

# Životnost sendvičových laminátových struktur

Bc. Pavel Bublík

---

Diplomová práce  
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2020/2021

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE** (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel Bublík**  
Osobní číslo: **T19528**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Životnost sendvičových laminátových struktur**

### **Zásady pro vypracování**

1. Vypracování literární rešerše v dané oblasti
2. Zhotovení zkušebních těles
3. Provedení experimentálních zkoušek životnosti na cyklickou únavu v ohybu
4. Vyhodnocení výsledků s ohledem na praktické aplikace

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

**Seznam doporučené literatury:**

Růžička, Milan, Miroslav Hanke a Milan Rost.:? Dynamická pevnost a životnost. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1987, 212 s.  
EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Žaludek, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. ledna 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové 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.

### **Prohlašuji,**

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce studuje únavové chování sendvičových laminátových struktur. Práce se dělí na teoretickou část, která popisuje sendvičové laminátové struktury a jejich složení, výrobu laminátových struktur a zkoušky pro testování únavového chování. Praktická část se zabývá výrobou vzorků pro testování za pomoci různých technologií výroby a s použitím různých materiálů výztužných vrstev, následným testováním a porovnáním výrobních technologií a vlivu materiálu potahové vrstvy na únavové vlastnosti sendvičové laminátové struktury.

Klíčová slova: kompozit, sendvič, laminát, únava

## **ABSTRACT**

The thesis studied the fatigue behaviour of sandwich laminate structures. The thesis is divided into a theoretical part, which describes sandwich laminate structures and their composition, production of laminate structures and tests for fatigue behavior. The practical part of the thesis deals with production of the samples for testing using different production technologies and different reinforcement materials for face layer, subsequent testing and comparison of production technologies and the influence of the coating layer material for the fatigue properties of the sandwich laminate structure.

Keywords: composite, sandwich, laminate, fatigue

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za ochotu a cenné rady při výrobě a měření vlastností vzorků a vypracování diplomové práce a paní doc. Ing. Soni Rusnákové, Ph.D. za ochotu, pomoc a připomínky při výrobě zkušebních vzorků.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ STRUKTURY</b> .....	<b>11</b>
1.1 POTAHOVÉ VRSTVY SENDVIČOVÝCH KOMPOZITŮ .....	12
1.1.1 Kombinace vyztužovacích vláken a pojiva .....	12
1.1.3 Výztuže .....	15
1.1.4 Prepreg .....	18
1.2 JÁDRA SENDVIČOVÝCH KOMPOZITŮ .....	19
1.2.1 Pěnová jádra .....	19
1.2.2 Voštinová jádra .....	22
1.2.3 Balsová jádra .....	24
1.2.4 Korková jádra .....	25
<b>2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>26</b>
2.1 VÝROBA RUČNÍM KLADENÍM .....	26
2.2 STRÍKANÍ.....	27
2.3 LISOVÁNÍ POMOCÍ VAKUA .....	27
2.4 TECHNOLOGIE RTM.....	28
2.5 VAKUOVÁ INFUZE .....	29
2.6 VÝROBA LISOVÁNÍM V AUTOKLÁVU .....	30
2.7 PULTRUZE .....	32
<b>3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>33</b>
3.1 STATICKÉ ZKOUŠKY .....	33
3.1.1 Zkouška tříbodovým ohybem .....	33
3.2 DYNAMICKÉ ZKOUŠKY .....	36
3.2.1 Únavová ohybová zkouška .....	37
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>41</b>
<b>4 VÝROBA VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ</b> .....	<b>42</b>
4.1 TECHNOLOGIE RUČNÍ LAMINACE - VZOREK 1 .....	42
4.2 VÝROBA Z PREREGU POMOCÍ AUTOKLÁVU – VZOREK 2 .....	43
4.3 TECHNOLOGIE RUČNÍ LAMINACE - VZOREK 3 .....	46
4.4 TECHNOLOGIE RUČNÍ LAMINACE S POUŽITÍM VAKUA - VZOREK 4 .....	46
4.5 TECHNOLOGIE RUČNÍ LAMINACE S POUŽITÍM VAKUA - VZOREK 5 .....	48
<b>5 ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b> .....	<b>49</b>
<b>6 ZKOUŠKY</b> .....	<b>52</b>
6.1 STATICKÁ ZKOUŠKA TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....	52

6.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY STATICKÝM TŘÍBODOVÝM OHYBEM .....	60
6.3	ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA CYKlickÝM OHYBEM .....	63
6.4	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT PŘI CYKlickÉM ZATĚŽOVÁNÍ .....	78
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>80</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>82</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>86</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>87</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>91</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>92</b>



## ÚVOD

Kompozitní materiály se dostávají do popředí zejména díky svým mechanickým vlastnostem při velmi nízké hmotnosti. Díky tomu nahrazují konvenční materiály ve velké škále aplikací. S výhodou se využívají zejména v leteckém průmyslu, při konstrukci raketoplánů, v automobilovém, či stavebním průmyslu a v mnoha dalších odvětvích.

Co se týká materiálů používaných pro výrobu laminátových struktur, je zde celá paleta možností. Volí se dle nejvhodnějších vlastností pro danou aplikaci. Důležitým faktorem použitých materiálů a výrobních postupů je také cena, která se velmi odvíjí od použitého materiálu a technologie. Výsledkem jsou optimální vlastnosti v celém rozsahu aplikace i tam, kde by jich nebylo možno dosáhnout s použitím konvenčních materiálů a způsobů výroby. Avšak výsledné vlastnosti jsou velmi závislé na zručnosti výrobních pracovníků a na jejich zkušenostech.

Podíl výroby součástí z kompozitních materiálů stále narůstá. Stávají se součástí aplikací, kde byly dříve používány konvenční materiály. Díky tomu se snižují náklady a hmotnost výrobků při zachování stejných nebo docílení i lepších nejen mechanických vlastností.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

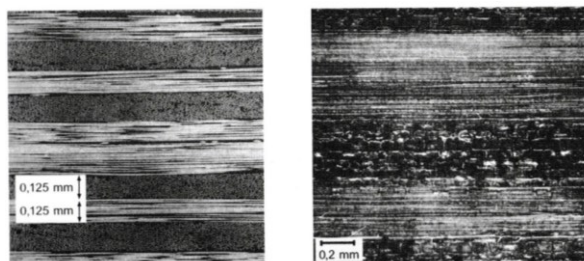
## 1 KOMPOZITNÍ SENDVIČOVÉ STRUKTURY

Kompozitní sendviče jsou moderní materiály vyznačující se velkou tuhostí a pevností v ohybu, při zachování nízké hmotnosti. Využití nachází zejména v leteckém a dopravním průmyslu, ale stále častěji i v ostatních průmyslových oblastech.

Sendvičové struktury se řadí mezi vrstevnaté konstrukce. Tyto konstrukce se sestávají z různých jednoduchých nebo složených materiálů odlišných vlastností a jsou spolu vzájemně pevně spojeny. [1]

V praxi se nejčastěji využívají standartní kovové materiály (např. ocel), které disponují homogenními, izotropními a pevnostními vlastnostmi. Takovýto materiál je vybírán tak, aby jeho vlastnosti korespondovaly s místem kde je součást, či konstrukce nejvíce namáhána. Tento materiál je tedy využit pouze v oblasti s největším namáháním a ve zbytku celku může být bez využití, tudíž využití tohoto materiálu je neefektivní. Pomocí kompozitních materiálů lze docílit takové struktury, která bude odpovídat poli napjatosti. Takto struktura bude velmi pevná v místech s vysokým namáháním a méně v místech, kde toho není zapotřebí. Moderní kompozitní struktury mají spoustu výhodnějších vlastností než běžné kovové materiály. K těmto můžeme zařadit například nízkou hustotu, lomovou houževnatost, vyšší měrnou pevnost, tepelné a elektroizolační vlastnosti a další. [2]

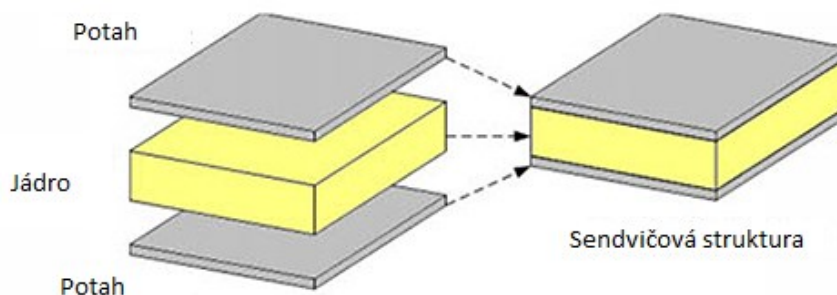
Historicky jsou kompozitní struktury jedny z nejstarších používaných materiálů. V dobách výstavby prvních lidských příbytků jejich stavitelé využívali hlínu vyztuženou slámou nebo podobnými travinami. Později byly vyráběny cihly se slaměnou výztuží, či ve starodávném Egyptě součásti z překližky. Taktéž v přírodě lze nalézt spoustu kompozitních struktur, například u bambusového stonku, jehož stavba je srovnatelná se strukturou epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny. [2] [3]



Obr. 1 porovnání řezu laminátem z epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken s bambusovým stonkem [3]

## 1.1 Potahové vrstvy sendvičových kompozitů

Sendvičová struktura se sestává ze dvou vysoce pevných potahů, které jsou odděleny materiálem jádra. Tyto potahy mohou být vyráběny kombinací vyztužujících vláken a pojiva, nebo už v předpřipravené formě prepregu (pojivo je už obsaženo ve výztuži, tím je zjednodušena výroba). [6]



Obr. 2 Sendvičová struktura [10]

### 1.1.1 Kombinace vyztužovacích vláken a pojiva

Materiál v podobě vláken je používán velmi ojediněle. Jejich největší využití nalézají až v kompaktní formě. Vznikají tak kompozitní vlákna vyztužené materiály, složené z vláken o vysoké měrné pevnosti eventuálně tuhosti a různě přizpůsobivého materiálu (matrice) v němž jsou uloženy. Matricí je tedy myšlen materiál, jímž je systém vláken a jiných částic prosycen tak, že vznikne tvarově stálý celek. Takovýto celek lze nazvat kompozit.[3]

### 1.1.2 Pojivo – Matrice

Nejdůležitějším aspektem kvalitního kompozitu je zajištění dostatečné adheze na rozhraní mezi fázemi matrice – vlákno. K docílení lepší fyzikální i chemické vazby mezi matricí a vláknem je na vlákno aplikována apretace vhodná pro daný druh pojiva. Pojivo musí mít správnou viskozitu a také povrchové napětí, aby bylo zajištěno co nejdokonalejší smočení vláken a nedocházelo k tvorbě bublin. [3]

Základními pojivy jsou polyesterové (UP-R) a epoxidové pryskyřice (EP-R). Toto jsou nejčastěji používané pryskyřice při výrobě kompozitních struktur. Jejich hlavní výhodou je jejich nízkomolekulární výchozí stav a také tekutý stav při pokojové teplotě. Jejich zpracování je podstatně snadnější než v případě termoplastů, neboť jejich viskozita je až tisíckrát nižší než viskozita taveniny termoplastu. [3]

### **Polyesterové pryskyřice (UP-R)**

Polyesterové pryskyřice jsou nejčastěji používaným pojivem v oblasti výroby lodí, zejména malých člunů, jachet a pracovních lodí.

Nenasycené polyesterové pryskyřice patří mezi reaktoplasty schopné být vytvrzeny z kapalného do pevného stavu, tím se liší od nasycených polyesterů. Běžně se užívá pouze název polyesterová pryskyřice, je tím automaticky míněna její nenasycená varianta.

Při výrobě kompozitů se využívají dva druhy polyesterových pryskyřic. Ortoftalická pryskyřice je běžnou a levnou možností. Isoftalická pryskyřice se nyní dostává do popředí hlavně v průmyslu výroby lodí.

Většina polyesterových pryskyřic je viskózní, světlá tekutina sestávající se monomeru esteru a styrenu. Přidání styrenu způsobuje až 50-ti procentní pokles viskozity, což je velmi výhodné při jejím zpracování. Taktéž styren umožňuje zesíťování molekulárních řetězců polyesteru bez vytvoření nežádoucích vedlejších produktů. Při procesu výroby nemusí být použit tlak, proto jsou nazývány jako „kontaktní“ či „nízkotlaké“ pryskyřice. Polyesterové pryskyřice mají limitovanou dobu skladování, postupem času dochází k samovytvrzení. Často se přidává malé množství inhibitoru ke zpomalení vytvrzení. [3] [5] [7]

Při výrobě z polyesterové pryskyřice se přidávají pomocné látky jako jsou:

- Katalyzátory.
- Akcelerátory.
- Aditiva.
  - o Pigmenty.
  - o Plniva.
  - o Retardéry hoření...

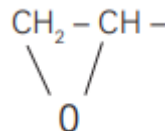
Výrobci pryskyřice dodávají buď to jako čistou látku, anebo pryskyřici již doplněnou o aditiva. Jelikož polymerizace čisté pryskyřice je velmi pomalá, těsně před použitím jsou přimíchávány katalyzátory a akcelerátory. Katalyzátory slouží k nastartování polymerizace, ale neúčastní se samotné chemické reakce. Akcelerátory je přidáván do již smíchané pryskyřice s katalyzátorem, aby byla umožněna teplota při pokojové teplotě a zároveň probíhalo vytvrzení rychleji. [3] [5] [7]

Plniva se do pryskyřice přidávají z důvodů snížení ceny výroby, zjednodušení výroby, či kvůli změně vlastností výsledného produktu. Přidávají se ve výši až 50 hm.% pryskyřice. Velikost zastoupení aditiv má vliv na flexibilitu a tuhost výsledného laminátu. Taktéž mohou pozitivně ovlivňovat odolnost laminátu proti hoření. Nevětší využití nalézají plniva při výrobě silnostěnných výrobků. [3] [5] [7]

### Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Epoxidové pryskyřice disponují nejlepšími vlastnostmi mezi dostupnými pryskyřicemi. Epoxidy celkově překonávají ostatní pryskyřice, co se týká mechanických vlastností a odolnosti vůči vlivům prostředí, což je obzvlášť výhodné pro letecký průmysl. Dále mají zvýšenou adhezi k ostatním materiálům a odolnost vůči působení vodního prostředí, co jim dává další využití ke konstrukci lodí. Zde jsou velmi široce využívány jako hlavní konstrukční materiál, díky jejich mechanickým vlastnostem. [3] [5] [7]

Termín „Epoxid“ odkazuje na chemickou skupinu sestávající se z atomu kyslíku spojeného se dvěma atomy uhlíku. Nejjednodušší epoxid je známý jako alfa-epoxid, nebo také 1,2-epoxid. Idealizovaná struktura viz. obr. 3, je identifikovatelná v každé i komplexnější epoxidové molekule. [3] [5] [7]



Obr. 3 Základní molekula epoxidové pryskyřice

Nejčastěji jsou identifikovatelné podle jejich jantarového až hnědého zbarvení. Jejich výhodou je nízká viskozita, což umožňuje jednoduché zpracování. Epoxidové pryskyřice lze jednoduše a rychle vytvrdit v rozmezí teplot 5°C až 150°C, teplota vytvrzování se mění v závislosti na použitém tužidle. Jejich nejvýhodnější vlastností je velmi malé smrštění během vytvrzování, což způsobuje minimální pnutí uvnitř materiálu. Vysoká adheze a výborné mechanické vlastnosti epoxidů jsou dále doplněny elektroizolačními vlastnostmi a chemickou odolností. [3] [5] [7]

Epoxidy se liší od polyesterových pryskyřic tím, že jsou vytvrzovány tužidlem a ne katalyzátorem. Tužidlo, nejčastěji ze skupiny aminů, vytvrzuje epoxid adiční reakcí, tedy pryskyřice a tužidlo se podílejí na společné chemické reakci.

### **Vinylesterové pryskyřice (VE-R)**

Vinylesterové pryskyřice mají podobnou molekulární stavbu jako polyesterové pryskyřice. Liší se v poloze reaktivních částí, ty jsou na koncích řetězce. Vinylesterové pryskyřice absorbují zatížení pomocí celé délky řetězce, to je činí tvrdší a odolnější než polyesterové. Molekuly obsahují méně esterových skupin, díky nim jsou méně citlivé k degradaci způsobené hydrolýzou a tím jsou odolnější vůči působení vody a dalších chemických látek. Své využití nalézají ve výrobě potrubí a zásobníků na chemikálie. Občas jsou využívány jako povrchová vrstva na polyesterových laminátech, kvůli jejich vyšší odolnosti vůči vodě. [3] [5]

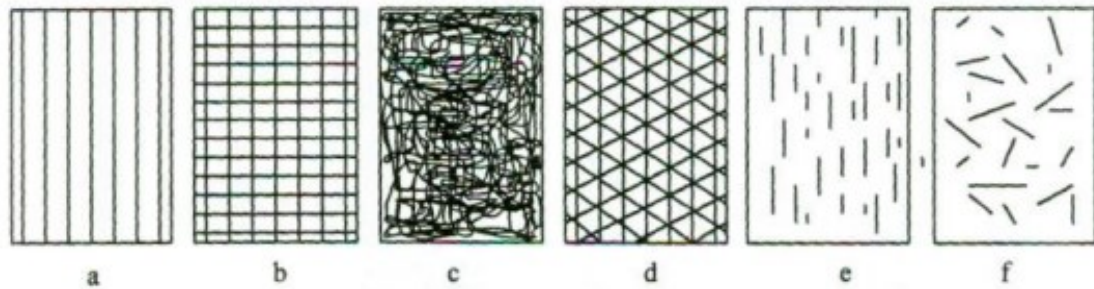
### **Fenolické pryskyřice (PF-R)**

Fenolické pryskyřice nalézají hlavní využití při výrobě interiérů dopravních prostředků. K jejich vývoji vedl protipožární zákon, který požadoval odolnost proti zvýšeným teplotám a nízkou toxicitu zplodin v případě požáru. Jejich další výhodou je cena, která je ze všech druhů pryskyřic nejnižší. Fenolické pryskyřice lze rozdělit do tří skupin. Jsou to standartní rezoly, novolaky a polybenzooxaziny. Lignin je fenolový biopolymer, který je vedlejším produktem při zpracování buničiny a výrobě papíru. S rostoucí výrobou a tím i spojeným vedlejším produktem ligninem, dává velký význam nahrazování fenolu za lignin. Z důvodu snížení používání formaldehydu v pryskyřici, vznikly fenolicko-furfalové pryskyřice (PFu) kde je místo formaldehydu používán glyoxal. Taková pryskyřice ve spojení s lignocelulózovou výztuží tvoří biologicky odbouratelný (kompostovatelný) laminát. [3] [5] [6]

#### **1.1.3 Výztuže**

Aby bylo dosaženo optimálních vlastností, musí být veškeré síly působící na kompozit přeneseny na vlákna. Proto je nutné dobré propojení vlákna s matricí. Při výrobě vláken používají látky zvyšující pevnost tohoto propojení a zároveň chrání vlákno před poškozením během zpracování a manipulace. [3] [5]

Výztuže kompozitních materiálů mohou mít různou orientaci vláken (jednosměrně, dvouose, víceose anebo s nahodilou orientací). [9]



Obr. 4 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [9]

### Skleněná vlákna

Smícháním písku, kaolinu, vápence za teploty kolem 1600°C vzniká tekuté sklo. Tavenina je protlačována přes pouzdra s mikroperforacemi a chlazena. Vznikají skelná vlákna o průměru 5-24  $\mu\text{m}$ . Tato vlákna jsou spřádána do neuspořádaných tkanin nebo rovingů a povlakována, aby držela soudržnost a zároveň byla chráněna před abrazí. [3] [5] [8]

Skelná vlákna můžeme rozdělit do tří skupin:

- E-glass vyniká svými elektrickými vlastnostmi. Taktéž mají dobrou odolnost na tah/tlak a nízkou cenu. Avšak jejich odolnost rázu je relativně nízká. Tato skupina vláken je nejběžněji používána při výrobě laminátů.
- C-glass vyniká svou chemickou odolností. Nejčastěji jsou používána na vnější vrstvu laminátů, která přichází do styku s chemikáliemi (potrubí, nádoby...)
- R,S,T-glass jsou vlákna se zvýšenou odolností vůči tahu/tlaku. Počáteční písmeno se liší dle výrobce, ale ve všech případech se jedná o shodná vlákna. Tato vlákna byla vytvořena pro letecký průmysl a pro výrobu částí raketoplánů. Taktéž se používají u obrněných vozidel, jako balistická ochrana. [3] [5] [8]

### Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou vyráběna kontrolovanou oxidací a karbonizací látek bohatých na uhlík jako je polyakrylonitril PAN, nebo z celulózy. Teplota při výrobě vláken se pohybuje v rozmezí 2600-3000°C. Teplota při výrobě má vliv na výsledné vlastnosti vlákna. Podle těchto vlastností je můžeme rozdělit na vysoce pevnostní (HS), středně modulová (IM),



vysoce modulová (HM) a ultra modulová (UHM). Uhlíková vlákna mají nejvyšší tuhost ze všech dostupných vláken, vysokou odolnost vůči tahu a tlaku, vysokou odolnost vůči degradaci, creepu a únavě. Jejich odolnost vůči rázům je ale nižší než u skelných vláken, či vláken z aramidů. [3] [5] [8]

### **Aramidová vlákna**

Aramid je člověkem vytvořený organický polymer vyráběný zvlákněním. Materiál má světle zlatou barvu a může mít širokou škálu vlastností. Ovšem každá varianta vyniká svou pevností a nízkou hustotou. Taktéž všechny druhy mají dobrou odolnost vůči rázům, což je předurčuje pro použití jako balistická ochrana. Jejich pevnost v tahu je však srovnatelná se skelným vláknem E-glass. Mnohem známější jsou aramidová vlákna pod názvem Kevlar, tady se však jedná pouze o obchodní označení výrobce Dupont. Výrobci nabízí širokou škálu kombinací modulu a povrchové úpravy pro různé aplikace. Tak jako vynikají aramidová vlákna svou pevností, jsou taktéž odolná vůči abrazi, chemikáliím a teplotní degradaci. Jejich nevýhodou je degradace pod UV zářením. [3] [5] [8]

### **Polyesterová vlákna**

Polyesterová vlákna vynikají svou nízkou hustotou, vysokou houževnatostí, dobrou rázovou odolností, avšak na úkor nízkého modulu. Díky nedostatečné tuhosti jsou nevhodná pro většinu aplikací v kompozitních materiálech. Využití nalézají pouze u kompozitů, od kterých je vyžadována nízká hmotnost, dobrá odolnost proti rázům a abrazi a nízká cena. Často se používají jen jako povrchová vrstva pro svou jemnost a kompatibilitu s většinou pryskyřic. [3] [5] [8]

### **Polyetylenová vlákna**

Při náhodné orientaci a velmi vysoké molekulární hustotě dosahují velmi nízkých mechanických vlastností. Pro uspořádání a srovnání molekul se používá procesu „gel-spinning“. Takto uspořádané molekuly dávají vláknu velmi vysokou odolnost v tahu. Tato odolnost odpovídá přibližně skelnému vláknem E-glass. Díky jejich ceně a špatnému vytváření vazby s matricí se tato vlákna prakticky nepoužívají. [3] [5] [8]

### **Keramická vlákna**

Keramická vlákna jsou nejčastěji ve formě krátkých „vousků“. Využívají je pro aplikace, kde je nutná vysoká odolnost vůči teplotě. Často se využívají ve spojení s nepolymerními matricemi jako jsou slitiny kovů. [5]

## Přírodní vlákna

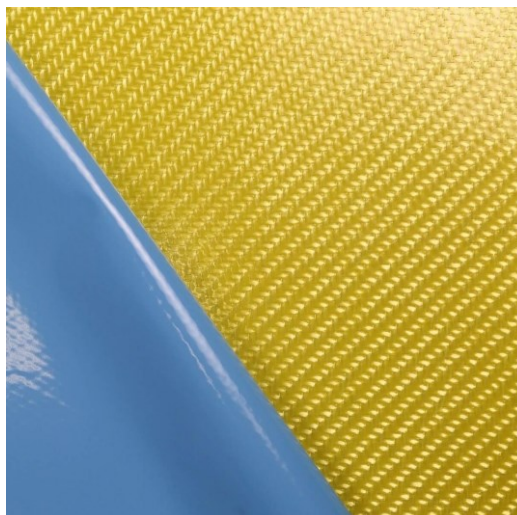
Posledním druhem jsou přírodní vlákna jako juta nebo sisal. Ta se používají v aplikacích, kde není potřeba vyšších mechanických vlastností, ale i tak jsou schopna dosáhnout relativně vysoké pevnosti. [3] [5]

### 1.1.4 Prepreg

Prepregem je označována tkanina, která byla již předimpregnována pryskyřicovým systémem. Tento systém již obsahuje činidlo k vytvrzení pryskyřice. Takto připravený materiál lze klást do formy podle stanovené skladby. Poté je forma zavakuována. Následné vytvrzení probíhá za tepla (cca 100-150°C). [11] [12]

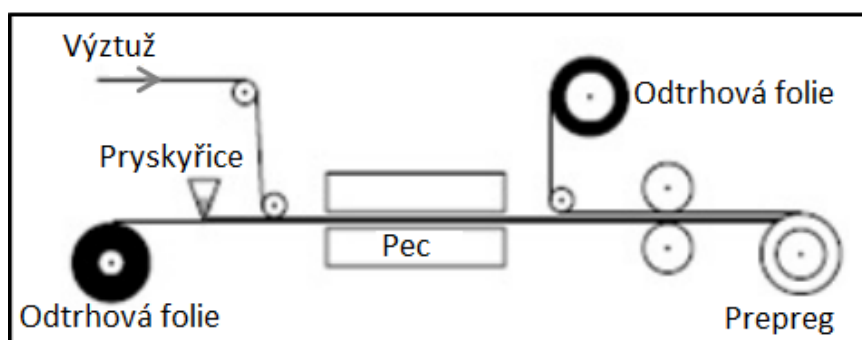
Výhodami jsou maximální pevnostní vlastnosti. Při ručním laminování je velmi obtížné dosáhnout minimálního množství pryskyřice a to i při použití vakua zůstává v laminátu přebytečná pryskyřice. Výsledná hmotnost laminátu bývá tedy tvořena z 50% pryskyřicí a z 50% tkaninou. Přebytek pryskyřice zvyšuje křehkost laminátu a celkově snižuje jeho mechanické vlastnosti. Většina prepregů je tvořena jen z 35% pryskyřicí, to je ideální pro dosažení maximálních mechanických vlastností. Další výhodou je rovnoměrnost a opakovatelnost výroby, oproti ruční laminaci nedochází k vytváření suchých míst, nebo naopak míst s velkým podílem pryskyřice. Z ekologického hlediska vzniká při výrobě za použití prepregů podstatně menší odpad. Nezůstávají žádné znečištěné pomůcky pro výrobu, ani zbytková nevyužitá pryskyřice. Prepregy jsou vhodné pro výrobu pohledových dílů. Vzhled dílů ovlivňuje kvalita formy, ale prepregy eliminují tvorbu vzduchových bublin, tím lze dosáhnout kvalitnějšího vzhledu výrobku. [11] [12]

Nevýhodou prepregů je cena, která je vyšší než náklady na pořízení pryskyřice, tužidla a textilie. Dále je velmi obtížné jejich skladování, neboť je nutné je skladovat v prostoru se sníženou teplotou, aby nedošlo k jejich znehodnocení. Velikost teploty ovlivňuje dobu použitelnosti prepregu. Pro dosažení nejdélsí doby uskladnění je nutné, aby byly zmrazeny. Další nevýhodou je, že pro vytvrzení musí být prepregům dodáváno teplo. Nejčastěji výroba probíhá v autoklávech, které udržují stálou teplotu, vnější přetlak a vnitřní podtlak. [12]



Obr. 5 Prepreg [13]

Při výrobě prepregu dochází k částečnému vytvrzení pryskyřice, to způsobí že po tom, co projde pecí je v lepkavém stavu a již dále neteče. Po výrobě prepregu je nutné jeho uskladnění v chladném prostředí. [5]



Obr. 6 Výroba prepregu [5]

## 1.2 Jádra sendvičových kompozitů

Jádra se používají z důvodu zvýšení tepelné a zvukové izolace, v některých případech pro zvýšení požární odolnosti a zejména ke zvýšení tuhosti. Jádro je v sendviči potaženo z obou stran potahovou vrstvou z laminátu. Koncepce tenkých, odolných potahových vrstev v kombinaci s tlustšími, ale lehčími materiály jader umožňuje vyrábět tuhé, lehké a velmi odolné struktury. Zvýšení hmotnosti způsobené jádrem o 3% může až 3,5-krát zvýšit ohybovou pevnost a tuhost. [14]

### 1.2.1 Pěnová jádra

Pěny jsou nejčastěji používaným materiálem pro jádra sendvičových kompozitů. Vyrábí se z široké škály syntetických polymerů, např. z polyvinylchloridu (PVC), polystyrenu (PS),

polyuretanu (PU), styrenakrylonitrilu (SAN) a dalších. Vyrábí se v hustotách 30-300kg/m<sup>3</sup>, taktéž v různých tloušťkách, nejčastěji 5-50mm. [15]

### **PET pěny**

Polyetylentereftalátové pěny jsou nečastějším zástupcem pěnových jader sendvičových panelů. Výhodou je nevyšší únavová odolnost mezi pěnovými jádry a také dobrá recyklovatelnost jader vyrobených z PET pěn. Využití nalézají při výrobě námořních plavidel (části trupu), vlaků a dalších dopravních prostředků, díky velké odolnosti vůči tlaku a chemické odolnosti. Odolávají teplotám až 150°C, což je činí vhodnými pro výrobu sendvičů v autoklávu. Nedochází k poškození jádra vlivem působení vody ani vzdušné vlhkosti. Jádra z PET odolávají všem druhům pryskyřic, je tedy možné užít téměř pro jakoukoliv aplikaci. [42] [45]

### **PVC pěny**

Polyvinylchloridové pěny jsou nejčastěji používaným materiálem jader. Používají se pro konstrukci vysoce výkonných sendvičových kompozitů. Jejich složení není z čistého PVC, ale jsou chemickým hybridem složeným z polyvinylchloridu a polyuretanu.

PVC pěny mají vyvážené spojení mezi statickými a dynamickými vlastnostmi. Taktéž jsou dobře odolné vůči absorpci vody. Lze je používat v prostředí s velkým rozsahem teplot (-240°C až +80°C), jsou také dostatečně odolné vůči chemickým látkám. Obecně jsou PVC pěny velmi hořlavé, vyrábí se však i varianty obsahující retardéry hoření, proto jsou často využívány pro součásti dopravních prostředků. Pěny se vyrábí ve formě tabulí nebo mříží pro snadné tvarování. PVC pěny se dají rozdělit na dva typy, nezesíťované pěny jsou pružnější a tvrdší, ale mají horší mechanické vlastnosti a teplotní odolnost, zesíťované pěny jsou křehčí a tvrdší. Taková pěna vytváří panely s vyšší tuhostí a teplotní odolností. [5][14]



Obr. 7 PVC pěna Airex C70.75 [16]

### PS pěny

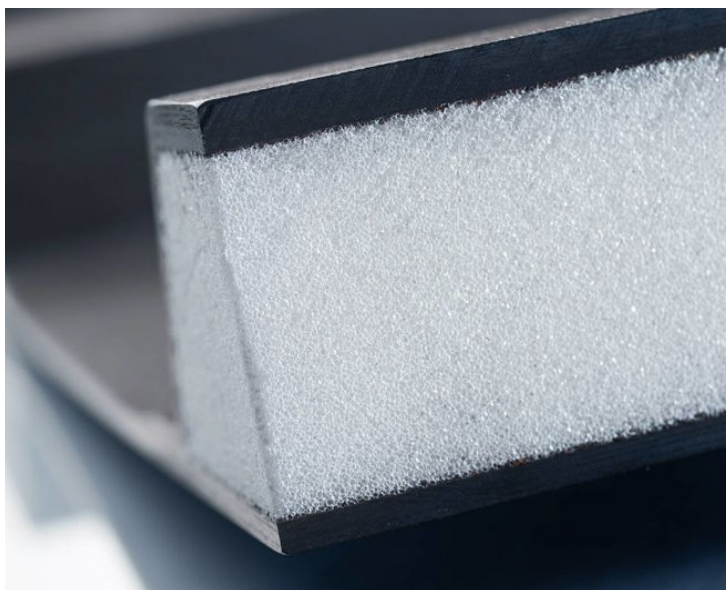
Polystyrenové pěny nemají velké uplatnění jako materiál jader sendvičů. Používají se jako jádra pro sportovní pomůcky, kvůli jejich velmi nízké hmotnosti. Pro výrobu konstrukčních dílů jsou nevhodné z důvodu nízkých mechanických vlastností. Není je možno používat s polyesterovými pryskyřicemi, neboť díky přítomnému styrenu by byly rozpuštěny. [14]

### PU pěny

Polyuretanové pěny disponují nepatrně vyššími mechanickými vlastnostmi než polystyrenové pěny. Časem stárnou, což způsobuje delaminaci potahové vrstvy od jádra sendviče. Proto je jejich použití velmi limitováno, používají se ve velmi lehce zatěžovaných sendvičových panelech pro své tepelně a zvukově izolační vlastnosti. Pěna je snadno obrobitelná, tudíž lze vyrábět sendviče rozmanitých tvarů. [5]

### PMI pěny

Polymetakrylimidové pěny disponují nejlepšími mechanickými vlastnostmi mezi polymerními pěnovými jádry. Jejich značná rozměrová stabilita zajišťuje možnost výroby s prepregy. Nevýhodou je vysoká cena, naopak výhodou je velmi dobrá obrobitelnost, která umožňuje výrobu tvarově velmi složitých dílů. Pro své vlastnosti jsou využívány pro výrobu rotorů vrtulníků, klapek dopravních letadel, přepážek v tlakových nádobách a při výrobě částí raketoplánů. [5] [17]



Obr. 8 PMI pěna Rohacell [31]

### **SAN pěny**

Styrenakrylonitrilové pěny mají vyšší mechanické vlastnosti než PVC pěny, zejména jejich houževnost. Používají se tam, kde jsou svými vlastnostmi PVC pěny nedostačující. Taktéž mají dobrou chemickou odolnost a odolnost vůči vyšším teplotám. Při výrobě PVC se pro změkčení používají plastifikátory, které zpříčiňují jeho stárnutí, kdežto při výrobě SAN pěny se plastifikátory nepoužívají, tudíž si udrží svou houževnatost podstatně delší čas. [5] [18]

### **1.2.2 Voštinová jádra**

Voštinová jádra jsou dostupná v různých materiálových provedeních od papíru, který má velmi nízkou pevnost a houževnatost, až po moderní materiály užívané v leteckém průmyslu. Voština může být použita na plošné i tvarové kompozitní sendviče, lze ji tvarovat za použití nízké mechanické, či tepelné energie. [5]

### **Papírová voština**

Výroba papírových voštin probíhá nejdříve slepením papírů do stohu. Stoh je potom opatrně roztažen na blok o tvaru budoucí voštiny. Takto roztažený blok je máčen ve lázni s pryskyřicí. Po odkapání je pryskyřice vytvrzena v peci. Jakmile je pryskyřice vytvrzena, je materiál dělen na požadované tloušťky. Papírové voštiny se využívají při výrobě nábytku, dveří apod. [5] [19]

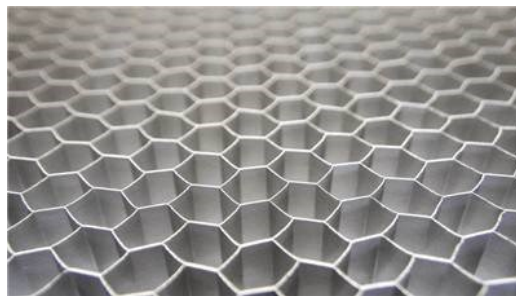


Obr. 9 Papírová voština

### **Hliníková voština**

Hliníková voština disponuje nejvyšším poměrem pevnosti vztažené na svou hmotnost. Díky mnoha variantám spojení, můžou mít buňky voštiny nejrůznější tvary (nejčastěji hexagon). Mechanické vlastnosti mohou být modifikovány tloušťkou folie a také velikostí buněk voštiny. Hliníkové voštiny jsou obvykle dodávány ve mrštěné podobě a před použitím je nutno je roztáhnout.

I když disponuje hliníková voština dobrými mechanickými vlastnostmi a poměrně nízkou pořizovací cenou, není jej vhodné pro některé aplikace používat. Například pro výrobu dílů velkých lodí, kde hrozí koroze způsobená působením slané mořské vody, dále nesmí přicházet do přímého styku s uhlíkem, který by mohl zapříčinit galvanickou korozi. Taktéž mají hliníkové voštiny problém s „pamětí“. Pokud dojde k deformaci, je tato deformace nevratná. Pokud by byla taková voština použita pro výrobu sendviče, v místě deformace nedojde ke spojení s potahem, což výrazně sníží mechanické vlastnosti sendviče. [5] [20]



Obr. 10 Hliníková voština [21]

### **Nomex**

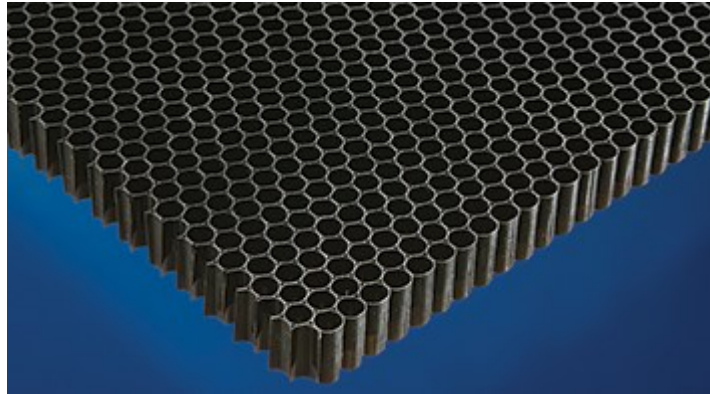
Materiál Nomex je v podstatě papír vyrobený z vláken Kevlaru namísto celulózy. Takováto voština je namáčena do fenolické pryskyřice, což jí dodává vysokou pevnost a velmi dobrou odolnost vůči hoření. Velmi často se používá při výrobě letadel, v kombinaci s potahem syceným taktéž fenolickou pryskyřicí. Díky vysoké pevnosti, nízké hustotě a dlouhodobé stabilitě se použití rozšiřuje i mimo letecký průmysl. [5]

### **Termoplastické voštiny**

Termoplastické voštiny jsou nejčastěji vyráběny pomocí extruze, následované rozřezáním na požadované tloušťky. Voštiny z termoplastů nabízejí nízkou hmotnost a umožňují snadnější recyklaci. Hlavní nevýhodou je obtížné dosažení dobrého spojení mezi voštinou a potahem a také nízká tuhost. Ve vysoce zatěžovaných dílech jsou využívány jen velmi zřídka, vhodné jsou spíše pro výrobu panelů do interiéru. Nejčastěji používanými termoplasty jsou:

- ABS pro svou tuhost, rázovou odolnost, povrchovou tvrdost a rozměrovou stabilitu.
- Polykarbonát pro svou odolnost vůči UV záření, optické vlastnosti, odolnost proti vyšším teplotám a samozhášivost, elektrickou nevodivost.

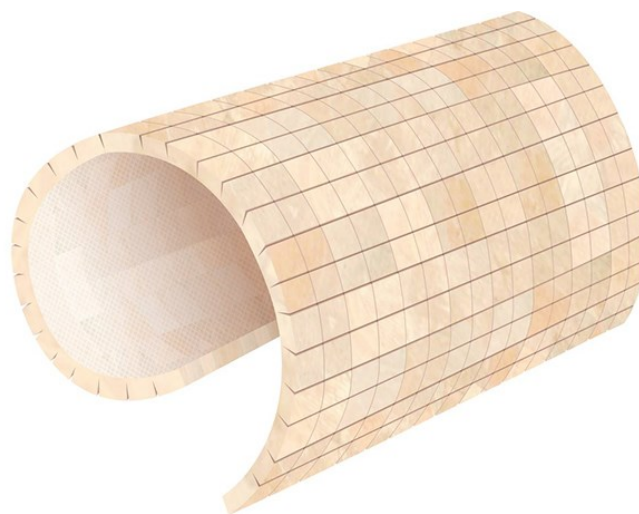
- Polypropylen pro svou chemickou odolnost, odolnost vůči vibracím a recyklovatelnost.
- Polyetylen pro svou nízkou cenu. [5] [22]



Obr. 11 Polykarbonátová voština [22]

### 1.2.3 Balsová jádra

Balsa je orientovaný materiál, tudíž při jejím použití na to musí být brány ohledy. Vyniká svou odolností vůči působení tlaku, navíc dobře izoluje teplo a zvuk. Při vystavení vysokým teplotám, nedochází k deformaci materiálu. Nevýhodou balsy je velmi malá hustota, což způsobuje při výrobě velkou absorpci pryskyřice. Její využití se tím omezuje na aplikace, kde není zapotřebí velká úspora hmotnosti, nebo pro lokálně velmi namáhaná místa. Své využití nalézá při výrobě lodí, letadel, lopatek větrných elektráren a průmyslových nádrží. [5] [14]



Obr. 12 Balsové jádro [30]



#### 1.2.4 Korková jádra

Uzavřené buňky korku tvoří přírodní voštinovou strukturu. Korek disponuje nízkou hustotou, vysokou stlačitelností a také výbornou schopností navrácení do původního stavu. Taktéž dobře odolává smykovému napětí. Má velmi nízkou tepelnou vodivost, nižší než dřevo, nebo některé polymerní pěny. Jádra vyrobená z korku mají hladký povrch, což minimalizuje absorpci pryskyřice a tím snižuje i celkovou hmotnost sendviče. Korková jádra se používají pro výrobu sportovních potřeb, částí lodí, ve stavebním a leteckém průmyslu. [43]



Obr. 13 Sendvičový panel s korkovým jádrem [44]

## 2 VÝROBA SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

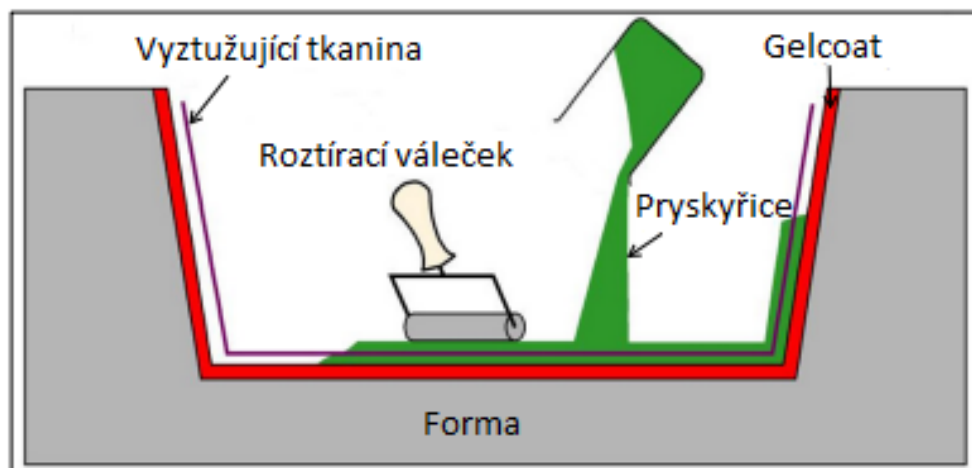
Kompozitní lamináty lze vyrábět mnoha způsoby, například ručním kladením, vakuovou infuzí či pomocí autoklávu. Každá z těchto variant má své výhody. Vlastnosti finálního produktu jsou ovlivněny nejen volbou materiálu matrice a výztuže, ale zásadně i metodou jejich výroby. [32]

### 2.1 Výroba ručním kladením

Pryskyřice je ručně nanášena na výztuž ve formě tkaniny, rohože atd. Pryskyřice se roztírá pomocí válečku. Na očištěnou formu musí být nejdříve aplikován separátor, aby bylo možné po vytvrzení laminát odformovat. Počet vrstev separátoru se liší dle jeho výrobce. Následuje nanesení první vrstvy pryskyřice (gelcoatu), na kterou je položena výztuž. Na výztuž se aplikuje další vrstva pryskyřice a může být položena následující vrstva výztuže. Toto se opakuje, dokud není dosažen požadovaný počet vrstev. Na poslední vrstvu výztuže je aplikována pryskyřice a laminát je ponechán k vytvrzení za běžných atmosférických podmínek. [5] [23] [24] [25]

Výhodou jsou velmi nízké náklady na potřebné nástroje pro výrobu, vytvrzování za pokojové teploty, velký výběr materiálů a jejich dodavatelů. Taktéž je to technologie vhodná pro výrobu laminátů velmi složitých tvarů, prototypovou výrobu a malosériovou výrobu. [5] [23] [24] [25]

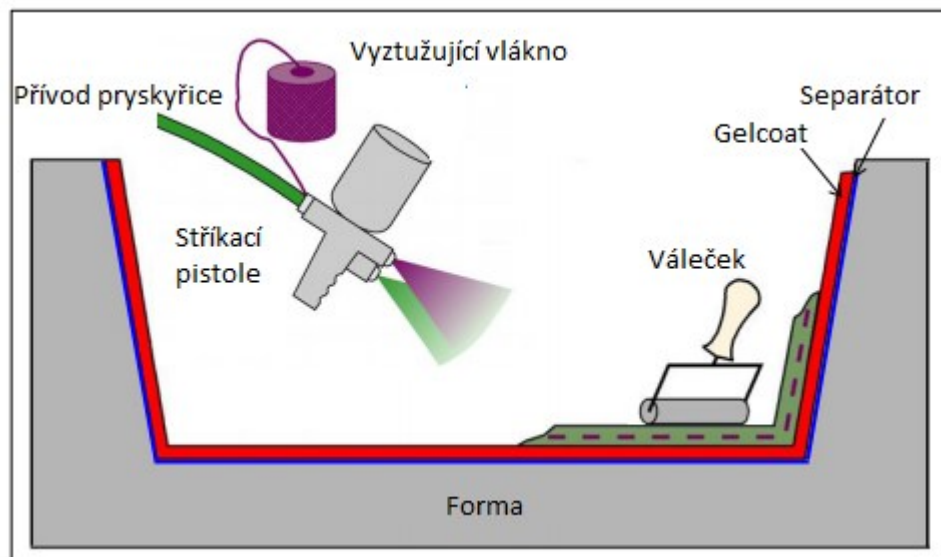
Nevýhodami jsou nízká kvalita laminátů (velmi závisí na zkušenostech obsluhy), nereprodukovatelnost, která vychází taktéž v nanášení jednotlivých vrstev člověkem, častá tvorba suchých míst a bublin, nutnost ochranných prostředků pro obsluhu. [5] [23] [24] [25]



Obr. 14 Ruční laminace [25]

## 2.2 Stříkání

Stříkáním se vyrábí lamináty z krátkých vláken rozmíchaných v pryskyřici nebo vlákna odvíjeného z cívky (rovingu), které je děleno přímo ve stříkací pistolí. Před nanášením je nutné, aby byla forma očištěna a naseparována. Vrstva laminátu je rovnoměrně rozprostírána pomocí válečku. Jedná se o rychlejší výrobní technologii, než je ruční kladení, navíc se nabízí možnost automatizace. Nevýhodami je možný vznik více vzduchových bublin, náhodná orientace vláken výztuže, nerovnoměrná vrstva laminátu a vnik odpadů při čištění sprejovacích pistolí. Při výrobě je obsluha vystavena chemikáliím a jejich výparům, proto musí mít i odpovídající ochranné prostředky. Výpary navíc tvoří i za běžné teploty velmi hořlavé a výbušné prostředí.[5] [24] [25]



Obr. 15 Výroba laminátu stříkáním

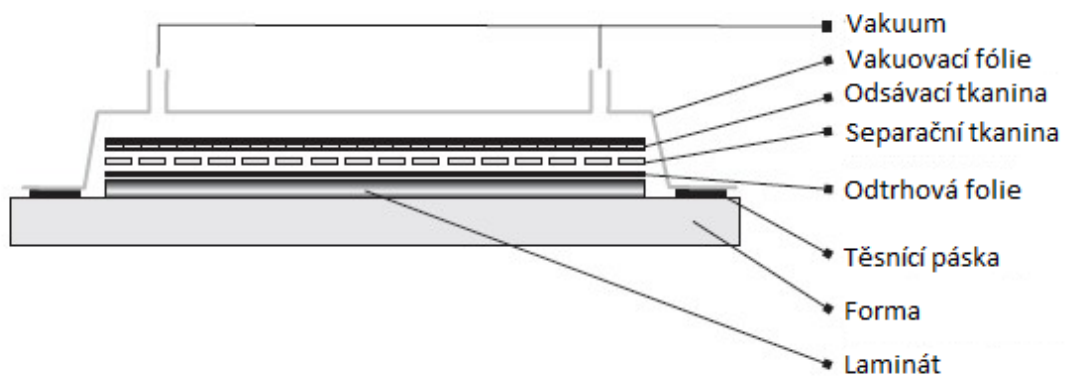
## 2.3 Lisování pomocí vakua

Výroba laminátů lisováním pomocí vakua je velmi podobná metodě ručního kladení. Nejdříve je nutné očistit a naseparovat povrch formy. Poté následuje nanesení první vrstvy pryskyřice (gelcoatu) a položení vyztužující tkaniny, ta je pomocí válečku vyhlazena a je vytlačen vzduch uvízlý pod tkaninou. Následně je na tkaninu nanesena další vrstva pryskyřice. Toto se opakuje do doby, kdy je dosaženo požadovaného počtu vrstev. Po dosažení požadovaného počtu vrstev je položena odtrhová folie nebo odtrhová tkanina. Na ní může být položena ještě separační tkanina, nebo rovnou může následovat absorpční tkanina, která absorbuje přebytečnou pryskyřici z laminátu. Nakonec se celá forma překryje vakuovací folií, která je po obvodu přilepena a utěsněna pomocí těsnící pásky. Je důležité,

aby byla vakuovací fólie trochu „nakřčená“, aby došlo ke správnému přilnutí folie k laminátu a odvodu přebytečné pryskyřice. Poté může být forma připojena ke zdroji vakua a ponechána k vytvrzení za pokojové teploty. Velikost vakua se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,9 bar. Po vytvrzení je forma odpojována od zdroje vakua a je stržena vakuovací fólie, poté dojde ke stržení odtrhové folie s absorpční tkaninou. Nakonec je odformován samotný laminát. [5] [26]

Výsledkem jsou lamináty s vyšším podílem výztuže k pryskyřici, což zajišťuje lepší mechanické vlastnosti laminátu. Během vakuování dochází také k lepšímu prosycení laminátu pryskyřicí a do okolního ovzduší se neuvolňuje velké množství toxických výparů.

Nevýhodami jsou narůstající cena výroby (vakuová pumpa, vakuovací, odsávací a odtrhová folie atd.), navíc jsou kladeny vyšší nároky na zkušenosti obsluhy pro namíchání směsi pryskyřice a tužidla a také pro dobré utěsnění formy. [5] [26]



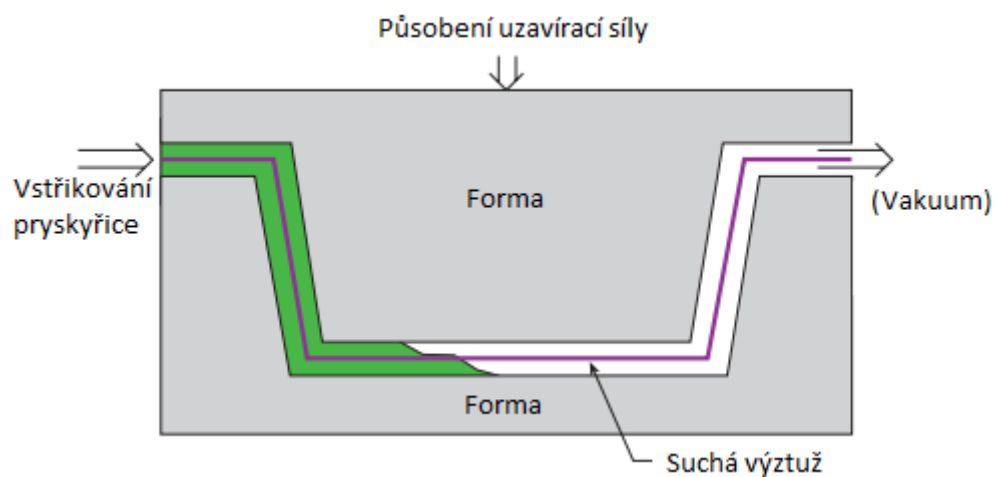
Obr. 16 Lisování pomocí vakua [26]

## 2.4 Technologie RTM

Při použití technologie RTM (Resin Transfer Moulding) je pryskyřice vstřikována do uzavřené formy, ve které je vložena výztuž. Vstřikování probíhá pod tlakem několika atmosfér pomocí plnicího zařízení. Pro snadnější vkládání výztuže do dutiny formy se v některých případech výztuž předtvaruje. Možné je také doplnění procesu připojením vakua, což má za následek lepší prosycení výztuže pryskyřicí. Tato modifikace se nazývá VARI (Vacuum Assisted Resin Injection). Poté co je dutina formy zaplněna pryskyřicí, jsou uzavřeny vstupy pryskyřice a laminát je ponechán k vytvrzení buďto za pokojové nebo zvýšené teploty. [5] [29]

Hlavní výhodou této technologie je minimální vznik míst, kde není výztuž dostatečně prosycena a nedochází ke vzniku vzduchových bublin. Další velkou výhodou je ekologie procesu, kdy při výrobě nedochází k uvolňování těkavých látek do ovzduší. Tím že je forma z obou stran výrobku, jsou díly oboustranně hladké. Díky tomu mohou být takto vyrobené díly použity jako pohledové z obou stran. Technologie je vhodná pro středně až velkosériovou výrobu. [5] [29]

Nevýhodou je velká hmotnost forem v porovnání s ostatními technologiemi, kde je dostačující pouze jedna strana formy. Jedná se velmi drahou technologii výroby, proto pokud je špatně aplikován separátor do dutiny formy a při odformování dojde k poškození dílu, jedná se o velmi drahé zmetky. [5] [29]



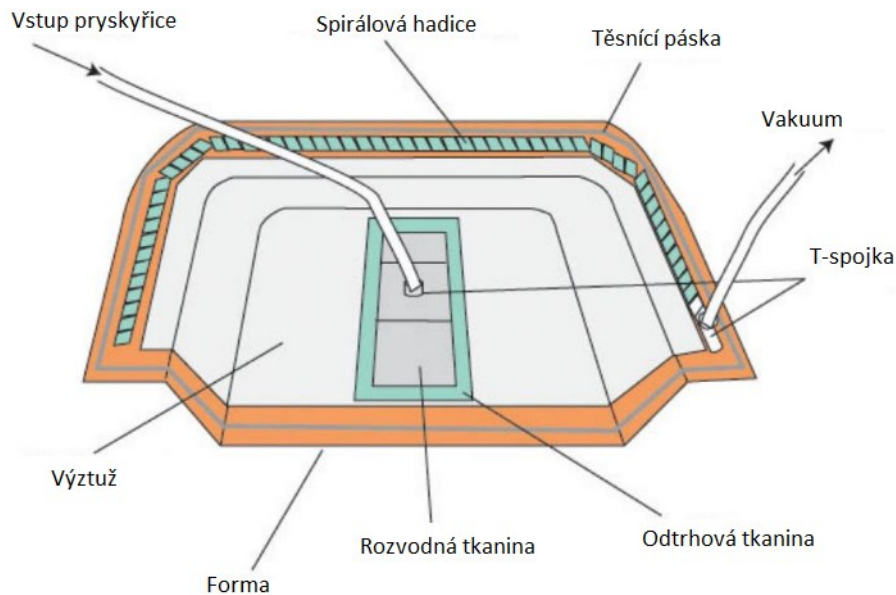
Obr. 17 Technologie RTM [5]

## 2.5 Vakuová infuze

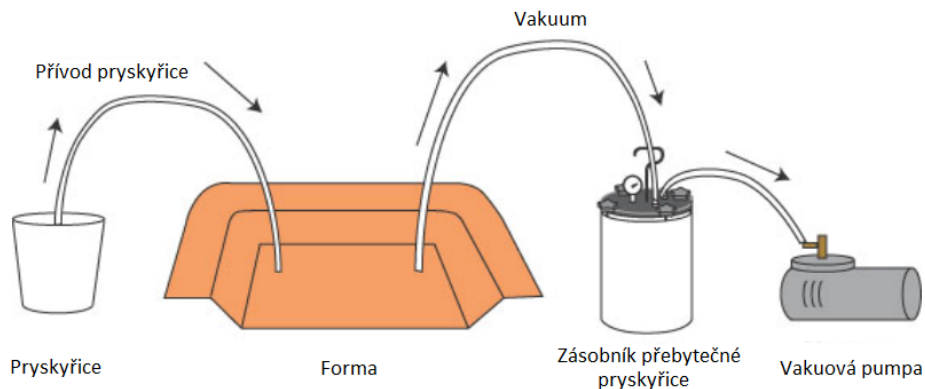
Výrobou pomocí vakuové infuze lze dosáhnout velmi dobrého poměru pryskyřice a výztuže. Na očištěnou a naseparovanou formu je položen potřebný počet vrstev výztuže. Na výztuž je položena odtrhová tkanina a rozvodná tkanina. Do středu rozvodné tkaniny je přivedena hadice od zdroje pryskyřice. Okolo dílu je připevněna spirálová hadice pro odvod vzduchu z formy, její konce jsou spojeny T-spojku. K T-spojce je připojen zdroj vakua. Následně je forma překryta vakuovací folií a utěsněna pomocí těsnící pásky. Po spuštění vakua je odsán vzduch z formy a zároveň nasávána pryskyřice, která prosycuje výztuž. [27] [29]

Vakuová infuze je metoda vhodná pro výrobu rozměrných dílů. Taktéž během výroby nedochází k úniku těkavých látek do okolí. Největší výhodou je doba zpracování, například při lisování pomocí vakua je doba zpracování značně omezená, neboť pryskyřice po

smíchání s tužidlem se začíná vytvrzovat cca po 40 minutách. V případě vakuové infuze je nejdříve všechno přichystáno a na závěr teprve dochází ke spuštění infuze pryskyřice, což dává „neomezenou“ dobu přípravy formy. Jedná se o čistější proces, nejsou zapotřebí žádné štetce, válečky, takže nedochází ke znečištění na pracovišti. [27] [29]



Obr. 18 Vakuová infuze – forma [29]



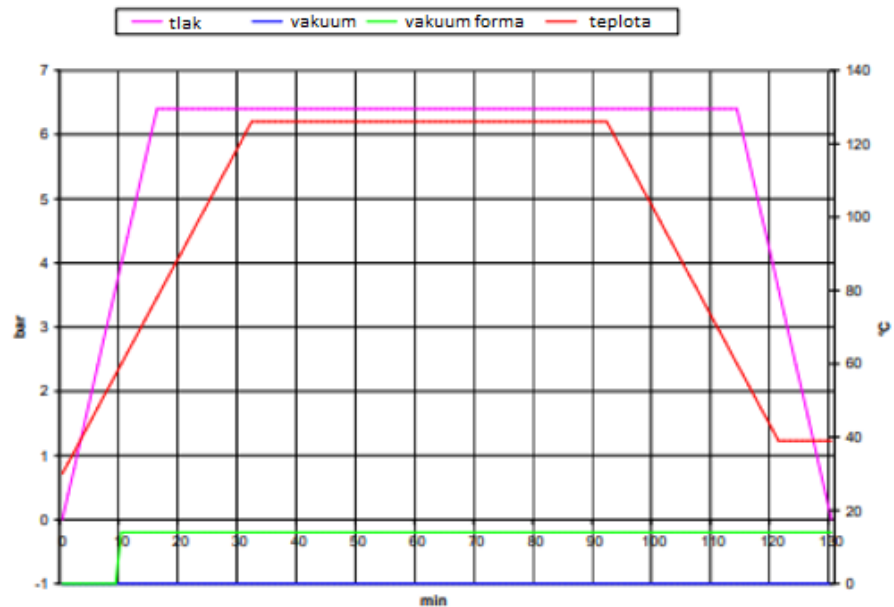
Obr. 19 Proces vakuové infuze [29]

## 2.6 Výroba lisováním v autoklávu

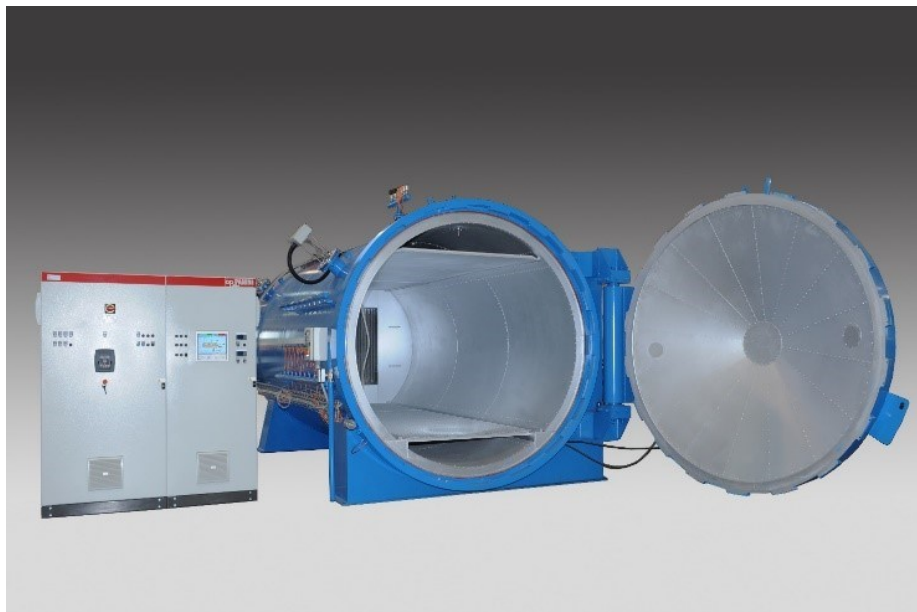
Lisování v autoklávu je nejvíce nákladnou a nejsložitější technologií zejména pro sériovou výrobu velkorozměrových konstrukcí. Pro výrobu v autoklávu se používají prepregy, neboť vyžadují vytvrzení za zvýšené teploty. Příprava formy je obdobná jako u lisování za pomoci vakua. Po vložení formy do autoklávu, je nejdříve evakuována forma podtlakem až 1 bar,

poté je komora autoklávu natlakována na cca 6 bar a za zadané teploty probíhá vytvrzení. Vytvrzování v autoklávu zajišťuje výrobu homogenních struktur.

Výroba v autoklávu se používá zejména pro díly kosmického a leteckého průmyslu, závodní automobily a pro výrobky s velkou sériovostí do dopravních prostředků. [33] [34]



Obr. 20 Cyklus autoklávu pro prepreg GG 204P IMP 503Z

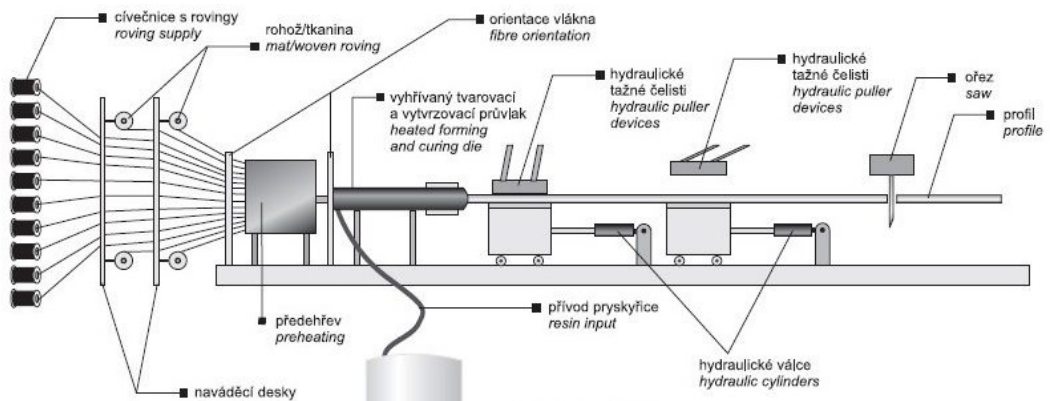


Obr. 21 Autokláv o.p. PANINI [41]

## 2.7 Pultruze

Metoda pultruze slouží ke kontinuální výrobě plných i dutých tvarových profilů s vysokým podílem výztuže (až 80%). Výztuž tvoří nejčastěji skelněné či uhlíkové vlákno případně v kombinaci se stuhami nebo rohožemi k docílení příčného vyztužení. Tato výztuž prochází přes lázeň, v níž je iniciovaná pryskyřice, následně je přebytečná pryskyřice ždímána. Následuje protahování přes tvarové a vytvrzovací průvlaky, které udávají tvar výrobku. Technologii lze modifikovat tak, že k prosycování výztuže dochází přímo v průvlaku. [34] [35]

Ve vytvrzovacím průvlaku dochází k vytvrzení vlivem sdíleného tepla (průvlak je vyhříván buďto elektricky nebo pomocí topného média) nebo vývojem tepla způsobeného vysokofrekvenčním polem. Vytlačený profil je odtahován pomocí hydraulických čelistí, nebo dopravníkem a dělen na požadované délky. [34] [35]



Obr. 22 Pultruze [34]



### 3 ZKOUŠKY SENDVIČOVÝCH KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

Mechanické vlastnosti se měří z mnoha důvodů. Nejzákladnějším důvodem je získání informací o chování materiálu pro konstruktéry. Dalším důvodem je měření mechanických vlastností pro zjištění kvality. Takovéto výsledky jsou ukazatelem kvality při výstupní kontrole, nebo naopak při kontrole vstupního materiálu. Nakonec slouží mechanické zkoušky pro výzkum materiálových vlastností, usilují o pochopení a vysvětlení chování materiálu a také zjištění konkrétních mechanických vlastností. Zkoušky mechanických vlastností použité pro testování konkrétních materiálů by měly vycházet z reálného zatěžování budoucího výrobku.[36]

Zkoušky mechanických vlastností lze rozdělit do dvou skupin podle působení síly na zkušební těleso:

- Statické zkoušky.
- Dynamické zkoušky. [36]

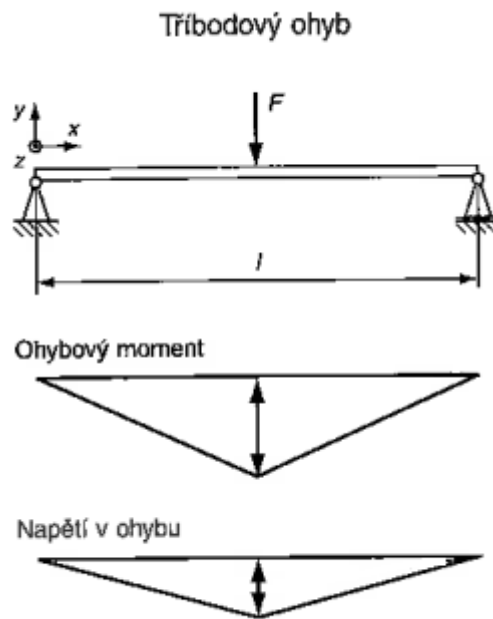
#### 3.1 Statické zkoušky

Při statických zkouškách je zkušební těleso namáháno pomalým vnějším zatížením. Mezi statické zkoušky se řadí zkoušky tahové, tlakové, zkoušky krutem nebo ohybem. Podmínky jednotlivých zkoušek jsou dány normami. [36]

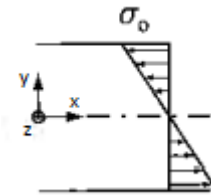
##### 3.1.1 Zkouška tříbodovým ohybem

Zkušební těleso obdélníkového průřezu je uloženo na dvou podpěrách. Uprostřed mezi podpěrami dochází k působení zatěžující síly. Při zkoušce ohybem se očekává že rozdělení normálních sil je lineární. Pevnost v ohybu je výrazně ovlivněna polohou vláken vůči neutrální rovině. Během zkoušky vzniká ve zkušebním vzorku maximální napjatost, a to v místě zatížení, kde dochází i k lomu vzorku (uprostřed vzorku). Uprostřed tloušťky vzorku se nachází maximální smykové napětí. [3]

Naměřená data slouží zejména ke srovnávání. Lze taktéž vyhodnocovat druhy porušení vzorků. Druh porušení, který lze akceptovat je lom vyvolaný tlakem, či tahem. Pro samotné měření jsou zapotřebí dostatečně štíhlé vzorky. S narůstajícím poměrem štíhlosti (rozeť podpěr ku tloušťce vzorku) až do hodnoty 10 dochází k výraznému nárůstu modulu pružnosti a pevnosti. [3]



Obr. 23 Zkouška třibodovým ohybem [3]



Obr. 24 Průběh napětí v průřezu vzorku [3]

Napětí v ohybu je teoretickou hodnotou povrchového napětí při porušení zkušební vzorku.

Pro zkušební tělísko o obdélníkovém průřezu je dáno vztahem:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{6 \cdot M_o}{b \cdot h^2}$$

(1)

Kde

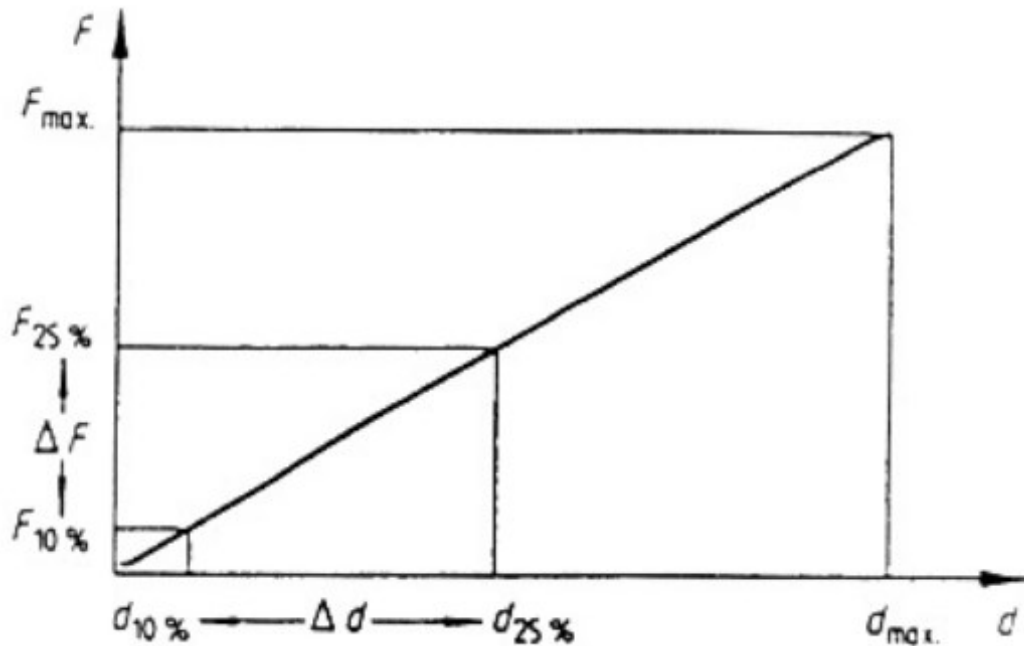
$\sigma_o$  – napětí v ohybu [MPa]

$M_o$  – ohybový moment [N·mm]

$b$  – šířka vzorku [mm]

$h$  – tloušťka vzorku [mm]

Ohybový modul je směrnici tečny vynesené na křivku závislosti napětí na deformaci. K jeho výpočtu se používá počáteční lineární část grafu. Pokud graf neobsahuje tuto lineární část, je graf proložen přímkou v bodech 10% a 25% z velikosti maximální síly viz. Obr 25. [37]



Obr. 25 Křivka závislosti síly na průhybu [37]

$$E_o = \frac{L^3 \cdot \Delta F}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta d}$$

(2)

Kde

$E_o$  – ohybový modul [MPa]

$L$  – Rozteč mezi podpěrami [mm]

$\Delta F$  – velikost síly mezi 10% a 25% z  $F_{max}$  [N]

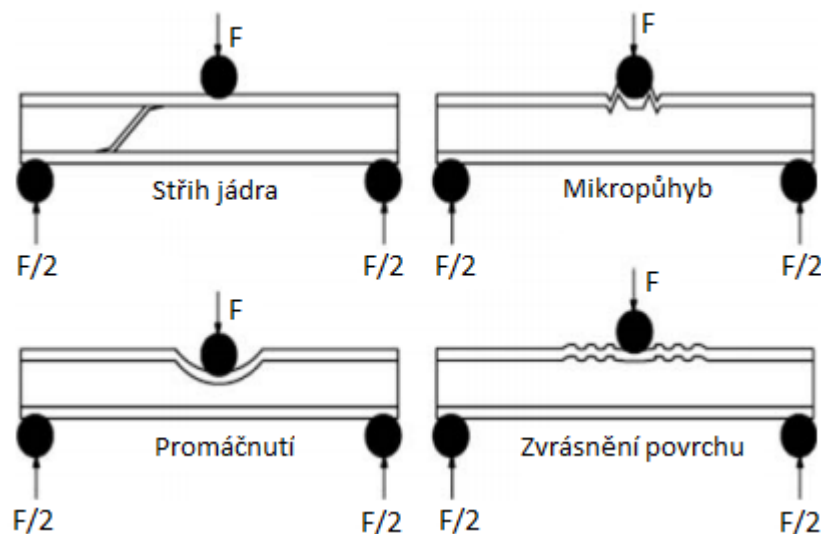
$b$  – šířka vzorku [mm]

$h$  – tloušťka vzorku [mm]

$\Delta d$  – rozdíl průhybu dle  $\Delta F$  [mm]

Při třibodové ohybové zkoušce můžou nastat čtyři druhy porušení:

- Střih jádra sendviče.
- Mikroprůhyb.
- Promáčnutí.
- Zvrásnění povrchu. [38]



Obr. 26 Druhy porušení sendviče při třibodovém ohybu [38]

### 3.2 Dynamické zkoušky

V praxi dochází k porušení soudržnosti materiálu, i když nebylo dosaženo jejich meze pevnosti, a to v důsledku opakovaného namáhání (například ohýbání drátu do doby než dojde k jeho oddělení). Toto se označuje jako únava materiálu. Z tohoto důvodu je nutné zkoušení materiálů pro díly namáhané opakovaným zatěžováním také na odolnost vůči únavě. Opakované zatížení, kterému jsou reálně součásti vystaveny, nemusí mít pouze pravidelný průběh (například zatěžování pružin podvozku u automobilů). Jelikož je simulování reálného zatěžování velmi obtížné, proto je zjednodušován na pravidelný – cyklický průběh.

Zatěžování můžeme rozdělit dle napětí vznikajícího ve vzorku na:

- Pulzující  $\sigma_m = \sigma_a$
- Míjivé  $\sigma_m > \sigma_a$
- Střídavé  $\sigma_m < \sigma_a$  (souměrné( $\sigma_m = \sigma_a$ )/nesouměrné( $\sigma_m \neq 0$ )) [39] [40]

Kde

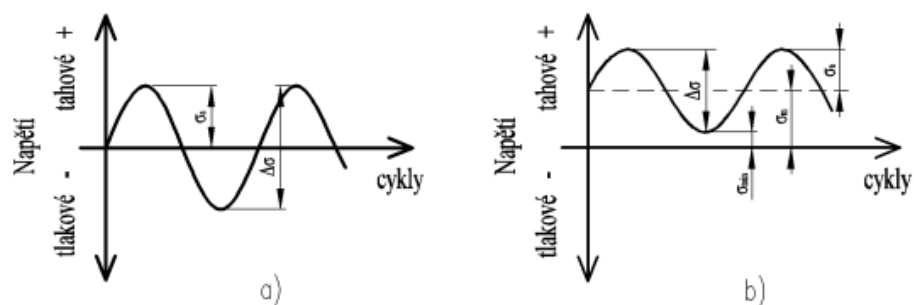
$\sigma_m$  – střední napětí

$\sigma_a$  – amplituda napětí

$\sigma_{max}$  – maximální napětí

$\sigma_{min}$  – minimální napětí

$\Delta\sigma$  – rozkmit napětí



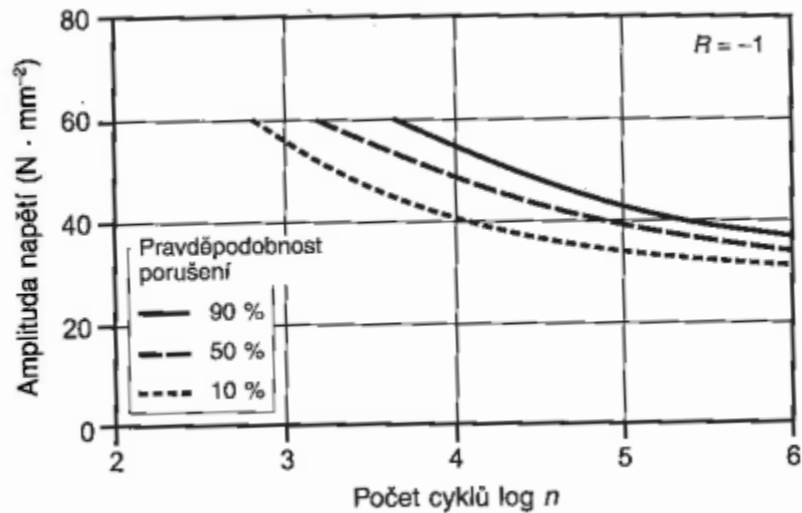
Obr. 27 Druhy cyklického zatěžování a) střídavé souměrné, b) pulzující [40]

Průběh namáhání se může často lišit. Dle působení namáhání na součást rozlišujeme cyklické zkoušky na tahové/tlakové, ohybové a krutové. Nejčastěji se provádí zkoušení souměrným střídavým ohybem, a to z důvodu že je jedná o nejnebezpečnější namáhání pro materiál. Taktéž je provedení zkoušky střídavým ohybem snadnější a rychlejší než provádění zkoušky jiným způsobem. [39]

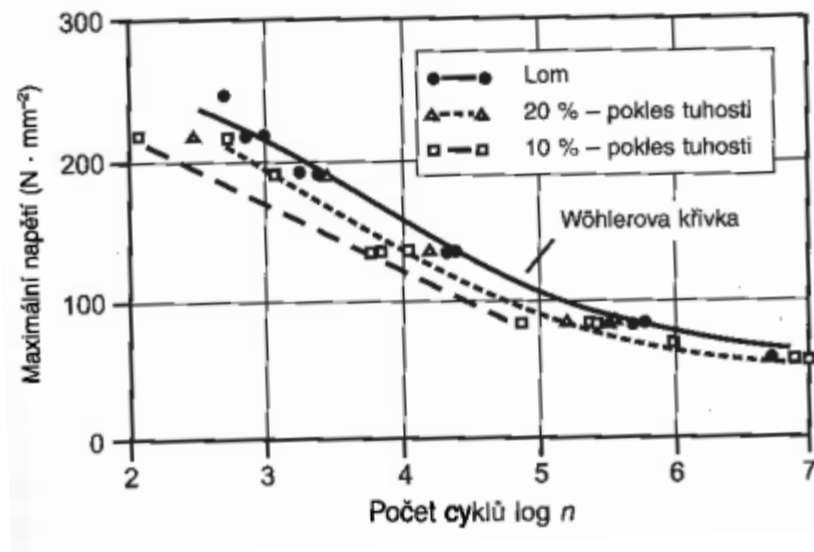
### 3.2.1 Únavová ohybová zkouška

Únavové chování kompozitních materiálů je nejčastěji popisováno pomocí Wöhlerovy křivky. Kritériem únavy je porušení zkušebního vzorku (lom). Podmínky únavového chování jsou vyhodnocovány z výsledků zkoušky za pomoci statistických metod viz. obr.28.

Jelikož vlákna vyztužené plasty vykazují s narůstající dobou zatěžování a zvyšující se únavou vykazují větší nebo menší pokles tuhosti, je lom jako jediné kritérium nedostačující. Použijeme-li jako další kritérium pokles tuhosti o 10% nebo 20% a zaznamenáme tyto body ve Wöhlerově diagramu, zajistíme si tak další informace o průběhu únavy v čase. [3]



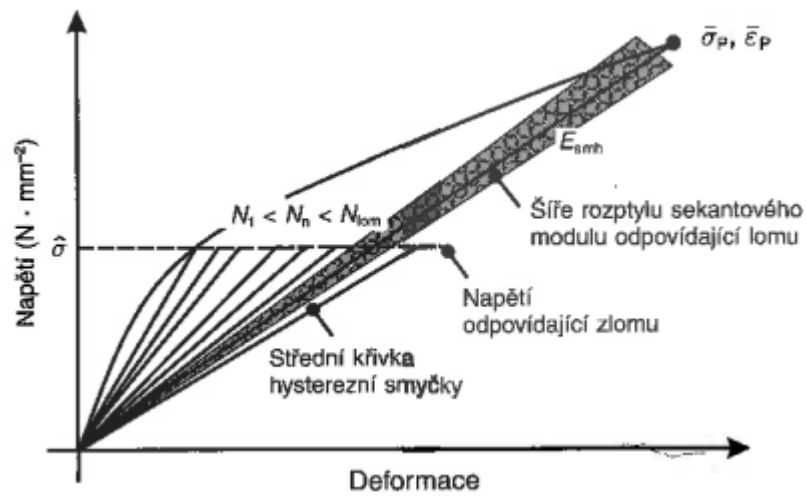
Obr. 28 Wöhlerova křivka pravděpodobnosti porušení vlivem únavy polyesterového SMC laminátu [3]



Obr. 29 Pokles tuhosti jako kritérium únavy [3]

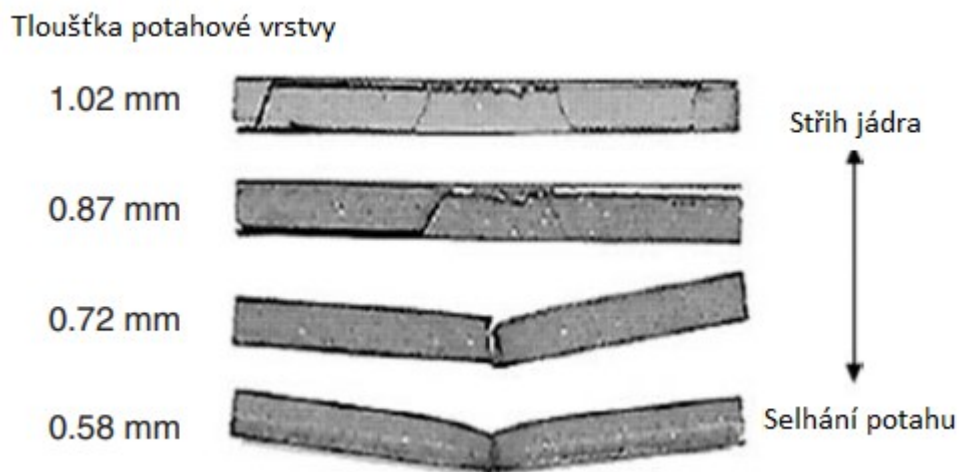
Použijeme-li toto kritérium tuhosti na laminát se skelnými vlákny, je nutné taktéž sestavit graf závislosti napětí na deformaci viz. obr.30. Ten se projevuje zlomem v oblasti, kdy dochází k největšímu nárůstu poruch. Tuhost v okamžiku lomu vzorku je směrnici přímky vedené mezi bodem lomu a počátkem souřadného systému. Během únavové ohybové zkoušky s průběžně měří tuhost vzorku. Pokud tuhost vzorku klesne pod úroveň hodnoty naměřené při statické zkoušce, je toto uvažováno jako lom vzorku. Pro lamináty s výztuží

z uhlíkových vláken to platí jen omezeně, protože graf závislosti napětí na deformaci vykazuje progresivní průběh. Tedy s narůstajícím zatížením roste i tuhost vzorku. [3]

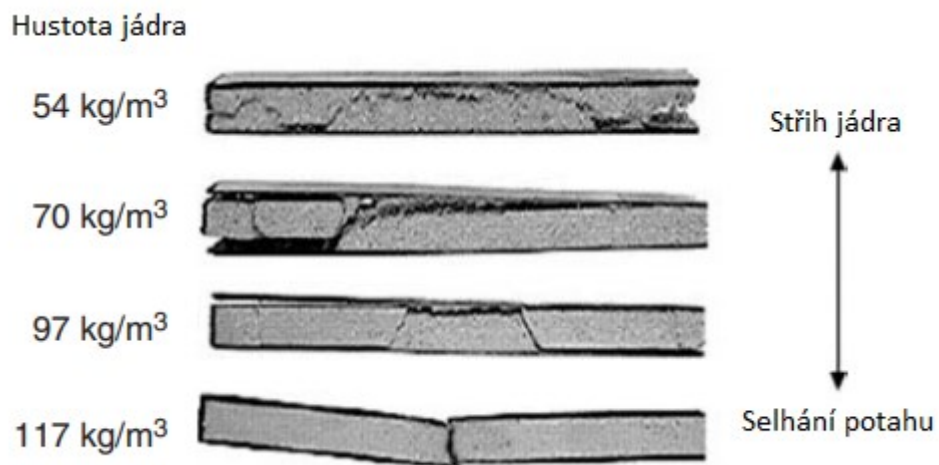


Obr. 30 Pokles tuhosti kompozitního laminátu vyztuženého skelným vláknem ( $N_n$  – počet cyklů,  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\varepsilon}$  – střední hodnota napětí a deformace při lomu) [3]

Způsob porušení zkušebního vzorku je velmi ovlivněn jak tloušťkou potahové vrstvy, tak hustotou jádra sendviče. U sendvičů s velkou tloušťkou potahové vrstvy, nebo s malou hustotou jádra dochází k porušení vlivem stříhu jádra. Naopak u sendvičů s malou tloušťkou potahové vrstvy, nebo s vysokou hustotou jádra dochází k porušení vlivem selhání potahu. [38]



Obr. 31 Vliv tloušťky potahu na způsob lomu sendviče [38]



Obr. 32 Vliv hustoty pěnového jádra na způsob lomu sendviče [38]

Mimo kvalitativní popisy poškození vzorku jako jsou oddělené matrice od vláknů, trhliny, delaminace a lom se používají další postupy ke stanovení kvantitativního průběhu poškození. Dělí se na diskrétní a integrální postupy. Diskrétní postupy stanovují kvantitativně konkrétní porušení a vynášejí se do grafů porušení v závislosti na počtu cyklů. Při integrálním postupu se k popsání průběhu cyklického zatěžování používá měření hystereze. Tento postup využívá hodnocení změn hysterezní smyčky během zatěžování. Tyto změny vyplývají z rozvoje mikroskopických poškození ve struktuře vzorku. [3]



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 VÝROBA VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ

Vzorky byly vyráběny pomocí tří metod. První metodou byla ruční laminace, dále ruční laminace s použitím vakua a výroba z prepregu pomocí autoklávu. Volba jádra probíhala mezi PVC pěnou Airex C70.55 a C70.75. Jako jádro byla zvolena pěna z PVC Airex C70.75, která disponovala vyšší pevností v tlaku, která byla zapotřebí pro výrobu v autoklávu.

### 4.1 Technologie ruční laminace - vzorek 1

První vzorek sendviče byl vyráběn ručním kladením. Skládal se z epoxidové pryskyřice Havel L 285 s tužidlem Havel 285 (MGS), uhlíkové tkaniny Havel Kordcarbon Industry o hustotě 200g/m<sup>2</sup> a PVC pěny Airex C70.75 o tloušťce 10mm pro jádro sendviče.

Nejdříve proběhla příprava formy. Forma musel být vyčištěna a odmaštěna po předchozích použití. Poté byl na formu nanášen separační vosk Havel Wax 60 ve třech vrstvách. Každá vrstva byla po aplikaci vyleštěna. Tímto byla forma připravena pro výrobu. Následně byly připraveny pásy uhlíkové tkaniny o rozměrech 100x43cm a pěnové jádro o téže rozměrech. Takto připravené materiály byly zváženy. Jejich hmotnost činila 794,7g. Po připočtení 10% rezervy, bylo zjištěno že potřebná hmotnost pryskyřice byla 875,2g. Z doporučeného poměru pryskyřice a tužidla 100:40 byly vypočteny hmotnosti obou složek. Hmotnost pryskyřice tedy činila 625,2g a hmotnost tužidla 250g. Obě složky byly důkladně promíchány.

Na formu byla nanesena první vrstva pryskyřice a pomocí válečku rovnoměrně rozetřena. Na tuto vrstvu byly položen pás uhlíkové tkaniny a za pomocí válečku vyhlazen. Následně byla aplikována pryskyřice, rovnoměrně rozetřena a byl položen druhý pás uhlíkové tkaniny se stejnou orientací jako předchozí. Po vyhlazení byla aplikována další vrstva a položeno pěnové jádro. Jádro bylo válečkem přitlačeno k předchozím vrstvám. Stejným způsobem byly položeny další dvě vrstvy uhlíkové tkaniny ve stejné orientaci jako předchozí. Na vrchní vrstvu byl aplikována pryskyřice, rozprostřena válečkem. Poté se nechal sendvič vytvrdit. Jak došlo k vytvrzení sendviče, byl odformován. Takto přichystaný sendvič byl připraven pro rozřezání na vzorky pro testování únavy.



Obr. 33 Vzorek 1 po odformování

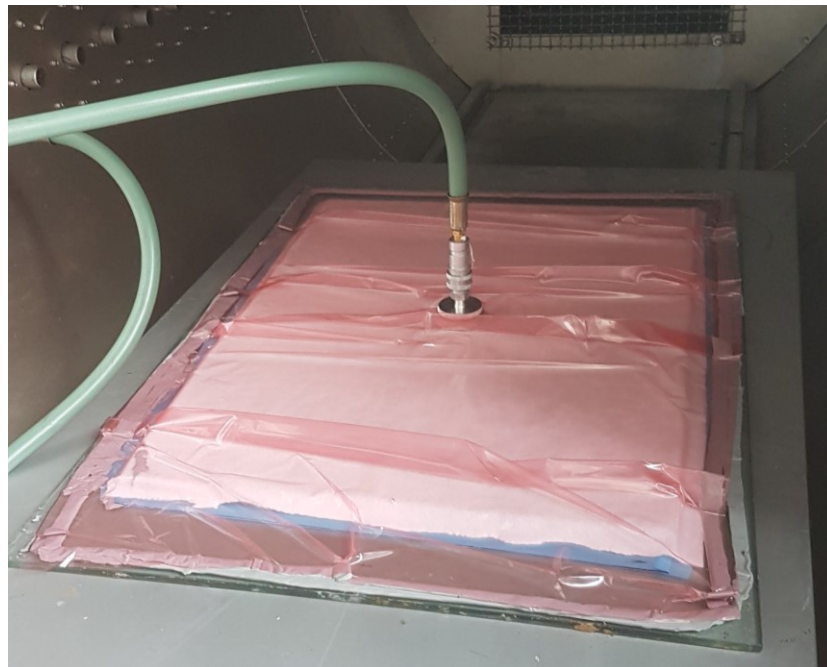
## 4.2 Výroba z prepregu pomocí autoklávu – vzorek 2

Druhý vzorek byl vyráběn z prepregu. Složení prepregu bylo uhlíková tkanina a epoxidová pryskyřice. Pěnové jádro bylo shodné jako v předchozím případě, a to PVC pěna Airex C70.75 o tloušťce 10 mm.

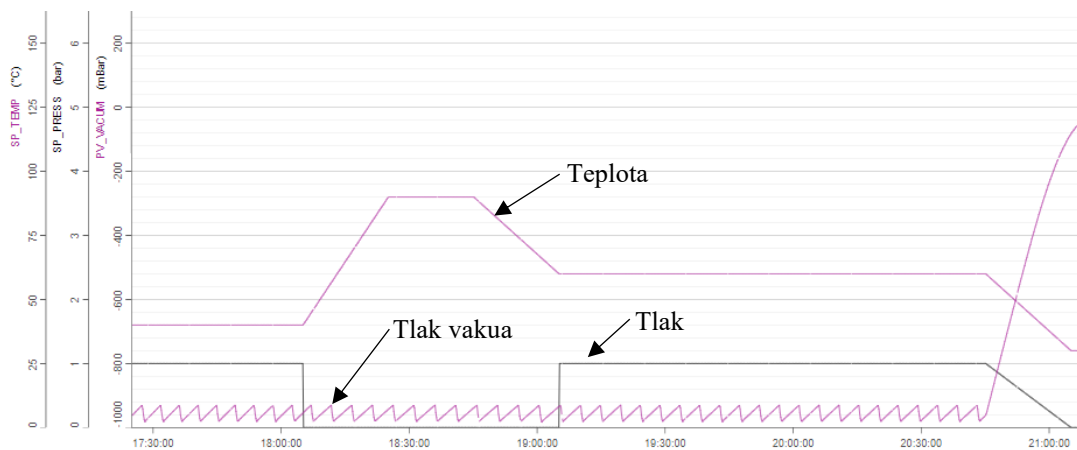
Nejdříve proběhlo očištění formy od zbytků z předchozí výroby. Následně byl na formu nanesen přípravek pro vyhlazení povrchu formy Chem Trend Zyvox. Přípravek byl nanášen ve dvou vrstvách, přičemž po nanesení a vyleštění první vrstvy musel uplynout 15 min časový interval, aby došlo k vyžrání. Po této době byla nanesena a vyleštěna druhá vrstva, která zrála 30 min. Dalším krokem byla aplikace separátoru Chem Trend Chemlease A219W. Ten byl nanášen a rozlešťován ve třech vrstvách, v intervalech po 10 minutách. Následně byl kladen prepreg ve dvou vrstvách ve stejné orientaci, poté bylo uloženo pěnové jádro a přikryto dvěma vrstvami prepregu ve stejné orientaci jako předchozí. Na vrchní vrstvu prepregu byla položena odtrhová folie, která usnadňuje odformování a absorpční tkanina pro přebytečnou pryskyřici. Doprostřed byl vložen spodní díl vakuovací rychlospojky pro spojení s autoklávem. Byla nachystána vakuovací folie o rozměrech větších, než je forma, a to z důvodu nutnosti folii částečně pokrčit, aby nedošlo k jejímu protržení při vakuování. Na folii byla přilepena těsnicí páska, která zaručuje těsné spojení folie s formou. Následně byla folie přilepena na formu, uprostřed byl prořezán malý otvor pro zamontování druhé části rychlospojky a provedlo se sestavení rychlospojky. Na takto připravené formě bylo otestováno vakuum a utěsněny místa, ve kterých docházelo k úniku.

Připravená a odzkoušená forma byla vložena do autoklávu a připojena ke zdroji vakua viz. Obr. 34. Pro výrobu nemohl být použit doporučený vytvrzovací cyklus prepregu pro

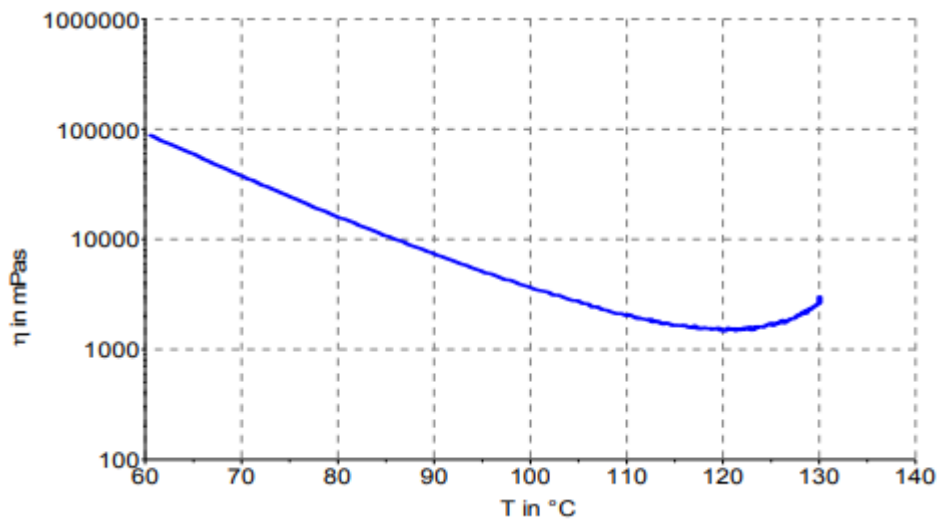
autokláv, neboť použité pěnové jádro není schopno vydržet takovéto procesní podmínky. Proto byl navržen upravený cyklus pro výrobu. Tento cyklus se opírá o materiálová data prepregu a pěnového jádra a byl zvolen jako kompromis doporučených podmínek obou prvků sendviče. Dle doporučení výrobce pěnového jádra bylo vytvrzování rozděleno do dvou částí. První vytvrzování probíhalo za procesních podmínek viz. obr. 35. Snahou bylo dosáhnout co nejnižší viskozity pryskyřice viz. obr.36, pro docílení dostatečného prosycení pěnového jádra. Proto byla forma po dobu 20 minut ohřívána na teplotu 90 °C, což je nejvyšší možná teplota udávaná výrobcem pěnového jádra.



Obr. 34 Forma přichystaná k výrobě sendviče

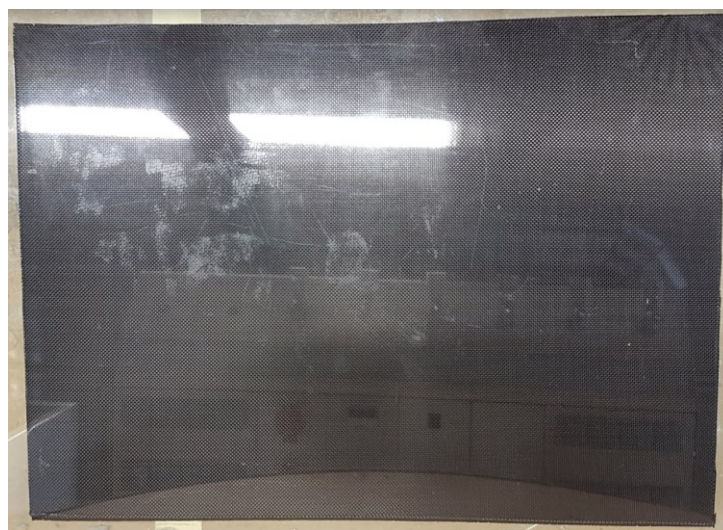


Obr. 35 Procesní podmínky první fáze vytvrzování v autoklávě



Obr. 36 Závislost viskozity pryskyřice na teplotě

Po vyjmutí formy z autoklávu se však ukázalo že doba ohřevu nebyla dostatečně dlouhá a nedošlo k prosycení sendviče pryskyřicí. Následně bylo přikročeno k dovytvrzovacímu cyklu, který se sestával z pozvolného náběhu na teplotu 90 °C po dobu 1 hodiny, výdrže na této teplotě po dobu 3,5 hodiny a pozvolného ochlazování na teplotu 40 °C po dobu 1 hodiny. To vše probíhalo za neustálého působení vnějšího přetlaku 1,5 Bar a působení vakua o velikosti -980 mBar. Následným odformováním bylo zjištěno, že prosycení a samotné spojení všech vrstev proběhlo úspěšně.



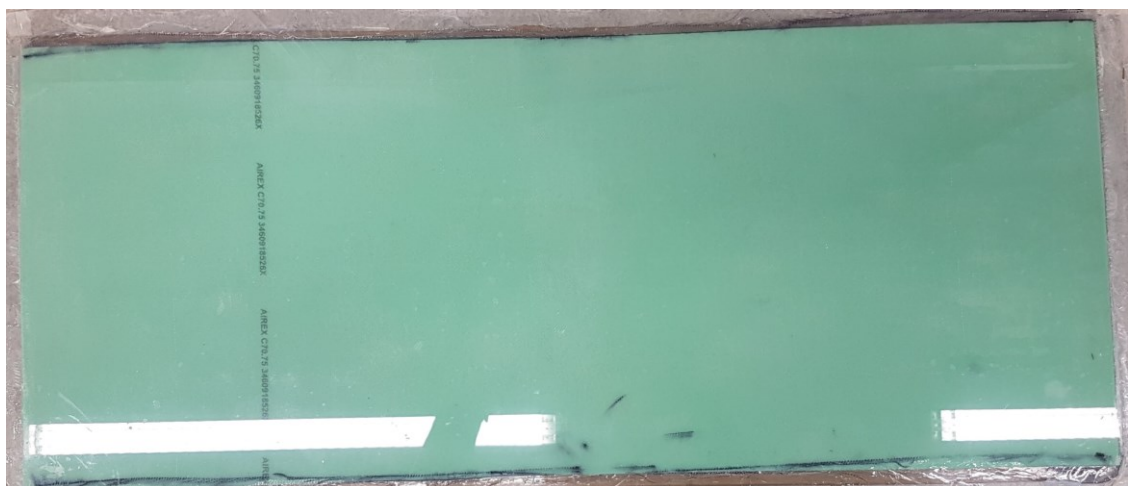
Obr. 37 Výsledný sendvičový panel vyrobený pomocí autoklávu

### 4.3 Technologie ruční laminace - vzorek 3

Třetí vzorek skládající se ze skelné tkaniny Havel Aeroglass o hustotě  $200\text{g/m}^2$ , PVC pěny Airex C70.75 a epoxidové pryskyřice L 285 s tužidlem Havel 285 (MGS) byl opět vyráběn pomocí ručního kladení. Celková hmotnost výztuže a jádra byla  $728,2\text{g}$ . Po připočtení 10% rezervy byla vypočítána hmotnost pryskyřice s tužidlem na  $801,2\text{g}$ . Pryskyřice s tužidlem byla míchána v poměru 100:40, tedy hmotnost pryskyřice činila  $572,2\text{g}$  a hmotnost tužidla  $228,9\text{g}$ . Následná výroba probíhala stejně jako v případě prvního vzorku a taktéž jeho složení a orientace tkaniny byly shodné, viz. obr. 38.



Obr. 38 Struktura vyráběného sendviče



Obr. 39 Vzorek 3 po odformování

### 4.4 Technologie ruční laminace s použitím vakua - vzorek 4

Pro výrobu čtvrtého vzorku byla zvolena metoda ruční laminace a následného vakuování. Použité materiály pro výrobu byly shodné s prvním vzorkem. Hmotnost výztuže a jádra byla  $572,9\text{g}$ , po přičtení rezervy vycházelo  $630,2\text{g}$  pryskyřice a tužidla. Při použití stejného poměru jako v předešlých případech činila hmotnost pryskyřice  $450,9\text{g}$  a hmotnost tužidla  $180\text{g}$ .

Ruční laminace probíhala shodně jako u výroby přechozích vzorků. Po dokončení poslední vrstvy byla položena na sendvič odtrhová folie a odsávací tkanina. Odtrhová folie zabezpečuje odtržení odsávací tkaniny od sendviče. Odsávací tkanina během vakuování

absorbuje přebytečnou pryskyřici ze sendviče, což by mělo zajistit lepší poměr výztuže ku pryskyřici a tím i lepší výsledné mechanické vlastnosti. Nakonec byl sendvič překryt vakuovací folií, ta byla přilepena k formě pomocí těsnící pásky. Ve středu formy byla pomocí spojky forma připojena ke zdroji vakua a ponechána k vytvrzení, obr. 40.



Obr. 40 Zavakuovaný vzorek 4

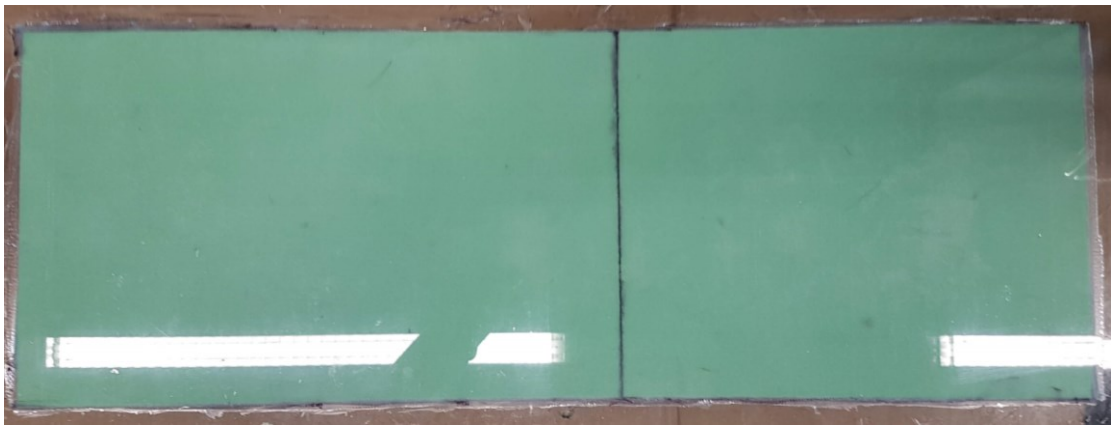
Po vytvrzení byla forma odpojena od zdroje vakua a byla odlepena vakuovací folie. Ze sendviče byla stržena odsávací tkanina a odtrhová folie. Poté byl sendvič odformován. Výsledek po odformování je zobrazen na obr.41.



Obr. 41 Vzorek 4 po odformování

#### 4.5 Technologie ruční laminace s použitím vakua - vzorek 5

Poslední vzorek byl složen stejně jako třetí vzorek ze skelné tkaniny ve stejné orientaci a pěnového jádra. Pro výrobu byla zvolena metoda ruční laminace a následného vakuování. Hmotnost výztuže a jádra činila 480,7g, tedy potřebná hmotnost pryskyřice a tužidla byla 528,8g. Po rozpočítání v poměru 100:40 pryskyřice ku tužidlu, byla potřebná hmotnost pryskyřice 337,8g a hmotnost tužidla 151g. Výroba sendviče probíhala naprosto shodně jako v předešlém případě. Po odformování vznikl sendvič viz. obr. 42.

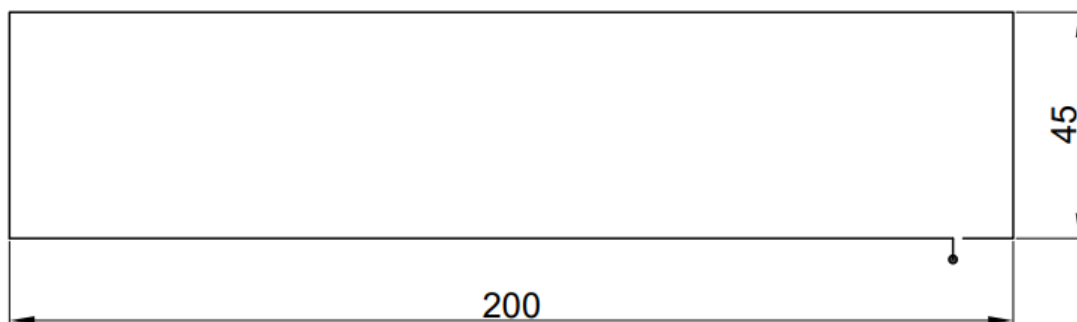


Obr. 42 Vzorek 5 po odformování



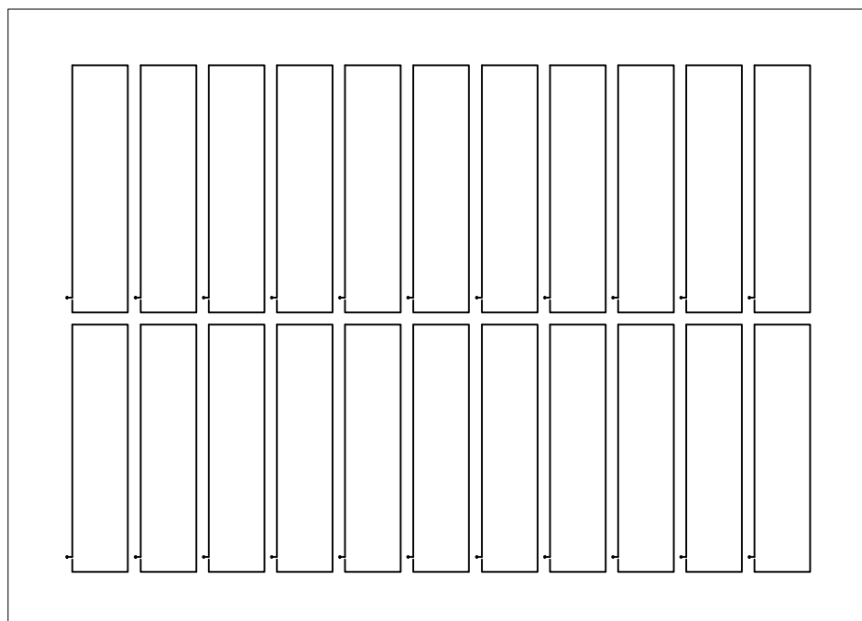
## 5 ŘEZÁNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro rozřezání sendvičových panelů na zkušební tělíska byla zvolena metoda řezání pomocí vodního paprsku. Řezání pobíhalo ve firmě Form s.r.o pomocí stroje PTV UniJet model WJ 3020-2Z-UJ-PJ. Velikost zkušebních tělísek byla zvolena na 200x45mm viz. obr. 43. Jelikož panely neměly shodné rozměry, musel být pro každý vytvořen zvlášť nářezový plán, který respektoval smysl orientace výztuže. Každé tělísko obsahovalo kruhový náběh vodního paprsku, který se nalézal mimo tělísko. Díky tomuto opatření nedocházelo k vzniku poškození v místě náběhu vodního paprsku. Dráha vodního paprsku netvořila celý obvod zkušebního tělíska, a to z důvodu, aby nedocházelo k vypadávání tělísek z panelu. Tělíska byla vyloupnuta z panelů až po jejich řádném označení.

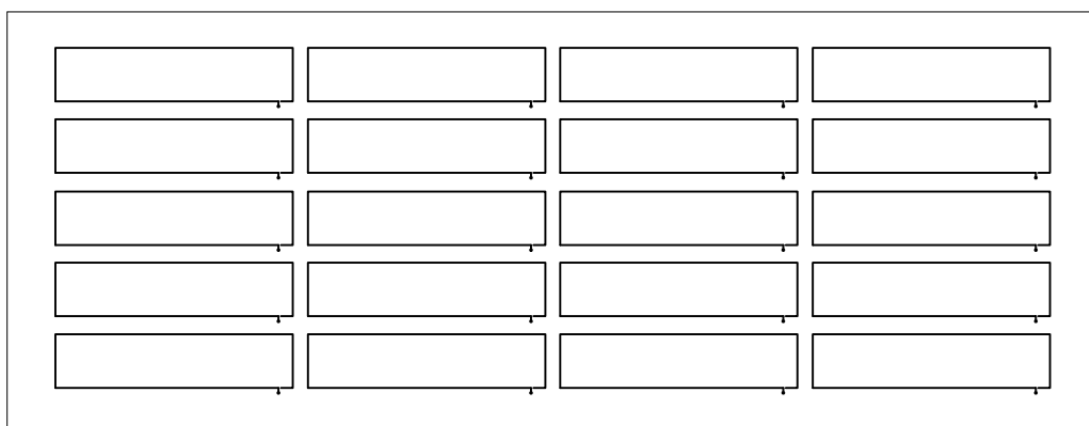


Obr. 43 Rozměry zkušebních tělísek

Tělíska byla rozmístěná do plochy desky tak, aby respektovala skladbu výztužné tkaniny. Zároveň byla umístěná dále od okrajů, které disponovaly řadou nedokonalostí způsobených ruční laminací. Vzhledem k různým rozměrům panelů, se lišil i výsledný počet zkušebních tělísek. Pro porovnání nářezový plán vzorku 2 (Obr.44) a vzorku 4 (Obr.45).



Obr. 44 Nářezový plán vzorku 2 vyráběného z prepregu



Obr. 45 Nářezový plán vzorku 4 vyráběného ruční laminací s vakuováním



Obr. 46 Sendvičový panel po rozřezání vodním paprskem

Řezání vodním paprskem se ukázalo jako ne zcela vhodné pro vzorky s výztuží ze skelné tkaniny. Zde docházelo k tvorbě delaminací po obvodu a také lokálních delaminací, což ovlivňuje mechanické vlastnosti tělísek. Tyto vady jsou zobrazeny na obrázcích 46-49.



Obr. 47 Delaminace zkušebního tělíka po řezání vodním paprskem (pohledová strana)



Obr. 48 Delaminace zkušebního tělíka po řezání vodním paprskem (nepohledová strana)



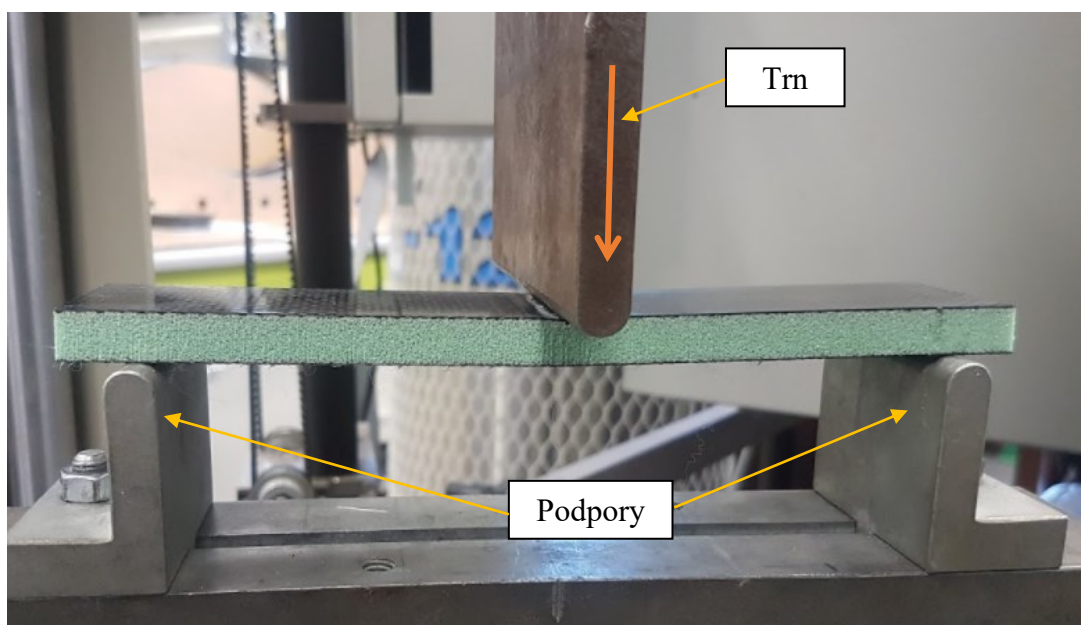
Obr. 49 Detail delaminace potahové vrstvy od jádra sendviče

## 6 ZKOUŠKY

Zkušební tělíska byla testována dvěma způsoby zatěžování. Nejdříve byly provedeny zkoušky statickým ohybem, z něž byla získána průměrná síla  $F_{max}$  při porušení a následně byla vypočtena síla  $F_{75\%}$  pro dynamické zatěžování.

### 6.1 Statická zkouška tříbodovým ohybem

Zkouška tříbodovým ohybem byla provedena pomocí stroje Zwick 1456 a její průběh byl zaznamenáván programe testXpert. Zkouška probíhala za pokojové teploty. Podmínky zkoušky vycházely z normy ČSN EN 14 125 pro statický tříbodový ohyb. Vzdálenost podpor byla nastavena na 170mm.



Obr. 50 Statický tříbodový ohyb

Při zkoušce statickým tříbodovým ohybem byla zaznamenávána následující data:

- $E_o$  [MPa] – modul pružnosti v ohybu.
- $F_{max}$  [N; MPa] – maximální síla.
- $\sigma_o$  [MPa]- ohybové napětí.
- $y_{Fmax}$  [mm] – průhyb zkušebního tělíska.
- $\varepsilon$  [%] – poměrná deformace.
- $W$  [N·mm] – práce potřebná k porušení tělíska.

V následující tabulce se nachází naměřené hodnoty ze zkoušky statickým tříbodovým ohybem.

Tabulka 1 Výsledky statické zkoušky ohybem

	č	$E_o$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\epsilon$ [%]	$\sigma_o$ [Mpa]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W$ [N·mm]
VAKUOVÁNÍ SKELNÁ TKANINA	1	2080	513	1,2	23,2	5	1339,67
	2	2110	432	1	19,5	4,3	961,7
	3	2130	458	1,1	20,7	4,5	1088,91
	4	1880	440	1,1	19,9	4,5	1001,73
	5	2110	391	0,9	17,6	3,9	786,76
	6	2120	422	1	19,1	4,2	917,63
RUČNÍ LAMINACE SKELNÁ TKANINA	1	1920	424	1	17,6	4	915,12
	2	2000	515	1,1	21,3	4,4	1135,92
	3	2070	445	1	18,4	3,9	893,83
	4	2140	457	0,9	18,9	3,9	894,21
	5	2180	479	1	19,8	4	978,37
VAKUOVÁNÍ UHĹÍKOVÁ TKANINA	1	4240	833	1	34,5	4,3	2081,91
	2	4150	810	1	33,5	4	1819,89
	3	4070	790	1,1	32,7	4,5	2084,42
	4	4220	806	1	33,3	4,1	1962,6
	5	4020	738	1,1	30,6	4,4	1954,86
	6	4120	852	1,2	35,3	4,8	2454,36
RUČNÍ LAMINACE UHĹÍKOVÁ TKANINA	1	4240	703	0,9	29,6	3,9	1638,93
	2	4180	687	0,9	28,9	3,9	1599,27
	3	4170	705	0,9	29,7	3,8	1577,22
	4	4240	758	1	31,9	4,2	1880,25
	5	4220	738	1	31,1	4,1	1810,32
	6	4140	699	1	29,4	4	1647,15
UHĹÍKOVÝ PPREPREG + AUTOKLÁV	1	4770	557	0,6	28,1	2,9	831,31
	2	4820	534	0,6	27,3	2,8	766,24
	3	4730	541	0,6	27,5	2,9	783,27
	4	4820	546	0,6	27,5	2,8	779,63
	5	4750	556	0,6	28	2,9	829,03
	6	4730	527	0,6	26,8	2,8	747,62

Z naměřených dat byly pomocí programu testXpert vypočteny následující data:

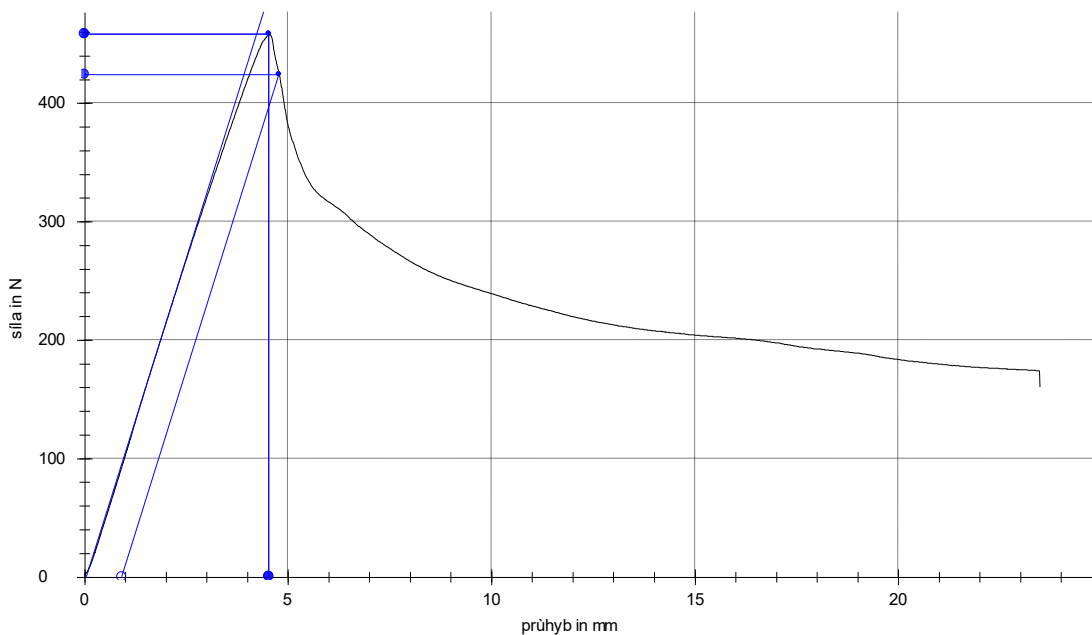
- $\bar{x}$  – průměrná hodnota.
- $s$  – směrodatná odchylka.
- $V$  – variační koeficient.

### Vakuování – skelná tkanina

Z dat naměřených u vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí vakuování nám vychází průměrný modul pružnosti  $E_o$  ( $2070 \pm 96$ ) MPa, dále průměrná síla při porušení  $F_{max}$  ( $443 \pm 42$ ) N, stanovení této síly u jednotlivých vzorků lze pozorovat na obr. 51. Při této síle docházelo k poměrné deformaci  $\varepsilon$  ( $1,0 \pm 0,1$ ) %. Průměrné ohybové napětí dosahovalo  $\sigma_o$  ( $20,0 \pm 1,9$ ) MPa a to při průměrném průhybu  $y_{F_{max}}$  ( $4,4 \pm 0,4$ ) mm, závislosti ohybového napětí na průhybu všech vzorků lze pozorovat na obr. 52. Průměrná práce pro dosažení síly  $F_{max}$  byla  $W$  ( $1016 \pm 190$ ) N·mm.

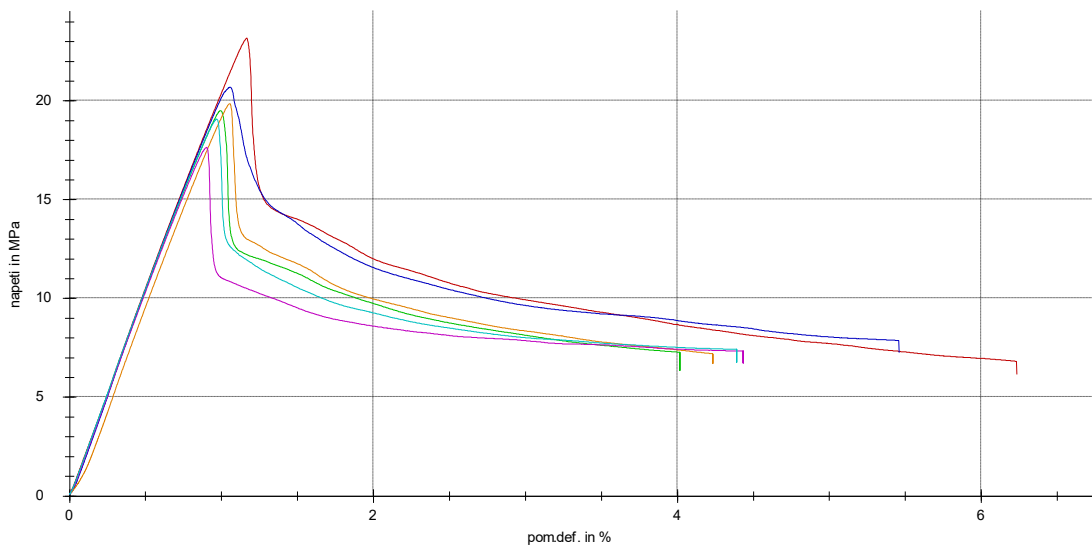
Tabulka 2 Průměrné hodnoty vakuování - skelná tkanina

$n = 6$	$E_o$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_o$ [Mpa]	$y_{F_{max}}$ [mm]	$W$ [N·mm]
$\bar{x}$	2070	443	1	20	4,4	1016,07
$s$	95,4	41,1	0,1	1,86	0,4	187,33
$V$	4,61	9,29	8,94	9,29	8,94	18,44



Obr. 51 Závislost působící síly na průhybu vzorku se skelnou tkaninou vyrobeném vakuováním

Graf viz. obr. 51 popisuje průběh síly v závislosti na průhybu zkušebního tělíska během zkoušky statickým tříbodovým ohybem. Z grafu je odečtena největší působící síla, poté je tělísko považováno za porušené.



Obr. 52 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí vakuování



Obr. 53 Poškozené zkušební tělísko po zkoušce statickým tříbodovým ohybem

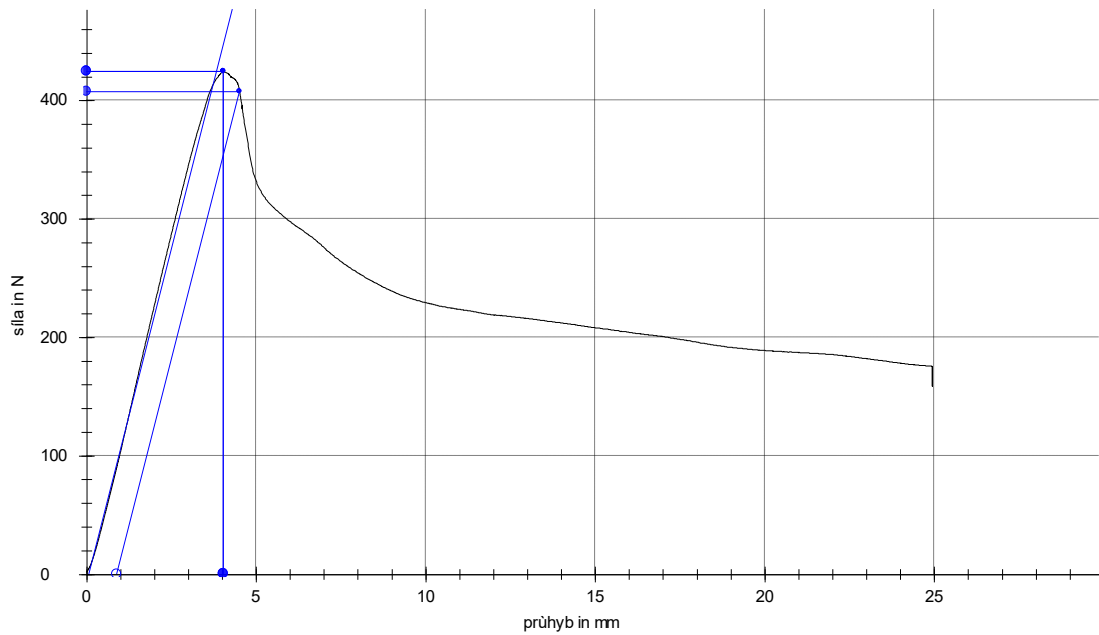
Graf viz. obr. 52 popisuje průběh napětí v závislosti na poměrné deformaci zkušebního tělíška. V grafu jsou zaznamenány průběhy zkoušek všech tělíšek pro sérii vyrobenou ze skelné tkaniny pomocí vakuování.

### Ruční laminace – skelná tkanina

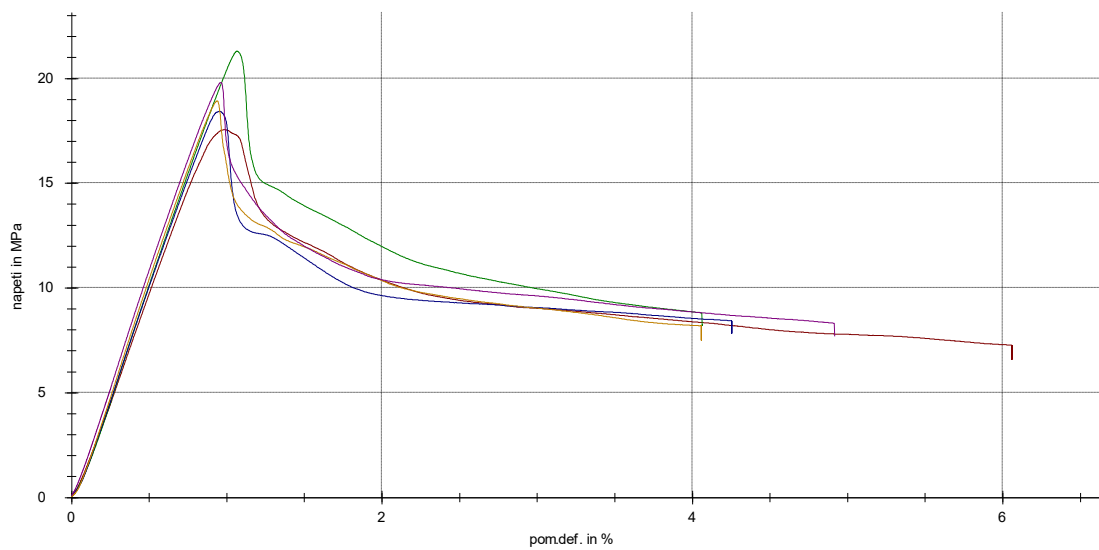
Z dat naměřených u vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí ruční laminace nám vychází průměrný modul pružnosti  $E_0$  ( $2060 \pm 105$ ) MPa, dále průměrná síla při porušení  $F_{max}$  ( $464 \pm 35$ ) N, stanovení této síly u jednotlivých vzorků lze pozorovat na obr. 54. Při této síle docházelo k poměrné deformaci  $\varepsilon$  ( $1,0 \pm 0,1$ ) %. Průměrné ohybové napětí dosahovalo  $\sigma_0$  ( $19,2 \pm 1,5$ ) MPa a to při průměrném průhybu  $y_{F_{max}}$  ( $4,0 \pm 0,2$ ) mm, závislosti ohybového napětí na průhybu všech vzorků lze pozorovat na obr. 55. Průměrná práce pro dosažení síly  $F_{max}$  byla  $W$  ( $964 \pm 102$ ) N·mm.

Tabulka 3 Průměrné hodnoty Ruční laminace – skelná tkanina

$n = 5$	$E_o$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_o$ [Mpa]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W$ [N·mm]
$\bar{x}$	2060	464	1	19,2	4	963,49
$s$	105	34,5	0,1	1,43	0,2	102,4
$V$	5,1	7,44	5,16	7,44	5,16	10,63



Obr. 54 Závislost působící síly na průhybu vzorku se skelnou tkaninou vyrobeném ruční laminací



Obr. 55 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí ruční laminace

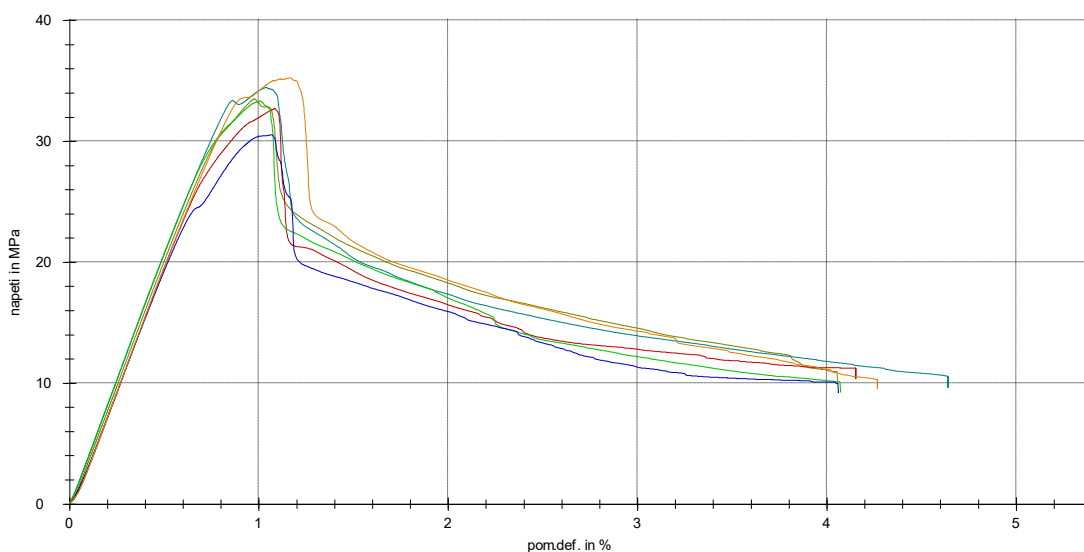


### Vakuování – uhlíková tkanina

Z dat naměřených u vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených pomocí vakuování nám vychází průměrný modul pružnosti  $E_o$  ( $4140 \pm 85$ ) MPa, dále průměrná síla při porušení  $F_{max}$  ( $805 \pm 40$ ) N. Při této síle docházelo k poměrné deformaci  $\varepsilon$  ( $1,1 \pm 0,1$ ) %. Průměrné ohybové napětí dosahovalo  $\sigma_o$  ( $33,3 \pm 1,7$ ) MPa a to při průměrném průhybu  $y_{Fmax}$  ( $4,3 \pm 0,3$ ) mm, závislosti ohybového napětí na průhybu všech vzorků lze pozorovat na obr. 56. Průměrná práce pro dosažení síly  $F_{max}$  byla  $W$  ( $2060 \pm 220$ ) N·mm.

Tabulka 4 Průměrné hodnoty vakuování – uhlíková tkanina

$n = 6$	$E_o$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_o$ [Mpa]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W$ [N·mm]
$\bar{x}$	4140	805	1,1	33,3	4,3	2059,67
$s$	84,9	39,1	0,1	1,62	0,3	216,7
$V$	2,05	4,86	6,29	4,86	6,29	10,52



Obr. 56 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených pomocí vakuování

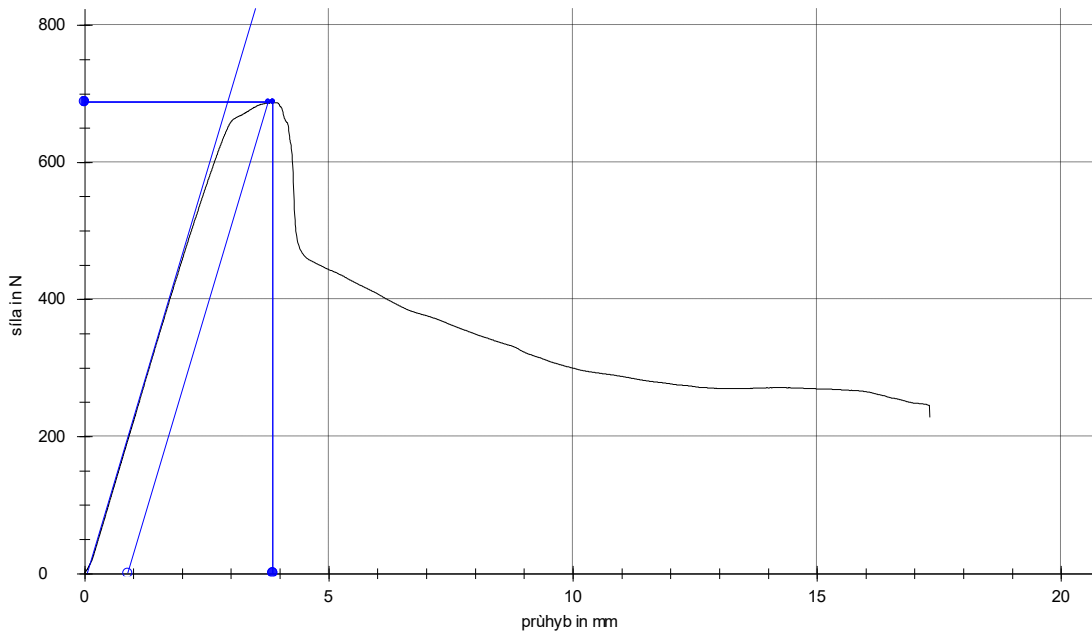
### Ruční laminace – uhlíková tkanina

Z dat naměřených u vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených ručního laminování nám vychází průměrný modul pružnosti  $E_o$  ( $4200 \pm 43$ ) MPa, dále průměrná síla při porušení  $F_{max}$  ( $715 \pm 28$ ) N, stanovení této síly u jednotlivých vzorků lze pozorovat na obr. 57. Při této síle docházelo k poměrné deformaci  $\varepsilon$  ( $1 \pm 0$ ) %. Průměrné ohybové napětí dosahovalo  $\sigma_o$  ( $30,1 \pm 1,2$ ) MPa a to při průměrném průhybu  $y_{Fmax}$  ( $4,0 \pm 0,1$ ) mm, závislosti ohybového napětí

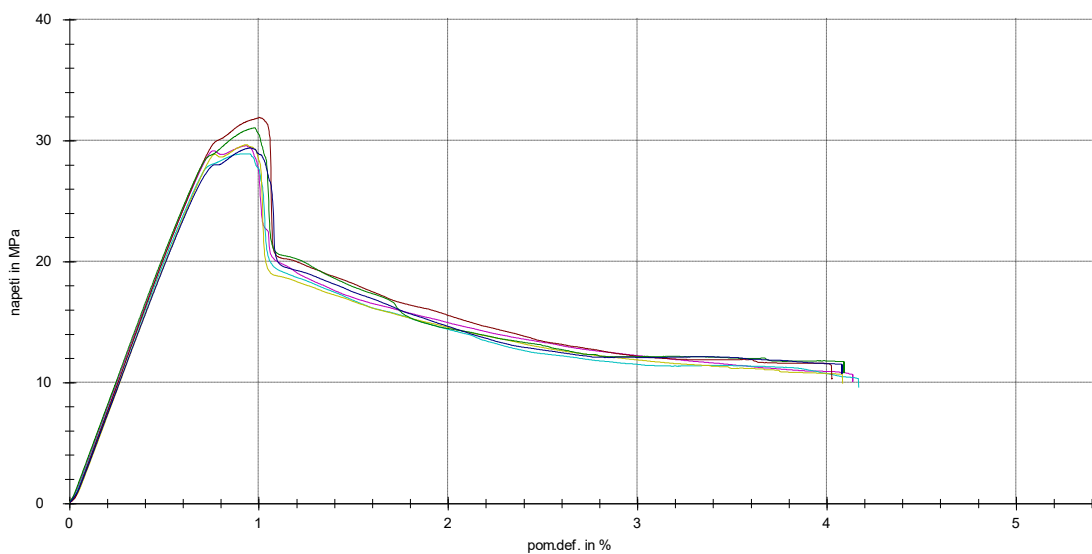
na průhybu všech vzorků lze pozorovat na obr. 58. Průměrná práce pro dosažení síly  $F_{max}$  byla  $W$  ( $1690 \pm 130$ ) N·mm.

Tabulka 5 Průměrné hodnoty Ruční laminace – uhlíková tkanina

$n = 6$	$E_o$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\epsilon$ [%]	$\sigma_o$ [Mpa]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W$ [N·mm]
$\bar{x}$	4200	715	1	30,1	4	1692,19
$s$	42,6	27,2	0	1,15	0,1	123,32
$V$	1,01	3,81	3,25	3,81	3,25	7,29



Obr. 57 Závislost působící síly na průhybu vzorku s uhlíkovou tkaninou vyrobeném ruční laminací



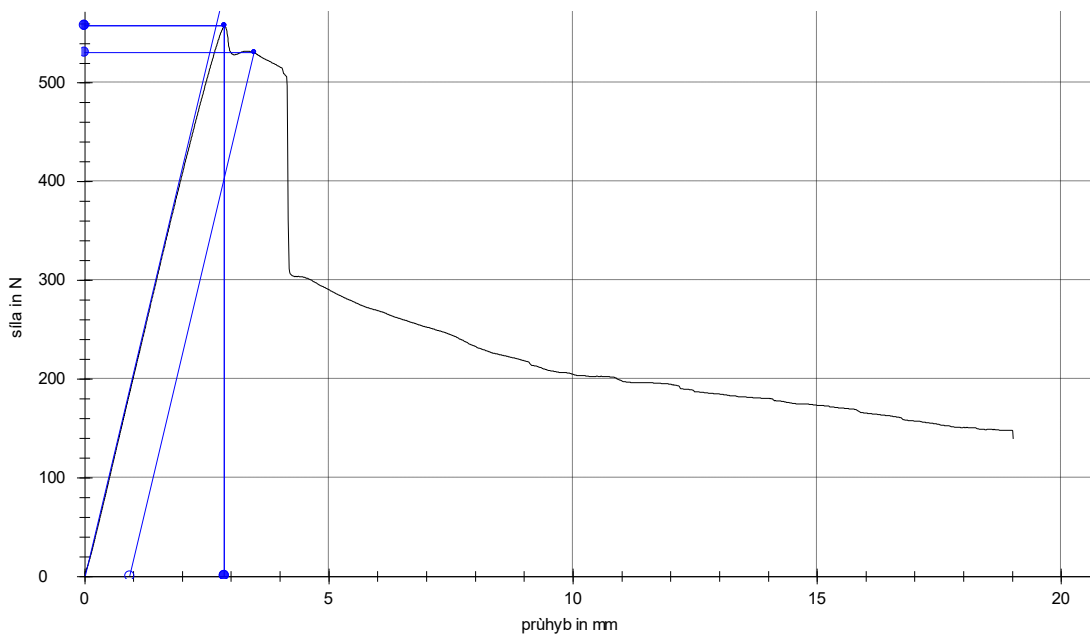
Obr. 58 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených pomocí ruční laminace

### Uhlíkový prepreg + autokláv

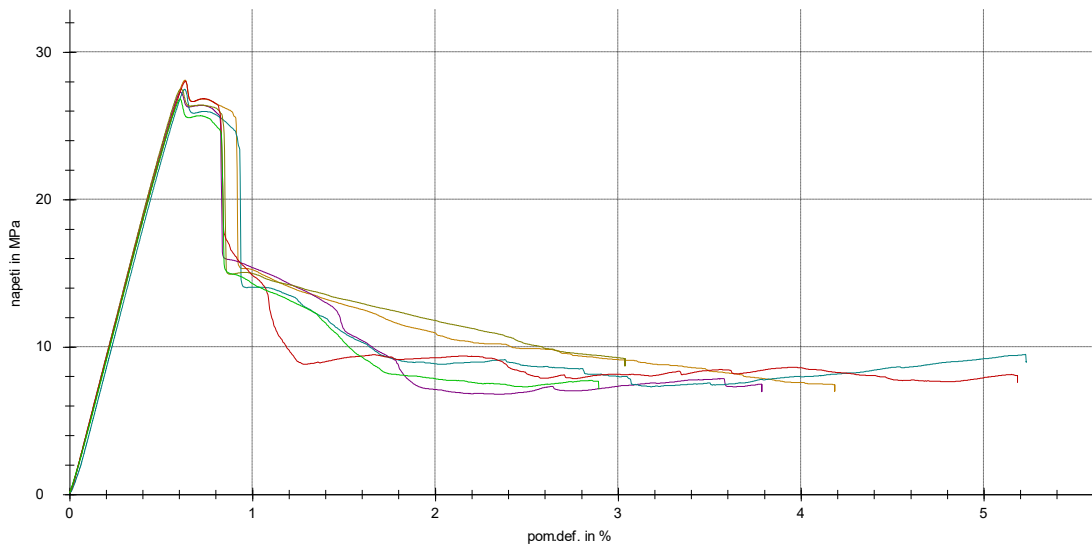
Z dat naměřených u vzorků z uhlíkového prepregu vyrobených v autoklávě nám vychází průměrný modul pružnosti  $E_0$  ( $4770 \pm 44$ ) MPa, dále průměrná síla při porušení  $F_{max}$  ( $544 \pm 12$ ) N, stanovení této síly u jednotlivých vzorků lze pozorovat na obr. 59. Při této síle docházelo k poměrné deformaci  $\varepsilon$  ( $0,6 \pm 0$ ) %. Průměrné ohybové napětí dosahovalo  $\sigma_0$  ( $27,50 \pm 0,48$ ) MPa a to při průměrném průhybu  $y_{F_{max}}$  ( $2,8 \pm 0,1$ ) mm, závislosti ohybového napětí na průhybu všech vzorků lze pozorovat na obr. 60. Průměrná práce pro dosažení síly  $F_{max}$  byla  $W$  ( $790 \pm 34$ ) N·mm.

Tabulka 6 Průměrné hodnoty Uhlíkový prepreg + autokláv

$n = 6$	$E_0$ [Mpa]	$F_{max}$ [N]	$\varepsilon$ [%]	$\sigma_0$ [Mpa]	$y_{F_{max}}$ [mm]	$W$ [N·mm]
$\bar{x}$	4770	544	0,6	27,5	2,8	789,52
$s$	43,3	12	0	0,477	0,1	33,89
$V$	0,91	2,2	2,26	1,73	2,11	4,29



Obr. 59 Závislost působící síly na průhybu vzorku z uhlíkového prepregu vyrobeném v autoklávě



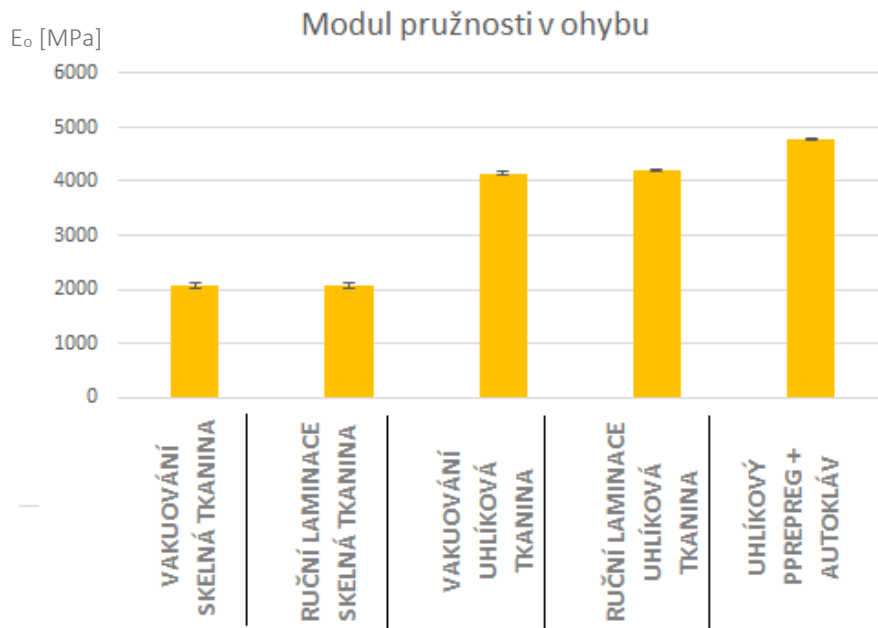
Obr. 60 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků z uhlíkového prepregu vyrobených v autoklávu

## 6.2 Vyhodnocení výsledků zkoušky statickým tříbodovým ohybem

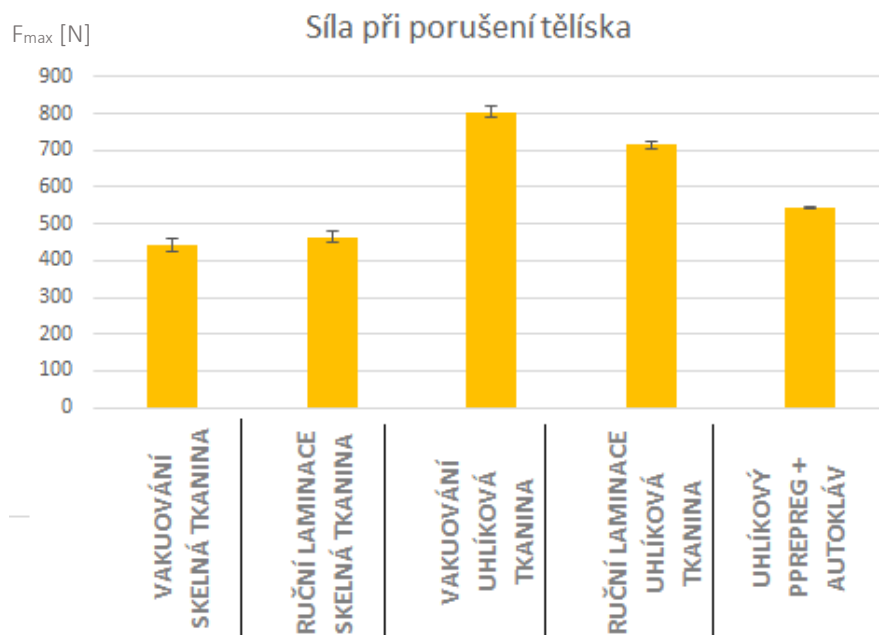
Z výsledků ohybové zkoušky viz. graf obr.61 je patrné, že velikost modulu pružnosti v ohybu  $E_o$  u vzorků vyztužených uhlíkovou tkaninou je více jak dvounásobná v porovnání se vzorky s výztuží ze skelné tkaniny. Taktéž velikost maximální síly  $F_{max}$  při porušení vzorku viz obr. 62 je výrazně vyšší, s výjimkou vzorků vyrobených z uhlíkového prepregu, kde se tato hodnota spíše blíží velikosti síly u vzorků s výztuží ze skelné tkaniny, což může být způsobeno jinou skladbou tkaniny použité při ruční výrobě a při výrobě z prepregu. Velikost poměrné deformace  $\varepsilon$  je u vzorků vyrobených ruční laminací a pomocí vakuování téměř stejná, u vzorků vyrobených v autoklávu je tato hodnota téměř poloviční. Ohybové napětí  $\sigma_o$  je u vzorků viz. obr 63 vyztužených skelnou tkaninou téměř stejné, toto platí i pro vzorky z uhlíkové tkaniny. Práce  $W$  pro dosažení maximální síly  $F_{max}$  byla u vzorků vyrobených vakuováním vyšší než u vzorků vyrobených ruční laminací. Nejmenší velikost práce byla u vzorků vyrobených v autoklávu viz. obr 64. Při porovnání jednotlivých výrobních metod lze konstatovat, že vakuování oproti ruční laminaci neposkytlo v tomto případě vzorkům výrazněji lepší mechanické vlastnosti. Výroba vzorků v autoklávu poskytla vzorkům vyšší hodnotu modulu  $E_o$ , ale k poškození vzorků docházelo již při nižší zatěžující síle.

Tabulka 7 Průměrné hodnoty všech naměřených dat

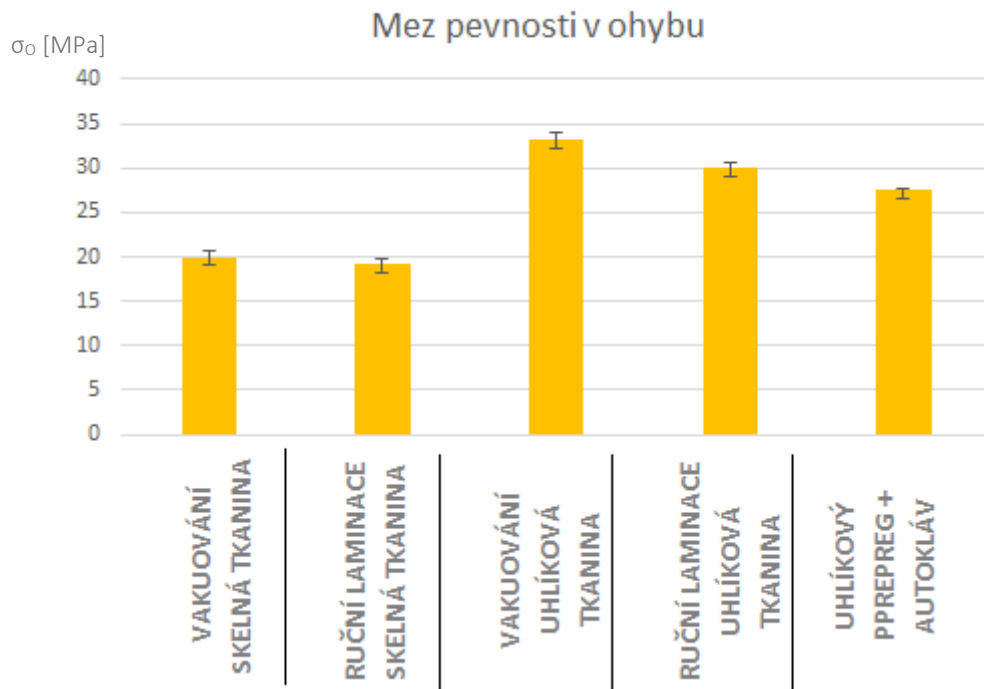
	$E_o$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$\epsilon$ [%]	$\sigma_o$ [MPa]	$y_{Fmax}$ [mm]	$W$ [N·mm]
Vakování - skelná tkanina	2070	443	1	20	4,4	1016
Ruční laminace - skelná tkanina	2060	464	1	19,2	4	964
Vakování - uhlíková tkanina	4140	805	1,1	33,3	4,3	2060
Ruční laminace - uhlíková tkanina	4200	715	1	30,1	4	1692
Uhlíkový prepreg + autokláv	4770	544	0,6	27,5	2,8	790



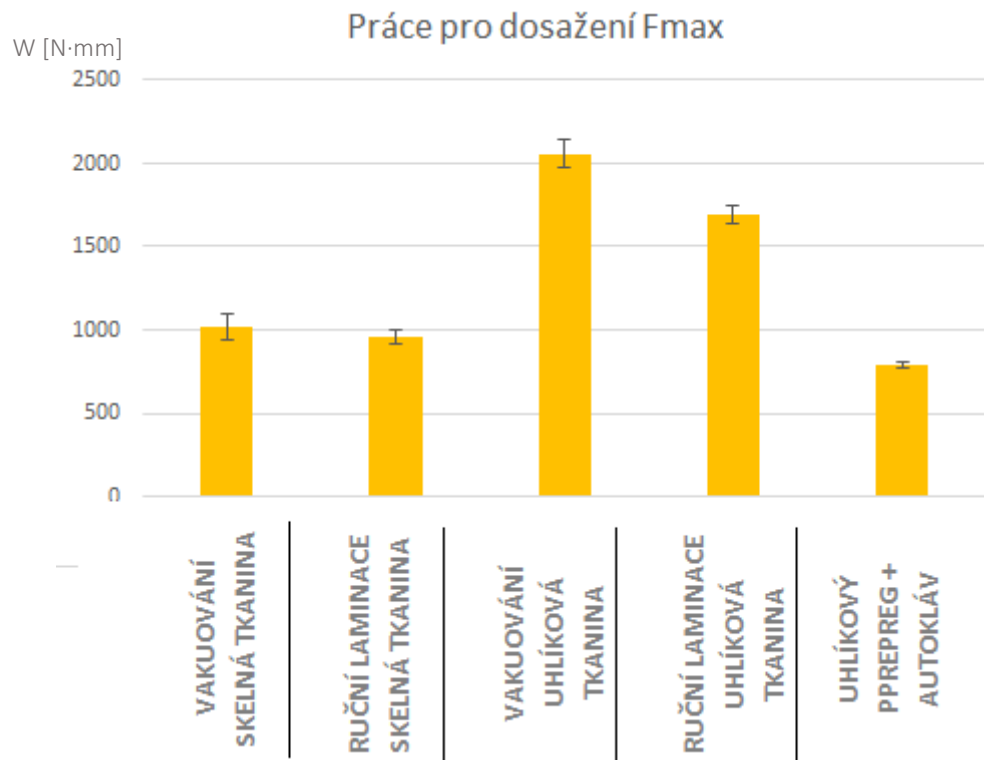
Obr. 61 Porovnání modulu pružnosti v ohybu  $E_o$



Obr. 62 Porovnání sil při porušení tělísek  $F_{max}$



Obr. 63 Porovnání ohybového napětí zkušebních tělísek

Obr. 64 Porovnání průměrné práce pro dosažení  $F_{max}$

### 6.3 Únavová zkouška cyklickým ohybem

Zkoušení únavových vlastností sendvičových laminátových struktur probíhalo pomocí stroje Zwick/Roell HC 25 Compact. Jedná se o univerzální stroj, díky kterému je možno provádět tahové či tlakové zkoušky a zkoušky únavy materiálu při zatížení do 25 kN.

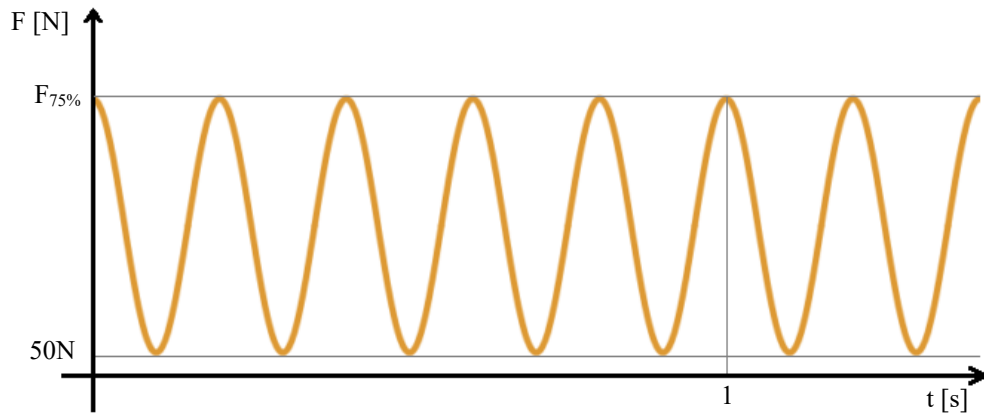


Obr. 65 Zkušební stroj Zwick/Roell HC 25 Compact

Rozteče podpor byly nastaveny shodně jako při zkoušce statickým tříbodovým ohybem a to na 170 mm. Pro zatěžování zkušebních tělísek byl zvolen sinusový průběh, kde minimální zatěžující silou byl a síla o velikosti 50 N a velikost maximální zatěžující síly byla zvolena na hodnotu 75% z průměrné maximální síly  $F_{max}$  pro danou sérii vzorků. Testování probíhalo při frekvenci 5 Hz. Toto je popsáno v grafu viz. obr. 61.

Tabulka 8 Hodnoty maximálních zatěžujících sil při cyklickém zatěžování

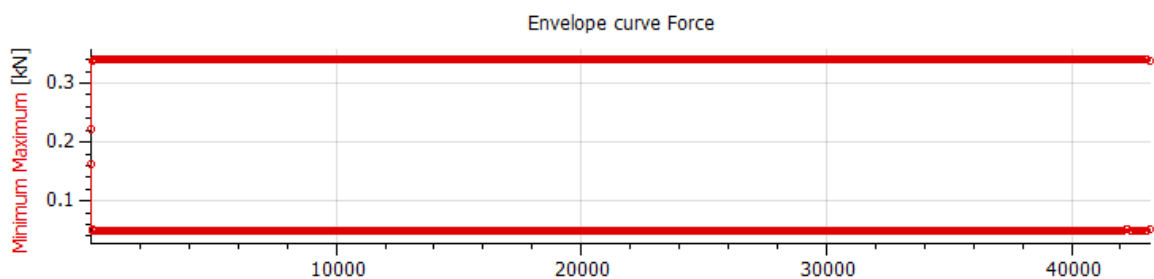
	$F_{max}$ [N]	$F_{75\%}$ [N]
Vaukování - skelná tkanina	443	340
Ruční laminace - skelná tkanina	464	350
Vaukování - uhlíková tkanina	805	604
Ruční laminace - uhlíková tkanina	715	536
Uhlíkový prepreg + autokláv	544	408



Obr. 66 Sinusové zatěžování zkušebních tělísek

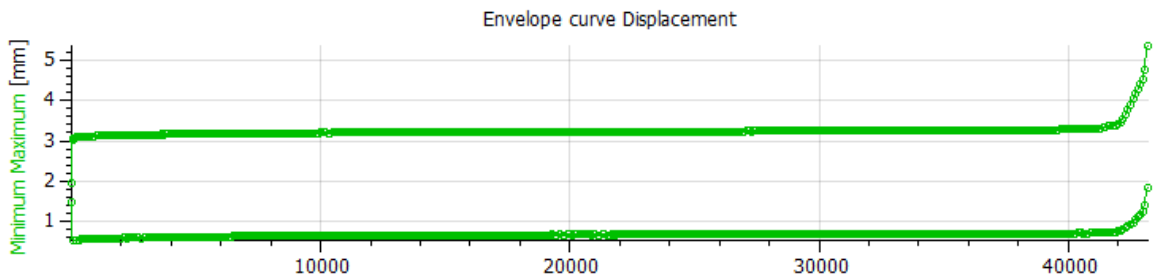
### Vakuování – skelná tkanina

Zatěžování vzorků vyrobených s výztuží ze skelné tkaniny pomocí vakuování probíhalo silou v rozpětí od 50 do 340 N viz. obr. 67. Na tomto obrázku je patrné, že tyto zatěžující síly byly konstantní po celou dobu zatěžování vzorku a ke změně došlo jen při porušení vzorku.

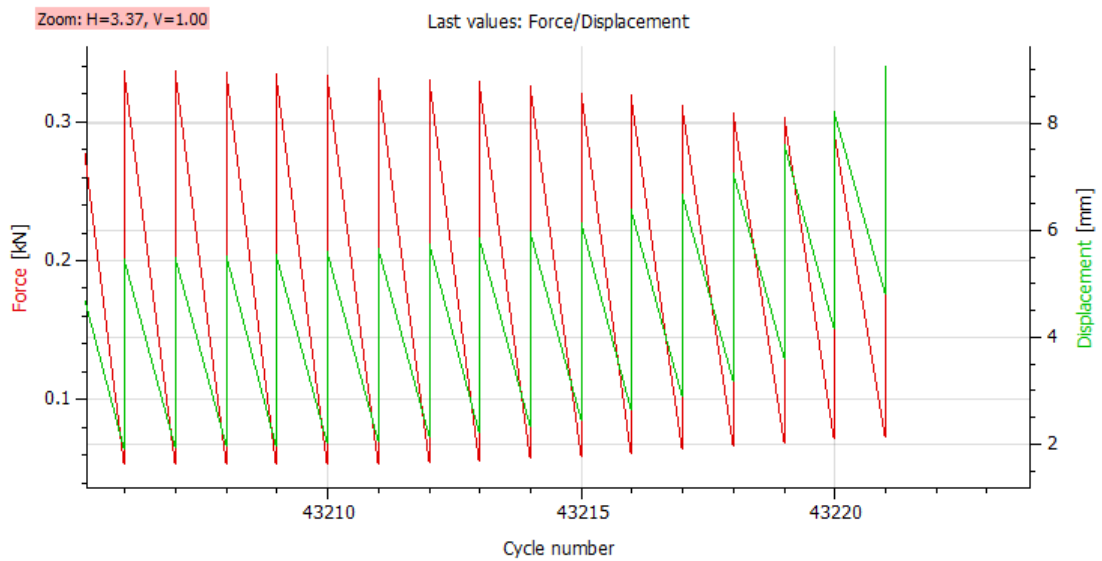
Obr. 67 Záznam zatěžujících sil během  $F_{max}$  a  $F_{min}$  během cyklické zkoušky

Následně lze pozorovat záznam velikosti prohnutí vzorku způsobeného maximální a minimální zatěžující silou viz. ob. 68. Velikost prohnutí významněji narůstá pouze na začátku zkoušky a poté dochází jen k velmi malému pozvolnému nárůstu velikosti prohnutí až do doby, kdy se na vzorku začíná projevovat únava vlivem zatěžování. S narůstající únavou dochází k výraznému narůstání velikosti průhybu až do samotného porušení vzorku. Tento nárůst je patrný na obr. 69, kde se nachází detailní pohled na poslední cykly zatěžování. Dochází k výraznému nárůstu prohnutí a zároveň k poklesu působící síly.



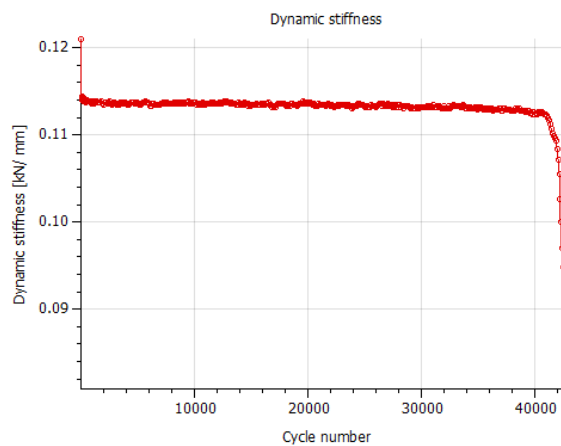


Obr. 68 Záznam velikosti průhybu zk. tělíska během cyklické zkoušky



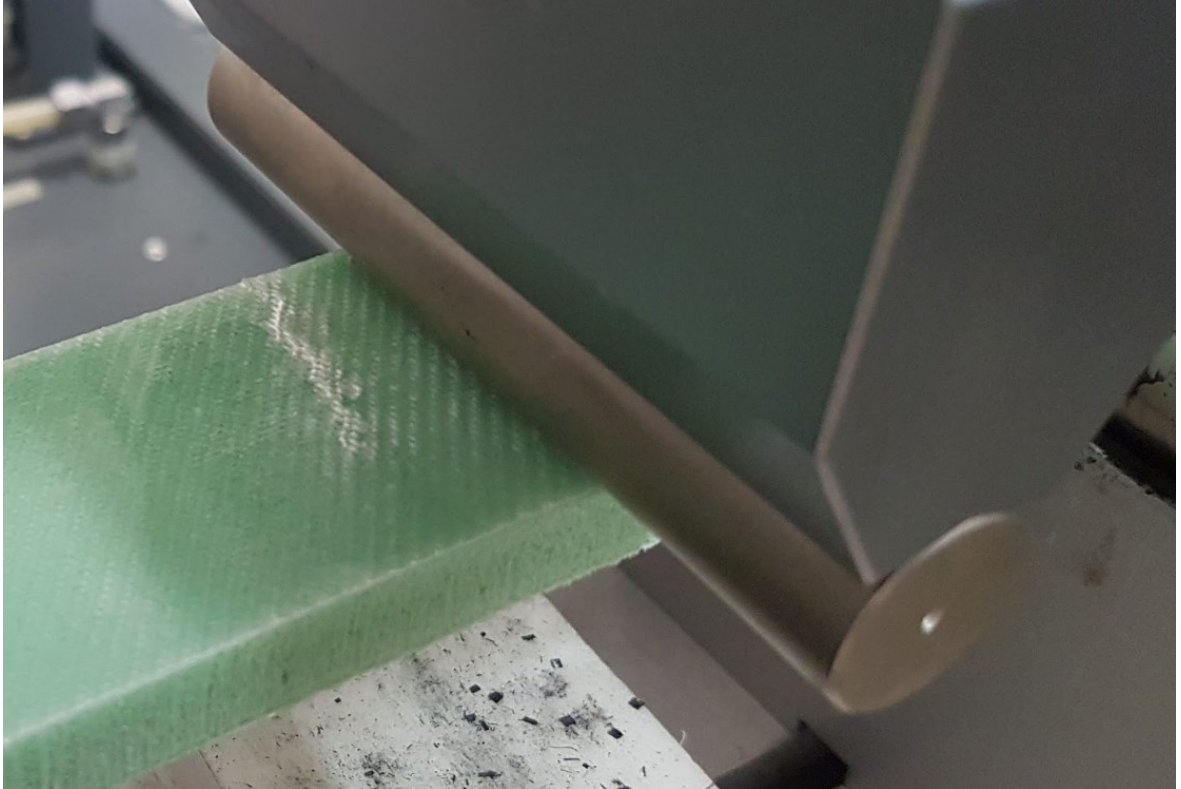
Obr. 69 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíska

Cyklováním povolna klesá tuhost vzorku. U konce zkoušky lze pozorovat výrazný pokles tuhosti vzorku až po úplnou ztrátu tuhosti (porušení vzorku) viz. obr. 70.



Obr. 70 Pokles tuhosti zk. tělíska během cyklické zkoušky

S narůstající únavou vzorku se začínají tvořit únavové poruchy viz. obr. 71. tyto poruchy se vyskytovaly pouze na „tlakové“ straně vzorku. Vlivem těchto poruch započal pokles tuhosti vzorku následovaný porušením viz. obr. 72.



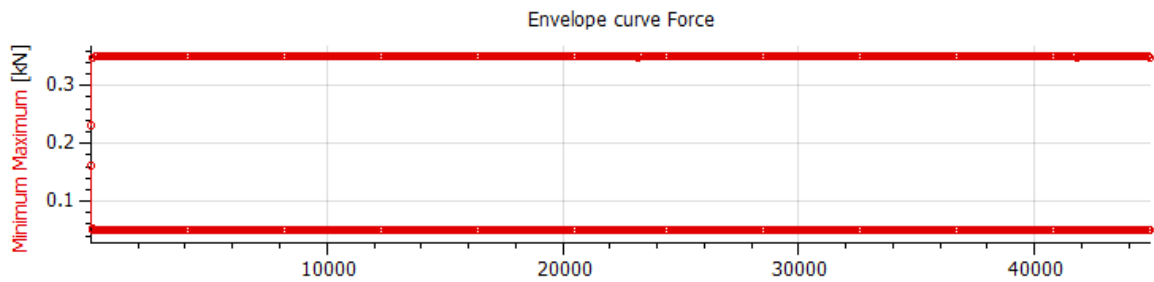
Obr. 71 Tvorba únavové poruchy



Obr. 72 Únavový lom

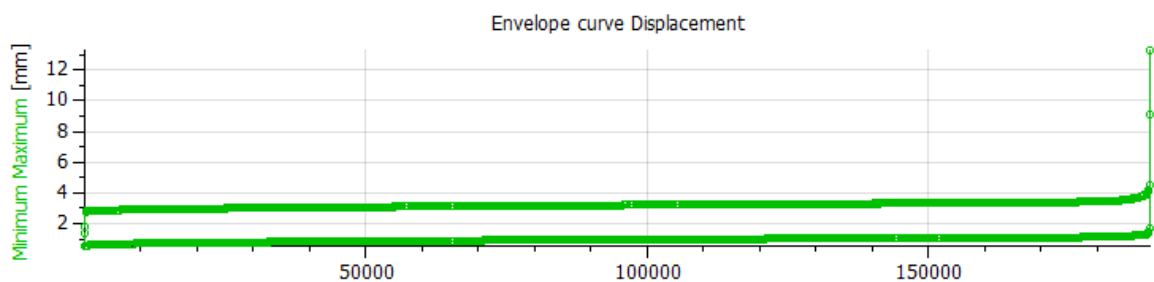
### Ruční laminace – skelná tkanina

Zatěžování vzorků vyrobených s výztuží ze skelné tkaniny pomocí ruční laminace probíhalo silou v rozpětí od 50 do 350 N viz. obr. 73. Na tomto obrázku je patrné, že tyto zatěžující síly byly konstantní po celou dobu zatěžování vzorku a ke změně došlo jen při porušení vzorku.

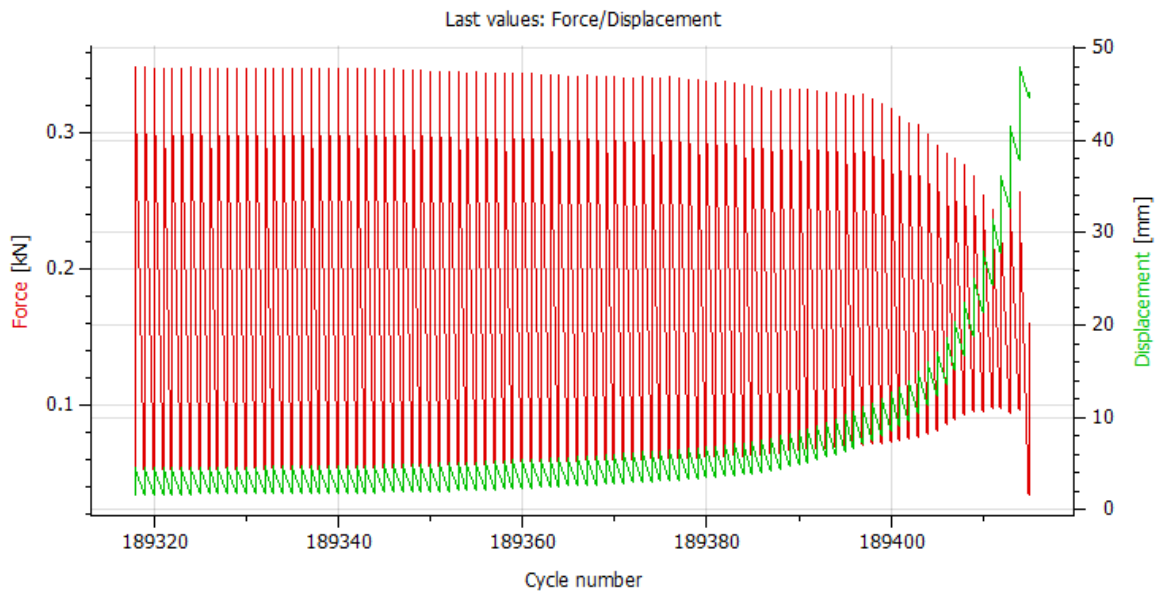


Obr. 73 Záznam zatěžujících sil během  $F_{max}$  a  $F_{min}$  během cyklické zkoušky

Následně lze pozorovat záznam velikosti prohnutí vzorku způsobeného maximální a minimální zatěžující silou viz. ob. 74. Velikost prohnutí významněji narůstá pouze na začátku zkoušky a poté dochází jen k velmi malému pozvolnému nárůstu velikosti prohnutí až do doby, kdy se na vzorku začíná projevovat únava vlivem zatěžování. S narůstající únavou dochází k výraznému narůstání velikosti průhybu až do samotného porušení vzorku. Tento nárůst je patrný na obr. 75, kde se nachází detailní pohled na poslední cykly zatěžování. Dochází k výraznému nárůstu prohnutí a zároveň k poklesu působící síly.

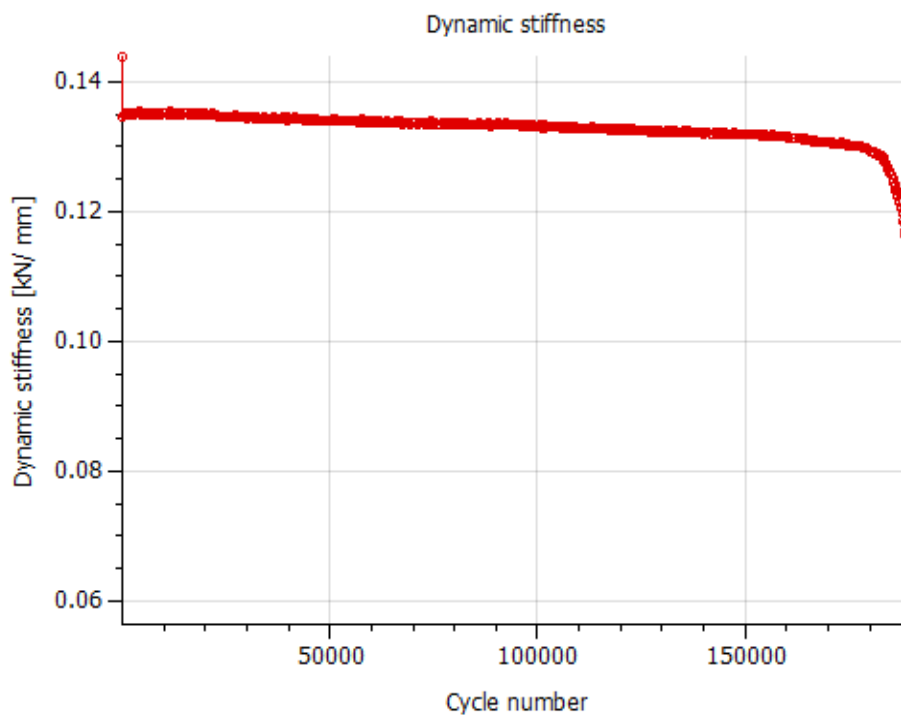


Obr. 74 Záznam velikosti průhybu zk. tělíska během cyklické zkoušky



Obr. 75 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíska

Cyklováním pozvolna klesá tuhost vzorku. U konce zkoušky lze pozorovat výrazný pokles tuhosti vzorku až po úplnou ztrátu tuhosti (porušení vzorku) viz. obr. 76.

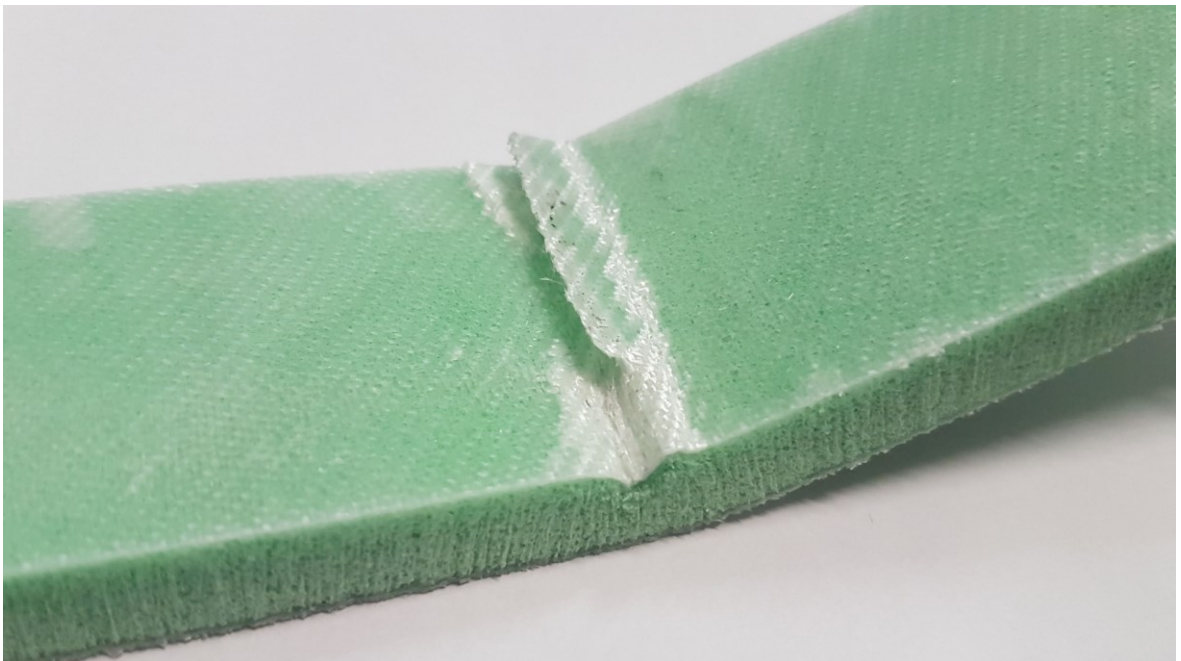


Obr. 76 Tuhost vzorku během cyklování

S narůstající únavou vzorku se začínají tvořit únavové poruchy viz. obr. 77. tyto poruchy se vyskytovaly pouze na „tlakové“ straně vzorku. Vlivem těchto poruch započal pokles tuhosti vzorku následovaný porušením viz. obr. 78. Na rozdíl od vzorků vyrobených vakuováním, docházelo u vzorků vyrobených ruční laminací k přetržení potahové vrstvy.



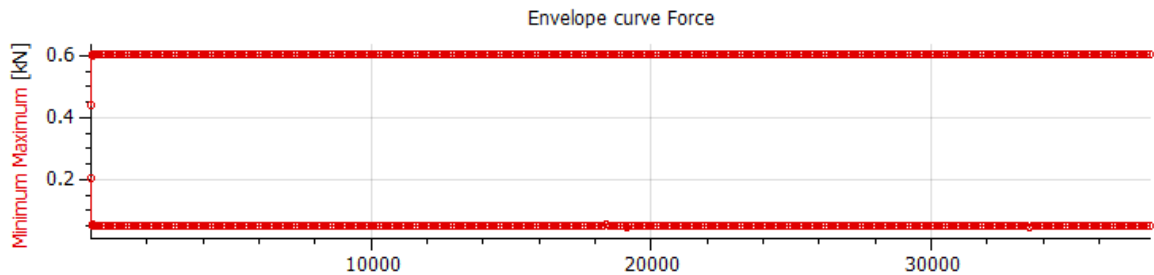
Obr. 77 Tvorba únavové poruchy



Obr. 78 Únavový lom

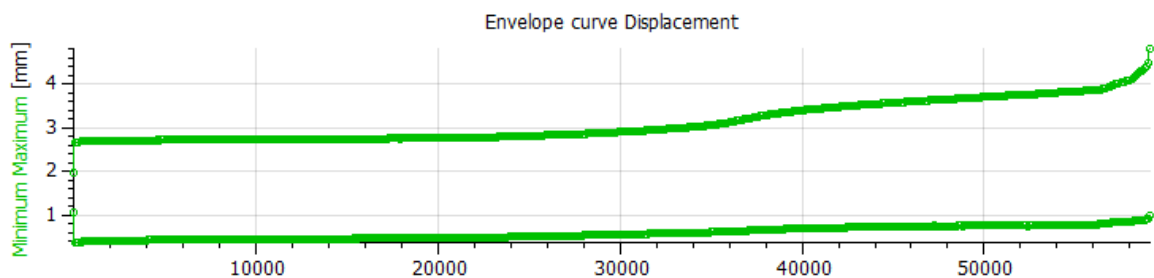
### Vakuování – uhlíková tkanina

Zatěžování vzorků vyrobených s výztuží z uhlíkové tkaniny pomocí vakuování probíhalo silou v rozpětí od 50 do 604 N viz. obr. 79. Na tomto obrázku je patrné, že tyto zatěžující síly byly konstantní po celou dobu zatěžování vzorku.

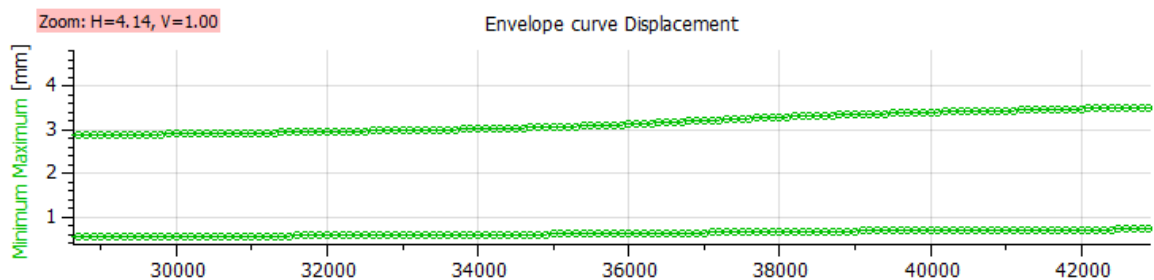


Obr. 79 Záznam zatěžujících sil během  $F_{max}$  a  $F_{min}$  během cyklické zkoušky

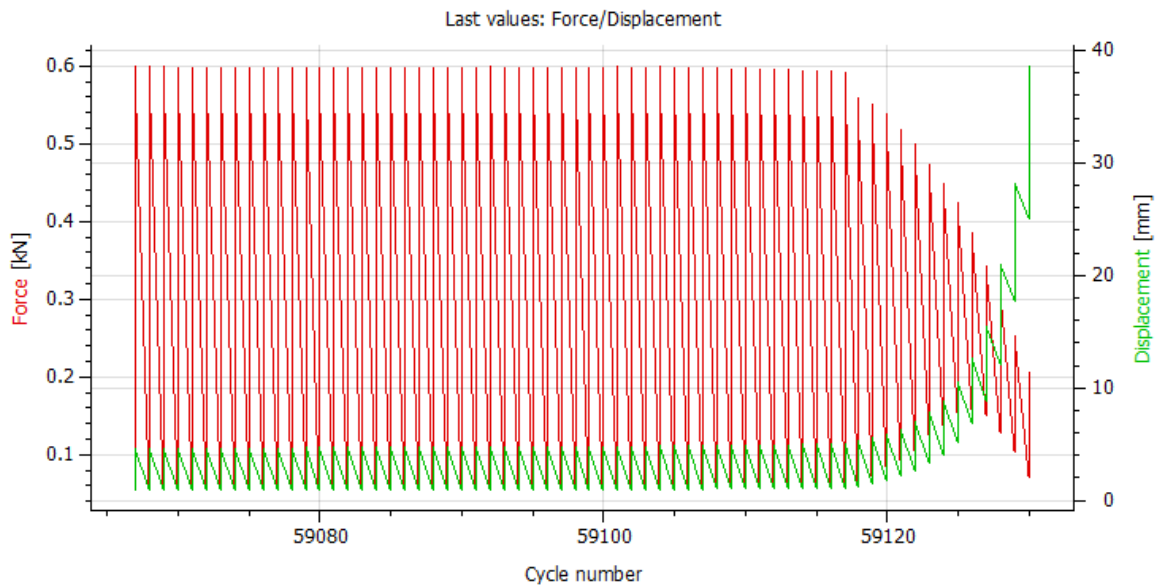
Následně lze pozorovat záznam velikosti prohnutí vzorku způsobeného maximální a minimální zatěžující silou viz. ob. 80. Velikost prohnutí nejprve narůstá velmi pozvolně až do oblasti vyššího nárustu, způsobeného poklesem tuhosti viz obr. 81. Poté dochází opět k pozvolnějšímu poklesu tuhosti, a tedy i pozvolnému nárustu prohnutí až to oblasti ztráty tuhosti vzorku a výrazného nárustu prohnutí až do porušení vzorku. Tento nárůst je patrný na obr. 82, kde se nachází detailní pohled na poslední cykly zatěžování. Dochází k výraznému nárustu prohnutí a zároveň k poklesu působící síly.



Obr. 80 Záznam velikosti průhybu zk. tělíska během cyklické zkoušky

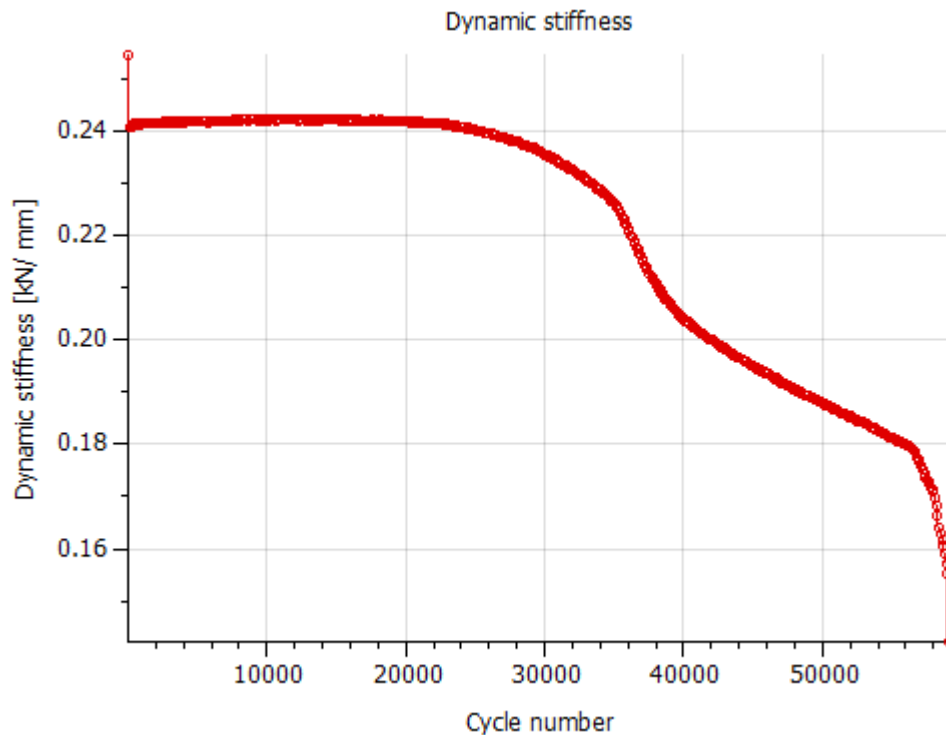


Obr. 81 Detail oblasti výrazného nárustu prohnutí



Obr. 82 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíska

Cyklováním pozvolna klesá tuhost vzorku. Na rozdíl od výztuže ze skelného vlákna se objevuje oblast výrazného poklesu tuhosti následovaná pozvolnějším poklesem až do úplné ztráty tuhosti (porušení vzorku) viz. obr. 83.



Obr. 83 Tuhost vzorku během cyklování

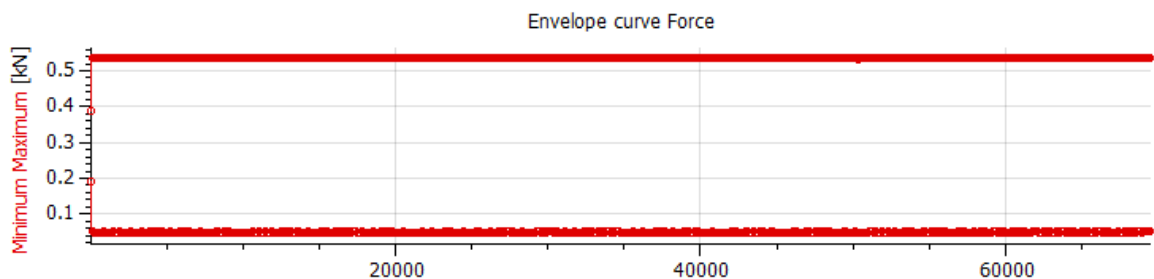
U vzorků s výztuží z uhlíkové tkaniny nebyla vizuálně patrná tvorba únavových trhlin. Únavový lom nastával shodně jako u ostatních vzorků na „tlakové“ straně. Následkem únavy došlo ke zhroucení potahové vrstvy vzorku viz. obr 84.



Obr. 84 Únavový lom

### Ruční laminace – uhlíková tkanina

Zatěžování vzorků vyrobených s výztuží z uhlíkové tkaniny pomocí ruční laminace probíhalo silou v rozpětí od 50 do 536 N viz. obr. 85. Na tomto obrázku je patrné, že tyto maximální zatěžující síla byla konstantní po celou dobu zatěžování vzorku, ale u minimální zatěžující síly docházelo k mírným odchýlkám.

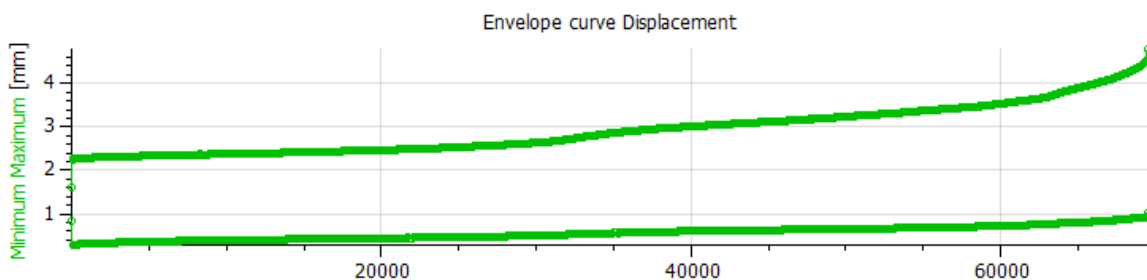


Obr. 85 Záznam zatěžujících sil během  $F_{max}$  a  $F_{min}$  během cyklické zkoušky

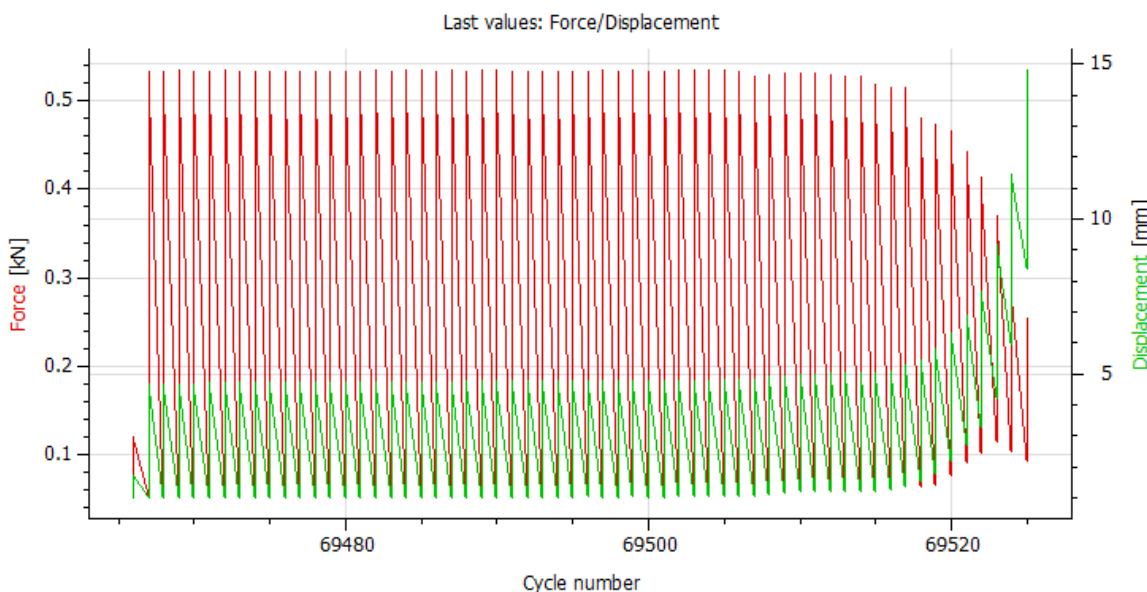
Následně lze pozorovat záznam velikosti prohnutí vzorku způsobeného maximální a minimální zatěžující silou viz. ob. 86. Velikost prohnutí nejprve narůstá velmi pozvolně až



do oblasti vyššího nárustu, způsobeného poklesem tuhosti. Poté dochází opět k pozvolnějšímu poklesu tuhosti, a tedy i pozvolnému nárustu prohnutí až to oblasti ztráty tuhosti vzorku a výrazného nárustu prohnutí až do porušení vzorku. Tento nárůst je patrný na obr. 87, kde se nachází detailní pohled na poslední cykly zatěžování. Dochází k výraznému nárustu prohnutí a zároveň k poklesu působící síly.

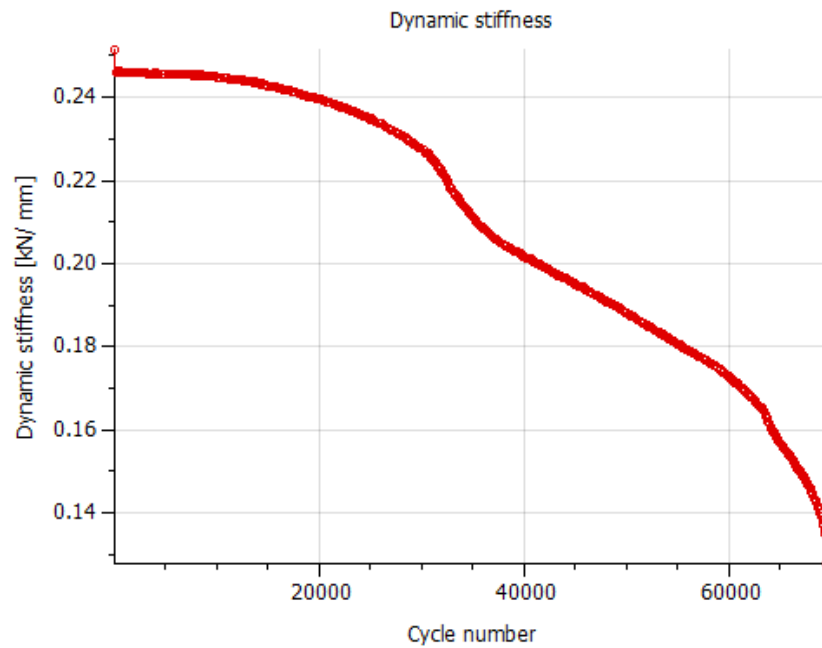


Obr. 86 Záznam velikosti průhybu zk. tělíska během cyklické zkoušky



Obr. 87 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíska

Cyklováním pozvolna klesá tuhost vzorku. Stejně jako u vzorků vyrobených pomocí vakuování se objevuje oblast výrazného poklesu tuhosti následovaná pozvolnějším poklesem až do úplné ztráty tuhosti (porušení vzorku) viz. obr. 88.



Obr. 88 Tuhost vzorku během cyklování

U vzorků s výztuží z uhlíkové tkaniny vyrobených ruční laminací nebyla vizuálně patrná tvorba únavových trhlin. Únavový lom nastával shodně jako u ostatních vzorků na „tlakové“ straně. Následkem únavy došlo ke prasknutí a zhroucení potahové vrstvy vzorku viz. obr 89 a 90.



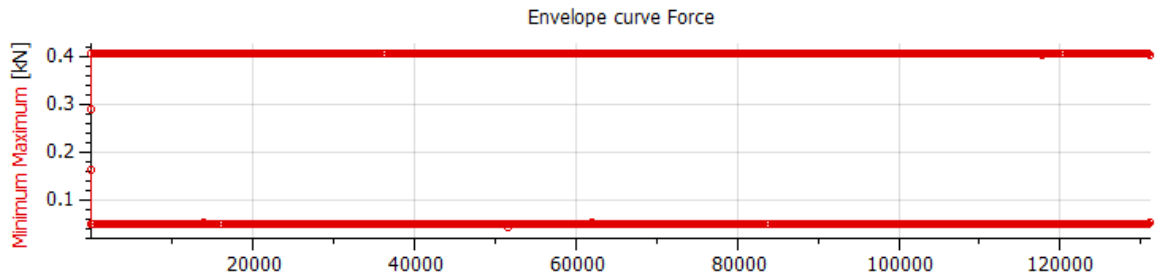
Obr. 89 Únavový lom



Obr. 90 Detail únavového lomu

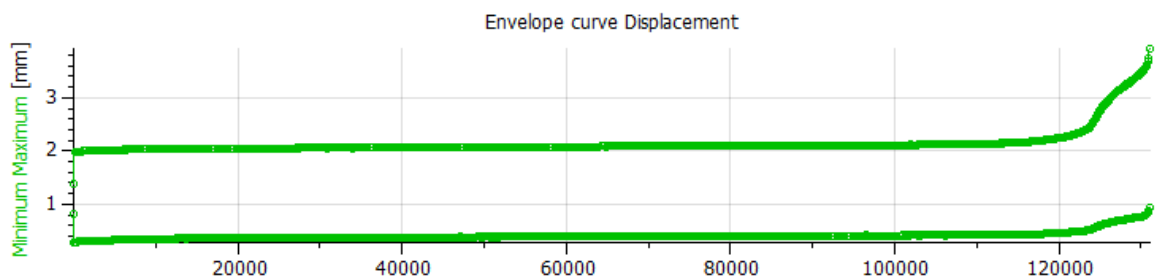
### Uhlíkový prepreg + autokláv

Zatěžování vzorků vyrobených s výztuží z uhlíkové tkaniny pomocí autoklávu probíhalo silou v rozpětí od 50 do 408 N viz. obr. 91. Na tomto obrázku je patrné, že tyto zatěžující síly byly konstantní po celou dobu zatěžování vzorku.

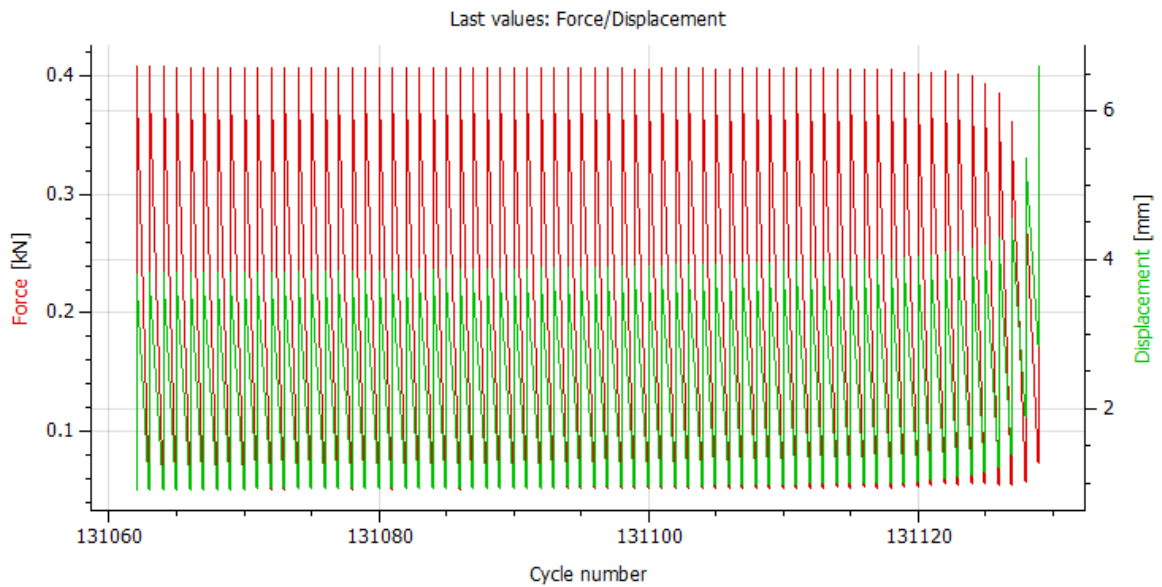


Obr. 91 Záznam zatěžujících sil během  $F_{max}$  a  $F_{min}$  během cyklické zkoušky

Následně lze pozorovat záznam velikosti prohnutí vzorku způsobeného maximální a minimální zatěžující silou viz. obr. 92. Velikost prohnutí významněji narůstá pouze na začátku zkoušky a poté dochází jen k velmi malému pozvolnému nárůstu velikosti prohnutí až do doby, kdy se na vzorku začíná projevovat únava vlivem zatěžování. S narůstající únavou dochází k výraznému narůstání velikosti průhybu až do samotného porušení vzorku. Tento nárůst je patrný na obr. 93, kde se nachází detailní pohled na poslední cykly zatěžování. Dochází k výraznému nárůstu prohnutí a zároveň k poklesu působící síly.

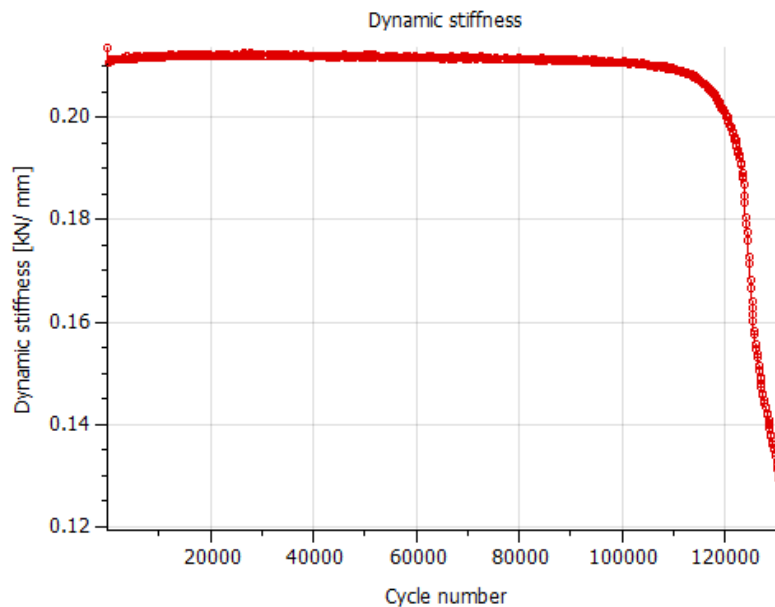


Obr. 92 Záznam velikosti průhybu zk. tělíska během cyklické zkoušky



Obr. 93 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíska

Cyklováním povolna klesá tuhost vzorku. U konce zkoušky lze pozorovat výrazný pokles tuhosti vzorku až po úplnou ztrátu tuhosti (porušení vzorku) viz. obr. 94.

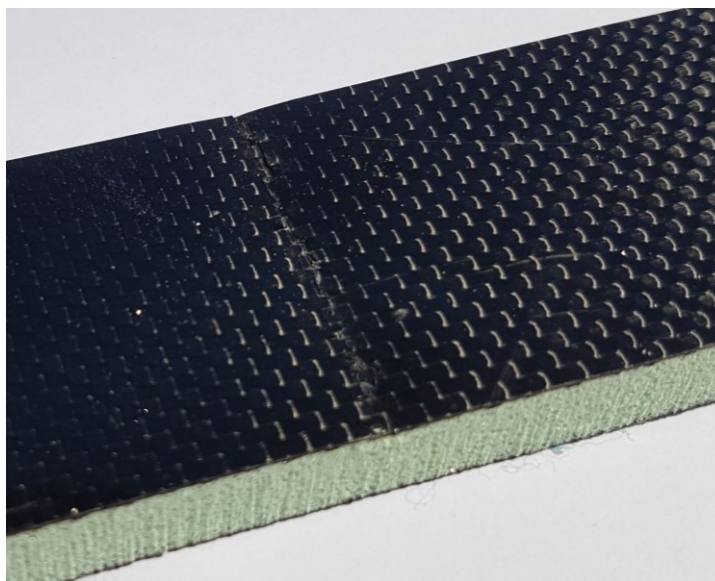


Obr. 94 Tuhost vzorku během cyklování

U vzorků s výztuží z uhlíkové tkaniny vyrobených v autoklávu nebyla vizuálně patrná tvorba únavových trhlin. Únavový lom nastával shodně jako u ostatních vzorků na „tlakové“ straně. Následkem únavy došlo ke prasknutí a zhroucení potahové vrstvy vzorku viz. obr 95 a 96.



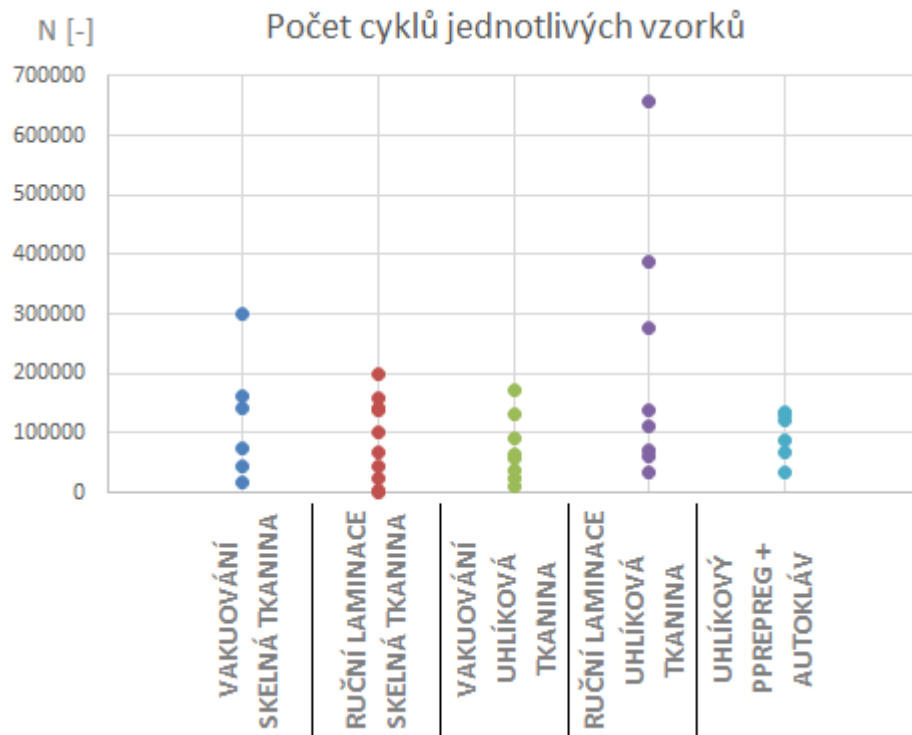
Obr. 95 Únavový lom



Obr. 96 Detail únavového lomu

Tabulka 9 Počet cyklů jednotlivých zkušebních tělísek

n	VAKUOVÁNÍ SKELNÁ TKANINA	RUČNÍ LAMINACE SKELNÁ TKANINA	VAKUOVÁNÍ UHĹÍKOVÁ TKANINA	RUČNÍ LAMINACE UHĹÍKOVÁ TKANINA	UHĹÍKOVÝ PPREPREG + AUTOKLÁV
	N [-]				
1	43221	3163	37864	69525	131129
2	75060	44995	59130	60214	122893
3	15628	198451	173516	657656	134240
4	161807	622	65006	139502	32625
5	143404	66125	131077	275942	66944
6	300139	140298	9301	112867	88944
7	-	100705	22825	386435	-
8	-	23118	89601	32844	-
9	-	157161	-	-	-
10	-	139575	-	-	-



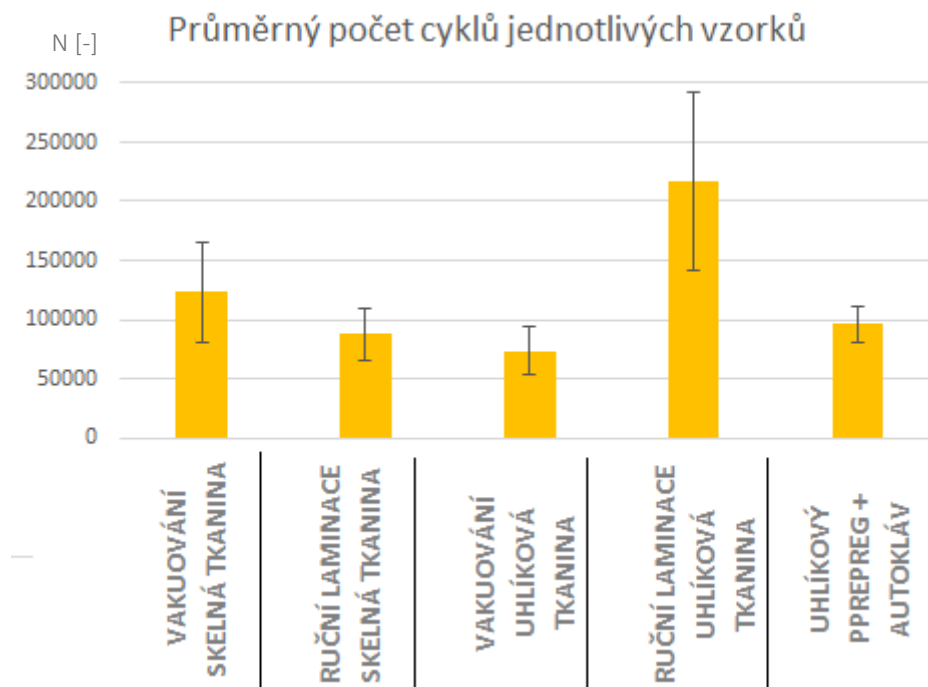
Obr. 97 Grafické zobrazení počtu cyklů vzorků pro jednotlivé výrobní metody

## 6.4 Vyhodnocení naměřených dat při cyklickém zatěžování

Z naměřeného počtu cyklů jednotlivých zkušebních tělísek pro jednotlivé vzorky byla vypočítána průměrná hodnota a její směrodatná odchylka. Směrodatná odchylka se velmi přibližuje průměrné hodnotě s výjimkou průměrné hodnoty vzorku vyrobeného z prepregu pomocí autoklávu, což je způsobeno velkým rozptylem naměřených hodnot. V tabulce 10 jsou průměrné hodnoty cyklů do porušení jednotlivých vzorků. Za nejstabilnější proces výroby lze označit výrobu pomocí autoklávu, kde je nejistota měření  $u$  nejnižší. U vzorku vyrobeného ruční laminací s výztuží z uhlíkové tkaniny se objevilo zkušební tělísko, jenž vydrželo 657656 zatěžujících cyklů. U tohoto tělíska bylo zřejmě dosaženo neoptimálnějších podmínek při výrobě. Naopak při testování vzorků s výztuží ze skelné tkaniny vyrobených ručním laminováním se objevila tělíska s velmi nízkým počtem cyklů do jejich poškození. To mohlo být způsobeno špatným prosycením tkaniny pryskyřicí v oblasti vzorku nebo poškozením v důsledku řezáním vodním paprskem, což mělo za následek velmi nízkou únavovou odolnost. Na obr. 98 se nachází grafické porovnání průměrných hodnot pro jednotlivé výrobní postupy, zde je patrné že výroba pomocí autoklávu byla nejstabilnějším procesem s nejmenší nejistotou měření. Nejvyšší průměrnou únavovou odolnost dosahoval vzorek vyrobený ruční laminací s výztuží z uhlíkového vlákna, avšak se zároveň jedná o výsledek s největší nejistotou měření díky rozptylu naměřených dat. Při porovnání metody ruční laminace s metodou ruční laminace s použitím vakua vychází v případě výztuže se skelnou tkaninou vyšší únavová odolnost pro metodu s použitím vakua, ale zároveň nebylo dosaženo takové stability procesu jako při ruční metodě o čemž vypovídá nejistota měření.

Tabulka 10 Průměrný počet cyklů do lomu

n	VAKUOVÁNÍ SKELNÁ TKANINA	RUČNÍ LAMINACE SKELNÁ TKANINA	VAKUOVÁNÍ UHÍKOVÁ TKANINA	RUČNÍ LAMINACE UHÍKOVÁ TKANINA	UHÍKOVÝ PPREG + AUTOKLÁV
	N [-]				
$\bar{x}$	123210	87421	73540	216873	96129
s	103440	69850	55830	214960	37260
u	42230	22090	19740	76000	15220



Obr. 98 Porovnání průměrných hodnot počtů cyklů jednotlivých vzorků

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce Životnost sendvičových laminátových struktur bylo zkoumání únavového chování sendvičových panelů vyrobených z různých materiálů výztuží a za pomoci různých metod výroby.

V teoretické části diplomové práce proběhlo seznámení s jednotlivými prvky sendvičových laminátových struktur, bylo popsány různé metody jejich výroby a rozebrány zkoušky pro testování únavového chování.

V praktické části byly popsány způsoby výroby sendvičových panelů pro testování pomocí ruční laminace, dále ruční laminace s použitím vakuování a výroba panelu z prepregu v autoklávu. Následně bylo rozebráno způsob řezání vzorků pomocí vodního paprsku, a přitom vzniklé problémy s delaminací u vzorků s výztuží ze skelné tkaniny. Dále byla popsána zkouška tříbodovým ohybem, která byla nutná pro zjištění maximální síly při porušení vzorku pro další využití při testování únavového chování. Při této zkoušce byly zároveň stanoveny hodnoty modulu pružnosti v ohybu, poměrná deformace, velikost průhybu, ohybové napětí a práce nutná k porušení zkušebního tělíska. Z těchto hodnot vyplývá, že technologie ruční laminace s použitím vakua nepůsobí zvýšení modulu pružnosti v ohybu  $E_0$ , zároveň má jen minimální vliv na maximální sílu při porušení tělíska  $F_{max}$  a na práci  $W$  k jejímu dosažení. U zkušebních tělísek vyrobených touto metodou docházelo k většímu průhybu  $y_{F_{max}}$  při působení síly  $F_{max}$ , než u tělísek vyrobených pouze technologií ruční laminace. Následně bylo zkoumáno únavové chování jednotlivých vzorků pomocí cyklického zatěžování. Zatěžování probíhalo při sinusovém průběhu zatížení, a to minimální silou 50N a maximální silou o velikosti 75% z maximální síly při porušení statickým tříbodovým ohybem při frekvenci zatěžování 5Hz. Ukázalo se že při výrobě pomocí ruční laminace, nebo při použití ruční laminace s působením vakua byly výsledky velmi různorodé, což bylo způsobeno právě ručním kladením, kde není možné zabezpečit homogenní strukturu. Při testování únavy materiálu u vzorků vyrobených pomocí prepregu v autoklávu byla zjištěna také velká různorodost únavového chování jednotlivých tělísek, avšak ne tak výrazná, jako u předešlých metod. Díky tomu bylo možné označit výrobu v autoklávu jako nestabilnější proces z hlediska únavového chování sendvičových laminátových struktur. Zároveň se podařilo ověřit, že je možné pomocí autoklávu za upravených podmínek vyrábět sendvičové struktury s jádrem z PVC pěny. S ohledem na únavovou odolnost, náklady a náročnost výroby se jeví technologie ruční laminace sendvičů jako nejvýhodnější. Z hlediska použitého materiálu výztuže se jeví tkanina z uhlíkové



tkaniny nejvýhodněji co se mechanických vlastností týká, avšak pro aplikace, kde není zapotřebí takto vysokých hodnot je s ohledem na cenu vhodnější použít skelnou tkaninu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Sendvičové konstrukce | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah | MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce>
- [2] VRBKA, Jan. Mechanika kompozitů [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: [https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HtFmFkYRmJgJ:https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php%3Fdpid%3D83340+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HtFmFkYRmJgJ:https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php%3Fdpid%3D83340+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz)
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 9788086960296.
- [4] Musaliar Group of Institutions [online]. Copyright © [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <http://www.musaliarcollege.com/eBooks/ME/An%20introduction%20to%20polymer-matrix%20composites.pdf>
- [5] GUIDE TO COMPOSITES. Gurit [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.gurit.com/-/media/Gurit/Datasheets/guide-to-composites.pdf>
- [6] NICOLAIS, Luigi. *Wiley Encyclopedia of Composites* [online]. 2011-09-16 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: doi:10.1002/9781118097298
- [7] Resins. *Compositeslab* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composite-materials/resins/>
- [8] Reinforcements. *Compositeslab* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composite-materials/reinforcements/>
- [9] Ústav materiálové inženýrství: Kompozitní materiály. *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6\\_kompozitni-materialy.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf)
- [10] Sandwich Steel Panels: Part One. *Total Materia* [online]. 2017 [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=EL&N M=484>

- [11] What Are Prepregs? *Fibreglast* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: [https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center)
- [12] Prepreg technologie. *Form* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.form-composite.com/prepreg>
- [13] Prepregs. *Castro composites* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.castrocompositesshop.com/en/prepregs/1680-aramid-epoxy-prepreg-vtc401-a200t-46rw-twill-2x2-200-gm2.html>
- [14] Core. *Compositelab* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composite-materials/core/>
- [15] Materiály Pěnového jádra. *TASUNS* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://cz.t-composites.net/info/foam-core-materials-22295774.html>
- [16] Sendvičové materiály. *HAVEL COMPOSITES* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/airex-c70-75-tloustka-20-mm-2180-x-1020-mm-1109-808>
- [17] PMI Structural Foam. *RIFENG* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <http://www.rfpmi.com/product.html>
- [18] SAN Foam Core. *COMPOSITES ONE* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/product/core-materials/san-foam-core/>
- [19] Examples of honeycomb use. *Forlit* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.forlit.cz/en/uses/>
- [20] Manufacturing Process. *Corex Honeycomb* [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: <https://corex-honeycomb.co.uk/products-and-services/aluminium-honeycomb-manufacturing/>
- [21] Aluminium Honeycomb Cores. *YAMEIJIA* [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: [http://www.al-honeycomb-panels.com/product\\_custom-aluminium-honeycomb-core\\_24074.html](http://www.al-honeycomb-panels.com/product_custom-aluminium-honeycomb-core_24074.html)
- [22] Thermoplastic Honeycomb Cores. *Plascore* [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: <https://www.plascore.com/honeycomb/honeycomb-cores/thermoplastic/>
- [23] Ruční laminace. *Form* [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: <https://www.form-composite.com/rucni-laminace>

- [24] An introduction to polymer-matrix composites. *Musaliar* [online]. [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: <http://www.musaliarcollege.com/e-Books/ME/An%20introduction%20to%20polymer-matrix%20composites.pdf>
- [25] AKAY, Mustafa. An introduction to polymer-matrix composites [online]. Bookboon 2015 [cit. 2021-04-12]. ISBN 9788740309805.
- [26] Lisování pomoví vakua. *Spolek pro technickou podporu a propagaci polymerních kompozitů* [online]. [cit. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/press-moulding/>
- [27] Closed Molding. *Compositeslab* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <http://compositeslab.com/composites-manufacturing-processes/closed-molding/>
- [28] RTM Technologie. *Compact composite* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.compact-composite.cz/vyrobní-technologie/rtm-technologie/>
- [29] VIP Brochure. *Universiteit Gent* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: [https://composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/documentation/FibreGlast\\_Vacuum\\_infusion\\_process.pdf](https://composites.ugent.be/home_made_composites/documentation/FibreGlast_Vacuum_infusion_process.pdf)
- [30] Foams / Balsa Core. *Fiber-Tek* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://fibertek.ca/shop/fiberglass-materials/foams-balsa/end-grain-balsa-core/>
- [31] Rohacell A. Rohacell [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://www.rohacell.com/en/products-services/rohacell-a>
- [32] Processes. *Composites UK* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/processes>
- [33] Autoclave Molding. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/autoclave-molding/pdf>
- [34] Technologie výroby kompozitů. *Havel composites* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [35] Pultruze. *Polymer Composites* [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: <https://polymer-composites.cz/pultrusion/>

- [36] Mechanické vlastnosti. Oddělení povrchového inženýrství Západočeská univerzita v Plzni [online]. [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/mechanicke\\_vlastnosti.pdf](https://www.opi.zcu.cz/mechanicke_vlastnosti.pdf)
- [37] ČSN EN 2746. *Letectví a kosmonautika - Sklem vyztužené plasty: Zkouška ohybem - Metoda třibodového ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [38] SHARMA, Nitin, Ronald F. GIBSON a Emmanuel O. AYORINDE. *Fatigue of Foam and Honeycomb Core Composite Sandwich Structures: A Tutorial* [online]. 2006, 8(4), 263-319 [cit. 2021-04-18]. ISSN 1099-6362. Dostupné z: doi:10.1177/1099636206063337
- [39] Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: [http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing\\_Hladky\\_4.pdf](http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kaft/wp-content/uploads/Ing_Hladky_4.pdf)
- [40] Únava materiálů. *Ústav materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni\\_stavy/prednasky/6MS\\_09\\_unav\\_a.ppt](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/prednasky/6MS_09_unav_a.ppt)
- [41] Autoclaves for composites. *O.p. PANINI* [online]. [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.op-panini.it/en/autoclave-for-composite-materials/>
- [42] La nueva espuma PET para aplicaciones de núcleos. Canales Sectoriales Interempresas [online]. 20.11.2007 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/19103-La-nueva-espuma-PET-para-aplicaciones-de-nucleos.html>
- [43] CoreCork. MATRIX Composites Material Company [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.matrix-composites.co.uk/products/core-materials/corecork.html>
- [44] Sandwich panels. MESH LIN [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.meshlin.com/en/products-sandwich-panel-cork/>
- [45] AIREX® T90. 3A Composites [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.3accorematerials.com/en/products/airex-foam/airex-t90-fire-resistant-foam>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

PET	Polyetylentereftalát
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
PU	Polyuretan
PMI	Polymetakrylimid
SAN	Styren-akrylonitril
ABS	Akrylonitrilbutadidenstyren
$\sigma_0$	Napětí v ohybu [MPa]
$M_0$	Ohybový moment [N·mm]
$W_0$	Modul průřezu v ohybu [mm <sup>3</sup> ]
b	Šířka vzorku [mm]
h	Tloušťka vzorku [mm]
$E_0$	Ohybový modul [MPa]
L	Rozteč mezi podpěrami [mm]
$F_{\max}$	Maximální síla [N]
$F_{75\%}$	75% z $F_{\max}$ [N]
y	Průhyb zkušebního tělíska [mm]
$\varepsilon$	Poměrná deformace [%]
W	Práce [N·mm]
$\bar{x}$	Průměrná hodnota
s	Směrodatná odchylka
u	nejistota měření
V	Variační koeficient
t	Čas [s]
N	Počet cyklů [-]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 porovnání řezu laminátem z epoxidové pryskyřice a uhlíkových vláken s bambusovým stonkem [3] .....	11
Obr. 2 Sendvičová struktura [10] .....	12
Obr. 3 Základní molekula epoxidové pryskyřice .....	14
Obr. 4 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné uspořádání, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna, f) krátká vlákna s nahodilou orientací [9] .....	16
Obr. 5 Prepreg [13] .....	19
Obr. 6 Výroba prepregu [5] .....	19
Obr. 7 PVC pěna Airex C70.75 [16] .....	20
Obr. 8 PMI pěna Rohacell [31] .....	21
Obr. 9 Papírová voština .....	22
Obr. 10 Hliníková voština [21] .....	23
Obr. 11 Polykarbonátová voština [22] .....	24
Obr. 12 Balsové jádro [30] .....	24
Obr. 13 Sendvičový panel s korkovým jádrem [44] .....	25
Obr. 14 Ruční laminace [25] .....	26
Obr. 15 Výroba laminátu stříkáním .....	27
Obr. 16 Lisování pomocí vakua [26] .....	28
Obr. 17 Technologie RTM [5] .....	29
Obr. 18 Vakuová infuze – forma [29] .....	30
Obr. 19 Proces vakuové infuze [29] .....	30
Obr. 20 Cyklus autoklávu pro prepreg GG 204P IMP 503Z .....	31
Obr. 21 Autokláv o.p. PANINI [41] .....	31
Obr. 22 Pultruze [34] .....	32
Obr. 23 Zkouška tříbodovým ohybem [3] .....	34
Obr. 24 Průběh napětí v průřezu vzorku [3] .....	34
Obr. 25 Křivka závislosti síly na průhybu [37] .....	35
Obr. 26 Druhy porušení sendviče při tříbodovém ohybu [38] .....	36
Obr. 27 Druhy cyklického zatěžování a) střídavé souměrné, b) pulzující [40] .....	37
Obr. 28 Wöhlerova křivka pravděpodobnosti porušení vlivem únavy polyesterového SMC laminátu [3] .....	38
Obr. 29 Pokles tuhosti jako kritérium únavy [3] .....	38
Obr. 30 Pokles tuhosti kompozitního laminátu vyztuženého skelným vláknem ( $N_n$ – počet cyklů, $\sigma$ , $\varepsilon$ – střední hodnota napětí a deformace při lomu) [3] .....	39

Obr. 31 Vliv tloušťky potahu na způsob lomu sendviče [38].....	39
Obr. 32 Vliv hustoty pěnového jádra na způsob lomu sendviče [38].....	40
Obr. 33 Vzorek 1 po odformování.....	43
Obr. 34 Forma přichystaná k výrobě sendviče .....	44
Obr. 35 Procesní podmínky první fáze vytvrzování v autoklávu .....	44
Obr. 36 Závislost viskozity pryskyřice na teplotě .....	45
Obr. 37 Výsledný sendvičový panel vyrobený pomocí autoklávu .....	45
Obr. 38 Struktura vyráběného sendviče.....	46
Obr. 39 Vzorek 3 po odformování.....	46
Obr. 40 Zavakuovaný vzorek 4.....	47
Obr. 41 Vzorek 4 po odformování.....	47
Obr. 42 Vzorek 5 po odformování.....	48
Obr. 43 Rozměry zkušebních tělísek .....	49
Obr. 44 Nářezový plán vzorku 2 vyráběného z prepregu .....	50
Obr. 45 Nářezový plán vzorku 4 vyráběného ruční laminací s vakuováním.....	50
Obr. 46 Sendvičový panel po rozřezání vodním paprskem .....	50
Obr. 47 Delaminace zkušebního tělíska po řezání vodním paprskem (pohledová strana) ..	51
Obr. 48 Delaminace zkušebního tělíska po řezání vodním paprskem (nepohledová strana) .....	51
Obr. 49 Detail delaminace potahové vrstvy od jádra sendviče.....	51
Obr. 50 Statický tříbodový ohyb.....	52
Obr. 51 Závislost působící síly na průhybu vzorku se skelnou tkaninou vyrobeném vakuováním.....	54
Obr. 52 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí vakuování .....	55
Obr. 53 Poškozené zkušební tělísko po zkoušce statickým tříbodovým ohybem .....	55
Obr. 54 Závislost působící síly na průhybu vzorku se skelnou tkaninou vyrobeném ruční laminací.....	56
Obr. 55 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků se skelnou tkaninou vyrobených pomocí ruční laminace .....	56
Obr. 56 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených pomocí vakuování .....	57
Obr. 57 Závislost působící síly na průhybu vzorku s uhlíkovou tkaninou vyrobeném ruční laminací.....	58
Obr. 58 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků s uhlíkovou tkaninou vyrobených pomocí ruční laminace .....	58
Obr. 59 Závislost působící síly na průhybu vzorku z uhlíkového prepregu vyrobeném v autoklávu.....	59



Obr. 60 Závislost ohybového napětí na poměrné deformaci vzorků z uhlíkového prepregu vyrobených v autoklávu.....	60
Obr. 61 Porovnání modulu pružnosti v ohybu $E_O$ .....	61
Obr. 62 Porovnání sil při porušení tělísek $F_{max}$ .....	61
Obr. 63 Porovnání ohybového napětí zkušebních tělísek.....	62
Obr. 64 Porovnání průměrné práce pro dosažení $F_{max}$ .....	62
Obr. 65 Zkušební stroj Zwick/Roell HC 25 Compact .....	63
Obr. 66 Sinusové zatěžování zkušebních tělísek .....	64
Obr. 67 Záznam zatěžujících sil během $F_{max}$ a $F_{min}$ během cyklické zkoušky .....	64
Obr. 68 Záznam velikosti průhybu zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	65
Obr. 69 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíška.....	65
Obr. 70 Pokles tuhosti zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	65
Obr. 71 Tvorba únavové poruchy .....	66
Obr. 72 Únavový lom .....	66
Obr. 73 Záznam zatěžujících sil během $F_{max}$ a $F_{min}$ během cyklické zkoušky .....	67
Obr. 74 Záznam velikosti průhybu zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	67
Obr. 75 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíška.....	68
Obr. 76 Tuhost vzorku během cyklování.....	68
Obr. 77 Tvorba únavové poruchy .....	69
Obr. 78 Únavový lom .....	69
Obr. 79 Záznam zatěžujících sil během $F_{max}$ a $F_{min}$ během cyklické zkoušky .....	70
Obr. 80 Záznam velikosti průhybu zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	70
Obr. 81 Detail oblasti výrazného nárůstu prohnutí.....	70
Obr. 82 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíška.....	71
Obr. 83 Tuhost vzorku během cyklování.....	71
Obr. 84 Únavový lom .....	72
Obr. 85 Záznam zatěžujících sil během $F_{max}$ a $F_{min}$ během cyklické zkoušky .....	72
Obr. 86 Záznam velikosti průhybu zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	73
Obr. 87 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíška.....	73
Obr. 88 Tuhost vzorku během cyklování.....	74
Obr. 89 Únavový lom .....	74
Obr. 90 Detail únavového lomu.....	74
Obr. 91 Záznam zatěžujících sil během $F_{max}$ a $F_{min}$ během cyklické zkoušky .....	75
Obr. 92 Záznam velikosti průhybu zk. tělíška během cyklické zkoušky .....	75
Obr. 93 Detail posledních cyklů před porušením zkušebního tělíška.....	76

---

Obr. 94 Tuhost vzorku během cyklování.....	76
Obr. 95 Únavový lom .....	77
Obr. 96 Detail únavového lomu.....	77
Obr. 97 Grafické zobrazení počtu cyklů vzorků pro jednotlivé výrobní metody .....	78
Obr. 98 Porovnání průměrných hodnot počtů cyklů jednotlivých vzorků .....	79

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1 Výsledky statické zkoušky ohybem.....	53
Tabulka 2 Průměrné hodnoty vakuování - skelná tkanina.....	54
Tabulka 3 Průměrné hodnoty Ruční laminace – skelná tkanina.....	56
Tabulka 4 Průměrné hodnoty vakuování – uhlíková tkanina .....	57
Tabulka 5 Průměrné hodnoty Ruční laminace – uhlíková tkanina.....	58
Tabulka 6 Průměrné hodnoty Uhlíkový prepreg + autokláv .....	59
Tabulka 7 Průměrné hodnoty všech naměřených dat .....	61
Tabulka 8 Hodnoty maximálních zatěžujících sil při cyklickém zatěžování .....	63
Tabulka 9 Počet cyklů jednotlivých zkušebních tělísek .....	77
Tabulka 10 Průměrné hodnoty počtu cyklů pro jednotlivé vzorky	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list prepregu GG 204P IMP 503Z 42%

Příloha P II: Materiálový list pěny Airex C70.75

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PREPREGU GG 204P IMP 503Z 42%



Via Tiepolo, 19 20022 CASTANO PRIMO (MI) Tel. +39 0331 880564 [www.impregnatex.it](http://www.impregnatex.it)

## MATRIX PRODUCT DATA

## IMP503Z

ST-130213-rev7-09/01/2015

### DESCRIPTION

Modified epoxy resin IMP503Z is suitable for prepregging of carbon/glass and aramid fabrics. IMP503Z with his high transparency is suitable for "carbon look" composite part where high cosmetic requirements are needed. IMP503Z can be used with carbon or metallic mould with the standard technologies: Hot Press, Wrapping, Autoclave and Vacuum Bag.

### BENEFITS AND FEATURES

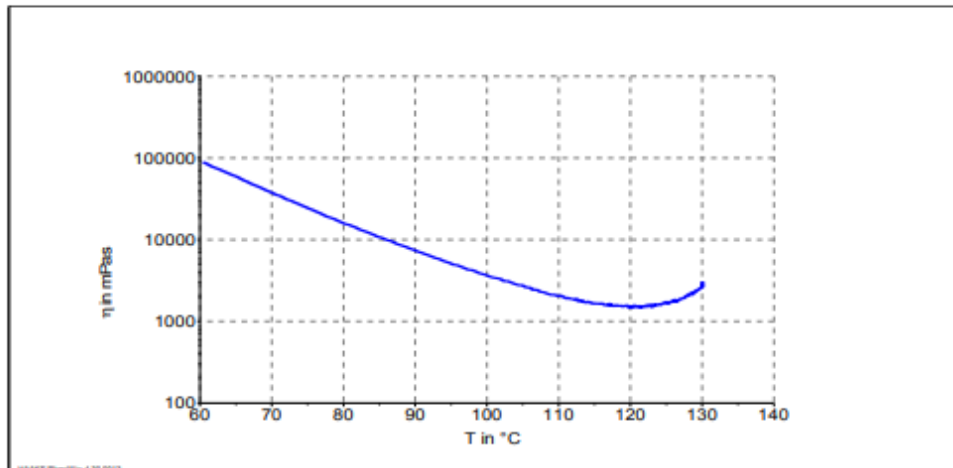
- Field of applications: automotive, sporting goods, marine, industrial
- Different curing cycles are possible
- Good mechanical properties
- UV resistance improved

### RESIN PROPERTIES

TYPE		TOUGHENED
Cured resin density	gr/cm <sup>3</sup>	1,15 - 1,25
Gel Time at 125 °C (257 °F)	minuti	6'-9'
Gel Time at 110 °C (221 °F)	minuti	20 - 26
TACK		MEDIUM/HIGH
Resin VOC on prepreg	%	< 1
Tg fully cured (Tan Delta DMA)	°C (°F)	120 (248)
Shelf life at room temperature (23 °C)	weeks	5
Shelf Life (-18°C approx)	years	1

### VISCOSITY VS TEMPERATURE BEHAVIOUR

The plot under depicted below is performed with cone-plate rehometer starting from 60°C until viscosity kick off.  
Parameters: frequency 0.2 Hz and heating rate 3 °C/ min.



### CURING CYCLES SUGGESTED

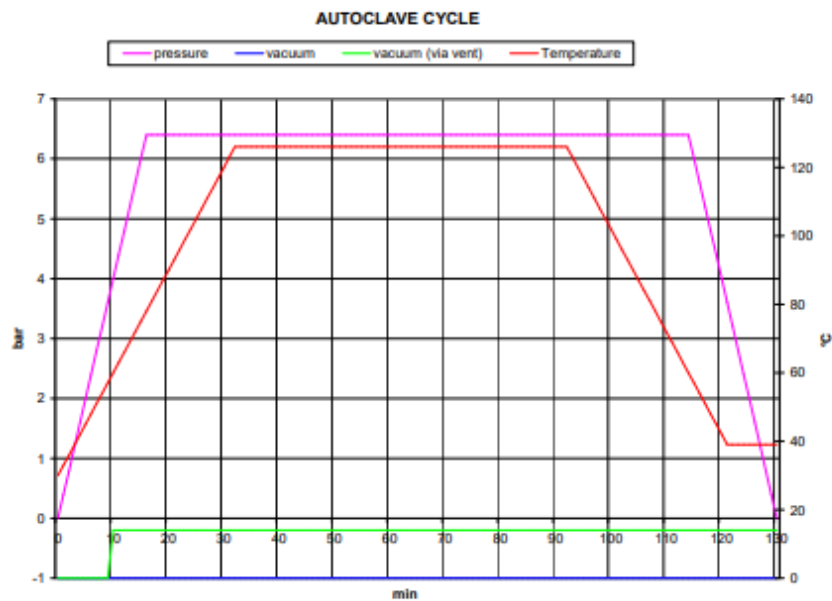
TEMPERATURES	TIME	Tg ( TanDelta DMA, °C)
110	2h	120-125
125	1h	120-125

## PROCESS DESCRIPTIONS

## Autoclave:

## 125°C cycle

1. After making the bag put it in the autoclave and apply  $-0.9 \pm -1.0$  bar vacuum
2. Heat to 125°C at 1-3 min/°C rate
3. Apply the pressure, with quick increment slope, in order to reach the maximum possible value (ex. 4-7 bar) before 80°C. Reached the process pressure is possible reduce the vacuum value to  $-0.2$  bar (via vent). This option depend on the evaluations of the autoclave driver.
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 60°C under pressure, then release the pressure
6. At room temperature get the part out of the autoclave



## Hot Press:

## 125°C cycle:

1. Put the prepreg material into the mould at room temperature and close the mould at 1Bar pressure
2. Heat to 125°C a 1-3°C/min (3-5°C/min for small part if possible)
3. When 100-110°C is reached apply 2-3 Bar or over if the flow can be controlled
4. When 125°C temperature is reached dwell it and the pressure for 1h
5. Cool to 40-50°C under pressure and pull the part out

**IMP503 Z** is a reactive epoxy formulation, too high heat up rate and/or too high temperature dwell can give out of control temperature inside the stack lay up when thick laminate are processed (thickness over 1 cm)

*These autoclave and hot press cycle are only suggestions based on Impregnatex Compositi experiences and are not absolute way to process properly the material. Different equipments may need different curing cycle conditions.*

## TYPICAL MECHANICAL PROPERTIES

The mechanical data below were performed on laminate cured by hot press technology at 125°C curing cycle (see above).

FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTMD790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m <sup>2</sup> ]	ILSS ASTM 2344 [N/mm <sup>2</sup> ]	Volume of fibre [%]
GG630T	730	57	800	56	64
GG428T	800	52	-	64	59
GG204T-V (1)	800	54	-	64	59
GG205T	810	55	750	68	58
GG245T	800	54	760	65	56
GG380T	800	55	730	64	62
GG90P	655	52	-	70	65
GG204P	810	53	-	66	59
CX400	938	56	-	54	62 (provini ricavati in direzione +45°)
GG800T	822	60	-	52	64
GG285T4	805	51	-	61	65
VV290T	630	27	-	57	64.8
VV380	710	23	-	64	60



FABRIC	Flexural Strength ASTM D790 [Mpa]	Flexural Modulus ASTM D790 [GPa]	G1c mod. ASTM D5528 [J/m <sup>2</sup> ]	ILSS ASTM 2344 [N/mm <sup>2</sup> ]	Volume of fibre [%]
VV580T	760	30	1160	60	56
VV700	750	25	-	56	64
KK300	440	21	-	44	56
GV330UD	1150	115	700	73	66
GV335UD	650	250	-	62	54

The values are to be understood as the average of the experimental values observed.

- (1) is also available as stabilized WF1, for exposed areas where high aesthetic of textile construction must be maintained during the process.

*These mechanical data were obtained by hot press technology. With different curing cycle technology these data can be different.*

## PREPREG STORAGE LIFE

This prepreg should be stored as received in a cool dry place or in a refrigerator. Storage life at different temperatures:

- 12 Months at -18 °C
- 5 weeks at +23 °C

After removal from refrigerator storage, prepreg should be allowed to reach room temperature before opening the polythene bag to prevent water condensation.

## PRECAUTIONS FOR USE

To handle properly the prepreg product observe the established precautions.

Operators working with this prepreg should wear clean and impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent the prepreg contamination  
Safety data sheet is available for this product.

## NOTE

The above mentioned technical informations are based on our actual knowhow and accurate, reproducible laboratories tests but due to the product complexity and its further processing, is not possible guarantee these.  
Impregnatex Compositi will reserve to made further modification to this paperwork

# PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST PĚNY AIREX C70.75

**AIREX**BALTEK**BANOVA**

## TECHNICKÝ LIST

07.2011 (nahrazuje 08.2010)

### AIREX<sup>®</sup> C70

#### Univerzální konstrukční pěna

##### CHARAKTERISTIKA

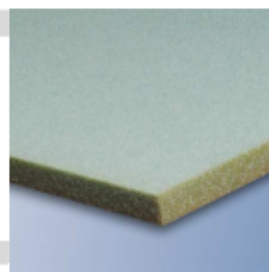
- Vynikající poměr pevnosti a tuhosti k váze
- Dobrá rázová odolnost
- Nízká absorpce pryskyfice
- Vysoká odolnost vůči únavě
- Dobré požární charakteristiky (samohášivý)
- Dobrá zvuková a tepelná izolace
- Dobrá odolnost vůči styrenu

##### POUŽITÍ

- **Námořní aplikace**  
Trupy, paluby, přepážky, nástavby, části interiéru
- **Silniční a kolejová doprava**  
Střešní panely, interiérové díly, podlahy, dveře, příčky, boční panely, čelní díly
- **Větrná energie**  
Lopatky rotorů, gondoly a kryty turbín
- **Letectví a kosmonautika**  
Interiéry, radary, převozní vozíky, všeobecné letectví (trupy a křídla)
- **Rekreace**  
Lyže, snowbordy, surfbordy, wakeboardy, kanoe, kajaky
- **Průmyslové aplikace**  
Náhradí, nádrže, potrubní řády, zásobníky, kryty

##### ZPRACOVÁNÍ

- Ruční kladení a stříkání
- Vakuové prosvycování
- Injektážní metody (RTM)
- Lepení
- Zpracování prepregů
- Tvarování za tepla



AIREX<sup>®</sup> C70 je polymerní pěna s uzavřenými buňkami u které se kombinuje vynikající pevnost a příznivý poměr pevnosti k váze s vysokou tuhostí.

Nedrobí se, neobsahuje žádné freony, má zanedbatelnou nasákavost vodou a vykazuje výbornou odolnost vůči chemikáliím. Jemná buněčná struktura nabízí vynikající povrch pro lepení.

Je kompatibilní s většinou pryskyfic a s běžnými zpracovatelskými postupy. AIREX<sup>®</sup> C70 je ideální jako jádrový materiál pro širokou škálu sendvičových konstrukcí zatěžovaných jak statickým tak dynamickým namáháním. Díky unikátní lehkosti (poměr vlastností k hustotě) je C70 vhodnou volbou pro aplikace, kde je nízká váha prioritou.

[www.3ACComposites.com](http://www.3ACComposites.com)



Europe | Middle East | India | Africa

**Airez AG**  
5643 Sira, Seltzerland  
T +41 41 789 66 00 | F +41 41 789 66 60  
[corematerials@3ACComposites.com](mailto:corematerials@3ACComposites.com)

North America | South America

**Baltek Inc.**  
High Point, NC 27261, USA  
T +1 336 398 1900 | F +1 336 398 1901  
[corematerials.americas@3ACComposites.com](mailto:corematerials.americas@3ACComposites.com)

Asia | Australia | New Zealand

**3A Composites (China) Ltd.**  
201201 Shanghai, China  
T +86 21 565 86 006 | F +86 21 338 27 298  
[corematerials.asia@3ACComposites.com](mailto:corematerials.asia@3ACComposites.com)

# AIREX BALTEK BANOVA

Typické vlastnosti AIREX® C70 pěny	Jednotka	Hodnota <sup>1)</sup>	C70.40	C70.48	C70.55	C70.75	C70.90	C70.130	C70.200	C70.250
Jmenovitá hustota	kg/m <sup>3</sup>	průměr typ. rozsah	40	48 43 - 55	60 54 - 69	80 72 - 92	100 90 - 115	130 120 - 150	200 180 - 250	250 225 - 288
Pevnost v tlaku kolmo na desku	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	0.45	0.60 0.50	0.90 0.75	1.45 1.10	2.0 1.7	3.0 2.6	5.2 4.5	6.6 5.3
Modul pružnosti v tlaku kolmo na desku	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	41	48 35	69 55	104 80	130 110	170 145	280 240	350 280
Pevnost v tahu v rovině desky	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	0.70	0.95 0.8	1.3 1.0	2.0 1.6	2.7 2.2	4.0 3.0	6.0 4.8	7.5 5.5
Modul pružnosti v tahu v rovině desky	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	28	35 28	45 35	66 50	84 65	115 95	175 140	230 160
Pevnost ve smyku	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	0.45	0.55 0.50	0.85 0.70	1.2 1.0	1.7 1.4	2.4 2.1	3.5 3.2	4.7 3.8
Modul pružnosti ve smyku	N/mm <sup>2</sup>	průměr minimum	13	16 14	22 18	30 24	40 34	54 45	75 68	95 78
Protážení ve smyku	%	průměr minimum	8	10 8	16 10	18 10	23 12	30 20	30 20	30 20
Tepelná vodivost při pokojové teplotě	W/m.K	průměr	0.031	0.031	0.031	0.033	0.035	0.039	0.048	0.056
Standardní desky	šířka	mm ± 5	1330	1270	1150	1020	950	850	750	700
	délka	mm ± 5	2850 <sup>2)</sup>	2730 <sup>2)</sup>	2450 <sup>2)</sup>	2180	2050	1900	1600	1500
	tloušťka	mm ± 0.5	5 až 80	5 až 70	5 až 70	3 až 68	3 až 60	5 až 50	5 až 40	5 až 40
Barva		světle zelená	fialová	žlutá	zelená	červená	modrá	hnědá	zelená	

Jiné rozměry, konfigurace a užší tolerance na požádání

<sup>1)</sup> Minimální hodnoty podle definice DNV; souřídka zkušebních těles 20 mm vyjma tahu (10 mm) a modulu v tlaku (40 mm)

<sup>2)</sup> Poloviční velikost možná pro tloušťky ± 8 mm

Poskytnuté údaje jsou přibližné hodnoty pro jmenovité hustoty a DNV minimální hodnoty podle certifikátu schválení typu DNV. Informace obsažené v tomto dokumentu jsou považovány za správné a odpovídají poslednímu stavu vědeckých a technických poznatků. Nicméně, žádná záruka není vyjádřena nebo předpokládána, týkající se jejich přesnosti nebo výsledků, které mohou být získány z použití těchto informací se neposkytuje. Žádné prohlášení by nemělo být chápáno jako doporučení k použití jakékoli.