



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

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**

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 **Disertační práce**
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

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

Motto:

„Ať už si myslíš, že to dokážeš, nebo že ne, máš pravdu.“

Henry Ford

Poděkování:

Tímto bych poděkovat svému školiteli prof. Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za jeho vřelý přístup, rady a pomoc jak během celého doktorského studia, tak i při zpracovávání této práce, a dále také doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za jeho velkou vstřícnost, kdykoliv jsem potřeboval s čímkoliv pomoci či poradit.

Dále velké díky patří také prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za jeho pomoc při statistickém zpracování dat v této práci.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat celému kolektivu mých kolegů doktorandů, na které jsem se po celou dobu svého studia mohl vždy obrátit.

Velký dík patří také celé mé rodině a blízkým, kteří mi byli po dobu mého studia vždy velkou oporou.

Tato disertační práce byla spolufinancována z projektu Interní Grantové Agentury Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně IGA/FT/2022/002 a IGA/FT/2023/005.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	8
3. CÍLE PRÁCE	12
4. TEORETICKÝ RÁMEC.....	13
4.1 Běžné metody 3D tisku	13
4.1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication)	13
4.1.2 SLA (Stereolitography)	14
4.1.3 SLS (Selective Laser Sintering)	15
4.1.1 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)	16
4.1.2 Polyjet.....	17
4.1.3 EBM (Electron Beam Melting)	18
4.2 Rozdělení materiálů pro tisk metodou FDM	19
4.2.1 Rigidní materiály	20
4.2.2 Flexibilní materiály.....	23
4.3 Možnosti multimateriálového 3D tisku	25
4.3.1 Tisk jednou tryskou se změnou filamentu.....	26
4.3.2 Tisk jednou tiskovou hlavou s více tryskami	26
4.3.3 Vyměnitelná tisková hlava	27
4.4 Mechanické zkoušky polymerů	28
4.4.1 Statické namáhání.....	28
4.4.2 Dynamické rázové namáhání.....	35
4.5 Pevnost spojení v kontaktní vrstvě	38
4.5.1 Mezimolekulární síly	38
4.5.2 Rozdělení polymerů podle polaritý	40
5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	42
5.1 Výběr materiálů.....	42
5.2 Návrh a výroba vzorků.....	43
5.3 Metodika vyhodnocení dat.....	44
5.4 Tahová zkouška.....	45

5.4.1	Příprava zkoušky	45
5.4.2	Výsledky tahové zkoušky	48
5.5	Rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy	67
5.5.1	Příprava zkoušky	67
5.5.1	Výsledky rázové zkoušky vrubové houževnatosti Charpy	71
5.6	Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče	78
5.6.1	Příprava zkoušky	79
5.6.2	Výsledky tahové zkoušky kolmo na vrstvy sendviče	81
5.7	Zkouška trojbodým ohybem	91
5.7.1	Příprava zkoušky	91
5.7.2	Výsledky zkoušky trojbodým ohybem	93
6.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	97
7.	PŘÍNOS PRÁCE PRO VĚDU A PRAXI	100
8.	ZÁVĚR	102
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	105
	SEZNAM OBRÁZKŮ	114
	SEZNAM TABULEK	117
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	118
	PŘÍLOHY	122
	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	128
	ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	130

ABSTRAKT

Hlavními trendy ve 3D tisku jsou v dnešní době především zpřesňování, zrychlování a zlevňování výroby, a to v kombinaci se stále se zvětšujícím množstvím tisknutelných materiálů. Možnost multimateriálového 3D tisku tu je sice od jeho počátků, kdy se používal pro tisk podpor pod samotným výtiskem, ale využití dvou a více materiálů v jednom funkčním dílci není dodnes zcela běžné. 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 zkoumán vliv procesních parametrů na kvalitu spojení obou materiálů v kontaktní vrstvě. Takto vyrobené vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám a následně veškerá data vyhodnocena.

ABSTRACT

The main trends in 3D printing today are precision, acceleration and cheaper production, combined with an ever-increasing number of printable materials. The possibility of multi-material 3D printing has been there since its beginnings, when it was used to print supports under the print itself, but the use of two or more materials in one functional part is still not common today. For such products, it is usually necessary to use specialized expensive equipment. For this reason, various 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 both materials in the contact layer was investigated. The samples produced in this way are subjected to mechanical tests and subsequently all data is evaluated.

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 jádery 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, 30, 31, 54]

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. [2, 32, 33, 34]

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 platforem pro pěstování buněk či při vývoji a výrobě léčiv. [3, 35, 36, 56]

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. [4, 37, 38, 39, 40]

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. [5, 41, 42, 43, 57, 58, 59, 60]

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. [6, 44, 45, 46]

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. [7, 47, 48, 49, 50]

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. [8, 51, 52, 53]

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. TEORETICKÝ RÁMEC

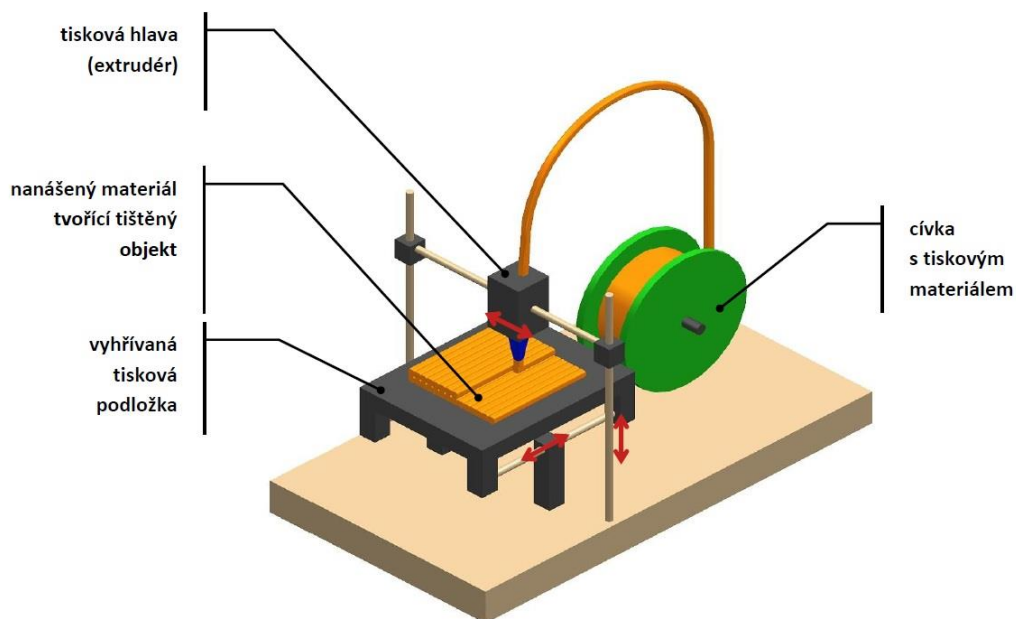
4.1 Běžné metody 3D tisku

4.1.1 FDM (Fused Deposition Modeling) / FFF (Fused Filament Fabrication)

Metoda Fused Deposition Modeling byla vyvinuta v roce 1988 Scottem Crumpem, budoucím zakladatelem firmy Stratasys. Jedná se o technologii, která je založena na principu tavení materiálu a jeho následném nanášení na pracovní plochu v jednotlivých vrstvách. Materiálem je tisková struna – filament, který může být vyroben z různých druhů polymerů. Tisková struna je navinuta na cívce, ze které je odvíjena za pomoci podávacího ústrojí a podávána do tiskové hlavy, kde se nahřeje na požadovanou teplotu a jako tavenina je vytlačována tryskou ven z tiskové hlavy.

Samotná příprava tisku začíná tvorbou 3D modelu, který je následně nahrán do specializovaného softwaru, který výrobek rozřeže na jednotlivé vrstvy a automaticky vygeneruje dráhy tiskové hlavy pro každou jednotlivou vrstvu. Tyto informace se následně exportují ve formě G-kódu, který je nahrán do samotné 3D tiskárny.

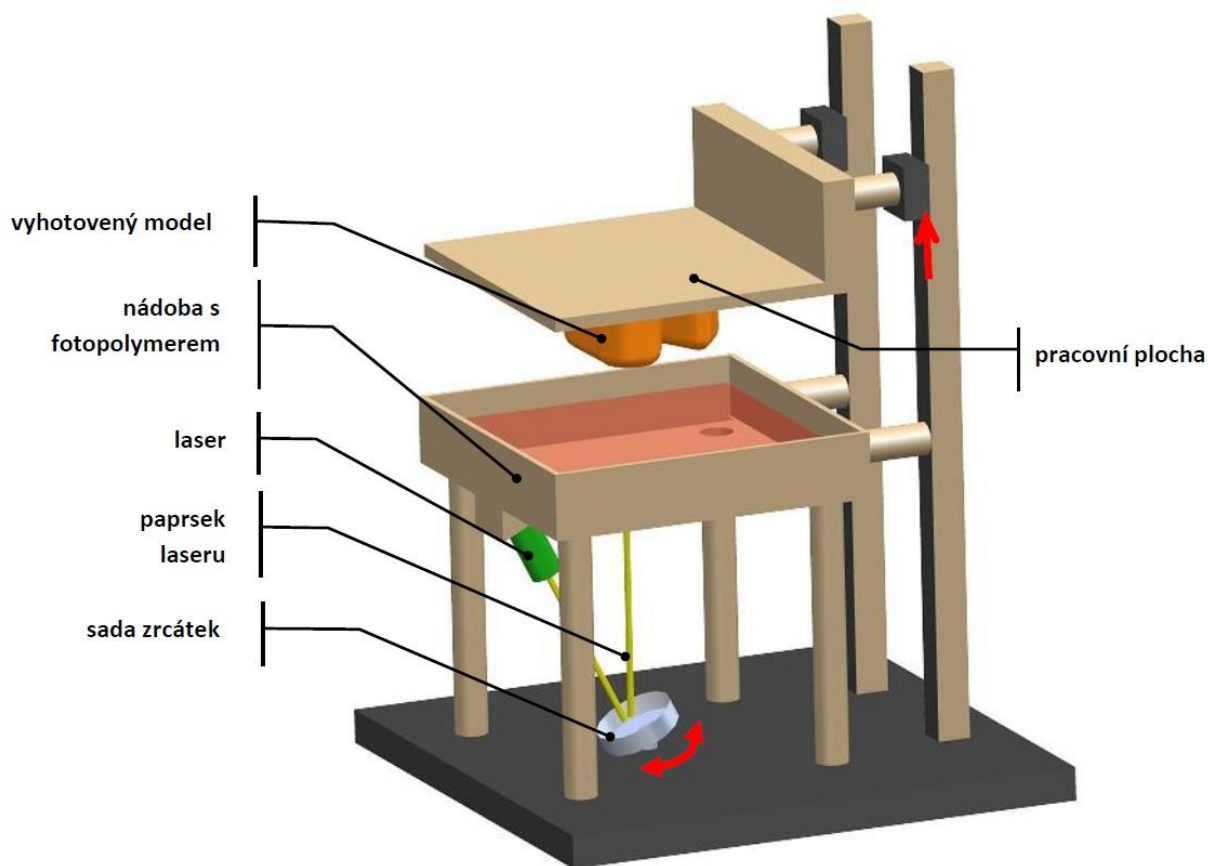
Technologie FDM byla chráněná patentem až do roku 2009. Z toho důvodu se jednalo o velmi drahou technologii, která by velmi špatně dostupná. V roce 2004 Dr. Adrian Bowyer založil celosvětovou open-source iniciativu RepRap, která začala vyvíjet levnou sebe replikující se 3D tiskárnu. Informace získávané během vývoje byly sdíleny mezi všechny výzkumníky podílející se na projektu, což vedlo k velmi rychlému vývoji. Zařízení, která vzešla ze základů tohoto projektu jsou nyní cenově dostupné tiskárny, které vynikají vysokou přesností a kvalitou tisku a nazývají se jako technologie FFF (Fused Filament Fabrication). Jedná se dnes o nejznámější a nejrozšířenější metodu 3D tisku. [9, 10, 55]



Obr. 1: Princip metody FDM [10]

4.1.2 SLA (Stereolitography)

Metoda SLA je založena na lokálním vytvrzování tekuté pryskyřice pomocí zdroje UV záření. Zařízení obsahuje kád' naplněnou fotosensitivní polymerní pryskyřicí, ve které je ponořena pracovní plocha, ale jen tak aby na ni byla vždy tenká souvislá vrstva pryskyřice. Následně dojde k vytvrzení požadovaných kontur díky hlavě se zdrojem UV záření pohybující ve dvou osách. Po ozáření je tisková plocha ponořena o vrstvu hlouběji do tekuté pryskyřice, a celý proces se opakuje. Po dokončení celého procesu je na pracovním stole vytvrzený hotový výrobek. Ten je následně vyjmut, a očištěn. Zbylá nevytvrzená pryskyřice je připravena k opakovanému použití. Výhodou této technologie je velká přesnost a možnost dosáhnutí vysokých detailů. Hojně je využívána dentisty či modeláři. [9,10, 55]



Obr. 2: Princip metody SLA [10]

4.1.3 SLS (Selective Laser Sintering)

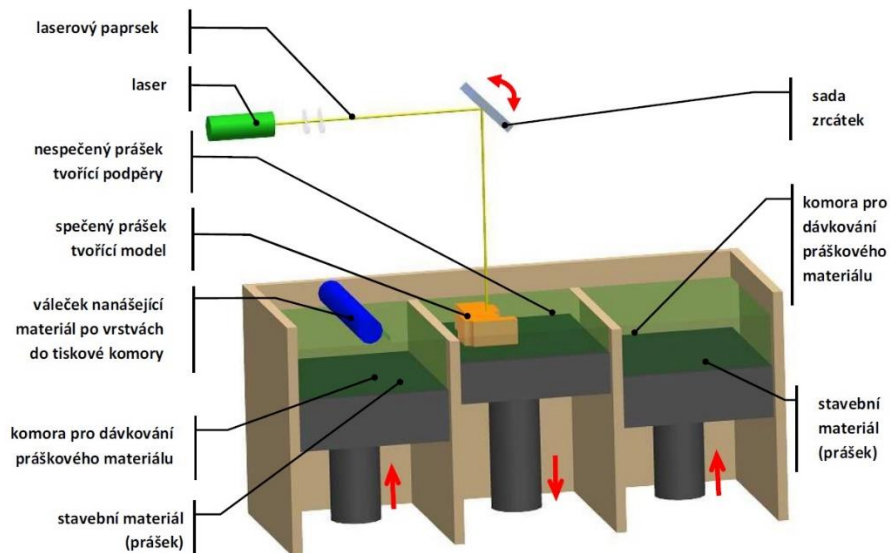
Selektivní laserové sintrování je velmi podobné jako metoda SLA, akorát nevyužívá kapalnou pryskyřici, ale jemně mletý polymerní prášek. Zařízení obsahuje zásobník prášku, nanášecí a urovnávací válec, pracovní plochu a hlavu se zdrojem laserového paprsku. Na pracovní plochu je nanášena tenká vrstva prášku, který přesně zarovnan. Následně jsou kontury budoucího výrobku ozářeny laserem a tím se daná vrstva speče dohromady. Pracovní stůl klesne o vrstvu níže, je nanášena a zarovnána další várka prášku ze zásobníku. Celý proces se opakuje, jsou slinovány jednotlivé vrstvy až je nakonec výrobek vytisknut. Hotový produkt je obklopen nevytvrzeným práškem, takže je nutné nevyužitý materiál odsát, a tak výrobek očistit. Produkt vzniklý metodou SLS vyniká

stejnými mechanickými vlastnostmi při namáhání ve všech třech směrech. [9,10, 55]

4.1.1 DMLS (Direct Metal Laser Sintering)

Přímé laserové sintrování kovů, známé pod zkratkou DMLS je aditivní technologie principiálně velmi podobá SLS. Rozdílem je použití kovového prášku, který je natavován výkonným laserem a po vrstvách sintrován do finálního produktu. Zařízení je vybaveno počítačem řízenou laserovou hlavou pro sintrování, pracovní plochou a zásobníkem kovového prášku. Stejně jako u SLS začíná proces nanesením přesné vrstvy kovového prášku na pracovní platformu, a jeho následným natavením za pomoci laseru. Na základě dat z G-kódu jsou v každé vrstvě sintrovány pouze dané kontury odpovídající řezu v dané vrstvě. Po dokončení sintrování je automaticky platforma posunuta dolů o vzdálenost odpovídající tloušťce vrstvy. Následuje nanesení nové vrstvy kovového prášku a celý proces se opakuje.

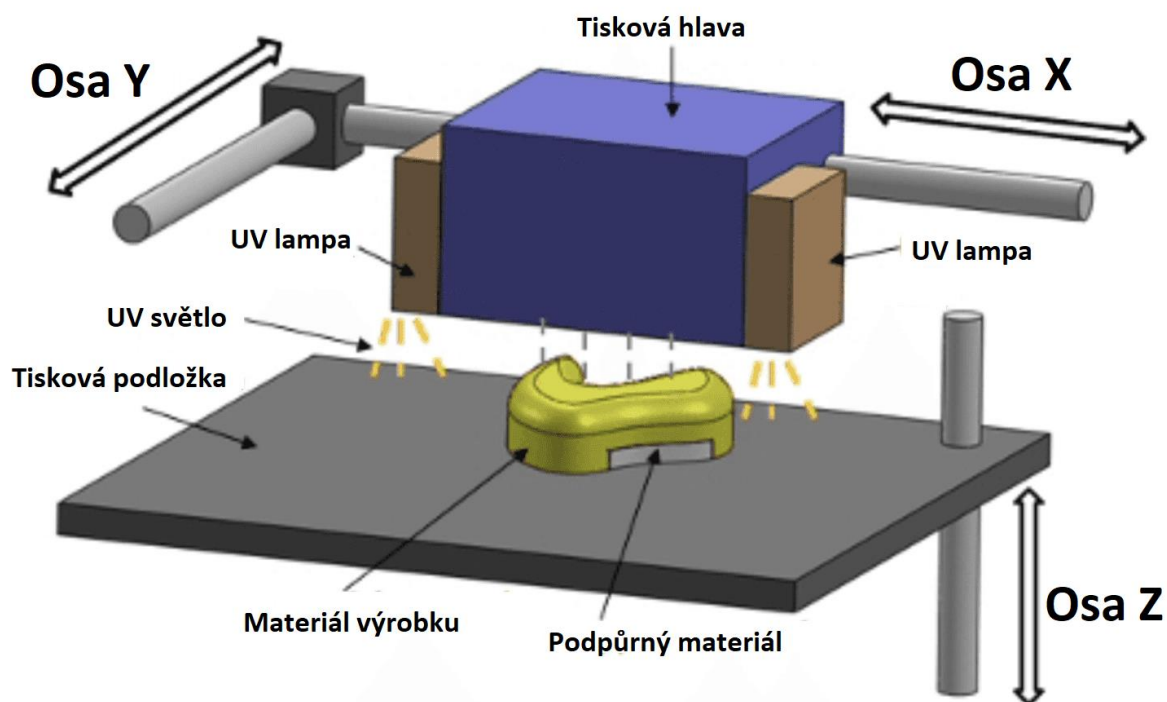
Výhodou této technologie je možnost vyrábět velmi komplikované geometrie z kovů. V dnešní době se hojně využívá například pro výrobu konformního chlazení do vstřikovacích forem. Nejčastěji používaným materiálem v této technologii je martenzitická nástrojová ocel 1.2709. Po vytisknutí dosahuje tvrdosti 36-39 HRC a lze jí dále zušlechtit až na tvrdost 52-54 HRC. [9, 10, 55]



Obr. 3: Princip metod SLS a DMLS [10]

4.1.2 Polyjet

Firma Stratasys (původně Objet) přišla s revoluční metodou 3D tisku kterou si patentovala pod názvem Polyjet. Celé zařízení funguje velmi podobně jako u technologie SLA, akorát je místo polymerní struny použitým materiálem fotosenzitivní polymerní pryskyřice, která je dodávána v certifikovaných cartridgech. Tisková hlava obsahuje miniaturní otvory, kterým jsou kapičky pryskyřice vstříkovány na pracovní plochu. Tisková jednotka má na svých stranách silné UV lampy, kterými jsou vstříknuté kapičky okamžitě vytvrzovány. Velkou výhodou této technologie je velmi rychlá výroba, a možnost kombinování různých tvrdostí a barev materiálu v jednom výrobku. [9,10,11]



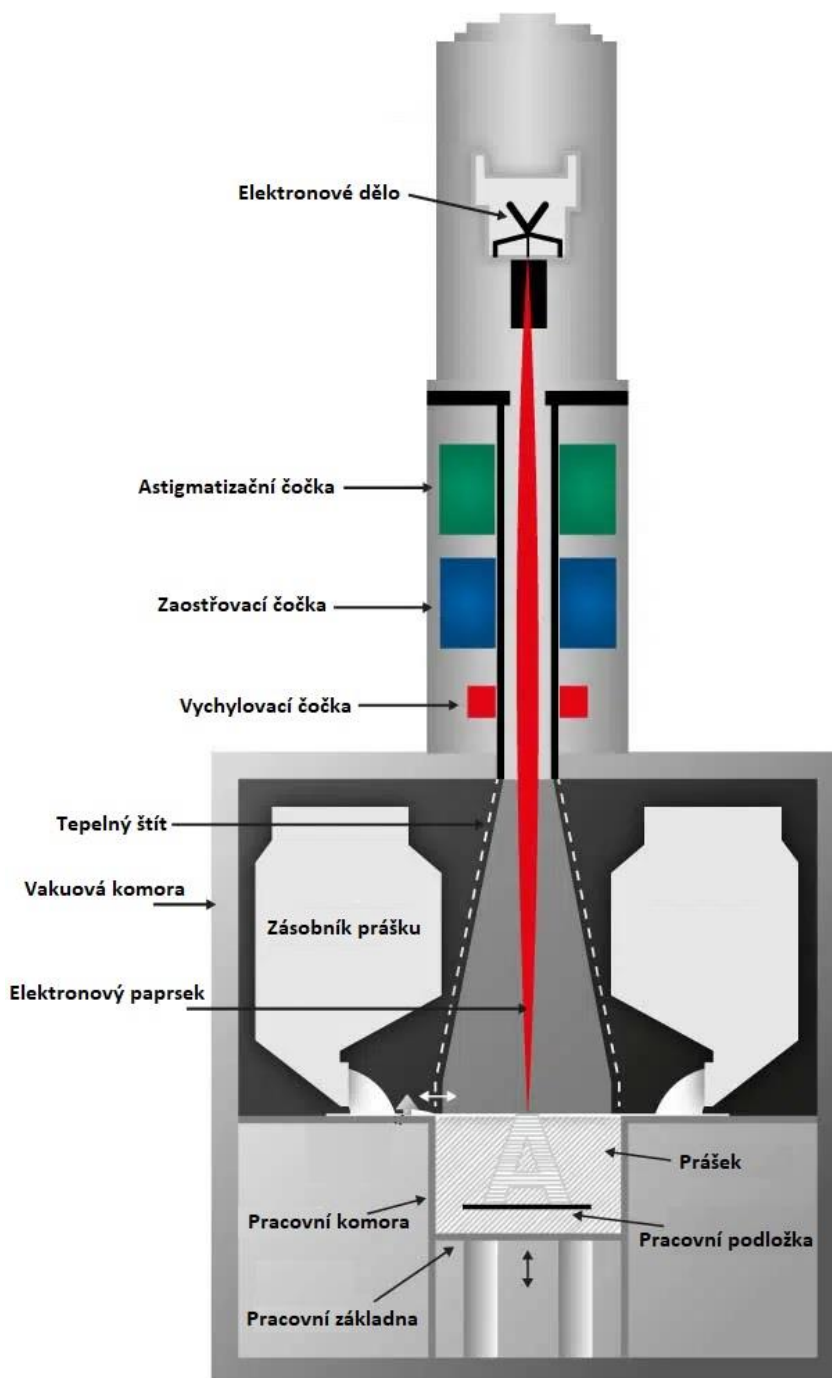
Obr. 4: Princip metody Polyjet [11]

4.1.3 EBM (Electron Beam Melting)

Další aditivní metodou, kterou lze vyrábět kovové výrobky je technologie EBM. Technologie funguje na podobném principu jako DMLS, to znamená že na pracovní plochu je nanášen velmi jemně mletý kovový prášek v tenké vrstvě. Rozdíl ale oproti DMLS je ve způsobu ozáření kontur výrobku. Není použito laseru ale generátoru elektronového paprsku. Díky tomu nedochází jen k lokálnímu natavení a zesintrování zrn k sobě, ale k úplnému roztavení materiálu. To je způsobeno hlavně velkým výkonem zdroje elektronového paprsku – 6kW, a také díky řízené vakuové technologii díky které je v celé pracovní komoře vytvořeno vakuum (1×10^{-5} mbar). Velkou výhodou oproti DMLS je také mnohem vyšší rychlost celého procesu, a to díky tomu že posuvová rychlost dosahuje 8000 m.s^{-1} .

Mezi nejpoužívanější materiály patří titanová slitina Ti6Al4V, která vyniká perfektní biokompatibilitou, nízkou hustotou, vysokou korozivzdorností, výbornou lomovou houževnatostí a dobrou pevností. Díky tomu se jedná mimo

jiné o výborný materiál pro výrobu protetik, k čemuž se také technologie EBM hojně využívá. [12]



Obr. 5: Princip metody EBM [12]

4.2 Rozdělení materiálů pro tisk metodou FDM

Materiál určený pro tisk metodou FDM/FFF se nazývá filament, je ve formě struny o průměru 1,75 mm, popřípadě 2,85 mm. Na filament jsou kladeny nároky

na zachování konstantního průměru po celé délce struny a na kvalitně návínou na cívce. Materiály lze rozdělit na rigidní a flexibilní.

4.2.1 Rigidní materiály

Tyto materiály jsou nejčastěji používané a existuje jich velmi široká škála. Jedná se o pevné materiály vynikající oproti flexibilním vyšší tvrdostí.



Obr. 6: Ukázka výrobku z rigidního materiálu [13]

PLA (Kyselina polyléčná)

V dnešní době je PLA nejrozšířenějším a nejlevnějším materiálem pro tisk metodou FFF, který z této pozice vytlačil ABS. Vyniká vysokou tvrdostí, velmi malým smrštěním a nízkou odolností vůči teplotě (50–60 °C). Díky vynikajícím tiskovým vlastnostem je možné jej tisknout při vysokých rychlostech (až 200 mm.s⁻¹), a tisknout tak i rozměrné výrobky. Nejčastěji se používá pro tisk nenamáhaných dílů, vizualizací, figurek, dekorativních prvků či prvních prototypů. Při tisku z materiálu PLA je dosahováno vysoké úrovně detailů.

Obvykle jsou doporučovány teploty trysky 190–210 °C, a teplota vyhřívané podložky je 50–60 °C. [14]

ABS (Akrylonitril Butadien Styren)

Jedná se o základní technický materiál používaný ve 3D tisku, dnes často nahrazovaný novými materiály s lepšími tiskovými vlastnostmi. Vyniká teplotní odolností až do 100 °C, vysokou houževnatostí, ale naopak vykazuje velké smrštění, díky čemuž není vhodný k tisku velkých objektů na tiskárnách, které nedisponují uzavřenou vyhřívanou tiskovou komorou. Hojně je využíván na tisk drobných součástí a náhradních dílů jako jsou různá ozubená kola, funkční prototypy a kryty na elektrická zařízení. Při tisku z ABS je vhodné použít na tiskovou podložku adhesivní přípravek. Teplota na trysce je doporučena v rozmezí 240–250 °C, a na vyhřívané podložce 80–105 °C. Velkou výhodou je možnost postprocessingu pomocí acetonu, kterým lze vyhlazovat povrch výrobku. ABS je citlivé na absorbování vzdušné vlhkosti. [14]

ASA (Akrylonitril Styren Akrylát)

Materiál ASA byl odvozen od ABS, a to s důrazem na zmenšení smrštivosti, díky čemuž lze tisknout o něco větší výrobky než z ABS, snížení tvořeného zápachu při tisku, a hlavně vysoké UV resistenci, díky čemuž se jedná dnes o nejvhodnější běžně dostupný materiál pro venkovní aplikace. Stejně jako ABS vyniká vysokou teplotní odolností dosahující až 100 °C a rozpustností v acetonu. Doporučená teplota trysky se uvádí 240–260 °C, teplota podložky 80–105 °C. [14]

PET-G (Polyethylen Tereftalát Glykol)

Dalším velmi rozšířeným materiálem je PET-G, který vyniká velmi snadným tiskem, podobně jako PLA, vyšší teplotní odolností (70–80 °C), a vyšší houževnatostí. Při dlouhodobém vystavení vzdušné vlhkosti ji absorbuje a následně při tisku vytváří tzv. „stringing“, což je tahaní natavené struny při pohybu tiskové hlavy za sebou po dokončení tiskového pohybu. Materiál PET-G lze využít od prototypování, přes výrobu dekorativních předmětů až po běžné

technické výrobky, kde dostačuje teplotní odolnost 70 °C. Doporučená teplota trysky při tisku je 230–245 °C, a teplota vyhřívané podložky 70–90 °C. [14]

CPE (Co-Polyester)

Materiál CPE je odvozen od PET-G, nicméně má ve všech ohledech lepší vlastnosti než PET-G. Vyniká teplotní odolností do 80 °C, výbornou rázovou houževnatostí, adhezí mezi jednotlivými vrstvami a chemickou odolností. Díky svým vlastnostem nahrazuje PET-G tam, kde již nestačí a je určen primárně pro technické použití. Doporučená teplota trysky je mezi 255–275 °C a teplota vyhřívané podložky 70–85 °C. [14]

PP (Polypropylen)

Polypropylen je určený pro technické použití, a to především díky svým vlastnostem jako je výborná schopnost elektrické izolace, vysoká teplotní odolnost až do 100 °C, dobrá rázová houževnatost, odolnost vůči venkovním podmínkám. PP se doporučuje tisknout při teplotě 225–245 °C na polypropylenovou lepicí pásku nalepenou na vyhřívanou podložku o teplotě 90–105 °C. Nejvhodnější aplikace jsou izolace elektrických součástí a komponenty vodovodních potrubí. [14]

PC (Polykarbonát)

Polykarbonát patří mezi nejpokročilejší materiály vhodné pro 3D tisk. Je velmi pevný, odolný, vyniká vysokou teplotní odolností, tvrdostí a tuhostí. Díky těmto vlastnostem je předurčen pro technické použití, převážně pro tisk nejnamáhanějších dílů. PC je náročný na tisk, převážně při tisku středních a větších objektů. Doporučená teplota trysky je v rozmezí 265–285 °C a vyhřívané podložky 100–120 °C. Vyniká vysokou možnou rychlostí tisku a to až 200 mm.s⁻¹. [14]

PA (Polyamid)

Dalším z pokročilých materiálů pro 3D tisk je polyamid. Opět se jedná o materiál využívaný výhradně pro technické účely. Vyniká rázovou houževnatostí,

chemickou odolností, dobrými mechanickými vlastnostmi a dobrou teplotní stabilitou při vysokých i nízkých teplotách. Jeho hlavní nevýhodou je velké smrštění, nasákavost vzdušnou vlhkostí a špatná přilnavost první vrstvy. Doporučená teplota trysky je v rozmezí 235–265 °C a teplota vyhřívané podložky 80–105 °C. Polyamid obvykle vyžaduje speciální adhezivum aplikované na vyhřívanou podložku před tiskem. [14]

Plněné filamenty

Všechny výše uvedené materiály mohou být vyráběny s různými plnivý, zlepšujícími mechanické či fyzikální vlastnosti. Mezi technická plniva se řadí uhlíková a aramidová vlákna. Dalšími používanými plnivý jsou dřevěné nebo kovové piliny. Plnění daného materiálu bývá mezi 10–80 %. Velkou nevýhodou je ucpávání trysky, proto se doporučuje tisknout tryskou o průměru alespoň 0,6 mm. Dochází také k velkému opotřebení trysky, proto je vhodné kalenou ocelovou nebo rubínovou tryskou. [14]

4.2.2 Flexibilní materiály

Jedná se zvláštní skupinu filamentů vyznačující se nízkou tvrdostí a velkou pružností. Obvykle se využívají pro specifické aplikace jako jsou různá těsnění nebo tlumící prvky. Vyrábějí se v tvrdostech 80–100 Shore A. [14]



Obr. 7: Ukázka výrobku z flexibilního materiálu [15]

TPU (Termoplastický polyuretan)

Velmi dobře tisknutelný flexibilní materiál s velmi nízkým smrštěním, dobrou přilnavostí k podložce a výbornou adhezí mezi jednotlivými vrstvami. Jeho výhodou je odolnost vůči ozonu, olejům a mazivům. Dobře odolává otěru a vyniká vysokou vratnou deformací. Obvykle se tiskne při teplotě 220–240 °C na podložku předehřátou na 50–60 °C. [16]

TPE (Termoplastický elastomer)

TPE je flexibilní materiál který je vhodný pro styk s potravinami a dlouhodobý kontakt s kůží. Má velmi dobré těsnící vlastnosti i při zvýšených teplotách. Oproti TPU má větší smrštivost a horší přilnavost k podložce – je nutné použít adhezivní přípravek. Mezi jeho další výhody patří odolnost vůči otěru, rozměrová stabilita a odolnost vůči chemikáliím. Doporučená teplota pro tisk je 225–245 °C a teplota vyhřívání podložky v rozmezí 50–60 °C. [16]

PEBA (Polyether Block Amid)

PEBA vykazuje vynikající mechanické vlastnosti i při nízkých teplotách, odolává cyklickému namáhání, má vysokou vratnou deformaci a nízkou hysterezi. Velmi dobře se tiskne díky nízkému smrštění a dobré přilnavosti na podložku.

Doporučená teplota trysky při tisku je 225–245 °C a teplota vyhřívané podložky 70–90 °C. [15]

4.3 Možnosti multimateriálového 3D tisku

Myšlenka použití dvou materiálů na tisk jednoho výrobku zde byla od počátku 3D tisku. Nejrozšířenější důvod použití dvou materiálů je při stavbě tkzv. vypratelných podpěr. V takovém případě je výrobek tisknut celý z jednoho materiálu, který byl předem vybrán, zatímco podpory, které podepírají velké převisy a přemostění na tisknuté součástce jsou tisknuty z jiného materiálu, který je snadno rozpustný ve vodě či jiné látce. Díky tomu lze podpěry po dokončení výrobku velmi snadno odstranit.

Další důvod použití více materiálů na jednom výrobku může být potřeba barevného výtisku. Ať už se jedná o designový výrobek, přívěšek na klíče, či figurku, vždy je jednodušší takový výrobek vytisknout již barevný než ho později dokončovat malováním. V takovém případě se ale většinou nejedná o použití více druhů materiálu na jednom výrobku, ale použití více barevných filamentů jednoho druhu materiálu.

Sendvičové struktury se vyskytují všude kolem nás, a to proto že kombinují vlastnosti dvou či více materiálů v jednom výrobku. Díky tomu má daný výrobek obvykle lepší mechanické vlastnosti, než kdyby byl vyroben z jednoho materiálu. U 3D tisku bývá hlavní problém při použití dvou různých materiálů do jednoho výrobku jejich vzájemné propojení v oblasti styku obou materiálů. Dalším častým problémem bývají odlišná tisková nastavení, ať už se jedná o teploty či rychlost tisku. Typický příklad 3D tištěného výrobku ze dvou materiálů může být tvarový tlumící prvek, jehož základna je kvůli uchycení tisknuta z rigidního materiálu, a samotný tlumící prvek s tvarovou stykovou plochou je natisknut přímo na pevnou základnu ale z flexibilního materiálu.

4.3.1 Tisk jednou tryskou se změnou filamentu

Nejjednodušší variantou více materiálového 3D tisku je manuální výměna materiálu ve chvíli, kdy je potřeba začít tisknout již jiným materiálem. V přípravě G-kódu lze přesně označit výšku vrstvy, kdy ke změně má dojít. Jakmile tiskárna vytiskne výrobek do dané výšky, sama se zastaví a čeká na výměnu filamentu, a následně pokračuje v tisku. Jedná se o velmi primitivní metodu, která lze použít bez jakéhokoliv přídavného vybavení použít i na nejlevnějších tiskárnách. Nevýhodou je, že změna materiálů neprochází více vrstvami, ale je v danou vrstvu přesně oddělen nový materiál od předchozího. Nejvhodnější použití této metody je kusovou výrobu barevných propagačních předmětů, či jednoduchých technických dílů kde ke změně materiálu dochází v jedné vrstvě a prochází celým výrobkem.

4.3.2 Tisk jednou tiskovou hlavou s více tryskami

Pokud je potřeba střídat barvy nebo materiál často během tisku jedné součásti, existují speciální tiskové hlavy obsahující 2 až 4 samostatné trysky, s různým uspořádáním. Každá tryska má samostatný termostat, takže lze jednotlivé trysky vyhřát na vlastní teploty. To umožňuje mít v každé trysce zaveden jiný typ materiálu a samotné přepínání mezi jednotlivými materiály se nastavuje již při tvorbě G-kódu. Změny materiálu mohou na výrobku tak probíhat i skrze více vrstev. Problémem tohoto uspořádání bývá kalibrace výšky jednotlivých trysek od tiskové podložky a také odkapávání roztaveného materiálu do prostoru výrobku z trysek které zrovna nejsou používány.



Obr. 8: Tisková hlava se dvěma samostatnými tryskami [17]

4.3.3 Vyměnitelná tisková hlava

Nejsofistikovanější způsob tisku výrobků z více materiálů, je tiskárna s výměníkem nástrojů. Díky tomuhle zařízení tiskárna během tisku sama vymění celou tiskovou hlavu se zavedeným materiálem za druhou. Vše se děje plně automaticky, a to díky zavedení informací o změně materiálu do G-kódu. Dražší zařízení mohou mít zásobník i na 5–15 jednotlivých tiskových hlav, ty cenově dostupnější mají obvykle dvě tiskové hlavy, každou parkující na jednom konci osy X. Tiskové hlavy se tak během tisku mohou střídát.

Tohle řešení má řadu výhod jako zachování velikosti tiskové plochy a také absencí znečištění výrobku právě nepoužívanou tiskovou hlavou.



Obr. 9: Tiskárna s vyměnitelnými tiskovými hlavami [18]

4.4 Mechanické zkoušky polymerů

Stejně jako u kovů, tak i u polymerních materiálů se zkouší mechanické vlastnosti na vzorcích. Zkoušek je celá řada, jak statických, tak i dynamických, standartně probíhají za pokojových teplot, avšak specializované zkoušky mohou probíhat i za snížených či zvýšených teplot. Zde jsou uvedeny ty nejčastější.

4.4.1 Statické namáhání

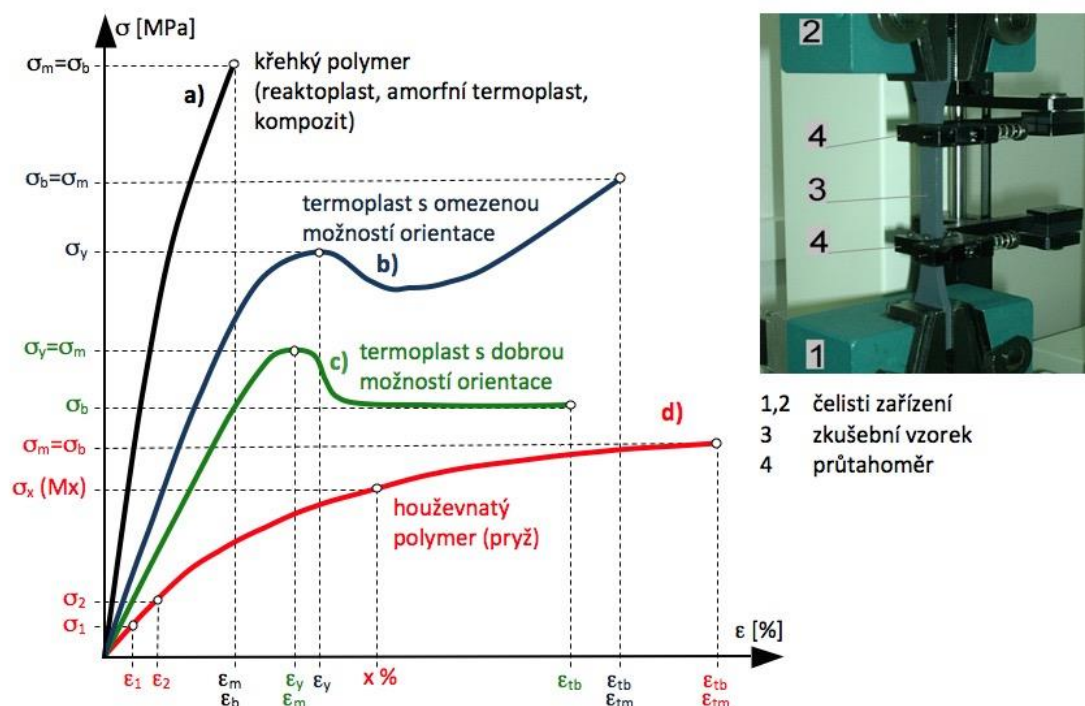
Během statických mechanických zkoušek je na testovací vzorek aplikováno statické namáhání, a to z časového hlediska buď krátkodobě anebo dlouhodobě. V důsledku aplikovaného zatížení jsou zkušební vzorky deformovány. V případě že se vzorek navrátí po odstranění zatěžující síly do původního tvaru, jedná se o elastickou deformaci. V případě že deformační změny přetrvávají i po odstranění zatížení, je deformace označována za plastickou. Vzhledem ke struktuře polymerů je jejich deformační chování odlišné – vždy obsahuje jak plastickou, tak i elastickou složku deformace, a navíc ještě složku viskoelastickou. U polymerů dochází k tečení za studena – při aplikaci konstantního zatížení roste deformace při snižování rychlosti deformace. Této vlastnosti se říká kríp a reprezentuje časovou závislost celkové deformace polymerů. Další vlastností polymerů je elastické zotavení, které nastává po odstranění napětí. Těleso se snaží navrátit do nedeformovaného stavu, nastává zpětný kríp. Jev nazývaný relaxace napětí, umožňuje v závislosti na čase potřebu stále nižšího napětí pro konstantní deformaci. [19]

Tah

Základní zkouškou pro většinu materiálů je zkouška tahová. V případě polymerů se nejčastěji jedná o normu ISO 527-2. Díky této zkoušce je možné během měření vyhodnocovat několik vlastností daného materiálu. Díky těmto datům je možné efektivně navrhovat konstrukční řešení jednotlivých výrobků.

Principem této zkoušky je umístění vzorku ve tvaru lopatky mezi čelisti zkušebního zařízení. Poté se aplikuje napětí až do přetržení zkoušeného vzorku.

Výsledkem zkoušky je tahová křivka, se které lze získat data o napětí, poměrném prodloužení, Poissonův poměr či modul pružnosti v tahu. [19,20]



Obr. 10: Tahová křivka [19]

Smluvní napětí σ lze vypočítat podle rovnice (1), relativní prodloužení ε podle rovnice (2) a jmenovité poměrné prodloužení ε_t podle rovnice (3). [19,20]

$$\sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Maximální síla v tahu je definována jako mez pevnosti σ_m a je stanovena rovnicí (4). Napětí, při němž začíná docházet ke vzniku plastické deformace je nazýváno napětí na mezi kluzu a na obrázku 10 je označeno jako σ_y . Napětí, při kterém dojde k přetržení vzorku je označeno σ_b . [19,20]

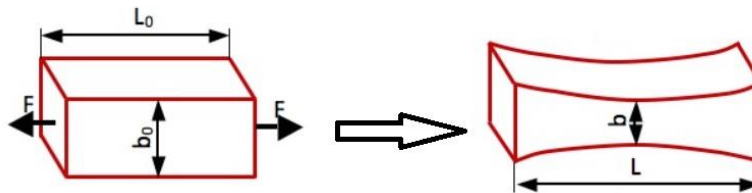
$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} [MPa] \quad (4)$$

Modul pružnosti E vyjadřuje tuhost materiálu. Tato hodnota je odečítána z deformační křivky v lineární oblasti závislosti napětí σ a poměrného prodloužení ε , kde platí Hookův zákon (rovnice 5). [19,20]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (5)$$

Pro přesný výpočet modulu pružnosti v tahu E_t (někdy označován jako sečný modul pružnosti) je nutné využít rovnice (6), kde se vychází ze dvou hodnot napětí σ_1, σ_2 , které odpovídají hodnotám poměrného prodloužení $\varepsilon_1=0,05\%$ a $\varepsilon_2=0,25\%$. [19,20]

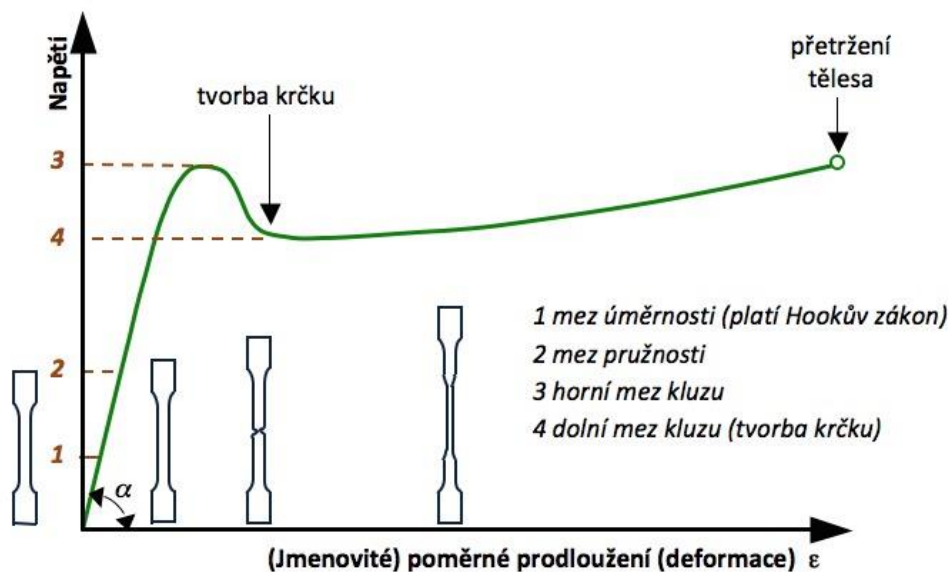
$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (6)$$



Obr. 11: Vysvětlení Poissonova poměru

Poměr vyjadřující příčné zúžení vůči podélnému protažení při deformaci, nazývaný Poissonův poměr μ , lze vypočítat podle vztahu (7). [19,20]

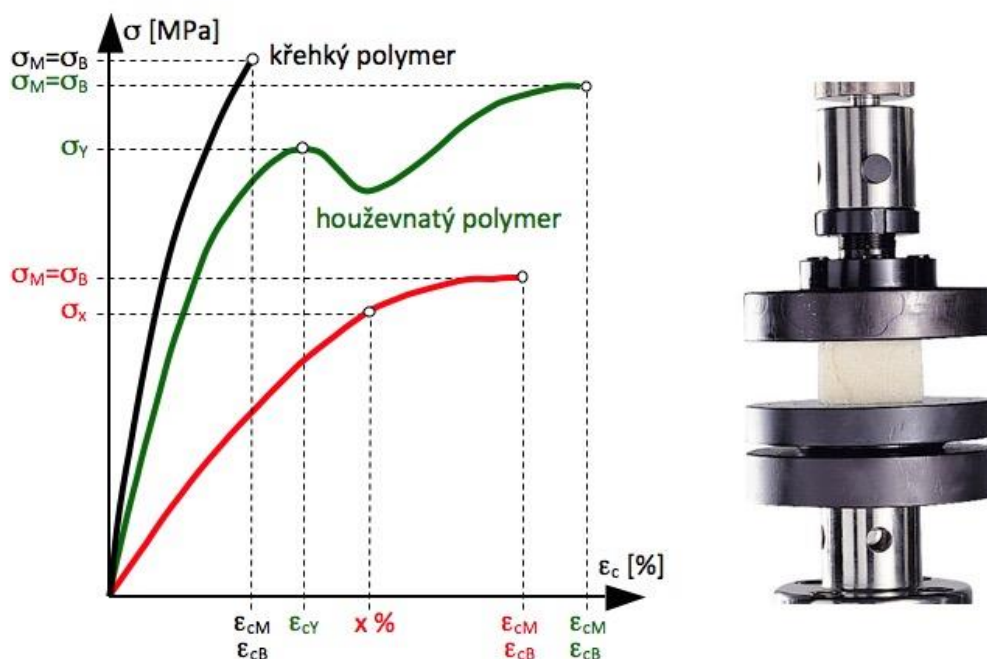
$$\mu = \frac{\frac{b-b_0}{b}}{\frac{L-L_0}{L_0}} \leq 0,5 [-] \quad (7)$$



Obr. 12: Tahová křivka proložená testovacími tělísky v jednotlivých fázích namáhání [19]

Tlak

Tlaková zkouška probíhá stlačováním zkušebního vzorku (nejčastěji ve tvaru válce) mezi dvěma deskami. Vyhodnocení zkoušky probíhá analogicky jako u zkoušky tahové, akorát se tlakové charakteristiky indexují velkými písmeny. [19]

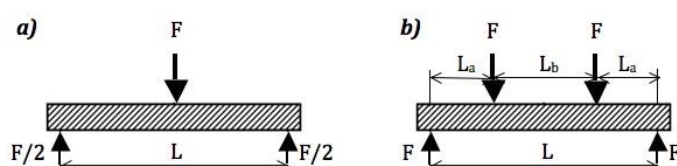


Obr. 13: Tlaková křivka [19]

Ohyb

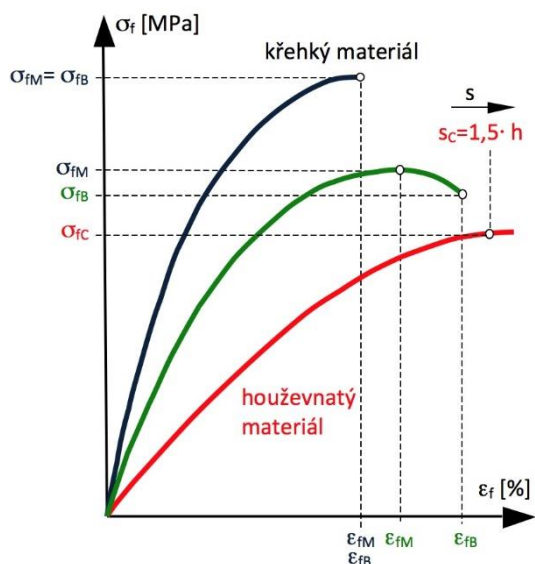
Další velmi důležitou vlastností polymerů je ohyb, a ten lze měřit například metodu trojbodého (obrázek 14 a) či čtyřbodého ohybu (obrázek 14 b). Jedná se často měřenou veličinou převážně u součástí, kde je vyžadována pružnost.

Průběh zkoušky trojbodého ohybu spočívá v podepření testovaného vzorku obdélníkového průřezu dvěma podpěrami. Poté je uprostřed mezi podpěrami vzorek zatěžován silou do doby, kdy praskne nebo jeho deformace nedosáhne 5 %. Zkouška je ukončena podle toho, který z daných stavů nastane dříve. [19]



Obr. 14: Schéma ohybového zatížení pro a) trojbodá a b) čtyřbodý ohyb [19]

Díky této zkoušce jsou získány materiálové informace jako je ohybové napětí, modul v ohybu, pevnost v ohybu či maximální průhyb. [19,21]



Obr. 15: Ohybová křivka [19]

Pevnost v ohybu je σ_{fM} vyjádřena podílem maximálního ohybového momentu $M_{o,max}$ a modulu průřezu W_o , tak jak je uvedeno v rovnici (8). [19,21]

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_o} [MPa] \quad (8)$$

Maximální ohybový moment pro tříbodový ohyb je vyjádřen rovnicí (9) a pro čtyřbodový rovnicí (10). Průřezový modul pro zkušební vzorek tvaru hranolu o tloušťce h a šířce b je stanoven rovnicí (11). [19,21]

$$M_{o,max} = \frac{F_{max} \cdot L}{4} [N \cdot mm] \quad (9)$$

$$M_{o,max} = F_{max} \cdot L_a [N \cdot mm] \quad (10)$$

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (11)$$

Konečným dosazením byl získán finální vztah pro pevnost v ohybu pro tříbodový (rovnice 12) a čtyřbodový ohyb (rovnice 13). [19,21]

$$\sigma_{fM} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{max} \cdot l}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (12)$$

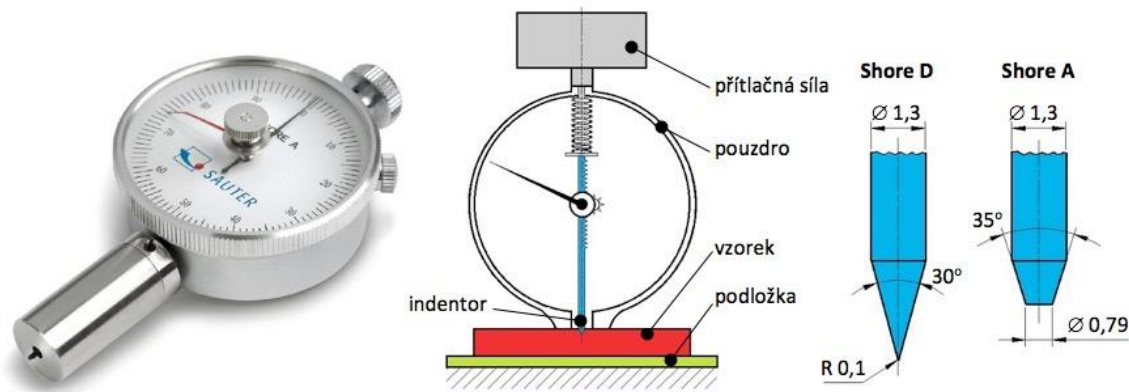
$$\sigma_{fM} = 6 \cdot \frac{F_{max} \cdot L_a}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (13)$$

Rovnice (18) vyjadřuje vztah mezi průhybem a deformací v ohybu ε_f při tříbodovém ohybu.

$$s = \frac{1}{6} \cdot \frac{\varepsilon_f \cdot L^2}{h} [mm] \quad (14)$$

Tvrđost

Mezi důležité mechanické charakteristiky polymerů patří tvrdost, která je definována jako odpor tělesa proti vnikání cizího tvrdšího tělesa do svého povrchu. Zpravidla měření probíhá zatlačováním vnikacího tělíska do zkušební vzorku, načež je po definované době odečítána hloubka vniknutí. Jednotlivé, v praxi užívané metody měření tvrdosti polymerů se od sebe liší tvarem vnikacího tělíska, dobou zatížení ale také způsobem, jakým je provedena jejich aplikace. [19]



Obr. 16: Zkouška tvrdosti metodou Shore [19]

Nejrozšířenější metodou v praxi je Shore. Podle tvaru vnikacího tělíska je dělena na Shore A (hrot tvaru komolého kužele) a Shore D (hrot tvaru kužele s kulovým vrchlíkem). Hrot je se vtlačuje silou zatěžující pružiny, kdy je pro tvrdé polymery využíváno metody Shore D s přítlačnou silou 50 N a pro měkké polymery Shore A s přítlačnou silou 10 N. Při výsledcích měření metodou Shore A dosahujících hodnot vyšších než 90 se přechází na Shore D, a naopak při hodnotách 20 a méně při měření Shore D se přechází na Shore A.

Hodnota tvrdosti se odečítá po 1 s nebo 15 s po kontaktu vnikacího hrotu se zkušebním tělesem. [19,22]

Mezi další metody patří vtlačování kuličky, kdy je vnikacím elementem kalená kulička o průměru 5 mm. Ta je zatížena počáteční silou 9,8 N a poté je aplikováno normalizované přídavné zatížení ($F_m = 49 \text{ N}, 132 \text{ N}, 358 \text{ N}, 961 \text{ N}$), zvolené tak aby byla hloubka vtlačení (h) v rozsahu 0,15 – 0,35 mm. Poté se podle vztahu (rovnice 15) odečte tvrdost vtlačení kuličky (H). [19]

$$H = 0,0535 \cdot \frac{F_m}{h^{-0,46}} [-] \quad (15)$$

Další metoda je podle Rockwella (R, L, M, E) kdy písmeno značí normalizovaný průměr kuličky (R = 12,7 mm, L a M = 6,35 mm a E = 3,175 mm). Tato je vtlačována do zkušebního vzorku nejprve počáteční silou (98 N) po dobu 10 s a

následně se po dobu 15 s aplikuje přídatné zatížení ($F_m = 588,4$ N pro stupnice R a L, 980,7 N pro stupnice M a E). Po odstranění vnikacího tělíska se odečítá tvrdost dle Rockewella (HR) dle rovnice (16). [19]

$$HR = 130 - \frac{h}{0,002} [-] \quad (16)$$

Další metodou měření tvrdosti je podle Rockwella α , kdy je kulička o průměru 12,7 mm vtlačována do zkušební vzorku silou 588,4 N. Na rozdíl od předchozí metody je hloubka odečítána při celkovém zatížení, a nikoliv po odlehčení. Tvrdost je pak stanovena podle rovnice (17). [19]

$$HR\alpha = 150 - \frac{h}{0,02} [-] \quad (17)$$

Velmi rozšířenou metodou je IRHD (International Rubber Hardness Degrese). Jedná se o alternativu k metodě Shore A, kdy se ocelová kulička vtlačuje do zkušební vzorku. Rozsah této metody je 10–100 IRHD, a podle předpokládané tvrdosti polymeru se volí vhodná metoda zatížení. Standardní zkouška se značí N, kdy je kulička o průměru 2,5 mm vtlačována silou 5,4 N. Tato metoda je vhodná pro tvrdostní rozsah 35–85 IRHD. Pro vysoké tvrdosti v oblasti 85–100 IRHD je určena metoda H zatěžující kuličku průměru 1 mm silou 5,4 N. Nízké tvrdosti v oblasti 10–35 IRHD je určena metoda L, kdy je kulička průměru 5 mm vtlačována do vzorku silou 5,4 N. Poslední variantou je metoda M určená pro zkoušení tenkých a malých těles. Jedná se o tkzv. mikrotvrdost. Vnikacím tělesem je kulička průměru 0,395 mm a zatěžující silou je 0,145 N. Tahle metoda je vhodná pro polymery s odhadovanou tvrdosti v rozsahu 35–85 IRHD. [19]

4.4.2 Dynamické rázové namáhání

Při návrhu výrobků je dobré znát také informace o rázové houževnatosti daného materiálu, protože součást při statickém namáhání poruší až při mnohem větším zatížení než při rázu. Je to dáno tím, že materiál se při vyšších rychlostech

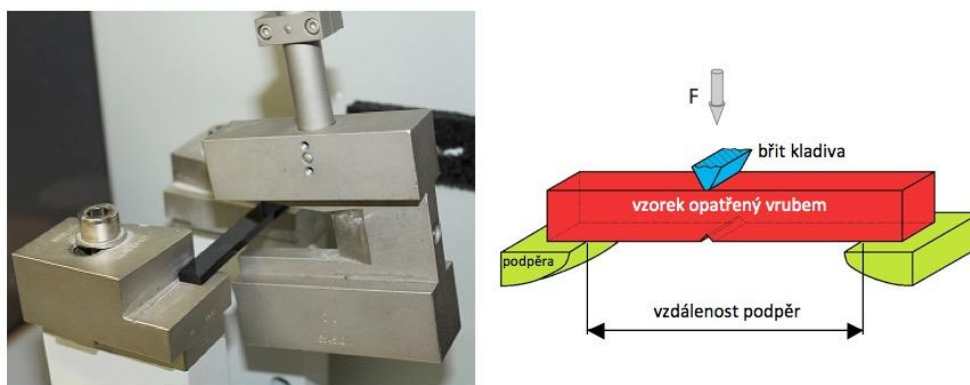
namáhání stává více křehkým. Během rázového namáhání může dojít k porušení křehkým nebo houževnatým lomem.

Rychlé absorbování energie je vlastnost materiálu nazývaná rázová houževnatost materiálu, která mu umožňuje se deformovat určitou rychlostí. V případě polymerů se zkušební vzorek opatřuje vrubem, ve kterém se následně koncentruje napětí. Při rázovém namáhání takového vzorku mluvíme o vrubové houževnatosti. [23]

Rázová a vrubová houževnatost Charpy

Princip zkoušky vrubové houževnatosti metodou Charpy spočívá v umístění normalizovaného zkušební vzorku ve tvaru hranolu opatřeného uprostřed vrubem vodorovně na dvě podpěry. Poté je proti vrubu spuštěno rázové kladivo dopadající konstantní rychlostí 2,9 m/s. Zkouška se vyhodnocuje podle toho, jestli zůstal zkušební vzorek nepřeražen, přeražen částečně, anebo přeražen zcela. Energie potřebná k přeražení vzorku je zaznamenávána během zkoušky. [23]

V případě vzorku s vytvořeným vrubem je veden směr rázu opačnou stranou, než je vrub umístěn. Zkušební vzorky se opatřují dle normy vrubem ve tvaru V a dále se dělí podle zaoblení kořene vrubu (standartní – typ A, nebo typ B a C). Existuje i norma popisující vrub ve tvaru U. [23]



Obr. 17: Vrubová houževnatost Charpy [23]

Rázová houževnatost metodou Charpy (a_{cU}) znázorňuje kinetickou energii (E_c) potřebnou k přeražení zkušební vzorku vztaženou na jeho průřez – šířka (b), tloušťka (h), viz rovnice (18). [23]

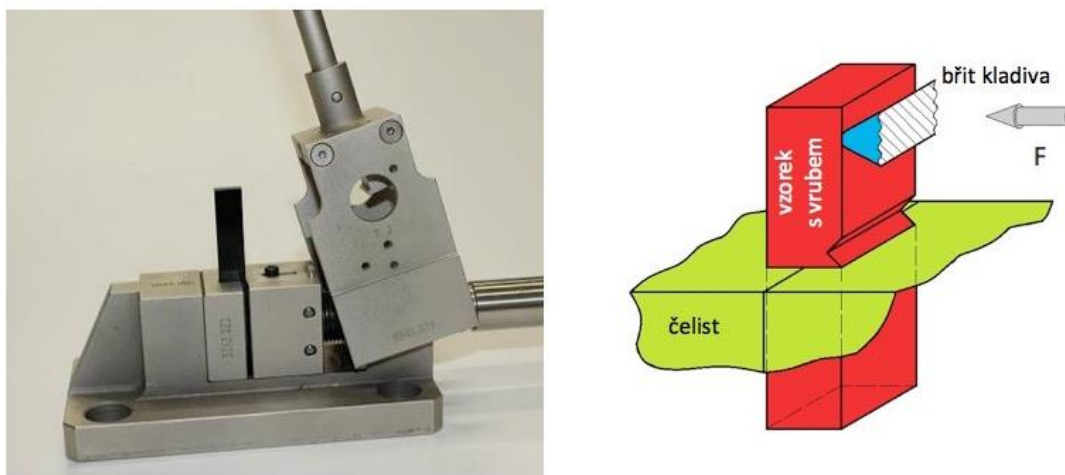
$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (18)$$

Vrubová houževnatost metodou Charpy představuje kinetickou energii E_c spotřebovanou k přeražení zkušební vzorku s vrubem, vztaženou na původní průřez pod vrubem – šířka pod vrubem b_N a tloušťka h , viz rovnice (19). [23]

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \text{ [kJ/m}^2\text{]}, \text{ kde } N = \text{typ vrubu } A, B, C \quad (19)$$

Rázová a vrubová houževnatost Izod

Zkouška metodou Izod probíhá a vyhodnocuje se analogicky jako zkouška metodou Sharpy (viz rovnice (20), (21)), s tím rozdílem že zkušební vzorek je u zkoušky Izod umístěné vertikálně ve svěráku jako vetknutý nosník. Rázové kladivo dopadá 22 mm od osy vrubu rychlostí 3,46 m/s na stranu zkušební vzorku opatřeného vrubem. [23]



Obr. 18: Vrubová houževnatost Izod [23]

$$a_{iU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (20)$$

$$a_{iN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \text{ [kJ/m}^2\text{]}, \text{ kde } N = \text{typ vrubu } A \text{ nebo } B, C \text{ se nepoužívá} \quad (21)$$

Odrazová pružnost elastomerů

Jedná se o jednoduché zkoušky umožňující srovnat schopnosti elastomerních materiálů vracet a absorbovat mechanickou energii při rázové deformaci. Zkouška probíhá tak že z přesně stanovené výšky dopadá kyvadlové kladivo na zkušební vzorek. Odrazová pružnost R_s je výsledkem poměru výšky odrazu h_r a dopadu h_0 , viz rovnice (22). [23]

$$R_s = \frac{h_r}{h_0} \cdot 100 [\%] \quad (22)$$

Pro rychlou kontrolu odrazové pružnosti slouží zařízení Schob, fungující na principu kladiva s nárazovou plochou ve tvaru celé kuličky o průměru 7,5 mm, dopadové rychlosti 2 m/s a potenciální energii 0,5 J. [23]

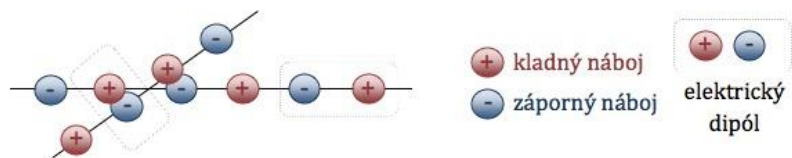
Zařízení typu Lüpke se využívá pro zkoušení odrazové pružnosti při snížených a zvýšených teplotách. Při této zkoušce je měřena vzdálenost odrazu tyčového kyvadla o hmotnosti 350 g po dopadu na zkušební vzorek. [23]

4.5 Pevnost spojení v kontaktní vrstvě

Při tisku sendvičových struktur je velmi důležité správné spojení obou vybraných materiálů v kontaktní vrstvě. Nejdůležitějším aspektem je polarita jednotlivých polymerů. I při správném výběru obou spojovaných materiálů je nutno dbát na to že pevnost takového spojení je ovlivněna i procesními podmínkami při tisku, jako je rychlost tisku, teplota, při které je materiál vytlačován a intenzita chlazení. [24]

4.5.1 Mezimolekulární síly

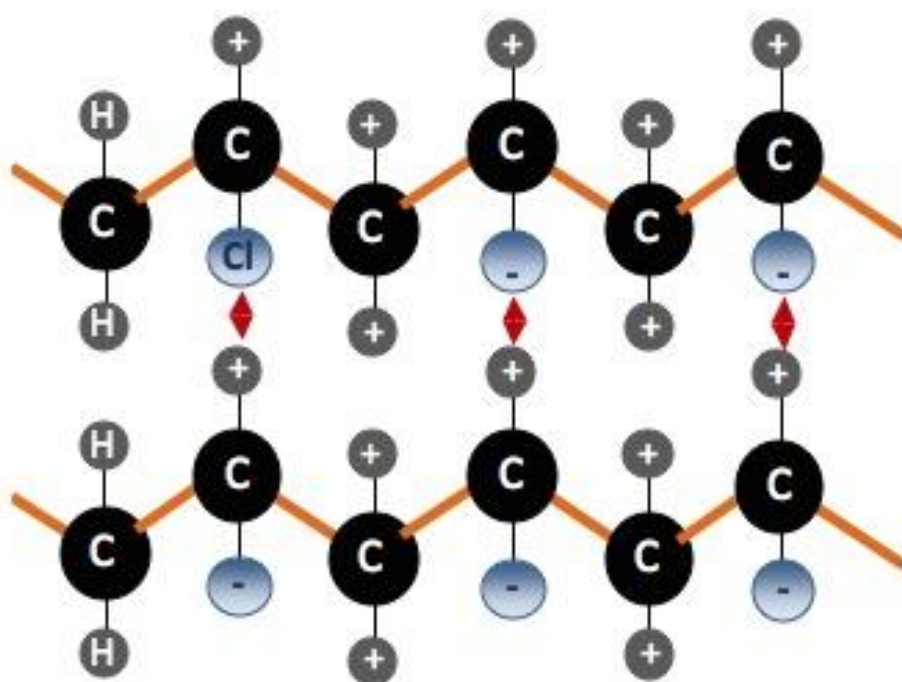
Všechny materiály jsou tvořeny atomy a molekulami které díky různým silám drží pohromadě. Kovalentní vazby tvoří primární velmi silné vazby, které vážou atomy v makromolekulách. Jednotlivé makromolekuly jsou pak drženy pohromadě poměrně slabými sekundárními silami, které jsou vyvolány dvojicemi záporných a kladných nábojů uvnitř molekul. [24]



Obr. 19: Schématické znázornění dipólu [24]

Vznik elektrického dipólu a dipólového momentu je podmíněn nahodilým rozmístěním kladných a záporných nábojů v prostoru. Opačné náboje jsou k sobě přitahovány a stejné náboje jsou od sebe odpuzovány stejně jako u permanentního magnetu.

Chemické složení, respektive polarita rozhoduje o velikosti sil mezi makromolekulami. Obsah nesymetrického rozložení kladných a záporných nábojů tvoří trvalý dipól a taková makromolekula se nazývá polární (např. polyvinylchlorid PVC). Makromolekula se symetrickým rozložením nábojů jako je například polyethylen (PE) obsahuje atomy C^+ a H^+ , které mají oba stejnou afinitu k elektronům a nemůže tak vzniknout trvalý dipól. Taková makromolekula se nazývá nepolární. [24]



Obr. 20: Ukázka dipólových sil v molekulách PVC [24]

Síly vznikající mezi jednotlivými makromolekulami lze dělit na několik druhů:

- Dipólové síly – tyto velmi přitažlivé síly jsou přítomny u polárních polymerů a působí mezi makromolekulami s trvalým dipólem.
- Indukované síly – tyto síly jsou mnohem slabší a vznikají mezi makromolekulou s trvalým dipólem a makromolekulou bez trvalého dipólu. Takové polymery jsou označovány za polarizovatelné.
- Disperzní síly – tyto slabé síly vznikají mezi makromolekulami s absencí trvalého dipólu, způsobeného symetrickým rozložením valenčních elektronů v náboji. Tyto polymery jsou nepolární.
- Vodíkové můstky – jedná se o nejpevnější vazbu, typickou pro velmi polární polymery jako jsou například polyamidy. Vodíkové můstky vznikají přitáhnutím atomů vodíku H^+ volným elektronovým párem v okolních makromolekulách (O^- , N^-). [24]

4.5.2 Rozdělení polymerů podle polarity

Níže jsou rozděleny běžné materiály používané pro výrobu tiskových strun pro metodu FFF. [25,26,27,28,29]

Polární

- PA (Polyamid)
- PMMA (Polymethylmetakrylát)
- PVC (Polyvinylchlorid)
- PC (Polykarbonát)
- PET (Polyethyltereftalát)
- TPU (Termoplastický polyuretan)

Nepolární

- PP (Polypropylen)
- ABS (Acrylonitrilbutadienstyren)
- PLA (Kyselina polylactonová)

Polarita materiálů jako TPE či PE a dalších je velmi ovlivnitelná přidáním různých přísad.

5. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

Tato práce rozvíjí myšlenky kanadského výzkumného týmu [7] 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 nejlepšími hodnotami 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 navrhována zkouška vrubové houževnatosti, tahová zkouška kolmo na vrstvy a zkouška trojbodým ohybem, díky kterým lze zjistit další nové informace o těchto sendvičových strukturách. V následujících kapitolách jsou rozebrány hlavní prvky řešené v praktické části disertační práce.

5.1 Výběr materiálů

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

5.2 Návrh a výroba vzorků

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 započetí 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 límeč 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.

Tabulka 1 Vzájemná kompatibilita materiálů tisknutelných na Prusa MINI

		Rigidní materiály						
		PLA	PET-G	ASA	CPE	PC	PP2320	NYLON FX256
Flexibilní materiály	PEBA 90 A	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO
	TPU 98 A	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO
	TPU 92 A	ANO	ANO	ANO	ANO	ANO	NE	ANO
	TPE 96 A	NE	NE	NE	ANO	NE	ANO	NE
	TPE 90 A	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE

5.3 Metodika vyhodnocení dat

Naměřená data byla vyhodnocena v programu Microsoft Excel. Data byla zpracována do grafů, srovnávajících jak absolutní naměřené hodnoty dané veličiny mezi sebou, tak poměrné hodnoty naměřených veličin vztažené k hodnotě naměřené veličiny u srovnávacího vzorku vytisknutého z rigidního materiálu.

Přepočet na poměrné hodnoty v procentech vůči maximálním hodnotám naměřených u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu bylo provedeno podle následujícího vztahu (23), kde A je maximální hodnota u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, a_N je hodnota naměřená u daného sendviče (N značí číslo sendviče) a hodnota x určuje danou

poměrnou hodnotu vůči srovnávacímu vzorku ze samostatného rigidního materiálu.

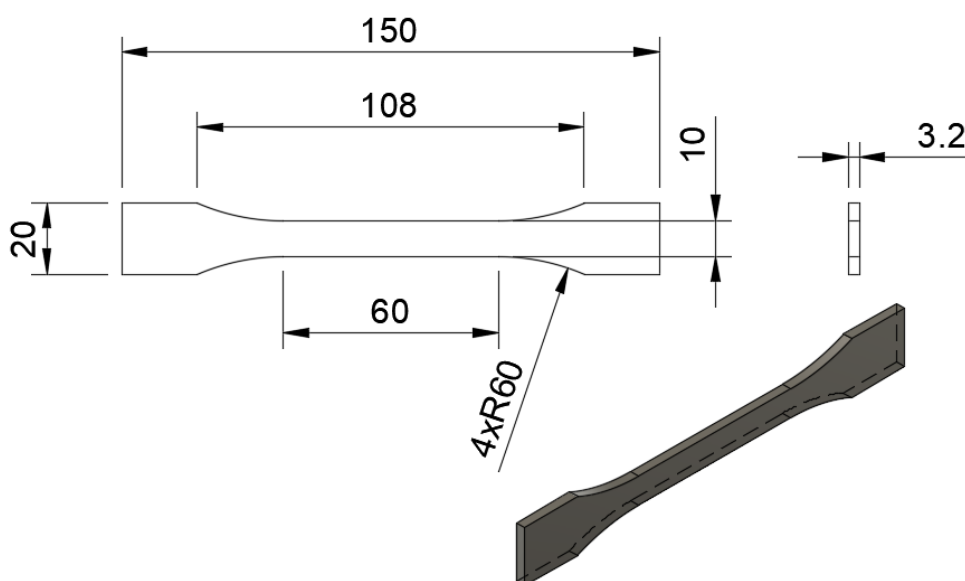
$$A = 100 [\%] \rightarrow \frac{a_N}{A} = x [\%] \quad (23)$$

5.4 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.

5.4.1 Příprava zkoušky

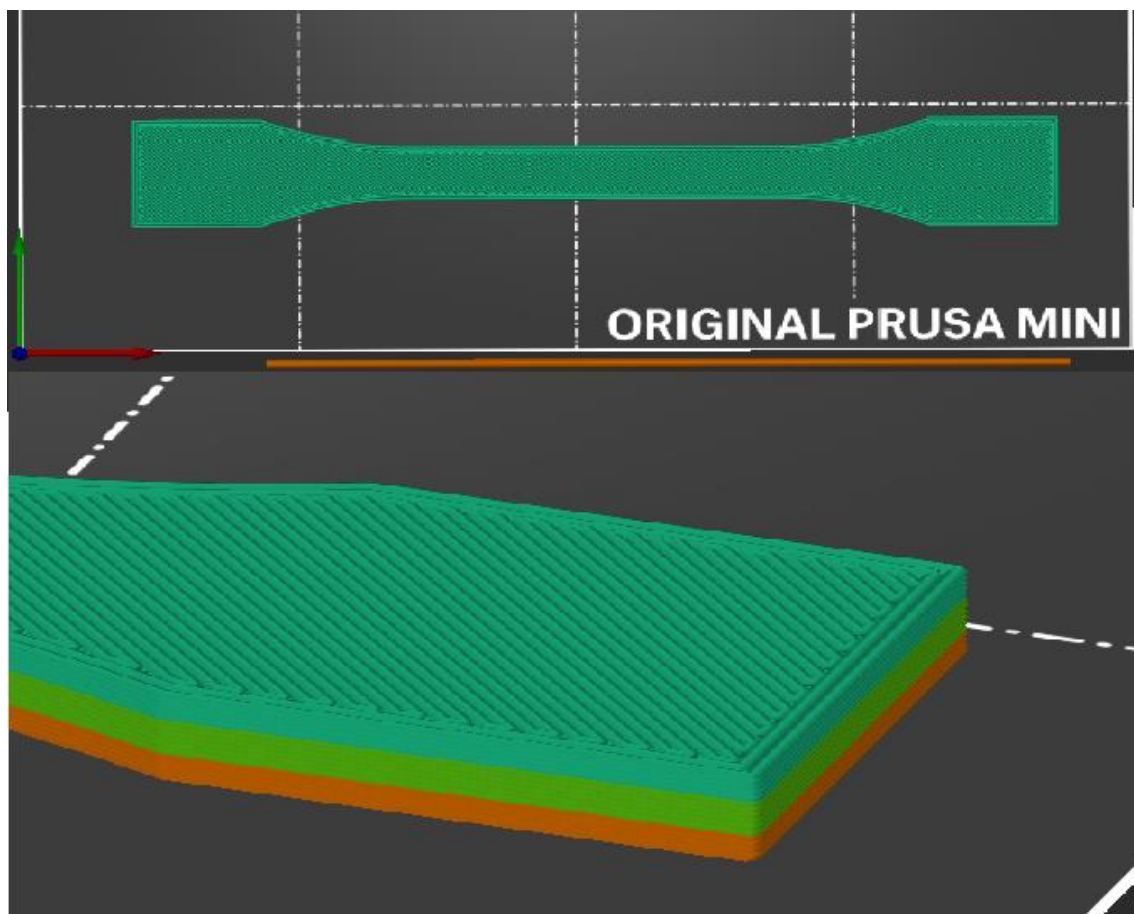
Vzorky pro instrumentovanou tahovou zkoušku byly připraveny podle normy ISO 527-2, a konkrétně je použitý u zkušební vzorku tvar lopatky s označením 1B.



Obr. 21: 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. 22). 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.



Obr. 22: Pohled na orientaci výrobku na tiskové podložce v programu Prusa Slic3r (nahore), detail na rozložení vrstev sendviče (dole)



Obr. 23: Vytisknuté zkušební vzorky pro tahovou zkoušku dle ISO 527-2/1B

Pro potřeby zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick Materialprüfung 1456, osazené pneumatickými čelistmi (Obr. 24). Podmínkou pro ukončení zkoušky byl nastaven propad napětí o 80 %.

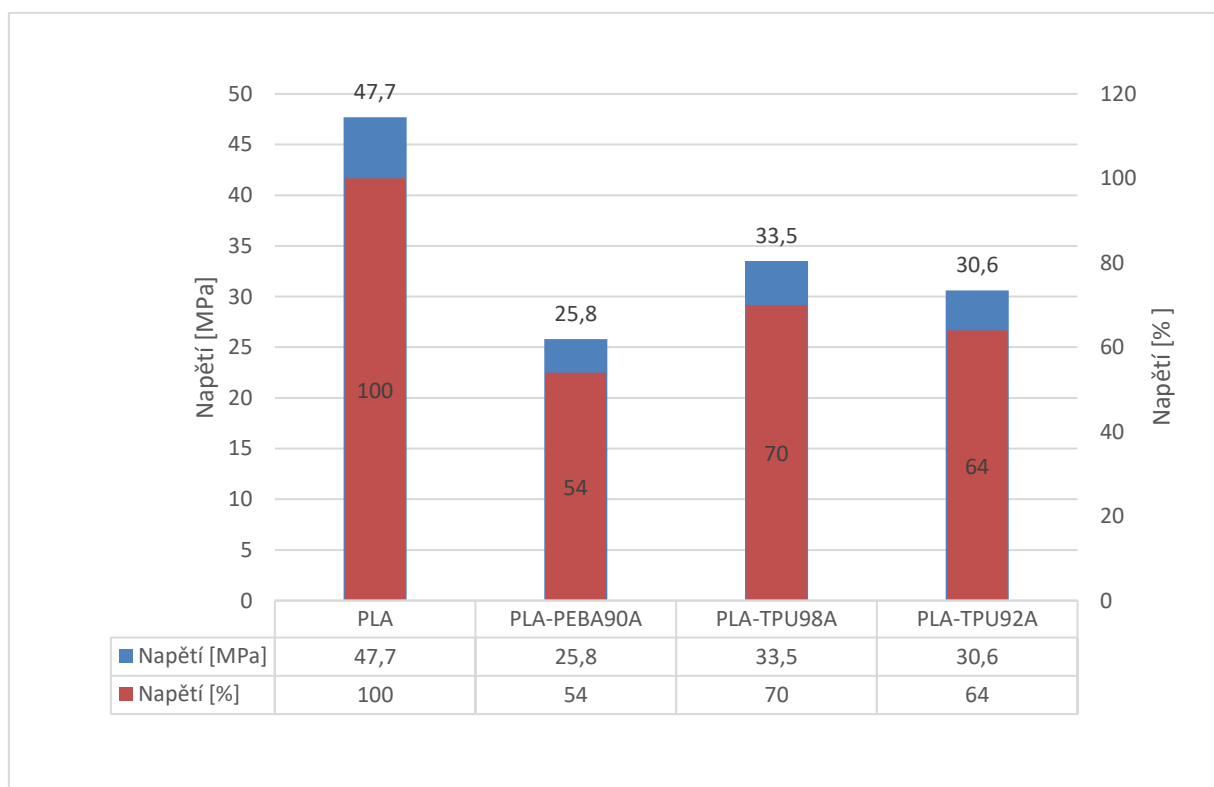


Obr. 24: Průběh tahové zkoušky sendviče

5.4.2 Výsledky tahové zkoušky

Napětí

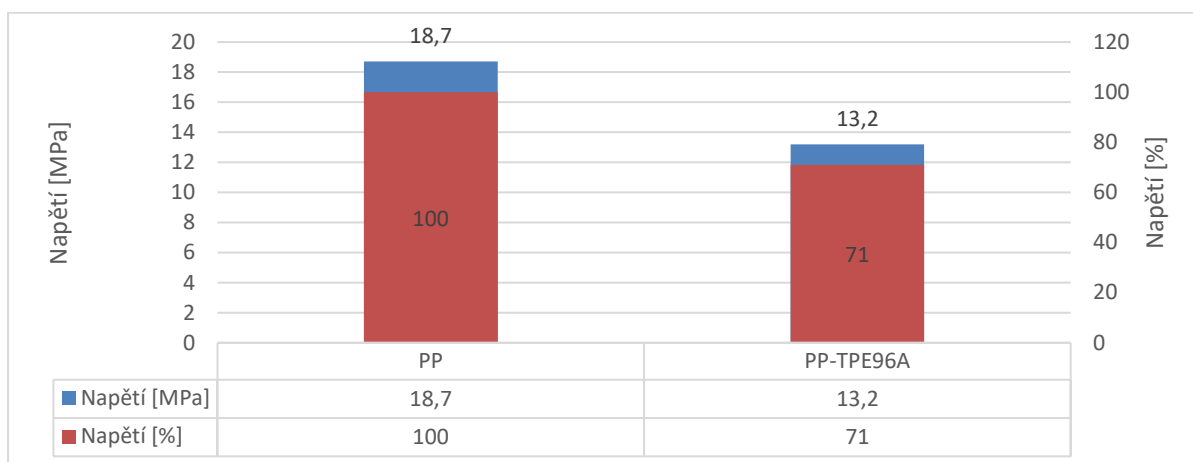
První zkoumanou veličinou během instrumentované tahové zkoušky bylo maximální napětí, které zkoušený vzorek vydrží. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci maximální napětí (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů. Červené sloupce reprezentují poměrné hodnoty maximálního naměřeného napětí v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximálnímu napětí, které bylo naměřeno u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



Obr. 25: Graf napětí PLA a jeho sendvičů

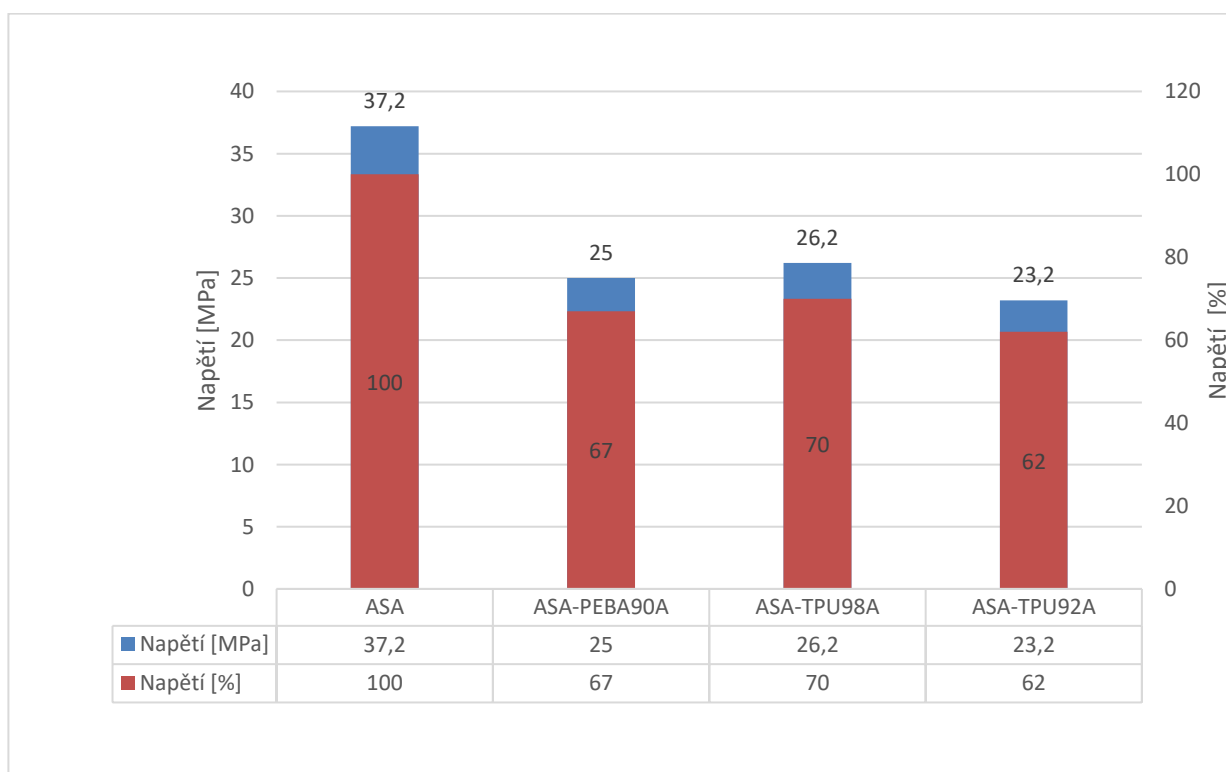
Z grafu na Obr. 25 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA bylo naměřeno napětí 47,7 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku PLA – TPU98A, a to hodnoty 33,5 MPa, což odpovídá 70 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PLA.

Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku PLA – PEBA90A a to 25,8 MPa, což odpovídá 54 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PLA.



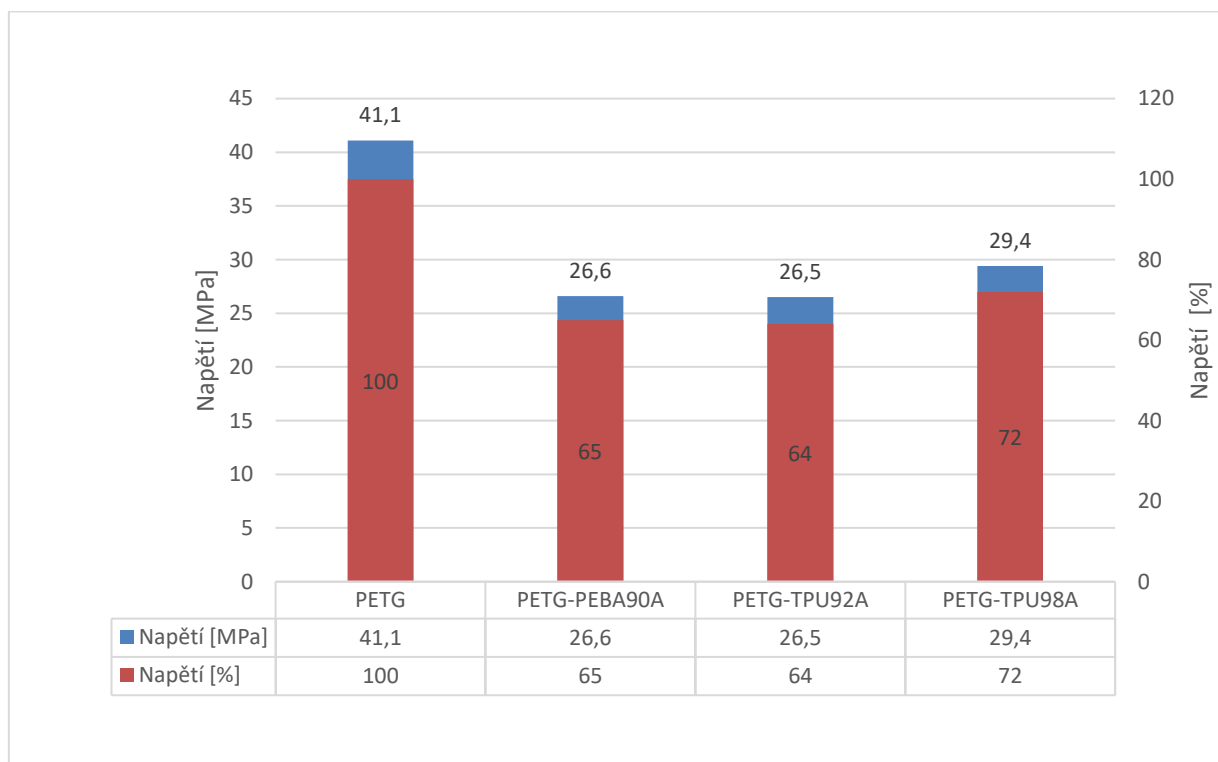
Obr. 26: Graf napětí PP a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 26 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP bylo naměřeno napětí 18,7 MPa. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena hodnota maximálního napětí 13,2 MPa, což odpovídá 71 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PP.



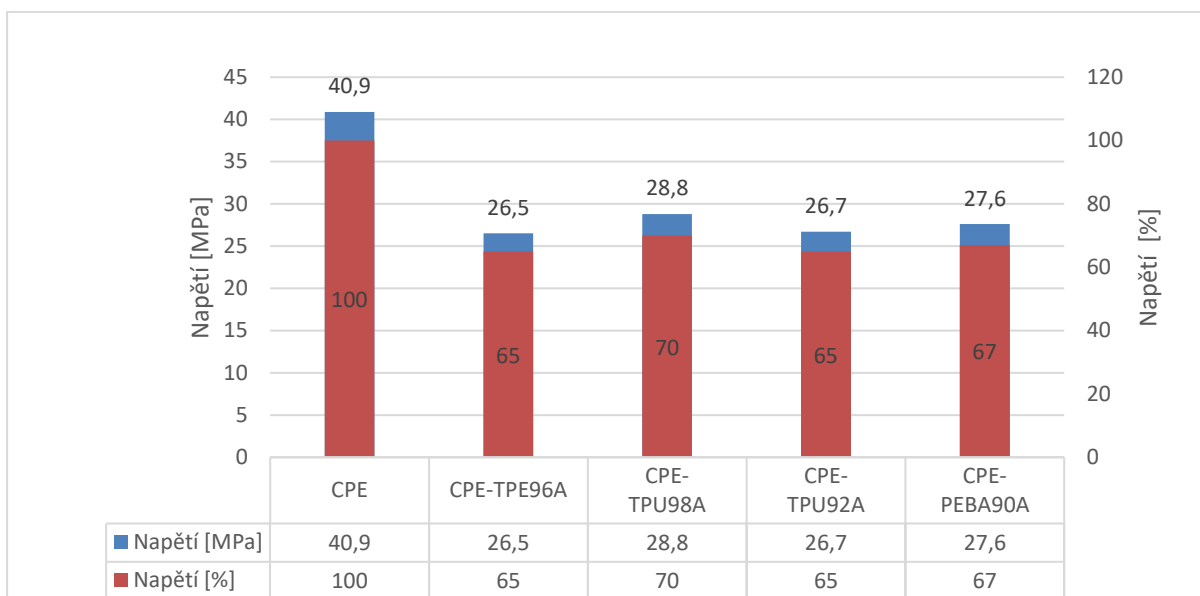
Obr. 27: Graf napětí ASA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 27 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z ASA bylo naměřeno napětí 37,2 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku ASA – TPU98A, a to hodnoty 26,2 MPa, což odpovídá 70 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného ASA. Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku ASA – TPU92A a to 23,2 MPa, což odpovídá 62 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z ASA.



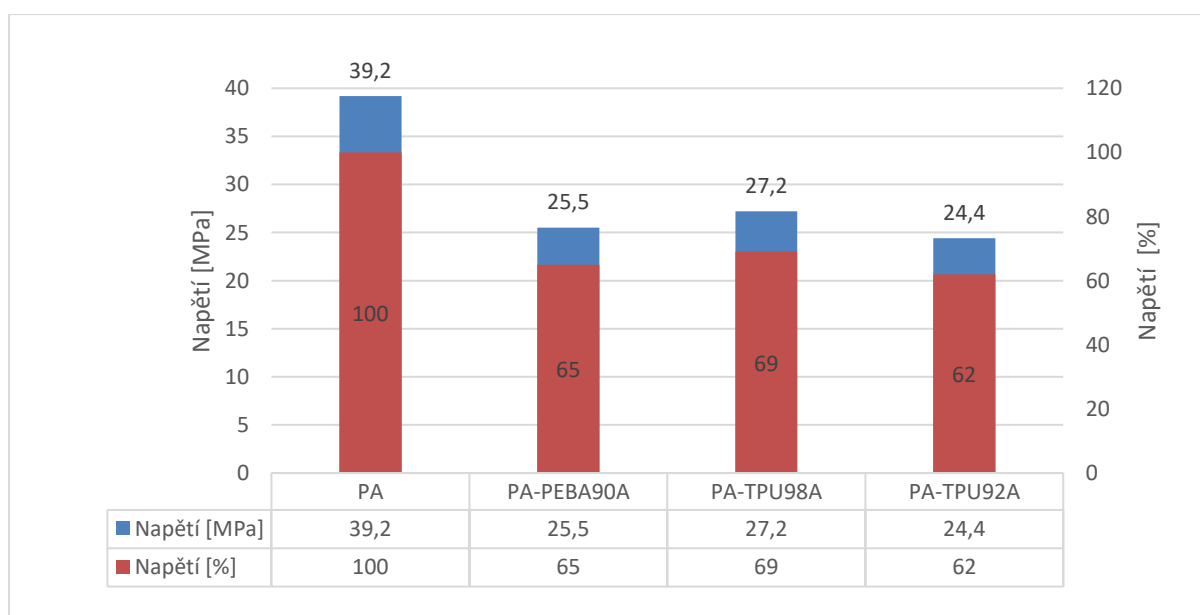
Obr. 28: Graf napětí PETG a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 28 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PETG bylo naměřeno napětí 41,1 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku PETG – TPU98A, a to hodnoty 29,4 MPa, což odpovídá 72 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PETG. Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku PETG – TPU92A, a to 26,5 MPa, což odpovídá 64 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PETG.



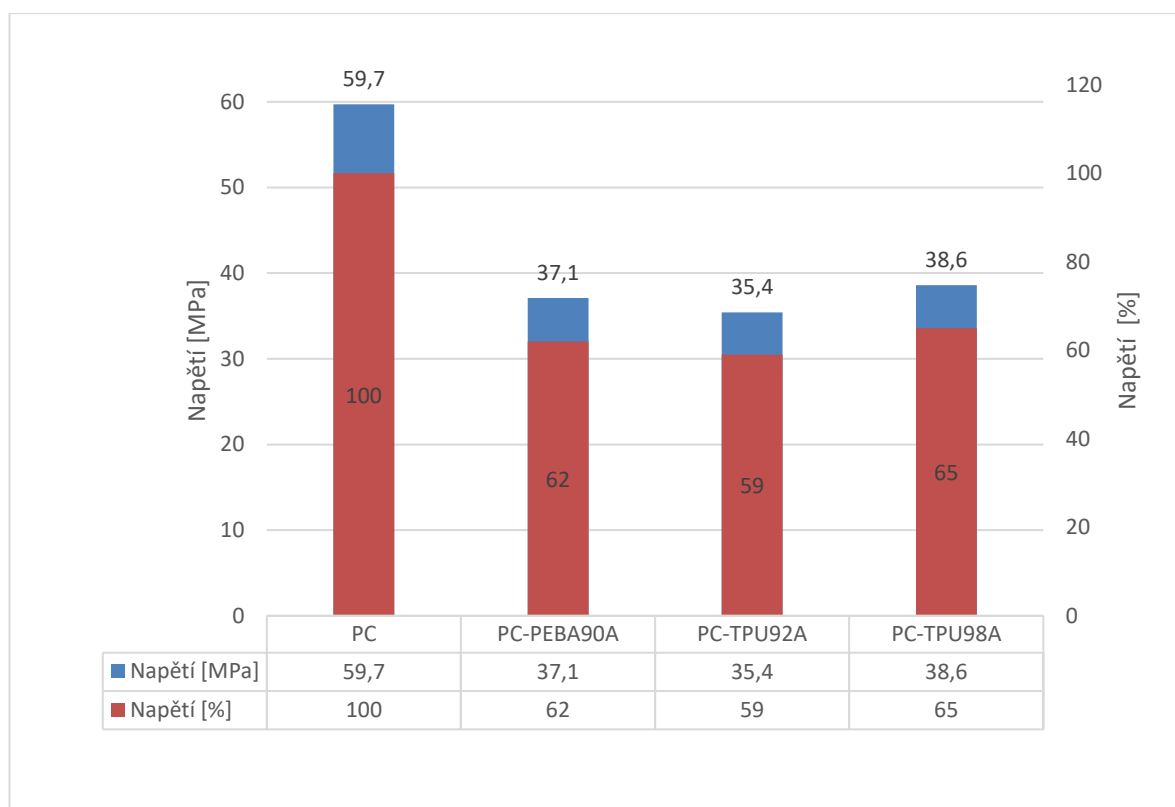
Obr. 29: Graf napětí CPE a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 29 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z CPE bylo naměřeno napětí 40,9 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku CPE – TPU98A, a to hodnoty 28,8 MPa, což odpovídá 70 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného CPE. Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku CPE – TPE96A a to 26,5 MPa, což odpovídá 65 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z CPE. Velmi podobných hodnot bylo dosaženo i u zbylých dvou vzorků.



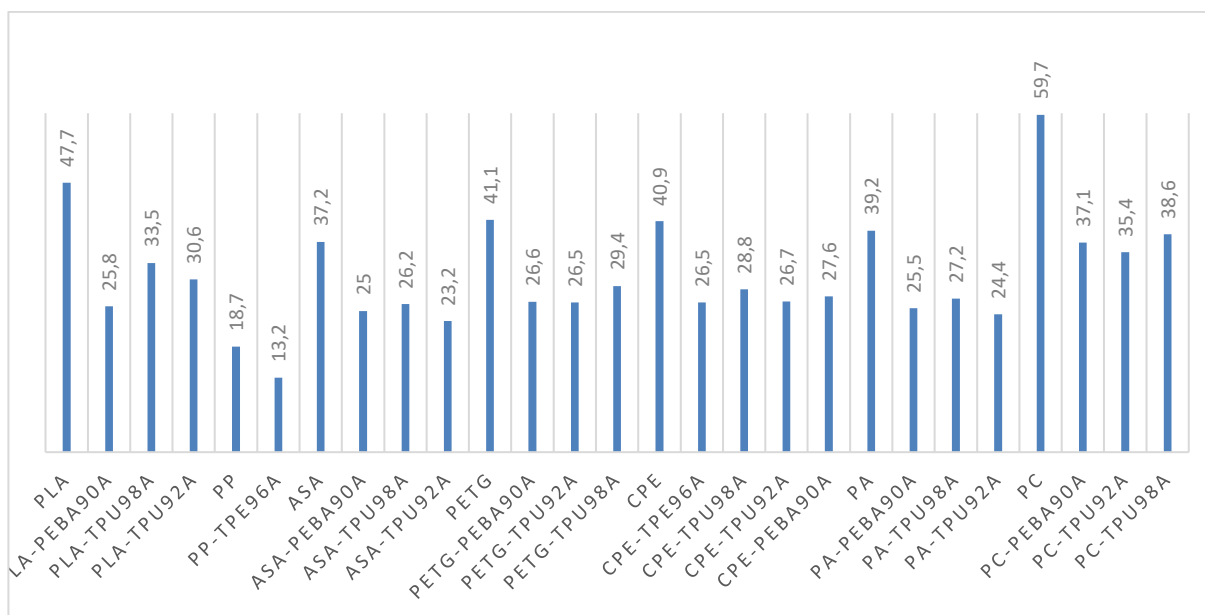
Obr. 30: Graf napětí PA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 30 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PA bylo naměřeno napětí 39,2 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku PA – TPU98A, a to hodnoty 27,2 MPa, což odpovídá 69 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PA. Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku PA – TPU92A a to 24,4 MPa, což odpovídá 62 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PA.



Obr. 31: Graf napětí PC a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 31 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC bylo naměřeno napětí 59,7 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího napětí dosaženo u vzorku PC – TPU98A, a to hodnoty 38,8 MPa, což odpovídá 65 % hodnoty napětí naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PC. Nejnižší hodnoty napětí u sendviče bylo dosaženo u vzorku PC – TPU92A, a to 35,4 MPa, což odpovídá 59 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PC.



Obr. 32: Graf srovnání napětí [MPa] u všech vzorků

Srovnání všech hodnot maximálního napětí při tahové zkoušce je uvedeno v grafu na Obr. 32. 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. Nejnížší hodnota napětí u referenčního vzorku byla naměřena u PP a to pouze 18,7 MPa.

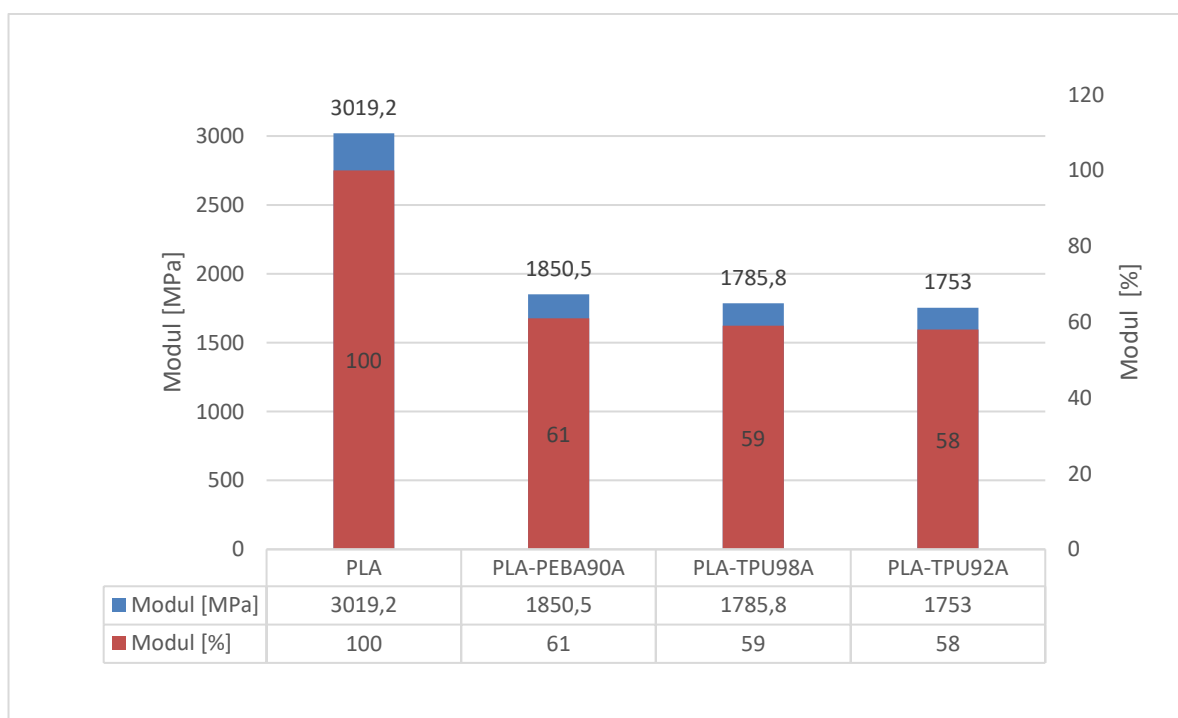
Sendvič PC – TPU98A vykazoval nejvyšší hodnoty napětí ze všech sendvičů, a to 38,6 MPa. Nejnížší hodnoty byly naměřeny u sendviče PP – TPE96A a to 13,2 MPa, to však bylo způsobeno tím, že již základní rigidní materiál nevykazoval příliš vysokých hodnot při měření. I přesto však tento vzorek dosahuje 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.

Nejnižšího poměrného maximálního napětí vůči referenčnímu vzorku bylo zjištěno u sendviče PLA – PEBA90A, a to pouze 54 %.

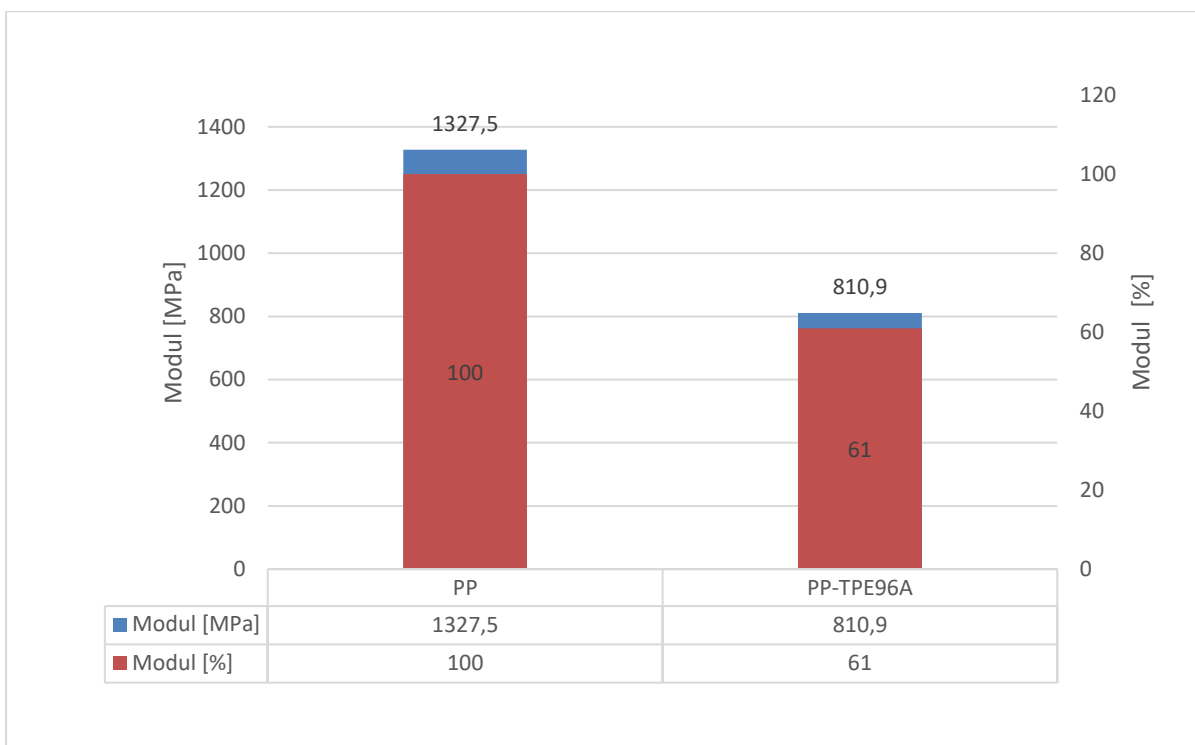
Youngův modul

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. Červené sloupce reprezentují poměrné hodnoty maximálního naměřeného modulu v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximálnímu modulu, který byl naměřen u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



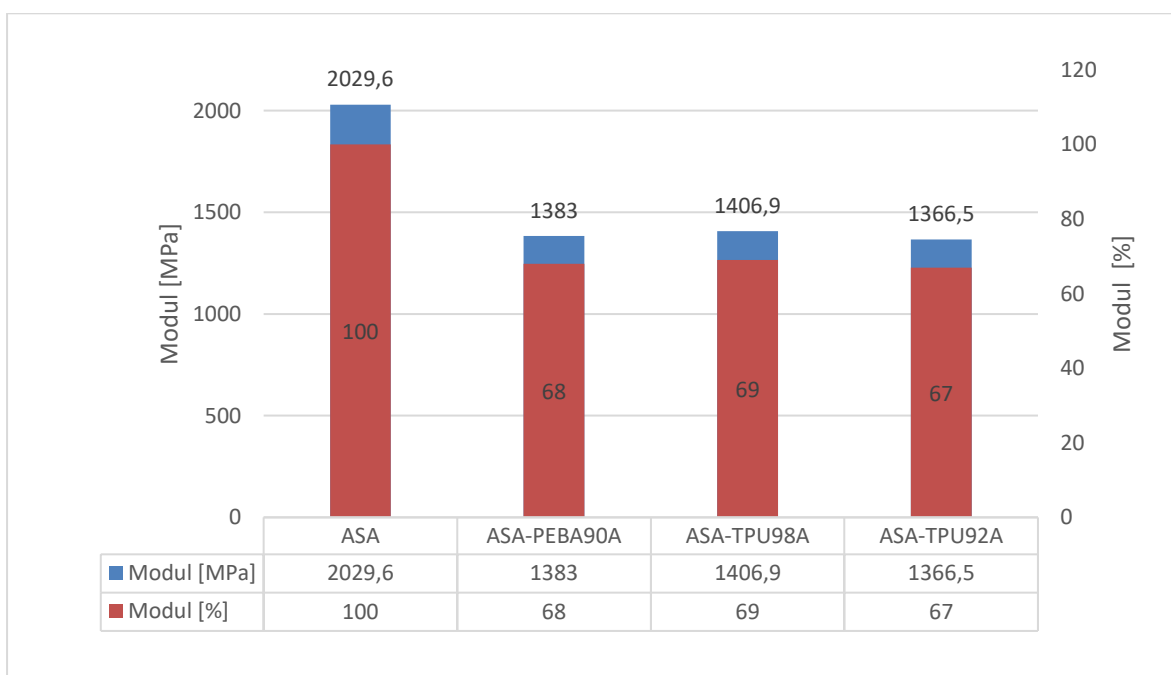
Obr. 33: Graf Youngova modulu PLA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 33 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byl naměřen modul 3019,2 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku PLA – PEBA90A, a to hodnoty 1850,5 MPa, což odpovídá 61 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PLA. Nejnížší hodnoty modulu u sendviče bylo dosaženo u vzorku PLA – TPU92A, a to 1753 MPa, což odpovídá 58 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PLA.



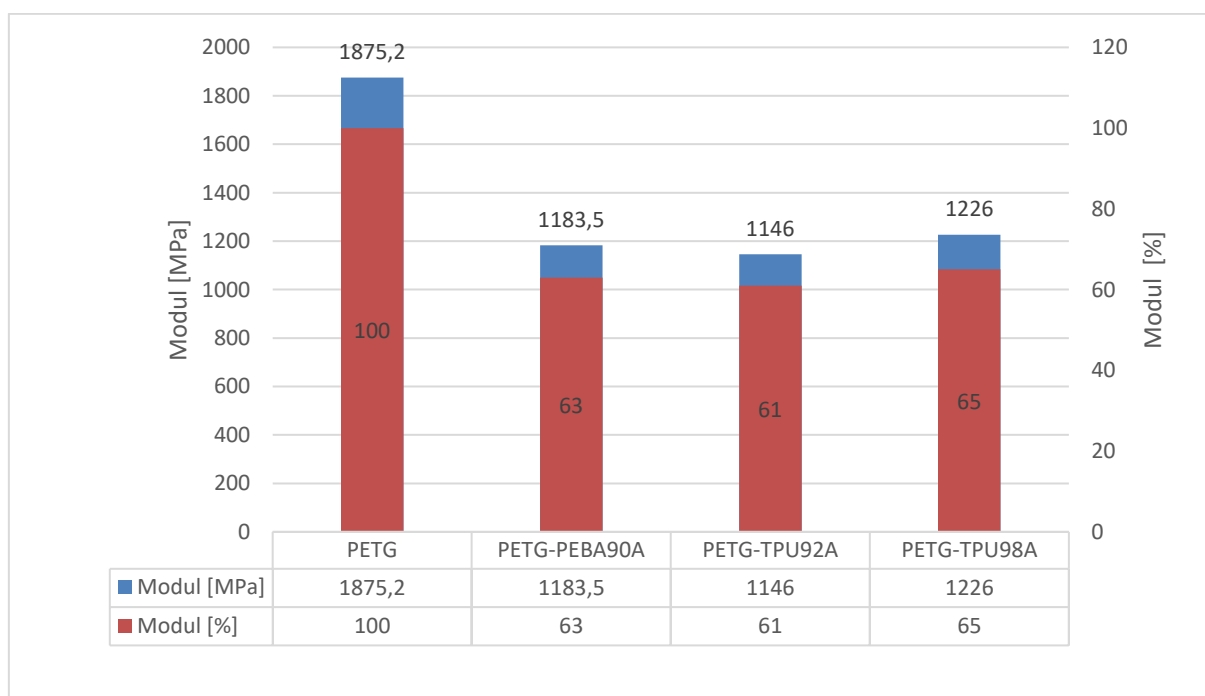
Obr. 34: Graf Youngova modulu PP a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 34 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP bylo naměřen modul 1327,5 MPa. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena hodnota modulu 810,9 MPa, což odpovídá 61 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PP.



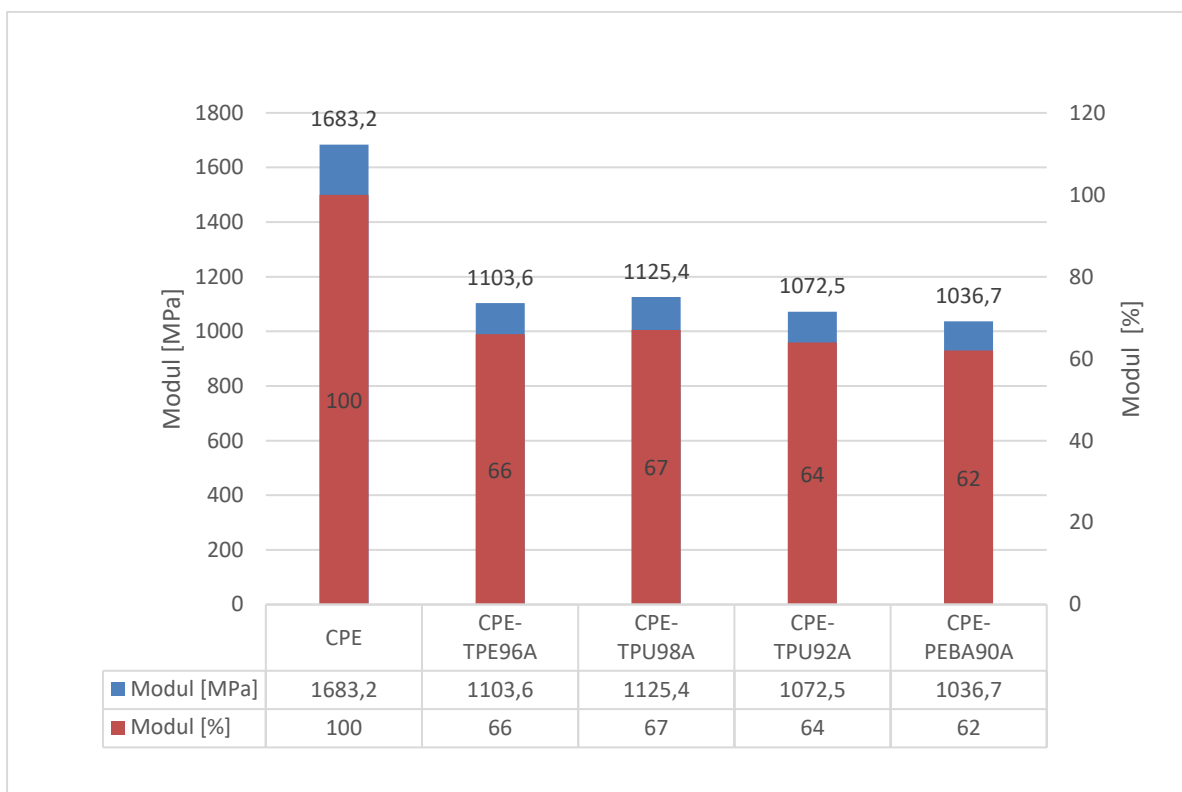
Obr. 35: Graf Youngova modulu ASA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 35 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z ASA bylo naměřen modul 2029,6 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku ASA – TPU98A, a to hodnoty 1406,9 MPa, což odpovídá 69 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného ASA. Nejnižší hodnoty modulu u sendviče bylo zjištěno u vzorku ASA – TPU92A, a to 1366,5 MPa, což odpovídá 67 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z ASA. Všechny sendviče obsahující ASA vykazují velmi podobné hodnoty modulu.



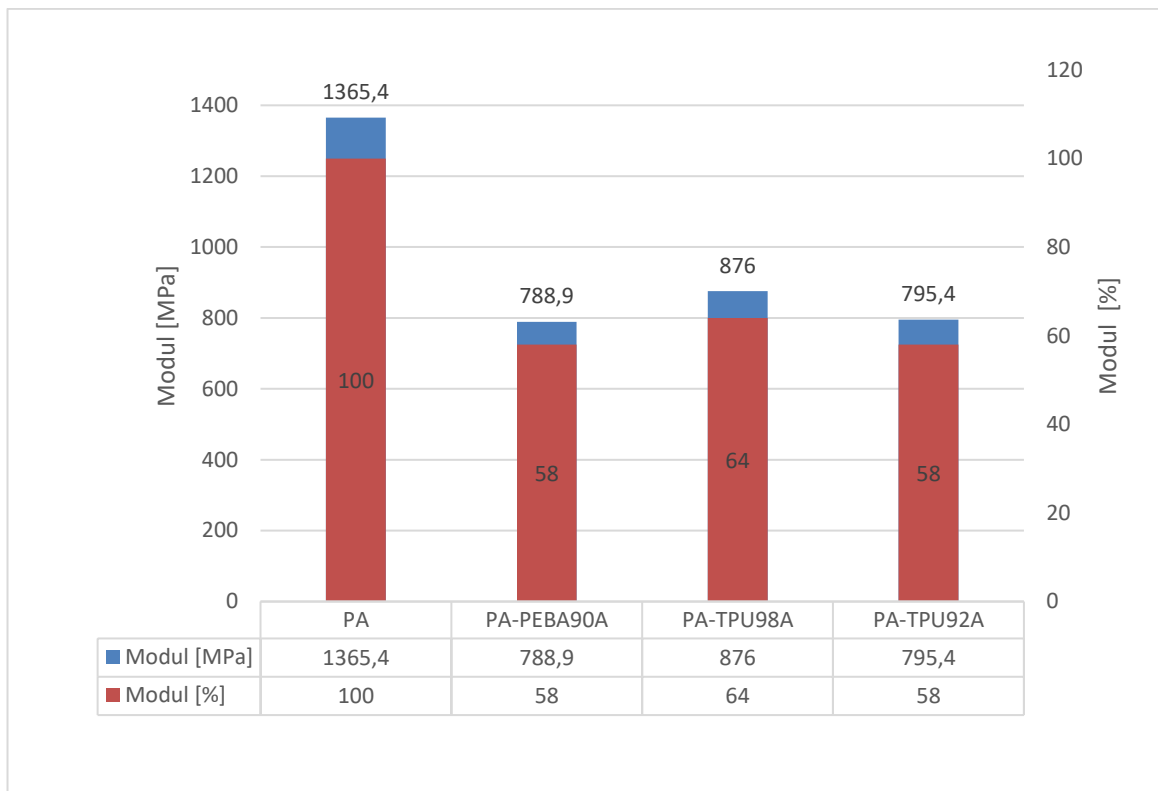
Obr. 36: Graf Youngova modulu PETG a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 36 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PETG bylo naměřen modul 1875,2 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku PETG – TPU98A, a to hodnoty 1226 MPa, což odpovídá 65 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PETG. Nejnižší hodnoty modulu u sendviče bylo dosaženo u vzorku PETG – TPU92A, a to 1146 MPa, což odpovídá 61 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PETG.



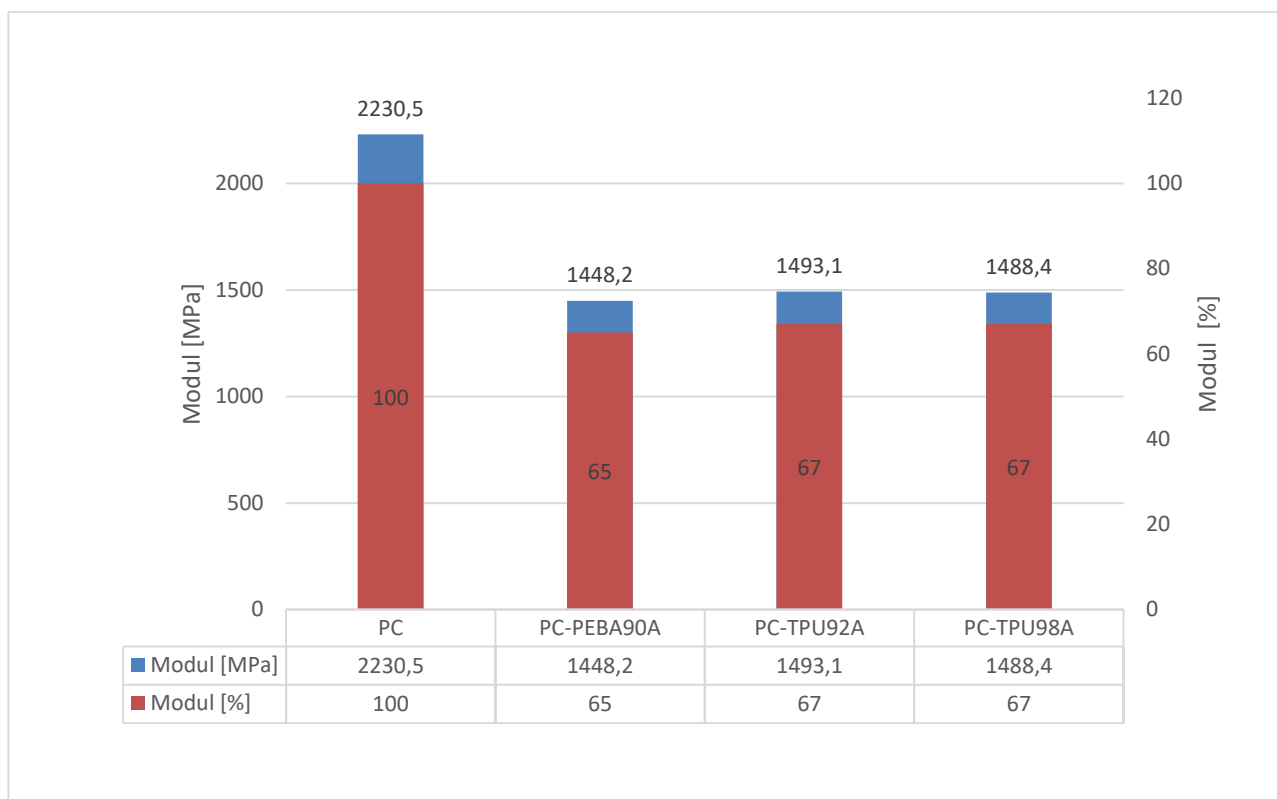
Obr. 37: Graf Youngova modulu CPE a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 37 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z CPE bylo naměřen modul 1683,2 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku CPE – TPU98A, a to hodnoty 1125,4 MPa, což odpovídá 67 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného CPE. Nejnižší hodnoty modulu u sendviče bylo dosaženo u vzorku CPE – PEBA90A, a to 1036,7 MPa, což odpovídá 62 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z CPE.



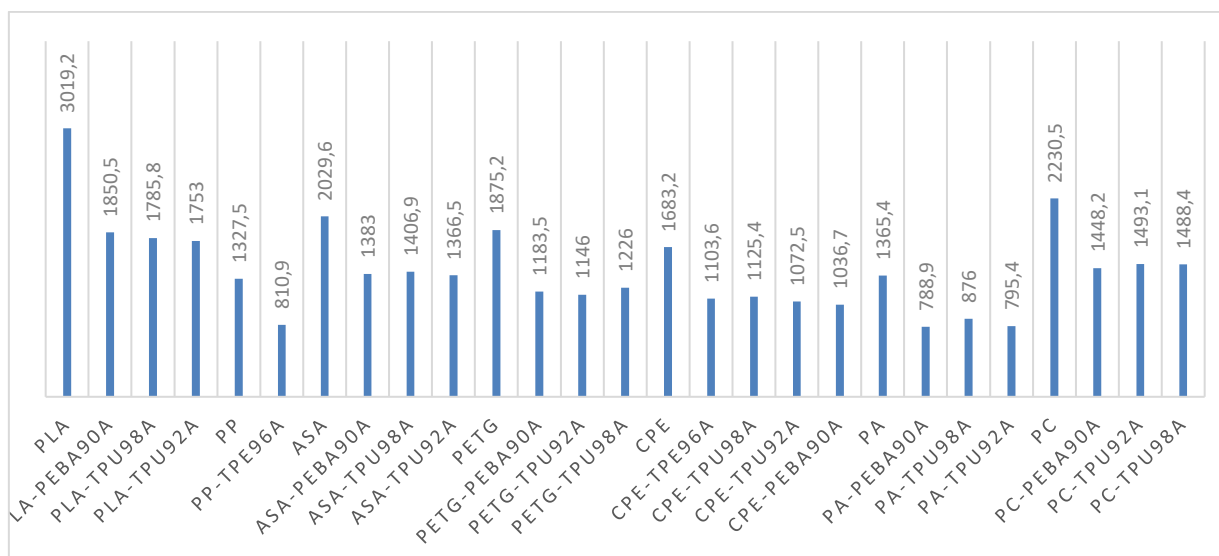
Obr. 38: Graf Youngova modulu PA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 38 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PA bylo naměřen modul 1365,4 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku PA – TPU98A, a to hodnoty 876 MPa, což odpovídá 64 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PA. Nejnižší hodnoty modulu u sendviče bylo dosaženo u vzorku PA – PEBA90A, a to 788,9 MPa, což odpovídá 58 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PA. Velmi podobné hodnoty bylo dosaženo i u posledního vzorku PA – TPU92A.



Obr. 39: Graf Youngova modulu PC a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 39 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC bylo naměřen modul 2230,5 MPa. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyššího modulu dosaženo u vzorku PC – TPU92A, a to hodnoty 1493,1 MPa, což odpovídá 67 % hodnoty modulu naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PC. Velmi podobných hodnot modulu bylo dosaženo také u vzorku PC – TPU92A. Nejnižší hodnoty modulu u sendviče bylo dosaženo u vzorku PC – PEBA90A, a to 1448,2 MPa, což odpovídá 65 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PC.



Obr. 40: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] u všech vzorků

Srovnání všech hodnot maximálního modulu při tahové zkoušce je uvedeno v grafu na Obr. 40. 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.

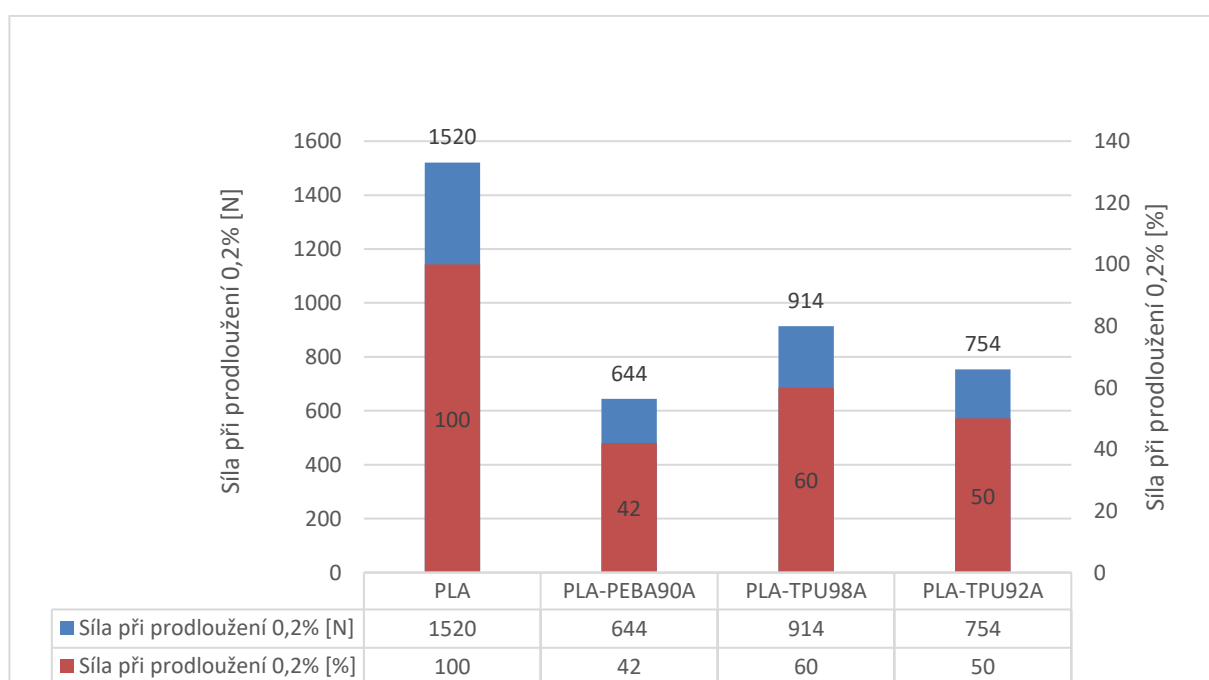
Sendvič PLA – PEBA90A vykazoval nejvyšší hodnoty modulu ze všech sendvičů a to 1880,5 MPa. Nejnižší hodnoty byly naopak naměřeny u sendviče PA – PEBA90A a to 788,9 MPa. Jedná se o překvapivé zjištění, že obou extrémů bylo dosaženo u sendvičů obsahující stejný flexibilní filament PEBA90A.

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.

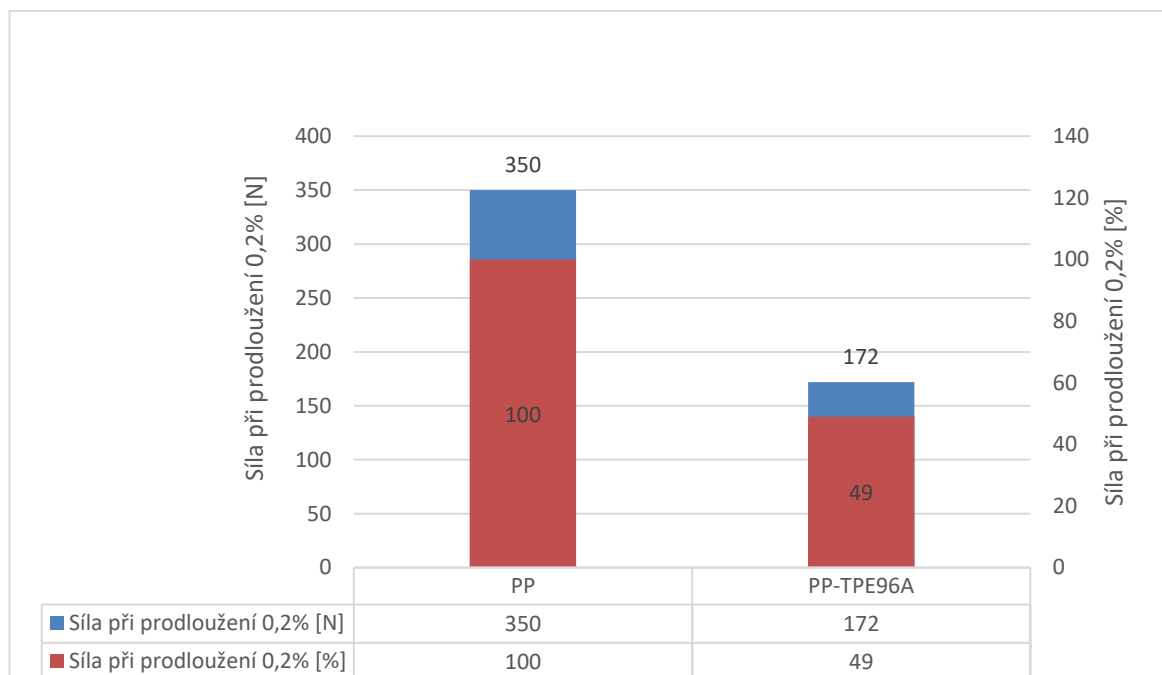
Síla při prodloužení o 0,2 %

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 a červenými sloupci poměrné hodnoty potřebné síly k prodloužení vzorku o 0,2 % přepočítané na procenta (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k síle potřebné k prodloužení referenčního vzorku ze samostatného rigidního materiálu o 0,2 %.



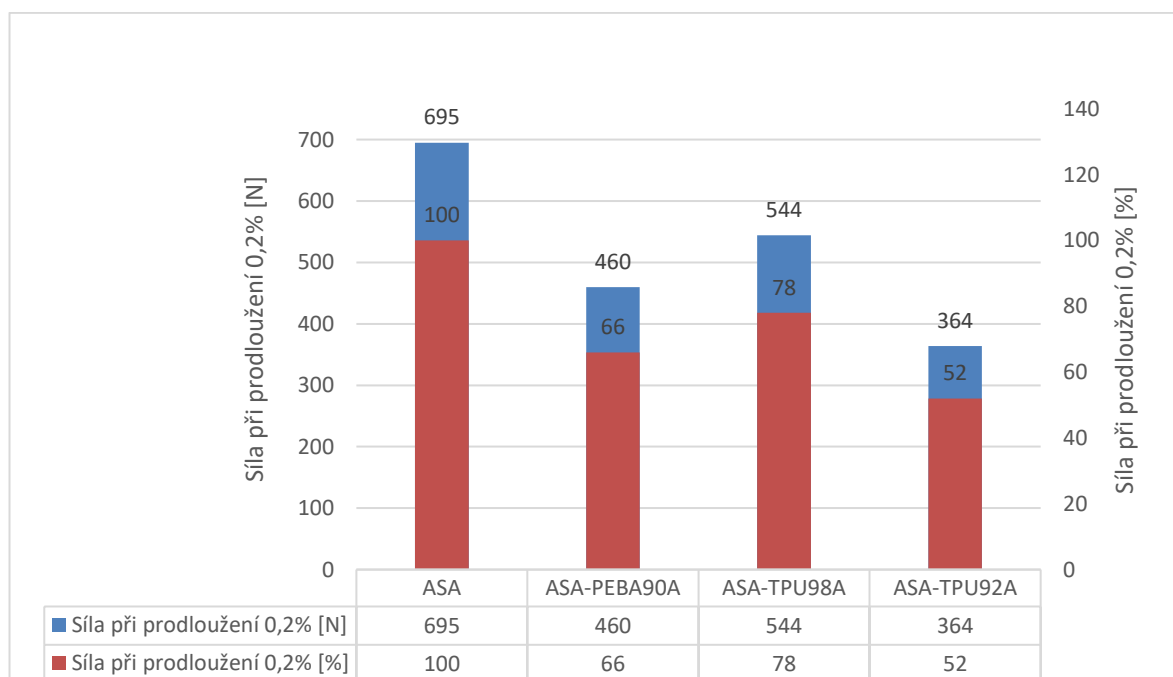
Obr. 41: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PLA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 41 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 1520 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku PLA – TPU98A, a to hodnoty 914 N, což odpovídá 60 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PLA. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku PLA – PEBA90A a to 644 N, což odpovídá 42 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z PLA.



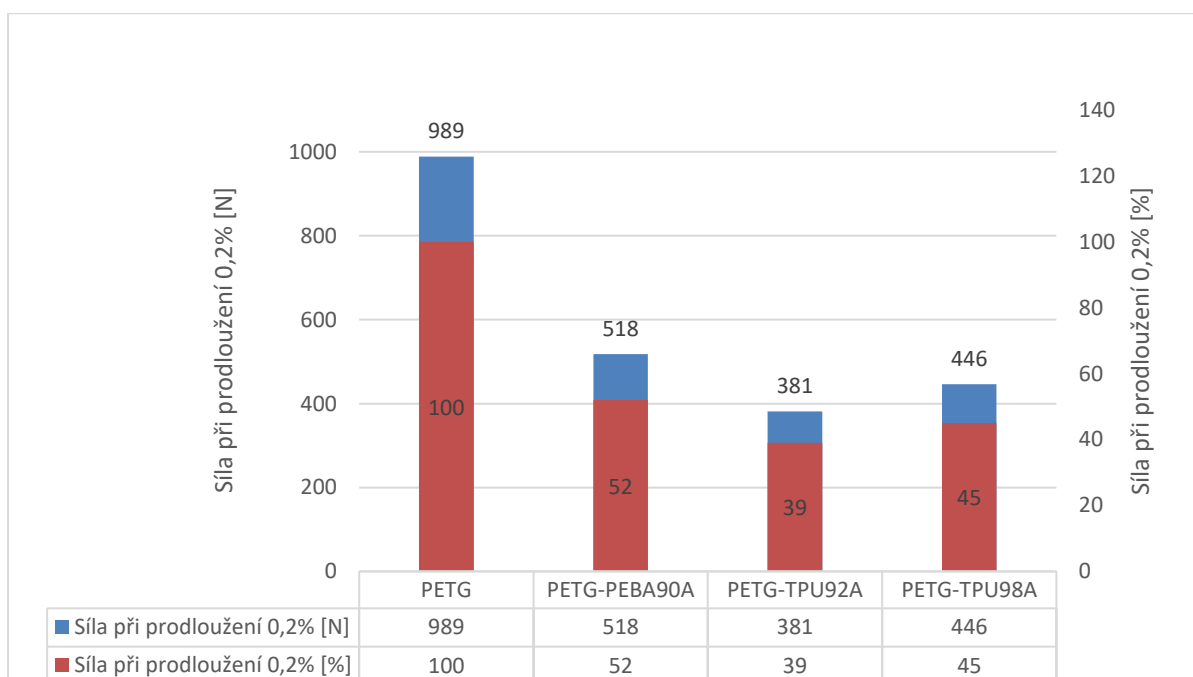
Obr. 42: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PP a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 42 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 350 N. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena síly potřebná k prodloužení o 0,2 % 172 N, což odpovídá 49 % síly potřebné k prodloužení referenčního vzorku o 0,2 %.



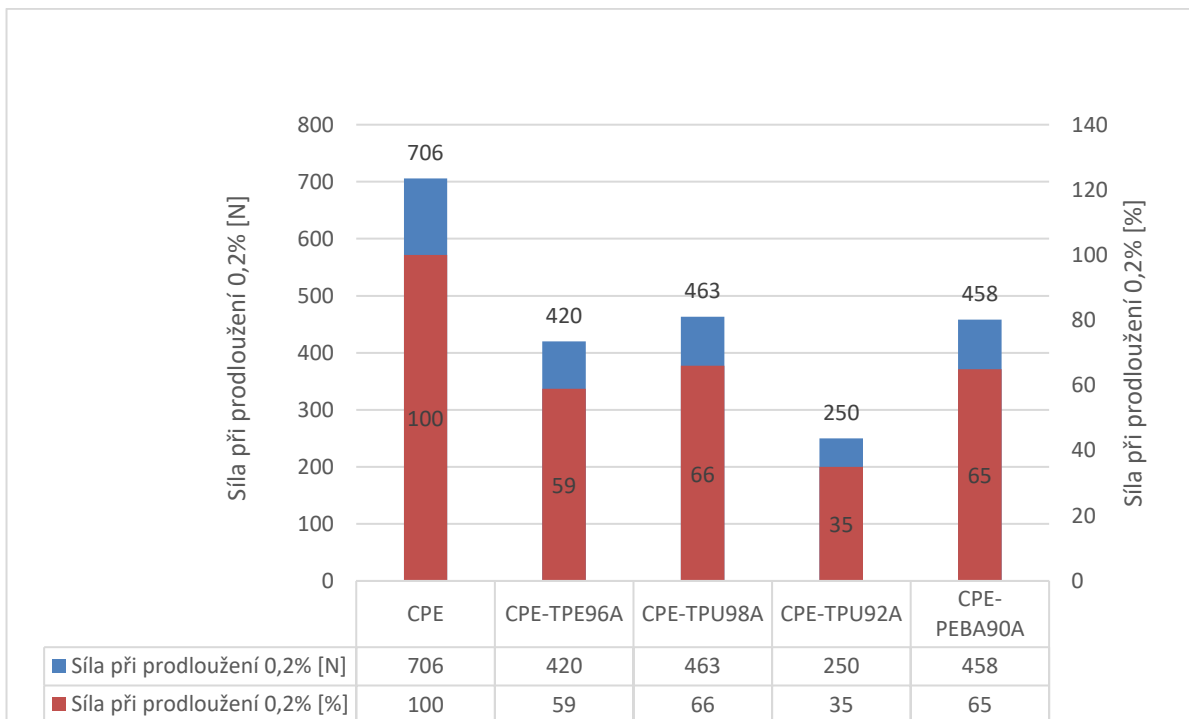
Obr. 43: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u ASA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 43 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z ASA byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 965 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku ASA – TPU98A, a to hodnoty 544 N, což odpovídá 68 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného ASA. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku ASA – TPU92A a to 364 N, což odpovídá 52 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z PLA.



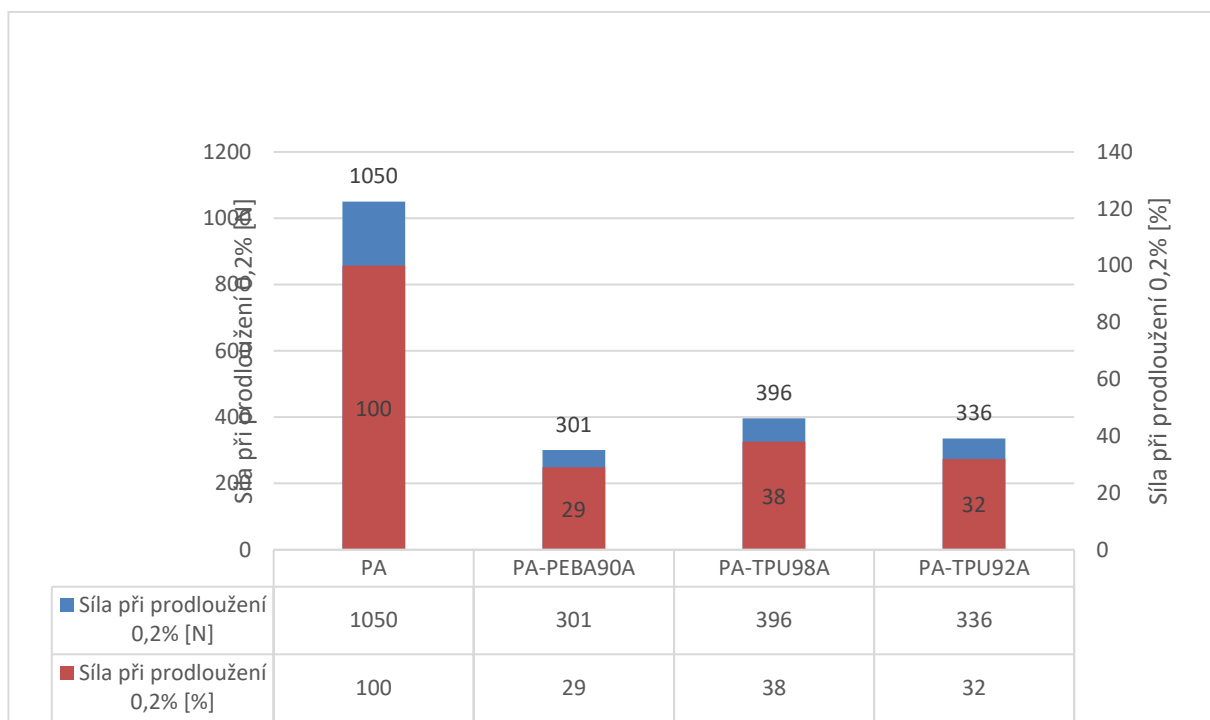
Obr. 44: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PETG a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 44 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PETG byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 989 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku PETG – PEBA90A, a to hodnoty 518 N, což odpovídá 52 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PETG. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku PETG – TPU92A a to 381 N, což odpovídá 39 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z PETG.



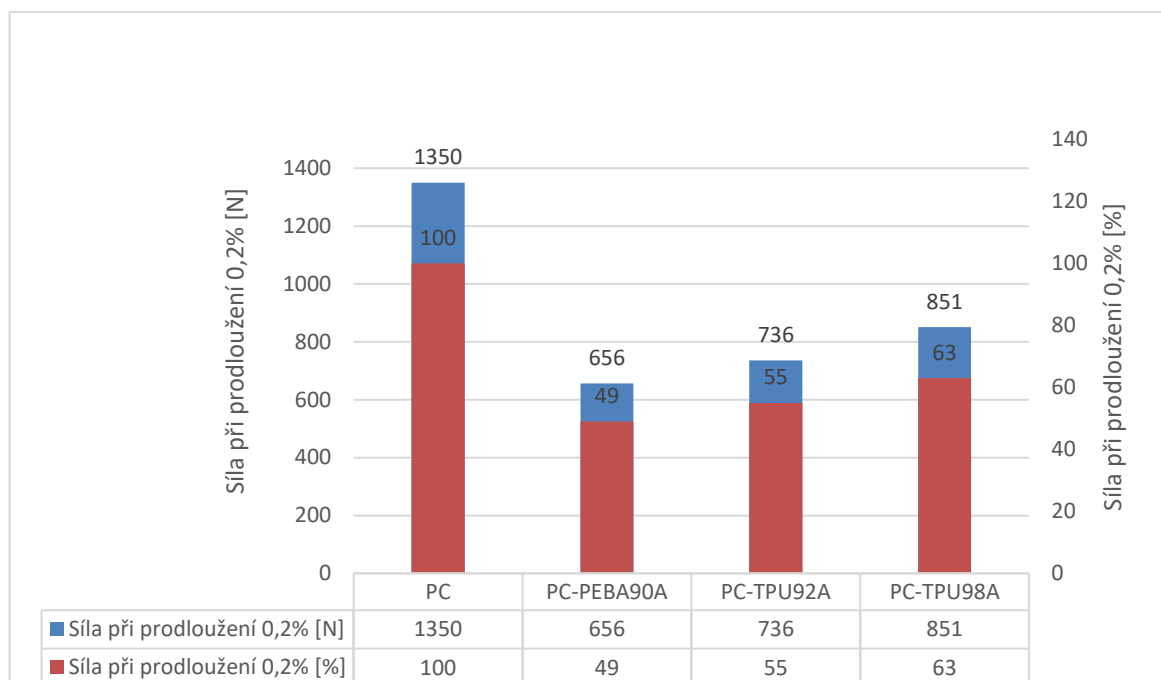
Obr. 45: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u CPE a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 45 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z CPE byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 706 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku CPE – TPU98A, a to hodnoty 463 N, což odpovídá 66 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného CPE. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku CPE – TPU92A a to 250 N, což odpovídá 35 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z CPE.



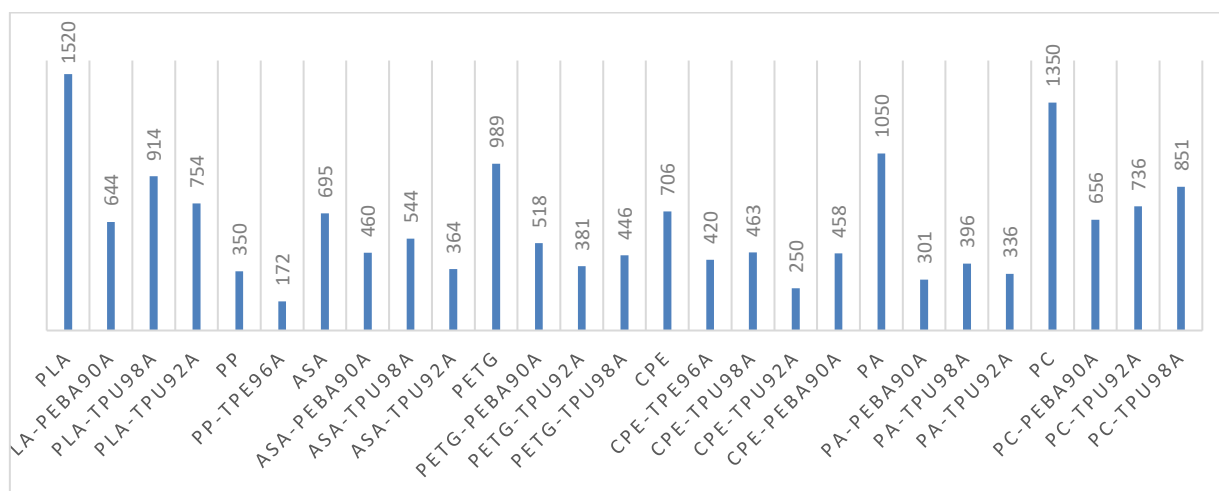
Obr. 46: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 46 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PA byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 1050 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku PA – TPU98A, a to hodnoty 396 N, což odpovídá 38 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PA. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku PA – PEBA90A a to 301 N, což odpovídá 29 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z PA.



Obr. 47: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2% u PC a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 47 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC byla naměřena síla potřebná k prodloužení o 0,2 % 1350 N. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší síly potřebné k prodloužení o 0,2 % dosaženo u vzorku PC – TPU98A, a to hodnoty 851 N, což odpovídá 63 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % naměřeného u referenčního vzorku ze samostatného PC. Nejnižší hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u sendviče bylo dosaženo u vzorku PC – PEBA90A a to 656 N, což odpovídá 49 % hodnoty síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u referenčního vzorku z PC.



Obr. 48: 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. 40. 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. Nejnižší 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 %.

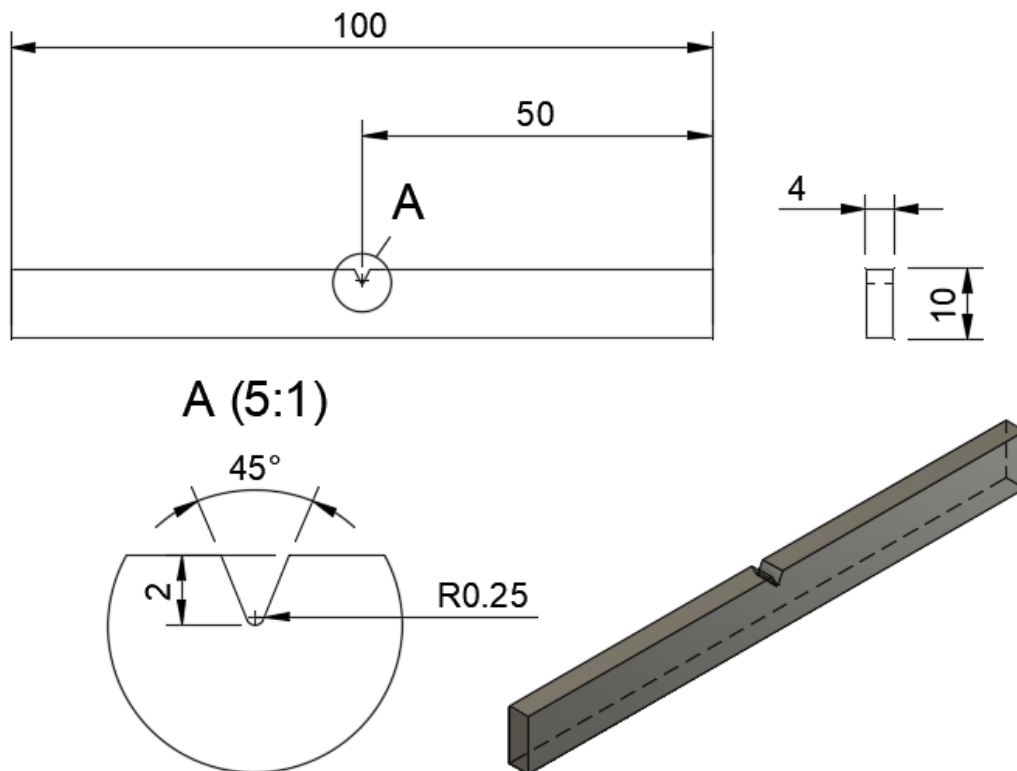
5.5 Rázová zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy

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.

5.5.1 Příprava zkoušky

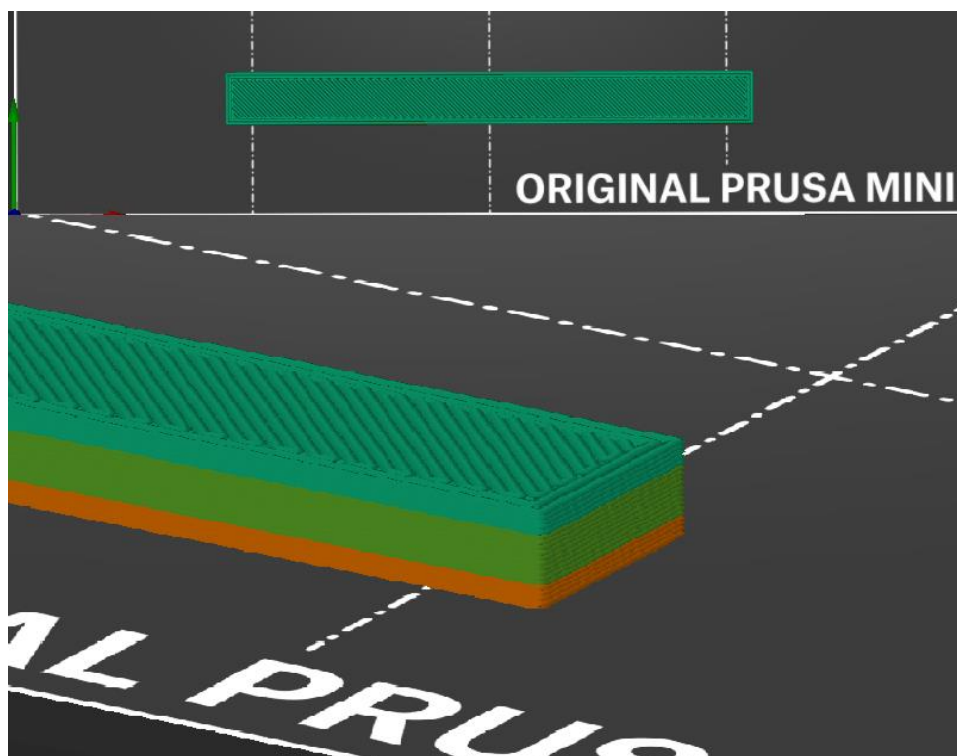
Vzorky pro zkoušku vrubové houževnatosti byly připraveny podle ČSN EN ISO 179-1, tedy opatřeny vrubem. Jedná se o hranoly o délce 100 mm, šířce 10 mm a tloušťce 4 mm.

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

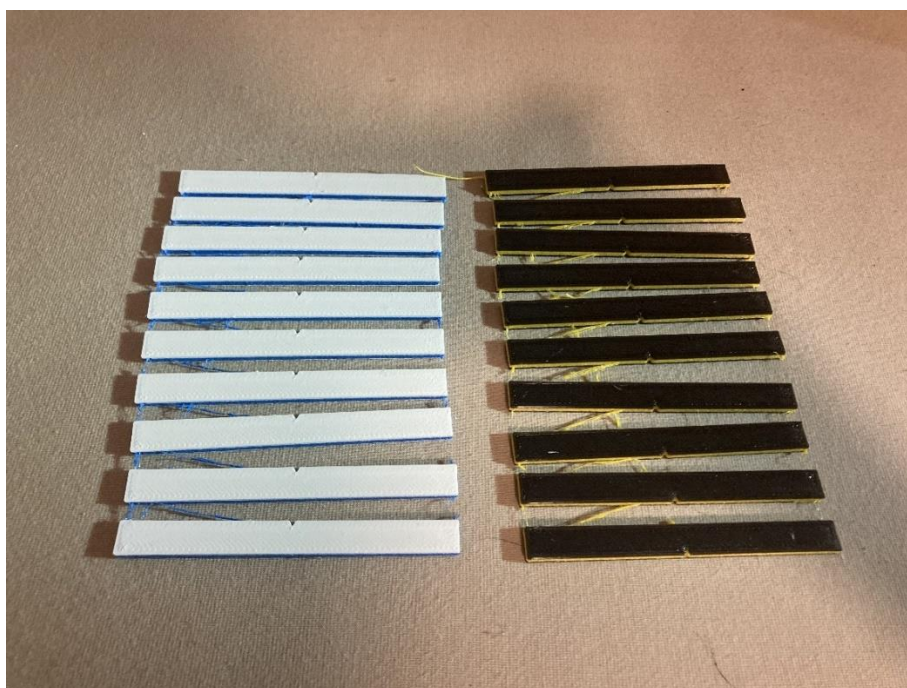


Obr. 49: Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1

Orientace zkušebních 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.



Obr. 50: Pohled na orientaci výrobku na tiskové podložce v programu Prusa Slic3r (nahore), detail na rozložení vrstev sendviče (dole)



Obr. 51: Vytisknuté zkušební vzorky pro rázovou zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1



Obr. 52: Zkušební zařízení Zwick/Roell HIT5.5P

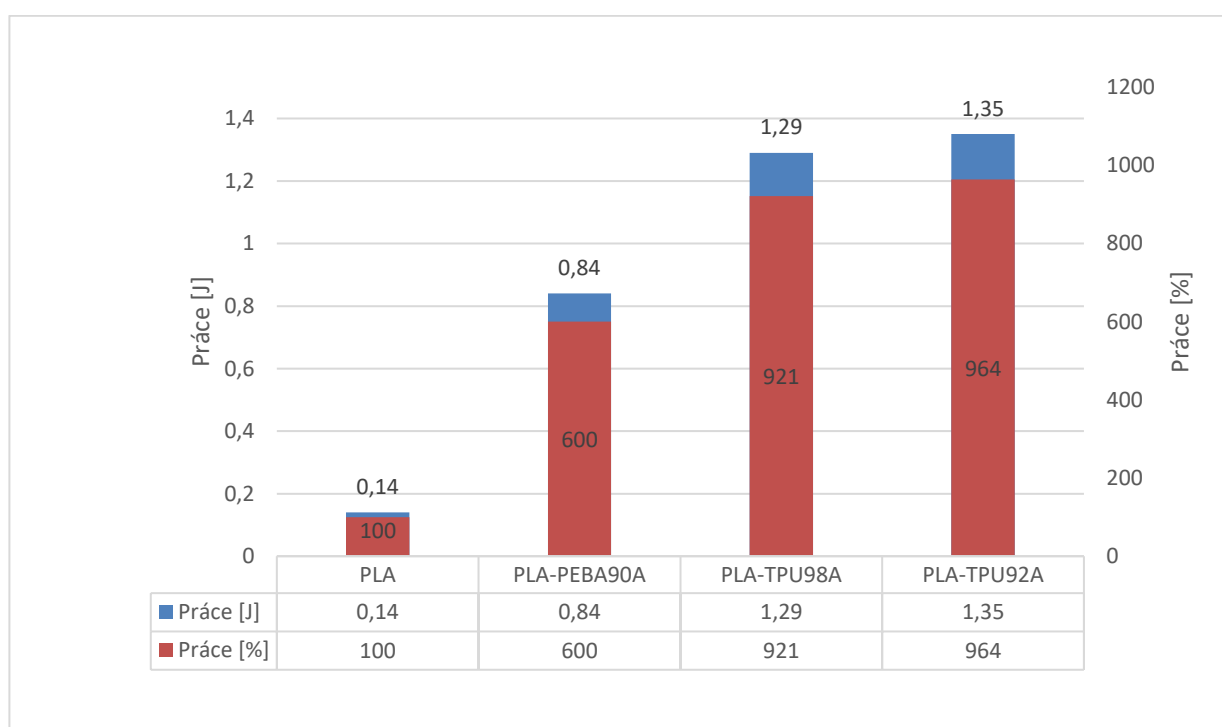


Obr. 53: Průběh rázové zkoušky vrubové houževnatosti Charpy

5.5.1 Výsledky rázové zkoušky vrubové houževnatosti Charpy

Práce

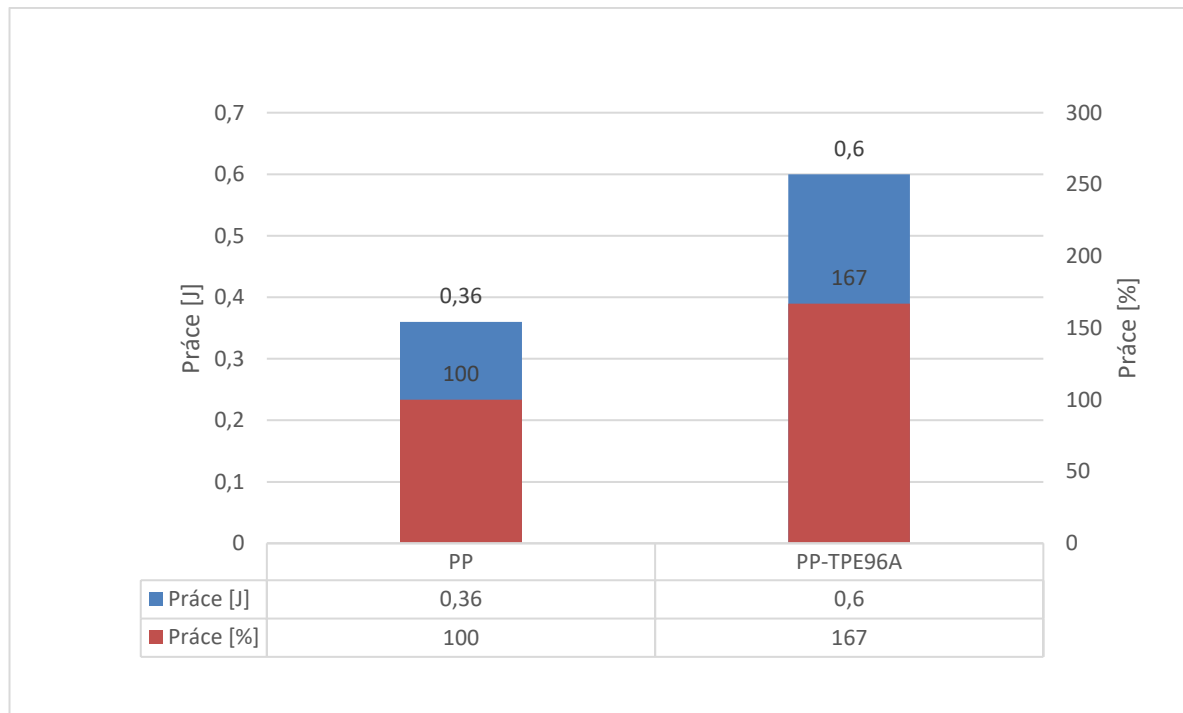
Během rázové zkoušky vrubové houževnatosti metodou Charpy byla zkoumanou veličinou práce v J nutná k přeražení zkušební vzorku opatřeného vrubem. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci práci nutnou k přeražení vzorku v J (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů. Červené sloupce znázorňují poměrné hodnoty naměřené práce v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximální práci, která byla naměřena u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



Obr. 54: Graf práce nutné k přeražení vzorku PLA a jeho sendvičů

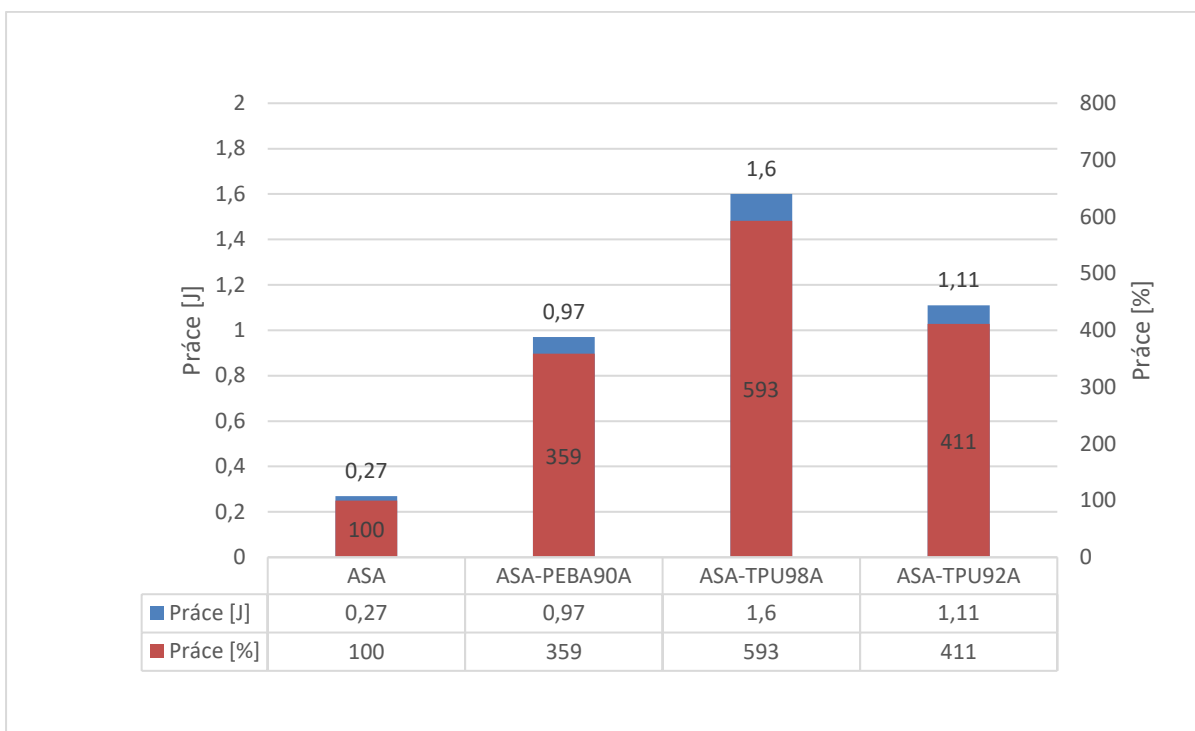
Z grafu na Obr. 53 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,14 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku PLA – TPU92A, a to hodnoty 1,85 J, což odpovídá 964 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného PLA. Nejnižší hodnoty práce nutné

k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku PLA – PEBA90A, a to 0,84 J, což odpovídá 600 % hodnoty práce u referenčního vzorku z PLA.



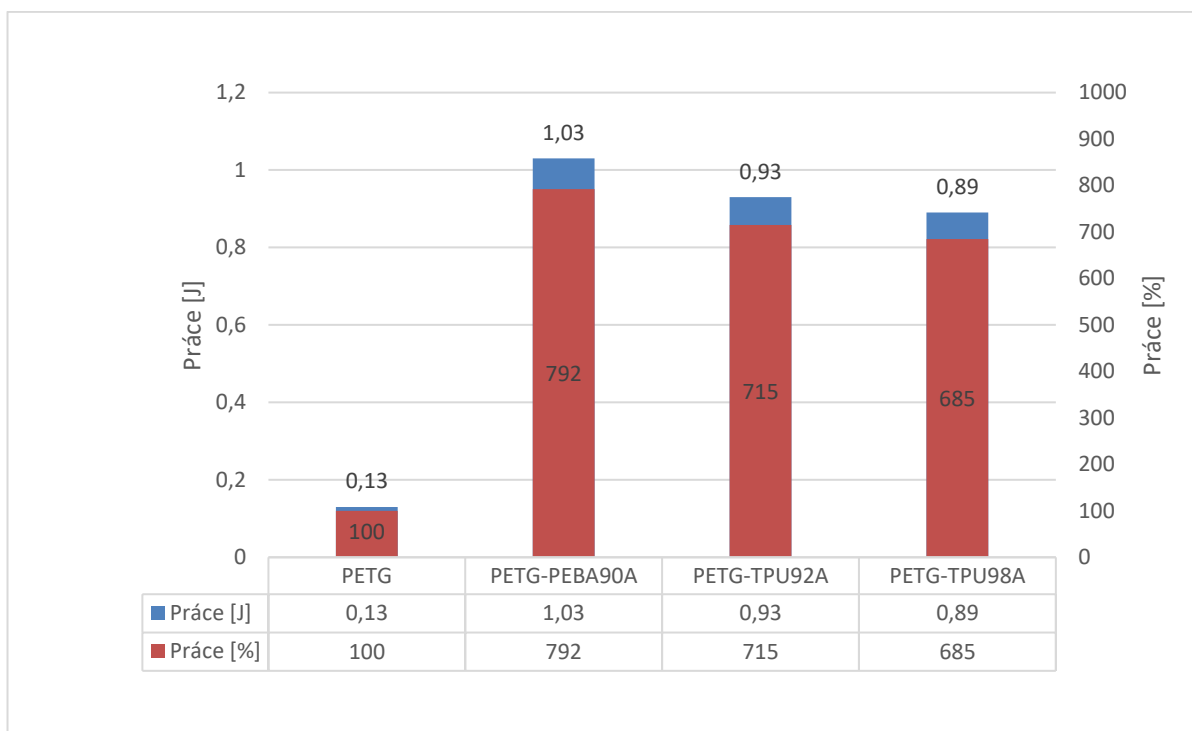
Obr. 55: Graf práce nutné k přeražení vzorku PP a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 54 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,36 J. U sendviče PP – TPE96A byla změřena práce 0,6 J, což odpovídá 167 % oproti hodnotám práce změřené u referenčního vzorku z PP.



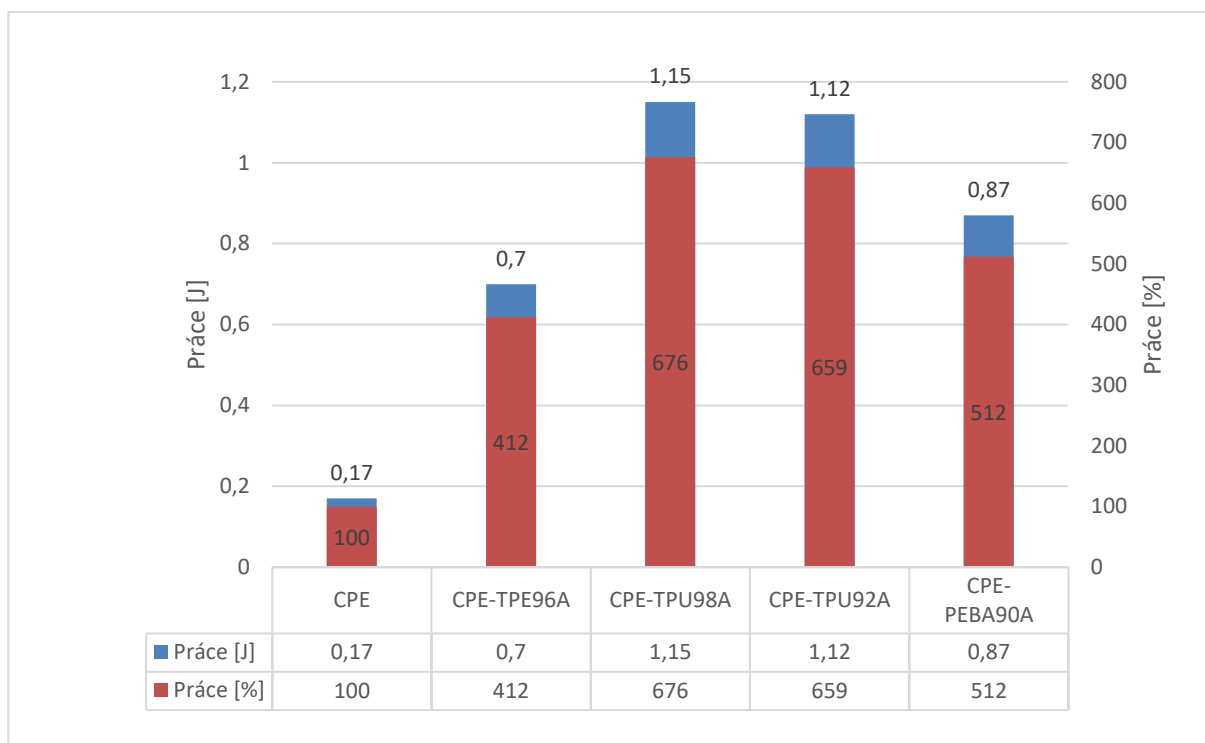
Obr. 56: Graf práce nutné k přeražení vzorku ASA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 55 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z ASA byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,27 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku ASA – TPU98A, a to hodnoty 1,6 J, což odpovídá 593 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného ASA. Nejnižší hodnoty práce nutné k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku ASA – PEBA90A, a to 0,97 J, což odpovídá 359 % hodnoty práce u referenčního vzorku z ASA.



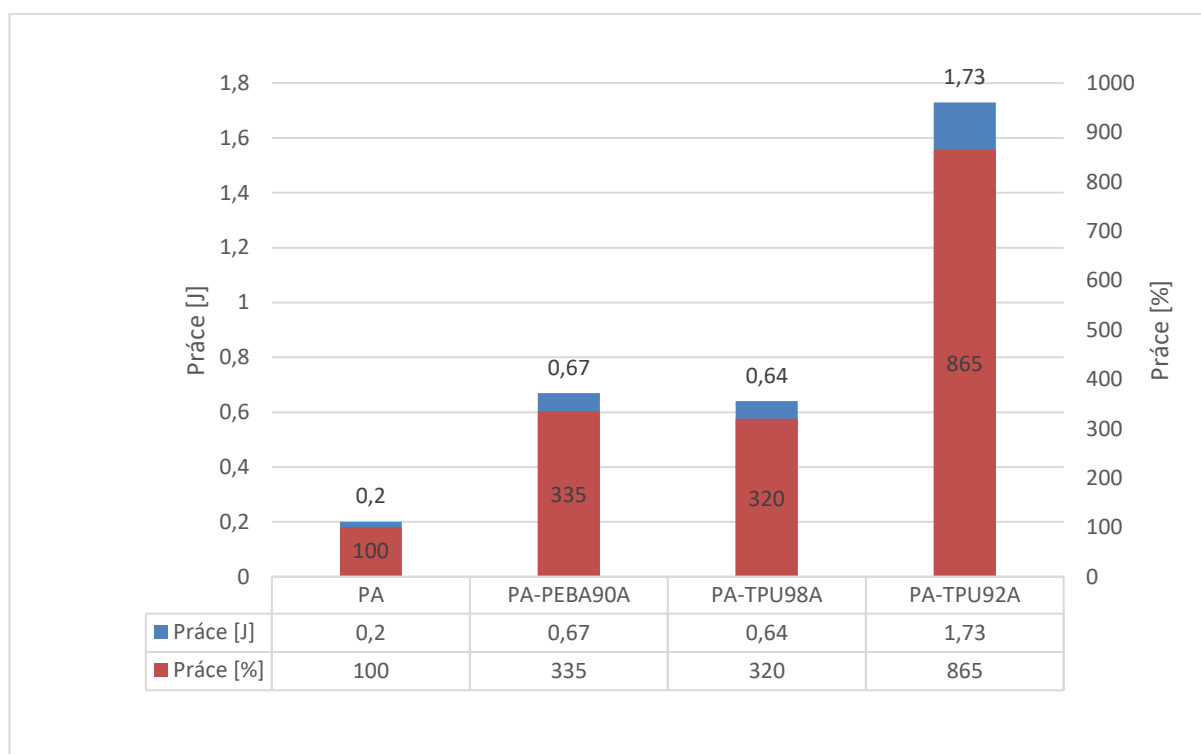
Obr. 57: Graf práce nutné k přeražení vzorku PETG a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 56 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PETG byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,13 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku PETG – PEBA90A, a to hodnoty 1,03 J, což odpovídá 792 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného PETG. Nejnižší hodnoty práce nutné k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku PETG – TPU98A, a to 0,89 J, což odpovídá 685 % hodnoty práce u referenčního vzorku z PETG.



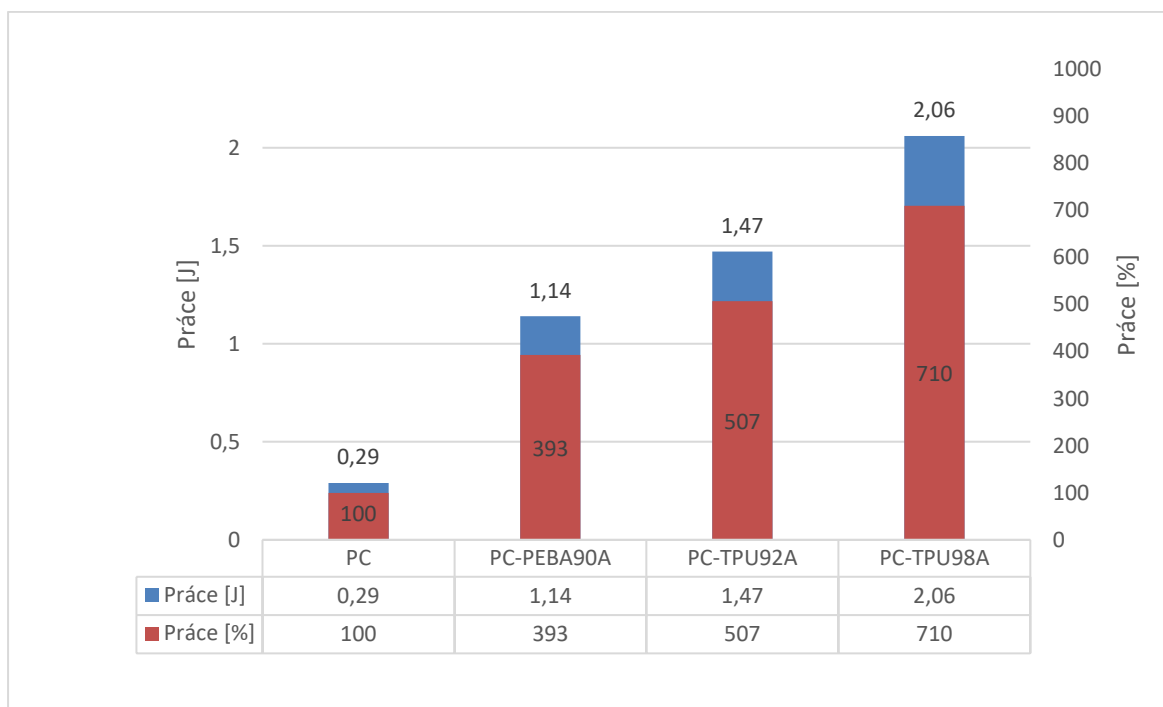
Obr. 58: Graf práce nutné k přeražení vzorku CPE a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 57 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z CPE byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,17 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku CPE – TPU98A, a to hodnoty 1,15 J, což odpovídá 676 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného CPE. Nejnižší hodnoty práce nutné k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku CPE – TPE96A a to 0,7 J, což odpovídá 412 % hodnoty práce u referenčního vzorku z CPE.



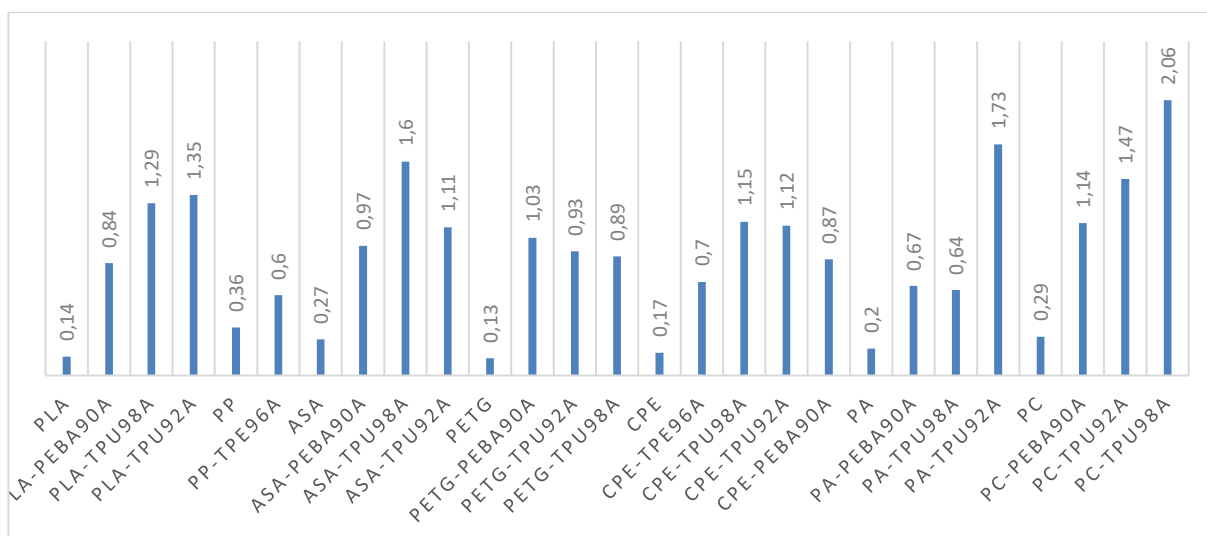
Obr. 59: Graf práce nutné k přeražení vzorku PA a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 58 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PA bylo naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,2 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku PA – TPU92A, a to hodnoty 1,73 J, což odpovídá 865 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného PA. Nejnižší hodnoty práce nutné k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku PA –TPU98A, a to 0,64 J, což odpovídá 320 % hodnoty práce u referenčního vzorku z PA.



Obr. 60: Graf práce nutné k přeražení vzorku PC a jeho sendvičů

Z grafu na Obr. 59 lze vidět že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC byla naměřena práce nutná k přeražení vzorku 0,29 J. Z jednotlivých sendvičů bylo nejvyšší práce potřebné k přeražení vzorku dosaženo u vzorku PC – TPU98A, a to hodnoty 2,06 J, což odpovídá 710 % hodnoty práce naměřené u referenčního vzorku ze samostatného PC. Nejnižší hodnoty práce nutné k přeražení vzorku u sendviče bylo dosaženo u vzorku PC – PEBA90A, a to 1,14 J, což odpovídá 393 % hodnoty práce u referenčního vzorku z PC.



Obr. 61: Graf srovnání práce [J] nutné k přeražení u všech vzorků

Srovnání všech hodnot práce nutné k přeražení zkušebního vzorku je uvedeno v grafu na Obr. 40. 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 zkušebního 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 zkušebního 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.

5.6 Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče

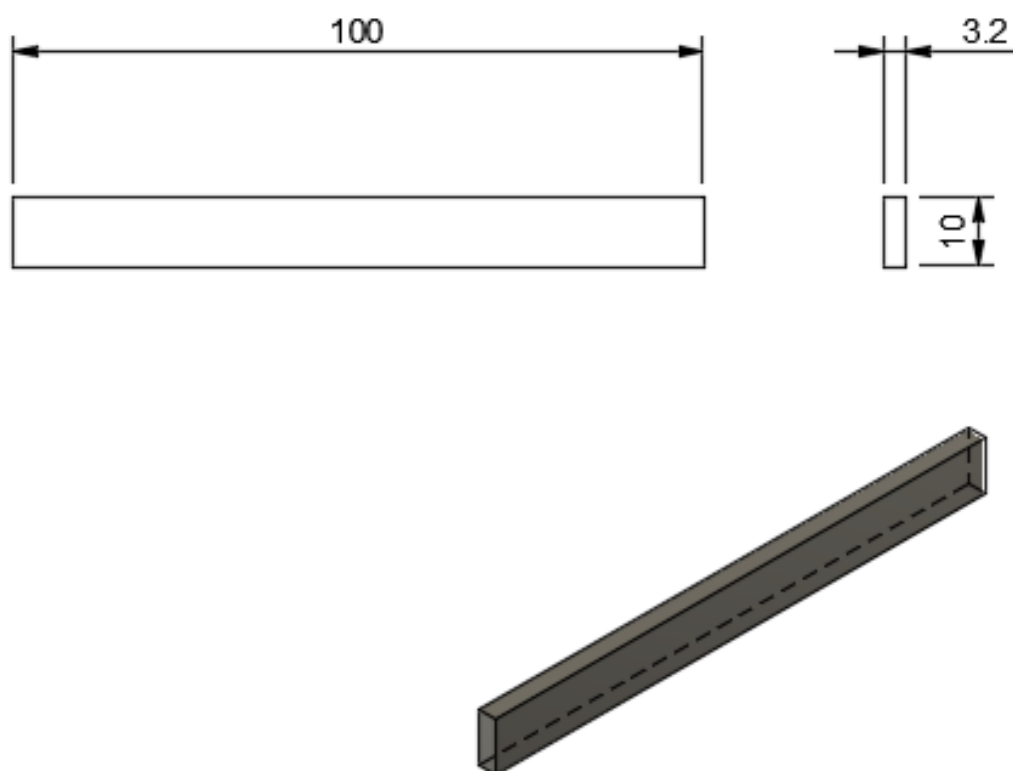
Tahová zkouška kolmo na vrstvy sendviče byla navrhnutá a provedena z důvodu zjištění změny vlastností při aplikování tahové síly kolmo na tisknuté vrstvy, což umožnilo získat data o pevnosti spoje mezi jednotlivými materiály. Zkoumanými veličinami bylo napětí, modul a síla nutné k prodloužení o 0,2 % 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.

5.6.1 Příprava zkoušky

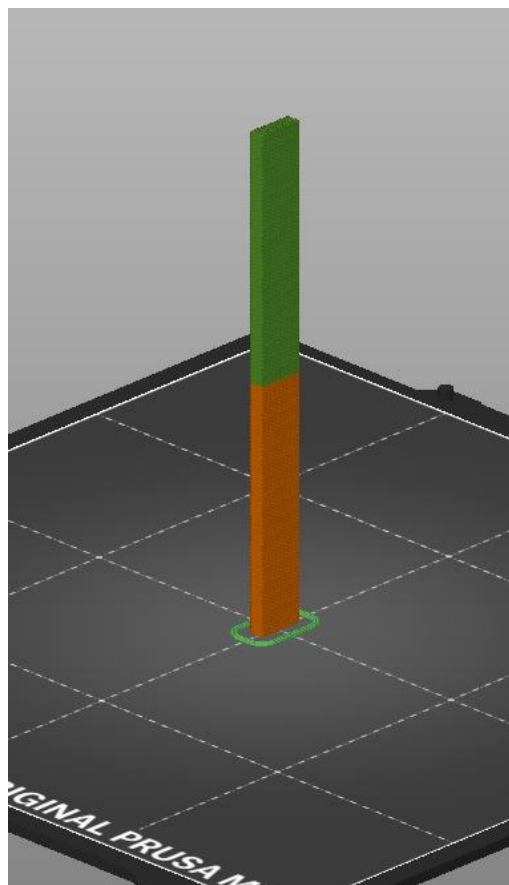
Vzorky pro instrumentovanou tahovou zkoušku, při níž byla zkoumána pevnost spojení mezi vrstvy sendviče byly navrženy jako tělesa ve tvaru kvádrů o rozměrech 100 x 10 x 3,2 mm.

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.

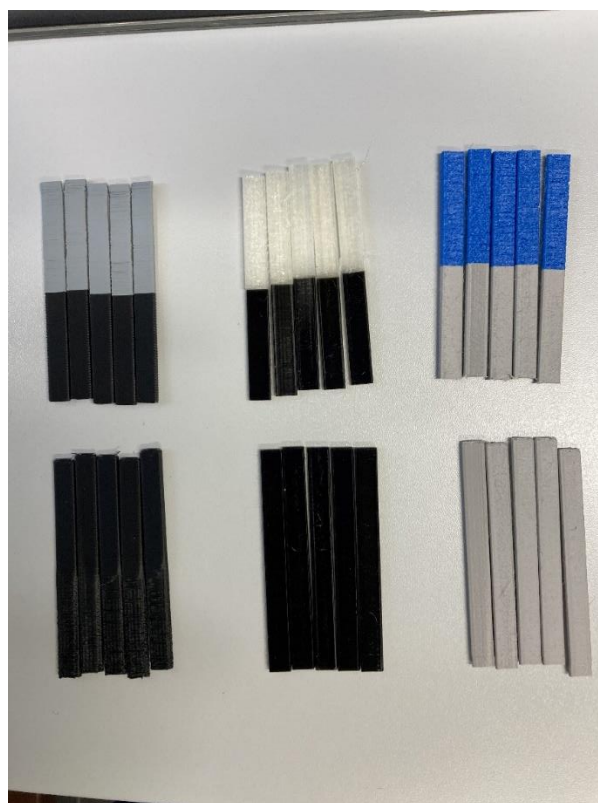
Pro potřeby zkoušky bylo použito zkušební zařízení Zwick Materialprüfung 1456, osazené pneumatickými čelistmi. Podmínkou pro ukončení zkoušky byl nastaven propad napětí o 80 %.



Obr. 62 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy sendviče



Obr. 63 Orientace vzorku na tiskové podložce včetně zobrazení rozložení vrstev sendviče v programu Prusa Slic3r



Obr. 64: Vytisknuté zkušební vzorky pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy

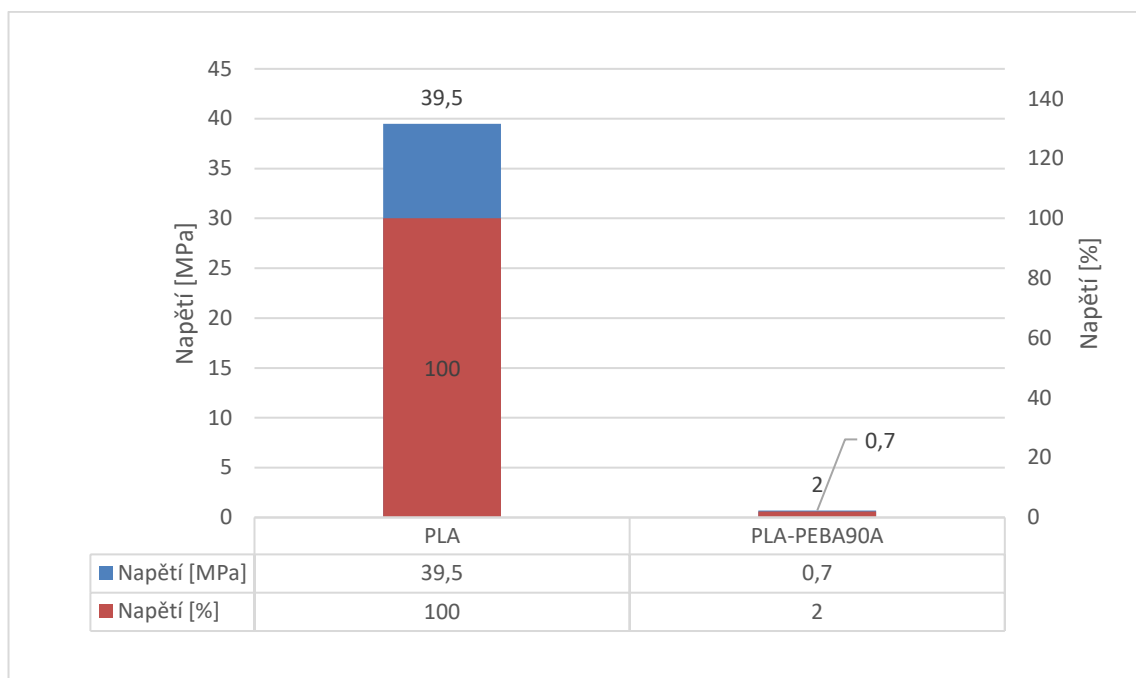


Obr. 65: Průběh tahové zkoušky kolmo na vrstvy

5.6.2 Výsledky tahové zkoušky kolmo na vrstvy sendviče

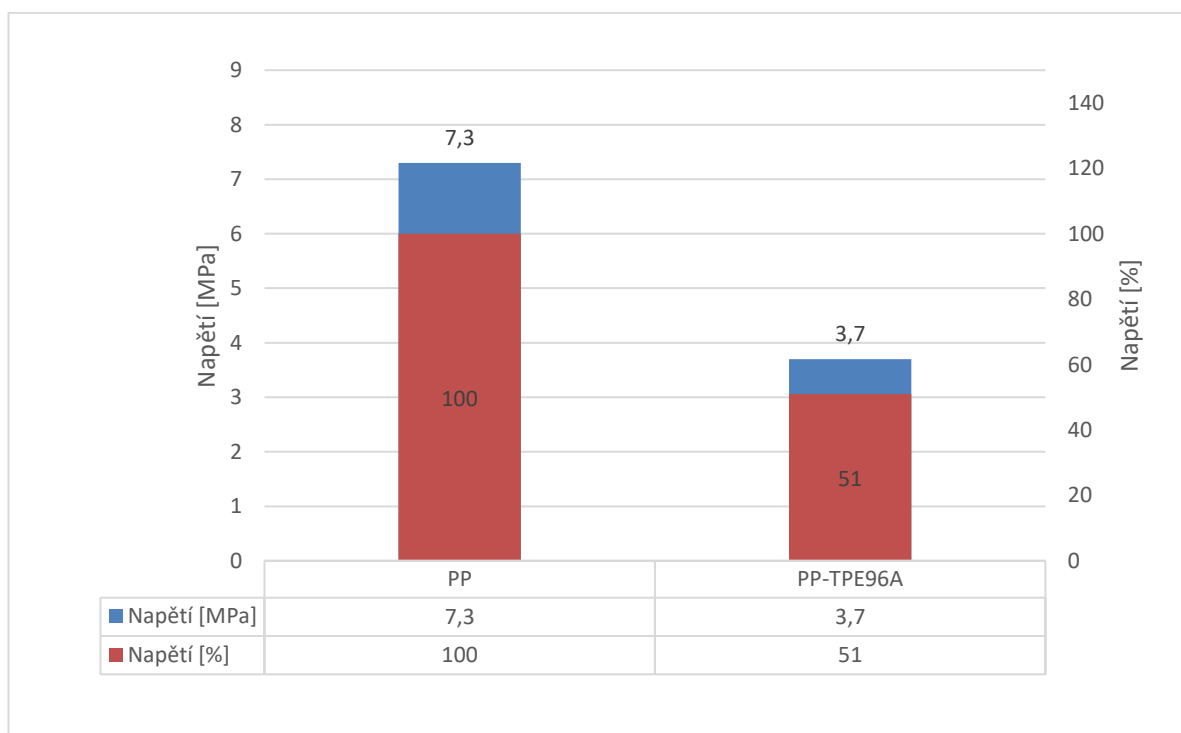
Napětí

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. Červené sloupce reprezentují poměrné hodnoty maximálního naměřeného napětí v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximálnímu napětí, které bylo naměřeno u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



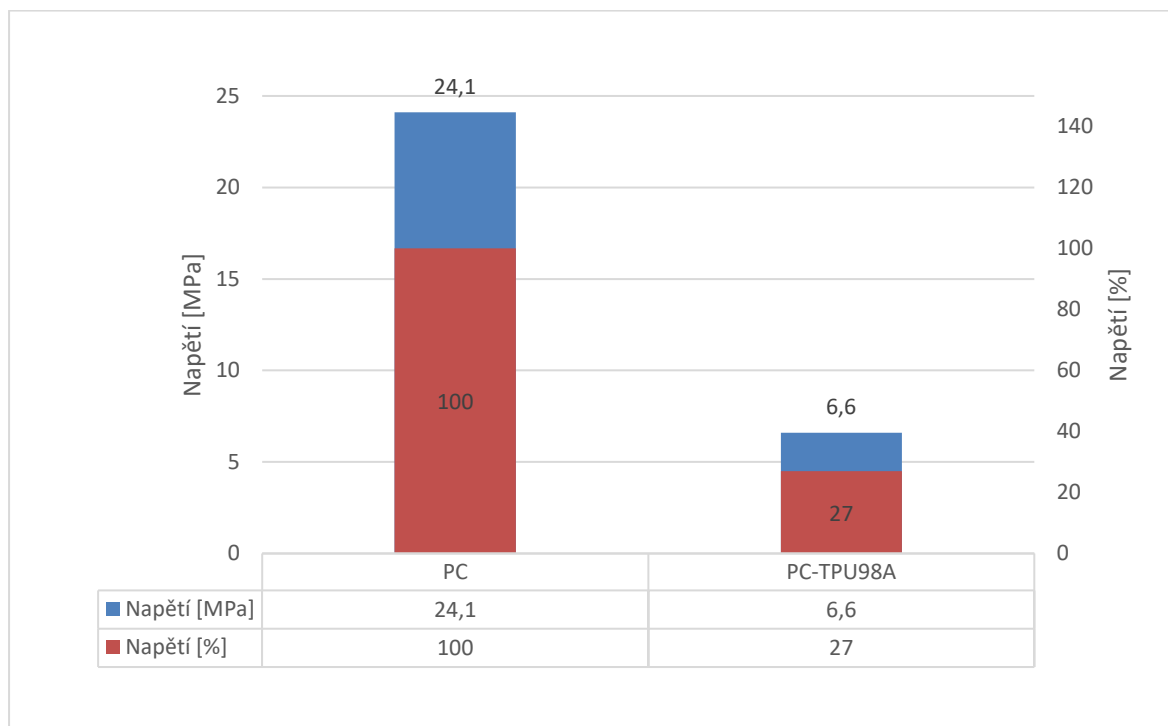
Obr. 66: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 65 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA bylo naměřeno napětí 39,5 MPa. U sendviče PLA – PEBA90A byla naměřena hodnota maximálního napětí 0,7 MPa, což odpovídá pouze 2 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PLA.



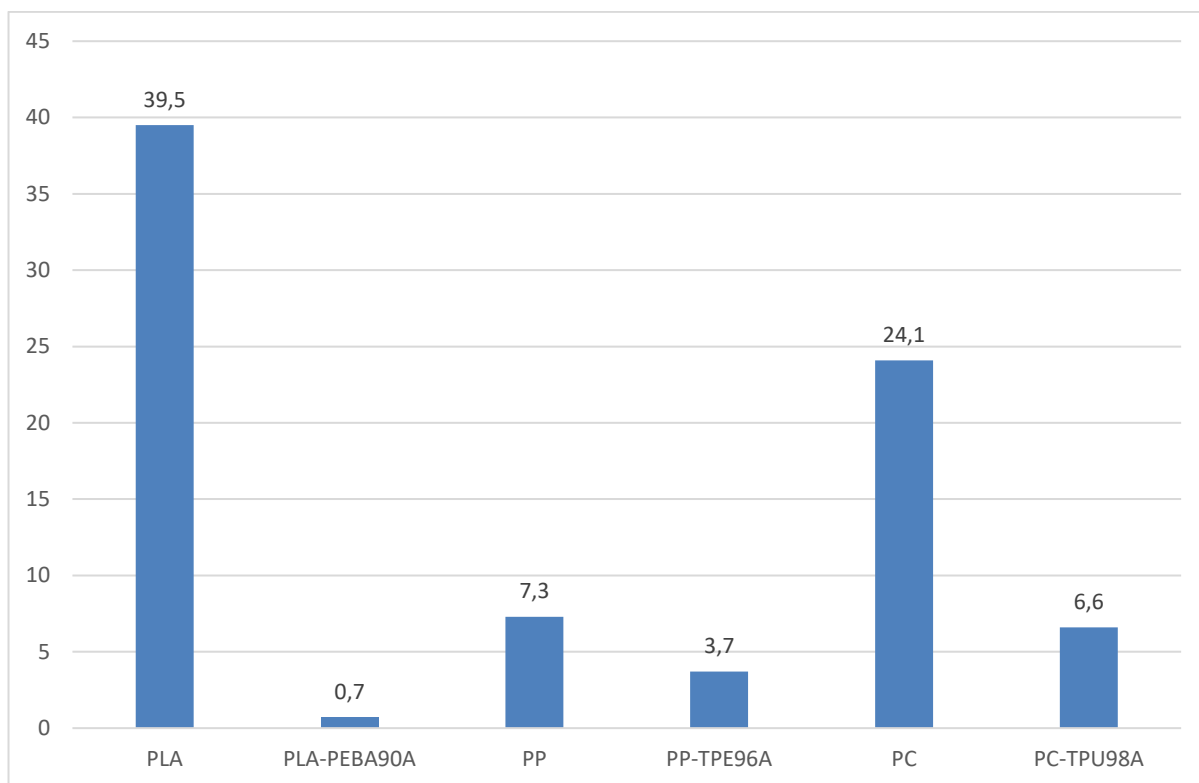
Obr. 67: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 66 lze vyčíst, že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP bylo naměřeno napětí 7,3 MPa. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena hodnota maximálního napětí 3,7 MPa, což odpovídá 51 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PP.



Obr. 68: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 67 lze vyčíst, že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC bylo naměřeno napětí 24,7 MPa. U sendviče PC – TPU98A byla naměřena hodnota maximálního napětí 6,6 MPa, což odpovídá 27 % hodnoty napětí u referenčního vzorku z PC.



Obr. 69: 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. 68.

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.

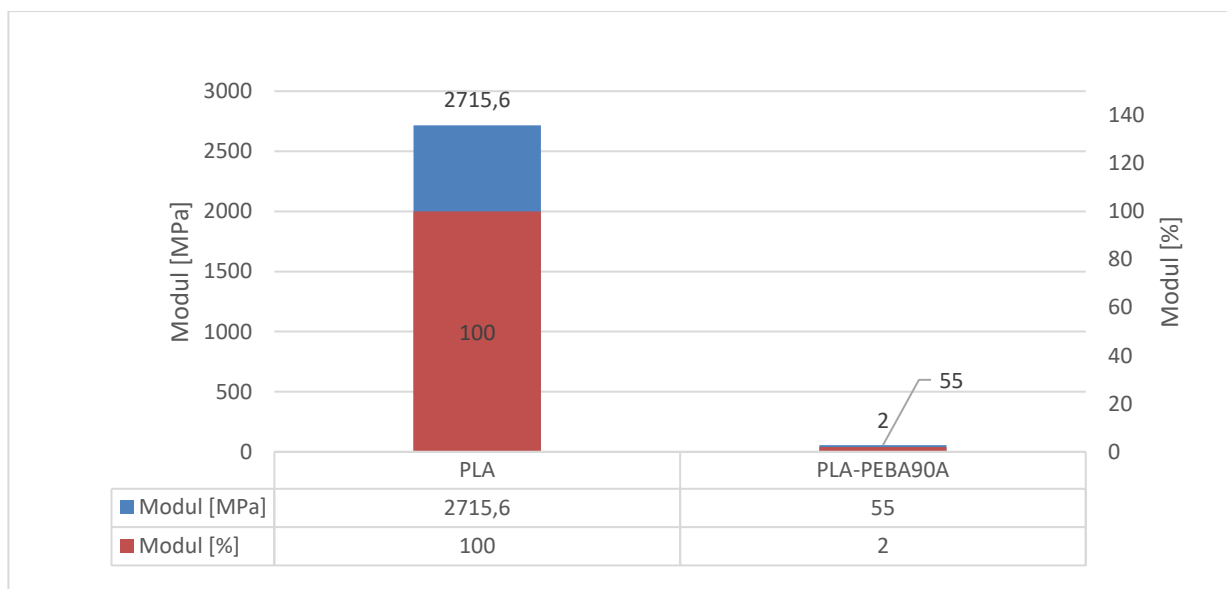
Z pohledu poměrného napětí vůči napětí u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 51%. Zajímavostí je, že u některých zkušebních vzorků došlo k přetržení v oblasti flexibilního materiálu TPE96A, a ne v oblasti spoje mezi flexibilním a rigidním materiálem (Obr. 64).

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

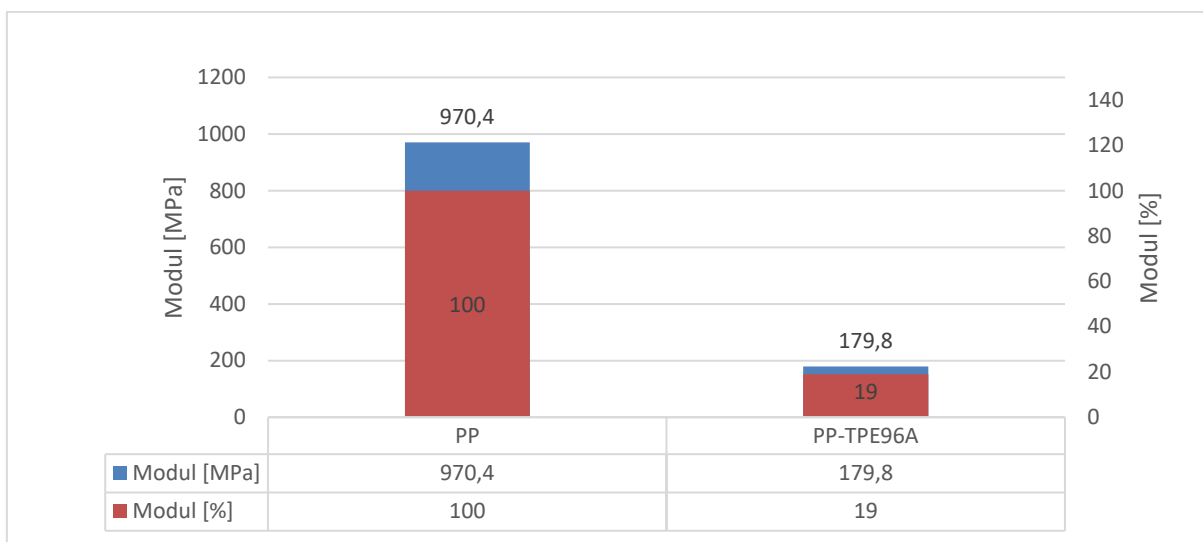
Další zkoumanou veličinou během tahové zkoušky kolmo na vrstvy byl Youngův modul, který zkoušený vzorek prokáže. Data v níže uvedených grafech vyjadřují

modrými sloupci maximální modul v MPa (levá svislá osa) naměřená jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu, tak i u jednotlivých sendvičů. Červené sloupce reprezentují poměrné hodnoty maximálního naměřeného modulu v procentech (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k maximálnímu modulu, který byl naměřen u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu.



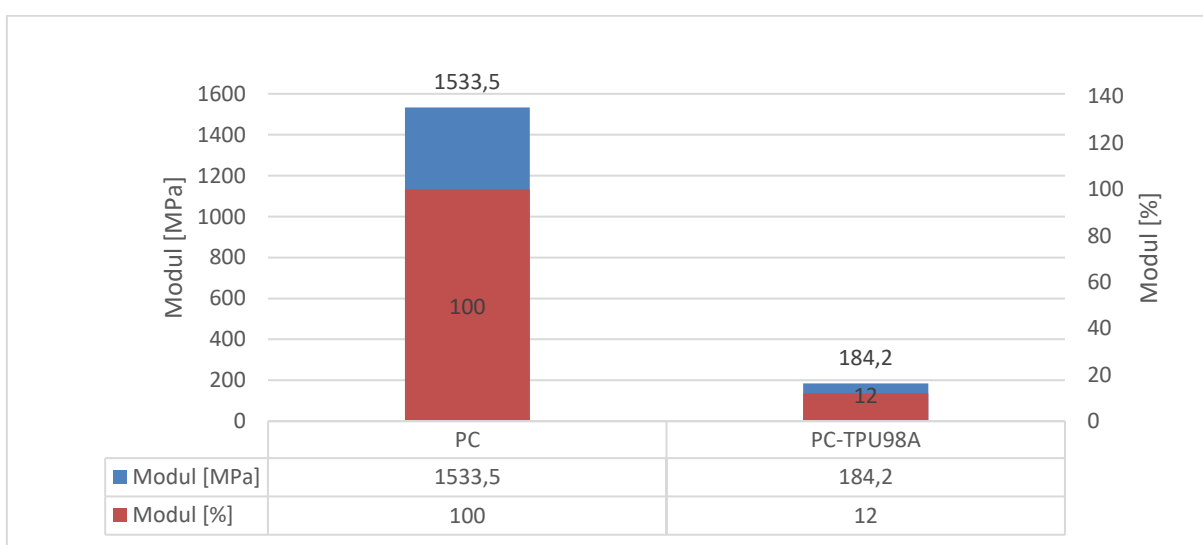
Obr. 70: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 69 lze vyčíst, že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byl naměřen modul 2715,6 MPa. U sendviče PLA – PEBA90A byla naměřena hodnota modulu 55 MPa, což odpovídá pouze 2 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PLA.



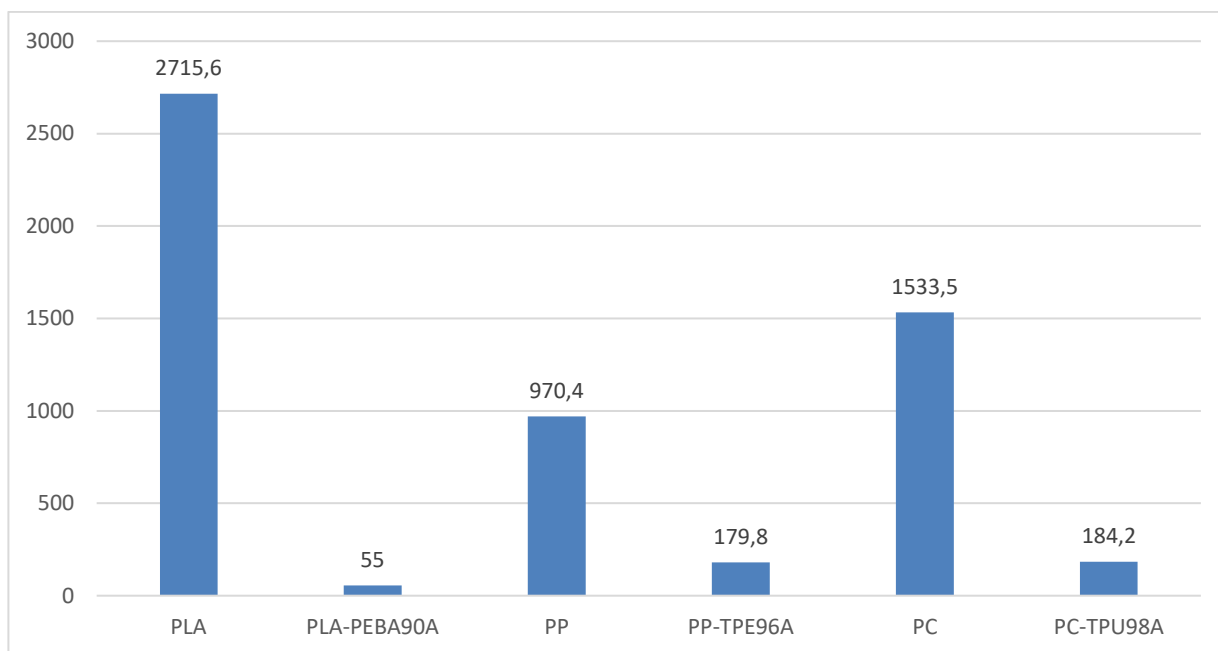
Obr. 71: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 70 lze vyčíst, že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP byl naměřen modul 970,4 MPa. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena hodnota maximálního modulu 179,8 MPa, což odpovídá pouze 19 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PP.



Obr. 72: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 71 lze vyčíst, že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC byl naměřen modul 1533,5 MPa. U sendviče PC – TPU98A byla naměřena hodnota maximálního modulu 184,2 MPa, což odpovídá pouze 12 % hodnoty modulu u referenčního vzorku z PP.



Obr. 73: 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. 72.

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.

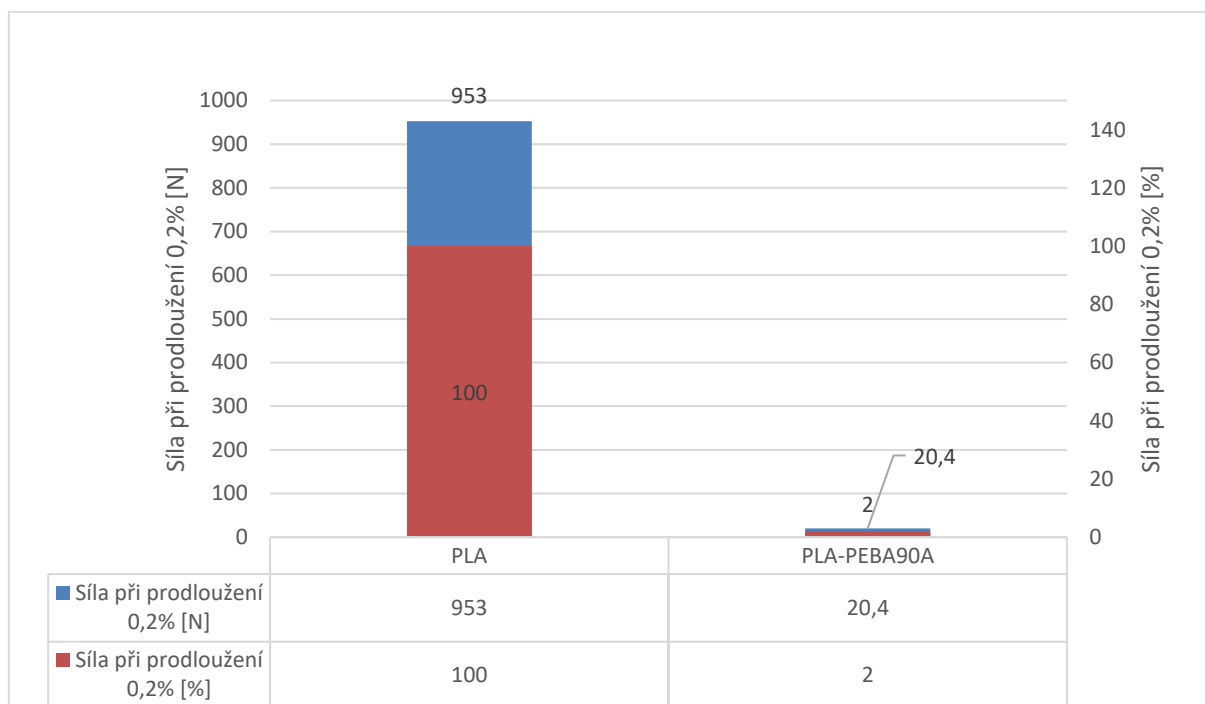
Z pohledu poměrného modulu vůči modulu u referenčního vzorku bylo dosaženo nejvyšších hodnot u sendviče PP – TPE 96A, a to 19 %.

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%

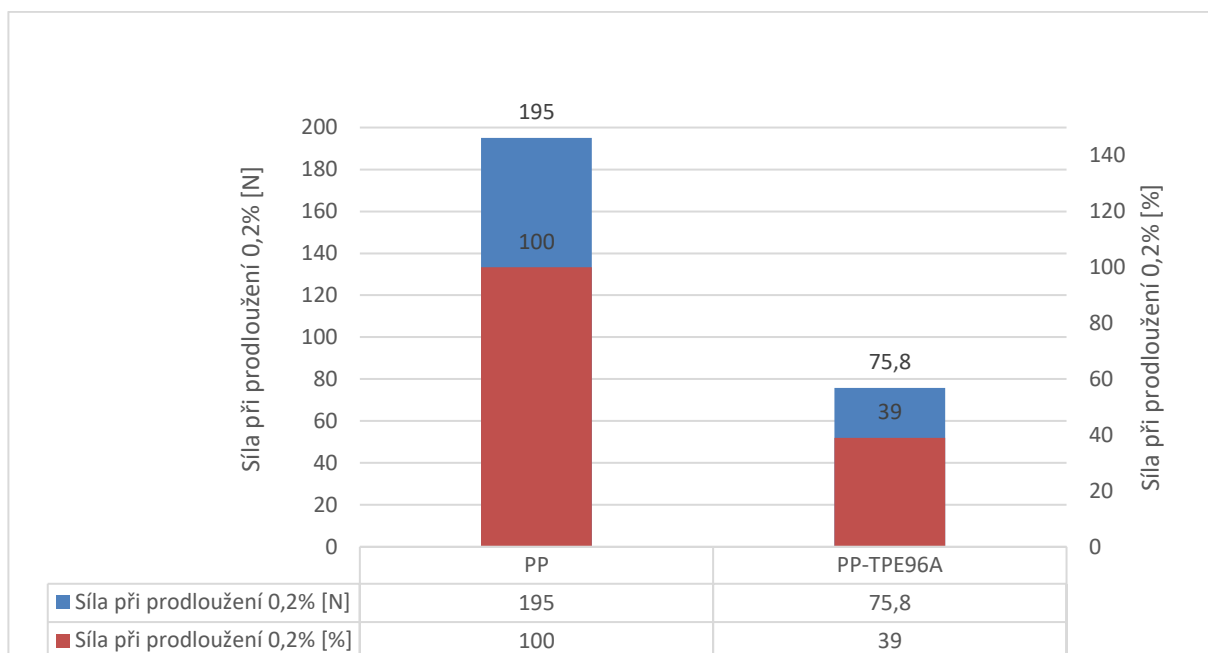
Poslední vyhodnocovanou veličinou během tahové zkoušky kolmo na vrstvy byla síla potřebná k prodloužení vzorku o 0,2 %. Data v níže uvedených grafech vyjadřují modrými sloupci potřebnou sílu k protažení vzorku o 0,2 % (levá svislá osa) naměřenou jak u srovnávacího vzorku ze samostatného rigidního materiálu,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

k prodloužení vzorku o 0,2 % přepočítané na procenta (pravá svislá osa) u sendvičů, vztažené k síle potřebné k prodloužení referenčního vzorku ze samostatného rigidního materiálu o 0,2 %.



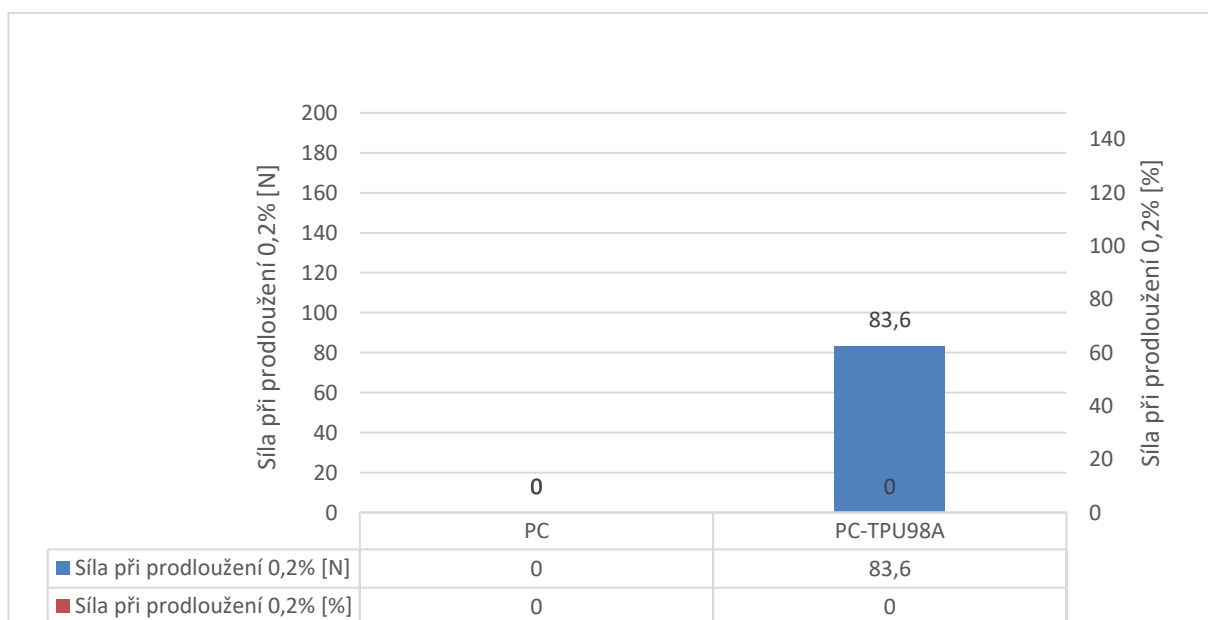
Obr. 74: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 73 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byla naměřena síla nutná k prodloužení vzorku o 0,2 %, a to 953 N. U sendviče PLA – PEBA90A naměřena síla nutná k prodloužení vzorku o 0,2 % pouze 20,4 N, což odpovídá pouze 2 % hodnoty síly u referenčního vzorku z PLA.



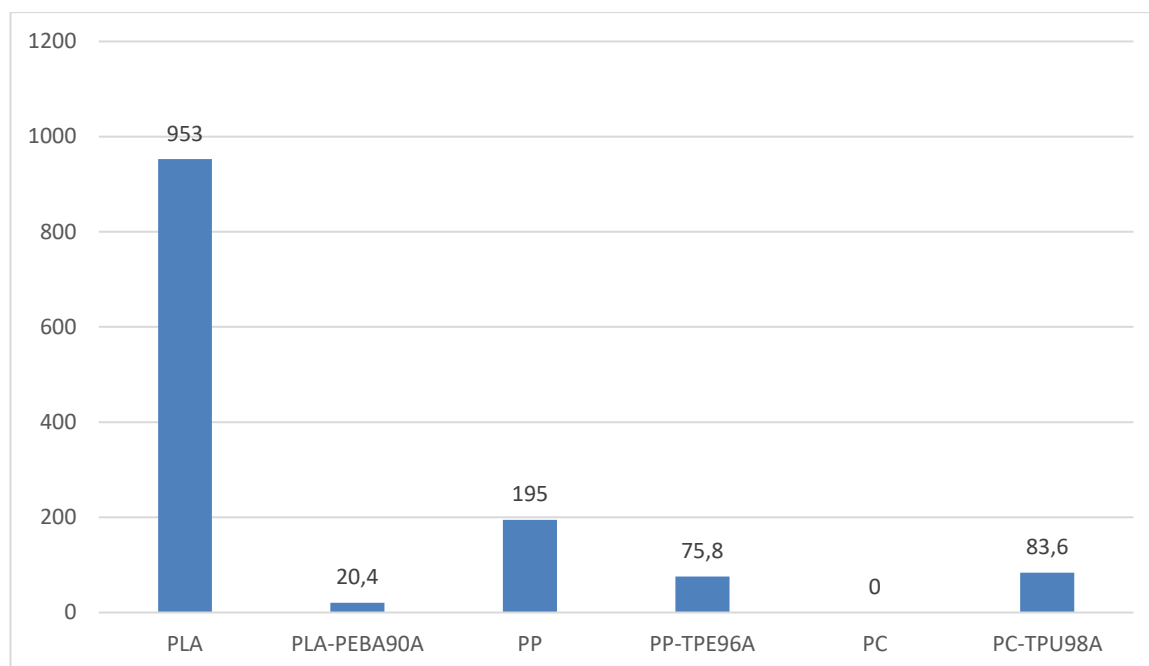
Obr. 75: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 74 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP byla naměřena síla nutná k prodloužení vzorku o 0,2 % 195 N. U sendviče PP – TPE96A naměřena síla nutná k prodloužení vzorku o 0,2 % pouze 75,8 N, což odpovídá 39 % hodnoty síly u referenčního vzorku z PP.



Obr. 76: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 75 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC se nepodařilo naměřit sílu nutnou k prodloužení vzorku o 0,2 %. U sendviče PC – TPU98A byla zaznamenána hodnota 83,6 N.



Obr. 77: 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. 76.

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.

5.7 Zkouška trojbodým ohybem

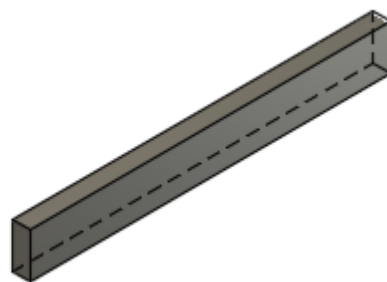
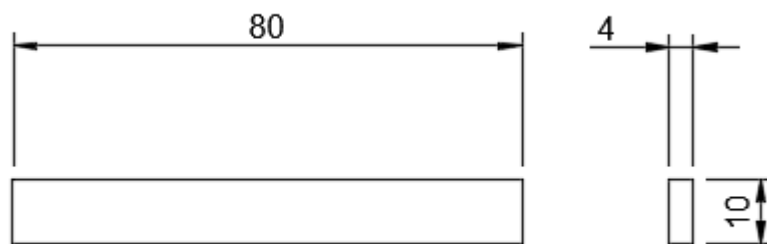
Zkouška trojbodým ohybem byla použita pro stejné vybrané sendvičové struktury, které byly vybrány i pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy. Zkoumanou veličinou v byl v tomto experimentu ohybový modul pro tisknuté sendvičové struktury ve složení rigidní – flexibilní – rigidní materiál. Stejná zkouška byla také aplikována na tisknuté srovnávací vzorky ze samostatných rigidních materiálů.

5.7.1 Příprava zkoušky

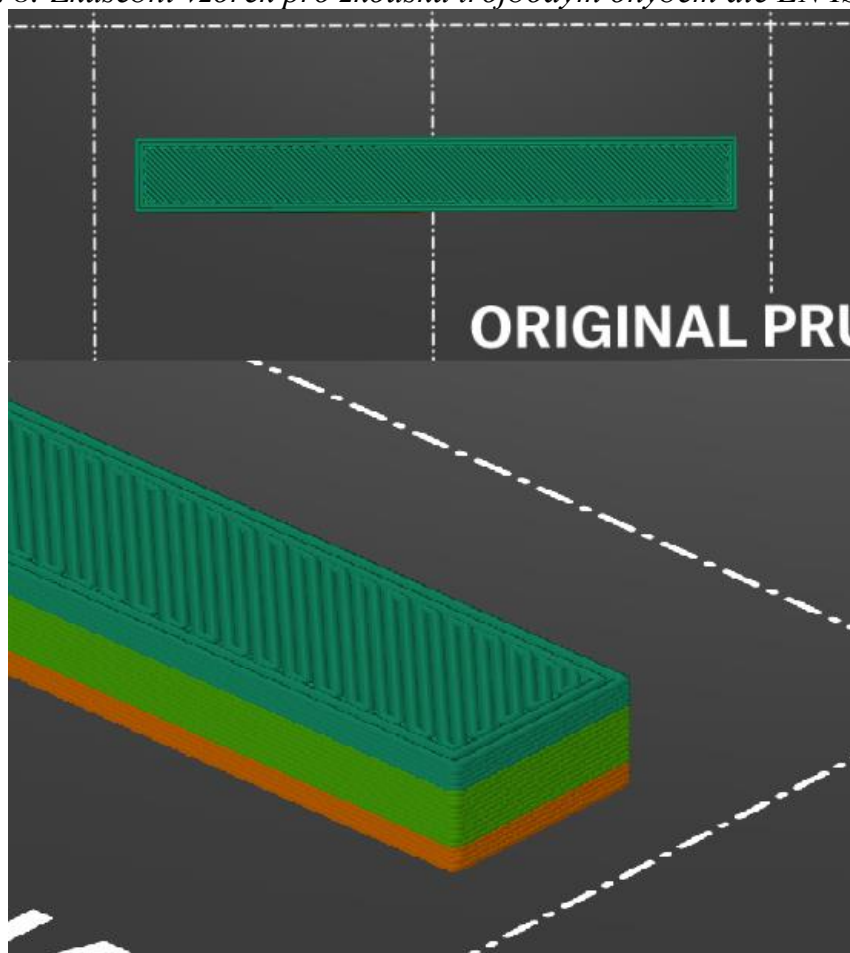
Vzorky pro zkoušku trojbodého ohybu byly připraveny podle EN ISO 178. Jedná se o hranoly o délce 80 mm, šířce 10 mm a tloušťce 4 mm.

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



Obr. 79: Vytisknuté zkušební vzorky pro zkoušku trojbodým ohybem

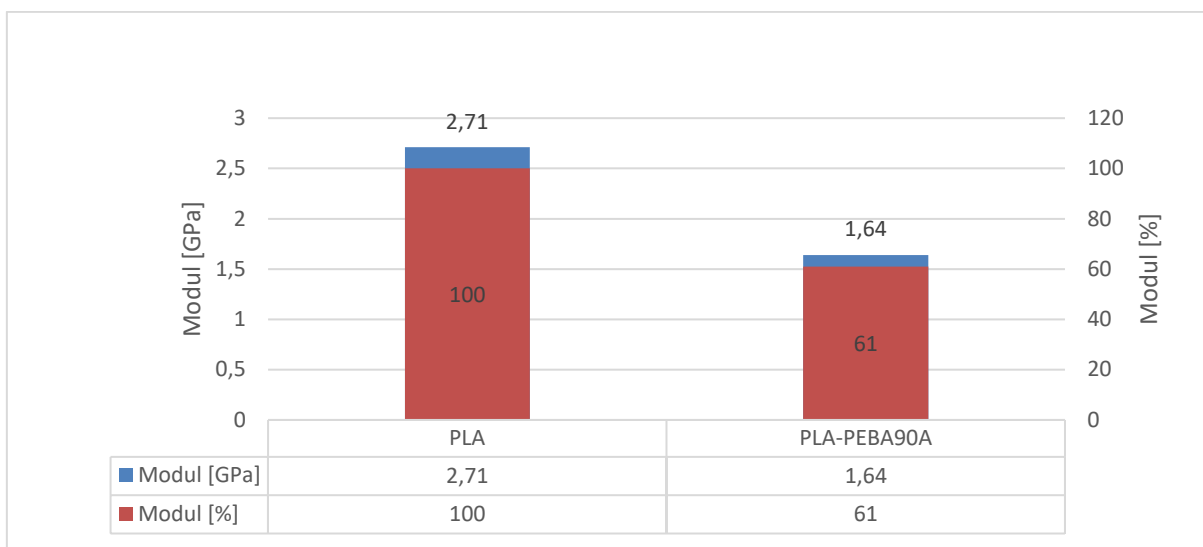


Obr. 80: Průběh zkoušky trojbodého ohybu

5.7.2 Výsledky zkoušky trojbodým ohybem

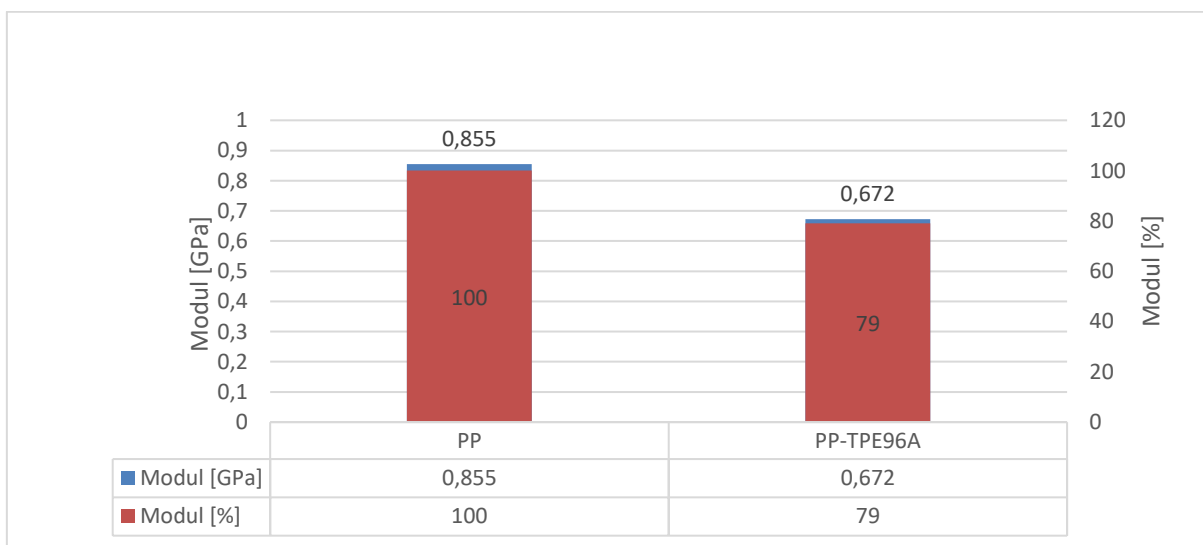
Ohybový modul

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.



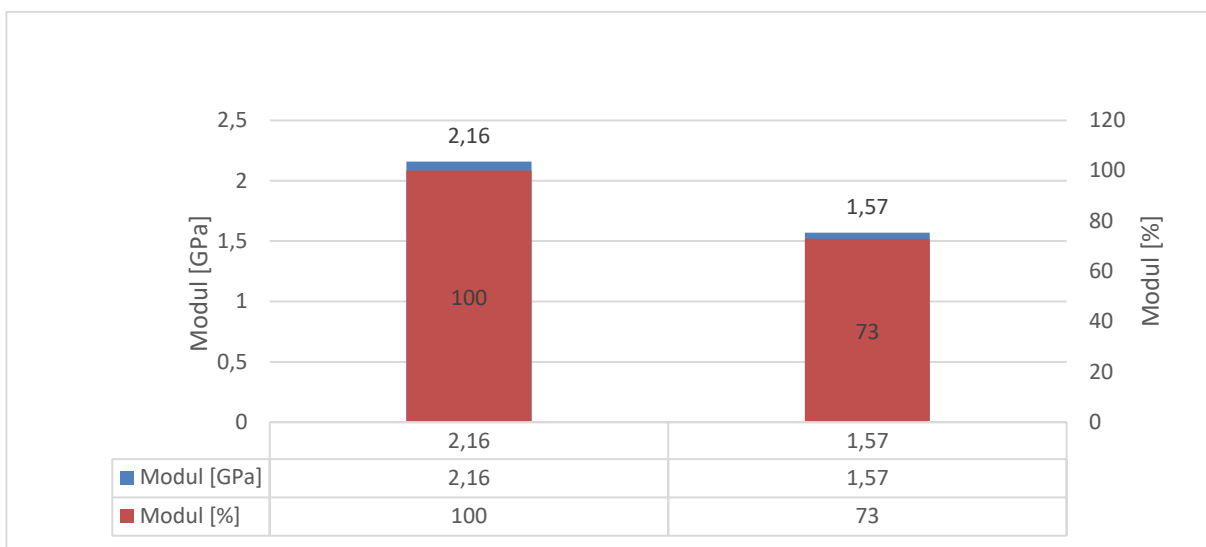
Obr. 81: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PLA a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 80 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PLA byl naměřen ohybový modul 2,71 GPa. U sendviče PLA – PEBA90A byla naměřena hodnota ohybové modulu 1,64 GPa, což odpovídá 61 % hodnoty ohybového modulu u referenčního vzorku z PLA.



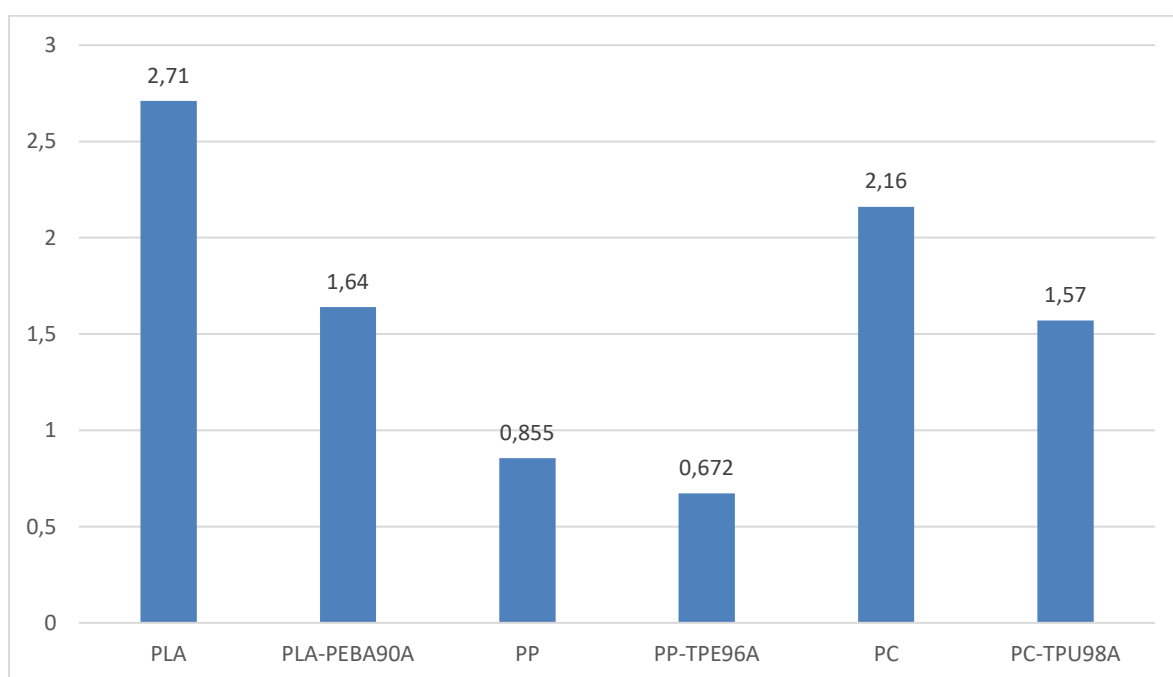
Obr. 82: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PP a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 81 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PP byl naměřen ohybový modul 0,885 GPa. U sendviče PP – TPE96A byla naměřena hodnota ohybové modulu 0,672 GPa, což je 79 % hodnoty ohybového modulu u referenčního vzorku z PP.



Obr. 83: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PC a jeho sendviče

Z grafu na Obr. 82 lze vyčíst že u srovnávacího vzorku vytisknutého z PC byl naměřen ohybový modul 2,16 GPa. U sendviče PC – TPU98A byla naměřena hodnota ohybové modulu 1,57 GPa, což je 73 % hodnoty ohybového modulu u referenčního vzorku z PC.



Obr. 84: 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. 83.

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 houževnatosti 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] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] BIKAS, H., P. STAVROPOULOS, G. CHRYSSOLOURIS, Lakmal SENEVIRATNE, Bilen Emek ABALI, D. DURAND, Frank ALIFUI-SEGBAYA a Allan RENNIE. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **83**(1-4), 389-405 [cit. 2022-10-22]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7576-2
- [10] Přehled technologií 3D tisku. In: *Dkmp.cz* [online]. 2018, 2018 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [11] UDROIU, Razvan, Ion Cristian BRAGA, L. SLĂTINEANU, et al. Polyjet technology applications for rapid tooling. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. 2017 [cit. 2022-10-22]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateccconf/201711203011
- [12] PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. EBM – průlomová technologie výroby exponovaných součástí. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. 2020 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ebm-prulomova-technologie-vyroby-exponovanych-soucasti>

- [13] CPE CF112 Carbon. In: *Fillamentum.com* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/cpe-cf112-carbon-filament/>
- [14] Průvodce materiály. In: *Prusa 3D* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/category/pruvodce-materialy_220
- [15] Flexfill PEBA 90A. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/flexfill-peba-filament/>
- [16] FLEXFILL FAMILY COMPARISON. In: *Fillamentum* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://fillamentum.com/collections/flexfill-tpe-flexible-filament/>
- [17] Chimera+. In: *E3D-online* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://e3d-online.com/products/chimera>
- [18] Original Prusa XL. In: *Prusa3D* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-xl-2/>
- [19] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání* [online]. 2016. 2016 [cit. 2022-10-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [20] Zkoušky plastů dle ISO 527-2. *Test Systeme* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkousky-plastu-dle-iso-187>
- [21] Ohybové vlastnosti plastů dle ISO 178. *Test Systeme* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkousky-plastu-dle-iso-187>
- [22] Zkoušky plastů dle ISO 527-2. *Test Systeme* [online]. [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/pouziti-metody-shore>
- [23] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Mechanické vlastnosti polymerů – dynamické rázové namáhání* [online]. 2016. 2016 [cit. 2022-10-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/11.html>
- [24] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery: Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti* [online]. 2016. 2016 [cit. 2022-10-22]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>

- [25] LAYSON, J. *Dielectric Properties of Polymers* [online]. In: <https://www.zeusinc.com/>, 2005, 2005 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: http://www.appstate.edu/~clementsjs/journalarticles/zeus_dielectric.pdf
- [26] REDDY, Abbavaram Babul, Goddeti Siva Mohan REDDY, Jarugala JAYARAMUDU, Kuncham SUDHAKAR, Bandla MANJULA, Suprakas Sinha RAY a Emmanuel Rotimi SADIKU. Polyethylene Terephthalate-Based Blends: Natural Rubber and Synthetic Rubber. *Poly(Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites* [online]. Elsevier, 2015, 2015, 75-98 [cit. 2022-10-22]. ISBN 9780323313063. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-31306-3.00005-1
- [27] LIN, Ting An, Bao LIMIN, Mei-Chen LIN, Jan-Yi LIN, Ching-Wen LOU a Jia-Horng LIN. Impact-resistant polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: compatible effects of maleic anhydride on thermal degradation properties and crystallization behaviors. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2019, **8**(4), 3389-3398 [cit. 2022-10-22]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2019.03.015
- [28] GU, Jin a Jeffrey M CATCHMARK. Polylactic acid composites incorporating casein functionalized cellulose nanowhiskers. *Journal of Biological Engineering* [online]. 2013, **7**(1) [cit. 2022-10-22]. ISSN 1754-1611. Dostupné z: doi:10.1186/1754-1611-7-31
- [29] MCKEEN, Laurence W. Introduction to Plastics and Polymers. In: *Film Properties of Plastics and Elastomers* [online]. Elsevier, 2012, 2012, s. 1-18 [cit. 2022-10-31]. ISBN 9781455725519. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-4557-2551-9.00001-3
- [30] 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
- [31] 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

- [32] 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
- [33] 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
- [34] 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
- [35] 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
- [36] 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
- [37] 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
- [38] 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
- [39] 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
- [40] 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
- [41] 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
- [42] 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
- [43] 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
- [44] 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
- [45] 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
- [46] 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
- [47] 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
- [48] 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
- [49] 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
- [50] 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
- [51] 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
- [52] 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
- [53] 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
- [54] 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
- [55] KRUTH, J.-P., G. LEVY, F. KLOCKE a T.H.C. CHILDS. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(2), 730-759 [cit. 2023-04-10]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2007.10.004
- [56] 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
- [57] 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
- [58] 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
- [59] 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

- [60] 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

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Princip metody FDM [10].....	14
Obr. 2: Princip metody SLA [10].....	15
Obr. 3: Princip metod SLS a DMLS [10].....	17
Obr. 4: Princip metody Polyjet [11]	18
Obr. 5: Princip metody EBM [12].....	19
Obr. 6: Ukázka výrobku z rigidního materiálu [13].....	20
Obr. 7: Ukázka výrobku z flexibilního materiálu [15].....	24
Obr. 8: Tisková hlava se dvěma samostatnými tryskami [17].....	27
Obr. 9: Tiskárna s vyměnitelnými tiskovými hlavami [18]	27
Obr. 10: Tahová křivka [19].....	29
Obr. 11: Vysvětlení Poissonova poměru	30
Obr. 12: Tahová křivka proložená testovacími tělísky v jednotlivých fázích namáhání [19]	31
Obr. 13: Tlaková křivka [19].....	31
Obr. 14: Schéma ohybového zatížení pro a) trojbodá a b) čtyřbodý ohyb [19].	32
Obr. 15: Ohybová křivka [19]	32
Obr. 16: Zkouška tvrdosti metodou Shore [19].....	34
Obr. 17: Vrubová houževnatost Scharpy [23].....	36
Obr. 18: Vrubová houževnatost Izod [23].....	37
Obr. 19: Schématické znázornění dipólu [24].....	39
Obr. 20: Ukázka dipólových sil v molekulách PVC [24]	39
Obr. 21: Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku dle ISO 527-2/1B.....	45
Obr. 22: Pohled na orientaci výrobku na tiskové podložce v programu Prusa Slic3r (nahore), detail na rozložení vrstev sendviče (dole).....	46
Obr. 23: Vytisknuté zkušební vzorky pro tahovou zkoušku dle ISO 527-2/1B..	47
Obr. 24: Průběh tahové zkoušky sendviče	47
Obr. 25: Graf napětí PLA a jeho sendvičů	48
Obr. 26: Graf napětí PP a jeho sendvičů	49
Obr. 27: Graf napětí ASA a jeho sendvičů.....	49
Obr. 28: Graf napětí PETG a jeho sendvičů.....	50
Obr. 29: Graf napětí CPE a jeho sendvičů	51
Obr. 30: Graf napětí PA a jeho sendvičů.....	51
Obr. 31: Graf napětí PC a jeho sendvičů.....	52
Obr. 32: Graf srovnání napětí [MPa] u všech vzorků	53
Obr. 33: Graf Youngova modulu PLA a jeho sendvičů.....	54

Obr. 34: Graf Youngova modulu PP a jeho sendvičů.....	55
Obr. 35: Graf Youngova modulu ASA a jeho sendvičů.....	55
Obr. 36: Graf Youngova modulu PETG a jeho sendvičů.....	56
Obr. 37: Graf Youngova modulu CPE a jeho sendvičů.....	57
Obr. 38: Graf Youngova modulu PA a jeho sendvičů.....	58
Obr. 39: Graf Youngova modulu PC a jeho sendvičů.....	59
Obr. 40: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] u všech vzorků.....	60
Obr. 41: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PLA a jeho sendvičů.....	61
Obr. 42: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PP a jeho sendvičů.....	62
Obr. 43: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u ASA a jeho sendvičů.....	62
Obr. 44: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PETG a jeho sendvičů....	63
Obr. 45: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u CPE a jeho sendvičů.....	64
Obr. 46: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2 % u PA a jeho sendvičů.....	65
Obr. 47: Graf síly potřebné k prodloužení o 0,2% u PC a jeho sendvičů.....	66
Obr. 48: Graf srovnání síly potřebné k prodloužení o 0,2% [N] u všech vzorků	66
Obr. 49: Zkušební vzorek pro zkoušku vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1.....	68
Obr. 50: Pohled na orientaci výrobku na tiskové podložce v programu Prusa Slic3r (nahore), detail na rozložení vrstev sendviče (dole).....	69
Obr. 51: Vytisknuté zkušební vzorky pro rázovou zkoušku vrubové houževnatosti dle.....	69
Obr. 52: Zkušební zařízení Zwick/Roell HIT5.5P.....	70
Obr. 53: Průběh rázové zkoušky vrubové houževnatosti Charpy.....	70
Obr. 54: Graf práce nutné k přeražení vzorku PLA a jeho sendvičů.....	71
Obr. 55: Graf práce nutné k přeražení vzorku PP a jeho sendvičů.....	72
Obr. 56: Graf práce nutné k přeražení vzorku ASA a jeho sendvičů.....	73
Obr. 57: Graf práce nutné k přeražení vzorku PETG a jeho sendvičů.....	74
Obr. 58: Graf práce nutné k přeražení vzorku CPE a jeho sendvičů.....	75
Obr. 59: Graf práce nutné k přeražení vzorku PA a jeho sendvičů.....	76
Obr. 60: Graf práce nutné k přeražení vzorku PC a jeho sendvičů.....	77
Obr. 61: Graf srovnání práce [J] nutné k přeražení u všech vzorků.....	77
Obr. 62 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy sendviče.....	79
Obr. 63 Orientace vzorku na tiskové podložce včetně zobrazení rozložení vrstev sendviče v programu Prusa Slic3r.....	80
Obr. 64: Vytisknuté zkušební vzorky pro tahovou zkoušku kolmo na vrstvy ...	80
Obr. 65: Průběh tahové zkoušky kolmo na vrstvy.....	81
Obr. 66: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče.....	82
Obr. 67: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče.....	82

Obr. 68: Graf napětí při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče	83
Obr. 69: Graf srovnání napětí [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků	84
Obr. 70: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče	85
Obr. 71: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče	86
Obr. 72: Graf Youngova modulu při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče	86
Obr. 73: Graf srovnání Youngova modulu [MPa] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků	87
Obr. 74: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PLA a jeho sendviče	88
Obr. 75: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PP a jeho sendviče	89
Obr. 76: Graf síly nutné k prodloužení o 0,2 % při tahu kolmo na vrstvy u PC a jeho sendviče	89
Obr. 77: Graf srovnání síly nutné k prodloužení o 0,2% [N] při tahu kolmo na vrstvy u vybraných vzorků	90
Obr. 78: Zkušební vzorek pro zkoušku trojbodým ohybem dle EN ISO 178.....	92
Obr. 79: Vytisknuté zkušební vzorky pro zkoušku trojbodým ohybem	92
Obr. 80: Průběh zkoušky trojbodého ohybu.....	93
Obr. 81: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PLA a jeho sendviče	94
Obr. 82: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PP a jeho sendviče	94
Obr. 83: Graf srovnání ohybového modulu při trojbodém ohybu u PC a jeho sendviče	95
Obr. 84: Graf srovnání ohybových modulů [GPa] při trojbodém ohybu u všech vzorků	95

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Vzájemná kompatibilita materiálů tisknutelných na Prusa MINI 44

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
%	procenta
X	osa
Y	osa
Z	osa
kW	kiloWatt
mbar	milibar
N	Newton
mm	milimetr
mm^2	milimetr čtvereční
m/s	metry za sekundu
s	sekunda
J	Joul
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
E_t	modul pružnosti v tahu / sečný modul pružnosti
ε_y	poměrné prodloužení na mezi kluzu
ε_m	poměrné prodloužení při přetržení
μ	<i>Poissonův poměr</i>
σ_{fM}	pevnost v ohybu
$M_{o,\max}$	maximální ohybový moment
W_o	modul průřezu
h	tloušťka
b	šířka
E_f	modul pružnosti v ohybu
ε_f	deformace v ohybu
s	průhyb

H	tvrdost
F_m	přídavné zatížení
h	výsledná hloubka vtláčení
a_{cU}	rázová houževnatost Sharpy
a_{cN}	vrubová houževnatost Sharpy
E_c	kinetická energie
b_N	šířka pod vrubem
a_{iU}	rázová houževnatost Izod
a_{iN}	vrubová houževnatost Izod
R_s	odrazová pružnost
h_r	výška odrazu
h_0	výška dopadu
C	uhlík
H	vodík
O	kyslík
N	dušík
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

SLS	Selective Laser Sintering
SLA	Stereolitography
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
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

2.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno a příjmení, titul: Ing. Vlastimil Chalupa

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