

3D tisk sendvičových struktur metodou FFF s ohledem na kombinaci vhodných materiálů

Ing. Vlastimil Chalupa, Ph.D.

Teze disertační práce



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Teze disertační práce

3D tisk sendvičových struktur metodou FFF s ohledem na kombinaci vhodných materiálů

**3D Printing of Sandwich Structures Using the FFF Method with Regards to
the Combination of Suitable Materials**

Autor: **Ing. Vlastimil Chalupa, Ph.D.**

Studijní program: Procesní inženýrství (P0711D130003)

Studijní obor: Nástroje a procesy (P0788D270012)

Školitel: prof. Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Robert Čep, Ph.D.
prof. Ing. Ivan Hudec, PhD.
prof. Ing. Dagmar Měřínská, Ph.D.

Zlín, září 2023

© Vlastimil Chalupa

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2023.

Klíčová slova: 3D tisk, sendvičová struktura, multimateriálový 3D tisk, mechanické zkoušky, flexibilní filament

Key words: 3D printing, sandwich structure, multi-material 3D printing, mechanical tests, flexible filament

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7678-192-4

ABSTRAKT

Možnost 3D tisku funkčních dílů kombinující v jednom výrobku dva druhy materiálu není dosud zcela běžná. Pro takové výrobky je obvykle nutné využít speciálních a drahých zařízení. Z tohoto důvodu byly tisknuty na cenově dostupné 3D tiskárně různé druhy flexibilních a rigidních materiálů ve formě sendvičových struktur a následně byl zkoumán vliv procesních parametrů na kvalitu spojení obou materiálů v kontaktní vrstvě. Takto vyrobené vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám a následně veškerá data vyhodnocena. Po vyhodnocení všech experimentů lze konstatovat, že je možné s úspěchem produkovat sendvičové struktury s flexibilními jádry na cenově dostupných 3D tiskárnách. Správně zvolený sendvič pro danou aplikaci umožňuje využít významně zvýšené houževnatosti za cenu nepříliš velkého snížení pevnosti v tahu a ohybu. Důležitá je správná konstrukce sendviče, která může dané vlastnosti velmi ovlivnit. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se podílem flexibilního materiálu v sendviči klesá pevnost v tahu a ohybu, a zároveň roste jeho houževnatost. Při tisku takových sendvičů je nutné také dbát na správnou orientaci na tiskové podložce s ohledem na reálné zatížení výsledného produktu, protože tahové namáhání kolmo na vrstvy je pro tyto sendviče velmi nevhodné.

ABSTRACT

The possibility of 3D printing functional parts combining two types of material in one product is not yet quite common. For such products, it is usually necessary to use special and expensive equipment. For this reason, different types of flexible and rigid materials in the form of sandwich structures were printed on an affordable 3D printer and then the influence of process parameters on the quality of the connection of the two materials in the contact layer was investigated. The samples thus produced were subjected to mechanical tests and then all data were evaluated. After evaluation of all experiments, it can be concluded that it is possible to successfully produce sandwich structures with flexible cores on

affordable 3D printers. A properly selected sandwich for a given application allows to take advantage of significantly increased toughness at the cost of a not very large reduction in tensile and flexural strength. The correct sandwich design is important and can greatly influence the properties. In general, as the proportion of flexible material in the sandwich increases, the tensile and flexural strength decreases, while the toughness increases. When printing such sandwiches, care must also be taken to ensure that the orientation on the printing substrate is correct with respect to the actual load on the final product, as tensile stresses perpendicular to the layers are very unsuitable for these sandwiches.

OBSAH

1. ÚVOD	6
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	7
3. CÍLE PRÁCE.....	11
4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ.....	12
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	14
5.1 Tahová zkouška	14
5.1.1 Příprava zkoušky	14
5.1.2 Výsledky tahové zkoušky	15
5.2 Rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy.....	18
5.2.1 Příprava zkoušky	18
5.3 Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče.....	21
5.3.1 Příprava zkoušky	21
5.3.2 Výsledky tahové zkoušky kolmo na vrstvy sendviče	22
5.3.3 Příprava zkoušky	26
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	29
7. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	32
8. ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	37
SEZNAM OBRÁZKŮ	43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
PŘÍLOHY	46
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	52
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	54

1. ÚVOD

Aditivní technologie se v dnešní době stávají v mnoha firmách běžnou výrobní metodou. Díky rychlému vývoji 3D tiskáren, jejich zpřesňování a zlevňování byl umožněn jejich průnik i mezi širokou odbornou veřejností, kdy je řada amatérů používá pro vývoj vlastních projektů. Spousta firem si je vědoma že stejnou práci jim dnes odvede i cenově dostupná 3D tiskárna, a proto není pro ně nutné pořizovat drahé průmyslové zařízení. Z toho důvodu je dnes možné sledovat trend častého využívání těchto cenově dostupných tiskáren pro čím dál sofistikovanější aplikace. Cílem této práce bylo zjistit, zda je možné na těchto zařízeních úspěšně vyrábět i produkty sendvičové konstrukce, konkrétně ty s flexibilním jádrem. Dále bylo nutné ověřit doporučené procesní podmínky poskytované výrobcí filamentů, zda je lze aplikovat i při tisku sendvičových struktur a vytvořit doporučení úprav procesních podmínek pro další použití na základě nabytých zkušeností během tisku zkušebních vzorků sendvičových struktur. Takto vytisknuté vzorky byly podrobeny řadou mechanických zkoušek, které umožnily vhled do chování 3D tisknutých sendvičových struktur s flexibilními jádry při jejich zatěžování tahem, ohybem a dynamickým rázem.

2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Následný výběr z odborných publikací ukazuje současný stav poznání v řešení problematiky 3D tisku sendvičových struktur z rigidních a flexibilních materiálů na cenově dostupných tiskárnách.

KIM, Park, Kim, Park, Kim, Lee. „Experimental Study on Mechanical Properties of Single – and Dual-Material 3D Printed Products“

Vědci z korejského Národního institutu vědy a technologie v Ulsanu se zabývali výrobou a testováním vzorků z materiálů ABS, PLA a jejich vzájemnou kombinací. V potaz byla brána orientace testovacího vzorku na tiskové podložce, což má za následek orientaci vláken, hustota výplně, a v případě kombinace obou materiálů na jednom výrobku, bylo zjišťováno, jaký efekt na pevnost mají různé poměry použitého množství jednotlivých materiálů. Tyto vytisknuté vzorky byly poté testovány tahovou zkouškou. Bylo zjištěno že vzorky kombinující oba materiály vykazují lepší pevnost v horizontálním spoji než ve vertikálním. Při správné kombinaci obou materiálů mohou být výsledky tahové zkoušky zlepšeny. [1, 2, 3, 4]

BODAGHI, Serjouei, Zolfagharian, Fotouhi, Rahman, Durand. „Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing“

Tým vědců ze Spojeného království, Francie a Austrálie se ve své práci věnuje k výrobě meta-sendvičových struktur z flexibilních polymerů, kombinujících materiály o různé tvrdosti. K výrobě využívají FDM tiskárnu, avšak výsledný produkt je nazýván 4D výtiskem, protože je výrobek již navrhován s tím, že každý z použitých materiálů se při změnách teploty chová zcela jinak. Navrženy jsou tedy programovatelné produkty, které v závislosti na vysokých a nízkých teplotách vynikají širokou škálou nelineární tuhosti a disipací energie, což umožňuje využití v aplikacích, kde je potřeba měnit množství absorbované energie. [5, 6, 7, 8]

GOH, Hashimoto. „Dual sacrificial molding: Fabricating 3D microchannels with overhang and helical features“

Vědci ze Singapurské univerzity technologie a designu využívají 3D tiskárnu využívající technologii FDM se dvěma extrudéry k výrobě forem, obsahujících mikro kanály, volné geometrie typu převis a spirálové prvky. K tisku je využito materiálů PVA a HIPS. Výrobek je vytisknut z materiálu PVA a podpory z HIPS, který je rozpustný v limonenu. Po odstranění podpěr je výrobek z PVA zalit do čirého PDMS, z níž je po zatuhnutí matrice rozpuštěna vodou. Výsledná dutina je poté vyplněna kontrastní tekutinou pro odhalení výsledku. U výrobků po odstranění podpor z HIPS bylo prováděno měření drsnosti na jednotlivých plochách. Výsledky získané tímto experimentem je možné využít například při tvorbě platform pro pěstování buněk či při vývoji a výrobě léčiv. [9, 10, 11, 12]

HASANOV, Alkunte, Rajeshirke, Gupta, Huseynov, Fidan, Alifui-Segbaya, Rennie. „Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and Challenges“

Vědci z USA, a Austrálie a Spojeného království vypracovali souhrn o dosavadním poznání v oblasti multi-materiálových aditivních technologií. Zaměřili se na jednotlivá technologická řešení této problematiky napříč různými oblastmi, od automobilu přes letectví až po biomedicínu. Dále popisují jednotlivé problémy, se kterými se multi-materiálové aditivní technologie v jednotlivých odvětvích potýkají. Následně doporučují, jakým směrem by se měl výzkum a vývoj multi-materiálových aditivních technologií dále ubírat, a na co by se mělo zaměřit při vývoji nových materiálů. [13, 14, 15, 16, 17]

ÖZEN, Auhl, Völlmecke, Kiendl, Abali. „Optimization of manufacturing parameters and tensile specimen geometry for fused deposition modeling (FDM) 3D-printed PETG

Němečtí vědci se zaměřili na materiál PETG tisknutý běžnou metodou FDM, a zabývali se, jakým způsobem ovlivní různá nastavení ve Sliceru místo prasknutí vzorku. Vzorky byly podrobeny jednoosé tahové zkoušce, a zároveň byly jednotlivé konstrukční přístupy testovacích těles analyzované metodou konečných prvků a výsledky byly poté porovnávány se skutečnými vzorky podrobenými tahovou zkouškou. Výsledky ukazují, jak zásadní vliv má na výslednou pevnost výrobku správná orientace při tisku, samotné nastavení ve Sliceru a také že drobná změna geometrie může výrazně ovlivnit pevnost daného tělesa. [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]

ANDÓ, Birosz, Jeganmohan. „Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials“

Skupina maďarských vědců se zabývala tiskem výrobků kombinujících dvě barvy stejného materiálu. Zajímali se hlavně, jaký vliv má tvar spoje mezi dvěma jednotlivými barvami na výslednou pevnost v tahu takového objektu. Testována byla řada tvarových spojení, kdy se měnil hlavně úhel kontaktní plochy. Výsledkem bylo zjištění, že adheze mezi horizontálními vrstvami byla vždy větší než adheze ve vertikálním směru, proto je důležité při tisku multi-materiálových výrobků zajistit co největší horizontální styčnou plochu mezi oběma materiály. [26, 27, 28, 29]

LOPEZ, Ahmad. „Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling“

Kanadský tým se zaměřil na tisk a testování sendvičových struktur z PLA, ABS a HIPS. Tisk probíhal na FDM tiskárně opatřené tiskovou hlavou se čtyřmi samostatnými tryskami. Sendvičové struktury byly tisknuty ze dvou materiálů, kdy jeden tvořil jádro a druhý materiál horní a spodní vrstvu sendviče. Takto byly vyrobeny testovací vzorky pro tahovou zkoušku z různých kombinací výše uvedených materiálů, následně otestovány a porovnány s výsledky vzorku ze

samostatných materiálů. Výsledkem bylo zjištění že nejlepšími hodnotami Youngova modulu a pevnosti v tahu bylo dosaženo u vzorku z PLA s jádrem z ABS. [30, 31, 32, 33, 34]

GALATAS, Hassanin, Zweiri, Senevirante. „Additive manufactured sandwich composite/ABS parts for unmanned aerial vehicle applications“

Skupina vědců ze Spojeného království a Spojených arabských emirátů se soustředila na výrobu a testování sendvičových struktur využitelných v oblasti výroby leteckých dronů. Rozhodli se použít metodu, při níž vytiskli jádro sendviče z materiálu ABS na FDM tiskárně a následně bylo jádro z horní a spodní strany podlepeno vrstvami rohože z uhlíkových vláken. K návrhu počtu vrstev uhlíkových rohoží byla využita neuronová síť. Takto vyrobené vzorky byly podrobeny instrumentované tahové zkoušce. Bylo dokázáno, že s rostoucím počtem vrstev uhlíkových rohoží významně roste jak pevnost v tahu, tak i Youngův modul. Výsledky simulované za pomoci neurální sítě byly velmi přesné v komparaci se skutečně naměřenými hodnotami. [35, 36, 37, 38]

3. CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem doktorské práce je navrhnout a optimalizovat procesní podmínky pro tisk sendvičových struktur kombinujících různé rigidní a flexibilní materiály na cenově dostupných hobby 3D tiskárnách. Takto získané vzorky pak podrobit mechanickým zkouškám jak za pokojové teploty, tak při teplotách snížených.

- Otestování vzájemné kompatibility vybraných materiálů pro tisk sendvičových struktur.
- Ověření a optimalizace procesních podmínek pro tisk sendvičových struktur na jedno tryskových cenově dostupných 3D tiskárnách.
- Mechanické zkoušky vyrobených sendvičových struktur.
- Porovnání naměřených výsledků u sendvičových struktur a srovnávacích vzorků vytisknutých ze samostatných materiálů.

4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Tato práce rozvíjí myšlenky kanadského výzkumného týmu [30] který se zaměřil na tisk sendvičových struktur z rigidních materiálů jako PLA, ABS a HIPS, ve snaze zjistit, zda tyto kombinace materiálů mohou nějakým způsobem vylepšit mechanické vlastnosti samostatných materiálů. Výsledkem jejich bádání bylo, že nejlepších hodnot Youngova modulu a délky protažení bylo dosaženo u struktury PLA-ABS-PLA. Oproti výše uvedenému výzkumu je v této práci předmětem zkoumání zlepšení mechanických vlastností rigidních materiálů tisknutých v sendvičových strukturách spolu s materiály flexibilními. Dále pak je kromě tahové zkoušky prováděné kanadským týmem ještě navíc navrhnutá zkouška vrubové houževnatosti, tahová zkouška kolmo na vrstvy a zkouška trojbodým ohybem, díky kterým lze zjistit další nové informace o těchto sendvičových strukturách.

Pro zpracování experimentu byly vybrány materiály od nejběžnějších typů, až po ty se specifickým technickým určením.

Rigidní:

- Prusament PLA – Jet Black
- Prusament PET-G – Urban Grey
- Prusament ASA – Signal White
- Prusament PC – Urban Grey
- Fillamentum – CPE HG100 Extrafill – Black Soul
- Fillamentum – PP2320 – Black
- Fillamentum – NYLON FX 256 – Natural

Flexibilní:

- Fillamentum – Flexfill PEBA 90 A – Natural
- Fillamentum – Flexfill TPU 98 A – Sky Blue

- Fillamentum – Flexfill TPU 92 A – Signal Yellow
- Fillamentum – Flexfill TPE 96 A – Light Grey
- Fillamentum – TPE 90 A – Signal Red

Z výše uvedených materiálů byly vytisknuty kombinace tak, že u každého rigidního materiálu byla otestována soudržnost v kontaktní vrstvě se všemi flexibilními materiály. Ty kombinace, u kterých se podařilo dokončit tisk bez započítí delaminace v kontaktní vrstvě byly použity na tisk zkušebních vzorků, a to vždy po 5 kusech pro každou zkoušku.

Všechny vzorky byly tisknuty na tiskárně Prusa MINI, tryskou o průměru 0,6 mm a výškou vrstvy 0,2 mm. Teploty tiskové hlavy a vyhřívané podložky byly voleny dle doporučení výrobců materiálů. V případě flexibilních materiálů byla zvyšovaná teplota trysky o 10–15 °C oproti doporučením výrobce. Rychlost byla při tisku flexibilních materiálů nastavena na 15 mm/s. Během přípravy tiskové podložky byl vždy před tiskem její povrch ošetřen adhezivním přípravkem ve spreji 3D Lak. Ten zajistil lepší přilnavost první vrstvy u materiálů jako PA, PP či PC. I přesto bylo nutné u těchto materiálů použít tiskový límec kolem výrobků o šířce 10 mm. Nejprve byly vyrobeny vzorky ze samostatných jednotlivých rigidních materiálů, které slouží jako etalon pro srovnání se sendvičovými strukturami, zda došlo ke zlepšení či zhoršení výsledných vlastností. Vzorky sendvičových struktur byly tisknuty tak, že prvních a posledních 5 vrstev (celkově 1 mm) tisku byly z rigidního materiálu a prostřední vrstvy z flexibilního.

Po vytisknutí všech vzorků se ukázalo že kromě materiálu Fillamentum Flexfill TPE 90 A lze všechny materiály bez problémů tisknout na tiskárně Prusa MINI. Materiál TPE 90 A se nedařilo tisknout kvůli jeho nízké tvrdosti, kdy se zasekával v podávacím zařízení. Materiál Fillamentum PEBA 90 A, jenž má stejnou tvrdost, však šlo tisknout bez jakýchkoliv komplikací.

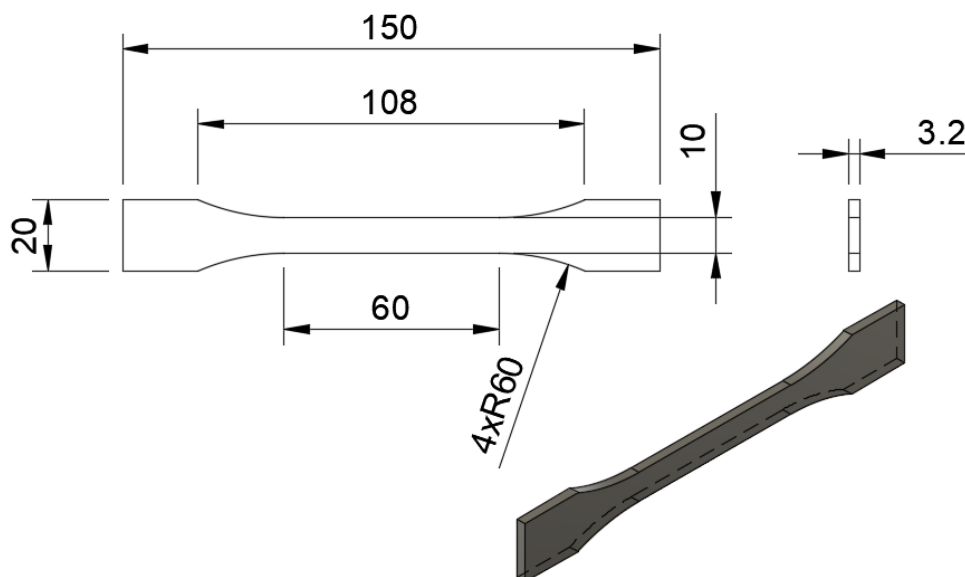
5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Tahová zkouška

Instrumentovaná tahová zkouška byla zvolena k zjištění napětí, modulu a síly nutné k prodloužení o 0,2 % pro tisknuté sendvičové struktury ve složení rigidní – flexibilní – rigidní materiál. Stejná zkouška byla také aplikována na tisknuté srovnávací vzorky ze samostatných rigidních materiálů.

5.1.1 Příprava zkoušky

Vzorky pro instrumentovanou tahovou zkoušku byly připraveny podle normy ISO 527-2, a konkrétně je použitý u zkušební vzorku tvar lopatky s označením 1B.



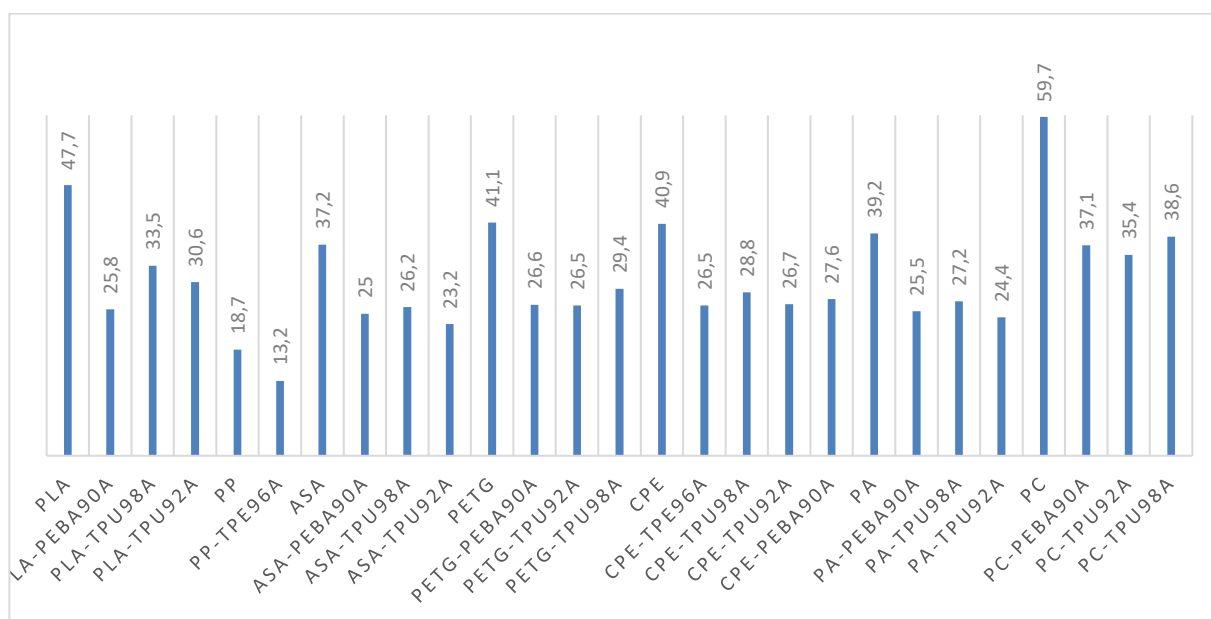
Obr. 1: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku dle ISO 527-2/1B

Orientace zkušebních vzorku na podložku při tisku byla plochou o stranách 150 mm a 20 mm (Obr.1). Tisk těles probíhal rigidním materiálem do výšky 1 mm, poté byl změněn na flexibilní, kterým bylo tisknuto 1,2 mm, a následně byl zbylý 1 mm dotisknut opět rigidním materiálem. Celkem bylo pro každý typ sendviče připraveno 5 vzorků a dalších 5 vzorků bylo vytisknuto pro srovnání vlastností ze samotného rigidního materiálu.

5.1.2 Výsledky tahové zkoušky

Napětí

První zkoumanou veličinou během instrumentované tahové zkoušky bylo maximální napětí, které zkoušený vzorek vydrží. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální napětí (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 2: Graf srovnání napětí [MPa] u všech vzorků

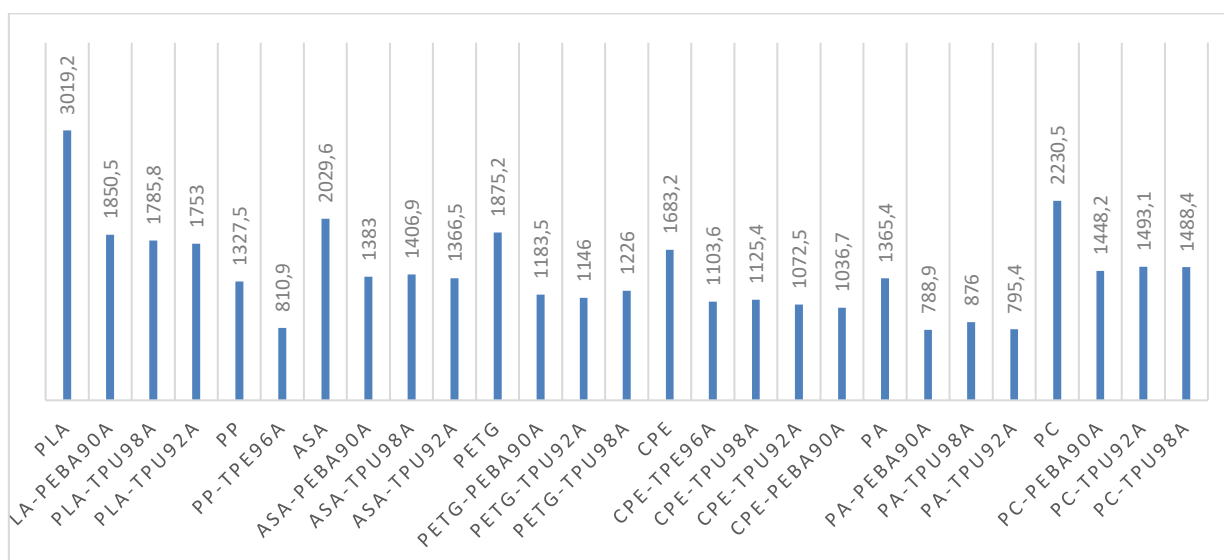
Srovnání všech hodnot maximálního napětí při tahové zkoušce je uvedeno v grafu na Obr. 2. Nejvyšší hodnoty napětí u referenčního vzorku bylo dosaženo u PC a to hodnoty 59,7 MPa a dále pak u PLA s hodnotou 47,7 MPa. Nejnižší hodnota napětí u referenčního vzorku byla naměřena u PP a to pouze 18,7 MPa.

Sendvič PC – TPU98A vykazoval nejvyšší hodnoty napětí ze všech sendvičů, a to 38,6 MPa. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u sendviče PP – TPE96A a to 13,2 MPa, to však bylo způsobeno tím, že již základní rigidní materiál nevykazoval příliš vysokých hodnot při měření. I přesto však tento vzorek dosahuje hodnot 71 % poměrného napětí vůči referenčnímu vzorku z PP, což patří mezi nejvyšší poměrná napětí naměřená mezi všemi sendviči.

Nejlepší poměrné hodnoty napětí lze najít u sendviče PETG – TPU98A, a to 72 %. Podobně vysoké hodnoty lze najít i u PP – TPE96A (71 %), CPE – TPU98A (70 %), ASA – TPU98A (70 %) a PLA – TPU98A (70 %). Lze tedy konstatovat, že flexibilní filament TPU98A zaručuje nejvyšší poměrné hodnoty maximálně dosažitelného napětí při použití v sendvičích s většinou zkoušených rigidních materiálů.

Youngův modul

Dalším zkoumaným parametrem během instrumentované tahové zkoušky byl Youngův modul. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální modul (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 3: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] u všech vzorků

Srovnání všech hodnot maximálního modulu při tahové zkoušce je uvedeno v grafu na Obr. 3. Nejvyšší hodnoty modulu u referenčního vzorku bylo dosaženo u PLA a to hodnoty 3019,2 MPa a dále pak u PC s hodnotou 2230,5 MPa. Nejnižší hodnota modulu u referenčního vzorku byla naměřena u PP a to pouze 1327,5 MPa, a druhých nejnižších hodnot u PA a to 1365,4 MPa.

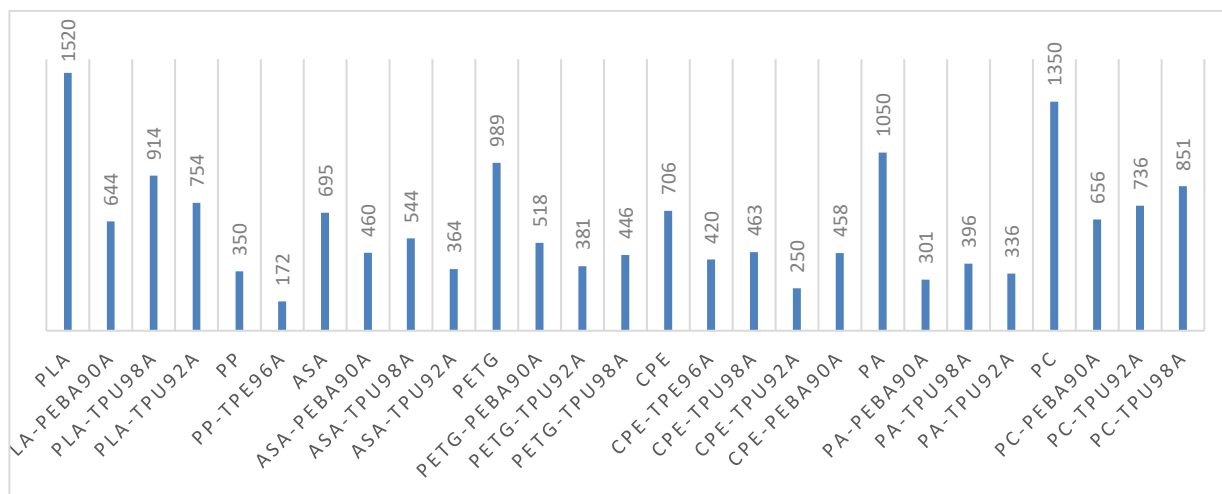
Sendvič PLA – PEBA90A vykazoval nejvyšší hodnoty modulu ze všech sendvičů a to 1880,5 MPa. Nejnižší hodnoty byly naopak naměřeny u sendviče PA – PEBA90A a to 788,9 MPa. Jedná se o překvapivé zjištění, že obou extrémů bylo dosaženo u sendvičů obsahující stejný flexibilní filament PEBA90A.

Nejlepší poměrné hodnoty modulů lze najít u všech tří sendvičů ASA. Absolutně nejvyšší hodnoty bylo dosaženo konkrétně u ASA – TPU98A, a to 69 %. Lze tedy těžko jednoznačně vyhodnotit, který flexibilní filament zaručuje dosažení nejlepších hodnot modulu.

Nejnižšího poměrného maximálního modulu vůči referenčnímu vzorku 58 % bylo zjištěno shodně u sendvičů PLA – PEBA90A a PLA – TPU92A.

Síla při prodloužení o 0,2 %

Poslední vyhodnocovanou veličinou během instrumentované tahové zkoušky byla síla potřebná k prodloužení vzorku o 0,2 % v N. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci potřebnou sílu k protažení vzorku o 0,2 % v N (levá svislá osa) naměřenou jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 4: Graf srovnání síly potřebné k prodloužení o 0,2% [N] u všech vzorků

Srovnání všech hodnot síly potřebné k prodloužení vzorku o 0,2 % při tahové zkoušce je uvedeno v grafu na Obr.4. Nejvyšší hodnoty síly potřebné k prodloužení vzorku o 0,2 % u referenčního vzorku bylo dosaženo u PLA, a to hodnoty 1520 N a dále pak u PC s hodnotou 1350 N. Nejnížší hodnota síly potřebné k prodloužení vzorku o 0,2 % u referenčního vzorku byla naměřena u PP a to pouze 350 N, a druhých nejnižších hodnot bylo zjištěno u ASA, a to 695 N.

Sendvič PLA – TPU98A vykazoval nejvyšší hodnoty síly potřebné k prodloužení vzorku o 0,2 % ze všech sendvičů a to 914 N. Nejnižší hodnoty byly naopak naměřeny u sendviče PP – TPE96A a to 172 N.

Nejlepší poměrnou hodnotu síly potřebné k prodloužení vzorku o 0,2 % lze najít u sendviče ASA – TPU98A dosahující 78 %.

Nejnižších poměrných sil potřebných k prodloužení vzorku o 0,2 % vůči referenčnímu vzorku bylo zjištěno u všech sendvičů PA. Absolutně nejnižší hodnota pak konkrétně u PA – PEBA90A a to 29 %.

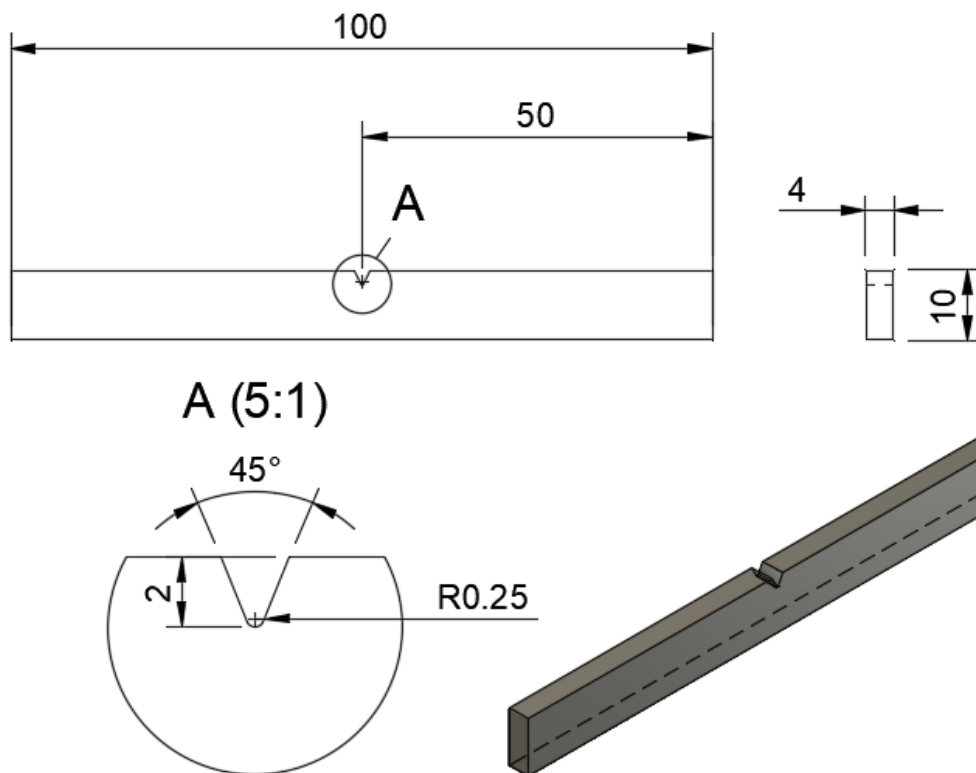
5.2 Rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy

Rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy byla zvolena k zjištění práce nutné k přeražení testovacího vzorku. Zkouška byla provedena na tisknutých sendvičových strukturách ve složení rigidní – flexibilní – rigidní materiál. Stejná zkouška byla také aplikována na tisknuté srovnávací vzorky ze samostatných rigidních materiálů.

5.2.1 Příprava zkoušky

Vzorky pro zkoušku vrubové houževnatosti byly připraveny podle ČSN EN ISO 179-1, tedy opatřeny vrubem. Jedná se o hranoly o délce 100 mm, šířce 10 mm a tloušťce 4 mm.

Pro potřeby zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick/Roell HIT5.5P.

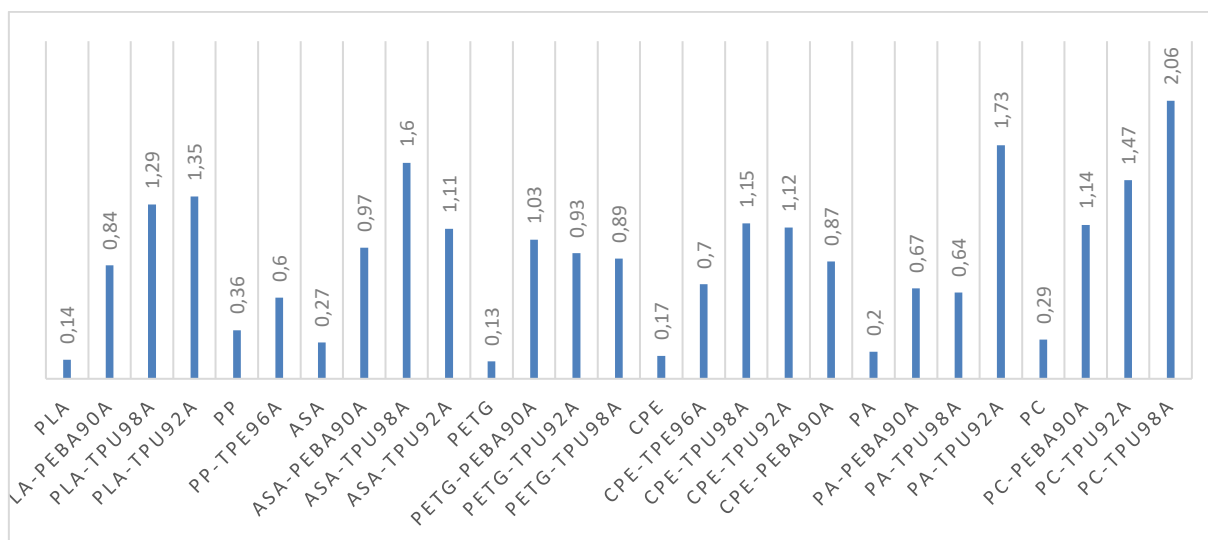


Obr. 5: Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1

Orientace zkušebního vzorku na podložku při tisku byla plochou o stranách 100 mm a 10 mm. Tisk těles probíhal rigidním materiálem do výšky 1 mm, poté byl změněn na flexibilní, kterým bylo tisknuto 2 mm, a následně byl zbylý 1 mm dotisknut opět rigidním materiálem. Celkem bylo pro každý typ sendviče připraveno 5 vzorků a dalších 5 vzorků bylo vytisknuto pro srovnání vlastností ze samotného rigidního materiálu.

Práce

Během rázové zkoušky vrubové houževnatosti metodou Charpy byla zkoumanou veličinou práce v J nutná k přeražení zkušebního vzorku opatřeného vrubem. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci práci nutnou k přeražení vzorku v J (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 6: Graf srovnání práce [J] nutné k přeražení u všech vzorků

Srovnání všech hodnot práce nutné k přeražení zkušební vzorku je uvedeno v grafu na Obr. 6. Nejvyšší hodnoty práce u referenčního vzorku bylo dosaženo u PP a to hodnoty 0,36 J a dále pak u PC s hodnotou 0,29 J. Nejnižší hodnota práce u referenčního vzorku byla naměřena u PETG, a to pouze 0,13 J, a druhých nejnižších hodnot u PLA, a to 0,14 J.

Sendvič PC – TPU98A vykazoval nejvyšší hodnoty práce nutné k přeražení zkušební vzorku a to 2,06 J. Nejnižší hodnoty byly naopak naměřeny u sendviče PP – TPE96A a to 0,6 J. Jedná se o překvapivé zjištění, protože nejlepších hodnot mezi referenčními vzorky bylo dosaženo právě u PP.

Nejlepší poměrné hodnoty práce nutné k přeražení lze najít u PLA – TPU92A, a to 964 % a druhého nejlepšího zlepšení vlastností bylo dosaženo u sendviče PLA – TPU98A s 921 %.

Nejnižšího poměrného zvýšení práce nutné k přeražení zkušební vzorku vůči referenčnímu vzorku 167 % bylo zjištěno u sendvičů PP – TPE96A.

Lze konstatovat, že použití sendviče s jakýmkoliv z výše uvedených flexibilních materiálů zvyšuje houževnatost vzorku oproti samotnému rigidnímu materiálu řádově o stovky procent.

5.3 Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče

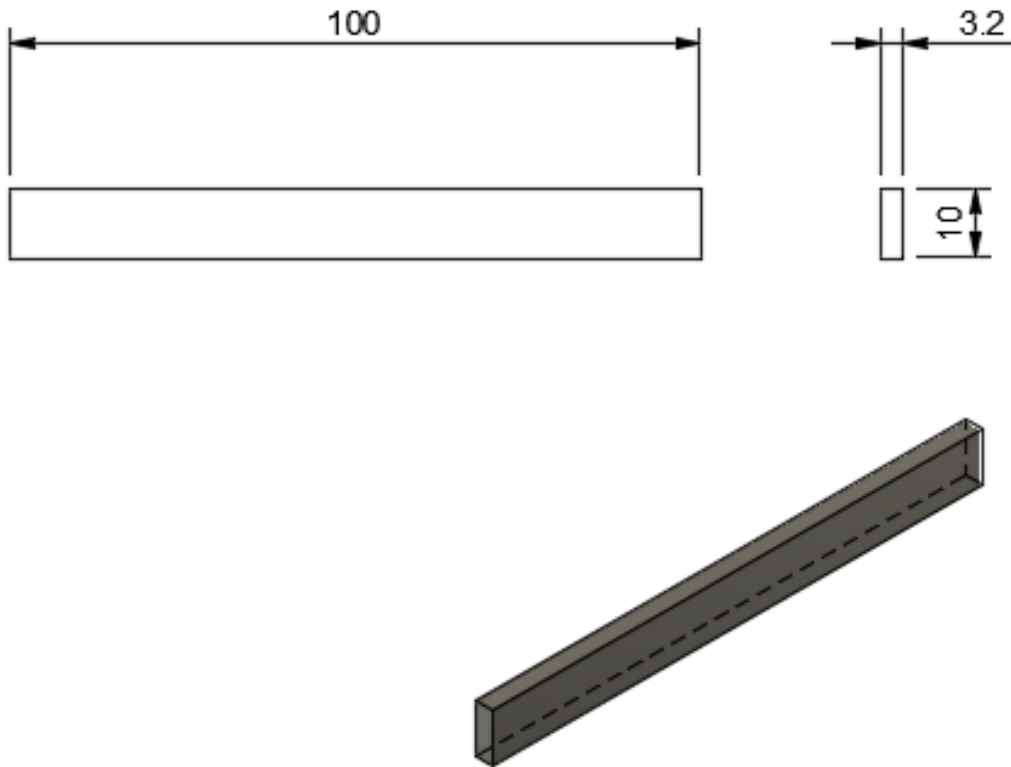
Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče byla navrhuta a provedena z důvodu zjištění změny vlastností při aplikování tahové síly kolmo na tisknuté vrstvy, což umožnilo získat data o pevnosti spoje mezi jednotlivými materiály. Zkoumanými veličinami bylo napětí, modul a síla nutné k prodloužení o 0,2 % pro tisknuté sendvičové struktury ve složení rigidní – flexibilní – rigidní materiál. Pro tento experiment byly vybrány po předchozích zkouškách tři sendvičové struktury, které byly nyní tisknuty na výšku. Stejná zkouška byla také aplikována na tisknuté srovnávací vzorky ze samostatných rigidních materiálů.

5.3.1 Příprava zkoušky

Vzorky pro instrumentovanou tahovou zkoušku, při níž byla zkoumána pevnost spojení mezi vrstvy sendviče byly navrženy jako tělesa ve tvaru kvádrů o rozměrech 100 x 10 x 3,2 mm.

Orientace zkušebních vzorků na podložku při tisku byla plochou o stranách 10 mm a 3,2 mm. Tisk těles probíhal rigidním materiálem do výšky 50 mm a poté byl změněn na flexibilní, kterým bylo dotisknuto zbylých 50 mm. Celkem bylo pro každý typ sendviče připraveno 5 vzorků a dalších 5 vzorků bylo vytisknuto pro srovnání vlastností ze samotného rigidního materiálu.

Pro potřeby zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick Materialprüfung 1456, osazené pneumatickými čelistmi. Podmínkou pro ukončení zkoušky byl nastaven propad napětí o 80 %.

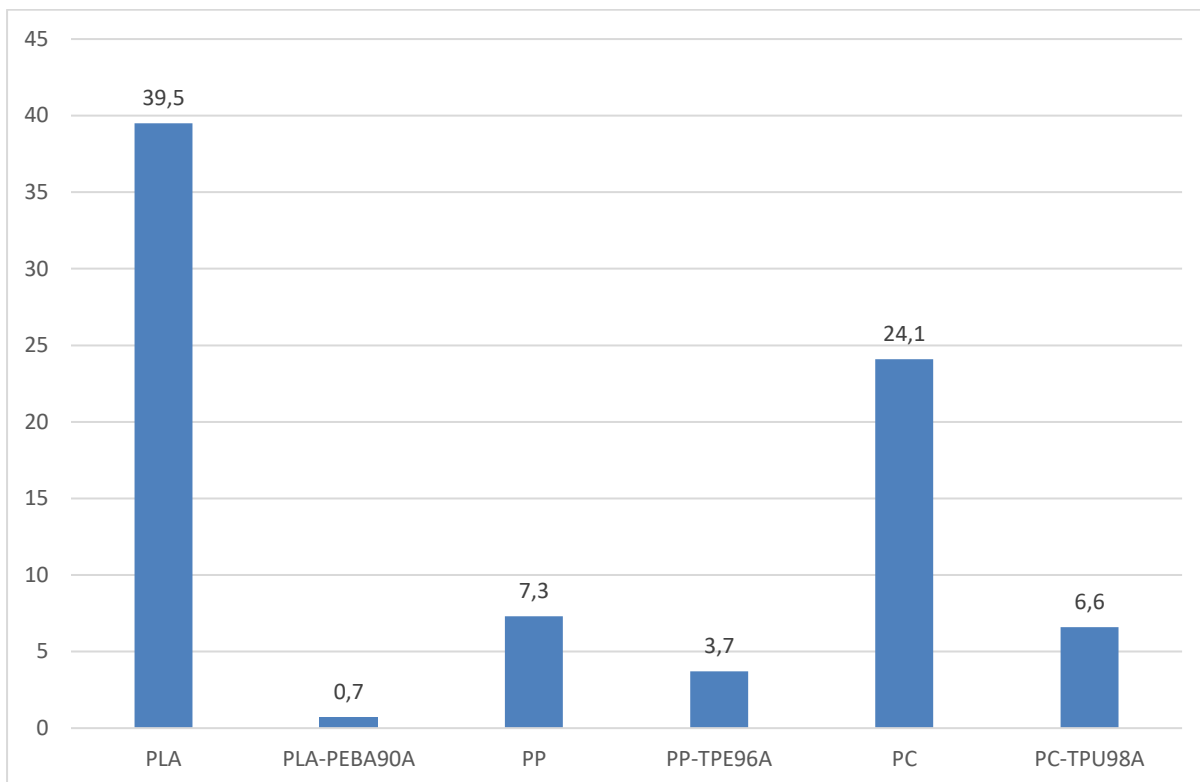


Obr. 7: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy sendviče

5.3.2 Výsledky tahové zkoušky kolmo na vrstvy sendviče

Napětí

První zkoumanou veličinou během tahové zkoušky kolmo na vrstvy bylo maximální napětí, které zkoušený vzorek vydrží. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální napětí (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 8: Graf srovnání napětí [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků

Celkové srovnání napětí při tahové zkoušce kolmo na vrstvy je uvedeno v grafu na Obr.8.

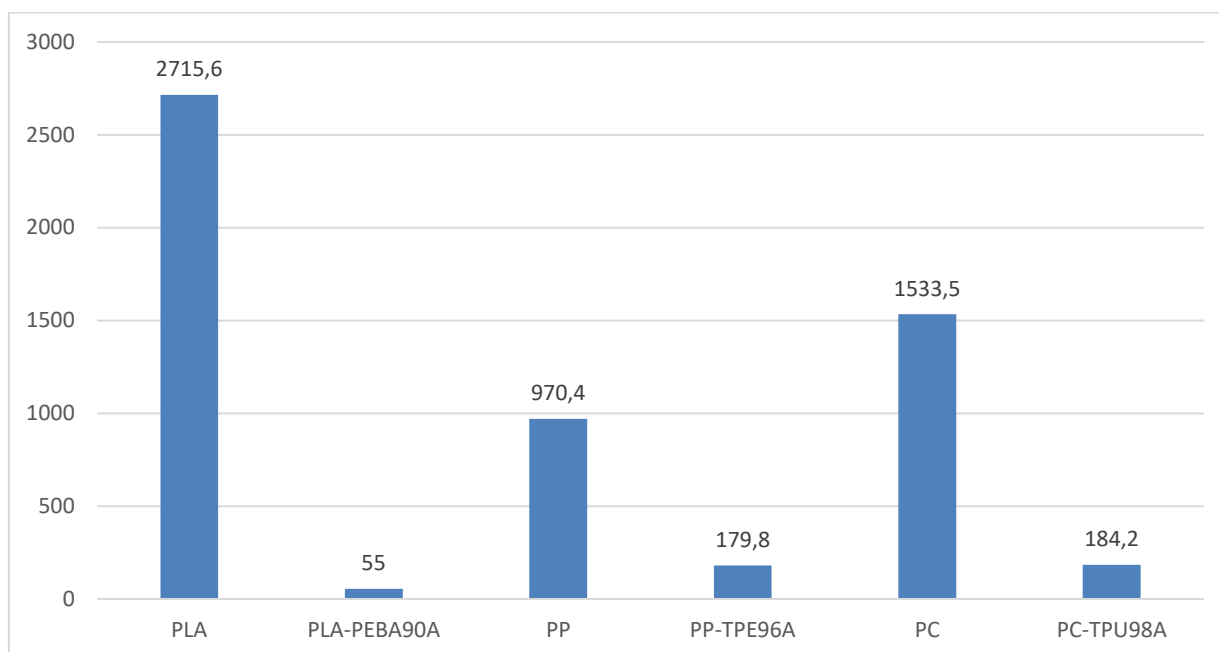
Nejvyšší hodnoty napětí mezi srovnávacími vzorky bylo dosaženo u materiálu PLA a to hodnoty 39,5 MPa, nejnižší naopak u PP 7,3 MPa. Mezi sendviči bylo dosaženo největší hodnoty napětí u vzorku PC – TPU98A, a to 6,6 MPa, nejméně pak u PLA – PEBA90A 0,7 MPa.

Z pohledu poměrného napětí vůči napětí u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 51%. Zajímavostí je, že u některých zkušebních vzorků došlo k přetržení v oblasti flexibilního materiálu TPE96A, a ne v oblasti spoje mezi flexibilním a rigidním materiálem.

Naopak nejnižší poměrné napětí bylo naměřeno u vzorku PLA – PEBA90A, kde bylo dosaženo pouze 2 % napětí ve srovnání s referenčním vzorkem z PLA.

Youngův modul

Další zkoumanou veličinou během tahové zkoušky kolmo na vrstvy byl Youngův modul, který zkoušený vzorek prokáže. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální modul v MPa (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 9: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků

Celkové srovnání modulů při tahové zkoušce kolmo na vrstvy je uvedeno v grafu na Obr. 9.

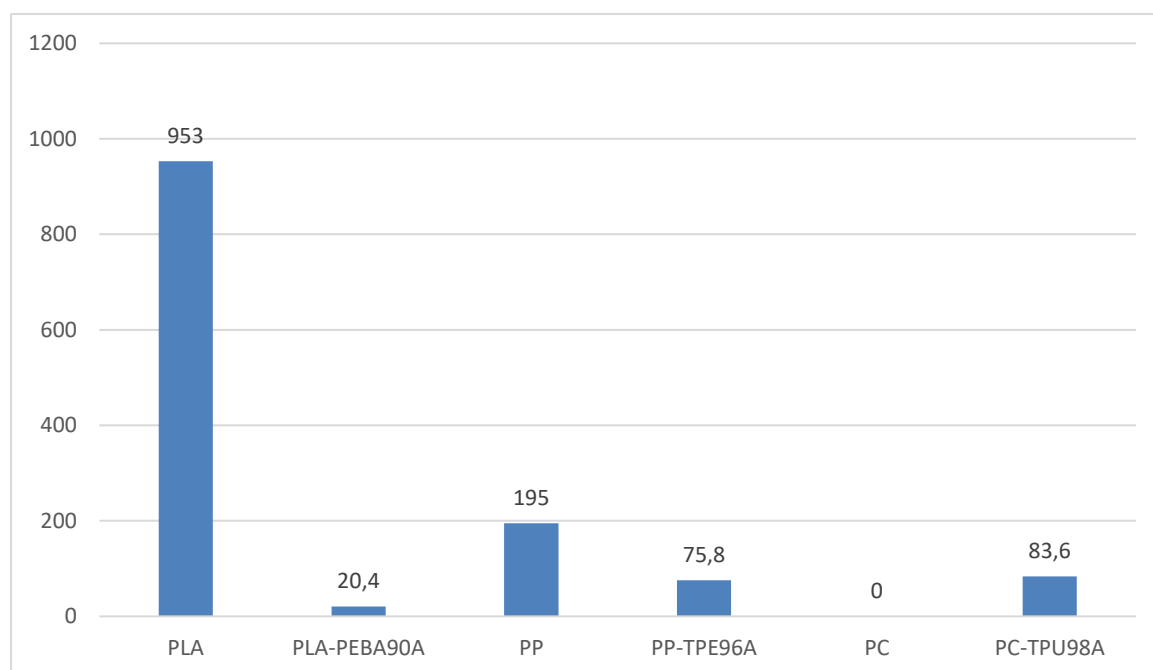
Nejvyšší hodnoty modulu mezi srovnávacími vzorky bylo dosaženo u materiálu PLA, a to hodnoty 2715,6 MPa, nejnižší naopak u PP 970,4 MPa. Mezi sendviči bylo dosaženo největší hodnoty modulu u vzorku PC – TPU98A, a to 184,2 MPa, nejméně pak u PLA – PEBA90A 55 MPa.

Z pohledu poměrného modulu vůči modulu u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 19 %.

Naopak nejnižší poměrný modul byl zjištěn u vzorku PLA – PEBA90A, kde dosáhl pouze 2 % modulu ve srovnání s referenčním vzorkem z PLA.

Síla při prodloužení o 0,2%

Poslední vyhodnocovanou veličinou během tahové zkoušky kolmo na vrstvy byla síla potřebná k prodloužení vzorku o 0,2 %. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci potřebnou sílu k protažení vzorku o 0,2 % (levá svislá osa) naměřenou jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů.



Obr. 10: Graf srovnání síly nutné k prodloužení o 0,2% [N] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků

Celkové srovnání síly nutné k protažení vzorku o 0,2 % při tahové zkoušce kolmo na vrstvy je uvedeno v grafu na Obr. 10

Nejvyšší hodnoty síly nutné k protažení vzorku o 0,2 % mezi srovnávacími vzorky bylo dosaženo u materiálu PLA a to hodnoty 953 N, nejnižší naopak u 195 N. Mezi sendviči bylo dosaženo největší síly nutné k protažení vzorku o 0,2 % u vzorku PC – TPU98A a to 83,6 N, nejméně pak u PLA – PEBA90A, a to 20,4 N.

Z pohledu poměrné síly nutné k protažení vzorku o 0,2 % vůči síle u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 39 %.

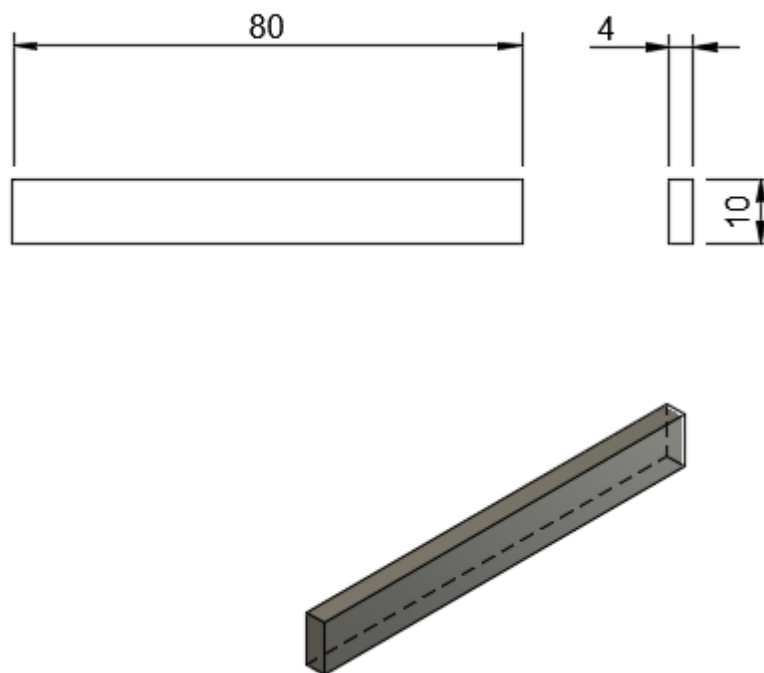
Naopak nejnižší poměrná síla nutná k protažení vzorku o 0,2 % byla zjištěna u vzorku PLA – PEBA90A, kde dosáhla pouze 2 % síly ve srovnání s referenčním vzorkem z PLA.

5.3.3 Příprava zkoušky

Vzorky pro zkoušku trojbodého ohybu byly připraveny podle EN ISO 178. Jedná se o hranoly o délce 80 mm, šířce 10 mm a tloušťce 4 mm.

Orientace zkušebních vzorku na podložku při tisku byla plochou o stranách 80 mm a 10 mm. Tisk těles probíhal rigidním materiálem do výšky 1 mm, poté byl změněn na flexibilní, kterým bylo tisknuto 2 mm a následně byl zbylý 1 mm dotisknut opět rigidním materiálem. Celkem bylo pro každý typ sendviče připraveno 5 vzorků a dalších 5 vzorků bylo vytisknuto pro srovnání vlastností ze samotného rigidního materiálu.

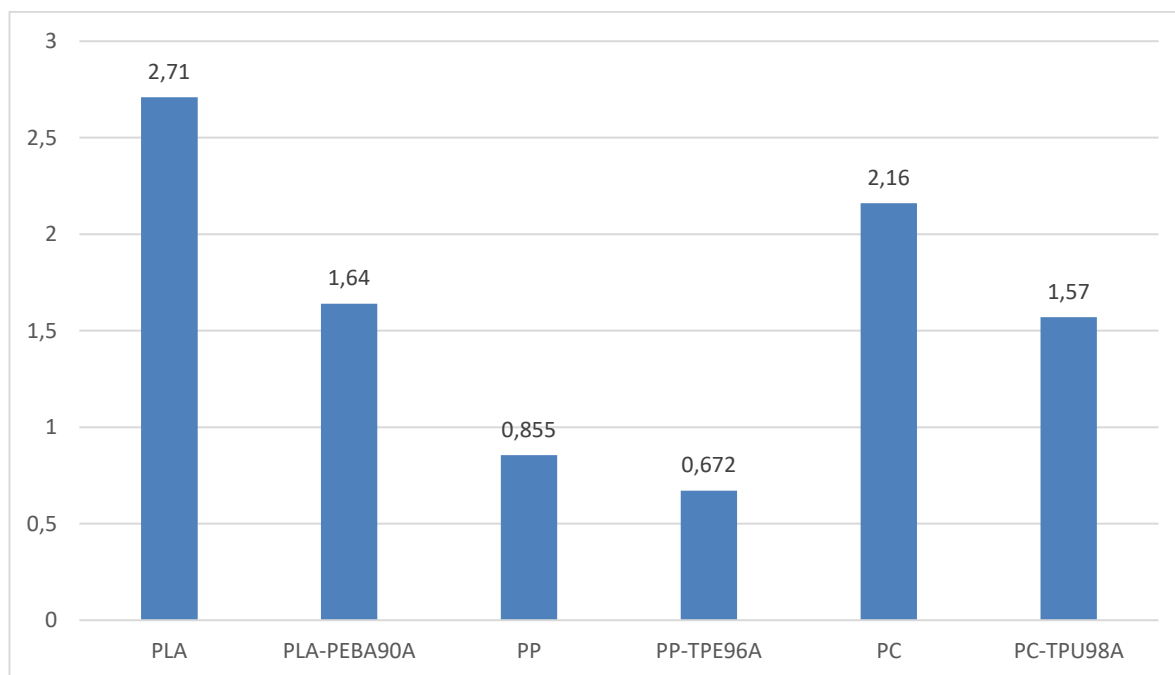
Pro potřeby zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick Materialprüfung 1456, osazené přípravkem pro zkoušku trojbodého ohybu. Podmínkou pro ukončení zkoušky byl nastaven propad napětí o 80 %.



Obr. 11: Zkušební vzorek pro zkoušku trojbodým ohybem dle EN ISO 178

Ohybový modul

Během zkoušky trojbodého ohybu byl zkoumanou veličinou ohybový modul. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální ohybový modul (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů a červenými sloupci poměrné hodnoty maximálního naměřeného ohybového modulu v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximálnímu ohybovému modulu, který byl naměřen u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



Obr. 12: Graf srovnání ohybových modulů [GPa] při trojbodém ohybu u všech vzorků

Celkové srovnání ohybových modulů při zkoušce trojbodým ohybem je uvedeno v grafu na Obr. 12.

Nejvyšší hodnoty ohybového modulu mezi srovnávacími vzorky bylo dosaženo u materiálu PLA, a to hodnoty 2,71 GPa, nejnižší naopak u PP 0,855 GPa. Mezi sendviči bylo dosaženo největší hodnoty ohybového modulu u vzorku PLA – PEBA90A, a to 1,64 GPa, nejméně pak u PP – TPE96A 0,672 GPa.

Z pohledu poměrného ohybového modulu vůči ohybovému modulu u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 79 %.

Naopak nejnižší poměrný ohybový modul byl zjištěn u vzorku PLA – PEBA90A, kde dosáhl 61 % ohybového modulu ve srovnání s referenčním vzorkem z PLA.

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě vyhodnocených dat lze konstatovat, že použití sendvičových struktur výrazně ovlivňuje všechny zkoumané veličiny, a to jak pozitivně, tak i negativně. Je třeba mít na paměti, že veškeré experimenty byly provedeny na vzorcích, které byly navrhnuty s pouze 1 mm širokými vnějšími rigidními vrstvami. Optimalizací této tloušťky lze očekávat výraznou změnu vlastností, oproti výše uvedeným datům.

Instrumentovaná tahová zkouška byla provedena na vzorcích o celkové tloušťce 3,2 mm, kde flexibilní jádro bylo 1,2 mm, což odpovídá 37,5 % z celkové tloušťky. Tento experiment prokázal, že u zkoušených typů sendvičových struktur dosahovala míra únosného napětí mezi v rozmezí 54–72 % ve srovnání s referenčními vzorky. Obecně lze říci, že nejvyšších hodnot napětí bylo docíleno u sendvičů s jádrem z materiálu TPU98A. Další zkoumanou veličinou byl Youngův v modul, kde výsledky prokázaly, že sendviče s flexibilním jádrem dosahují poměrných hodnot Youngova modulu v rozmezí 58-69 % vůči referenčním vzorkům ze samotného rigidního materiálu. Nelze jednoznačně vyzdvihnout jeden konkrétní flexibilní materiál, který by tuhle vlastnost výrazně zvyšoval, protože každý typ flexibilního jádra v kombinaci s jednotlivými rigidními materiály se choval odlišně a nelze vyčíst jednoznačnou závislost. Zajímavostí bylo že flexibilní materiál PEBA90A použitý spolu s PLA vykazoval ze všech sendvičů nejvyšší hodnotu Youngova modulu, naopak v použití s PP zase tu nejnižší. Třetí vyhodnocovanou veličinou během tahové zkoušky byla síla nutná k prodloužení vzorku o 0,2 %. U tohoto experimentu bylo zjištěno, že nejvyšší poměrné síly bylo docíleno u vzorku ASA – TPU98A kdy dosahoval hodnoty 78 % vůči referenčnímu vzorku ASA. Obecně bylo mezi sendviči dosahováno hodnot 29-78 % vůči referenčním vzorkům.

Další prováděnou zkoušku byla rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy. Tato zkouška byla prováděna na vzorcích o tloušťce 4 mm, kde flexibilní

jádro bylo tlusté 2 mm. Zde bylo jednoznačně dokázáno, že práce nutná k přeražení vzorku významně stoupla u všech sendvičů, nehledě na typ použitého flexibilního jádra. Nejvyšší poměrné hodnoty bylo dosaženo u vzorku PLA-TPU92A, který vykazoval 921 % této hodnoty vůči referenčnímu vzorku z PLA. Nejnižší poměrné hodnoty síly nutné k přeražení vzorku mezi sendviči bylo prokázáno u PP – TPE96A, avšak i zde tato hodnota dosahovala 167 % vůči referenčnímu vzorku z PP. Bylo dokázáno, že flexibilní jádro významně zvyšuje houževnatost výrobku.

Dalším prováděným experimentem byla tahová zkouška kolmo na vrstvy. Tato zkouška měla zprostředkovat informace o pevnosti sendvičů na rozhraní dvou materiálů. Použité vzorky byly navrženy o tloušťce 3,2 mm a výšky 100 mm. Vzorek se skládal ze dvou vrstev, kdy rigidní materiál dosahoval do výšky 50 mm a zbylých 50 mm bylo vytisknuto z materiálu flexibilního. Pro tuto zkoušku byly vybrány z předchozích zkoušek 3 sendvičové struktury, a to tak, aby byly zastoupeny jak běžné rigidní materiály jako PLA, tak i ty pro náročnější či specifické použití jako je PP a PC. Výběr flexibilních materiálů byl zamýšlen tak, aby byly zastoupeny materiály o různých tvrdostech, což vedlo k výběru materiálů PEBA90A, TPU98A a TPE96A. Výsledné složení testovaných sendvičů bylo PLA-PEBA90A, PP – TPE96A a PC – TPU98A. Poměrné napětí, které bylo vyhodnoceno z dat získaných během této zkoušky, bylo v případě sendviče PLA – PEBA90A velmi nízké, dosahovalo pouze 2 % hodnoty naměřené u referenčního vzorku z PLA. U sendviče PC – TPU98A bylo dosaženo vyšších hodnot poměrného napětí a to 27 % vůči referenčnímu vzorku z PC. Nejlepší výsledek byl pozorován u sendviče PP – TPE96A, rozhraní obou materiálů odolalo poměrnému napětí dosahující hodnoty 51 % referenčního vzorku PP. Zajímavostí zde je, že u dvou vzorků PP – TPE96A nedošlo k přetržení v rozhraní obou materiálů, ale v oblasti TPE96A. V případě Youngova modulu při zatížení kolmo na vrstvy dosáhly naměřené poměrné hodnoty tohoto modulu vůči referenčnímu vzorku u PLA – PEBA90A hodnoty 2 %, PC – TPU98A 12 % a

u PP – TPE96A 19 %. Poslední vyhodnocovanou veličinou při této zkoušce byla síla nutná k prodloužení vzorku 0,2 %. Poměrná hodnota této veličiny vůči referenčnímu vzorku u PLA – PEBA90A opět dosáhla jen 2 % a u PP – TPE96A to bylo 39 %. V případě PC – TPU98A lze vyhodnotit jen absolutní naměřenou sílu nutnou k prodloužení o 0,2 %, protože u referenčního vzorku PC se systému na měřícím zařízení nepodařilo tuto hodnotu vyhodnotit. Celková síla na sendviči PC – TPE96A byla 83,6 N. Obecně lze hodnotit, že z vybraných tří sendvičů si nejlépe během tahové zkoušky kolmo na vrstvy vedl PP – TPE96A. Dle výsledků však lze vyvodit, že namáhání 3D tisknutých sendvičových struktur s flexibilním jádrem kolmo na vrstvu spojení není vhodné.

Posledním experimentem byla zkouška trojbodým ohybem, pro kterou byly vybrány stejné tři sendviče jako pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy. Zde byla tloušťka vzorku 4 mm, kdy flexibilní jádro bylo tlusté 2 mm. Cílem zkoušky bylo zjistit ohybový modul těchto sendvičů. Z pohledu poměrného ohybového modulu vůči ohybovému modulu referenčního vzorku si nejlépe vedl sendvič PP – TPE96A který dosáhl hodnoty 79 %. Pro vzorek PC – TPU98A byla naměřena poměrná hodnota ohybového modulu 73 % a pro PLA – PEBA90A 61 %. Lze konstatovat že při použití sendvičů PP – TPE96A lze zachovat poměrně vysoké hodnoty ohybového modulu.

V rámci jednotlivých zkoušek byly naměřeny i další veličiny, které byly zpracovány taktéž do poměrných hodnot vůči referenčním vzorkům a byla z nich vytvořena ucelená přehledová tabulka expertního systému. (Příloha 1).

7. PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI

Primárním přínosem této práce pro vědu a praxi je získání informací o možnostech využití cenově dostupných 3D tiskáren pro výrobu sendvičových struktur a výrobků skládajících se z kombinace rigidního a flexibilního materiálu. Nejdůležitějším aspektem je zjištění, které materiály lze efektivně tisknout v sendvičových strukturách a jejich následné testování vybranými mechanickými zkouškami. Experiment umožňuje také nalezení optimálních procesních podmínek pro vytisknutí co nejkvalitnějších sendvičových struktur.

Během tisku zkušebních vzorků byly identifikovány materiály se špatnou přilnavostí k tiskové podložce, a to PC, PP a PA. Efektivním řešením se ukázalo využití adhezivního přípravku ve formě spreje 3D Lak v kombinaci s tiskovým límcem šířky 10 mm kolem. Pro zkvalitnění tisku výrobku z flexibilního materiálu je nutné tisknout velmi pomalu, maximálně rychlostí 15–20 mm/s. Zvýšení teploty na trysce o 10–15 °C oproti doporučení výrobce během tisku flexibilních materiálů zlepší průtok materiálu tryskou a výrazně sníží riziko zamotání materiálů na podávacím kolečku bovdového extruderu. Celkový přehled všech optimalizovaných procesních parametrů je přiložen jako příloha 3.

Díky nabytým informacím z naměřených dat během mechanických zkoušek bylo prokázáno, že při použití sendviče s flexibilním jádrem lze dosáhnout až 69 % Youngova modulu vůči referenčnímu vzorku, zvýšit houževnatost výrobku až devítinásobně a dosáhnout až 79 % ohybového modulu vůči referenčnímu vzorku. Během tahové zkoušky kolmo na vrstvy bylo prokázáno, že zkoušené sendvičové struktury není vhodné namáhat kolmo na vrstvu spojení dvou materiálů, a to z důvodů nízké pevnosti.

Lze hodnotit, že na cenově dostupné 3D tiskárně lze s úspěchem vyrábět sendvičové výrobky s flexibilním jádrem, je však nutné dbát na správnou orientaci výrobku na tiskové ploše s ohledem na způsob reálného namáhání daného výrobku. Dále je nutné uzpůsobit konstrukci dané součástky dle konkrétní

aplikace a počítat s potřebou odladění návrhu, než bude docíleno vyžadovaných vlastností. Lze však s jistotou konstatovat, že lze zásadně zvýšit tuhost takového výrobku na úkor mírného snížení pevnosti v tahu a ohybu. Reálné použití takových sendvičů může být v aplikacích, kde je nutné při zachování relativní tuhosti a pevnosti zvýšit houževnatost výrobku, či zvýšit jeho pružnost či schopnost jímat vibrace, což jednoznačně flexibilní materiály vykazují oproti materiálům rigidním. Možnou aplikací mohou být tlumící prvky či například odolné rámy dronů.

Během jednotlivých zkoušek byly naměřeny i další veličiny, které nebyly v této práci uváděny. Data z těchto experimentů jsou součástí příloh (Příloha 2). Dále byl z uvedených poměrných hodnot vytvořen expertní systém ve formě přehledné tabulky (Příloha 1), rozlišené pomocí barevné škály, umožňující konstruktérovi velmi jednoduše vybrat vhodný typ sendviče daného rigidního materiálu pro potřebnou aplikaci.

8. ZÁVĚR

Technologie 3D tisku se dostává čím dál víc do popředí, a je aplikována ve stále sofistikovanějších aplikacích, kdy je trendem k tomu využívat i cenově dostupné 3D tiskárny. Jednou z takových aplikací může být 3D tisk sendvičových struktur. Cílem této práce bylo ověřit možnosti 3D tisku sendvičových struktur s flexibilními jádry na cenově dostupné 3D tiskárně.

Pro potřeby experimentů byla vybrána tiskárna Prusa MINI s bovdenovým extruderem. Byla otestována vzájemná kompatibilita celé řady běžně dostupných flexibilních a rigidních materiálů. Jednalo se jak o ty nejběžněji používané (PLA, PETG, TPU), tak i ty pro specifické a náročné aplikace (CPE, ASA, PP, PC, PA, TPE a PEBA). Dané kompatibilní materiály byly poté vytisknuty jako zkušební vzorky pro mechanické zkoušky ve formě sendvičových struktur. Během tisku byly ověřeny doporučené procesní podmínky udávané výrobcem jednotlivých materiálů, zda je lze použít i pro tisk sendvičových struktur. Z nabytých zkušeností byla vytvořena doporučení pro tisk takových materiálů na daném typu tiskárny.

K daným zkouškám byly připraveny také vzorky z jednotlivých rigidních materiálů, které sloužili jako referenční vzorky pro srovnání výsledných naměřených hodnot s jejich sendviči. Vyhodnocená data byla uváděna vždy v grafu obsahujícím jak výsledné hodnoty naměřené u sendvičových struktur, tak i srovnávacího vzorku z daného rigidního materiálu. Prezentovaná data byla vždy uváděna jak v absolutních hodnotách, tak i poměrných, vztažených k naměřené hodnotě referenčního vzorku z rigidního materiálu, kdy tato je vždy uváděna jako 100 %.

Prvním experimentem byla tahová zkouška, kdy byly vyhodnocovány veličiny maximální napětí, Youngův modul a síla nutná k prodloužení o 0,2 %. Z výsledných dat lze konstatovat, že maximálního napětí bylo u sendvičů dosahováno v rozmezí mezi 54 % a 72 % vůči referenčním vzorkům. Hodnota

Youngova modulu se pohybovala v rozmezí 58 % až 69 % a síla nutná k prodloužení o 0,2 % mezi 29 % až 78 % referenční hodnoty.

Druhým z provedených experimentů byla rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy, kde byla zkoumána houževnatost sendvičových struktur a vyhodnocovaná veličina byla práce nutná k přeražení zkušební vzorku. Všechna použitá flexibilní jádra významně zvýšila houževnatost vzorku, nehledě na použitý typ. Poměrná hodnota práce vztažená k referenčním vzorkům z rigidních materiálu se pohybovala v rozmezí 167 % až 921 %.

Třetím provedeným experimentem byla tahová zkouška kolmo na vrstvy, kdy byla zkoumána pevnost spojení dvou vrstev v oblasti přechodu mezi jednotlivými materiály sendviče. Pro tuto zkoušku byly vybrány 3 sendviče, v nichž byly zastoupeny jak všechny tři druhy flexibilních materiálů, tak i rigidní materiály PLA, PP a PC. Zkoumanými vlastnostmi bylo maximální napětí, Youngův modul a síla nutná k protažení vzorku o 0,2 %. Bylo dokázáno že poměrné maximální napětí vůči referenčnímu vzorku se pohybuje v rozmezí 2 % – 51 %. V případě modulu byly poměrné hodnoty v rozmezí 2 % – 19 % a u síly nutné k protažení tělesa o 0,2 % bylo dosaženo hodnot 2 % pro sendvič PLA – PEBA90A a 39 % pro PP – TPE96A. U referenčního vzorku z PC se nepodařilo měřicímu zařízení tento údaj zaznamenat, proto nemohl být sendvič PC – TPU98A vyhodnocen pomocí poměrné hodnoty ale pouze absolutní silou, která dosáhla 83,6 N. Zajímavostí během tohoto experimentu bylo že u dvou vzorku z PP – TPE96A nedošlo k porušení integrity v oblasti rozhraní dvou materiálů, ale v materiálu TPE96A.

Posledním prováděným experimentem byla zkouška trojbodého ohybu, která byla provedena na stejných vybraných sendvičích jako zkouška předchozí. Zkoumanou veličinou zde byl ohybový modul sendvičových struktur. Poměrná hodnota ohybového modulu se pohyboval v rozmezí mezi 61 % – 79 % hodnoty referenčních vzorků.

Ze všech vyhodnocených dat byl vypracován expertní systém formou přehledné tabulky poměrných hodnot daných veličin vůči referenčním vzorkům z jednotlivých rigidních materiálů. Pro lepší přehlednost byl zaveden systém barevného značení dle dosažených poměrných hodnot. Tento systém umožní konstruktérovi velmi jednoduše určit vhodný sendvič pro danou aplikaci.

Po vyhodnocení všech experimentů lze konstatovat, že je možné s úspěchem produkovat sendvičové struktury s flexibilními jádry na cenově dostupných 3D tiskárnách. Správně zvolený sendvič pro danou aplikaci umožňuje využít významně zvýšené houževnatosti za cenu nepříliš velkého snížení pevnosti v tahu a ohybu. Důležitá je správná konstrukce sendviče, která může dané vlastnosti velmi ovlivnit. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se podílem flexibilního materiálu v sendviči klesá pevnost v tahu a ohybu, a zároveň roste jeho houževnatost. Při tisku takových sendvičů je nutné také dbát na správnou orientaci na tiskové podložce s ohledem na reálné zatížení výsledného produktu, protože tahové namáhání kolmo na vrstvy je pro tyto sendviče velmi nevhodné.

Výsledky této práce lze uplatnit v praxi například při tisku tvarových tlumících prvků, odolných rámců dronů a podobných aplikací vyžadující vysokou houževnatost při zachování určité pevnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KIM, Heechang, Eunju PARK, Suhyun KIM, Bumsoo PARK, Namhun KIM a Seungchul LEE. Experimental Study on Mechanical Properties of Single- and Dual-material 3D Printed Products. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **10**, 887-897 [cit. 2022-10-22]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.076
- [2] NING, Fuda, Weilong CONG, Jingjing QIU, Junhua WEI a Shiren WANG. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2015, **80**, 369-378 [cit. 2023-04-10]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2015.06.013
- [3] KRUTH, J.-P., M.C. LEU a T. NAKAGAWA. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals* [online]. 1998, **47**(2), 525-540 [cit. 2023-04-10]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)63240-5
- [4] ZIEMIAN, Constance, Mala SHARMA a Sophia ZIEMI. Anisotropic Mechanical Properties of ABS Parts Fabricated by Fused Deposition Modelling. In: GOKCEK, Murat, ed. *Mechanical Engineering* [online]. InTech, 2012, 2012-04-11 [cit. 2023-04-10]. ISBN 978-953-51-0505-3. Dostupné z: doi:10.5772/34233
- [5] BODAGHI, M., A. SERJOUEI, A. ZOLFAGHARIAN, M. FOTOUHI, H. RAHMAN, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Reversible energy absorbing meta-sandwiches by FDM 4D printing: Progress and Challenges. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2020, **173**(1) [cit. 2022-10-22]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2020.105451
- [6] WANG, Xin-Tao, Xiao-Wen LI a Li MA. Interlocking assembled 3D auxetic cellular structures. *Materials & Design* [online]. 2016, **99**, 467-476 [cit. 2023-04-10]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.088
- [7] YANG, Li, Ola HARRYSSON, Harvey WEST a Denis CORMIER. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. *International Journal of Solids and*

- Structures* [online]. 2015, **69-70**, 475-490 [cit. 2023-04-10]. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.05.005
- [8] BATES, Simon R.G., Ian R. FARROW a Richard S. TRASK. 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Materials & Design* [online]. 2016, **112**, 172-183 [cit. 2023-04-10]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.08.062
- [9] GOH, Wei a Michinao HASHIMOTO. Dual Sacrificial Molding: Fabricating 3D Microchannels with Overhang and Helical Features. *Micromachines* [online]. 2018, **9**(10) [cit. 2022-10-22]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi9100523
- [10] GOH, Wei Huang a Michinao HASHIMOTO. Fabrication of 3D Microfluidic Channels and In-Channel Features Using 3D Printed, Water-Soluble Sacrificial Mold. *Macromolecular Materials and Engineering* [online]. 2018, **303**(3) [cit. 2023-04-10]. ISSN 14387492. Dostupné z: doi:10.1002/mame.201700484
- [11] SAGGIOMO, Vittorio a Aldrik H. VELDERS. Simple 3D Printed Scaffold-Removal Method for the Fabrication of Intricate Microfluidic Devices. *Advanced Science* [online]. 2015, **2**(9) [cit. 2023-04-10]. ISSN 21983844. Dostupné z: doi:10.1002/advs.201500125
- [12] MILLER, Jordan S., Kelly R. STEVENS, Michael T. YANG, et al. Rapid casting of patterned vascular networks for perfusable engineered three-dimensional tissues. *Nature Materials* [online]. 2012, **11**(9), 768-774 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1476-1122. Dostupné z: doi:10.1038/nmat3357
- [13] HASANOV, Seymour, Suhas ALKUNTE, Mithila RAJESHIRKE, Ankit GUPTA, Orkhan HUSEYNOV, Ismail FIDAN, Frank ALIFUI-SEGBAYA a RENNIE. Dual Sacrificial Molding: Progress and Challenges. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. 2022, **6**(1) [cit. 2022-10-22]. ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp6010004
- [14] JOSHI, Sunil C. a Abdullah A. SHEIKH. 3D printing in aerospace and its long-term sustainability. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2015, **10**(4), 175-185 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2015.1111519

- [15] PUTRA, N.E., M.J. MIRZAALI, I. APACHITEI, J. ZHOU a A.A. ZADPOOR. Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution. *Acta Biomaterialia* [online]. 2020, **109**, 1-20 [cit. 2023-04-10]. ISSN 17427061. Dostupné z: doi:10.1016/j.actbio.2020.03.037
- [16] VAEZI, Mohammad, Srisit CHIANRABUTRA, Brian MELLOR a Shoufeng YANG. Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping* [online]. 2013, **8**(1), 19-50 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1745-2759. Dostupné z: doi:10.1080/17452759.2013.778175
- [17] CHEN, Da a Xiaoyu ZHENG. Multi-material Additive Manufacturing of Metamaterials with Giant, Tailorable Negative Poisson's Ratios. *Scientific Reports* [online]. 2018, **8**(1) [cit. 2023-04-10]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-018-26980-7
- [18] ÖZEN, Arda, Dietmar AUHL, Christina VÖLLMECKE, Josef KIENDL, Bilen Emek ABALI, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Optimization of Manufacturing Parameters and Tensile Specimen Geometry for Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Printed PETG: Progress and Challenges. *Materials* [online]. 2021, **14**(10) [cit. 2022-10-22]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14102556
- [19] AUHL, Dietmar, Falk ROHNSTOCK, Oliver LÖSCHKE, Konstanze SCHÄFER, Peng WANG a Manfred H. WAGNER. *3D-printing quality in relation to melt flow and fusion behavior of polymer materials* [online]. In: . 2019, 030004- [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: doi:10.1063/1.5109498
- [20] MEZA, Lucas R., Alex J. ZELHOFER, Nigel CLARKE, Arturo J. MATEOS, Dennis M. KOCHMANN a Julia R. GREER. Resilient 3D hierarchical architected metamaterials. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2015, **112**(37), 11502-11507 [cit. 2023-04-10]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1509120112
- [21] SCHNEEVOGT, Helge, Kevin STELZNER, Buket YILMAZ, Bilen Emek ABALI, André KLUNKER a Christina VÖLLMECKE. Sustainability in additive manufacturing: Exploring the mechanical potential of recycled PET filaments. *Composites and Advanced Materials* [online].

- 2021, **30** [cit. 2023-04-10]. ISSN 2634-9833. Dostupné z: doi:10.1177/26349833211000063
- [22] ZHAO, Yu, Yuansong CHEN a Yongjun ZHOU. Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: Experimental and theoretical analyses. *Materials & Design* [online]. 2019, **181** [cit. 2023-04-10]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2019.108089
- [23] TORRADO, Angel R. a David A. ROBERSON. Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns. *Journal of Failure Analysis and Prevention* [online]. 2016, **16**(1), 154-164 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1547-7029. Dostupné z: doi:10.1007/s11668-016-0067-4
- [24] ZIEMIAN, Sophia, Maryvivan OKWARA a Constance Wilkens ZIEMIAN. Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene. *Rapid Prototyping Journal* [online]. 2015, **21**(3), 270-278 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-09-2013-0086
- [25] SHOJIB HOSSAIN, Mohammad, David ESPALIN, Jorge RAMOS, Mireya PEREZ a Ryan WICKER. Improved Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling-Manufactured Parts Through Build Parameter Modifications. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2014, **136**(6) [cit. 2023-04-10]. ISSN 1087-1357. Dostupné z: doi:10.1115/1.4028538
- [26] ANDÓ, Mátyás, Márton BIROSZ, Sudhanraj JEGANMOHAN, Josef KIENDL, Bilen Emek ABALI, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Surface bonding of additive manufactured parts from multi-colored PLA materials: Progress and Challenges. *Measurement* [online]. 2021, **169**(10) [cit. 2022-10-22]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2020.108583
- [27] SLESARENKO, Viacheslav a Stephan RUDYKH. Towards mechanical characterization of soft digital materials for multimaterial 3D-printing. *International Journal of Engineering Science* [online]. 2018, **123**, 62-72 [cit. 2023-04-10]. ISSN 00207225. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijengsci.2017.11.011

- [28] MANSOURI, M.R., H. MONTAZERIAN, S. SCHMAUDER a J. KADKHODAPOUR. 3D-printed multimaterial composites tailored for compliancy and strain recovery. *Composite Structures* [online]. 2018, **184**, 11-17 [cit. 2023-04-10]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2017.09.049
- [29] YIN, Jun, Chaohua LU, Jianzhong FU, Yong HUANG a Yixiong ZHENG. Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design* [online]. 2018, **150**, 104-112 [cit. 2023-04-10]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.04.029
- [30] BACA LOPEZ, David Moises, Rafiq AHMAD, Sudhanraj JEGANMOHAN, Josef KIENDL, Bilen Emek ABALI, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Tensile Mechanical Behaviour of Multi-Polymer Sandwich Structures via Fused Deposition Modelling: Progress and Challenges. *Polymers* [online]. 2020, **12**(3) [cit. 2022-10-22]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12030651
- [31] URIONDO, Adrián, Manuel ESPERON-MIGUEZ a Suresh PERINPANAYAGAM. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* [online]. 2015, **229**(11), 2132-2147 [cit. 2023-04-10]. ISSN 0954-4100. Dostupné z: doi:10.1177/0954410014568797
- [32] SINGH, Rupinder, Jagdeep SINGH a Sunpreet SINGH. Investigation for dimensional accuracy of AMC prepared by FDM assisted investment casting using nylon-6 waste based reinforced filament. *Measurement* [online]. 2016, **78**, 253-259 [cit. 2023-04-10]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2015.10.016
- [33] ALGHAMDY, Mohammed, Rafiq AHMAD a Basel ALSAYYED. Material Selection Methodology for Additive Manufacturing Applications. *Procedia CIRP* [online]. 2019, **84**, 486-490 [cit. 2023-04-10]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2019.04.265
- [34] SPOERK, Martin, Joamin GONZALEZ-GUTIERREZ, Janak SAPKOTA, Stephan SCHUSCHNIGG a Clemens HOLZER. Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament

- fabrication. *Plastics, Rubber and Composites* [online]. 2017, **47**(1), 17-24 [cit. 2023-04-10]. ISSN 1465-8011. Dostupné z: doi:10.1080/14658011.2017.1399531
- [35] GALATAS, Athanasios, Hany HASSANIN, Yahya ZWEIRI, Lakmal SENEVIRATNE, Bilen Emek ABALI, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Additive Manufactured Sandwich Composite/ABS Parts for Unmanned Aerial Vehicle Applications: Progress and Challenges. *Polymers* [online]. 2018, **10**(11) [cit. 2022-10-22]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym10111262
- [36] SAARI, Matt, Bryan COX, Edmond RICHER, Paul S. KRUEGER a Adam L. COHEN. Fiber Encapsulation Additive Manufacturing: An Enabling Technology for 3D Printing of Electromechanical Devices and Robotic Components. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2015, **2**(1), 32-39 [cit. 2023-04-10]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2015.0003
- [37] LI, Guiwei, Ji ZHAO, Wenzheng WU, Jili JIANG, Bofan WANG, Hao JIANG a Jerry FUH. Effect of Ultrasonic Vibration on Mechanical Properties of 3D Printing Non-Crystalline and Semi-Crystalline Polymers. *Materials* [online]. 2018, **11**(5) [cit. 2023-04-10]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11050826
- [38] ASKANIAN, Haroutioun, Daniel MURANAKA DE LIMA, Sophie COMMEREUC a Vincent VERNEY. Toward a Better Understanding of the Fused Deposition Modeling Process: Comparison with Injection Molding. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 2018, **5**(4), 319-327 [cit. 2023-04-10]. ISSN 2329-7662. Dostupné z: doi:10.1089/3dp.2017.0060

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku dle ISO 527-2/1B</i>	14
<i>Obr. 2: Graf srovnání napětí [MPa] u všech vzorků</i>	15
<i>Obr. 3: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] u všech vzorků</i>	16
<i>Obr. 4: Graf srovnání síly potřebné k prodloužení o 0,2% [N] u všech vzorků</i>	17
<i>Obr. 5: Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1</i>	19
<i>Obr. 6: Graf srovnání práce [J] nutné k přeražení u všech vzorků</i>	20
<i>Obr. 7: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy sendviče</i>	22
<i>Obr. 8: Graf srovnání napětí [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků</i>	23
<i>Obr. 9: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků</i>	24
<i>Obr. 10: Graf srovnání síly nutné k prodloužení o 0,2% [N] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků</i>	25
<i>Obr. 11: Zkušební vzorek pro zkoušku trojbodým ohybem dle EN ISO 178</i>	27
<i>Obr. 12: Graf srovnání ohybových modulů [GPa] při trojbodém ohybu u všech vzorků</i>	28

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
%	procenta
mm	milimetr
mm^2	milimetr čtvereční
m/s	metry za sekundu
MPa	Mega Pascall
σ	smluvní napětí
ε	poměrné prodloužení
ε_t	jmenovité poměrné prodloužení
F	síla
S_0	původní průřez
L_0	počáteční délka
ΔL_0	zvětšení počáteční délky
L	upínací délka mezi čelistmi
L_t	zvětšení upínací délky mezi čelistmi
σ_m	mez pevnosti
F_{\max}	maximální síla
σ_y	napětí na mezi kluzu
σ_b	napětí při přetržení

E	modul pružnosti
HRC	tvrdost dle Rockwella
Shore A	tvrdost dle metody Shore A
Shore D	tvrdost dle metody Shore D
FDM	Fused Deposition Modelling
FFF	Fused Filament Fabrication
PLA	kyselina polyléčná
PET-G	polyetylen tereftalát glykol
ASA	akrylonitril styren akrylát
ABS	akrylonitril butadien styren
CPE	kopolyester
PP	polypropylen
PC	polykarbonát
PA	polyamid
TPE	termoplastický elastomer
TPU	termoplastická polyuretan
PEBA	polyeter blok amid
HIPS	houževnatý polystyren
PVA	polyvinyl alkohol
PDMS	polydimetylsiloxan

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – EXPERTNÍ SYSTÉM

Vzorek	Napětí	Modul	Síla při prodloužení 0,2%	Horní mez kluzu	Prodloužení při mezi kluzu	Práce	ak
PLA	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PLA-PEBA90A	54%	61%	42%	49%	84%	600%	589%
PLA-TPU98A	70%	59%	60%	63%	95%	921%	903%
PLA-TPU92A	64%	58%	50%	58%	84%	964%	946%
PP	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PP-TPE96A	71%	61%	49%	70%	192%	167%	170%
ASA	100%	100%	100%	x	x	100%	100%
ASA-PEBA90A	67%	67%	66%	x	x	359%	362%
ASA-TPU98A	70%	70%	78%	x	x	593%	597%
ASA-TPU92A	62%	62%	52%	x	x	411%	412%
PETG	100%	100%	100%	x	x	100%	100%
PETG- PEBA90A	65%	65%	52%	x	x	359%	783%
PETG- TPU92A	64%	64%	39%	x	x	593%	707%
PETG- TPU98A	72%	72%	45%	x	x	411%	674%
CPE	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CPE-TPE96A	65%	65%	59%	64%	80%	412%	410%
CPE-TPU98A	70%	70%	66%	69%	69%	676%	678%
CPE-TPU92A	65%	65%	35%	64%	114%	659%	657%
CPE-PEBA90A	67%	67%	65%	66%	97%	512%	511%
PA	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PA-PEBA90A	65%	65%	29%	65%	179%	335%	340%
PA-TPU98A	69%	69%	38%	70%	176%	320%	324%
PA-TPU92A	62%	62%	32%	62%	155%	865%	875%
PC	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
PC-PEBA90A	62%	62%	49%	62%	108%	393%	396%
PC-TPU92A	59%	59%	55%	60%	87%	507%	509%
PC-TPU98A	65%	65%	63%	65%	79%	710%	712%

Vzorek	Tah kolmo na vrstvy – napětí	Tah kolmo na vrstvy – modul	Tah kolmo na vrstvy – síla při prodloužení 0,2%
PLA	100%	100%	100%
PLA-PEBA90A	2%	2%	2%
PP	100%	100%	100%
PP-TPE96A	51%	19%	39%
PC	100%	100%	x
PC-TPU98A	27%	12%	x
Vzorek	Ohyb – modul	Ohyb – horní mez kluzu	Ohyb – deformace v horní mezi kluzu
PLA	100 %	100 %	100%
PLA-PEBA90A	61%	x	x
PP	100%	100%	100%
PP-TPE96A	79%	76%	86%
PC	100%	100%	100%
PC-TPU98A	73%	71%	82%
Vzorek	Ohyb – maximální napětí	Ohyb – deformace při maximálním napětí	Ohyb – deformace při prasknutí
PLA	100%	100%	100%
PLA-PEBA90A	55%	77%	66%
PP	100%	100%	100%
PP-TPE96A	76%	87%	101%
PC	100%	100%	100%
PC-TPU98A	71%	83%	78%

LEGENDA

>100%
100%
90-99%
80-90%
70-80%
60-70%
50-60%
40-50%
30-40%
20-30%
10-20%
0-10%

PŘÍLOHA 2 – NAMĚŘENÁ DATA

Vzorek	Napětí (MPa)	Modul (MPa)	Síla při prodloužení 0,2% (N)	Horní mez kluzu (N)	Prodloužení při mezi kluzu (%)
PLA	47,7	3019,2	1520	1680	1,9
PLA-PEBA90A	25,8	1850,5	644	819	1,6
PLA-TPU98A	33,5	1785,8	914	1060	1,8
PLA-TPU92A	30,6	1753	754	969	1,6
PP	18,7	1327,5	350	592	5,1
PP-TPE96A	13,2	810,9	172	417	9,8
ASA	37,2	2029,6	695	-	-
ASA-PEBA90A	25	1383	460	791	2,6
ASA-TPU98A	26,2	1406,9	544	829	2,7
ASA-TPU92A	23,2	1366,5	364	735	2,6
PETG	41,1	1875,2	989	-	-
PETG-PEBA90A	26,6	1183,5	518	842	2,4
PETG-TPU92A	26,5	1146	381	838	3,2
PETG-TPU98A	29,4	1226	446	930	3
CPE	40,9	1683,2	706	1320	3,5
CPE-TPE96A	26,5	1103,6	420	841	2,8
CPE-TPU98A	28,8	1125,4	463	914	2,4
CPE-TPU92A	26,7	1072,5	250	846	4
CPE-PEBA90A	27,6	1036,7	458	874	3,4
PA	39,2	1365,4	1050	1240	7,1
PA-PEBA90A	25,5	788,9	301	808	12,7
PA-TPU98A	27,2	876	396	862	12,5
PA-TPU92A	24,4	795,4	336	774	11
PC	59,7	2230,5	1350	1880	3,8
PC-PEBA90A	37,1	1448,2	656	1170	4,1
PC-TPU92A	35,4	1493,1	736	1120	3,3
PC-TPU98A	38,6	1488,4	851	1220	3

Vzorek	Práce (J)	Práce (%)	ak (kJ/m ²)
PLA	0,14	1,9	4,45
PLA-PEBA90A	0,84	11,2	26,23
PLA-TPU98A	1,29	17,1	40,18
PLA-TPU92A	1,35	18	42,1
PP	0,36	4,7	11,1
PP-TPE96A	0,6	8,1	18,9
ASA	0,27	3,6	8,39
ASA-PEBA90A	0,97	12,9	30,33
ASA-TPU98A	1,6	21,4	50,05
ASA-TPU92A	1,11	14,7	34,56
PETG	0,13	1,8	4,12
PETG-PEBA90A	1,03	13,8	32,27
PETG-TPU92A	0,93	12,4	29,13
PETG-TPU98A	0,89	11,9	27,78
CPE	0,17	2,3	5,32
CPE-TPE96A	0,7	9,3	21,82
CPE-TPU98A	1,15	15,4	36,08
CPE-TPU92A	1,12	14,9	34,95
CPE-PEBA90A	0,87	11,6	27,16
PA	0,2	2,6	6,16
PA-PEBA90A	0,67	8,9	20,93
PA-TPU98A	0,64	8,5	19,93
PA-TPU92A	1,73	23	53,93
PC	0,29	3,9	9,03
PC-PEBA90A	1,14	15,2	35,73
PC-TPU92A	1,47	19,6	45,96
PC-TPU98A	2,06	27,4	64,3

Vzorek	Tah kolmo na vrstvy – napětí (MPa)	Tah kolmo na vrstvy – modul (MPa)	Tah kolmo na vrstvy – síla při prodloužení 0,2% (N)
PLA	39,5	2715,6	953
PLA-PEBA90A	0,7	55	20,4
PP	7,3	970,4	195
PP-TPE96A	3,7	179,8	75,8
PC	24,1	1533,5	0
PC-TPU98A	6,6	184,2	83,6

Vzorek	Ohyb – modul (GPa)	Ohyb – horní mez kluzu (N)	Ohyb – deformace v horní mezi kluzu (mm)	Ohyb – maximální napětí (MPa)	Ohyb – deformace při maximálním napětí (%)	Ohyb – deformace při prasknutí (%)
PLA	2,71	132	7,4	79,9	4,4	5,3
PLA-PEBA90A	1,64	-	-	43,9	3,4	3,5
PP	0,855	38,5	11,5	23,1	6,7	17,7
PP-TPE96A	0,672	29,1	9,9	17,5	5,8	17,9
PC	2,16	144	10,7	86,7	6,3	17,6
PC-TPU98A	1,57	102	8,8	61,2	5,2	13,8

PŘÍLOHA 3 – OPTIMALIZOVANÉ PROCESNÍ PODMÍNKY

Materiál	Teplota na trysce od výrobce [°C]	Teplota na trysce optimalizovaná [°C]	Teplota na podložce od výrobce [°C]	Teplota na podložce optimalizovaná [°C]	Rychlost tisku od výrobce [mm/s]	Rychlost tisku optimalizovaná [mm/s]
PLA	205-225	215	40-60	50	až 200	100
PETG	240-260	250	70-90	85	až 200	100
CPE	255-275	275	70-85	90	40-60	50
ASA	250-270	260	105-115	100	až 200	100
PC	265-285	285	100-120	100	až 200	100
PA	235-260	260	80-105	100	30-50	30
PP	225-245	230	90-105	100	20-40	30
TPU92A	220-240	250	50-60	60	15-30	20
TPU98A	220-240	250	50-60	60	15-30	20
TPE90A	225-245	250	50-60	80	15-25	20
TPE96A	225-245	250	50-60	80	15-25	20
PEBA90A	225-245	250	70-90	90	20-40	20

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

Kvalifikační práce:

1. CHALUPA Vlastimil. Parciální kalení nerezových ocelí. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 70 s, Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/40785>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Maňas, David.
2. CHALUPA Vlastimil. Konstrukční úprava 3D tiskárny. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 87 s, Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45233>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta Technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Staněk, Michal.

Práce uvedené v databázi Web of Science:

1. OVSIK, Martin, Michal STANEK, Adam DOCKAL, Petr FLUXA a Vlastimil CHALUPA. The Influence of Surface Quality on Flow Length and Micro-Mechanical Properties of Polycarbonate. *Materials* [online]. 2021, 14(20) [cit. 2023-03-16]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14205910
2. CHALUPA, Vlastimil, Michal STANEK, Jiří VANEK, Jan STRNAD a Martin OVSIK. Design of Dual-Head 3D Printer. *Manufacturing Technology* [online]. 2023, 23(2), 177-185 [cit. 2023-05-21]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/mft.2023.032
3. JIRI VANEK, MICHAL STANEK, MARTIN OVSIK a Vlastimil CHALUPA. INJECTION MOLDING OF POLYCARBONATE THICK-WALLED PARTS USING A TOOL WITH VARIOUSLY DESIGNED GATE INSERTS. *Materiali in Tehnologije* [online]. 2023, 57(3) [cit. 2023-07-03]. ISSN 1580-3414. Dostupné z: doi:10.17222/mit.2022.692

Užitné vzory:

1. Užitný vzor číslo 36862 – Podešev s tlumící 3D heterogenní zonální strukturou

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno a příjmení, titul: Ing. Vlastimil Chalupa, Ph.D.

Datum a místo narození: 10.3.1993, Zlín

Adresa: Pod rozhlednou 1869, Zlín 760 01

Telefon: +420 737 017 797

E-mail: v_chalupa@utb.cz

Státní příslušnost: česká

Vzdělání:

- 2019 – dosud** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Obor: Nástroje a procesy
- 2017 – 2019** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce technologických zařízení
- 2014 – 2017** Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Studijní program: Procesní inženýrství
Studijní obor: Technologická zařízení
- 2012 – 2013** Denní pomaturitní studium
E-Lingua Zlín
- 2008 – 2012** SPŠ Zlín
Studijní obor: Strojírenství

Pracovní zkušenosti:

- 09/2012 – 03/2013** **Zelinger plast s.r.o.**
Pozice: obsluha vstřikovacích strojů
- 2013 – 2014** **Flowtech s.r.o.**
Pozice: montér
- 1.1.2019 – 31.8.2019** **Flowtech s.r.o.**

- Pozice: konstruktér
- 1.1.2020 – dosud** **Provozování živnosti**
Výroba plastových výrobků – zakázkový 3D tisk
- 3.4.2023 – dosud** **Promens Zlín a.s.**
Pozice: konstruktér
- 09/2019 – 12/2019** **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen týmu
Projekt: IGA/FT/2019/002
- 10/2020 – 12/2020** **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: tvůrce/realizátor přednášek
Projekt: IKAROS
- 01/2020 – 12/2020** **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen týmu
Projekt: IGA/FT/2020/03
- 01/2021 – 12/2021** **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen týmu
Projekt: IGA/FT/2021/005
- 01/2022 – dosud** **UTB ve Zlíně, FT - Ústav výrobního inženýrství**
Pozice: člen týmu
Projekt: IGA/FT/2022/002
- 1.02.2021 – 31.01.2023** **UTB ve Zlíně, Fakulta Technologická**
Pozice: Výzkumný projektový pracovník
Projekt: JUNG-2020-019
- 01.03.2022 – 01.04.2022** **Mezinárodní mobilita – program CEEPUS**
Pozice: doktorand
Projekt: Studijní stáž

Pedagogická činnost:

A1ING – Inženýrská grafika

AP1IG – Inženýrská grafika

T1TK1 – Technické kreslení I

T2TK2 – Technické kreslení II

T1CD – Úvod do CAD

TP8PG – Zpracovatelské procesy gumárenské

Ing. Vlastimil Chalupa, Ph.D.

**3D tisk sendvičových struktur metodou FFF s ohledem na
kombinaci vhodných materiálů**

3D Printing of Sandwich Structures Using the FFF Method with Regards to the
Combination of Suitable Materials

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Vlastimil Chalupa, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2023

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7678-192-4

