

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLASTNOSTI KOMPOZITU ULTREX™ SURETOUCH™

PROPERTIES OF ULTREX™ SURETOUCH™ COMPOSITE

AUTOR: Petr Čapek

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

PRAHA 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čapek** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **491259**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vlastnosti kompozitu UltreX™ SureTouch™

Název bakalářské práce anglicky:

Properties of UltreX™ SureTouch™ composite

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je vyhodnotit vlastnosti kompozitního materiálu

1. Literární rešerše problematiky kompozitů a měření jejich mechanických a fyzikálních vlastností.
2. Návrh metodiky experimentů.
3. Provedení experimentů.
4. Diskuse a závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Gottfried W. Ehrenstein. Polymerní kompozitní materiály. Praha: Scientia, 2006.
- [2] ČSN pro měření mechanických vlastností kompozitů s polymerní maticí a plastů.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Elena Čižmárová, Ph.D. ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.03.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které uvádím v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat za cenné rady a vstřícný přístup mé vedoucí bakalářské práce Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. Také bych rád poděkoval Ústavu letadlové techniky a Ústavu makromolekulární chemie Akademie věd České republiky za realizaci tlakových zkoušek a zkoušky DMA.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením mechanických a fyzikálních vlastností kompozitního materiálu UltreX™ SureTouch™. Jedná se o kompozitní materiál složený z vrstev skelného vlákna v epoxidové pryskyřici a vrstev gumy. V práci jsou představeny kompozitní materiály a jejich rozdělení, následně charakterizovány vybrané zkoušky pro plasty a polymerní kompozitní materiály. V praktické části práce jsou popsány a vyhodnoceny zkoušky mechanických a fyzikálních vlastností kompozitního materiálu UltreX™ SureTouch™.

Klíčová slova:

Kompozit, zkouška tahem, zkouška tlakem, zkouška tříbodovým ohybem, zkouška rázové houževnatosti metodou Charpy, hustota, zkouška DMA.

Abstract:

This bachelor thesis is concerned to determine mechanical and physical properties of composite material UltreX™ SureTouch™. It is composite material composed from layers of glass fibres in epoxy resin and layers of rubber. In thesis are introduced composite materials and their division, then selected tests for plastics and polymer composite materials are characterized. Tests of mechanical and physical properties of composite material UltreX™ SureTouch™ are described and evaluated in practical part of thesis.

Keywords:

Composite, tensile test, compression test, three-point bend test, Charpy impact test, density, DMA test.

Obsah

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK (ZNAČEK)	6
1. ÚVOD	10
2. TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1. KOMPOZITY	12
2.1.1. DĚLENÍ KOMPOZITŮ	14
2.2. SENDVIČOVÉ A HYBRIDNÍ KOMPOZITY	19
2.3. ZKOUŠKY KOMPOZITŮ	19
2.3.1. STANOVENÍ TAHOVÝCH VLASTNOSTÍ	20
2.3.2. STANOVENÍ TLAKOVÝCH VLASTNOSTÍ	23
2.3.3. STANOVENÍ OHYBOVÝCH VLASTNOSTÍ	25
2.3.4. STANOVENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	27
2.3.5. STANOVENÍ HUSTOTY U NELEHČENÝCH PLASTŮ	29
2.3.6. DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA	32
3. PRAKTICKÁ ČÁST	34
3.1. ULTREX™ SURETOUCH™	34
3.2. ZJIŠŤOVANÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI	34
3.3. ZKOUŠKA V TAHU	35
3.4. ZKOUŠKA V TLAKU	40
3.5. ZKOUŠKA V OHYBU	43
3.6. RÁZOVÁ HOUŽEVNATOST PODLE CHARPYHO	48
3.7. HUSTOTA	50
3.8. ZKOUŠKY DMA	51
4. DISKUZE	54
5. ZÁVĚR	56
ZDROJE	58

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK (ZNAČEK)

G10		Označení kompozitního materiálu společnosti Norplex Micarta
DMA		Dynamická mechanická analýza
DSC		Diferenciální snímací kalorimetrie
TMA		Termomechanická analýza
CVD		chemická depozice
SM		Uhlíkové vlákno se standardními modulem
UHS		Uhlíkové vlákno se zvýšenou pevností
UHM		Uhlíkové vlákno se zvýšeným modulem pružnosti
σ	[MPa]	Napětí
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti
σ_y	[MPa]	Napětí na mezi kluzu
σ_b	[MPa]	Napětí při přetržení
σ_x	[MPa]	Napětí při daném poměrném prodloužení
ϵ	[%]	Poměrné prodloužení
$\epsilon_{1,2}$	[%]	Poměrné prodloužení/stlačení v bodech 1 a 2
ϵ_{tm}	[%]	Poměrné prodloužení při mezi pevnosti
ϵ_{ty}	[%]	Poměrné prodloužení při mezi kluzu
ϵ_{tb}	[%]	Poměrné prodloužení při přetržení
ČSN		Česká státní norma
EN		Evropská norma
ISO		Mezinárodní norma
σ_M	[MPa]	Mez pevnosti
σ_Y	[MPa]	Napětí na mezi kluzu
σ_B	[MPa]	Napětí při přetržení
σ_X	[MPa]	Napětí při daném poměrném prodloužení
ϵ_c	[%]	Poměrné zkrácení v bodech 1 a 2
ϵ_{cM}	[%]	Poměrné zkrácení při mezi pevnosti
ϵ_{cY}	[%]	Poměrné zkrácení při mezi kluzu

ε_{cB}	[%]	Poměrné zkrácení při porušení
$\sigma_{t,c}$	[MPa]	Napětí v tahu/tlaku
$F_{t,c}$	[N]	Síla tahová/tlaková
A	[mm ²]	Plocha
ΔL_0	[mm]	Prodloužení/stlačení délky zkušebního tělesa
L_0	[mm]	Počáteční délka zkušebního tělesa mezi značkami
ΔL	[mm]	Prodloužení/stlačení mezi čelistmi
L_3	[mm]	Délka zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
L_1	[mm]	Délka zúžené části zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
R	[mm]	Rádus zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
b_2	[mm]	Šířka konců zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
b_1	[mm]	Šířka zúžené části zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
h	[mm]	Tloušťka zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
D	[mm]	Průměr středících děr zkušebního vzorku pro zkoušku tahem
L	[mm]	Počáteční vzdálenost čelistí
h_t	[mm]	Tloušťka přílozek pro zkoušku tahem
L_t	[mm]	Délka přílozek pro zkoušku tahem
$E_{t,c}$	[MPa]	Modul pružnosti v tahu/tlaku
σ_f	[MPa]	Napětí v ohybu
σ_{fM}	[MPa]	Mez pevnosti
σ_{fB}	[MPa]	Napětí při přetržení
σ_{fC}	[MPa]	Napětí při průhybu 1,5násobku tloušťky vzorku
ε_{fi}	[%]	Deformace ohybem
ε_{fM}	[%]	Deformace ohybem při mezi pevnosti
ε_{fB}	[%]	Deformace ohybem při porušení
l	[mm]	Délka zkušebního tělesa
b	[mm]	Šířka zkušebního tělesa
h	[mm]	Tloušťka zkušebního tělesa
L	[mm]	Rozpětí podpěr podle ČSN EN ISO 178

l_v	[mm]	Rozpětí podpěr podle ČSN EN 2562
R1	[mm]	Poloměr zatěžovacího trnu podle ČSN EN ISO 178
r_1	[mm]	Poloměr zatěžovacího trnu podle ČSN EN 2562
R2	[mm]	Poloměr podpěr podle ČSN EN ISO 178
r_2	[mm]	Poloměr podpěr podle ČSN EN 2562
v	[mm/min]	Zkušební rychlost
s_i	[mm]	Průhyb podle ČSN EN ISO 178
f_i	[mm]	Průhyb podle ČSN EN 2562
E_f	[MPa]	Modul pružnosti v ohybu ČSN EN ISO 178
σ_b	[MPa]	Napětí při porušení podle ČSN EN 2562
E_b	[MPa]	Modul pružnosti v ohybu podle ČSN EN 2562
σ_{fi}	[MPa]	Napětí v ohybu v průhybech s_i
e		Ráz směrem na užší stranu
f		Ráz směrem na širší stranu
n		Normálový ráz na výztuž
p		Rovnoběžný ráz na výztuž
a_{cU}	[kJ·m ⁻²]	Rázová houževnatost
a_{cN}	[kJ·m ⁻²]	Vrubová houževnatost
E_C	[kJ]	Korigovaná energie spotřebovaná při přeražení
m_{IL}	[g]	Hmotnost ponorné kapaliny
m_W	[g]	Hmotnost vody
ρ_W	[g·mm ⁻³]	Hustota vody
ρ_{IL}	[g·mm ⁻³]	Hustota ponorné kapaliny
$m_{S,A}$	[g]	Hmotnost vzorku na vzduchu
$m_{S,IL}$	[g]	Hmotnost vzorku v ponorné kapalině
$m_{K,IL}$	[g]	Hmotnost závaží v ponorné kapalině
$m_{S+K,IL}$	[g]	Hmotnost vzorku a závaží v ponorné kapalině
m_1	[g]	Hmotnost ponorné kapaliny pro naplnění pyknometru
m_2	[g]	Hmotnost kapaliny v pyknometru společně se vzorky

m_{APP}	[g]	Zdánlivá hmotnost
m_T	[g]	Skutečná hmotnost
ρ_{AIR}	[g·mm ⁻³]	Hustota vzduchu
ρ_S	[g·mm ⁻³]	Hustota vzorku
ρ_L	[g·mm ⁻³]	Hustota závaží
p	[bar]	Tlak
t	[°C]	Teplota
E'	[MPa]	Elastický modul
E''	[MPa]	Ztrátový modul
$\tan(\delta)$	[-]	Fázový faktor
σ_0	[MPa]	Maximální napětí
ε_0	[-]	Maximální amplituda deformace
δ	[-]	Fázové zpoždění mezi napětím a deformací
σ_{tm}	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$\sigma_{t1.max}$	[MPa]	1.maximum napětí v tahu
$\sigma_{t,b}$	[MPa]	Napětí při přetržení v tahu
σ_{cm}	[MPa]	Mez pevnosti v tlaku
v_{zk}	[mm/min]	Zkušební rychlost při zkoušce ohybem
T_g	[°C]	Přechodová teplota

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce je zaměřena na kompozitní materiál UltreX™ SureTouch™ od firmy ISOMA s.r.o, která je distributorem materiálů UltreX™ od společnosti Norplex-Micarta. V jejich produkci najdeme termosetické kompozity pro technologický průmysl, materiálové inženýrství, ložiska a kluzné systémy pro transportní, energetický a strojní průmysl, kompozitní materiály pro kryogenní aplikace např. v aerospace, energetice, medicíně a vědě, kompozitní materiály pro elektrotechnické aplikace k izolaci a ochraně proti statickému výboji, ale také kompozity pro dekorativní a estetické účely pod označením UltreX™.

Hlavním tématem práce jsou zkoušky kompozitního materiálu. V životě dílů jsou zkoušky materiálů velmi důležité. Materiály se neustále vyvíjí a přichází nové, u kterých je zjištění vlastností stěžejní, abychom je mohli efektivně využít nebo zařadit. Zkoušky, ale neslouží jen pro určení vlastností nových materiálů, ale i k ověření vlastností již používaných materiálů. Také mohou sloužit k validaci vybraných řešení, nebo ke kontrole kvality výroby a kontrole nastavení technologických procesů výroby. Po ukončení výroby nebo vyřazení dílů z provozu (prevence, porušení) mohou být zkoušky zařazeny pro ověření předchozích rozhodnutí (např. volba materiálu, geometrie atd.), jako podklady pro další vývoj, nebo zjištění příčiny porušení.

Zjistit vlastnosti materiálu jde několika způsoby. Z počátku lze vlastnosti předběžně predikovat teoretickým výpočtem, nebo matematickým modelem. Teoretické výpočty často neuvažují vady v materiálu, technologii, velikosti výrobku a další faktory. Nejčastěji se však stanovují vlastnosti pomocí zkoušek materiálů, které většinou zkouší materiál pouze v jednom typu zatížení jako je tah, tlak, ohyb, krut, rázy, dynamické zatížení, teplota, různá prostředí a výjimečně jejich kombinace. Zkouší se zkušební tělesa, ale i celé díly. Dále se mohou díly zkoušet pomocí simulací jejich provozu, které jsou nákladnější a jejich realizace trvá zpravidla delší dobu, navíc mohou vyžadovat stavbu specializovaných zařízení nebo přípravků. Pomocí těchto komplexnějších zkoušek lze simulovat do jisté míry výkyvy zatížení, teplot nebo prostředí. V reálném provozu však mohou nastat i situace, jenž těžko simulovat nebo situace, které nebyly do simulací zahrnuty, proto je sbírání dat o dílech z provozu nejcennější informací pro konstruktéry. Sbíráání dat z provozu je nicméně nákladné a časově náročné,

například u automobilů může takovéto testování probíhat po celou dobu života modelu na trhu.

Kompozitní materiály najdou uplatnění v mnoha oborech. Mohou řešit klidně hned několik problémů najednou, zmenšovat či odlehčovat díly, případně zlevnit výrobu daného dílu. Kompozity se vyznačují velkou variabilitou, co se týče geometrie dílů od nejjednodušších až po tvarově komplikované díly. Umožňují zlevnění dílů například přidáváním výztuží do plastů. Pomocí kompozitů lze taktéž zjednodušit některé konstrukce, které by za jiných okolností muselo tvořit několik samostatných dílů.

2. TEORETICKÁ ČÁST

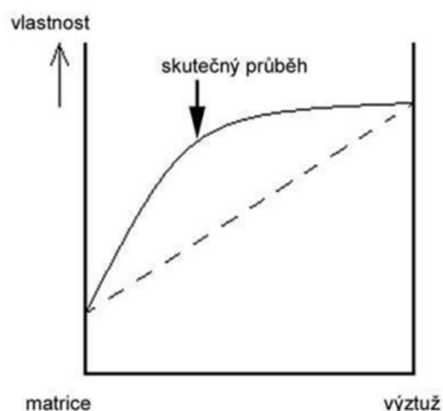
2.1. Kompozity

Kompozity se stále stávají více používanými. Jedná se o heterogenní materiál, jenž obsahuje dvě a více fází. Tyto fáze jsou chemicky odlišné, mají však i odlišné mechanické a fyzikální vlastnosti. Tyto fáze se často nazývají jako výztuž a matrice. [1–3]

Výztuž je nespojitá fáze často v podobě částic a vláken. Kompozit je pomocí ní vyztužen, ale každý druh výztuže má jiný vliv na finální mechanické i fyzikální vlastnosti. Matrice je spojitou fází. Přenáší vnější síly na výztuž, chrání ji před vnějšími vlivy, odděluje výztuž a tím chrání kompozit před šířením trhliny. [1–3]

Mezi hlavní výhody kompozitu se řadí synergický účinek. Samotné fáze kompozitu by měly vždy horší mechanické vlastnosti, oproti tomu, když by byly ve formě kompozitu, ve zjednodušené formě to je patrné z Obr. 1 a je z něj dále vidět, že existuje i vrchol vlastností. Kompozity jsou charakteristické také velmi vysokým poměrem pevnosti ku hmotnosti například vůči ocelím. Spousta kompozitů vykazuje dobrou odolnost vůči vysokoteplotní korozi, oxidaci a otěru a oproti použití nevyztužených materiálů mají menší rozptyl pevnosti a vyšší odpor proti mechanickým a teplotním šokům. Jelikož kompozity je možné konstruovat z velké řady pevných materiálů a keramiky, nabízí to konstruktérům velké množství kombinací materiálů a tím i velké rozpětí vlastností, které lze výběrem nejrůznějších materiálů ovlivňovat, a to jak přidávat a vylepšovat žádoucí vlastnosti tak i potlačovat nežádoucí vlastnosti. Jako další výhodu a komplikaci zároveň lze označit anizotropii kompozitů. Zejména u krátkovláknových a dlouhovláknových kompozitů. Pevnost je závislá na směru působení sil, proto se v této souvislosti mluví o řízené anizotropii. Této vlastnosti lze využít pro změny elastických vlastností kompozitu v různých směrech. Výroba kompozitů je výhodná pro velké a komplexní součásti a konsolidaci součástí do jedné. Příkladem mohou být součásti letadel, monokoky a chassis sportovních a závodních vozidel. Často jsou kompozitní díly v komerční sféře použity právě v letectví, automobilovém a dopravním průmyslu jako jsou spalovací motory, auta, vlaky, letadla, hřídele, brzdy, tlakové nádoby, kryty a skříně elektroniky a dalších systémů. Dalším velkým odvětvím je také výroba sportovních pomůcek jako jsou kola nebo

tenisové rakety. Kompozity ale jsou přínosné také v lékařství, a to třeba jako protézy, zubní implantáty, klouby prstů, kostní dlahy a mnoho dalších. [1–6]



Obr. 1 – Synergický účinek [13]

Kompozity samozřejmě nemají pouze samé výhody. Je třeba si být vědom i několika nevýhod a paradoxů, se kterými je potřeba počítat při konstrukci dílů z kompozitních materiálů. Mezi tyto paradoxy patří paradox pevného materiálu, vláknité struktury, délky zatížení a paradox kompozitního materiálu. Paradox pevného materiálu je důležitý zejména při výpočtech, protože kompozity ale i jiné materiály mají teoretické hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v tahu vyšší, než jsou skutečné hodnoty pro vlákna a kompaktní formu. To platí i pro ostatní materiály jako je ocel, hliník či sklo a jejich modul pružnosti se blíží k teoretické hodnotě a pevnost v tahu není o tolik nižší než u kompozitů. Pro vlákna jsou hodnoty modulu pružnosti poloviční až třetinové a pro pevnost v tahu jsou až o řád nižší než teoretické hodnoty. Kompaktní forma se vyznačuje modulem pružnosti o dva řády nižší než teoretický modul pružnosti. Pevnost v tahu kompaktní formy je pak o tři řády nižší oproti teoretické hodnotě. Paradox vláknité struktury je už naznačen v paradoxu pevného materiálu, ve kterém je vidět, že pevnost vláken je i řádově větší než pevnost kompaktní formy. Délka zatížení je také důležitá, neboť podle paradoxu délky zatížení kompozity s kratšími vlákny vykazují vyšší pevnost, to by mělo být dáno tím, že kratší a tenčí vlákna mají menší výskyt poruch, tím pádem i vliv těchto poruch je menší na výslednou pevnost. Posledním paradoxem je paradox kompozitního materiálu, který velmi připomíná synergický účinek, protože kompozitní materiál je schopen vydržet napětí, které by jeho nejslabší složku porušilo a také pevnější složka v kompozitu se může více přiblížit k teoretické hodnotě pevnosti. [7]

2.1.1. Dělení kompozitů

2.1.1.1. Podle matrice

Kompozity je možné rozdělit podle několika hledisek. Jedním z nich je dělení podle matrice, a to na kompozity s polymerní matricí, s kovovou matricí, s keramickou matricí a s uhlíkovou matricí. [2, 3]

Polymerní matrice se sami o sobě nevyznačují vysokou pevností a až pomocí výztuže se stávají tuhými a pevnými. Je potřeba u nich sledovat přechodovou teplotu, neboť polymery s rostoucí teplotou ztrácejí své mechanické vlastnosti a také je potřeba u nich znát prostředí v nichž jsou použité, protože absorbují vodu, ale mohou vynikat svojí odolností proti chemikáliím. Kompozity s polymerní matricí jsou tvořeny převážně termoplasty, reaktoplasty a zesíťovanými elastomery. Z termoplastických matric se používá polypropylen (PP), polyamid (PA), polykarbonát (PC), polysulfon (PSU), polyetherimid (PEI), polyamidimid (PAI), polyetheretherketon (PEEK), polyfenylsulfid (PPS). U reaktoplastických matric se používá epoxidová, fenolytická, vinylesterová, kyanátovoesterová, polyimidová a polyesterová pryskyřice. Zesíťovaný elastomer se používá nejvíce asi styren – butadien a akrylonitril – butadien styren. Epoxidové pryskyřice jsou jedny z nejrozšířenějších, protože poskytují velmi dobré mechanické vlastnosti, i když jsou v zásadě křehké. Z hlediska teploty jsou použitelné do 120 °C. Polyimidy se používají v aplikacích s vyšší teplotou, a to až do 250–290 °C. Fenolytické pryskyřice se používají v místech, kde by mohlo dojít k požáru, jako jsou interiéry letadel nebo ropné plošiny, neboť při jejich hoření nedochází k uvolňování toxických zplodin a také dochází k menší produkci dýmu a kouře. Jako výztuž u tohoto druhu kompozitu se používají částice a vlákna z uhlíku, skla, bóru či aramidu. [2, 3, 5]

U kovových matric se používají převážně kovy s nižší hustotou, popřípadě kovy s nějakou specifickou vlastností. Jedná se nejčastěji o hliníkové, titanové nebo hořčíkové matrice, může však jít i o matrice ze slitin železa, kobaltu, stříbra, mědi či matrice ze superslitin. Výztuž u těchto kompozitů může být kovová (wolfram) nebo keramická, a to ve formě krátkých i dlouhých vláken, whiskerů, či částic. Nejlepších mechanických vlastností se dá dosáhnout při použití dlouhých vláken. Z důvodu nákladné výroby se nejvíc používají částicové výztuže. Takovéto kompozity se mohou použít třeba v motorsportu a v aerospace průmyslu. Příkladem

kompozitu s kovovou maticí by mohla být hliníková slitina s částicemi karbidu křemíku (25 % objemu), která má oproti běžným hliníkovým slitinám vyšší modul pružnosti při podobné hustotě (115 GPa oproti 70 GPa). Nejznámějším příkladem je slinutý karbid v obráběcích nástrojích. [5, 8]

Keramické matrice se vyrábí z karbidu křemíku, nitridu křemíku, korundu, mullitu a dalších keramických materiálů. Keramické matrice a jejich mechanické vlastnosti jsou citlivější na výrobní proces než kovy. Se zvětšujícím se objemem roste i množství chyb v matici a klesá pevnost. Proto je i obtížné jednoznačně stanovit u keramických matic tahové a ohybové vlastnosti. Výsledky měření mají často velký rozptyl hodnot. Keramické matrice nejsou příliš odolné vůči tepelným a mechanickým šokům. Vytuž tvoří keramická případně uhlíková vlákna, whiskery a částice. Tato vyztužení zlepšují výše uvedené vlastnosti, avšak dlouhá vlákna zlepšují mechanické vlastnosti výrazněji. Na rozdíl od samostatných keramik vyztužené keramické matrice mají nelineární průběh v tahovém diagramu a větší obsah plochy pod grafem, tudíž jsou schopny absorbovat více energie před porušením. [3, 5]

Uhlíková matrice je uhlík v různém stavu strukturní uspořádanosti vytvořeného karbonizací organického polotovaru nebo depozicí pyrolytického uhlíku. Vyznačují se především velmi vysokou teplotní vodivostí a vysokou odolností proti vysokoteplotnímu opotřebení, jinak jsou to křehké a nepříliš pevné materiály. Proto se používají v aplikacích s velmi vysokými teplotami jako jsou karbon keramické brzdy závodních aut, jejich spojky, sklářské vybavení, letecké brzdy, raketové trysky nebo opláštění raketoplánů. Nejčastěji bývají vyztuženy uhlíkovými vlákny, a to v 2D a 3D uspořádáních, jelikož jednosměrné vyztužení má hodnoty příčného modulu pružnosti, modulu pružnosti ve smyku a pevnosti v tahu nízké. Ve směru vláken lze dosáhnout modulu pružnosti až 340 GPa, pevnosti v tahu až 700 MPa a pevnosti v tlaku až 800 MPa, kolmo na směr vláken hodnoty klesají a elastický modul pružnosti jde k 10 MPa, v tahu k 14 MPa a v tlaku k 34 MPa. [3, 5, 9, 10]

2.1.1.2. Podle výztuže

Výztuže můžeme dělit na tři druhy, a to na částicové, krátkovláknové a dlouhovláknové viz Obr. 2, na němž jsou vidět tyto druhy a v případě dlouhovláknových výztuží vidíme jednosměrnou a dvousměrnou výztuž. Dále je dělíme podle materiálu, a to na skleněné, uhlíkové, aramidové, borové, polyethylenové, korundové a další výztuže. Vývoj a výzkum se dnes zabývá výztužemi přírodního původu jako jsou kokosová, třtinová, konopná, bavlněná vlákna a vlákna z dalších plodin. Těmto kompozitům se přezdívá zelené kompozity. Na kvalitu vláken má vliv několik faktorů například způsob pěstování či počasí. Mezi vlákna s nejlepšími mechanickými vlastnostmi se řadí konopná vlákna a je možné s nimi nahradit v některých případech skelná vlákna. Tato vlákna by se mohla stát dostatečnou náhradou spousty kompozitů, neboť třeba v případě uhlíkových kompozitů je obtížná, až téměř nemožná, recyklace a nahrazením by měla být recyklace jednodušší, levnější a s menším zatížením životního prostředí. [1–3, 5, 11, 12]



Obr. 2 – Druhy výztuže [13]

Částicové výztuže jsou ve formě kuliček, destiček a existují i výztuže dalších typů a tvarů. V případě částic se vzhledem k jejich velikosti dá hovořit pouze o náhodné orientaci nebo usměrněné podle toku taveniny. Rovnoměrnost rozložení výztuže v kompozitu se dá ovlivnit až při výrobě, jinak je ovlivnění velmi obtížné, například přimícháváním do vstřikování. Tato výztuž zvyšuje tuhost kompozitu, avšak nezvyšuje tahové vlastnosti tolik jako dlouhovláknové výztuže. [3, 5]

Mezi krátkovláknové výztuže patří nasekaná uhlíková, skelná, aramidová a další vlákna. Často se mluví i o whiskerech, což jsou krátká monokrystalická vlákna uhlíku, karbidu křemíku (SiC) nebo oxidu hlinitého (Al_2O_3). Vlákna jsou dlouhá zhruba stonásobek svého průměru. Jejich orientace se dá ovlivnit pouze při vstřikování. [2, 3, 5]

U dlouhovláknových výztuží mluvíme o desítkách i stovkách mm dlouhých vlákních. Často jsou tato vlákna ze skla, uhlíku či aramidů. I u těchto výztuží lze hovořit o náhodné či přednostní orientaci. Pokud jsou přednostně orientována často jsou tato vlákna uspořádána do tkanin a úpletů, které nabízejí převážně jednosměrnou, dvousměrnou nebo trojsměrnou orientaci. [1, 3–5]

Nejvýznamnějšími výztužemi z hlediska mechanických vlastností jsou vlákna, neboť vykazují nejlepší mechanické vlastnosti. Většina vláken se vyrábí ve formě pramenců nebo příze z multiflamentu, monofilament nabízí vlákna většího průměru. [5]

Skleněná vlákna jsou nejčastěji používána k vyztužení polymerních kompozitů a byla vytvořena mezi prvními, z počátku však jako elektricky izolující materiál, proto se pořád používá označení E – glass a jsou oproti dalším vláknům levnější. Vlákna mívají průměr zhruba 3 až 20 μm . Pevnost v tahu samotného E – glass vlákna je zhruba 2000 MPa a v jeho variantě se zvýšenou pevností v tahu HS – glass je pevnost v tahu 4200 MPa. E – glass i HS – glass jsou náchylná na creep, avšak HS – glass méně. Dnes vyrábí skelná vlákna spousta výrobců, kteří nabízejí vlákna shodná i jiná než jsou uvedena. A – glass jsou vlákna z alkalické skloviny a mají složením blízko k okennímu sklu. Další jsou třeba C – glass, která jsou odolná proti kyselinám a dalším chemikáliím, proto se jim také přezdívá chemická skla. AE nebo AR – glass jsou zase odolná proti alkalickému prostředí. S – glass jsou vlákna ze skloviny s větším podílem oxidu křemíku, hořčíku a hliníku a bez oxidu boru, používají se především v kompozitech s epoxidovou pryskyřicí, neboť nabízí větší pevnost v tahu a modul pružnosti. R – glass jsou od S – glass odlišná ve složení, kdy místo oxidů hořčíku obsahují oxidy vápníku a nedosahují takových hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti jako S – glass. Dále jsou na trhu skla ze skloviny L s obsahem oxidů olova, která dokáží blokovat rentgenové záření, korozivzdorná varianta E – glass ze skloviny E – CR, křemenná vlákna a mnoho dalších. [5, 14–16]

Uhlíková vlákna nachází uplatnění především v polymerních kompozitech, ale najdeme je i v kovových, keramických a uhlíkových kompozitech. Jsou charakteristické svojí vysokou pevností v tahu, která je až 7000 MPa. Jsou také odolná proti creepu, tečení, únavě a korozním prostředím, ale oxidují při vyšších teplotách. Co se týče tepelné vodivosti překonávají měď, a to hned několikanásobně (400 proti 2000 W/m·K). Zajímavostí může být to, že mají záporný

součinitel teplotní roztažnosti, tudíž se při zahřívání vlákna zkracují. Vlákna se vyrábějí třemi způsoby, a to z polyacrylonitrilu (PAN) nebo z ropné či černouhelné smoly. Experimentálně se vlákna vyrábějí pomocí chemické depozice (CVD). PAN vlákna se používají nejčastěji v jejich variantách standard modulus (SM), ultrahigh strength (UHS) a ultrahigh modulus (UHM). Vlákna ze smoly poskytují horší mechanické vlastnosti v tahu, stříhu a v tlaku než PAN vlákna. Co se týče průměru, běžně se používají průměry zhruba 4 až 10 μm . [5]

Borová vlákna najdeme především v polymerních a kovových kompozitech. Vyrábí se jako monofilament pomocí CVD naprašování na wolframový drát nebo uhlíkový filament. Díky tomu mají velký průměr vláken zhruba 100 až 140 μm . V případě mechanických vlastností velmi záleží na průměru drátu nebo filamentu. [5]

Aramidová vlákna byla proslavena firmou DuPont, kterou byla i vynalezena a prezentována pod názvem Kevlar. Tato vlákna jsou především známá jakožto balistická ochrana, neboť vykazují až pětinasobně vyšší lomovou houževnatost než uhlíková vlákna, tudíž se používají k výrobě balistických vest, helem a dalšího vybavení. Dále dobře absorbují vibrace, takže je najdeme v rotorech helikoptér a dalších dílech pro letectví. Dobře odolávají i abrazi, tudíž se uplatní třeba jako skid platy, ochrany podvozku i celé podlahy závodních vozů. [5, 17]

2.1.1.3. Podle velikosti výztuže

Výztuže dělíme podle velikosti do tří skupin nano, mikro a makro, podle nich dělíme i kompozity. [18]

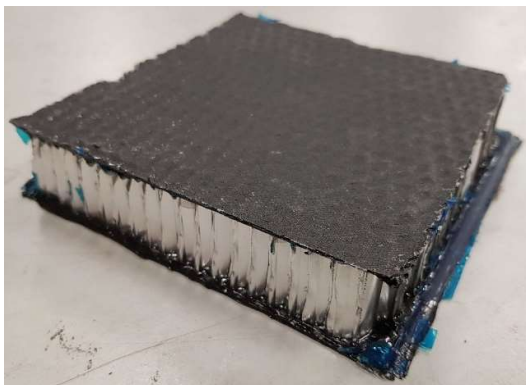
Nanokompozity jsou kompozity s průměrem vlákna nebo největším rozměrem částice v jednotkách nm. Používají se nanočástice, grafenové destičky a další. Nanokompozity mohou být ve formě nanokompozitních povlaků, kdy se do organických povlakových technologií přidají plniva, která dokáží zajistit antibakteriální povrchy, zlepšit tepelné nebo mechanické vlastnosti a zvýšit odolnost vůči různým prostředím např. proti UV záření. [18–20]

Mikrokompozity mají největší význam v průmyslu a strojírenství. Výztuž má rozměry od 10^0 až 10^2 μm . U tohoto typu kompozitu se používají částice, destičky, kuličky a vlákna jako výztuž. [18]

Makrokompozity jsou nejvýznamnější ve stavebnictví, neboť průměr výztuže je zhruba od 10^0 až do 10^2 mm. Do této kategorie bychom zařadili železobeton, polymerbetony s kamenivem, plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce jako jsou vozovky, chodníky atd. [18]

2.2. Sendvičové a hybridní kompozity

Sendvičové kompozity jsou tvořeny dvěma plochami (lamináty), mezi kterými je vloženo lehké jádro viz Obr.3, na němž je vidět sendvičový kompozit ze dvou uhlíkových laminátů a jádra z hliníkové voštiny. Toto jádro zvyšuje tuhost kompozitu v ohybu a je zapotřebí, aby bylo pevně spojeno s oběma lamináty. Tyto jádra lze lepit zároveň s výrobou oněch laminátů. Jádra bývají nejčastěji ve formě hliníkových, aramidových a papírových voštin případně ve formě tuhých pěn, a to jak polymerních, tak i kovových. [3]



Obr. 3 – Ukázka sendvičového kompozitu [autor]

Hybridní kompozity jsou definovány jako kombinace dvou a více druhů vláken v jedné tkanině či úpletu patří sem i kompozity s matricí modifikovanou částicovými výztužemi. Příkladem jsou tkaniny aramidových a uhlíkových vláken, tato kombinace zvyšuje lomovou houževnatost oproti čistě uhlíkové tkanině. Nebo lze do skladby přidat výztuž přírodního původu, která je levnější a recyklovatelná. [1–3, 5]

2.3. Zkoušky kompozitů

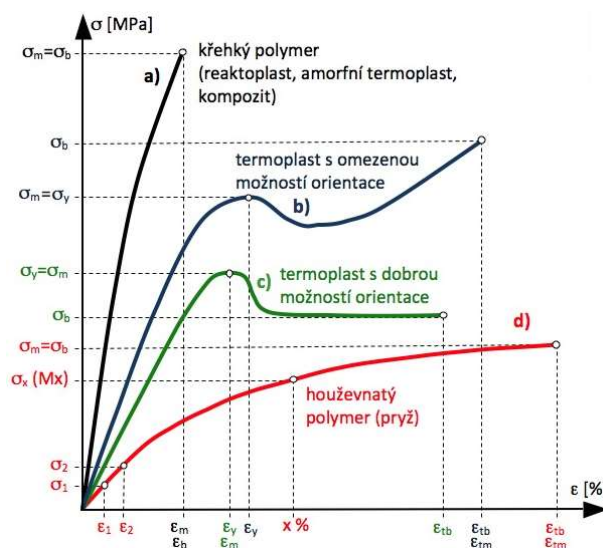
Mechanické vlastnosti kompozitů se zjišťují podobnými metodami jako u kovů, avšak s několika odlišnostmi. Tahové a tlakové zkoušky vypadají na první pohled velmi podobně a v zásadě se liší ve tvaru vzorků a způsobu uchycení, aby bylo zajištěno správné zatěžování (jednoosá napjatost). Vzorky pro stanovení ohybových vlastností jsou odlišné ve srovnání

s obdobnými zkouškami pro kovy. Zkoušky pro kompozity s polymerní matricí jsou často společné se zkouškami pro polymery, které jsou odvozeny od zkoušek pro kovy. Mezi novější zkoušky patří zkoušky DMA, jenž je možno aplikovat na nejrůznější materiály, mimo jiné i na kompozitní materiály. Mezi další moderní zkoušky patří také DSC (diferenciální snímací kalorimetrie) a TMA (Termomechanická analýza). Mezi jednodušší by patřily zkoušky pro stanovení hustoty, pro zjištění navlhavosti nebo zkoušky pro zjištění zhašitelnosti. [21–23]

2.3.1. Stanovení tahových vlastností

Na zjištění tahových vlastností zkušebních těles se využívá zkouška dle normy ČSN EN ISO 527. Z této zkoušky jsme schopni stanovit mez pevnosti, napětí na mezi kluzu, modul pružnosti v tahu, sečný modul pružnosti, celkovou tažnost a Poissonovo číslo daného materiálu. Zkouška je určena pro tvářené plasty, fólie a desky, izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlákny a pro plastové kompozity vyztužené jednosměrnými vlákny. [24]

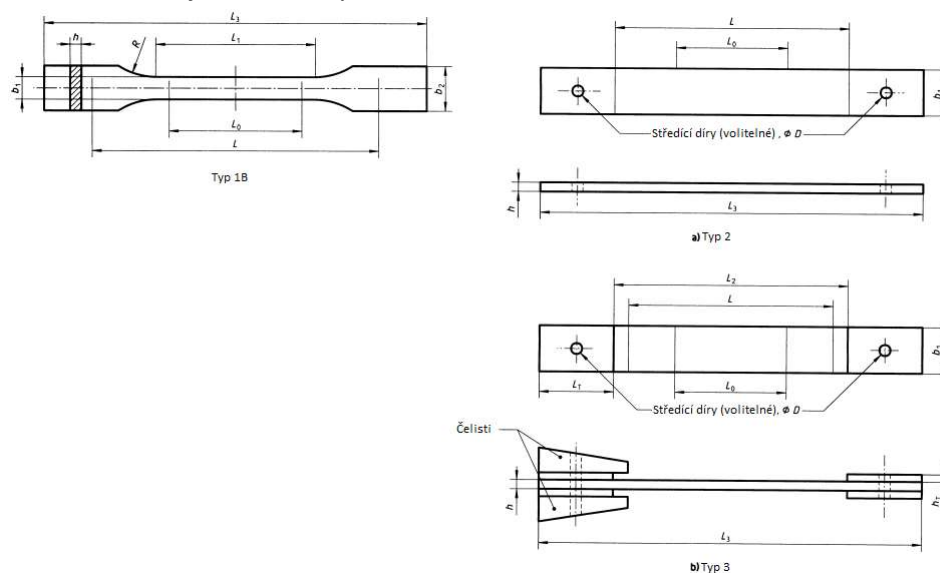
Zkouška má 4 typické křivky napětí v tahu a poměrného prodloužení viz Obr. 4, který zobrazuje typické průběhy pro pryže, termoplasty a reaktoplasty. [24]



Obr. 4 – Typické křivky napětí v tahu [25]

Zkušební těleso je v tomto případě zatěžováno podél své hlavní osy tahovou silou, stálou rychlostí posuvu čelistí do porušení nebo do stanoveného prodloužení zkušebního tělesa. [24]

Dle ČSN EN ISO 527-4 jsou využívány tři druhy zkušební tělesa. Typ 1B (viz Obr. 5) je vhodný pro termosetické kompozity a není vhodný pro vícesměrně vyztužené kompozity. Používá se rychlost 10 mm/min pro běžnou kontrolu a 2 mm/min pro kvalifikační zkoušky pro stanovení maximálního prodloužení a modulu pružnosti v tahu. Typy 2 a 3 (viz Obr. 5) jsou vhodné pro termosety a termoplasty vyztužené vlákny. Na rozdíl od typu 1B je rychlost pro běžnou kontrolu 5 mm/min a pro kvalifikační zkoušku je 2 mm/min. Typ 3 volíme pokud nelze zkoušku s typem 2 vykonat či nejsou-li výsledky s typem 2 uspokojivé. Rozměry jednotlivých typů zkušebních těles jsou uvedeny v Tabulce 1. [24]



Obr. 5 – Zkušební tělesa pro zkoušku tahem ČSN EN ISO 527-4 (upraveno pro potřeby práce) [24]

Tabulka 1 – Rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem ČSN EN ISO 527-4 [24]

Zkušební těleso typ 1B [mm]	$L_3 \geq 150$; $L_1 = 60 \pm 0,5$; $R \geq 60$ $b_2 = 20 \pm 0,2$; $b_1 = 10 \pm 0,2$; $h = 2$ až 10 $L_0 = 50 \pm 0,5$; $L = 115 \pm 1$
Zkušební těleso typ 2 [mm]	$L_3 \geq 250$; $L_0 = 50 \pm 1$; $L = 150 \pm 1$; $b_1 = 25 \pm 0,5$ nebo $50 \pm 0,5$; $h = 2$ až 10 $D = 3 \pm 0,25$ (volitelné)
Zkušební těleso typ 3 [mm]	$L_3 \geq 250$; $L_2 = 150 \pm 1$ $L_0 = 50 \pm 1$ $L = 150 \pm 1$; $L_T \geq 50$ $b_1 = 25 \pm 0,5$ nebo $50 \pm 0,5$; $h = 2$ až 10 $h_T = 1$ až 3; $D = 3 \pm 0,25$ (volitelné)

Z naměřených hodnot lze zjistit napětí v tahu σ_t . Síla F_t je uvedena v N a počáteční plocha zkušebního tělesa A v mm^2 .

$$\sigma_t = \frac{F_t}{A} [\text{MPa}] \quad (1)$$

Poměrné prodloužení ε je určeno z počáteční délky mezi značkami L_0 v mm a prodloužení délky zkušebního tělesa mezi značkami ΔL_0 v mm. Uplatňuje se při měření pomocí extenzometru.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} [-] \quad (2)$$

Jmenovité poměrné prodloužení ε_t stanovíme z počáteční vzdálenosti čelistí L v mm a prodloužení vzdálenosti mezi čelistmi ΔL v mm. Měříme pouze z pohybu čelistí.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} [-] \quad (3)$$

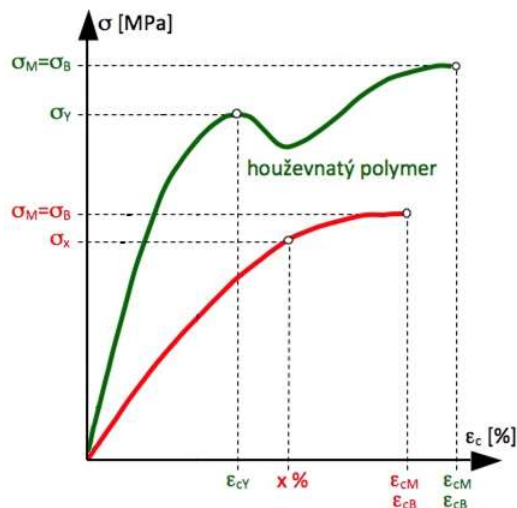
Modul pružnosti v tahu E_t určíme ze dvou napětích v tahu σ_1 , σ_2 v předem stanovených hodnot prodloužení ε_1 , ε_2 . [24]

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [\text{MPa}] \quad (4)$$

2.3.2. Stanovení tlakových vlastností

Zkouška ČSN EN ISO 604 slouží pro zkoumání chování zkušebních těles při namáhání tlakem. Z této zkoušky jsme schopni zjistit pevnost v tlaku, modul pružnosti v tlaku a výpočtem z charakteristiky tlakovou sílu a poměrné stlačení. Zkouška je určena pro tuhé a polotuhé reaktoplasty a termoplasty a také pro termotropní polymery. [26]

U této zkoušky máme dvě typické křivky napětí v tlaku a poměrného stlačení viz Obr. 6, na němž lze vidět průběh s mezí kluzu a bez meze kluzu. [26]



Obr. 6 – Typické křivky napětí v tlaku (upraveno pro potřeby práce) [25]

Zkušební těleso je při této zkoušce zatěžováno podél své hlavní osy stálou rychlostí do porušení nebo do okamžiku, kdy zatížení, popřípadě zkrácení dosáhne určených hodnot. [26]

Přípravek pro tuto zkoušku je složen ze dvou tlačných desek z kalené oceli. Tlaková síla je přenášena přes leštěné plochy kolmé na osu zatěžování s rovinností do 0,025mm. Tyto požadavky mají zajistit přesnost deformace axiálně 1:1 000. [26]

Pro zjištění modulu pružnosti je zapotřebí snímače stlačení tzv. extenzometru. Toto zařízení slouží ke stanovení poměrného stlačení. K měření je potřeba i jiné zkušební těleso oproti měření pevnosti (viz Tabulka 2). [26]

Tabulka 2 – Zkušební rychlosti a rozměry zkušebních těles pro ČSN EN ISO 604 [26]

Zkušební rychlosti v [mm/min]	(1, 2, 5, 10 ± 20 %) a (20 ± 10 %)
Zkušební těleso typ A [mm] pro modul pružnosti	$l = 50 \pm 2$; $b = 10 \pm 0,2$; $h = 4 \pm 0,2$
Zkušební těleso typ B [mm] pro pevnost	$l = 10 \pm 2$; $b = 10 \pm 0,2$; $h = 4 \pm 0,2$

U anizotropních materiálů je potřeba zatěžovat ve směru odpovídajícímu provozu hotového výrobku. U těchto materiálů je doporučeno změřit alespoň 10 zkušebních těles, kdy 5 z nich bude namáháno ve směru kolmém k hlavní ose anizotropie a 5 ve směru rovnoběžném k hlavní ose anizotropie. [26]

Z naměřených hodnot lze vyhodnotit napětí v tlaku σ_c , síla F_c je v N a počáteční plocha průřezu zkušebního tělesa A je v mm².

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

Poměrné stlačení ε určíme z počáteční délky mezi značkami L_0 v mm a zkrácení délky zkušebního tělesa mezi značkami ΔL_0 v mm. Vychází z měření pomocí extenzometru.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} [-] \quad (6)$$

Jmenovité poměrné stlačení ε_c můžeme stanovit z počáteční vzdálenosti tlačných desek L v mm a zkrácení vzdálenosti mezi tlačnými deskami ΔL v mm. Měří se z pohybu tlačných desek.

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L} [-] \quad (7)$$

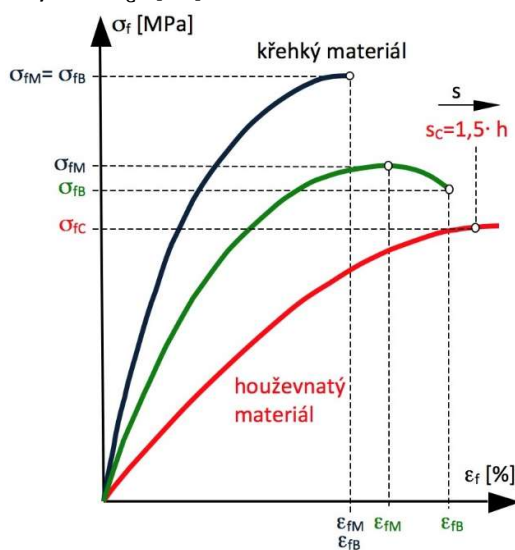
Modul pružnosti v tlaku E_c určíme ze dvou napětích v tlaku σ_1, σ_2 , a to při hodnotách poměrného stlačení $\varepsilon_1 = 0,0005$ a $\varepsilon_2 = 0,0025$. [26]

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

2.3.3. Stanovení ohybových vlastností

Zkouška ČSN EN ISO 178 slouží pro zjišťování ohybových vlastností tuhých a polotuhých plastů. Zejména je vhodná pro termoplasty a reaktoplasty (tvářené a vytlačované). Norma ČSN EN ISO 178 je vhodná i pro vyztužené varianty. [27]

U této zkoušky můžeme pozorovat tři typické křivky napětí. Na obr. 7 můžeme vidět průběhy pro křehké, houževnaté materiály a materiály, které se porušují po dosažení maxima a ještě před smluvním průhybem s_c . [27]



Obr. 7 – Typické křivky napětí při ohybu [25]

Tabulka 3 – Zkušební rychlosti a rozměry zkušebního zařízení a zkušebních těles pro ČSN EN ISO 178 [27]

Zkušební rychlosti v [mm/min]	(1, 2, 5, 10 \pm 20 %) a (20, 50, 100, 200, 500 \pm 10 %)
Poloměr zatěžovacího trnu R_1 [mm]	5 \pm 0,1
Poloměr podpěr R_2 [mm]	2 a 5 \pm 0,2
Přednostní zkušební tělesa [mm]	$l = 80 \pm 2$; $b = 10 \pm 0,2$; $h = 4 \pm 0,2$

Při použití zkušební tělesa, které neodpovídá přednostnímu zkušebnímu tělesu (viz Tabulka 3), pokud tomu neodporuje část normy upravující rozpětí podpěr, musí být použity vzorky se šířkou, která je stanovena podle jmenovité tloušťky vzorku h . [27]

$$\frac{l}{h} = 20 \pm 1 \quad (9)$$

Pro anizotropní materiály je potřeba zkoušet vzorky ve směru, v jakém budou užívány. Jinak jsou rozlišeny 4 vzorky a jejich způsob zkoušení. [27]

Pro danou zkoušku je potřeba zkoušet nejméně 5 zkušebních těles a stejný počet je vhodné zkoušet i u přímovstříkovaných vzorků. Pokud se těleso poruší mimo střední třetinu rozpětí podpěr, je potřeba tento vzorek vyřadit z vyhodnocování. [27]

Rozpětí podpěr L se nastavuje podle tloušťky vzorku h a to následovně. [27]

$$L = (16 \pm 1)\bar{h} \text{ [mm]} \quad (10)$$

Tento vztah se nepoužije v případě, že jsou zkušební tělesa velmi tlustá a jednosměrně vyztužená, nebo velmi tenká. Nelze využít ani u poddajných termoplastů. [27]

Z této zkoušky lze stanovit pevnost v ohybu σ_{fM} , kde F [N] je maximální síla, L [mm] rozpětí, šířka zkušebního tělesa b [mm] a tloušťka h [mm]. [27]

$$\sigma_{fM} = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

Dále lze určit modul pružnosti v ohybu E_f , a to z výpočtu průhybů s_1 a s_2 pro deformace ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,00025$. Ještě je potřeba znát rozpětí L [mm] a tloušťku h [mm].

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi}L^2}{6h} \text{ [mm]} \quad (i = 1; 2) \quad (12)$$

Výpočet modulu pružnosti v ohybu E_f vypadá následovně.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

Kde σ_{f1} a σ_{f2} jsou napětí v ohybu v průhybech s_1 a s_2 . [27]

Pro letectví, a další odvětví vznikají normy zaměřené na materiály, které se v těchto odvětvích typicky objevují. Příkladem takové normy je norma ČSN EN 2562, která je určena pro kompozity vyztužené vlákny v jejich podélné ose. Zkušební zařízení je pro tuto zkoušku stejné jako u ostatních zkoušek ohybem, liší se v rozměrech zkušebních těles, rychlostech a vyhodnocením modulu pružnosti E viz vztah (14). Zkušební těleso je kvádr o rozměrech $L \times b \times h$ dvou typů viz Tabulka 4.

Tabulka 4 – Zkušební rychlosti a rozměry zkušebních těles pro ČSN EN 2562 [28]

	Typ A	Typ B
Délka L [mm]	100 ± 1	60 ± 1
Šířka b [mm]	$10 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$
Tloušťka h [mm]	$2 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
Poloměr zatěžovacího trnu r_1 [mm]	$12,5 \pm 0,1$	$12,5 \pm 0,1$
Poloměr podpěr r_2 [mm]	$5 \pm 0,1$	$5 \pm 0,1$
Vzdálenost podpěr l_v [mm]	$80 \pm 0,5$	$50 \pm 0,5$
Zkušební rychlost v [mm/min]	5	2

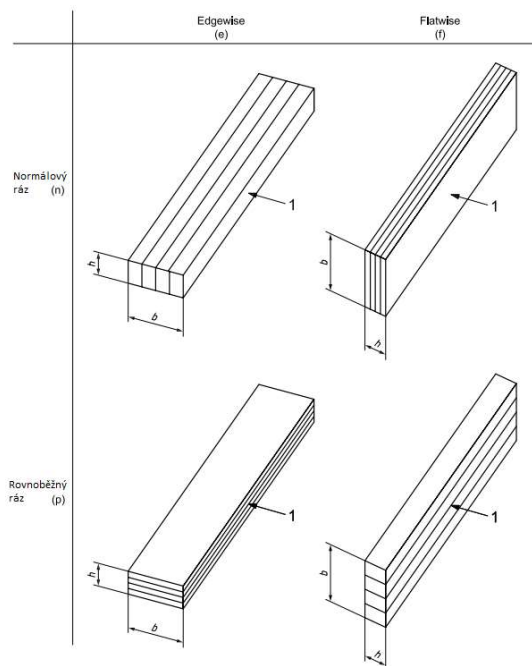
$$E_b = \frac{P_R \cdot l_v^3}{10 \cdot b \cdot h^3 \cdot (f_2 - f_1)} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

Kde P_R je velikost síly v okamžiku poruchy a f_1, f_2 jsou průhyby v $P_R/10$ a $P_R/2$. [28]

2.3.4. Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy

Zkouška ČSN EN ISO 179–1 se zaměřuje na stanovení rázových vlastností metodou Charpy u plastů, a to zejména u tuhých termoplastů a reaktoplastů, kompozitů plněných vlákny v jednom i více směrech a termotropních polymerů na bázi tekutých krystalů. Zkušební tělesa mohou být bez vrubu i s vrubem. [29]

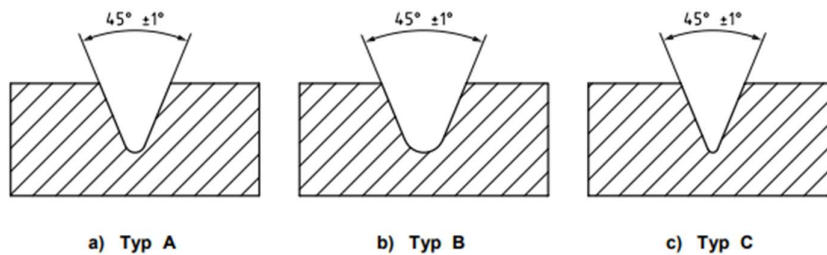
Rozlišujeme dva způsoby rázu (viz obr. 8), a to na užší („edgewise“) a širší stranu („flatwise“), dále dělíme dle směru rázu na výtzuže, a to na normálový (kolmý na rovinu vrstev) a rovnoběžný (rovnoběžný na rovinu vrstev) ráz. [29]



Obr. 8 – Schématické znázornění směru rázu (upraveno pro potřeby práce) [29]

Zkušební tělesa opatřena vrubem mohou mít tři podoby vrubu, a to typ A, B nebo C (viz obr. 9). Přednostně se používá vrub A. Rozdíl mezi nimi je v poloměru kořene vrubu. Zkušební tělesa existují celkem ve třech provedeních. Pokud je materiál v podobě desky, je doporučována tloušťka 4 mm, ale pokud je odebráno z desky, nechá se do 10,2 mm stejná tloušťka jako deska, jinak se z jedné strany obrobí na rozměr $10 \pm 0,2$ mm. [29]

Zkoušet by se mělo minimálně 10 zkušebních těles, pokud nepředepisuje předmětová norma jinak. U laminátů je potřeba 10 zkušebních těles pro každý směr. [29]



Obr. 9 – Vruby zkušebního tělesa (upraveno pro potřeby práce) [29]

Rázová houževnatost a_{cU} se počítá pro tělesa bez vrubu a s vrubem stejně až na šířku zkušební tělesa, kdy s vrubem musíme vzít šířku pod vrubem a ne šířku zkušební tělesa. [29]

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (15)$$

E_c [kJ] je korigovaná energie spotřebovaná při přeražení, h [mm] je tloušťka zkušební tělesa a b [mm] je šířka zkušební tělesa. [29]

2.3.5. Stanovení hustoty u nelehčených plastů

Pro stanovení hustoty lze použít tři metody. Ponorné – metoda A, která je vhodná pro plasty bez pórů, pyknometru – metoda B pomocí ní lze zjišťovat hustotu částic, prášků, granulí a malých součástí, titrační – metoda C pro plasty bez jakýchkoliv pórů. [30]

Testovací prostředí by mělo odpovídat normě ISO 291, avšak kondicionování vzorků na konstantní teplotu není nutné, v průběhu zkoušky nastane teplotní rovnováha. Vzorky, které mění hustotu výrazněji během zkoušky (nedostatečná přesnost), by měly být kondicionovány podle materiálových specifikací. Tohoto jevu lze využít, pokud hledáme závislost změny hustoty na čase, případně na okolních podmínkách. [30]

Pro měření metodou A je zapotřebí analytické váhy nebo jiného zařízení pro měření hmotnosti s přesností na 0,1 mg. Nádobu pro ponoření vzorků se stojanem, který zajistí, aby nádoba byla nad pánví váhy. Teploměr v rozsahu od 0 °C do 30 °C s intervaly po 0,1 °C. Drát pro uchycení vzorků, pokud je potřeba, případně závaží pro zajištění ponoření vzorků do kapaliny. Pro stanovení hustoty ponorné kapaliny je potřeba pyknometru a tekuté lázně s termostatem. Ponornou kapalinou je destilovaná nebo deionizovaná voda. Vzorky by měly být hladké a bez pórů, aby se minimalizovala možnost zachycení vzduchových bublin a měly by vážit více než 1 g. [30]

Nejdříve změříme vzorky na vzduchu (vzorky pod 10 g zaokrouhlíme na 0,1 mg a nad 10 g na 1 mg). Poté ponoříme do ponorné kapaliny o teplotě 23 ± 2 °C nebo 27 ± 2 °C. Odstraníme bubliny pomocí míchadla a zvážíme vzorek na nejbližších 0,1 mg. Pokud

potřebujeme určit hustotu ponorné kapaliny, stanovíme ji ze vztahu (16). Hmotnost ponorné kapaliny v gramech m_{IL} a hmotnost vody v gramech m_V a hustota vody ρ_W v $g \cdot cm^{-3}$.

$$\rho_{IL} = \frac{m_{IL}}{m_W} \cdot \rho_W [g \cdot cm^{-3}] \quad (16)$$

Výslednou hustotu vzorku dostaneme ze vztahu (17), kde $m_{S,A}$ je hmotnost vzorku na vzduchu v gramech, $m_{S,IL}$ je hmotnost vzorku v ponorné kapalině v gramech a hustota ponorné kapaliny ρ_{IL} v $g \cdot cm^{-3}$.

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \cdot \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} [g \cdot cm^{-3}] \quad (17)$$

Pro vzorky, jenž mají nižší hustotu než voda (18), postupujeme stejně, ale je třeba započítat i hmotnost závaží v ponorné kapalině v gramech $m_{K,IL}$ a hmotnost závaží a vzorku v ponorné kapalině $m_{S+K,IL}$.

$$\rho_S = \frac{m_{S,A} \cdot \rho_{IL}}{m_{S,A} + m_{K,IL} - m_{S+K,IL}} [g \cdot cm^{-3}] \quad (18)$$

Zkouška by měla být provedena alespoň na třech vzorcích a výsledkem by měl být průměr na tři desetinná místa. [30]

Na měření metodou B budeme potřebovat shodně jako v metodě A váhu s přesností na 0,1 mg, stojan, pyknometr, tekutou lázeň s termostatem a exsikátor s vývěvou. Ponorná kapalina bude stejná jako pro měření metodou A. Vzorky by měly být ve formě prášku, granulátu nebo vloček a měly by vážit od 1 do 5 g. [30]

Zvážíme pyknometr prázdný a suchý, poté zvážíme vzorky s pyknometrem. Zalijeme pyknometr se vzorky ponornou kapalinou a přesuneme pyknometr do exsikátoru. Vývěvou v exsikátoru odstraníme všechny vzduch. Po vyjmutí pyknometru z exsikátoru dolijeme ponornou kapalinu. Necháme pyknometr ustálit na konstantní teplotu ($23 \pm 0,5$ °C nebo $27 \pm 0,5$ °C) v tekuté lázni s termostatem. Po dosažení konstantní teploty otřeme a zvážíme pyknometr. Vyprázdníme pyknometr, doplníme ho destilovanou nebo deionizovanou vodou bez bublin vzduchu a zvážíme. Hustotu vypočteme ze vztahu (19), m_S je hmotnost vzorků, m_1 hmotnost ponorné kapaliny potřebné pro naplnění prázdného pyknometru, m_2 hmotnost kapaliny v pyknometru společně se vzorky a ρ_{IL} je hustota ponorné kapaliny. [30]

$$\rho_S = \frac{m_S \cdot \rho_{IL}}{m_1 - m_2} [g \cdot cm^{-3}] \quad (19)$$

Poslední je metoda C neboli titrační metoda. Potřebujeme tekutou lázeň s termostatem, odměrný válec o objemu 250 ml, teploměr se stupnicí po 0,1 °C, odměrnou baňku o objemu 100 ml, ploché skleněné míchadlo, pipetu o objemu 25 ml (vhodnou do tekuté lázně) a umožňující dělení po 0,1 ml. Ponorné kapaliny jsou pro tuto metodu dvě kapaliny o rozdílných hustotách, jedna by měla mít hustotu nižší než testovaný materiál a druhá vyšší. [30]

Pomocí odměrné baňky odměříme 100 ml ponorné kapaliny o nižší hustotě a odlijeme ji do odměrného válce o objemu 250 ml, tento válec následně umístíme do tekuté lázně s teplotou $23 \pm 0,5$ °C nebo $27 \pm 0,5$ °C. Po ustálení teploty vložíme vzorek a necháme ho klesnout na dno. Dále budeme postupně přidávat kapalinu s vyšší hustotou po 1 ml. Až se začne rychlost pádu vzorku výrazně zpomalovat, budeme přidávat pouze po 0,1 ml. Pokud už se nejlhčí vzorky budou vznášet v kapalině po dobu jedné minuty, tak hustota této kombinace kapalin je dolní hranicí hustoty materiálu. Dále přidáváme kapalinu o vyšší hustotě do bodu, kdy se už i nejtěžší kousky vzorku vznášejí po dobu jedné minuty. Hustota kapaliny je v každém bodě měření určena pyknometrem. [30]

Pro získání větší přesnosti měření je potřeba korekce vzdušné vztlakové síly při měření hmotnosti na vzduchu. Dále lze použít přepočít hustoty vzduchu v závislosti na tlaku a teplotě. Hmotnost, kterou jsme naměřili označíme m_{APP} [g], hustotu vzduchu ρ_{Air} [$g \cdot cm^{-3}$] (21), hustotu vzorku ρ_S [$g \cdot cm^{-3}$], hustotu použitých závaží ρ_L [$g \cdot cm^{-3}$], teplotu při zkoušení t [°C] a atmosférický tlak p [bar]. Takto získáme skutečnou hmotnost m_T podle vztahu (20), kterou použijeme pro stanovení hustoty. [30]

$$m_T = m_{APP} \cdot \left(1 + \frac{\rho_{Air}}{\rho_S} - \frac{\rho_{Air}}{\rho_L} \right) [g] \quad (20)$$

$$\rho_{Air} = \frac{0,00131}{(1 + 0,0067 \cdot t)} \cdot \frac{1}{P} [g \cdot cm^{-3}] \quad (21)$$

2.3.6. Dynamická mechanická analýza

Zkouška DMA (dynamic mechanical analysis) je metoda pro zjištění fyzikálních vlastností nejrůznějších materiálů. Mezi fyzikální vlastnosti měřené dle této zkoušky se řadí elastický modul E' , ztrátový modul E'' a fázový faktor $\tan(\delta)$. Zkouška spočívá v cyklickém zatěžování vzorku a měřením mechanické odezvy. Tímto nápadem se v Poyntingových laboratořích zabývali už na začátku 20.století, avšak rozšíření se dočkal až s příchodem dostatečně výkonných počítačů pro zpracování naměřených dat. [31–33]

Dnešní zařízení pro provádění DMA zkoušek (viz obr. 10) často podporují zatěžování v nejrůznějších prostředích, módech, ve velkém rozsahu teplot. Pomocí dalších přípravků je možné měřit na vzduchu, v kapalině, ve vlhkém prostředí a v plynných atmosférách. Teploty lze volit zhruba v rozmezí od $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lze analyzovat materiály nejen pevné, ale i kapaliny či pasty. Tudíž je to metoda vhodná jak pro kovy, tak i pro polymery, kompozity, ale i třeba keramiku. Pro všechny tyto zkoušky je zapotřebí přípravků a platí to i pro změnu módů zatěžování. Módů je celkem pět, tah/tlak, krut, konzolové ohýbání, dvojité konzolové ohýbání a tříbodový ohyb. Frekvence sinusoidního zatěžování se mohou pohybovat od 0,001 až do 1000 Hz a síla od 0,001 do 40 N. [31–33]



Obr. 10 – DMA analyzér Mettler Toledo [34]

Zkoušky DMA se často používají pro zjištění přechodové teploty, s čím souvisí proměnlivá teplota v průběhu zkoušky. Tudíž jedním z výsledků může být i závislost modulů a fázového faktoru na teplotě. Z této závislosti je možné odečíst přechodovou teplotu, jelikož při ní dojde k maximu fázového faktoru $\tan(\delta)$. Elastický modul E' nám udává, do jaké míry se materiál chová elasticky jako například oceli. Ztrátový modul E'' nám zase udává chování

viskózní. Fázový faktor $\tan(\delta)$ pak tyto dva moduly dává do poměru na základě čehož lze určit, jaká bude odezva materiálu na namáhání. Moduly a fázový faktor určíme podle následujících vztahů. Dále ve vztazích 22, 23 a 24 lze nalézt maximální napětí při zatěžování σ_0 , amplitudu deformace ε_0 a fázové zpoždění δ . [31–33]

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \cos(\delta) \quad (22)$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cdot \sin(\delta) \quad (23)$$

$$\delta = \arctan\left(\frac{E''}{E'}\right) \quad (24)$$

3. PRAKTICKÁ ČÁST

3.1. UltreX™ SureTouch™

Jedná se o kompozitní materiál od společnosti Norplex Micarta, přesněji o jejich modifikovaný kompozitní materiál G-10. Tato modifikace spočívá v přidání gumy jako jedné z vrstev, kdy se střídá vrstva gumy s několika vrstvami skelného vlákna. G-10 je kompozitní materiál s dlouhovláknovou výztuží ve formě skleněného vlákna a epoxidovou matricí. [35]



Obr.11– UltreX™ SureTouch™ [34]

3.2. Zjišťované mechanické vlastnosti

Pro kompozitní materiál UltreX™ SureTouch™ byla stanovena mez pevnosti v tahu, tlaku, případně meze kluzu v tahu a tlaku. Dále byl určen i modul pružnosti v tahu a tlaku, tento parametr však u tlaku byl stanoven orientačně, jelikož byl využit extenzometr pouze u zkoušky tahem. Stanovena byla též mez pevnosti, modul pružnosti v ohybu a rázová houževnatost při pokojové teplotě. Z fyzikálních vlastností byla stanovena hustota materiálu a přechodové teploty. Zkoušky byly provedeny podle norem viz Tabulka 5.

Tabulka 5 – Přehled použitých norem pro zkoušky

Veličina	Jednotky	Norma
Mez kluzu v tahu	[MPa]	ČSN EN ISO 527-4
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	
Modul pružnosti v tahu	[MPa]	
Mez kluzu v tlaku	[MPa]	ČSN EN ISO 604
Mez pevnosti v tlaku	[MPa]	
Modul pružnosti v tlaku	[MPa]	
Mez pevnosti v ohybu	[MPa]	ČSN EN 2562 a ČSN EN ISO 178
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	
Rázová houževnatost	[kJ/m ²]	ČSN EN ISO 179-1
Hustota	[g/cm ³]	ČSN EN ISO 1183-1
Přechodová teplota	[°C]	—

3.3. Zkouška v tahu

Zkouška v tahu byla provedena na stroji MTS Criterion Model 45 (viz Obr.13) při podmínkách podle normy ČSN EN ISO 527-4. Byla využita tělesa o rozměrech 250x25x5 mm (viz Obr. 12). Konkrétní podmínky zkoušky jsou uvedeny v Tabulce 6 a výsledky jednotlivých vzorků v Tabulce 7.



Obr. 12 – Vzorek pro zkoušku tahem



Obr. 13 – Zkouška tahem

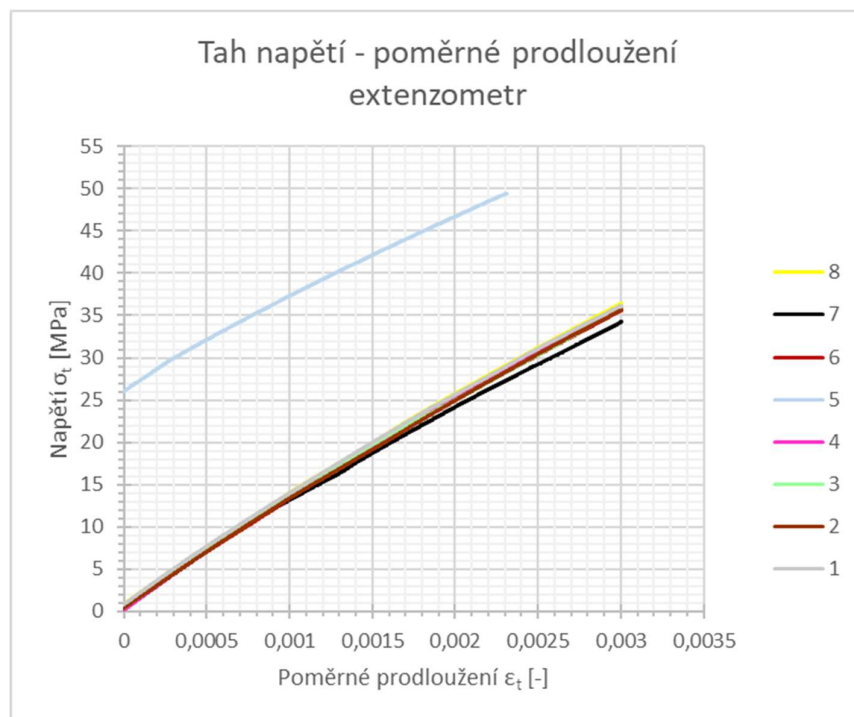
Tabulka 6 – Podmínky zkoušky

Rychlost zkoušky v_{zk}	2 mm/min
Vzdálenost mezi značkami L_0	50 mm
Vzdálenost mezi čelistmi L	170 mm

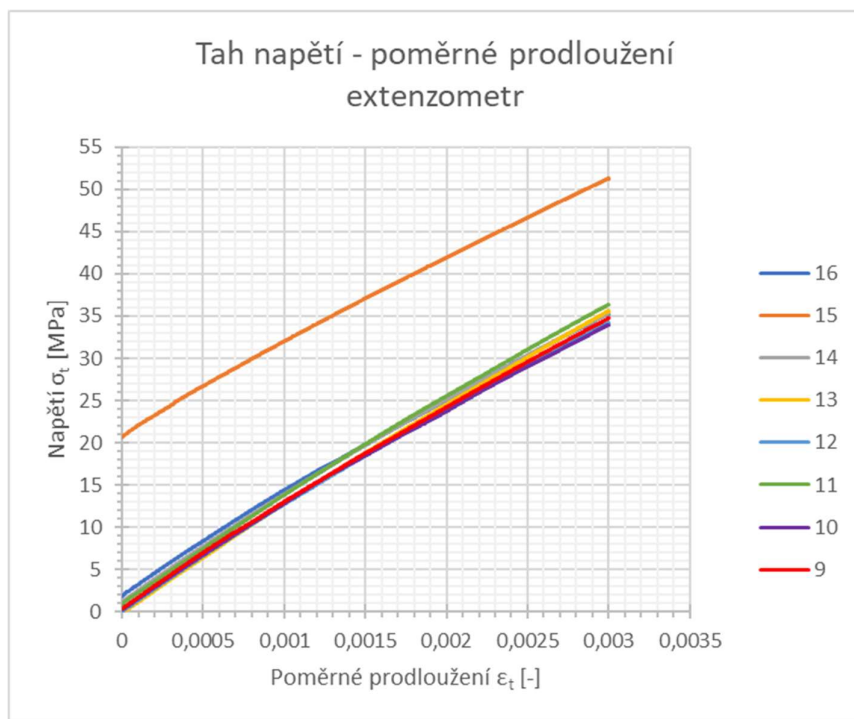
Tabulka 7 – Výsledky zkoušky tahem

	h [mm]	b [mm]	σ_{tm} [MPa]	$\sigma_{t1.max}$ [MPa]	σ_{tb} [MPa]	E_t [MPa]
1	5,03	25,02	72,87	60,04	49,49	11703,73
2	5,01	25,06	66,58	47,82	47,98	11699,83
3	5,04	25,09	66,31	62,88	49,24	11516,55
4	5,03	25,05	68,39	66,81	47,77	11744,86
5	—	—	—	—	—	—
6	5,03	25,06	70,87	52,37	48,69	11636,87
7	5,07	25,05	58,48	51,86	52,49	11058
8	5,01	24,98	65,88	48	45,47	11856,83
9	5,02	24,99	70,07	54,51	64,9	11301,62
10	5,06	25,09	66,11	56,5	47,97	11163,75
11	5,02	25,06	66,01	59,71	59,57	11806,09
12	5,06	25,07	66,41	53,72	45,18	11327,01
13	5,03	25,04	70,81	62,26	62,74	11865,25
14	5,07	25,06	70,33	65,73	56,62	11308,43
15	—	—	—	—	—	—
16	5,05	25,07	68,79	57,15	59,99	10989,08
\bar{x}	—		67,31	56,87	52,97	11482,63
$\dot{=}$			67,3	56,9	53	11500
s			3,298	6,27	6,89	308,87
$\dot{=}$			3,3	6,27	6,89	309

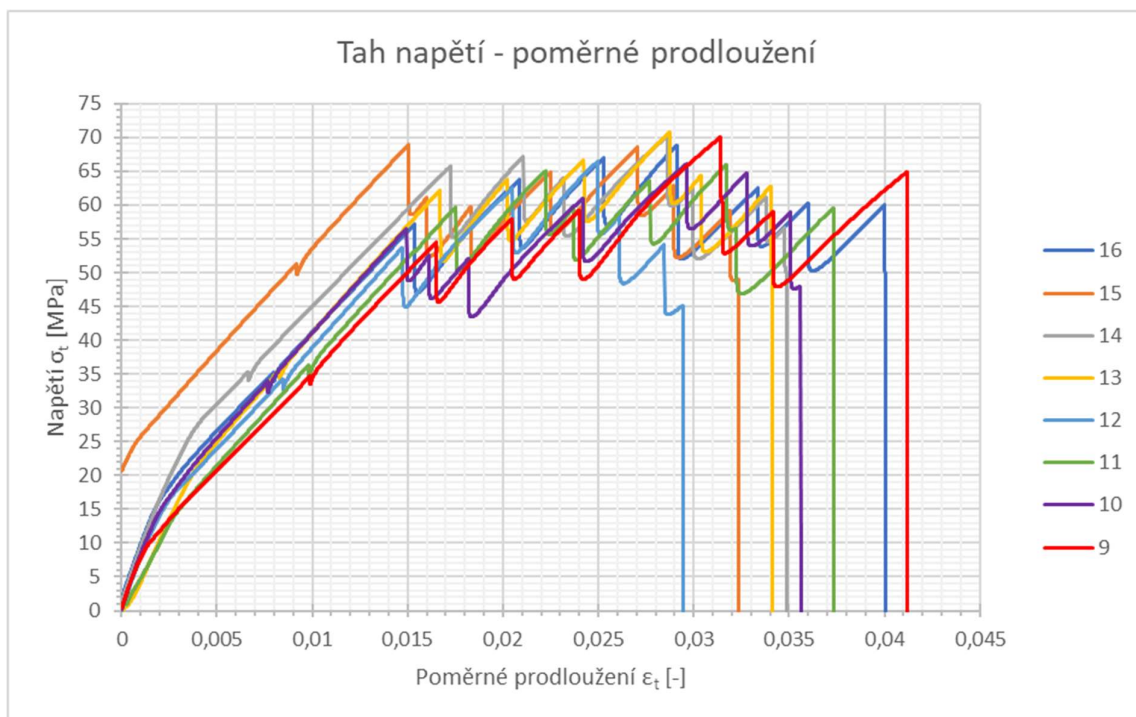
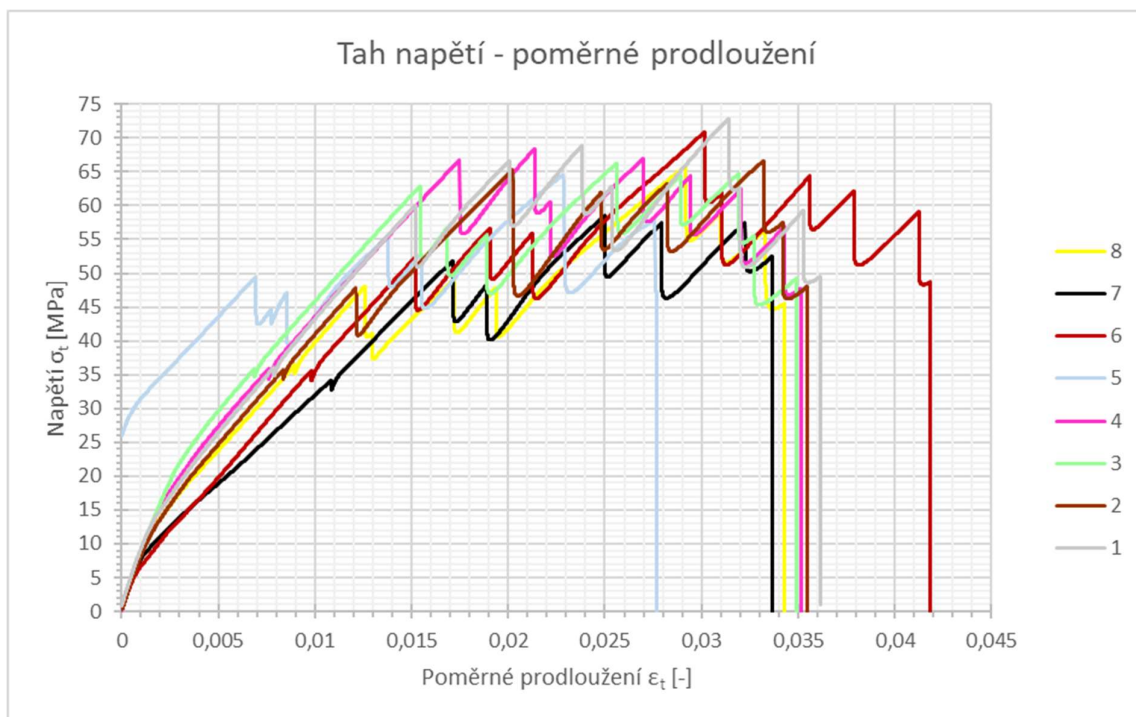
Na Obr. 14, 15 jsou uvedeny záznamy ze zkoušky tahem z měření s extenzometrem pro stanovení modulu pružnosti a na Obr. 16, 17 celkové průběhy tahové zkoušky do porušení.



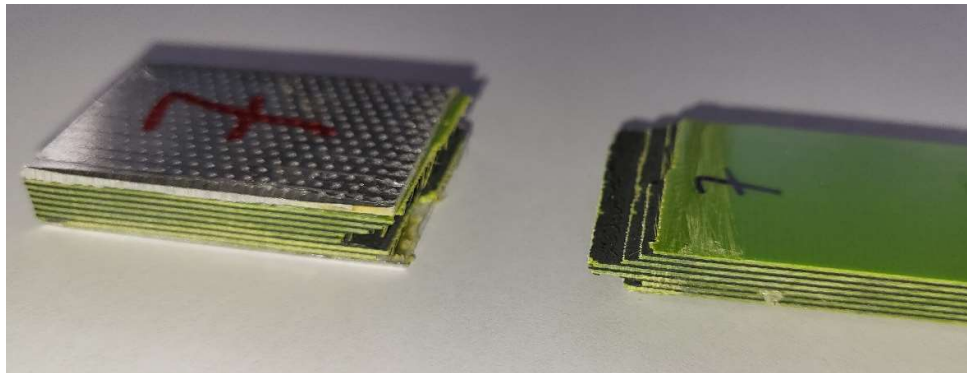
Obr. 14 – Graf průběhů měření s extenzometrem 1.skupiny zkoušky tahem



Obr. 15 – Graf průběhů měření s extenzometrem 2.skupiny zkoušky tahem



Během zkoušky se všechny vzorky porušili mimo střed vzorků (viz Obr. 18), vzorky 5 a 15 byly výrazně předepruty na počátku měření, proto byly vyřazeny.



Obr. 18 – Porušení vzorku u zkoušky tahem

Vzhledem k průběhům napětí – poměrné prodloužení bylo stanoveno pouze maximální napětí, napětí při přetržení, první maximum a modul pružnosti. Výsledky zkoušky jsou následovné:

$$\sigma_{tm} = (67,3 \pm 3,3) \text{ MPa}$$

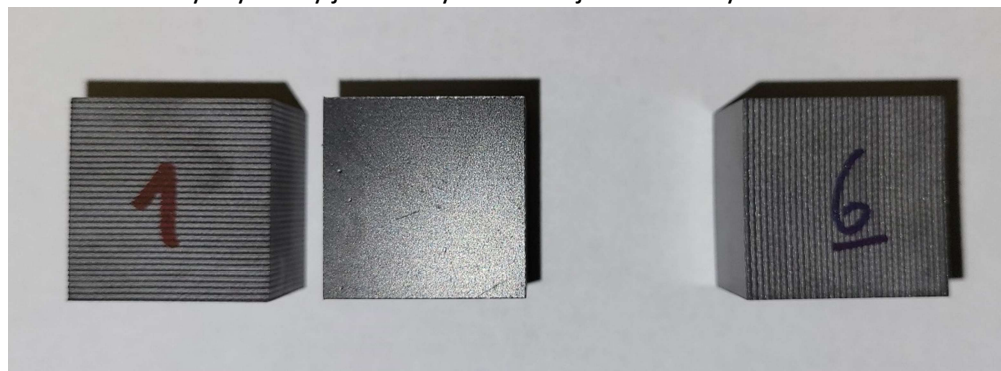
$$\sigma_{t1.max} = (56,9 \pm 6,27) \text{ MPa}$$

$$\sigma_{tb} = (53 \pm 6,89) \text{ MPa}$$

$$E_t = (11500 \pm 309) \text{ MPa}$$

3.4. Zkouška v tlaku

Zkoušky byly provedeny na stroji MTS Criterion Model 45 a stroji ZUZ 200 (viz Obr. 20) při rychlosti 2,5 mm/min podle normy ČSN EN ISO 604. Vzorky byly nařezány na kostky o rozměrech 25,25x25x25 mm (viz Obr. 19). Byly sestaveny dvě skupiny po pěti vzorcích, jenž se lišili způsobem zatěžování. První skupina byla zatěžována kolmo na vrstvy a druhá skupina rovnoběžně na vrstvy. Výsledky jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tabulkách 8 a 9.



Obr. 19 – Vzorky pro zkoušku tlakem



Obr. 20 – Zkouška tlakem

Tabulka 8 – Výsledky zkoušky tlakem 1.skupina (kolmo na vrstvy)

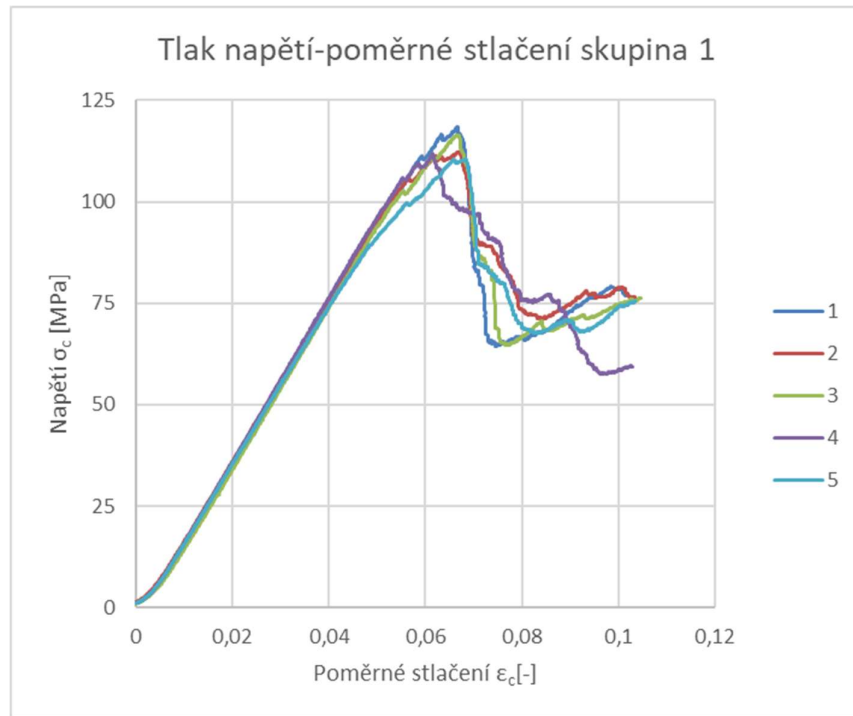
	b [mm]	h [mm]	σ_m [MPa]	E_c [MPa]
1	25,04	25	118,49	783,93
2	25,03	25,02	112,33	880,07
3	25,02	25,02	116,39	739,24
4	25,02	25	111,82	836,82
5	25,05	24,99	110,37	866,04
\bar{x}	—		113,88	821,22
\pm			114	821
s			3,41	58,79
\pm			3,41	58,8

Tabulka 9 – Výsledky zkoušky tlakem 2.skupina (rovnoběžně na vrstvy)

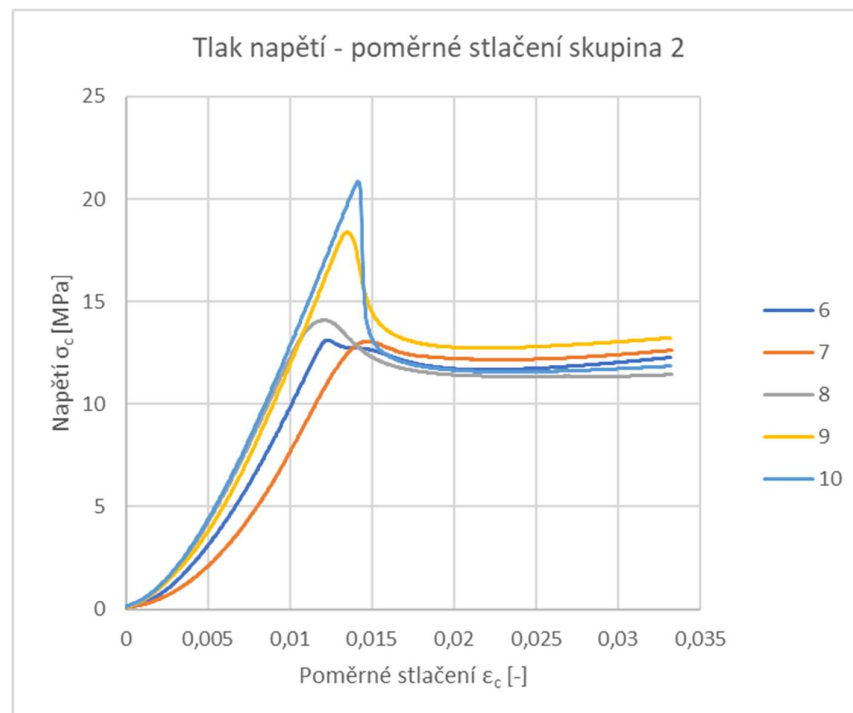
	b [mm]	h [mm]	σ_m [MPa]	E_c [MPa]
6	25,25	24,99	13,13	395,66
7	25,28	25,01	13,06	262,48
8	25,27	25,03	14,09	586,84
9	25,25	24,98	18,4	549,13
10	25,26	25	20,86	607,09
\bar{x}	—		15,91	480,24
\pm			15,9	480
s			3,53	147,29
\pm			3,53	147,3



Obr. 21 – Porušení vzorku z 1.skupiny po zkoušce tlakem



Obr. 22 – Graf průběhů 1.skupiny (kolmo na vrstvy) zkoušky tlakem



Obr. 23 – Graf průběhů 2.skupiny (kolmo na vrstvy) zkoušky tlakem

U vzorků skupiny 1 i 2 jsou v grafu vidět počáteční části křivky viz Obr. 22 a 23, které stoupají pomaleji než zbytek křivky, proto musely být ručně vybrány počátky křivek. Dále je na Obr. 21 vidět porušení vzorku ze skupiny 1. Výsledky jsou následující:

$$\sigma_{cm1} = (114 \pm 3,41) \text{ MPa}$$

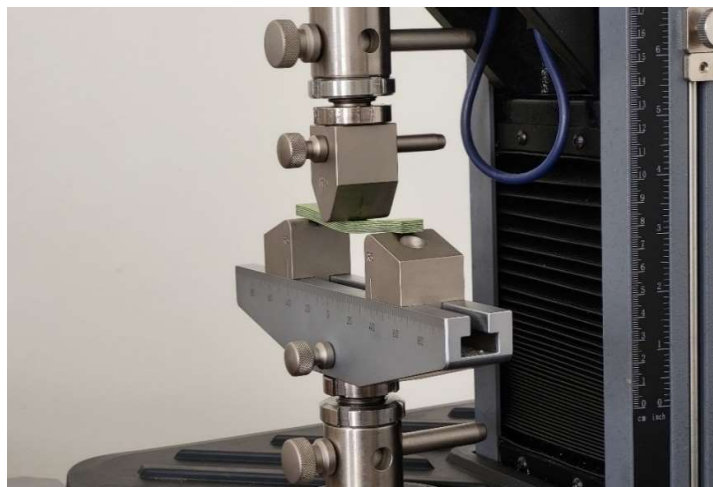
$$\sigma_{cm2} = (15,9 \pm 3,53) \text{ MPa}$$

$$E_{c1} = (821 \pm 58,8) \text{ MPa}$$

$$E_{c2} = (480 \pm 147) \text{ MPa}$$

3.5. Zkouška v ohybu

Zkoušky byly provedeny na stroji MTS E42.503 5kN (viz Obr. 24) při daných parametrech zkoušky (viz Tabulka 10). Rychlost byla stanovena podle normy ČSN EN 2562.



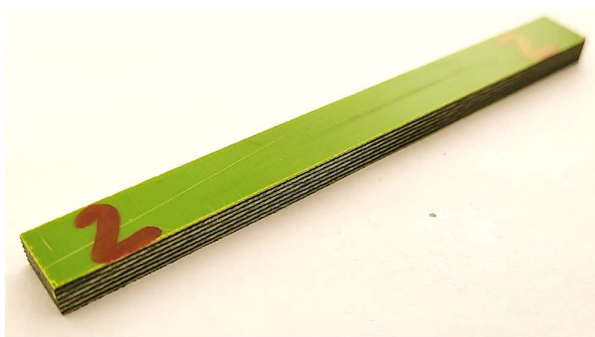
Obr. 24 – Zkouška na ohyb

Tabulka 10 – Podmínky zkoušky na ohyb

Rychlost zkoušky v_{zk}	5 mm/min
Poloměr zátěžného trnu r_1	5 mm
Poloměr podpěr r_2	5 mm
Vzdálenost podpěr l_p	80 mm

Zkušební tělesa byla zhotovena z vytvrzené desky kompozitu a nařezána na tělesa o rozměrech 100x10x5 mm viz Obr. 25. Vycházelo se ze zkušebních těles uvedených v normě ČSN EN 2562. Skupiny se mezi sebou liší tím, jak byly vzorky vloženy do stroje.

Skupina 1 byla hladkou stranou vzorku namířena na zatěžovací trn a protější strana o podpěry (viz Tabulka 11). Skupina 2 byla otočena o 180° okolo podélné osy vzorků (viz Tabulka 12).



Obr. 25 – Zkušební vzorek pro zkoušku ohybem

Tabulka 11 – Rozměry a výsledky těles na ohyb pro skupinu 1

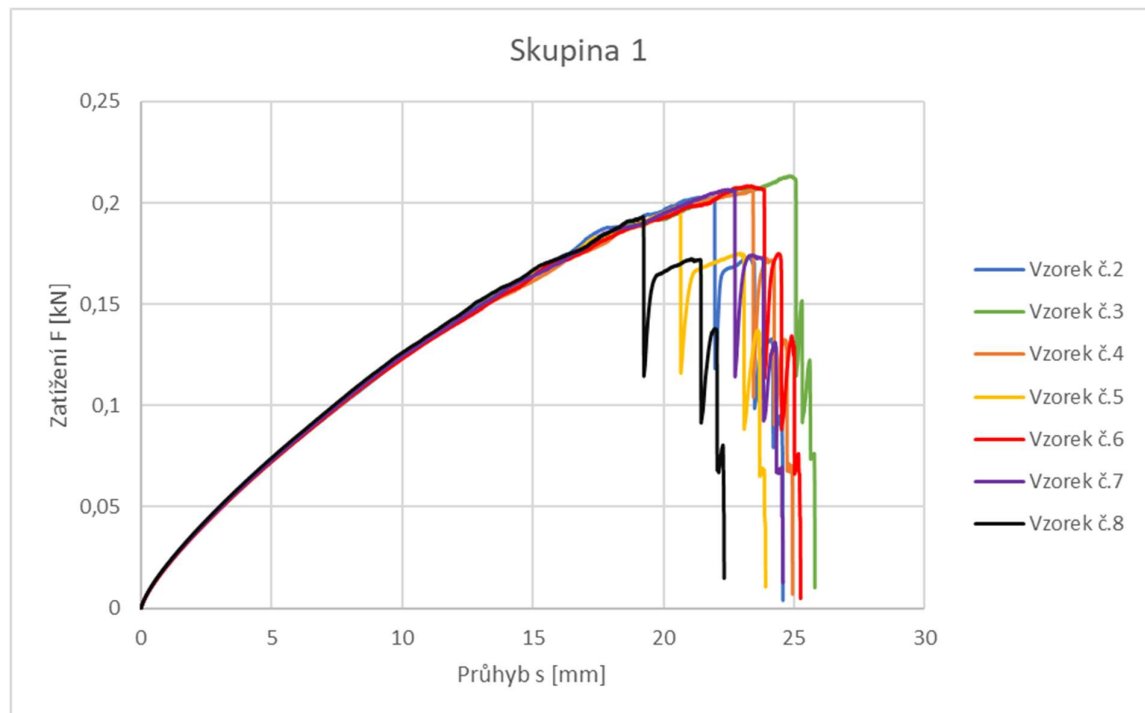
Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
2	10,1	5,06	94,08	2220,39
3	10,08	5,07	98,83	2228,86
4	10,09	5,06	95,93	2130,1
5	10,05	5,05	92,95	2180,7
6	10,09	5,08	96,06	2151,32
7	10,08	5,07	95,72	2211,47
8	10,09	5,07	89,41	2247,88
\bar{x}	—		94,71	2195,82
$\bar{\sigma}$			94,7	2200
s			2,97	43,16
\bar{s}			2,97	43,2

Tabulka 12 – Rozměry a výsledky těles na ohyb pro skupinu 2

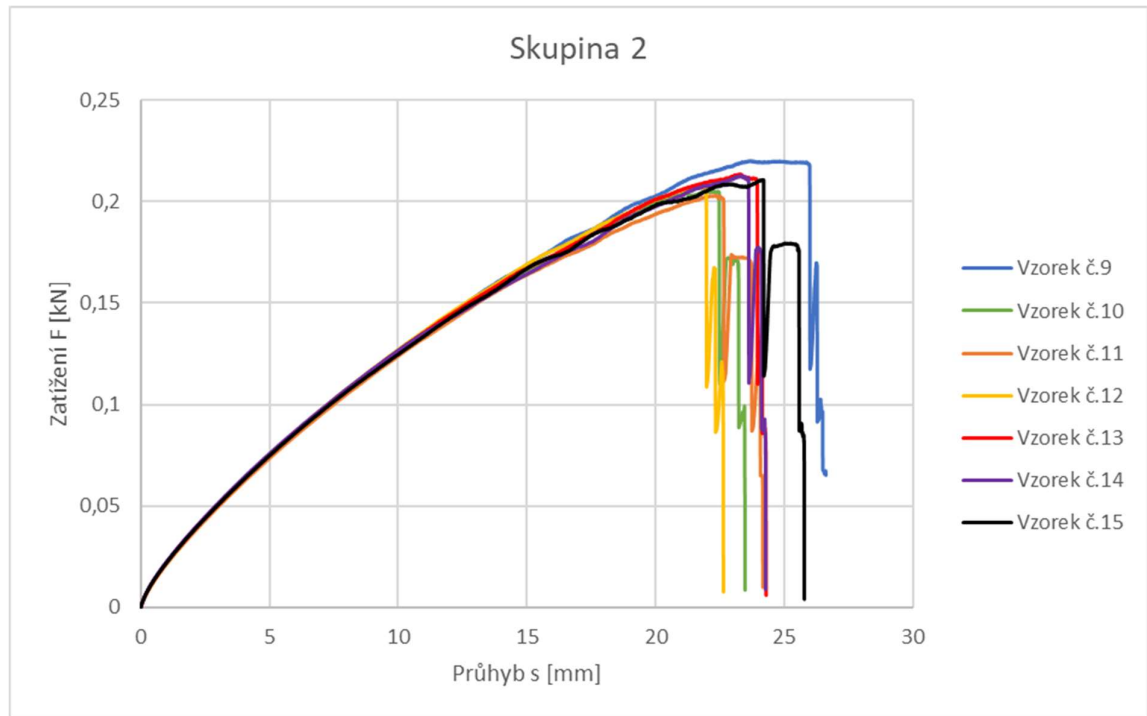
Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
9	10,1	5,06	102,12	2325,11
10	10,09	5,05	95,65	2240,98
11	10,09	5,07	93,91	2219,71
12	10,09	5,06	96,37	2241,81
13	10,08	5,05	99,68	2314,24
14	10,1	5,06	98,72	2288,98
15	10,09	5,06	97,87	2307,05
\bar{x}	—		97,76	2276,84
$\bar{\sigma}$			97,8	2280
s			2,74	41,96
\bar{s}			2,74	42

U všech měření byly nejprve stanoveny nejvyšší síly a z nich určena mez pevnosti v ohybu, následně byly určeny napětí v ohybu v deformacích ohybem $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,00025$, z nich byl určen modul pružnosti v ohybu (viz rovnice 13) podle ČSN EN ISO 178. Vyhodnocení bylo provedeno u obou skupin stejně.

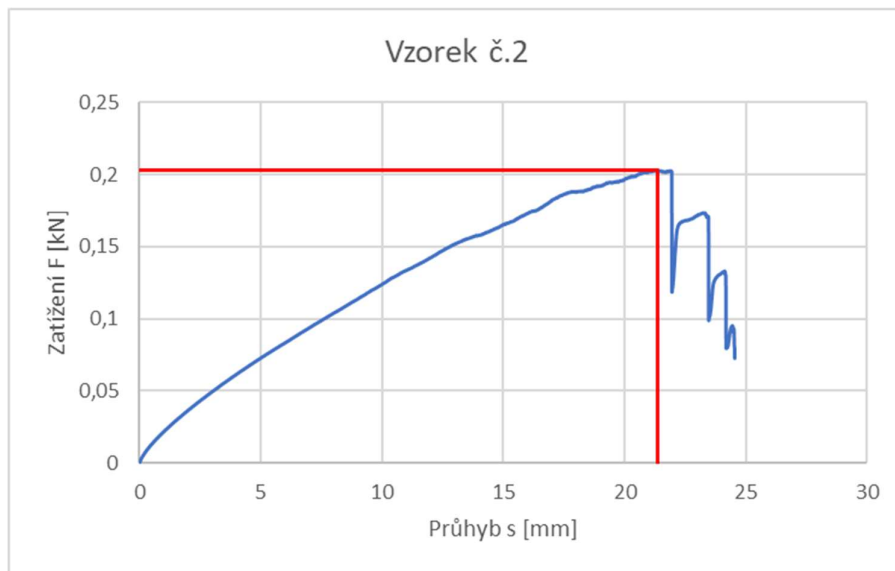
Byly také stanoveny průběhy zatížení v závislosti na průhybu. Zde jsou přiloženy grafy pro obě skupiny zvlášť viz Obr. 26 a 27 a druhý vzorek jako ukázkový pro zobrazení průběhu viz Obr. 28. Na Obr. 29 lze vidět tři vzorky po zkoušce ohybem.



Obr. 26 – Graf průběhů 1.skupiny zkoušky ohybem



Obr. 27 – Graf průběhů 2.skupiny zkoušky ohybem



Obr. 28 – Graf průběhu 2. vzorku zkoušky ohybem

Z naměřených hodnot vychází meze pevnosti a modul pružnosti v ohybu následovně:

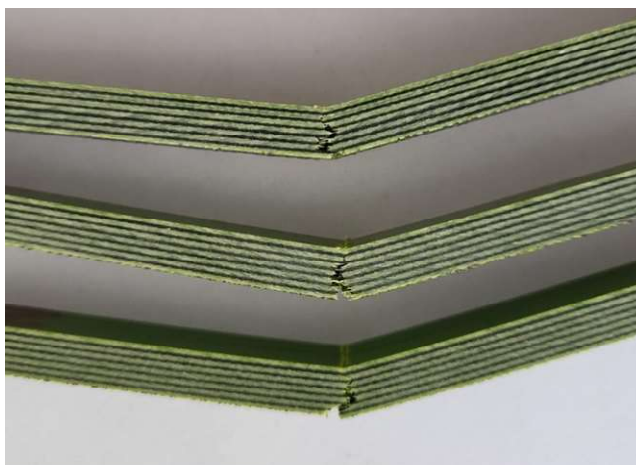
$$\sigma_{fM1} = (94,7 \pm 2,97) \text{ MPa}$$

$$\sigma_{fM2} = (97,8 \pm 2,74) \text{ MPa}$$

$$E_{f1} = (2200 \pm 43,2) \text{ MPa}$$

$$E_{f2} = (2280 \pm 42,0) \text{ MPa}$$

Dále byla provedena testová statistika získaných dat (viz Tabulka 13). Byly vytvořeny Q–Q grafy a proveden Shapiro–Wilkův test pomocí programu JASP (JASP Team (2022). JASP (Version 0.16.2)), jenž prokázal, že naměřená data jsou z normálního rozložení pravděpodobnosti. Poté byl proveden F – test pro zjištění shody rozptylů. Tyto testy prokázaly shodné rozptyly, proto byl dále proveden T – test pro shodné rozptyly. P – hodnota T – testů neprokázala významný rozdíl mezi skupinami až na vyhodnocení modulu pružnosti v ohybu. Proto stanovit Cohenova D má smysl pouze u tohoto modulu pružnosti a má velký efekt.



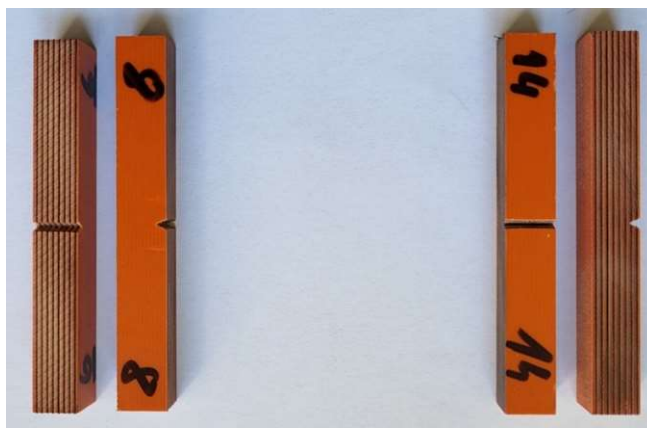
Obr. 29 – Porušení vzorků po zkoušce ohybem

Tabulka 13 – Testová statistika ohyb

		σ_{fM}	E_f
Shapiro–Wilkův test	Skupina 1	0,692	0,635
	Skupina 2	0,996	0,286
F – test		0,846	0,947
T – test		0,069	0,004
Cohenova D		–	1,903

3.6. Rázová houževnatost podle Charpyho

Zkoušku rázové houževnatosti byly provedeny na dvou Charpyho kladivech (viz Tabulka 14). Jedna sada vzorků byla s rázem rovnoběžně na vrstvy a druhá normálově na vrstvy. Byla použita zkušební tělesa s rozměry 80x10x10 mm (viz Obr. 30). Všechna zkušební tělesa byla opatřena vrubem, změřena a kondicionována při pokojové teplotě. Až následně byla přerážena (viz Obr. 31). Výsledky jednotlivých skupin jsou uvedeny v Tabulkách 15 a 16.



Obr. 30 – Vzorky pro zkoušku rázové houževnatosti

Tabulka 14 – Podmínky zkoušky

	Rozpětí L [mm]	Energie kladiva [J]
Rovnoběžně (skupina 1)	60	7,5
Normálově (skupina 2)	40	300

Tabulka 15 – Rozměry a výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro skupinu 1

Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]	b_N [mm]	E [J]	a_{cN} [kJ/mm ²]
2	10,24	9,98	7,9	2,82	35,77
3	10,63	9,99	8,39	3,06	36,51
4	10,38	10,02	7,96	2,79	34,98
5	10,91	10	8,27	3,15	38,09
6	10,55	9,95	8,2	3,05	37,38
7	10,76	10,02	8,1	2,87	35,36
8	10,65	9,99	8,25	3,18	38,58
9	10,33	10,02	7,83	2,87	36,58
10	10,35	10,01	7,85	2,94	37,42
\bar{x}					36,74
$\hat{=}$					37
s					1,23
$\hat{=}$					1,2

Tabulka 16 – Rozměry a výsledky zkoušky rázové houževnatosti pro skupinu 2

Číslo vzorku	b [mm]	h [mm]	b_N [mm]	E [J]	a_{cN} [kJ/mm ²]
12	9,98	10,73	7,56	9,4	115,88
13	9,99	10,47	7,67	9,9	123,28
14	10,07	10,44	7,73	9,4	116,48
15	9,97	10,55	7,68	10,1	124,65
16	9,99	10,59	7,72	10,2	124,76
17	10,07	10,28	7,69	9,8	123,97
18	9,97	10,05	7,74	10,3	132,41
19	9,99	10,37	7,7	10	125,24
20	9,98	10,35	7,73	10,6	132,49
\bar{x}					124,35
$\dot{=}$					120
s					5,78
$\dot{=}$					5,8



Obr. 31 – Porušené vzorky po zkoušce rázové houževnatosti

Z naměřených dat byly stanoveny následující vrubové houževnatosti:

$$a_{cN1} = (37 \pm 1,2) \text{ kJ/mm}^2$$

$$a_{cN2} = (120 \pm 5,8) \text{ kJ/mm}^2$$

3.7. Hustota

Pro vzorky na stanovení hustoty byly použity přeražené vzorky z vrubové houževnatosti (viz Obr.32). Měření se provádělo na elektronickém hustoměru SD-200L (viz Obr. 33) při teplotě 23 °C. Naměřená data jsou uvedeny v Tabulce 17.



Obr. 32 – Vzorky pro stanovení hustoty



Obr. 33 – Elektronický hustoměr SD-200L

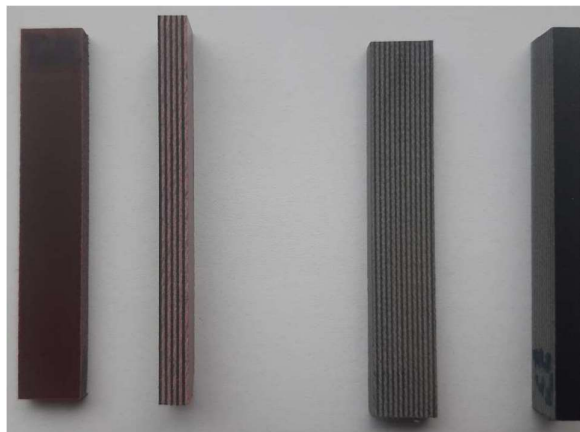
Tabulka 17 – Naměřená data hustota

Číslo vzorku	Hmotnost na vzduchu [g]	Hmotnost v ponorné kapalině [g]	Hustota [g/cm^3]
8	7,6213	3,3962	1,8038
5	7,8325	3,4755	1,7977
19	7,5354	3,327	1,7906
4	7,4427	3,305	1,7988
18	7,1559	3,152	1,7872
\bar{x}	—		1,7956
\pm			1,796
s			0,0067
\pm			0,007

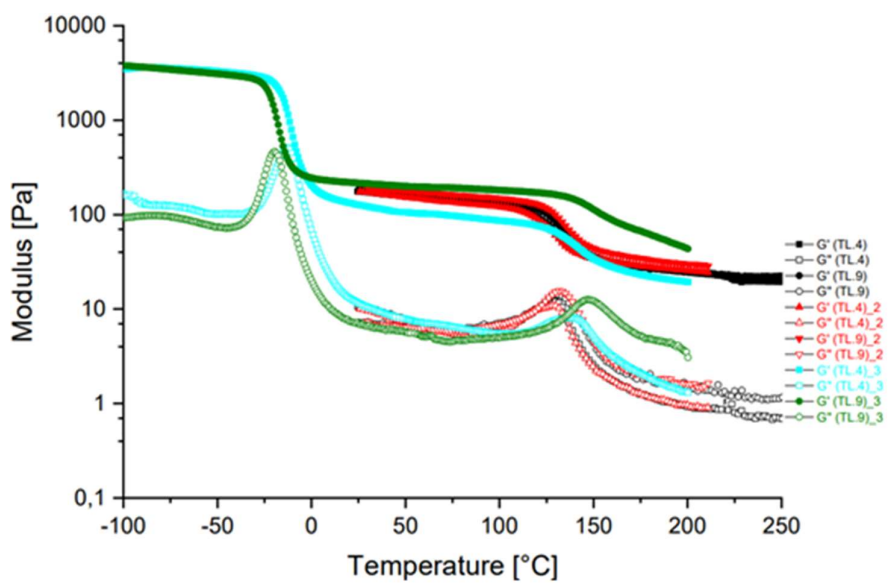
Výsledná hustota je $(1,796 \pm 0,007) g/cm^3$ (bez korekcí).

3.8. Zkoušky DMA

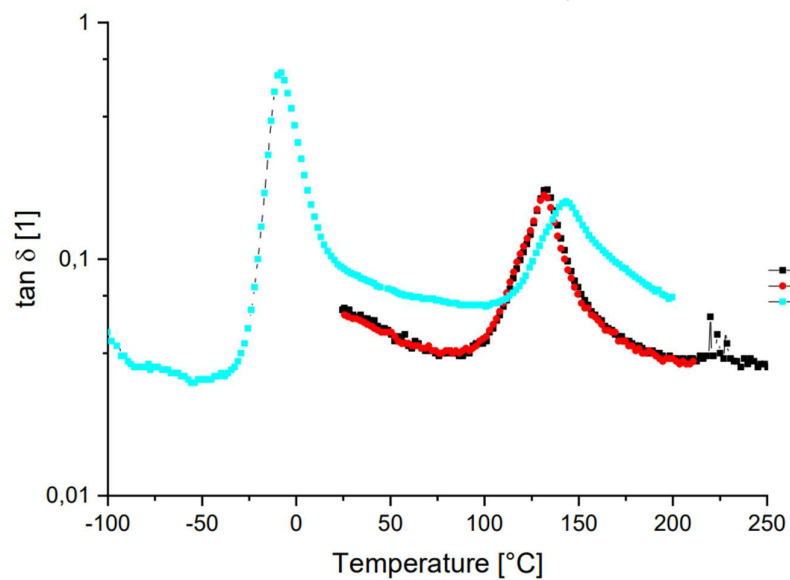
Zkoušky DMA byly provedeny na Akademii věd České republiky na Ústavu makromolekulární chemie na rotačním reometru Physica MCR 501 (Anton Paar). Pro toto měření bylo k dispozici pouze 6 vzorků o dvou různých tloušťkách označených jako TL4 a TL9 (viz Obr. 34). Probíhala dvě měření v teplotním rozsahu od $-100\text{ }^\circ\text{C}$ do $200\text{ }^\circ\text{C}$ a v rozsahu od $25\text{ }^\circ\text{C}$ do $250\text{ }^\circ\text{C}$. Byly stanoveny závislosti elastického, ztrátového modulu a fázového faktoru na teplotě (viz Obr. 35, 36, 37).



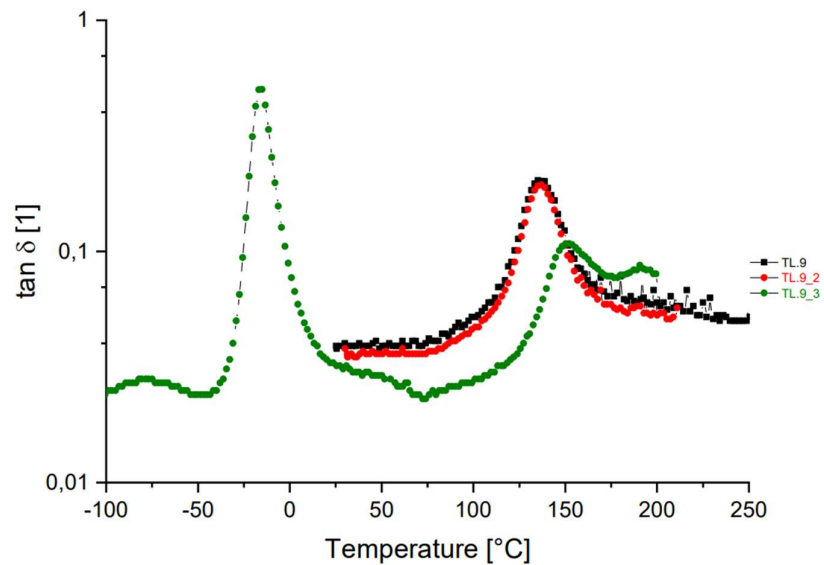
Obr. 34 – Vzorky pro zkoušku DMA



Obr. 35 – Závislosti modulů na teplotě



Obr. 36 – Závislost fázového faktoru na teplotě vzorku TL4



Obr. 37 – Závislost fázového faktoru na teplotě vzorku TL9

Z těchto naměřených závislostí byly stanoveny následující přechodové teploty (viz Tabulka 18).

Tabulka 18 – Tabulka výsledků zkoušky DMA

Rozsah 25 °C až 250 °C		
Vzorek	Tg [°C] 1.měření	Tg [°C] 2.měření
TL4	132	133
TL9	137	136
Rozsah -100 °C až 200 °C		
Vzorek	Tg1 [°C]	Tg2 [°C]
TL4	-9	143
TL9	-16	150

4. DISKUZE

Měření tahových vlastností přineslo zajímavé výsledky, protože všechny měly velmi podobný průběh. Z průběhů napětí a poměrného prodloužení je vidět postupné porušování jednotlivých vrstev. Hodnoty meze pevnosti nejsou vysoké a pohybují se v desítkách MPa, ale dosahují podobných hodnot jako skelná tkanina v epoxidové pryskyřici uvedené v přehledu mechanických vlastností vybraných kompozitů v knize Engineering Mechanics of Composite Materials 2nd Edition. Hodnota modulu pružnosti je však menší oproti zmíněnému kompozitnímu materiálu. [21]

Hodnoty meze pevnosti v tlaku jsou nižší při srovnání se stejným materiálem jako u zkoušky tahem. U vzorků s rovnoběžným zatížením vrstev velmi brzo docházelo ke ztrátě stability, nejspíš proto byly u této zkoušky také naměřeny největší odchylky. Vzorky s zatížením kolmo na vrstvy se porušovali podobně, ale i tak vidíme u hodnot modulu pružnosti větší rozptyl. [21]

Při zkoušce ohybem se všechny průběhy vzorků podobaly, proto i rozptyl naměřených hodnot je malý. Hodnoty meze pevnosti v ohybu jsou vyšší oproti mezi pevnosti v tahu zhruba o 40 MPa a nižší vůči mezi pevnosti v tlaku (kolmo na vrstvy) asi o 20 MPa, ale výrazně vyšší oproti mezi pevnosti v tlaku (rovnoběžně na vrstvy) asi o 80 MPa. Modul pružnosti v ohybu je řádově nižší než modul pružnosti v tahu, ale vyšší oproti modulům pružnosti v tlaku. Při porovnání s jednosměrně vyztuženým kompozitem se skelným vláknem s epoxidovou pryskyřicí z práce Gökhan Demircan a kol. vůči našemu materiálu jsou hodnoty meze pevnosti v ohybu vyšší a modul pružnosti v ohybu je o řád vyšší pro zmíněný kompozit. [36]

Směr rázu měl výrazný vliv na výsledné hodnoty vrubové houževnatosti. Při normálovém rázu vykazovaly vzorky až třikrát vyšší hodnoty vrubové houževnatosti oproti vzorkům při rovnoběžném rázu. Jednotlivá měření ve skupinách se nijak zásadně od sebe neliší a všechna tělesa se porušovala stejně, proto mají i malou výslednou směrodatnou odchylku.

Výsledná hodnota hustoty je nižší než v případě kompozitu z epoxidové pryskyřice a skelného vlákna, avšak vyšší než u některých gum. Hodnoty byly porovnány s hodnotami uvedenými na webových stránkách Performance Composites a Molded Dimensions. [37, 38]

Na základě naměřených dat ze zkoušky DMA lze konstatovat, že se vzorky mezi sebou mírně odlišují, jde však pouze o posunutí těchto průběhů. Větší variabilita dat byla zaznamenána u měření v teplotním rozsahu -100 °C až 200 °C. Při měření v druhém teplotním rozsahu se data více překrývají, nicméně i zde vykazují vzorky TL9 vyšší hodnoty modulů. Přechodová teplota zhruba od 130 °C do 150 °C odpovídá přechodové teplotě epoxidových pryskyřic z webové stránky Masterbond a nižší přechodová teplota okolo -10 °C odpovídá zhruba akrylonitrilovému kaučuku ze studie Changsheng Zheng a Sen Liang. [39, 40]

5. ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo zjistit mechanické a fyzikální vlastnosti kompozitního materiálu UltreX™ SureTouch™. Pro tento cíl byly vybrány zkoušky pro tah, tlak, ohyb, vrubovou houževnatost, hustotu a dynamicko mechanická analýza. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 7, 8, 11, 12, 13.

Konkrétně pro zkoušku v tahu byla stanovena pevnost v tahu ($67,3 \pm 3,3$) *MPa* a modul pružnosti v tahu (11500 ± 309) *MPa*.

Zkouška v tlaku byla provedena na dvou skupinách vzorků (podle směru zatěžování vrstev). Pevnost v tlaku u první skupiny (kolmo na vrstvy) byla zjištěna ($114 \pm 3,41$) *MPa* a modul pružnosti v tlaku ($821 \pm 58,8$) *MPa*. U druhé skupiny (rovnoběžně na vrstvy) byla pevnost v tlaku ($15,9 \pm 3,53$) *MPa* a modul pružnosti v tlaku (480 ± 147) *MPa*.

Pro zkoušku v ohybu byly určeny dvě skupiny vzorků, jež byly jinak natočeny vůči zatěžovacímu trnu. Pro skupinu číslo 1 (hladkou stranou na zatěžovací trn) byla pevnost v ohybu ($94,7 \pm 2,97$) *MPa* a modul pružnosti ($2200 \pm 43,2$) *MPa*. Pro skupinu 2 (hladkou stranou na podpěry) byla pevnost v ohybu ($97,8 \pm 2,74$) *MPa* a modul pružnosti ($2280 \pm 42,0$) *MPa*. Na výsledky byla použita testová statistika, jež ukázala významný rozdíl pouze u modulů pružnosti, tudíž vliv otočení vzorku na výsledky nelze jednoznačně prokázat.

Vrubová houževnatost byla měřena na dvou skupinách vzorků, jež se odlišovali ve směru rázu (rovnoběžný a normálový). Byly stanoveny dvě vrubové houževnatosti ($37 \pm 1,2$) *kJ/mm²* rovnoběžně na vrstvy a ($120 \pm 5,8$) *kJ/mm²* normálově na vrstvy.

Hustotu byla stanovena $(1,796 \pm 0,007) \text{ g/cm}^3$ ponornou metodou.

Poslední zkouškou byla dynamicko mechanická analýza, pomocí níž byly určeny tranzitní teploty 132 °C a 137 °C z prvního měření a 133 °C a 136 °C z druhého měření na rozsahu teplot od 25 °C do 250 °C. Pro rozsah -100 °C až 200 °C byly přechodové teploty -9 °C, -16 °C, 143 °C a 150 °C.

Do budoucna by bylo vhodné zařadit více zkoušek pro lepší pochopení chování tohoto komplexního kompozitního materiálu.

ZDROJE

- [1] PETRTÝL, Miroslav a Stavební fakulta. Mechanika kompozitních těles. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991. s. 22. ISBN 80-01-00639-5. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:5ced23b0-e738-11e8-9445-5ef3fc9bb22f>
- [2] HORÁČEK, Jaroslav. Nauka o materiálu. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2000. s. 65. ISBN 80-213-0397-2. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:98ea9f80-a273-11e5-82dc-5ef3fc9bb22f>
- [3] JANOVEC, Jiří, CEJP, Jiří, STEIDL, Josef a Strojní fakulta. Perspektivní materiály. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. s. [1a]. ISBN 978-80-01-04167-3. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:4fa3bd20-f3d3-11e8-95ba-5ef3fc9bb22f>
- [4] ZILVAR, Václav, KOŘÍNEK, Zdeněk a STEIDL, Josef. Plasty a kompozity: laboratorní cvičení : určeno pro stud. fak. strojní. Praha: ČVUT, 1990. s. 22. ISBN 80-01-00270-5. Dostupné také z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:43b62f70-a7b1-11e3-b74a-5ef3fc9ae867>
- [5] KUTZ, Myer. Handbook of Materials Selections. New York: John Wiley, 2002. ISBN 978-0-471-35924-1.
- [6] SUCHÝ, Tomáš. Kompozitní materiál v medicíně [online]. Praha, 2013 [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: http://www.csm-kompozity.wz.cz/tomas_suchy_kompozity.pdf. Přednáška. Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze.
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] METAL MATRIX COMPOSITE (MMC) MATERIALS. CRP MECCANICA [online]. Modena [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.crpmeccanica.com/machining-metal-matrix-composites-mmc/>
- [9] YIN, Jian, Huan ZHANG, Kailun BAI, Xiang XIONG, Hongbo ZHANG a Denghao MA. Effect of carbon matrix on mechanical and tribological properties of Cf/Cu/C composites. Materials Characterization [online]. 2020, 168 [cit. 2022-02-28]. ISSN 10445803. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2020.110551
- [10] BUCKLEY, John D. a Dan D. EDIE. Carbon-Carbon Materials and Composites [online]. Mill Road, Park Ridge, New Jersey 07656: Noyes Publications, 1993 [cit. 2022-02-28]. ISBN 9780815516293.

- [11] CHIDHANANDA, R.S. a B. NAVANEETH. Fabrication and testing of bagasse and coir fibre reinforced composite material. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021 [cit. 2022-02-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.08.208
- [12] , Reza, Hassan SHOKROLLAHI a S. Mohammad Reza KHALILI. Experimental and numerical analysis of a biodegradable hybrid composite under tensile and three-point bending tests. *Composite Structures* [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2021.114255
- [13] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály* [online]. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2021-12-16]. ISBN 80-708-0600-1.
- [14] KOŘÍNEK, Zdeněk. Vlákna. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. Praha, 2016, 2016 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/13laXaUZ1GDDetCdZ1KaufjHLRdTLNomu/view>
- [15] *Fiberglass – Types, Properties, and Applications Across Industries. Phelps gaskets* [online]. Maryland, 2021 [cit. 2022-06-14]. Dostupné z: <https://www.phelpsgaskets.com/blog/fiberglass--types-properties-and-applications-across-industries>
- [16] HU, H. a Y. LIU. High modulus, high tenacity yarns. *Technical Textile Yarns* [online]. Elsevier, 2010, 2010, 329-386 [cit. 2022-06-14]. ISBN 9781845695491. Dostupné z: doi:10.1533/9781845699475.2.329
- [17] *Aramid & Kevlar Composites*. [Http://www.dexcraft.com](http://www.dexcraft.com) [online]. 05-200 Helenów 13, Poland [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <http://www.dexcraft.com/articles/aramids/aramid-kevlar-composites/>
- [18] KOŘÍNEK, Zdeněk. Definice a historie. KOŘÍNEK, Zdeněk. *Kompozity* [online]. Praha, 2016, 2016 [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1buTHQ0wJf-MA5sFzvi89f5Tm9r0qKFAb/view>
- [19] JEONG, Young Gyu a Ji-Eun AN. UV-cured epoxy/graphene nanocomposite films: preparation, structure and electric heating performance. *Polymer International* [online]. 2014, 63(11) [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1002/pi.4713

- [20] NGUYEN, Thien Vuong, Phi Hung DAO, Tuan Anh NGUYEN, et al. Photocatalytic degradation and heat reflectance recovery of waterborne acrylic polymer/ZnO nanocomposite coating. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2020, 137(37) [cit. 2022-06-13]. ISSN 0021-8995. Dostupné z: doi:10.1002/app.49116
- [21] DANIEL, Issac M. a Ori ISHAI. *Engineering Mechanics of Composite Materials 2nd Edition*. 2. New York: Oxford University Press, 2006. ISBN 9780195150971.
- [22] DYNAMICAL MECHANICAL ANALYSIS. *Polymer Properties Database* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/DMA.html?fbclid=IwAR3y8VxWG7OplgxTRqvAspp5NxZW2fiosm8MobRrhJbFj_GAsWUOI08OrpM
- [23] ŠVECOVÁ, Veronika. Termomechanická analýza kompozitních materiálů s uhlíkovými částicemi [online]. *Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, 461 17 Liberec 1, 2018* [cit. 2022-06-13]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/154163/DPsvecova.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [24] ČSN EN ISO 527. *Plasty – Stanovení tahových vlastností*
- [25] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: publi.cz, 2006 [cit. 2021-12-16]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [26] ČSN EN ISO 604. *Plasty – Stanovení tlakových vlastností.*
- [27] ČSN EN ISO 178. *Plasty – Stanovení ohybových vlastností.*
- [28] ČSN EN 2562. *Letectví a kosmonautika – Plasty vyztužené uhlíkovými vlákny – Jednosměrné kompozity - Zkouška ohybem ve směru vláken*
- [29] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*
- [30] ISO 1183–1. *Plastics – Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method*
- [31] FOSTER, Gary. *What is Dynamic Mechanical Analysis (DMA)?* *Coventive Composites* [online]. Chesterfield, 22.4.2018 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://coventivecomposites.com/explainers/dynamic-mechanical-analysis-dma/>

- [32] DYNAMICAL MECHANICAL ANALYSIS. POLYMER PROPERTIES DATABASE [online]. [cit. 2022-07-23]. Dostupné z: https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/DMA.html?fbclid=IwAR3y8VxWG7OplgxTRqvAspp5NxZW2fiosm8MobRrhJbFj_GAsWUOI08OrpM
- [33] MEYERS, Marc A. a Krishan Kumar CHAWLA. Mechanical behavior of materials. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-86675-0.
- [34] Dynamic Mechanical Analyzer (DMA). METTLER TOLEDO [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://www.mt.com/int/en/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/DMA.html#models-and-specs
- [35] G-10 Handle Material | Suretouch | Ultrex Composites [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.ultrexcomposites.com/suretouch/>
- [36] DEMİRCAN, Gökhan, Mustafa ÖZEN a Murat KISA. Cam Fiber Takviyeli Epoksi Kompozitleri Farklı Yükleme Hızlarında Eğilme Özellikleri. Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik [online]. 2020, 22(64), 271-276 [cit. 2022-07-18]. ISSN 1302-9304. Dostupné z: doi:10.21205/deufmd.2020226426
- [37] Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials. Performance composites [online]. Taunton [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp
- [38] Physical Properties Of Rubber | Molded Dimensions. Molded Dimensions [online]. Port Washington [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://moldeddimensions.com/comparative-physical-properties.php>
- [39] ZHENG, Changsheng a Sen LIANG. Improving interfacial shear strength of co-cured sandwich composites by designing novel damping layer. Journal of Alloys and Compounds [online]. 2021, 854 [cit. 2022-07-18]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/j.jallcom.2020.157175
- [40] How To: Optimizing the Glass Transition Temperature (Tg). Masterbond [online]. Hackensack [cit. 2022-07-18]. Dostupné z: <https://www.masterbond.com/techtips/how-optimizing-glass-transition-temperature-tg>