



Středoškolská technika 2022

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Flexibilní materiály ve 3D tisku

Lukáš Novotný

Gymnázium Botičská

Botičská 1, Praha 2, 12801

Anotace

Cílem této práce bylo otestovat fyzikální vlastnosti specifických flexibilních materiálů na bázi termoplastického polyuretanového elastomeru (TPU), určených pro FFF/FDM 3D tisk. K testování bylo zvoleno 8 materiálů. První čtyři materiály jsou vyvíjené společností Prusa Polymers a.s. Zbylé čtyři materiály pochází od konkurenčních výrobců. Byly měřeny a porovnávány mechanické a tvarové vlastnosti těchto materiálů, konkrétně pevnost v tahu, pružnost a tvrdost. Měření probíhalo za pomoci trhacího přístroje a durometru. Naměřené hodnoty byly vzájemně srovnány, a mohou tak posloužit k budoucímu vývoji těchto materiálů.

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod | 5 |
| Přehled literatury | 6 |
| 3D tisk | 6 |
| Stručná historie 3D tisku | 6 |
| Využití a výhody 3D tisku..... | 6 |
| Metody 3D tisku..... | 6 |
| Materiály pro 3D tisk | 8 |
| Popis 3D tiskárny | 9 |
| Polymery | 10 |
| Termoplasty..... | 11 |
| Elastomery..... | 11 |
| Termoplastické elastomery..... | 11 |
| Mechanické vlastnosti polymerů..... | 14 |
| Metodika..... | 16 |
| Použité pomůcky a přístroje | 16 |
| Použité materiály | 16 |
| Použité programy | 17 |
| Postup práce | 17 |
| Příprava tělísek k tisku | 17 |
| Příprava tiskárny a filamentů před tiskem..... | 18 |
| Tisk..... | 18 |
| Měření | 18 |
| Zpracování výsledků | 19 |
| Výsledky a diskuse..... | 20 |
| Tvrдость materiálů | 20 |
| Tahové vlastnosti materiálů..... | 22 |
| Materiál 0 | 22 |
| Materiál 1 | 23 |
| Materiál 2 | 24 |
| Materiál 3 | 25 |
| FilaFlexible40..... | 26 |
| Flexfill 98A | 27 |
| SainSmartTPU..... | 28 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Fiberflex 40D | 29 |
| Tahové křivky..... | 30 |
| Porovnání a zhodnocení výsledků..... | 31 |
| Závěr..... | 33 |
| Seznam literatury..... | 34 |

Úvod

Ve své práci se věnuji rešerši 3D tisku a jeho metod. Část práce se zabývá materiály, které se ve 3D tisku hojně využívají. Svou pozornost dále soustředuji na flexibilní materiály, především pak na termoplastické elastomery vycházející ze struktury polyurethanu, jež se nejčastěji využívají v oblasti automotive a zdravotnictví, avšak s 3D tiskem nejsou tolik spojovány. Proto mi přijde velmi přínosné tuto oblast hlouběji prozkoumat. Myslím si, že 3D tisk může pomoci ať už v prototypování výrobků v technologických firmách, tak i v nahrazení spotřebního zboží v domácnosti. Cílem práce bude naučit se pracovat s 3D tiskárnou a použitými flexibilními materiály, z nichž se vytisknou tělíska, která budou sloužit k testování a porovnání mechanických vlastností.

Přehled literatury

3D tisk

3D tisk je automatizovaný proces, při kterém se vytváří fyzický objekt z digitální předlohy. Model je nejčastěji programově rozřezán na jednotlivé vrstvy, které jsou pak tiskárnou extrudovány a pokládány na sebe. (1) (2)

Stručná historie 3D tisku

První koncepty 3D tiskáren se začaly objevovat v druhé polovině 20. století. Zpočátku se 3D tisk primárně používal k rychlé výrobě prototypů, proto je možné se dále setkat s anglickým názvem *Rapid Prototyping*. Nicméně do rukou veřejnosti se začal 3D tisk dostávat až v 90. letech 20. století v podobě stereolitografické platformy (SLA). (1)

Využití a výhody 3D tisku

3D tisk je hojně využíván v mnoha různých oborech, například v průmyslu, zdravotnictví, architektury, designu. Může být použit pro výrobu prototypů, nových produktů, výrobu náhradních dílů pro stroje nebo zařízení, vytváření modelů budov nebo měst pro plánování a navrhování, nebo také v tkáňovém inženýrství pro tisk orgánů. (3)

Oproti tradičním výrobním procesům má 3D tisk výhodu v oblastech jako je rychlost a efektivita. Zároveň umožňuje výrobu složitějších tvarů a designů, které by konvenčními způsoby nebyly možné vytvořit. Dále také může být používán pro výrobu jednotlivých kusů nebo jejich serií. Z environmentálního hlediska může 3D tisk pomoci snížit odpad a zlepšit ekologickou stopu výroby. (3)

Metody 3D tisku

Metody 3D tisku lze rozdělit do tří hlavních kategorií z hlediska používaného materiálu a jeho způsobu zpracování. Mezi tyto metody lze zařadit SLA, SLS/DMLS a FFF/FDM technologie, které jsou podrobněji vysvětleny níže.

SLA (Stereolitografie)

Technologie SLA je založena na principu chemického zesíťování fotocitlivých pryskyřic v přítomnosti ultrafialového světla. Tisk probíhá po velmi tenkých vrstvách (0,05 do 0,25 mm), na kterých dochází k osvitě požadovaných míst, aby následně docházelo k vytvrzení tekuté pryskyřice. Přednosti SLA technologie jsou zejména v tvorbě detailních výtisků, jež se využívá v medicíně a šperkařství. Nevýhodou této technologie může být časová náročnost tisku a menší tisková plocha oproti tiskárnám FFF/FDM. Dále je zapotřebí věnovat řádnou pozornost

k toxicitě fotopryskyřice, neboť způsobuje podráždění kůže a její páry mohou vyvolávat nevolnost. (1)

SLS/DMLS

SLS (Selective Laser Sintering) je technologie selektivního práškového spékání. DMLS (Direct Metal Laser Sintering) je metoda selektivního laserového sinterování určená pro výrobu kovových dílů.

Při těchto metodách je materiál v podobě prášku nanášen válcem po vrstvách, který se dále tzv. sintruje (spéká), tudíž oproti jiným technologiím není materiál roztaven do tekuté podoby. Prášek bývá z materiálů, které jsou založeny na různých termoplastech, například na polyamidu (nylonu), polypropylenu, polystyrenu nebo na elastomerech. Na konci tisku je hotový objekt zasypan ve zbylém prášku, který lze použít opakovaně pro další tisk. Výhodou této technologie je poměrně malý odpad tiskového materiálu a jeho nevýrazné vrstvení z hlediska postprocesního obrábění. Avšak tento typ tiskáren vyžaduje poměrně vysokou počáteční investici, jež si mohou dovolit především velké společnosti, tudíž oproti FFF/FDM tiskárnám nejsou tolik rozšířené mezi veřejností. (1)

FFF/FDM

FFF a FDM jsou zkratky dvou podobných metod aditivního výrobního procesu, které se často zaměňují a používají jako synonyma, ale v zásadě jsou to dva různé názvy pro stejný proces.

FFF (Fused Filament Fabrication) je metoda 3D tisku, při které se vytváří objekty pomocí topné hlavy, která taví filament.

FDM (Fused Deposition Modeling) je podobná metoda jako FFF. Tento termín byl zaregistrován společností Stratasys, která tuto technologii vynalezla, a používá se jako ochranná známka.

V rámci BOČ jsem používal tiskárnu používající právě tuto technologii. Proto je v této části uveden obsáhlejší popis, jak tato technologie i tiskárny používající tuto metodu fungují.

Tato technologie je nejdostupnější a nejrozšířenější metoda 3D tisku. Hlavním materiálem je primárně roztavený plast, který má před tavením podobu filamentu (tiskové struny). Filament je při této metodě extrudován (vytlačován) rozehřátou tiskovou tryskou. Nejčastěji se používá tisková struna o průměru 1,75 mm

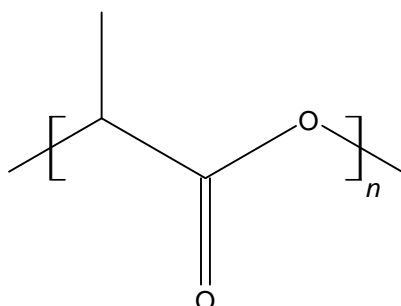
Podle způsobu pohybu v trojrozměrném prostoru lze rozdělit FFF tiskárny na tiskárny Polar, Delta a tiskárny Kartézské. Polar tiskárna používá systém, kdy se tisková hlava pohybuje po dvou osách a rotační podložce. Delta tiskárna používá systém, kde je extruder zavěšený na extruderu na třech ramenech, která jsou spojena právě v místě extruderu. Kartézská tiskárna funguje tak, že tisková hlava, která vytlačuje materiál (extruder), se pohybuje po dvou lineárních osách (X, Z), zatímco tisková podložka se pohybuje po jedné ose (Y). Příkladem je tiskárna Original Prusa i3 MK3S, který byla při vypracování mé práce. (1)

Materiály pro 3D tisk

Tato podkapitola bude především pojednávat o materiálech použitých v souvislosti s mou prací.

PLA

PLA je jeden z nejčastějších a nejsnadněji tisknutelných materiálů. Z chemického hlediska jedná o kyselinu polymléčnou. Vyrábí se z kukuřice, cukrové třtiny či řepy, kvůli čemuž je biologicky rozložitelná. Tiskne se poměrně rychle a nevyžaduje vysokou teplotu tisku. Používá se nejčastěji pro výrobu prototypů, figurek a dalších objektů nevyžadující vysokou mechanickou a chemickou odolnost. (4)



Obrázek č.1: Vzorec kyseliny polymléčné (autor)

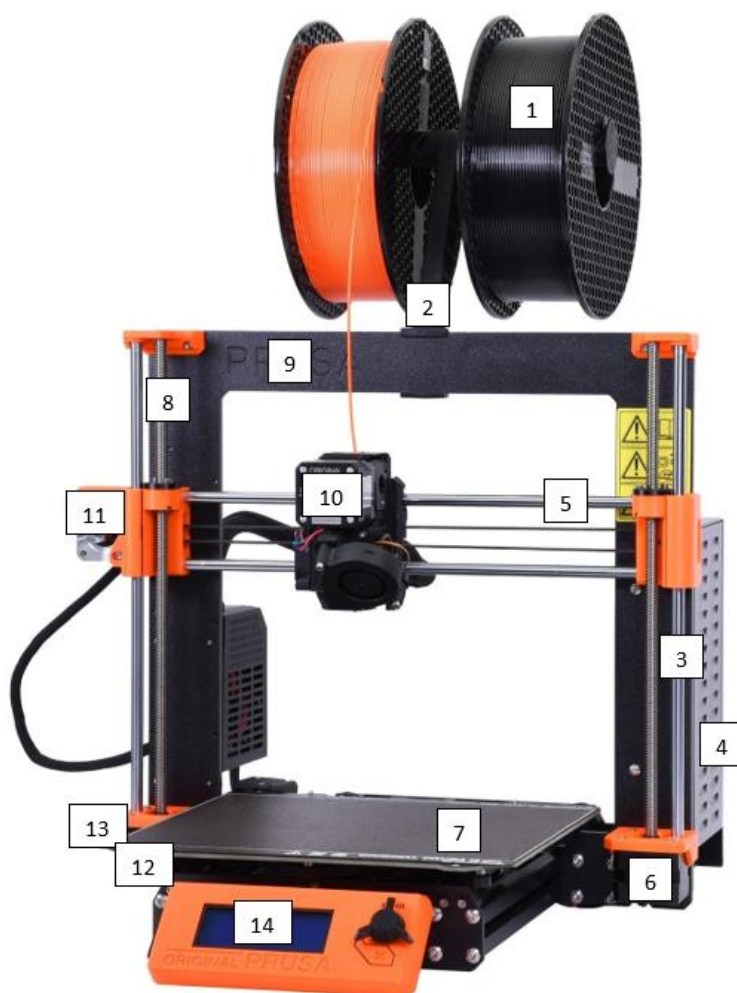
TPU

(V tomto textu bude rozebrán tento materiál v souvislosti s 3D tiskem. Důkladný popis TPU je k nalezení v podkapitole *Polyuretan a termoplastický polyuretan (TPU)*.)

TPU (termoplastický polyuretan) je flexibilní materiál, který vykazuje odolnost proti poškození, flexibilitu i v chladném prostředí a odolnost proti rozpouštědlům. Je také velmi dobrý, co se týče odolnosti v tahu. Tisk z tohoto materiálu je však pomalejší a je poměrně obtížné z něj tisknout. Zároveň je tento materiál hygroskopický (pohlcuje vlhkost). Je vhodný pro tisk razítek, RC pneumatik, částí bot nebo pásků. (5)

Popis 3D tiskárny

K popisu 3D tiskárny použiji tiskárnu Original Prusa i3 MK3S+, kterou jsem použil při vypracování své práce.



Obrázek č.2: Tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ (6)

Popis obrázku:

1) Filament; 2) Držák na filament; 3) Osa Z; 4) Zdroj; 5) Osa X; 6) Motor Z2; 7) Vyhřívaná podložka s pružným tiskovým plátem; 8) Tyč s trapézovým závitem; 9) Rám tiskárny; 10) Motor tiskové hlavy (extruderu); 11) Motor X; 12) Osa Y; 13) Motor Z1; 14) LCD panel (7)

Polymery

Polymery jsou makromolekulární látky skládající se z mnoha základních konstitučních jednotek *merů*, které se mnohokrát v makromolekule opakují. Mohou být syntetického nebo přírodního původu (materiály v živých organismech, včetně například bílkovin, celulózy a nukleových kyselin). (8) (9)

Syntetické polymery vznikají syntézou monomerních jednotek, kdy nízkomolekulární sloučenina *monomer* přechází ve vysokomolekulární látku *polymer*. Monomerem je nejčastěji organická sloučenina získávaná ropnými frakcemi, např. ethylen, propylen. Aby došlo k reakci, musí výchozí monomer v molekule obsahovat alespoň dvě funkční skupiny, které jsou reaktivní a jsou schopné vytvářet se sousedními molekulami chemické vazby. Existují tři základní typy reakcí (postupy), které vedou ke vzniku syntetických polymerů. Mezi ně patří polymerace, polyadice a polykondenzace. (8)

Pokud je makromolekula vyrobena pouze z jednoho druhu monomeru, jedná se o *homopolymer*. Slovo homopolymer se často využívá i v souvislosti s označením polymeru, jehož struktura může být reprezentována opakováním jednoho druhu opakující se jednotky. Znamená to tedy, že hypotetický polymer $[-AB-]_n$ může být označen jako homopolymer. (10)

Polymer odvozený od více než jednoho druhu monomeru se nazývá *kopolymer*. Kopolymerace má v technické praxi velký význam, protože umožňuje upravovat fyzikální vlastnosti polymeru požadovaným směrem (vlastnosti závisí na poměru monomerů a na jejich uspořádání). Typickým příkladem může být například kopolymer polypropylenu, který je připravován polymerací ethenu a propenu za účelem získání materiálu s vyšší rázovou pevností i při nízkých teplotách (typické pro polyethylen). Běžný polyethylen při ochlazování křehne přibližně při teplotě kolem -120°C (do té doby je pevný v širokém rozmezí teplot), zatímco polypropylen křehne již při teplotě přibližně -15°C . Kopolymer polypropylenu (tvořený monomery ethenu a propenu) bude mít lepší rázovou houževnatost při nízkých teplotách než polypropylen a zároveň lepší pevnostní charakteristiky než jinak houževnatý polyethylen. (8) (10)

Mezi další základní rozdělení polymerů patří rozdělení na *plasty* a *elastomery*. Pokud hovoříme o plastech, můžeme je dále dělit na *termoplasty* a *reaktoplasty*. (8)

Termoplasty

Termoplast je polymer, který měkne a tvrdne při změně teploty. Změny, kterými termoplasty procházejí, jsou fyzikálního charakteru a neovlivňují jejich chemickou strukturu. Proto je možné teoreticky tento proces nekonečně mnohokrát opakovat.

Tato vlastnost je využívána výrobními procesy, jako je vstřikování, vytlačování a vyfukování a tvarování termoplastických pryskyřic. Tuhost termoplastických pryskyřic při nízkých teplotách je dána sekundárními silami mezi polymerními řetězci, které se při vyšších teplotách ničí, což způsobuje tekutost pryskyřice. (8) (10)

Elastomery

Elastomer je vysoce elastický materiál složený z molekul s dlouhým řetězcem nebo z polymerů, které jsou schopny po roztažení do značné míry obnovit svůj původní tvar. (8) (11)

Tento materiál tedy lze za běžných podmínek malou silou deformovat bez jeho porušení. Dlouhé molekuly tvořící elastomerní materiál jsou v normálních podmínkách nepravidelně stočeny. Při použití síly se však molekuly narovnají ve směru, ve kterém jsou taženy. Hranice pružné odezvy nastává, když jsou molekuly v plně roztažených konformacích. Po uvolnění se pak molekuly spontánně vrátí do svého běžného kompaktního uspořádání. Vratnosti a okamžité odezvy se dosahuje u makromolekul, které mají pružné řetězce se slabými mezimolekulárními silami. Proto nejsou tuhé skupiny, jako je benzen, objemné postranní řetězce, jako je isopropyl, polární skupiny, jako jsou estery, a skupiny s vodíkovou vazbou, jako jsou hydroxy- skupiny, žádoucí, má-li být polymer elastomerem. (8) (11) (12)

Typickým představitelem elastomerů jsou kaučuky, z nichž se vulkanizací (řídším zesílením, nejčastěji sírou) vyrábějí pryže, vysoce pružné materiály odolné trvalé deformaci. (8) (11)

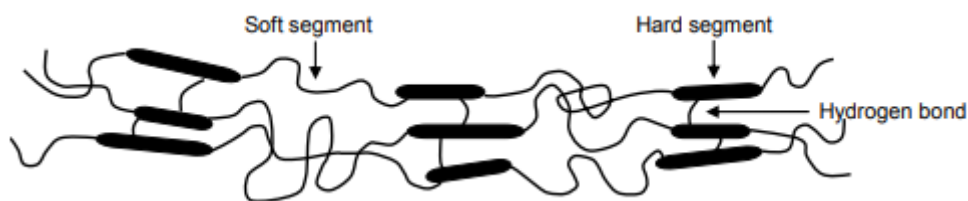
Termoplastické elastomery

Termoplastické elastomery (TPE) jsou polymerní systémy, které kombinují aplikační vlastnosti elastomerů (elastická, ohebnost) a vlastnosti termoplastů (jednoduchá zpracovatelnost, recyklovatelnost).

Lze říci, že termoplastický elastomer má všechny vlastnosti popsané u elastomeru s tím rozdílem, že chemická síť je nahrazena sítí fyzikálních příčných vazeb. Jejich síť tak není pevná jako chemická síť u např. pryží, a z toho důvodu leží vlastnosti termoplastických elastomerů v oblasti mezi pryžemi a termoplasty. (8) (12)

TPE mají nejčastěji strukturu *blokových kopolymerů*. Kombinace vlastností termoplastů a elastomerů je způsobena přítomností měkkých segmentů (bloků) a tvrdých segmentů, které jsou navzájem nemísitelné. Měkký segment (blok) je tvořen elastomerem a tvrdé segmenty,

keré vytváří síť, jsou tvořeny termoplastem. Elastický (měkký) blok by měl mít vysokou molární hmotnost a všechny ostatní vlastnosti požadované pro elastomer. Tvrdý blok naopak omezuje vzájemnou pohyblivost měkkých segmentů. (12) (8)



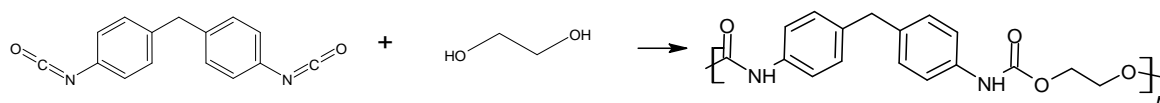
Obrázek č.3: Struktura TPE na bázi polyuretanu (12)

Velká výhoda termoplastických elastomerů spočívá v tom, že je lze zpracovávat jako termoplasty. Dají se roztavit a následně znovu tvarovat. Zahřátím TPE nad teplotu tání tvrdých segmentů přechází TPE v taveninu, která může být použita např. při vstřikováním, 3D tisku a ostatních plastikářských technologiích. Při vyšších teplotách je však jejich použitelnost omezená, což může být jedna z nevýhod. Po ochlazení tvrdé segmenty opět vytvoří pevné a tuhé uzly, které tvoří síť fyzikální povahy. Materiál se tak vrátí k původním vlastnostem termoplastického elastomeru. (12) (8)

Aplikační oblast termoplastických elastomerů se neustále rozrůstá. Nejčastěji nahrazuje běžné pryže anebo měkčený polyvinylchlorid (PVC-P). Využití nachází při výrobě hadic, hadiček, membrán, protiskluzových úchytů, nožiček u brýlí nebo podrážek. Využívá se také jako izolace drátů nebo jako těsnění. (8)

Polyuretan a termoplastický polyuretan (TPU)

Polyuretan je polymer, který vzniká polyadící polyolů (vícesytných alkoholů) s diisokyanáty (v přítomnosti katalyzátoru). Touto reakcí vzniká charakteristická uretanová skupina ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$).



Obrázek č.4: Příklad syntézy polyuretanu (autor)

Vlastnosti polyuretanů se mohou lišit, vzhledem k velké škále výchozích materiálů, ze kterých se vyrábí. Zároveň se mohou jejich vlastnosti lišit v závislosti na stupni propojování nebo přidáním jiné příměsi. (13)

Rozlišujeme dva základní typy polyuretanů:

- Pěnový polyuretan
- Termoplastický polyuretan

Pěnový polyuretan

Pěnový polyuretan se dělí na měkký a tvrdý. Zatímco měkký se používá v nábytkářství a v interiérech, tvrdý se používá především ve stavebnictví jako výplň karosérií nebo jako izolace. Nejznámějšími firmami zabývající se výrobou pěnových polyuretanů je např. značka Molitan a Borex. Tři čtvrtiny celosvětové spotřeby polyuretanových výrobků jsou právě ve formě pěny. (13)

Termoplastický polyuretan (TPU)

Termoplastické polyuretany mohou být ve formě reaktoplastu, elastomeru nebo termoplastu. (13)

V reakcích polyolů a diisokyanátů hrají velkou roli meziprodukty, které jsou často samy o sobě polymerního charakteru (polyestery, polyethery). Tyto meziprodukty nesou terminální skupiny (obvykle -OH nebo -NCO) schopné další reakce, a tím zvětšení velikosti molekuly (často během vlastního výrobního procesu). Zvětšení molekuly probíhá prodloužením řetězce, větvením nebo zesíťováním. Některé z těchto reakcí jsou vratné působením tepla, což přináší možnost přeskupení molekul během zpracování. Z tohoto důvodu mohou mít polyuretany převahu jiných vazebných skupin, mohou být v podstatě kopolymery. Celý makromolekulární systém v těchto polymerech pak může být podle toho navržen tak, aby obsahoval články nebo segmenty řetězce, které zajišťují požadovanou molekulární pružnost nebo tuhost a uspořádání řetězce, větvení nebo síťování nezbytné pro dosažení požadovaných vlastností konečného výrobku. (14)

Tato segmentovaná struktura polymeru může měnit své vlastnosti ve velmi širokém rozsahu pevnosti a tuhosti modifikací svých tří základních stavebních prvků: polyolu, diisokyanátu a prodlužovače řetězce. V podstatě se jedná o rozsah tvrdosti od měkkých rosolovitých struktur až po tvrdé tuhé plasty. Vlastnosti výsledného polyuretanového materiálu pak souvisejí se segmentovou pružností, propleteností řetězců, meziřetězcovými silami a síťováním. (14)

Vlastnostmi je tedy TPU velmi podobný TPE (jedná se o podtyp TPE) s hlavním rozdílem v tvrdosti. Hlavní rozdíl je ve tvrdosti. Termoplastický polyuretan nachází využití při např. výrobě koleček, náradí, sportovního zboží, zdravotnických prostředků, hnacích pásů, obuvi, nafukovacích raftů a různých extrudovaných fólií. Používá se také k plátování drátů a kabelů nebo při výrobě lepidel a textilních nátěrů. (15)

Mechanické vlastnosti polymerů

V rámci zkoumání vlastností materiálů se měří v základu čtyři hlavní mechanické vlastnosti: pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost. Nejsou to však všechny aspekty, které lze v rámci vlastností polymerů měřit. Měří se i z hlediska mechanických charakteristik materiálů. Ty jsou rozdělitelné na charakteristiky dle časového hlediska, dle charakteru působící síly nebo dle způsobu namáhání.

V mé práci jsem měřil krátkodobě, co se týče časového hlediska. Měření probíhalo staticky (měření tvrdosti) i dynamicky (měření tahových vlastností) a zahrnovalo tahové a tlakové namáhání materiálu.

Při namáhání tělesa v souvislosti s polymery je pozorována deformace (zejména u tahového způsobu namáhání). Deformaci lze rozdělit na pružnou (elastickou) a trvalou (plastickou). Pokud se těleso vrátí po odstranění působící vnější síly zpět do původního stavu, jedná se o deformaci elastickou. Pokud se do svého původního stavu nevrátí, jedná se o plastickou deformaci.

Tahové vlastnosti

Při zkoumání tahových vlastností je možné pozorovat průběh deformace na tzv. deformačních (tahových) křivkách, kde jsou v závislosti normálové tahové napětí a poměrné prodloužení.

Z hlediska těchto křivek jsou pozorovány dvě nejpodstatnější hodnoty: hodnota napětí na mezi kluzu (σ_y) a hodnota napětí při přetržení (σ_b).

Mez kluzu (v anglickém jazyce značeno YP – Yield point) je bod, kdy začíná vznikat plastická deformace. Obecně se pokládá jako za horní hranici přípustného napětí v praktickém využití, protože se těleso začne trvale deformovat.

Napětí při přetržení je napětí, při kterém dojde k porušení zkušebního tělíska.

Tlakové vlastnosti

Pro obecné měření tvrdosti materiálů nelze vždy použít stejné jednotky, protože se vztahují k jiným vlastnostem materiálů. Jsou založeny na jiných metodách měření, mají různé stupnice a měřicí jednotky. Tvrdost je vlastnost, která se obtížně převádí a neexistuje u ní jednoznačný přímý převod. Každá metoda má totiž své specifické charakteristiky.

Ve své práci jsem k měření použil pro zavádění hodnot tvrdostí materiálů stupnici Shore A. Stupnice Shore A slouží k měření tvrdosti elastomerů a gumových materiálů. Používá se především pro měření měkkých materiálů, které mají nižší pevnost.

Měření Shore A tvrdosti se provádí pomocí hrotu, který se stlačuje do povrchu materiálu. Tlak vyvíjený hrotem při dosažení určité deformace se používá k určení tvrdosti materiálu. Tato stupnice má rozsah od 0 do 100. Nižší čísla na stupnici znamenají měkké materiály, zatímco vyšší čísla označují tvrdší materiály. Jak už bylo zmíněno, nejčastěji se používá právě pro měření tvrdosti elastomerů, jako jsou pryže, silikony, neopreny, polyuretany a další polymerní materiály. Pro měření ve stupnici Shore A se používají speciální měřicí přístroje nazývané Shore

durometry. Tyto přístroje mají definované parametry a geometrii hrotu, který se používá k provedení měření.

Metodika

Cílem mé práce bylo otestovat specifické flexibilní materiály na bázi termoplastického polyuretanového elastomeru (TPU), určené pro FFF/FDM 3D tisk. Testování probíhalo zejména z fyzikálního hlediska. Byly měřeny a porovnávány mechanické a tvarové vlastnosti těchto materiálů, konkrétně pevnost v tahu, pružnost a tvrdost. V této části své práce popíši hlavní pomůcky, přístroje, materiály a ostatní podstatné věci použité k měření a vypracování této práce. Dále bych se v této kapitole chtěl věnovat pracovnímu postupu a zpracování výsledků.

Použité pomůcky a přístroje

Podstatnou částí postupu bylo vtištění tělísek, která byla tištěna na FFF/FDM 3D tiskárnách modelu „Original Prusa i3 MK3S+“ od firmy *Prusa Research a.s.* (Jednotlivé postupy práce s použitými přístroji budou popsány v části *Postup práce.*)

Dalším použitým přístrojem byl analyzátor vlhkosti „DBS 60-3“ od firmy *Kern*, přístroj, který měří vlhkost filamentu na základě zahřátí materiálu a následnému určení hodnoty z rozdílů hmotností. Používá se pro zjištění toho, jestli je materiál dobře vysušen, aby se zajistila dobrá kvalita tisku. S tím souvisí laboratorní sušárna, ve které se filamenty suší. V mé práci byla použita sušárna „Drys“ od firmy *COLO Laboratory Experts*.

K zjištění tahových vlastností materiálů jsem použil univerzální zkušební stroj pro měření tahových vlastností materiálů „EZTest“ od firmy *Shimadzu*, který dokáže natahovat specifická tělíska, měřit jejich vlastnosti, chování a přehledně hodnoty zapisovat do propojeného notebooku s připraveným programem. S tímto měřením souvisí také digitální šuplera „Digimatic Absolute AOS“ od společnosti *Mitutoyo*, pomocí které jsem měřil délku a šířku tělísek, jejichž hodnoty se v reálném čase zapisovaly do již zmíněného programu, a ze kterých zároveň vycházelo měření trhacím přístrojem.

Podstatným zařízením byl také analogový durometr „LD 0550“ od značky Shore A TQC. Používá se na měření tvrdostí gum, měkkých plastů a elastomerů.

Použité materiály

K testování bylo zvoleno 8 materiálů. První čtyři materiály jsou vyvíjené společností *Prusa Polymers a.s.* Zbylé čtyři materiály pochází od konkurenčních výrobců. Všechny tyto materiály byly záměrně vybrány, jakožto materiály na bázi polyuretanu.

Jakožto konkurenční materiály jsme vybrali následující:

- „Fiberflex 40D“ od společnosti *Fiberlogy*

- „FilaFlexible40“ od společnosti *Filatech*
- „Flexfill 98A“ od společnosti *Fillamentum*
- „SainSmart TPU“ od společnosti *SainSmart*

Materiály od společnosti *Prusa Polymers* si můžeme označit jako materiály 0, 1, 2 a 3. Materiál 0 je čistý TPU materiál. Ostatní materiály se mezi sebou liší procentuálními poměry přidávaných aditiv, které mají příznivý vliv na tiskové vlastnosti a jsou nezveřejněné. Také se očekává, že budou mít patřičný vliv i na mechanické vlastnosti, což je mimo jiné předmětem mé práce. Materiály můžeme seřadit od 1 do 3 s tím, že materiál 1 má nejmenší procentuální zastoupení aditiv a naopak materiál 3 má zastoupení nejvyšší.

Použité programy

Velmi podstatným použitým programem byl software pro přípravu .gcode souborů „PrusaSlicer 2.5.0“ od *Prusa Development*, což je program, který umožňuje upravit nastavení tisku a připravit tělísko k tisku. S určitým nastavením dokáže tzv. slicovat objekty, a následně tak vytvořit G-CODE (kód pro tiskárnu, v němž jsou stanoveny veškeré úkony, které má tiskárna provést). Ve své práci jsem ho použil zejména k vytvoření profilů pro jednotlivé materiály.

Při práci s trhacím přístrojem jsem použil software „Trapezium Lite X“ společnosti Shimadzu. Jedná se o program, který během měření s trhacím přístrojem zaznamenával veškeré hodnoty a zároveň zprostředkoval a promítal do měření hodnoty dříve naměřené šuplerou. Po měření jsem tak měl k dispozici tabulku všech naměřených hodnot a grafy, které zobrazují průběh měření (chování určitého materiálu, který je natahován).

V poslední řadě jsem použil tabulkový editor „Microsoft Excel“ od firmy *Microsoft*, ve kterém jsem zpracoval a uložil veškerá naměřená data z programu Trapezium.

Postup práce

Příprava tělísek k tisku

Před tisknutím samotných tělísek, které jsem použil při měření, bylo zapotřebí připravit je k tisku. První část práce tedy probíhala v programu PrusaSlicer.

Na počátku jsem měl k dispozici od svého externího školitele modely tělísek, které jsem při své práci potřeboval a které se běžně na tyto testy používají.

Do PrusaSlicer jsem vždy importoval model tělíska a zvolil materiál, jaký má být použit při tisku. Tento program nabízí obsáhlý výběr materiálů (i konkurenčních), které již mají přednastaveny základní parametry pro tisk (teplota extruderu, teplota podložky,...). U materiálů FilaFlex40, FiberFlex 40D, Flexfill 98A a Sainsmart TPU jsem tak měl přednastaveny základní parametry. Materiály 0, 1, 2 a 3 nejsou ještě obsáhnuty v PrusaSliceru z důvodu probíhajícího vývoje. Z toho důvodu mi byly od externího školitele poskytnuty konfigurace, při jejichž manuálním importu se PrusaSlicer nastaví. Po tomto základním nastavení jsem musel ještě

nastavit výplň objektu na 100 % a vrchní a spodní stěny nastavit na 0, aby vytištěné objekty měly potřebné vlastnosti a strukturu k budoucímu měření. Ve finále jsem objekty tzv. vyslicoval (programem rozřezal na jednotlivé vrstvy, které bude tiskárna tisknout) a následně vytvořil G-CODE. Takto vytvořené G-CODY pro každý materiál (dohromady 16) jsem uložil na SD karty, které se dávají do tiskárny.

Příprava tiskárny a filamentů před tiskem

Před tiskem se musí tiskárna vyčistit a zkalibrovat, aby tisk proběhl bez problémů. Nejprve jsem vyndal z tiskárny starý filament (pokud byl nějaký dříve zaveden) a vyčistil jsem drátkem motor tiskárny a měděným kartáčkem extruder, aby nedocházelo k budoucímu znečištění tělíska jiným materiálem. Dále jsem očistil isopropanolem podložku, na které se bude tisknout. Po těchto krocích následuje kalibrování tiskárny.

Ke kalibraci se používá tzv. kalibrační tělísko vytištěné z PLA materiálu, které by při rychlém vytištění mělo vážit 1,75 g. Jeho hmotnost může ovlivnit částečně ucpaný extruder nebo špatné nastavení přítlaku extruderu při tištění. Po kalibraci tiskárny jsem, ještě před opětovným vyčištěním tiskárny a zavedením požadovaného filamentu, musel změřit vlhkost filamentu, který jsem chtěl použít. Z důvodu částečné absorpce vzdušné vlhkosti jsou flexibilní materiály běžně sušeny v pecích (laboratorních sušárnách) s teplotou 60 °C po dobu alespoň 4 hodin. Jejich vlhkost před tiskem by se tedy měla pohybovat okolo 0,2 % . Vlhkost jsem měřil tak, že jsem nastříhal kousek filamentu tak, aby výsledné množství vážilo kolem 10 g. Následně jsem toto množství dal do analyzátoru vlhkosti, který jsem nastavil na 100 °C po dobu 10 minut. Po deseti minutách jsem zjistil vlhkost a ověřil tak, zda je materiál vhodný k tisku.

Posledním krokem přípravy je zavádění požadovaného filamentu. Při práci s flexibilními filamenti nemusí fungovat dobře automatické zavádění filamentu, proto jsem veškeré filamenti zaváděl manuálně.

Tisk

Tisk probíhal na několika tiskárnách zároveň. K měření jsem potřeboval 3 tělíska určená pro test tvrdosti a 5 tělísek pro test v tahu. Z důvodu toho, že by mohla být nějaká tělíska po tisku poškozená, jsem tiskl alespoň 4 tělíska pro tvrdost a alespoň 7 tělísek pro tah. Tělíska pro měření tvrdosti se tiskla v průměru 20 minut a tělíska určená pro tah v průměru 8 minut. Po vytisknutí jsem zkontroloval vzhled i strukturu tělísek, zda nebyla porušena či znečištěna jiným filamentem. Tato kontrola byla důležitá, aby bylo měření přesné. Po tisku bylo důležité nechat tělíska 24 hodin kondicionovat pro ustálení všech procesů v tělískách. Z toho důvodu probíhalo měření až další den.

Měření

Před začátkem měření jsem u tělísek určených pro zkoušku v tahu změřil digitální šuplerou jejich parametry (šířku a tloušťku). Každá finální hodnota vycházela z nejnižší naměřené

hodnoty ze třech měření po celé délce tělíska. To znamená, že každé jedno tělísko bylo změřeno 6krát (3x šířka, 3x tloušťka).

Po změření prvních dvou materiálů jsem mohl začít s měřením na trhacím přístroji. Tělísko stačilo pevně upevnit do ramen trhacího přístroje a poté jen nastavit, aby se počáteční hodnota měření přibližovala hodnotě 0,1 N. Průměrná délka měření jednoho tělíska činila něco kolem 5 minut, z toho důvodu jsem mohl doměřit parametry zbylých materiálů v průběhu a ušetřit tak čas.

Po naměření zbylých parametrů tělísek jsem se v průběhu měření trhacím přístrojem věnoval měření tvrdosti tělísek. K tomuto měření jsem použil durometr a již dříve vytištěná tělíska pro test tvrdosti. Durometr jsem kolmo zapichoval do tělísek na tři různá místa a veškeré hodnoty jsem zapsal.

Zpracování výsledků

Hodnoty tvrdostí tělísek jsem zprůměroval a určil směrodatnou odchylku. Veškeré výsledky a naměřené hodnoty (vlhkost materiálů, tvrdosti a hodnoty spojené s měřením na trhacím stroji) jsem následně zanesl do programu Microsoft Excel.

Výsledky a diskuse

Tvrдость materiálů

Tabulka č.1: Hmotnost a vlhkost filamentů

| Název filamentu | Hmotnost filamentu před vysušením | Vlhkost |
|-----------------|-----------------------------------|---------|
| SainSmartTPU | 10,185 g | 0,18 % |
| FilaFlexible40 | 10,147 g | 0,22 % |
| Fiberflex 40D | 10,035 g | 0,16 % |
| Flexfill 98A | 10,202 g | 0,19 % |

V tabulce Tabulka č.1: Hmotnost a vlhkost filamentů jsou zaneseny hmotnosti před měřením a změřené vlhkosti filamentů konkurenčních značek. Z grafu vyplývá, že nejlépe byl vysušen filament Fiberflex 40. Každopádně požadovaná hodnota vlhkosti filamentu byla předem stanovena na hodnotu pohybující se kolem 0,2 % (s odchylkou v rámci setin), což znamená, že hodnoty vlhkostí všech uvedených filamentů odpovídají prvotním požadavkům.

Tabulka č.2: Tvrдость materiálů konkurenčních značek

| | Flexfill 98A | SainSmartTPU | FilaFlexible40 | Fiberflex 40D |
|-----------|--------------|--------------|----------------|---------------|
| Kostka A | | | | |
| 1. měření | 98,00 | 93,00 | 92,00 | 93,00 |
| 2. měření | 97,00 | 94,00 | 93,00 | 94,00 |
| 3. měření | 98,00, | 93,00 | 92,00 | 93,00 |
| Kostka B | | | | |
| 1. měření | 96,00 | 94,00 | 92,00 | 93,00 |
| 2. měření | 97,00 | 95,00 | 91,00 | 94,00 |
| 3. měření | 97,00 | 94,00 | 92,00 | 94,00 |
| Kostka C | | | | |
| 1. měření | 96,00 | 94,00 | 91,00 | 93,00 |
| 2. měření | 96,00 | 94,00 | 91,00 | 92,00 |
| 3. měření | 98,00 | 93,00 | 92,00 | 92,00, |
| Průměr | 97,00 | 93,78 | 91,78 | 93,11 |
| SMODCH | 0,82 | 0,63 | 0,63 | 0,74 |

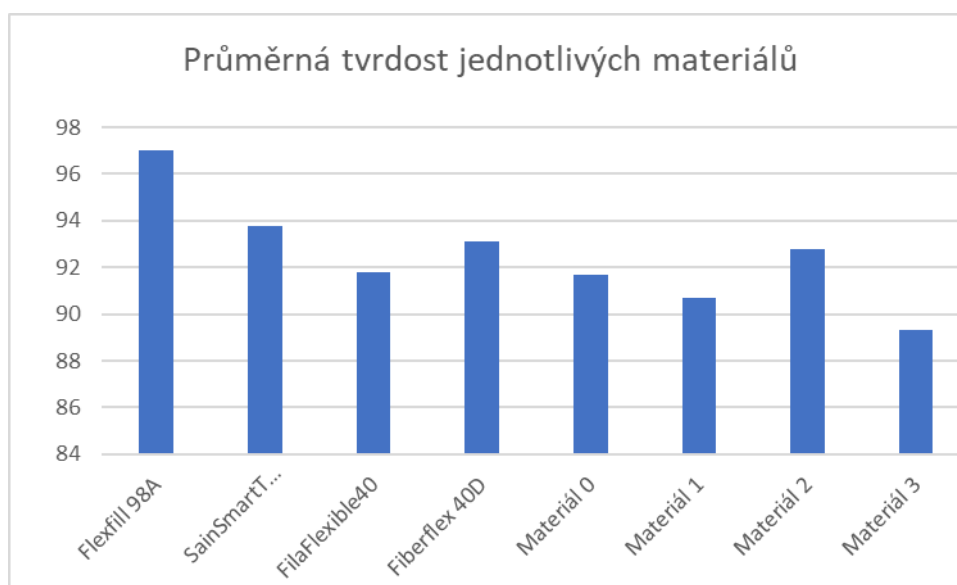
Pozn.: Čísla uvedená v tabulce jsou v stupnici Shore A (10 = extra měkké – 100 = extra tvrdé)

Tabulka č.3: Tvrdost materiálů vyvíjených firmou Prusa Polymers a.s.

| | Materiál 0 | Materiál 1 | Materiál 2 | Materiál 3 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Kostka A | | | | |
| 1. měření | 92,00 | 89,00 | 92,00 | 89,00 |
| 2. měření | 90,00 | 90,00 | 92,00 | 90,00 |
| 3. měření | 92,00 | 90,00 | 93,00 | 90,00 |
| Kostka B | | | | |
| 1. měření | 92,00 | 91,00 | 93,00 | 89,00 |
| 2. měření | 91,00 | 92,00 | 93,00 | 89,00 |
| 3. měření | 92,00 | 92,00 | 94,00 | 90,00 |
| Kostka C | | | | |
| 1. měření | 92,00 | 92,00 | 93,00 | 90,00 |
| 2. měření | 92,00 | 89,00 | 93,00 | 88,00 |
| 3. měření | 92,00 | 91,00 | 92,00 | 89,00 |
| Průměr | 91,67 | 90,67 | 92,78 | 89,33 |
| SMODCH | 0,67 | 1,15 | 0,63 | 0,67 |

Pozn.: Čísla uvedená v tabulce jsou v stupnici Shore A (10 = extra měkké – 100 = extra tvrdé)

Graf 1 Srovnání průměrných tvrdostí materiálů



Z tabulek vyplývá, že všechny materiály jsou, v rámci stupnice Shore A, velmi pevnými polymery. Jejich průměrná tvrdost se pohybovala kolem hodnoty 90.

Hodnoty u Materiálu 1 vykazují největší směrodatnou odchylku (rozptyl), tzn. hodnoty jednotlivých měření tohoto materiálu se vzájemně více liší než u ostatních materiálů. To může být zapříčiněno nepřesným měřením s duometrem nebo také nepřesnostmi ve strukturách testovaných tělísek.

V znázorněném grafu je patrné, že nejtvrdším materiálem je Flexfill 98A. Nejměkčím materiálem je Materiál 3, tedy materiál s největším procentuálním podílem přidávaných aditiv.

Tahové vlastnosti materiálů

V rámci tahových vlastností materiálů jsem měřil maximální tahové napětí (max. stress), maximální prodloužení (max. strain), tahové napětí a prodloužení při přetržení tělíska (tyto hodnoty jsou velmi podobné, již zmíněným, maximálním hodnotám), hodnoty tahového napětí při určitém prodloužení (100%, 200% a 300%). Poslední měřenou hodnotou u materiálů byl tzv. YP (Yield point = mez kluzu), který znázorňuje hodnoty, při kterých polymer přechází z elastické deformace do plastické deformace, resp. hodnoty, po kterých se už materiál nevrátí do původního stavu.

Materiál 0

Tabulka č.4: Tahové vlastnosti Materiálu 0

| Materiál 0 | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 59,38 | 495,97 | 59,38 | 495,97 | 12,71 | 117,09 |
| II | 60,27 | 488,23 | 60,27 | 488,23 | 12,88 | 116,29 |
| III | 59,18 | 487,75 | 59,18 | 487,75 | 12,91 | 115,64 |
| IV | 54,61 | 473,23 | 54,61 | 473,23 | 12,55 | 112,96 |
| V | 59,38 | 482,63 | 59,37 | 482,67 | 13,31 | 120,27 |
| Průměr | 58,56 | 485,56 | 58,56 | 485,57 | 12,87 | 116,45 |
| SMODCH | 2,25 | 8,38 | 2,25 | 8,38 | 0,29 | 2,64 |
| Rozsah | 5,66 | 22,74 | 5,66 | 22,74 | 0,77 | 7,30 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.5: Tahové vlastnosti Materiálu 0 při procentuálním tahovém napětí

| Materiál 0 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 11,38 | 20,62 | 30,74 |
| II | 11,64 | 21,30 | 31,63 |
| III | 11,72 | 21,21 | 31,69 |
| IV | 11,56 | 21,02 | 31,12 |
| V | 11,66 | 21,39 | 31,94 |
| Průměr | 11,59 | 21,11 | 31,42 |
| SMODCH | 0,13 | 0,30 | 0,48 |
| Rozsah | 0,34 | 0,77 | 1,20 |

Z tabulky pro Materiál 0 vyplývá, že tento materiál je poměrně pevný, resp. maximální tahové napětí působící na tento materiál se pohybuje kolem 58 MPa. Maximální prodloužení se pohybuje okolo 485%. YP (bod, kdy polymer přechází z elastické deformace do plastické

deformace) tohoto materiálu odpovídá průměrnému prodloužení 116% a tahovému napětí 13 MPa.

Materiál 1

Tabulka č.6: Tahové vlastnosti Materiálu 1

| Materiál 1 | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 42,91 | 475,90 | 42,90 | 476,15 | 10,91 | 105,99 |
| II | 48,92 | 484,72 | 48,79 | 486,70 | 11,51 | 108,10 |
| III | 38,08 | 434,00 | 38,08 | 434,00 | 11,07 | 107,52 |
| IV | 49,91 | 470,92 | 49,85 | 470,96 | 12,55 | 107,90 |
| V | 45,52 | 468,40 | 45,37 | 469,10 | 11,26 | 108,90 |
| Průměr | 45,07 | 466,79 | 45,00 | 467,38 | 11,46 | 107,68 |
| SMODCH | 4,80 | 19,36 | 4,75 | 19,88 | 0,65 | 1,07 |
| Rozsah | 11,83 | 50,72 | 11,77 | 52,70 | 1,64 | 2,91 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.7: Tahové vlastnosti Materiálu 1 při procentuálním tahovém napětí

| Materiál 1 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 10,55 | 18,56 | 26,57 |
| II | 10,99 | 19,34 | 28,06 |
| III | 10,64 | 18,09 | 26,47 |
| IV | 11,98 | 20,85 | 30,25 |
| V | 10,71 | 18,75 | 27,39 |
| Průměr | 10,98 | 19,12 | 27,75 |
| SMODCH | 0,58 | 1,65 | 1,54 |
| Rozsah | 1,42 | 2,75 | 3,77 |

Z výsledků získaných z tabulky pro Materiál 1 (materiál s nejmenším procentuálním zastoupením aditiv) lze usoudit, že se jedná stále o poměrně pevný materiál. Nejvyšší hodnota tahového napětí, které tento materiál snese se pohybuje kolem 45 MPa. Pokud jde o maximální prodloužení, hodnota je přibližně 467%. Bod, kde materiál přechází z elastické deformace do plastické deformace (YP), je stanoven na hodnotě 11 MPa pro tahové napětí a průměrném prodloužení 107%.

V tabulce Tabulka č.6: Tahové vlastnosti Materiálu 1 je velmi patrná odchylka u maximálního prodloužení materiálu. Ta je způsobena výrazně nižší hodnotou u tělíska III (3. měření). Je to nejspíše způsobeno částečnou nepřesností měření, ale hlavně materiálovými faktory (nepřesnost při tisku, která způsobila malou odlišnost ve vnitřní struktuře tělíska). Zajímavé je, že odchylka je výrazná pouze u maximálního prodloužení a částečně tahového napětí, ale je

velice malá u hodnot YP. Znamená to tedy, že se patrně odlišnost (znehodnocenost) struktury tělíska projevila až při vyšší síle působící na tělísko, protože do tohoto bodu se znehodnocení neprojevuje.

Materiál 2

Tabulka č.8: Tahové vlastnosti Materiálu 2

| Materiál 2 | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 51,40 | 472,84 | 51,40 | 472,84 | 11,93 | 105,10 |
| II | 50,97 | 469,32 | 50,89 | 469,40 | 11,64 | 98,70 |
| III | 50,93 | 495,95 | 50,91 | 496,17 | 12,09 | 118,03 |
| IV | 50,30 | 476,37 | 50,26 | 476,54 | 11,80 | 104,35 |
| V | 49,88 | 485,12 | 49,88 | 485,12 | 12,24 | 117,10 |
| Průměr | 50,69 | 479,92 | 50,67 | 480,01 | 11,94 | 108,66 |
| SMODCH | 0,60 | 10,71 | 0,60 | 10,76 | 0,24 | 8,51 |
| Rozsah | 1,53 | 26,63 | 1,53 | 26,77 | 0,60 | 19,33 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.9: Tahové vlastnosti Materiálu 2 při procentuálním tahovém napětí

| Materiál 2 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 11,56 | 20,28 | 29,83 |
| II | 11,73 | 20,87 | 30,29 |
| III | 10,88 | 19,21 | 28,07 |
| IV | 11,50 | 20,28 | 29,50 |
| V | 11,09 | 19,49 | 28,50 |
| Průměr | 11,35 | 20,03 | 29,24 |
| SMODCH | 0,35 | 0,67 | 0,92 |
| Rozsah | 0,85 | 1,66 | 2,22 |

V tabulkách pro Materiál 2 je patrné, že se jedná o materiál opět podobný předchozím dvěma materiálům. Oproti předchozímu Materiál 1 vykazuje trochu větší maximální tahové napětí kolem 50 MPa. Materiál může být podroben prodloužení až 480 % předtím, než dojde k přetržení. Při prodloužení 108% a tahovém napětí 12 MPa dochází k překročení meze pevnosti kluzu v tahu.

Materiál 3

Tabulka č.10: Tahové vlastnosti Materiálu 3

| Materiál 3 | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 50,24 | 411,22 | 50,17 | 411,73 | 14,93 | 120,65 |
| II | 37,89 | 358,38 | 37,59 | 358,97 | 15,57 | 141,57 |
| III | 47,43 | 398,53 | 47,42 | 398,56 | 14,65 | 118,86 |
| IV | 43,99 | 380,70 | 43,99 | 380,70 | 15,13 | 128,20 |
| V | 43,48 | 369,92 | 43,48 | 369,92 | 15,27 | 126,10 |
| Průměr | 44,61 | 383,75 | 44,53 | 383,98 | 15,11 | 127,08 |
| SMODCH | 4,65 | 21,31 | 4,74 | 21,31 | 0,35 | 8,96 |
| Rozsah | 12,35 | 52,83 | 12,58 | 52,77 | 0,92 | 22,70 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.11: Tahové vlastnosti Materiálu 3 při procentuálním tahovém napětí

| Materiál 3 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 13,10 | 23,30 | 35,06 |
| II | 11,99 | 21,43 | 32,34 |
| III | 12,95 | 23,13 | 34,68 |
| IV | 12,58 | 22,86 | 34,37 |
| V | 12,93 | 23,14 | 35,02 |
| Průměr | 12,71 | 22,77 | 34,29 |
| SMODCH | 0,45 | 0,77 | 1,13 |
| Rozsah | 1,11 | 1,87 | 2,73 |

Dle Tabulek Tabulka č.10: Tahové vlastnosti Materiálu 3 a Tabulka č.11: Tahové vlastnosti Materiálu 3 při procentuálním tahovém napětí je patrné, že Materiál 3 vykazuje stále poměrně vysokou pevnost, i přestože, že je menší než u ostatních, již zmíněných, materiálů. Maximální tahové napětí se zde pohybovalo kolem 44 MPa. Oproti ostatním se však nejvíc liší v maximálním prodloužení, to činí zhruba 380%. Hodnoty pro YP jsou průměrně 15 MPa, co se týče tahového napětí, a 127% u prodloužení.

Opět je tu patrná odchylka u maximálního tahového napětí, kterou tvoří zejména měření I a měření II. Při druhém měření lze z tabulek vyčíst, že přetržení tohoto tělíska nastalo při menším tahovém napětí. Zároveň je také vidět, že i prodloužení při přetržení nebylo tak velké jako při ostatních měřeních. Zajímavé je však, že ačkoliv toto tělísko mělo menší zmíněné hodnoty, tak hodnoty meze kluzu jsou větší. Znamená to tedy, že ačkoliv nevykazovalo toto tělísko podobnou pevnost jako u ostatních tělísek, bylo lépe deformovatelné, resp. dalo se natáhnout do větší míry, aniž by nastala plastická deformace. Toto může být opět způsobeno odlišností ve vnitřní struktuře tělíska.

FilaFlexible40

Tabulka č.12: Tahové vlastnosti FilaFlexible40

| FilaFlexible 40 | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|-----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 22,74 | 641,08 | 22,23 | 648,20 | 11,61 | 279,93 |
| II | 23,54 | 687,80 | 23,49 | 689,08 | 11,61 | 283,88 |
| III | 23,52 | 687,78 | 23,42 | 690,67 | 11,56 | 284,45 |
| IV | 23,06 | 651,26 | 22,96 | 652,93 | 11,82 | 284,28 |
| V | 23,86 | 676,27 | 23,71 | 678,79 | 11,84 | 282,72 |
| Průměr | 23,35 | 668,84 | 23,16 | 671,93 | 11,69 | 283,05 |
| SMODCH | 0,44 | 21,52 | 0,59 | 20,10 | 0,13 | 1,87 |
| Rozsah | 1,12 | 46,72 | 1,48 | 42,47 | 0,28 | 4,52 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.13: Tahové vlastnosti FilaFlexible40 při procentuálním tahovém napětí

| FilaFlexible 40 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 8,38 | 9,86 | 12,08 |
| II | 8,29 | 9,75 | 11,99 |
| III | 8,27 | 9,80 | 11,93 |
| IV | 8,43 | 10,00 | 12,22 |
| V | 8,55 | 10,12 | 12,36 |
| Průměr | 8,38 | 9,91 | 12,12 |
| SMODCH | 0,11 | 0,15 | 0,17 |
| Rozsah | 0,28 | 0,37 | 0,43 |

Z výsledků, které byly získány z tabulek pro FilaFlexible40, je zřejmé, že se jedná o materiál, který vykazuje menší pevnost (přetrhne se při menší působící síle), ale zároveň je elastičtější než dosud uvedené materiály. Tento materiál může odolat maximálnímu tahovému napětí v rozmezí okolo 23 MPa. Nicméně, co se týče jeho maximálního prodloužení, to se pohybuje zhruba kolem 670 %. Materiál přechází z pružné deformace do plastické deformace, když je podroben průměrnému prodloužení o 283 % a tahovému napětí 11 MPa. Z tabulky Tabulka č.13: Tahové vlastnosti FilaFlexible40 při procentuálním tahovém napětí zároveň vyplývá, že oproti ostatním materiálům u tohoto materiálu neplatí přímo úměrná závislost prodloužení a tahového napětí. (hodnota napětí při 100% není dvojnásobná při 200% prodloužení).

Opět je tu zřetelná odchylka, která je způsobena obzvláště 1. měřením. Pozoruhodné je, že maximální napětí, které toto tělíčko vykazovalo se moc neliší od ostatních tělísek, ale odchylka v prodloužení je patrnější. To může být opět způsobeno malými rozdíly v mikrostruktuře tělíška a nebo také může dojít k náhodným fluktuacím v materiálu, což by mohlo vést k rozdílnému prodloužení jednotlivých tělísek.

Flexfill 98A

Tabulka č.14: Tahové vlastnosti Flexfill 98A

| Flexfill 98A | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 52,64 | 343,10 | 52,59 | 343,74 | 11,40 | 29,75 |
| II | 58,54 | 352,35 | 58,44 | 352,84 | 13,15 | 37,05 |
| III | 55,95 | 350,19 | 55,87 | 350,62 | 12,71 | 38,68 |
| IV | 52,85 | 344,39 | 52,76 | 344,85 | 10,89 | 25,55 |
| V | 60,97 | 370,18 | 60,96 | 370,35 | 12,07 | 28,83 |
| Průměr | 56,19 | 352,04 | 56,12 | 352,48 | 12,04 | 31,97 |
| SMODCH | 3,61 | 10,85 | 3,63 | 10,70 | 0,92 | 5,63 |
| Rozsah | 8,33 | 27,08 | 8,38 | 26,62 | 2,26 | 13,13 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.15: Tahové vlastnosti Flexfill 98A při procentuálním tahovém napětí

| Flexfill 98A | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 19,10 | 33,07 | 46,63 |
| II | 20,82 | 36,13 | 49,90 |
| III | 19,90 | 34,36 | 47,92 |
| IV | 19,19 | 33,32 | 46,32 |
| V | 20,46 | 35,46 | 49,75 |
| Průměr | 19,89 | 34,47 | 48,10 |
| SMODCH | 0,76 | 1,33 | 1,68 |
| Rozsah | 1,72 | 3,06 | 3,58 |

Z naměřených hodnot tohoto materiálu lze usoudit, že předností tohoto materiálu bude jeho pevnost. Maximální tahové napětí, které lze na materiál aplikovat, se pohybuje okolo 56 MPa. Průměrné prodloužení, které tento materiál vykazuje je 352%. Nejen, že je tato hodnota nižší než u ostatních materiálů, i jeho plastická deformace nastává při výrazně nižších hodnotách, konkrétně při prodloužení jen 31% a tahovém napětí 12 MPa

SainSmartTPU

Tabulka č.16: Tahové vlastnosti SainSmartTPU

| SainSmartTPU | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 52,37 | 459,17 | 52,37 | 459,17 | 11,03 | 88,48 |
| II | 53,25 | 461,82 | 53,25 | 461,82 | 11,17 | 87,96 |
| III | 49,71 | 436,02 | 49,71 | 436,02 | 11,47 | 89,88 |
| IV | 52,97 | 462,94 | 52,97 | 462,97 | 11,27 | 92,52 |
| V | 49,18 | 437,08 | 49,18 | 437,20 | 11,31 | 89,90 |
| Průměr | 51,50 | 451,40 | 51,50 | 451,43 | 11,25 | 89,75 |
| SMODCH | 1,91 | 13,63 | 1,91 | 13,61 | 0,17 | 1,77 |
| Rozsah | 4,07 | 26,92 | 4,07 | 26,95 | 0,44 | 4,56 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.17: Tahové vlastnosti SainSmartTPU při procentuálním tahovém napětí

| SainSmartTPU | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 11,87 | 22,37 | 32,60 |
| II | 12,05 | 22,65 | 33,38 |
| III | 12,23 | 23,00 | 33,64 |
| IV | 11,80 | 22,59 | 32,62 |
| V | 12,09 | 22,90 | 32,89 |
| Průměr | 12,01 | 22,70 | 33,03 |
| SMODCH | 0,17 | 0,25 | 0,47 |
| Rozsah | 0,43 | 0,63 | 1,04 |

Pro materiál SainSmartTPU vyplývá, že jedná opět o pevný polymer. Hodnotami je vcelku podobný Materiál 2. Vykazuje jen trochu menší maximální prodloužení, konkrétně 451%. Maximální tahové napětí se v tomto případě pohybuje kolem 51 MPa. Oproti ostatním materiálům má opět nižší hodnoty v rámci meze kluzu, může být prodloužen o 89% a vystaven napětí 11 MPa.

Fiberflex 40D

Tabulka č.18: Tahové vlastnosti Fiberflex 40D

| Fiberflex 40D | Max. stress | Max. strain | Stress (break) | Strain (break) | YP (stress) | YP (strain) |
|---------------|--------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|
| Jednotka | MPa | % | MPa | % | MPa | % |
| I | 25,97 | 707,12 | 25,85 | 710,50 | 13,47 | 317,75 |
| II | 26,46 | 743,28 | 26,45 | 743,92 | 13,00 | 311,08 |
| III | 30,20 | 798,90 | 30,03 | 801,59 | 13,51 | 305,19 |
| IV | 26,62 | 745,84 | 26,49 | 749,10 | 13,07 | 312,92 |
| V | 26,49 | 757,40 | 26,45 | 760,07 | 13,17 | 323,03 |
| Průměr | 27,15 | 750,51 | 27,05 | 753,03 | 13,24 | 313,99 |
| SMODCH | 1,72 | 32,96 | 1,69 | 32,84 | 0,23 | 6,76 |
| Rozsah | 4,23 | 91,78 | 4,18 | 91,09 | 0,51 | 17,85 |

Pozn.: SMODCH = směrodatná odchylka; Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení; YP (Yield point)

Tabulka č.19: Tahové vlastnosti Fiberflex 40D při procentuálním tahovém napětí

| FilaFlexible 40 | Stress (100%) | Stress (200%) | Stress (300%) |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|
| Jednotka | MPa | MPa | MPa |
| I | 8,08 | 10,23 | 12,98 |
| II | 7,93 | 10,03 | 12,68 |
| III | 8,27 | 10,55 | 13,33 |
| IV | 7,91 | 10,02 | 12,68 |
| V | 7,80 | 9,90 | 12,47 |
| Průměr | 8,00 | 10,15 | 12,83 |
| SMODCH | 0,18 | 0,25 | 0,34 |
| Rozsah | 0,47 | 0,64 | 0,87 |

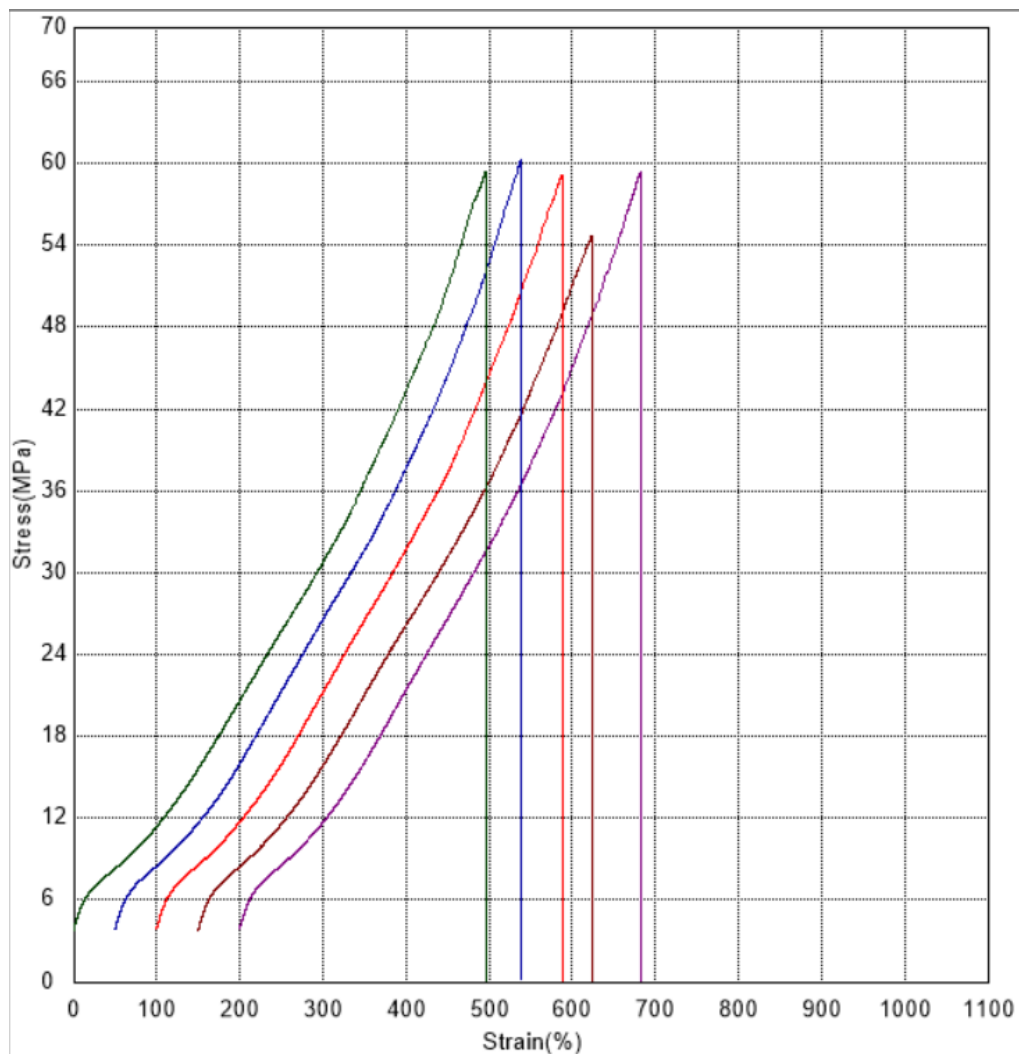
Stejně jako materiál FilaFlexible40 vykazuje i tento materiál velkou elasticitu s menším maximálním tahovým napětím. Přetržení tohoto materiálu nastává již při 27 MPa, nicméně hodnota prodloužení je přibližně 750%, což je ze všech materiálů nejvyšší. Yield pointu je dosaženo při hodnotách 13 MPa a 313%.

Stejně jako FilaFlexible40 nejsou hodnoty prodloužení a tahové napětí přímo úměrné. Opět platí, že dvojnásobek hodnoty tahového napětí při 100% neodpovídá tahovému napětí při 200%.

Tahové křivky

Tahové křivky jsou také jedním z výsledků mé práce. Odrážejí a zobrazují podrobněji hodnoty z tabulek a zároveň tak i průběh měření, díky čemuž umožňují snazší orientaci ve výsledcích. Křivky ukazují závislost mezi prodloužením a tahovým napětím materiálu.

Tahové křivky č.1: Materiálu 0



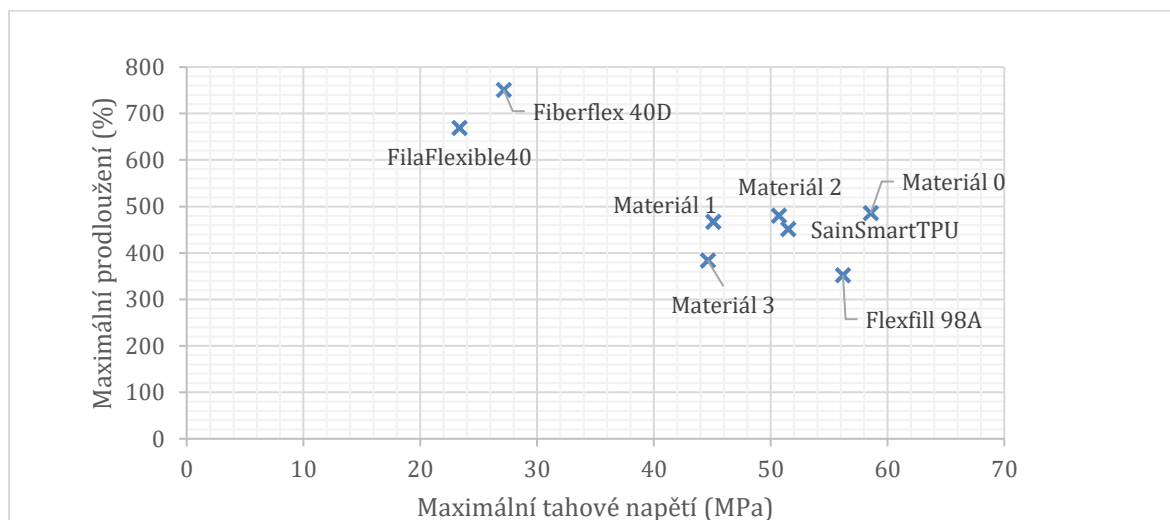
Pozn.: Stress = tahové napětí; Strain = prodloužení

Na výše uvedeném obrázku je znázorněno všech pět křivek jednotlivých měření Materiálu 0. Křivky jsou vůči sobě posunuty o 50 % na ose s prodloužením. Je to důvodu snazší orientace v jednotlivých měřeních. Přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulkách, a tak tyto křivky slouží primárně k snazšímu určení vlastností materiálu a vizuálnímu znázornění chování materiálu v průběhu měření. Kupříkladu konkrétně z Tahové křivky č.1: Materiálu 0 lze určit, že materiál bude pevnějšího charakteru a bude se vykazovat poměrně velkým maximálním prodloužením. Takto může být z křivek vyvozen velmi podobný závěr jako z tabulek. .

Tahové křivky ostatních materiálů se nachází v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Porovnání a zhodnocení výsledků

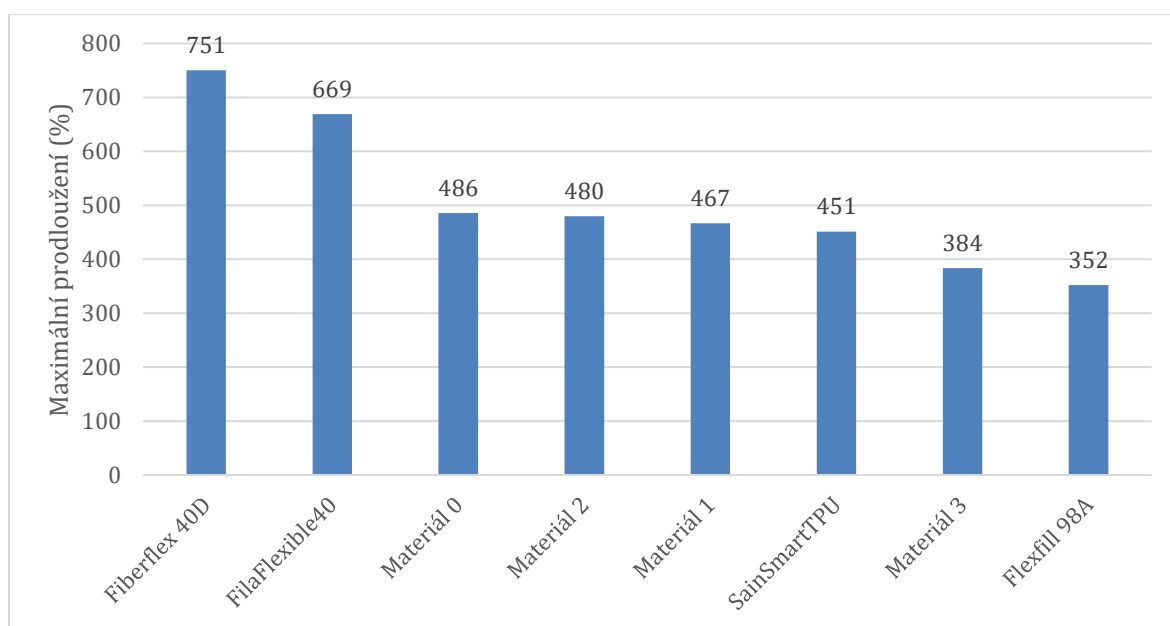
Graf č.2: Srovnání materiálů



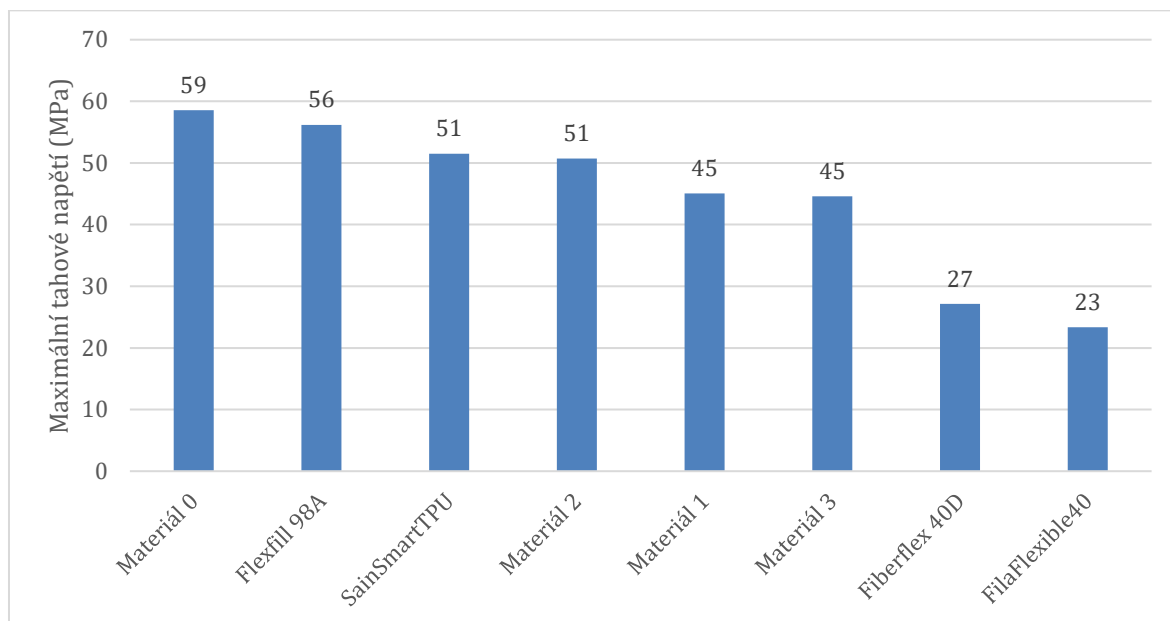
Na tomto grafu jsou zaneseny jednotlivé měřené materiály v rámci jejich průměrných hodnot maximálního tahového napětí a prodloužení. Usnadňuje orientaci mezi výsledky v tabulkách. Lze snadněji říci, že materiály FilaFlexible40 a Fiberflex 40D budou patřit mezi materiály, které se vyznačují svou elasticitou. To znamená, že se oproti ostatním materiálům dají lépe natahovat a je k tomu zapotřebí méně síly.

Naproti tomu například materiál Flexfill 98A se bude vyznačovat velkou pevností a podstatně menší elasticitou než ostatní materiály. Dále se bude vyznačovat i velkou tvrdostí, což je patrné z výsledků měření tvrdosti.

Graf č.3: Srovnání materiálů (prodloužení)



Graf č.4: Srovnání materiálů (tahové napětí)



Tyto dva výše uvedené grafy zobrazují stejné hodnoty jako Graf č.2: Srovnání materiálů, jen jsou navzájem oddělené a seřazené podle nejvyšší průměrné hodnoty.

Závěr

Ve své práci jsem měřil fyzikální vlastnosti flexibilních materiálů ve 3D tisku. Porovnával jsem 4 materiály vyvíjené společností *Prusa Research a.s.* a 4 konkurenční materiály. Hodnoty tvrdostí a tahových vlastností jednotlivých jsem se snažil analyzovat a zaneš je do přehledných tabulek a grafů. Dospěl jsem k závěru, že nelze jednoznačně určit, jaký materiál je svými vlastnostmi nejlepší. Každý materiál vykazuje odlišné vlastnosti, které by měli být koncovým uživatelem zváženy při výběru materiálu, který odpovídá požadovaným vlastnostem finálního produktu.

Z výsledků mé práce lze vyvodit tři hlavní rozdělení materiálů a jejich použití podle jejich zjištěných vlastností. Materiály s velkým prodloužením a menším maximálním tahovým napětím (FilaFlexible40, Fiberflex 40D) se mohou použít například pro výrobu elastických produktů, jako elastické pásy, elastické těsnění a další. Díky své elasticitě a pružnosti se tyto materiály mohou snadno přizpůsobit různým tvarům a velikostem a mohou se používat tam, kde je vyžadována schopnost roztažení a návratu do původního tvaru.

Na druhé straně materiály s velkou tvrdostí, pevností, ale menším prodloužením (Flexfill 98A) se mohou použít pro výrobu přesných dílů, jako jsou těsnění, kryty a další. Tyto materiály mají vysokou odolnost proti opotřebení, odolnost proti trhlínám a dobré vlastnosti při uchycování.

Materiály s poměrně velkou pevností a s poměrně velkým maximálním prodloužením (Materiál 0, 1, 2, 3 a SainSmartTPU) mohou být využity v široké škále aplikací, jako jsou nárazově odolné kryty, pružné ovládací prvky, lehčí díly pro dopravní prostředky, elastické náhrady a další. Tyto materiály mají vysokou pevnost, zatímco zároveň zachovávají svou elasticitu a flexibilitu, což jim umožňuje vykazovat dobré vlastnosti při nárazech a náhodných namáháních.

Tato práce však odráží jen specifické vlastnosti materiálů. Hodnoty naměřené v rámci této práce slouží k zobrazení určitého chování materiálů, ale neodráží všechny aspekty, které rozhodují v kvalitě výsledného produktu. Nejsou zde například zahrnuty vlastnosti aditiv přidávaných do materiálů. Ačkoliv se tedy může například zdát, že Materiál 0 je nejvhodnějším materiálem v rámci jeho fyzikálních vlastností, může být kupříkladu nevhodný v rámci jeho přilnavosti k jiným materiálům, hydrofóbnosti, degradaci na světle a ostatních negativních vlastnostech, které jsou upravovány přidávanými aditivami.

Seznam literatury

1. PRŮŠA, Josef a Martin BACH. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research, 2019. Dostupné také z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/
2. HAYES, Adam. *3D Printing: What It Is, How It Works, Examples* [online]. New York: Dotdash Meredith, 2021, 29. 11. 2021 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/terms/1/3d-printing.asp>
3. VANTA, David. *Proč používat 3D tisk? Kde se dá využít?* [online]. Technologie Budoucnosti, 2019, 13. 3. 2019 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://technologiebudoucnosti.cz/proc-pouzivat-3d-tisk-kde-se-da-vyuzit/>
4. PLA. *Prusa3d* [online]. Praha: Prusa Research, 2022, 27. 7. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062
5. Flexibilní materiály. *Prusa3d* [online]. Praha: Prusa Research, 2022, 27. 11. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/flexibilni-materialy_2057
6. Original Prusa i3 MK3S+. In: *Prusa3d* [online]. Praha: Prusa Research, 2022, 16. 12. 2022 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://cdn.prusa3d.com/content/images/category/imageMobile/original/2365.jp>
7. *Příručka 3D tiskaře* [online]. Praha: Prusa Research, 2022-4-21 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://help.prusa3d.com/cs/downloads/mk3s/handbook>
8. BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Brno: Code Creator, 2015 [cit. 2022-12-27]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://etul.publi.cz/book/180-polymery>
9. Polymer. *Britannica* [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica, 2022, 23. 8. 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/polymer>
10. CHANDA, Manas. *Introduction to Polymer Science and Chemistry*. 2. vydání. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 978-1-4665-5385-9.
11. GENT, Alan. *Elastomer*. Britannica [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica, 2019, 7. 8. 2019 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/elastomer>
12. SHANKS, Robert a Ing KONG. *Thermoplastic Elastomers*. Rijeka: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0346-2.
13. Polyurethane. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022 [cit. 2022-12-31]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polyurethane>