



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**TECHNOLOGIE VÝROBY KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ  
S POLYMERNÍ MATRICÍ S APLIKOVÁNÍM RŮZNÝCH VÝZTUŽÍ  
A NÁSLEDNÉ POROVNÁNÍ JEJICH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.**

**AUTOR: David Derka**

**VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Lukáš HOLUB Ph.D.**

**STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojího inženýrství**

**STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový**

**Praha 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Derka** Jméno: **David** Osobní číslo: **501281**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Teoretický základ strojírenského inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Technologie výroby kompozitních materiálů s polymerní matricí s aplikováním různých výztuží a následné porovnání jejich mechanických vlastností.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Technology for the production of composite materials with a polymer matrix with the application of various reinforcements and subsequent comparison of their mechanical properties**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozdělení kompozitních materiálů dle matric a použitých výztuží
- 2) Popis technologií výroby kompozitních materiálů
- 3) Popis metody ruční výroby kompozitních materiálů – výhody a nevýhody
- 4) Popis metod zkoušení kompozitních materiálů
- 4) Návrh experimentu – Provedení výroby zkušebních vzorků, provedení ohybových zkoušek
- 5) Vyhodnocení dosažených výsledků a závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] Jančář, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. 1. vyd. Brno, 2003
- [2] Ehrenstein, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha, 2009
- [3] Chung, Deborah D. Composite materials: functional materials for modern technologies. London: Springer
- [4] Krebs, S., Bryksí-Stunová, B., Kolařík, L.: Podklady k výuce předmětu Technologie zpracování plastů a kompozitů, FS, ČVUT v Praze, Praha

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Lukáš Holub, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Lukáš Holub, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Lukáše Holuba Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: .....

.....

Podpis autora

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé práce panu Ing. Lukáši Holubovi Ph.D. za cenné rady, trpělivost a čas, který mi věnoval.

Děle bych chtěl poděkovat společnosti ISOMA s.r.o. a především panu Dušanu Elznicí, díky kterému jsem měl možnost otestovat vzorky UltreX.

Rád bych poděkoval také panu Ing. Vítu Novákovi a panu Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D., kteří mi velmi pomohli s měřením vzorků v rámci experimentu.

Velké poděkování také patří celému Ústavu strojírenských technologií za zapůjčení laboratoře a jejího vybavení.

# Anotace

**Název bakalářské práce:** Technologie výroby kompozitních materiálů s polymerní matricí s aplikováním různých výztuží a následné porovnání jejich mechanických vlastností.

**Autor práce:** David Derka

**Vedoucí práce:** Ing. Lukáš Holub, Ph.D.

**Akademický rok:** 2022/2023

**Vysoká škola:** ČVUT v Praze, Fakulta strojní

**Ústav:** 12133 – Ústav strojírenské technologie

**Vedoucí ústavu:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Rozsah práce:** 74 stránek, 10 tabulek, 50 obrázků

**Klíčová slova:** kompozit, polymerní matrice, papírová výztuž, bavlněná výztuž, epoxidová pryskyřice, mez pevnosti v ohybu

**Abstrakt:** Tato Bakalářská práce se zabývá popisem kompozitních materiálů. Popisuje jejich dělení podle materiálu matrice, výztuže a jejího rozmístění v kompozitu. V rámci experimentální části byly vyrobeny kompozity, ty se porovnávaly s kompozity průmyslově vyráběnými. Jednalo se o kompozity s polymerní matricí vyztužené u prvního typu papírem a u druhého typu bavlněnou textilií. Vzorke kompozitů byly obrobena na požadovaný rozměr a podrobena zkoušce ohybem. V závěru došlo k porovnání hodnot napětí na mezi pevnosti v ohybu jednotlivých typů kompozitu.

# Annotation

- Title of the final thesis:** Technology for the production of composite materials with a polymer matrix with the application of various reinforcements and subsequent comparison of their mechanical properties.
- Author:** David Derka
- Supervisor:** Ing. Lukáš Holub, Ph.D.
- Academic year:** 2022/2023
- University:** CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
- Department:** 12133 – Department of Manufacturing Technology
- Head of department:** doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
- Extent:** 74 pages, 10 tables, 50 pictures
- Keywords:** composite, polymer matrix, paper composite, textile composite, epoxy resin, flexural strength
- Abstract:** This Bachelor thesis deals with the description of composite materials. It describes their classification according to the matrix material, reinforcement and its distribution in the composite. In the experimental part, composites were fabricated and these were compared with industrially produced composites. These were polymer matrix composites reinforced with paper for the former and cotton fabric for the latter. The composite samples were machined to the required dimensions and subjected to a bending test. Finally, the stress values were compared between the flexural strengths of each type of composite.

# Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE .....	10
2. DEFINICE KOMPOZITU .....	11
3. HISTORIE KOMPOZITU.....	12
4. VLASTNOSTI.....	13
5. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE MATERIÁLU MATRICE .....	17
5.1 Keramická matrice.....	17
5.2 Kovová matrice .....	18
5.3 Polymerní matrice.....	19
5.3.1 Termoplasty.....	19
5.3.2 Reaktoplasty .....	19
6. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE MATERIÁLU VÝZTUŽE .....	26
6.1 Skelné vlákno .....	27
6.2 Uhlíkové vlákno.....	27
6.3 Textil.....	29
6.4 Papír.....	31
7. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE ORIENTACE VÝZTUŽE.....	32
7.1 Částicové.....	32
7.2 Vláknové.....	33
8. ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	36
8.1 Zkouška ohybem .....	37
9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	38
9.1 VÝROBA VZORKŮ .....	38
9.1.1 Volba materiálů.....	38
9.1.2 Výroba formy.....	39
9.1.3 Výroba polotovaru.....	39

9.1.4	Formátování a frézování vzorků .....	42
9.2	MĚŘENÍ VZORKŮ .....	45
9.2.1	Rozměry vzorků vyráběných kompozitů.....	46
9.2.2	Rozměry vzorků kompozitů od ISOMA s.r.o. ....	48
9.3	ZKOUŠKA OHYBEM .....	49
9.4	VÝPOČET NAPĚTÍ NA MEZI PEVNOSTI .....	52
9.4.1	Vzorky vyráběných kompozitů s papírovou výztuží.....	53
9.4.2	Vzorky vyráběných kompozitů s bavlněnou výztuží .....	55
9.4.3	Vzorky z epoxidové pryskyřice G20 bez výztuže.....	57
9.4.4	Vzorky kompozitů PAPER MICARTA od ISOMA .....	59
9.4.5	Vzorky kompozitů CANVAS MICARTA od ISOMA.....	60
10.	ZÁVĚR.....	62
	Bibliografie .....	65
	Seznam tabulek .....	71
	Seznam obrázků .....	72
	Přílohy .....	74



## Seznam zkratek

zkratka	vysvětlení
např.	například
tzv.	takzvaný, tak zvaný

## Seznam použité symboliky

symbol	[jednotka]	vysvětlení
$F$	[N]	Síla
$A$	[ $mm^2$ ]	Plocha
$\sigma$	[MPa]	Napětí
$\rho$	[ $kg \cdot mm^{-3}$ ]	Hustota
$E_m$	[MPa]	Modul pružnosti matrice
$E_f$	[MPa]	Modul pružnosti vláken
$\sigma_f$	[MPa]	Mez pevnosti vláken
$\sigma_m$	[MPa]	Mez pevnosti matrice
$l$	[mm]	Vzdálenost podpěr
$b$	[mm]	Šířka vzorku
$h$	[mm]	Tloušťka vzorku
$\lambda$	[ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	Tepelná vodivost
$W_o$	[ $mm^3$ ]	Modul průřezu v ohybu
$F_{MAX}$	[N]	Maximální ohybová síla
$M_{oMAX}$	[N·mm]	Maximální ohybový moment
$\sigma_{MAX}$	[MPa]	Napětí na mezi pevnosti v ohybu

# 1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Teoretická část této bakalářské práce pojednává o kompozitních materiálech. Jsou popisovány vlastnosti jednotlivých kompozitů a je provedeno jejich dělení do skupin podle typu matrice, výztuže a podle rozmístění výztuže v kompozitu. Největší důraz je přitom kladen na kompozity s polymerní matricí. V teoretické části je také obsažen popis zkoušek mechanických vlastností kompozitních materiálů.

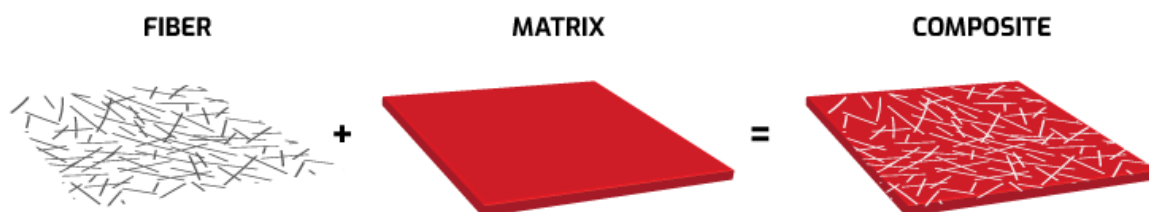
Experimentální část je zaměřena na výrobu kompozitních materiálů s polymerní matricí. Epoxidová licí pryskyřice společně s textilní bavlněnou a papírovou výztuží vytvoří kompozit. Z kompozitních desek se zhotoví vzorky, na kterých bude následně provedena zkouška prostým ohybem. Pro referenci bude změřeno i pět vzorků vyrobených z homogenní hmoty pryskyřice, která bude použita u kompozitů. Tak bude zjištěno, jak jednotlivé výztuže ovlivňují odolnost vůči ohybu. Kromě vzorků vyráběných experimentální metodou bude provedena zkouška ohybem i u kompozitních materiálů vyráběných průmyslově. Od každého typu kompozitu bude vyrobeno deset vzorků určených pro testování a celé proces výroby i průběh zkoušky budou podrobně zaznamenány. Data z měření vzorků budou zpracována do tabulek a grafů. Zprůměrováním hodnot napětí na mezi pevnosti v ohybu se docílí přesnějšího výsledku.

Průmyslově vyráběné kompozitní materiály poskytla společnost ISOMA s.r.o. Tato firma se zabývá prodejem tvrzených kompozitů vyrobených americkou společností Von Roll, která mimo jiné nabízí také kompozity pro dekorativní a estetické účely pod označením UltreX™. Právě materiály z kategorie UltreX™ budou testovány v experimentální části práce. Konkrétně budou měřeny vzorky materiálů *Canvas Micarta* a *Paper Micarta* [1]

Cílem práce je zjistit, zdali je možné v experimentální výrobě, vyrobit kompozit s polymerní matricí, který bude dosahovat srovnatelných mechanických vlastností jako kompozit vyráběný průmyslově. Pokud by se touto prací prokázala možnost takto vyrábět a testovat vzorky se srovnatelnou kvalitou, značně by to usnadnilo a zlevnilo zavádění nových inovativních kompozitních materiálů na trh. Bylo by možné experimentovat s prototypy vyrobenými ruční metodou v malém množství.

## 2. DEFINICE KOMPOZITU

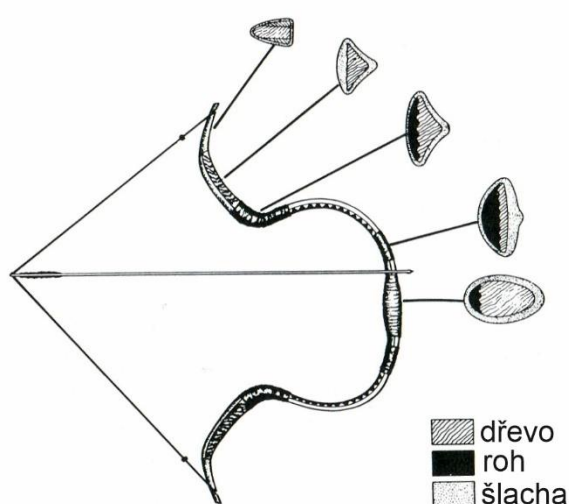
Kompozity jsou anizotropní a nehomogenní materiály. Každý kompozit se musí skládat ze dvou nebo více jednotlivých komponent spojených do jednoho celku (Obrázek 1). Jednotlivé komponenty mají rozdílné fyzikální vlastnosti a odlišné hranice. Jejich spojením získáme materiál s lepšími vlastnostmi, než jakých by dosáhly komponenty samostatně. Tento jev se nazývá synergický účinek a vychází ze silné vazby mezi pojivem a plnivem. Pojivo slouží jako matrice, která spojuje jednotlivé části plniva. Plnivo vyztužuje kompozit, každý typ disperze různě ovlivňuje mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Samotné plnivo je nespojitou fází a může být například v podobě vláken, částic nebo destiček. Změnou umístění a orientace výtuzže v matrici se budou měnit mechanické vlastnosti kompozitu. Nejčastějším pojivem jsou pryskyřice. [2] [3] [4]



Obrázek 1: Složení kompozitu [5]

### 3. HISTORIE KOMPOZITU

První nálezy dokazující použití kompozitu se datují do roku 800 př. n.l. v Izraeli. Zde se používala pro stavbu budov směs hlíny a kousků slámy, které po vysušení vytvořili směs s tvrdostí až 7MPa. Bláto zde zastává funkci pojiva, které spojuje stébla slámy, ty zvyšují tvrdost konstrukce a výsledkem je vyšší tvrdost a trvanlivost stavby. Zmínky o tomto materiálu nalezneme i v Bibli. Další prvky použití kompozitu z této doby najdeme například na konstrukcích lodí nebo u keramiky. Kombinace více materiálů pro dosažení lepších vlastností celku se využívala i při výrobě reflexních luků, kde se na sebe vrstvily pláty dřeva a zvířecích kostí (Obrázek 2). Jako pojivo bylo používáno lepidlo získávané vyvařováním koňských kopyt. Ty obsahují kolagen, který právě lze použít pro vzájemné spojování povrchů. [2] [6]



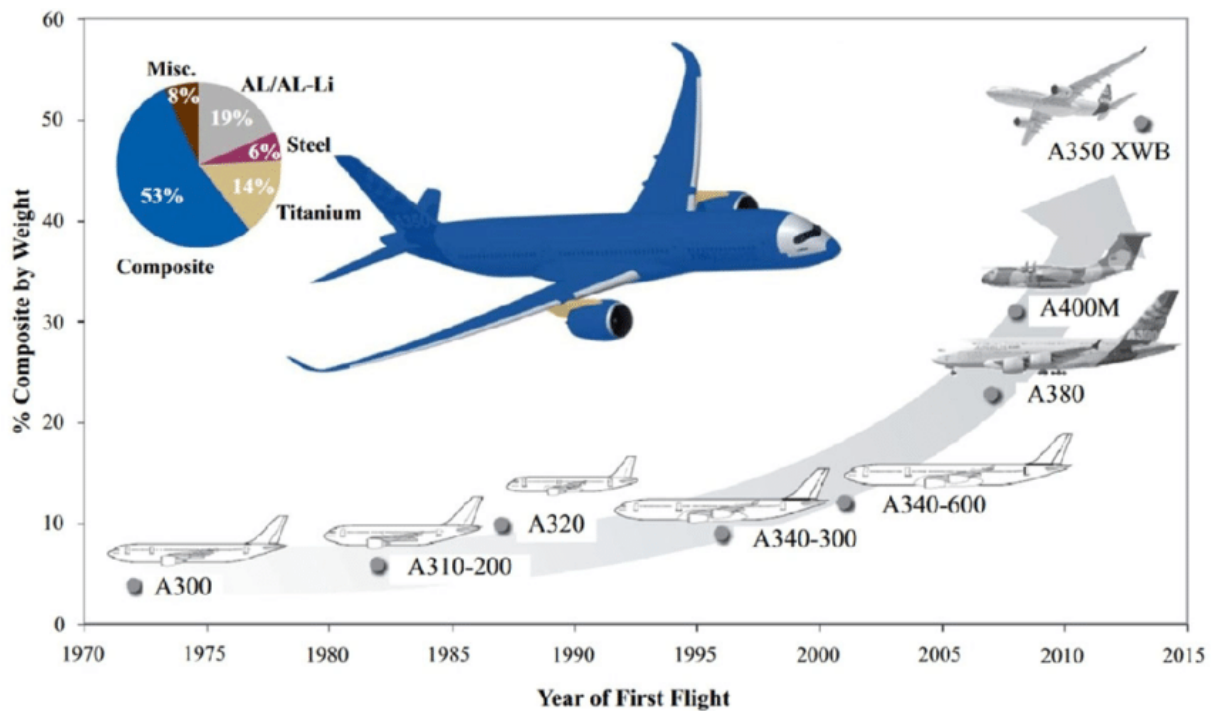
Obrázek 2: Kompozitní reflexní luk [6]

Velké rozšíření kompozitu v průmyslu přišlo společně s vývojem plastů na začátku 20. století. Syntetické polymerní materiály jako polystyren, vinyl nebo polyester svými vlastnostmi překonaly do té doby používané pryskyřice získávané z rostlin nebo živočišného kolagenu. V roce 1938 společnost Owens Corning na trh uvedla první sklolaminátové vlákno. Spojením skleněných vláken s polymerem vzniká vláknový kompozit (FRB), který je velice pevný a lehký, bohužel křehký. Byl to však začátek polymerního kompozitu, jako perspektivního materiálu s širokou možností uplatnění v průmyslu. [7] [8]

## 4. VLASTNOSTI

S rostoucím tlakem na vývoj moderních materiálů, které dosahují lepších mechanických vlastností, došlo i k rozšíření používání kompozitních materiálů téměř do každého odvětví. V porovnání s homogenními materiály dosahují výrazně vyššího poměru pevnosti a měrné hmotnosti. Tyto vlastnosti umožňují snížit hmotnost konstrukce až o 20-30 %. Díky odlehčení konstrukce se snižuje i energetická náročnost. Pokročilé kompozitní materiály dosahují i vyšší odolnosti vůči tečení, odolnosti proti chemikáliím a dobře tlumí vibrace. Při výrobě je možné jim dát téměř jakýkoliv tvar a tím docílit zlepšení aerodynamiky nebo dalšího snížení hmotnosti vhodnou optimalizací. Při návrhu konstrukce z kompozitu se nabízí více možností návrhu, jako například snížení potřebného počtu dílů. [4] [8] [9]

U řady kompozitu můžeme pozorovat zvýšenou odolnost vůči otěru, oxidaci a vysokoteplotní korozi a u speciálních kompozitu i zvýšenou odolnost vůči poškození chemickými látkami a rozpouštědly. V porovnání s homogenním materiálem bez výztuže dosahuje vyššího odporu vůči teplotním a mechanickým šokům. Další důležitou vlastností kompozitu je anizotropie tohoto materiálu. Anizotropie udává změnu vlastností závislou na směru působící zátěžné síly. Tato vlastnost je výrazná obzvláště u v kompozitů s vláknovou výztuží. Materiál má různou pevnost podle směru, v němž je namáhán. Pokud s tím konstruktér počítá a díl tomu přizpůsobí, může tak zlepšit výsledné elastické vlastnosti součástí. Kompozity jsou vhodné pro rozměrné tenkostěnné součásti, proto se používají například na díly na letadlech (Obrázek 3), karoserie sportovních aut nebo skořepiny kajaků. [3] [10] [11] [12]



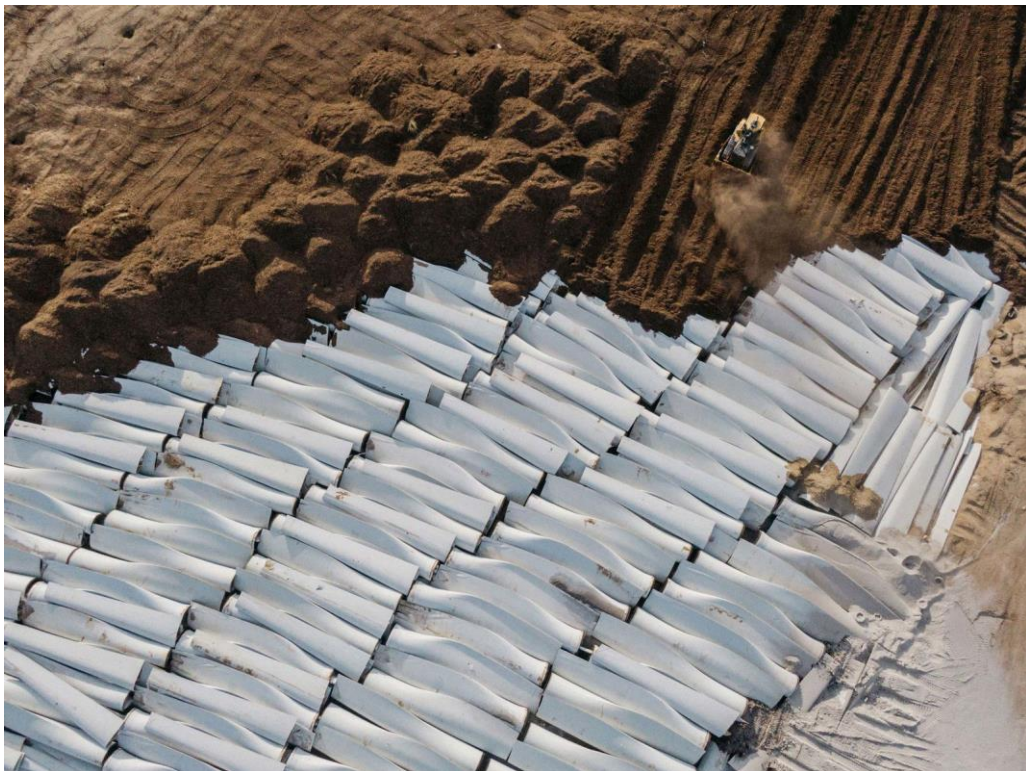
Obrázek 3: Použití kompozitu v konstrukci letadel [12]

Díky vysoké pevnosti a nízké měrné hmotnosti je to skvělý materiál na výrobu sportovního vybavení, jako jsou kola nebo tenisové rakety. Dále našly uplatnění ve zdravotnictví jako protézy nebo zubní implantáty, kloubní náhrady a další. [13] [14]

Kompozitní materiály mají také své nevýhody, se kterými je třeba počítat. Výroba kompozitu je v porovnání s ostatními konstrukčními materiály podstatně složitější a vyžaduje speciálně vybavené pracoviště. I suroviny při výrobě používané jsou nákladné, kvůli čemuž mají kompozitní materiály poměrně vysokou cenu. I když se kompozity vyznačují dlouhou životností, dříve nebo později dojde k jejich poškození. Nejčasnější vadou je delaminace neboli odlepování a porozita. Poškození často není na první pohled patrné a může se tak stát, že je přehlédnuta nutnost opravy nebo nahrazení dílu. To by například u konstrukcí letadel mohlo mít fatální následky, proto se pravidelně kontrolují na přítomnost vad. Používají se k tomu defektoskopie. Zkoušky, během kterých nedojde k poškození dílu. Při poruše výrobku z kompozitního materiálu je oprava velice náročná a drahá. Pokud při poškození dochází k porušení výztuže u nosných prvků konstrukce, oprava často není vůbec možná a díl je vyřazen.

[3] [15] [16]

Tím narážíme na téma likvidace a případné recyklace kompozitu. Kompozit je tvořený z více materiálů, které jsou mezi sebou pevně spojeny. Pokud bychom chtěli tyto jednotlivé materiály recyklovat, je třeba je od sebe separovat, což může být velice náročné a prozatím neexistuje mnoho technologií, které jsou toho schopné a současně ekonomicky výhodné. Dalším problémem je, že jako matrice se nejčastěji používají pryskyřice. To jsou polymerní materiály patřící mezi reaktoplasty. Ty, na rozdíl od termoplastů, není možné recyklovat a proces vytvrzení je nevratný. Řada dílů, u kterých byla použita taková matrice, často končí na skládkách (Obrázek 4). To je již v řadě států evropské unie zakázáno, ale ve státech, kde tento zákaz prozatím není, jsou skládky tohoto typu běžné. Mezi součásti, které můžeme na skládkách nalézt patří i listy větrných elektráren, které jsou vyrobeny ze sklolaminátu. [16] [17] [18] [19]



Obrázek 4: Skládkování listů větrných elektráren [17]

Další možností je následné využití vyřazených dílů k jinému účelu, tzv. druhotné kompozity. Z vyřazeného křídla letounu nebo lopatky větrné elektrárny je možné vyrobit něco nového, a tak znovu použít tento velice kvalitní materiál, který by jinak musel být nákladně a složitě likvidován. V posledních letech

vznikají projekty zabývající se využitím právě lopatek větrných elektráren. Vznikají tak kreativní řešení, jako jsou lavičky, mosty pro pěší nebo dětská hřiště (Obrázek 5). Další způsob, jak tento kvalitní materiál využít, spočívá v jeho rozdrcení a následném použití jako výztuže do betonu místo tradiční železné konstrukce. [17] [18]



Obrázek 5: Dětské hřiště vyrobené z vyřazených lopatek větrných elektráren [20]



## 5. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE MATERIÁLU MATRICE

Matrice je materiál, který v kompozitu slouží jako pojivo. Spojuje mezi sebou jednotlivé částice výztuže a zajišťuje mezi nimi přenos zatížení, a tak distribuuje zatížení po součásti. Současně také výztuži udává geometrickou polohu, která je důležitá pro anizotropii součásti a oddělení jednotlivých částic výztuže od sebe brání spojitému šíření trhlin. Matrice má nižší hustotu a pevnost než výztuž. Určuje tvar součásti, udržuje její tvar a chrání výztuž před vnějšími vlivy, které by mohly způsobit její degradaci. Základním faktorem v posuzování kvality kompozitu je zajištění maximální adheze mezi maticí a výztuží. Při zatížení by k první poruše mělo dojít ve výztuži a až poté v matici, která by si měla v tuto chvíli stále držet funkci pojiva. [2] [9]

### 5.1 Keramická matrice

Keramické matrice jsou tvořeny z keramických materiálů, jako jsou hlíny, skla, křemičitany a nitridy. Tyto materiály se vyznačují vysokou teplotní stabilitou, velmi velkou teplotní kapacitou a dobrým odvodem tepla. Proto se používají na výrobu brzdných kotoučů sportovních aut (Obrázek 6). Mezi další vlastnosti kompozitu s keramickou maticí patří odolnost vůči opotřebení, vysoká tvrdost a odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí. Tyto vlastnosti jsou důležité pro jejich použití v náročných průmyslových a technických aplikacích, jako jsou aeronautický a kosmický průmysl, automobilový průmysl, nebo ve zdravotnictví. [2] [4] [21]



Obrázek 6: Automobilové keramické kompozitní brzdy [22]

Samotná keramická matrice může být křehká a náchylná k praskání, což může vést ke snížení pevnosti a životnosti součásti. Proto při porovnání s kovovými nebo polymerními matricemi v nich může docházet ke vzniku prasklin dříve než ve výztuži. Keramické materiály jsou elektricky nevodivé a mají nízkou tepelnou vodivost. Jako výztuž se u nich nejčastěji používají dlouhá nebo krátká vlákna. [2] [4]

## 5.2 Kovová matrice

Materiály pro kovové matrice se používají slitiny hliníku, titan, měď, nerezová ocel nebo hořčík. Výztuže jsou nejčastěji kovové nebo keramické. V praxi se můžeme setkat například s  $Al_2O_3$ , SiC, TiC, W, nebo uhlíkovým vláknem. V porovnání s keramickou matricí mají vyšší tepelnou vodivost a vedou i elektrický proud, ale mohou podléhat oxidaci. Mají vyšší houževnatost a lépe odolávají rázům. Technologie výroby se může pro jednotlivé kovy lišit, každopádně mezi nejčastější metody výroby kompozitů s kovovou matricí patří nanášení tekutého kovu na výztuž, plasmové navařování, lisování a další. Mezi

speciálními technologiemi výroby nalezneme i kompozity vytvořené práškovou metalurgií. Kdy se jemné částice za vysokého tlaku a teploty spojí a vytvoří, tak kompozitní materiál. [4] [10] [19] [23]

## 5.3 Polymerní matrice

Nejpoužívanějšími kompozity jsou právě kompozity s polymerní maticí. Jsou odolné vůči korozi, většinou chemikáliím a v porovnání s ostatními maticemi mají nižší hmotnost. Polymerní matrice se používají v prostředí s nižší teplotou a je třeba počítat s velkou teplotní roztažností. Základní materiály pro tyto matrice jsou například polyamid, polypropylen, polyester nebo epoxidová pryskyřice. Polymery se dělí na termoplasty a reaktoplasty. [2] [3] [8] [19]

### 5.3.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymerní materiály charakteristické tím, že zahřátím mění svůj stav mezi pevným a měkkým. Tento jev je vratný, to znamená, že je možné je opakovaně tavit a následně různě tvarovat. Chemické vazby mezi atomy a molekulami jsou rovněž kovalentní. Fyzikální vazby v termoplastech jsou zodpovědné za jejich tepelnou citlivost. Tyto vazby zahrnují van der Waalsovy síly, dipólové interakce a vodíkové vazby. Tyto interakce jsou slabší než kovalentní vazby, což umožňuje termoplastům být taveny a formovány při zahřátí. Kompozity z termoplastů jsou často používány v leteckém a automobilovém průmyslu. Kompozity s termoplastickou maticí je možné lisovat, vytlačovat nebo vstříkovat. Výztuže mohou být použity pro zlepšení mechanických vlastností kompozitu, snížení hmotnosti nebo ceny. Kompozity s termoplastickou maticí se v průmyslu zpracovávají technologiemi válcování, lisování, vytlačování nebo vstřikování. Technologický postup je stanoven na základě volby materiálu, velikosti výztuže, tvaru vyráběných dílů a dalších parametrech. [8] [24] [25]

### 5.3.2 Reaktoplasty

Jsou to polymerní materiály, které vznikají z monomerů pomocí nevratných chemických reakcí. Ty způsobí přechod z lineárního viskózního

stavu do síťovaného stavu. Tímto zasíťováním vzniká řada typů vazeb, primární je však kovalentní vazba. Vznikají mezi atomy a molekulami a jsou velmi silné. To reaktoplastům zajišťuje vysokou pevnost a stabilitu. Další důležitou vlastností reaktoplastů jsou jejich fyzikální vazby, které umožňují polymerům držet pohromadě. Tyto fyzikální vazby jsou obvykle slabší než chemické vazby a zahrnují různé interakce mezi molekulami, jako jsou van der Waalsovy síly, dipólové interakce a vodíkové vazby. Celkově jsou chemické vazby v reaktoplastech zodpovědné za jejich pevnost a stabilitu, zatímco fyzikální vazby pomáhají udržovat polymer pohromadě a zajišťují jeho fyzikální vlastnosti jako je křehkost a elasticita. [8] [24] [26]

K chemické reakci, která způsobí zasíťování a vytvrzení hmoty, dochází například smícháním složek v přesně daném poměru za předepsané teploty. Tyto složky se v praxi označují jako tužidlo a tvrdidlo, kde tvrdidlo má funkci zasíťovacího činidla. Do reaktoplastu je možné přidávat plniva nebo barviva pro změnu jejich mechanických vlastností nebo vzhledu (Obrázek 7). [8] [24] [26]



Obrázek 7: Rukojeť nože z epoxidové pryskyřice

Pro výrobu kompozitu s reaktoplastickou maticí jsou vhodné tyto technologie:

- Tažení–vyrábějí se takto např. desky, trubky nebo profily. [27]
- Ovíjení–vhodné pro výrobu kruhových profilů. [27]
- Lití do formy [27]
- Lití do autoklávu [25]
- Lisování [25]
- Ruční laminování–tato metoda je zdlouhavá a neproduktivní. Její výhodou je, že nevyžaduje žádné speciální vybavení nebo stroje. Pořizovací náklady při zavádění této technologie ve výrobě tedy nejsou vysoké. Ruční laminací se vyrábějí tenkostěnné skořepiny, jako jsou karoserie aut nebo člunů. [27]
- SMC–jedná se o velice produktivní metodu, při které se z bubnů odvíjí folie termosetické pryskyřice a po přidání výztuže dochází k válcování nebo lisování. [27]

Jako matrice kompozitu se používají například tyto reaktoplasty: epoxidová, polyesterová, fenolytická, polyimidová pryskyřice. Jejich aplikace je možná v prostředí s teplotami do 120 °C, ale polyamidovou pryskyřici je možné použít i v prostředí do 250-290 °C. Fenolytická pryskyřice má tu vlastnost, že při jejím hoření nevznikají toxické látky a hořením vzniká menší množství kouře a dýmu. Používá se proto například v interiérech letadel, kde by při požáru kouř a toxické zplodiny způsobily fatální škody na zdraví a životech pasažérů. [8] [10] [11]

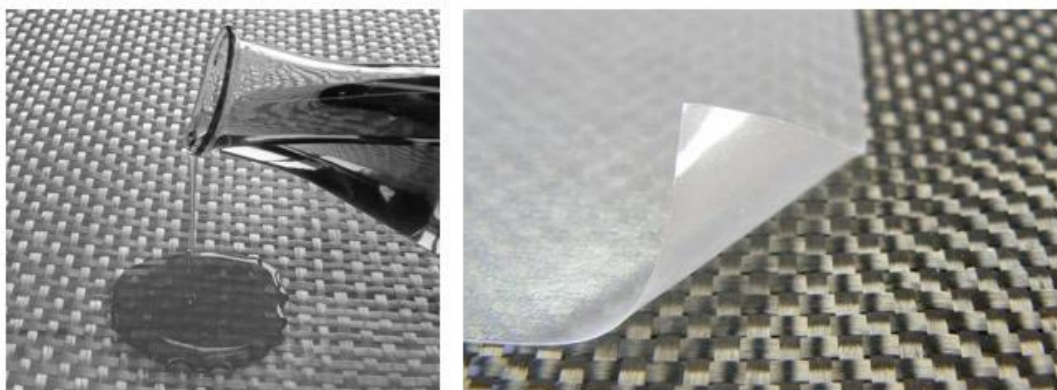
Reaktoplasty mají proti kovům nebo keramice vyšší viskozitu a dobře smáčí vlákna výztuže. Jako výztuž se nejčastěji používá skelné, uhlíkové, přírodní nebo aramidové vlákno. Výrobky mohou být například karoserie vozidel. Dále je možné se setkat s papírovou nebo textilní výztuží. Tento typ kompozitů se často označuje jako micarta a používají se především na rukojetí nožů nebo zbraní. [1] [8] [10] [24]

### 5.3.2.1 Druhy pryskyřice

#### Epoxidová pryskyřice

Jako epoxidové pryskyřice označujeme látky, které ve svém řetězci obsahují alespoň dvě epoxidové skupiny. Tyto skupiny jsou velmi reaktivní a tato reakce způsobují zasíťování makromolekul. Jedná se o velmi rozšířený syntetický reaktoplast používaný jako matrice kompozitu v celé řadě odvětví průmyslu. Vyznačují se chemickou a korozní odolností. Podléhají však poškození acetonem a chlorovaným uhlovodíkům. [3] [4] [26] [28]

Při odlévání epoxidových pryskyřic je důležitá okolní teplota. Pokud by byla příliš nízká, tak by po smíchání obou složek nedošlo k dostatečně silné reakci a při vysokých teplotách je rychlost reakce taková, že komplikuje pracovní postup. Ideální teplota pro práci s epoxidovými pryskyřicemi je 20 °C. Pryskyřice nalezneme nejen v tekuté podobě, ale i v pevném skupenství. Pryskyřice je formě folie (Obrázek 8). Ta se používá např. při laminaci. Folie již obsahuje tužidlo a ke spuštění reakce a vytvrzení dochází zahřátím folie na předepsanou teplotu. Epoxidové pryskyřice je možné modifikovat přidáním dalších látek a měnit, tak jejich vlastnosti. [8] [25]



Obrázek 8: tekutá a fóliová epoxidová pryskyřice [8]

Epoxidy jsou odolné vůči vlhku a plísním a velmi málo propouštějí vodní páry. Uchovávají si dobré mechanické vlastnosti i s rostoucí teplotou. Díky těmto vlastnostem se používají v letectví, při výrobě karoserií a v kosmonautice jako izolace a tmely. Tento materiál má malý počet elektrolytů a vysokou odolnost

vůči plazivým proudům, proto je nalezneme i v elektrotechnice, kde se s ní zalévají elektrické obvody. [3] [28] [29]

Epoxidové pryskyřice se vyznačují vysokou adhezí a jsou přilnavé na mnoho materiálů jako například sklo, ocel, dřevo. Po vytvrzení je jejich povrch pevný, hladký, lesklý a často se takový povrch nechává bez dalších úprav. Epoxidy se používají na odlévání podlah (Obrázek 9). [3] [25] [30]



Obrázek 9: Epoxidová podlaha [31]

### **Nenasycená polyesterová pryskyřice**

Jedná se o jeden z používanějších materiálů pro výrobu kompozitních materiálů. Nejčasnější výztuží jsou skelné vlákna, následně se profily z tohoto materiálu používají například ve stavebnictví. Polyesterové pryskyřice se vytvrzují při pokojové teplotě nebo při vyšších teplotách. Řetězce nenasycených polyesterů ve své vazbě obsahují dvojitou kovalentní vazbu. [3] [30] [32]

Mezi jejich nevýhody patří vysoké smrštění, které dosahuje hodnoty 6-9 % a současně obsahují látky škodící životnímu prostředí, například styren. Styren v matrici zvyšuje její tekutost, ale po vytvrzení zvyšuje křehkost kompozitu. Jejich výhodou je nízká cena. [3] [25] [30] [32]

## Fenolová pryskyřice

Jedná se o křehké pryskyřice, někdy nazývané také jako fenoplasty. Vznikají polykondenzací fenolu s aldehydy, nejčastěji se k tomu používá formaldehyd. Výsledná látka se nazývá fenol-formaldehydová pryskyřice (PF). Vyznačují se vysokou pevností a jsou odolné vůči řadě nepolárních rozpouštědel, kyselinám i povětrnostním podmínkám. Mají nízkou teplotní vodivost a velmi špatně hoří. Současně mají velmi dobré elektroizolační vlastnosti. To je způsobeno vlivem značné polarizace, díky které dochází k vysokým dielektrickým ztrátám. Dříve se používaly jako primární materiál pro výrobu elektrických obvodových desek a jako zalévací hmota elektrických obvodů. Tyto pryskyřice jsou však křehké, a proto se do nich ve většině případů přidávají plniva. Plniva současně mohou zvyšovat teplotní a chemickou odolnost, zvyšovat pevnost a vzhled kompozitu. Jako plniva se používají organické materiály jako dřevní moučka, papír nebo textil, ale i anorganické materiály, např. břidlice, grafit nebo kaolin (Obrázek 10).

[8] [25] [28] [30] [33]

Jedná se o nejstarší komerčně používanou pryskyřici a ve své době se z ní vyráběly kompozity, které můžeme znát pod jejich obchodními názvy: [33] [34]

- Bakelit (PF s dřevěnou močkou)
- Novotext (PF s textilní výztuží)
- Umakart (PF s papírovou výztuží)



Obrázek 10: Výrobky z kompozitu s fenolickou maticí [8]



V současné době je z velké části nahradily epoxidové pryskyřice, které jsou v porovnání s PF ale dražší. Díky svým vlastnostem se dodnes často používají při výrobě tepelněizolačních materiálů, jako jsou izolační desky ve stavebnictví nebo licí systémy určené k izolaci střech a podlah. Často se s nimi můžeme setkat i jako s pojivem řezných a brusných kotoučů. [19] [34]

## 6. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE MATERIÁLU VÝZTUŽE

Výztuž výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu a její rozmístění a orientace v matrice určuje anizotropii výsledného kompozitu. Výztuž už z podstaty svého názvu vyztužuje matrici, zvyšuje její pevnost a elastické vlastnosti. [3]

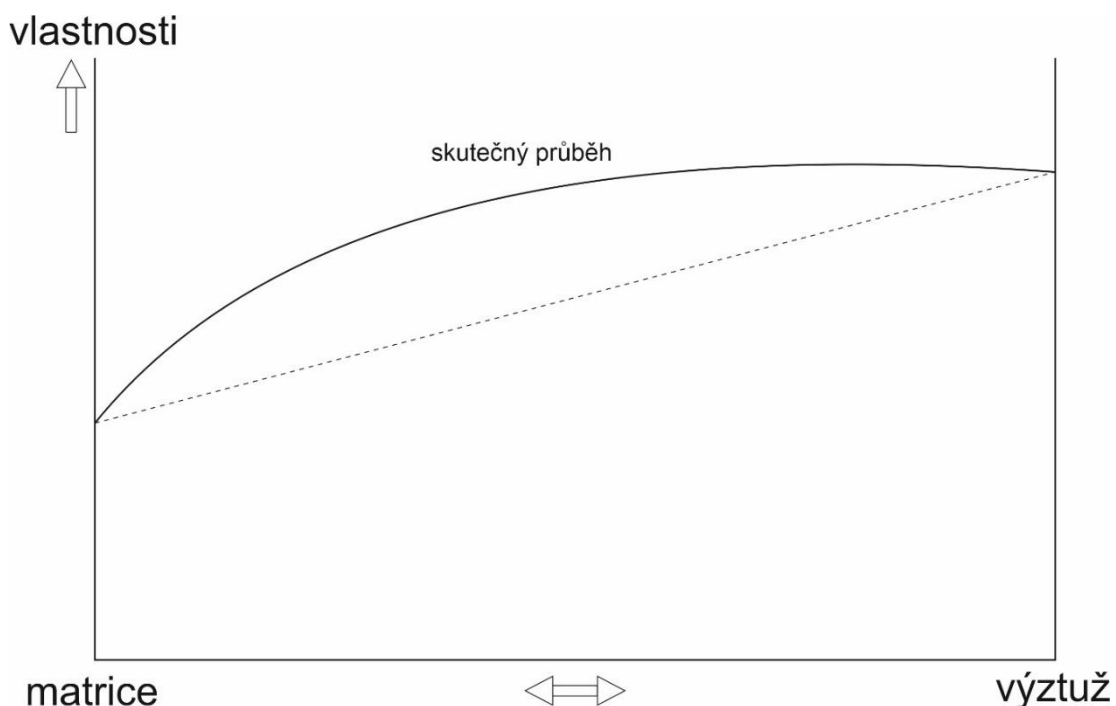
Mez pevností vláken musí být vyšší než mez pevnosti matrice

$$\sigma_f > \sigma_m$$

Modul pružnosti vláken musí být vyšší než modul pružnosti matrice

$$E_f > E_m$$

Výztuž v kompozitu také způsobuje synergický účinek. To znamená, že samotná matrice by měla mít vždy horší mechanické vlastnosti než kompozit s touto matricí. Průběh změny těchto vlastností v závislosti na rostoucím objemu výztuže, obsažené v kompozitu, je možné vynést do grafu (Obrázek 11). Z grafu je patrné, že funkce má i své maximum, kdy je dosaženo nejlepších mechanických vlastností. [4] [11]



Obrázek 11: synergický účinek, překresleno podle [2]

Podíl výztužné fáze a matrice se liší podle konkrétní aplikace. Aby se výsledný materiál mohl označit za kompozit, měla by výztužná fáze tvořit 10-15 % objemu kompozitu. V praxi je však při výrobě kompozitu toto procento vyšší, nejčastěji mezi 20-70 %, tak aby výztuže bylo dostatečné množství pro docílení požadované tvrdosti, pevnosti a odolnosti vůči únavě. [35]

## 6.1 Skelné vlákno

Jeden z nejpoužívanějších kompozitů s polymerní matricí. Skelná vlákna se vyrábějí tažením z taveniny a mají většinou průměr od 3,5 do 20  $\mu\text{m}$ . Vlákna se spojují do pramenů a opatří se ochranným povlakem, protože jsou velice lámavá a tento povlak snižuje lámavost. Prameny se navíjí na buben, ze kterého se následně odvíjí při výrobě. Výroba je snadná a díky tomu i levná. Skelné vlákno je odolné vůči vysokým teplotám i chemikáliím. Má však v porovnání s jinými konstrukčními materiály nižší modul pružnosti (Tabulka 1). [4] [25] [32]

Tabulka 1: Porovnání vlastností sklolaminátu s konstrukčními materiály [8]

Materiál	Hustota [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [MPa]
Sklolaminát *	2,10	1000 + 1400	45 000
Ocel	7,85	400 + 1200	210 000
Hliník	2,70	180	70 000
Polyvinylchlorid (PVC)	1,38	45 + 65	3 500

\* Vlastnosti lze měnit typem a skladbou výztuže, poměrem množství výztuže a pryskyřice, včetně jejího typu.

## 6.2 Uhlíkové vlákno

Patří mezi nejpevnější výztuže kompozitu. Vyznačují se svou vysokou pevností v tahu, která je až 7000MPa a jsou odolná vůči creepu, tečení a dlouhodobému dynamickému namáhání. Uhlíková vlákna se dělí na:

- HS vysokopevnostní vlákna (High Strength)
- HM vysokomodulová vlákna (High Modulus)
- HMS uhlíková vlákna s vysokou tuhostí a vysokým modulem (High Modulus and Strain)
- IM středně modulová a pevnostní (Intermediate Modulus).

Nejčastěji se používají u polymerních matric, ale své uplatnění mají i v kovových, keramických a uhlíkových matricích. Jedná se o často používaný materiál při výrobě karoserii, výfukových systémů a dalších součástí sportovních aut (Obrázek 12). Uhlíková vlákna mají vysokou teplotní odolnost, které je možné využít hlavně v aplikacích s keramickou nebo uhlíkovou matricí. Dobře odolávají vlivům rozpouštědel, kyselin a dalším chemikáliím. Uhlíková vlákna jsou odolná vůči korozi, avšak při vysokých teplotách dochází k oxidaci. Tepelná vodivost uhlíkových vláken závisí na mnoha parametrech, jako je množství nebo orientace vláken. Dosahuje hodnot od 500 do 2000  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ . To je násobně vyšší než například u mědi, kde se  $\lambda$  pohybuje okolo 400  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ . [3] [25] [36] [37]

Uhlíkové vlákno nemá jen výhody. Je třeba počítat s vysokou cenou tohoto materiálu a potížemi vznikajícími při jeho obrábění. Studie, které byly provedeny na téma škodlivosti uhlíkových nanočástic naznačují, že při vdechnutí nebo spolknutí uhlíkových vláken může dojít k vážným zdravotním problémům. Může dojít k mezoteliomu nebo rakovině plic. [3] [36] [37]



Obrázek 12: Výroba trubky z kompozitu s uhlíkovými vlákny [38]

## 6.3 Textil

Po tomto typu kompozitních materiálů v posledních letech stoupá poptávka, a to především díky levné a produktivní výrobě. Nachází se uprostřed spektra mezi náklady a výkonem. Jejich nevýhodou je hořlavost většiny druhů těchto vláken. Při výrobě kompozitu se používají plátka tkané i netkané textilie vyráběná z přírodních nebo syntetických vláken (Obrázek 13). [39] [40]

Existují tři hlavní zdroje, ze kterých lze vyrábět přírodní vlákna. Jsou to celulózová vlákna (původ z rostlin), proteinová vlákna (původ ze zvířat) a minerální vlákna. V praxi se můžeme setkat s těmito: juta, konopí, len, bavlna, kokosová vlákna a další. Přírodní vlákna jsou citlivější na vlhkost než syntetická. Díky dobré nasákavosti, je zde vyšší riziko poškození způsobené vlhkostí. Na druhou stranu jsou však odolnější vůči slunečnímu záření, takže se vlákna vlivem záření méně poškozuje. [39] [41]

Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností výztuží z přírodních vláken [42]

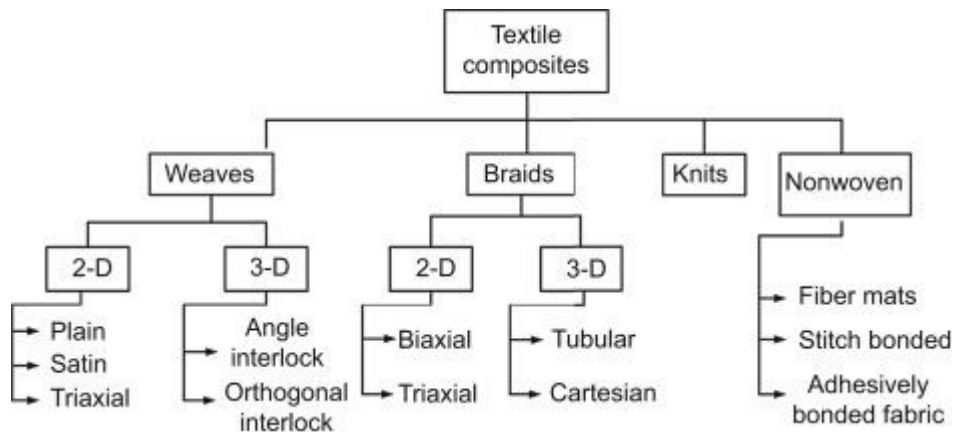
druh přírodního vlákna	rozměr v ( $\mu\text{m}$ )	mez pevnosti v tahu (MPa)	modul pružnosti $E$ (GPa)
Bambusová	15-30	550	36
Jutová	10-50	580	22
Kokosová	10-20	250	5,5
Rýžová	5-15	100	6
Přírodní hedvábí	15	400	13
Pavoučí	4	1750	12,7

Syntetická vlákna se získávají syntézou uhlíku, vodíku a dalších prvků. Mezi syntetická textilní vlákna je možné zařadit polyesterová, polyamidová a další. Přírodní vlákna jsou proti syntetickým levnější a lehčí, stále jsou však pevná a jejich velkou výhodou je rozložitelnost v přírodě. Jejich spojením s kompostovatelnými pryskyřicemi vznikají udržitelné kompozitní materiály, které jsou proti tradičním polymerním kompozitům výrazně šetrnější k životnímu prostředí. [40] [43] [44]

Textilní vlákna jsou nasáková a s dobře zatékavou polymerní maticí vytváří pevné spojení. Výsledný kompozit je pružný a odolnější proti dynamickému namáhání než samotná matrice. Tyto kompozity dosahují vyšších pevností v tahu než v tlaku a při konstrukci s touto vlastností musíme počítat.

Jejich chování se dá předpokládat jako lineárně pružné až do porušení. Rozložením a orientací výztuže v kompozitu lze ovlivnit jeho anizotropii. Dále je možné vlákna nasekat a smíchat s polymerem a následně vstříkovat do formy. Často se setkáme s textilní kombinovanou výztuží, kde se vrstvy textilie prokládají například skelným vláknem nebo pryží.

[40] [42] [44]



Obrázek 13: Schéma dělení textilních výztuží [45]

## 6.4 Papír

Papír je také možné použít jako výztuž při výrobě kompozitu. Papír je lehký, houževnatý materiál, který vzniká zhušťováním vláken. Nejpoužívanější surovinou jsou přírodní vlákna na bázi celulózy. Při strojní výrobě papíru se nejčastěji používá buničina získávaná z jehličnatých stromů. Při ruční výrobě papíru se především používá bavlněný linters. To je odpadový materiál vznikající při zpracování bavlny. Další materiály vhodné pro výrobu papíru jsou například bambus, konopí, juta a další. Papír vyztužuje obvykle kompozity s polymerní maticí. Papírové listy v kombinaci s pryskyřicí po vytvrzení vytvoří pevný, houževnatý materiál s dobrou odolností proti rázům. Proces výroby je jednoduchý a není potřeba složitého vybavení a při správném postupu výroby je kompozit voděodolný a rozměrově stály. Pro změnu vzhledu je možné do něj přidávat barviva, plniva nebo přímo barevné listy papíru. Existují i imitace různých přírodních materiálů od břidlice po dřevo. Tohoto efektu je docíleno potisknutím vrchní vrstvy papíru požadovaným vzorem. [1] [46] [47] [48]

Díky jeho vlastnostem si papírové kompozity oblíbili designéři, kteří pro tento materiál našli uplatnění při výrobě rukojetí nožů nebo zbraní. Současně pomalu nahrazuje dřevo při výrobě interiérového i exteriérového nábytku a jeho popularita roste i v dalších odvětvích. Papírové listy s fenol-formaldehydovou maticí patřily mezi první kompozity s polymerní maticí. Dodnes se používají jako izolační materiál v elektrotechnice nebo jako konstrukční materiál. Díky schopnosti dobře tlumit rázy a odolávat otěru, se z tvrzeného papíru stal materiál ideální pro výrobu méně namáhaných ozubených kol, třecích ložisek, kladek a dalších strojních součástí. Tvrzený papír je také někdy označován jako kartit nebo Pertinax. [1] [33] [34] [48]

## 7. DĚLENÍ KOMPOZITŮ PODLE ORIENTACE VÝZTUŽE

Při konstrukci je potřeba nejen zvolit vhodný materiál výztuže, ale i její typ a rozmístění v matrici. Disperze může mít tvar částec, vláken, lamel nebo pláten, které tvoří skelet konstrukce (Obrázek 14). Další parametr, který výrazně ovlivňuje vlastnosti kompozitu, je procentuální množství obsažené ve výsledném kompozitu. Aby byl materiál považován za kompozit, měl by obsahovat minimálně 10% výztužné složky. [2] [49]



Obrázek 14: Druhy výztuže [30]

### 7.1 Částicové

Plnivo tvoří částice s lepšími mechanickými vlastnostmi, než má matice. Účinně kompozit zpevňují drobné a rovnoměrně rozmístěné částice. Charakteristickou vlastností pro kompozity s částicovou výztuží je izotropie mechanických vlastností. To znamená, že materiál má stejné chování vlivem síly bez ohledu na její orientaci. Důležitá je kvalita rozhraní mezi matricí a disperzí, ta ovlivní soudržnost kompozitu. Částice nemusí být dokonale kulaté, rozměry ve všech směrech by měly být přibližně stejné, aby se nejednalo o vláknovou výztuž. U částicových výztuží dochází k dělení do podskupin podle velikosti částic. Jako velké částice se označují ty od 0,1mm a výše. Malé částice mají rozměry obvykle řádu nm. Mikročásticové kompozity se nazývají disperzně zpevněné, k tomu dochází na atomární nebo molekulární úrovni. Tímto odvětvím se zabývají spíše metalurgové. Jako matrice částicových kompozitů se používají kovy, keramika i polymery. Částice mohou být z konstrukční keramiky, kovů nebo kysličníků kovů a dalších. Při volbě materiálů, ze kterých se kompozit bude skládat, je třeba, aby



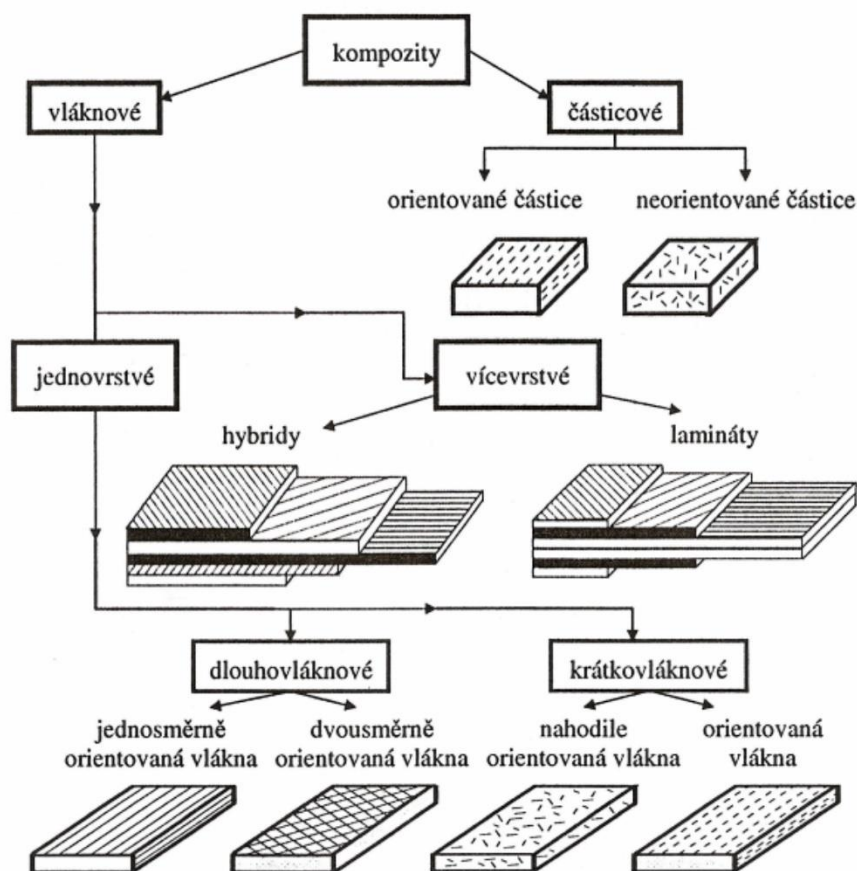
tepelná roztažnost všech složek měla být přibližně stejná a neměla by se lišit více než  $t \cdot 4 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Pokud by tato podmínka nebyla splněna, vlivem roztažnosti by v kompozitu vznikalo pnutí, které značně snižují pevnost materiálu. [2] [49]

Mezi významné kompozity s částicovou disperzí patří ty vyráběné metodou slinování prášků cobaltu, wolframu nebo titanu. Dosahují vysoké pevnosti a teplotní odolnosti, proto se tento materiál používá na výrobu vysoce výkonných obráběcích nástrojů. [49]

Nejvýznamnějším kompozitem tohoto typu s polymerní matricí je pryž. Ta vzniká z kaučuku přidáním plniv, např. sazí nebo  $SiO_2$ . Pryže se díky otěruvzdornosti a schopnosti tlumit vibrace stali materiálem vhodným pro výrobu pneumatik. Plněním drobnými částicemi u plastů roste jejich tuhost, modul pružnosti nebo pevnost. Jinými typy disperze je možné ovlivnit i další vlastnosti kompozitu, jako je vedení tepla, elektrického proudu nebo zvýšení odolnosti. Plnivo také ve většinou snižuje výrobní cenu kompozitu. [49] [50]

## 7.2 Vláknové

U tohoto typu kompozitu výztuž tvoří tělesa ve tvaru vláken. Ty jsou charakteristické tím, že jeden z jejich rozměrů je výrazně větší než zbylé. Obecně se udává, že délka vlákna výztuže by měla být násobkem jeho příčného rozměru. Mechanické vlastnosti kompozitu ovlivňuje materiál vlákna a jeho vazba s matricí. Kromě délky vláken zde hraje roli i rozmístění výztuže v kompozitu. Zda-li je výztuž jen v jediné nebo více vrstvách dále kompozity dělí na jedno a více vrstvé (Obrázek 15). [49] [50]



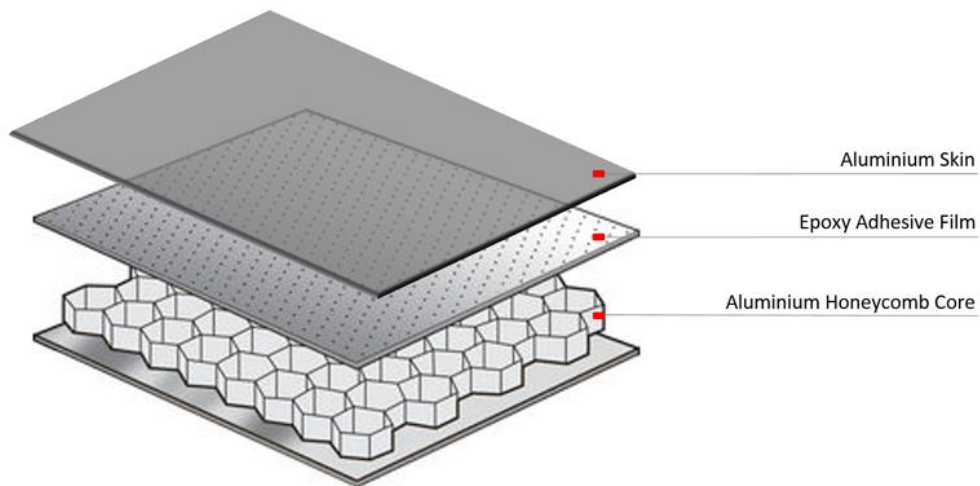
Obrázek 15: Dělení kompozitu podle výztuže [50]

Krátkovláknové kompozity mívají většinou náhodně rozmístěnou výztuž v matrici, orientaci vláken při výrobě je možné ovlivnit jen při vstřikování. U krátkovláknových kompozitů je délka deseti až stonásobkem průměru vlákna. Disperze bývají nasekaná vlákna například uhlíku, aramidu nebo skla. U krátkovláknových kompozitů je délka deseti až stonásobkem průměru vlákna. Výztuží mohou být i nasekaná vlákna textilií. Jak bylo o materiálu textilních vláken již zmíněno, mohou být jak přírodní, tak i syntetická. Tento typ výztuže se používá jen u kompozitů s polymerní matricí a jako výztuž je možné použít i textil vzniklý, jako odpadový materiál při výrobě oblečení. Po následném rozemletí odstřížků získáme levný materiál, který kompozitu přidá na houževnatosti. [51] [44] [49]

Dlouhovláknové kompozity se dále dělí podle orientace v kompozitu, která může být jedním směrem nebo se vlákna kříží a vytváří tak mřížku. Tím se mění izotropní vlastnosti kompozitu. Materiál vláken je dost podobný jako u

krátkovláknových kompozitů a používají se tedy uhlíková, aramidová, skelná a textilní vlákna. Výztuží mohou být i dráty vyrobené z oceli wolframu, nebo dalších kovů. Vlákna se často spojují do pramenů nebo do úpletu. Tak vzniká dvousměrná nebo třisměrná orientace v kompozitu, která tak vytváří velmi silné provázání výztuže s matricí. [4] [49]

Při vrstvení kompozitů je možné kombinovat výztuže z různých materiálů. Tak vznikají strukturální kompozity. Vrstvy jednotlivých materiálů se mohou v kompozitu pravidelně opakovat a jádro kompozitu z obou stran obklopuje plášť. Takovýto typ vícevrstvého kompozitu se nazývá laminát (Obrázek 16). Každý materiál kompozitu propůjčuje některé ze svých vlastností a dohromady vytvářejí hybridní materiál. [32] [49]



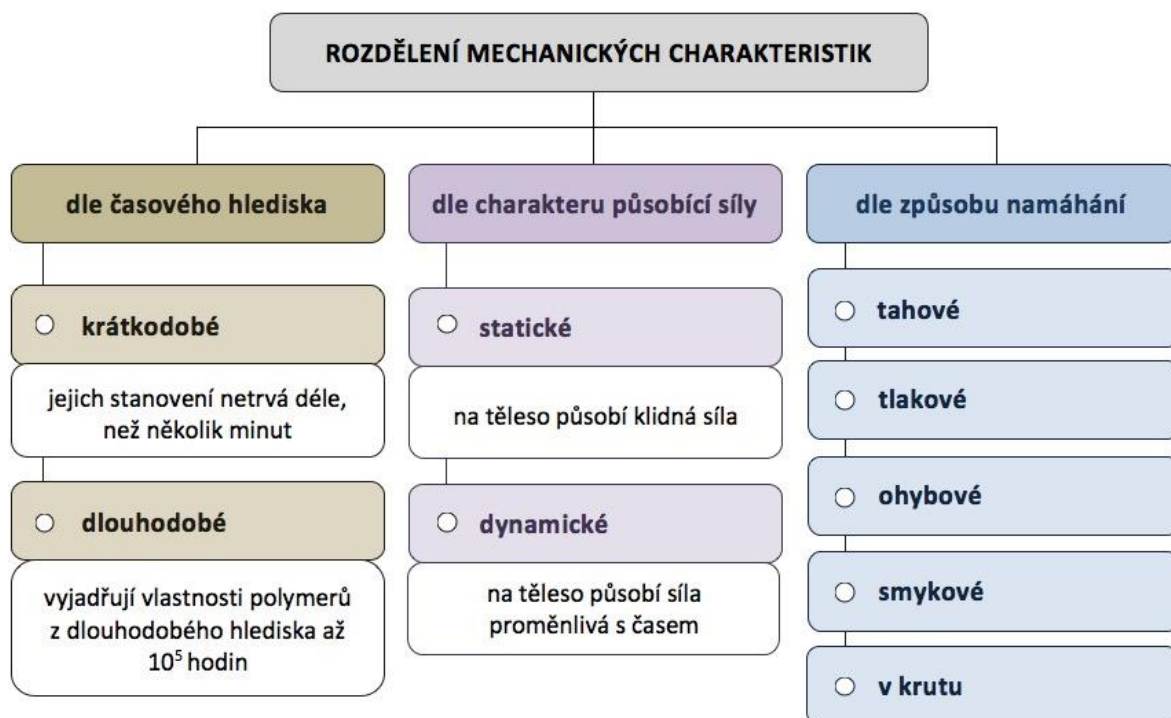
Obrázek 16: Hliníkový sendvičový laminát [52]

## 8. ZKOUŠENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Jako u každého jiného materiálu i u kompozitů se zjišťují jejich vlastnosti pomocí měření tvrdosti, pevnosti, pružnosti, houževnatosti nebo plasticity. Kromě těchto parametrů je možné sledovat i charakteristiku průběhu zkoušek, která poskytuje důležité informace pro aplikaci materiálů v praxi. Při zjišťování mechanických vlastností u kompozitů se používají podobné zkoušky jako u kovů. Rozdíly mohou být v rozměrech zkušebních vzorků nebo způsobu upnutí.

[3] [8] [10]

Provádějí se zkoušky statické, jako jsou zkoušky tahem, tlakem, ohybem, krutem, ale také dynamické zkoušky (Obrázek 17). Zkouška v ohybu pro kompozity je stejná jako pro polymery, se kterými se často měří a porovnává. Mezi další používané metody zjišťování vlastností jsou například termomechanická analýza, zkouška odolnosti proti vlhkosti a další. [3] [8] [10]

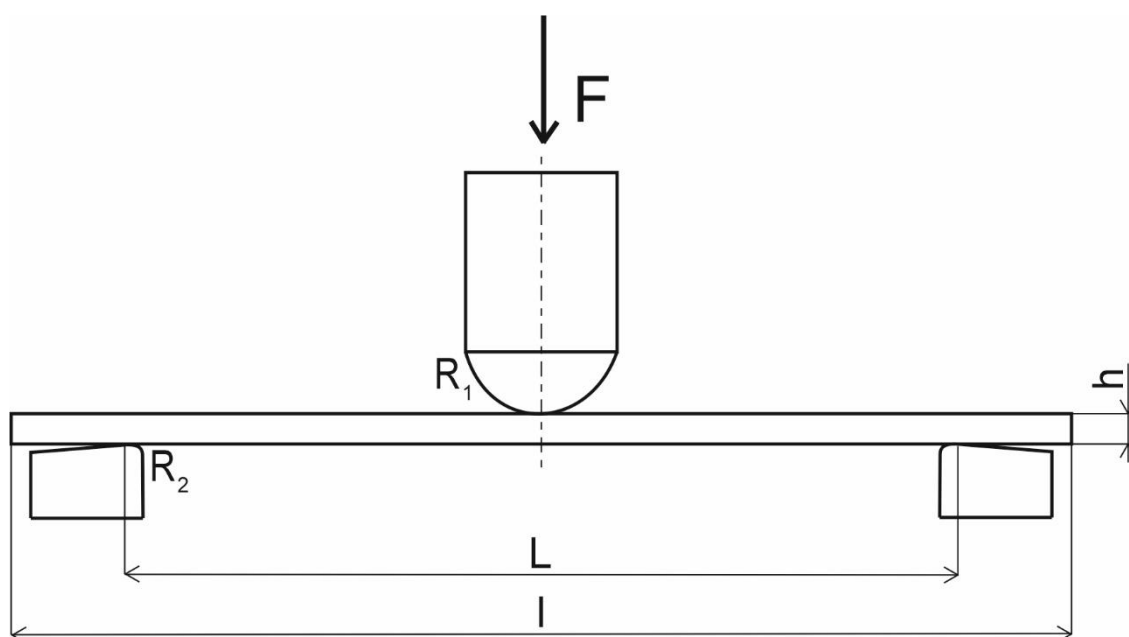


Obrázek 17: Rozdělení mechanických charakteristik [8]

## 8.1 Zkouška ohybem

Tato zkouška slouží k zjišťování vlastností materiálu a jeho chování při namáhání prostým ohybem. Norma ČSN EN 178 popisuje průběh zkoušky při stanovování pevnosti v ohybu, modulu pružnosti a závislosti deformací na napětí (Obrázek 18). Metoda je vhodná pro termoplasty, reaktoplasty a plněné či vyztužené plasty.

[3] [8] [53]



Obrázek 18: Zkouška ohybem, překresleno podle [53]

Vzorky jsou namáhány na ohyb v univerzálním ohybovém stroji. Výstupními daty stroje z měření je graf, který popisuje průhyb vzorku v závislosti na působící síle. Pokud by u jakéhokoliv vzorku došlo k porušení v jiném místě než uprostřed mezi podpěrami, musí být vzorek vyřazen z vyhodnocování měření. Z maximální ohybové síly, při které došlo k porušení vzorku, je možné spočítat pevnost v ohybu. [8] [53]

Napětí se spočte ze síly a rozměru vzorku v místě porušení dle vzorce:

$$\sigma_{fM} = \frac{3F}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad [53]$$

## 9. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části bakalářské práce jsem využil dříve zmíněných informací a využil jsem rovněž zkušenosti z vlastní práce s epoxidovými pryskyřicemi. Porovnával jsem materiály od společnosti ISOMA s kompozity, které jsem sám vyráběl. Při výrobě jsem zaměřil na to, aby vzorky byly co nejpodobnější jejich průmyslově vyráběným alternativám. Vzorky budou mít obdélníkový tvar a bude se vzájemně porovnávat jejich mez pevnosti v ohybu. Hodnota napětí na mezi pevnosti v ohybu bude určena výpočtem, a to ze síly která byla vynaložena na přelomení jednotlivých vzorků.

### 9.1 VÝROBA VZORKŮ

#### 9.1.1 Volba materiálů

##### **Matrice**

Mnou vyráběné vzorky budou porovnávány s těmi průmyslově vyráběnými. Při výrobě bude tedy použita polymerní matrice s vláknovou výztuží. Jako polymerní matrice byla zvolena epoxidová pryskyřice EPOX G20. Jedná se o transparentní licí systém s vysokou pevností a snadnou aplikací. Materiál byl dodán společností Dawex chemical.

##### **Výztuž**

U kompozitu, který bude porovnáván s PAPER MICARTA, jsem jako výztuž zvolil papír s vysokou gramáží bez dalších povrchových uprav. Pro spojení jednotlivých vrstev je velmi důležité, aby papír byl nasákavý a pryskyřice tak prostoupila celou tloušťkou papíru a provázala tak jednotlivé vrstvy mezi sebou. Pokud by se to nestalo, byl by výsledný kompozit náchylný k delaminaci.

Jako alternativa k Ultrex Canvas jsem do kompozitu jako výztuž použil džínovinu, tedy pevnou tkanou bavlněnou textilií. Ta by svými vlastnostmi měla být podobná té používané u průmyslově vyráběných kompozitů. Textilie je velmi savá a neměl by tedy být problém se spojených plátů pomocí epoxidové matrice.

### 9.1.2 Výroba formy

Kompozit bude lisovaný ve formě. Aby během lisování nedošlo k vzájemnému posunutí vrstev kompozitu, bude mít forma bočnice. Na výrobu formy bude použit polyethylen, protože je to neslepitelný plast a vyjímání kompozitu z formy po vytvrzení nebude náročné a výrazně se tak sníží riziko poškození kompozitu během této operace. Z desky tloušťky 15 mm se ponornou pilou naformátují bočnice, základní deska a přítlačná deska (Obrázek 19).

Při lisování bude na bočnice vyvíjen tlak, proto jsou k sobě sešroubovány pomocí samořezných nábytkářských šroubů. Rozměr formy je 200x250 mm s maximální výškou vylisku 25 mm. Výsledná forma (Obrázek 20) se pomocí lepící pásky zatěsní, aby přebytečná pryskyřice nebyla vytlačena dolní částí formy.



Obrázek 19: Řezání desek z PE



Obrázek 20: Forma z PE

### 9.1.3 Výroba polotovaru

Pro výrobu polotovaru je třeba nachystat epoxidovou pryskyřici, směšovací nádobu, váhu a nástroj, pomocí kterého se pryskyřice bude nanášet na pláty výztuže. (Obrázek 21).



Obrázek 21: Příprava pryskyřice na výrobu kompozitu

Do směšovací nádoby se odváží obě složky pryskyřice ve správném poměru, tedy 100:23 (A:B). Důkladným promícháním se spustí chemická reakce a je možné začít natírat pláty výztuže (Obrázek 22, Obrázek 23). Výztuž, na kterou byla nanesena pryskyřice, se vrství do předem odmaštěné formy. Pláty jsou vždy natřeny z obou stran, aby došlo ke zvýšení adheze povrchů.



Obrázek 22: Papírová výztuž



Obrázek 23: Bavlněná výztuž



Pláty výztuže se postupně vrství do formy. Jakmile je dosaženo požadovaného počtu vrstev je forma zakryta deskou a pomocí svorek je vyvinut tlak mezi základovou a krycí deskou (Obrázek 24).



Obrázek 24: lisování kompozitu ve formě

Kompozit se vytvrzuje pod tlakem z důvodu odstranění vzduchu mezi vrstvami výztuže. Přebytečná pryskyřice, kterou již výztuž nedokázala absorbovat, byla vytlačena pryč z formy. Zvážením samotné výztuže a následně i vylisovaného kompozitu je možné určit množství pryskyřice v kompozitu obsažené. Tlak nesmí být příliš vysoký, aby nevytlačil z formy veškerou pryskyřici. To by mělo za následek nesoudržnost kompozitu a nedostatečnou tvrdost.

U kompozitu s papírovou disperzí bylo použito celkem 32 vrstev papíru o celkové hmotnosti 352 g a použito bylo 360g pryskyřice. Při lisování byl její přebytek vytlačen a výsledná hmotnost desky o rozměru 250x200x9,4 mm byla 586 g.

Při výrobě kompozitu s textilní výztuží bylo použito 14 vrstev denimových plátů o celkové hmotnosti 236 g a použito bylo znovu 360 g pryskyřice. Z formy nebyla vytlačena žádná přebytečná pryskyřice. Výsledná hmotnost desky o rozměru 250x200x10,9 mm byla 696 g.

Pro zjištění toho, jak výztuž ovlivňuje vlastnosti kompozitu, byla pro porovnání odlita i deska z homogenní pryskyřice EPOX G20 bez jakékoliv výztuže. Protože se bude jednat o doplňkové hodnoty, bude postačujících 5 vzorků tohoto typu. Ze všech ostatních desek bude vyrobeno po deseti zkušebních vzorcích.

#### 9.1.4 Formátování a frézování vzorků

Ze všech desek bylo odřezáno 10 mm po obvodu, ve kterých hrozilo nedostatečné prostoupení pryskyřice nebo jiné vady, které by negativně ovlivnily mechanické vlastnosti vzorku. Tím bylo docíleno homogennějších vlastností v objemu vzorků. Při výrobě kompozitu s papírovou výztuží došlo k posunutí dolních tří vrstev (Obrázek 25).



Obrázek 25: posunutí vrstev kompozitu

Deska byla poté na pásové pile naformátována na deset stejně velkých dílů (Obrázek 26). Každý o rozměru 120x35 mm. K této operaci byla použita pásová pila PAKRSIDE PBS 350 B2.



*Obrázek 26: Řezání polotovarů na pásové pile*

Rozměry vzorků by měly být co nejpřesnějších rozměrů, proto byla k formátování použita CNC frézka. Do vzorků byly vyvrtány dva otvory o průměru 4 mm pro přesnou polohu upnutí do CNC frézky. Vzdálenost mezi otvory je 110 mm a podpěry pro zkoušku ohybem budou ve vzdálenosti 80 mm, takže tyto vyvrtané otvory nijak ovlivní průběh samotné zkoušky. Byla použita frézka STEPCRAFT D840 s vysokoobrátkovým vřetenem o výkonu 1100 W (Obrázek 27).



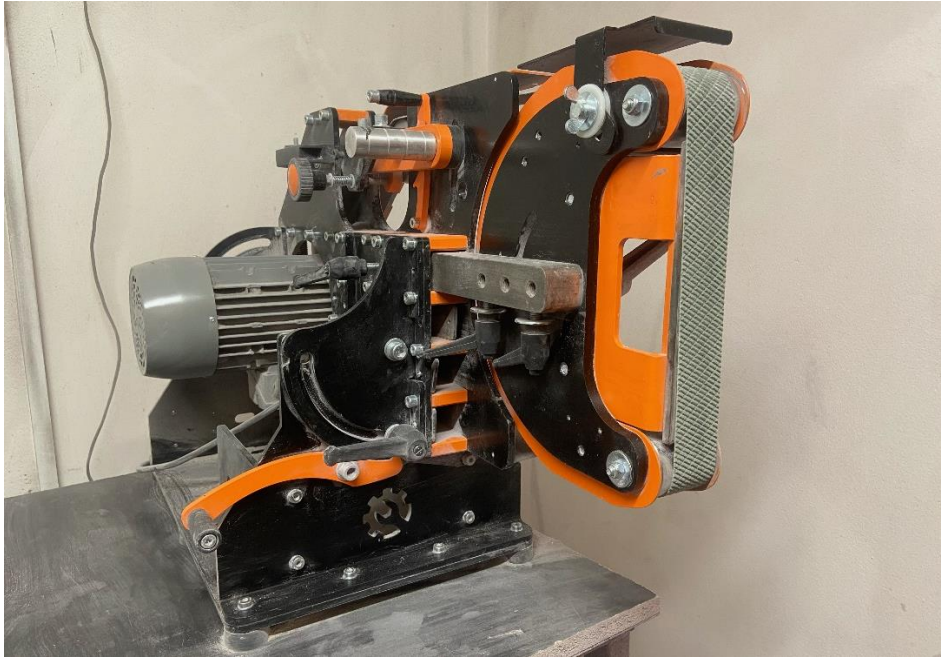
*Obrázek 27: CNC frézka STEPCRAFT D840*

Na obrábění byla použita válcová fréza o průměru 8 mm s jedním břitem pod úhlem 30° ze slinutého karbidu (Obrázek 28). Hladká stopka nástroje slouží k upnutí do vřetene stroje pomocí kleštiny.



*Obrázek 28: Stopková fréza, slinutý karbid*

Postupně byl obroběn každý z vzorků. V CNC kódu, který byl pro toto frézování napsán, byly požadované rozměry obrobku 120x30mm. Stroj i nástroj však pracuje s určitou přesností, a proto byly některé vzorky ještě upravovány na pásové brusce (Obrázek 29). Tloušťka vzorků byla ponechána jako původní desky vyjmuté z formy.



Obrázek 29: Pásová bruska

## 9.2 MĚŘENÍ VZORKŮ

Všechny vzorky dostaly své pořadové číslo a v předpokládaném místě lomu (uprostřed) byly změřeny. Jejich šířka a tloušťka byla zanesena do tabulky. Ta bude následně využita při přepočtu síly v okamžiku lomu na napětí. Pro měření byl použit mikrometr s cejchovanou přesností 0,01mm (Obrázek 30).



Obrázek 30: Mikrometr

## 9.2.1 Rozměry vzorků vyráběných kompozitů

### S papírovou výztuží



Obrázek 31: Kompozit s papírovou výztuží

### S bavlněnou výztuží



Obrázek 32: Kompozit s bavlněnou výztuží

Tabulka 3: Rozměry vyráběných vzorků s papírovou a textilní výztuží

číslo vzorku	Rozměry vzorku	
	šířka [mm]	tloušťka [mm]
1	29,93	9,27
2	29,8	9,38
3	30,05	9,15
4	30,07	9,25
5	29,4	9,12
6	29,7	9,45
7	29,29	9,17
8	29,82	9,26
9	30,02	9,44
10	29,81	9,35

číslo vzorku	Rozměry vzorku	
	šířka [mm]	tloušťka [mm]
11	30,2	10,85
12	30,01	10,91
13	30,14	10,75
14	30,22	10,88
15	30,11	10,86
16	30,25	10,82
17	30,05	10,95
18	30,22	10,85
19	30,32	10,82
20	30,35	10,89

## Epoxidová pryskyřice EPOX G20 bez výztuže



Obrázek 33: Epoxidová pryskyřice bez výztuže

Tabulka 4: Rozměry vyráběných vzorků, Epoxidová pryskyřice bez výztuže

číslo vzorku	Rozměry vzorku	
	šířka [mm]	tloušťka [mm]
41	29,99	10,22
42	29,72	10,2
43	29,99	10,11
44	29,9	10,2
45	29,87	10,15

## 9.2.2 Rozměry vzorků kompozitů od ISOMA s.r.o.

**Paper Micarta**



Obrázek 34: Paper Micarta

**Canvas Micarta**



Obrázek 35: Canvas Micarta

Tabulka 5: Rozměry vzorků od ISOMA s papírovou a textilní výztuží

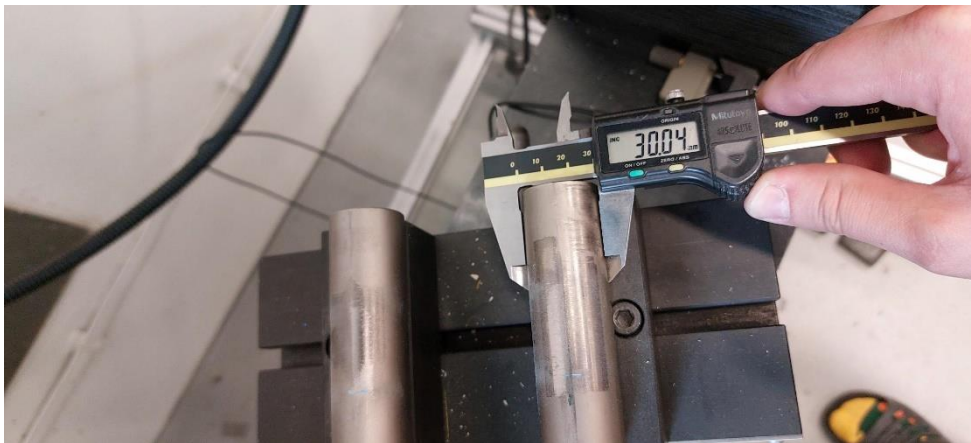
číslo vzorku	Rozměry vzorku	
	šířka [mm]	tloušťka [mm]
31	30,3	9,06
32	29,85	9,08
33	29,86	9,07
34	29,69	9,06
35	30,19	9,1
36	29,65	9,15
37	29,8	9,07
38	29,95	9,09
39	29,83	9,13
40	30,06	9,09

číslo vzorku	Rozměry vzorku	
	šířka [mm]	tloušťka [mm]
21	29,8	10,02
22	30,23	10,01
23	30,1	9,99
24	29,73	9,98
25	29,93	10
26	29,56	9,99
27	29,65	9,95
28	29,9	9,91
29	29,7	10
30	29,73	10,03

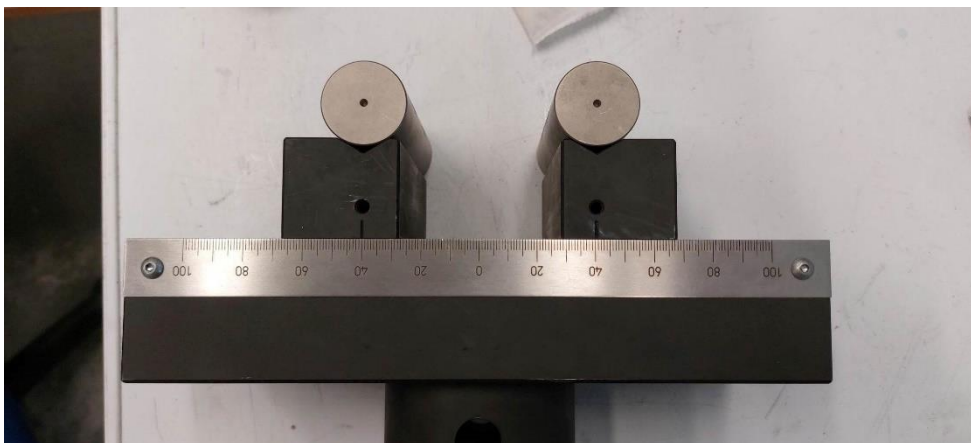


### 9.3 ZKOUŠKA OHYBEM

Zkouška ohybem byla prováděna na univerzálním trhacím stroji 48/17 v laboratořích ČVUT FS. Stroj byl nastaven na zkoušku ohybem, tak že se do statické dolní čelisti stroje upnuly podpěry. Podpěry mají podobu dvou válců o průměru 30 mm (Obrázek 36) a od sebe umístěných ve vzdálenosti 80 mm (Obrázek 37).



Obrázek 36: Průměr válců podpěr



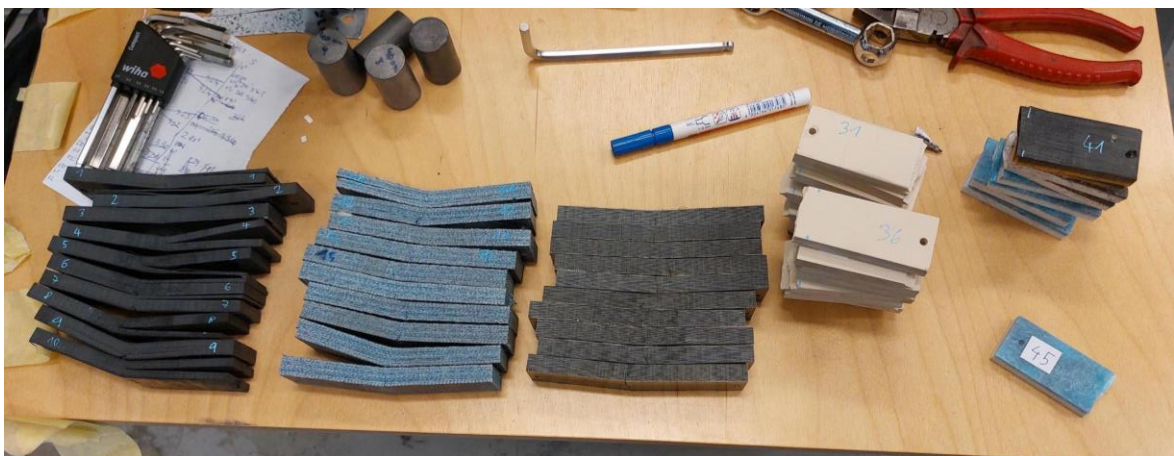
Obrázek 37: Vzájemná poloha podpěr

Do pohyblivé horní čelisti stroje byl upnut trn, který má podobu ocelového válce o průměru 20 mm (Obrázek 38).



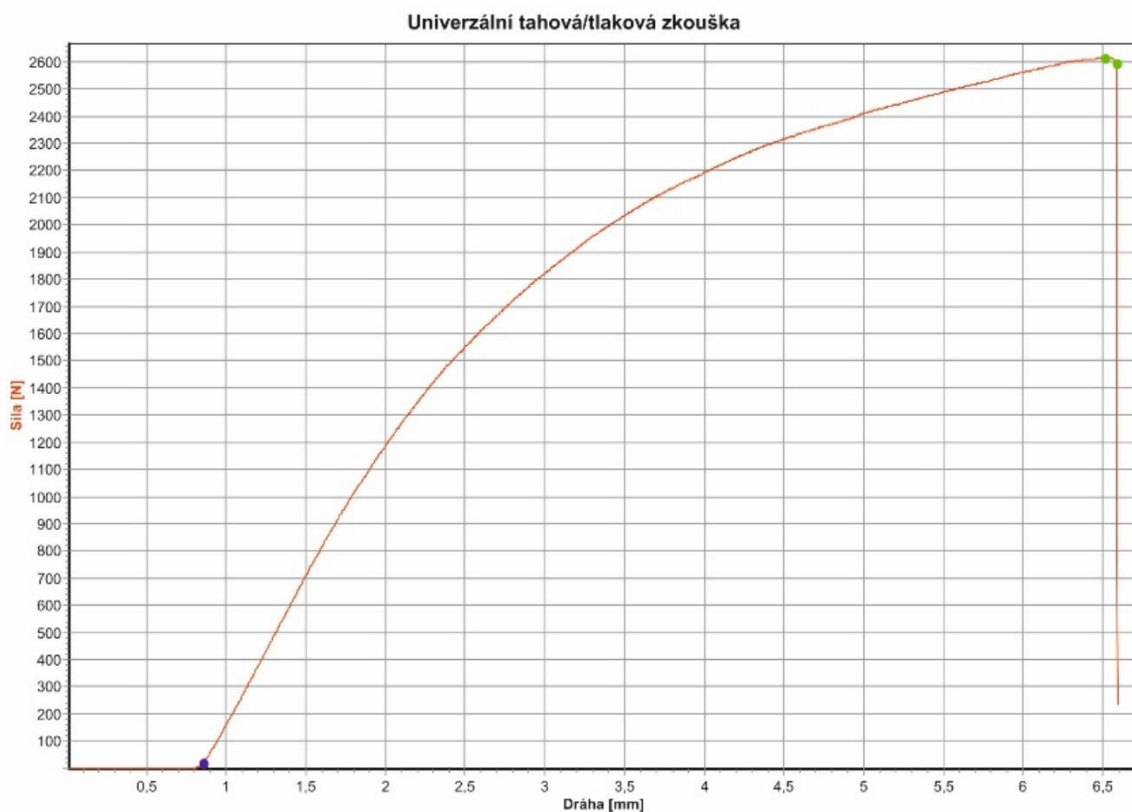
Obrázek 38: Průměr válce ohybníku

Ohyb vzorku je způsoben pohybem trnu uprostřed mezi podpěrami směrem dolů. Po položení vzorku na podpěry pohyb trnu způsobuje průhyb vzorku až do jeho přelomení nebo výrazného poklesu odporu. V tento okamžik je zkouška ukončena (Obrázek 39). Průběh zkoušky je zaznamenán pomocí grafu, který zkušební stroj vykresluje. Graf popisuje závislost deformace vzorku na velikosti síly  $F$ , kterou je vzorek namáhán.



Obrázek 39: Vzorky po dokončení zkoušky ohybem

Na grafu (Obrázek 40) je vidět, jak může vypadat průběh zkoušky ohybem kompozitního materiálu. V tomto konkrétním případě se jedná o kompozit s epoxidovou maticí a bavlněnou výztuží, který byl v rámci experimentální části vyroben, a v tabulce je uveden pod pořadovým číslem 17.



**Tabulka výsledků**

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
17	x	10.05.23	13:04			2614,80	5,66	2591,80	5,73

*Obrázek 40: Graf z průběhu zkoušky vzorku č.17*

## 9.4 VÝPOČET NAPĚTÍ NA MEZI PEVNOSTI

Z průběhu zkoušky jednotlivých vzorků byla do tabulky zapsána hodnota maximální síly. Tato síla se následně použije pro určení velikosti reakcí ve vazbách a průběhu momentu na nosníku. Ohybový moment nabývá maxima uprostřed mezi podpěrami. Velikost tohoto momentu je vyjádřena pomocí vzorce:

$$M_{oMAX} = \frac{l * F_{MAX}}{4} \quad [53]$$

Napětí, které na průřezu působí, se získá ze vzorce:

$$\sigma_{MAX} = \frac{M_{oMAX}}{W_o} \quad [53]$$

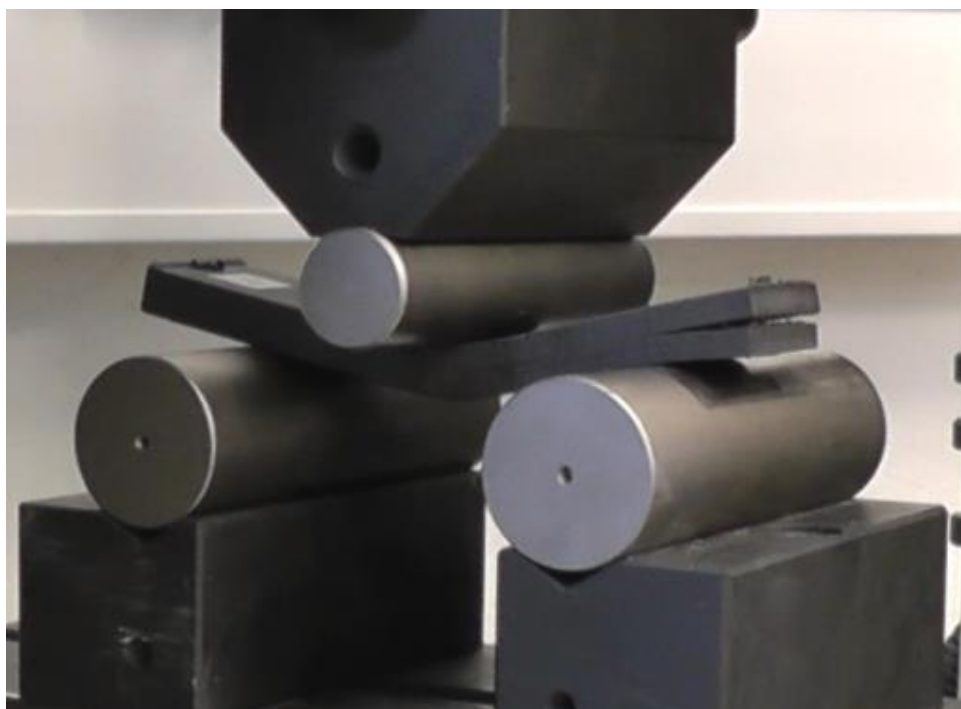
Hodnoty napětí pro jednotlivé vzorky jsou zaneseny do tabulek podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Vypočítaná napětí jsou v podobě bodů vynesena do grafu. Pomocí funkce aritmetického průměru se z jednotlivých napětí určí průměrná hodnota. V grafu tuto hodnotu znázorňuje konstantní funkce. Tak se docílí přesnější hodnoty napětí na mezi pevnosti v ohybu pro každý materiál. Současně je možné pozorovat s jakým rozptylem se body pohybují od křivky, tedy jak se liší mechanické vlastnosti v jednotlivých částech polotovaru, ze kterého jsou vzorky zhotoveny.

### 9.4.1 Vzorky vyráběných kompozitů s papírovou výztuží

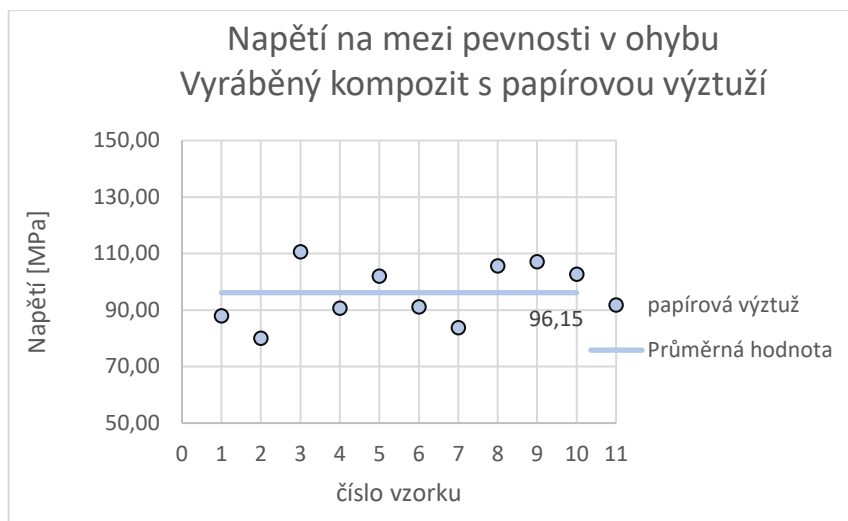
U zkoušky ohybem vzorků s papírovou výztuží nedocházelo k lomu v místě působení trnu stroje. Při zvyšující se síle došlo vlivem napětí k delaminaci mezi vrstvami kompozitu (Obrázek 41).

Tabulka 6: Hodnoty napětí vyráběných vzorků s papírovou výztuží

číslo vzorku	$F_{MAX}$ [N]	Wo [mm <sup>3</sup> ]	Napětí [MPa]
1	1884,5	428,66	87,92
2	1748,6	436,99	80,03
3	2318,9	419,31	110,61
4	1944,5	428,81	90,69
5	2078,8	407,55	102,01
6	2014,7	442,05	91,15
7	1719,1	410,54	83,75
8	2249,6	426,17	105,57
9	2387,7	445,87	107,10
10	2228,3	434,34	102,61
PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAPĚTÍ			<b>96,15</b>



Obrázek 41: Delaminace vzorku během zkoušky ohybem

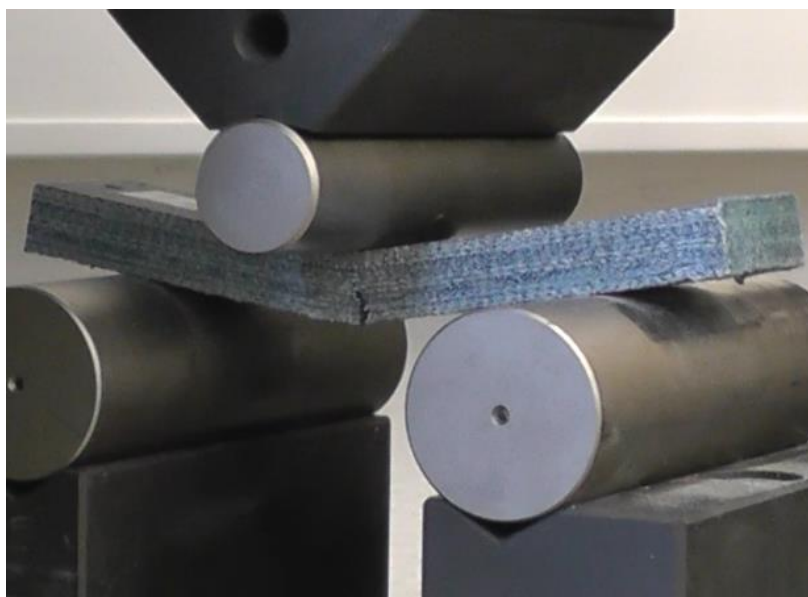


Obrázek 42: Napětí na mezi pevnosti v ohybu vyráběného kompozitu s papírovou výztuží

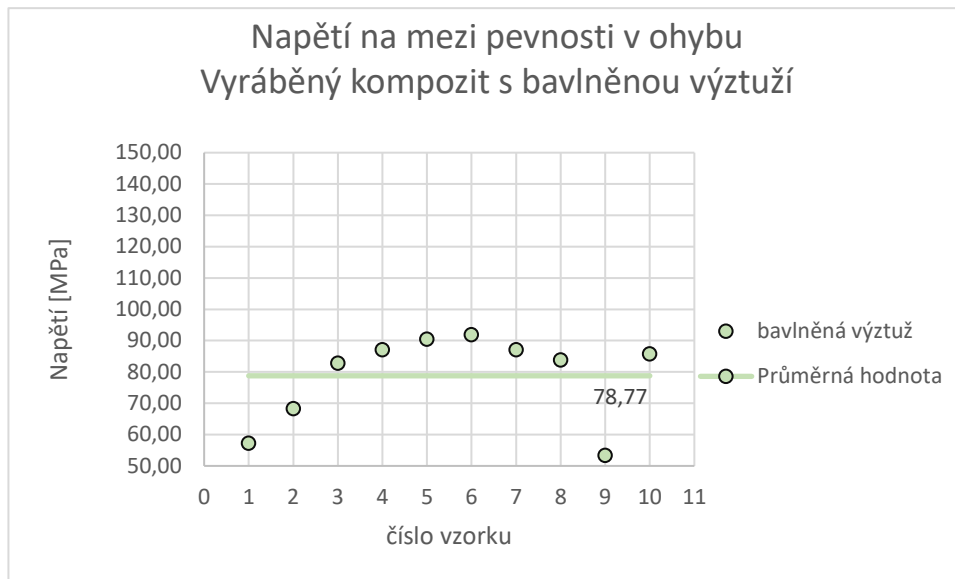
## 9.4.2 Vzorky vyráběných kompozitů s bavlněnou výztuží

Tabulka 7: Hodnoty napětí vyráběných vzorků s textilní bavlněnou výztuží

číslo vzorku	$F_{MAX}$ [N]	Wo [mm <sup>3</sup> ]	Napětí [MPa]
11	1695,1	592,54	57,22
12	2032,9	595,32	68,30
13	2403,5	580,51	82,81
14	2594,5	596,21	87,03
15	2677,5	591,86	90,48
16	2710,2	590,24	91,83
17	2614,8	600,51	87,09
18	2483,8	592,93	83,78
19	1579,4	591,61	53,39
20	2572,2	599,88	85,76
PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAPĚTÍ			<b>78,77</b>



Obrázek 43: Vzorek vyráběného kompozitu během zkoušky ohybem



Obrázek 44: Napětí na mezi pevnosti v ohybu vyráběného kompozitu s bavlněnou výztuží

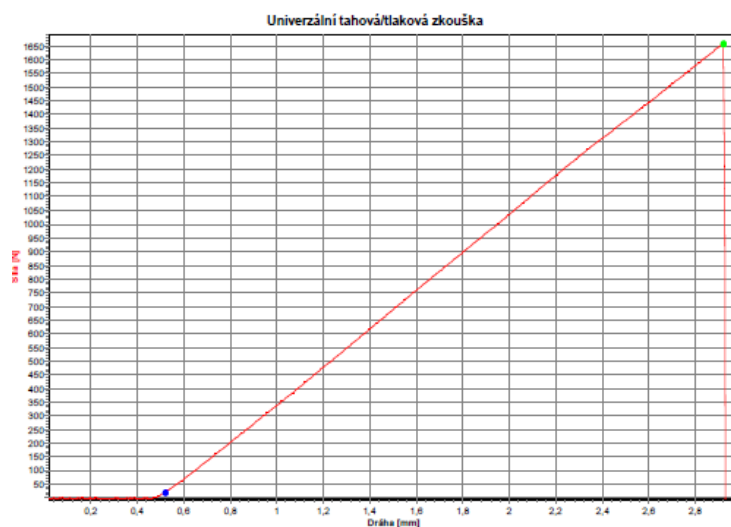


### 9.4.3 Vzorky z epoxidové pryskyřice G20 bez výztuže

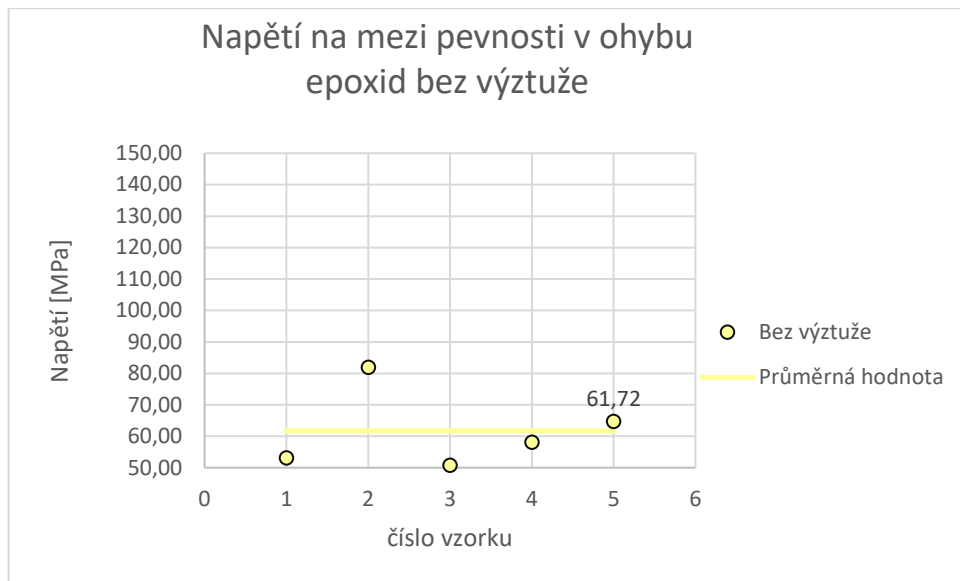
Epoxidová pryskyřice bez výztuže je velmi křehká, proto v okamžiku překročení napětí na mezi pevnosti se vzorek roztříštil na několik kusů. Zajímavé u tohoto materiálu je, že jeho křivka závislosti napětí na deformaci je téměř lineární.

Tabulka 8: Hodnoty napětí vyráběných vzorků z pryskyřice G20

číslo vzorku	$F_{MAX}$ [N]	Wo [mm <sup>3</sup> ]	Napětí [MPa]
41	1385,7	522,07	53,09
42	2109,4	515,34	81,86
43	1296,7	510,89	50,76
44	1506,8	518,47	58,13
45	1660,2	512,88	64,74
PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAPĚTÍ			<b>61,72</b>



Obrázek 45: Graf průběhu zkoušky v ohybu vzorku vyrobeného z pryskyřice bez výztuže



Obrázek 46: Napětí na mezi pevnosti v ohybu epoxidové pryskyřice bez výztuže

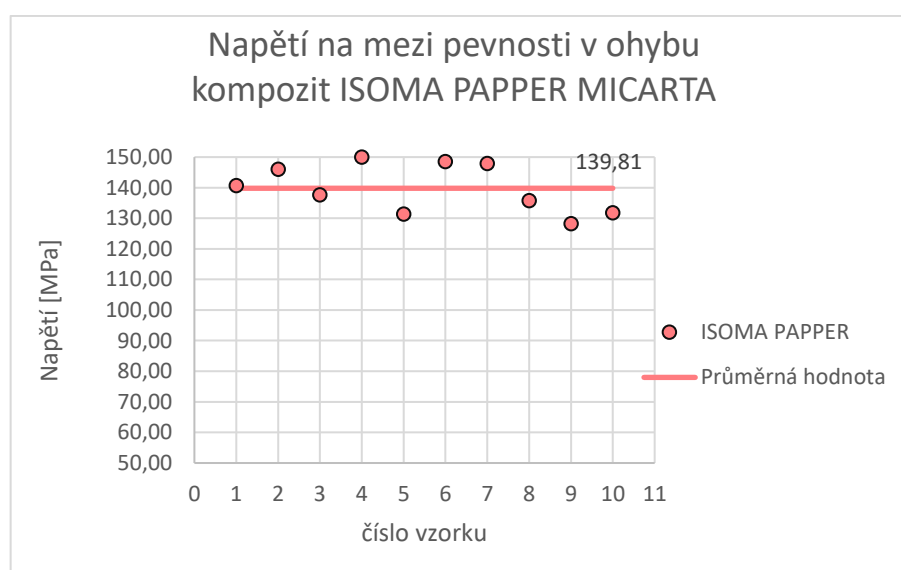
### 9.4.4 Vzorky kompozitů PAPER MICARTA od ISOMA

Kompozit, který poskytla společnost ISOMA, má matici z fenol formaldehydové pryskyřice a výztuží jsou tenké listy papíru. Při zkoušce ohybem při překonání meze pevnosti v ohybu došlo k přelomení vzorku na dva kusy. Kompozit nevykazoval žádné známky nesoudržnosti mezi vrstvami.

Na hodnotách v grafu můžeme pozorovat malý rozptyl hodnot napětí od průměrné hodnoty. To značí, že v různých místech polotovaru, se mechanické vlastnosti tolik neliší. Největší odchylka napětí od průměrné hodnoty je asi 7,27%.

Tabulka 9: Hodnoty napětí vzorků od ISOMA, PAPER MICARTA

číslo vzorku	$F_{MAX}$ [N]	Wo [mm <sup>3</sup> ]	Napětí [MPa]
31	2917,1	414,52	140,75
32	2995,2	410,17	146,05
33	2817,8	409,40	137,65
34	3045,9	406,18	149,98
35	2738,1	416,67	131,43
36	3072,7	413,73	148,54
37	3021,9	408,58	147,92
38	2799,8	412,45	135,76
39	2656,8	414,42	128,22
40	2727,7	413,97	131,78
PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAPĚTÍ			<b>139,81</b>



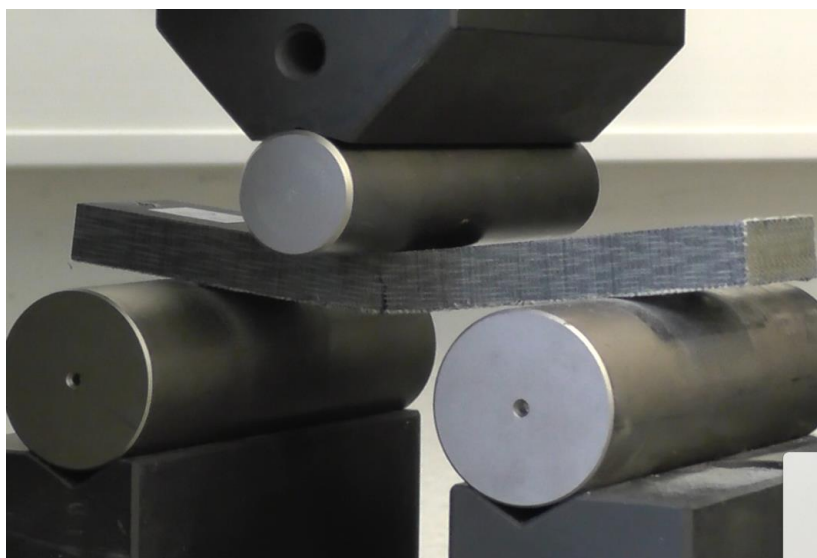
Obrázek 47: Napětí na mezi pevnosti v ohybu kompozitu PAPER MICARTA

### 9.4.5 Vzorky kompozitů CANVAS MICARTA od ISOMA

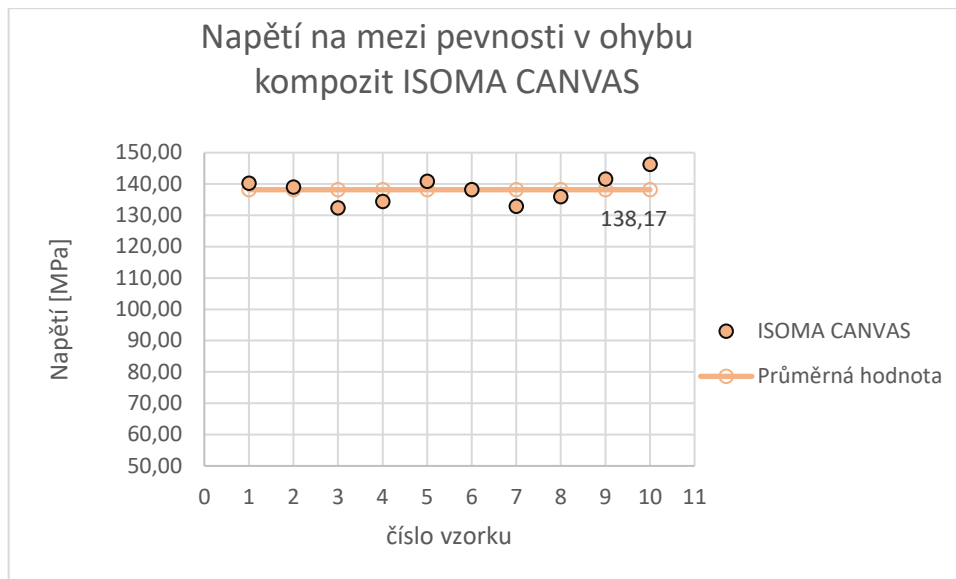
Kompozit, který poskytla společnost ISOMA má matici s fenol formaldehydové pryskyřice a výztuží jsou pláty bavlněné textilie. K ukončení zkoušky došlo v okamžiku porušení vzorku. To vždy nastalo u vnějších vrstev namáhaných tahovou silou. Kompozit nevykazoval žádné známky nesoudržnosti mezi vrstvami.

Tabulka 10: Hodnoty napětí vzorků od ISOMA, CANVAS MICARTA

číslo vzorku	$F_{MAX}$ [N]	Wo [mm <sup>3</sup> ]	Napětí [MPa]
21	3496,2	498,66	140,23
22	3508,2	504,84	138,98
23	3313,3	500,66	132,36
24	3316,1	493,52	134,39
25	3513,6	498,83	140,87
26	3397,9	491,68	138,22
27	3251,1	489,24	132,90
28	3326,4	489,40	135,94
29	3502,2	495,00	141,50
30	3646,3	498,48	146,30
PRŮMĚRNÁ HODNOTA NAPĚTÍ			<b>138,17</b>



Obrázek 48: Vzorek kompozitu CANVAS MICARTA během zkoušky ohybem



Obrázek 49: Napětí na mezi pevnosti v ohybu kompozitu CANVAS MICARTA

## 10. ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo zjistit, zdali je možné bez speciální technologie vyrobit kompozity s polymerní matricí a různým typem výztuže. Následným porovnáním mechanických vlastností s kompozity vyráběnými průmyslovou metodou je možné zjistit, zdali jsou hodnoty srovnatelné. Pokud by bylo možné v experimentální výrobě dosahovat obdobných vlastností, umožní to snazší testování nových materiálů. To by snížilo finanční i časovou náročnost při zavádění inovativních kompozitů na trh.

Pro testování vzorků jsem se rozhodl pro zkoušku prostým ohybem. Mez pevnosti v ohybu je pro kompozity důležitou vlastností a je značně ovlivněna použitým typem výztuže.

Jako vzorky kompozitů vyráběných průmyslově jsem od společnosti ISOMA s.r.o. získal materiály PAPER a CANVAS MICARTA. Při experimentální výrobě vzorků jsem zvolil jako matrici epoxidovou pryskyřici G20, a jako výztuž papír a bavlněnou textilií, tedy stejný typ výztuže jako je používán u PAPER a CANVAS MICARTA. Pro referenci byly změřeny i vzorky z epoxidové pryskyřice G20 bez přidání výztuže. Tak je možné určit, jak výrazně vlastnosti kompozitu ovlivňuje právě výztuž.

U kompozitu vyráběného experimentální metodou s papírovou výztuží byla zjištěna průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu 96,15 MPa. U 80 % vzorků došlo k delaminaci vrstev ještě předtím, než byl vzorek porušen v kritickém průřezu. K této chybě materiálu pravděpodobně došlo kvůli špatné volbě výztuže. Použitý papír nedostatečně absorboval pryskyřici a nedošlo tedy k požadovanému provázání vrstev. Největší rozptyl hodnot napětí jednotlivých vzorků byl cca 25 %. To mohlo být způsobeno nerovnoměrným rozložením pryskyřice při výrobě polotovaru. Odchytky hodnot také mohou způsobovat nepřesnosti výroby i samotné měření rozměrů vzorků.

U kompozitu vyráběného experimentální metodou s bavlněnou textilní výztuží byla zjištěna průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu 78,77 MPa. Materiál se do jisté míry choval plasticky. Tato vlastnost mohla být způsobena nedostatečným množstvím pryskyřice použité při výrobě polotovaru. Bavlněná textilie by byla schopna absorbovat větší množství epoxidové pryskyřice. Rozptyl

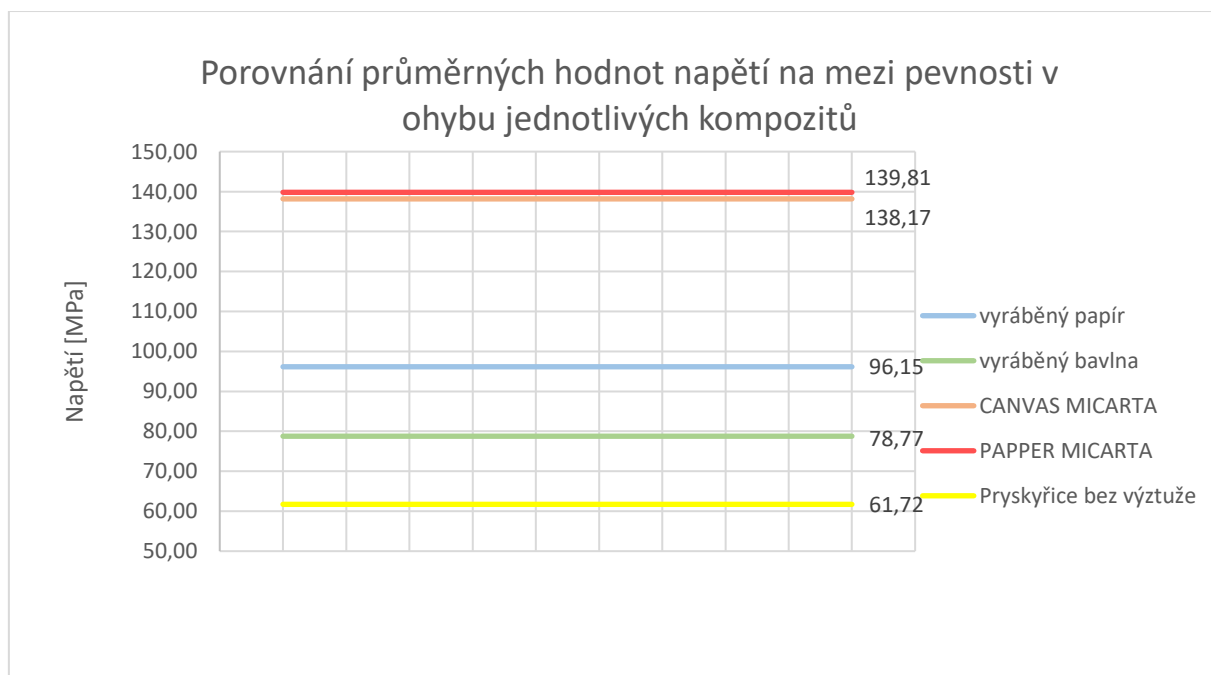
hodnot napětí jednotlivých vzorků mohou způsobovat nepřesnosti výroby nebo nerovnoměrné rozložení pryskyřice v polotovaru. Při měření rozměrů vzorku vznikají odchylky vlivem nepřesnosti měřidla.

U vzorků z epoxidové pryskyřice G20 bez výztuže byla zjištěna průměrná hodnota napětí na mezi pevnosti v ohybu 61,72 MPa. V okamžiku dosažení napětí na mezi pevnosti v ohybu došlo ke křehkému lomu vzorku. V grafu z měření je patrná téměř lineární závislost deformace na velikosti působící síly.

U kompozitu PAPPER MICARTA od ISOMA s.r.o. byla zjištěna průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu 139,81 MPa. V okamžiku dosažení napětí na mezi pevnosti v ohybu došlo současně k přerušení všech vrstev kompozitu a vzorek se přelomil na dva kusy. Pryskyřice velmi dobře prostoupila všemi vrstvami a způsobila tak provázání materiálu.

U kompozitu CANVAS MICARTA od ISOMA s.r.o. byla zjištěna průměrná hodnota meze pevnosti v ohybu 138,17 MPa. Rozptyl hodnot pro jednotlivé vzorky byl menší než u experimentálně vyráběných kompozitů. To naznačuje rovnoměrné rozložení vlastností v polotovaru. V okamžiku dosažení napětí na mezi pevnosti v ohybu došlo k porušení části vnějších vrstev namáhaných tahem.

Při zanesení všech průměrných hodnot napětí pro jednotlivé vzorky do jediného grafu, je možné tyto napětí mezi sebou porovnat.



Obrázek 50: Napětí na mezi pevnosti v ohybu jednotlivých kompozitů

Při porovnání experimentálně vyráběného kompozitu s papírovou výztuží s kompozitem PAPER MICARTA byla mez pevnosti v ohybu vyráběných vzorků nižší o 31,2 %. Takto značný rozdíl mohl vzniknout kvůli chybám ve výrobě nebo nevhodné volbě materiálu výztuže. I s ohledem na vyšší rozptyl hodnot jednotlivých vzorků je výsledek měření nevěrohodný a bylo by potřeba vyrobit větší počet vzorků s různými typy papírové výztuže pro zodpovězení otázky, zdali je možné v experimentální výrobě bez speciální technologie vyrábět a testovat nové kompozity.

Při porovnání experimentálně vyráběného kompozitu s bavlněnou výztuží s kompozitem CANVAS MICARTA byla mez pevnosti v ohybu vyráběných vzorků nižší o 43,5 %. K takto rozdílnému výsledku zkoušky mohlo dojít nedostatečným množstvím pryskyřice použité při výrobě, ale vlastnosti kompozitu mohla ovlivnit i samotná technologie výroby. Výsledek tohoto měření je tedy neprůkazný, ale otevírá nové možnosti pro měření a navázání v diplomové práci.

Vzorky epoxidové pryskyřice G20 byly měřeny za účelem zjištění toho, jak výztuž u kompozitů ovlivňuje mez pevnosti v ohybu. Přestože při experimentální výrobě kompozitů došlo ke výše zmíněným chybám, měly tyto kompozity vyšší mez pevnosti v ohybu než samotná pryskyřice. U kompozitu s papírovou výztuží to bylo o 34,38 MPa a u kompozitu s bavlněnou výztuží o 17,05 MPa. Lze tedy říct, že výztuž pozitivně ovlivňuje odolnost kompozitu vůči ohybu, alespoň u těchto konkrétních disperzí.



## Bibliografie

- [1] *ISOMA: ultrex* [online]. Praha: ISOMA, 2003 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.isoma.cz/designove-kompozity?category=ultrex-suretouch>
- [2] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. První. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [4] BRABAZON, Dermot. *Encyclopedia of materials: composites*. 1st Edition. Amsterdam: Elsevier, 2021. ISBN 9780128197240.
- [5] What are Composites?. In: *ROMEORIM* [online]. USA: romeo rim, 2020 [cit. 2023-06-22]. Dostupné z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>
- [6] Composite bow. *Composite Bows: Weapon of Ancient Nomadic Equestrian Cultures* [online]. [Online]: Legio I Lynx Fulminata, 2012 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://legioilynx.com/2012/04/19/composite-bows-weapon-of-ancient-nomadic-equestrian-cultures/>
- [7] *Owens corning* [online]. Toledo, Ohio: Owens corning, 1996 [cit. 2023-03-20]. Dostupné z: <https://www.owenscorning.com/en-us/corporate/our-history>
- [8] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. [Online]: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3.
- [9] KNIGHT, M. a D. CURLISS. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 3rd Edition. Michigan: Academic Press, 2001. ISBN 978-0-12-227410-7.
- [10] HORÁČEK, Jaroslav. *Nauka o materiálu* [online]. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2000 [cit. 2023-04-10]. ISBN 80-213-0397-2. Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:98ea9f80-a273-11e5-82dc-5ef3fc9bb22f>
- [11] JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály* [online]. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2008 [cit. 2023-04-10]. ISBN 978-80-01-04167-3. Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:4fa3bd20-f3d3-11e8-95ba-5ef3fc9bb22f>
- [12] XU, Yingjie, Jihong ZHU, Zhen WU a Yinfeng CAO. A review on the design of laminated composite structures: constant and variable stiffness design and

topology optimization: Trends in the use of composite materials in commercial aircrafts Airbus and Boeing. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. Springer Nature, 2018, 2018(1). ISSN 2522-0136. Dostupné z: doi:10.1007/s42114-018-0032-7

- [13] *Česká stomatologie / Praktické zubní lékařství: Kompozitní materiály v současné stomatologii*. Česká stomatologie / Praktické zubní lékařství, 2013, . ISSN 1805-4471.
- [14] ŠEVČÍK, Ondřej. SPORT JE VĚDA: Karbonové kompozity a větší aerodynamika. In: *Český rozhlas* [online]. Praha: Český rozhlas, 2016 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz/sport-je-veda-karbonove-kompozity-a-vetsi-aerodynamika-sportovni-hity-poslednich-6508976>
- [15] ČAPKA, Alexander. *DEFEKTOSKOPIE KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ*. Zlín, 2019. Článek. Tomas Bata University in Zlín. Vedoucí práce Ing. Alexander Čapka, PhD.
- [16] KREBS, Stefan, Ladislav KOLAŘÍK a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. *Teorie zpracování plastů a kompozitů*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2020. ISBN 978-80-01-06722-2.
- [17] KOMPOZITY NA KONCI SVÉHO ŽIVOTA. *MATERIAL TIMES* [online]. Praha: Happy Materials, 2013 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema/kompozity-na-konci-sveho-zivota.html>
- [18] Wind industry calls for Europe-wide ban on landfilling turbine blades. *Windeurope* [online]. Brusel: WindEurope asbl/vzw, 1982 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/wind-industry-calls-for-europe-wide-ban-on-landfilling-turbine-blades/>
- [19] CHUNG, Deborah D. L. *Composite Materials: Functional Materials for Modern Technologies*. 1. Berlín: Springer Nature, 2003. ISBN 978-1-4471-3734-4.
- [20] MCGLASSON, Rachel. THESE AWESOME PLAYGROUNDS ARE MADE OUT OF OLD, USED-UP WIND TURBINES: HERE'S WHY THAT'S SPECIAL. In: *The cool down* [online]. USA: THE COOL DOWN COMPANY, 2023 [cit. 2023-05-14].

Dostupné z: <https://www.thecooldown.com/green-business/arcadia-solar-energy-panels-home-cost/>

- [21] Moderní keramika. In: *Ustav keramiky a skla, VŠCHT* [online]. Praha: VŠCHT, 2020 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://sil.vscht.cz/cer>
- [22] PCSB... Všetko o brzdách: PCCB. In: *PORSCHE SK* [online]. Slovensko: ON Performance, 2020 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://porsche.sk/onperformance/pccb-pcsb-vsetko-o-brzdach.html>
- [23] MCCULLOUGH, R.L. a Diane S. KUKICH. Metal-matrix and ceramic-matrix composites. *Encyclopedia britannica* [online]. Chicago: Encyclopedia britannica, 2021 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/materials-science/Metal-matrix-and-ceramic-matrix-composites>
- [24] KRÁLOVÁ, Magda. VAZEBNÉ SÍLY. In: *Techmania* [online]. Plzeň: Techmania Science Center o.p.s., 2007 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/struktura-latek/pevne-latky/vazebne-sily>
- [25] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [26] SOVA, Miloš. Vytvrzování reaktoplastu. In: *Techportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2015 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/vytvrzovani-reaktoplastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxjPbT5GkW9f8/>
- [27] Katalog včetně základních informací o materiálech. In: *Havel Composites* [online]. Přešlavice: Havel Composites CZ s.r.o., 2018 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/HAVEL%20katalog%202021%281%29.pdf>
- [28] DOLEŽAL, Vladimír. *Plastické hmoty*. 3 edition. Praha: SNTL, 1977. ISBN 04-605-77.
- [29] HASSDENTEUFEL, Josef a Karel KVĚT. *Elektrotechnické materiály*. 1. Praha: SNTL, 1967. ISBN -.

- [30] KOŘÍNEK, CSC., Doc. Ing. Zdeněk. Kompozity: Polymerní matrice. In: *Kompozity* [online]. Praha: webnode, 2016 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: [https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC\\_DgIXrOVUoFScaVFtL/view](https://drive.google.com/file/d/1xKu2cZA3gkL3PC_DgIXrOVUoFScaVFtL/view)
- [31] METALLIC EPOXY FLOORING. In: *Black bear concrete* [online]. USA: BLACK BEAR COATINGS & CONCRETE, 2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.blackbearconcrete.com/services/resinous-coatings/metallic-epoxy-flooring/>
- [32] BANK, Lawrence Colin. *Composites for construction: structural design with FRP materials*. 1. Hoboken: Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-68126-7.
- [33] POSPÍŠIL, CSC., RNDr. Ladislav. *Polymery a plasty v praxi: PRYSKYŘICE NA BÁZI FORMALDEHYDU* [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/C3805/POLYMERY\\_A\\_PLASTY\\_V\\_PRAXI\\_MU\\_jaro\\_2017\\_C3805\\_PRYSKYRICE\\_NA\\_BAZI\\_FORMALDEHYDU\\_13042017.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/C3805/POLYMERY_A_PLASTY_V_PRAXI_MU_jaro_2017_C3805_PRYSKYRICE_NA_BAZI_FORMALDEHYDU_13042017.pdf). Prezentace k přednášce. Masarykova univerzita.
- [34] Kartit (Pertinax). In: *KAJMAN K* [online]. Přelouč: KAJMAN K CZ s.r.o., 2019 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: [https://kajmank.cz/textit-sklotextit-kartit-pertinax/?gclid=CjwKCAjwxr2iBhBJEiwAdXECw8qjtBdKkcnN-3WH11OJB-qC3NuaQ5PCPNUW5EpJEAZK9QPiqGQxqoRoCN3sQAvD\\_\\_BwE](https://kajmank.cz/textit-sklotextit-kartit-pertinax/?gclid=CjwKCAjwxr2iBhBJEiwAdXECw8qjtBdKkcnN-3WH11OJB-qC3NuaQ5PCPNUW5EpJEAZK9QPiqGQxqoRoCN3sQAvD__BwE)
- [35] CHAWLA, Krishan K. *Composite Materials*. 3. New York: Springer Publishing, 2012. ISBN 978-1-4939-5015-7.
- [36] KUTZ, Mayer. *Handbook of Materials Selection*. 1. New York: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 9780471359241.
- [37] MRÁZ, Petr a Jaroslav TALÁCKO. *Konstrukce strojů s kompozitními materiály*. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3540-9.
- [38] DAY, Lewin. TECHNIQUES FOR MAKING COMPLEX CARBON FIBRE TUBE PARTS. In: *HACKADAY* [online]. USA: Hackaday, 2020 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2020/07/18/techniques-for-making-complex-carbon-fibre-tube-parts/>

- [39] IBRAHIM, Nabil a Chaudhery HUSSAIN. *Green Chemistry for Sustainable Textiles: Modern Design and Approaches*. 1st Edition. Sawston, UK: Woodhead Publishing, 2021. ISBN 9780323852043.
- [40] HORROCKS, A. Richard a Subhash C. ANAND. *Handbook of Technical Textiles*. 2 ed. Velká Británie: Elsevier Science & Technology, 2015. ISBN 9781782424581.
- [41] Použití vláken - souhrn vlastností. In: *Škola textilu* [online]. Brno: e-LTex, 2020 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <http://www.skolertextilu.cz/elearning/469/textilni-terminologie-zboziznalstvi/vlakna-prize-a-nite/Pouziti-vlaken-souhrn-vlastnosti.html>
- [42] VASILIEV, Valery V. a Evgeny V. MOROZOV. *Advanced Mechanics of Composite Materials*. 1st. Amsterdam: Elsevier, 2007. ISBN 9780080453729.
- [43] Syntetická vlákna. In: *Učse online* [online]. Praha: Thimble Group s.r.o., 2013 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.ucseonline.cz/skola/zakladni-skola/skolni-zapisky/chemie/synteticka-vlakna/>
- [44] WARADE, Prathamesh. Textile Composites. In: *Textile School* [online]. Nagpur: Textile School, 2021 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.textileschool.com/7107/textile-composites/>
- [45] CAREY, Jason P. *Handbook of Advances in Braided Composite Materials: Handbook of Advances in Braided Composite Materials*. 1. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-100369-5.
- [46] KAŠPÁRKOVÁ, Lenka. *Papír, historie jeho výroby a ruční výroba papíru*. Opava, 2012. Operační Program Vzdělávání pro konkurenceschopnost. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, příspěvková organizace.
- [47] Richlite. In: *MakerMaterialSupply* [online]. USA: Maker Material Supply, 2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://www.makermaterialsupply.com/collections/richlite>
- [48] Paper Composite: Panels. In: *Tekstur* [online]. USA: Tekstur, 2023 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://tekstur.com/materials/paper-composite/>
- [49] HALAMA, PH.D., doc. Ing. Radim, Ing. František FOJTÍK, PH.D., Ing. Martin FUSEK, PH.D., Ing. Jaroslav ROJÍČEK, PH.D. a Dr. Ing. Ludmila ADÁMKOVÁ.

*VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ: POLYMERY A KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ, CHEMICKÉ SLOŽENÍ, STRUKTURA. REOLOGICKÉ MODELY NAPĚŤOVĚ-DEFORMAČNÍHO* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2023-05-04]. ISBN 978-80-248-3027-8. Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY\\_01\\_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2013.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_014/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF/02%20Text%20pro%20e-learning/Vlastnosti%20a%20zkou%C5%A1en%C3%AD%20materi%C3%A1l%C5%AF%2013.pdf)

- [50] LAŠ, Vladislav. *Mechanika kompozitních materiálů*. 2., přeprac. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [51] TECHNOLOGIE VÝROBY: PREFA KOMPOZITY A.S. POUŽÍVÁ NÁSLEDUJÍCÍ TECHNOLOGIE VÝROBY. *PREFA KOMPOZITY* [online]. Brno: Prefa Brno a.s., 2018 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
- [52] HONEYCOMB TECHNOLOGY. In: *Samia* [online]. Kanada: SAMIA, 2022 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://samiacanada.com/honeycomb/>
- [53] ČSN EN ISO 178 (640607). *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. 2019.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání vlastností sklolaminátu s konstrukčními materiály [8] .....	27
Tabulka 2: Porovnání mechanických vlastností výztuží z přírodních vláken [42]	29
Tabulka 3: Rozměry vyráběných vzorků s papírovou a textilní výztuží.....	46
Tabulka 4: Rozměry vyráběných vzorků, Epoxidová pryskyřice G20 bez výztuže .....	47
Tabulka 5: Rozměry vzorků od ISOMA s papírovou a textilní výztuží .....	48
Tabulka 6: Hodnoty napětí vyráběných vzorků s papírovou výztuží.....	53
Tabulka 7: Hodnoty napětí vyráběných vzorků s textilní bavlněnou výztuží .....	55
Tabulka 8: Hodnoty napětí vyráběných vzorků z pryskyřice G20.....	57
Tabulka 9: Hodnoty napětí vzorků od ISOMA, PAPER MICARTA .....	59
Tabulka 10: Hodnoty napětí vzorků od ISOMA, CANVAS MICARTA .....	60

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Složení kompozitu [5].....	11
Obrázek 2: Kompozitní reflexní luk [6].....	12
Obrázek 3: Použití kompozitu v konstrukci letadel [12].....	14
Obrázek 4: Skládkování listů větrných elektráren [17] .....	15
Obrázek 5: Dětské hřiště vyrobené z vyřazených lopatek větrných elektráren [20] .....	16
Obrázek 6: Automobilové keramické kompozitní brzdy [22] .....	18
Obrázek 7: Rukojeť nože z epoxidové pryskyřice .....	20
Obrázek 8: tekutá a fóliová epoxidová pryskyřice [8] .....	22
Obrázek 9: Epoxidová podlaha [31] .....	23
Obrázek 10: Výrobky z kompozitu s fenolitickou matricí [8] .....	24
Obrázek 11: synergický účinek, překresleno podle [2] .....	26
Obrázek 12: Výroba trubky z kompozitu s uhlíkovými vlákny [38] .....	28
Obrázek 13: Schéma dělení textilních výztuží [45] .....	30
Obrázek 14: Druhy výztuže [30].....	32
Obrázek 15: Dělení kompozitu podle výztuže [50] .....	34
Obrázek 16: Hliníkový sendvičový laminát [52] .....	35
Obrázek 17: Rozdělení mechanických charakteristik [8] .....	36
Obrázek 18: Zkouška ohybem, překresleno podle [53] .....	37
Obrázek 19: Řezání desek z PE .....	39
Obrázek 20: Forma z PE .....	39
Obrázek 21: Příprava pryskyřice na výrobu kompozitu.....	40
Obrázek 22: Papírová výztuž.....	40
Obrázek 23: Bavlněná výztuž.....	40
Obrázek 24: lisování kompozitu ve formě .....	41
Obrázek 25: posunutí vrstev kompozitu .....	42
Obrázek 26: Řezání polotovarů na pásové pile.....	43
Obrázek 27: CNC frézka STEPCRAFT D840.....	44
Obrázek 28: Stopková fréza, slinutý karbid.....	44
Obrázek 29: Pásová bruska .....	45
Obrázek 30: Mikrometr .....	45



Obrázek 31: Kompozit s papírovou.....	46
Obrázek 32: Kompozit s bavlněnou .....	46
Obrázek 33: Epoxidová pryskyřice bez výztuže.....	47
Obrázek 34: Paper Micarta    Obrázek 35: Canvas Micarta .....	48
Obrázek 36: Průměr válců podpěr.....	49
Obrázek 37: Vzájemná poloha podpěr .....	49
Obrázek 38: Průměr válce ohybníku.....	50
Obrázek 39: Vzorky po dokončení zkoušky ohybem .....	50
Obrázek 40: Graf z průběhu zkoušky vzorku č.17 .....	51
Obrázek 41: Delaminace vzorku během zkoušky ohybem .....	53
Obrázek 42: Napětí na mezi pevnosti v ohybu vyráběného kompozitu s papírovou výztuží .....	54
Obrázek 43: Vzorek vyráběného kompozitu během zkoušky ohybem.....	55
Obrázek 44: Napětí na mezi pevnosti v ohybu vyráběného kompozitu s bavlněnou výztuží .....	56
Obrázek 45: Graf průběhu zkoušky v ohybu vzorku vyrobeného z pryskyřice bez výztuže.....	57
Obrázek 46: Napětí na mezi pevnosti v ohybu epoxidové pryskyřice bez výztuže .....	58
Obrázek 47: Napětí na mezi pevnosti v ohybu kompozitu PAPER MICARTA.....	59
Obrázek 48: Vzorek kompozitu CANVAS MICARTA během zkoušky ohybem.....	60
Obrázek 49: Napětí na mezi pevnosti v ohybu kompozitu CANVAS MICARTA .....	61
Obrázek 50: Napětí na mezi pevnosti v ohybu jednotlivých kompozitů .....	63

## **Přílohy**

Příloha 1: Technologický list, EPOX G20

Příloha 2: Průběh zkoušky ohybem vzorku č.3

Příloha 3: Průběh zkoušky ohybem vzorku č.17

Příloha 4: Průběh zkoušky ohybem vzorku č.22

Příloha 5: Průběh zkoušky ohybem vzorku č.34

Příloha 6: Průběh zkoušky ohybem vzorku č.44

## EPOX G20

### *transparentní epoxidový lící systém*

#### **Použití:**

Nízkomolekulární epoxidová pryskyřice s širokým spektrem použití. Vhodná pro zalévání a vytváření dekoračních předmětů, podlah, 3D efektů, odznaků, světelných těles, zalévání a lepení šperků apod. Velmi tekutý a dobře zabíhavý systém. Lze použít i pro výrobu forem, modelů, a také pro pevnostní lepení a spojování (kovy, sklo, beton, guma, dřevo apod). Vhodná pro přípravu laminátů, a pro použití v elektronickém a elektrotechnickém průmyslu. Po vytvrzení transparentní, lze dodat i pigmentovaný.

Výborné mechanické vlastnosti. Vysoká pevnost a soudržnost. Hmota je prakticky bez zápachu. Pro zajištění optimální konzistence a kvalitního výsledku po aplikaci je potřeba zajistit dostatečnou teplotu prostředí i hmoty při smíchávání (cca 20 °C), popřípadě hmotu před odlitím temperovat. Nízké teploty mají výrazně negativní vliv na konečný výsledek. Dále je vhodné materiál vakuovat, pro odstranění bublin vzniklých při míchání.

#### **Vlastnosti:**

viskozita (23 °C)	cca 450 mPa.s (pryskyřice) cca 30 mPa.s (tvrdidlo)
hustota směsi	1 – 1,05 g/cm <sup>3</sup>
mísící poměr	100 : 23
zpracovatelnost	10 – 20 minut (200 g, 23 °C)
vytvrzení	cca 24 hodin (200 g, 23 °C)
pevnost v tahu	55 Mpa
pevnost v tlaku	65 Mpa
barva	čirá, modrá, černá nebo dle dohody s dodavatelem

Doba vytvrzení se liší podle množství zpracovávaného materiálu a teploty prostředí. Při standardních podmínkách má hmota pro běžné aplikace vyhovující vlastnosti za cca 24 hodin. Vlastnosti materiálu po vytvrzení však můžeme ještě zlepšit temperováním vytvrzeného materiálu při teplotě 40 - 60 °C po dobu cca 2 hodiny. Tím dojde k dokonalému zesíťování a vytvrzení materiálu. Zlepšíme tím výslednou teplotní a chemickou odolnost a tvrdost.

V případě že navržený systém nevyhovuje z důvodu např. rychlosti zpracování nebo doby vytvrzení je možné po poradě s dodavatelem zvolit jiný typ tvrdidla.

#### **Skladování:**

- Skladuje se v suchu při teplotě 20 °C
- Záruční doba 12 měsíců

#### **Balení:**

- 1, 5, 10, 50 kg nebo dle dohody s dodavatelem

#### **Ochrana bezpečnost při práci:**

- Podrobnosti týkající se bezpečného zacházení a ochrany zdraví jsou uvedeny v bezpečnostním listu.

---

---

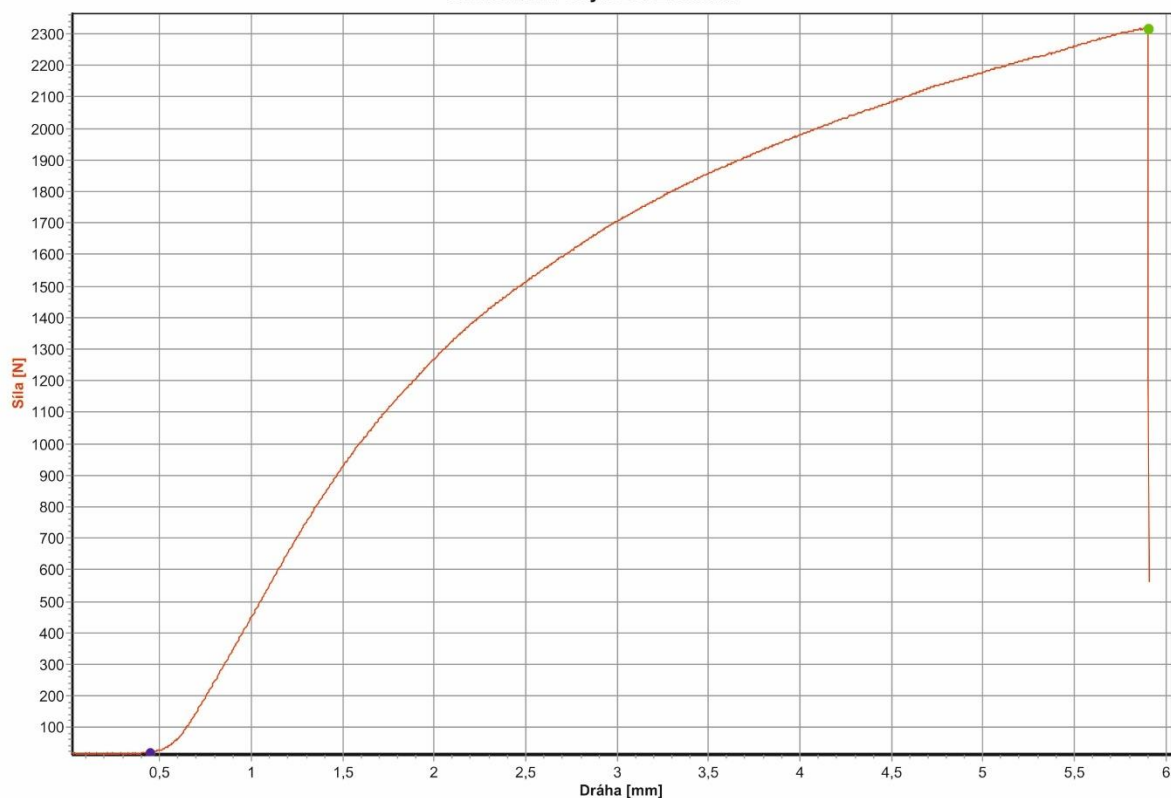
Instrukce a informace v tomto technickém listu jsou výsledkem našich zkoušek a zkušeností. Protože různorodost materiálů a podkladů a počet jejich možných kombinací a způsobů aplikací je nesmírně vysoký, není možné obsáhnout jejich úplný popis. Prospekt může jen právně nezávazně poradit, zpracování výrobku je však nutno přizpůsobit konkrétním podmínkám. Výrobce není odpovědný za škody způsobené nedodržením instrukcí nebo použitím produktu k nevhodnému účelu. Ujistěte se, že postupujete podle nejnovějšího vydání technického listu výrobku. Ty jsou k dispozici na naší webové stránce.

# Vzorek č.3

## Zkušební parametry

Materiál vzorku: Vyráběný kompozit s papírovou výztuží  
Zkušební norma: ČSN EN ISO 178 (640607)  
Typ stroje: 48/17  
Snímač síly: 100kN  
Průtahoměr: Dráha  
Upínací přípravek: ne  
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
Rozměry vzorku: a = 9 mm; b = 30 mm; l=120mm; m = 100 g  
Zadáni délek: Le = 40 mm; Lc = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 15 mm/min; V1 = 15 mm/min  
Přepínací body: F0 = 20 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 75 %

Univerzální ohybová zkouška



## Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
9	x	10.05.23	12:47			2318,90	5,46	2318,90	5,46

## Statistika a = 9

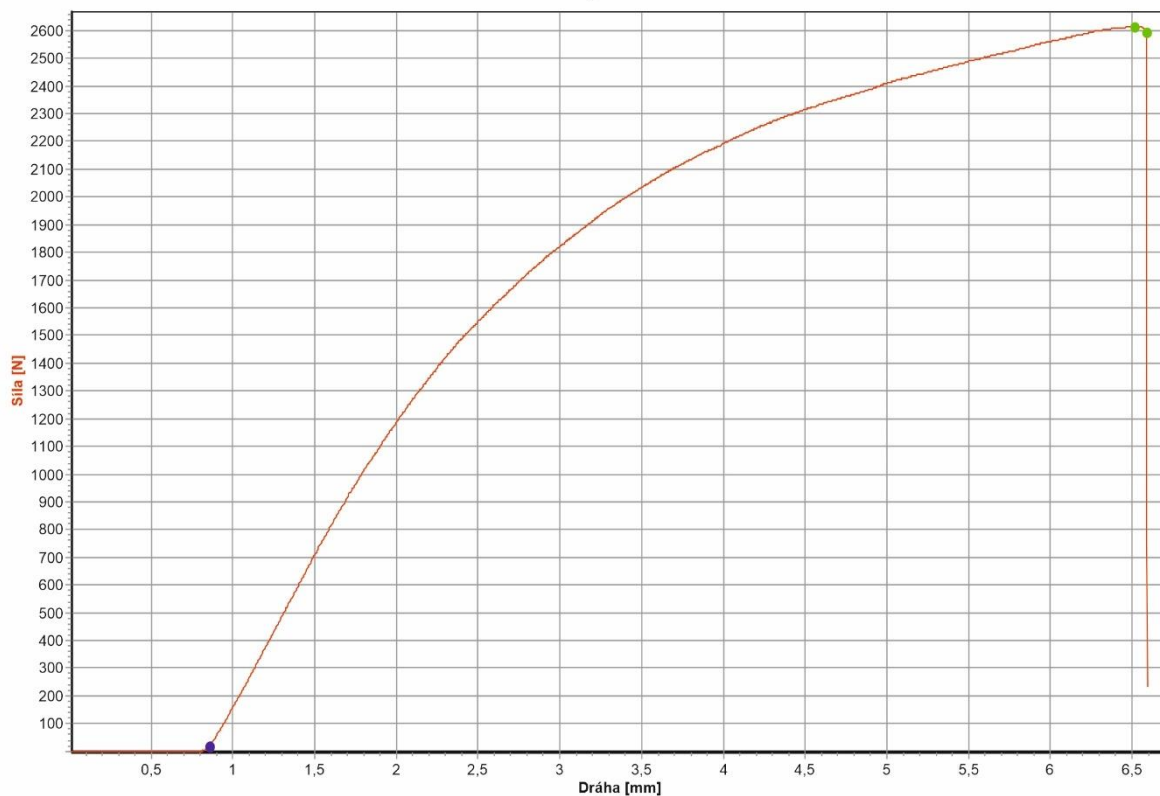
FH N	dLH mm	FB N	dLB mm

# Vzorek č.17

## Zkušební parametry

Materiál vzorku: Vyráběný kompozit s bavlněnou výztuží  
Zkušební norma: ČSN EN ISO 178 (640607)  
Typ stroje: 48/17  
Snímač síly: 100kN  
Průtahoměr: Dráha  
Upínací přípravek: ne  
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
Rozměry vzorku: a = 9 mm; b = 30 mm; l=120mm; m = 100 g  
Zadáni délek: Le = 40 mm; Lc = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 15 mm/min; V1 = 15 mm/min  
Přepínací body: F0 = 20 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 75 %

Univerzální ohybová zkouška



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
17	x	10.05.23	13:04			2614,80	5,66	2591,80	5,73

Statistika a = 17

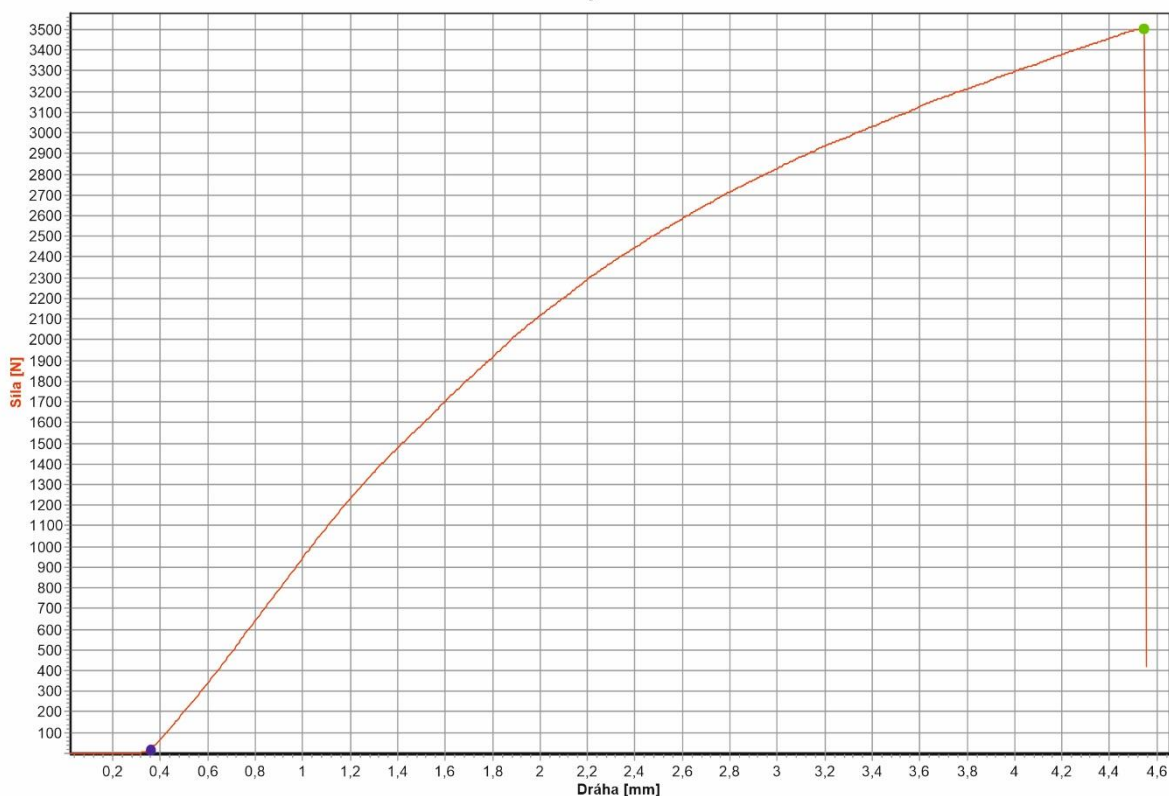
FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
---------	-----------	---------	-----------

# Vzorek č.22

## Zkušební parametry

Materiál vzorku: Kompozit ISOMA CANVAS MICARTA  
Zkušební norma: ČSN EN ISO 178 (640607)  
Typ stroje: 48/17  
Snímač síly: 100kN  
Průtahoměr: Dráha  
Upínací přípravek: ne  
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
Rozměry vzorku: a = 9 mm; b = 30 mm; l=120mm; m = 100 g  
Zadáni délek: Le = 40 mm; Lc = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 15 mm/min; V1 = 15 mm/min  
Přepínací body: F0 = 20 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 75 %

Univerzální ohybová zkouška



## Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
22	x	10.05.23	13:13			3508,20	4,19	3507,10	4,19

## Statistika a = 22

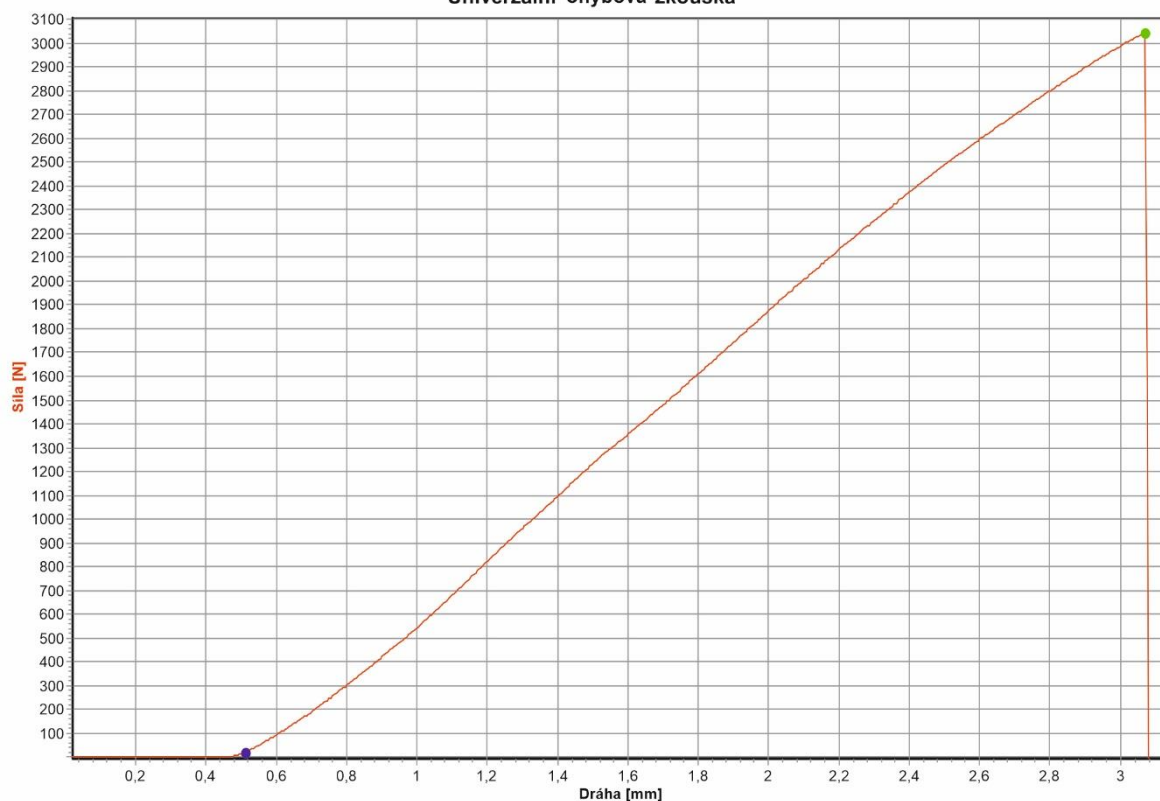
FH N	dLH mm	FB N	dLB mm

# Vzorek č.34

## Zkušební parametry

Materiál vzorku: Kompozit ISOMA PAPPER MICARTA  
Zkušební norma: ČSN EN ISO 178 (640607)  
Typ stroje: 48/17  
Snímač síly: 100kN  
Průtahoměr: Dráha  
Upínací přípravek: ne  
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
Rozměry vzorku: a = 9 mm; b = 30 mm; l=120mm; m = 100 g  
Zadáni délek: Le = 40 mm; Lc = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 15 mm/min; V1 = 15 mm/min  
Přepínací body: F0 = 20 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 75 %

Univerzální ohybová zkouška



Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
34	x	10.05.23	13:26			3045,90	2,56	3045,90	2,56

Statistika a = 34

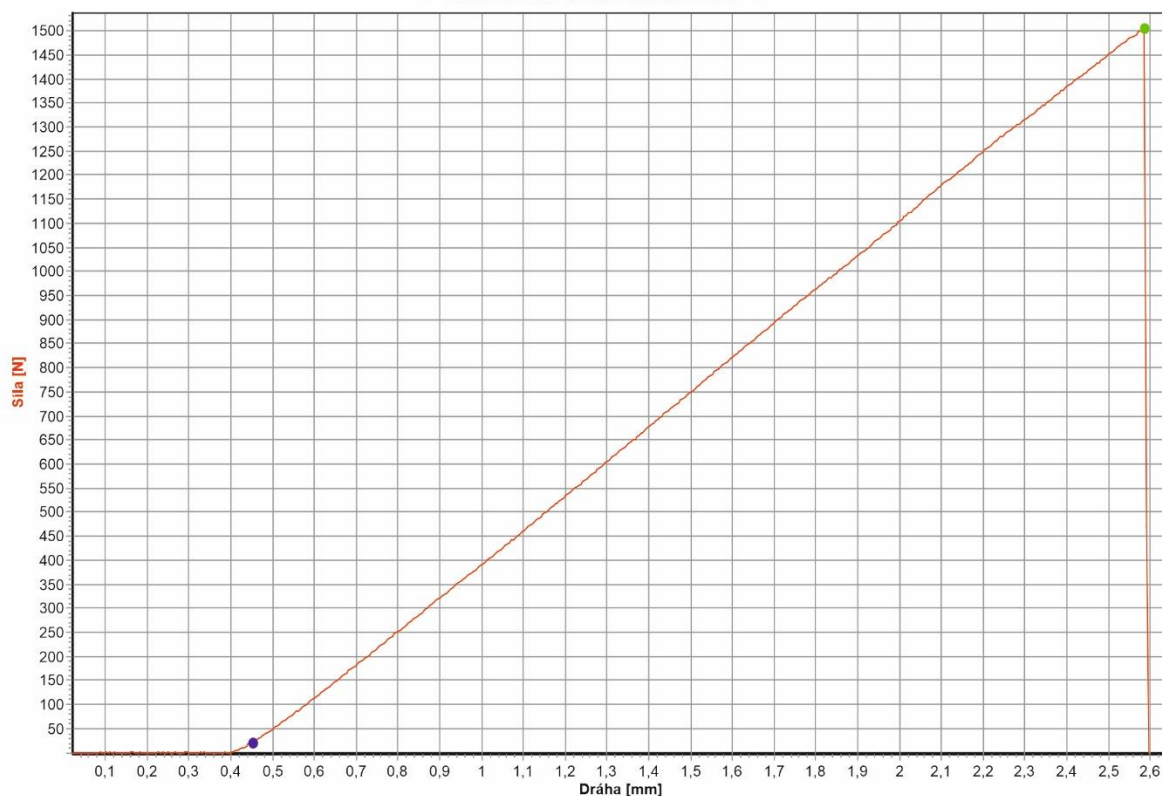
FH N	dLH mm	FB N	dLB mm

# Vzorek č.44

## Zkušební parametry

Materiál vzorku: Epoxidová pryskyřice G20 bez výztuže  
Zkušební norma: ČSN EN ISO 178 (640607)  
Typ stroje: 48/17  
Snímač síly: 100kN  
Průtahoměr: Dráha  
Upínací přípravek: ne  
Zkušební prostor: Spodní zkušební prostor  
Rozměry vzorku: a = 9 mm; b = 30 mm; l=120mm; m = 100 g  
Zadáni délek: Le = 40 mm; Lc = 80 mm  
Zkušební rychlosti: V0 = 15 mm/min; V1 = 15 mm/min  
Přepínací body: F0 = 20 N  
Kriterium ukončení zkoušky: Síla = 50000 N; dF = 75 %

### Univerzální ohvbová zkouška



### Tabulka výsledků

	OK	Datum	Čas	Ozn.1	Ozn.2	FH N	dLH mm	FB N	dLB mm
44	x	10.05.23	13:43			1506,80	2,14	1506,80	2,14

### Statistika a = 44

FH N	dLH mm	FB N	dLB mm