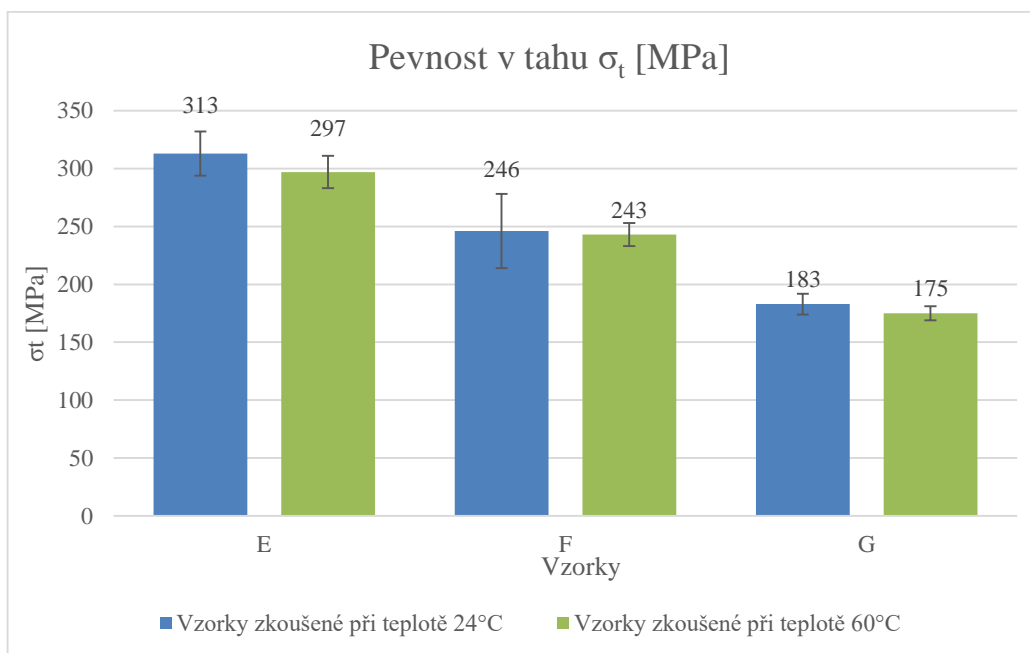
Obr. 77 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z jednosměrné tkaniny (ohyb)



Obr. 78 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu σ_0 vzorků z jednosměrné tkaniny



Obr. 79 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z jednosměrné tkaniny (tah)



Obr. 80 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v tahu σ_t vzorků z jednosměrné tkaniny

Vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů byl testován na vzorcích E, F a G. Tyto vzorky byly vytvořeny na základě poznatků o vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti. Proto byly vzorky vyrobeny z jednosměrné tkaniny, byla dodržena symetrie systému vůči neutrální ose a jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice.

Každý vzorek byl vytvořen s rozdílnými orientacemi vrstev, z důvodu možnosti testování vlivu této orientace na mechanické vlastnosti. Vzorek E byl podle dostupných podkladů sestaven tak, aby jeho křížení vrstev dosahovalo co nejlepších mechanických vlastností. To potvrdilo i následné testování, kdy jeho modul pružnosti E jak v tahu, tak v ohybu dosáhl mezi testovanými vzorky nejvyšších hodnot a to srovnatelně přibližně 31 000 MPa. Při zvýšené teplotě poklesl opět obdobně a to přibližně na hodnotu 22 000 MPa. Tento vzorek byl zkonstruován tak, aby jeho mechanické vlastnosti byly vhodnější pro namáhání ohybem, a to opět testování potvrdilo. Hodnota pevnosti v ohybu σ_o dosáhla 636 MPa, touto hodnotou převýšila i hodnoty tkanin. Při zvýšené teplotě došlo k poklesu téměř na polovinu. Pevnost v tahu σ_t u tohoto vzorku dosáhla 313 MPa, ale při zvýšené teplotě došlo k poklesu o 5 %.

Vzorek F měl skladbu vzorku E, ale byl testován pod úhlem 45° na podélný směr L. Jeho modul pružnosti E při zkoušce ohybem dosáhl hodnoty 22 175 MPa při zvýšené teplotě pokles o 22 %, zatímco při tahové zkoušce dosáhl hodnot 28 000 MPa a pokles byl také 22 %. Pevnost v ohybu σ_o byla naměřena 509 MPa, její pokles při zvýšené teplotě byl o 42 %. Pevnost v tahu σ_t dosáhla hodnoty 246 MPa a poklesla o 1 %.

Vzorek G měl skladbu vzorku E, ale byl testován v příčném směru T. Jeho hodnoty modulů E jak v tahu, tak i v ohybu byly téměř srovnatelné přibližně 9 000 MPa. Pokles při zvýšené teplotě byl kolem 20 %. Hodnota pevnosti v ohybu σ_o dosáhla 297 MPa a v tahu σ_t 183 MPa. Při ohybu došlo k poklesu za zvýšené teploty na polovinu pevnosti a při tahu přibližně o 4 %. Z těchto výsledků vyplývá, že skladba je také vhodnější pro namáhání ohybem.

Z naměřených dat vyplývá, že vhodně zvolené křížení vrstev má zásadní vliv na mechanické vlastnosti kompozitního systému. Volba matrice u mnou zvolených a testovaných skladeb nehraje za běžné teploty zásadní roli. Tvrzení o vlivu křížení potvrdilo testování několika navržených a vyrobených kompozitních systémů. Systémy byly vytvořeny tak, aby potvrdily vliv orientace a uspořádání vrstev kolem své neutrální osy. Skladba těchto systémů se odvíjela od poskytnutých podkladů a literárních zdrojů.

Vzorky A, B, C a D byly vyrobeny za účelem testování vlivu tkaniny, jejich vazeb a matic na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. Vzorky E, F a G byly vyrobeny za účelem testování vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů.

ZÁVĚR

Diplomová práce byla zaměřena na vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. Teoretická část byla věnována problematice kompozitních materiálů, jejich základnímu popisu, včetně definice a rozdělení kompozitního materiálu. V této kapitole byl vytvořen přehled základních složek kompozitního systému, včetně nejčastějších materiálů. Velká část této kapitoly se zabývala využitím synergického efektu a také adhezí, které jsou nejdůležitější problematiky kompozitních systémů. Adheze byla popsána, rozdělena a doplněna o metody testování, včetně jejich popisu.

Následující kapitola popisuje technologické aspekty orientace výztužných systémů na výsledné mechanické vlastnosti, kde je mimo jiné popsána orientace vláken v kompozitních materiálech, včetně jejich značení. Další kapitola se věnuje výrobě kompozitních systémů, jsou zde popsány ruční, částečně automatizované a plně automatizované postupy výroby. Předposlední kapitola teoretické části byla věnována mechanickým vlastnostem kompozitního materiálu včetně popisu mechanismu porušování a popisu zkoušení mechanických vlastností. Poslední kapitola teoretické části se věnovala polárnímu diagramu pro, který byl položen teoretický základ a byl následně aplikován v praktické části, jako výstup jejich výsledků.

V praktické části bylo nejprve navrženo materiálové složení kompozitního systému, kdy se vhodné pro testování jevíly tři druhy tkaniny s rozdílným druhem vazby. Jako matrice byly zvoleny dvě pryskyřice s rozdílnými specifikacemi jedna epoxidová a druhá poluretan-metakrylátová. Následně bylo navrženo sedm vzorků pro experimentální testování. Vzorky byly voleny tak, aby bylo možné experimentálně otestovat vliv křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. Dále byla popsána výroba jednotlivých vzorků, včetně technologických postupů.

Poté proběhlo experimentální testování zkušebních těles, pomocí zkoušky ohybem metodou tříbodového ohybu na stroji ZWICK 1456 a tahovou zkouškou na tom samém zařízení. Obě zkoušky byly provedeny za laboratorní a zvýšené teploty na 60°C. Z tohoto testování byly získány naměřené hodnoty, které byly statisticky zpracovány pro následné vyhodnocení. Jako první výstup byly zhotoveny polární diagramy pro jednotlivé vzorky a teploty. Z uvedených polárních diagramů lze vyčíst rozdílné mechanické vlastnosti v různých směrech testování kompozitního systému. Z výsledků bylo vytvořeno vyhodnocení experimentálních výsledků, kde jsou hodnoty uvedeny v grafické podobě, a následně porovnány.

Vzorky A, B, C a D byly vyrobeny za účelem testování vlivu tkaniny, jejich vazeb a matric na mechanické vlastnosti kompozitních systémů. Vzorky E, F a G byly vyrobeny za účelem testování vlivu křížení vrstev na mechanické vlastnosti kompozitních systémů.

Z naměřených dat vyplývá, že vhodně zvolené křížení vrstev má zásadní vliv na mechanické vlastnosti kompozitního systému. Volba matrice u mnou zvolených a testovaných skladeb nehraje za běžné teploty zásadní roli. Tvrzení o vlivu křížení potvrdilo testování několika navržených a vyrobených kompozitních systémů. Systémy byly vytvořeny tak, aby potvrdily vliv orientace a uspořádání vrstev kolem své neutrální osy. Skladba těchto systémů se odvíjela od poskytnutých podkladů a literárních zdrojů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007, 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [2] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu*. Vyd. 4. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [3] GRAEME W. MILTON., G. W. *The theory of composites*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. ISBN 978-051-1613-357.
- [4] VASILE, Cornelia a A KULSHRESHTHA. *Handbook of polymer blends and composites*. Shrewsbury: Rapra Technology, 2003, ISBN 18595730454
- [5] BAREŠ, Richard A. *Kompozitní materiály*. Vydání 1. Nakladatelství SNTLNakladatelství technické literatury. 1988
- [6] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2003, ISBN 80-214-2443-5.
- [7] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [8] DAĐOUREK, Karel. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Kompozitní materiály: Definice a složení*. Liberec, 2008. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad.pdf
- [9] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [10] RUSNÁKOVÁ, Soňa: Přednášky z předmětu zpracovatelské inženýrství kompozitů T5ZIK; FT UTB. 2011
- [11] ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ. *Kompozitní materiály*. 2012. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/6_kompozitni-materialy.pdf
- [12] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [13] Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými vlákny: Autoklávová technologie. *Mmspektrum.com* [online]. 2010 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-z-polymeruvyztuzenych-uhlikovymi-vlakny.html>

- [14] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 200 s. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [15] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005, 55 s. ISBN 80-7083-972-4.
- [16] ŠUBA, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 110 s. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [17] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [18] KOŘÍNEK, Zdeněk. [Http://www.volny.cz/zkorinek/](http://www.volny.cz/zkorinek/) [online]. 2013 [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [19] ŠVEC, Pavol. *Konstrukčné materiály*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 220 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3386-1.
- [20] SKOČOVSKÝ, Petr. *Nové konstrukčné materiály: vybrané kapitoly*. Vyd. 1. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1995, 59 s. ISBN 80-7100-264-x.
- [21] VYSLOUŽIL, Tomáš. *Lomová mechanika částicových a vláknových kompozitů s křehkou maticí: Fracture mechanics of particulate-reinforced and fiber-reinforced brittle matrix composites : zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [Brno: VUTIUUM], 2005, 32 s. ISBN 80-214-3103-2.
- [22] HIDVÉGHY, Július a Ján DUSZA. *Nekovové konstrukčné materiály: plasty a konstrukčná keramika*. 1. vyd. Košice: Technická univerzita, 1998, 162 s. ISBN 80-7099-363-4.
- [23] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2006, 157 s. ISBN 80-7318-440-0. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/200612/contents/nkc20061688638_1.pdf
- [24] SKÁLOVÁ, Jana, Jaroslav KOUTSKÝ a Vladislav MOTYČKA. *Nauka o materiálech*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010, 232 s. ISBN 978-80-7043-244-0.
- [25] Polární diagram. *Office.lasakovi*. [online]. [cit. 2016-01-24]. Dostupné z: <http://office.lasakovi.com/excel/grafy/polarni-grafy-excel/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

b	Šíře zkušebního tělesa	[mm]
D	Faktor drsnosti	[-]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
F	Síla	[N]
F_{\max}	Maximální zatížení	[N]
h	Tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
l	Délka zkušebního vzorku při přetržení	[mm]
l_0	Délka zkušebního tělesa původní	[mm]
L_p	Rozteč mezi podpěrami	[mm]
L	Podélná směr	[-]
MCM	Ceramic Matrix Composites	
MMC	Metal Matrix Composites	
M_{\max}	Maximální ohybové zatížení	[N.mm]
n	Počet měření	[-]
n_0	Počet skladeb v jednom laminátu	[-]
P	Průhyb vzorku při zkoušce	[mm]
PA	Polyamid	
PE	Polyetylen	
PMC	Plastic Matrix Composites	
Q	Příčný směr	[-]
R_1	Poloměr vnikajícího tělesa	[mm]
R_2	Poloměr podpory	[mm]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
s	Symetrie	[-]
S	Výběrová směrodatná odchylka	[-]

S_0	Původní průřez	[mm]
u_p	Pravděpodobnostní koeficient	[-]
W	Práce	[N.mm]
x	Vzdálenost od podpěr	[mm]
α	Úhel	[°]
β	Úhel	[°]
Δ	Přesnost měření	[-]
ε	Poměrné prodloužení	[%]
Θ	Úhel smáčivosti	[°]
σ_t	Pevnost v tahu	[MPa]
σ_o	Pevnost v ohybu	[MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Příklad výrobku z kompozitního systému</i>	12
<i>Obr. 2 Příklad výrobku s plastovou maticí</i>	13
<i>Obr. 3 Příklad výrobku s kovovou maticí</i>	14
<i>Obr. 4 Příklad výrobku s keramickou maticí</i>	14
<i>Obr. 5 Rozdělení materiálu podle výztuže</i>	15
<i>Obr. 6 Schéma uložení vláken v matici</i>	17
<i>Obr. 7 Znázornění synergického efektu v kompozitních materiálech [19]</i>	18
<i>Obr. 8 Princip přímého měření adhezního napětí normálové, smykové a tečné</i>	21
<i>Obr. 9 Princip scratch testu</i>	21
<i>Obr. 10 Princip vrypového čtverečkového testu</i>	22
<i>Obr. 11 Princip odlupovacího testu</i>	22
<i>Obr. 12 Schéma nesymetrického laminátu[18]</i>	23
<i>Obr. 13 Schéma symetrického hybridního laminátu[18]</i>	24
<i>Obr. 14 Skelné vlákno</i>	25
<i>Obr. 15 Uhlíkové vlákno</i>	26
<i>Obr. 16 Roving na cívce</i>	27
<i>Obr. 17 Uspořádání tkanin</i>	28
<i>Obr. 18 Vizualizace porovnání uspořádání tkanin na výrobku</i>	28
<i>Obr. 19 Rohož z kontinuálních vláken</i>	29
<i>Obr. 20 Schéma ručního laminování</i>	31
<i>Obr. 21 Schéma částečné automatizace laminování (stříkání)</i>	31
<i>Obr. 22 Autokláv[13]</i>	32
<i>Obr. 23 Schéma mokrého lisování[9]</i>	33
<i>Obr. 24 Schéma vysokotlakého vstřikování - RTM</i>	34
<i>Obr. 25 Schéma kontinuální výroby laminátu[9]</i>	34
<i>Obr. 26 Schéma technologie navíjení[9]</i>	35
<i>Obr. 27 Vizualizace vzniku trhlin laminátu</i>	36
<i>Obr. 28 Schéma tahové zkoušky a zařízení pro tahovou zkoušku</i>	39
<i>Obr. 29 Schéma tříbodové ohybové zkoušky</i>	40
<i>Obr. 30 Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky a zařízení pro ohybovou zkoušku</i>	42
<i>Obr. 31 Pevnost v tahu v polárním diagramu[25]</i>	43
<i>Obr. 32 Skladba laminátu vzorku E</i>	49

Obr. 33	Skladba laminátu vzorku F	49
Obr. 34	Skladba laminátu vzorku G	49
Obr. 35	Příklad vyrobeného laminátu (ruční laminace)	51
Obr. 36	Zkušební tělesa připravena pro podrobení mechanickým zkouškám	51
Obr. 37	Ručně laminovaný kompozitní systém připravený pro vakuovací fólii	52
Obr. 38	Odrhová a netkaná textilie	53
Obr. 39	Kompletně za vakuovaný vyráběný kompozitní systém	54
Obr. 40	Za vakuovaný kompozitní systém včetně přepadové nádoby a vývěvy	54
Obr. 41	Příklad vyrobeného laminátu (pod vakuovou fólií)	55
Obr. 42	Zkušební tělesa připravena k testování (vak. fólie)	55
Obr. 43	Zkušební zařízení ZWICK 1456 s teplotní komorou	57
Obr. 44	Zkušební těleso při zkoušce ohybem	57
Obr. 45	Graf naměřených dat vzorku A při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	59
Obr. 46	Graf naměřených dat vzorku B při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	60
Obr. 47	Graf naměřených dat vzorku C při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	61
Obr. 48	Graf naměřených dat vzorku D při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	62
Obr. 49	Graf naměřených dat vzorku E při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	63
Obr. 50	Graf naměřených dat vzorku F při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	64
Obr. 51	Graf naměřených dat vzorku G při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	65
Obr. 52	Redukce pro pneumatické skličidla	68
Obr. 53	Zkušební těleso při zkoušce tahem	69
Obr. 54	Graf naměřených dat vzorku A při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	70
Obr. 55	Graf naměřených dat vzorku B při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	71
Obr. 56	Graf naměřených dat vzorku C při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	72
Obr. 57	Graf naměřených dat vzorku D při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	73
Obr. 58	Graf naměřených dat vzorku E při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	74
Obr. 59	Graf naměřených dat vzorku F při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	75
Obr. 60	Graf naměřených dat vzorku G při teplotě 24°C (levý) a 60°C (pravý)	76
Obr. 61	Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek A a B při 24°C	80
Obr. 62	Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek A a B při 60°C	80
Obr. 63	Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek C a D při 24°C	81
Obr. 64	Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek C a D při 60°C	82
Obr. 65	Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek E, F a G při 24°C	83

<i>Obr. 66 Polární diagram pevnosti v ohybu pro vzorek E, F a G při 60°C.....</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 67 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek A a B při 24°C</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 68 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek A a B při 60°C</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 69 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek C a D při 24°C.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 70 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek C a D při 60°C.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 71 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek E, F a G při 24°C</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 72 Polární diagram pevnosti v tahu pro vzorek E, F a G při 60°C</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 73 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z tkaniny (ohyb) ...</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 74 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu σ_o vzorků z tkaniny</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 75 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z tkaniny (tah)</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 76 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v tahu σ_t vzorků z tkaniny</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 77 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z jednosměrné tkaniny (ohyb).....</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 78 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v ohybu σ_o vzorků z jednosměrné tkaniny</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 79 Porovnání průměrů hodnot modulů pružnosti E vzorků z jednosměrné tkaniny (tah)</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 80 Porovnání průměrů hodnot pevnosti v tahu σ_t vzorků z jednosměrné tkaniny</i>	<i>94</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Uhlíkové tkaniny od firmy KORDCARBON.....</i>	46
<i>Tab. 2 Specifikace kapalné pryskyřice a tužidla při 25°C</i>	47
<i>Tab. 3 Specifikace kapalné vývojové pryskyřice při 25°C</i>	47
<i>Tab. 4 Technická data stroje ZWICK 1456.....</i>	56
<i>Tab. 5 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 24°C</i>	59
<i>Tab. 6 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 60°C</i>	59
<i>Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 24°C</i>	60
<i>Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 60°C</i>	60
<i>Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 24°C</i>	61
<i>Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 60°C</i>	61
<i>Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 24°C</i>	62
<i>Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 60°C</i>	62
<i>Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 24°C</i>	63
<i>Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 60°C</i>	63
<i>Tab. 15 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 24°C</i>	64
<i>Tab. 16 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 60°C</i>	64
<i>Tab. 17 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 24°C</i>	65
<i>Tab. 18 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 60°C</i>	65
<i>Tab. 19 Vzorky po ohybové zkoušce (vzorek A-G)</i>	66
<i>Tab. 20 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 24°C</i>	70
<i>Tab. 21 Naměřené hodnoty vzorku A při teplotě 60°C</i>	70
<i>Tab. 22 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 24°C</i>	71
<i>Tab. 23 Naměřené hodnoty vzorku B při teplotě 60°C</i>	71
<i>Tab. 24 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 24°C</i>	72
<i>Tab. 25 Naměřené hodnoty vzorku C při teplotě 60°C</i>	72
<i>Tab. 26 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 24°C</i>	73
<i>Tab. 27 Naměřené hodnoty vzorku D při teplotě 60°C</i>	73
<i>Tab. 28 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 24°C</i>	74
<i>Tab. 29 Naměřené hodnoty vzorku E při teplotě 60°C</i>	74
<i>Tab. 30 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 24°C</i>	75
<i>Tab. 31 Naměřené hodnoty vzorku F při teplotě 60°C</i>	75
<i>Tab. 32 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 24°C</i>	76
<i>Tab. 33 Naměřené hodnoty vzorku G při teplotě 60°C</i>	76
<i>Tab. 34 Vzorky po tahové zkoušce (vzorek A-G).....</i>	77

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha PI	Technický list – uhlíková tkanina – CC 200 P – 120
Příloha PII	Technický list – uhlíková tkanina – CC 280 T2
Příloha PIII	Technický list – uhlíková jednosměrná tkanina – KC 160 3K
Příloha PIV	Technický list – Laminační pryskyřice L285
Příloha PV	Technický list – Vývojová polyuretan - metakrylátová pryskyřice
Příloha PVI	Naměřená data při ohybové zkoušce
Příloha PVII	Naměřená data při tahové zkoušce
Příloha PVIII	Výkres redukce

PŘÍLOHA P I: TECHNICKÝ LIST – UHLÍKOVÁ TKANINA – CC 200 P – 120



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0065101**

Material Code: TOR000601
Material Designation: **CC 200 P - 120**
Manufacturing Date: 18.6.2014
Article no.: CA0010-641-0001
Test roll No.: C0065101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: plain

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR000601				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	500	495	510	* 500	DIN EN 1049-2
Sett of weft	n/m	500	495	510	* 510	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,35	0,32	0,38	* 0.37	DIN EN 5084
Area weight	g/m ²	200	195	210	204	DIN EN 12127
Width	cm	120	119,5	121	* 120.4	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm ³	1,76				
* orientation value						
Corresponds to the batch no.: C00651						



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P II: TECHNICKÝ LIST – UHLÍKOVÁ TKANINA – CC 280 T2



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: **C0063101**

Material Code: TOR003301
Material Designation: **CC 280 T2 - 100**
Manufacturing Date: 0.1.1900
Article no.:
Test roll No.: C0063101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxi resin
Binding: twill 2/2

Results of specific tests according to Specification No.:		TOR003301				
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp1	n/m	700	695	710	* 710	DIN EN 1049-2
Sett of weft1	n/m	700	695	710	* 710	DIN EN 1049-2
Thickness	mm	0,55	0,5	0,6	* 0,48	DIN EN 5084
Area weight	g/m2	280	275	285	284	DIN EN 12127
Width	cm	100	99,5	101	* 99.9	DIN EN 1773
Density TOR 3K 200 tex	g/cm3	1,76				

* orientation value

Corresponds to the batch no.: C00631



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

PŘÍLOHA P III: TECH. LIST – UHLÍKOVÁ JEDNOSMĚRNÁ TKANINA – KC 160 3K



Inspection Certificate 3.1

EN 10 204: 2004

Certificate No.: C0024101

Material Code: TOR000501
Material Designation: **CC 160 P - 100**
Manufacturing Date: 8.1.2014
Article no.: CA0005-641-0001
Test roll No.: C0024101
Finish: loomstate

Kind of material - warp: Toray 3K 200 tex
Kind of material - weft: Toray 3K 200 tex
Compatibility: Epoxide resin
Binding: Plain

Results of specific tests according to Specification No.: TOR000501						
Characteristic	Unit	Target values	Tolerance (min. - max.)		Test results	Note
Sett of warp	n/m	400	395	410	* 400	EN 1049-2
Sett of weft	n/m	400	395	410	* 410	EN 1049-2
Thickness	mm	0,3	0,26	0,34	* 0,32	EN 5084
Area weight	g/m ²	160	155	170	162	EN 12127
Width	cm	100	99,5	100,5	* 100,2	EN 1773
Density	g/cm ³	1,76				
* orientation value						
Corresponding rolls: C0024103, C0024102,						



Address of Manufacturer:
KORDÁRNA Plus a.s.
696 74 Velká nad Veličkou 890
Czech Republic

Contact of Techn. Dept.: Kučera Jiří, +420 518 312 528
+ 420 518 329 302, kuceraj@kordarna.cz

**PŘÍLOHA P IV: TECHNICKÝ LIST – LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE
L285**

LAMINAČNÍ PRYSKYŘICE L 285

Charakteristika

Schválení:	Německý federální úřad pro letectví
Použití:	výroba kluzáků, motorových kluzáků a motorových letadel, lodě a stavba lodí, sportovní nářadí, letecké modely, formy a nástroje
Teplotní odolnost výrobků bez výrazných změn jejich parametrů:	- 60 °C - □ + 50-60 °C za temperování - 60 °C - □ + 80-+ 100 °C po temperování
Zpracování:	Při teplotách mezi 10 °C a 50 °C Všechny běžné metody zpracování
Zvláštní vlastnosti:	Extremně dobrá fyziologická kompatibilita Dobré mechanické a tepelné vlastnosti Doba zpracovatelnosti (tzv. pot life) od přibližně 45 minut do asi 5 hodin (závisí na použitém tužidle)
Zvláštní úpravy:	L 285 T: tixotropní L 285 K2: tixotropní tepelná úprava L 285 W: bílá

Použití

Systém laminační pryskyřice, schválený německým federálním úřadem pro letectví, má rozdílné doby zpracovatelnosti (v závislosti na použitém tužidle) pro výrobu s použitím skelných, uhlíkových a kevlarových vláken a vyznačuje se vysokými statickými a dynamickými vlastnostmi.

Po tepelném vytvrzení při 50 - 55 °C systém splňuje standard pro větroně a motorové větroně (pracovní teplota - 60 °C až + 54 °C. Pro splnění požadavků motorových letadel (pracovní teploty - 60 °C až + 72 °C) je nezbytné tepelné vytvrzení při 80 °C.

Specifikace

		Laminační pryskyřice L 285
Hustota °C	g/cm ³ / 25	1,18 - 1,23
Viskozita °C	mPas / 25	600 - 900
Ekvivalent epoxidu	-	165 - 170
Hodnota epoxidu	-	0,59 - 0,65
Barva Gardner		max 3

PŘÍLOHA P V: TECHNICKÝ LIST – VÝVOJOVÁ POLYURETAN - METAKRYLÁTOVÁ PRYSKYŘICE

Introduction

CBZ 650F is a low viscous urethane methacrylate resin for use in RTM and VaRTM(infusion) applications. CBZ 650F has excellent compatibility to a wide range of fibers (Carbon,Glass,Aramide,Basalt with general purpose sizing.) and provides composite with excellent mechanical properties.

Features and Benefits

Compared to conventional resin such as vinylester and epoxy resin , CBZ 650F leads to carbon composites and benefits with below ;

- ❑ Excellent fire retardant (UL94 V-0)
- ❑ Increased interlaminar shear-,compressive- and flexural-strength.
- ❑ Excellent surface finish and hardness
- ❑ Preheating resin and mould are not necessary
- ❑ Reduced thermal energy usage at curing and post-curing

Table 1 Mixing ratios and Geltimes for CBZ 650F

Temperature		at 25°C		at 20°C	
Cure speed		Normal	Slow	Normal	Slow
CBZ500LM	pbw	100	100	100	100
PR-CBZ 01 [promoter]	pbw	0.5	0.5	0.5	0.5
328E [catalyst]	pbw	1.0	1.0	1.0	1.0
ST-A [inhibitor]	pbw	-	0.1	-	0.1
Geltime	min.	40-60	65-85	40-60	95-115
De-mould time*	Hrs	4-7	>8	4-7	>8

Table 2 Liquid properties of CBZ 650F

Property	Unit	Value
Appearance		Yellowish
Viscosity at 25°C	mPa·s	200-300
Specific gravity		1.18
Geltime* at 25°C	minutes	40-60

Table 3 Cured properties of CBZ 650F [non-reinforced]

Property	Unit	Value
Tensile strength	MPa	88
Tensile modulus	GPa	3.5
Elongation at break	%	3.7
Flexural strength	MPa	150
Flexural modulus	GPa	3.9
Izod impact	kJ/m ²	24
Barcol hardness		47
Heat distortion temp.	°C	117
Water absorption**	%	0.18

PŘÍLOHA P VI: NAMĚŘENÁ DATA PŘI OHYBOVÉ ZKOUŠCE

Tab. 1 Naměřené hodnoty vzorku A [0₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek A [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	32500	365	1	368	2,36	19,5
2	36200	422	1,1	454,5		
3	32800	334	1	377,2	2,48	19,4
4	27000	337	1,2	469,6		
5	28500	340	1,2	482,1	2,55	19,6
6	27400	361	1,1	456,8		
7	28800	370	1,2	465,5	2,48	19,4
8	27600	385	1,1	447,9		
9	27500	350	1,1	394,8	2,5	19,4
10	29800	339	1,1	382,4		
\bar{x}	29755	346	1,2	432,3	2,54	19,4
S	2402	29	0,1	39,1	0,08	0,29
v [%]	8,07	8,38	8,3	9,04	3,15	1,5

Tab. 2 Naměřené hodnoty vzorku A [0₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek A [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	28700	246	1	308,4	2,51	19
2	26000	236	1	298,3		
3	27500	254	1	306,8	2,47	19,4
4	25300	233	1	268,7		
5	28200	250	1	293,6	2,49	19,4
6	23100	255	1	268,8		
7	31200	232	0,9	261,2	2,46	19,6
8	25000	258	0,9	282,5		
9	31100	279	0,9	314,3	2,39	19,1
10	31000	272	0,8	247,2		
\bar{x}	28040	255	0,9	285,4	2,46	19,3
S	2993	14	0,1	34,3	0,05	0,22
v [%]	10,67	5,49	11	12,02	2,03	1,14

Tab. 3 Naměřené hodnoty vzorku B [45₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	10600	319	7,2	4646,7	2,46	19,8
2	10850	287	4,9	2587,8	2,45	19,6
3	11900	305	6,4	3800,9	2,44	20,1
4	14500	357	7	5141,3	2,49	19,3
5	10600	272	7,4	4231,9	2,47	20,2
6	13100	263	6,3	3314,1	2,47	19,9
7	13800	363	6,1	4361,2	2,39	20,2
\bar{x}	12193	309	6,5	4012	2,45	19,9
S	1130	28	0,8	456	0,03	0,31
v [%]	9,27	9,06	12	11,37	1,22	1,56

Tab. 4 Naměřené hodnoty vzorku B [45₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	3650	156	11	3313,3	2,51	20,2
2	2660	118	10	2086,6	2,49	20,2
3	2231	102	8,3	1274,8	2,45	19,7
4	2940	101	8,7	1533,7	2,38	19,6
5	2640	98	7,3	1273,3	2,45	20,6
6	3320	105	8,5	1602,4	2,32	20,1
7	3730	135	8,3	2105	2,49	20
\bar{x}	3024	116	8,9	1884,2	2,44	20
S	302	16	1,2	663,2	0,06	0,3
v [%]	9,99	13,79	13	35,2	2,46	1,5

Tab. 5 Naměřené hodnoty vzorku C [0₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	31200	657	1,8	1417,4	2,48	19,7
2	30600	703	1,8	1436,3	2,54	20,1
3	32800	710	2,2	1436,9	2,54	20,1
4	31700	779	1,8	1532,8	2,37	20
5	39400	865	1,7	1611,6	2,49	20
\bar{x}	33140	743	1,9	1487	2,48	20
S	3212	72	0,2	74,2	0,06	0,16
v [%]	9,69	9,69	11	4,99	2,42	0,8

Tab. 6 Naměřené hodnoty vzorku C [0₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	29200	385	2,1	1313,2	2,68	20,1
2	34100	386	1,1	1520,9	2,51	19,9
3	28900	425	2,2	1435,7	2,43	20,1
4	34400	426	1,3	1646,3	2,39	20,1
\bar{x}	31650	406	1,7	1479	2,5	20
S	2604	20	0,5	121,6	0,11	0,1
v [%]	8,23	4,93	29	8,22	4,4	0,5

Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorku D [45₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	14100	375	5,3	2877,9	2,58	17,3
2	13600	338	4,9	2360,3		
3	12900	339	4,6	2144	2,7	17
4	15300	367	5	2614		
5	14100	413	5,1	2999,4	2,72	18,6
6	8930	382	4,8	2657,6		
7	8800	347	6	3394,9	2,84	18,1
8	8770	369	5,4	3008,6		
9	13600	330	6,5	3377,6	2,65	17,2
10	14600	356	4,9	2520,7		
\bar{x}	13080	356	5,2	2727,2	2,66	17,9
S	1269	24	0,7	454,9	0,08	0,57
v [%]	9,7	6,74	13	16,68	3,01	3,19

Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorku D [45₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _o [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	4540	139	9,1	2967,9	2,51	19
2	4620	118	11	3186,5	2,72	18,5
3	3480	98,7	11	2490,1	2,66	17,4
4	2970	99,2	12	2585,1	2,82	17,1
5	3080	110	11	2514,7	2,7	17,3
6	3590	97,8	11	2756,6	2,87	18
7	3660	122	11	3050,8	2,77	18,3
8	3330	107	11	2566,3	2,63	18,1
9	3820	113	11	2605,2	2,61	18,5
10	3590	120	11	2669,9	2,61	18,2
\bar{x}	3868	112	11	2739,3	2,69	18,1
S	387	12	0,6	232,1	0,1	0,56
v [%]	10,01	10,71	5,5	8,47	3,72	3,1

Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorku E [(0/45/0/±45/0)₂]_S při 24°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	29900	613	1,9	1300	2,37	19,9
2	26900	615	2	1297		
3	30300	621	1,8	1175	2,31	19,9
4	33300	646	1,9	1353		
5	27000	651	1,9	1317	2,28	19,8
6	31800	667	1,9	1337		
7	32100	624	1,8	1170	2,29	19,5
8	35200	647	1,9	1342		
\bar{x}	30812,5	636	1,9	1286	2,31	19,7
S	2716	19	0,1	68,2	0,03	0,16
v [%]	8,81	2,99	5,3	5,3	1,3	0,81

Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorku E [(0/45/0/±45/0)₂]_S při 60°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	27800	416	2,2	1239	2,32	19,7
2	26600	387	3	1765		
3	22100	324	1,8	1231	2,28	19,9
4	20300	345	2,8	1357		
5	22100	320	2,6	1313	2,41	19,6
6	19100	345	3,1	1585		
7	26700	350	1,5	1586	2,28	19,5
8	22900	368	2,6	1259		
\bar{x}	22980	345	2,6	1415	2,33	19,6
S	2705	36	0,6	199,8	0,05	0,29
v [%]	11,77	10,43	23	14,12	2,15	1,48

Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorku F [(45/0/±45/0/45)₂]_S při 24°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	23400	487	2	1028	2,23	19,2
2	20200	508	2,3	1148	2,31	19,1
3	23500	549	2,2	1195	2,28	19,2
4	21600	490	2,3	1030	2,32	19,9
\bar{x}	22175	509	2,2	1100	2,29	19,3
S	1368	25	0,1	73	0,04	0,35
v [%]	6,17	4,91	4,6	6,63	1,75	1,81

Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorku F [(45/0/±45/0/45)₂]_S při 60°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	15900	292	3,1	1288	2,25	20
2	15200	304	2,9	1217	2,31	19,8
3	18000	263	1,5	1413	2,22	19,2
4	19000	322	2,6	1135	2,23	20
\bar{x}	17025	295	2,5	1263	2,25	19,8
S	1537	21	0,6	102	0,03	0,33
v [%]	9,03	7,12	24	8,07	1,33	1,67

Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorku G [(90/45/90/±45/90)₂]_S při 24°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	10100	317	3,4	1207	2,26	19,5
2	9850	306	3,8	1326		
3	6330	258	4,3	1331	2,34	19,9
4	6740	272	3,9	1225		
5	8070	301	3,8	1372	2,26	19,9
6	8650	311	3,7	1331		
7	9220	298	3,5	1208	2,29	19,8
8	7790	306	3,7	1285		
9	7090	298	3,5	1151	2,26	19,8
10	8580	303	3,7	1320		
\bar{x}	8242	297	3,7	1276	2,28	19,8
S	814	17	0,2	68,8	0,03	0,14
v [%]	9,88	5,72	5,4	5,39	1,32	0,71

Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorku G [(90/45/90/±45/90)₂]_S při 60°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ ₀ [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	3670	123	4,8	790,7	2,28	19,3
2	3690	122	5,1	870,8		
3	4800	153	4,7	1024	2,21	19,9
4	4730	142	3,4	615,3		
5	5230	143	5	1084	2,23	19,8
6	5180	146	4,9	1045		
7	5890	144	3,7	730,7	2,27	20
8	5550	140	3,2	587,3		
9	6280	168	3,3	703,3	2,28	20
10	5930	166	2,8	520,1		
\bar{x}	5095	145	4,1	797,1	2,25	19,8
S	548	14	0,8	191,7	0,03	0,25
v [%]	10,76	9,66	20	24,05	1,33	1,26

PŘÍLOHA P VII: NAMĚŘENÁ DATA PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

Tab. 1 Naměřené hodnoty vzorku A [0₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek A [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	56200	439	1	5288,4	2,44	19,1
2	55600	430	0,8	1745,5	2,47	19,5
3	54800	496	1,3	6935,3	2,54	19,4
4	46200	450	1,3	6435,1	2,55	19,4
5	44500	444	1,3	6537,8	2,41	18,9
6	53400	427	1,5	4784,3	2,51	19,5
7	51100	452	0,9	3061,2	2,5	19,3
8	47100	484	0,9	3142,7	2,46	19,4
9	58200	484	1,1	5524,5	2,46	19,5
10	50700	456	0,9	2894,1	2,42	19,5
ĥ	51780	456	1,1	4634,9	2,48	19,4
S	4413	23	0,2	1716,9	0,05	0,2
v [%]	8,52	5,04	18	37,04	2,02	1,03

Tab. 2 Naměřené hodnoty vzorku A [0₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek A [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	37100	386	4,2	25081	2,55	19,3
2	37100	450	4	29149	2,61	19,3
3	48300	467	5,1	32883	2,48	18,8
4	42400	305	4,1	31761	2,55	19,4
ĥ	41225	402	4,4	29718	2,55	19,2
S	4622	64	0,4	3000,7	0,05	0,24
v [%]	11,21	15,92	9,1	10,1	1,96	1,25

Tab. 3 Naměřené hodnoty vzorku B [45₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	12800	138	11	26554	2,41	20
2	12900	137	11	30552	2,51	20
3	13000	134	12	31116	2,35	19,8
4	12230	102	12	24873	2,43	19,8
5	12200	106	11	21876	2,45	20
6	11780	108	11	23143	2,37	19,9
7	12200	110	11	17801	2,53	20
8	13000	132	12	31321	2,42	20,1
ĥ	12514	121	11	25904	2,43	20
S	436	15	0,5	4597,4	0,06	0,11
v [%]	3,48	12,4	4,4	17,75	2,47	0,55

Tab. 4 Naměřené hodnoty vzorku B [45₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek B [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	4160	85,2	9	24767	2,46	19,4
2	4070	110	12	25902	2,56	20
3	4810	95,3	12	20245	2,57	20
4	5180	119	12	28032	2,43	20
5	5160	83,1	9,1	24644	2,38	20
6	5280	94,9	12	20901	2,35	20
7	5490	115	11	25414	2,33	20,2
8	5640	91	13	23281	2,56	19,5
ĥ	4974	99	11	24148	2,46	19,9
S	546	13	1,4	2421,9	0,09	0,26
v [%]	10,98	13,13	13	10,03	3,66	1,31

Tab. 5 Naměřené hodnoty vzorku C [0₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	71100	394	1,8	19585	2,48	19,7
2	62600	447	3,7	26786	2,54	20,1
3	60300	424	2,7	19340	2,37	20
ĥ	64667	422	2,7	21904	2,46	19,9
S	4645	22	0,8	3453,9	0,07	0,19
v [%]	7,18	5,21	30	15,77	2,85	0,95

Tab. 6 Naměřené hodnoty vzorku C [0₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek C [0 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	62300	411	2,3	16361	2,68	20,1
2	60000	373	2	17120	2,51	19,9
3	57800	415	2,9	19689	2,43	20,1
ĥ	60033	400	2,4	17723	2,54	20
S	1837	19	0,4	1424,1	0,1	0,09
v [%]	3,06	4,75	17	8,04	3,94	0,45

Tab. 7 Naměřené hodnoty vzorku D [45₁₁] při teplotě 24°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	14900	171	7,3	18537	2,72	17,2
2	13200	146	6,4	14418	2,66	18
3	15400	174	7,4	19440	2,69	17,9
4	13200	173	10	25163	2,75	18,1
5	17700	158	10	24713	2,73	18,1
6	20200	158	9,7	22307	2,72	17,7
7	12500	150	9,7	20470	2,7	17,3
8	14000	162	11	24784	2,72	17,4
9	13800	159	10	23151	2,63	17,3
10	17700	152	9,3	20118	2,68	17,2
ĥ	15260	160	9,1	21310	2,7	17,6
S	1372	9	1,4	3220,2	0,03	0,35
v [%]	8,99	5,63	15	15,11	1,11	1,99

Tab. 8 Naměřené hodnoty vzorku D [45₁₁] při teplotě 60°C

Vzorek D [45 ₁₁]	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	7690	111	12	21478	2,75	19,7
2	8170	125	12	22994	2,66	19,4
3	8900	156	11	23835	2,67	19,7
ĥ	8253	131	11	22769	2,69	19,6
S	497	19	0,6	975,1	0,04	0,12
v [%]	6,02	14,5	5,3	4,28	1,49	0,61

Tab. 9 Naměřené hodnoty vzorku E [(0/45/0/±45/0)₂]_S při 24°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	32200	277	2,8	11739	2,28	19,9
2	33900	312	2,7	13176	2,22	20
3	28300	328	3,7	16916	2,27	19,7
4	26300	325	3,9	18166	2,37	19,8
5	34000	324	3,6	16412	2,31	19,8
\bar{x}	30940	313	3,3	15282	2,29	19,8
S	3105	19	0,5	2419	0,05	0,09
v [%]	10,04	6,07	15	15,83	2,18	0,45

Tab. 10 Naměřené hodnoty vzorku E [(0/45/0/±45/0)₂]_S při 60°C

Vzorek E [(0/45/0/±45/0) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	20700	302	3,5	15317	2,29	19,9
2	27600	274	2,9	12030	2,36	19,4
3	12800	295	2,9	14890	2,27	19,9
4	24200	296	3,6	15682	2,38	19,7
5	21500	317	3,8	16067	2,32	19,4
\bar{x}	21360	297	3,3	14797	2,32	19,6
S	914	14	0,4	1437	0,04	0,21
v [%]	4,28	4,71	12	9,71	1,72	1,07

Tab. 11 Naměřené hodnoty vzorku F [(45/0/±45/0/45)₂]_S při 24°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	29400	258	4,4	15029	2,25	19,4
2	35400	268	4,3	15494	2,24	19,5
3	23400	191	3,2	8313	2,21	18,8
4	23800	268	5,1	17483	2,24	19,7
\bar{x}	28000	246	4,3	14080	2,24	19,4
S	2887	32	0,7	3455	0,02	0,35
v [%]	10,31	13	16	24,54	0,89	1,81

Tab. 12 Naměřené hodnoty vzorku F [(45/0/±45/0/45)₂]_S při 60°C

Vzorek F [(45/0/±45/0/45) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	25800	229	4,3	13086	2,31	18,5
2	24700	252	4,6	15041	2,22	19,4
3	22800	240	4,4	14366	2,29	19,9
4	26600	252	4,7	16014	2,27	19,7
\bar{x}	24975	243	4,5	14627	2,27	19,4
S	1425	10	0,2	1065	0,03	0,54
v [%]	5,71	4,12	4,4	7,28	1,32	2,79

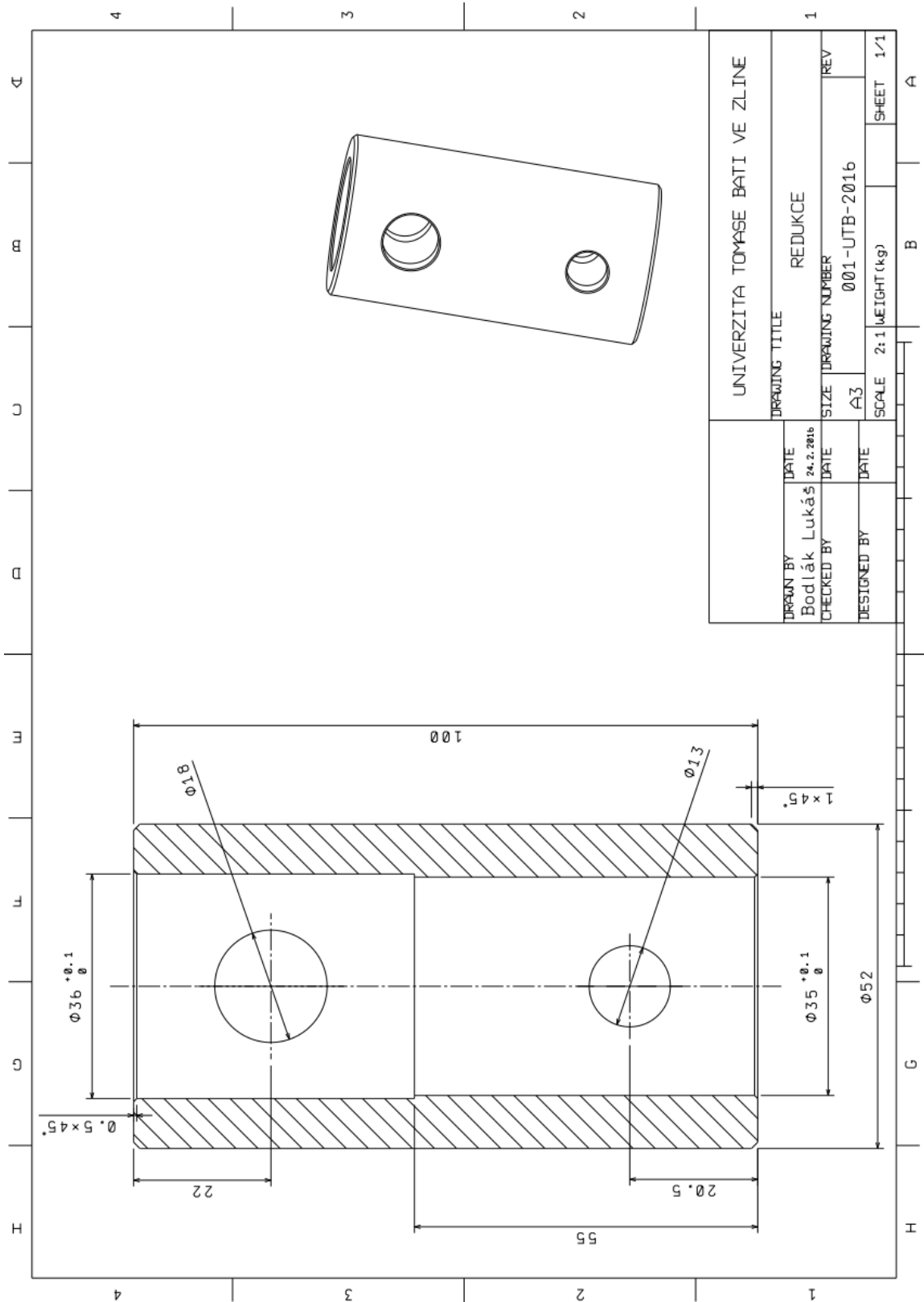
Tab. 13 Naměřené hodnoty vzorku G [(90/45/90/±45)₂]_S při 24°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	13300	197	5,6	15213	2,32	19,8
2	8710	188	5,2	15174	2,38	19,9
3	8770	171	4,5	11996	2,33	20,4
4	9040	175	4,6	12365	2,3	20,4
5	10800	183	5,2	13576	2,28	20,3
\bar{x}	10124	183	5	13665	2,32	20,1
S	764	9	0,4	1353	0,03	0,27
v [%]	7,55	4,92	8	9,9	1,29	1,34

Tab. 14 Naměřené hodnoty vzorku G [(90/45/90/±45)₂]_S při 60°C

Vzorek G [(90/45/90/±45/90) ₂] _S	E [MPa]	σ _t [MPa]	ε [%]	W [Nmm]	h [mm]	b [mm]
1	10300	170	5,4	13758	2,39	20,2
2	11600	183	5,4	13956	2,26	20,2
3	8210	180	5,1	13939	2,26	20
4	6060	173	4,6	14212	2,37	20,4
5	7610	169	4,5	11953	2,27	20,3
\bar{x}	8756	175	5	13564	2,31	20,2
S	967	6	0,4	817,9	0,06	0,12
v [%]	11,04	3,43	8	6,03	2,6	0,59

PŘÍLOHA P VIII: VÝKRES REDUKCE



UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLINE		DRAWING TITLE	
DRAWN BY Bodlák Lukáš		REDUKCE	
DATE 24.2.2016	CHECKED BY	SIZE A3	DRAWING NUMBER 001-UTB-2016
DATE	DESIGNED BY	SCALE 2:1	WEIGHT (kg)
			SHEET 1/1