



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ
KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ VYTISKNUTÝCH ADITIVNÍ
TECHNOLOGIÍ 3D TISKU**

ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS PRINTED BY ADDITIVE 3D
PRINTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Mudrák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Michal Mudrák
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů vytisknutých aditivní technologií 3D tisku

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat analýzou mechanických vlastností vzorků vytisknutých aditivní technologií s využitím dostupných 3D tiskáren. Normalizované vzorky budou vyrobeny z vybraných kompozitních materiálů (typů vláken) a následně testovány za pomoci dostupných zkušebních zařízení. Testování vzorků bude realizováno pro dva typy rozdílných výplní. Získaná data z průběhu testování zkušebních vzorků budou statisticky zpracována s využitím výpočetní techniky. Práce bude ukončena zhodnocením dosažených výsledků a celkovým doporučením pro uživatele.

Cíle diplomové práce:

Teoretická část – charakteristika kompozitních materiálů, rozbor mechanických zkoušek.
Experimentální část – výroba vzorků, provedení mechanických zkoušek, zpracování výsledků.
Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80--4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 14-419-1120-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou mechanických vlastností kompozitních materiálů používaných pro 3D tisk společností Markforged. Teoretická část je zaměřena na charakteristiku kompozitních materiálů a rozbor mechanických zkoušek. Experimentální část se zabývá výrobou zkušebních vzorků pro konkrétní mechanické zkoušky (zkouška tahem, zkouška tvrdosti Shore D a zkouška ohybem). Zkušební vzorky se základním materiálem Onyx jsou jednotlivě vyztuženy uhlíkovými a vysokoteplotními skleněnými vlákny (HSHT). Pro jednotlivé mechanické zkoušky jsou statisticky vyhodnoceny vybrané parametry (mez pevnosti v tahu, tažnost, modul pružnosti, tvrdost Shore D, napětí v ohybu a deformace ohybem). Diplomová práce je ukončena srovnáním vybraných parametrů kompozitních materiálů s celkovým doporučením pro uživatele.

Klíčová slova

aditivní technologie, mechanické vlastnosti, kompozitní materiál, 3D tisk, vyztužující vlákno

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of mechanical properties of composite materials used for 3D printing by Markforged company. The theoretical part is focused on the characterization of composite materials and analysis of mechanical tests. The experimental part deals with the production of test specimens for specific mechanical tests (tensile test, Shore D hardness test and bending test). The test samples with Onyx base material are individually reinforced with carbon and high-temperature glass fibers (HSHT). There are statistically evaluated selected parameters for individual mechanical tests (tensile strength, elongation, modulus of elasticity, Shore D hardness, bending stress and bending deformation). The thesis is completed by comparing selected parameters of composite materials with overall recommendations for users.

Key words

additive technology, mechanical properties, composite material, 3D print, reinforcing fiber

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUDRÁK, Michal. *Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů vytisknutých aditivní technologií 3D tisku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132588>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Analýza mechanických vlastností kompozitních materiálů vytisknutých aditivní technologií 3D tisku* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

21. 05. 2021

.....
Datum

.....
Bc. Michal Mudrák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji zaměstnancům Katedry strojírenství Fakulty vojenských technologií Univerzity obrany za poskytnutí laboratorního vybavení a odbornou asistenci při realizaci mechanických zkoušek.

Děkuji také panu Ing. Josefu Bednářovi, Ph.D. za cenné rady v oblasti statistického vyhodnocení naměřených dat.

Závěrem bych chtěl poděkovat své přítelkyni Natálii Caletkové a celé své rodině za podporu během studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 Teoretická část	11
1.1 Kompozitní materiály.....	11
1.1.1 Klasifikace kompozitních materiálů	12
1.1.2 Výztuže kompozitních materiálů	12
1.1.3 Matrice	18
1.1.4 Výhody a nevýhody kompozitních materiálů	19
1.2 Klasifikace technologie 3D tisku kompozitních materiálů	20
1.2.1 Metody sycení vlákna	20
1.2.2 Společnosti v průmyslu.....	22
1.3 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů	23
1.3.1 Zkouška tahem	24
1.3.2 Zkouška tvrdosti	31
1.3.3 Zkouška ohybem.....	34
2 Experimentální část – Výroba vzorků a jejich zkoušky	36
2.1 Použitá technologie.....	36
2.1.1 Použité materiály	36
2.1.2 Tiskové parametry	37
2.2 Zkouška tahem	37
2.2.1 Výběr zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku.....	37
2.2.2 Tvorba modelu zkušebního vzorku.....	38
2.2.3 Výroba zkušebních vzorků	38
2.2.4 Provedení tahové zkoušky	40
2.3 Zkouška tvrdosti	43
2.3.1 Výběr zkušebního tělesa pro zkoušku tvrdosti	43
2.3.2 Tvorba modelu zkušebních vzorků.....	43
2.3.3 Výroba zkušebních vzorků	43
2.3.4 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore D	45
2.4 Zkouška ohybem.....	46
2.4.1 Výběr zkušebního tělesa pro zkoušku ohybem.....	46

2.4.2	Tvorba modelu zkušebního vzorku.....	46
2.4.3	Výroba zkušebních vzorků	46
2.4.3	Provedení zkoušky ohybem	48
3	Vyhodnocení naměřených dat	50
3.1	Vyhodnocení tahové zkoušky	50
3.1.1	Výsledky tahové zkoušky Onyx (100 %) + CF vlákna	52
3.1.2	Výsledky tahové zkoušky Onyx (25 %) + CF vlákna	53
3.1.3	Výsledky tahové zkoušky Onyx (100 %) + HSHT vlákna.....	54
3.1.4	Výsledky tahové zkoušky Onyx (25 %) + HSHT vlákna.....	55
3.2	Vyhodnocení tvrdosti Shore D	56
3.2.1	Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + CF vlákna.....	56
3.2.2	Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + CF vlákna.....	57
3.2.3	Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + HSHT vlákna	57
3.2.4	Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + HSHT vlákna	57
3.3	Vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem	58
3.3.1	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (100 %) + CF vlákna.....	58
3.3.2	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + CF vlákna	59
3.3.3	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (100 %) s HSHT vlákny	60
3.3.4	Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + HSHT vlákny.....	61
4	Technické zhodnocení	62
4.1	Srovnání meze pevnosti v tahu	62
4.2	Srovnání tažnosti.....	63
4.3	Srovnání modulu pružnosti v tahu	64
4.4	Srovnání tvrdosti Shore D.....	65
4.5	Srovnání pevnosti v ohybu	66
4.6	Srovnání deformace ohybem	67
4.7	Celkové zhodnocení pro uživatele	68
	ZÁVĚR	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	71
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

Běžné obráběcí metody mohou být z důvodů nízkého využití materiálu či obtížného odebírání materiálu z geometricky složitých objektů nevhodné. Zde nastává možnost použití technologie 3D tisku.

Jedná se o aditivní technologii, jejíž vývoj se neustále zrychluje. Směřuje k využívání nových technologií či materiálů, které nelze využít pro běžné konvenční obrábění. Do hledáčku se tak dostávají různé druhy polymerů, kovů či kompozitních materiálů.

Hlavní předností technologie 3D tisku je možnost tvorby tvarově složitých objektů s rozdílnými vnitřními strukturami s minimálním množstvím odpadu. Pro vhodný způsob výroby součástí je nezbytná znalost mechanických vlastností konkrétního materiálu při různých způsobech zatěžování či za různých stavů.

V poslední dekádě klesly pořizovací náklady 3D tiskáren, díky čemuž se staly přístupnými pro běžné spotřebitele. V mnoha domácnostech je dnes možné vidět FFF (Fused Filament Fabrication) 3D tiskárnu, jejíž pořizovací náklady se pohybují v řádech několika tisíc korun. V drtivé většině případů se však jedná pouze o „hobby“ 3D tiskárny, které není možné srovnávat s profesionálními průmyslovými tiskárnami, jež jsou kvalitou tisku, zpracováním či servisem na vysoké úrovni.

Nejběžnějšími materiály pro 3D tisk jsou polymery, které nacházejí využití hlavně díky nízkým pořizovacím nákladům, nízké měrné hmotnosti a jednoduchému zpracování. V posledních letech se průmysl začíná orientovat na vývoj kompozitních materiálů kvůli omezeným mechanickým vlastnostem polymerních materiálů.

Kompozitní materiál je složen ze dvou a více odlišných materiálů. Kombinací takových materiálů lze dosáhnout nových charakteristických vlastností, kterých by jednotlivé složky nebyly schopny dosáhnout. Díky množství možných kombinací materiálů existuje široká škála vlastností, které umožňují využití kompozitních materiálů v mnoha odvětvích průmyslu. Obecně jsou hlavními přednostmi vysoké pevnosti při nízké měrné hmotnosti [1].

Existuje několik metod 3D tisku kompozitních materiálů. Principy vybraných metod jsou popsány v teoretické části. Experimentální část diplomové práce tvoří analýza mechanických vlastností zkušebních vzorků zhotovených pomocí 3D tiskárny Marforged X7. Matrice je tvořena materiálem Onyx (nylon plněný mikro uhlíkovými vlákny) [2], která je vyztužena uhlíkovými vlákny nebo vysoko pevnostními teplotně odolnými skleněnými vlákny [2].

V celé délce diplomové práce budou uhlíková vlákna označována pouze zkratkou CF (Carbon Fiber) a vysoko pevnostní teplotně odolná skleněná vlákna zkratkou HSHT (High Strength High Temperature). Práce navazuje na následující poznatky prací z oblasti analýzy mechanických vlastností kompozitních materiálů zhotovených aditivní technologií.

Vliv orientace vláken a způsob upnutí zkušebních vzorků z důvodu ortotropního chování kompozitního materiálu popisuje článek [3]. Kompozity vyztužené spojitými vlákny mají při zatížení ve směru vláken několikanásobnou pevnost v tahu proti zatížení ve směru kolmém. U CF vláken dosahuje hodnota pevnosti v tahu dvacetinásobně až třicetinásobně vyšších hodnot pro zatížení ve směru vláken [3].

Vliv orientace vláken popisuje také studie [4]. Výsledky ukazují na závislost pevnosti na vyztužujících vláknech při zatížení ve směru hlavního napětí (ve směru vláken). Při orientaci vláken v kolmém směru je výsledná pevnost závislá hlavně na samotné matici a adhezi matrice s vlákny [4].

Zkušební vzorky zhotoveny z materiálu ABS (Akrylonitributandiensterenu), kdy 5 % objemu bylo tvořeno CF vlákny popisuje studie [5]. Vzorky vykazují vyšší pevnost v tahu o 22,5 % a vyšší pevnost v ohybu o 11,82 % ve srovnání s čistým ABS [5]. Pokud byl objem vláken vyšší (> 9 %), docházelo k silné pórovitosti v mikrostruktuře, což způsobovalo zhoršení mechanických vlastností [5].

Chování při zkoušce třibodovým ohybem dle normy ASTM-D2344 zkoumá studie [6]. Během této zkoušky došlo k šíření trhliny v příčném směru ohybu. Převládajícím způsobem porušení byla delaminace [6], což poukazuje na slabou adhezi mezi vrstvami matrice a vláken. Zkušební vzorky byly zhotoveny z matrice tvořené materiálem Onyx [2] a vyztužujících CF vláken [2]. Interlaminární pevnosti ve smyku dosahovaly téměř trojnásobných hodnot (až 30,5 MPa) ve srovnání s nevyztuženým materiálem Onyx [6]. Těchto hodnot bylo dosaženo pro soustřednou i izotropní orientaci tisku vláken [6]. Po dosažení interlaminární pevnosti ve smyku vykazovaly zkušební vzorky vyztužené soustředně orientovanými vlákny účinnější přenos zatížení a větší tvárnost [6].

Výše uvedená studie zkoumala také vliv orientace vyztužujících vláken při tahové zkoušce. Zkušební vzorky dle normy ASTM D638-14 (typu II) se soustředně orientovanými vlákny vykazují o 13,6 % vyšší pevnost v tahu ve srovnání s izotropní orientací výplně při obdobné tuhosti [6].

Mechanické vlastnosti při tahové zkoušce materiálu Onyx a kompozitních materiálů (Onyx + CF/ HSHT vlákna) byly analyzovány v diplomové práci [7]. V tab. 1 jsou uvedeny průměrné hodnoty sledovaných parametrů. U většiny zkušebních vzorků vyztužených spojitými vlákny došlo k lomu ve vrubové části [7]. Dle normy ČSN ISO 527-2:2012 mělo dojít k vyřazení takto přetržených vzorků [7]. Pro četnost tohoto jevu byly zkušební vzorky zařazeny do statistického hodnocení [7]. V experimentální části bude snaha o ověření tohoto jevu, případné navržení možného řešení a porovnání naměřených hodnot s touto diplomovou prací.

Tab. 1 Naměřené hodnoty závěrečné práce [7].

Materiál	Rm [MPa]	E [MPa]	At [%]
Onyx	23,8	175,6	49,6
Onyx + CF vlákna	136,6	596,2	15,5
Onyx + HSHT vlákna	153,6	440,0	24,4

Při analýze vlivu hustoty výplně [8] byla zjištěna vyšší tuhost a pevnost v tahu u dílců s hustší výplní. Toto tvrzení potvrzuje článek [9], ve kterém jsou pozorovány vzorky nylonu s hustotou výplně 60 % a 100 %, které jsou vyztuženy 20 % objemu CF vlákny. Zkušební tělesa vykazovala při 100 % hustotě výplně přibližně trojnásobné zlepšení pevnosti v tahu a tuhosti proti vzorkům s 60 % hustotou výplně základního materiálu [9].

Dalším výzkumem kompozitních materiálů [10] bylo zjištěno zvýšení tuhosti (v tahu) o 6 % při změně hustoty výplně z 50 % na 75 %. V tomto případě se jednalo o zkušební vzorky pouze z materiálu Onyx. Při dalších výzkumech byla sledována závislost houževnatosti na hustotě výplně. Bylo zjištěno téměř dvojnásobné zvýšení houževnatosti při zvýšení hustoty výplně ze 75 % na 100 % [10], což poukazuje na téměř zanedbatelné zlepšení zvýšením hustoty výplně z 50 % na 70 % [11].

Vysoká hustota výplně vyžaduje velké množství materiálu a času na dokončení dílu, vzhledem k tomu dochází ke zvýšení výrobních nákladů součástí. Z článku [12] bylo zjištěno, že vyšší rozměrové přesnosti dílce lze dosáhnout s nízkou procentuální výplní, jelikož mřížka vykazovala lepší difuzi tepla, což mělo za následek snížení deformace dílu [12].

V článku zabývajícím se analýzou 3D tisku s vyztuženými vlákny bylo zjištěno až jedenáctinásobné zlepšení pevnosti v ohybu [13]. Jednalo se o zkušební vzorky vyztužené CF vlákny společnosti Markforged, které obsahovaly 6 vrstev CF vláken a 2 vrstvy materiálu Onyx [13]. Tyto vzorky byly srovnávány s materiálem Onyx.

Ve studii zabývající se vyztuženými termoplasty došlo ke zjištění, že vlákna s nízkou flexibilitou nemohou vyplnit malý poloměr či oblast se složitou geometrií, což vede ke vzniku mezer o velikosti do 2,5 mm² [14]. Mezery jsou sice vyplněny nylonem, dochází však k lokálnímu oslabení součástí.

Zatížení působí na všechna vyztužující vlákna rovnoměrně, pokud jsou zatěžována ve směru hlavního napětí (ve směru vláken). Předpokládaným porušením je dle studie [15] lom vláken. U zkušebních vzorků zhotovených metodou Towpreg Extrusion docházelo k lomům v kombinaci s vytahováním CF vláken z matrice. Důvodem bylo nedokonalé smáčení a špatná adheze matrice s výztuží [16], [17].

Studie [17] zkoumala lomovou mechaniku u vzorků zhotovených pomocí tiskárny společnosti Markforged. Bylo zjištěno obdobné vytahování vláken jako ve studiích [15], [16] i pro jiné typy výztuží. U CF vláken docházelo k lomu vláken ve směru kolmém na zatížení, kdežto u kevlarových (aramidových) a skleněných vláken docházelo k lomu na několika různých místech. Detaily lomů výztuží jsou uvedeny ve studii [17], jenž dále zmiňuje, že matricí je potahována převážně vnější část vláken, což vede k nízké adhezi mezi matricí a vlákny ve srovnání s termosetovou impregnační vlákny pomocí vakua [17].

1 TEORETICKÁ ČÁST

První část kapitoly se bude zabývat charakteristikou kompozitních materiálů a jejich klasifikací v průmyslu. Druhá část bude pojednávat o vybraných mechanických zkouškách, které budou následně realizovány v experimentální části.

1.1 Kompozitní materiály

Pod označením „kompozitní“ se rozumí skládající se ze dvou a více specifických složek [18]. Jednotlivé složky se výrazně liší v mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech. Kombinací více různorodých složek lze získat nové fyzikální vlastnosti a možnosti použití. Mechanické vlastnosti kompozitního materiálu jsou výrazně odlišné od mechanických vlastností jeho složek a měly by předčít vlastnosti jednotlivých složek [18].

Kompozitní materiály jsou tvořeny jednou nebo více nespojitými fázemi, ponořenými ve spojité fázi. Spojitá fáze se nazývá *matrice* (pojivo), zatímco nespojitá fáze je označována jako *vyztužení* (vyztužující materiál) [19].

Podmínky kompozitních materiálů:

- výztuž musí zastupovat alespoň 5 % v kompozitním materiálu,
- kompozit musí být složen ze dvou a více složek,
- fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti složek musí být rozdílné.

Podmínky vyztužení:

Vyztužením se rozumí zvýšení pevnosti a tuhosti, které vznikne uložením výztuže do matrice, přičemž musí být splněny podmínky dle vztahu (1, 2, 3):

- vyztužení musí být pevnější než matrice [18],

$$\sigma_v > \sigma_m \quad (1)$$

σ_v – pevnost vyztužení [MPa],

σ_m – pevnost matrice [MPa],

- vyztužení musí mít vyšší tuhost než matrice [18],

$$E_v > E_m \quad (2)$$

E_v – modul pružnosti vyztužení [MPa],

E_m – modul pružnosti matrice [MPa],

- vyztužující materiál se musí porušit dříve než matrice [18].

$$\varepsilon_v < \varepsilon_m \quad (3)$$

ε_v – mezní prodloužení výztuže [-],

ε_m – mezní prodloužení matrice [-].

Funkce matrice:

- rovnoměrný přenos vnějších napětí mezi vlákny,
- spojení vyztužující fáze, tvarová stálost,
- udržuje geometrickou polohu vláken,
- ochrana vyztužujících vláken [18].

Funkce vyztužení:

- přenos hlavního zatížení na matici,
- zesílení mechanických vlastností díky vyšší pevnosti a tuhosti [18].

1.1.1 Klasifikace kompozitních materiálů

Kompozitní materiály je možné rozdělit podle řady parametrů, vzhledem k tomu nelze kompozity striktně kategorizovat. Mezi některé možnosti klasifikace patří rozdělení dle vyztuže, matrice, původu nebo složení. Obecně jsou v průmyslu nejčastěji používány kompozitní materiály s polymerní maticí vyztužené kontinuálním vláknem [18], [20]:

Klasifikace dle vyztuže:

- kompozity vyztužené vláknem,
- kompozity vyztužené částicemi,
- kompozity vrstvené [18].

Klasifikace dle matrice:

- kompozity s kovovou maticí,
- kompozity s polymerní maticí,
- kompozity s keramickou maticí [18].

Klasifikace dle původu:

- organické kompozity,
- umělé kompozity [18].

Následující podkapitoly se budou zaměřovat pouze na jednotlivé typy matic a vyztuží, jelikož ostatní klasifikace nejsou zcela zásadní pro pochopení dané problematiky v oblasti 3D tisku kompozitních materiálů.

1.1.2 Vyztuže kompozitních materiálů

Primární úlohou vyztuže je především zajištění tuhosti a pevnosti. Pro vyztužování matrice se používají nanomateriály, částice nebo vlákna. Vedle nejčastěji používaných CF vláken jsou to vlákna skelná, aramidová nebo přírodní [21].

Další možností jsou plošné výrobky z vláken označované jako tkaniny, které působí jako vyztuž ve dvou směrech [18]. Zvýšením počtu vláken v osnově vznikají odlišné typy vazeb (obr. 1).



Obr. 1 Druhy vazeb vyztužujících tkanin [18].

Kompozitní materiály vyztužené částicemi

Kompozity mohou být vyztuženy nejrůznějšími druhy částic. Jejich použití může sloužit jak ke zlepšení mechanických vlastností, tak k úpravě nebo zlepšení jiných vlastností (elektrická, tepelná odolnost, útlum vibrací apod.) [18], [22].

Kompozitní materiály vyztužené vlákny

Kompozity vyztužené pomocí vláken lze rozdělit dle délky vyztužujících vláken na dlouho vláknové viz vztah (4) a krátko vláknové viz vztah (5). Velká část zatížení je u dlouhých vláken přenesena z matrice na kontinuální vlákna, jejichž vyztužující účinek je patrně vyšší díky možnosti rozložení zatížení podél délky vláken [2], [18].

$$\frac{L}{D} > 100 \quad (4)$$

$$\frac{L}{D} < 100 \quad (5)$$

L – délka vlákna [mm],

D – průměr vlákna [mm] [18].

Paradoxy kompozitních materiálů

Při dimenzování kompozitů vyztužených spojitými vlákny jako konstrukčních materiálů nesmí dojít k opomenutí čtyř paradoxů, z nichž tyto materiály vychází:

1) Paradox kompozitního materiálu

„Kompozitní materiál jako celek může převzít napětí, které by jeho slabší složku porušilo. Od pevnější složky kompozitu může převzít vyšší podíl její teoretické pevnosti, než kdyby byla namáhána samostatně (G. Slayter).“

Tento paradox platí jen u tahového zatížení, jelikož při jiných způsobech namáhání nemohou jednotlivé složky kompozitu samy o sobě převzít svůj podíl na přenosu porušujících sil, proto dochází k narušení geometrického uspořádání výztuže v matrici [18].

2) Paradox délky zatěžování

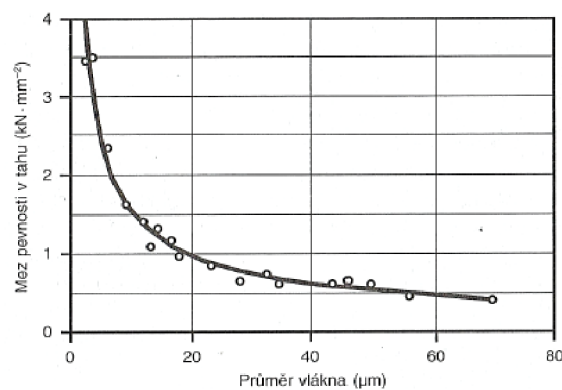
„Čím kratší je zatěžovaná část jednotlivého vlákna, tím větší je jeho naměřená pevnost (A. A. Griffith).“

S rostoucí délkou zatíženého vlákna klesá jeho pevnost. Pokles pevnosti lze vysvětlit tím, že výskyt poruch materiálu a jejich vliv je o to větší, o co delší je jejich zatěžovaná oblast [18].

3) Paradox vláknité struktury

„Materiál ve formě vlákna má mnohonásobně vyšší pevnost než stejný materiál v kompaktní formě. Čím je vlákno tenčí, tím je jeho pevnost vyšší (A. A. Griffith).“

Jako v předchozím případě jsou na vině vrozené a povrchové vady. Vlákna dosahují průměrů v řádech jednotek až stovek μm . Zmenšování průměru vláken vede ke snížení rizika výskytu vad materiálu a zvýšení pevnosti. Závislost meze pevnosti v tahu na průměru skleněného vlákna je zřetelně zobrazena na obr. 2.



Obr. 2 Vliv průměru skleněného vlákna na jeho pevnost [23].

4) Paradox pevného materiálu

„Skutečná pevnost materiálu je podstatně nižší než pevnost vypočítaná teoreticky (F. Zwicky).“

V tab. 2 je uvedeno porovnání modulu pružnosti v tahu a meze pevnosti pro vybrané materiály. Naměřené hodnoty jsou výrazně nižší jak ve formě vláken, tak ve formě kompaktní hmoty.

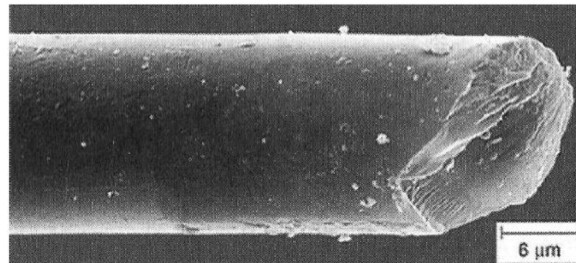
Tab. 2 Porovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot některých konstrukčních materiálů [18].

Materiál	Modul pružnosti v tahu [MPa]			Mez pevnosti v tahu [MPa]		
	Teoretický	Naměřený		Teoretický	Naměřený	
		Vlákno	Kompaktní hmota		Vlákno	Kompaktní hmota
Polyetylen	300 000	100 000	1 000	27 000	1 500	30
Polypropylen	50 000	20 000	1 600	16 000	1 300	38
Polyamid	160 000	5 000	2 000	27 000	1 700	50
Sklo	80 000	80 000	70 000	11 000	4 000	55

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna (obr. 3) jsou obvykle vyráběna rychlým spřádáním taveniny skla z trysek. Vlákno je samo o sobě velmi lámavé a abrazivní, proto je před samotným navinutím opatřeno lubrikací a apreturou. Samotná lubrikace je pro použití v kompozitech nevhodná, jelikož způsobuje prakticky nulovou adhezi k polymerní matici. Z toho důvodu jsou vlákna již ve výrobě opatřena apretační vrstvou, obvykle se jedná o organické silany [18], [24].

Díky svým mechanickým vlastnostem a nízkým nákladům se jedná o jeden z nejpoužívanějších typů vláken. Nejčastěji používaným typem jsou *E-vlákna*, jejichž základem je soustava oxidů SiO_2 , Al_2O_3 a CaO . Hlavní předností těchto vláken je teplotní odolnost. Mechanické vlastnosti nejsou ovlivněny ani při dlouhodobém teplotním namáhání kolem $250\text{ }^\circ\text{C}$. Mají relativně vysokou pevnost v tahu (2500 až 4500 MPa) a nízký modul pružnosti (73000 až 86000 MPa) [24]. Speciální typem jsou HSHT vlákna, které odolávají vyšším teplotám [2].



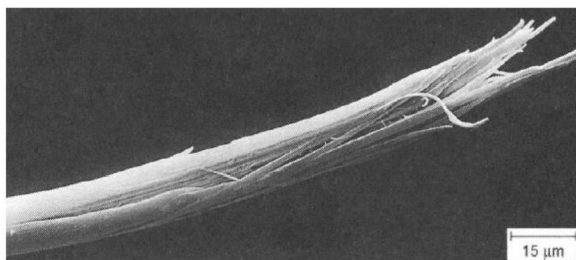
Obr. 3 Řez skleněného vlákna [18].

Aramidová vlákna

Aramidová vlákna (obr. 4) není možné vyrábět spřádáním z taveniny, protože teplota tavení leží nad teplotou tepelného roztoku, proto výroba probíhá spřádáním vysokoviskozního 20 % roztoku v koncentrované kyselině sírové [18].

Jedná se o jednu z nejlehčích vláken tvořených na bázi lineárních organických polymerů, jejichž kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Pro zlepšení zpracovatelnosti se jednotlivá vlákna velmi často propírají, neutralizují a opatřují aviváží [18].

Aramidová vlákna jsou zpracovávána se všemi běžně dostupnými reaktivními pryskyřicemi a termoplasty. Mez pevnosti v tahu ve směru vláken je výrazně vyšší (1800 MPa) než mez pevnosti v tlaku (230 MPa) [18]. Je nutné tedy počítat s jejich citlivostí na zatížení tlakem, působícím v podélném směru. Z tohoto důvodu jsou kompozity s aramidovými vlákny vhodné pro lehké konstrukce s převažujícím tahovým namáháním. Typickým moderním představitelem těchto vláken je kevlar [18].

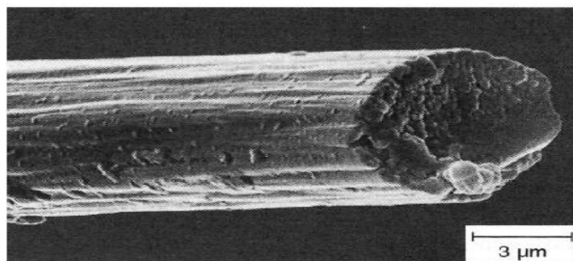


Obr. 4 Řez aramidového vlákna [18].

Uhlíková vlákna (CF)

CF vlákna (obr. 5) jsou technická vlákna s velmi vysokou pevností a tuhostí. Výchozí organické suroviny ve vláknitém tvaru jsou nejprve karbonizovány. V průběhu karbonizace dochází k odštěpení drtivé většiny prvků s výjimkou uhlíku. Mezi nejčastější způsoby výroby CF vláken patří pyrolýza PAN (Polyakrylonitril), kdy jsou vlákna tažena z taveniny [18].

Za běžných podmínek jsou tato vlákna velmi křehká a při zpracování se snadno lámou. Z tohoto důvodu se při zpracování povrchově upravují apretací směsí na bázi epoxidové pryskyřice, která současně slouží jako prostředek pro zlepšení vazby mezi vláknem a matricí. Při delším skladování dochází k vytvrzení apretační vrstvy, z toho důvodu dochází ke ztrátě ohebnosti vláken [18]. CF vlákna jsou hojně využívána v leteckém, kosmickém a automobilním průmyslu. Často jsou také využívány pro sportovní potřeby [22], [25].



Obr. 5 Řez CF vlákna [18].

Přírodní vlákna

Ze všech dostupných přírodních vláken jsou pro vyztužování ideální pouze rostlinná vlákna, které mají jako základ celulózu. Patří mezi ně konopí, len, bavlna, ramie, juta a sisal. Hlavní výhodou těchto vláken je čichová nezávadnost během měnicích se klimatických podmínek, odolnost proti stárnutí a výhodná likvidace spalováním. Přírodní vlákna jsou však citlivá na působení vlhkosti a mohou u nich nastat změny vyvolané biologickým napadením. Vzhledem ke své nízké měrné hmotnosti ($1,4 - 2,54 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) jsou tato vlákna vhodná primárně pro lehké konstrukce [18].

Hybridní tkaniny

Lamináty jsou konstruovány ze dvou či více typů tkanin. Kombinací různých typů tkanin vede k využití jejich charakteristických vlastností a tím zlepšení výsledných vlastností kompozitního materiálu [26].

Nejčastěji používané kombinace tkanin [26]:

- uhlík/ sklo,
- uhlík/ aramid,
- aramid/ sklo.

Porovnání vláken

V tab. 3 jsou porovnány vlastnosti výztuží vyráběny společností Markforged pro 3D tisk kompozitních materiálů. Vybrané typy výztuží budou následně použity v experimentální části. Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů nejsou závislé pouze na zvolené výztuži. Závisí také na zvolené matici, se kterou se jednotlivé vlastnosti výrazně změni.

Tab. 3 Vlastnosti kontinuálních vláken společnosti Markforged [2].

	CF	Kevlarová	Skleněná	HSHT
Pevnost v tahu	800 MPa	610 MPa	590 MPa	600 MPa
Pevnost v ohybu	540 MPa	240 MPa	200 MPa	420 MPa
Teplotní odolnost	105 °C	105 °C	105 °C	150 °C
Vhodné zatížení	Přerušované	Rázové	Konstantní	Přerušované
Charakteristika	Vysoká pevnost a tuhost	Houževnatost, nárazuvzdornost	Houževnatost, robustnost	Odolnost proti vysokým teplotám
Typ deformace	Tuhé až do lomu	Ohyb až do zdeformování	Ohyb až do lomu	Ohyb až do lomu

Při výběru vhodného vlákna je důležité myslet také na cenu, která je ovlivněna mnoha faktory. Odvíjí se od cen použitých výrobních postupů, použitých surovin a situace na trhu. V tab. 4 jsou uvedeny ceny vyztužujících vláken společnosti Markforged [27].

Skleněná vlákna jsou vyráběna z levně dostupných surovin spřádáním z tekutiny, díky tomu se jedná o nejlevnější typ vláken. Výroba kevlarových vláken probíhá poměrně pomalu mokřím spřádáním za přítomnosti agresivních rozpouštědel. CF vlákno je vyráběno z drahých a kvalitních přízí. V kombinaci s energeticky náročnou a pomalou výrobou se jedná o nejdražší typ kontinuálního vlákna [18].

Tab. 4 Cena kontinuálních vláken společnosti Markforged [27].

	Cena
CF	71,50 Kč/cm ³
Kevlarová	47,50 Kč/cm ³
Skleněná	38,00 Kč/cm ³
HSHT	47,50 Kč/cm ³

1.1.3 Matrice

Pod výrazem matrice neboli nosič se rozumí materiál, jenž tvoří základní prvek výsledného kompozitu. Úkolem matrice je zajištění tvarové stálosti, přenos vnějšího namáhání na vyztužující vlákna a ochrana vláknů před okolními vlivy. K výrobě matric kompozitních materiálů se používají polymery, kovy a keramika. Jednotlivé druhy materiálů se vyznačují svými charakteristickými vlastnostmi, které souvisí s jejich vnitřní stavbou [18], [28].

Polymerní matrice

Jedná se o nejčastěji využívanou skupinu matric pro výrobu pomocí aditivních technologií. Ve srovnání s kovy mají polymerní materiály vysokou měrnou pevnost a nízkou měrnou hustotu, díky nimž jsou často využívány v leteckém průmyslu [20]. Polymerní matrice lze klasifikovat na termosetické (reaktoplastické) a termoplastické materiály [29]. Souhrn vlastností nejběžněji používaných materiálů je uveden v tab. 5.

Termosetické materiály jsou složeny molekulovými řetězci, které vytvářejí trojrozměrnou síť [20]. Ve výchozím stavu je materiál tvarovatelný. Výsledné tuhé podoby je dosaženo až vytvrzením. Vytvrzení probíhá díky času, teplotě nebo UV záření. Jedná se o křehké materiály s nízkou tažností, které dosahují vysokých hodnot pevnosti a tuhosti [18]. Nejčastěji používaný termosetický materiál pro technologii 3D tisku je epoxidová pryskyřice, díky svým mechanickým vlastnostem a malému smrštění (do 3 %) [30].

Termoplastické materiály jsou složeny z odlišně orientovaných molekulových řetězců, proto nevytváří komplexní trojrozměrnou síť jako v případě termosetů [20]. Ve výchozím stavu jde o pevný a neformný materiál, jenž přechází do tekuté fáze při teplotách okolo 210 °C [18]. Pro 3D tisk kompozitních materiálů je vhodný polyamid, v případě společnosti Markforged se jedná o materiál Onyx [2].

Tab. 5 Vlastnosti vybraných používaných organických matric [29].

Materiál	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Hustota ρ [g.cm ⁻³]	Deformace do lomu [%]
Epoxidy	35 až 90	2100 až 6000	1,1 až 1,4	1 až 10
Polyestery	45 až 85	1300 až 4500	1,1 až 1,5	1 až 5
Fenolitické pryskyřice	50 až 60	4400	1,3	1 až 3
PP	28 až 41	1100 až 1500	0,90	5 až 150
PC	62 až 76	2100 až 2800	1,21	110 až 130
PEEK	70	3800	1,31	50 až 150

Kovová matrice

Kompozity s kovovou maticí jsou stále ve vývoji a jejich využití v průmyslu není tak časté. Matrice je řadu let intenzivně studována, přesto se nenacházejí v popředí zájmu. Hlavním důvodem menšího uplatnění je vysoká cena ve srovnání s jinými materiály.

Velmi často je tato matrice využívána v kombinaci s keramickou nebo kovovou výztuží, která bývá převážně ve formě vláken [31]. U takových kompozitů většinou není snaha o zvýšení tuhosti matrice nebo zvýšení její pevnosti. Ve většině případů jde o zvětšení teplotního rozsahu použitelnosti kovů, zvýšení oteřuvzdornosti, snížení měrné hustoty či zvýšení elektrické a teplotní vodivosti [32], [33].

Nejčastěji jsou používány matrice z lehkých slitin hliníku, titanu či hořčíku [34]. Jedná se o kompozity s velice dobrým poměrem pevnosti k hustotě [35]. Z tohoto důvodu jsou používány v automobilovém a leteckém průmyslu [34], [35].

Keramická matrice

Hlavním účelem výroby kompozitů s keramickou maticí jsou požadavky na zvýšení lomové houževnatosti (až $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0,5}$) a teplotní odolnosti v extrémních podmínkách (až $2600 \text{ }^\circ\text{C}$) [18]. Nejčastěji jsou používány matrice z nitridů, oxidů nebo karbidů hliníku, hořčíku a křemíku [36]. Vzhledem k mechanickým vlastnostem jsou kompozity s keramickou maticí používány v zařízeních pracujících za vyšších teplot, např. spalovacích motorech a plynových turbínách. Mezi nevýhody keramické matrice patří křehkost [18], [36].

1.1.4 Výhody a nevýhody kompozitních materiálů

Vlastnosti výsledného materiálu závisí na použitém typu výztuže a matrice, avšak nesmí se zapomínat na konkrétní způsoby výroby. Většina podniků vyžaduje, aby byl kompozit připraven „na míru“. Základním požadavkem je přenos tlakového napětí při zachování svého tvaru bez deformace. Dalším požadavkem je správná orientace vyztužujících vláken. S tím jsou spojeny jisté pozitivní a negativní vlastnosti. Obecně lze uvést několik výhod a nevýhod jejich využití (tab. 6):

Tab. 6 Výhody kompozitních materiálů [18], [20], [22], [37].

Výhody	Nevýhody
Nízká měrná hmotnost	Velmi specifické způsoby výroby
Vysoká pevnost	Vysoké náklady při dimenzování složitých konstrukcí
Vysoká tuhost	Neobvyklé chování materiálu
Vysoká tvarová stálost	Lokální poškození
Dobré tlumící vlastnosti	Obtížné nedestruktivní zkoušení materiálu
Výroba tvarově složitých dílů	Nízká mez pevnosti v tahu v kolmém směru ke směru uložení vláken
Odolnost vůči korozi	

1.2 Klasifikace technologie 3D tisku kompozitních materiálů

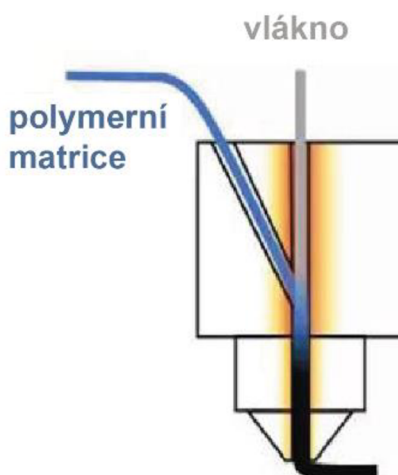
Pro 3D tisk kompozitních materiálů je typický vývoj tisku kontinuálního vlákna. Vzhledem k specifickým nuancím jednotlivých výrobců 3D tiskáren je poměrně obtížné výrobní procesy přesně kategorizovat. Je možné se zaměřit na klasifikaci dle způsobu sycení vlákna a rozdělení společností dle množství vytisknutých dílů za rok v kombinaci s tiskovým objemem.

1.2.1 Metody sycení vlákna

Suché vlákno je výhodné sytit termoplastickou matricí, která je poměrně snadno tisknutelná, jelikož u reaktoplastické matrice (obvykle epoxidová pryskyřice) je sycení problematické z důvodu vytvrzení časem, teplem nebo UV zářením.

In-situ Impregnation

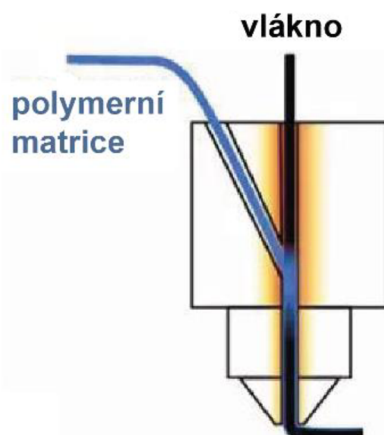
U metody *In situ Impregnation* (volný překlad impregnace na místě) je suché vlákno přiváděno do tiskové hlavy, kde se setkává s polymerní matricí ve formě drátu (obr. 6). Matrice je v tiskové hlavě společně s vláknem zahřívána. Dochází k nasycení vlákna a následnému nanášení na tiskovou plochu. Jedná se o metodu vhodnou pro robotické systémy. Tato metoda je využívána společnostmi Continuous Composites, Moi Composites a Orbital Composites [38], [39], [40], [41], [42].



Obr. 6 Tisková hlava metody In-situ Impregnation [39].

Co-Extrusion with Towpreg

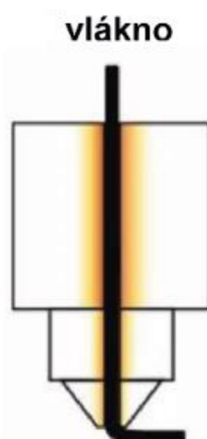
Místo suchého vlákna je u metody *Co-Extrusion with Towpreg* (volný překlad koextruze s předsyceným vláknem) přiváděno do tiskové hlavy vlákno předsycené polymerem. V tiskové hlavě dochází k zahřívání vlákna, které následně koextruduje společně s přidávným materiálem, jenž je rovněž přiváděn do tiskové hlavy (obr. 7). Výrobce CEAD používá předsycené vlákno, které se skládá ze stejného materiálu jako matrice, kdežto výrobce Anisoprint využívá vlákna, jenž se skládají z termosetického polymeru a matricí jsou termoplastické polymery [39], [43], [44], [45].



Obr. 7 Tisková hlava metody Co-extrusion with towpreg [39].

Towpreg Extrusion

Jedná se o obdobnou technologii jako v předchozím případěch, avšak v případě metody *Towpreg Extrusion* (volný překlád extruze s předsyceným vláknem) matrice a vlákno již nejsou přiváděny stejné tiskové hlavy (obr. 8). Základní materiál i vyztužující vlákna mají vlastní tiskovou hlavu. Vlákna jsou již při výrobě nasyceny obvykle termoplasty a do tiskové hlavy jsou tedy přiváděny ve formě drátu. Tuto technologii využívají společnosti Markforged, 9T Labs, APS Tech Solutions, Ingersoll Machine Tools' a Mantis Composites [39], [43], [46], [47], [48], [49], [50].



Obr. 8 Tisková hlava metody Towpreg extrusion [39].

In-situ Consolidation

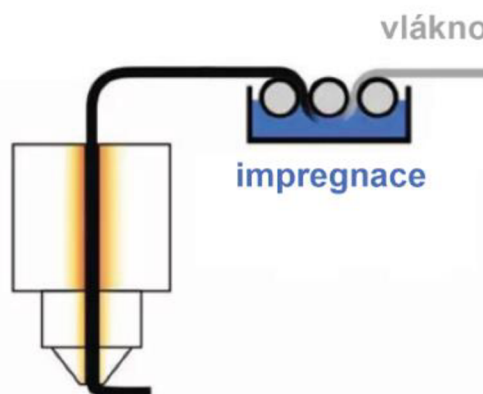
In-situ Consolidation (volný překlád zažehlování na místě) je plně automatizovaná metoda nanášení termoplastického vlákna. Do tiskové hlavy je přiváděné studené předsycené vlákno, které je na výstupu zažehlováno pomocí tepelného zdroje energie a přítlačného válečku (obr. 9). Dochází tedy k přitavování k předchozí vrstvě. Nejznámějšími společnostmi využívající tuto metodu jsou Arevo, Desktop Metal a Electroimpact [39], [51], [52], [53].



Obr. 9 Tisková hlava metody In-situ consolidation [39].

Inline Impregnation

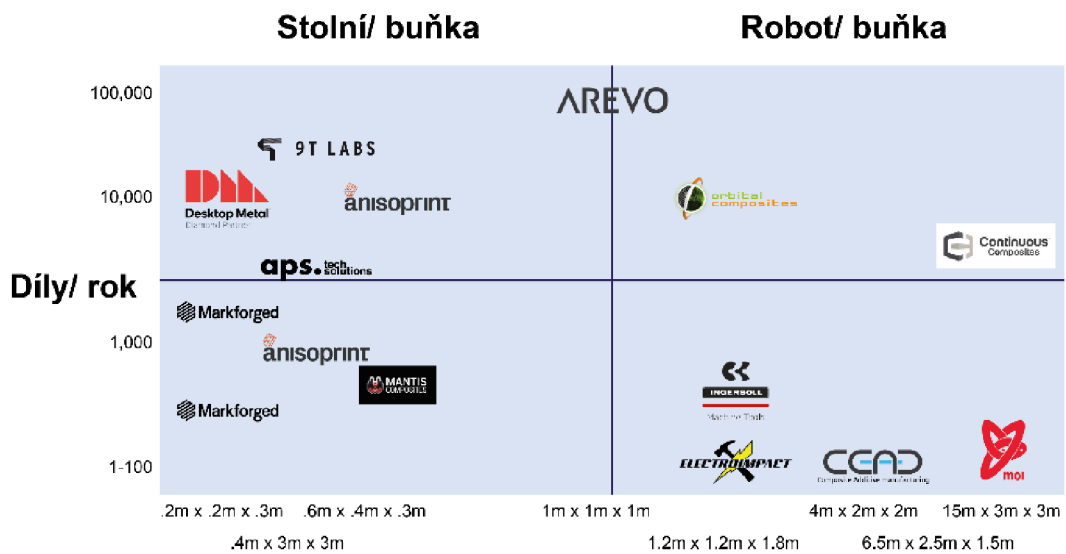
Metoda *Inline Impregnation* (volný překlad zaváděcí impregnace) je charakteristická impregnací suchého vlákna polymerem při transportu do tiskové hlavy (obr. 10). Následně dochází k nanášení vrstvy pomocí trysky, do které je vlákno navijeno. Jedná se o metodu vhodnou pro robotické systémy. Tuto technologii využívá Moi Composites [39], [41].



Obr. 10 Tisková hlava metody Inline impregnation [39].

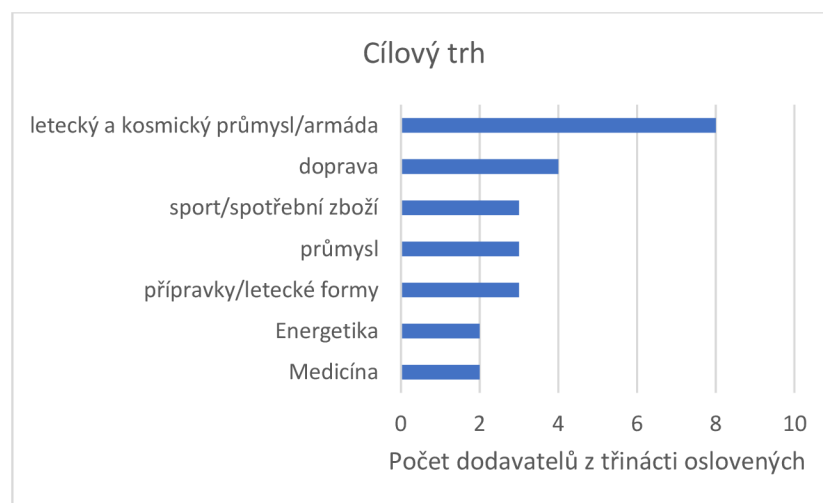
1.2.2 Společnosti v průmyslu

Stále se zvyšuje počet společností, které komercializují 3D tisk kompozitních materiálů s kontinuálním vláknem. Roste také spektrum materiálů, výrobních procesů, velikosti dílců, objemů výroby a množství koncových trhů. Byly osloveny společnosti [39], které dodávají některou ze zmíněných technologií (kap. 1.2.1). Ze získaných informací byla vytvořena grafika (obr. 11), jenž pomohla ke kategorizaci jednotlivých společností v rámci technologie 3D tisku kompozitních materiálů a přehled nejčastějších cílených trhů (obr. 12) [39].



Objem tisku

Obr. 11 Grafické rozdělení výrobců [39].



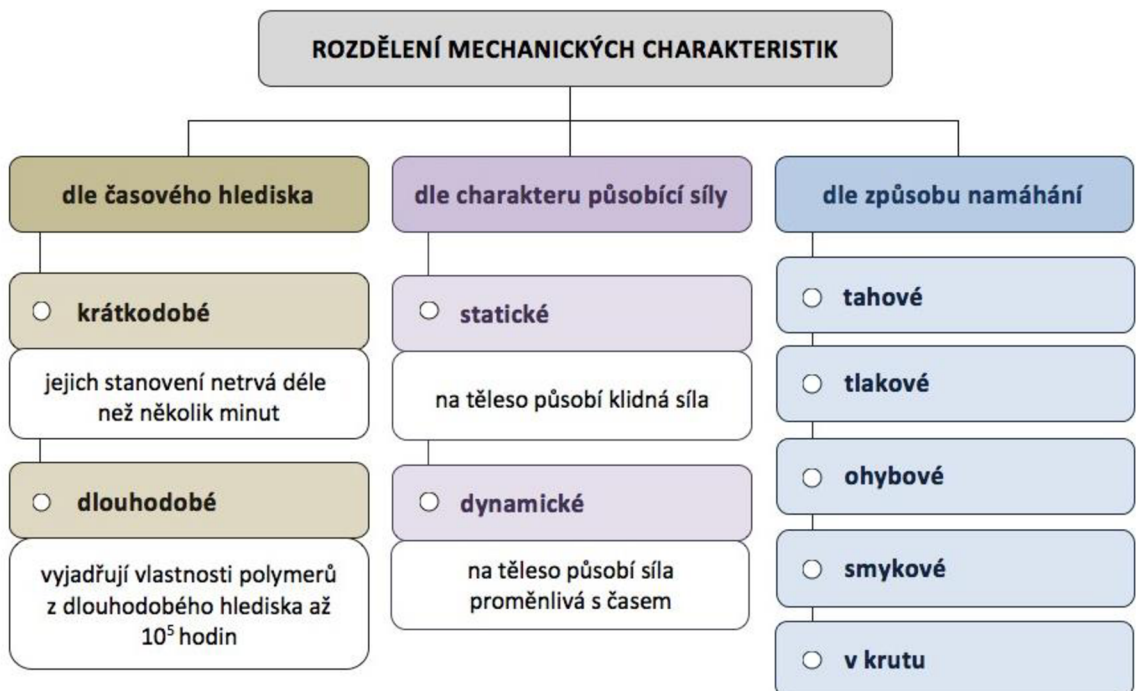
Obr. 12 Cílové trhy výše uvedených dodavatelů [39].

1.3 Mechanické vlastnosti polymerních materiálů

Mechanické vlastnosti poskytují důležité informace o materiálu a možnostech jeho použití. Vliv na mechanické vlastnosti kompozitních materiálů má především vytvrzení matrice, množství a orientace vláken [54].

Vzorky jsou podrobeny účinkům mechanických sil. Výsledkem jsou mechanické vlastnosti charakterizující odolnosti materiálu proti působení vnějších sil. Porušení kompozitních materiálů je mnohem složitější proces než u homogenních materiálů [54], [55]. U těchto materiálů určuje vznik nebo rychlost šíření jednotlivé trhliny, stav poškození a tím i životnost materiálu [54], [56].

Existuje několik způsobů rozdělení mechanických charakteristik materiálů. Metody měření se odvíjí podle různých hledisek [55], [57]: dle doby zatěžování, dle působící síly nebo způsobu namáhání (obr. 13). Experimentální část diplomové práce se bude zabývat zkouškou tvrdosti, tříbodovým ohybem a zkouškou tahem.

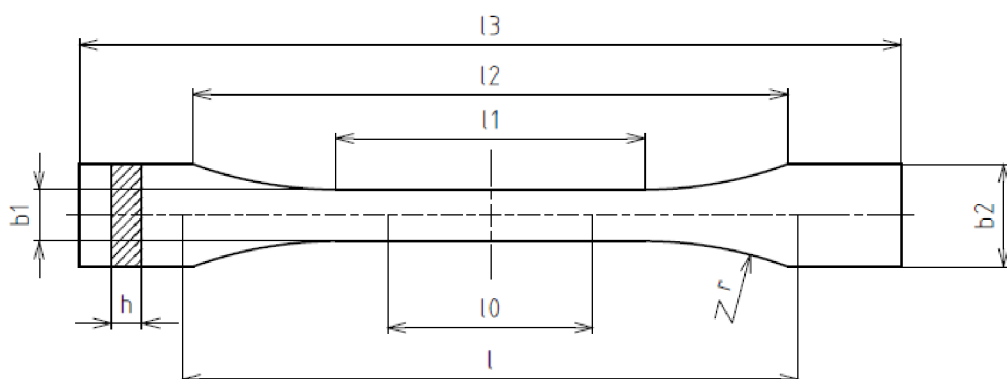


Obr. 13 Rozdělení mechanických charakteristik [57].

1.3.1 Zkouška tahem

Jedná se o statickou zkoušku, která se řadí mezi nezákladnější mechanické zkoušky. Princip tahové zkoušky spočívá v zatěžování zkušební vzorku pomalu zvyšující se tahovou silou až do okamžiku lomu nebo dosažení předem definované hodnoty [57].

Tahová zkouška se používá k hodnocení pevnosti, plasticity a dalších parametrů. Zkouška je prováděna při pokojové teplotě ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zkušební vzorky neboli zkušební tyče používané pro tahovou zkoušku kompozitních materiálů jsou obdélníkového průřezu (obr. 14) o rozměrech dle normy ČSN EN ISO 527-2 typu 1BA (tab. 7) [18], [58], [60]. Pro kompozitní materiály budou v experimentální části sledovány pouze naměřené hodnoty meze pevnosti, modulu pružnosti a tažnosti.



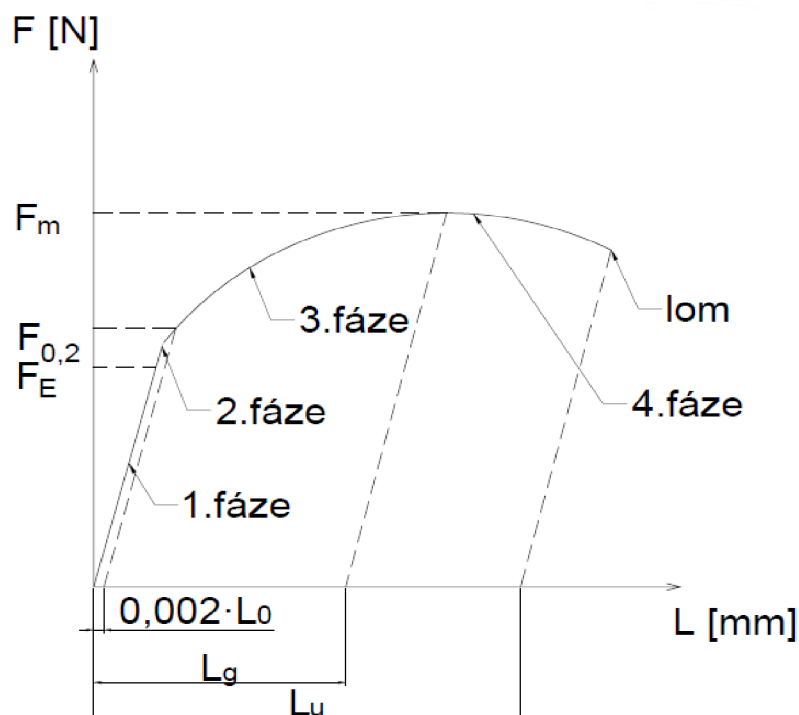
Obr. 14 Zkušební tyč pro tahovou zkoušku plastů [58].

Tab. 7 Rozměry zkušebních těles [mm] [58].

	Typ zkušebního tělesa	1BA
l_3	Celková délka	≥ 75
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	≥ 30
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2
b_2	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
h	Tloušťka	≥ 2
l_0	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
l	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$

Zkušební těleso je upnuto do čelistového mechanismu zkušebního zařízení, následně dochází k jednoosému tahovému zatížení. V průběhu zatěžování dochází k zaznamenávání pracovního tahového diagramu (viz obr. 15) zatěžující síly v závislosti na délce. Během tahové zkoušky prochází zkušební materiál čtyřmi fázemi [34], [54]:

- 1. Oblast elastické deformace:** V první fázi dochází k prodlužování zkušební tyče, které je přímo úměrné zatěžující síle. Deformace je v této oblasti elastická, tudíž se zkušební tyč po odlehčení vrací do původního stavu [34]. Oblast končí mezi úměrnosti F_E . U většiny litin s lupínkovým grafitem či neželezných kovů se tato fáze neurčuje [61][61].
- 2. Oblast meze úměrnosti až meze kluzu:** Druhá fáze probíhá po dosažení síly na mezi kluzu ($F_{0,2}$). Po překročení této síly dochází k plastické deformaci [34].
- 3. Oblast rovnoměrných trvalých deformací:** V průběhu třetí fáze je zkušební tyč rovnoměrně deformována po celé své délce a dochází k trvalé změně tvaru. V okamžiku, kdy dochází k poklesu zatěžující síly, nastává tvorba krčku [34], [58]. Během této fáze je získána největší síla z celého průběhu tahové zkoušky, která se označuje jako síla na mezi pevnosti (F_m) [34], [58].
- 4. Oblast nerovnoměrných trvalých deformací:** Poslední fáze je typická poklesem zatěžující síly a růstem krčku. Deformace vzniká již pouze v oblasti krčku z důvodu zmenšení průřezu zkušební tyče. Kvůli zmenšujícímu se průřezu roste napětí v oblasti krčku. Konec této fáze nastává lomem zkušební tyče [34], [58].



Obr. 15 Pracovní diagram [34],[58].

Smluvní tahový diagram je používán v praxi, protože pracovní tahový diagram neumožňuje porovnání mechanických vlastností mezi jednotlivými materiály. Vzhledem k tomu jsou tahové napětí σ a poměrné prodloužení ε přepočítávána. Vlivem zatěžování dochází ke vzniku tahového napětí viz vztah (6) a poměrného prodloužení, viz vztah (7) [34], [62]:

$$\sigma = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (6)$$

σ – tahové napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S – aktuální průřez vzorku [mm²],

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad (7)$$

ε – poměrné prodloužení [-],

L – konečná délka vzorku [mm],

ΔL – změna délky zkušební vzorku [mm],

L_0 – počáteční délka vzorku [mm].

Tahové napětí je označováno jako skutečné napětí. Zatěžující síla je vztahována k aktuálnímu průřezu zkušební tyče. Jelikož měření aktuálního průřezu zkušební tyče je obtížné, dochází ke stanovení smluvního tahové napětí (R), viz vztah (8) [34], [63]:

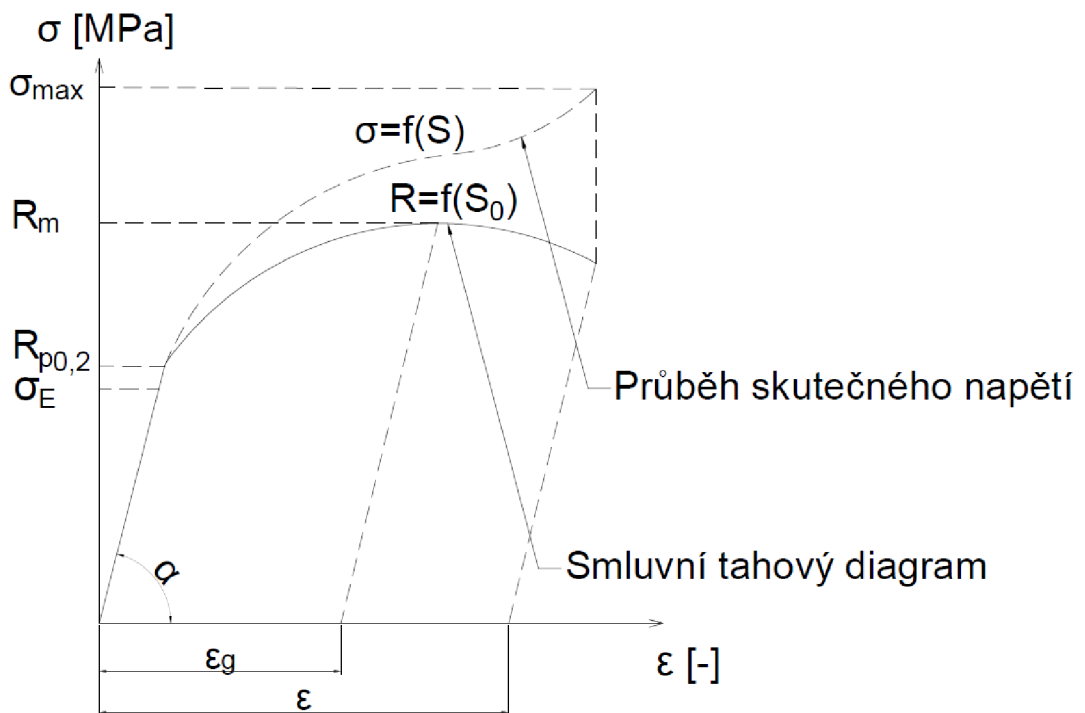
$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

R – smluvní tahové napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S_0 – počáteční průřez tyče [mm²].

Smluvní tahový diagram (obr. 16) znázorňuje závislost smluvního napětí na poměrném prodloužení. Z diagramu je zřejmé, že hodnota tahového napětí je téměř shodná s hodnotou smluvního napětí až do meze kluzu. Hlavním důvodem je elastická deformace v této oblasti, a tudíž platí lineární závislost napětí na poměrném prodloužení. Po překročení meze pevnosti dochází k výraznému rozdílu mezi těmito hodnotami. Skutečné napětí stále roste, kdežto smluvní napětí začíná klesat. U zkušební tyče začíná vznikat krček [34], [61], [64].



Obr. 16 Porovnání smluvního tahového a skutečného diagramu [65].

Hookův zákon vyjadřuje vztah mezi napětím a relativním prodloužením. Ve smluvním tahovém diagramu je Hookův vztah vyjádřen jako přímka, jejíž směrnice je dána modulem pružnosti v tahu (E) a je možné ho matematicky vyjádřit pomocí následujících vztahů (9, 10) [34], [66]:

$$E = \tan(\alpha) \quad (9)$$

E – modul pružnosti v tahu [MPa],

α – úhel mezi Hookovou přímkou s vodorovnou osou [°],

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{l_0} = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (10)$$

σ – tahové napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S – aktuální průřez vzorku [mm²],

E – modul pružnosti v tahu [MPa],

ΔL – změna délky zkušební vzorku [mm],

l_0 – počáteční délka vzorku [mm],

ε – poměrné prodloužení [-].

Mez kluzu je hodnota smluvního napětí, jenž určuje konec platnosti Hookova zákona. Do této hodnoty se materiál deformuje elasticky. Po překročení meze kluzu dochází k plastické deformaci zkušební tyče. Jedná se o velmi důležitou materiálovou charakteristiku, která udává odolnost proti plastické deformaci. Podle chování materiálu se používají při tahové zkoušce dva druhy meze kluzu. Výraznou mez kluzu (obr. 17) lze určit pomocí vztahu (11). Pokud materiál neprojevuje známky výrazné meze kluzu, je možné stanovit smluvní mez kluzu pomocí vztahu (12) (obr. 18) [34], [64]:

a) Vztah pro výpočet výrazné meze kluzu

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

R_e – napětí na mezi kluzu [MPa],

F_e – zatěžující síla na mezi kluzu [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²].

b) Vztah pro výpočet nevýrazné meze kluzu

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

$R_{p0,2}$ – smluvní napětí na mezi kluzu [MPa],

$F_{p0,2}$ – zatěžující síla na smluvní mezi kluzu [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²].

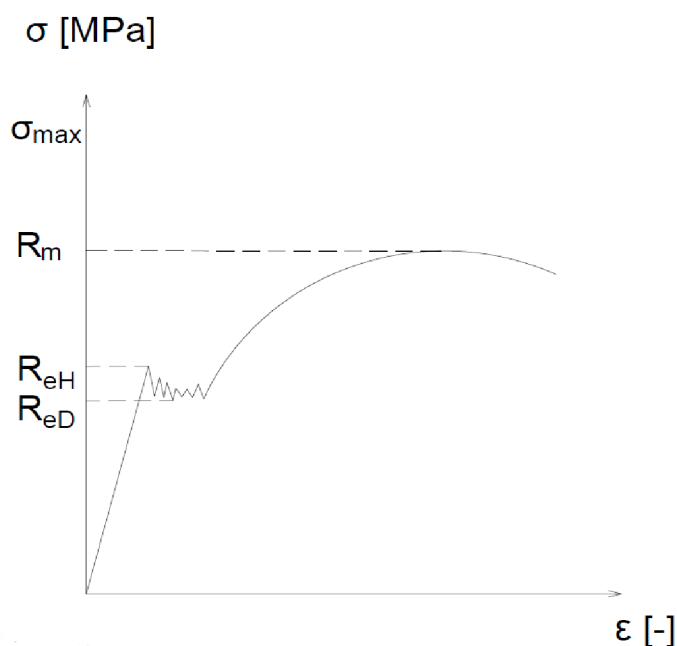
Mez pevnosti je hodnota napětí, které je dosaženo při největším zatížení. Po překročení hodnoty meze kluzu začíná zatěžující síla klesat. Dochází k růstu krčku, který se stále zužuje, až dochází k lomu a tím ukončení zkoušky. Jedná se o důležitou materiálovou charakteristiku, pomocí které se klasifikují jednotlivé konstrukční materiály. Hodnota meze pevnosti se určuje pomocí vztahu (13) [34], [61] [64]:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (13)$$

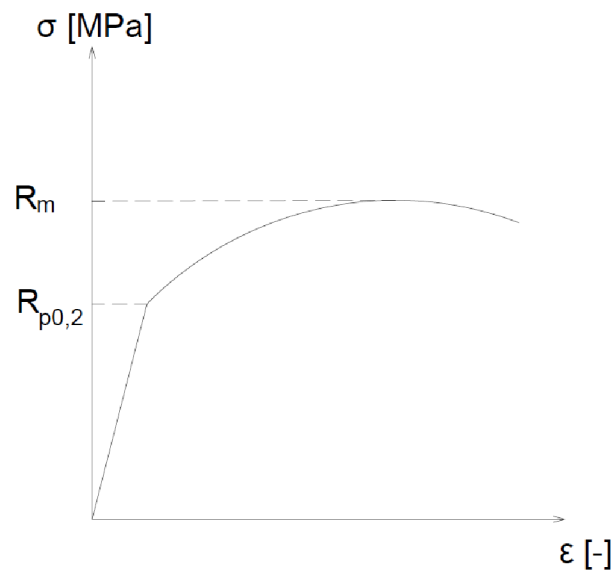
R_m – napětí na mezi pevnosti [MPa],

F_m – maximální zatěžující síla [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²].



Obr. 17 Smluvní tahový diagram s výraznou mezí kluzu [34].



Obr. 18 Smluvní tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu [34].

Tažnost lze určit pomocí poměrného prodloužení pomocí vztahu (14). Tažnost určuje hodnotu trvalého prodloužení [34], [61]:

$$At = 100 \cdot \varepsilon_u = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (14)$$

A – tažnost [%],

ε_u – konečné poměrné prodloužení [-],

L_0 – počáteční délka vzorku [mm],

L_u – konečná délka vzorku [mm],

ΔL – absolutní přírůstek počáteční délky po přetržení [mm].

Kontrakce je definovaná jako poměr rozdílu průřezu přetrženého vzorku a počátečního vzorku k počátečnímu průřezu, viz vztah (15). V praxi se kontrakce určuje jen pro kruhové tyče [34], [64].

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (15)$$

Z – kontrakce [%],

ΔS – rozdíl počátečního a konečného průřezu [mm²],

S_0 – počáteční průřez [mm²],

S_u – konečný průřez [mm²].

1.3.2 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti je jedna z nejpoužívanějších zkoušek, která definuje mechanické vlastnosti materiálu. Tvrdost lze definovat jako odolnost povrchových oblastí materiálu proti vniknutí tvrdšího cizího tělesa. Rozděluje materiály na tvrdé, tuhé a houževnaté [57], [60].

Při zkoušce dochází k minimálnímu porušení povrchu vzorku a díky tomu lze ve většině případů provádět měření na zhotovené součásti bez nutnosti použití zkušební vzorku. Měření tvrdosti je možné rozdělit dle několika hledisek. Dle hlediska rychlosti zatížení lze dělit zkoušky na statické a dynamické. Ty lze dále rozdělit na vrypové, vnikací, odrazové a porovnávací (tab. 8) [57], [60].

Tab. 8 Rozdělení metod zkoušek tvrdosti [57], [58], [60].

Zkoušky mikro tvrdosti	Statické	Vnikací	Metoda Vickers
Zkoušky makro tvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martens
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
			Metoda Rockwell
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda volným pádem
			Metoda stlačenou pružinou
			Porovnávací metoda
		Elastické odrazové	Metoda volným pádem
			Metoda kyvadlová

Pro polymery je typické elastické zotavení po odlehčení, proto se měří hloubka vniknutí tělesa do zkušební tělesa po definovanou dobu a zpravidla při zatížení. U kovů nehraje podíl pružné deformace roli, tudíž jsou důsledky vniknutí tělesa měřeny obvykle až po ukončení zatížení. Kovy vykazují trvalou (plastickou) deformaci, kdežto u polymerů musí být zahrnuta jak deformace elastická, tak deformace plastická [57], [67], [68].

Pro měření tvrdosti materiálů s polymerní matricí je možné v praxi použít několik zkušebních metod, které se vzájemně liší v tvaru a materiálu zkušební tělesa, velikosti a doby zatížení [57], [60]. Mezi některé z nich se řadí:

- metoda vtlačování kuličky,
- metoda Rockwell,
- metoda Shore.

Metoda vlačování kuličky

Jedná se o zkušební metodu, při které dochází k vlačování kuličky z kalené oceli zkušebního tělesa (obr. 19). Zkušební těleso je nejprve zatíženo definovaným počátečním zátěžím, poté dochází ke zkušebnímu zatížení (49 N až 961 N). Velikost zatížení závisí na výsledné hloubce vlačení, která musí být v rozsahu 0,15 mm až 0,35 mm. Tvrdost se odečte po 30 vteřinách měření, dle vztahu (16) [60], [66]:

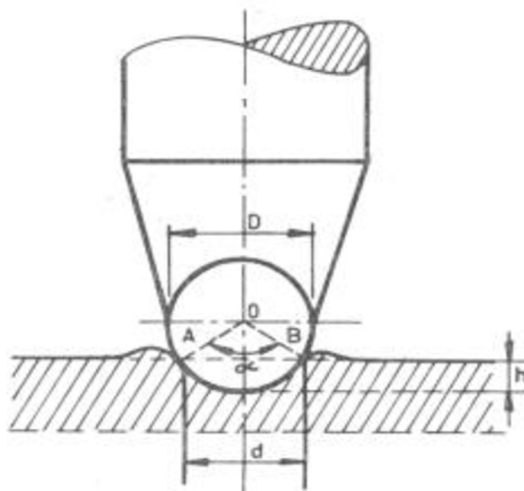
$$H = \alpha \cdot \frac{F_c}{h - 0,46} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (16)$$

F_c – celkové zatížení [N],

α – faktor (0,0535) [mm^{-1}],

h – hloubka vniknutí kuličky do materiálu [mm],

H – výsledná tvrdost [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$].



Obr. 19 Princip měření tvrdosti kuličkou [60].

Metoda Rockwell

Principem metody je vlačování kuličky ze slinutého karbidu (event. ocelové kuličky) nebo diamantového kuželu s vrcholovým úhlem 120° do zkušebního tělesa. Indentor vlivem přesně určeného zatížení vniká do analyzovaného materiálu. Z míry deformace povrchu materiálu (hloubky vtisku) je určena jeho tvrdost. Zatížení se určuje jako předběžné a celkové, kdy předběžné zatížení je používáno z důvodu minimalizace vlivu pružnosti materiálu. Hodnotu výsledné tvrdosti lze stanovit pomocí vztahu (17) [55], [57].

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (17)$$

HR – hodnota tvrdosti dle Rockwella,

h – trvalá hloubka vtisku při předběžném zatížení po odlehčení přidavného zatížení [mm],

S – konstanta stupnice charakterizující stupnici [mm],

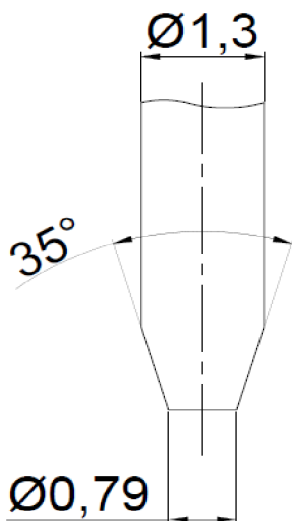
N – konstanta celkového rozsahu charakterizující stupnici.

Metoda Shore

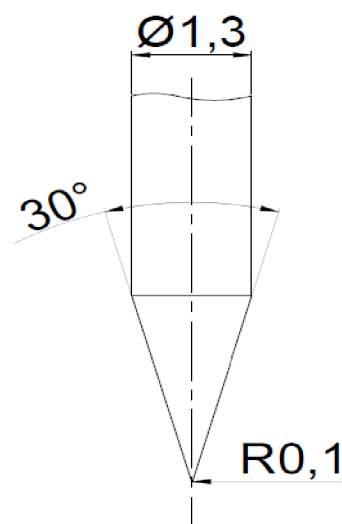
Jedná se o nejrozšířenější metodu měření tvrdosti polymerů v praxi. Principem metody je vlačování hrotu kužele do povrchu silou, která je vyvozena tlakem pružiny. Měření tvrdosti Shore má několik různých stupnic, které jsou určeny pro konkrétní tvrdost materiálu. Metoda Shore A (obr. 20) je využívána pro měkké materiály. Metoda Shore D (obr. 21) je využívána pro tvrdé gumy a plasty [20], [57].

Míra tvrdosti je určena hloubkou, do které je hrot vtačen. Tvrdost je určena na stupnici 0 až 100. Hodnota tvrdosti Shore D je odečítána po dobu 15 s po dotyku vlačovaného tělesa se zkušebním vzorkem. Hodnota tvrdosti Shore A je odečítána po dobu 3 s po dotyku vlačovaného tělesa se zkušebním vzorkem [20], [57].

Pokud nastane situace, kdy během měření ukáže tvrdoměr Shore A hodnotu vyšší než 90, dochází k použití tvrdoměru Shore D. Stejně je tomu v opačném případě, kdy tvrdoměr Shore D ukáže hodnotu nižší než 20, dochází k použití tvrdoměru Shore A [57], [60].



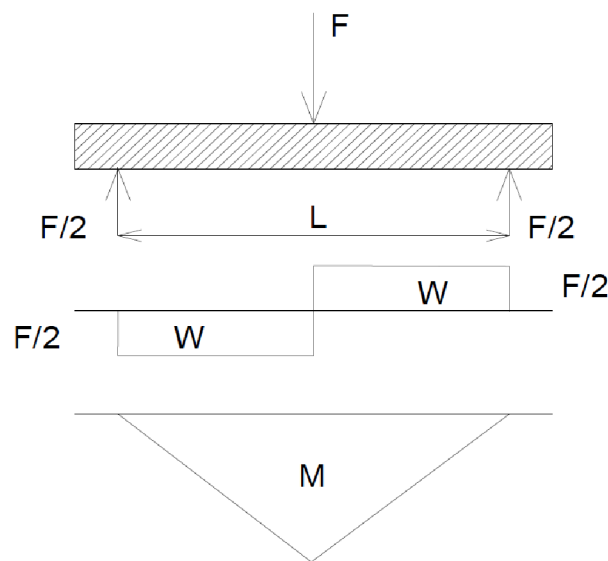
Obr. 20 Hrot Shore A [57].



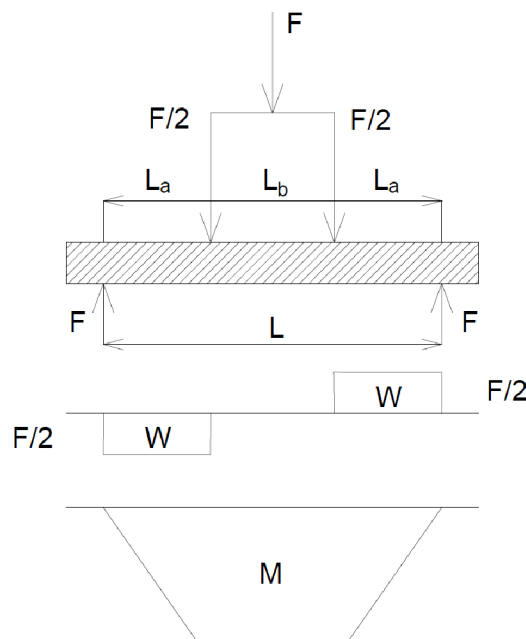
Obr. 21 Hrot Shore D [57].

1.3.3 Zkouška ohybem

Zkouška probíhá na zkušebním stroji pro zkoušku tahem, avšak místo upínacích nástrojů je umístěn přípravek pro zkoušku ohybem. K ohybovým zkouškám jsou využívány tělesa ve tvaru hranolu, která jsou umístěna na rovnoběžné podpěry o předepsané vzdálenosti dle normy ČSN EN ISO 178. Zkušební trn ve tvaru válečku je připevněn k hornímu příčniku a působí silou v osové rovině mezi podpěrami v případě tříbodového ohybu (obr. 22). V případě čtyřbodového ohybu (obr. 23) je síla rozdělena na dvě stejně velké síly působící v určitých bodech od podpěr [57], [60]:



Obr. 22 Zatěžování tříbodovým ohybem [60].



Obr. 23 Zatěžování čtyřbodovým ohybem [60].

Díky ohybové zkoušce lze určit modul pružnosti materiálů, u nichž to není možné stanovit s dostatečnou přesností pomocí tahových či tlakových zkoušek. Při namáhání v ohybu dochází k rozložení napětí, kdy nulové napětí je uprostřed (neutrální vrstva) a maximální hodnoty jsou v krajních vrstvách. Ty se dále v závislosti na působení síly dělí na tahové a tlakové. Napětí v ohybu lze získat pomocí vztahu (18) [57], [60]:

$$\sigma_o = \frac{M_o \cdot h}{I} = \frac{M_{o\max}}{W_o} [MPa] \quad (18)$$

M_o – ohybový moment [$N \cdot mm$],

I – moment setrvačnosti plochy průřezu tělesa vzhledem k neutrální ose [$Kg \cdot m^2$],

h – tloušťka materiálu [mm],

W_o – průřezový modul [mm^3].

Ohybový moment pro tříbodový ohyb lze vyjádřit pomocí vztahu (19), pokud se jedná o čtyřbodový ohyb je možné tento moment vyjádřit pomocí vztahu (20). Hodnota průřezového modulu pro zkušební tělesa ve tvaru hranolu je stanovena dle vztahu (21) [57], [60]:

$$M_o = \frac{F \cdot L}{4} [N \cdot mm] \quad (19)$$

F – síla [N],

L – vzdálenost podpěr [mm].

$$M_o = F \cdot L [N \cdot mm] \quad (20)$$

F – síla [N],

L – vzdálenost podpěr [mm].

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (21)$$

b – šířka hranolu [mm],

h – tloušťka hranolu [mm].

Dosazením hodnot do vztahu (18) lze získat výsledné vztahy pro napětí v ohybu pro tříbodový ohyb, viz vztah (22) a pro čtyřbodový ohyb viz vztah (23) [57], [60]:

$$\sigma_o = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot L}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (22)$$

$$\sigma_o = 6 \cdot \frac{F \cdot L_a}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (23)$$

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – VÝROBA VZORKŮ A JEJICH ZKOUŠKY

Následující část diplomové práce bude zaměřena na postup výroby zkušebních vzorků pomocí 3D tiskárny Markforged X7, následným popisem a provedením jednotlivých zkoušek za účelem zjištění mechanických vlastností vybraných kompozitních materiálů.

2.1 Použitá technologie

Všechny vzorky byly vyhotoveny pomocí CFR 3D tiskárny Markforged X7 (obr. 24). Jedná se o profesionální tiskárnu nejvyšší průmyslové třídy, která pro zajištění co největší rozměrové přesnosti používá laserovou inspekci spolu s uzavřenou tiskovou komorou pro zajištění teplotní stálosti.

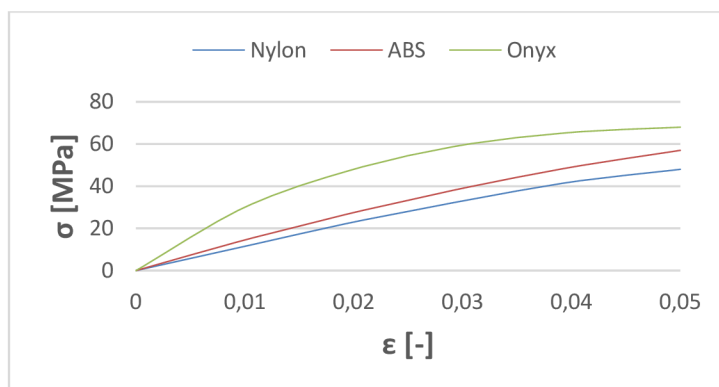


Obr. 24 3D Tiskárna Markforged X7 [46].

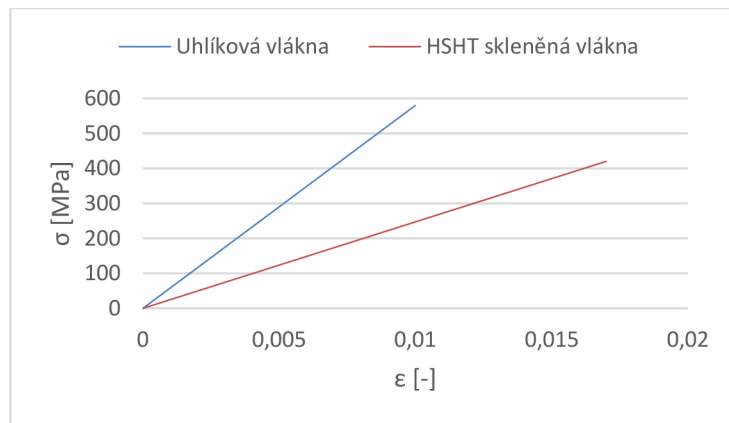
2.1.1 Použité materiály

Pro vybrané mechanické zkoušky byly zhotoveny zkušební vzorky z materiálu Onyx, jde o nylon plněný mikro uhlíkovými částicemi dosahující vyšší pevnosti než materiál ABS (obr. 25) [2], vyztužený spojitými vlákny.

Jako výztuž byla zvolena CF vlákna a HSHT vlákna (obr. 26). CF vlákna mají nejvyšší poměr pevnosti k hmotnosti z dostupných vyztužujících vláken. Běžně jsou tyto vlákna používána pro díly, které nahrazují opracovaný hliník. Ačkoli HSHT vlákna nejsou tak tuhá jako CF vlákna, stále se jedná o často používanou výztuž z důvodu vyšší teplotní odolnosti, což dělá z těchto vláken materiál vhodný pro vysokoteplotní prostředí, jako jsou formy [2].



Obr. 25 Porovnání vybraných matric při ohybovém zatížení [1].



Obr. 26 Porovnání vybraných výztuží při ohybovém zatížení [1].

2.1.2 Tiskové parametry

Tiskové parametry jako hustota a orientace výplně byly zvoleny s ohledem na dostupné informace o technologii 3D tisku a možnostech softwaru Eiger 3D zajišťující přípravu modelu pro tiskárny společnosti Markforged. Ostatní tiskové parametry, jako teplota extruze a rychlost tisku byly definovány výrobcem tiskárny a nacházejí se již v počítačovém softwaru Eiger 3D.

2.2 Zkouška tahem

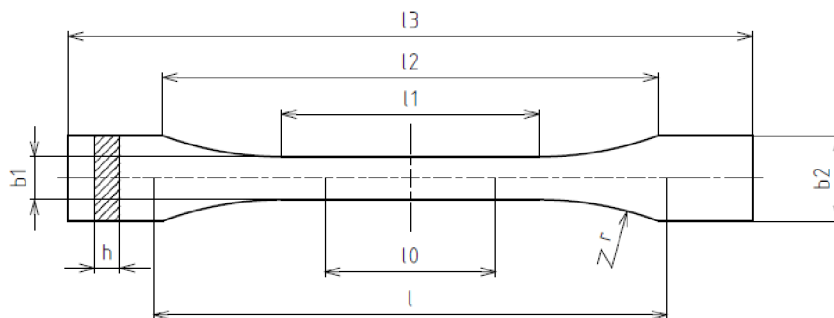
Tato část bude pojednávat detailním rozбором provedení tahové zkoušky s vhodným výběrem tvaru a rozměrů zkušební tělesa z kompozitního materiálu zhotoveného pomocí 3D tiskárny Markforged X7.

2.2.1 Výběr zkušební tělesa pro tahovou zkoušku

Rozměry a tvary zkušebních vzorků byly stanoveny dle normy ČSN ISO 527-2 [58]. Norma popisuje zkušební tělesa vytvořená vstříkáním, odléváním nebo lisováním.

V době realizace experimentální části neexistovala norma, která by specifikovala zkušební podmínky pro stanovení tahových vlastností kompozitních materiálů zhotovených pomocí technologie 3D tisku. Z toho důvodu byla zvolena norma ČSN ISO 527-2 [58].

Pro tahovou zkoušku kompozitních materiálů byla dle normy zvolena zkušební tyč s označením 1BA (obr. 27) s předepsanými rozměry (tab. 9). Zkušební tyč 1BA byla zvolena z důvodu možnosti porovnání výsledků s obdobnými studii a diplomovými pracemi zabývajícími se mechanickými vlastnostmi 3D tisknutých vzorků.



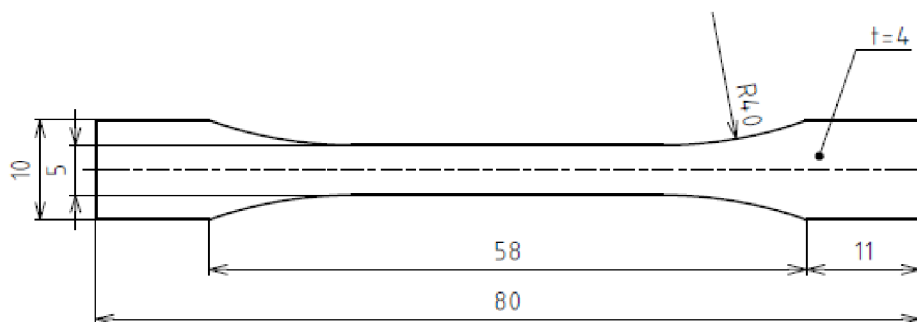
Obr. 27 Zkušební tyč 1BA [58].

Tab. 9 Rozměry zkušební tyče IBA [18].

Parametry	Typ zkušební tělesa	Rozměry [mm]
l_3	Celková délka	≥ 75
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	≥ 30
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2
b_2	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
h	Tloušťka	≥ 2
L_0	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$

2.2.2 Tvorba modelu zkušební vzorku

Model zkušební vzorku (obr. 28) byl vyhotoven pomocí parametrického programu Autodesk Inventor Professional o rozměrech, které odpovídaly normě EN ISO 527-2 [58].



Obr. 28 Model zkušební vzorku.

Model byl zkonstruován pomocí 2D skici základních rozměrů s následným použitím základních funkcí (vysunutí, zaoblení). Po dokončení modelování byl proveden export do formátu STL. Soubor ve formátu STL byl následně připraven pro tisk v programu Eiger 3D. Z důvodu tisku zkušebních vzorků na 3D tiskárně Markforged X7 nelze využít běžně dostupných softwarů jako je PrusaSlicer, Cura, apod.

2.2.3 Výroba zkušebních vzorků

Pro dostatečné statistické vyhodnocování dle normy musela být zkouška provedena alespoň na 5 zkušebních vzorcích [58]. V případě přetržení zkušební tyče v rozšířené části, vyklouznutí z čelistí nebo k předčasnému lomu, musí být zkušební vzorky vyřazeny ze statistického vyhodnocení.

Byly zhotoveny celkem čtyři skupiny vzorků (tab. 10). Pro každou z nich celkem 11 ks, kdy 1 ks sloužil k přípravě zkušebního zařízení a vhodné volbě upnutí. Všechny zkušební vzorky byly vyrobeny z materiálu společnosti Markforged s dostupnou tiskárnou této společnosti.

Tab. 10 Rozdělení zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku.

Typ	Počet vzorků
Onyx (100 %) + CF	11 ks
Onyx (25 %) + CF	11 ks
Onyx (100 %) + HSHT	11 ks
Onyx (25 %) + HSHT	11 ks

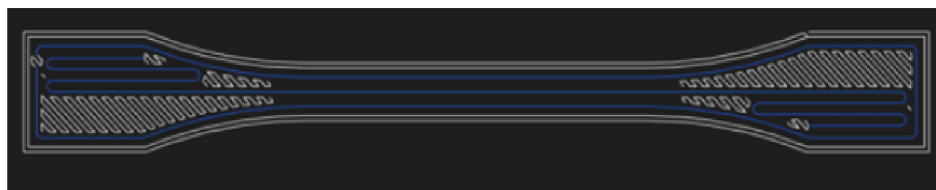
Tiskové parametry:

Byly zvoleny tiskové parametry uvedené v tab. 11. Výšku vrstvy nebylo možné sjednotit z důvodu odlišných tlouštěk CF a HSHT vláken. CF vlákna se nacházela ve vrstvách 0,625 mm až 1 mm, 3,125 mm až 3,5 mm a HSHT vlákna byla obsažena ve vrstvách 0,6 mm až 1 mm, 3,1 mm až 3,5 mm.

Tab. 11 Tiskové parametry.

	Onyx 25 % + CF	Onyx 100 % + CF	Onyx 25 % + HSHT	Onyx 100 % + HSHT
Výška vrstvy	0,125 mm	0,125 mm	0,1 mm	0,1 mm
Počet vrstev	32	32	40	40
Tloušťka stěny	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Hustota výplně Onyx	25 %	100 %	25 %	100 %
Vzor výplně Onyx	mřížka	mřížka	mřížka	mřížka
Počet perimetrů Onyx	2	2	2	2
Hustota výplně vláken	100 %	100 %	100 %	100 %
Počet perimetrů vláken	2	2	2	2
Vyztužené vrstvy	5. až 8., 25. až 28.	5. až 8., 25. až 28.	6. až 10., 31. až 35.	6. až 10., 31. až 35.

Kvůli rozměrům zkušební tyče a tloušťce vláken, nebylo možné vytisknout dva soustředné prstence / závity vyztužujícího vlákna dle nastavených tiskových parametrů (obr. 29). Oblast, kterou nebylo možné vyplnit pomocí vyztužujících vláken, byla vyplněna základním materiálem Onyx. Nedošlo k obsazení 2. vrstvy CF / HSHT vlákny, jelikož při nastavení 100 % hustoty výplně Onyx nebylo možné nastavit tisk vyztužujících vláken do 1. až 4. vrstvy. Tyto vrstvy obsahovaly 100 % hustotu výplně materiálem Onyx z důvodu omezení softwaru Eiger 3D.

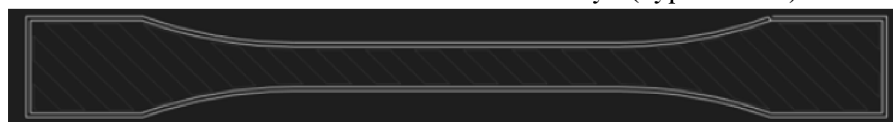


Obr. 29 Extrudovaná vrstva obsahující CF vlákno.

Po extruzi poslední vrstvy obsahující vyztužující vlákna (vrstva 8., resp. 10.) následovala extruze vrstvy materiálu Onyx, která má 100 % hustotu výplně (obr. 30) i případy, kdy je hustota výplně základního materiálu nastavena na 25 %. Poté již následuje vrstva dle zvolených parametrů (obr. 31).



Obr. 30 Extrudovaná vrstva materiálu Onyx (výplň 100 %).



Obr. 31 Extrudovaná vrstva materiálu Onyx (výplň 25 %).

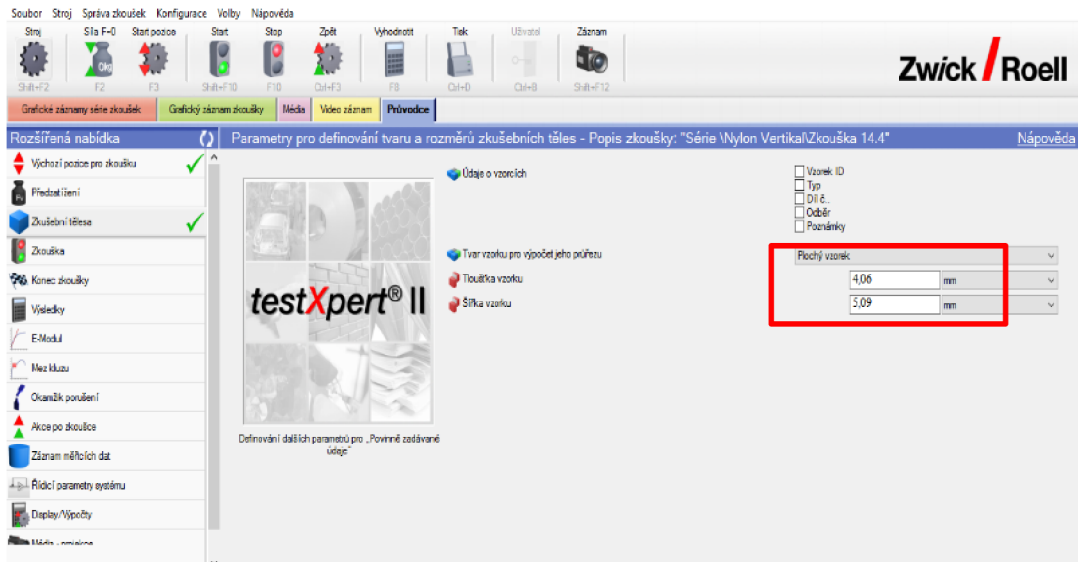
2.2.4 Provedení tahové zkoušky

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick Z100 (obr. 32). Došlo k připojení zkušebního zařízení pomocí datového kabelu k počítači, ve kterém byl od výrobce dodávaný program testXpert II. Pomocí tohoto programu došlo k nastavení vstupních parametrů zkoušky jako: výchozí rozměry vzorku, rychlost zatěžování, předzatížení nebo vzdálenost upínacích čelistí. Dále tento program sloužil k vyhodnocování průběhu zkoušky a výsledných parametrů jako: meze pevnosti, tažnosti, kluzu, modulu pružnosti a další.



Obr. 32 Zkušební zařízení Zwick Z100.

Před zahájením měření bylo nutné nastavit vstupní údaje dle normy EN ISO 527-2 [58]. Vzdálenost upínacích čelistí byla nastavena na hodnotu 60 mm. Dále došlo k nastavení vstupních rozměrů zúžené části zkušebních tyčí (obr. 33). Z důvodu omezené přesnosti technologie FDM 3D tisku, náchylnosti na rozměrovou stálost, byly všechny zkušební tyče přeměřeny pomocí digitálního posuvného měřidla (tab. 12).

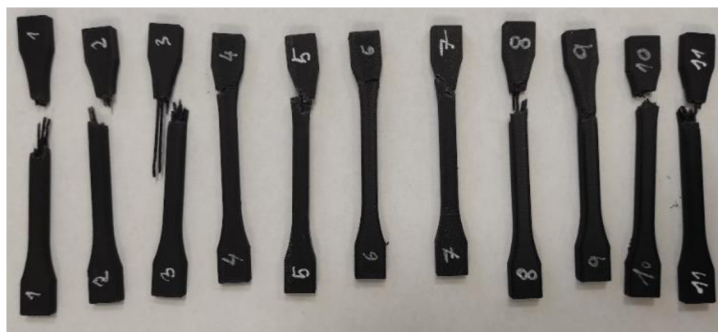


Obr. 33 Průvodce programu testXpert, zadávání vstupních parametrů.

Tab. 12 Intervaly vstupních rozměrů zkušebních tyčí.

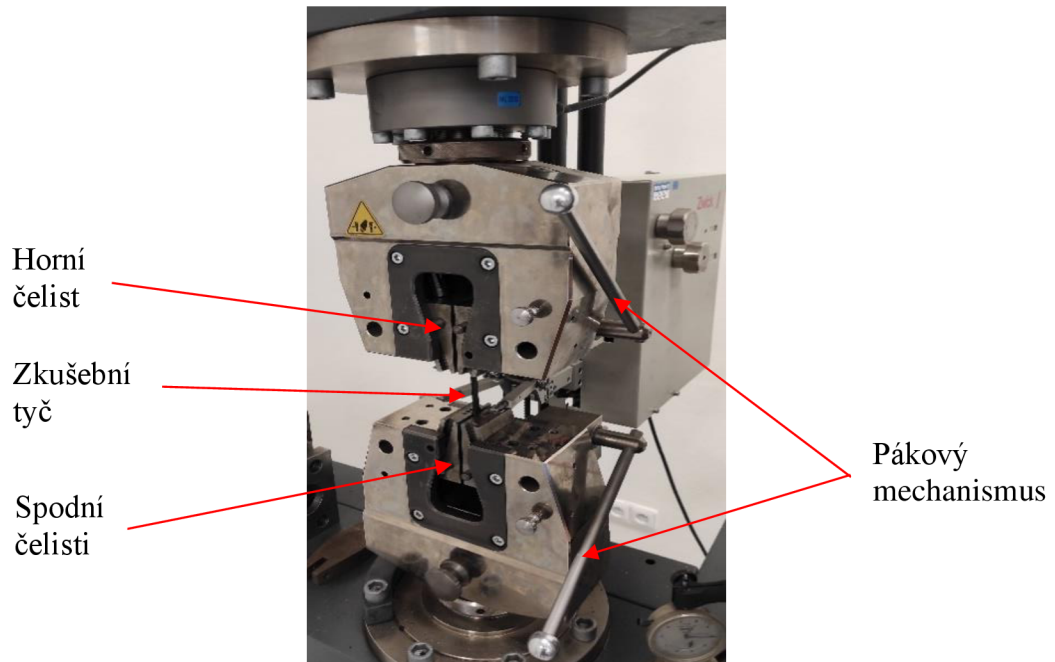
Materiál	Onyx+CF (100 %)	Onyx+CF (25 %)	Onyx+HSHT (100 %)	Onyx+HSHT (25 %)
Tloušťka [mm]	<3,98; 4,12>	<4,00; 4,15>	<4,00; 4,13>	<4,02; 4,12>
Šířka zúžené části [mm]	<5,00; 5,17>	<4,99; 5,15>	<5,01; 5,18>	<5,00; 5,18>

Po zadání vstupních parametrů do softwaru testXpert byly zkušební vzorky označeny čísly pro jednoznačné určení (obr. 34) a následně upnuty do zkušebního zařízení. Upínací sílu bylo nutné zvolit vhodně, aby nedošlo k vyklouznutí tyče z čelisti při příliš malé síle, ale ani k poškození zkušební tyče při příliš velké síle.



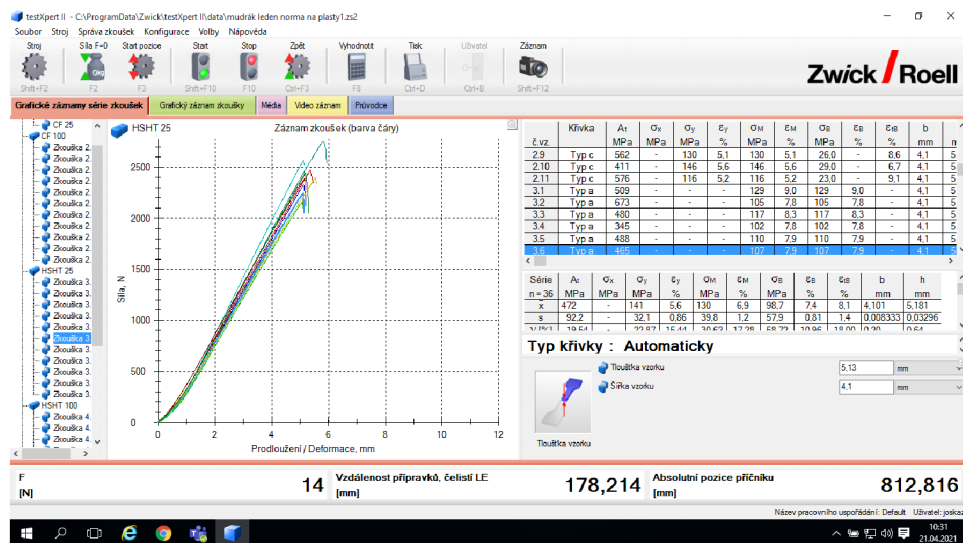
Obr. 34 Označení vzorků.

Upnutí zkušební tyče bylo realizováno pomocí čelistí. Došlo k vložení zkušební tyče mezi spodní čelisti, následnému sevření pomocí pákového mechanismu (obr. 35), vizuální kontrole rovnoběžnosti podélné osy zkušební vzorku s osou zkušebního zařízení a následovalo sevření mezi horní čelisti (obr. 35).



Obr. 35 Upínací část zkušebního zařízení.

Došlo k zahájení zkoušky tahem pomocí softwaru Test Xpert. V průběhu zkoušky byla graficky zobrazována závislost síly na deformaci (obr. 36). Po přetržení vzorku docházelo k automatickému ukončení zkoušky, vyhodnocení parametrů a vyjmutí jednotlivých částí zkušební tyče z čelistí. Následně se celý proces opakoval až do naměření všech vzorků daného typu. Následovalo vyhodnocení požadovaných parametrů, které byly exportovány do programu Excel pro další statistické vyhodnocení.



Obr. 36 Zobrazení průběhu tahových zkoušek.

2.3 Zkouška tvrdosti

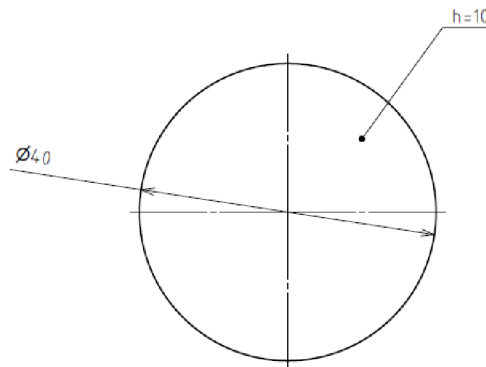
Tato část bude pojednávat detailním rozbořem provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore D s vhodným výběrem tvaru a rozměrů zkušební tělesa z kompozitního materiálu zhotoveného pomocí 3D tiskárny Markforged X7.

2.3.1 Výběr zkušební tělesa pro zkoušku tvrdosti

Rozměry a tvar zkušebních vzorků pro měření tvrdosti metodou Shore D byly stanoveny dle normy ČSN ISO 48-4 [69]. Tato norma určuje podmínky pro zkoušky tvrdosti vzorků z pryže, vulkanizovaného nebo termoplastického elastomeru.

2.3.2 Tvorba modelu zkušebních vzorků

Model zkušební vzorku pro zkoušku tvrdosti metodou Shore D (obr. 37), zvolený dle normy ČSN ISO 48-4 [69], byl vyhotoven pomocí 3D modelovacího programu Autodesk Inventor Professional. Postup zhotovení modelu a následné nastavení parametrů v softwaru Eiger 3D bylo stejné jako v kap. 2.2.2.



Obr. 37 Zkušební vzorek pro měření tvrdosti metodou Shore D.

2.3.3 Výroba zkušebních vzorků

Pro dosažení dostatečného počtu vtisků, dodržení minimální vzdálenosti mezi jednotlivými měřicími body a vzdálenosti měřícího bodu od okraje zkušební vzorku, byly vytisknuty 2 ks pro každou skupinu vzorků (tab. 13) pomocí tiskárny Markforged X7.

Tab. 13 Rozdělení zkušebních vzorků pro zkoušku tvrdosti.

Typ	Počet vzorků
Onyx (100 %) + CF	2 ks
Onyx (25 %) + CF	2 ks
Onyx (100 %) + HSHT	2 ks
Onyx (25 %) + HSHT	2 ks

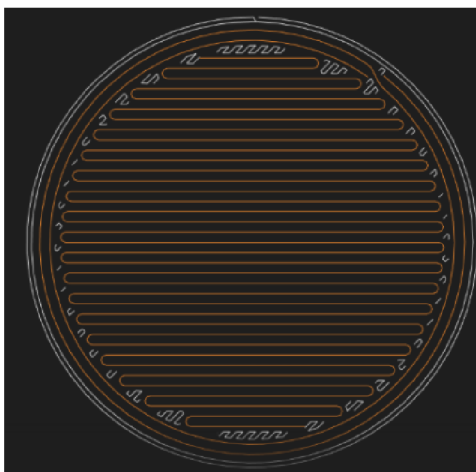
Tiskové parametry:

Byly zvoleny tiskové parametry uvedené v tab. 14. Výšku vrstvy nebylo možné sjednotit z důvodu odlišných tlouštěk CF a HSHT vláken. CF vlákna se nacházela ve vrstvách 0,625 mm až 1 mm, 9,125 mm až 9,5 mm a HSHT vlákna byla obsažena ve vrstvách 0,6 mm až 1 mm, 9,1 mm až 9,5 mm. Ostatní tiskové parametry se shodovaly s parametry pro zkoušku tahem (tab. 11).

Tab. 14 Zvolené tiskové parametry pro zkoušku tvrdosti

	Onyx 25 % + CF	Onyx 100 % + CF	Onyx 25 % + HSHT	Onyx 100 % + HSHT
Výška vrstvy	0,125 mm	0,125 mm	0,1 mm	0,1 mm
Počet vrstev	80	80	100	100
Tloušťka stěny	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Hustota výplně Onyx	25 %	100 %	25 %	100 %
Vzor výplně Onyx	mřížka	mřížka	mřížka	mřížka
Počet perimetrů Onyx	2	2	2	2
Hustota výplně vláken	100 %	100 %	100 %	100 %
Počet perimetrů vláken	2	2	2	2
Vyztužené vrstvy	5. až 8., 73. až 76.	5. až 8., 73. až 76.	6. až 10., 91. až 95.	6. až 10., 91. až 95.

Oblast, kterou nebylo možné vyplnit pomocí vyztužujících vláken byla vyplněna materiálem Onyx (obr. 38) stejně jako v případě tahové zkoušky, Vyztužující vlákna nebyla obsažena již ve 2. vrstvě, jelikož při nastavení 100 % hustoty výplně Onyx nelze tisknout vyztužující vlákna do 1. až 4. vrstvy (viz kap 2.2.2).



Obr. 38 Extrudovaná vrstva obsahující HSHT vlákna.

2.3.4 Provedení zkoušky tvrdosti metodou Shore D

Metoda Shore D umožňuje měřit tvrdost plastových materiálů. Pro měření byl použit tvrdoměr Bareiss Digi-Test (obr. 39).

Zkušební vzorek byl umístěn na podložku zkušebního zařízení, následně byl indentor vtlačován do zkušebního tělesa (obr. 40) po dobu 15 vteřin. Po uplynutí této doby došlo k odlehčení zkušebního tělesa a výsledná tvrdost byla zobrazena na výstupním zařízení. Měření tvrdosti metodou Shore D bylo prováděno o deseti opakováních pro každé těleso.

Naměřené hodnoty byly zaznamenány a následně zpracovány v programu Excel pro další statistické vyhodnocení.



Obr. 39 Zkušební zařízení Digi Tech.



Obr. 40 Zkušební vzorky pro zkoušku tvrdosti.

2.4 Zkouška ohybem

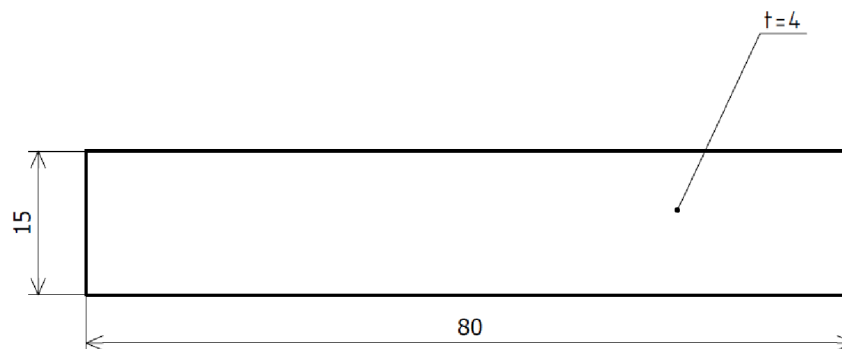
V této kapitole budou zvoleny vhodné rozměry zkušebních vzorků pro jednotlivé zkoušky ohybem s následným popisem zkušební metody.

2.4.1 Výběr zkušebního tělesa pro zkoušku ohybem

Rozměry a tvary zkušebních vzorků byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 178 [70]. Tato norma stanovovala podmínky pro zkoušení plastových materiálů a jejich ohybové vlastnosti. Pro zkoušku tříbodovým ohybem kompozitních materiálů byla zvolena zkušební tyč obdélníkového průřezu dle normy ČSN EN ISO 178 [70].

2.4.2 Tvorba modelu zkušebního vzorku

Model zkušební tyče (obr. 41) byl vyhotoven obdobně jako v kap. 2.2.2 pomocí parametrického programu Autodesk Inventor Professional o rozměrech odpovídající normě EN ISO 178. Postup zhotovení modelu a následné nastavení parametrů v softwaru Eiger 3D bylo stejné jako v kap. 2.2.2.



Obr. 41 Zkušební tyč pro zkoušku ohybem.

2.4.3 Výroba zkušebních vzorků

Pro dostatečné statistické vyhodnocování dle normy musela být zkouška provedena alespoň na 5 zkušebních vzorcích [70]. Došlo ke zhotovení čtyř skupin vzorků (tab. 15). Pro každou z nich celkem 11 ks, kdy 1 ks sloužil k přípravě zkušebního zařízení pro zajištění správného měření. Všechny zkušební vzorky byly vyrobeny z materiálu společnosti Markforges s dostupnou tiskárnou této společnosti.

Tab. 15 Rozdělení a počet zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku.

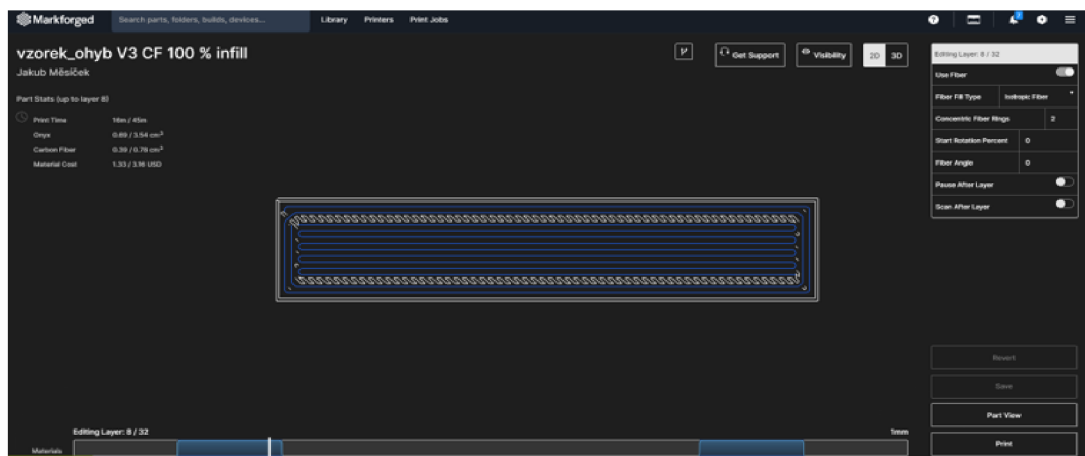
Typ	Počet vzorků
Onyx (100 %) + CF	11 ks
Onyx (25 %) + CF	11 ks
Onyx (100 %) + HSHT	11 ks
Onyx (25 %) + HSHT	11 ks

Tiskové parametry:

Byly zvoleny tiskové parametry uvedené v tab. 16. Výšku vrstvy nebylo možné sjednotit z důvodu odlišných tloušťek CF vláken a HSHT vláken. CF vlákna jsou obsažena ve vrstvách 0,625 mm až 1 mm (obr. 42), 3,125 mm až 3,5 mm a HSHT vlákna se nacházejí ve vrstvách 0,6 mm až 1 mm, 3,1 mm až 3,5 mm.

Tab. 16 Zvolené tiskové parametry pro tříbodový ohyb.

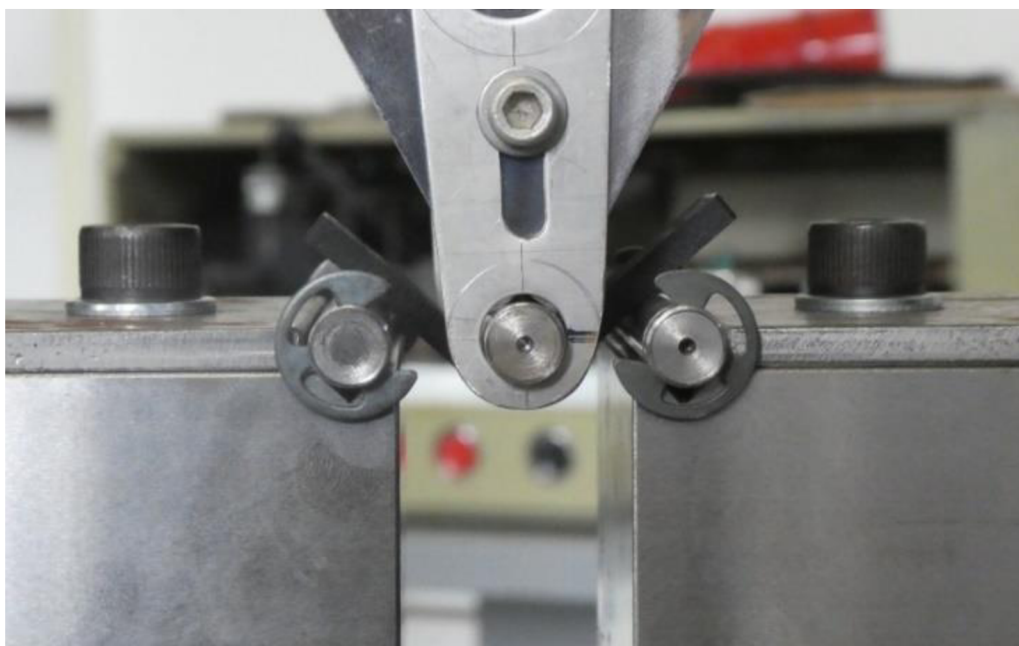
	Onyx 25 % + CF	Onyx 100 % + CF	Onyx 25 % + HSHT	Onyx 100 % + HSHT
Výška vrstvy	0,125 mm	0,125 mm	0,1 mm	0,1 mm
Počet vrstev	32	32	40	40
Tloušťka stěny	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm
Hustota výplně Onyx	25 %	100 %	25 %	100 %
Vzor výplně Onyx	mřížka	mřížka	mřížka	mřížka
Počet perimetrů Onyx	2	2	2	2
Hustota výplně vláken	100 %	100 %	100 %	100 %
Počet perimetrů vláken	2	2	2	2
Vyztužené vrstvy	5. až 8., 25. až 28.	5. až 8., 25. až 28.	6. až 10., 31. až 35.	6. až 10., 31. až 35.



Obr. 42 Vrstva obsahující CF vlákno v softwaru Eiger 3D.

2.4.3 Provedení zkoušky ohybem

Zkouška ohybem byla provedena obdobně jako zkouška tahem na zařízení Zwick Z100 (viz obr. 32). Příprava ohybové zkoušky byla shodná s přípravou pro zkoušku tahem (viz kap. 2.2.4), ale čelisti použité pro zkoušku tahem byly nahrazeny přípravkem pro zkoušku tříbodovým ohybem (obr. 43). Poloměry všech válečků a vzdálenost podpěrných válečků byly zvoleny dle normy ČSN EN ISO 178 [70].



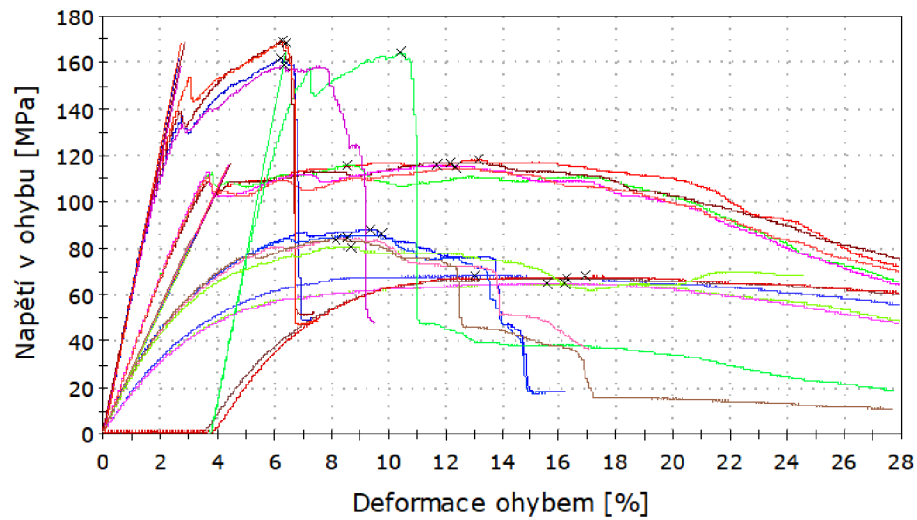
Obr. 43 Detail zkušební vzorku s přípravkem pro zkoušku ohybem.

Před vložením zkušební tyče na přípravek byly změřeny příčné rozměry pomocí digitálního posuvného měřidla (tab. 17). Naměřené hodnoty byly následně zadány do softwaru Test Expert II (viz obr. 33).

Tab. 17 Intervaly vstupních rozměrů.

Materiál	Onyx + CF (100 %)	Onyx + CF (25 %)	Onyx + HSHT (100 %)	Onyx + HSHT (25 %)
Tloušťka [mm]	<3,98; 4,13>	<4,00; 4,11>	<3,98; 4,14>	<4,02; 4,14>
Šířka [mm]	<14,99; 15,16>	<15,00; 15,16>	<15,00; 15,20>	<14,98; 15,18>

Následně bylo pomocí softwaru test Xpert II zahájena zkouška. Počáteční průhyb byl nastaven na 0,09 mm. Zatěžovací váleček o poloměru 5 mm se začne pohybovat v příčném směru proti vzorku předdefinovanou rychlostí zatěžování 2 mm/min. Posuvem zatěžovacího válečku došlo k vyvolání síly působící proti směru pohybu válečku a do softwaru testXpert II byla zaznamenána data o průběhu ohybové zkoušky (obr. 44).



Obr. 44 Průběhy ohybových zkoušek.

3 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Následující část práce se bude zabývat vyhodnocením naměřených dat z provedených zkoušek. Experimentálně získaná data budou vyhodnocena pro jednotlivé zkoušky a sledované parametry.

Naměřená data byla vyhodnocena pomocí softwaru Minitab a Microsoft Excel. Postup vyhodnocování dat byl proveden na základě konzultace s Ing. Josefem Bednářem, Ph.D. zabývajícím se statistikou.

Byl proveden Anderson-Darlingův Test Normality, který potvrdil normální rozdělení všech naměřených dat. Test spočíval v určení P-hodnoty, jestliže je hodnota vyšší než 0,05, data se spolehlivostí větší než 95 % mají normální rozdělení. Pokud byla tato podmínka splněna, došlo pomocí T-testu v softwaru Minitab ke stanovení střední hodnoty, medián, minimum, maximum, rozptyl, směrodatnou odchylku a chybu střední hodnoty.

3.1 Vyhodnocení tahové zkoušky

V této části budou vyhodnocena naměřená data zkušebních vzorků pro zkoušku tahem. Matici tvoří materiál Onyx, který byl vyztužen CF nebo HSHT vlákny. Naměřená data z tahové zkoušky neodpovídala normě ČSN EN ISO 527-2 [58], jelikož zkušební tyče byly přetrženy v zúžené části pouze ojedinele (obr. 45, obr. 46).



Obr. 45 Detail normovaného lomu zkušební tyče s CF vlákny.

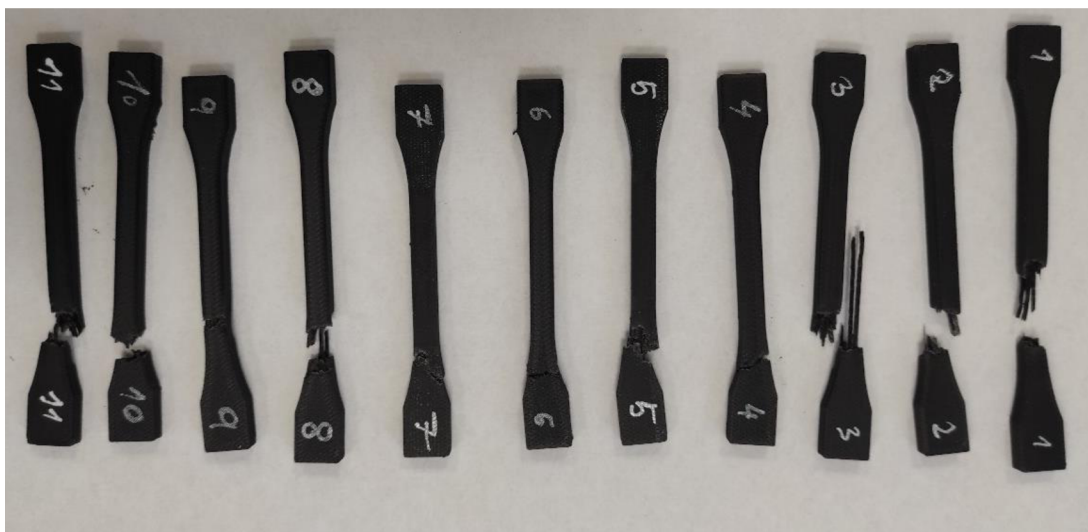


Obr. 46 Detail normovaného lomu zkušební tyče s CF vlákny (24x zvětšeno).

K deformaci docházelo obdobně jako v případě diplomové práce [7] u většiny vzorků k přetržení v oblasti vrubu. Takto přetržené vzorky měly být dle normy ČSN EN ISO 527-2 vyřazeny ze statistického hodnocení [58]. Zkušební tyče byly zhotoveny pro dvě hustoty výplně materiálu Onyx (25 % a 100 %). V obou případech docházelo k lomu ve stejné části. Tím bylo ověřeno, že hustota výplně matrice nemá vliv na oblast lomu.

Byla snaha o výběr vhodného nastavení upnutí, ale síla sevření čelistí ani vzdálenost čelistí neměla výrazný vliv na oblast přetržení zkušební vzorku. Nepodařilo se tedy zajistit přetržení v zúžené části pro celou zkušební sérii pro žádný z testovaných materiálů (obr. 47).

Z níže uvedeného obr. 47 je v některých případech patrné vytahování CF vláken z matrice. K vytahování vláken dochází pravděpodobně z důvodu nedokonalého smáčení a špatného mezifázového spojení, čímž se již dříve zabývaly studie [15], [16], [17] uvedené v úvodní části diplomové práce.



Obr. 47 Přetržené vzorky s CF vlákny.

Pro tahovou zkoušku kompozitních materiálů vyrobených aditivní technologií by bylo vhodné vytvořit normu, která by používala zkušební tyč obdélníkového, případně kruhového průřezu bez rozšiřujících částí v celé délce. S největší pravděpodobností dochází v oblasti vrubu ke koncentraci napětí z důvodu nízké ohybnosti kontinuálních vláken, což také popisuje studie [14] uvedená v úvodu. Tato teorie nebyla během experimentální části ověřena.

Po prozkoumání rozložení vláken a orientace tisku došlo k zjištění, že software Eiger 3D zvolil začátek tisku vnějších perimetrů základního materiálu místo spojující oblast vrubu a upínací část (viz obr. 29, obr. 30 a obr. 31). V tomto místě nedocházelo k přetržení zkušebních k tyčí, mohlo však negativně ovlivnit celou oblast vrubu. Toto zjištění nebylo možné během experimentální části ověřit.

Vzhledem k četnosti lomu v rozšířené vrubové části nebyly výsledné hodnoty těchto zkušebních vzorků i přes nesoulad s normou vyřazeny ze statistického vyhodnocení. Sledovanými parametry byly meze pevnosti, tažnosti a moduly pružnosti.

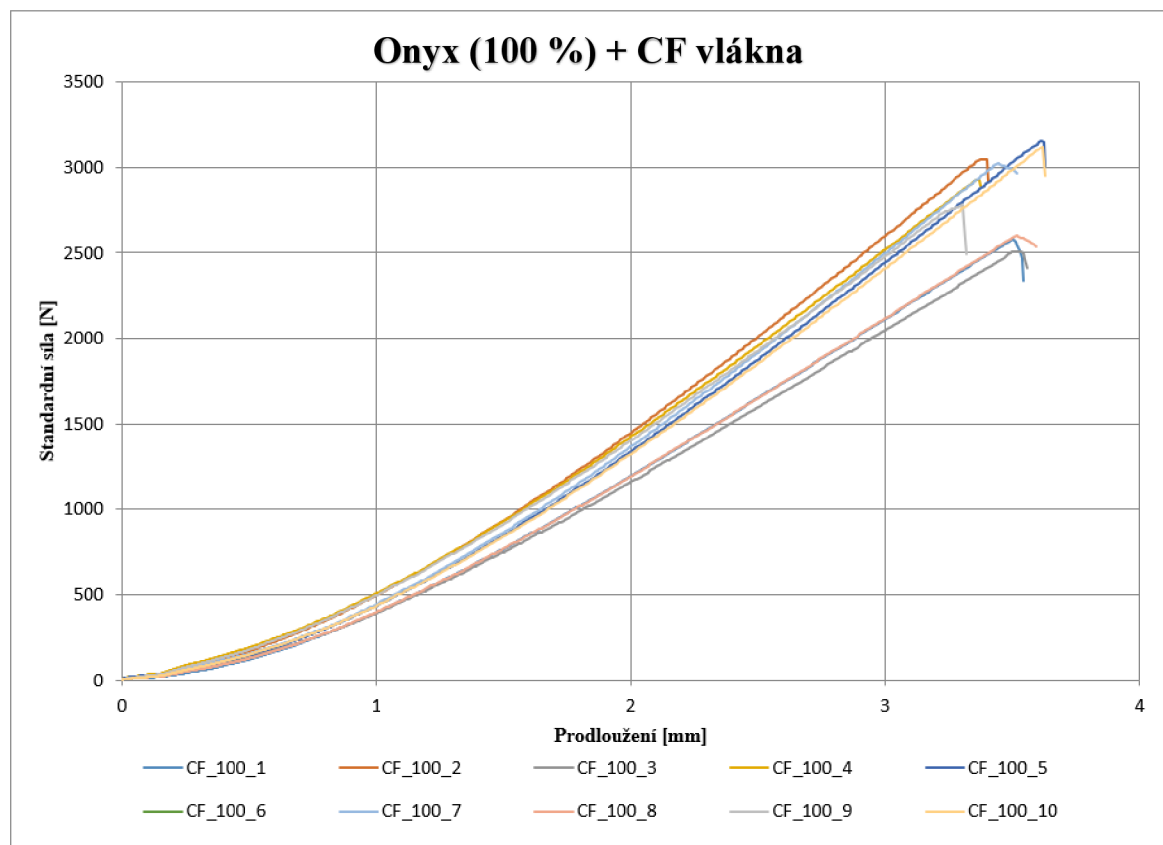
3.1.1 Výsledky tahové zkoušky Onyx (100 %) + CF vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 18. Hodnoty nebyly v souladu s normou dle ČSN EN ISO 527-2 [58] (viz kap. 3.1). Průběhy tahových zkoušek byly znázorněny na obr. 48.

Tab. 18 Základní statistické parametry vzorků Onyx (100 %) + CF vlákna.

	Mez pevnosti Rm	Tažnost At	Modul pružnosti E
Průměr	132,1 MPa	11,6 %	1177,2 MPa
Medián	130,3 MPa	11,7 %	1181,5 MPa
Minimum	116,0 MPa	11,0 %	1136,3 MPa
Maximum	148,1 MPa	12,1 %	1224,9 MPa
Rozptyl*	139,840	0,164	742,237
Směrodatná odchylka*	11,825	0,405	27,244
Chyba střední hodnoty*	3,565	0,122	8,14
Hladina spolehl. (95 %)*	0,393	0,433	0,454

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 48 Průběhy tahových zkoušek vzorků Onyx (100 %) + CF vlákna.

3.1.2 Výsledky tahové zkoušky Onyx (25 %) + CF vlákna

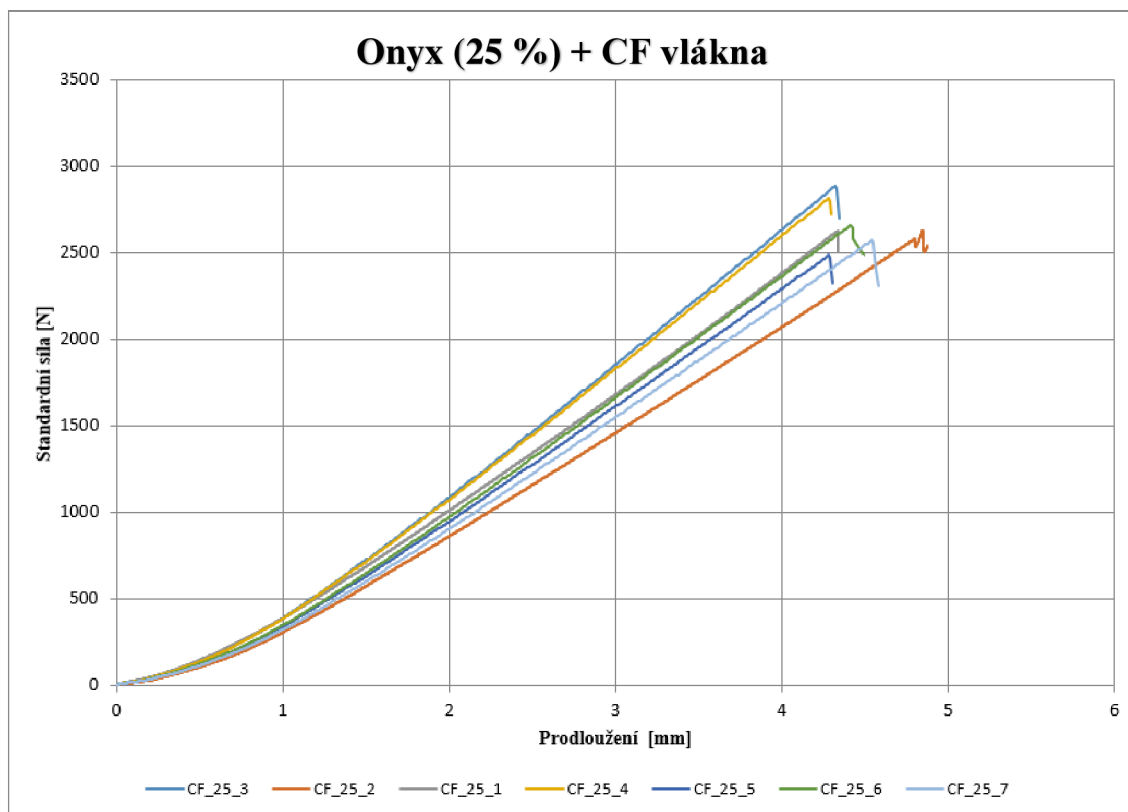
Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 19. Hodnoty nebyly v souladu s normou dle ČSN EN ISO 527-2 [58] (viz kap. 3.1). Průběhy tahových zkoušek byly znázorněny na obr. 49.

Statistické vyhodnocení bylo provedeno pouze pro 7 ks zkušebních tyčí z důvodu chyby softwaru Test Xpert II, která vyústila ve ztrátu dat 3 ks tyčí. Před ztrátou dat došlo k vizuální kontrole průběhů těchto ztracených dat. Grafické závislosti dosahovaly obdobných hodnot jako na obr. 49. Zkušební tyče tedy nevykazovaly anomální chování, proto nemusela být vyrobena nová série vzorků.

Tab. 19 Základní statistické parametry vzorků Onyx (25 %) + CF vlákna.

	Mez pevnosti Rm	Tažnost At	Modul pružnosti E
Průměr	125,2 MPa	14,9 %	857,7 MPa
Medián	123,4 MPa	14,5 %	845,9 MPa
Minimum	116,6 MPa	14,3 %	794,9 MPa
Maximum	135,6 MPa	16,3 %	937,8 MPa
Rozptyl*	43,097	0,494	3542,099
Směrodatná odchylka*	6,565	0,703	59,516
Chyba střední hodnoty*	2,481	0,266	22,495
Hladina spolehl. (95 %)*	0,413	0,075	0,367

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 49 Průběhy tahových zkoušek vzorků Onyx (25 %) + CF vlákna.

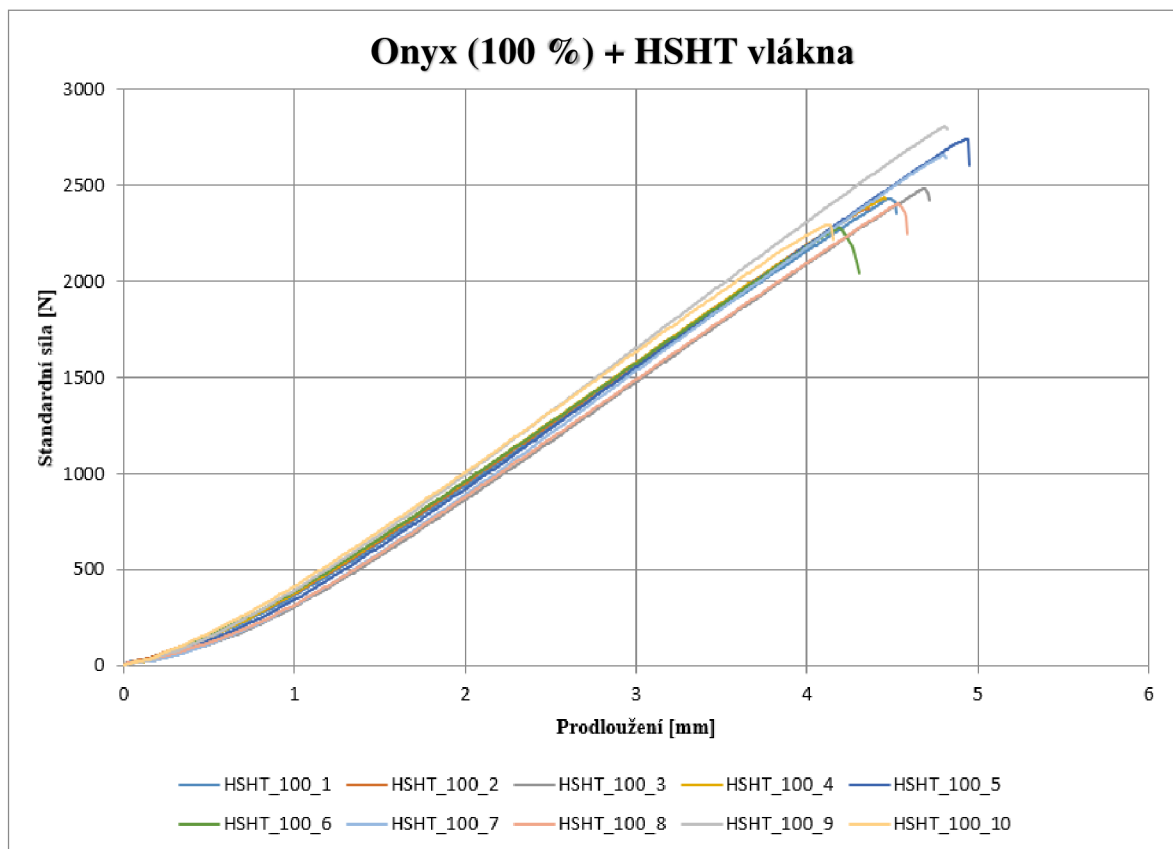
3.1.3 Výsledky tahové zkoušky Onyx (100 %) + HSHT vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 20. Hodnoty nebyly v souladu s normou dle ČSN EN ISO 527-2 [58] (viz kap. 3.1). Průběhy tahových zkoušek byly znázorněny na obr. 50.

Tab. 20 Základní statistické parametry vzorků Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

	Mez pevnosti Rm	Tažnost At	Modul pružnosti E
Průměr	116,7 MPa	15,2 %	783,7 MPa
Medián	114,2 MPa	15,1 %	784,5 MPa
Minimum	106,9 MPa	13,8 %	752,2 MPa
Maximum	131,7 MPa	16,5 %	835,3 MPa
Rozptyl*	66,560	0,671	513,723
Směrodatná odchylka*	8,158	0,819	22,665
Chyba střední hodnoty*	2,460	0,247	6,834
Hladina spolehl. (95 %)*	0,177	0,887	0,437

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 50 Průběhy tahových zkoušek vzorků Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

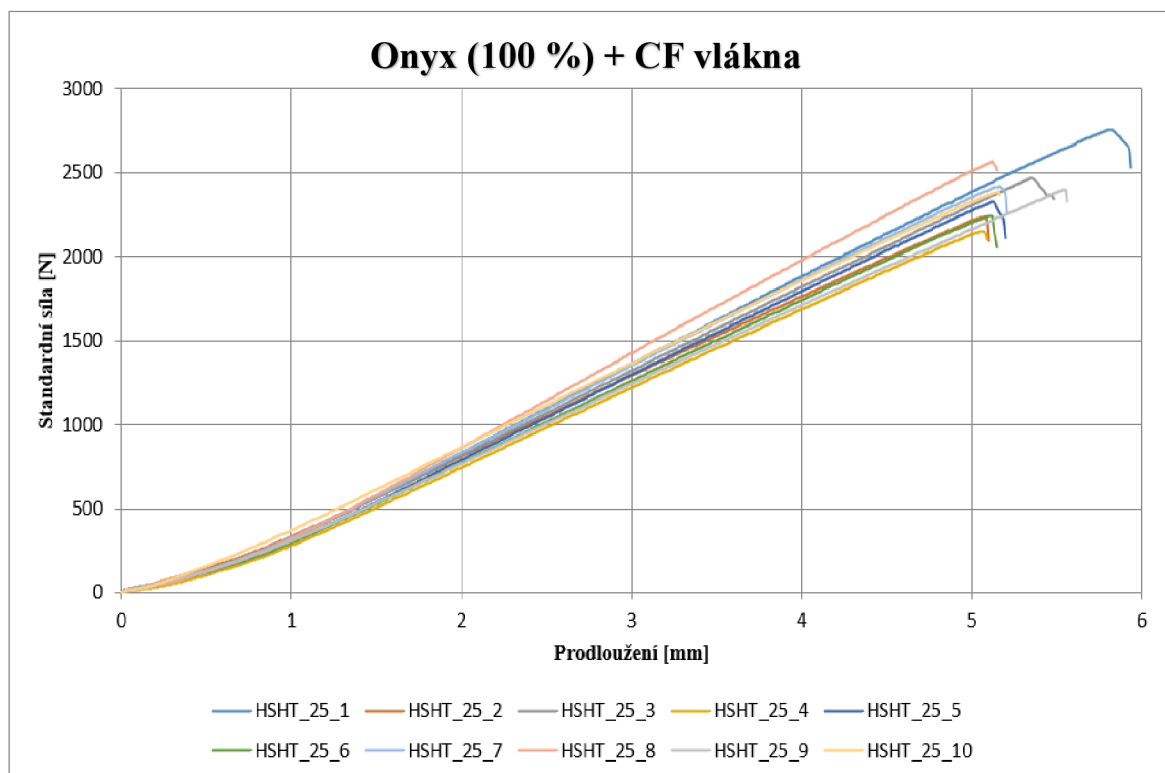
3.1.4 Výsledky tahové zkoušky Onyx (25 %) + HSHT vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 21. Hodnoty nebyly v souladu s normou dle ČSN EN ISO 527-2 [58] (viz kap. 3.1). Průběhy tahových zkoušek byly znázorněny na obr. 51.

Tab. 21 Základní statistické parametry vzorků Onyx (25 %) + HSHT vlákna.

	Mez pevnosti Rm	Tažnost At	Modul pružnosti E
Průměr	112,5 MPa	17,3 %	657,7 MPa
Medián	112,6 MPa	17,2 %	660,12 MPa
Minimum	101,0 MPa	17,0 %	613,8 MPa
Maximum	129,3 MPa	18,2 %	721,1 MPa
Rozptyl*	61,109	0,150	1022,881
Směrodatná odchylka*	7,817	0,387	31,983
Chyba střední hodnoty*	2,357	0,117	9,643
Hladina spolehl. (95 %)*	0,636	0,064	0,817

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.

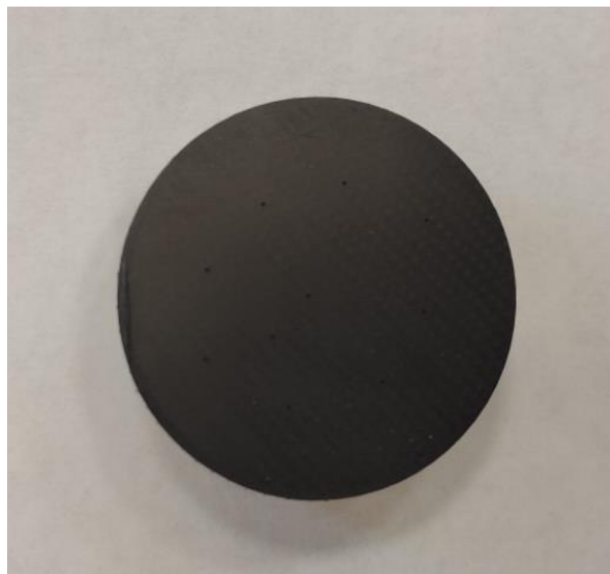


Obr. 51 Průběhy tahových zkoušek vzorků Onyx (25 %) + HSHT vlákna.

3.2 Vyhodnocení tvrdosti Shore D

V této části budou vyhodnocena naměřená data zkušebních vzorků pro zkoušku tvrdosti metodou Shore D. Matrici tvoří materiál Onyx, který je vyztužen CF nebo HSHT vlákny. Naměřená data odpovídají normě ČSN ISO 48-4 [69].

Při měření byly dodrženy minimální vzdálenosti mezi jednotlivými vtisky a vzdálenosti od kraje vzorku. Pro každý materiál byly zhotoveny 2 zkušební vzorky. Celkem došlo k naměření 20 hodnot tvrdosti pro každý materiál, což odpovídalo 10 vtiskům pro 1 vzorek (obr. 52).



Obr. 52 Zkušební vzorek pro tvrdost Shore D Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

3.2.1 Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + CF vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny hodnoty tvrdosti v tab. 22, které byly v souladu s normou ČSN ISO 48-4 [58].

Tab. 22 Statistické vyhodnocení tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + CF vlákna.

Parametry	Hodnoty
Průměr	75,3 HShD
Medián	75,3 HShD
Minimum	72,5 HShD
Maximum	77,4 HShD
Rozptyl*	1,368
Směrodatná odchylka*	1,169
Chyba střední hodnoty*	0,262
Hladina spolehl. (95 %)*	0,699

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.

3.2.2 Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + CF vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny hodnoty tvrdosti v tab. 23, které byly v souladu s normou ČSN ISO 48-4 [58].

Tab. 23 Statistické vyhodnocení tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + CF vlákna.

Parametry	Hodnoty
Průměr	65,6 HShD
Medián	65,4 HShD
Minimum	64,2 HShD
Maximum	67,8 HShD
Rozptyl*	1,234
Směrodatná odchylka*	1,111
Chyba střední hodnoty*	0,248
Hladina spolehl. (95 %)*	0,218

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.

3.2.3 Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + HSHT vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny hodnoty tvrdosti v tab. 24, které byly v souladu s normou ČSN ISO 48-4 [58].

Tab. 24 Statistické vyhodnocení tvrdosti Shore D Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

Parametry	Hodnoty
Průměr	71,7 HShD
Medián	71,9 HShD
Minimum	70,1 HShD
Maximum	73,5 HShD
Rozptyl*	0,786
Směrodatná odchylka*	0,887
Chyba střední hodnoty*	0,198
Hladina spolehl. (95 %)*	0,577

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.

3.2.4 Výsledky tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + HSHT vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny hodnoty tvrdosti v tab. 25, které byly v souladu s normou ČSN ISO 48-4 [58].

Tab. 25 Statistické vyhodnocení tvrdosti Shore D Onyx (25 %) + HSHT vlákna.

Parametry	Hodnoty
Průměr	68,1 HShD
Medián	68,4 HShD
Minimum	66,2 HShD
Maximum	69,5 HShD
Rozptyl*	0,874
Směrodatná odchylka*	0,935
Chyba střední hodnoty*	0,209
Hladina spolehl. (95 %)*	0,390

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.

3.3 Vyhodnocení zkoušky třibodovým ohybem

V této části budou vyhodnocena naměřená data zkušebních vzorků pro zkoušku ohybem. Matrice byla tvořena materiálem, která byla vyztužena + CF vlákny nebo HSHT vlákny. Naměřená data zkoušky ohybem odpovídala normě ČSN EN ISO 178 [70].

Pro každý materiál bylo zhotoveno 10 ks vzorků, které měly být použity pro statistické vyhodnocení parametrů. Z důvodů panujících epidemických opatření a časové náročnosti zkoušky bylo možné tuto zkoušku provést pouze pro 5 ks. Jelikož nedošlo k žádné anomálii byl tento počet pro statistické vyhodnocení dostačující.

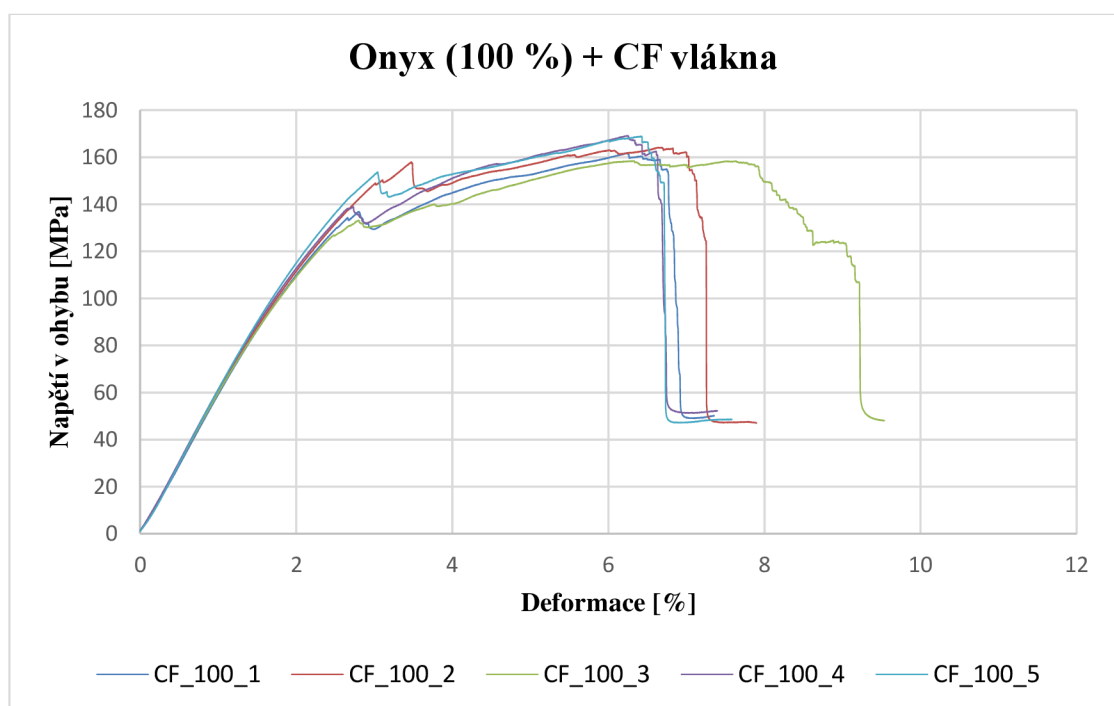
3.3.1 Výsledky zkoušky třibodovým ohybem Onyx (100 %) + CF vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel došlo ke statistickému vyhodnocení jednotlivých parametrů v tab. 26 v souladu s normou dle ČSN EN ISO 178 [58]. Průběhy ohybových zkoušek byly graficky znázorněny na obr. 53.

Tab. 26 Statistické vyhodnocení zkoušky třibodovým ohybem Onyx (100 %) + CF vlákna.

	Pevnost v ohybu	Deformace
Průměr	164,5 MPa	6,4 %
Medián	164,1 MPa	6,3 %
Minimum	158,5 MPa	6,2 %
Maximum	169,2 MPa	6,6 %
Rozptyl*	21,088	0,027
Směrodatná odchylka*	4,592	0,164
Chyba střední hodnoty*	2,054	0,073
Hladina spolehl. (95 %)*	0,518	0,178

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 53 Průběhy ohybových zkoušek vzorků Onyx (100 %) + CF vlákna.

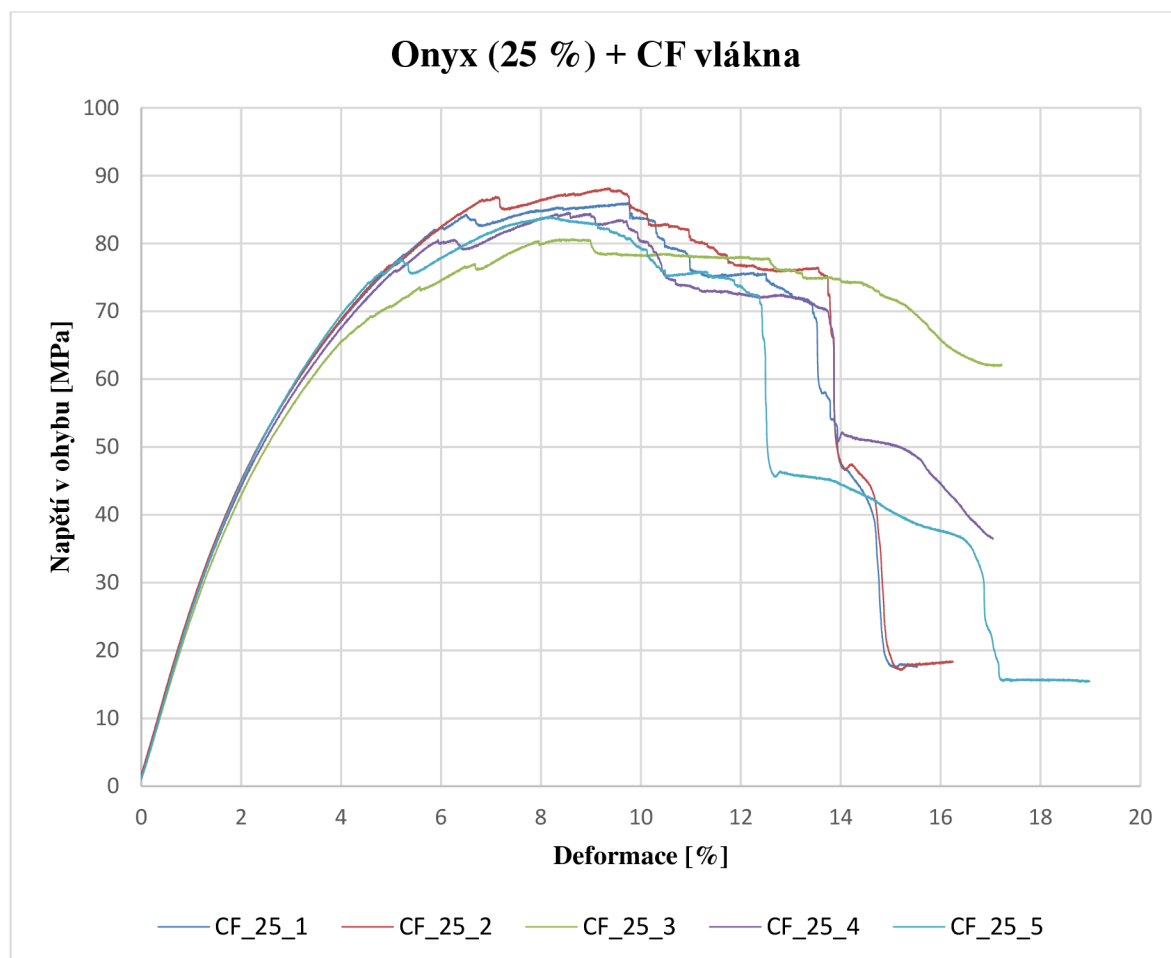
3.3.2 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + CF vlákna

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 27 v souladu s normou dle ČSN EN ISO 178 [58]. Průběhy ohybových zkoušek byly graficky znázorněny na obr. 54.

Tab. 27 Statistické vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + CF vlákna.

	Pevnost v ohybu	Deformace
Průměr	84,7 MPa	8,9 %
Medián	84,6 MPa	8,7 %
Minimum	80,7 MPa	8,1 %
Maximum	88,2 MPa	9,7 %
Rozptyl*	7,609	0,419
Směrodatná odchylka*	2,758	0,647
Chyba střední hodnoty*	1,24	0,289
Hladina spolehl. (95 %)*	0,813	0,642

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 54 Průběhy ohybových zkoušek vzorků Onyx (25 %) + CF vlákna.

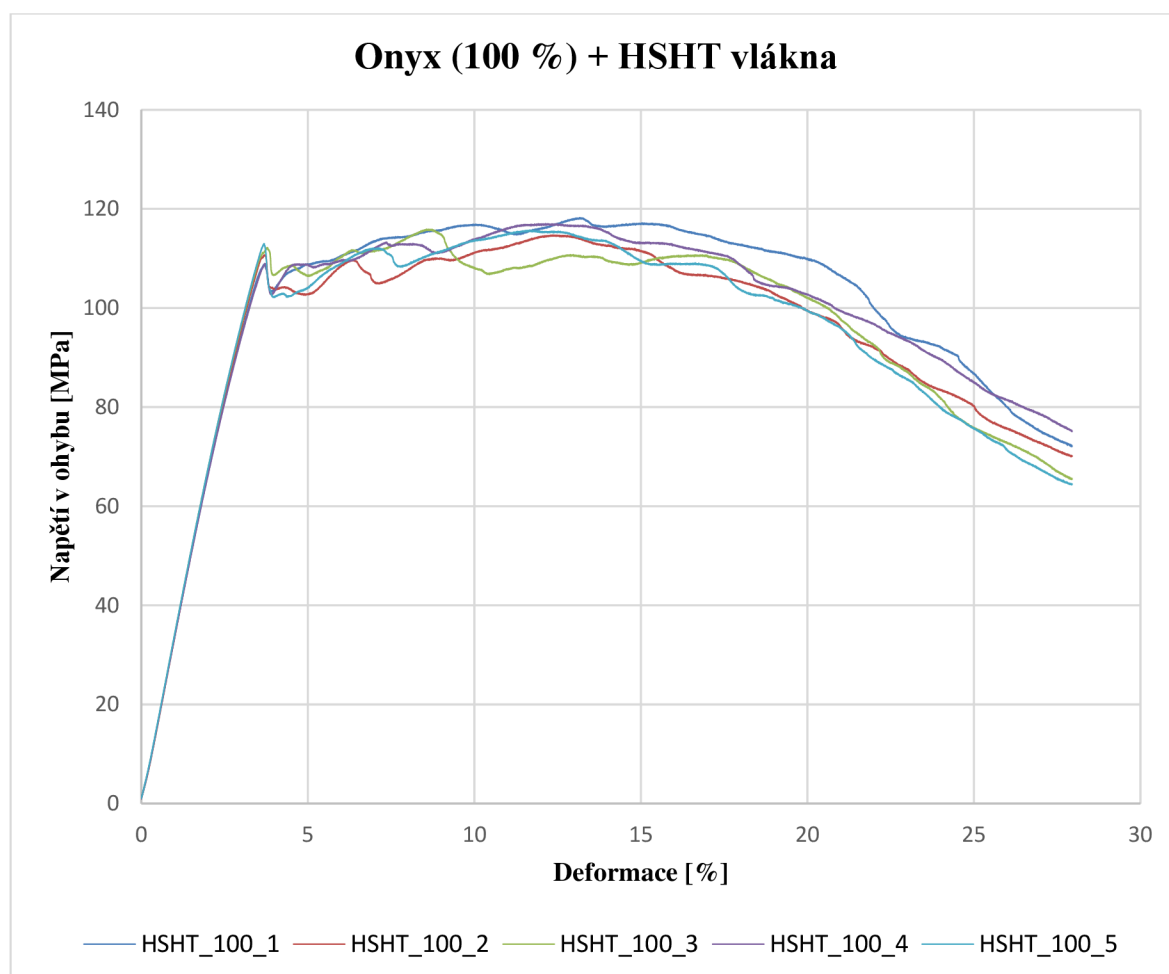
3.3.3 Výsledky zkoušky třibodovým ohybem Onyx (100 %) s HSHT vlákny

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 28 v souladu s normou dle ČSN EN ISO 178 [58]. Průběhy ohybových zkoušek byly graficky znázorněny na obr. 55.

Tab. 28 Statistické vyhodnocení zkoušky třibodovým ohybem Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

	Pevnost v ohybu	Deformace
Průměr	116,3 MPa	11,6 %
Medián	116,0 MPa	12,1 %
Minimum	114,8 MPa	8,6 %
Maximum	118,2 MPa	13,2 %
Rozptyl*	1,771	3,140
Směrodatná odchylka*	1,331	1,772
Chyba střední hodnoty*	0,595	0,792
Hladina spolehl. (95 %)*	0,725	0,104

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 55 Průběhy ohybových zkoušek vzorků Onyx (100 %) + HSHT vlákna.

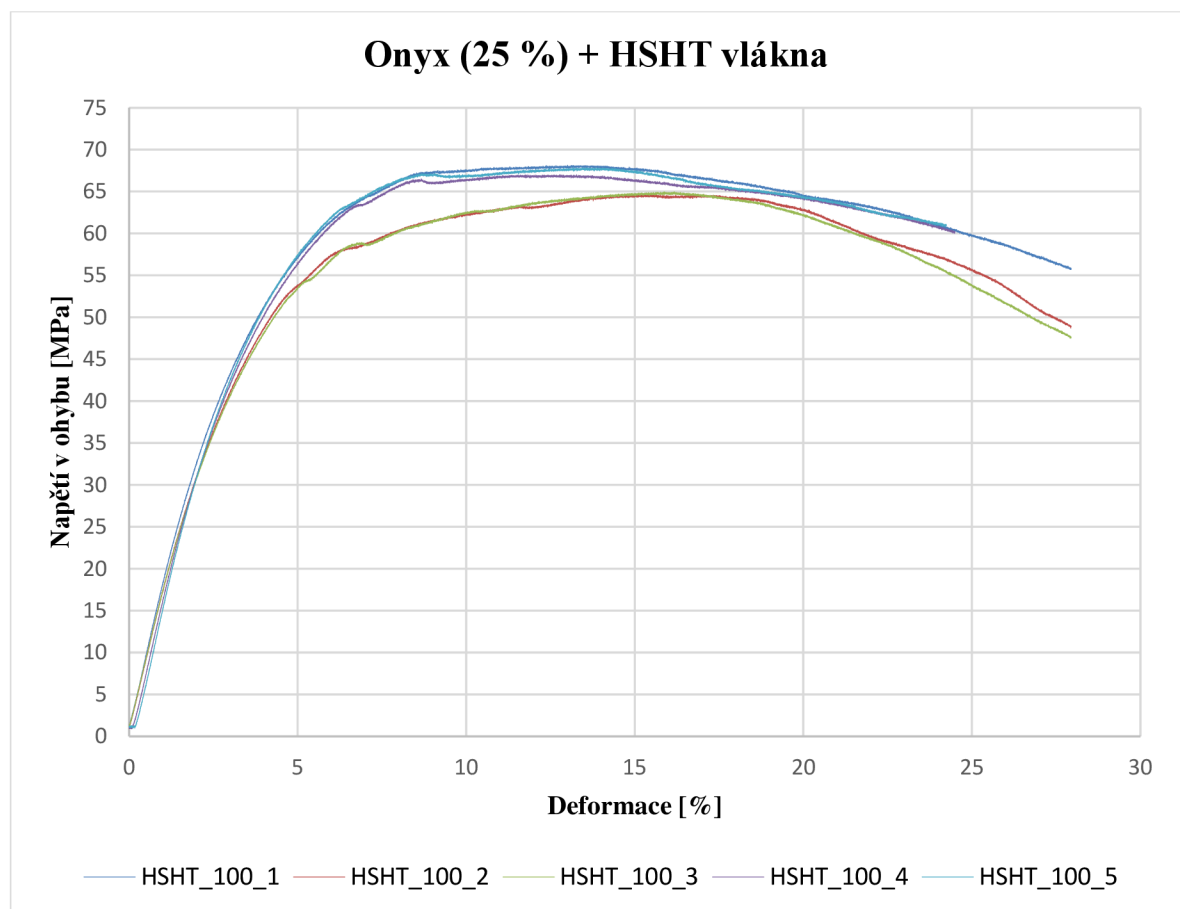
3.3.4 Výsledky zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + HSHT vlákny

Pomocí počítačových softwarů Minitab a Microsoft Excel byly statisticky vyhodnoceny jednotlivé parametry v tab. 29 v souladu s normou dle ČSN EN ISO 178 [58]. Průběhy ohybových zkoušek byly graficky znázorněny na obr. 56.

Tab. 29 Statistické vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem Onyx (25 %) + HSHT vlákna.

	Pevnost v ohybu	Deformace
Průměr	66,5 MPa	15,0 %
Medián	67,1 MPa	14,6 %
Minimum	64,6 MPa	14,0 %
Maximum	68,2 MPa	16,2 %
Rozptyl*	2,678	0,741
Směrodatná odchylka*	1,636	0,861
Chyba střední hodnoty*	0,732	0,385
Hladina spolehl. (95 %)*	0,251	0,517

* Hodnoty nebyly zaokrouhleny na desetiny z důvodu možné chyby při vyhodnocování.



Obr. 56 Průběhy ohybových zkoušek vzorků Onyx (25 %) + HSHT vlákna.

4 TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola se bude zabývat srovnáním parametrů jednotlivých kompozitních materiálů mezi sebou a celkovým doporučením pro uživatele. Níže uvedené hodnoty byly čerpány ze statisticky vyhodnocených hodnot v kap. 3.

4.1 Srovnání meze pevnosti v tahu

Do tab. 30 byly zaznamenány průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 57.

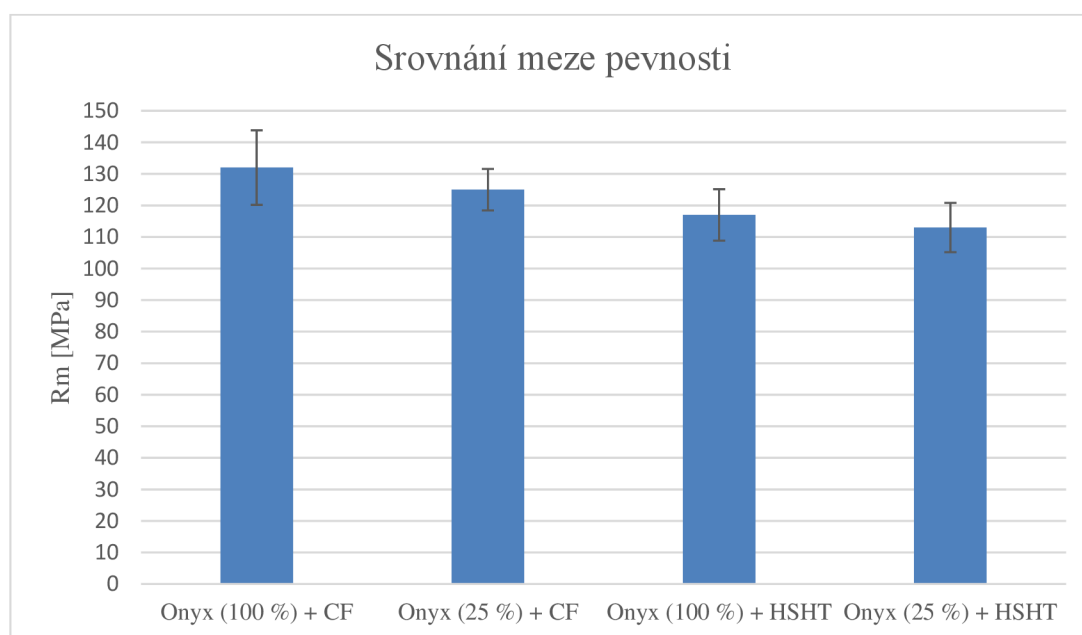
Jelikož při snížení hustoty výplně matrice Onyx došlo ke snížení pevnosti v tahu pouze o 5,2 % pro + CF vlákna a pro HSHT vlákna dokonce jen o 3,5 % je patrné, že mez pevnosti v tahu je závislá primárně na množství vyztužujících vláken a jejich pevnosti. To potvrzuje studii, která se zabývala vlivem orientace vyztužujících vláken [4].

Bylo provedeno srovnání s naměřenými hodnotami v diplomové práci [7]. Průměrná hodnota pro zkušební tyče s HSHT vlákny dosahovala o 12,7 % vyšší hodnoty než pro zkušební tyče s CF vlákny [7]. V uvedené práci nebyla tato anomálie zdůvodněna. Výrazně se tato hodnota rozcházela s informacemi o HSHT vláknech v materiálových listech výrobce viz příloha 1 a příloha 2, proto nebudou další parametry s touto prací již srovnávány.

Nejvyšších hodnot dosahoval materiál Onyx (100 %) + CF vlákna, což potvrdilo informace čerpané z materiálových listů Markforged viz příloha 1 a příloha 2. CF vlákno bylo z pohledu pevnosti v tahu nejlepším vyztužujícím materiálem společnosti Markforged.

Tab. 30 Srovnání meze pevnosti v tahu R_m [MPa].

R_m [MPa]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	132±11,8	125±6,6	117±8,2	113±7,8



Obr. 57 Srovnání meze pevnosti v tahu.

4.2 Srovnání tažnosti

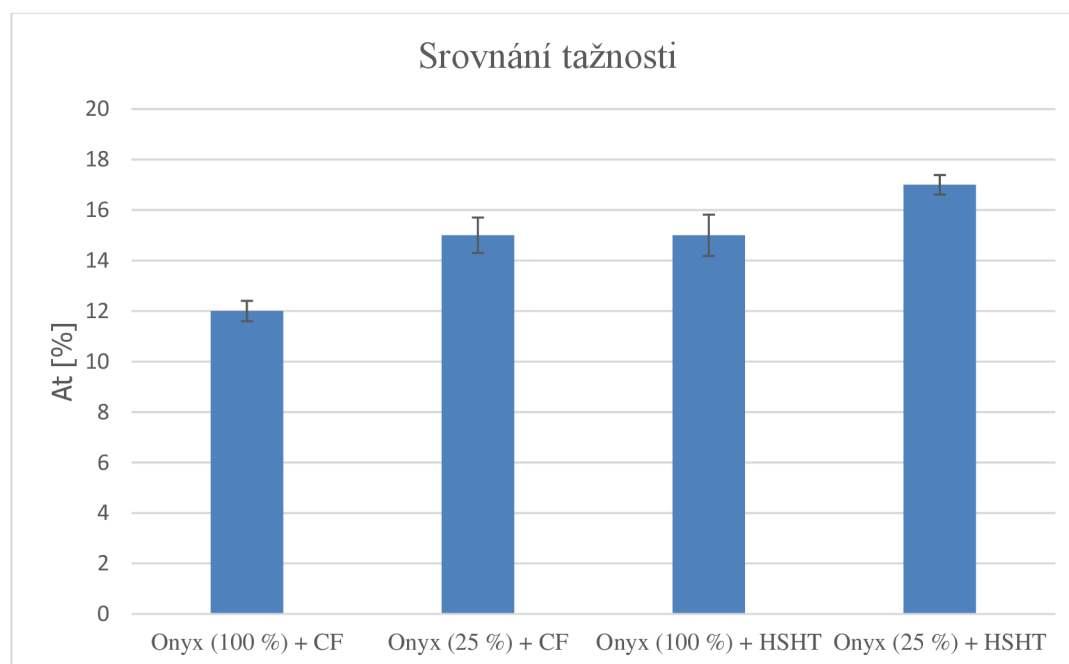
Do tab. 31 byly zaznamenány průměrné hodnoty tažnosti pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 58.

Při snížení hustoty výplně matrice Onyx došlo ke zvýšení tažnosti o 28,1 % pro CF vlákna a pro HSHT vlákna o 14,1 %. Z grafu je zřejmá závislost tažnosti na vyztužujících vláknech i matrici.

Nejvyšších středních hodnot dosahoval materiál Onyx (25 %) s HSHT vlákny, což potvrdilo informace čerpané z materiálových listů Markforged viz příloha 1 a příloha 2. Z pohledu houževnatosti byla HSHT vlákna lepší než CF vlákna, ale společnost Markforged vyrábí také Kevlarová vlákna, která dosahují vyšší tažnosti než HSHT vlákna. Kevlarová vlákna nebyla součástí experimentální části.

Tab. 31 Srovnání tažnosti At [%].

At [%]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	12±0,4	15±0,7	15±0,8	17±0,4



Obr. 58 Srovnání tažnosti.

4.3 Srovnání modulu pružnosti v tahu

Do tab. 32 byly zaznamenány průměrné hodnoty modulu pružnosti v tahu pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 59.

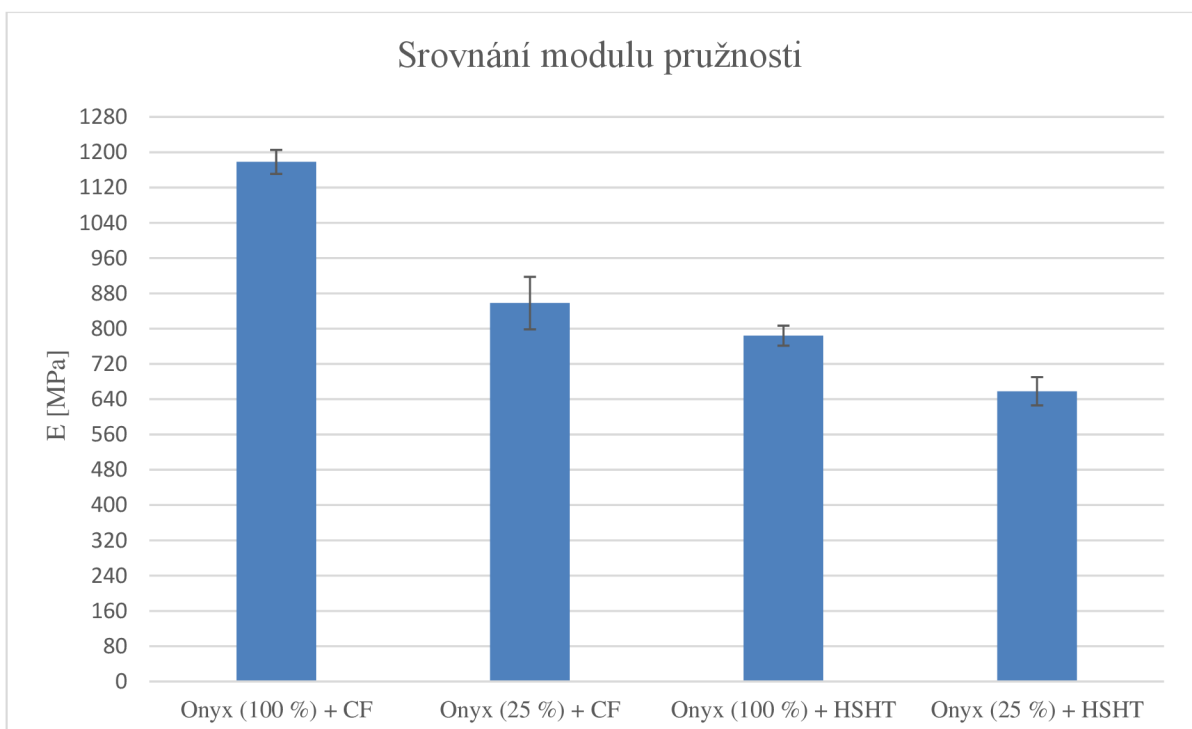
Došlo ke zjištění, že tuhost nebyla závislá pouze na vyztužujících vláknech jako v případě pevnosti v tahu. Při snížení hustoty výplně matrice Onyx došlo ke snížení tuhosti o 29,1 % pro CF vlákna a pro HSHT vlákna o 16,1 %. Naměřené hodnoty potvrzují studii [8] zabývající se analýzou vlivu hustoty výplně.

Nejvyšší střední hodnoty dosahoval materiál Onyx (100 %) + CF vlákna, což potvrdilo informace čerpané z materiálových listů Markforged viz příloha 1 a příloha 2 a studií.

CF vlákno bylo z pohledu modulu pružnosti v tahu nejlepším vyztužujícím vláknem společnosti Markforged.

Tab. 32 Srovnání modulu pružnosti E [MPa].

E [MPa]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	1178±27,2	858±59,5	784±22,7	658±31,9



Obr. 59 Srovnání modulu pružnosti.

4.4 Srovnání tvrdosti Shore D

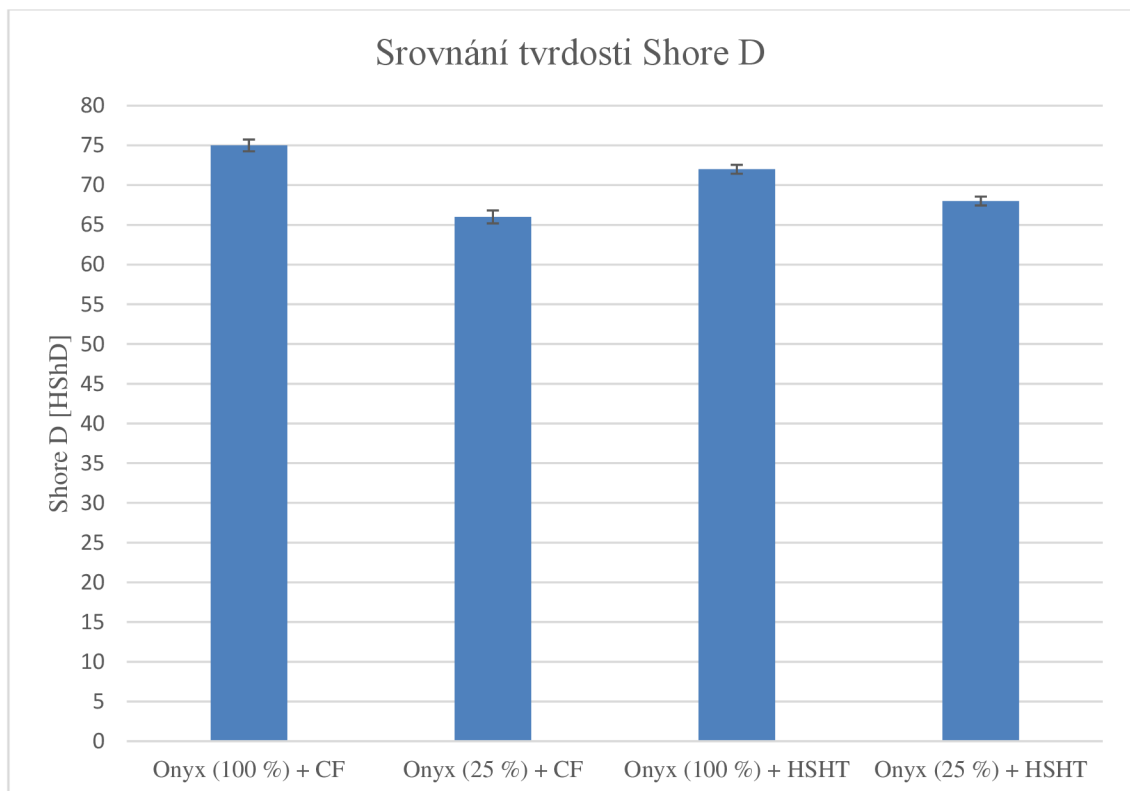
Do tab. 33 byly zaznamenány průměrné hodnoty tvrdosti Shore D pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 60.

Materiál Onyx (100 %) s CF vlákny dosahoval vyšší tvrdosti proti materiálu Onyx (100 %) s HSHT vlákny o 4,7 %. Hodnoty tvrdosti Onyx 25 % s CF i HSHT vlákny nebyly pravděpodobně zcela vypovídající z důvodu možného ovlivnění tvrdosti díky mezerám ve vrstvách obsahující pouze 25 % hustotu výplně.

Statisticky vyhodnocené hodnoty byly srovnány s hodnotami uvedenými v diplomové práci zabývající se analýzou mechanických vlastností plastových komponentů zhotovených 3D tiskem [71]. Hodnoty materiálu Onyx (100 %) s CF vlákny dosahují obdobných hodnot jako materiály ABS (± 2 %) a nižších hodnot ve srovnání s materiálem PLA (≤ 10 %) [71]. V případě kompozitních materiálů se nejedná o mechanickou vlastnost, ve které by předčila běžně dostupné materiály pro 3D tisk.

Tab. 33 Srovnání tvrdosti Shore D [HShD].

Shore D [HShD]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	75 \pm 1,2	66 \pm 1,1	72 \pm 0,9	68 \pm 0,9



Obr. 60 Srovnání tvrdosti Shore D.

4.5 Srovnání pevnosti v ohybu

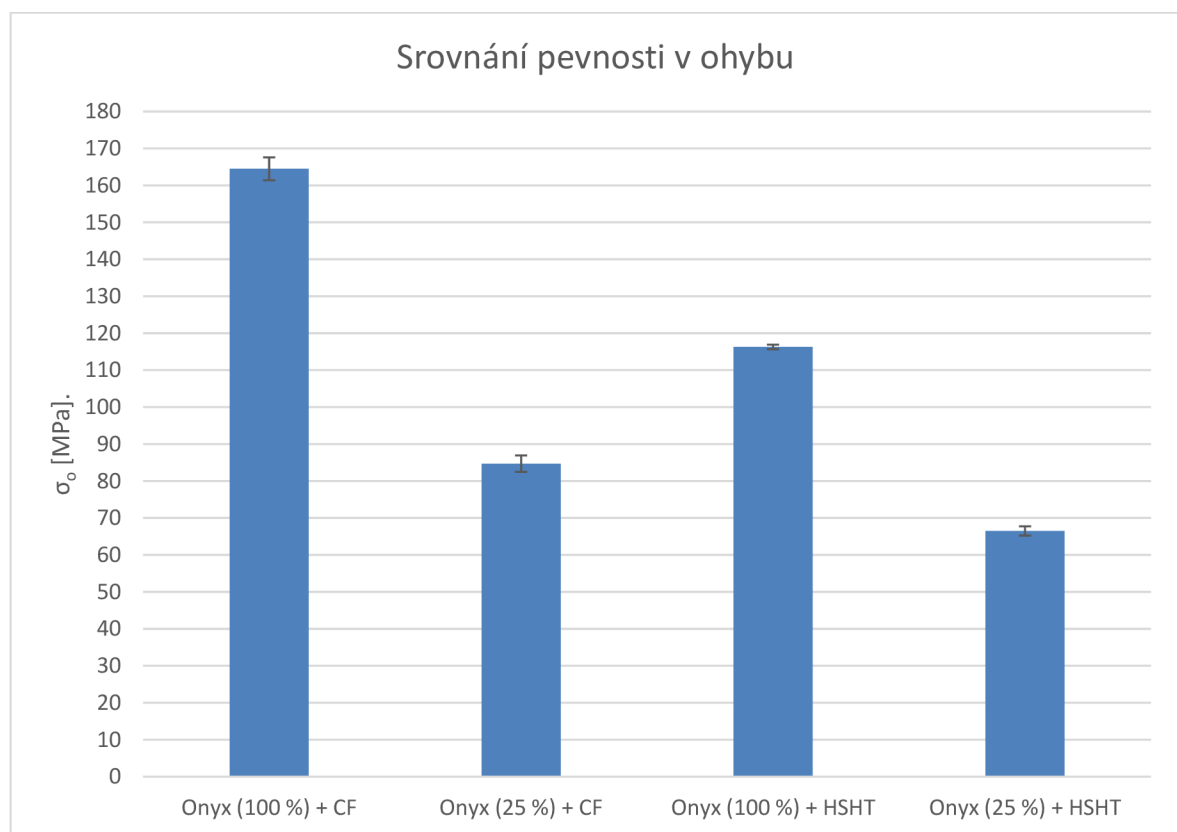
Do tab. 34 byly zaznamenány průměrné hodnoty pevnosti v ohybu pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 61.

Materiál Onyx (100 %) s CF vlákny dosahoval vyšší pevnosti proti materiálu Onyx (100 %) s HSHT vlákny o 29,3 %. Při snížení hustoty výplně na 25 % došlo ke snížení pevnosti téměř o 50 % pro CF i HSHT vlákna.

Nejvyšší střední hodnoty dosahoval materiál Onyx (100 %) + CF vlákna, což potvrdilo informace čerpané z materiálových listů Markforged viz příloha 1 a příloha 2 a studií.

Tab. 34 Srovnání pevnosti v ohybu σ_o [MPa].

σ_o [MPa]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	164,5±3,1	84,7±2,2	116,3±0,6	66,5±1,2



Obr. 61 Srovnání pevnosti v ohybu.

4.6 Srovnání deformace ohybem

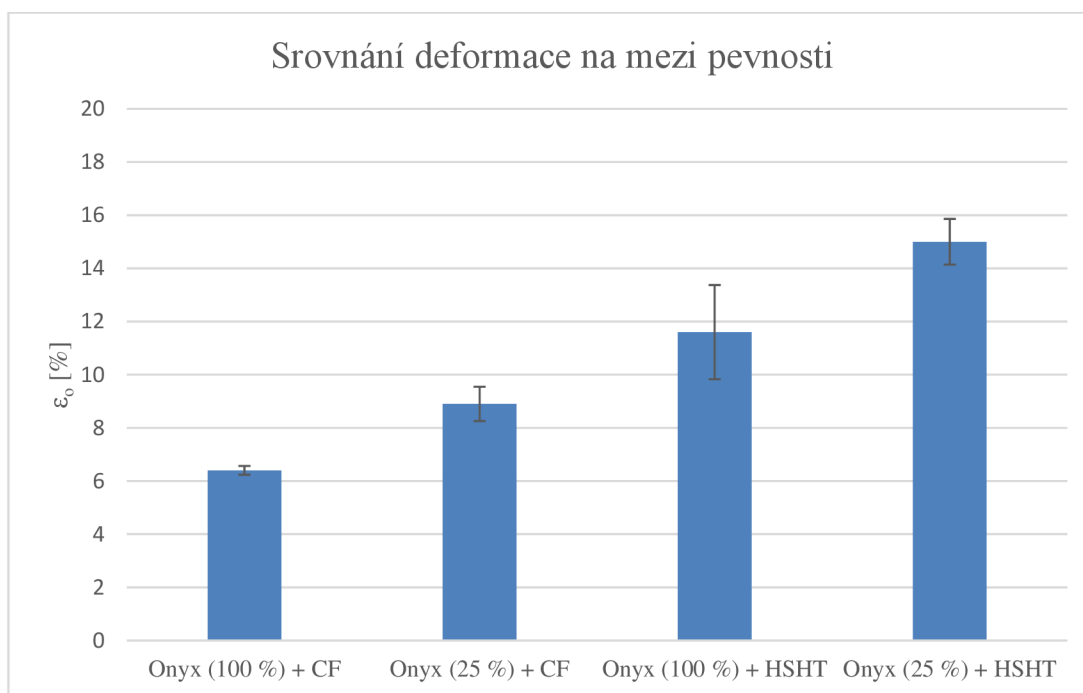
Do tab. 35 byly zaznamenány průměrné hodnoty deformace ohybem pro jednotlivé druhy kompozitních materiálů včetně jejich směrodatné odchylky, které byly následně porovnány na obr. 62.

Materiál Onyx (100 %) s CF vlákny dosahoval nejmenší deformace ve srovnání s ostatními materiály. Při snížení hustoty výplně na 25 % bylo dosaženo téměř o 40 % vyšší deformace pro materiál Onyx (25 %) s CF vlákny.

Nejmenší střední hodnoty dosahoval materiál Onyx (100 %) + CF vlákna, což odpovídalo materiálovým listům společnosti Markforged viz příloha 1 a příloha 2.

Tab. 35 Srovnání deformace na mezi pevnosti ϵ_0 [%].

ϵ_0 [%]	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Průměr	6,4±0,2	8,8±0,7	11,5±1,7	15,0±0,8



Obr. 62 Srovnání deformace na mezi pevnosti.

4.7 Celkové zhodnocení pro uživatele

Naměřená data z mechanických zkoušek kompozitních materiálů byly statisticky zpracovány a jejich průměrné hodnoty jednotlivých parametrů jsou uvedeny v tab. 36.

Účelem této kapitoly je také shrnutí problémů, které nastaly během experimentálního měření. Na základě těchto znalostí bude následně možné se vyvarovat některým problémům v případě dalších analýz mechanických vlastností kompozitních materiálů.

Tab. 36 Průměrné hodnoty sledovaných parametrů.

Materiál	Onyx (100 %) + CF	Onyx (25 %) + CF	Onyx (100 %) + HSHT	Onyx (25 %) + HSHT
Mez pevnosti v tahu [MPa]	132±7,4	125±5,2	117±5,0	113±4,3
Tažnost [%]	12±0,6	15±0,7	15±0,6	17±0,6
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1178±16,7	858±44,4	784±14,3	658±19,8
Tvrdość [HShD]	75±0,7	66±0,8	72±0,6	68±0,6
Pevnost v ohybu [MPa]	164,5±3,1	84,7±2,2	116,3±0,6	66,5±1,2
Deformace ohybem [%]	6,4±3,1	8,8±2,2	11,5±0,6	15,0±1,2

Při výrobě součástí je důležité zvolit vhodný materiál, pro jehož správnou volbu je nutné určit požadavky na jeho vlastnosti. Pevnost v tahu / ohybu je často požadovanou vlastností kompozitních materiálů.

Z tab. 36 je zřejmé, že z hlediska pevnosti v tahu / ohybu dosahuje materiál **Onyx (100 %) + CF** nejvyšších hodnot. CF vlákna se tedy jeví jako nejlepší kontinuální vlákno pro vyztužení matrice při pokojové teplotě. V případě aplikace kompozitních materiálů ve vysokoteplotním prostředí, nastává možnost použití HSHT vláken, která jsou dle materiálových listů společnosti Markforged viz příloha 1 a příloha 2. vhodná pro tyto prostředí. Vliv teploty na mechanické vlastnosti zkušebních vzorků nebyl součástí experimentální části diplomové práce, je tedy vhodný k dalším analýzám.

Hodnoty tvrdosti dosahují obdobných hodnot jako běžně dostupné materiály pro 3D tisk, které jsou analyzovány v diplomové práci [71]. Pokud by vyžadovanou vlastností materiálu byla tvrdost, nabízí se alternativa v podobě levnějších materiálů ABS a PLA [71].

U většiny parametrů dochází ke zhoršení mechanických vlastností při snížení hustoty výplně základního materiálu Onyx. Pro dosažení nejvyšších hodnot je tedy vhodné volit maximální hustotu výplně matrice / vyztužení.

Při změně hustoty výplně matrice / vyztužení je důležitou informací objem spotřebovaného materiálu. Při volbě vhodného materiálu je v některých případech důležitým aspektem cena, kterou lze z objemu spotřebovaného materiálu spočítat. Tab. 37 obsahuje objem spotřebovaného materiálu a cenu materiálu pro výrobu 1 ks zkušební vzorku pro mechanické zkoušky realizované v experimentální části (viz kap. 2).

Tab. 37 Objemy spotřebovaného materiálu [cm^3/ks] a ceny vzorků [Kč/ks].

	Onyx (100 %) + CF			Onyx (25 %) + CF			Onyx (100 %) + HSHT			Onyx (25 %) + HSHT		
	Objem [cm^3]		Cena [Kč]	Objem [cm^3]		Cena [Kč]	Objem [cm^3]		Cena [Kč]	Objem [cm^3]		Cena [Kč]
	Onyx	CF		Onyx	CF		Onyx	HSHT		Onyx	HSHT	
Tah	2,3	0,3	30,1	2,0	0,3	28,8	2,2	0,3	25,6	1,9	0,3	23,6
Tvr.	12,0	1,0	13	6,3	1,0	100,2	12,0	1,6	108,4	6,1	1,1	78,0
Ohyb	3,9	0,8	71,0	3,2	0,8	67,8	3,9	0,8	54,6	3,1	0,8	50,6

Finanční náklady na 3D tisk kompozitních materiálů jsou ve srovnání s běžně dostupnými materiály (ABS, PLA, PETG, atd) vyšší. Cena 1 ks zkušební tyče pro tahovou zkoušku obsahující CF vlákna ve vrstvách 5. až 28. nebo HSHT vlákna ve vrstvách 6. až 32. je až dvojnásobně vyšší. Z důvodu finanční nákladnosti při výrobě takových vzorků, byly zhotoveny zkušební vzorky uvedené v kap. 2.

Z akademických důvodů byl vytvořen 1 ks obsahující CF vlákna ve vrstvách 5. až 28. nebo HSHT vlákna ve vrstvách 6. až 32. (zbylé vrstvy materiál Onyx). Tyto zkušební tyče (pro tahovou zkoušku) nebyly statisticky vyhodnoceny. Pro zkušební tyč vyztuženou CF vlákny v 5. až 28. vrstvě dosahovala mez pevnosti v tahu více než dvojnásobné hodnoty v porovnání s materiálem **Onyx (100 %) + CF** (viz tab. 36). Zkušební tyč vyztužená HSHT vlákny v 6. až 32. vrstvě dosahovala dvojnásobné hodnoty v porovnání s materiálem **Onyx (100 %) + HSHT** (viz tab. 36). Kompozitní materiály mají tedy potenciál pro zlepšení mechanických vlastností ve srovnání s touto diplomovou prací a jsou vhodné k další analýze.

Při výrobě zkušebních vzorků došlo ke komplikacím díky softwaru Eiger 3D. Vyztužující vlákna nebylo možné vkládat při nastavení hustoty výplně matrice 100 % (solid) do prvních 4 vrstev. Rozdílné tloušťky vyztužujících CF a HSHT vláken způsobily problém při volbě hodnoty výšky vrstvy tisku zkušebních vzorků (viz kap. 2.2.3, kap 2.4.3). Pokud by uživatel vyžadoval tisk dvou a více soustředných prstenců / závitů vyztužujících vláken v kombinaci se dvěma perimetry základního materiálu pro tahovou zkoušku, je nutné změnit šířku zúžené části (viz obr. 29).

Před výběrem tvaru a rozměrů zkušebních vzorků dle normy je tedy vhodné konzultovat možnosti softwaru Eiger 3D a tiskové parametry konkrétních vláken s osobou odborně způsobilou.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala analýzou mechanických vlastností vybraných kompozitních materiálů společnosti Markforged zhotovených technologií 3D tisku.

Teoretická část popisovala kompozitní materiály, dále se zabývala metodami 3D tisku kompozitních materiálů s charakteristikou společnosti a rozboru mechanických zkoušek, které byly realizovány v experimentální části.

Experimentální část detailně popisovala proces výroby zkušebních vzorků od výběru tvaru a rozměrů po jejich výrobu. Následně se zabývala realizovanými mechanickými zkouškami. Zkušební vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, zkoušce tvrdosti Shore D a zkoušce třibodovým ohybem. Vyhodnocovanými parametry těchto zkoušek byly mez pevnosti v tahu, tažnost, modul pružnosti v tahu, tvrdost Shore D, pevnost v ohybu a deformace ohybem na mezi pevnosti. Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů byly statisticky zpracovány a graficky porovnány. Bylo provedeno porovnání parametrů mezi sebou a následně byly stanoveny doporučení pro uživatele.

V diplomové práci bylo dosaženo následujících cílů:

- byla zpracována charakteristika kompozitních materiálů,
- byla vypracována charakteristika pro 3D tisk kompozitních materiálů,
- byl proveden rozbor mechanických zkoušek,
- došlo k výrobě zkušebních tyčí pomocí 3D tiskárny Markforged X7,
- pro jednotlivé materiály byly stanoveny mechanické parametry,
- bylo provedeno statistické zpracování naměřených hodnot,
- naměřená data byla porovnána mezi sebou,
- bylo stanoveno doporučení pro uživatele.

Závěrem lze konstatovat, že všechny stanovené cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Materials & Processes: Introduction* [online]. 2016 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-materials-and-processes>
- [2] COMPOSITES, MATERIAL DATASHEET. In: *Markforged* [online]. Watertown: Markforged, 2020 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://static.markforged.com/downloads/composites-data-sheet.pdf>
- [3] ADAMS, Daniel. *Gripping composite test specimens: Options and guidance* [online]. 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/gripping-composite-test-specimens-options-and-guidance>
- [4] DING, Qingjun, Xinyu LI, Denghui ZHANG, Gai ZHAO a Zhijun SUN. *Anisotropy of poly(lactic acid)/carbon fiber composites prepared by fused deposition modeling* [online]. 2019, 2-4 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/app.48786>
- [5] NING, Fuda, Weilong CONG, Jingjing QIU, Junhua WEI a Shiren WANG. *Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling* [online]. 2015, 369-378 [cit. 2021-5-13]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- [6] FERNANDES, Rossana R., Ali Y. TAMIJANI a Marwan AL-HALK. Mechanical characterization of additively manufactured fiber-reinforced composites. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2021 [cit. 2021-5-13]. ISSN 1270-9638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106653>
- [7] KAŠPÁRKOVÁ, Kristýna. *3D tisk kompozitních materiálů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/192684>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Zouhar.
- [8] CARNEIRO, O. S., A. F. SILVA a R. GOMES. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design* [online]. 2015, 768-776 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.053>
- [9] VARDEJO DE TORO, E., J. COELLO SOBRINO, A. MARTÍNEZ MARTÍNEZ, V. MIGUEL EGUÍA a J. AYLLÓN PÉREZ. Investigation of a Short Carbon Fibre-Reinforced Polyamide and Comparison of Two Manufacturing Processes: Fused Deposition Modelling (FDM) and Polymer Injection Moulding (PIM). *Materials* [online]. 2020, **13**(3), 672 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma13030672>
- [10] YASA, E. a K. ERSOY. Dimensional Accuracy and Mechanical Properties of Chopped Carbon Reinforced Polymers Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing. *Materials* [online]. 2019, **12**(23) [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ma12233885>
- [11] YASA, E. ANISOTROPIC IMPACT TOUGHNESS OF CHOPPED CARBON FIBER REINFORCED NYLON FABRICATED BY MATERIAL-EXTRUSION-BASED ADDITIVE MANUFACTURING. *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering* [online]. 2019, **20**(2), 195-203 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.18038/aubtda.498606>

- [12] NAZAN, M. A., F. R. RAMLI, M. R. ALKAHARI, M. N. SUDIN a M. ABDULLAH. PROCESS PARAMETER OPTIMIZATION OF 3D PRINTER USING RESPONSE SURFACE METHOD. *ARPJ J. Eng. Appl. Sci.* [online]. 2017, **12**(7), 2291 - 2296 [cit. 2021-5-13]. ISSN 1819-6608. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [13] ZHUA, P., S. LI, I. ASHCROFT, A. JONES a J. PU. *3D PRINTING OF CONTINUOUS FIBRE REINFORCED THERMOPLASTIC COMPOSITES* [online]. 2017, 1-9 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM21proceedings/index.htm>
- [14] BLOK, L.G., M. L. LONGANA, H. YU a B.K. WOODS. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Markforged* [online]. 2018, **22**, 176-186 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>
- [15] Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Technology*. [online]. 2016, (238), 218-225 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.025>
- [16] MATSUZAKI, R., M. UEDA, M. NAMIKI, T. JEONG, A. HIROSUKE a H. KEISUKE. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports* [online]. **2016**(6) [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep23058>
- [17] CHACÓN, J. M., M. A. CAMINERO, P. J. NÚÑEZ, E. GARCÍA-PLAZA a I. GARCÍA-MORENO. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. *Composites Science and Technology* [online]. 2019, 2019, (181), 181 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107688>
- [18] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [19] PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [20] MÍŠEK, Bohumil. *Polymery, keramika, kompozity*. Brno: VUT Brno, 1993, 155 s. ISBN 80-214-0521-X.
- [21] BAREŠ, Richard, Richard A BAREŠ a Jaroslav NĚMEC. *Kompozitní materiály*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [22] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [23] GORDON, J. E. *The New Science of Strong Materials*. 2. Kalifornská univerzita: Penguin, 1968, 269 s. ISBN 0140209204.
- [24] JANČÁŘ, Josef. Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [25] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. 3D tisk. Ústí nad Labem: UJEP, 2015. 96 s. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [26] WANG, K., S. LI, Y. WU, Y. RAO a Y. PENG. Simultaneous reinforcement of both rigidity and energy absorption of polyamide-based composites with hybrid continuous fibers by 3D printing. *Composite Structures* [online]. 2021, (267) [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113854>

- [27] *3D printing materials* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://markforged.com/materials>
- [28] VRBK A, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008, s. 94 [cit. 2021-03-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340
- [29] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [30] WANG, X., M. JIANG, Z. ZHOU, J. GOU a D. HUI. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2017, (110), 442 - 458 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- [31] DAĐOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-972-4.
- [32] BENEŠ, Libor. *Technické materiály (nejen) pro dopravní techniku*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010. ISBN 978-80-7395-248-8.
- [33] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [34] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu]*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03686-0.
- [35] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2006. ISBN 80-213-1442-7.
- [36] SKÁLOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu*. 4. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-874-9.
- [37] ZEMAN, Jan. *Analysis of composite materials with random microstructure*. In Prague: Czech Technical University, Faculty of Civil Engineering, 2003. CTU reports. ISBN 80-01-02847-x.
- [38] GAROFALO, J. a D. WALCZYK. In Situ Impregnation of Continuous Thermoplastic Composite Prepreg for Additive Manufacturing and Automated Fiber Placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106446>
- [39] MASON, Hannah a Ginger GARDINER. *3D printing with continuous fiber: A landscape* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/3d-printing-with-continuous-fiber-a-landscape>
- [40] *Continuous Composites* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.continuouscomposites.com/>
- [41] *MOI* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.moi.am/>
- [42] *Orbital Composites* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.orbitalcomposites.com/>
- [43] VAN HATTUM, F.W.L, J.P. NUNES a C.A. BERNARDO. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2005, (36), 25-32 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.06.031>
- [44] *CEAD* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://ceadgroup.com/>

- [45] *Anisoprint* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://anisoprint.com/>
- [46] *Markforged* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://markforged.com/3d-printers/x7>
- [47] *9T Labs* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.9tlabs.com/>
- [48] *APS TechSolutions* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://aps-techsolutions.com/de>
- [49] *Ingersoll Machine Tools* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://en.machinetools.camozzi.com/>
- [50] *Mantis Composites* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://www.mantiscomposites.com/>
- [51] *AREVO* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://arevo.com/>
- [52] Desktop Metal. <https://www.desktopmetal.com/> [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://arevo.com/>
- [53] *Electroimpact* [online]. [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.electroimpact.com/>
- [54] I M WARD. The mechanical properties of solid polymers. *British Journal of Applied Physics* [online]. 1966, **17**(1), 3-32 [cit. 2021-02-16]. ISSN 0508-3443. Dostupné z: doi:10.1088/0508-3443/17/1/302
- [55] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [56] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [57] BĚHÁLEK, Libor. *Polymery* [online]. Liberec: Střední odborné učiliště Svitavy, 2015 [cit. 2021-02-24]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [58] ČSN EN ISO 527-2. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 2. 2012.
- [59] SKÁLOVÁ, Jana, Vladimír BENEDIKT a Rudolf KOVAŘÍK. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Vyd. 2. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995. ISBN 80-7082-021-7.
- [60] ÚSTAV FYZIKY A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ. *Statické zkoušky krátkodobé* [online]. s. 23 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [61] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1990. ISBN 80-7082-021-7.
- [62] HRUBÝ, Vojtěch. *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil, 2010. ISBN 978-80-903694-5-0.
- [63] PACAL, Bohumil. *Nauka o materiálu II: návody do cvičení*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984, 143 s. obr., čb. fot., tabulky, grafy.
- [64] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.

- [65] MORAVČÍK, Roman, Roman ČÍČKA, Marián HAZLINGER, Pavol HVIZDOŠ a Jozef JANOVEC. *Úvod do materiálového inžinierstva I*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2015. Edícia vysokoškolských učebníc (Slovenská technická univerzita). ISBN 978-80-227-4405-8.
- [66] POKLUDA, Jaroslav, František KROUPA a Ladislav OBDRŽÁLEK. *Mechanické vlastnosti a štruktúra pevných látok: (kovy, keramika, plasty)*. Brno: PC-DIR, 1994. ISBN 80-214-0575-9.
- [67] JANČÁŘ, Josef a Eva NEZBEDOVÁ. *Zkoušení plastů*. Brno: VUT FCH, 2007, 1 elektronický optický disk (CD-ROM). ISBN 978-80-214-3452-3.
- [68] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018, 455 stran: ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-271-0614-1.
- [69] ČSN ISO 48- 4. *Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti – Část 4: Tvrdost metodou vlačování hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. 4. Česká agentura pro standartizaci, 2018.
- [70] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2019.
- [71] HORÁK, Ondřej. *Analýza rozměrové přesnosti a mechanických vlastností plastových komponentů zhotovených 3D tiskem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/192683>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
2D	Two-Dimensional
3D	Three-Dimensional
ABS	Acrylonitrile-Butadiene-Styrene
Al₂O₃	Oxid hlinitý
CAD	Computer Aided Design
CaO	Oxid vápenatý
CFF	Continuous Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HSHT	Hight Strenght High Temperature
Obr.	Obrázek
PAN	Polyakrylonitril
PETG	Polyethylene-Terephthalate-Glycol
PLA	Polyamid Acid
SiO₂	Oxid křemičitý
STL	Standart Triangle Language (formát soboru)
Tvr.	Tvrlost

Symbol	Jednotka	Popis
At	[%]	Tažnost materiálu
b₁	[mm]	Šířka zúžené části
b₂	[mm]	Šířka konců
d	[mm]	Průměr délek vtisku
D	[mm]	Průměr indentoru
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
E_m	[MPa]	Modul pružnosti matrice
E_v	[MPa]	Modul pružnosti vyztužení
F	[N]	Zatěžující síla
F_{0,2}	[N]	Zatěžující síla na smluvní mezi kluzu

F_E	[N]	Mez úměrnosti
F_c	[N]	Celkové zatížení
F_e	[N]	Zatěžující síla na mezi kluzu
F_m	[N]	Maximální zatěžující síla
H	[N · mm ⁻²]	Tvrдость vtláčování kuličkou
h	[mm]	Tloušťka vzorku
I	[Kg·m ²]	Moment setrvačnosti
L	[mm]	Vzdálenost podpěr
l	[mm]	Počáteční vzdálenost čelistí
L₀	[mm]	Počáteční délka vzorku
l₀	[mm]	Počáteční měřená délka
l₁	[mm]	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami
l₂	[mm]	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami
l₃	[mm]	Celková délka
L_u	[mm]	Konečná délka vzorku
M₀	[N·mm]	Ohybový moment
R	[MPa]	Smluvní napětí
r	[mm]	Poloměr
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_{eD}	[MPa]	Dolní mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
S	[mm ²]	Aktuální plocha průřezu zkušebního tělesa
S₀	[mm ²]	Počáteční plocha průřezu
S_u	[mm ²]	Plocha průřezu po přetržení
W₀	[mm ³]	Průřezový modul
Z	[%]	Kontrakce materiálu
α	[°]	Směrnice přímky dle Hookeova zákona
ΔL	[mm]	Změna délky zkušebního vzorku

ΔS	[mm ²]	Změna průřezu zkušebního vzorku
ε	[-]	Relativní prodloužení
ε_m	[-]	Mezní prodloužení matrice
ε_v	[-]	Mezní prodloužení výztuže
σ_m	[MPa]	Pevnost matrice
σ_o	[MPa]	Pevnost v ohybu
σ_v	[MPa]	Pevnost výztužení

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Materiálový list společnosti Markforged
Příloha 2 Materiálový list společnosti Markforged



MATERIAL DATASHEET

Composites

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx	Onyx FR	Onyx ESD	Nylon	Markforged parts are primarily composed of Composite Base materials. Users may reinforce parts with one type of Continuous Fiber. Dimensions and construction of test specimens: <ul style="list-style-type: none"> Tensile: ASTM D638 type IV beams Flexural: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H) Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B) 1. Measured by a method similar to ASTM D790. Composite Base -only parts do not break before end of flexural test. 2. Onyx FR is UL 94 V-0 Blue Card certified down to a thickness of 3mm. 3. Surface resistance measured on multiple part surfaces using recommended print settings by an accredited third party test facility. See Onyx ESD technical data sheet for more details.
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4	3.0	4.2	1.7	
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40	41	52	51	
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37	40	50	36	
Tensile Strain at Break (%)	D638	25	18	25	150	
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71	71	83	50	
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0	3.6	3.7	1.4	
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	145	145	138	41	
Flame Resistance	UL94	—	V-0 ²	—	—	
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	330	—	44	110	
Surface Resistance (Ω)	ANSI/ESD STM11.11 ³	—	—	10 ⁵ - 10 ⁷	—	
Density (g/cm ³)	—	1.2	1.2	1.2	1.1	

Continuous Fiber	Test (ASTM)	Carbon	Kevlar®	Fiberglass	HSHT FG
Tensile Strength (MPa)	D3039	800	610	590	600
Tensile Modulus (GPa)	D3039	60	27	21	21
Tensile Strain at Break (%)	D3039	1.5	2.7	3.8	3.9
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	540	240	200	420
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	51	26	22	21
Flexural Strain at Break (%)	D790 ¹	1.2	2.1	1.1	2.2
Compressive Strength (MPa)	D6641	320	97	140	192
Compressive Modulus (MPa)	D6641	54	28	21	21
Compressive Strain at Break (%)	D6641	0.7	1.5	—	—
Heat Deflection Temp (°C)	D648 B	105	105	105	150
Izod Impact - notched (J/m)	D256-10 A	960	2000	2600	3100
Density (g/cm ³)	—	1.4	1.2	1.5	1.5

Dimensions and Construction of Fiber Composite Test Specimens:

- Test plaques used in these data are fiber reinforced unidirectionally (0° Piles)
- Tensile test specimens: 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.048 in (W) (CF composites), 9.8 in (L) x 0.5 in (H) x 0.08 in (W) (GF and Kevlar® composites)
- Compressive test specimens: 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.085 in (W) (CF composites), 5.5 in (L) x 0.5 in (H) x 0.12 in (W) (Kevlar® and FG composites)
- Flexural test specimens: 3-pt. Bending, 4.5 in (L) x 0.4 in (W) x 0.12 in (H)
- Heat-deflection temperature at 0.45 MPa, 66 psi (ASTM D648-07 Method B)

Tensile, Compressive, Strain at Break, and Heat

Deflection Temperature data were provided by an accredited 3rd party test facility. Flexural data was prepared by Markforged, Inc. These represent typical values.

Markforged tests plaques are uniquely designed to maximize test performance. Fiber test plaques are fully filled with unidirectional fiber and printed without walls. Plastic test plaques are printed with full infill. To learn more about specific testing conditions or to request test parts for internal testing, contact a Markforged representative. All customer parts should be tested in accordance to customer's specifications.

Part and material performance will vary by fiber layout design, part design, specific load conditions, test conditions, build conditions, and the like.

This representative data were tested, measured, or calculated using standard methods and are subject to change without notice. Markforged makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use, or warranty against patent infringement, and assumes no liability in connection with the use of this information. The data listed here should not be used to establish design, quality control, or specification limits, and are not intended to substitute for your own testing to determine suitability for your particular application. Nothing in this sheet is to be construed as a license to operate under or a recommendation to infringe upon any intellectual property right.

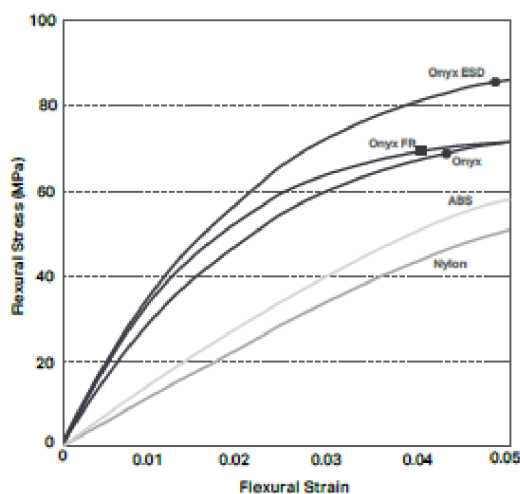
MATERIAL DESCRIPTIONS

Composites

Markforged composite printers are capable of Continuous Fiber Reinforcement (CFR) — a unique process that reinforces FFF parts with high-strength continuous fibers. A CFR capable machine uses two extrusion systems: one that extrudes Composite Base material in a standard FFF process, and a second for long strand continuous fibers that are laid down in-layer, replacing FFF infill.

Composite Base

Markforged Composite Base materials print like conventional FFF thermoplastics. They can be printed by themselves, or reinforced with any of our continuous fibers, including Carbon Fiber, Kevlar, and Fiberglass.



● Onyx Flexural Strength: 71 MPa

Onyx is a micro carbon fiber filled nylon. It's 1.4 times stronger and stiffer than ABS and can be reinforced with any continuous fiber. Onyx sets the bar for surface finish, chemical resistivity, and heat tolerance.

■ Onyx FR Flexural Strength: 71 MPa

Onyx FR is a Blue Card certified UL94 V-0 material that possesses similar mechanical properties to Onyx. It's best for applications in which flame retardancy, light weight, and strength are required.

● Onyx ESD Flexural Strength: 83 MPa

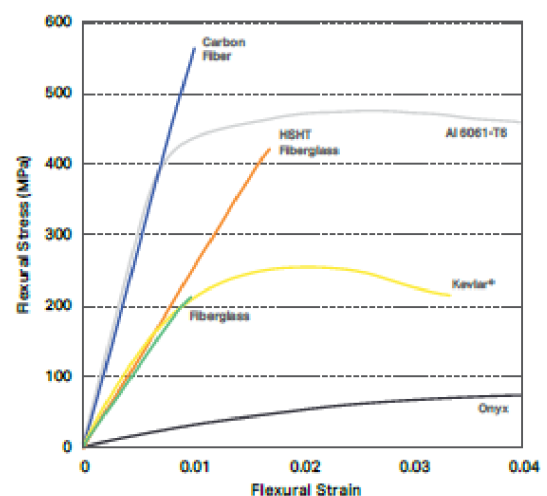
Onyx ESD is a static dissipative safe variant of Onyx — meeting stringent ESD safety requirements while offering excellent strength, stiffness, and surface finish. It's best used in applications that require ESD safe materials.

● Nylon Flexural Strength: 50 MPa

Nylon White parts are smooth, non-abrasive, and easily painted. They can be reinforced with any continuous fiber and work best for non-marring work holding, repeated handling, and cosmetic parts.

Continuous Fiber

Continuous Fibers are laid down on the inside of parts through a second fiber nozzle. They cannot be printed by themselves — instead, they are used to reinforce parts printed out of a composite base material like Onyx.



● Carbon Fiber Flexural Strength: 540 MPa

Carbon Fiber has the highest strength-to-weight ratio of our reinforcing fibers. Six times stronger and eighteen times stiffer than Onyx, Carbon Fiber reinforcement is commonly used for parts that replace machined aluminum.

● Fiberglass Flexural Strength: 200 MPa

Fiberglass is our entry level continuous fiber, providing high strength at an accessible price. 2.5 times stronger and eight times stiffer than Onyx, Fiberglass reinforcement results in strong, robust tools.

● Kevlar® Flexural Strength: 240 MPa

Kevlar® possesses excellent durability, making it optimal for parts that experience repeated and sudden loading. As stiff as fiberglass and much more ductile, it can be used for a wide variety of applications.

● HSHT Fiberglass Flexural Strength: 420 MPa

High Strength High Temperature (HSHT) Fiberglass exhibits aluminum strength and high heat tolerance. Five times as strong and seven times as stiff as Onyx, it's best used for parts loaded in high operating temperatures.