

Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

Mechanické vlastnosti biokompozitů

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.
Autor práce: Bc. Petr Janošík

PRAHA 2016

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Petr Janošík

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Mechanické vlastnosti biokompozitů

Název anglicky

Mechanical properties of biocomposites

Cíle práce

Cílem diplomové práce je popsání mechanických vlastností pryskyřic – reaktoplastů – plněných organickými druhy plniv. Mezi dílčí cíle práce patří provedení literární rešerše, na základě které bude vhodně indikován experimentální program. Vzniklé biokompozitní systémy je nutné charakterizovat především mechanickými vlastnostmi, mezi které lze řadit kohezni charakteristiky, ale i jiné vlastnosti ovlivňující možné aplikační oblasti těchto materiálů.

Metodika

- Současný stav řešeného problému (literární rešerše),
- vlastní experimentální program (laboratorní experiment),
- závěry a přínos práce.

Doporučený rozsah práce

60 s.

Klíčová slova

Adhezí a kohezí charakteristiky, organické částice, reaktoplasty.

Doporučené zdroje informací

AGARWAL, BHAGWAN D., LAWRENCE BROUTMAN, J.: Vláknové kompozity, 1.vyd., Praha: Nakladatelství techn. lit., 1987, 294 s.

BERTHELOT, J.: Composite materials: Mechanical behavior and structural analysis, New York: Springer, 1999, 646 s.

COWIE, JOHN MCKENZIE GRANT, VALERIA ARRIGHI: Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials, 3rd ed., Boca Raton: Taylor & Francis, 2007, 450 s.

EHRENSTEIN, G.W.: Polymerní kompozitní materiály, Nakladatelství Scientia 1. vydání, Praha, 2009, 351 s.

KAW, AUTAR K.: Mechanics of Composite Materials, 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006, 496 s.

MILTON, GREAME W.: The Theory of Composites, Cambridge: Cambridge Univ. Press 2, 2002, 719 s.

MLEZIVA, J.: Polymery: Výroba, Struktura, Vlastnosti a Použití, 1. vyd. Praha: Sobotáles, 1993, 537 s.

Předběžný termín obhajoby

2015/16 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 20. 4. 2015

doc. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2015

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 21. 03. 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Mechanické vlastnosti biokompozitů vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Valáška, Ph.D a všechny prameny, které jsem použil cituji a uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze

dne

.....

Petr Janošík

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval především vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Petru Valáškoví, Ph.D. za předávání cenných rad, zkušeností a za ochotu při spolupráci na mé diplomové práci.

Též bych chtěl poděkovat celé katedře materiálu a strojírenské technologie za možnost využívání laboratoří a strojů.

Abstrakt: Cílem diplomové práce bylo popsání mechanických vlastností epoxidových pryskyřic plněných přírodními (organickými) vlákny a experimentálně posoudit vliv délky vláken o různých koncentracích na výsledné mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. První část diplomové práce je věnována literární rešerši ve které jsou popsány obecné vlastnosti zaměřené na vláknové kompozity, materiály ze kterých se zhotovují a mechanické zkoušky. V kapitole „Metodika“ jsou popsány materiály, které byly použity pro experimentální výzkum. Dále je zde popsán postup přípravy vzorků a zkoušky, kterým byly vzorky vystaveny. Poslední část diplomové práce se zabývá vyhodnocením výsledků z prováděných mechanických zkoušek na kompozitech s výztuží vláken o různých délkách a koncentracích.

Klíčová slova: adhezní a kohezní charakteristiky, organické částice, reaktoplasty.

Mechanical properties of biocomposites

Summary: Goal of this diploma thesis was to describe mechanical properties of epoxy resins containing organical fibers and to experimentally evaluate the effect of the fiber length with various concentrations on final mechanical property of composit material. First part of the diploma thesis is dedicated to literature review which describes general properties of fiber composites, materials which they are made of, and mechanical trials. In chapter called "Methodics", materials used for experimental research are described. Process of sample preparation and mechanical trials, which were used for the test, are also described there. Last part of the diploma thesis is dedicated to evaluation of results of executed mechanical trials on composites with fiber support of various lengths and concentrations

Key words: adhesion and cohesion characteristics, organic particles, reactoplastic.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíle práce	2
3	Přehled o současném stavu kompozitů	2
3.1	Základní části kompozitních systémů.....	3
3.1.1	Matrice.....	3
3.1.2	Výztuž	4
3.2	Rozdělení kompozitů	4
3.2.1	Partikulové (částicové) kompozity.....	5
3.2.2	Vláknové kompozity	5
3.3	Adheze	6
3.4	Vyztužující vlákna	7
3.5	Polymery.....	12
3.6	Zkoušky mechanických vlastností u jednosměrných kompozitů.....	17
3.6.1	Zkouška tahem v podélném směru.....	18
3.6.2	Zkouška tahem v příčném směru	21
3.6.3	Zkouška tlakem v podélném směru	21
3.6.4	Zkouška tlakem v příčném směru	21
3.6.5	Rovinná zkouška smykem.....	22
3.7	Krátkovláknové kompozity	22
3.7.1	Přenos napětí u krátkovlákných kompozitů.....	23
3.8	Aplikační oblasti	26
4	Metodika	27
4.1	Použité materiály	27
4.1.1	Polymerní matrice	27
4.1.2	Vyztužující vlákna	30
4.2	Příprava zkušebních těles	34
4.2.1	Příprava vláken a kompozitní směsi	34
4.2.2	Výroba forem pro zkušební tělesa	36
4.2.3	Výroba zkušebních těles pro tahovou zkoušku a pórovitost	37

4.3	Provedení mechanických zkoušek.....	38
4.3.1	Stanovení tahových vlastností (ČSN EN ISO 527 - 1)	38
4.3.2	Stanovení tvrdosti Shore D (ČSN EN ISO 868).....	42
4.3.3	Stanovení pórovitosti.....	43
4.3.4	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM).....	45
4.4	Vztahy použité při výpočtech naměřených dat	45
5	Výsledky a diskuze experimentálního výzkumu	47
5.1	Rozměry sisalového vlákna.....	47
5.2	Hustota kompozitu a pórovitost.....	49
5.3	Zkouška tvrdosti Shore D.....	51
5.4	Zkouška tahem	54
5.5	Analýza lomových ploch.....	60
6	Závěr	61
7	Seznam literatury	63
	Seznam obrázků	66
	Seznam tabulek	67
	Přílohy.....	68

1 Úvod

Kompozitní materiály se využívají stále častěji a nahrazují spoustu tradičních konstrukčních materiálů. Používají se zejména pro svou flexibilitu. Vlastnosti jednotlivých složek je možné různě kombinovat k dosažení požadovaných vlastností. Mezi jejich další výhody patří například vysoká pevnost, chemická odolnost, elektrické vlastnosti a nízká hmotnost.

Kompozitní materiály se začaly dostávat do popředí hlavně ve druhé polovině 20. století. Začínaly se používat v oblastech jako je automobilový průmysl, stavebnictví a letecký průmysl. Kompozitní materiály jsou rychle se rozvíjející obor, zvláště pak vláknové polymerní kompozity. Jejich vývoj není zdaleka ukončen a stále se vyvíjí.

Vláknové kompozitní materiály mají řadu výhod. Nejvíce se využívají v oblasti letectví a automobilového průmyslu. V těchto oblastech se zasloužily především o snížení hmotnosti a zjednodušení staveb konstrukcí. Příkladem může být využití polymerních kompozitů při stavbě letadla, kde je použito více jak 60 % těchto materiálů. Při použití vláken jako výztuže se docílí zvýšení celkové lomové houževnatosti a zabrání se tím náhlým lomům strojních součástí. Vlastnosti kompozitních materiálů jsou dány především konstrukčními požadavky, kde a pro co se bude daný materiál používat a také technologickými možnostmi výroby.

Tato práce se zabývá sumarizací poznatků o vláknových kompozitech a je zaměřena především na organická neboli přírodní vlákna. Experimentální výzkum se zabývá přípravou vzorků kompozitů z přírodních vláken sisalu, které pochází z rostliny Agáve sisalana a epoxidové pryskyřice.

Během několika posledních let, přírodní vlákna získávají pozornost jako alternativa k syntetickým vláknům. K dispozici je široká nabídka různých přírodních vláken, které mohou být použity jako zesílení kompozitů na bázi polymerů. Mezi největší výhody přírodních vláken patří především jejich cena, biologická rozložitelnost, recyklovatelnost a nízká hustota.

Zhotovené biokompozity byly podrobeny tahové zkoušce, zkoušce tvrdosti a byla zjištěna pórovitost. Výsledky z těchto mechanických zkoušek byly v závěrečné kapitole vyhodnoceny.

2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je zjištění a popsání mechanických vlastností kompozitů, složených z epoxidové pryskyřice a přírodních vláken. K dalším cílům této práce patří vypracování literární rešerše z odborné literatury. Rešerše obsahuje přehled kompozitů, zkoušky jejich mechanických vlastností, aplikační oblasti a je podkladem pro experimentální program.

Vzniklé kompozity jsou podrobeny experimentálnímu programu, který charakterizuje mechanické vlastnosti materiálu a určí jejich možné aplikační oblasti.

3 Přehled o současném stavu kompozitů

Kompozitní materiál znamená, že je vytvořený nebo se skládá ze dvou či více odlišných částí. Materiál, který má dvě nebo více odlišných materiálových složek, se stává materiálem složeným. Tyto složky neboli fáze musejí mít značně lišící se fyzikální vlastnosti. Následně i vlastnosti složeného materiálu jsou odlišné od vlastností jeho složek. Tento materiál se nazývá kompozit. [1, 2]

Aby byl vícefázový materiál zařazen mezi kompozity musí splňovat následující podmínky:

- kompozitní materiál musí být připraven smícháním více fází či složek,
- vlastnosti matrice a výztuže (fyzikální, mechanické či chemické) musí být rozlišné.

Kompozity jsou tvořeny jednou nebo více nespojitými fázemi, které jsou ponořené ve spojitě fázi. Nespojitě fáze jsou ve většině případech pevnější a tvrdší než spojitá fáze. Nespojitě fázi se říká výztuž nebo také vyztužovací materiál, zatímco spojitá fáze se nazývá matrice. [1, 2]

Jedním z největších rozdílů mezi kompozitním materiálem a heterogenním materiálem je synergický účinek. [3]

Je to účinek, který vzniká jen u kompozitních materiálů. Spojení dvou a více fází s odlišnými vlastnostmi dochází ke zlepšení vlastností materiálu. Tento materiál má mnohem lepší vlastnosti jako celek, než kdyby se jednotlivé fáze sečetly dohromady. [3]

3.1 Základní části kompozitních systémů

Tato kapitola je věnována obecnému popisu částí kompozitních systémů, materiálů ze kterých jsou tvořené a jejich vlastností.

3.1.1 Matrice

Matrice ve většině případů bývá prosycena systémem vláken nebo partikulárních částic. Druhy matic jsou uvedeny v obr. 1. Tato spojitá fáze zastává funkci pojiva vyztužujícího materiálu. [2, 4, 5]

Mezi hlavní úkoly matrice patří zaručení geometrického tvaru, přenos sil a ochrana vláken, tj:

- zajištění geometrické polohy vláken a tvarové stálosti výrobku,
- přenos namáhání na vlákna,
- ochrana vláken před vlivy okolí,
- převedení namáhání z vlákna na vlákno. [2, 4, 5]

Hlavním faktorem pro kvalitu kompozitu je zajištění adheze na fázovém rozhraní matrice - vlákno. Pro lepší fyzikální a popřípadě i chemické vazby mezi vláknem a maticí se musí provést konečná úprava vlákna tzv. apretace vhodná pro určitý druh matrice. Vhodná viskozita a povrchové napětí matrice hraje výraznou roli. Určují jestli bude vlákno smáčeno úplně a jestli se budou tvořit bubliny. [2, 4, 5]

Obr. 1 - Rozdělení matic kompozitů [7]



3.1.2 Výztuž

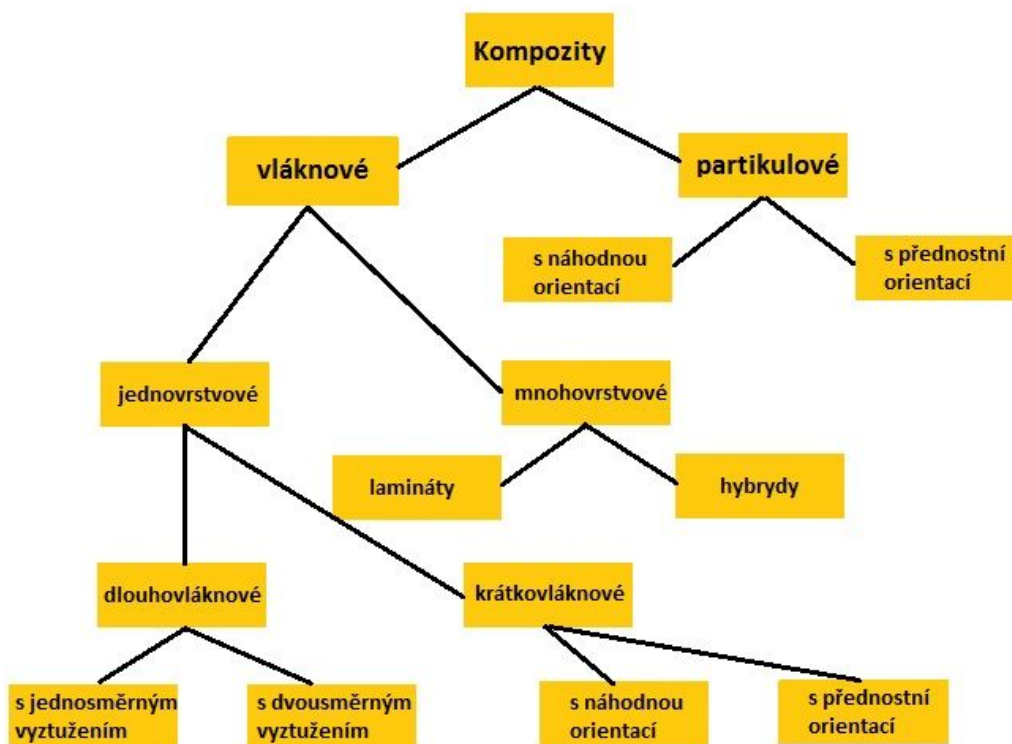
Výztuž je pevná látka s vysokým stupněm tuhosti. Díky tomu jsou na výztuž svedeny všechny vnější síly, působící na matici. Úkolem výztuže je celkové zpevnění materiálu a následně tím zlepšení dosahovaných vlastností daného materiálu. [6]

3.2 Rozdělení kompozitů

Do dnes většina vyvinutých kompozitních materiálů je vyráběna pro zlepšení mechanických vlastností, jako jsou pevnost, tažnost, tuhost a vysokoteplotní odolnost. Mechanismus pevnostního chování je velice závislý na geometrii vyztužení. Proto se kompozitní materiály rozdělují na základě geometrie jednotky vyztužení. Toto obecné schéma rozdělení pro kompozitní materiály je patrné na obr. 2. [1]

Hlavní rozlišovací charakteristikou kompozitů v tomto schématu je to, jestli jsou vláknové, nebo nikoli. Vláknové je především charakterizováno svou délkou, která je mnohem větší v porovnání s jeho průřezem. Kompozity, které jsou vyztuženy částicemi jsou označovány jako partikulové (částicové). Kompozity vyztužené vlákny se pak nazývají vláknové. [1]

Obr. 2 - Klasifikace kompozitních materiálů [1]



3.2.1 Partikulové (částicové) kompozity

Za částicové kompozity lze pokládat materiály, jejichž struktura je tvořena maticí, která je zpevněná jemnými částicemi. Tyto částice bývají obvykle o rozměrech větší než 1 μm . Tvar vyztužujících částic může být destičkový, kulový, ale i nepravidelný. [8]

3.2.2 Vláknové kompozity

Vláknové kompozity patří mezi nejlepší kompozitní materiály, protože dokážou dosahovat vysokých pevností. Teoretické hodnoty pevnosti většiny materiálů, jsou v některých případech o mnoho větší než jejich skutečně naměřené. Tyto rozdíly v hodnotách pevnosti jsou přičítány vrozeným vadám v materiálu. Mezi vady, které poškozují pevnost, patří zejména trhliny, které jsou orientovány kolmo ke směru působícího zatížení. V porovnání plastových vláken nebo vláken z nepolymerních materiálů mají oproti kompaktu ze stejného materiálu větší pevnost ve směru délky. Vysoká pevnost je docílena díky minimalizování velkých nečistot v důsledku malých průřezových rozměrů vláken. [1, 2]

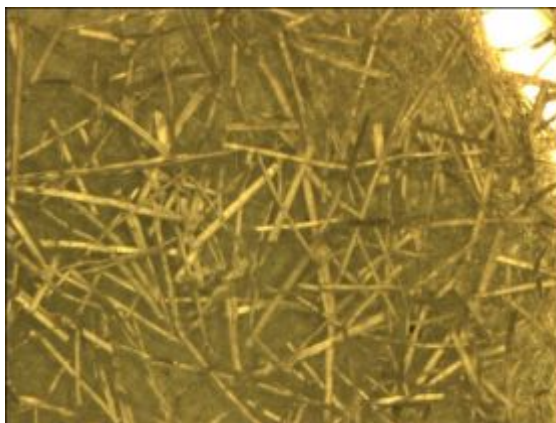
V technickém využití se vlákna díky jejich malým průřezovým rozměrům, nemohou používat. Proto se spojují s maticovými materiály, aby vytvořily vláknové kompozity. [1, 2]

Vláknové kompozity můžeme rozdělit na jednovrstvové a na mnohovrstvové (obr. 2). Zhotovení jednovrstvových kompozitů může být i z několika vrstev, přičemž každá z nich má stejnou orientaci vláken a tytéž vlastnosti. Kompozity, které jsou tvarovány litím do forem a obsahující nesouvislá vlákna, nevznikají žádné vrstvy a jsou tedy označovány jako jednovrstvové. [1, 2]

Vlákna používána pro vyztužování v jednovrstvovém kompozitu jsou krátká nebo dlouhá vzhledem k jejich průřezovým rozměrům. Kompozity s krátkými vlákny jsou *krátkovláknové (diskontinuální)*. U krátkovláknových kompozitů jsou vlastnosti ovlivňovány délkou jejich vláken. Kompozity s dlouhými vlákny se nazývají *dlouhovláknové (kontinuální)* a u těchto kompozitů lze předpokládat, že zatížení působí přímo na vlákna a že vlákna ve směru namáhání jsou hlavní nosnou složkou. Tato podmínka je platná hlavně, když jsou použita vysokomodulová (např. uhlíková vlákna) ve velkých koncentracích. Pak není hlavním úkolem matrice být nosnou složkou. Tím úkolem se stává pojení vláken k sobě a jejich ochrana. [1, 2]

V kompozitním materiálu orientaci krátkých neboli diskontinuitních vláken nelze snadno řídit a předpokládá se, že vlákna jsou orientována nahodile, jak je znázorněno na obr. č. 3. [1, 2]

Obr. 3 - Ukázka diskontinuitních vláken sisalu



3.3 Adheze

Celková pevnost při spojování dvou a více fází závisí hlavně na smáčivosti. Smáčivost ovlivňuje adhezi mezi plnivem a matricí. Také má výrazný vliv na tvorbu bublin, které vedou k lomu. [4, 9]

Význam slova adheze znamená vzájemné přitahování dvou povrchů adhezními silami. Je to velice důležitý faktor pro kvalitu kompozitu. Docílit dobré adheze mezi dvěma tuhými materiály bez lepidla, je skoro nemožné. Spojované plochy by se k sobě musely přiblížit na vzdálenost až $3 \cdot 10^{-8}$, obě plochy by musely být dokonale rovné a čisté.

Snadněji můžeme dosáhnout adheze mezi pevným povrchem a měkkou nebo tekutou látkou. Tekutá látka se snadněji přizpůsobí nerovnostem na pevném povrchu. U kompozitů musí být zajištěna dobrá adheze na fázovém rozhraní mezi matricí a vyztužujícím vláknem. [4, 9]

Zesílení adhezních sil u vláknových kompozitů lze dosáhnout například povlakováním, poprašováním nebo impregnací vyztužujících vláken nebo také zajištěním nižší viskozity polymerů. [4, 9]

3.4 Vyztužující vlákna

Vlákna se jako konstrukční prvky používají velmi málo. Naopak vlákna v kompaktní formě se stávají velice zajímavou skupinou, jako je tomu v kompozitních materiálech. Vlákna, které se používají na vyztužení plastů mají vysokou měrnou pevnost a tuhost. [2, 4]

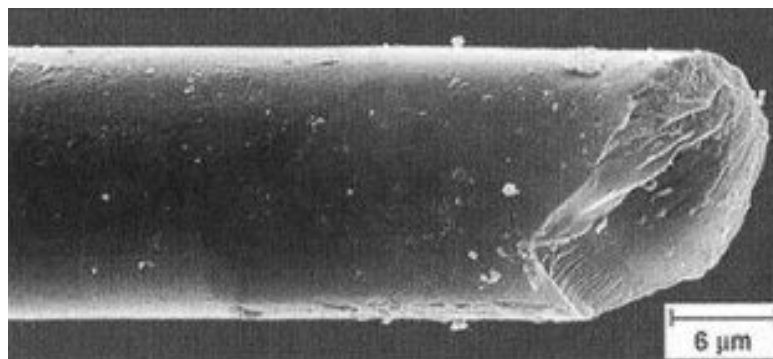
Druhy používaných vyztužujících vláken:

- skelná vlákna,
- aramidová vlákna,
- uhlíková vlákna,
- přírodní vlákna. [2, 4]

Skelná vlákna

Skelná vlákna mají průměr od 3,5 μm do 24 μm . Mají pravidelný kruhový průřez a jsou tažená z roztavené skloviny. Struktura skelného vlákna je vidět na obr. 4. Nejčastěji používaným typem skloviny používané pro výrobu vlákna je tzv. *E - sklovina*. Tento typ je vynikajícím elektrickým izolantem s vysokou prostupností pro záření. Velkou nevýhodou skelných vláken je, že podléhají korozi. Mezi největší výhody patří dobrá tvárnost, pevnost, nízká cena (oproti uhlíkovým nebo aramidovým vláknům) a elektrický odpor. [2, 4, 5]

Obr. 4 - Struktura skelného vlákna [4]



Aramidová vlákna

Aramidová vlákna mají základ z organických polymerů. Na obr. 5 je vidět struktura aramidového vlákna. Hlavními výhodami těchto vláken je tuhost, vysoká pevnost v tahu a odolnost vůči abrazi. Patří mezi nejlehčí výztuže. K nevýhodám aramidovým vláken patří zejména rozdílná mez pevnosti v tlaku ve směru vláken, která je výrazně menší než mez pevnosti v tahu. Při projektování je proto nutno počítat s jejich citlivostí na zatížení tlakem, působící v podélném směru. [2, 4, 5]

Základní skupiny aramidových vláken se dělí na:

- para - aramidová (Kevlar, Twaron),
- meta - aramidová (Nomex). [2, 4, 5]

Obr. 5 - Aramidové vlákno pod mikroskopem [4]



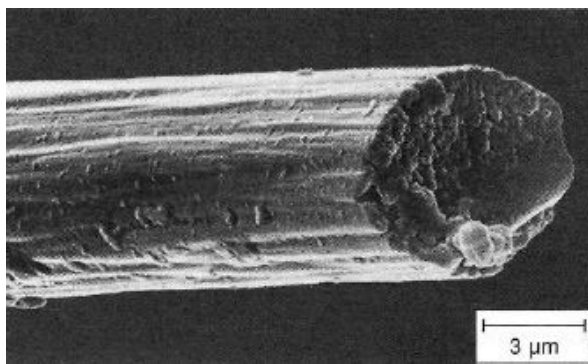
Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mají nejširší rozsah mechanických vlastností při malé hustotě ($1,8 - 2 \text{ g/cm}^3$). Jsou to vlákna s vysokou pevností, tuhostí a skvěle odolávají korozi. Naopak mají nízkou tažnost. Za normálních podmínek jsou vlákna velmi křehká a snadno se lámou. Proto se musí před zpracováním provést povrchová apretace směsí na základě epoxidové pryskyřice. Tato úprava poskytuje vláknům ochranu při zpracování a zlepšuje vazby mezi vláknem a matricí. Oproti oceli mají uhlíková vlákna až 60x vyšší pevnost v tahu. To je také znát na jejich ceně. Řez uhlíkovým vláknem je zachycen na obr. 6. [2, 4, 10]

Příklady vyráběných druhů uhlíkových vláken:

- karbonizovaná vlákna - mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost (označován jako standardní typ HT),
- vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM),
- vlákna velmi pevná - mají střední modul pružnosti, pevnost větší než 6500 MPa (IM),
- dutá uhlíková vlákna,
- vlákna s vysokou pevností v tahu. [2, 4, 10]

Obr. 6 - Řez uhlíkovým vláknem [4]



Přírodní vlákna

Ze všech přírodních vláken pro vyztužování plastů se používají pouze rostlinná vlákna, které mají jako základ celulózu. Mezi používané přírodní vlákna patří len, konopí, sisal, juta, ramie a bavlna. Hlavní výhodou je odolnost proti stárnutí a čichová nezávadnost, při klimatických změnách. Za zmínku stojí i jejich odolnosti v tahu. Tato přírodní vlákna mají nízkou měrnou hmotnost a proto jsou vhodným materiálem pro lehké konstrukce. [2, 4, 10]

Výhody rostlinných přírodních vláken:

- malá abrazivita při mechanickém opracování,
- výhodná likvidace spalováním,
- nízká hustota,
- nízká cena. [2, 4, 10]

Nevýhody rostlinných přírodních vláken:

- citlivost na působení vlhkosti,
- omezená délka vláken,
- závislost vlastností vláken na podmínkách jejich růstu,
- možnost změn vyvolaných biologickým napadením,
- omezená možnost volby matrice vzhledem k nebezpečí rozkladu vláken při vysoké teplotě zpracování, tyto vlákna mají odolnost do 200°C. [2, 4, 10]

Porovnání vyztužujících vláken

Vlastnosti vláken lze porovnávat z mnoha směrů. V tab. 1 jsou porovnány vlastnosti přírodních vláken a skelných. Srovnání vlastností mezi uhlíkovými, aramidovými a skelnými vlákny je v tab. 2., tab. 3 znázorňuje cenové porovnání druhů vláken. [2, 4]

Tab. 1 - Porovnání mechanických vlastností skelných a přírodních vláken [4]

Vlastnosti	<u>Druhy vláken</u>				
	<i>Sklo</i>	<i>Konopí</i>	<i>Len</i>	<i>Juta</i>	<i>Sisal</i>
<i>Modul pružnosti v tahu ($N \cdot mm^{-2}$)</i>	75 000	70 000	30 000	55 000	20 000
<i>Mez pevnosti v tahu ($N \cdot mm^{-2}$)</i>	3 500	600	750	550	600
<i>Tažnost (%)</i>	4	1,6	2,0	2,0	2,0
<i>Hustota ($g \cdot cm^{-3}$)</i>	2,54	1,45	1,48	1,4	1,45

Tab. 2 - Všeobecné srovnání některých vláknových kompozitů [4]

Vlastnosti	Kompozity		
	vyztužené sklem	aramidové	uhlíkové
Hustota	+-	++	+
Mez pevnosti v tahu	+	+	+
Modul pružnosti v tahu	-	+	++
Mez pevnosti v tlaku	+	-	+
Rázová houževnatost	+	+	-
Tlumení	-	+	-
Chování při statickém a dynamickém namáhání	+	+	++
Dialektrické vlastnosti	++	++	-
Adheze, přilnavost	++	-	+
Nasákavost	+	-	+
Cena	++	+-	-

++ velmi dobré, + dobré, +- uspokojivé, - špatné

Tab. 3. - Ceny vláken [4]

Materiál vlákna	Cena (€/1kg)
Sklo	2 - 3
Aramid	20 - 30
Uhlík	
- standardní typ (HT, IM)	20 - 80
- vysokomodulový typ (HM)	100 - 500

Povrchové úpravy vláken

U kompozitů je důležité vzájemné působení mezi matricí a plnivem. Mezi těmito složkami dochází k přenosu napětí a podle toho jak na sebe složky působí, budou i výsledné vlastnosti kompozitu. Rozhraní mezi matricí a plnivem je důležité především u kompozitů s vysokým obsahem plniva (vyztužující vlákna nebo částice) tzv. nasycené kompozity. Toto rozhraní lze rozdělit do dvou způsobů vzniku [4, 7]:

- řízené mezivrstvy - mezivrstvy vznikající předem určeným řízeným procesem. Je to speciální povrchová úprava plniva, která zvyšuje adhezi k určitému typu matrice.
- neřízené mezivrstvy - vznikají při vzniku kompozitu, neřízenými fyzikálně chemickými procesy. [4, 7]

Při výrobě kompozitů se mohou vyskytovat obě mezivrstvy zároveň. U kompozitů, které jsou aplikovány v náročnějších oblastech, převládají hlavně mezivrstvy řízené a u jednodušších aplikací dominují především mezivrstvy neřízené. [4, 7]

Jak už bylo zmíněno vlastnosti kompozitů jsou ovlivňovány vzájemným působením maticí a plniva. Při použití vláken jako plniva existují různá uspořádání, která poté vedou k požadovaným vlastnostem kompozitu. [4, 7]

Druhy uspořádání vláken:

- krátká vlákna - vlákna různých délek (od 0,1 - 5,0 mm) volně rozptýlených v matrici.
- příze - spředený vlákna, která se používají pro výrobu pásů, tkanin nebo různých pletených výrobků.
- nitě - jedna nebo více přízí, které jsou spředeny dohromady.
- tkaniny - plošné výrobky z vláken uložené do pravého úhlu.
- rohože z kontinuálních vláken - pojivem spojená nekonečná vlákna, uložená bez orientace. [4, 7]

3.5 Polymery

Polymery jsou chemické látky přírodní nebo syntetické. Jsou tvořeny tzv. makromolekulami. Tyto makromolekuly jsou složeny z mnoha atomů, mezi které patří: kyslík, uhlík, vodík, dusík a chlór. V určité fázi výroby se polymery chovají jako kapalina, aby se z nich dal vytvořit požadovaný tvar. [2, 4]

Polymerní matrice

Polymerní matrice je mnohem poddajnější než vlákna a jejím hlavním úkolem je zajištění ochrany vláken, geometrické polohy a přenos sil.

Polymerní matrice se rozděluje na reaktoplasty a termoplasty. V tab. 4 jsou porovnány mechanické vlastnosti reaktoplastů a termoplastů. Hlavní důvodem použití reaktoplastů je snazší smáčení, které ovlivňuje nižší viskozita. Některé příklady viskozit termoplastových a reaktivních pryskyřic jsou znázorněny v tab. 5. Termoplasty se lépe recyklují a dokážjí opakovaně pomocí ohřevu měknout a ochlazením tuhnout. Adheze je zde významný činitel, protože ovlivňuje přenos napětí mezi výztuží a matricí. [2, 4, 6, 11]

Tab. 4 - Porovnání mechanických vlastností reaktoplastů a termoplastů [7]

Matrice	Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Deformace do lomu [%]
Reaktoplasty				
Epoxidové pryskyřice	1,1 - 1,4	35 - 90	2,1 - 6,0	1 - 10
Polyesterové pryskyřice	1,1 - 1,5	45 - 85	1,3 - 4,5	1 - 5
Fenolické pryskyřice	1,3	50 - 60	4,4	1 - 3
Termoplasty				
Polypropylen	0,9	28 - 41	1,1 - 1,5	100 - 700
Polyamidy	1,4	76 - 83	2,8 - 3,4	300 - 600
Polykarbonáty	1,2	62 - 76	2,1 - 2,8	110 - 130

Tab. 5 - Porovnání viskozit termoplastových a reaktivních pryskyřic [4]

Matrice	Teplota zpracování	Viskozita při teplotě zpracování
Nevyztužená nenasyčená polyesterová pryskyřice vytvrzovaná za studena	10 až 40°C	stovky mPa · s
Nenasycená polyesterová pryskyřice vytvrzovaná za tepla	≈140 °C	≈ 1000 mPa · s
Nevyztužená epoxidová pryskyřice vytvrzovaná za tepla	130°C	stovky mPa · s
Polypropylen	200 až 270 °C	10 ³ Pa · s
Polyéteréterketon	≈ 350 až 400 °C	10 ³ až 10 ⁴ Pa · s

Polymerní reaktivní pryskyřice

Reaktivní pryskyřice patří do skupiny termoplastů a jsou nejčastěji používané při výrobě kompozitů. Bývají to pryskyřice v kapalné nebo tavitelné formě, které se samostatně, nebo za pomoci tvrdidel (iniciátor, katalyzátor, urychlovač apod.) vyztužují bez odštěpení těkavých složek. [2, 4, 6]

Nejpoužívanější druhy reaktivních pryskyřic:

- epoxidové pryskyřice (EP),
- vinylesterové pryskyřice (VE),
- fenolické pryskyřice (PF),
- nenasyčené polyesterové pryskyřice (UP). [2, 4, 6]

Epoxidová pryskyřice (EP)

Tyto pryskyřice se vyrábějí v několika variantách, lišící se způsobem vytvrzování. Za normální teploty mají kapalné až pevné skupenství. Vytvrzování probíhá bez vzniku těkavých látek, proto nehrozí nebezpečí vzniku bublin a objemové smrštění je poměrně nízké (2 až 5 %). Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi. Epoxidové pryskyřice mají velice dobrou adhezi. Ve formě vyztužených kompozitů se vyrábí jen 8 %. K výrazným oblastem využití patří zejména zalévací hmoty pro elektroniku a výroba forem a nástrojů. Epoxidové pryskyřice se musí mísit s tvrdidlem v přesném poměru. Vlastnosti

těchto pryskyřic jsou díky široké škále tvrdidel výrazně ovlivněny. Oproti nenasyčeným polyesterovým pryskyřicím jsou 3 až 4krát dražší a pro vysokou viskozitu a pomalou vytvrzovací reakci jsou hůře zpracovatelné. V oblasti kompozitů se používá jako matrice pro materiály v elektrotechnice, v oboru letectví a na sportovní potřeby. [2, 4, 6]

Vinylesterové pryskyřice (VE)

Vinylesterové pryskyřice se vyznačují vysokou houževnatostí a odolností v alkalickém prostředí. V porovnání s epoxidovými pryskyřicemi mají kratší molekulové řetězce a tím nižší viskozitu. Díky dvojité vazbě mají nižší tvarovou stálost za tepla. Nejvíce se používají v oblastech s vysokým korozním namáháním (např. stavba lodí, čistírny odpadních vod, tepelné regenerátory atd.). Vysoká houževnatost a pevnost umožňuje využití u nosných konstrukcí a rotorových listů. [2, 4]

Fenolické pryskyřice (PF)

Vyrábějí se kondenzací fenolů a 30 až 50 % vodných roztoků aldehydů. Fenolické pryskyřice jsou tvarově stálé a mají vysokou tepelnou a chemickou odolnost. Výroba těchto kompozitů je nízká. [2, 4]

Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP)

Jsou to bezbarvé, až lehce nažloutlé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Mohou být bez problému vytvrzovány za normálních i zvýšených teplot. Při vytvrzování dochází ke smrštění o 5 až 9 %. Mezi jejich nevýhody patří zejména nízká pevnost a špatná odolnost proti vodě a dalším chemikáliím. Naopak díky nízké viskozitě, dobrému smáčení skelných vláken a přijatelné ceně, patří mezi nejpoužívanější materiál pro kompozity. [2, 4, 11]

Tepelné vlastnosti polymerů

Tepelné vlastnosti polymerů určuje hlavně struktura makromolekul. Ovlivňuje především tepelné vlastnosti, poměr hlavních vazebních sil, které působí podél molekulárních řetězců k vedlejším vazebním silám. [12]

Prostorově vázané polymery mají makromolekuly vzájemně vázány vazbami, u kterých se pevnost v širokém rozmezí teplot nemění. Na rozdíl u polymerů s lineárními řetězci, které mají makromolekuly navzájem vázány vazbami, pevnost při zvyšující se teplotě rychle klesá. [12]

Díky teplotě se u plastů výrazně mění jejich mechanické vlastnosti. Při zvýšených teplotách jsou polymery především termoplasty velice náchylné k tečení. To má za následek výraznou závislost důležitých konstrukčních veličin např. modul pružnosti v tahu a pevnost v tahu na teplotě. [12]

Vyztužující účinek

Vyztužení znamená zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne vložením výztuže do matrice. Je nutné, aby byly dodrženy následující podmínky [4]:

- vyztužující vlákna musí být pevnější než matrice:

$$\sigma_{fP} > \sigma_{mP}$$

- vyztužující materiál musí mít vyšší tuhost než matrice:

$$E_f > E_m$$

- matrice se nesmí porušit dříve než vlákno:

$$\varepsilon_{mP} > \varepsilon_{fP}$$

kde:

E_m , příp. E_f	modul pružnosti matrice, příp. vlákna v tahu,
σ_{mP} , příp. σ_{fP}	pevnost matrice, příp. vlákna,
ε_{mP} , příp. ε_{fP}	mezní prodloužení matrice, příp. vlákna.

3.6 Zkoušky mechanických vlastností u jednosměrných kompozitů

Ve srovnání s nevyztuženými plasty závislost vlastností kompozitů na teplotě, podmínkách prostředí a době zatížení není tak výrazná. Hlavní vliv na mechanické vlastnosti kompozitů má především vytvrzení matrice a rozložení plniva. U plniva ve formě vláken je důležitá orientace vláken, druh a velikost obsahu vláken. [4, 7]

Mechanické vlastnosti kompozitů se určují hlavně pomocí experimentálních metod, které by měly být prokazatelné, jednoduché a opakovatelné. Při změně poměru mezi fázemi kompozitu nebo změně způsobu přípravy kompozitního systému, musí dojít k opakování experimentální zkoušky. Toto opakování způsobuje časovou náročnost procesu. Využitím teoretických a semiempirických metod k určování vlastností, lze proces částečně urychlit, ale nelze ho použít ke konstrukčním účelům. Jelikož tyto metody nejsou příliš spolehlivé. [4, 7]

K použití těchto modelů u jednosměrných kompozitů musí být splněny následující předpoklady:

- mezi vlákny a matricí je dokonalá adheze,
- vlákna jsou rovnoběžná, nekonečná a pravidelně rozmístěná v průřezu,
- poměrná deformace vláken, matrice a kompozitu je stejná,
- vlákna jsou geometricky i fyzikálně homogenní. [4, 7]

Důležitou veličinou u kompozitů je objemový podíl, který charakterizuje obsah plniva a tím i mechanické vlastnosti. Pomocí objemového podílu v matrici můžeme porovnávat mezi sebou mechanické vlastnosti kompozitů s různými druhy plniv a matric. Abychom mohli takto porovnávat mechanické vlastnosti, musí být v matrici stejná koncentrace plniva. [4, 7]

Základními konstantami mechanických vlastností materiálů je pružnost a pevnost. Pro jednosměrné kompozity existují čtyři nezávislé konstanty pružnosti:

- modul pružnosti v podélném směru (ve směru vláken),
- modul pružnosti v příčném směru (ve směru kolmém k vláknům),
- modul pružnosti ve smyku,
- Poissonovo číslo. [4, 7]

A pět nezávislých konstant pevností:

- mez pevnosti v tahu v podélném směru (ve směru vláken),
- mez pevnosti v tahu v příčném směru (ve směru kolmém k vláknům),
- mez pevnosti v tlaku v podélném směru (ve směru vláken),
- mez pevnosti v tlaku v příčném směru (ve směru kolmém k vláknům),
- mez pevnosti ve smyku v rovině vrstvy. [4, 7]

Některé konstrukce z kompozitních materiálů bývají často vystaveny i ohybovému zatížení. Takže ke zmíněným vlastnostem je třeba ještě určit ohybové vlastnosti. [4, 7]

3.6.1 Zkouška tahem v podélném směru

Tuto statickou zkoušku jednosměrným tahem můžeme označit pravděpodobně za nejjednodušší a nejpoužívanější mechanickou zkoušku. Jednosměrné vláknové kompozity mají nejlepší mechanické vlastnosti právě ve směru vláken a právě v tomto směru by měli být nejvíce namáhány. [1, 4, 7]

Tahová zkouška u kompozitních materiálů by měla být prováděna na plochých vzorcích. Nejčastější tvar vzorků je normovaná plochá tyč nebo vzorek, kde jsou strany rovné a na obou koncích jsou zesíleny (tzv. tvar kosti) jak je vidět na obr 7. [1, 4, 7]

Obr. 7 - Zkušební tělesa pro zkoušku v tahu jednosměrného kompozitu [13]



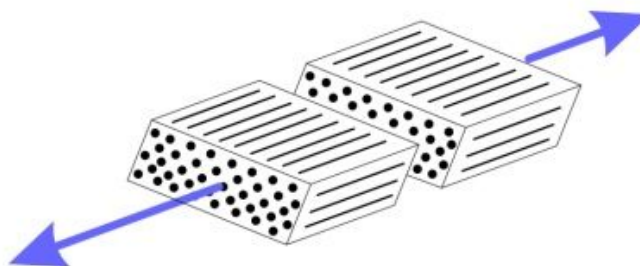
Orientace vláken v kompozitu nemusí být vždy stejná. Výrazně však ovlivňuje rozložení zatížení mezi maticí a vlákny. Zatížení, které se z matrice přenáší na vlákna, se přenáší pomocí konců vláken. Vlákna v kompozitech nemusejí být vždy stejně dlouhá, to

má velký vliv na celkovou mez pevnosti. Kratší vlákna mají vyšší pevnost než dlouhá, protože vlákno se obvykle poruší v nejslabším místě. U krátkovláknových kompozitů je obtížné kontrolovat orientaci vláken a to má vliv na horší mechanické vlastnosti. Důležité je také fázové rozhraní, které určuje šíření mikrotrhlin v kompozitu. [1, 4, 7]

Deformace vrstvy lze rozdělit do tří fází:

- elastická deformace vlákna i matrice,
- elastické prodloužení vlákna, plastické matrice,
- plastická deformace vlákna i matrice (obr. 8) → přetržení vláken, porušení kompozitu. [1, 4, 7]

Obr. 8 - Porušení vláken a matrice při tahovém zatížení [14]



Všechny zde uvedené vztahy jsou předpokládány pro ideální případy kompozitních systémů. Ve skutečnosti však nejsou docíleny a následkem je odchýlení výpočtů od skutečných vlastností. Toto může být důsledkem již zmíněných délek vláken. [7, 10]

U elastické deformace vlákna i matrice a při nulovém napětí se vše bez jakéhokoliv porušení vrací zpět do původní podoby. Pokud předpokládáme, že při elastické deformaci nedochází k prokluzu vláken v matrici a je dodržena ideální adheze mezi vlákny a matricí, můžeme říct, že zde platí Hookův zákon. To znamená, že pracovní diagram zkoušky je lineární (vztahy 1 - 3): [7, 10]

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c \quad (1)$$

$$\sigma_m = E_m \cdot \varepsilon_m \quad (2)$$

$$\sigma_p = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (3)$$

kde:

σ_c , příp. σ_m , σ_p	napětí v tahu celkového kompozitu, příp. matrice, vlákna [Pa],
E_c , příp. E_m , E_p	modul pružnosti v tahu celk. kompozitu, příp. matrice, vlákna [Pa],
ε_c , příp. ε_m , ε_p	relativní deformace celk. kompozitu, příp. matrice [-].

Modul pružnosti kompozitu ve směru vláken E_c a Poissonova čísla (poměr příčné a podélné deformace) μ můžeme použít směšovací pravidlo (vztahy 4 a 5) [4, 7, 10, 14]:

$$E_c = E_p \cdot v_p + E_m \cdot (1 - v_p) \quad (4)$$

$$\mu = \mu_p \cdot v_p + \mu_m \cdot (1 - v_p) \quad (5)$$

kde:

μ Poissonovo číslo [1],

v_p objemový podíl plniva [-].

Má-li matrice kompozitu větší tažnost než je tažnost u vláken a jejich podíl je vyšší než je kritická hodnota 5 %, můžeme napětí v kompozitu u pružných deformací definovat vztahem (6), kde je σ_m napětí v matrici při přetržení vláken [4, 7, 10, 14]:

$$\sigma_c = \sigma_p \cdot v_p + \sigma_m \cdot (1 - v_p) \quad (6)$$

Z dosud uvedených vztahů je možné definovat vztah pro podíl zatížení vláken k zatížení celého kompozitu (7). Následující vztah poměr zatěžujících sil je důležitý pro popis v praxi [4, 7, 10, 14]:

$$\frac{F_p}{F_c} = \frac{E_p \cdot v_p}{E_p \cdot v_p + E_m \cdot v_m} \quad (7)$$

kde:

$\frac{F_p}{F_c}$ procentuální podíl zatížení [%].

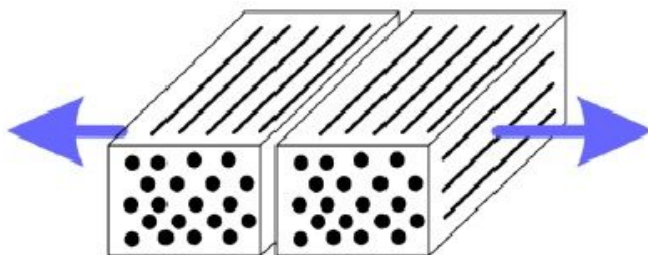
Pro druhou fázi je typické, že se vlákna pořád prodlužují elasticky, na rozdíl od matrice, která se prodlužuje plasticky. V druhé fázi už pracovní diagram není lineární.

Třetí fáze se vytváří pouze u kompozitů, kde jsou použita houževnatá vlákna. Tyto houževnatá vlákna se deformují plasticky. Dovolují prodloužení kompozitu více pro, než by bylo prodloužení samotných vláken bez vzájemného působení s matricí. [4, 7, 10, 14]

3.6.2 Zkouška tahem v příčném směru

Hlavním úkolem vláken u vláknových kompozitů je vyztužit kompozit v podélném směru. Vliv vláken na zvyšování pevnosti kompozitu v příčném směru je několikrát menší než vliv podílu vláken na zvyšování pevnosti v podélném směru. Při namáhání kompozitu v příčném směru dochází k porušení, tehdy když je překročena mez pevnosti matrice (obr. 9). [7, 10, 14]

Obr. 9 - Porušení vláknového kompozitu při příčném namáhání [14]



3.6.3 Zkouška tlakem v podélném směru

Při namáhání tlakem u kompozitu s dlouhými vlákny, dochází většinou k prohnutí a vybočení vláken. Jako první ještě před prohnutím a vybočením vláken vznikají mikrotrhliny. Ty způsobují vzájemné oddělení vláken od matrice. Při dobré adhezi mezi vláknem a matricí nastává lom vlivem smyku, při špatné vlivem delaminace. [4, 7, 10]

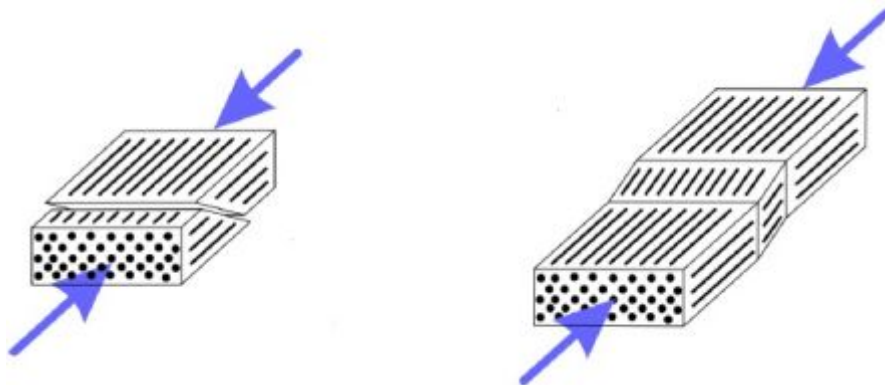
3.6.4 Zkouška tlakem v příčném směru

Jak už bylo zmíněno u zkoušky tahem, mez pevnosti v příčném směru k vláknům má mnohem nižší hodnoty než mez pevnosti působící ve směru podélném a to stejné platí i u tlakové zkoušky. Zde se jedná o smykové porušení matrice a rozdrčení vláken. [7, 10, 14]

3.6.5 Rovinná zkouška smykem

U jednosměrného kompozitu má namáhání smykem velice podobný mechanismus poškození jako při namáhání tlakem v podélném směru (obr. 10). [7, 10, 14]

Obr. 10 - Zleva: porušení vláken vlivem smyku, vybočení vláken [14]



3.7 Krátkovláknové kompozity

Hlavní výhodou jednosměrových kompozitů, je jejich vyšší pevnost a modul ve směru osy vláken. Naopak jejich velká nevýhoda je nízká pevnost a modul v příčném (kolmém na osu vláken) směru. Tam kde můžeme namáhání předvídat, jsou tyto kompozity velice účinné a mohou tak nahradit tradiční konstrukční materiály. Avšak v oblastech, kde namáhání nelze předvídat, nebo kde je namáhání ve všech směrech stejné, jednosměrové kompozity nemohou vyhovět požadavkům. V těchto oblastech je třeba použít kompozity, které mají ve všech směrech přibližnou pevnost. [1, 7, 15]

Pevnost ve všech směrech u krátkovláknových kompozitů zajišťuje výztuž, která je tvořena krátkými (sekanými) vlákny náhodně nebo preferovaně orientovanými. Kompozity s náhodně orientovanými krátkými vlákny můžeme považovat za izotropní. [1, 7, 15]

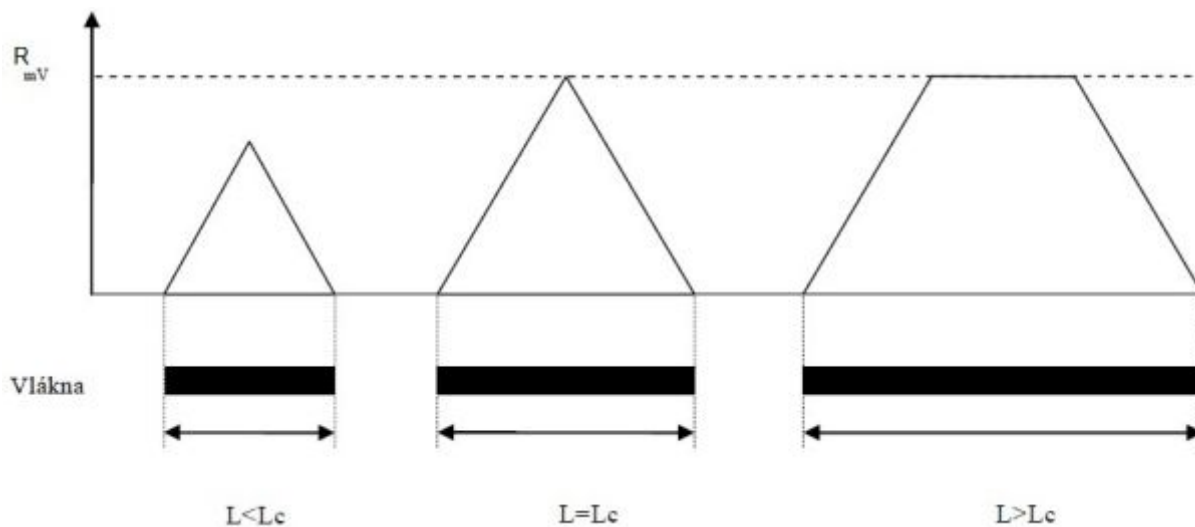
Směs matrice s vyztužujícími vlákny mohou být snadno vstřikovány nebo odlévány do forem. Pokud jsou kompozity připravovány odléváním, vznikají tak kompozitní systémy s izotropními vlastnostmi tj. nahodilá orientace vláken v kompozitu. Při vstřikování může být výsledek takový, že orientace může být totožná se směrem tečení. Tímto způsobem pak kompozit ztrácí své izotropní vlastnosti, protože vlákna mají ve většině případech stejnou orientaci (závislost na směru toku ve formě). [1, 7, 15]

3.7.1 Přenos napětí u krátkovlákných kompozitů

U kompozitů zatížení nepůsobí přímo na vlákna, ale nejprve působí na matricový materiál a na vlákna je přenášeno prostřednictvím jejich konců a také válcovým povrchem vlákna v oblasti jeho konců. Zpevňovací účinky u krátkovláknových kompozitů výrazně ovlivňují konce vláken. [1, 4, 7]

Vliv konců vláken můžeme zanedbat tehdy, pokud je délka vlákna mnohem větší než délka, přes kterou se přenos napětí uskutečňuje. U krátkovláknových kompozitů účinky konců vláken nemohou být zanedbány a vlastnosti kompozitů jsou pak funkcí délky vlákna. V případě krátkovláknových kompozitů je důležitý pojem kritická délka vlákna. Kritická délka vlákna je maximální hodnota přenosové délky a ovlivňuje mezní vlastnosti kompozitu. Průběhy napětí vlákna a smykového napětí na rozhraní pro různé délky jsou znázorněny na obr. 11. [1, 4, 7]

Obr. 11 - Vliv různé délky vlákna na průběh napětí vlákna a smykového napětí [7]



Napětí, které působí na matrici, se přenáší na vlákno v podobě smykového napětí τ . Smykové napětí přenesené na vlákno, se změní na napětí tahové. Ideální využití vlákna v kompozitu je, pokud tahové napětí dosáhne meze pevnosti R_{mV} . Tato podmínka může být splněna pouze u vláken s nadkritickou velikostí. [1, 4, 7]

Z rovnováhy mezi působící tahovou silou uprostřed vlákna o průměru d a silou, která je potřebná na jeho porušení, vychází velikost kritické délky vlákna L_c (rovnice 8).

$$L_c = \frac{R_{mV}}{2\pi} \cdot d \quad (8)$$

kde:

L_c kritická délka vlákna [mm],

R_{mV} mez pevnosti [MPa],

d průměr vlákna [mm].

Čím kratší jsou vlákna krátkovlákných kompozitů, tím více klesá mez pevnosti a modul pružnosti kompozitu. Jestli je vlákno o mnoho delší, než je jeho kritická délka, kompozit bude mít vlastnosti, jako kdyby byl vyztužen spojitými vlákny. Při použití křehké matrice jsou navíc kompozity náchylnější k oddělení vláken od matrice. Toto způsobuje zvýšená koncentrace napětí na jejich koncích, to má za následek podporu vzniku mikrotrhlin při nízkém zatížení. [1, 4, 7]

U teoretického výpočtu mechanických vlastností krátkovlákných kompozitů se musí počítat s určitými korekcemi. Tyto korekce zohledňují to, že na koncích vláken je nižší napětí, než je maximální napětí vlákna. Modul pružnosti E_c krátkovlákných kompozitů s náhodně orientovanými vlákny se vypočte pomocí vztahů (9-11), kdy E_T je příčný modul pružnosti a E_L je podélný modul pružnosti kompozitu. [1, 4, 7]

$$E_c = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T \quad (9)$$

kdy:

$$E_L = E_m \cdot (1 + \xi \cdot k_L \cdot \nu_p \frac{l}{d}) / (1 - k_L \cdot \nu_p) \quad (10)$$

$$E_T = E_m \cdot (1 + \xi \cdot k_T \cdot \nu_p) / (1 - k_T \cdot \nu_p) \quad (11)$$

kde:

l délka vláken [mm],

ξ míra vyztužení kompozitu závisící na geometrii vláken
(vlákna kruhového průřezu $\xi = 2$),

d průměr vláken [mm].

Výpočet koeficientů k_T a k_L se provede ze vztahů (12 a 13)

$$k_L = \left(\frac{E_p}{E_m} - 1\right) / \left(\frac{E_p}{E_m} + \xi \cdot \frac{l}{d}\right) \quad (12)$$

$$k_T = \left(\frac{E_p}{E_m} - 1\right) / \left(\frac{E_p}{E_m} + \xi\right) \quad (13)$$

Tepelné vlastnosti krátkovlákných kompozitů

Skelné vlákno a materiály matrice se s rostoucí teplotou ve všech směrech roztahují, uhlíková a aramidová vlákna se smršťují ve směru vlákna a roztahují ve směru kolmo na směr vlákna. Součinitel teplotní roztažnosti některých vláken a matrice je v tab. 6. [4]

Tab. 6 - Součinitel teplotní roztažnosti složek kompozitu [4]

Materiál		Součinitel teplotní roztažnosti (10^{-6} K^{-1})	
		Kolmo ke směru vláken	Rovnoběžně se směrem vláken
Matrice		70 až 200	
Vlákno	Skelné	4,6	4,6
	Uhlíkové	-0,1 až -1,5	10 až 15
	Aramidové	-1 až -4	40 až 60

Při porovnání vláken a matrice, je vidět, že vlákna mají výrazně nižší součinitel teplotní roztažnosti (tab. 6.). Díky tomu, při zvýšení teploty brání ve směru svého uložení matici ve snaze se roztáhnout. U uhlíkových a aramidových vláken mohou vyvolat dokonce i negativní roztažení tedy smrštění. [4]

Porušování vláknových kompozitů

U vláknových kompozitů ještě před makroskopickými projevy porušení materiálu vznikají mikroskopická vnitřní porušení. Všeobecně lze říci, že když je tuhá látka vystavena zatížení, pohltí energii pomocí přetvořením materiálu a tvořením nových povrchů. [7]

Porušení ve vláknových kompozitech vznikají podobně jako u kovů v oblastech, kde se vyskytují malé vrozené vady (např.: chyby v matici, zlomená vlákna, špatné vzájemné působení na rozhraní fází). [7]

Druhy vnitřních porušení:

- oddělení vláken od matrice,
- vznik mikrotrhlin v matrici,
- delaminace,
- vytahování vláken,
- přetržení vláken. [7]

3.8 Aplikační oblasti

Kompozitní materiály našly uplatnění v mnoha oborech. Mezi největší obory aplikace kompozitních materiálů patří především lékařství, letecký, automobilový strojírenský a stavební průmysl. Rozsáhlá oblast použití kompozitních materiálu je dána především užitnými vlastnostmi, kterých konvenční materiály nemohou dosáhnout. Další výhodou je výroba, kdy je možno vyrobit bezmála jakýkoliv tvar výsledného kompozitu. U kompozitu kde je výztuž ve formě vláken, které jsou nositelem pevnosti, je možné vlákna aplikovat přesně ve směru největšího zatížení. [16]

Nízká hmotnost kompozitních materiálů je zajímavá především pro letecký a automobilový průmysl, kde se neustále řeší snižování spotřeby paliva. Aplikací většího množství kompozitních materiálů do konstrukcí namísto konvenčních materiálů, dochází ke snížení hmotnosti a tím i snížení spotřeby paliva. Výhodou je i pevnost při různých typech namáhání. Při aplikaci kompozitních materiálů je důležité si uvědomit, že namáhání musí být ve směru vláken, kde kompozitní materiály mají nejvyšší pevnost. [16]

Strojní průmysl je oblast, ve které je čas důležitým faktorem. Dochází zde ke zrychlování výrobních časů díky výkonnějším modelovacím programům, kvalitnějším konstrukcím strojů apod. Kompozitní materiály jsou zde aplikovány v podobě nosníků a hnacích hřídelů. Potřebný čas na zhotovení výrobku je podléhá útlumu a řezným rychlostem. Důsledkem aplikace kompozitních materiálů je zvýšení útlumu a tím i zvýšení rychlosti rychloposuvu. [16]

4 Metodika

V následujících kapitolách jsou popsány použité materiály a příměsi, které se používaly, postupy přípravy jednotlivých vzorků a také zkoušky, kterým byly vzorky vystaveny.

Veškerá měření byla prováděna v laboratořích Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Byly použity různé měřicí přístroje, které jsou popsány v následujících kapitolách.

Vzorky byly připravovány podle specifických postupů, které musejí být dodržovány. Formy na odlévání vzorků byly zhotoveny pro různé mechanické zkoušky, které odpovídají normám. Vybrané materiály byly vystaveny tahové zkoušce, zkoušce tvrdosti a byla zjištěna pórovitost.

4.1 Použité materiály

V této kapitole jsou popsány všechny materiály použité jako plnivo a matrice, z kterých byly zhotoveny zkušební tělesa.

4.1.1 Polymerní matrice

Při výrobě zkušebních těles byly pro matrici použity dva druhy matrice. Pro první sadu vzorků byla matrice vytvořena z epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) s tvrdidlem P11 (obr. 12). Druhá sada obsahuje matrici z epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID. Obě pryskyřice vyrábí česká firma DHC - Sincolor, a.s.

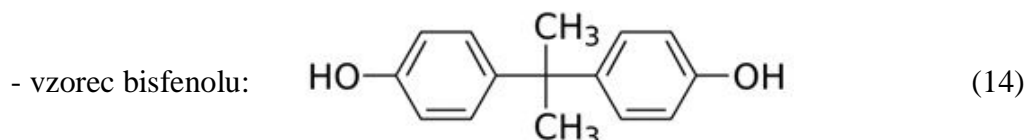
Obr. 12 - Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 324 a tvrdidlo P 11 [17]



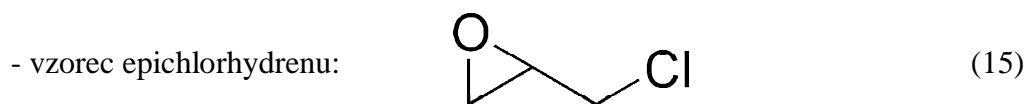
CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200)

Je to středněmolekulární epoxidová pryskyřice připravená reakcí bisfenolu A s epichlorhydrinem modifikovaná bezftalátovým změkčovadlem.

Bisfenol A (viz chemický vzorec 14) - syntetická látka na bázi uhlíku a používá se pro výrobu plastů. Je to bílá, až světle hnědá látka, rozpustná ve vodných alkalických roztocích. Vyrábí se chemickou reakcí fenolu s acetonem v kyselém prostředí [18].



Epichlorhydrin (viz chemický vzorec 15) - chlororganická látka. V normálních podmínkách to je bezbarvá tekutina. Používá se k výrobě syntetického glycerolu, epoxidových pryskyřic, vodou ředitelných pryskyřic [18].



Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) se používá k přípravě lepicích kompozic pro lepení kovů, skla, keramiky, porcelánu, eternitu a jiných materiálů.

Vlastnosti CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) uváděné výrobcem [17]:

<i>Vzhled:</i>	nažloutlá až žlutá čirá silně viskózní kapalina
<i>Hustota (20°C):</i>	1,15 g·cm ⁻³
<i>Viskozita (25°C):</i>	20 - 60 Pa·s
<i>Obsah epoxidových skupin (mol·kg⁻¹):</i>	3,0 - 3,4
<i>Epoxidový hm. ekvivalent (g·mol⁻¹):</i>	290 - 330
<i>Celkový obsah chloru (%):</i>	max. 0,5
<i>Neobsahuje VOC. (těkavé organické látky)</i>	

Tvrdidlo P 11

Ztužení docházelo pomocí tvrdidla P 11 v hmotnostním poměru 100 : 7 (CHS - EPOXY 324 : tvrdidlo P 11). Je to rychlé tvrdidlo s kratší dobou zpracovatelnosti. Vytvrzená kompozice zůstává transparentní. [17]

Vlastnosti tvrdidla P 11 uváděné výrobcem [17]:

<i>Doba želatiny:</i>	30 - 50 min. při teplotě 23 °C (dle připraveného množství)
<i>Nejnižší doporučená teplota zpracování:</i>	15 °C
<i>Vytvrzení:</i>	24 hodin při teplotě 23 ± 5 °C
<i>Plné vytvrzení:</i>	7 dní při teplotě 23 ± 5 °C

Při aplikaci se musí zajistit takové teplotní podmínky, aby nedošlo k vysrážení vlhkosti na povrchu předmětu (rosný bod). Větráním je nutné omezit případný výskyt kyselých plynů a par, které reagují s tužidlem a znemožňují dokonalé vytvrzení materiálu. [17]

GLUEPOX RAPID

Tato epoxidová pryskyřice (obr. 13) se skládá ze dvou složek. Složka A je nízkomolekulární epoxidová pryskyřice s přidavkem aditiv. Složka B je speciální polyamidické tvrdidlo. Po smíchání těchto dvou složek vzniká epoxidové lepidlo. [17]

Toto dvousložkové epoxidové lepidlo se vyznačuje vysokou tekutostí a zvýšenou rychlostí vytvrzování. GLUEPOX RAPID lze použít jako lepidlo nebo zalévací hmotu. [17]

Používá se pro lepení a zalévání velké řady substrátů, např. kovů, dřeva, betonu, přírodního a umělého kamene a vláken atd. Na rozdíl od polyesterových lepidlům vykazuje minimální smrštění. Po vytvrzení se vyznačuje vysokou tažností a houževnatostí. [17]

Vlastnosti GLUEPOX RAPID uváděné výrobcem [17]:

Složka A:

Vzhled: nažloutlá viskózní kapalina

Hustota: 1,14 - 1,16 g·cm⁻³

Složka B:

Vzhled: světle žlutá kapalina s typickým zápachem po aminech

Hustota (25 °C): 1,06 g·cm⁻³

Neobsahuje VOC.

Ztužení v případě GLUEPOX RAPID dochází v hmotnostním poměru 100 : 45 (složka A : složka B). Při přípravě směsi se musí dbát na dokonalé promíchání obou složek

v předepsaném hmotnostním poměru. Pokud se GLUEPOX RAPID použije jako zalévací hmota, musí se brát v úvahu silná exotermní reakce (vývin tepla). [17]

Obr. 13 - Epoxidová pryskyřice GLUEPOX RAPID [17]



Veškeré údaje o epoxidové pryskyřici CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) a GLUEPOX RAPID pocházejí z technických listů [17].

4.1.2 Vyztužující vlákna

Pro diplomovou práci byly použity dva druhy vyztužujícího vlákna. Hlavním vyztužujícím vláknem je přírodní vlákno sisal, aby bylo měl k těmto vláknům porovnání, jako druhé bylo použito syntetické umělé skelné vlákno.

Sisalové vlákno

Sisalové vlákno je jedním z nejčastěji používaných přírodních vláken v materiálovém inženýrství. Charakteristická vlastnost sisalových vláken je, že dokážou absorbovat 60 až 70 % vody, proto je nutné jej před jakýmkoliv použitím vysušit. Pěstuje se na rozsáhlých plantážích (obr. 14) v tropickém a subtropickém pásmu. [19, 25]

Obr. 14 - Plantáž s rostlinou Agáve sisalana [25]



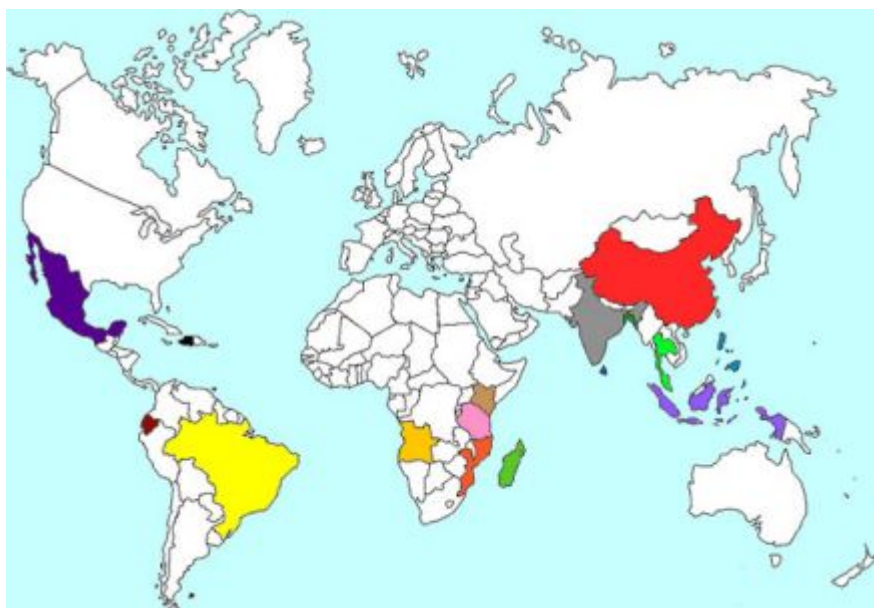
Sisalové vlákno se získává z listů rostliny Agáve sisalana, která není náročná na pěstování. Tato rostlina produkuje 200 až 250 listů a každý list obsahuje 1000 až 1200 svazků vláken. Po celém světě se vyrábí téměř 4,5 milionů tun těchto vláken. Agáve sisalana má ve svých listech dlouhá tuhá vlákna (obr. 15). [19, 20, 25]

Obr. 15 - Získávání vláken z listů Agáve sisalana [21]



Nejčastěji se používají při výrobě lan, tkanin, ale také koberců. Mezi hlavní země v produkci sisalových vláken patří rozvojové země v Jižní Americe, Mexiku, tropických zemí Afriky, ale pěstuje se například v Brazílii a Číně (obr. 16). [19, 20]

Obr. 16 - Země produkující sisalové vlákno [22]



Získané vlákno je vidět na obr. 17. Jelikož se sisalová vlákna pěstují především v rozvojových zemích, kde není vybavenost pro zpracování kompozitů na takové úrovni, vyráběl jsem kompozit bez využití náročných technologií. Důraz byl kladen na co nejnižší cenu.

Obr. 17 - Sisalové vlákno před přípravou krátkých vláken



Sisalová vlákna, která byla použita pochází z Číny a byly dodány v délce 80 - 100 mm. Sisalové vlákno před použitím muselo být důkladně vysušeno. Vysušení probíhalo za teploty 105 °C po dobu 20 hodin. Teoretická hustota sisalových vláken je 1,45 g·cm⁻³ [20]. Pro přípravu zkušebních těles bylo sisalové vlákno nastříháno na rozměry 3, 6 a 9 mm (obr. 18).

Obr. 18 - Nastříhané sisalové vlákno před aplikací do matrice



Skelné vlákno

Vybrané skelné vlákno pochází od firmy ECTA Handelsgesellschaft mbH. Tato firma se zabývá prodejem vstupních surovin, plniv, aditiv a masterbatchí v oblasti plastikářského průmyslu v Evropě. [23]

Skelná vlákna jsou vyráběna z roztaveniny určitého skla (v mém případě E-skla) s vrstvou povrchové úpravy. Roztavená sklovina o teplotě až 1560 °C protéká přes platinoiridiové perforované destičky. Vzniklá monovlákna rychle chladnou a je na ně ihned nanášena povrchová lubrikace. Pro diplomovou práci byla použita nasekaná skelná vlákna (obr. 19) o rozměrech uváděných výrobcem [23]:

Průměr vlákna (μm): 10 - 13

Délka vlákna (mm): 3 - 12

Obr. 19 - Nasekaná skelná vlákna



Tato vlákna se vyznačují dobrou sypkostí a integritou. Mají výbornou slučitelnost s matricí kompozitního plastu. [23]

Skelná vlákna pro polymerní kompozity mají jako hlavní strukturní prvek amorfnní oxid křemičitý (SiO_2), který tvoří třídimenziální tetraedickou síť. Teoretická hustota skelného vlákna je $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Použitá vlákna byla vysušena už od výrobce. [23]

4.2 Příprava zkušebních těles

Úkolem výzkumu bylo zjistit, jak přírodní vlákno ovlivňuje mechanické vlastnosti polymerního kompozitního systému bez využití řízených mezivrstev. Zkušební tělesa byla vytvořena z přírodního a syntetického vlákna, která byla smáčena ve dvou epoxidových pryskyřicích. Zkušební tělesa byla připravována pro zkoušku stanovení tahových vlastností a pro zjištění pórovitosti.

4.2.1 Příprava vláken a kompozitní směsi

Příprava vláken probíhala tak, že Sisalové vlákno bylo nastříháno na rozměry 3, 6 a 9 mm. Skelné vlákno se neupravovalo, použilo se tak, jak bylo nasekané od výrobce. U obou případů vláken se jejich povrch nijak neupravoval.

U přípravy kompozitního systému se musely dodržovat určité postupy, aby byly minimalizovány nežádoucí vlivy. Práce s epoxidovou pryskyřicí je časově omezená. Díky tvrdidlu dochází podle technických doporučení výrobce přibližně okolo 1 hodiny k tuhnutí.

Zkušební tělesa s epoxidovou pryskyřicí CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200)

Při přípravě zkušebních těles s epoxidovou pryskyřicí CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) je v technických listech od výrobce uveden hmotnostní poměr 100 g epoxidové pryskyřice a 7 g tvrdidla P 11. Pro přípravu zkušebních vzorků byl pomocí přepočtu upraven hmotnostní poměr na 70 g epoxidové pryskyřice a 4,9 g tvrdidla. Toto množství bylo zvoleno kvůli počtu připravovaných zkušebních těles. Množství přírodního a syntetického vlákna ve zkušebních vzorcích je v tab. 7. Toto množství bylo stanoveno od 1% koncentrace vláken po nasycenou 7,5% koncentraci. Vyšší koncentrace vláken nebyla možná vyrobit, vzhledem k výskytu velkého množství bublin a tedy i pórovitosti. Pro porovnání byla zhotovena zkušební tělesa s 0% koncentrací vláken.

Tab. 7 - Množství vláken ve zkušebních vzorcích

Objemová %	Přírodní vlákno (Sisal)	Syntetické vlákno (skelné)
	Množství v gramech	
1	0,9	1,53
2,5	2,1	3,90
5	4,6	8,0
7,5	7,15	12,33

Objemová procenta vláken byla vypočítána z následujícího vztahu (16). [7]

$$v_p = \frac{V_p}{V_c} \quad (16)$$

kde:

V_p objem plniva [cm^3],

V_c celkový objem kompozitu [cm^3].

Pomocí váhy bylo docíleno přesného navážení jednotlivých složek. Na váhu byl umístěn kelímek. Do tohoto kelímku bylo nejprve odměřeno množství vláken. V dalším kelímku bylo odlito 70 g epoxidové pryskyřice a 4,9 g tvrdidla. Obě složky se důkladně promíchaly. Dále se k epoxidové pryskyřici s tvrdidlem postupně přisypávalo odměřené množství vláken. Vše bylo důkladně promícháno, aby byla všechna vlákna smáčena. Po důkladném promíchání směsi, byla směs připravena k nalití do forem přesně stanovených rozměrů.

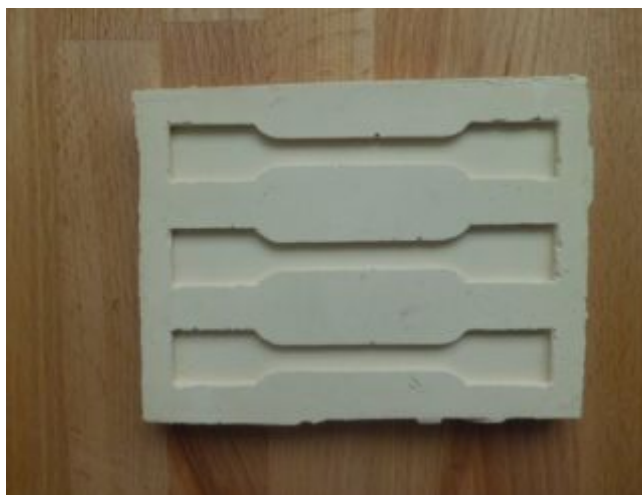
Zkušební tělesa s epoxidovou pryskyřicí GLUEPOX RAPID

Při přípravě zkušebních těles s epoxidovou pryskyřicí GLUEPOX RAPID se postupuje obdobně jako u zkušebních těles s epoxidovou pryskyřicí CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) s tím rozdílem, že epoxidová pryskyřice GLUEPOX RAPID je rozdělena na složku A (epoxidová pryskyřice) a na složku B (tvrdidlo). U této epoxidové pryskyřice je od výrobce uveden hmotnostní poměr 100 : 45. Pro množství zkušebních vzorků byl tento hmotnostní poměr upraven na 48,27 g složky A a 21,72 g složky B. Množství vláken (tab. 8) a další postup je totožný jako u předchozího případu s epoxidovou pryskyřicí CHS - EPOXY 324 (EPOXY 1200).

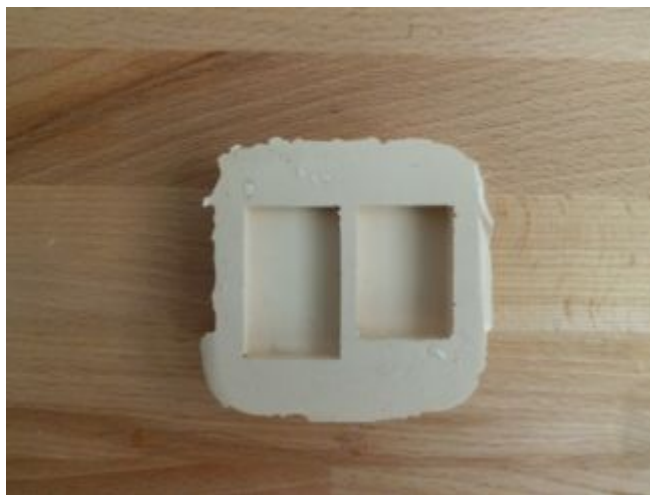
4.2.2 Výroba forem pro zkušební tělesa

Před vytvořením zkušebních těles pro mechanické zkoušky, je nutné si nejprve příslušné formy vytvořit. Pro zkoušku tahem a zjištění pórovitosti jsem použil formy na obr. 20 a 21. Formy, které byly použity pro vytvrzování pryskyřice, byly vyrobeny z materiálu Lukopren N 1522.

Obr. 20 - Forma pro víceúčelová zkušební tělesa



Obr. 21 - Forma použitá k určení pórovitosti



Jedna se o univerzální dvousložkový kaučuk, který slouží pro výrobu forem na odlitky s nízkou adhezí po vytvrzení (např. syntetické pryskyřice, sádra, vosk nebo beton). Tepelná odolnost Lukoprenu N 1522 je -50 až 180 °C a lineární smrštění max. 1 %. K vulkanizaci dochází pomocí katalyzátoru. Pro vytvoření formy je potřeba na 100 g Lukoprenu 2 až 2,5 g katalyzátoru. V technologických listech od výrobce je uvedena doba zpracovatelnosti 25 až 35 minut od zamíchání katalyzátoru.

4.2.3 Výroba zkušebních těles pro tahovou zkoušku a pórovitost

Do vytvořené formy byla ručním způsobem odlévána důkladně promíchaná kompozitní směs. Při odlévání se postupovalo opatrně, aby se minimalizoval výskyt nežádoucích bublin ve směsi. Tyto bubliny způsobují zvýšenou pravděpodobnost rychlejšího lomu. Pomocí dřevěné stěrky se odstranily vzniklé bubliny a docílilo se rovnoměrného rozetření kompozitní směsi ve formě. Přebytečná kompozitní směs musela být odstraněna, kvůli dosažení co nejpřesnějších rozměrů. U zkušebních těles zvláště s větší koncentrací vláken nebylo možné rozpoznat výskyt bublin a proto bylo připraveno více těchto zkušebních těles.

Po odlití zkušebních těles následoval proces vytvrzení. Výrobce u obou epoxidových pryskyřic (EPOXY 1200, GLUEPOX RAPID) uvádí, že k vytvrzení dochází už po 24 hodinách při teplotě $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ a plné vytvrzení po 7 dnech při teplotě $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Až po plném vytvrzení se zkušební těleso může dále zpracovávat.

Vytvrzená zkušební tělesa byla vyjmuta z forem. Jako poslední proces výroby bylo odstranění otřepů, nerovností a obroušení zkušebních těles na rozměry, které udává norma. Broušením se upravovala hlavně tloušťka, protože ne zcela vždy se povedlo odstranit přebytečnou směs a zarovnat tak odlité množství směsi s formou. Zkušební tělesa byla broušena na brusce, která měla brusný papír o zrnitosti P 60. Broušení probíhalo velice pečlivě, aby se získaly potřebné rozměry. Každá nepřesnost by měla negativní vliv na průběh zkoušky. Příklad zhotovených a připravených zkušebních těles k tahové zkoušce je na obr. 22.

Obr. 22 - Zhotovená víceúčelová zkušební tělesa



4.3 Provedení mechanických zkoušek

Všechny mechanické zkoušky byly prováděny podle určitých norem. Každá norma má své postupy, zkušební tělesa, stroje kterými se zkouška provádí a další. Tyto normy musí být dodrženy, jinak by výsledky byly nepřesné a zavádějící. Mechanické zkoušky pomáhají určit vlastnosti materiálů a případnou aplikaci v různých oborech.

4.3.1 Stanovení tahových vlastností (ČSN EN ISO 527 - 1)

Tahová zkouška patří mezi nejpoužívanější mechanické zkoušky. Udává základní představy o vlastnostech daného materiálu. Norma ČSN EN ISO 527 - 1 je nástrojem pro stanovení tahových vlastností zkušebních těles pro plasty. [26]

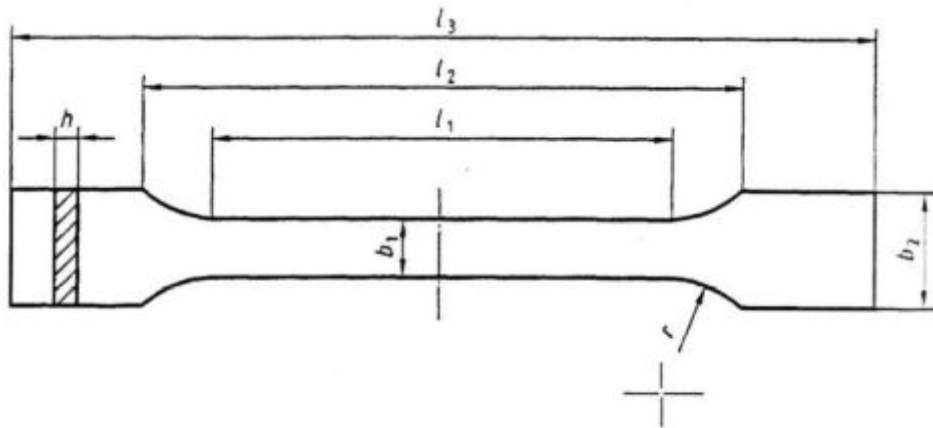
Podstatou tahové zkoušky je protahování zkušebního tělesa ve směru hlavní podélné osy při konstantní rychlosti. Konec zkoušky nastává tehdy, když je zkušební těleso porušeno nebo v okamžiku, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhne předem navolené hodnoty. [26]

Zkouška byla provedena na víceúčelových zkušebních tělesech. Rozměry tohoto tělesa jsou popsány v následující kapitole. Norma udává, že pro každou vyhodnocovanou vlastnost (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti atd.) musí být zkoušeno minimálně pět zkušebních těles. V mém případě bylo vytvořeno minimálně šest zkušebních těles od každé koncentrace. Při přetržení zkušebního tělesa v rozšířené části, se zkouška považuje za neplatnou a musí být vyřazena. [26]

Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku

Všechna zkušební tělesa podléhají určité technické normě, která stanovuje přesný počet zkušebních těles pro danou zkoušku a specifikuje rozměry a tvary. V mém případě pro tahovou zkoušku jsou to tzv. víceúčelové zkušební tělesa dány normou ČSN EN ISO 3167. Rozměry víceúčelových zkušebních těles dané normou ČSN EN ISO 3167 jsou zobrazeny na obr. 23. [27]

Obr. 23 - Rozměry víceúčelového zkušebního tělesa [27]



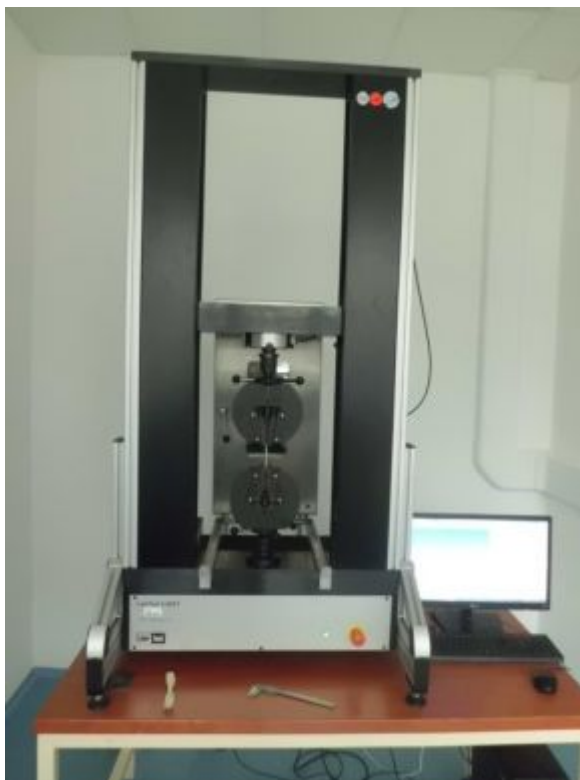
l_3	Celková délka	135
l_1	Délka zúžené rovnoběžné části	55 ± 2
r	Poloměr	12,5
l_2	Rozpětí mezi širokými rovnoběžnými částmi	75
b_2	Šířka konců	$20 \pm 0,2$
b_1	Šířka zúžené rovnoběžné části	$10 \pm 0,2$
h	Tloušťka	$4 \pm 0,2$

Pozn.: uvedené rozměry jsou v mm

Testovací zařízení pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku byl použit univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST (obr. 24) od české firmy LABORTECH. U tohoto stolního provedení je použita řídicí a měřicí elektronika. Stroj je určen pro mechanické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, pro statická a dynamická namáhání. Principem stroje je vyvozování mechanického zatížení.

Obr. 24 - Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST



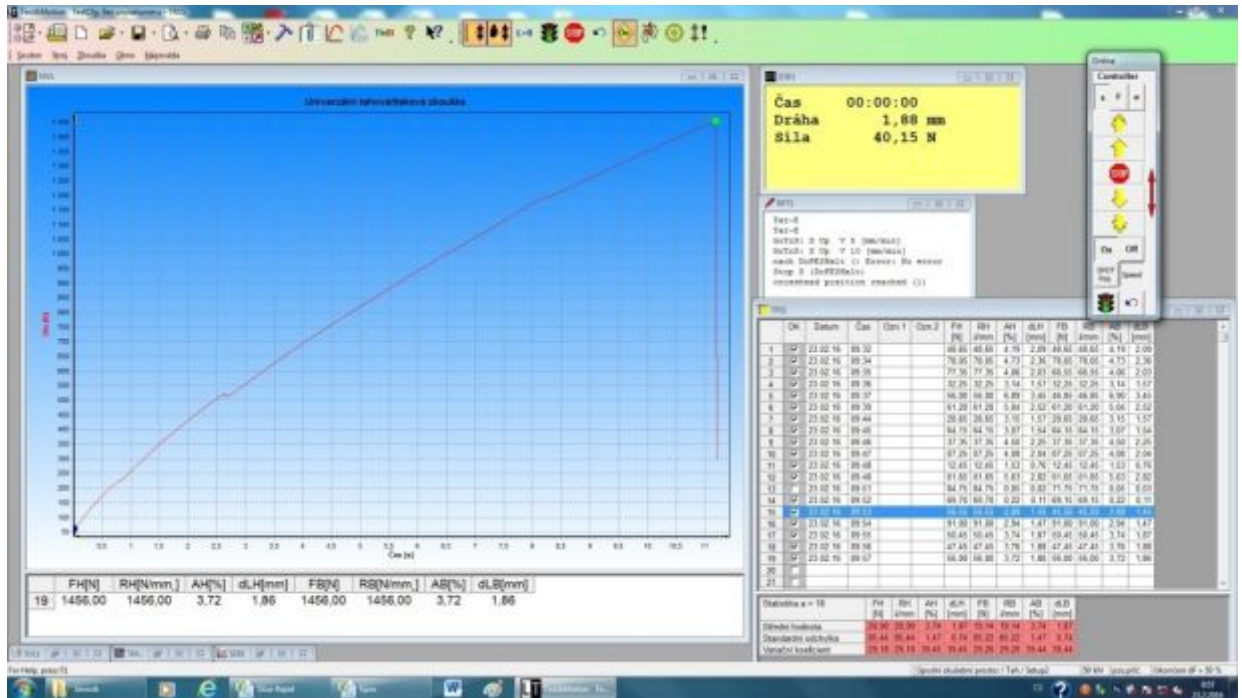
Základní technické údaje stroje LabTest 5.50ST udávané výrobcem:

<i>Maximální zkušební síla</i>	50 kN
<i>Výška pracovního prostoru</i>	1181 mm
<i>Šířka pracovního prostoru</i>	400 mm
<i>Minimální zkušební testovací rychlost</i>	0,001 mm/min
<i>Maximální zkušební testovací rychlost</i>	600 mm/min

Popis tahové zkoušky na univerzálním pracovním stroji

Stroj byl nejprve nastaven na požadovaný test a na rozměry zkušebních těles. Zkouška byla prováděna přes PC, pomocí programu Test&Motion ve kterém se zaznamenávaly i výsledky. Na obr. 25 je zaznamenán průběh zkoušky v programu Test&Motion.

Obr. 25 - Program Test&Motion



U každého zkušební tělesa byla ve střední části, změřena šířka b_1 a tloušťka h digitální posuvkou s přesností na 0,01 mm. Měření šířky a tloušťky se provádělo posuvkou.

Výsledná pevnost se vypočítá podle vzorce (17), kde F je maximální síla naměřená strojem (FH) a S plocha průřezu přetrženého zkušební tělesa.

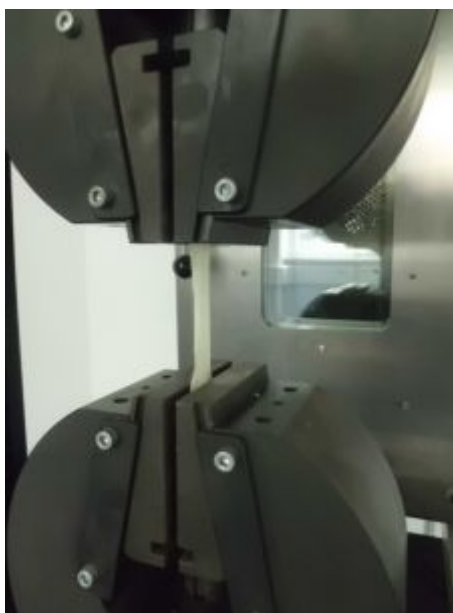
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (17)$$

kde:

- σ pevnost [MPa],
- F maximální síla [N],
- S plocha průřezu [mm²].

Zkušební těleso se upevnilo do čelistí stroje (obr. 26) takovým způsobem, že podélná osa zkušebního tělesa byla shodná s osou stroje a aby nedošlo k posunutí během testu. Po přetržení zkušebního vzorku byly programem Test&Motion zaznamenány tyto vlastnosti: FH - maximální síla [N], RH - pevnost v tahu [N/mm], AH - celkové prodloužení [%]. Výsledky byly poté převedeny do programu Microsoft Excel, kde došlo ke statickému vyhodnocení.

Obr. 26 - Upevněný zkušební vzorek v čelistech stroje



4.3.2 Stanovení tvrdosti Shore D (ČSN EN ISO 868)

Nejčastěji používanými typy na měření tvrdosti Shore jsou A a D. V mém případě byl použit ruční přístroj typu D (obr. 27). Norma ČSN EN ISO 868 specifikuje metodu, která stanoví tvrdost plastů vtláčováním hrotu tvrdoměru. Dále udává, že měření tvrdosti Shore D se používá pokud, tvrdost daného materiálu přesáhne 85 jednotek stupnice Shore A. Z toho vyplývá, že typ A se používá pro měkčí materiály a typ D pro tvrdší. V tomto případě se stanovení tvrdosti vyjadřuje v jednotkách Shore D. [12, 28]

U metody typu D spočívá zkouška v měření odporu, který klade zkoušený materiál proti vtláčování hrotu. Tento hrot má předepsaný tvar. Zkušební těleso musí být bez viditelných defektů, hladké a rovné. Tloušťka zkušebního tělesa musí být alespoň 6 mm. Při tvrdosti materiálu nad 50 Shore D může být 3 mm. Pro stanovení tvrdosti byla použita tělesa o rozměrech 25x20x4 mm (viz str. 38, obr. 24). [12, 28]

Popis zkoušky tvrdosti s ručním přístrojem Shore D

Tento způsob měření tvrdosti materiálu je velice jednoduchý. Pro měření této zkoušky tvrdosti byl použit ruční přístroj SHITO HT - 6510 (obr. 27). Při měření se postupuje tak, že se na zkušební těleso přiloží ruční přístroj Shore D a hrot na konci stroje vnikne do materiálu pod tlakem pružiny. Ruční stroj musí být v pravé úhlu proti zkušebnímu tělesu. Výsledná hodnota tvrdosti se ihned zobrazí na digitálním displeji v jednotkách Shore D od 0 až 100.

Obr. 27 - Ruční přístroj Shore D



4.3.3 Stanovení pórovitosti

V ideálním případě by měla být teoretická hustota (ρ_t) totožná s hustotou reálnou (ρ_r). Pórovitost (P) znamená, že teoretická hustota kompozitů je vyšší než reálná hustota kompozitů. Pórovitost se vyjadřuje v procentech. Pro zjištění pórovitosti nejsou zkušební tělesa nijak zvláště určena, proto byla pórovitost prováděna na hranolech o rozměrech 25x20x4 mm, která byla použita i pro zkoušku tvrdosti Shore D. [7]

Pórovitost je způsobena vadami při výrobě kompozitů. Způsobuje jí například výskyt vzduchových bublin v matrici. Dalším faktorem kdy se teoretická hustota neshoduje s reálnou hustotou je nerovnoměrné rozdělení vláken v matrici. Pórovitost se stanoví podle následujícího vztahu (18), reálná hustota byla zjištěna z objemu a hmotnosti zkušebních těles [7]:

$$P = \frac{\rho_t - \rho_r}{\rho_t} \cdot 100 \quad (18)$$

kde:

P pórovitost [%],

ρ_t teoretická hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

ρ_r reálná hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$].

Kompozit, který má menší než 1% pórovitost se dá považovat za velmi dobrý, do 5 % dostatečný a větší než 5 % pórovitosti se považuje za extrémní s velkým podílem pórů. Větší pórovitost významně omezuje využití kompozitů. Mechanické vlastnosti kompozitů jsou výrazně ovlivňovány pórovitostí. Mezi největší problémy kompozitů patří vzniklé bubliny. Bubliny zhoršují odolnost kompozitu vůči únavě, například při měření pevnosti v tahu zvyšují rozptyl v měření mechanických vlastností. [7]

Směšovací pravidlo

Směšovací pravidlo se používá pro základní výpočty jednotlivých parametrů kompozitu. Teoretická hustota kompozitu se vypočte tak, že se zjistí tabulkové hustoty použitých materiálů. Tento vzorec (19) nepočítá s pórovitostí. Díky tomu se teoretická hustota kompozitu neshoduje s hustotou reálnou. [7]

$$\rho_c = \rho_m \cdot v_m + \rho_p \cdot v_p = \rho_p \cdot v_p + \rho_m \cdot (1 - v_p) \quad (19)$$

kde:

ρ_c hustota kompozitu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

ρ_m hustota matrice [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

ρ_p hustota plniva [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$],

v_m objemový podíl matrice [-],

v_p objemový podíl plniva [-].

4.3.4 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Skenovací elektronová mikroskopie je určena k pozorování povrchů vzorků. Slouží k posouzení adheze mezi polymerní matricí a vyztužujícími vlákny. Snímání pomocí SEM bylo provedeno po tahové zkoušce. Pomocí elektronové mikroskopie byly vyhodnoceny lomové plochy přetržených zkušebních těles.

4.4 Vztahy použité při výpočtech naměřených dat

Statistické výpočty byly prováděny v programu Microsoft Excel. Z výpočtů byly poté sestaveny grafy, na které byl použit program Statistika.

Aritmetický průměr

Aritmetický průměr patří mezi nejčastěji používané charakteristiky středu statistického souboru. Je vymezen pro průměr výběrového souboru. Definuje se jako součet všech hodnot náhodné proměnné (x_i) dělený počtem hodnot (n). Vzorec vypadá následovně (20) [24]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (20)$$

kde:

- \bar{x} aritmetický průměr,
- x_i soubor vypočtených hodnot,
- n počet naměřených výsledků.

Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka patří mezi charakteristiky variability. Určí jak mnoho se od sebe liší případy v souboru vyhodnocených čísel. Směrodatná odchylka má stejné měrné jednotky jako sledovaná číselná proměnná v souboru. Může nabývat pouze kladných hodnot. Výpočet se provádí podle následujícího vzorce (1.20), \bar{x} a x_i vyplývá z (21) [24]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

kde:

- s směrodatná odchylka.

Variační koeficient

Variační koeficient patří stejně jako směrodatná odchylka mezi charakteristiky variability. Používá se pro vzájemné srovnání dvou nebo více souborů s podstatně odlišnou úrovní hodnot. Výsledek se většinou vyjadřuje v procentech. Variační koeficient se počítá podle následujícího vzorce (22), \bar{x} vyplývá z (1.19) [24]:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (22)$$

kde:

v variační koeficient [%].

5 Výsledky a diskuze experimentálního výzkumu

Tato kapitola obsahuje výsledky a jejich statistické vyhodnocení ve formě grafů a tabulek z následujících měření a mechanických zkoušek:

- rozměry použitého sisalového vlákna - šířka, délka,
- hustoty koncentrací kompozitu a stanovení pórovitosti,
- stanovení tvrdosti Shore D podle normy ČSN EN ISO 868,
- stanovení tahových vlastností podle normy ČSN EN ISO 527 - 1,
- analýza lomových ploch pomocí skenovací elektronové mikroskopie.

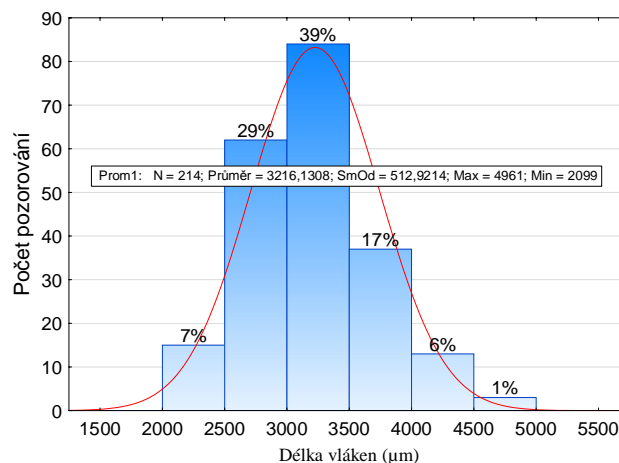
Naměřené hodnoty v podobě průměrů a základních statistických ukazatelů jsou uvedeny v přílohách.

5.1 Rozměry sisalového vlákna

Při přípravě kompozitu byla vlákna nastříhána na rozměry 3 mm, 6 mm a 9 mm. Různé rozměry vláken se použily proto, aby se zjistil vliv délky vlákna na mechanické vlastnosti zhotoveného kompozitního systému.

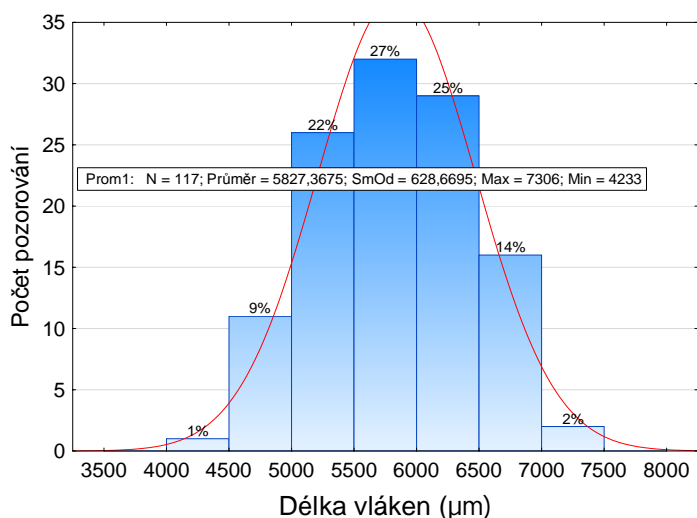
Pro zjištění reálných rozměrů použitých vláken, byla vlákna měřena pod stereoskopickým mikroskopem. V histogramu (obr. 28) jsou zobrazeny reálné rozměry vláken délky 3 mm. Z histogramu vyplývá, že celkový průměr použitých vláken byl $3216 \pm 512,9 \mu\text{m}$. Maximální délka vlákna byla $4961 \mu\text{m}$ a minimální $2099 \mu\text{m}$. Největší zastoupení vláken (39 %) bylo v rozmezí 3000 až 3500 μm .

Obr. 28 - Histogram reálné délky vláken 3 mm



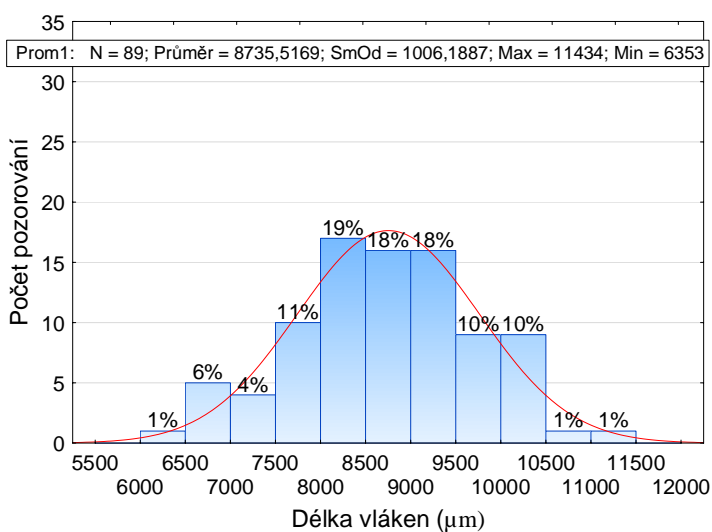
Další histogram (obr. 29) se zabývá délkou vláken 6 mm. Reálný průměr vláken byl $5827,37 \pm 628,67 \mu\text{m}$, přičemž vlákna dosahovaly nevyšší délky $7306 \mu\text{m}$ a nejnižší $4233 \mu\text{m}$. V největší zastoupení byla vlákna v rozmezí 5500 až $6000 \mu\text{m}$.

Obr. 29 - Histogram reálné délky vláken 6 mm



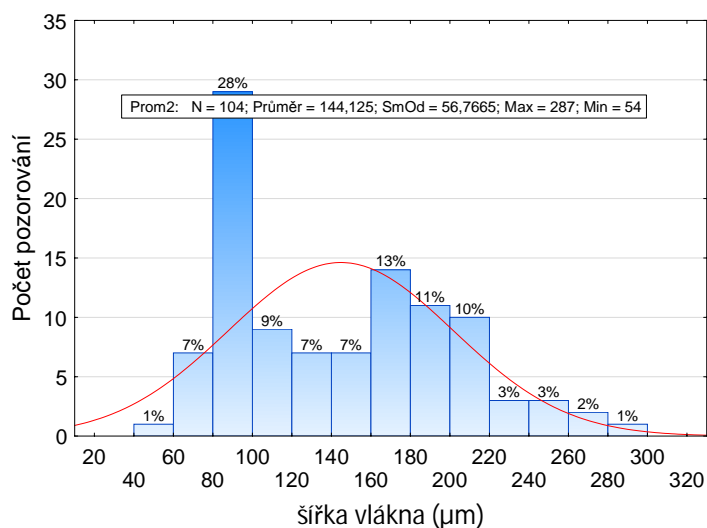
Jako nejdelší vlákna použitá v kompozitu byla vlákna 9 mm. Histogram (obr. 30) poukazuje na to, že největší zastoupení měla vlákna v rozmezí 8000 až $9500 \mu\text{m}$. Při použití těchto vláken u vyšších koncentrací, docházelo k nasycení epoxidové pryskyřice. Z tohoto důvodu byly kompozity zhotoveny s maximální koncentrací vláken $7,5 \%$.

Obr. 30 - Histogram reálné délky vláken 9 mm



V následujícím histogramu (obr. 31) je zaznamenána šířka vláken. Průměrná šířka vláken se pohybovala okolo $144,13 \pm 56,77 \mu\text{m}$, avšak vlákna s největším zastoupením (28 %) se pohybovala v rozmezí 80 až 100 μm . Maximální šířka vlákna byla 287 μm a minimální šířka 54 μm .

Obr. 31 - Histogram reálné šířky sisalových vláken

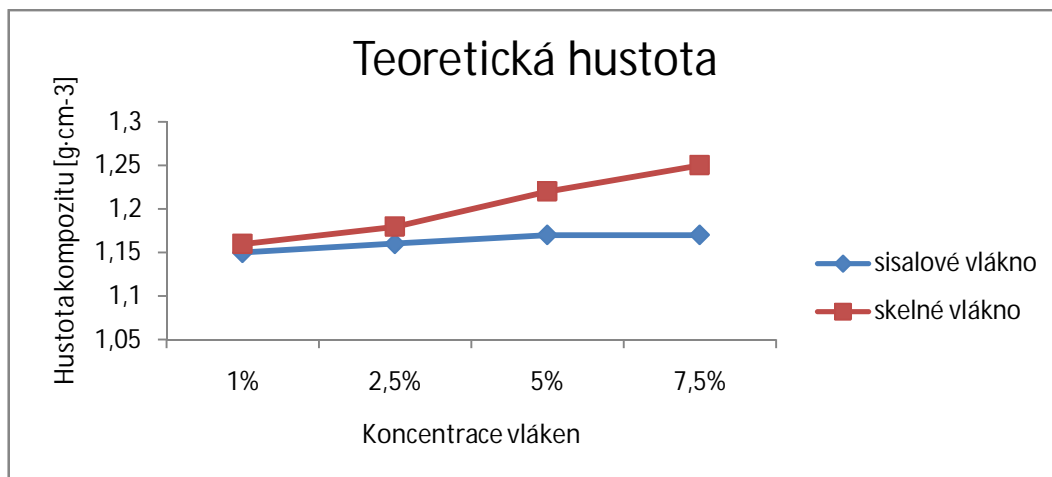


5.2 Hustota kompozitu a pórovitost

Hustota matrice, kterou má použita epoxidová pryskyřice EPOXY 1200 a GLUEPOX RAPID je $1,15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, tato hustota je uváděna výrobcem. Obě tyto pryskyřice mají stejnou hustotu. Na výztuž byla použita přírodní vlákna sisalu, která mají hustotu $1,45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [20]. Jako příklad k přírodním vláknům byla použita syntetická skelná vlákna o hustotě $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [23].

Podle hustoty matrice a hustoty výztuže byly vypočítány teoretické hustoty kompozitního systému, viz následující graf (obr. 32).

Obr. 32 - Graf teoretických hustot kompozitního systému



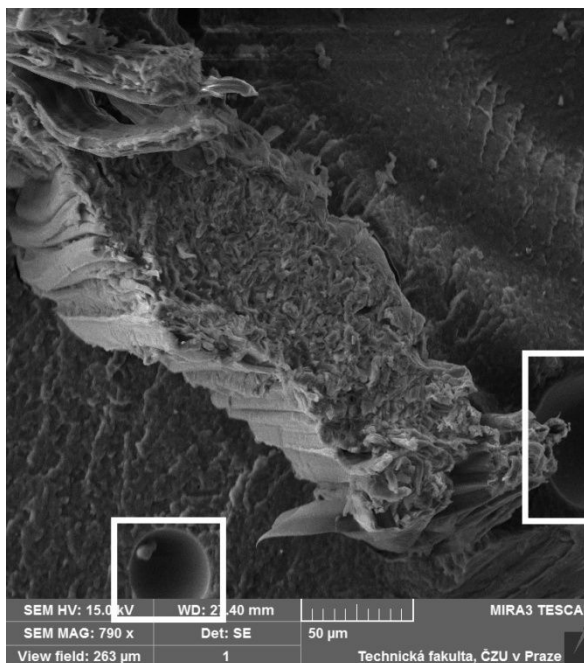
Z grafu (obr. 32) je patrné, že sisalové vlákno výrazným způsobem neovlivnilo celkovou hustotu kompozitního systému. Naopak skelné vlákno teoretickou hustotu zvýšilo. Na základě teoretických hustot a reálných hustot, které byly zjištěny z objemu a hmotnosti zkušebních těles, byla spočítána pórovitost P . V tab. 8 je spočítána pórovitost pro epoxidovou pryskyřici EPOXY 1200. Hodnoty pro epoxidovou pryskyřici GLUEPOX RAPID se sisalovými vlákny a skelnými vlákny jsou uvedeny v tabulkách v příloze 1.

Tab. 8 - Vypočítané hodnoty pórovitosti pro EPOXY 1200 a sisalová vlákna

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna sisalu 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pórovitost		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	11,4	0,2	1,75
2,5	11,05	1,05	9,50
5	12	1,8	15,00
7,5	9	0,7	7,78
pro délku vlákna sisalu 6 mm			
1	8,05	0,85	10,56
2,5	9,6	1,9	19,79
5	11,8	1,5	12,71
7,5	10,7	0,8	7,48
délku vlákna sisalu 9 mm			
1	11,15	1,75	15,70
2,5	12,35	0,55	4,45
5	12,4	0,1	0,81
7,5	13,65	0,35	2,56

Hodnoty pórovitosti bezesporu ovlivňovali pevnost v tahu, protože jsou poměrně vysoké. V tab. 9 můžeme vidět, že nejvyšší hodnota pórovitosti dosahuje hodnoty $13,65 \pm 0,35$ %. Vysoká pórovitost je důsledkem přítomnosti nežádoucích bublin. Tyto bubliny mohou vést ke vzniku trhlin, které poté mohou vést ke snížení hodnot pevnosti v tahu. Přítomnost bublin byla prokázána na snímcích z elektronového mikroskopu (obr. 33).

Obr. 33 - Snímek z elektronového mikroskopu, kde je sisalové vlákno smáčeno matricí



Pozn.: v bílých rámečcích jsou ohraničené bubliny

5.3 Zkouška tvrdosti Shore D

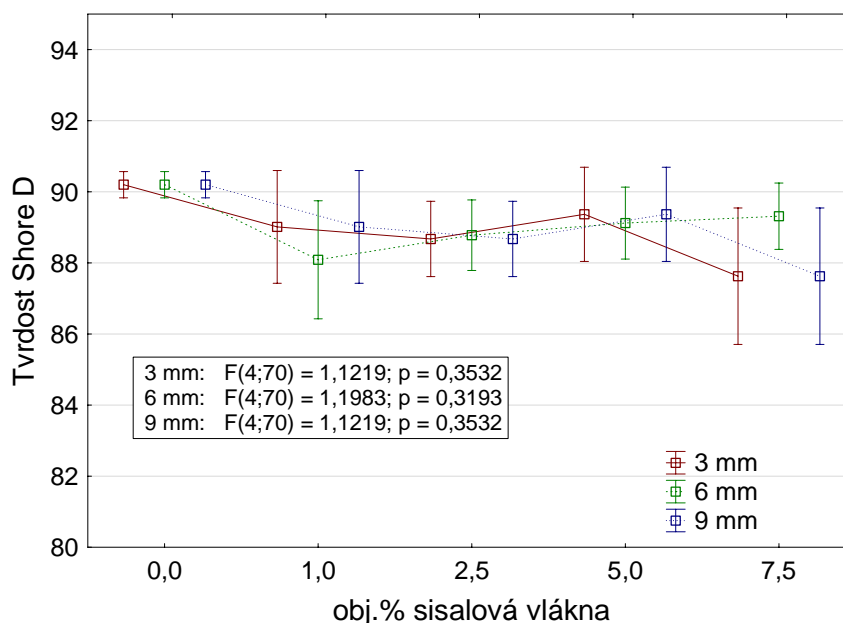
Tvrдость patří mezi velmi důležité vlastnosti materiálu. Pro tvrdost platí, že je to odpor proti deformaci povrchu materiálu vzniklého působením cizího tělesa. Cílem zkoušky bylo zjištění jak vyztužující vlákna, o různých koncentracích ovlivňují celkovou tvrdost kompozitního systému. Koncentrace vláken byly stejné jako u tahové zkoušky.

Vyhodnocení výsledků měření

Měření tvrdosti probíhalo u epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 a GLUEPOX RAPID se sisalovými vlákny. Pro porovnání byly zkoušeny ještě kompozity s epoxidovou pryskyřicí GLUEPOX RAPID a jako výztuž byla použita syntetická skelná vlákna.

Při měření tvrdosti epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 se sisalovými vlákny, byla nejvyšší hodnota naměřena u nenaplněné epoxidové pryskyřice $90,20 \pm 0,91$ ShoreD, což je patrné z grafu (obr. 34). Kompozity s různými koncentracemi vláken mají hodnoty nižší. Lze tvrdit, že sisalová vlákna snižují tvrdost epoxidové pryskyřice EPOXY 1200. Ostatní vypočítané hodnoty koncentrací jsou v příloze 2.

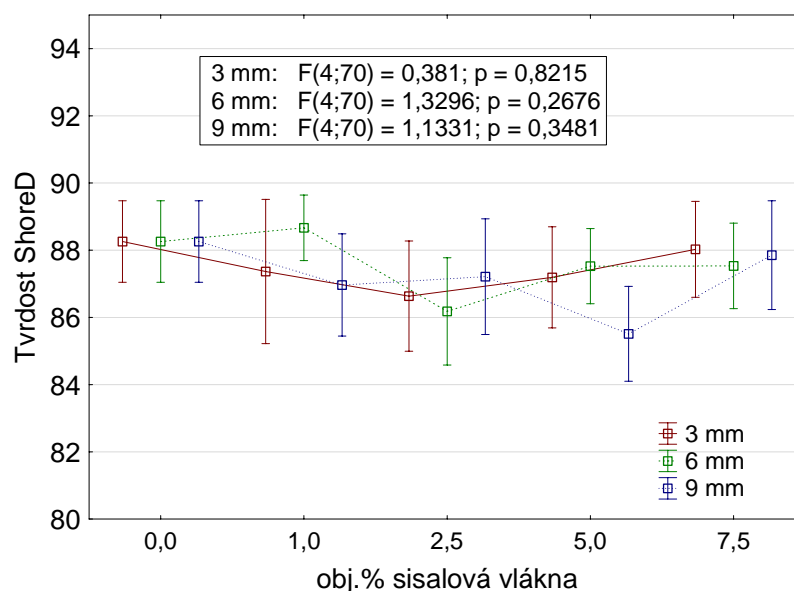
Obr. 34 - Graf porovnání naměřené tvrdosti epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující sisalová vlákna



Z analýzy ANOVA vyplývá, že přítomnost vláken ve sledovaném intervalu statisticky významně neovlivní tvrdost.

Hodnota naměřené tvrdosti neplněné pryskyřice GLUEPOX RAPID odpovídá hodnotě $88,26 \pm 2,98$ Shore D, tedy menší než u EPOXY 1200 ($90,20 \pm 0,91$ Shore D). Z grafu (obr. 35) je patrné, že je zde pouze jedna hodnota vyšší než u neplněné pryskyřice a to u délky vláken 6 mm při koncentraci 1 %, hodnota dosahuje $88,67 \pm 2,40$ Shore D. Ostatní koncentrace mají tvrdost nižší nebo blížíci se tvrdosti nenaplněné pryskyřice. Nejnižší hodnota byla naměřena u vlákna 9 mm při koncentraci 5 %, tato hodnota dosahovala $85,51 \pm 3,47$ Shore D.

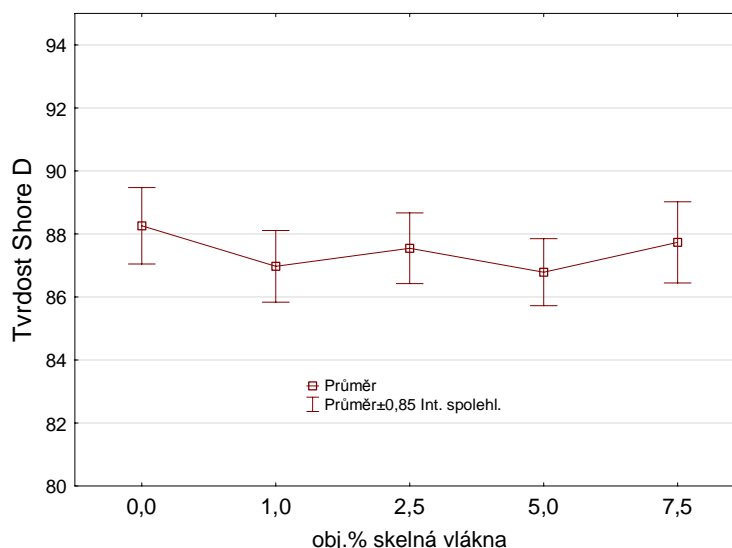
Obr. 35 - Graf porovnání naměřené tvrdosti epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující sisalová vlákna



Z analýzy ANOVA vyplývá, že se s přidáním sisalových vláken statisticky výrazně nezměnily hodnoty tvrdosti.

Porovnání k sisalovým vláknům, byly zhotoveny kompozity GLUEPOX RAPID se syntetickými skelnými vlákny. Z grafu (obr. 36) je vidět, že hodnoty tvrdosti různých koncentrací se pohybují v malém rozsahu od $86,79 \pm 2,76$ Shore D až do $87,73 \pm 3,17$ Shore D. Technologický postup, který byl zvolen byl zaměřen na minimalizaci ceny a bez použití vakua při výrobě zkušební tělesa vznikly nežádoucí bubliny. Tyto bubliny způsobily snížení tvrdosti oproti neplněné epoxidové pryskyřici. V tabulkách, které jsou v příloze 3 jsou vypsány ostatní vypočítané hodnoty.

Obr. 36 - Graf porovnání naměřené tvrdosti epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující skelná vlákna



5.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem se používá pro zjištění chování daného kompozitu při zatížení tahem. Cílem zkoušky bylo zjištění zda přidání vláken do pryskyřice, ovlivní pevnosti v tahu. Výsledky toto tvrzení vyvracují. U testovaných těles se přidáním vláken ve většině případů pevnost v tahu snížila. Při tahové zkoušce byla použita víceúčelová zkušební tělesa o rozměrech podle normy ČSN EN ISO 3167. Samotná zkouška se prováděla podle normy ČSN EN ISO 527 - 1.

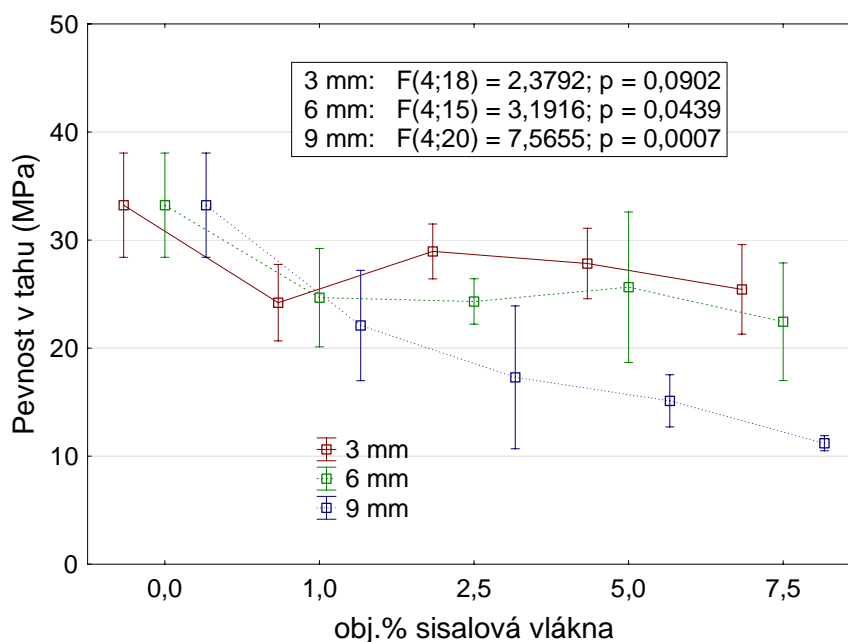
Při zkoušce je zkušební těleso vystaveno zatížení, které se měří. Zkušební těleso bylo protahováno ve směru hlavní osy až došlo k jeho přetržení. Posuv univerzálního pracovního stroje byl nastaven na 10 mm/min.

Vyhodnocení výsledků měření

Měření bylo provedeno na 6 zkušebních tělesech od všech koncentrací a druhů vláken. Pro porovnání bylo zhotoveno i zkušební těleso bez přidání vláken, tedy neplněná epoxidová pryskyřice (EPOXY 1200, GLUEPOX RAPID).

Z grafu (obr. 37) je patrné, že průměrné hodnoty pevnosti v tahu neplněné epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 dosahují $33,23 \pm 6,34$ MPa. Dále je patrné, že jakékoliv přidání vláken sisalu do kompozitu mělo za následek pokles pevnosti. Pevnost poklesla až na hodnotu $11,20 \pm 0,63$ MPa, kdy nejvýrazněji snižovala hodnotu pevnosti v tahu epoxidová pryskyřice, která obsahovala 9 mm vlákna. Celkově se jedná o pokles pevnosti v tahu o 66 %.

Obr. 37 - Graf porovnání pevností v tahu epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující vlákna sisalu

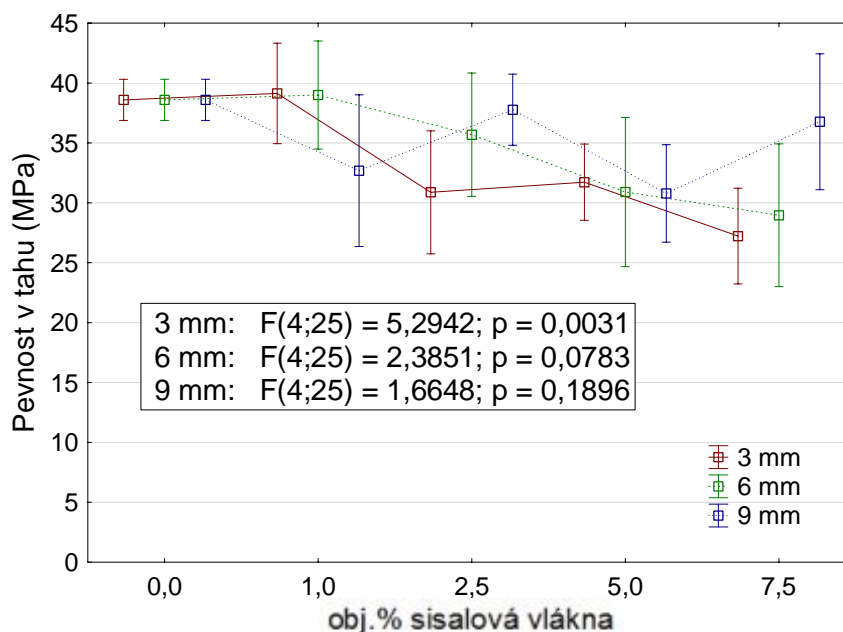


V grafu byl stanoven interval spolehlivosti na 85 % a také byla provedena analýza rozptylu (ANOVA), která prokazuje vliv délky vlákna na výslednou pevnost v tahu. Veškeré vypočtené hodnoty pro pevnost v tahu jsou uvedeny v příloze 4.

Při použití epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID je z grafu (obr. 38) patrné, že hodnota pevnosti v tahu neplněné epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID je $38,60 \pm 2,26$ MPa. To znamená, že má o něco vyšší hodnotu pevnosti v tahu než epoxidová pryskyřice EPOXY 1200. Graf (obr. 38) ukazuje, že přidaná vlákna snižují pevnost v tahu

jako u předchozí epoxidové pryskyřice, ale rozdíl není tak výrazný. Za zmínku stojí hodnota při délce vlákna 9 mm a koncentraci vláken 7,5 %, která dosahuje $36,77 \pm 7,47$ MPa. Tato hodnota se blíží hodnotě neplněné epoxidové pryskyřice, avšak z grafu je patrné, že je zde velká směrodatná odchylka. Mezi další zajímavé hodnoty patří i délka vláken 3 a 6 mm při koncentraci 1 %, kdy tyto hodnoty dokonce o něco málo převyšují pevnost v tahu čisté epoxidové pryskyřice.

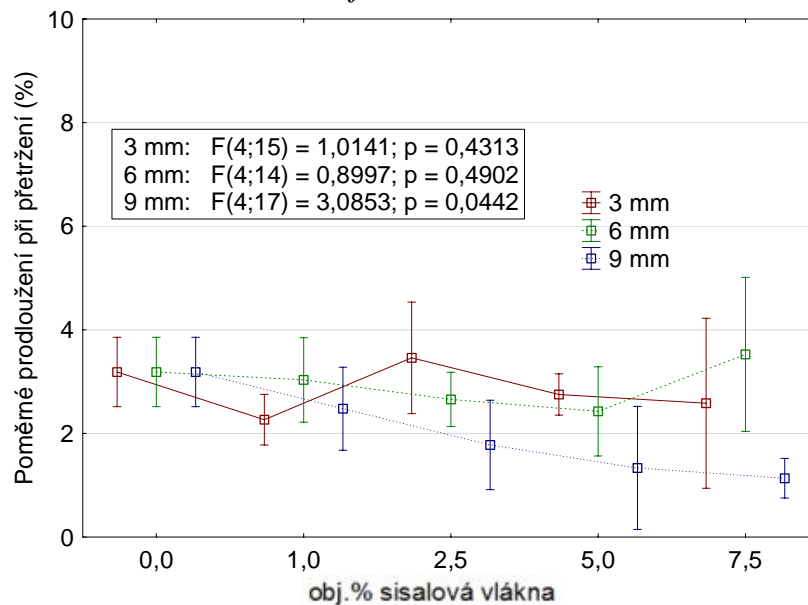
Obr. 38 - Graf porovnání pevností v tahu epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující vlákna sisalu



Další sledovaná hodnota u zkušebních těles bylo poměrné prodloužení při přetržení. Z grafu (obr. 39) pro EPOXY 1200 je patrné, že při přidání sisalových vláken ve většině případů vlákna snižovala poměrné prodloužení při přetržení. Nejvýrazněji bylo poměrné prodloužení při přetržení sníženo u délky vláken 9 mm. Naopak hodnota vyšší než u čisté epoxidové pryskyřice byla naměřena u 6 mm vláken při koncentraci 7,5 %, kde tato hodnota dosahovala $3,53 \pm 0,92$ %. Jako další hodnota vyšší než čistá epoxidová pryskyřice byla naměřena u délky vlákna 3 mm a koncentrace 2,5 %, tato hodnota je $3,46 \pm 0,97$ %.

Je nutné si v grafu všimnout, že je zde pro obě hodnoty velká směrodatná odchylka, tudíž navýšené hodnoty jsou statisticky bezvýznamné. Vypočítané hodnoty pro poměrné prodloužení jsou uvedeny v příloze 5.

Obr. 39 - Graf porovnání poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující vlákna sisalu

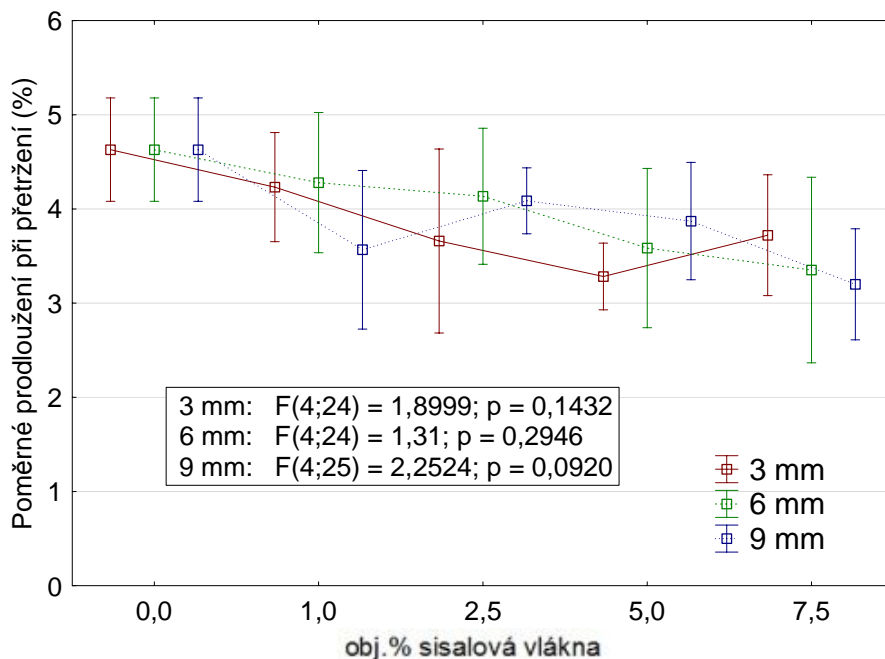


Z výsledné analýzy ANOVA je patrné, že u délek 3 a 6 mm nedošlo ke statisticky výrazné změně. Naopak u vláken 9 mm je vidět výrazný pokles poměrného prodloužení.

U použité epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID je z grafu (obr. 40) vidět, že po přidání vláken sisalu došlo tak jako u epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 ke snížení poměrného prodloužení při přetržení. Hodnota neplněné epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID dosahuje hodnoty $4,63 \pm 0,72$ %.

Největší pokles poměrného prodloužení při přetržení byl zaznamenán u vláken 9 mm při koncentraci 7,5 %. Při této koncentraci a délce vláken byl kompozit značně nasycený a je tedy logické, že tento kompozity ve většině případech dosahuje nejnižších hodnot.

Obr. 40 - Graf porovnání poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující vlákna sisalu

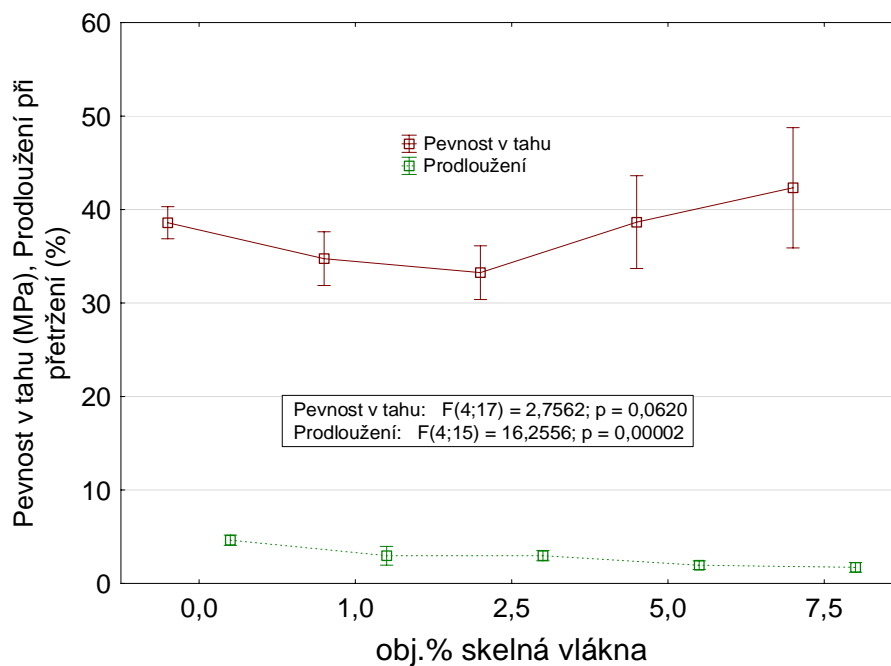


Jako příklad ke kompozitním systémům se sisalovými vlákny byla použita syntetická skelná vlákna. Jako porovnání byla vybrána rychle vytvrzovací epoxidová pryskyřice GLUEPOX RAPID. Byly zhotoveny stejné objemové koncentrace jako u sisalových vláken.

Hodnota 0% koncentrace vláken u epoxidové pryskyřice zůstává stejná $38,60 \pm 2,26$ MPa. Rozdílem je, jak je vidět v grafu (obr. 41), že skelná vlákna oproti sisalovým pevnost v tahu zvyšují. U koncentrací 1% a 2,5% je patrný pokles pevnosti, který je způsoben zvoleným technologickým postupem výroby zkušebních těles, který byl zaměřen na minimalizaci ceny. Pokles, který je u koncentrací 1% a 2,5% byl způsobený přítomností bublin. Nejvyšší hodnota dosahuje $42,33 \pm 3,98$ MPa u 7,5% koncentrace.

Z grafu (obr. 41) je patrné, že u kompozitů se skelnými vlákny se mírně snižuje poměrné prodloužení při přetržení. Poměrné prodloužení při koncentraci 0 % dosahuje hodnoty $4,63 \pm 0,72$ MPa. Nejnižší hodnota byla naměřena při 7,5% koncentrace a to $1,60 \pm 0,47$ MPa. Ostatní vypočítané hodnoty jsou v příloze 6.

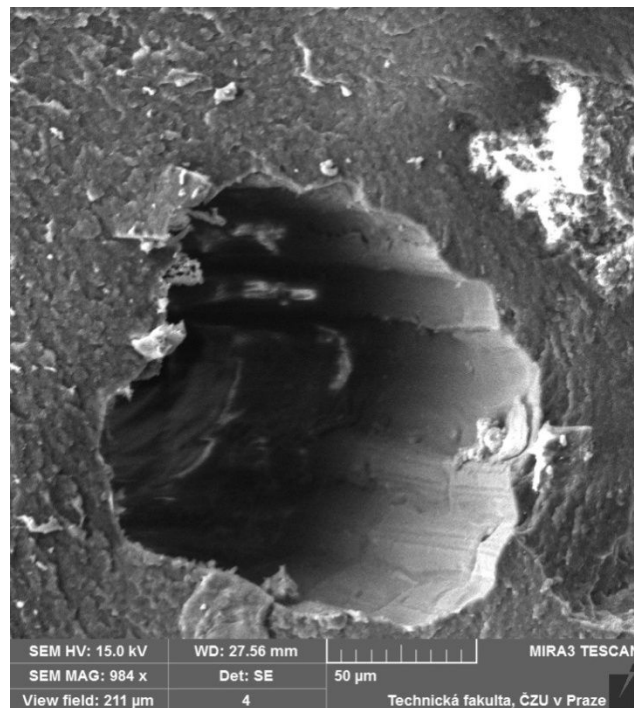
Obr. 41 - Graf porovnání pevností v tahu a poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující skelná vlákna



5.5 Analýza lomových ploch

Zkušební tělesa použita při analýze byla před snímáním elektronovým mikroskopem podrobena tahové zkoušce na univerzálním zkušebním stroji LabTest. Při tahové zkoušce docházelo k vytržení sisalových vláken z polymerní matrice. Toto vytržení je zachyceno na obr. 42, kde je patrný otvor po vytrženém vláknu.

Obr. 42 - Výsledek vytržení vlákna z polymerní matrice



Důvodem vytržení vlákna z matrice je ten, že matrice vlákno dokonale nesmáčela. Zlepšení smáčivosti vláken se dosahuje tím, že se vlákna povlakuji (poprašují), což zvyšuje i cenu kompozitu. Pro technicky náročnější aplikace kompozitu je povlakování vláken nezbytné.

6 Závěr

Kompozity mají v dnešní době širokou oblast využití. Od každodenně používaných věcí až po složité součásti ve strojírenském nebo leteckém průmyslu. Toto široké využití kompozitů je dáno jejich vlastnostmi a především jejich cenou, což u obvyklých materiálů nelze dosáhnout.

Kompozity se od klasických materiálů liší tím, že jsou složeny z matrice a výztuže. Každá z těchto fází má vlastní úkol. Matrice udává tvar kompozitu a přenáší namáhání na výztuž. Na výztuž se přenáší veškeré vnější vlivy. Výztuž může být ve formě částic nebo vláken. Díky matrici a výztuži dochází ke zlepšení výsledných vlastností materiálu.

Diplomová práce byla zaměřena na polymerní kompozity vyztužené přírodním vláknem.

První kapitola diplomové se zaměřuje na cíle práce a literární rešerši. Je zde popsána podstata kompozitů a nejpoužívanější materiály pro jejich výrobu. Pozornost je především určena vláknovým kompozitům. Druhá kapitola je věnována metodice. V metodice jsou charakterizovány veškeré materiály, které se používaly při experimentálním výzkumu, výroba kompozitů a postupy mechanických zkoušek podle náležitých norem. Třetí a poslední kapitola se věnuje výsledkům, které byly vyhodnoceny na základě naměřených a poté vypočítaných hodnot z praktického experimentu.

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv délky vláken o různých koncentracích v epoxidové pryskyřici na mechanické vlastnosti zhotoveného kompozitu. Při výrobě byl kladen důraz na co nejnižší cenu kompozitu. Použitý materiál jako plnivo bylo přírodní sisalové vlákno, které se získává z listů rostliny *Agave sisalana*. Jako příklad pro porovnání k přírodním vláknům, bylo použito syntetické skelné vlákno, které patří k nejpoužívanějším vláknům v oblasti výroby kompozitů. Použitá sisalová vlákna byla nastříhána na délku 3, 6 a 9 mm. Tyto rozměry byly zvoleny proto, aby se zjistil vliv délky vláken na mechanické vlastnosti kompozitu. Kompozit byl zhotoven v několika koncentracích plniva. Nejnižší koncentrace byla 1% poté 2,5%, 5% a 7,5%. Zejména u vláken délky 9 mm při koncentraci 7,5 % docházelo k nasycení epoxidové pryskyřice. Z toho důvodu nebylo možné zhotovit vyšší koncentrace. Jako matrice byly použity dvě epoxidové pryskyřice CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) a GLUEPOX RAPID. U jednotlivých kompozitů s různými koncentracemi byla zjištěna pórovitost a provedeny mechanické zkoušky s cílem zjistit mechanické vlastnosti.

Získané hodnoty pórovitosti dokazují, že byla výrazným způsobem ovlivněna pevnost v tahu, protože hodnoty pórovitosti jsou poměrně vysoké. To dokazuje přítomnost nežádoucích bublin, které vedou ke vzniku trhlin.

Zkouška tvrdosti Shore D prokazuje, že použitá sisalová vlákna jako plnivo, snižují tvrdost, jak u epoxidové pryskyřice EPOXY 1200, tak u GLUEPOX RAPID. V obou případech bylo zjištěno snížení tvrdosti přibližně o 3,5 %. U skelných vláken jako plniva, bylo zjištěno, že nemají výrazný vliv na změnu tvrdosti epoxidové pryskyřice.

Poslední prováděná zkouška byla zkouška tahem. Zjišťovala se pevnost a poměrné prodloužení. Výsledky měření dokazují, že jakékoliv přidání vláken sisalu do kompozitu snížilo pevnost v tahu i poměrné prodloužení. U epoxidové pryskyřice EPOXY 1200, délce vláken 9 mm a koncentrace 7,5 % došlo k nejvýznamnějšímu poklesu pevnosti v tahu o 66 %. Tento kompozit měl i nejvyšší pokles poměrného prodloužení a to o 64 %. Naopak skelná vlákna pevnost v tahu zvýšila.

Jednotlivé mechanické zkoušky prokazují že sisalová vlákna zhoršují mechanické vlastnosti kompozitu. Ve většině případů nejnižších hodnot dosahoval kompozit s vlákny o délce 9 mm při koncentraci 7,5 %, kdy docházelo k nasycení matrice. Na rozdíl od sisalových vláken skelná vlákna zlepšovala mechanické vlastnosti kompozitu.

7 Seznam literatury

- [1] AGARWAL, B. D., BROUTMAN, L. J.: *Vláknové kompozity*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987. 294 s.
- [2] KOŘÍNEK, Z.: *Kompozity* [online]. Vystaveno 2005 [cit. 2015-12-11].
Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [3] POLÁČEK, P.: *Vláknové kompozitní materiály - znovuobjevovaný typ materiálu?* [online]. Vystaveno 2011 [cit. 2015-12-15].
Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/polacek>
- [4] EHRENSTEIN, W. G.: *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6
- [5] MACHÁLEK, V., SODOMKA, J.: *Polymery a kompozity s polymerní maticí*. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03927-4
- [6] CHOTĚBORSKÝ, R.: *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, 2006. ISBN 80-213-1442-7
- [7] VALÁŠEK, P.: *Kompozity, prášková metalurgie a keramika*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, 2014. 86 s. ISBN 978-80-213-2488-6
- [8] DUCHÁČEK, V.: *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [9] OSTEN, M.: *Práce s lepidly a tmely*. Vydání třetí, upravené. Praha : Nakladatelství technické literatury, 1986. 288 s.
- [10] BERTHELOT, Jean-Marie.: *Composite Materials*. Francie, 1998. 645 s. ISBN 0-387-98426-7
- [11] HAVEL COMPOSITES, [online]. [cit. 201-1-15].
Dostupné z: http://www.havel-composites.com/ktlgfiles/cz_katalog.pdf
- [12] JARUŠEK, J.: *Metody zkoumání polymerů*. VŠCHT Pardubice, 1984.

- [13] L. K. ENGINEERING. [online]. [cit. 2016-1-15].
Dostupné z: <http://www.lke.cz/trhacka.htm>
- [14] KRYSTEK, J.: *Pevnostní kritéria pro kompozitní materiály*. [online].
[cit. 2015-1-20]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd,
2012. 32 s.
Dostupné z: http://seminare.fav.zcu.cz/media/document/krystek_pevnostni-kriteria-pro-kompozitni-materialy.pdf
- [15] HULL, D., CLYNE, T. W.: *An introduction to composite material*. 2. vydání.
Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-38855-4.
- [16] ŠVAH, Jiří.: Bilsing automation [Interní materiály-výzkum] v Benátkách. 25. března
2013, s. 15.
- [17] DCH - SINCOLOR, a.s.: *Technicko-aplikační listy*. [online]. [cit. 2015-2-10].
Dostupné z: <http://www.sincolor.cz/>
- [18] ARNIKA. [online]. [cit. 2015-2-10]. Dostupné z: <http://arnika.org>
- [19] GHAVAMI, K., FILHO, R., BARBOSA, P.: *Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers*. Cement Concrete Compos 1999. 21:39–48.
- [20] YAN LI, YIU-WING MAI, LIN YE.: *Sisal fibre and its composites: a review of recent developments*. The University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australie
- [21] THE CLOUDFOREST ADVENTURE.: *Sisal: extracting the fiber*. [online].
Vystaveno 2009. [cit. 2015-2-15].
Dostupné z: <https://ecotouristadventure.wordpress.com/2009/11/29/sisal-extracting-the-fiber/>
- [22] FAO.: *World fibre map*. [online]. [cit. 2015-2-15].
Dostupné z: <http://www.fao.org/economic/futurefibres/profiles/en/>
- [23] ECTA HANDELSGESELLSCHAFT MBH. [online]. [cit. 2015-2-20].
Dostupné z: <http://www.ecta-gmbh.com/czech/schnittglas.html>

- [24] LITSCHMANNOVÁ, M.: *Úvod do statistiky*. [online]. [cit. 2015-3-5]. Ostrava: Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 2012. 525 s. Dostupné z: http://www.cs.vsb.cz/ochodkova/courses/MADI/interaktivni_uvod_do_statistiky.pdf
- [25] KOLEKTIV AUTORŮ.: *Sisal: The natural potential fiber of Pakistan*. [online]. [cit. 2015-3-10]. Dostupné z: <http://agrihunt.com/recent-researches/sisal-the-natural-potential-fiber-of-pakistan/>

Normy:

- [26] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty: stanovení tahových vlastností*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 15 s.
- [27] ČSN EN ISO 3167. *Plasty – Víceúčelová zkušební tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2004. 11 s.
- [28] ČSN EN ISO 3167. *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtláčováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 12 s.

Seznam obrázků

- Obr. 1 - Rozdělení matric kompozitů
- Obr. 2 - Klasifikace kompozitních materiálů
- Obr. 3 - Ukázka diskontinuitních vláken sisalu
- Obr. 4 - Struktura skelného vlákna
- Obr. 5 - Aramidové vlákno pod mikroskopem
- Obr. 6 - Řez uhlíkovým vláknem
- Obr. 7 - Zkušební tělesa pro zkoušku v tahu jednosměrného kompozitu
- Obr. 8 - Porušení vláken a matrice při tahovém zatížení
- Obr. 9 - Porušení vláknového kompozitu při příčném namáhání
- Obr. 10 - Zleva: porušení vláken vlivem smyku, vybočení vláken
- Obr. 11 - Vliv různé délky vlákna na průběh napětí vlákna a smykového napětí
- Obr. 12 - Epoxidová pryskyřice CHS-EPOXY 324 a tvrdidlo P 11
- Obr. 13 - Epoxidová pryskyřice GLUEPOX RAPID
- Obr. 14 - Plantáž s rostlinou Agáve sisalana
- Obr. 15 - Získávání vláken z listů Agáve sisalana
- Obr. 16 - Země produkující sisalové vlákno
- Obr. 17 - Sisalové vlákno před přípravou krátkých vláken
- Obr. 18 - Nastříhané sisalové vlákno před aplikací do matrice
- Obr. 19 - Nasekaná skelná vlákna
- Obr. 20 - Forma pro víceúčelová zkušební tělesa
- Obr. 21 - Forma použitá k určení pórovitosti
- Obr. 22 - Zhotovená víceúčelová zkušební tělesa
- Obr. 23 - Rozměry víceúčelového zkušební tělesa
- Obr. 24 - Univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST
- Obr. 25 - Program Test&Motion
- Obr. 26 - Upevněný zkušební vzorek v čelistech stroje
- Obr. 27 - Ruční přístroj Shore D
- Obr. 28 - Histogram reálné délky vláken 3 mm
- Obr. 29 - Histogram reálné délky vláken 6 mm
- Obr. 30 - Histogram reálné délky vláken 9 mm

- Obr. 31 - Histogram reálné šířky sisalových vláken
- Obr. 32 - Graf teoretických hustot kompozitního systému
- Obr. 33 - Snímek z elektronového mikroskopu, kde je sisalové vlákno smáčeno matricí
- Obr. 34 - Graf porovnání naměřené tvrdosti epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující sisalová vlákna
- Obr. 35 - Graf porovnání naměřené tvrdosti epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující sisalová vlákna
- Obr. 36 - Graf porovnání naměřené tvrdostí epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující skelná vlákna
- Obr. 37 - Graf porovnání pevností v tahu epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující vlákna sisalu
- Obr. 38 - Graf porovnání pevností v tahu epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující vlákna sisalu
- Obr. 39 - Graf porovnání poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice EPOXY 1200 obsahující vlákna sisalu
- Obr. 40 - Graf porovnání poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující vlákna sisalu
- Obr. 41 - Graf porovnání pevností v tahu a poměrného prodloužení u epoxidové pryskyřice GLUEPOX RAPID obsahující skelná vlákna
- Obr. 42 - Výsledek vytržení vlákna z polymerní matrice

Seznam tabulek

- Tab. 1 - Porovnání mechanických vlastností skelných a přírodních vláken
- Tab. 2 - Všeobecné srovnání některých vláknových kompozitů
- Tab. 3 - Ceny vláken
- Tab. 4 - Porovnání mechanických vlastností reaktoplastů a termoplastů
- Tab. 5 - Porovnání viskozit termoplastových a reaktivních pryskyřic
- Tab. 6 - Součinitelé teplotní roztažnosti složek kompozitu
- Tab. 7 - Množství vláken ve zkušebních vzorcích
- Tab. 8 - Vypočítané hodnoty pórovitosti pro EPOXY 1200 a sisalová vlákna

Přílohy

Příloha 1 - Spočítané hodnoty pórovitosti

GLUEPOX RAPID a sisalová vlákna

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pórovitost		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	7,75	1,55	20
2,5	9,7	0,4	4,12
5	11,65	0,15	1,29
7,5	11,65	1,05	9,01
pro délku vlákna 6 mm			
1	12,35	0,75	6,07
2,5	10,25	0,35	3,41
5	11,6	0,5	4,31
7,5	10,3	0,6	5,83
délku vlákna 9 mm			
1	12,35	0,75	6,07
2,5	10,25	0,35	3,41
5	11,6	0,5	4,31
7,5	10,3	0,6	5,83

GLUEPOX RAPID a skelná vlákna

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Pórovitost		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	5,25	1,15	21,90
2,5	6,65	1,15	17,29
5	11,35	0,05	0,44
7,5	12	2,1	17,50

Příloha č. 2 - Výsledky naměřených hodnot tvrdosti při použití sisalových vláken

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200)			
Koncentrace vláken [%]	Tvrđost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
0	90,20	0,91	1,01

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrđost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	89,67	2,30	2,54
2,5	88,77	2,45	2,76
5	87,16	2,90	3,33
7,5	88,98	2,25	2,52

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrđost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	88,09	4,08	4,63
2,5	88,78	2,44	2,75
5	89,12	2,48	2,79
7,5	89,31	2,29	2,57

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrđost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	89,01	3,89	4,38
2,5	88,67	2,60	2,94
5	89,37	3,25	3,64
7,5	87,63	4,72	5,38

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
0	88,26	2,98	3,38

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	87,37	5,27	6,03
2,5	86,63	4,03	4,65
5	87,19	3,70	4,24
7,5	88,03	3,51	3,99

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	88,67	2,40	2,70
2,5	86,18	3,92	4,55
5	87,53	2,75	3,14
7,5	87,53	3,12	3,57

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	v [%]
1	86,97	3,74	4,30
2,5	87,21	4,23	4,85
5	85,51	3,47	4,06
7,5	87,85	3,98	4,53

Příloha č. 3 - Výsledky naměřených hodnot tvrdosti při použití syntetických skelných vláken

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	ν [%]
0	88,26	2,98	3,38

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Tvrdost		
	\bar{x} [Shore D]	s [Shore D]	ν [%]
1	86,97	2,79	3,21
2,5	87,55	2,76	3,15
5	86,79	2,62	3,01
7,5	87,73	3,17	3,61

Příloha 4. Výsledky naměřených hodnot pevnosti v tahu při použití sisalových vláken

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200)			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
0	33,23	6,34	19,09

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	24,21	2,19	9,06
2,5	28,95	2,28	7,89
5	27,83	3,67	13,17
7,5	25,44	4,66	18,33

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	24,67	4,09	16,60
2,5	24,32	1,89	7,77
5	25,64	4,31	16,83
7,5	22,44	3,37	15,04

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	22,09	6,72	30,41
2,5	17,29	8,70	50,29
5	15,12	1,49	9,89
7,5	11,20	0,63	5,64

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
0	38,60	2,26	5,85

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	39,13	5,52	14,11
2,5	30,88	6,76	21,88
5	31,72	4,19	13,20
7,5	27,23	5,26	19,31

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	39,00	5,93	15,22
2,5	35,69	6,77	18,98
5	30,90	8,20	26,52
7,5	28,96	7,84	27,07

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	ν [%]
1	32,69	8,33	25,49
2,5	37,78	3,91	10,34
5	30,78	5,35	17,39
7,5	36,77	7,47	20,30

Příloha č. 5 - Výsledky naměřených hodnot poměrného prodloužení při použití sisalových vláken

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200)			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
0	3,19	0,88	27,62

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	2,27	0,30	13,36
2,5	3,46	0,97	28,01
5	2,75	0,36	13,03
7,5	2,58	1,02	39,35

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	3,03	0,51	16,66
2,5	2,66	0,47	17,77
5	2,43	0,53	21,97
7,5	3,53	0,92	26,13

CHS-EPOXY 324 (EPOXY 1200) pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	2,48	0,90	36,38
2,5	1,78	1,14	63,86
5	1,34	0,29	21,35
7,5	1,14	0,24	20,85

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
0	4,63	0,72	15,59

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 3 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	4,23	0,65	15,40
2,5	3,66	1,29	35,11
5	3,28	0,47	14,18
7,5	3,72	0,84	22,69

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 6 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	4,28	0,98	22,89
2,5	4,14	0,95	22,97
5	3,59	1,11	31,04
7,5	3,35	1,11	33,05

GLUEPOX RAPID pro délku vlákna 9 mm			
Koncentrace vláken [%]	Poměrné prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	3,57	1,11	31,07
2,5	4,09	0,46	11,26
5	3,87	0,82	21,17
7,5	3,20	0,78	24,24

**Příloha č. 6 - Výsledky naměřených hodnot pevnosti v tahu a poměrného prodloužení
při použití skelných vláken**

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	v [%]
0	38,60	2,26	5,85

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Pevnost		
	\bar{x} [MPa]	s [MPa]	v [%]
1	34,75	2,59	7,44
2,5	33,25	2,59	103,44
5	38,66	5,58	14,43
7,5	42,33	3,98	9,41

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
0	4,63	0,72	15,59

GLUEPOX RAPID			
Koncentrace vláken [%]	Prodloužení		
	\bar{x} [%]	s [%]	v [%]
1	2,96	0,62	20,96
2,5	2,50	0,34	1,04
5	1,95	7,81	400,00
7,5	1,60	0,47	29,53