

Vliv leptání povrchu na mechanické vlastnosti výrobků z ABS zhotovených technologií Arburg freeforming

Bc. Jan Vondřejc

Diplomová práce
2024

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jan Vondřejc
Osobní číslo:	T22392
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv leptání povrchu na mechanické vlastnosti výrobků z ABS zhotovených technologií Arburg freeforming

Zásady pro vypracování

1. Zpracování literární rešerše na dané téma.
2. Vyrobení zkušebních těles technologií Arburg freeforming.
3. Leptání zkušebních těles vybranými metodami.
4. Měření mechanických vlastností.
5. Vyhodnocení získaných výsledků.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. MCCULLOUGH, Eric J. a Vamsi K. YADAVALLI, 2013. Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. **213**(6), 947–954. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015
2. MU, Mulan, Chun-Yen OU, Junjie WANG a Yongliang LIU, 2020. Surface modification of prototypes in fused filament fabrication using chemical vapour smoothing. *Additive Manufacturing* [online]. **31**, 100972. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100972
3. POORNAGANTI, Satyanarayana, Shivraj Narayan YEOLE a Jaya Prakash KODE, 2022. Insights on surface characterization of 3D printed polymeric parts. *Materials Today: Proceedings* [online]. **62**, 3837–3848. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2022.04.499
4. SAENZ, F., C. OTAROLA, K. VALLADARES a J. ROJAS, 2021. Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K. *Additive Manufacturing* [online]. **39**, 101841. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2021.101841

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Janošík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 27. února 2024

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užit své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Jan Vondřejc

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zaměřuje na zkoumání vlivu leptání acetonem na povrch ABS materiálu. Testovací vzorky byly vyrobeny pomocí stroje Arburg freeformer a 3D tiskárny Prusa.

Teoretická část práce detailně rozebírá doposud známé aplikace leptadel na ABS materiálu, aditivní technologii a technologii 3D tisku, včetně používaných materiálů. Dále se zabývá technologií volného tvarování, povrchovými úpravami plastů a mechanickými zkouškami materiálu.

Praktická část práce popisuje provedení experimentu leptání acetonem testovacích vzorků vyrobených na strojích Arburg freeformer a 3D tiskárnou Prusa, s využitím speciálně navrženého držáku. Po experimentu následovalo mechanické testování materiálu.

Klíčová slova: Akrylonitrilbutadienstyren, 3D tisk, Aditivní technologie, Freeformer, Leptání povrchu, Aceton

ABSTRACT

The aim of this thesis is to investigate the effect of etching on the ABS surface. Test samples were made with an Arburg freeformer and a Prusa 3D printer.

The theoretical part deals with the investigation of the known applications of etchants on ABS, additive technology, 3D printing technology including types and materials used in standard and non-standard ways. The chapters contained in the theoretical part are further developed by freeforming technology, surface treatment of plastics and mechanical testing of materials.

The practical part deals with the experiment of acetone etching of test samples produced on Arburg freeformer and Prusa 3D printing machines, using a specially designed holder. After the experiment, mechanical testing of the material took place.

Keywords: Acrylonitrile butadiene styrene, 3D printing, Additive technology, Freeformer, Surface etching, Acetone

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Václavu Janoščíkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady, typy a čas věnovaný této diplomové práci. Dále bych rád poděkoval všem pedagogům, kteří mě provázeli na půdě Fakulty technologické, především pak těm, jež trávili dlouhé dny vysvětlováním látky při mém inženýrském studiu. Také chci poděkovat rodině za neustálou motivaci, důvěru ve mně vloženou a podporu, která byla a bude nadále hnacím motorem nejen při studijních cestách.

Nejprve se tě budou ptát, proč to děláš. A poté se tě budou ptát, jak jsi to udělal.

Život jako hra

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

I	TEORETICKÁ ČÁST	10
1	SOUČASNÝ STAV	11
1.1	ÚVOD	11
2	ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	14
3	3D TISK	16
3.1	TECHNOLOGIE 3D TISKU	16
3.1.1	Fused Deposition Modeling – FDM	16
3.1.2	Laminated Object Manufacturing- LOM	17
3.1.3	Selective Laser Sintering- SLS	18
3.1.4	Stereolithography- SLA	19
3.2	MATERIÁLY 3D TISKU	20
3.2.1	Polymery a kompozity	21
3.2.2	Kovové materiály a jejich slitiny	23
4	TECHNOLOGIE VOLNÉHO TVAROVÁNÍ	25
4.1	ARBURG FREEFORMING	25
5	POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLASTŮ	30
5.1	ČIŠTĚNÍ	31
5.2	KORÓNOVÉ VÝBOJE.....	31
5.3	ÚPRAVA PLASMOU	32
5.4	CHEMICKÉ MOŘENÍ.....	32
5.5	LEPTÁNÍ	33
5.5.1	Leptání acetonem	33
6	MECHANICKÉ ZKOUŠKY	35
6.1	MECHANICKÁ ZKOUŠKA STATICKÁ	35
6.1.1	Tahová zkouška.....	35
6.2	MECHANICKÉ ZKOUŠKY DYNAMICKÉ	37
6.2.1	Zkouška rázem v ohybu – Charpyho kladivo	37
6.3	INSTRUMENTOVANÁ VNIKACÍ ZKOUŠKA TVRDOSTI (DSI)	38
II	PRAKTICKÁ ČÁST	42
7	PŘÍPRAVA VZORKŮ ARBURG FREEFORMER	43
7.1	NASTAVENÍ STROJE ARBURG PRO VOLNÉ VAROVÁNÍ.....	44
7.2	NÁVRH DRŽÁKU TESTOVACÍCH VZORKŮ	45
7.3	LEPTÁNÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	52
7.4	POPIS EXPERIMENTU.....	53
7.5	TESTOVÁNÍ VZORKŮ Z ARBURG FREEFORMERU	59

7.5.1	Tahová zkouška.....	59
7.5.2	Zkouška Sharpyho kladivem.....	64
7.5.3	Zkouška mikrotvrlosti	67
8	PŘÍPRAVA VZORKŮ NA PRUSA 3D TISKÁRNĚ.....	72
8.1	NASTAVENÍ PRUSA I3 MK3.....	76
8.2	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO TESTOVÁNÍ	77
8.3	TESTOVÁNÍ VZORKŮ.....	78
8.3.1	Tahová zkouška.....	79
8.3.2	Zkouška Charpyho kladivem	81
8.3.3	Zkouška mikrotvrlosti	82
9	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	85
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	92
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	95

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SOUČASNÝ STAV

Práce věnovaná vlivu leptání povrchu na mechanické vlastnosti výrobků z ABS zhotovených technologií Arburg freeforming přináší hlubší pohled do problematiky tohoto inovativního procesu. V průběhu fází mého výzkumu jsem se intenzivně věnoval leptání povrchu a následným fázím testování.

Provedené mechanické, konkrétně tahové zkoušky, zkoušky rázové houževnatosti a mikrotvrdomosti poskytly významná data, která nám umožní dále porozumět změnám v mechanických vlastnostech materiálu ABS vlivem leptání. Tato práce reprezentuje kritický krok směrem k pochopení optimálních postupů pro dosažení maximální pevnosti, odolnosti a kvality povrchu výsledných výrobků.

Výsledky mého výzkumu nejenom poskytnou konkrétní poznatky o vlivu leptání na mechanické vlastnosti ABS, ale též přispějí k širšímu kontextu v oblasti aditivní výroby a jeho možností v průmyslovém nasazení.

1.1 Úvod

V roce 2014 byla v České republice představena revoluční 3D tiskárna s označením Freeformer, výrobek německé společnosti ARBURG GmbH + Co KG. Tato inovativní technologie přinesla průlom v oblasti aditivní výroby tím, že umožnila tisknout přímo ze standardního plastového granulátu. Tím byly otevřeny nové možnosti v materiálovém spektru, finanční efektivitě a ekologické udržitelnosti. Technologie Freeformer se odlišuje od konvenčních tiskáren využívajících technologii FDM (Fused Deposition Modeling). Místo toho pracuje na základě inovativní technologie APF (Arburg Plastic Freeforming). Tato metoda umožňuje zpracování standardního plastového granulátu, který je speciálním plastikačním šnekem roztaven a následně aplikován v podobě kapének pomocí vysokofrekvenčního taktovaného uzávěru trysky, které jsou přesně pozicionovány díky polohovatelnému nosiči pracovní desky. Kapky, jakmile jsou aplikovány, se automaticky spojují při postupném ochlazení. Tato vlastnost umožňuje tisknout vrstvu po vrstvě, vytvářející tak trojrozměrný výrobek. Průměr nanášených kapének se pohybuje mezi 0,18 a 0,30 mm, což umožňuje dosahovat různých povrchových struktur. Menší průměr kapek znamená jemnější povrch. Freeformer díky kapkové technologii dokáže vytvářet body a tisknout i drobné detaily, což je výrazný rozdíl oproti klasickým FDM systémům, které pracují s krátkými úseky. Tato technologie je flexibilní i při kombinaci pružných materiálů

s ABS nebo jinými termoplasty, přičemž jediným omezením jsou materiály obsahující skleněná vlákna, která by mohla způsobit ucpání trysky.

Jako první je řešerže zaměřena na aditivní technologii freeformer. Hlavní studie zabývající se touto problematikou byli od autorů S. Charlon a J. Soulestin v roce 2020, kdy studie zkoumá nový aditivní výrobní stroj "freeformer", srovnává aditivní procesy v různých parametrech zpracování a analyzuje jejich vliv na strukturu a mechanické vlastnosti výrobních činek. Zdůrazňuje výhody aditivní výroby, včetně absence potřeby nástrojů, rychlé tvorby prototypů a snížení nákladů na 3D díly. Současně indikuje nutnost dalších studií zaměřených na vliv geometrie kapek materiálu na mechanické vlastnosti 3D dílů, kterému se věnuje studie Philipp Eyer a kol. z roku 2022. Jako průzkum přesnosti vyrobených vzorků se nejvíce věnovali A. Hirsch, F. Hecker, a E. Moritzer (2019) s cílem identifikovat faktory ovlivňující parametry výrobního procesu a vlastnosti výsledných součástí. Analyzuje chování materiálu při smršťování, snaží se vytvořit optimalizovanou metodiku pro stanovení faktorů pro kompenzaci smršťování a zkoumá vliv tvarového faktoru na vizuální vlastnosti součástí. Výzkum je proveden s použitím vlákna ABS-M30, které bylo rozdrceno pro zpracování v procesu této relativně nové, aditivní technologie. Studie hodnotí možnosti a omezení této aditivní výrobní metody a snaží se identifikovat klíčové faktory ovlivňující kvalitu výroby a vlastnosti součástí.[1], [2], [3]

U vlivu leptání může být součástí procesu úpravy povrchu plastových výrobků z ABS za účelem dosažení požadovaných vlastností, například lepší přilnavosti nebo estetického vzhledu. Jako leptací činidlo se jeví jako vhodné například leptání kyselinou sulfochromovou, kterému se věnoval Ran Tao a kol. v srpnu 2023. Leptání kyselinou sulfochromovou je však toxické a způsobuje znečištění životního prostředí. Další významnou studií s názvem *Adhesion improvement of ABS resin by MnO₂-H₃PO₄-H₂SO₄ colloid with ultrasound-assisted etching treatment* (2022) kde byl zkoumán vliv doby leptání ultrazvukem na povrchovou drsnost a adhezní pevnost ABS pryskyřice. Při ošetření ultrazvukem se povrch stává méně drsným než při tradičním leptání koloidem CrO₃-H₂SO₄. Nicméně adhezní pevnost mezi elektrolyticky nanášenou měděnou vrstvou byla vyšší při použití ultrazvuku, což bylo přisuzováno větším a rovnoměrnějším dutinám vytvořeným na povrchu ABS substrátu. Povrch byl také více hydrofilní díky zvýšení hustoty hydrofilních skupin na povrchu po ošetření ultrazvukem. Ve studii vedené Xinchem Han s kol. v r 2019 se zase kladl důraz najít vhodný bezelektrický leptací roztok, který by nahradil systém kyseliny chromové. Ten se však nepovedlo plně nahradit se zanecháním stálých

mechanických vlastností materiálu. U studie vedenou Eric J. McCullough, Vamsi K. Yadavalli z roku 2013 bylo prokázáno, že dvě hlavní překážky používání freeformeru a ABS pro biologické mikrofluidní aplikace, propustnost kapalin nebo vodotěsnost a biokompatibilitu povrchu, lze odstranit, či překonat jednoduchou chemickou úpravou zařízení z ABS, přičemž je možné zachovat jednoduchost, náklady a časové výhody použití ABS zařízení. Ošetření zařízení za pomoci vodního roztoku acetonu vedlo k utěsnění dříve vyrobených zařízení zařízení propouštějící vodu s minimálním vlivem na drsnost povrchu a kontrolovatelný vliv na věrnost vlastností zařízení. Velmi podobná studie se věnovala ošetření acetonem, ethylacetátem a směsnými parami. Studoval se vliv různých chemických par, délky expozice a orientace tiskové stavby na drsnost povrchu, pevnost v tahu, rozměrovou stabilitu a hmotnostní stabilitu ABS vzorků před a po ošetření. Výsledky této studie od autorů Mu M, Ou C-Yen, Wang J, Liu Y, s názvem *Surface modification of prototypes in fused filament fabrication using chemical vapour smoothing* ukázaly, že všechny zkoumané chemické páry vedly k zlepšení hrubosti povrchu vzorků ABS.[4], [5], [6], [7], [8]

Provedený výzkum poskytuje důležité informace o vlivu leptání různými přípravky na mechanické vlastnosti, zejména mikrotvrdość, povrchovou morfologii a úpravy povrchu. Tyto informace mají význam pro optimalizaci procesu leptání jak v automobilovém průmyslu, kde se setkáváme s rostoucím trendem využívání plastových komponentů, tak v mnoha dalších odvětvích. Další fáze výzkumu se bude zaměřovat na systematické zkoumání různých přípravků, jejichž cílem bude dosáhnout nejen optimální adheze vrstvy, ale také udržení či zlepšení mechanických vlastností plastových substrátů. To by mohlo přinést inovativní přístupy a postupy v oblasti povrchové úpravy plastů v průmyslu s potenciálem zlepšit celkovou kvalitu výrobků a zároveň snížit výrobní náklady.

2 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní technologie výroby, známá také jako 3D tisk, získává popularitu pod zkratkou AM (additive manufacturing). Tato metoda se rozděluje do dvou klíčových aplikačních úrovní, a to rapid prototyping a rapid manufacturing. Rapid prototyping představuje první část využití aditivních technologií, kde je důraz kladen na rychlý vývoj a testování prototypů. To umožňuje designérům a inženýrům rychle získat fyzický model svých nápadů k evaluaci a zdokonalení. Na druhé straně rapid manufacturing poskytuje perspektivu průmyslové výroby pomocí aditivních procesů. Tato úroveň zdůrazňuje schopnost 3D tisku produkovat finální funkční díly s vysokou přesností a efektivitou. Tímto způsobem aditivní technologie nejen zkracuje vývojové cykly, ale také nabízí flexibilitu v sériové výrobě.[9]



Obr. 1 Stavba domu aditivní technologií [10]

Rapid prototyping (RP) se věnuje vytváření prototypů modelů nebo maket, kde je obvykle zkoumána konkrétní vlastnost součásti; není však zpravidla konečným produktem. Naopak rapid manufacturing (RM) se zaměřuje na výrobu finálních produktů. Mezi tyto dvě hlavní aplikace patří metoda rapid tooling (RT), která se specializuje na výrobu náradí nebo měřidel. Tato metoda zahrnuje jak výrobu finálních produktů, tak výrobu prototypů, což posiluje propojení mezi vývojem a průmyslovou výrobou. Tímto způsobem aditivní technologie nejen urychluje prototypování, ale také přináší inovativní možnosti pro výrobu koncových komponent s vysokou přesností a efektivitou. [9]

Všechny výrobní aditivní technologie jsou postaveny na principu postupného nanášení jednotlivých vrstev materiálu, které mají stejnou tloušťku. Tvarování těchto vrstev probíhá ve dvou dimenzích, konkrétně v rovině X-Y, zatímco třetí výsledný rozměr vzniká

postupným přidáváním materiálu ve směru Z. V současné době se obvykle uplatňují vrstvy s tloušťkou mezi 0,1 až 0,05 mm. Stroje, které jsou určeny pro výrobu makroskopických komponent, mohou dosahovat minimální tloušťky vrstvy až 0,0016 mm. Naopak, pokud jde o výrobu mikroskopických komponent, tloušťky vrstev mohou dosahovat až 5 nm, čímž se otevírají další možnosti v oblasti přesnosti a mikroskopického zpracování. [9]



Obr. 2 Další příklad využití aditivní technologie [10]

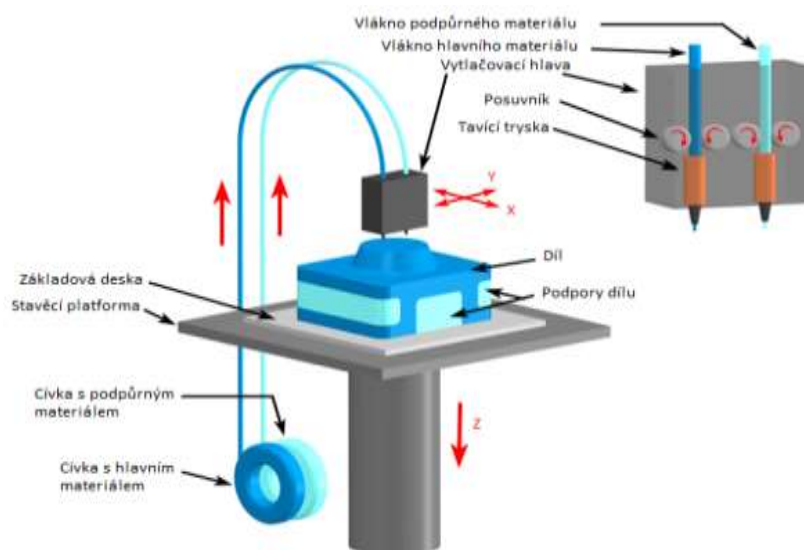
3 3D TISK

Aditivní technologie 3D tisku zahrnuje širokou paletu různých metod, které se liší v způsobu nanášení a vrstvení materiálu. Dále je možné tyto metody klasifikovat podle procesu přetváření materiálu, který může probíhat nahříváním, tavením nebo vytvrzováním. Existují také výrazné rozdíly v typech používaných materiálů a jejich formách. Některé z těchto metod vyžadují specifické komponenty a technologické postupy, což ovlivňuje náročnost celého aditivního výrobního procesu. Výzkum a inovace v oblasti aditivních technologií přinášejí stále nové metody a materiály, což posiluje flexibilitu a rozmanitost tohoto revolučního přístupu k výrobě. Tím se otevírají nové možnosti pro tvorbu komplexních a precizních struktur, přičemž každá metoda nese své vlastní výhody a specifické využití v průmyslovém i domácím prostředí.

3.1 Technologie 3D tisku

3.1.1 Fused Deposition Modeling – FDM

Tato technologie spočívá v postupném vrstvení roztaveného materiálu, nejčastěji plastu, čímž se vytváří souvislý výrobek. Materiál, obvykle dodávaný ve formě struny namotané do cívky, je taven v komoře a poté vytlačován přes trysku. Při tomto procesu se materiál navrstvuje na předchozí vrstvu nebo na pracovní stůl, což umožňuje postupné budování výrobku. K dosažení požadovaných geometrických parametrů a rozměrů se používá buď pohyb trysky, nebo pohyb pracovního stolu. Princip fungování této technologie je ilustrován na Obr. 3. [11]



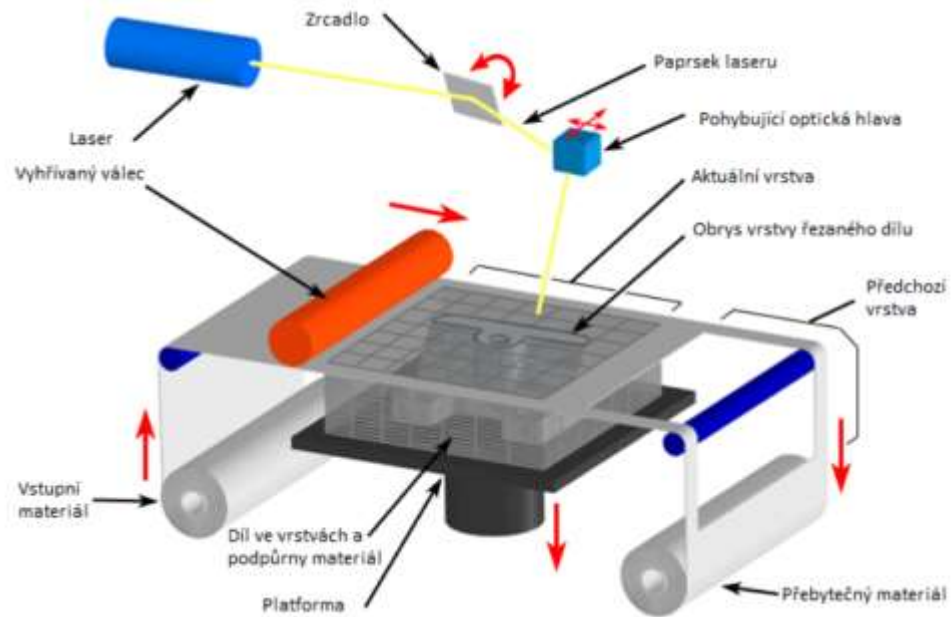
Obr. 3 Princip fungování FDM [12]

Pracovní stůl, na který se materiál navařuje, musí být vyhříván, aby kompenzoval teplotní rozpínání výrobku. Během tisku jsou často potřebné podpory, které zajišťují stabilitu výrobku během procesu. Ty jsou nezbytné zejména kvůli smršťování materiálu během ochlazování a vlivu gravitace. Jsou-li rozměry výrobku větší ve vertikálním směru, nebo pokud není celá část výrobku dostatečně ohřáta, aby se kompenzovalo teplotní rozpínání, podpory jsou nezbytné k udržení stability a integrity výsledného produktu.[11]

3.1.2 Laminated Object Manufacturing- LOM

Technologie Laminated Object Manufacturing (LOM) se odlišuje od metody FDM. Firma Helis tuto technologii vyvinula v roce 1991. Principem LOM je postupné vrstvení materiálu. Každá vrstva je vytvořena laserem, který vyřeže obrys dílu. Přebytečný materiál je rozřezán na čtverce, které slouží jako podpora pro vytvářený díl a zároveň usnadňují odstranění. Poté se vrstva spojí s předchozí pomocí nahřátého válce a tlaku. Papír je impregnován zpevňovací hmotou nebo potažen tenkou plastovou vrstvou. Materiál pokrývá celou pracovní plochu s menšími přesahy pro posun další vrstvy. Platforma je posunuta o tloušťku jedné vrstvy dolů a je připravena pro další vrstvu. Tento proces se opakuje až do dokončení celého dílu.[13], [14]

Materiály jsou obvykle dodávány ve formě rolí. Častým materiálem jsou papír a plast (například nylon, polyester), avšak méně často se používají i kovy a kompozity. Výhodou této metody je velmi rychlá výroba dílu, protože se řeže pouze obrys modelu, nikoliv celá jeho plocha. LOM je vhodná pro výrobu větších modelů. Tato technologie prakticky nevytváří vnitřní napětí, což minimalizuje nežádoucí deformace dílu. Nicméně obecně je méně přesná než metody SLA a SLS, kterým budou věnována následující kapitola. Nevýhodou je vysoké množství přebytečného materiálu, který nelze znovu použít, jak je tomu u práškových metod (například SLS). Tato metoda není vhodná pro modely s tenkými stěnami a není možné vytvářet prázdné uzavřené dutiny. [13], [14]

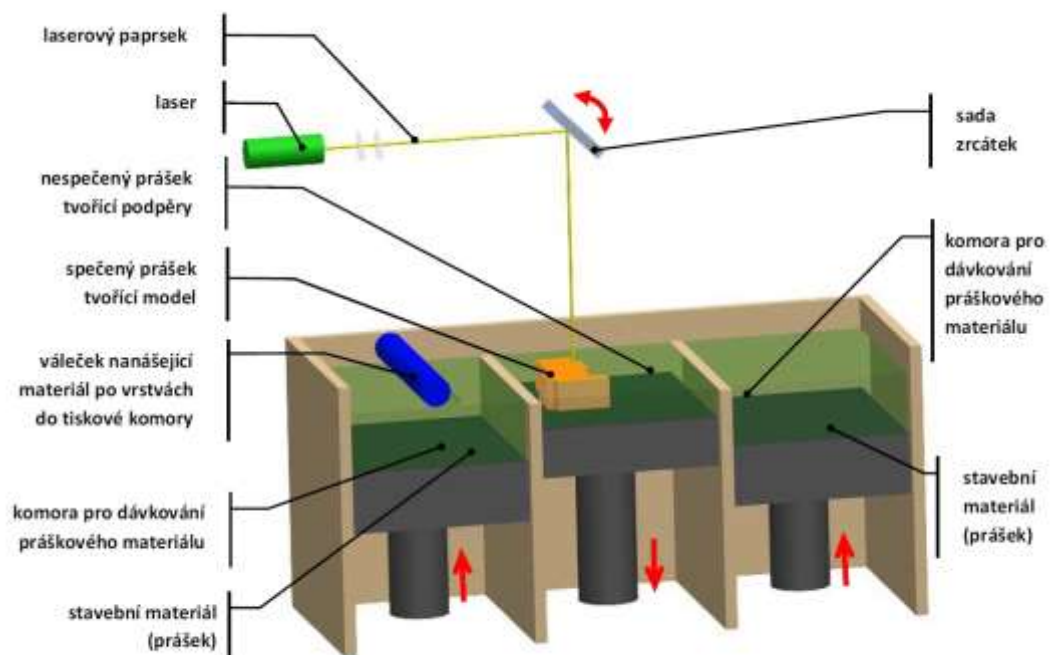


Obr. 4 Princip fungování LOM [15]

3.1.3 Selective Laser Sintering- SLS

Tato starověká technologie byla vyvinuta Dr. Carlem Deckardem a funguje pomocí výkonného laserového paprsku (CO₂ laseru), který spéká práškový materiál, čímž vytváří vrstvu po vrstvě. Tento proces je podobný technologii SLA. Vstupní materiál je dodáván ve formě jemného prášku, s velikostí částic typicky mezi 20 a 100 μm , a zahrnuje plastické materiály jako polykarbonáty a nylon, ale také kovy, sklo a keramiku.

Princip spočívá v tom, že laser postupně vytváří jednotlivé vrstvy, spékajíc prášek, a materiál je dodáván ze zásobníku na stavěcí píst. Poté, co je vytvořena jedna vrstva, stavěcí píst se posune dolů o tloušťku jedné vrstvy a proces se opakuje, dokud není tištěný díl kompletní. Jednou z výhod je absence potřeby podpory při stavbě složitých součástí, protože je součást permanentně obklopena materiálem. [12], [16]

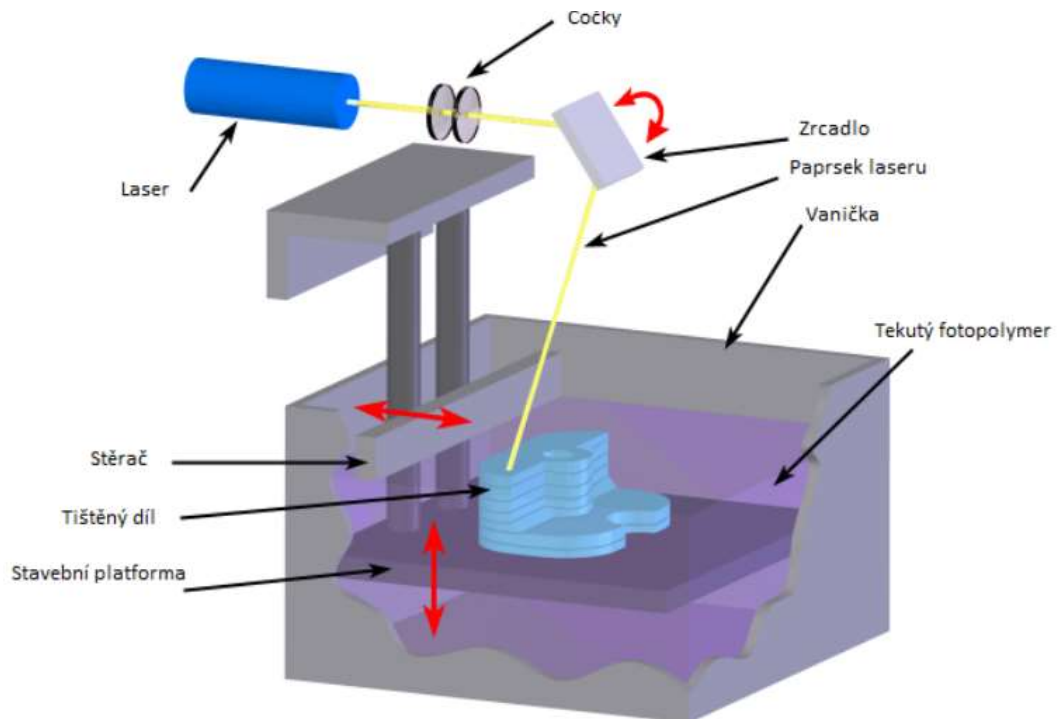


Obr. 5 Princip metody SLS [17]

Po dokončení tisku není nutné díl dalšími postupy vytvrzovat, ale tato metoda má některé nevýhody, jako je nemožnost tisku prázdných uzavřených dutin a vyšší energetická náročnost. [12], [16]

3.1.4 Stereolithography- SLA

Stereolitografie operuje s UV laserem, který postupně vytvrzuje kapalinu fotosenzitivního polymeru, tvořící vrstvu po vrstvě. Tištěný model je umístěn v nádobě obsahující kapalný materiál. Po dokončení každé vrstvy je třeba vyrovnat nerovnosti pomocí stěrača a poté se stavební platforma posune dolů o tloušťku vrstvy pro následné vytvrzování další vrstvy (viz Obr. 14). Tloušťka jednotlivých vrstev se obvykle pohybuje v rozmezí od 0,05 do 0,15 mm. Tento cyklus se opakuje až do úplného vytvoření součásti. Po dokončení tisku je stavební platforma vysunuta nad hladinu kapaliny a součást se vyjme pro další zpracování. Je opláchnuta od zbytků polymeru, odstraní se podpory a v případě potřeby se vytvrdí v UV peci, aby se zlepšily mechanické vlastnosti.[18]



Obr. 6 Princip metody SLA[18]

Materiály, které se nejčastěji využívají při této metodě, zahrnují akryláty, epoxidy a pryskyřice. Stereolitografie patří mezi jednu z nejpřesnějších a nejrychlejších metod. Její výhodou je možnost vytvářet modely s malými otvory a detaily s vysokou přesností. Naopak nevýhodou může být omezená tepelná odolnost některých materiálů, toxicita, křehkost a nutnost použití podpor pro složitější geometrie. Stereolitografická technologie nenabízí možnost vytvářet prázdné uzavřené dutiny. [18]

3.2 Materiály 3D tisku

Výběr materiálů pro aditivní technologii je poměrně rozsáhlý, přičemž budou zohledněny pouze nejběžněji používané materiály, které jsou typické pro aditivní technologie a jednotlivé metody. Materiály jsou pečlivě vybírány v závislosti na konkrétním procesu aditivního výrobního řetězce a požadovaných vlastnostech finálního produktu. V současné době se často využívají materiály jako plast, kovy, keramika a dokonce i bio-polymery, což zdůrazňuje široké spektrum možností, které aditivní technologie nabízejí v oblasti materiálového zpracování. Průběžné inovace a výzkum nových materiálů neustále posouvají hranice toho, co je možné dosáhnout v oblasti aditivní výroby, podporující tak neustálý růst a rozvoj technologie.

3.2.1 Polymery a kompozity

Plasty jsou polymery, které za běžných podmínek obvykle vykazují tvrdost a při větším namáhání často trvale deformují. Při výrobě výrobků z těchto materiálů je nezbytné brát v úvahu jejich křehkost a omezenou pružnost. Z hlediska chování při vyšší teplotě lze plasty dále rozdělit na termoplasty a reaktoplasty.

Termoplasty patří mezi polymery, které s narůstající teplotou získávají na plasticitě a tvárnosti. Tyto vlastnosti mohou být opakovaně uplatňovány, protože při zahřívání nedochází k chemickým změnám, ale pouze k fyzikálním transformacím. Tato skupina materiálů, charakterizovaná svou schopností opakovaného tvarování, je často využívána ve 3D tiskárnách typu FDM.[19]



Obr. 7 Příklady termoplastů[20]

Naopak u reaktoplastů dochází k tzv. vytvrzování za působení tepla, tlaku nebo například záření. Tento proces je nevratný, což znamená, že výrobky vyrobené z reaktoplastů nelze svařovat, tvarovat nebo znovu zpracovávat do taveniny. Surový a nevytvrzený materiál je obecně označován jako pryskyřice. Například metody SLA a DLP využívají speciálních fotopolymerů, které se vytvrzují pomocí UV záření, umožňující přesné a účinné zpracování. [19]



Obr. 8 Příklady vybraného užití reaktoplastů [12]

Elastomery představují vysoce pružné materiály, které lze výrazně deformovat malou silou, aniž by docházelo k nevratné změně. Mezi hlavní kategorie elastomerů patří kaučuky a termoplastické elastomery.[21]



Obr. 9 Příklady vybraného užití termoplastických elastomerů[22]

Termoplastické elastomery jsou vytvořeny smísením měkkých elastomerů s tvrdými termoplasty, což umožňuje vytváření síťové struktury. Jejich klíčovou výhodou oproti tradičním pryžím spočívá v tom, že při zvyšující se teplotě tento materiál přechází do tekutého stavu. Tím je umožněno snadné zpracování a případné recyklování, podobně jako u již dříve zmíněných termoplastů. Tato flexibilita využití termoplastických elastomerů v aditivních technologiích poskytuje prostor pro inovace a rozvoj v oblasti pružných a plně funkčních komponent.[23]

Za účelem zdokonalení vlastností mohou být polymery smíchány s přídatnými složkami, které slouží k posílení nebo mají kosmetickou či jinou funkci. Mezi tyto přídatné složky patří různé prášky, úlomky, nasekaná vlákna, filamenty a podobně. Vytvářením kompozitních materiálů lze dosáhnout výrazně lepších parametrů než v případě použití samotného čistého polymeru. Nicméně vlastnosti těchto kompozitů jsou značně závislé na orientaci výtuh v jejich struktuře. [23]

Pro zvládnání této problematiky slouží technologie tzv. nekonečných vláken. Tato technologie se zaměřuje na optimalizaci orientace výtuh v kompozitním materiálu. Tímto způsobem se dosahuje vyváženého a efektivního rozložení výtuh ve struktuře, což v konečném důsledku posiluje vlastnosti materiálu. Inovace v oblasti přídatných složek a technologií nekonečných vláken přinášejí možnost vytvářet kompozitní materiály s optimálními parametry, což je hlavní, stavební prvek pro pokrok v oblasti materiálového inženýrství a průmyslové výroby. Technologie nekonečných vláken se vztahuje k výrobě a používání tenkých, pružných materiálů při 3D tisku. Filamenty jsou tenké pružné materiály,

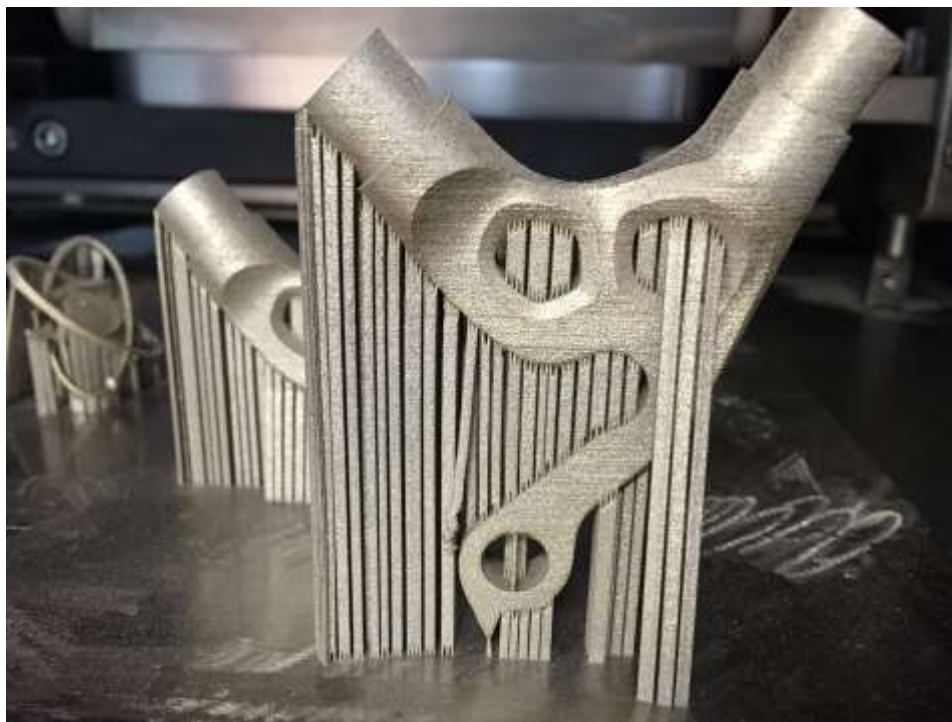
kteře jsou přiváděny do 3D tiskárny a následně taveny, aby vytvořily 3D objekt vrstvu po vrstvě. V posledních letech došlo k výraznému pokroku v oblasti technologie filamentů, a nyní je k dispozici rozsáhlá paleta materiálů pro 3D tisk, včetně ABS, PLA, PETG, nylonu a dalších. Filamenty jsou dostupné v různých průměrech, obvykle 1,75 mm nebo 2,85 mm, a jsou k dispozici v různých barvách a povrchových úpravách. Kvalita použitého filamentu má významný vliv na kvalitu výsledného 3D tištěného objektu, a proto je klíčové vybrat kvalitní filament, který odpovídá konkrétní aplikaci.[24]

3.2.2 Kovové materiály a jejich slitiny

Aditivní výroba s využitím kovů za poslední desetiletí prochází zásadním vývojem, především v leteckém a automobilovém průmyslu. Tato technologická metoda umožňuje vytvářet složité tvary, které nejsou dosažitelné jinými výrobními postupy, jako například odlévání, tváření nebo obrábění. Na rozdíl od polymerní aditivní výroby přináší použití kovů a jejich slitin výslednému produktu radikálně odlišné mechanické vlastnosti, což rozšiřuje možnosti jejich aplikace.[25]

V aditivní výrobě kovů lze vytvářet složité jednodílné komponenty, lehké struktury a komplikované duté kanály, které dokáží odolat vysokým teplotám a tlakům. Tato technologie je proto často využívána v leteckém průmyslu, kde je potřeba splnit náročné požadavky na odolnost a lehkost materiálů. V automobilovém průmyslu nachází uplatnění zejména v oblasti prototypového vývoje a v konstrukci závodních speciálů. [25]

Zásadní rozdíl mezi aditivní výrobou kovů a polymerní aditivní výrobou se projevuje i v ekonomickém smyslu. Tisk kovových materiálů je finančně náročnější než tisk polymerů, avšak z hlediska výnosnosti je mnohem atraktivnější. Mezi nejčastěji využívané metody pro tisk kovů patří PBF (Powder Bed Fusion) a DED (Directed Energy Deposition). Metody PBF dokáží dosáhnout přesnosti až 0,02 mm, což je důležitý parametr pro dosažení vysoké kvality tištěných kovových komponent. [25]



Obr. 10 Ukázka tvorby z tisku kovových materiálů [26]

Aditivní výroba se často využívá i při výrobě forem pro vstřikovací lisy, což umožňuje vytvářet struktury chladicích kanálů s bohatým vzorem. Tímto způsobem lze efektivně předejít vzniku přehřátých oblastí a dosáhnout výrazného zkrácení výrobního cyklu. Vedle zlepšení kvality produktů přináší aditivní výroba i razantní snížení nákladů na výrobu. [25]

Avšak tento způsob výroby s sebou nese určitá úskalí, mezi něž patří povrchová struktura, která nemusí být příliš dokonalá. Vysoká pórovitost materiálu může vést k možným defektům, jako jsou mikroskopické trhliny, a lokalizovaná koncentrace napětí může způsobit rychlejší únavové poškození. Na druhou stranu mikrostruktura materiálu může vykazovat lepší vlastnosti ve srovnání s konvenčně vyrobenými díly. Je však důležité brát v úvahu, že struktura materiálu bývá výrazně anizotropní v závislosti na směru tvorby jednotlivých vrstev.

4 TECHNOLOGIE VOLNÉHO TVAROVÁNÍ

Technologie volného tvarování představuje využití pokročilých výrobních postupů s cílem vytvářet komplexní tvary a struktury bez potřeby tradičních nástrojů nebo forem. Tato inovativní metoda je často spojována s konceptem 3D tisku, což umožňuje vytvářet složité konstrukce a geometrie, jež by bylo obtížné nebo dokonce nemožné dosáhnout pomocí konvenčních výrobních procesů. [15]

Technologie nachází uplatnění v rozmanitých odvětvích průmyslu, včetně automobilového, leteckého, zdravotnického a spotřebního zboží. Její využití v těchto oblastech přináší možnost výroby inovativních, pokročilých a efektivních výrobků, které vyhovují specifickým požadavkům v mnoha odvětvích.[27]

Volné tvarování umožňuje dosahovat jedinečných forem a designů, což otevírá prostor pro nové nápady a tvůrčí přístupy k výrobě. Tato technologie představuje významný krok v oblasti výroby a nabízí široké spektrum možností pro vytváření sofistikovaných a přizpůsobitelných výrobků s vysokou přidanou hodnotou. [27]

4.1 Arburg Freeforming

Firma Arburg, přední výrobce vstřikovacích strojů s odborným zaměřením na oblast vstřikování plastů, věnovala rozvoji technologie 3D tisku plastových dílců intenzivní úsilí přes osm let. Výsledek této systematické práce představuje unikátní zařízení pojmenované Freeformer a i celkem nový, patentovaný výrobní postup vstřikování plastu do volného prostoru. V souladu s názvem tohoto postupu, při formování plastových komponent není potřeba žádné formy ani předem definované dutiny.[28]



Obr. 11 Stroj Arburg Freeformer [29]

V rámci procesu probíhá přímé zpracování 3D datových souborů řídicím systémem Freeformeru. Následně je v integrovaném vstřikovacím agregátu zahříván standardní granulát, jaký se obvykle používá v tradičním vstřikovacím procesu. Tavenina je následně transformována do kapének pomocí speciálního postupu a tyto kapénky jsou nanášeny vrstva po vrstvě, bez použití formy, do plně funkčního dílce. Metoda umožňuje nákladově efektivní výrobu dílců v malých a středních sériích. Arburg, se svými více než padesátiletými zkušenostmi ve výrobě vstřikovacích strojů, efektivně využila své bohaté znalosti při vývoji a implementaci jedinečného procesu. Z hlediska praktičnosti a ekonomiky přináší výhodu využívání běžně dostupného granulátu oproti speciálním materiálům, jako jsou prášky nebo vlákna, což vede k celkovému snížení nákladů. [28]

V samotném procesu formování dílce sehrává jednu z hlavních rolí pětiosý pohyblivý nosič, který minimalizuje materiálové požadavky, i při vytváření složitých tvarů, jelikož není potřeba využívat podpůrné struktury. [28]



Obr. 12 Detailní pohled do pracovní části [28]

Opakování již probádaných konceptů není nezbytné. Tento princip byl zřetelně reflektován ve filozofii techniků a vývojářů ve společnosti Arburg během vývoje nového zařízení. Konstrukce nového stroje byla provedena s využitím již existující a několika lety prověřené přípravy materiálu, pracující podstatně podobným způsobem jako při klasickém vstřikování do formy. Standardní plastový granulát je přiváděn do zařízení, kde je plastifikační válcem ohříván a připravován na další zpracování v tzv. nanášecí jednotce. [28]

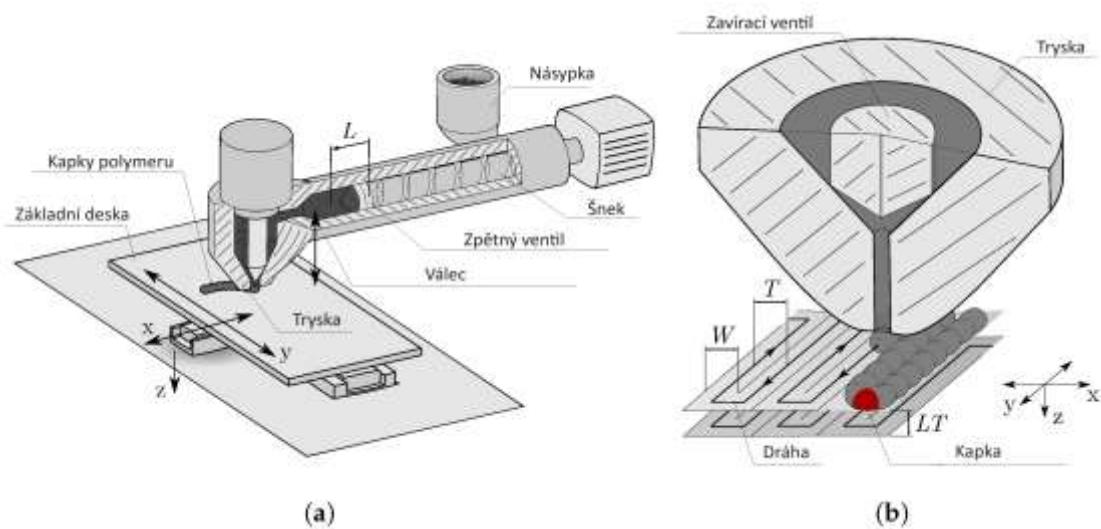
Nanášecí jednotka představuje uzávěr trysky, vybavený vysokofrekvenční piezotechnologií, která umožňuje rapidní otevírání a zavírání trysky. Tímto způsobem je dosaženo vytváření plastových kapek pod tlakem, což následně formuje požadovaný 3D tvar při výrobě dílce. [28]

Principiálně lze říci, že vzniklé dílo reprezentuje amalgám inovativních technologií a osvědčených postupů, vytvářející synergii mezi moderním přístupem a osvědčenými metodami.



Obr. 13 Granulát přiváděný do Freeformeru[28]

Princip pohybu stacionární a pohyblivé části zařízení byl zvážen s ohledem na dlouholeté zkušenosti. V konstrukci Freeformeru zůstává nanášecí jednotka s její tryskou ve fixní vertikální poloze, zatímco nosič dílce se pohybuje. Kromě standardního nosiče, schopného pohybu v lineárních směrech ve třech osách, je dostupná také pěti-osá verze, která umožňuje tvorbu složitých tvarů. Významným benefitem pěti-osé konfigurace je eliminace potřeby podpůrných struktur i při vytváření velmi komplexních tvarů dílců. Tímto je dosaženo možnosti implementovat nové geometrie dílců, jež by nebylo možné realizovat tradičním vstřikováním do formy. Zároveň jsou dílce ihned po vytvoření připraveny k použití, bez potřeby dodatečného čištění, úprav nebo dokončování. [28]



Obr. 14 Princip metody freeformeru

V průběhu vývoje zařízení byl důraz na vysoký stupeň procesní flexibility. Jedním z výsledků této koncepce je zařízení Freeformer s možností zpracování dvou různých materiálů nebo barev. Vzhledem k tomu bylo vyvinuto zařízení s dvěma nanášecími jednotkami. Tímto dvou-komponentním 3D tiskem lze například vytvářet kombinace měkkých a tvrdých plastů nebo dílce s unikátními tvary a texturou, kde jsou obě komponenty pevně propojeny. [28]



Obr. 15 Více-komponentní zařízení dopravující granulát [28]

5 POVRCHOVÉ ÚPRAVY PLASTŮ

Před provedením samotné úpravy plastového povrchu je často nezbytné důkladně očistit povrch, zejména pokud byl během zpracování nebo skladování vystaven různým znečišťujícím látkám. To je zvláště důležité u některých plastů, jako jsou polyolefiny, které mohou obsahovat látky s nízkou molekulovou hmotností, jež se mohou hromadit na povrchu. Mezi tyto látky patří například oleje, mastnoty nebo jiné nežádoucí přísady, které mohou omezit přilnavost úpravy k povrchu plastu. K očištění plastového povrchu se obvykle používají speciální čisticí prostředky, které odstraňují nečistoty a zbytky látek z povrchu, a zajišťují tak optimální podmínky pro následnou úpravu. Po očištění je důležité povrch důkladně opláchnout a nechat jej zcela vyschnout, aby se minimalizovala přítomnost jakýchkoli zbytků čisticích prostředků, které by mohly ovlivnit adhezi následné úpravy. Při výběru čisticího prostředku je důležité zohlednit jak typ plastu, tak i povahu a míru znečištění. Pro některé plasty mohou být vhodné méně agresivní čisticí prostředky, zatímco pro jiné, zejména pokud se jedná o silně znečištěné povrchy, mohou být nutné silnější čisticí prostředky nebo dokonce mechanické očištění.[30]

Jednotlivé plasty mají odlišnou hodnotu kritického povrchového napětí. Jestliže má daný polymer kritické povrchové napětí příliš nízké pro dosažení správné smáčivosti a přilnavosti povlaku, je nutné ho zvýšit pomocí čištění a vhodných povrchových úprav. Existuje několik metod, které se používají k upravení povrchu plastů. [30] [31]

Omývání vodou je vhodné pro odstranění povrchového prachu a nečistot. Čištění a leptání rozpouštědlem se používá k odstranění mastnoty a dalších organických nečistot. Mechanické obrušování může odstranit vrstvy nečistot a zlepšit adhezi úpravy. Chemické leptání se používá k odstranění povrchových nečistot a přípravě povrchu pro další úpravu. Nastříkávání zahrnuje aplikaci speciálních chemikálií nebo nátěrů na povrch plastu za účelem zlepšení jeho adheze. Úprava plamenem zvyšuje adhezi plastového povrchu. Korónový výboj se používá k modifikaci povrchu plastů za účelem zvýšení jejich přilnavosti. Úprava plazmou zlepšuje adhezi a přilnavost povrchu. Ozařování plastového povrchu vhodným zářením může také zlepšit jeho vlastnosti. [30] [31]

Plastové povrchy po některých úpravách mají tendenci se snadno nabíjet statickou elektřinou, což přitahuje prach a nečistoty. Pro minimalizaci tohoto znečištění se používají dmychadla ionizovaného vzduchu, která odstraňují statický povrchový náboj. Udržování

vyšší vlhkosti vzduchu pomáhá eliminovat tvorbu statické elektřiny a usnadňuje čištění a úpravu plastových povrchů.

5.1 Čištění

Čištění, např. rozpouštědly, může být prováděno různými způsoby, včetně otírání, potápění, rozstříku nebo odmašťování výpary. Nejúčinnější metodou je odmašťování výpary, které využívá uzavřený prostor s parami, jež kondenzují na chladnějším povrchu plastu a odplavují rozpuštěné nečistoty. Tato metoda zajišťuje, že rozpouštědlo se na povrch dostane vždy čisté, ale může způsobit vytváření nerovností, jako jsou rýhy a vybouleniny, což může zlepšit adhezi povlaku, ale zároveň zvyšuje riziko vzniku vad, jako jsou trhliny. Potápění je další možností, která může být ještě efektivnější s využitím ultrazvuku nebo mechanického kartáčování. Omývání vodou se používá k odstranění povrchových nečistot před aplikací povlaku. Čisticí prostředky s vysokým pH jsou vhodné k odstranění běžných nečistot, zatímco rozpouštědla na bázi vodných uhlovodíků jsou účinná proti vodou nerozpustným znečištěním, jako jsou látky používané k uvolnění plastových výrobků z forem. [30] [31]

5.2 Korónové výboje

Nejčastěji používanou technologií povrchové úpravy plastových fólií je korónová úprava. Zařízení pro korónové výboje obvykle sestává z generátoru, transformátoru a výbojové hlavy. Generátor má za úkol zvyšovat frekvenci střídavého proudu z běžných 60 Hz na mnohem vyšší hodnoty, typicky mezi 25 a 30 kHz. Transformátor pak zvětšuje napětí na hodnoty mezi 15000 a 30000 voltů, což je nezbytné pro vytvoření korónového výboje. Tento výboj se projevuje jako množství malých, rovnoměrně rozptýlených jisker. [30] [31]

Samotná výbojová hlava je složena ze dvou desek, které tvoří kondenzátor, přičemž mezi nimi je umístěn plastový materiál. Uspořádání jednotlivých částí výbojové hlavy se může lišit v závislosti na konkrétním designu zařízení. Běžné provedení zahrnuje váleček pokrytý dielektrikem a nekryté elektrody, ale existují i další variace, jako například elektrody pokryté křemenem a kovový váleček. Během procesu korónové úpravy dochází k rozrušování uhlíkových a uhlovodíkových vazeb na povrchu plastu elektrony, protony, excitovanými atomy a ionty ve výboji. To vede k rychlé tvorbě nových vazeb. Radikály reagují s kyslíkem a dusíkem obsaženými ve vzduchu, což vytváří polární skupiny na povrchu plastové fólie. [30] [31]

5.3 Úprava plasmou

Velmi často používanou metodou úpravy povrchu je technologie plazmy, která se osvědčila jako efektivní prostředek k zlepšení adheze a přilnavosti na povrchu různých materiálů, včetně plastů. Tento proces je však prováděn ve vakuové komoře, což omezuje jeho použití pro masovou produkci. Souvislá úprava povrchu pomocí plazmy vyžaduje speciální a drahá zařízení, která jsou využívána spíše pro specifické aplikace než pro běžné průmyslové procesy. Při úpravě povrchu pomocí plazmy dochází k rozrušení mikroskopické struktury povrchu, což vede k jeho očištění od nečistot a znečištění. Tento proces dále způsobuje zesílení struktury materiálu a aktivaci povrchu díky interakci plynů plazmy s povrchem plastu. Jedná se o relativně bezpečnou metodu, která nenarušuje základní strukturu materiálu a umožňuje precizní úpravu. Jedním z hlavních výhod tohoto postupu je možnost volby různých druhů plynů, což umožňuje přizpůsobení procesu konkrétním požadavkům a aplikacím. Plazma se tak stává důležitým nástrojem v oblasti povrchových úprav, přičemž její aplikace sahá od zlepšení adheze až po úpravu povrchového napětí či změnu chemických vlastností materiálu. [30] [31]

5.4 Chemické moření

Metoda úpravy povrchu pomocí chemického leptání je založena na působení roztoků reaktivních chemických sloučenin, často oxidačních činidel, na nechráněný povrch plastu. Tento proces dokáže výrazně ovlivnit chemickou strukturu povrchu a vytvořit mikroskopickou drsnost odstraněním části materiálu. Důsledkem těchto změn je zlepšení smáčivosti a přilnavosti materiálu na povrch. Chemické leptání je nicméně náročný proces a často se používá především pro úpravu plastů, které mají problémy s adhezí, jako jsou například fluoro-uhlíkové polymery. Tato technika se často využívá v průmyslových procesech, kde je klíčové dosažení spolehlivého spojení s povrchem, například při galvanickém pokovování. V praxi se běžně využívají různé chemikálie pro leptání plastů. Mezi nejčastěji používané patří sirmé a chromové kyseliny. Pro efektivní úpravu fluoro-uhlíkových sloučenin se často používá roztok sodíku a naftalenu. Sodík z povrchu odstraňuje fluor, čímž umožňuje tvorbu karboxylových nebo karbonylových skupin, které jsou příznivé pro adhezi na povrch. [30] [31]

5.5 Leptání

Leptání plastů je proces chemického odstranění materiálu z povrchu plastového materiálu za účelem vytvoření reliéfu, textury nebo struktury. Tento postup se často využívá v různých průmyslových odvětvích, jako je výroba reklamních tabulí, označení dílů a výrobků, a také při výrobě elektronických součástek.

Proces leptání plastů začíná přípravou a výběrem roztoku leptadla, což je chemická směs schopná rozpouštět plastový materiál. Leptadlo se aplikuje na povrch plastu buď kontaktně s pomocí štětce, nebo bezkontaktně pomocí par či mlhy. Po aplikaci se plast vystavuje leptacímu roztoku po určitou dobu, která závisí na požadovaném výsledku a typu plastu. Během této doby leptadlo reaguje s povrchem plastu a postupně ho odstraňuje, vytvářející požadovaný reliéf nebo texturu.

Důležitým faktorem při leptání plastů je kontrola procesu, aby nedošlo k nadměrnému odstranění materiálu nebo poškození povrchu. Proto je důležité pečlivě volit typ leptadla a správně nastavit čas a teplotu leptání. Po dokončení procesu se plast důkladně opláchne, aby se odstranily zbytky leptadla, a poté může být povrch dále zpracován, jako je například lakování, potisk nebo další úpravy.

5.5.1 Leptání acetonem

Aceton patří mezi alifatické ketony a je charakterizován jako bezbarvá kapalina s typickým zápachem. Je těkavý a hořlavý, ale méně jedovatý než většina ostatních rozpouštědel. Jedná se o rozpouštědlo, které je dokonale mísitelné s vodou v jakémkoli poměru. Navíc se výborně míchá s většinou organických rozpouštědel, zejména s aromatickými uhlovodíky a alkoholy. Přidáním acetónu do směsi rozpouštědel se výrazně snižuje viskozita roztoků.

Aceton je stabilní vůči zředěným kyselinám a zásadám. Díky své schopnosti rychle se odpařovat a vysoké rozpouštěcí schopnosti, nízké toxicitě a relativně nízké ceně má široké využití jako rozpouštědlo. [32]

V praxi se aceton používá například při výrobě acetonových nátěrových hmot, k rozpouštění acetylcelulózy, polymeračních pryskyřic a při výrobě bezdýmného střelného prachu. Dále se využívá při výrobě filmů, umělé kůže a bezpečnostních skel. Aceton je také základní surovinou pro výrobu důležitých látek, jako jsou chloroform, jodoform, methylmetakrylát, některé druhy plastických hmot a syntetické pryskyřice.[32]

Vyhlazování acetonovými parami představuje chemickou úpravu povrchu, při které dochází k roztavení povrchu vlivem působení rozpouštědla. Acetonové páry rozpouštědla pronikají do jednotlivých vrstev výrobku, čímž povrch dočasně roztaví, a poté, co jsou výpary odstraněny, se vrstvy opět ztuhnou. Tato metoda se primárně využívá k estetickému zlepšení vzhledu povrchu, avšak probíhají i studie zaměřené na posílení vlastností mezivrstev po vyhlazení v acetonových parách. Aceton se běžně používá jako rozpouštědlo při vyhlazování dílů vyrobených z materiálu ABS. Jeho vlastnosti mu umožňují efektivně roztavit a vyplnit všechny otvory a póry, které by mohly vzniknout na povrchu během procesu 3D tisku, čímž se zajistí nepropustnost pro kapaliny nebo plyny. Tímto způsobem se také dosahuje lesklého povrchu materiálu. Pokud však lesklý povrch není požadován, lze díl dále upravit pískováním nebo broušením, aby se dosáhlo matného vzhledu. Tyto postupy umožňují upravit povrch podle požadavků a estetických preferencí. [30] [33]



Obr. 16 Leptané povrchy ABS [34]

6 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Pro úspěšnou výrobu různorodých výrobků a zařízení je nezbytné pečlivě zvážit, jaký materiál je pro daný účel nejvhodnější. Tento proces je založen na detailní znalosti vlastností jednotlivých materiálů, které mohou být mechanické, technologické, fyzikální nebo chemické povahy. Při rozhodování o vhodném materiálu je klíčové provést podrobnou analýzu těchto charakteristik a zvážit, které z nich jsou pro konkrétní aplikaci nejdůležitější. Tento výběr je silně ovlivněn nejen funkcí, kterou bude součást plnit, ale i podmínkami prostředí, ve kterém bude používána. Je třeba vyjádřit požadované vlastnosti materiálu formou konkrétních číselných hodnot nebo charakteristik. Zkoumání a hodnocení těchto vlastností materiálů se obvykle provádí v rámci specializovaného oboru známého jako zkoušení materiálů. Komplexní znalost těchto vlastností umožňuje inženýrům a výrobcům vybrat ten nejvhodnější materiál pro danou aplikaci, což vede ke kvalitnímu a efektivnímu výrobnímu procesu a výslednému produktu.[35]

Základní a nejčastěji využívané zkoušky jsou zkoušky mechanické povahy, které se obvykle dělí na zkoušky statické a dynamické. Pro experimentální určení různých mechanických charakteristik materiálu je nutné vytvořit z něj zkušební vzorky, na kterých se provádějí zkoušky simulující účinky zatěžovací síly. Rozměry těchto zkušebních vzorků a postup zkoušky musí být v souladu s platnými normami. V České republice jsou tyto normy označovány zkratkou ČSN. Normy Evropské unie, které se postupně začleňují do českých norem, nesou označení ČSN EN. Normy převzaté od celosvětové organizace International Organization for Standardization jsou označeny jako ČSN ISO. [35]

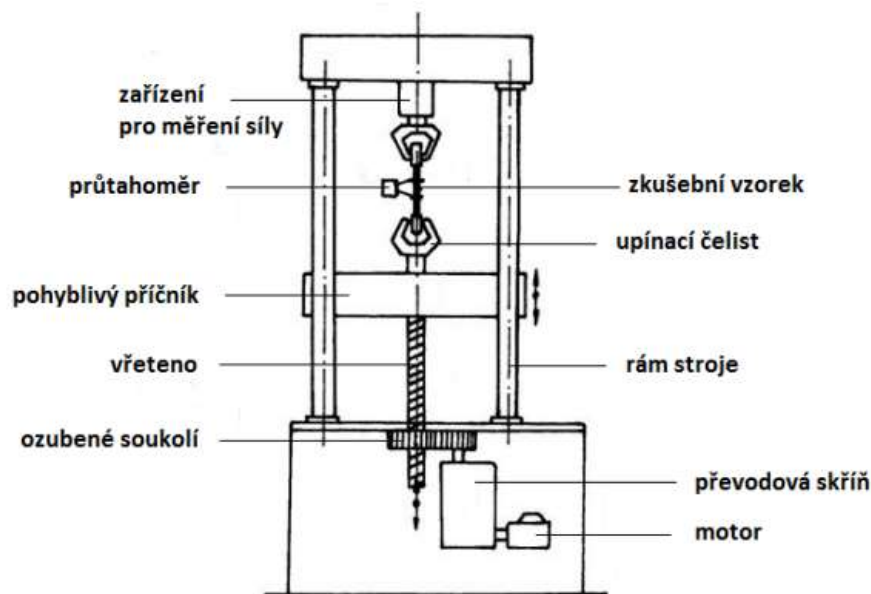
6.1 Mechanická zkouška statická

6.1.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška je jednou z nejdůležitějších metod pro posouzení mechanických vlastností materiálů, zejména plastů. Princip této zkoušky spočívá v postupném protahování zkušebního tělesa jednoosým tahem až do jeho porušení nebo dosažení předem stanovené hodnoty tahového napětí. Provedení této zkoušky vyžaduje důkladné přípravy a pečlivé nastavení parametrů, aby výsledky byly spolehlivé a reprodukovatelné. [35]

Norma ČSN EN ISO 527 stanovuje postupy pro provedení tahové zkoušky a určení mechanických vlastností plastů. Jedním z klíčových prvků je univerzální zkušební stroj, který se skládá z pevného rámu a zařízení pro měření síly umístěného v horní části. Zkušební

těleso je připojeno k tomuto zařízení jedním koncem a k pohyblivému příčníku druhým koncem. Pohyblivý příčník je poháněn motorem, který postupně zvyšuje zatížení a deformuje zkušební těleso. Výsledky tahové zkoušky poskytují důležité informace o pevnosti, pružnosti a dalších mechanických vlastnostech materiálu, které jsou důležité pro navrhování a výrobu výrobků a zařízení z plastů. Takto získaná data jsou například pro inženýrské a výrobní procesy, kde je nezbytné zajistit správnou funkčnost a spolehlivost výsledných produktů. [35]

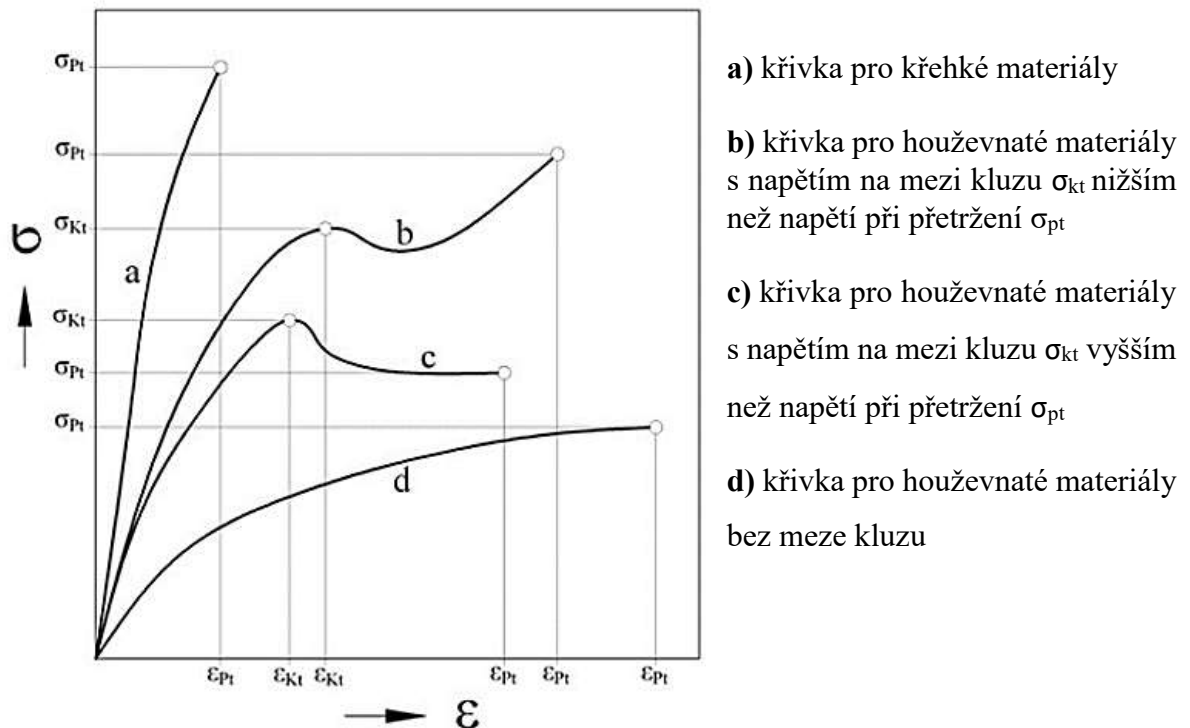


Obr. 17 Jednoduché schéma stroje pro tahovou zkoušku [35]

Průběh tahových diagramů je výrazně ovlivněn rychlostí zatěžování a teplotou. Pokud jde o časový faktor deformačního chování plastů, je třeba poznamenat, že klasický koncept tažnosti, jaký známe u kovů, není zcela přenositelný. Zatímco u kovů se pojem tažnosti opírá o trvalé deformace, u plastů je vhodnější hovořit o prodloužení při přetržení, což zahrnuje jak elastické, tak plastické deformace. Tato distinkce je zásadní pro správné pochopení chování polymerních materiálů při mechanickém zatěžování. [35][36]

Existuje několik základních typů tahových diagramů, které se vyskytují u polymerů, a ty jsou ilustrovány na Obr. 18 Křivky napětí a deformace pro polymerní materiály[36]. Každý z těchto diagramů poskytuje unikátní informace o mechanických vlastnostech plastů v závislosti na různých podmínkách zatížení a teploty. Tyto informace jsou klíčové pro inženýry a materiállové vědce při vývoji nových materiálů a při navrhování komponent a konstrukcí, které budou vystaveny různým mechanickým podmínkám. Znalost tahových

diagramů umožňuje efektivní optimalizaci materiálů a procesů v průmyslové praxi, což vede k výrobě spolehlivějších a výkonnějších produktů. [35][36]

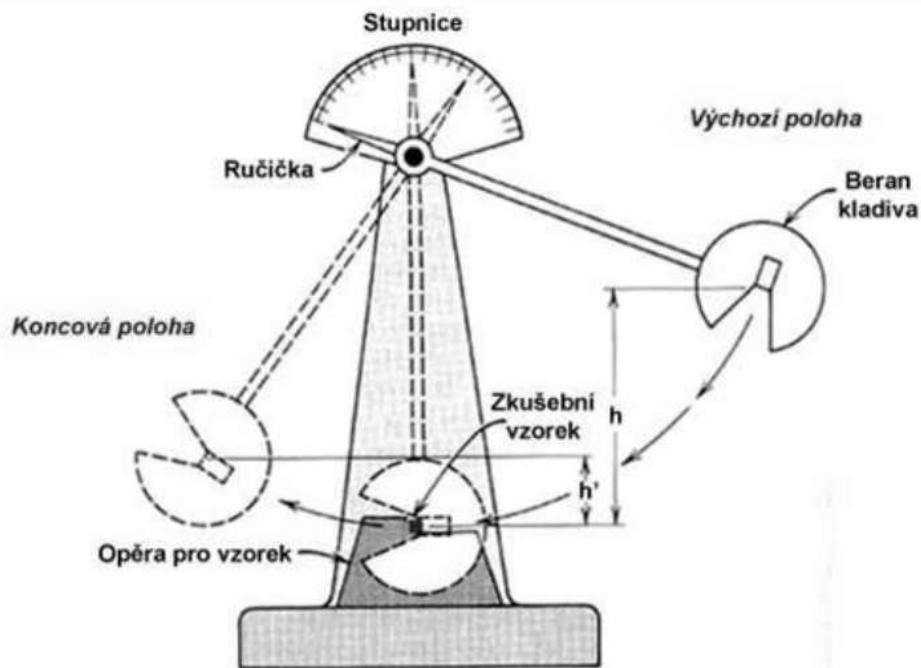


Obr. 18 Křivky napětí a deformace pro polymerní materiály[36]

6.2 Mechanické zkoušky dynamické

6.2.1 Zkouška rázem v ohybu – Charpyho kladivo

Při provádění zkoušky rázem v ohybu je zkušební vzorek umístěn na oporách a následně je přerušen nárazem beranu kyvadlového kladiva. Práce spotřebovaná k přerušení zkušební vzorku je dána rozdílem potenciálních energií. Rázové zkoušky v ohybu se provádějí na přístrojích Charpy, jejichž rozsah měření se liší podle typu zkoušeného materiálu a rozměrů zkušebních těles. Výsledky této zkoušky poskytují důležité informace o houževnatosti a odolnosti materiálu vůči rázovým zatížením. Naměřené hodnoty jsou klíčové pro posouzení schopnosti materiálu odolat náhlým zatížením, kterým může být v reálném provozu vystaven. Rázová zkouška v ohybu je důležitá zejména při hodnocení materiálů používaných v konstrukcích, kde je důležitá schopnost odolat náhlým rázovým namáháním, jako jsou například karoserie vozidel, konstrukce mostů nebo ochranné prvky. Odolnost materiálu vůči rázům je klíčová pro zajištění bezpečnosti a spolehlivosti takových konstrukcí.[37]



Pro zkoušku rázem v ohybu se často používají normalizované vzorky, které jsou speciálně upraveny pro tuto účinnou zkoušku. Tyto vzorky jsou opatřeny U a V vrubem, které slouží k provokaci lomu během zkoušky. Důležitým faktorem při přípravě vzorků je hloubka vrubu, která by neměla přesáhnout 20 % tloušťky zkušebního materiálu, aby nedocházelo k deformaci výsledků. [37]

Pro získání detailních informací o lomovém chování polymerních materiálů lze použít tělesa s oboustranným vrubem. Nejběžnější rozměry vrubu jsou šířka 2 mm, hloubka 3,3 mm a poloměr zaoblení 0,2 mm. V případě menších zkušebních vzorků jsou vruby zpravidla menší, aby bylo možné zachovat adekvátní poměr mezi rozměry vzorku a velikostí vrubu. Pro vrstevnaté materiály je důležité zajistit, aby byly vruby umístěny až do třetiny jejich tloušťky, aby byla zkouška reprezentativní a poskytovala relevantní výsledky. Takové přístupy k přípravě vzorků zajišťují, že výsledky zkoušky budou spolehlivé a reprezentativní pro reálné podmínky použití materiálu. [37]

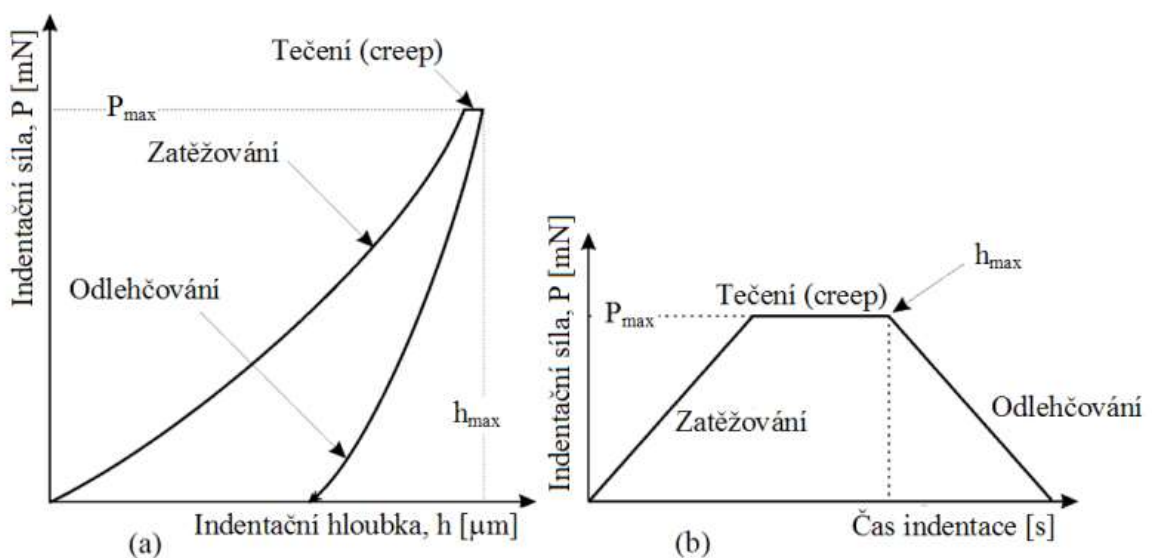
6.3 Instrumentovaná vnikací zkouška tvrdosti (DSI)

Dřívější postup měření tvrdosti spočíval v tradiční zobrazovací metodě, která využívala analýzu rozměrů reziduálního vtisku. S rozvojem technologie tenkých vrstev a potřebou přesnějšího měření lokálních mechanických vlastností však tato metoda postupně přestala dostačovat. Hlavní omezení spočívala v neschopnosti přesného měření mechanických

charakteristik velmi tenkých nebo extrémně elastických vrstev. Tyto nedostatky vedly k vývoji nové metody nazvané Instrumentovaná zkouška tvrdosti (DSI - Depth Sensing Indentation), český ekvivalent. Metoda DSI vznikla v sedmdesátých letech dvacátého století díky práci Bulicheva a Alekina, avšak zásadní pokroky v metodologii, analýze a sběru dat byly provedeny až Oliverem a Pharr na počátku osmdesátých let. DSI se jeví jako nová a pokroková metoda v porovnání s ostatními technikami měření tvrdosti.[39], [40]

Princip metody Depth Sensing Indentation (DSI), česky nazývané Instrumentovaná zkouška tvrdosti, spočívá v detekci okamžité změny hloubky průniku indentoru do zkoumaného materiálu a současném sledování změn zatížení v průběhu celého zatěžovacího a odlehčovacího procesu. Tento postup umožňuje získání charakteristické indentační křivky zatížení-hloubka vtisku, která slouží k analýze mechanických vlastností materiálu. [39], [40], [41]

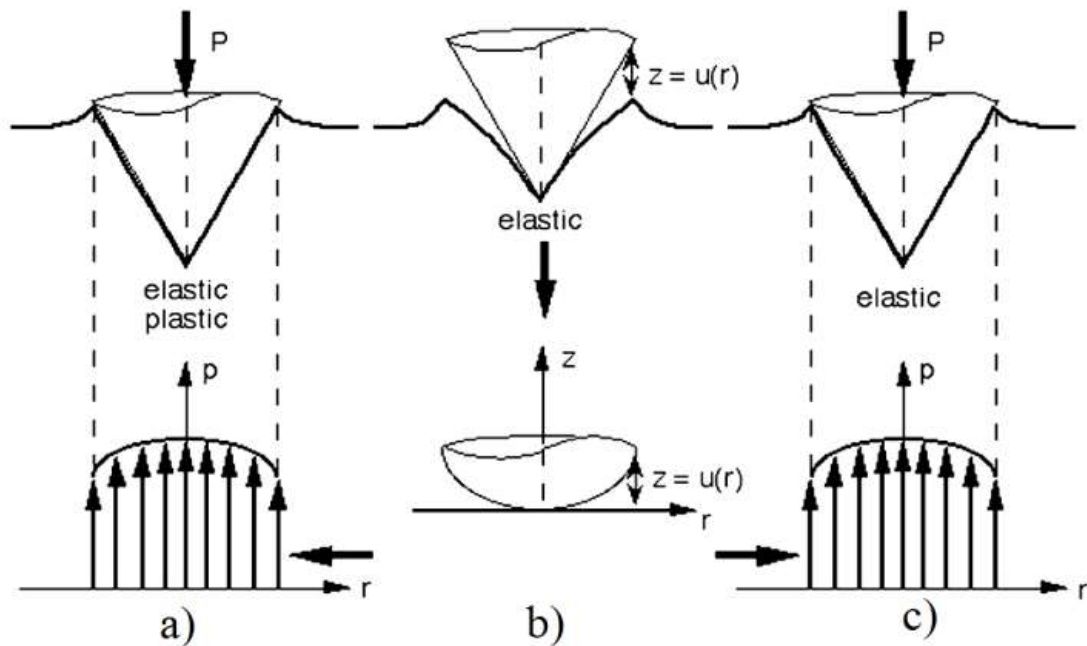
V klasickém indentačním cyklu se první fáze nazývá řízené zatěžování, během které je na indentor aplikována zatěžující síla definovanou rychlostí. Druhá fáze, nazývaná odlehčování, spočívá v postupném snižování zatěžující síly až na nulovou hodnotu. Mezi těmito dvěma fázemi se často vkládá prodleva, známá také jako výdrž na aplikovaném zatížení. Během této fáze je vzorek vystaven maximální zatěžující síle, což umožňuje studium jevu creep, což je dlouhodobé deformace materiálu pod působením konstantního zatížení. [39], [40], [31]



Obr. 20(a) Indentační křivka, (b) Časový diagram indentační zkoušky

[30]

Během zatěžování dojde k elasticko-plastické deformaci, kdy tvar vtisku odpovídá tvaru indentoru (Obr. 21). Nicméně, během odlehčování dochází k elastickému zotavení, a tím ke změně tvaru vtisku, který již neodpovídá tvaru indentoru. Při opětovném zatížení se kontaktní plocha postupně zvětšuje až do plného zatížení. Během procesu opětovného zatížení a odlehčování probíhá elastická deformace. [42]



Obr. 21 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení, b) odlehčení, c) opětovné zatížení[42]

Instrumentovaná zkouška, známá také jako zkouška tvrdosti, poskytuje komplexní informace o mechanických vlastnostech materiálu. Pomocí této metody lze detailně analyzovat elastické chování materiálu, jeho odolnost vůči plastické deformaci (creep), schopnost odolat lomu a případné fázové transformace. Díky přesnému měření hloubky vtisku a aplikované síly umožňuje tato zkouška získat data o materiálovém chování v průběhu zatěžování a odlehčování. [40]

Metoda DSI je důležitým nástrojem pro charakterizaci mechanických vlastností materiálů na mikroskopické úrovni. Její aplikace není omezena pouze na specifický typ materiálu, ale rozpíná se na široké spektrum, což zahrnuje jak polymerní materiály s nižší tvrdostí, tak i extrémně tvrdé uhlíkové struktury, jako je diamant. [39], [40]

Při provádění instrumentované zkoušky mikrotvrdosti je klíčovým aspektem kontinuální sledování zatěžovací síly a hloubky indentace. Tento sled zaznamenává proměny, které materiál prochází během zatěžování a odlehčování, což umožňuje získat detailní povědomí

o jeho chování pod zátěží. Grafické vyjádření této závislosti, známé jako indentační křivka, je klíčovým prvkem pro analýzu vlastností materiálu. [39], [40]

Indentační křivka není pouze prostým ukazatelem tvrdosti a elasticity materiálu, ale může poskytnout důležité informace o jeho struktuře a chování. Například nespojitý průběh křivky může naznačovat fázové transformace, vznik trhlin nebo delaminaci vrstev, což jsou faktory při posuzování mechanické stability a odolnosti materiálu. Takové detailní poznatky jsou nepostradatelné pro návrh a vývoj nových materiálů v různých průmyslových odvětvích, jako je například výroba polymerů, kompozitů, nebo materiálů využívaných v elektronice a medicíně. [39], [40]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 PŘÍPRAVA VZORKŮ ARBURG FREEFORMER

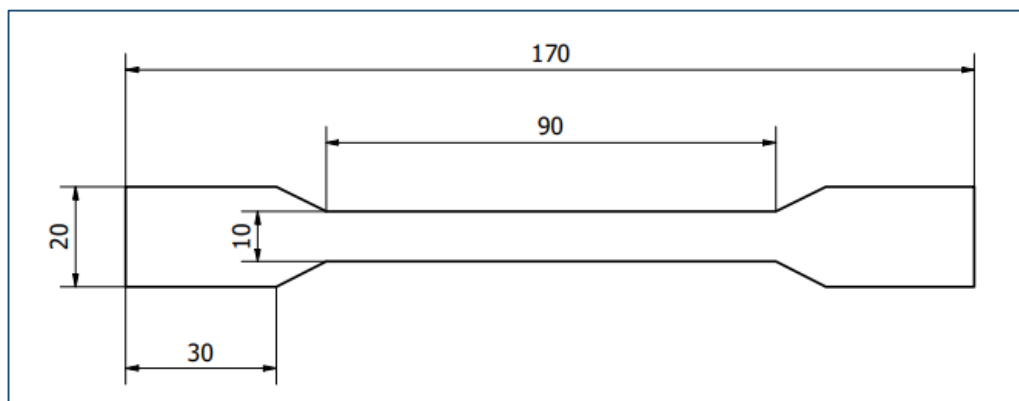
Materiál ABS, ve své granulovité formě, byl připraven k použití prostřednictvím procesu sušení v sušičce. Sušení proběhlo z důvodu dosažení optimálních mechanických vlastností výsledných výrobků. Sušička byla nastavena na teplotu 80 stupňů Celsia a materiál byl v ní ponechán po dobu přibližně 4 hodiny. Cílem sušení bylo odstranit jakoukoli vlhkost z materiálu ABS, což je důležité pro minimalizaci potenciálních vad a zajištění konzistentní kvality výrobků.

Sušička Binder FD 53 představuje základní model sušáren. Tento model je vybaven mikroprocesorovým regulátorem, který umožňuje nastavit teplotu od +5 °C nad teplotou okolí až do +300 °C s definovanou rychlostí náběhu teploty. Dále je možné využít integrovaný časovač, který umožňuje nastavit dobu provozu sušičky v rozmezí od 0 do 99.59 hodin nebo trvalý provoz. Provoz sušičky je možné ovládat manuálně, avšak je také možné programovat rychlost nárůstu teploty. Sušička je vybavena vestavěným ventilátorem, který zajišťuje intenzivní oběh vzduchu v komoře. Díky tomu se výrazně zkracuje čas potřebný k dosažení požadované teploty. Je důležité poznamenat, že ventilátor nelze vypnout, což zajišťuje stálý proud vzduchu v komoře. K dispozici je také odvětrávací trubice o průměru 50 mm umístěná v zadní části komory, která umožňuje odvádění odpařených plynů a výparů z procesu sušení. To přispívá k udržení optimálního prostředí v komoře a minimalizaci rizika nežádoucích vlivů na sušený materiál. Binder FD 53 je tedy spolehlivý a efektivní nástroj pro sušení materiálů ve vědeckých laboratořích a průmyslových provozech.



Obr. 22 Binder FD 53

Dále následoval návrh testovacích vzorků. Pro dosažení optimálních výsledků porovnatelných s dalším druhem tvorby dílců ABS jsem se rozhodl pro normalizované rozměry testovacích dílců dle normy ISO 527 a ISO 179. Tato standardizovaná forma testovacích vzorků nám umožnila provést srovnání mechanických vlastností materiálu ABS, které bylo získáno pomocí technologie Arburg Freeforming, s jinými metodami zpracování a výroby dílců ABS. Konkrétní testovací návrhy mají tloušťku 5mm a rozměry na Obr. 23. Malý testovací vzorek je tvaru kvádrů s nejdelší stranou 100 milimetrů a kratší stranou 10 milimetrů s tloušťkou 5 milimetrů.



Obr. 23 Náčrt testovacího dílu pro tahovou zkoušku

Arburg Freeformer obsahuje násypku pro dopravu granulátu, což eliminuje potřebu jakýchkoli dalších úprav tohoto granulátu před samotným procesem výroby testovacích těles. Díky této vlastnosti není nutné provádět žádné další přípravné kroky předtím, než se začne s vlastní výrobou testovacích vzorků. To zjednodušuje proces a urychluje výrobu, čímž přispívá k efektivitě a ekonomičnosti celého výrobního postupu.

7.1 Nastavení Stroje Arburg pro volné varování

Při výrobě těchto testovaných dílců je nezbytné předehřát pracovní komoru na přesně určenou teplotu, a to z důvodu zajištění lepší adheze nanášeného materiálu na pracovní desku a následně na samotný materiál. V tomto konkrétním případě byla pracovní komora předehřáta na teplotu 100 stupňů Celsia. Pro dosažení optimálního výsledku v procesu výroby je předehřátí důležité, neboť umožňuje materiálu lépe se spojit a zajistit kvalitní a homogenní strukturu výsledného testovaného dílce.

Při nastavení procesu výroby byla pečlivě zvážena řada faktorů, které ovlivňují výslednou kvalitu výrobku. Jedním z faktorů je teplotní nastavení, které bylo prováděno s ohledem na doporučená teplotní pásma stanovená výrobcem pro náš konkrétní materiál. Materiál, známý

pod obchodním názvem Terlutan GP-35 a s hustotou $1,04 \text{ g/cm}^3$, vyžadoval specifické teplotní podmínky pro optimální zpracování. Podle doporučení výrobce byla teplota na trysce nastavena na 260 stupňů Celsia, což je hodnota odpovídající potřebám tohoto materiálu. Pro zóny 1 a 2 byly stanoveny teploty 170 a 200 stupňů Celsia, respektive, také v souladu s výrobcem doporučenými hodnotami. Tato pečlivá kalibrace teplotních parametrů je důležitá pro zajištění správného a přesného zpracování během procesu výroby.

Dalším důležitým aspektem bylo procento vyplnění materiálu, které má vliv na strukturu a pevnost výsledného výrobku. Pro dosažení maximálních výsledků v pevnostních zkouškách bylo proto rozhodnuto o 100% plnění materiálu. Úprava zajišťuje, že vnitřní struktura výrobku bude plně naplněna materiálem, což podporuje homogenitu a pevnost dílce.

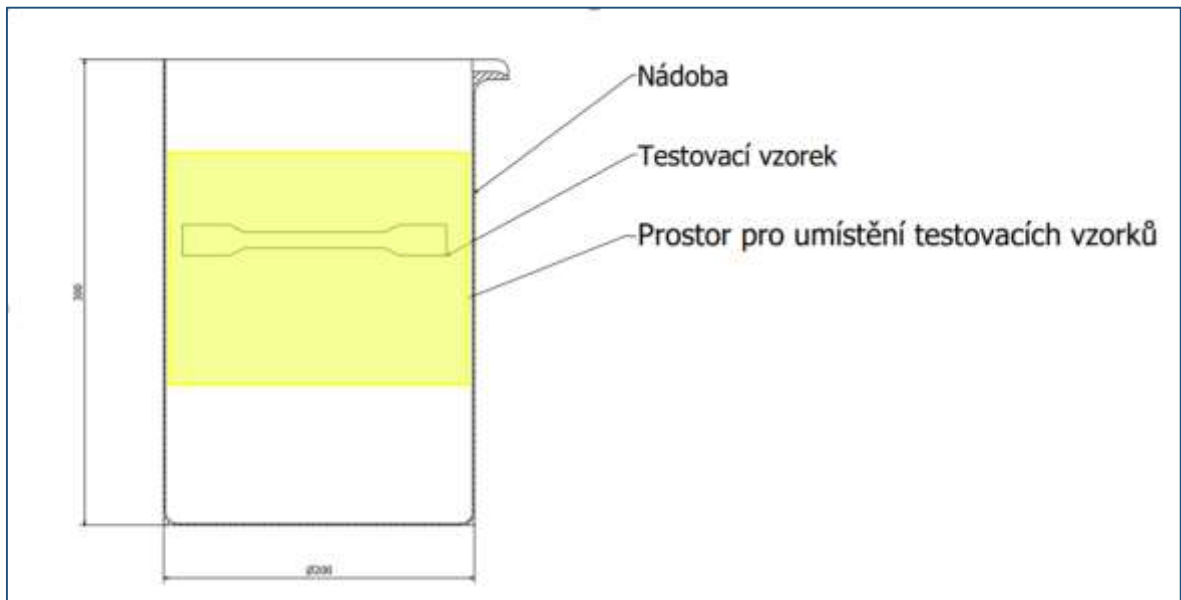
Celkově vzato, pečlivé nastavení teplotních parametrů a procenta vyplnění materiálu je pro dosažení požadovaných mechanických vlastností a kvality výrobku zásadní. Tento přístup k nastavení procesu výroby pomáhá minimalizovat chyby a zajistit konzistentní výsledky při testování mechanických vlastností materiálu.

Přednastavená tloušťka jedné vrstvy při tisku pomocí zařízení Arburg Freeformer je stanovena na 0,2 mm. Tato tloušťka je definována jako vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami materiálu vytlačeného z trysky. Z teoretického hlediska by tato vrstva měla mít tvar koule, neboť materiál vycházející z trysky by měl být rovnoměrně rozprostřen a tvořit kulovitý tvar. Nicméně, z praktického hlediska není tato situace tak jednoduchá. Ve skutečnosti, jakmile materiál opustí trysku a než dopadne na povrch tiskového podkladu, dochází k deformaci tvaru z koule na kapku. Tento jev je způsoben gravitací a adhezí materiálu k podkladu, což vede k tomu, že tvar materiálu se mění z kulovitého na kapkovitý. Stroj Arburg Freeformer je schopen tyto faktory brát v úvahu a dokonce vyhodnocuje hodnotu poměru výšky a šířky vzniklé kapky. V konkrétním případě, se kterým pracujeme, tento poměr činí 1,32. Tento poznatek je důležitý pro správné pochopení chování materiálu během procesu tisku a umožňuje optimalizovat nastavení stroje tak, aby byly dosaženy požadované výsledky. I když je přednastavená tloušťka jedné vrstvy stanovena na 0,2 mm, je důležité mít na paměti, že v praxi se tvar materiálu může lišit od ideální koule kvůli vlivu gravitace a adheze, což je nutné brát v úvahu při plánování a provádění tiskových operací.

7.2 Návrh držáku testovacích vzorků

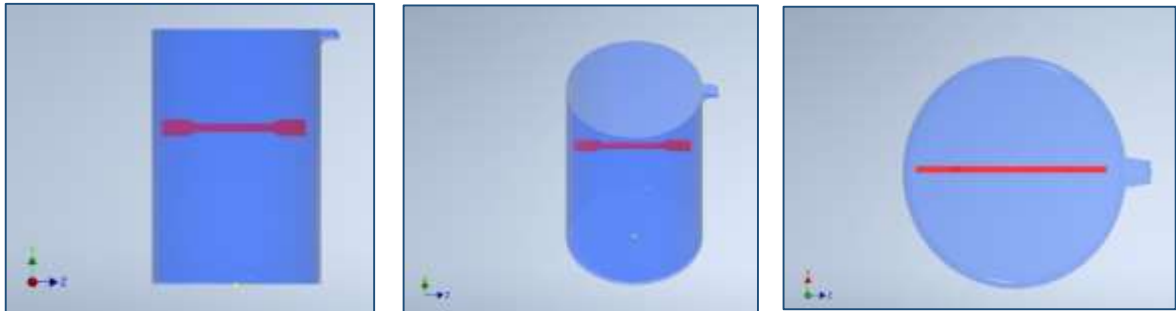
Při aplikaci techniky leptání v našem experimentu jsem se zaměřil na důkladné zajištění optimálních podmínek pro úspěšný průběh procesu. Jednou z hlavních součástí této aplikace

byla speciální nádoba, která byla pečlivě navržena a vybrána s ohledem na potřeby daného experimentu. Tato nádoba měla za úkol poskytnout dostatečný prostor pro umístění testovacích vzorků tak, aby byl zajištěn rovnoměrný přístup acetonu ke všem jejich částem.



Obr. 24 Prostor pro vložení držáku s testovacími dílci

Při výběru nádoby jsem bral v úvahu několik důležitých faktorů. Za prvé, bylo nezbytné zajistit správnou velikost nádoby, aby se do ní vešly všechny testované vzorky bez problémů. Dále jsem dbal na to, aby nádoba umožňovala snadnou manipulaci s testovanými dílci a zároveň umožňovala efektivní distribuci acetonové mlhy po celém jejich povrchu. Dalším faktorem byla bezpečnostní opatření. Vzhledem k použití acetonu bylo nezbytné zajistit dobrou ventilaci prostoru a minimalizovat riziko vzniku nebezpečných výparů. Proto jsem vybral nádobu, která umožňovala snadnou manipulaci a zároveň, díky umístění experimentu, minimalizovala úniky acetonu do okolí. Kromě toho bylo dbáno i na to, aby nádoba umožňovala snadnou kontrolu procesu leptání. Transparentní konstrukce nádoby umožňovala pozorovat průběh procesu a monitorovat distribuci acetonové mlhy na testovaných dílcích. To poskytovalo důležité informace pro optimalizaci nastavení teploty a dosažení požadovaných výsledků.



Obr. 25 Umístění vzorku v nádobě ve 3D prostředí

Důkladná příprava prostředí a správný výběr nádoby nám umožnil dosáhnout optimálních podmínek pro provádění leptání a zajistit spolehlivost a přesnost našich výsledků.

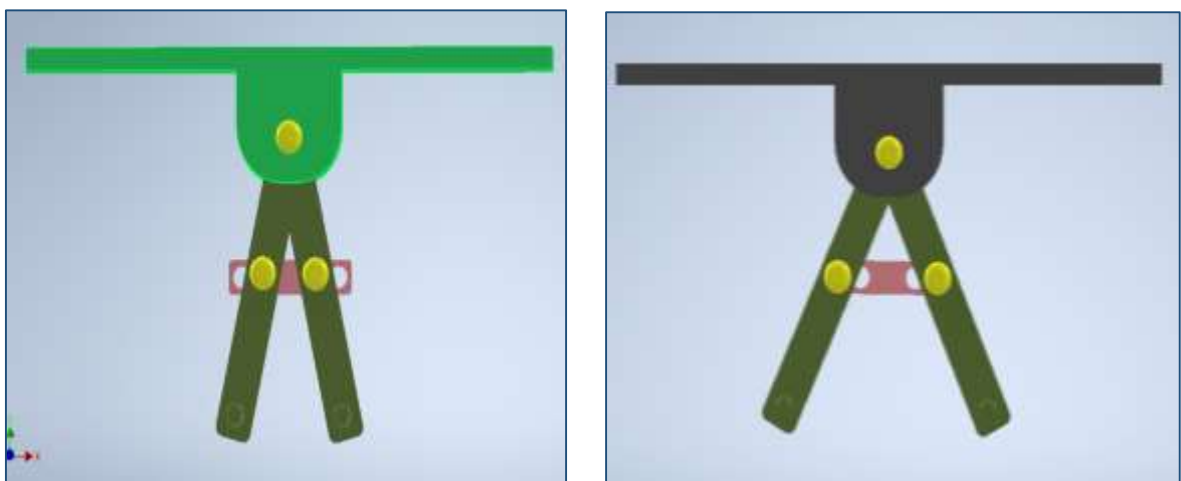
Při návrhu konstrukce držáku bylo nutné zohlednit několik důležitých konstrukčních vlastností a požadavků, které měly zásadní vliv na konečnou podobu zařízení držáku testovacích vzorků. Jednou z těchto vlastností byla velikost držáku, která byla důležitá z hlediska funkčnosti a praktičnosti. Držák musel být navržen tak, aby se vešel do použité nádoby a zároveň poskytoval dostatečný prostor pro umístění testovacích vzorků. Dalším důležitým požadavkem bylo, aby byl držák vhodný pro oba typy testovaných vzorků. To znamená, že konstrukce musela být navržena tak, aby byla kompatibilní s různými formáty a velikostmi testovaných dílců. V zájmu dosažení těchto cílů byl proveden důkladný průzkum možných konstrukčních řešení a provedeny potřebné analýzy a simulace. Na základě těchto poznatků byla vybrána optimální konstrukce držáku, která splňovala všechny požadavky a umožňovala efektivní provádění experimentů s testovanými vzorky. Tento proces zahrnoval návrh jednotlivých částí držáku, aby byla zajištěna co nejvyšší kvalita a spolehlivost zařízení.



Obr. 26 Návrh konstrukce držáku v aplikaci Inventor

Všechny konstrukční procesy byly prováděny v softwaru Autodesk Inventor, což je profesionální CAD (počítačem podporovaný design) software, který umožňuje detailní modelování a simulace konstrukcí. Tento software poskytuje uživatelům široké možnosti pro návrh a vytváření komplexních konstrukcí s ohledem na specifické požadavky a technické specifikace projektu. Díky použití aplikace Inventor bylo možné efektivně navrhnout a optimalizovat konstrukci držáku tak, aby splňovala všechny požadavky a přispívala k úspěšnému průběhu experimentu.

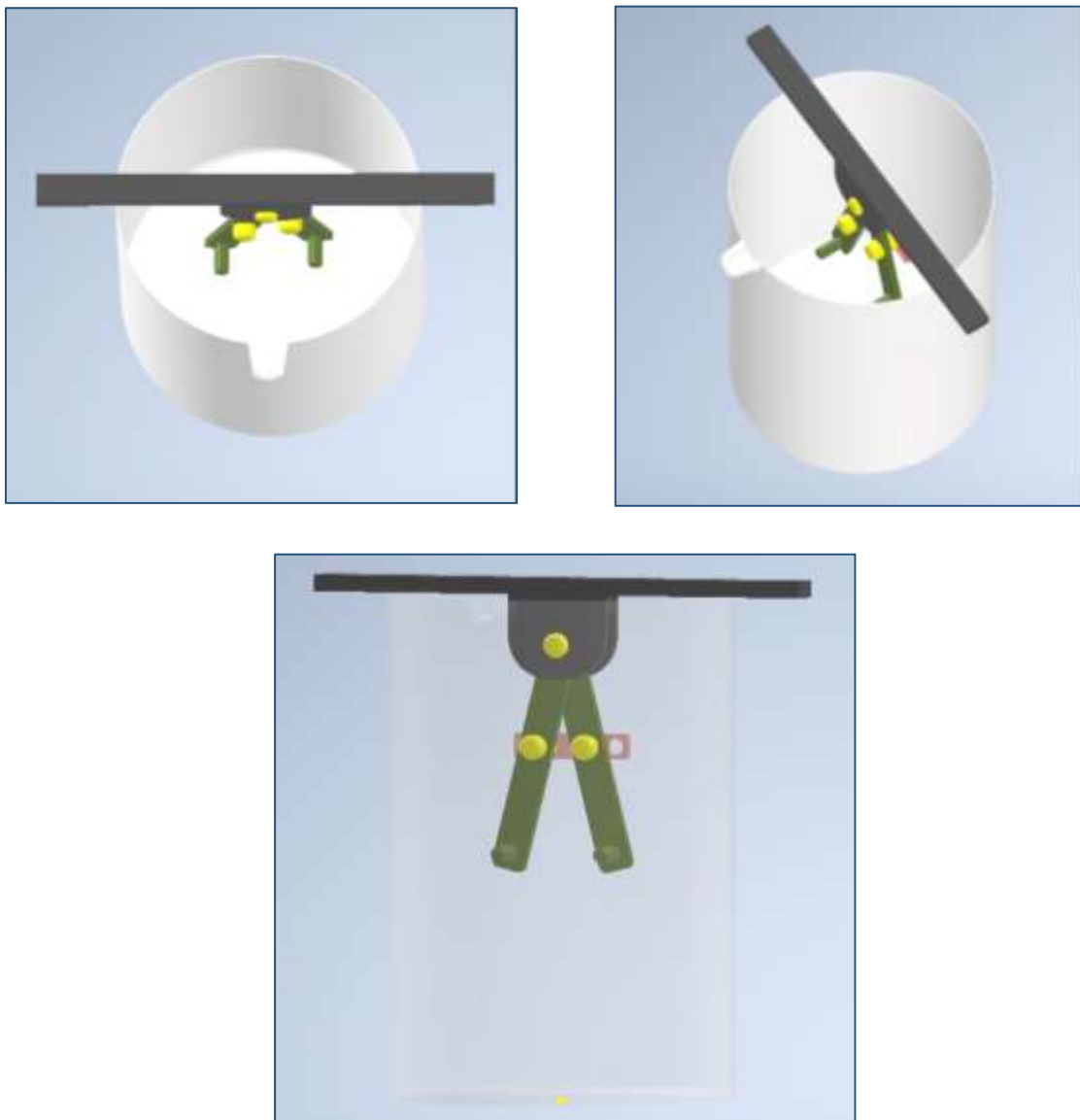
Při konstrukci držáku byl kladen důraz na několik dalších klíčových faktorů. Bylo nutné zajistit jednoduché sestavení, které by umožňovalo rychlé opravy a úpravy přímo v laboratorním prostředí. To znamená, že konstrukce držáku byla navržena s ohledem na snadnou manipulaci a přístupnost k jednotlivým částem. Díky tomu bylo možné provádět jakékoli potřebné úpravy bez zbytečné ztráty času nebo složitých postupů. Dalším z aspektů byla minimalizace interferencí s funkčními plochami testovaných vzorků. Je zásadní, aby držák neovlivňoval vlastnosti testovaných vzorků a aby nedocházelo ke kontaktu s důležitými částmi, které by mohly ovlivnit výsledky experimentu. Proto byl držák navržen tak, aby se vyhýbal těmto oblastem a zajišťoval neomezený přístup acetonu k celému povrchu vzorků. Kromě toho byla věnována pozornost univerzálnosti držáku pro oba typy testovaných vzorků. To znamená, že držák byl navržen tak, aby byl kompatibilní s různými formáty a velikostmi vzorků. Tato univerzální funkce byla zásadní pro efektivitu procesu, protože nebylo nutné měnit držáky při použití různých typů vzorků. To zjednodušovalo manipulaci s experimentálním zařízením a přispívalo k plynulému průběhu experimentu.



Obr. 27 Návrh držáku v obou polohách

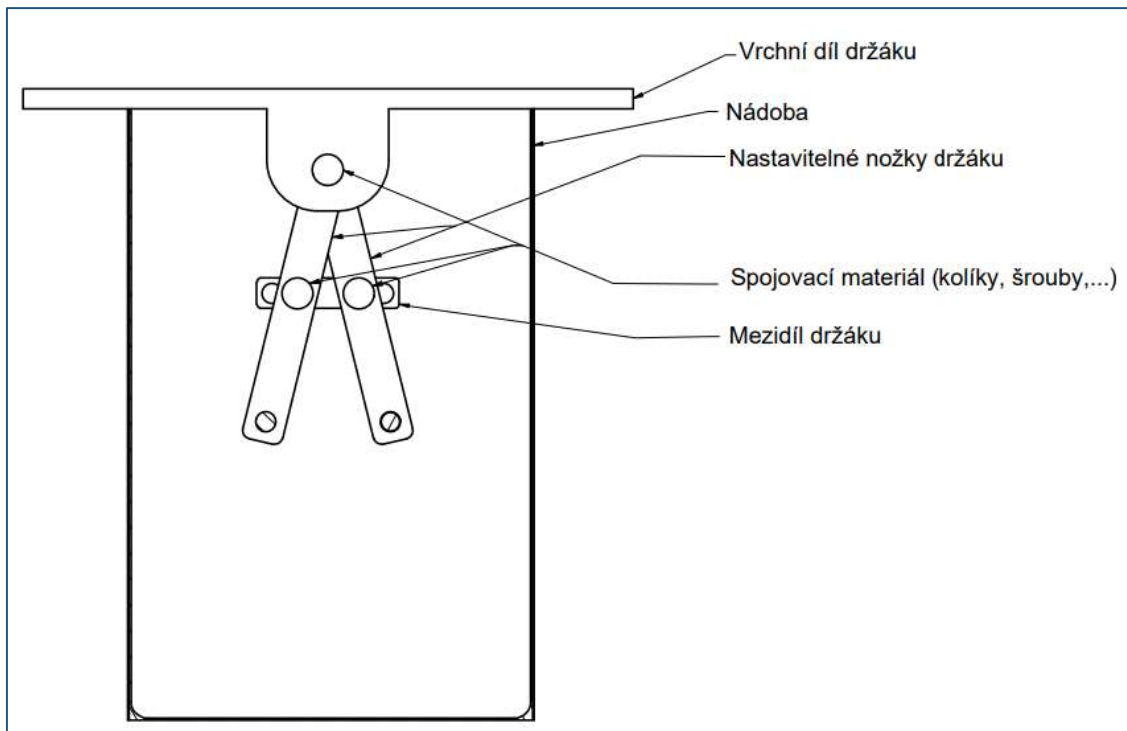
Konstrukce tohoto speciálního držáku byla procesem, který si vyžádal pečlivé plánování, důkladný návrh a precizní realizaci. Každý krok v tomto procesu byl prováděn s ohledem na dosažení optimálních výsledků a zajištění plné funkčnosti a bezpečnosti v rámci našeho výzkumného projektu.

Začátkem tohoto procesu byla důkladná analýza požadavků (viz výše) a specifikací dané aplikace. Bylo nutné pečlivě zvážit potřeby a aspekty konstrukce, včetně rozměrů, funkčnosti a bezpečnosti. Na základě těchto požadavků byl navržen plán konstrukce, který definoval jednotlivé kroky a postupy, které budou nutné k vytvoření finálního produktu.



Obr. 28 Umístění držáku v pohledu zepředu

Následoval detailní návrh jednotlivých částí držáku. Každý detail byl pečlivě promyšlen a navržen tak, aby co nejlépe vyhovoval svému účelu a přispíval k celkové funkčnosti a bezpečnosti zařízení. Konstrukce tohoto speciálního držáku byla provedena s maximální péčí a profesionalitou, s důrazem na dosažení nejvyšší kvality a efektivity v rámci našeho experimentu.



Obr. 29 Sestava návrhu upevnění testovacích dílců v nádobě

Konstrukce držáku testovacích dílců se skládala z několika důležitých částí, z nichž každá hrála klíčovou roli v procesu experimentu. První z těchto částí byl vrchní díl, který sloužil jako opěra o vrchní část nádoby s acetonem. Tento vrchní díl byl navržen tak, aby poskytoval stabilní podporu celému držáku a zároveň umožňoval snadnou manipulaci s testovanými vzorky.

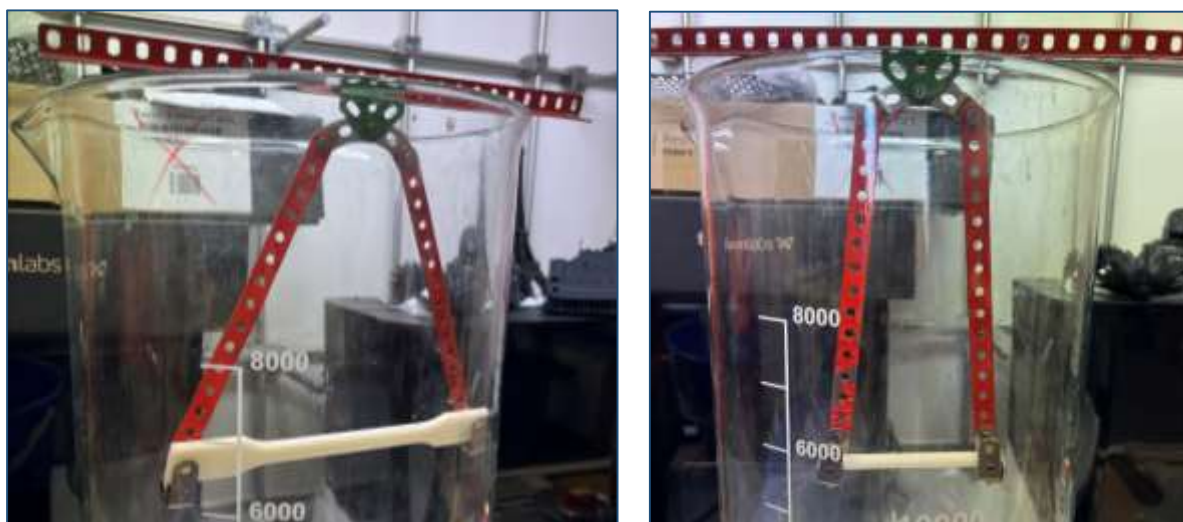
Následovaly nastavitelné nožky, které představovaly klíčový prvek pro uchycení testovacích dílců. Tyto nožky byly vybaveny otvory pro spojovací materiál, jako byly kolíky nebo šrouby s matkami, což umožňovalo flexibilní a bezpečné uchycení různě velkých a tvarovaných dílců. Spodní strana nožek byla opatřena výstupky, které sloužily k přesnému umístění testovaných dílců a zajišťovaly jejich stabilní polohu během procesu leptání.

Další důležitou částí byl mezidíl, který měl za úkol stabilizovat vzdálenost mezi nožkami a zajistit rovnoměrné rozložení testovaných dílců v rámci držáku. Mezidíl byl pevně připevněn

k nožkám pomocí spojovacích dílů, jako například kolíků, což zajišťovalo pevnou a stabilní konstrukci držáku během celého procesu.

Všechny tyto části byly navrženy s ohledem na požadavky dané aplikace a byly pečlivě promyšleny a realizovány s cílem dosáhnout maximální efektivity a spolehlivosti během experimentu. Díky této komplexní konstrukci bylo možné provádět leptání testovaných dílců s vysokou přesností a opakovatelností, což přispívalo k dosažení přesných a spolehlivých výsledků v rámci výzkumného projektu.

Proto v rámci realizace konstrukce byla využita stavebnice Merkur, která se osvědčila jako ideální volba pro tento účel. Díky své modularitě a flexibilitě umožnila stavebnice Merkur realizaci komplexních konstrukcí s ohledem na specifické požadavky aplikace. Držák vytvořený z této stavebnice splňuje všechny potřeby a aspekty jak konstrukčně, tak bezpečně a funkčně, což jej činí ideálním řešením pro náš výzkumný projekt.



Obr. 30 Držák ze stavebnice Merkur

Pro tuto konkrétní aplikaci byl vyvinut a použit speciální držák, který měl za cíl zautomatizovat proces leptání a zlepšit celkovou manipulaci s ponořením testovaných vzorků do acetonové mlhy. Tento držák nebyl pouhým náhodným výtvořem, ale pečlivě navrženým a konstruovaným zařízením s ohledem na specifické potřeby a požadavky dané aplikace. Jeho konstrukce z merkurů perfektně splňovala funkční požadavky držáku a přitom jeho výroba byla finančně nenáročná. Byla využita konstrukce, která obsahovala malý počet základních dílů, které byly již dostupné v archivu materiálů, což přispělo ke snížení nákladů na výrobu.



Obr. 31 Vrchní pohled na držák ze stavebnice Merkur

Při detailním prozkoumání konstrukce je patrná absence mezidílu. Tento nedostatek je však zcela záměrný a vychází z technických specifik aplikace. Nožky držáku jsou totiž vybaveny speciálním mechanismem, který zajišťuje pevné uchycení testovaných dílců a současně jim brání v pohybu v podélném směru. Díky tomu není potřeba používat mezidíl, ačkoliv testovací vzorky jsou stále spolehlivě uchyceny a manipulace s držákem i dílky je zajištěna bezpečně a efektivně.

Lze tedy konstatovat, že navržený držák se svou pečlivě promyšlenou konstrukcí a vynikající funkcí představoval klíčový prvek v procesu experimentu s leptáním. Jeho použití umožnilo snadnou a bezproblémovou manipulaci s testovanými dílky a zároveň přispělo k dosažení přesných a spolehlivých výsledků v rámci výzkumného projektu.

7.3 Leptání zkušebních vzorků

Po úspěšném vytisknutí zkušebních vzorků následovala klíčová fáze operace leptání. Leptání, jakožto jedna z technik povrchové úpravy, bylo podrobně prozkoumáno a analyzováno v rámci literárního přehledu této diplomové práce. Důležitým faktorem, který vyplývá z této analýzy, je skutečnost, že tradiční metody leptání materiálu ABS mohou mít negativní dopad na životní prostředí a zdraví. S ohledem na tyto faktory jsem se rozhodl pro povrchovou úpravu leptání v parách acetonu.

Tento postup zahrnuje manipulaci s acetonem za zvýšené teploty, což vytváří nad povrchem kapalinu mlhu. Testovaný materiál je následně ponořen do této mlhy a ponechán tam po určitý časový úsek. Tento proces umožňuje efektivní aplikaci povrchové úpravy leptání s minimálním rizikem negativních dopadů na životní prostředí a lidské zdraví, což je klíčové pro dosažení požadovaných výsledků v rámci této práce.

Technické informace o leptadlu:

Skupenství	Kapalné
Barva	Bezbarvá
Zápach	Charakteristický
Bod varu nebo počáteční bod varu	56 °C
Hořlavost	Vysoce hořlavá kapalina a páry
Teplota samovznícení	603 °C
Hustota	530 hPa při 40 °C



Tabulka 1 Technické informace o acetonu;

Dalším potenciálním způsobem úpravy povrchu je naimpregnování kusu bavlněné látky acetonem, který se následně umístí do uzavřené nádoby spolu s testovanými vzorky. Tato metoda byla zvážena, avšak nakonec vyloučena z důvodu jejího omezeného spojení s technickou praxí. V technickém prostředí, kde je kladen důraz na přesné parametry a rychlost procesu leptání, není tato metoda obvykle preferovaná. Požadavky na specifické množství leptané látky a rychlost leptání jsou zpravidla maximalizovány, což znamená, že tradiční metoda naimpregnování acetonem nemusí splňovat požadavky na přesnost a konzistenci, které jsou v technickém prostředí nezbytné. Z tohoto důvodu byla tato alternativní metoda povrchové úpravy vyřazena a upřednostněna byla metoda leptání v parách acetonu, která nabízí vyšší kontrolu a přesnost v procesu úpravy povrchu testovaných vzorků.

7.4 Popis experimentu

Proces leptání povrchu testovaných vzorků představoval hlavní fázi výzkumného experimentu. Pro dosažení požadovaných vlastností a zkoumání vlivu leptání na mechanické vlastnosti materiálu ABS jsme využili aplikaci acetonové mlhy a ponoření testovaných dílců do této mlhy. Doba leptání byla přesně odstupňována, aby bylo možné zkoumat vliv trvání procesu na konečné vlastnosti materiálu. Vzorky byly vyjímány po přesně stanovených intervalech času - po pěti, deseti, patnácti, dvaceti a pětadvaceti sekundách. Pro každý

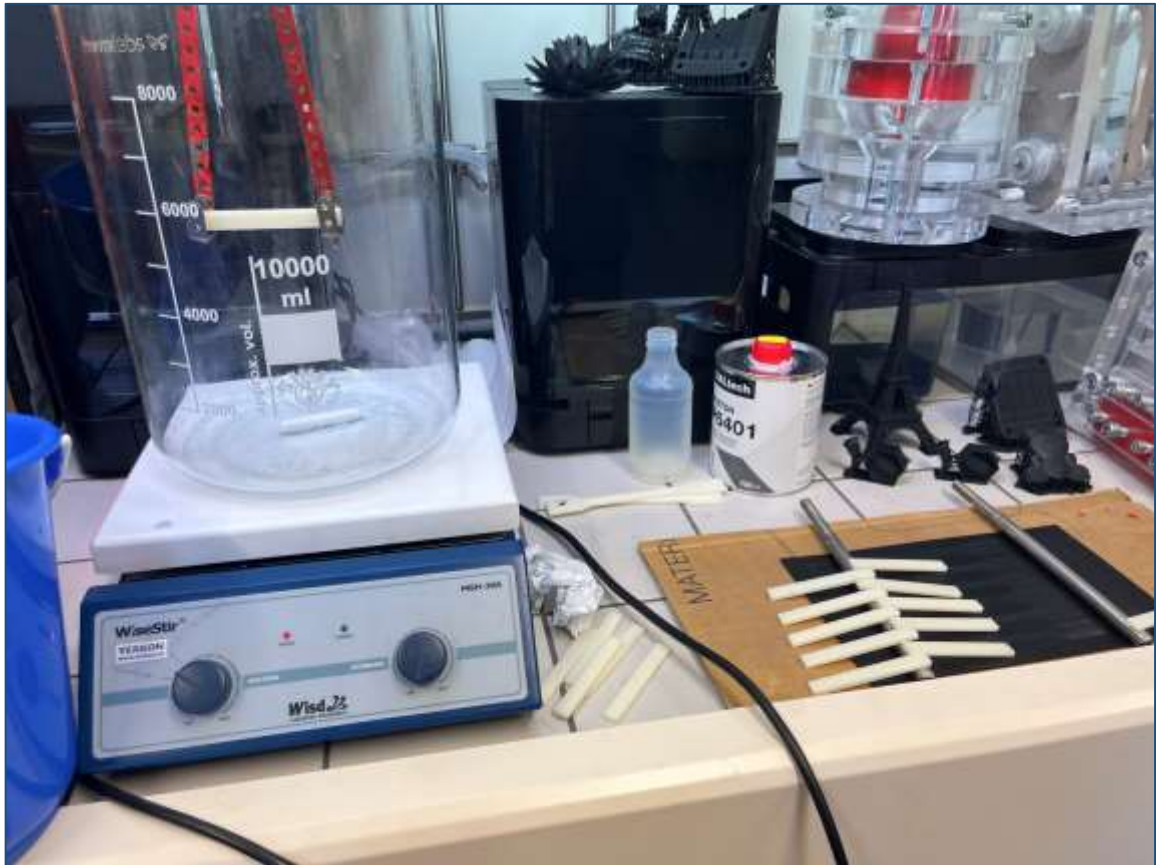
časový úsek bylo leptáno deset vzorků, což nám poskytlo dostatečný počet dat pro následnou analýzu.



Obr. 33 Proces leptání většího testovacího dílce

Pro ohřev acetonu v nádobě jsme využili a regulovali magnetickou míchačku Witeg, konkrétně model MSH-A s ohřevem, která se vyznačuje spolehlivým provozem a jednoduchým ovládáním. Tato míchačka disponuje otočnými knoflíky pro nastavení otáček i teploty, avšak bez možnosti kontroly hodnot na displeji. Pracovní deska, vyrobená z hliníkové slitiny a pokrytá keramickým potahem, zajistila optimální přenos tepla do vzorku a zároveň poskytuje vysokou chemickou i mechanickou odolnost.

Pro míchání acetonu jsme využili magnetického tyčinkového míchadla vyrobeného z materiálu PTFE. Samotná míchačka disponuje maximálními otáčkami 1500 ot/min a teplotním rozsahem až 380°C. S topným výkonem 1200W a ocelovou konstrukcí s práškovým lakováním poskytuje toto míchadlo spolehlivý výkon a odolnost v náročných pracovních podmínkách.



Obr. 34 Pracovní prostředí s míchačkou a testovacími díly

Během samotného procesu leptání bylo důležité dodržovat stanovený časový harmonogram a zajistit, aby všechny vzorky byly vystaveny stejným podmínkám. Obsluha experimentu měla proto důležitou úlohu v monitorování procesu a pečlivém vyjímání vzorků v přesně definovaných časových intervalech.

Tímto přístupem jsem mohl získat ucelený pohled na vliv leptání na mechanické vlastnosti materiálu ABS a poskytnout relevantní data pro naši další analýzu a závěry v rámci této práce.

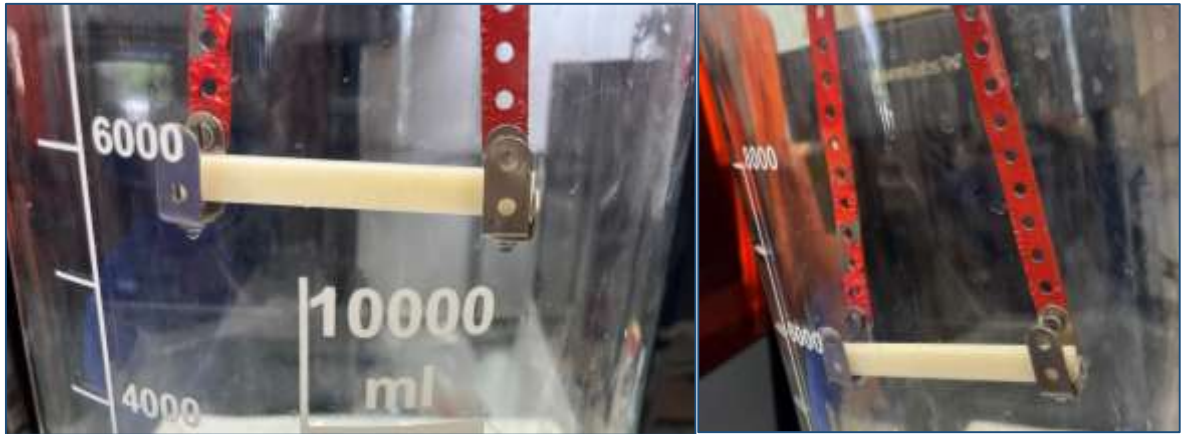
Během tohoto experimentu jsem získal několik důležitých poznatků, které je třeba detailněji popsat. Prvním z nich bylo zjevné pozorování, že doba, kterou testovací díl strávil ponořený v acetonové mlze, výrazně ovlivňuje strukturu povrchu materiálu ABS. S prodlužujícím se časem ponoření docházelo k výrazným změnám ve vlastnostech povrchu.



Obr. 35 Tvrdnutí materiálu po vyjmutí z mlhy

Porovnání vzorků vyjmutých z mlhy po pěti sekundách a těch vyjmutých po dvaceti až pětadvaceti sekundách jasně ukázalo, že struktura povrchu je výrazně odlišná. Povrch materiálu se po delším ponoření jevil lepkavý a snadno se přichytil na ruku obsluhy experimentu. Z tohoto důvodu jsem zavedl opatření, které spočívalo v tvrdnutí materiálu po vyjmutí z mlhy, přičemž jsem se zaměřil na užší části testovacího dílu s podporou pomocného držadla. Tímto způsobem jsme minimalizovali narušení povrchu materiálu, a to pouze v místech, která nejsou kriticky namáhána, a zajistili tak konzistenci výsledků experimentu.

Během pozorování samotného procesu leptání jsme získali ale i další důležité poznatky, které je třeba detailněji rozebrat. Při experimentu jsem si všiml, že na povrchu držáku, který byl ponořen v acetonové mlze, začaly postupně vznikat kapky. Tento jev byl snadno pozorovatelný pouhým okem a naznačoval, že aceton jako agresivní látka může mít významný vliv na materiál držáku.



Obr. 36 Kapky utvořené v mlze na povrchu držáku a rozleptaná část držáku

V průběhu experimentu jsme si uvědomili, že agresivní prostředí acetonové mlhy způsobuje odlepování kusů laku ze stavebnice Merkur, ze které byl držák součástek vyroben. Tento jev naznačuje, že při procesu leptání dochází k chemické reakci mezi acetonem a povrchem stavebnice, což má za následek poškození držáku a jeho estetického vzhledu. Tento fakt nám poskytl důležité poznatky o agresivitě acetonové mlhy a jejím potenciálním negativním dopadu na materiály používané v procesu leptání.

Během fáze odpočívání a sušení naleptaných dílců jsem dbal na to, aby bylo zajištěno dostatečné větrání místnosti. Tím bylo minimalizováno hromadění výparů z acetonem upravených dílců, což by mohlo mít negativní dopad na prostředí i na pracovníka. Proces odpočívání a sušení byl pečlivě plánován tak, aby trval téměř 24 hodin, což umožnilo dílcům dostatek času na stabilizaci a odpaření zbývajících acetonu z jejich povrchu.



Obr. 37 Proces relaxace materiálu

Po ukončení procesu odpočívání a sušení byly díly pečlivě uschovány v pytlech, které byly navrženy speciálně pro tento účel. Tato opatření jsme přijali s cílem zajistit optimální stav dílců pro jejich další manipulaci a zkoumání. Uchování dílců v pytlech zajišťuje jejich ochranu před vnějšími vlivy a zabraňuje nechtěnému poškození či kontaminaci během manipulace s nimi v následující fázi výzkumu. Takto pečlivě plánovaný proces odpočívání a sušení dílců nám umožnil získat spolehlivá data a zajistit konzistentní výsledky v rámci našeho výzkumného projektu.



Obr. 38 Uchovávací pytlíky s odpočínutými materiály



Obr. 39 Velké testovací dílce po leptání

7.5 Testování vzorků z Arburg freeformeru

Pro testování leptaných vzorků byly zvoleny metody mechanických zkoušek, které poskytnou ucelený pohled na jejich mechanické vlastnosti a odolnost. Konkrétně jsem se zaměřil na tahovou zkoušku a zkoušku rázovou, které jsou považovány za standardní metody pro hodnocení pevnosti materiálů.

Tahová zkouška umožní posoudit pevnost materiálu a jeho schopnost pevnosti v tahu. Tato zkouška se provádí taháním vzorku materiálu a měřením síly, která je potřebná k jeho roztržení. Zkouška rázová zase zkoumá schopnost materiálu absorbovat energii při náhlém zatížení. Tímto způsobem získáme informace o jeho tvrdosti a odolnosti vůči nárazu.

Kromě těchto zkoušek byla provedena také zkouška mikrotvrdosti, která poskytne detailní informace o lokální tvrdosti materiálu. Tato zkouška je užitečná zejména pro hodnocení mikrostruktury materiálu a detekci případných defektů či změn v materiálu vlivem procesu leptání. Tyto metody zkoušek byly zvoleny s cílem získat komplexní a důkladné poznatky o mechanických vlastnostech leptaných vzorků ABS a poskytnout relevantní data pro naši další analýzu a interpretaci v rámci výzkumného projektu.

7.5.1 Tahová zkouška

Testovací vzorky byly systematicky podrobeny tahové zkoušce na přístroji Zwick / Materialprüfung 1456 v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1. Provedení zkoušek bylo řízeno pečlivě stanovenou rychlostí posunu čelistí, která byla nastavena na 50 mm/min. Tato zkouška byla záměrně zaměřena na několik klíčových aspektů mechanických vlastností materiálu, zejména na Youngův modul pružnosti, sílu potřebnou k přetržení a mez pevnosti.

Po provedení tahových zkoušek byly získané hodnoty pečlivě analyzovány a porovnány s referenčními hodnotami poskytnutými výrobcem materiálu. Tento srovnávací proces nám umožnil posoudit konzistenci a spolehlivost materiálu při různých zatíženích.

Výsledky těchto zkoušek jsou informacemi pro naše výzkumné úsilí, a proto byly detailně rozebrány jednotlivé výsledky a prezentovány ve formě tabulek a grafů. Tyto vizuální prezentace umožní snadnější porovnání a interpretaci dat a zároveň poskytnou ucelený obraz o mechanických vlastnostech testovaných materiálů.

Přesné hodnoty a interpretace výsledků budou uvedeny níže, abychom poskytli podrobný pohled na vliv leptání povrchu na mechanické vlastnosti materiálu. Tímto způsobem se budeme moci lépe porozumět chování materiálu v reálných podmínkách a poskytnout

důležité informace pro další vývoj a optimalizaci procesů v oblasti výroby a materiálového inženýrství.



Obr. 40 Tahová zkouška

Tahová zkouška představuje tedy základní metodu pro hodnocení mechanických vlastností materiálů. Principem této zkoušky je postupné protahování zkušební tělesa ve směru jeho hlavní podélné osy při konstantní zkušební rychlosti až do okamžiku jeho porušení nebo dosažení předem stanovené hodnoty napětí nebo deformace. Během celého procesu zkoušky jsou měřeny zatížení působící na zkušební těleso a příslušné prodloužení.



Obr. 41 Průběh tahové zkoušky

Norma ISO 527 definuje minimální požadavky na provedení tahové zkoušky. Je stanoveno, že pro každý požadovaný směr zkoušení musí být testováno alespoň pět zkušebních těles. Tento počet může být zvýšen, pokud je vyžadována vyšší přesnost střední hodnoty nebo pokud je požadována podrobnější analýza mechanických vlastností materiálu. Touto metodou získaná data nám poskytují důležité informace o chování materiálu za různých podmínek zatížení a jsou jedním z hlavních prvků pro optimalizaci procesů v oblasti materiálového inženýrství.

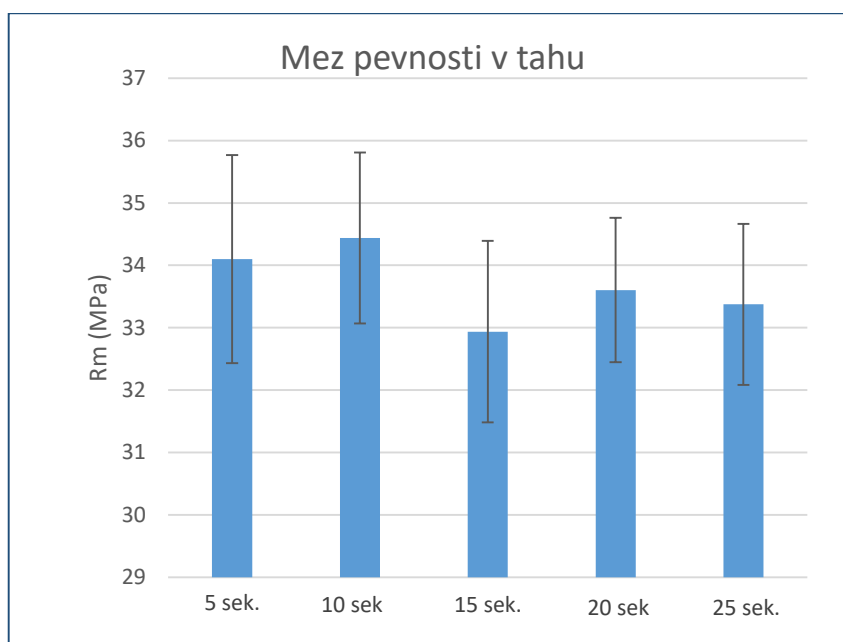
Číslo měření	Doba leptání (s)	rozměr a (mm)	rozměr b (mm)	Obsah S (mm ²)	Poměrné prodloužení %	Maximální Síla (N)	E	Mez pevnosti v tahu Rm (MPa)
1	5	4	10	40	4,9	1484,3	2274,9	37,1075
2	5	4	10	40	6,1	1295,3	2206	32,3825
3	5	4	10	40	3,8	1353,6	2328,8	33,84
4	5	4	10	40	3,8	1375,3	3003,1	34,3825
5	5	4	10	40	6	1311,2	2231,1	32,78
6	10	4	10	40	5,3	1461,9	2097,5	36,5475
7	10	4	10	40	4,8	1400,3	2332,8	35,0075
8	10	4	10	40	4,9	1328,5	2389,2	33,2125
9	10	4	10	40	6,4	1308	2038	32,7
10	10	4	10	40	5,2	1388,9	1847,6	34,7225
11	15	4	10	40	6,1	1316,5	2182,4	32,9125
12	15	4	10	40	5	1277,6	2363,6	31,94
13	15	4	10	40	7,9	1363,1	2346	34,0775
14	15	4	10	40	5,1	1233,6	2275,2	30,84
15	15	4	10	40	6,8	1396,5	2390,5	34,9125
16	20	4	10	40	6,3	1255,6	2245,1	31,39
17	20	4	10	40	4,6	1349,8	2116,7	33,745
18	20	4	10	40	4,3	1358,3	2729,1	33,9575
19	20	4	10	40	5	1390,1	2122,6	34,7525
20	20	4	10	40	6,4	1367,1	2057,9	34,1775
21	25	4	10	40	4,6	1420,4	2367,5	35,51
22	25	4	10	40	4,4	1283	2482,7	32,075
23	25	4	10	40	6	1361	2268,6	34,025
24	25	4	10	40	7,3	1284,8	2107,2	32,12
25	25	4	10	40	5,6	1325,6	2110,8	33,14

Tabulka 2 Naměřené výsledky pro zkoušku tahem pro arburg freeforming

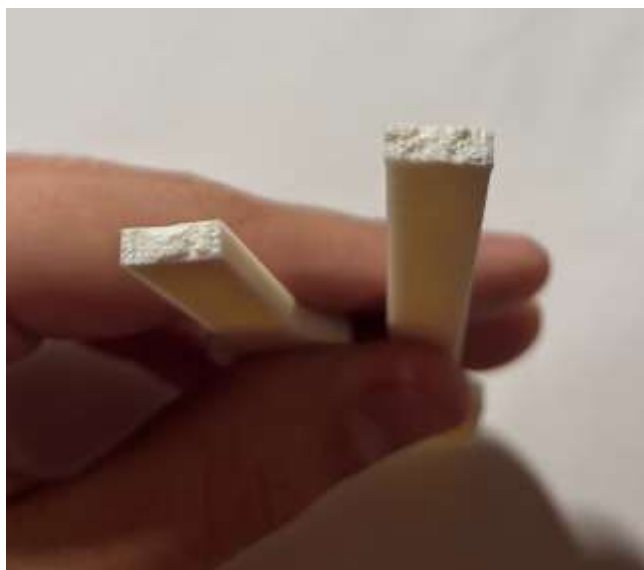
U výsledků, které jsou v *Tabulka 2*, jsou zaznamenány údaje o výsledcích z měření tahové zkoušky. Výsledná hodnota meze pevnosti v tahu je vyčíslen poměr síly a obsahu plochy, kde síla působí. Z těchto výsledků není na první pohled patrná korelace s klesající, nebo stoupající tendencí. Výrobcem stanovená mez pevnosti v tahu se pohybuje dle aplikace materiálu je 30 Megapascalů. Tato pevnost, byť lehce zvýšena, je tedy potvrzena i naší zkouškou.

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	34,1	1,7	0%
10s	34,4	1,4	-1%
15s	32,9	1,5	3%
20s	33,6	1,2	1%
25s	33,4	1,3	2%

Tabulka 3 Průměrné hodnoty tahové zkoušky



Obr. 42 Výsledky měření závislosti meze pevnosti v tahu a doby leptání acetonu



Obr. 43 Křehký lom

Z testů není na první pohled patrná závislost, která by měla být prokázána účinností použitého leptadla acetonu. Na Obr. 43 si však můžeme všimnout, že se jedná o křehký lom.

7.5.2 Zkouška Sharpyho kladivem

V rámci hodnocení materiálu a schopnosti absorbovat energii při lomu byla provedena zkouška vrubové houževnatosti, známou také jako Charpyho zkouška. Tato metoda zkoušky je jedním z důležitých nástrojů pro posouzení mechanických vlastností materiálů, zejména jejich chování za různých podmínek zatížení.



Obr. 44 ZwickRoell HIT25P

Charpyho zkouška byla realizována na zařízení ZwickRoell HIT25P, což je vysoce spolehlivý přístroj, splňující normu ČSN EN ISO 179-1 pro provedení této zkoušky. Charpyho kladivo bylo speciálně nastaveno s energií 7,5 Joule, což je standardní hodnota používaná pro testování materiálů v laboratorních podmínkách.



Obr. 45 ZwickRoell HIT25P s testovacím tělesem

Tato zkouška umožňuje stanovení množství energie, které materiál dokáže absorbovat při lomu. Výsledky Charpyho zkoušky jsou důležitými ukazateli materiální odolnosti a mohou poskytnout cenné informace pro návrh a výrobu komponentů v různých odvětvích průmyslu.

Během zkoušky bylo zkušební těleso umístěno vodorovně na podpěrách a podrobeno úderu rázového kladiva. Směr rázu byl řízen středem vzdálenosti mezi podpěrami, přičemž těleso bylo ohýbáno vysokou a nominálně konstantní rychlostí. V našem konkrétním případě byla zkouška provedena rázem na užší stranu.

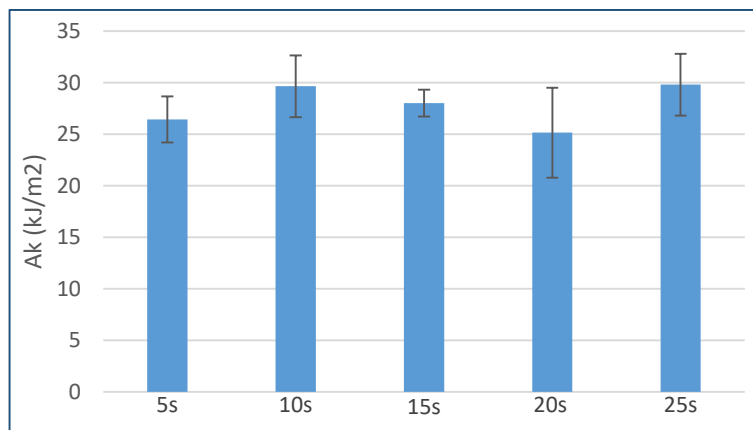
Číslo měření	Čas leptání (s)	Energie (J)	kJ/m ²
1	5	7,5	27,71
2	5	7,5	23,4
3	5	7,5	25,24
4	5	7,5	26,66
5	5	7,5	29,21
6	10	7,5	29,86
7	10	7,5	30,88
8	10	7,5	32,36
9	10	7,5	24,54
10	10	7,5	30,64
11	15	7,5	30,01
12	15	7,5	28,58
13	15	7,5	26,61
14	15	7,5	27,55
15	15	7,5	27,37
16	20	7,5	24,97
17	20	7,5	18,84
18	20	7,5	23,97
19	20	7,5	27,35
20	20	7,5	30,64
21	25	7,5	28,87
22	25	7,5	32,2
23	25	7,5	32,66
24	25	7,5	25,19
25	25	7,5	30,12

Tabulka 4 výsledky měření zkoušky Charpyho kladivem

Výsledky měření na Tabulka 4 jsou výsledky z přístroje pro měření vrubové houževnatosti kladivem Charpy. Tyto výsledky také nepotvrzují závislost účinnosti leptadla na materiál ABS, podobně jako je tomu u tahové zkoušky.

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	26,44	2,23	0%
10s	29,65	2,99	-12%
15s	28,02	1,31	-6%
20s	25,15	4,36	5%
25s	29,81	3,01	-13%

Tabulka 5 Průměrné výsledky vrubové houževnatosti



Obr. 46 Vrubová houževnatost

7.5.3 Zkouška mikrotvrdomosti

Odolnost proti pronikání cizího tělesa, obecně vyjadřovaná jako vtisková tvrdost, poskytuje cenné informace o mechanických vlastnostech zkoumaných vzorků. Tato zkouška spočívá v analýze proniknutí Vickersova indentoru do povrchu materiálu, což je důležitý krok při zhodnocování pevnosti a odolnosti materiálu. Hodnocení výsledků této zkoušky umožňuje hlubší pochopení chování zkoumaných materiálů v různých podmínkách a prostředí, což má důležité aplikace v jejich návrhu a výrobě. Výsledky ze zkoušky mikrotvrdomosti jsou zaznamenány v *Tabulka 6*.

Číslo měření	5s	10s	15s	20s	25s
1	2,822	2,579	2,575	2,452	2,286
2	2,667	2,582	2,584	2,386	2,228
3	2,591	2,77	2,476	2,411	2,229
4	2,644	2,71	2,484	2,411	2,196
5	2,86	2,61	2,584	2,396	2,221
6	2,607	2,582	2,547	2,328	2,314
7	2,651	2,675	2,66	2,33	2,278
8	2,644	2,547	2,633	2,345	2,227
9	2,712	2,51	2,577	2,317	2,228
10	2,689	2,618	2,569	2,375	2,245

Tabulka 6 Výsledky zkoušky mikrotvrdomosti- Vtiskový modul

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	2,69	0,09	0%
10s	2,62	0,08	3%
15s	2,57	0,06	4%
20s	2,38	0,05	12%
25s	2,25	0,04	17%

Tabulka 7 Průměry hodnot z vtiskového modulu

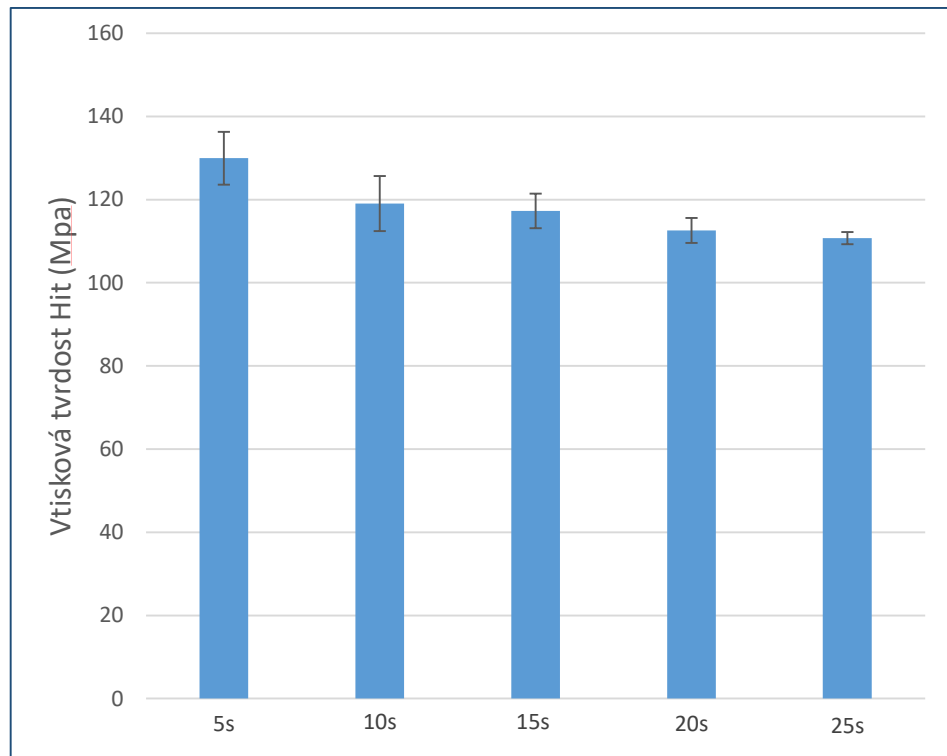
Výše se nachází průměry hodnot z vtiskového modulu, včetně směrodatné odchylky a procentuálního rozdílu hodnot s porovnáním s první hodnotou. Už při prvním pohledu na výsledky z měření mikrotvrdomosti si lze všimnout, že výsledky mají klesající tendenci.

Číslo měření	5s	10s	15s	20s	25s
1	138,403	114,169	118,654	115,616	109,431
2	125,661	116,176	115,843	113,218	110,703
3	123,608	132,633	110,747	113,005	110,991
4	133,026	125,822	112,66	117,078	108,417
5	141,438	117,81	119,752	114,762	111,017
6	125,275	118,918	114,053	110,275	113,907
7	129,242	120,53	121,952	112,314	111,075
8	125,251	112,61	122,435	108,622	110,428
9	127,665	112,481	119,636	108,506	110,703
10	129,952	119,017	117,303	112,6	110,741

Tabulka 8 Výsledky zkoušky mikrotvrdomosti- Vtisková tvrdost

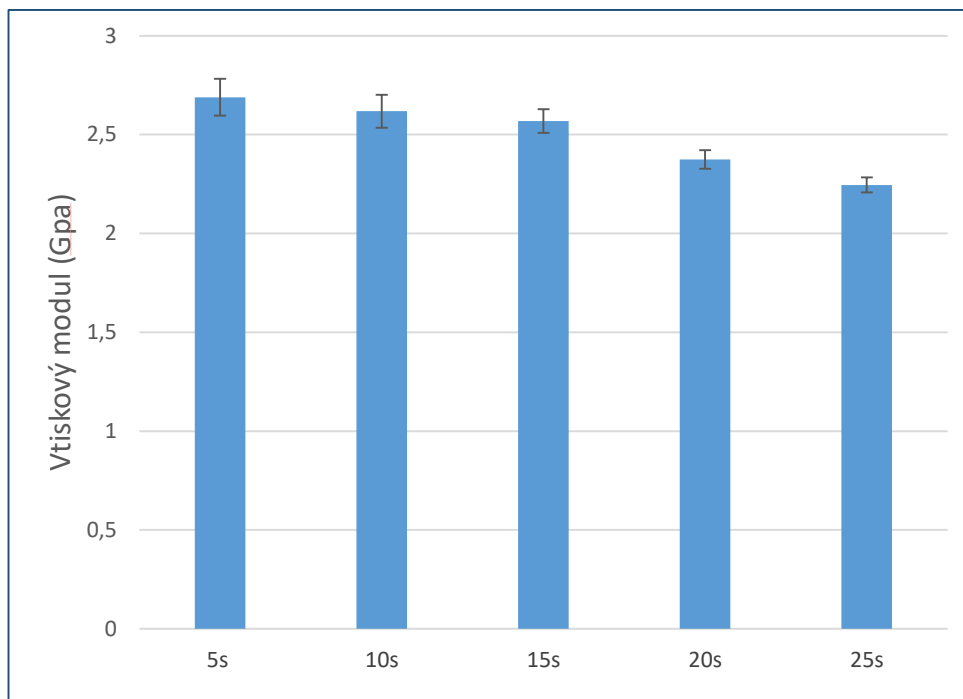
Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	130,0	6,3	0%
10s	119,0	6,6	8%
15s	117,3	4,2	10%
20s	112,6	3,0	13%
25s	110,7	1,5	15%

Tabulka 9 Průměry hodnot z vtiskové tvrdosti



Obr. 47 Vtisková tvrdost

Hodnoty vtiskové tvrdosti vykazují klesající tendenci, což je důležitým ukazatelem. Vtisková tvrdost je definována jako maximální zatěžující síla k průmětu kontaktní plochy materiálu. Tato zkouška poskytuje užitečné informace o odolnosti materiálu vůči vnějším tlakům a jeho schopnosti odolávat deformaci.



Obr. 48 Vtiskový modul

Během průběhu experimentu byly pozorovány zajímavé trendy v hodnotách vtiskového modulu pro materiál ABS vytvořený pomocí technologie Arburg Freeformer. Tyto hodnoty vykazují pozoruhodnou tendenci k poklesu s prodlužujícím se časem leptání. Vtiskový modul byl stanoven na základě průběhu tečny při postupném zatížení/odtížení vzorků. Během samotného experimentu byla zatížena vzorky konstantní silou po dobu 90 sekund. Maximální zatížení během této zkoušky dosáhlo hodnoty 1 Newton, a to jak při zatížení, tak při následném uvolňování. Rychlost zatížení i odlehčování byla nastavena na 2 Newtony za minutu, což umožnilo přesné měření průběhu tečny a výpočet vtiskového modulu. V grafickém zobrazení na Obr. 48 Vtiskový modul byl zaznamenán charakteristický průběh elastického (Youngova) modulu.



Obr. 49 Měřidlo Micro-Combi Tester

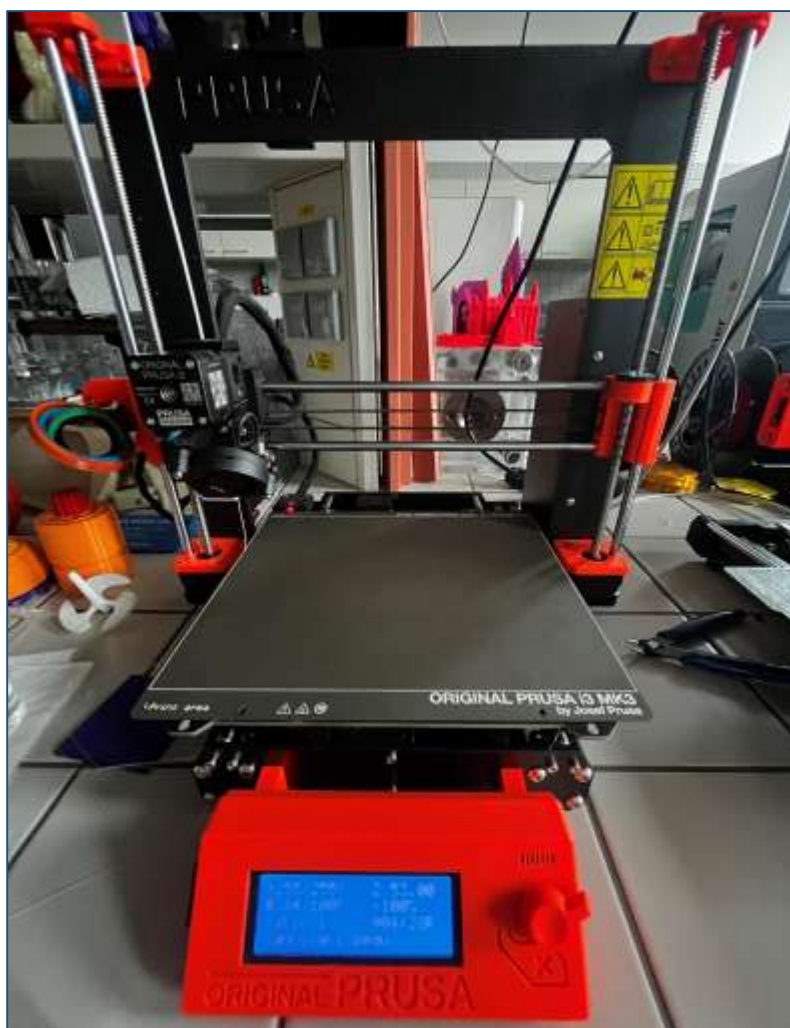
Vtisková mikrotvrdoost byla konána na speciálním zařízení nesoucí název Micro-Combi Tester. Toto zařízení pochází z dílny CSM Instruments a dokáže vyvinout sílu až 10 Newtonů na samotném měření. Díky testu mikrotvrdoosti se dá po detailním výpočtu stanovit i třeba tvrdoost povlaků a Yongův modul v hlubokých profílech a materiálech.



Obr. 50 Detail měřidla pro mikrotvrdoost

8 PŘÍPRAVA VZORKŮ NA PRUSA 3D TISKÁRNĚ

Samotná volba 3D tiskárny pro práci byla důkladně promyšlená a založená na potřebách a požadavcích výzkumu. Po zvážení různých možností bylo rozhodnuto pro tiskárnu od renomované společnosti PRUSA RESEARCH, a to konkrétně model Original Prusa i3 MK3. Tato tiskárna je známá svou spolehlivostí, kvalitou tisku a širokými možnostmi nastavení, které nabízí uživatelům. Když byly analyzovány technické parametry tiskárny, bylo zřejmé, že splňuje veškeré požadavky. Maximální výška vrstvy tisku dosahuje 0,35 mm, což umožňuje tisk detailních a precizních modelů. Rychlost posuvu se pohybuje okolo 200 milimetrů za sekundu, což zase zajišťuje efektivní a rychlý proces tisku. Maximální teplota na trysce je 300 stupňů Celsia, a to je dostatečné pro tisk široké škály materiálů, zatímco maximální teplota podložky činí 120 stupňů Celsia, což je důležité pro adhezi tisknutého materiálu.



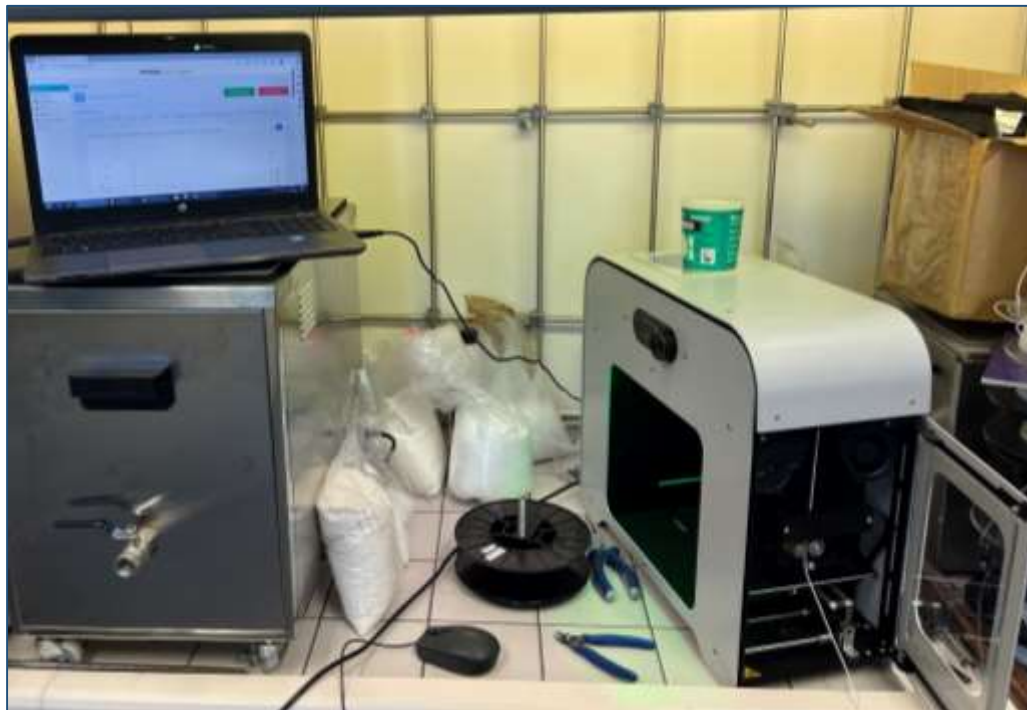
Obr. 51 3D tiskárna Prusa i3 MK3

Jedním z důležitých faktorů, které vedly k výběru této tiskárny, byl její rozměrový limit pro tisk. S maximální velikostí tisku 250x210x210 milimetrů má dostatek prostoru pro tisk velkých i malých vzorků bez nutnosti jejich dělení nebo úprav. Tento rozměrový limit poskytuje flexibilitu a svobodu při navrhování a tisku různorodých objektů. Je důležité také zmínit, že zde probíhá přímé podávání materiálu, protože jiné 3D tiskárny mohou používat extrudér s Bowdenovým systémem podávání filamentu. Tento typ extrudéru by však mohl mít potíže s ucpáváním při použití ručně vytvořeného filamentu. Materiál k výrobě struny byl tedy stejný, jako u aplikace výroby freeform od Arburgu. Granulát byl sušen a skladován za stejných podmínek, jaké byly uvedeny v první části praktické části.



Obr. 52 3devo Composter 450

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků a zajištění srovnatelnosti dat s výsledky získanými pomocí freeformové technologie, bylo rozhodnuto vyrobit speciální filamentovou strunu pro použití v této konkrétní 3D tiskárně. Tento postup umožnil dosáhnout podobných podmínek tisku jako u freeformu a zajistit konzistenci v parametrech tisku mezi oběma zařízeními. Výroba vlastní filamentové struny tak umožnila optimalizaci procesu tisku vzorků a minimalizaci odchylek ve vlastnostech materiálu mezi testovanými metodami výroby.



Obr. 53 Systém extrudéru a zapojení aplikace Devovision

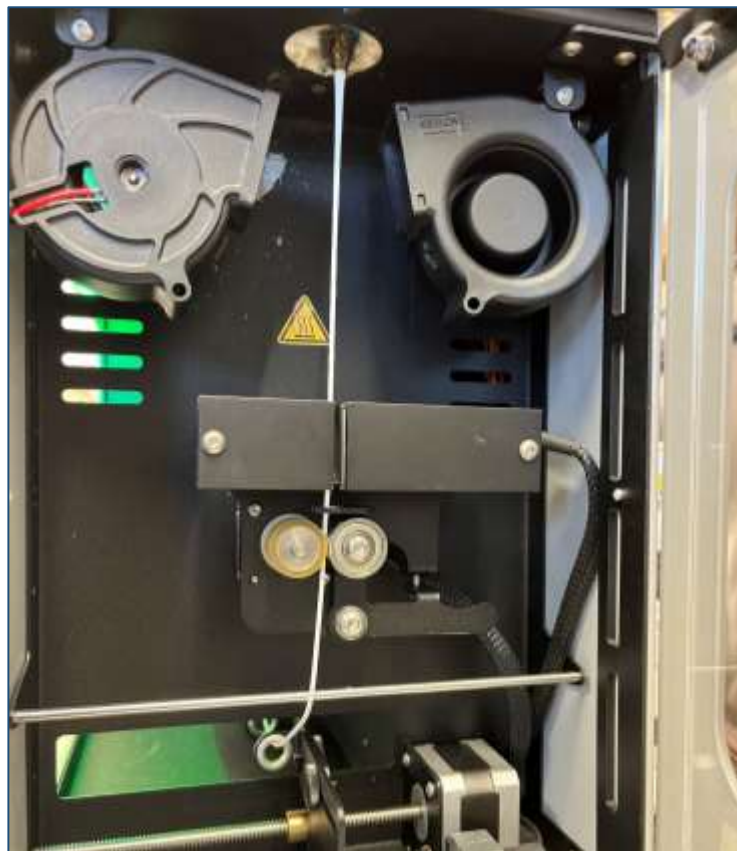
Filament byl vyráběn pomocí výrobního zařízení od společnosti 3devo, konkrétně pomocí modelu Composer 450. Tato technologie umožňuje transformaci granulí ABS do podoby filamentu, což bylo klíčové pro plánování a realizaci druhé fáze experimentu.

Při optimalizaci procesu tvorby filamentu z granulátu ABS byla kladená zvláštní pozornost na detaily a pečlivé nastavení jednotlivých parametrů. Pro dosažení požadovaných vlastností a kvality výsledného materiálu bylo nezbytné provést systematický přístup k nastavení teplotních zón a odtahových parametrů. Nastavení zón bylo provedeno s ohledem na doporučení výrobce a specifické vlastnosti granulátu ABS. Zóna 4, umístěná nejbližší k násypce, byla nastavena na teplotu 240 stupňů Celsia, zatímco zóny 3, 2 a 1 měly postupně nižší teploty, a to 230, 230 a 220 stupňů Celsia. Tato gradace teplot zajišťovala optimální podmínky pro rovnoměrné a stabilní tavení granulátu a minimalizovala riziko nežádoucích deformací nebo poruch.



Obr. 54 Cívka se strunou a nastavené teploty pásem

Pro dosažení správného tvaru a kvality vytlačované struny byly aktivovány ofuky. Tyto ofuky pomáhaly stabilizovat tvar a rozměry struny ještě před jejím odtahem, čímž byla zajištěna konzistentní geometrie a minimální variabilita výsledného produktu.



Obr. 55 Detail ofuku a odtahu struny extrudéru

Následovala pečlivá optimalizace otáček odtahu, což bylo důležité pro správný tok materiálu a minimalizaci rizika poruchy tiskového procesu. Odtahové otáčky byly pečlivě laděny v rozmezí od 4,5 do 6 otáček za minutu, přičemž vyšší hodnoty zajišťovaly rychlejší odtah materiálu, zatímco nižší hodnoty zvyšovaly stabilitu tiskového procesu.



Obr. 56 Závislost tloušťky struny na čase

Výsledná tloušťka struny se pohybovala v rozmezí od 1650 do 1850 μm . Ta byla konstantně měřena aplikací devovision, který je vytvořen pod hlavičkou výrobce extrudéru 3devo. Tvorba struny probíhala po dobu necelých 3 hodin, avšak na Obr. 56 je pouze část z naměřených hodnot z důvodu přehlednosti výsledků. Nastavená tloušťka vyrobené struny byla 1,75 milimetrů. Systematický a důkladný přístup k nastavení procesu tvorby filamentu zaručil konzistentní kvalitu a spolehlivost výsledného materiálu.

8.1 Nastavení Prusa i3 MK3

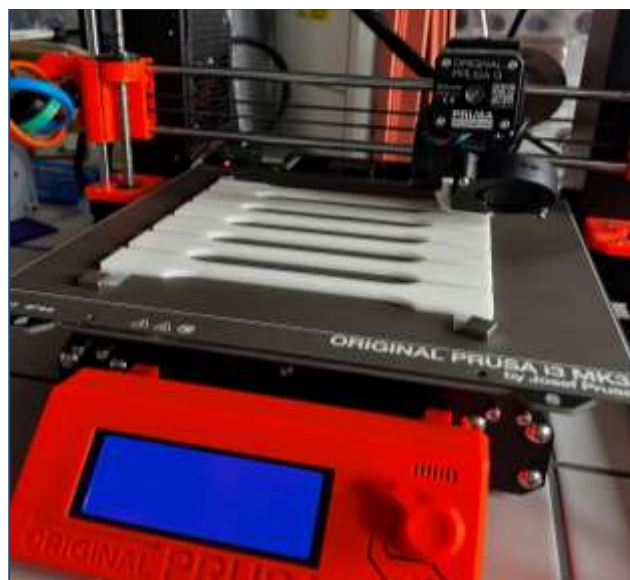
Nastavení programu, který operuje a pracuje s 3D tiskárnami od firmy Prusa, se nazývá prusaslicer. Všechny nastavení výroby testovacích vzorečků byly provedeny tedy v počítačovém 3D prostředí.

Samotný proces tisku byl doplněn o inovativní prvek - speciální přidržovací magnety, které měly za úkol zajišťovat pevné umístění tisknutých vzorků během tisku.



Obr. 57 Přidané magnetky do 3D tisku

Tento krok vyžadoval upravení modelu tak, aby bylo možné přidat další vrstvy materiálu, které nejenže stabilizovaly tisknuté vzorky, ale také poskytovaly větší odolnost. To znamenalo důkladné zvážení designu a optimalizaci procesu tisku pro dosažení maximálně přesných výsledků.



Obr. 58 Tisk vzorků

8.2 Příprava vzorků pro testování

Před samotným testováním byly vzorky ošetřeny acetonem, stejně tak, jako tomu bylo u leptání v první části praktické části této práce. Díky podmínkám a zautomatizovanému

nastavení pracoviště bylo velmi snadné zopakovat proces leptání tak, aby byly zachovány všechny prvky, které by mohly leptání a odpočívání materiálu narušit. Testovací dílce byly vytaženy z acetonu opět po pěti, deseti, patnácti, dvaceti a pětadvaceti vteřinách. Dále bylo nutné nechat naleptané testovací dílce odpočinout. Tento proces probíhal opět stejně, jako první část experimentu.

8.3 Testování vzorků

Ve druhé části práce bylo testování materiálů provedeno pomocí tří různých metod, což bylo analogické k postupu v první části praktického experimentu. Tyto metody zahrnovaly tahovou zkoušku, zkoušku Charpyho kladivem a zkoušku mikrotvrlosti. Každá z těchto zkoušek poskytuje unikátní informace o mechanických vlastnostech materiálů a jejich chování za různých podmínek zatížení. Rozmanitost těchto zkoušek umožňuje komplexní zhodnocení odolnosti materiálů a jejich schopnost absorbovat energii při náhlých změnách zatížení. Provedení těchto zkoušek srovnatelným způsobem s první částí experimentu umožňuje získat konzistentní data a porovnatelné výsledky, což je klíčové pro přesné vyhodnocení vlastností materiálu.

V následujících kapitolách se nachází výsledky z provedených zkoušek.

8.3.1 Tahová zkouška

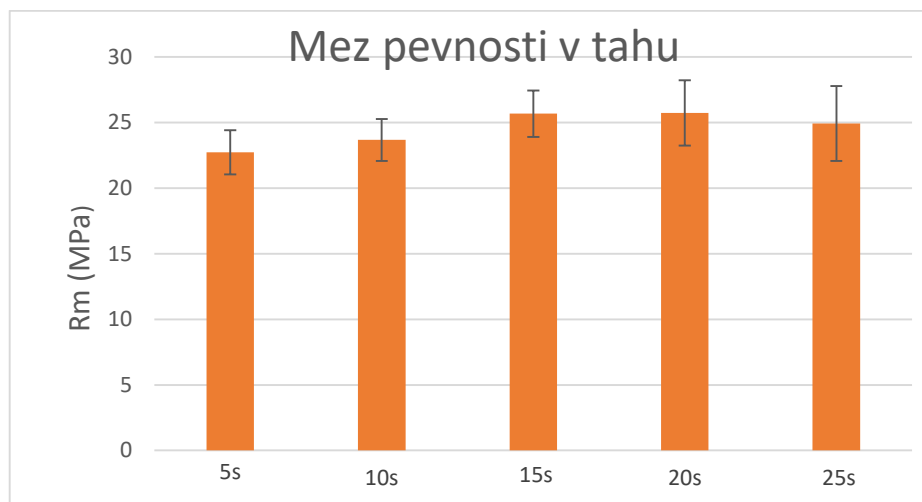
Číslo měření	Doba leptání (s)	rozměr a (mm)	rozměr b (mm)	Obsah S (mm ²)	Poměrné prodloužení %	Maximální Síla (N)	E	Mez pevnosti v tahu Rm (MPa)
1	5	4	10	40	24,5	940,3	1172,3	23,5075
2	5	4	10	40	7,7	913,1	1456,8	22,8275
3	5	4	10	40	6	1016,5	1374,7	25,4125
4	5	4	10	40	3,8	824,4	1013,7	20,61
5	5	4	10	40	4,7	852,3	1042	21,3075
6	10	4	10	40	5,5	968,4	1442,9	24,21
7	10	4	10	40	5,6	1048,6	1207,4	26,215
8	10	4	10	40	5,5	925,9	1401,5	23,1475
9	10	4	10	40	4,4	942	1395,4	23,55
10	10	4	10	40	4,8	849,9	748,6	21,2475
11	15	4	10	40	6,6	898,7	1315	22,4675
12	15	4	10	40	6	1023,4	1493,2	25,585
13	15	4	10	40	8,7	1044,9	1155,4	26,1225
14	15	4	10	40	5,6	1056,2	1531,3	26,405
15	15	4	10	40	4,6	1112	1652,3	27,8
16	20	4	10	40	4,8	1086,2	1444,6	27,155
17	20	4	10	40	7,2	1049	1470,4	26,225
18	20	4	10	40	5,7	1068,2	1365,7	26,705
19	20	4	10	40	4,8	1109,8	1636,1	27,745
20	20	4	10	40	6	834,6	846,1	20,865
21	25	4	10	40	4,3	863,1	1091,7	21,5775
22	25	4	10	40	3,9	857,3	1224,4	21,4325
23	25	4	10	40	5,7	1092,5	1170,3	27,3125
24	25	4	10	40	5	1052,4	1307,6	26,31
25	25	4	10	40	5,8	1122,2	1492,4	28,055

Tabulka 10 Výsledky tahové zkoušky 3D Prusa

Výsledky tahové zkoušky jsou k nahlédnutí Tabulka 10. Zde si můžeme všimnout opět ne příliš velkých rozdílů v naměřených výsledcích. U maximální síly se výsledky pohybují okolo a pod hranicí 1000 Newtonů. Výsledky naměřené meze pevnosti tahu se jeví jako poněkud nestálé. Hodnoty mají zdánlivě rostoucí hodnotu. Po zhlédnutí výsledků v tabulce se však jedná o celkem nekonzistentní hodnoty. V každém z měřících intervalů, které byly konkrétně rozděleny do pěti souborů po pěti měřeních, jsou hodnoty, které se ne příliš podobají hodnotám blízkých k nim.

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	22,7	1,7	0%
10s	23,7	1,6	-4%
15s	25,7	1,8	-13%
20s	25,7	2,5	13%
25s	24,9	2,9	-10%

Tabulka 11 Výsledky tahové zkoušky 3D Prusa s průměry



Obr. 59 Výsledky meze pevnosti v tahu a doby leptání acetonu

8.3.2 Zkouška Charpyho kladivem

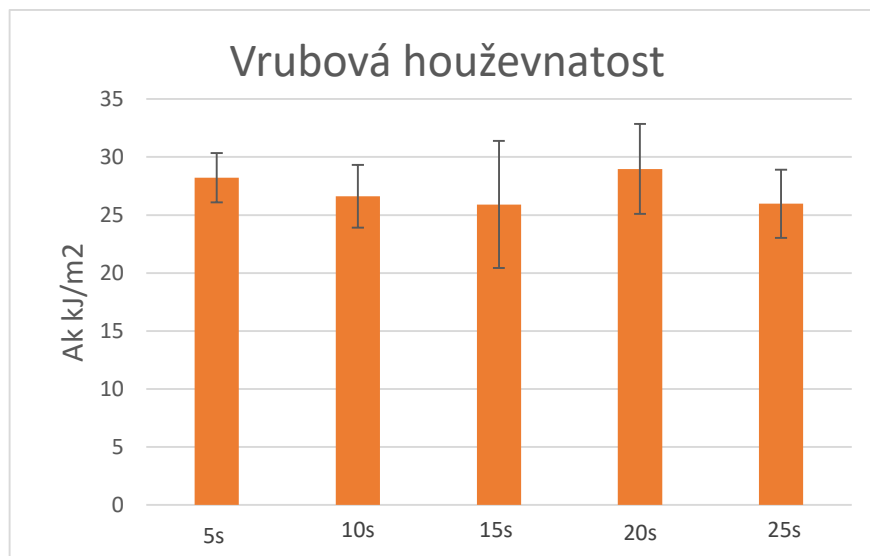
Číslo měření	Čas leptání (s)	J	kJ/m ²
1	5	7,5	29,31
2	5	7,5	29,78
3	5	7,5	24,47
4	5	7,5	30,25
5	5	7,5	27,35
6	10	7,5	23,97
7	10	7,5	24,22
8	10	7,5	26,79
9	10	7,5	31,51
10	10	7,5	26,61
11	15	7,5	34,37
12	15	7,5	20,86
13	15	7,5	24,84
14	15	7,5	29,73
15	15	7,5	19,76
16	20	7,5	34,86
17	20	7,5	32,1
18	20	7,5	24,37
19	20	7,5	27,04
20	20	7,5	26,51
21	25	7,5	24,17
22	25	7,5	30,96
23	25	7,5	22,12
24	25	7,5	26,3
25	25	7,5	26,33

Tabulka 12 Výsledky vrubové houževnatosti

Hodnoty výsledků vrubové houževnatosti potvrdily více méně to, co prvotní zkouška. Výsledky neukázaly žádnou výraznou závislost leptání na testovací dílce.

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	28,2	2,1	0%
10s	26,6	2,7	6%
15s	25,9	5,5	8%
20s	29,0	3,9	-3%
25s	26,0	2,9	8%

Tabulka 13 Průměrné výsledky vrubové houževnatosti



Obr. 60 Vrubová houževnatost

8.3.3 Zkouška mikrotvrdosti

Číslo měření	5s	10s	15s	20s	25s
1	2,346	1,958	2,002	2,065	2,133
2	2,413	1,839	1,964	2,109	2,138
3	2,423	1,956	2,143	2,01	2,141
4	2,312	1,884	2,072	2,143	2,231
5	2,379	1,938	2,224	2,071	2,145
6	2,438	1,871	2,055	2,139	2,192
7	2,349	1,875	2,185	2,15	2,224
8	2,436	1,839	2,19	2,129	2,206
9	2,393	1,799	2,316	1,819	2,333
10	2,388	1,884	2,128	2,071	2,194

Tabulka 14 Výsledky zkoušky mikrotvrdosti- Vtiskového modulu

Hodnoty získané zkouškou mikrotvrdosti nevykazují prvotní známky korelace výsledku působení acetonu na leptaný povrch. Z výsledků byl vytvořen průměr hodnot včetně směrodatné odchylky.

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	2,39	0,04	0%
10s	2,19	0,07	8%
15s	2,13	0,11	11%
20s	2,07	0,11	13%
25s	1,88	0,06	21%

Tabulka 15 Průměry hodnot z vtiskového modulu

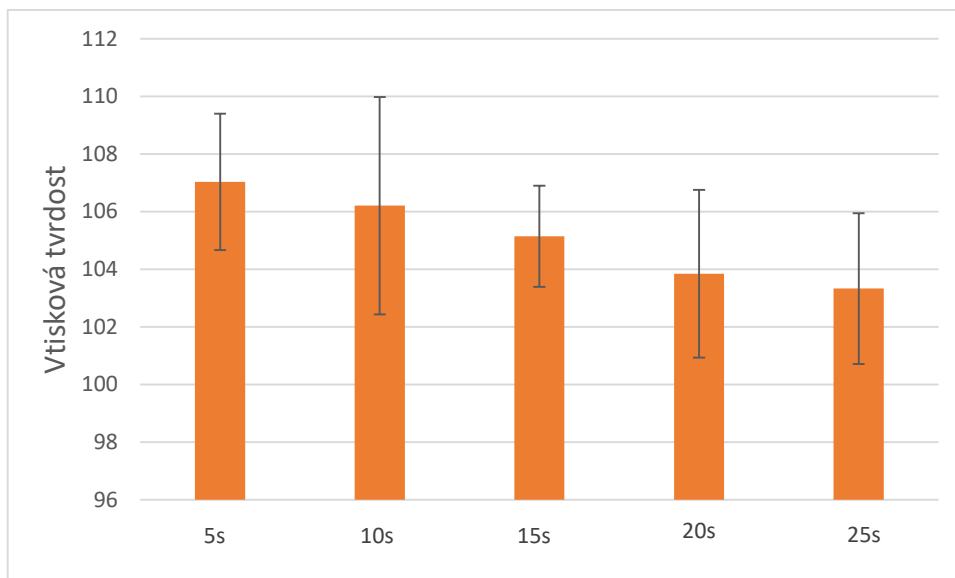
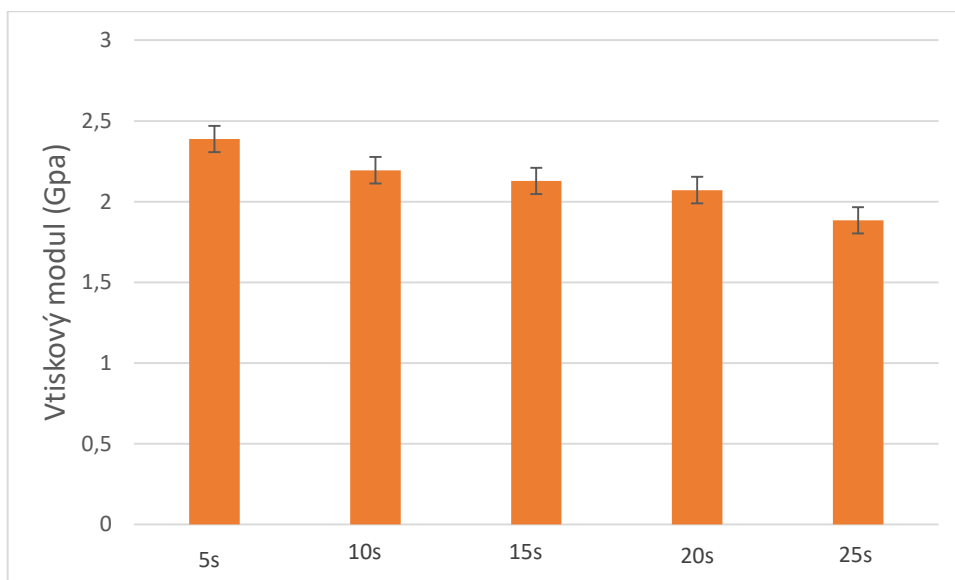
V Tabulka 15 se nachází hodnoty, které jsou zprůměrované a je přidána směrodatná odchylka a rozdíl v procentech, který porovnává hodnotu s první naměřenou hodnotou.

Číslo měření	5s	10s	15s	20s	25s
1	108,046	100,742	102,695	104,685	100,916
2	108,288	102,481	102,851	104,989	100,79
3	104,964	104,801	102,268	105,862	101,986
4	103,148	102,82	109,893	103,293	108,53
5	104,048	103,724	110,581	109,458	101,988
6	108,42	106,685	102,274	104,291	105,835
7	108,153	101,036	109,118	104,44	104,052
8	108,069	107,538	105,75	104,301	102,685
9	110,132	100,104	110,419	104,949	107,817
10	107,03	103,326	106,205	105,141	103,844

Tabulka 16 Výsledky zkoušky mikrotvrdomosti- Vtisková tvrdost

Soubor hodnot	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka průměru	Procentuální rozdíl hodnoty
5s	107,03	2,37	0%
10s	106,21	3,77	1%
15s	105,14	1,76	2%
20s	103,84	2,91	3%
25s	103,33	2,61	3%

Tabulka 17 Průměry hodnot z vtiskové tvrdosti

*Obr. 61 Vtisková tvrdost**Obr. 62 Průměrné hodnoty vtiskového modulu*

Na *Obr. 61* a *62* jsou zobrazeny průměrné hodnoty naměřených výsledků, které vykazují odlišnosti ve srovnání s předchozími měřeními. Struktura dat však není na první pohled z grafu jednoznačně patrná, což může představovat určité výzvy při analýze. Stejně tak chybové úsečky, vyjadřující směrodatnou odchylku průměru, nedokáží jednoznačně určit význam výsledků, ale určité náznaky korelace by se najít mohly.

9 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky mechanického testování byly detailně zkoumány a analyzovány. Data z tahové mechanické zkoušky vzorků vytvořených na stroji Arburg freeformer byla pečlivě zhodnocena. V Tabulce 2 byla pozorována standardizovaná pevnost v tahu, kterou výrobce materiálu ABS stanovil na 30 MPa. Průměrné hodnoty po 5 sekundách dosahovaly 34 MPa s chybou 1,7 MPa, přičemž tato chyba byla největší zaznamenaná chyba tohoto měření. Vzorky získané po 10 sekundách vykazovaly nejvyšší průměrnou hodnotu, tedy téměř 34,5 MPa. Naopak, průměrná hodnota po 15 vteřinách, kdy byly vzorky leptány, měla nejnižší hodnotu z celého souboru výsledků. Další dva intervaly, tedy 20 a 25 sekund, měly hodnoty kolem 33,5 MPa s rozdílem pohybů 2% oproti první naměřené hodnotě. Tento soubor hodnot nevykazoval klesající ani stoupající tendenci, takže nelze potvrdit přímý vliv doby leptání na pevnost v tahu.

U vzorků z 3D tiskárny Prusa lze pozorovat konstantnější výsledky s postupným nárůstem. Nejnižší hodnota, tedy po dobu leptání 5 vteřin, dosáhla 22,7 MPa. Další hodnoty s nárůstem času po 5sekundovém vytahování z mlhy acetonu byly 23,6 MPa, 25,6 MPa, 25,7 MPa a 25 MPa při dobití leptání 25 vteřin s tím, že největší rozdíl hodnot byl zaznamenán mezi 15 a 20 vteřinovými intervaly, kdy rozdíl byl 3%. Chybové úsečky však vykazovaly u nejvyšší doby leptání hodnotu 2,9 MPa. Z toho lze usoudit, že hodnoty by měly mít vzrůstající charakter.

Ve srovnání s výsledky leptání u vzorků zhotovených na 3D tiskárně Prusa byla zaznamenána zásadní změna. Pevnost v tahu byla v některých případech až o 10 MPa nižší než u výrobků ze stroje Arburg. To je významné při porovnání výsledků, protože potvrzuje tvrzení výrobce, že materiál v nastavení 100% plnění je identický s homogenním materiálem. Tento výsledek měření je ovlivněn způsobem nanášení polymeru. U freeformeru jde o nanášení kapiček, kdežto u 3D tiskárny Prusa se jedná o aplikaci vláken. Tyto způsoby výroby ovlivnily i rázovou zkoušku ohybem.

U výsledků zkoušky rázem v ohybu byla zaznamenána podobná nekonzistence jako u tahové zkoušky provedené na freeformeru. Hodnoty vrubové houževnatosti kolísají pod hodnotou 30 kJ/m², s rozdílem chyb v hodnotách dosahujícím až 3,6 kJ/m². V tomto případě nelze úplně vyloučit korelaci mezi výsledky a dobou leptání. Zajímavostí je, že výsledky pro soubor vzorků z tiskárny značky Prusa vykazují velmi podobné hodnoty, tedy pod hranicí 30 kJ/m². Je však třeba poznamenat, že v případě měření po 15 vteřinách leptání je

různorodost výsledků na maximální úrovni, s chybou dosahující až 5,5 kJ/m², tedy s nárůstem o 9%. Celkové hodnocení souboru hodnot zůstává podobné předchozímu, a tudíž nelze úplně vyloučit korelaci mezi výsledky a dobou leptání.

Hodnoty mikrotvrdomosti získané pro výrobky z freeformeru naznačují pozoruhodné výsledky. S jak vtiskovým modulem, tak s vtiskovou tvrdostí, je patrná klesající tendence. Nejvyšší hodnoty vtiskové tvrdosti dosahují 130 MPa a postupně klesají až na 110 MPa po 25 sekundách leptání, tedy o maximálně 17%. Vtiskový modul, odvozený ze směrnice tečny při odtížení, rovněž vykazuje klesající tendenci, s nejvyšší hodnotou po 5 sekundách leptání a nejnižší po 25 sekundách. Z těchto výsledků lze odvodit hypotézu, že s prodlužujícím se časem leptání klesá tvrdost výrobků z freeformeru.

U hodnot získaných pro druhý soubor testovacích vzorků z tiskárny Prusa je na první pohled patrná tak závislost s klesající tendencí, jako u prvního souboru. Hodnoty vtiskové tvrdosti se pohybují mezi 103 až 107 MPa, přičemž hodnoty mají rozdílný potencionální pokles. Konkrétně, mezi 5 a 10 vteřinami působnosti leptadla dochází k poklesu o 1%. Dále je pokles velmi podobný, avšak mezi hodnotami zprůměrovanými po 20 až 25 vteřinách se rozdíl nijak výrazně nezměnil a zůstal 3% oproti prvotní hodnotě. Hodnoty vtiskové tvrdosti jednoznačně vykazují fakt, že dochází k poklesu tvrdosti s dobou působením leptadla, tedy acetonu. S tím, že u vzorků z freeformeru je celkový rozdíl tvrdosti 15% a u vzorků z tiskárny Prusa pouze 3%. Rozdíly jsou také viditelné v hodnotách měření vtiskového modulu. U vzorků z tiskárny Prusa se pohybují pod hranicí 2,5 GPa, zatímco u vzorků z freeformeru byly v prvních případech nad touto hranicí. Po 25 sekundách leptání jsou výsledky s procentuálním poklesem velmi podobné. V prvním případě jde o 21% pokles hodnoty a u Prusy se jedná o 17%. Z výsledků mikrotvrdomosti je tedy stále patrné, že dochází k poklesu a že v případech obou typů výroby jsou vzorky ovlivněny dobou leptání.

Zajímavým poznatkem z testování a pečlivé analýzy lomu materiálu je fakt, že projevuje vlastnosti křehkého lomu, což je neobvyklé pro materiál ABS. Očekávalo by se, že materiál bude vykazovat spíše charakter houževnatého lomu, což by se projevilo prodlužováním materiálu během tahové zkoušky. Křehký lom materiálu je pravděpodobně důsledkem zvláštního procesu výroby na zařízení Arburg freeformer. Při tomto procesu jsou jednotlivé kapičky materiálu aplikovány a spojovány do požadovaného tvaru. Tento postup vytváří materiál s odlišnou mikrostrukturou, která může ovlivnit jeho mechanické vlastnosti a způsob lomu.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zkoumání vlivu leptání na povrch materiálu ABS z hlediska mechanických vlastností. Práce se zabývala jak teoretickým přehledem současných poznatků v oblasti aditivní výroby a technologií 3D tisku, tak praktickým experimentem, který prověřil vliv času leptání acetonem na vlastnosti testovaných vzorků. Během experimentu byly vytisknuty dva druhy vzorků, přičemž jedny byly zhotoveny na inovativním stroji Arburg freeformer.

Arburg freeformer představuje revoluční přístup k aditivní výrobě, kde je možné tvořit 3D výrobky přímo z granulovaného materiálu bez nutnosti formování filamentu. Tento stroj umožňuje vysoce flexibilní a efektivní výrobu díky své schopnosti přesného dávkování a míchání materiálu a následného tvarování, což zajišťuje vysokou kvalitu a přesnost výsledných dílů.

Výsledky mechanických zkoušek ukázaly, že čas leptání má minimální vliv na pevnost v tahu materiálu ABS u vzorků zhotovených na stroji Arburg freeformer. Naopak u vzorků z 3D tiskárny Prusa byla zaznamenána mírná tendence k poklesu pevnosti v tahu s prodlužujícím se časem leptání. Výsledky vrubové houževnatosti ukázaly, že leptání nemělo významný vliv na testované vzorky, s výjimkou menších fluktuací u některých časových intervalů. Zkouška rázem v ohybu neukázala zřejmou korelaci mezi dobou leptání a houževnatostí materiálu.

Výsledky mikrotvrdomosti naznačují, že čas leptání má vliv na tvrdost povrchu materiálu ABS, přičemž delší doba leptání snižuje tvrdost výrobků zhotovených na stroji Arburg freeformer. U vzorků z tiskárny Prusa byla také zaznamenána výrazná závislost mezi časem leptání a tvrdostí povrchu.

Rozmanitost získaných výsledků naznačuje, že vliv leptání na mechanické vlastnosti materiálu ABS může být komplexní a závisí na řadě faktorů, včetně použitého zařízení pro výrobu a konkrétních parametrů procesu. Další výzkum by mohl být zaměřen na detailnější analýzu těchto faktorů a jejich vlivu na vlastnosti materiálu. Rovněž by bylo vhodné provést experimenty s různými typy materiálů a nastavením procesu leptání pro další porozumění této problematiky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] S. Charlon a J. Soulestin, „Thermal and geometry impacts on the structure and mechanical properties of part produced by polymer additive manufacturing", *J Appl Polym Sci*, roč. 137, č. 35, s. 49038, zář. 2020, doi: 10.1002/app.49038.
- [2] P. Eyer, S. Enzler, A. Trauth, a K. A. Weidenmann, „Investigating the Mechanical Properties of Polymer Samples from Different Additive Manufacturing Processes Using Ultrasonic Phase Spectroscopy", *3D Printing and Additive Manufacturing*, s. 3dp.2022.0148, lis. 2022, doi: 10.1089/3dp.2022.0148.
- [3] A. Hirsch, F. Hecker, a E. Moritzer, „Process Parameter Optimization to Improve the Mechanical Properties of Arburg Plastic Freeformed Components", 2019, doi: 10.26153/TSW/17308.
- [4] Y. He, B. Li, Y. Shen, a Z. Wang, „Adhesion improvement of ABS resin by MnO_2 - H_3PO_4 - H_2SO_4 colloid with ultrasound-assisted etching treatment", *Journal of Adhesion Science and Technology*, roč. 36, č. 17, s. 1883–1893, zář. 2022, doi: 10.1080/01694243.2021.1989225.
- [5] R. Tao, L. Fatta, R. Melentiev, A. K. Tevtia, a G. Lubineau, „Contributions of chemical interactions and mechanical interlocking for the adhesion of electroplated copper to ABS in the Cr(VI) etching process", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, roč. 126, s. 103450, srp. 2023, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2023.103450.
- [6] X. Han, G. Wang, J. He, J. Guan, a Y. He, „Influence of temperature on the surface property of ABS resin in KMnO_4 etching solution", *Surf Interface Anal*, roč. 51, č. 2, s. 177–183, úno. 2019, doi: 10.1002/sia.6560.
- [7] E. J. McCullough a V. K. Yadavalli, „Surface modification of fused deposition modeling ABS to enable rapid prototyping of biomedical microdevices", *Journal of Materials Processing Technology*, roč. 213, č. 6, s. 947–954, čer. 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.12.015.
- [8] M. Mu, C.-Y. Ou, J. Wang, a Y. Liu, „Surface modification of prototypes in fused filament fabrication using chemical vapour smoothing", *Additive Manufacturing*, roč. 31, s. 100972, led. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100972.
- [9] A. Gebhardt a J.-S. Hötter, *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich : Cincinnati: Hanser Publishers ; Hanser Publications, 2016.

- [10] Karel Sedláček, „Aditivní technologie na vlně všeobecného zájmu“, Technický týdeník. [Online]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/aditivni-technologie-na-vlne-vseobecneho-zajmu_43045.html
- [11] C. K. Chua a K. F. Leong, *3D printing and additive manufacturing: principles and applications*, Fourth edition of Rapid prototyping. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015.
- [12] <https://www.fs.cvut.cz/>, „FDM- Princip technologie 3D tisku FDM“, CVUT. [Online]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologie-3dtisk/fdm-3dtisk/>
- [13] Miltiadis A. Boboulos, Ph.D, *CAD-CAM & Rapid Prototyping Application Evaluation*, 1st edition., roč. 2014. 2014.
- [14] Nejčtenější strojírenský časopis - MM a spektrum, „Nekonvenční metody obrábění“, MM Průmyslové spektrum. [Online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-10-dil>
- [15] ManufacturingCostEstimation, „LaminatedObjectManufacturing.“ [Online]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/laminated-objectmanufacturing>
- [16] Top Max Technology Magazine, „Types of 3D printer or 3D printing technologies overview.“, TopMaxTech Solutions, Network. [Online]. Dostupné z: <https://en.topmaxtech.net/reviews/2015/12/27/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/279.html>
- [17] dkmp.cz, „Přehled technologií 3D tisku“, dk metal prominent. [Online]. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [18] ManufacturingCostEstimation, „Rapid Prototyping - Stereolithography“, ManufacturingCostEstimation. [Online]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [19] „Classical Thermoset Epoxy Composites for Structural Purposes: Designing, Preparation, Properties and Applications“, in *Materials Research Foundations*, roč. 38, Materials Research Forum LLC, 2018, s. 260–299. doi: 10.21741/9781945291876-9.
- [20] FANUC Czech s.r.o., „Co- jsou- to- termoplasty“, Magazín o průmyslové automatizaci a robotice. [Online]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/>

- [21] P. M. Visakh, S. Thomas, A. K. Chandra, a Aji. P. Mathew, Ed., *Advances in Elastomers I: Blends and Interpenetrating Networks*, roč. 11. in *Advanced Structured Materials*, vol. 11. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-20925-3.
- [22] Code Creator, s.r.o., „Polymery- termoplastické elastomery“, <https://publi.cz/>. [Online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/23.html>
- [23] P. Awasthi a S. S. Banerjee, „Fused deposition modeling of thermoplastic elastomeric materials: Challenges and opportunities“, *Additive Manufacturing*, roč. 46, s. 102177, říj. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102177.
- [24] A. Yadav *et al.*, „Fused filament fabrication: A state-of-the-art review of the technology, materials, properties and defects“, *Int J Interact Des Manuf*, roč. 17, č. 6, s. 2867–2889, pro. 2023, doi: 10.1007/s12008-022-01026-5.
- [25] M. Armstrong, H. Mehrabi, a N. Naveed, „An overview of modern metal additive manufacturing technology“, *Journal of Manufacturing Processes*, roč. 84, s. 1001–1029, pro. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060.
- [26] JAN SEDLÁK, „Metal 3D: V raketové základně u Dobříše se za dotace rozjel 3D tisk z kovu“, <https://www.lupa.cz/>. [Online]. Dostupné z: <https://www.lupa.cz/clanky/metal-3d-v-raketove-zakladne-u-dobrise-se-za-dotace-rozjel-3d-tisk-z-kovu/>
- [27] L. Eisele, A. Heuer, K. A. Weidenmann, a W. V. Liebig, „Can Different Parameter Sets Lead to Equivalent Optima between Geometric Accuracy and Mechanical Properties in Arburg Plastic Freeforming?“, *Polymers*, roč. 15, č. 6, s. 1516, bře. 2023, doi: 10.3390/polym15061516.
- [28] „ARBURG“, <https://www.arburg.com/cs/cz/>. [Online]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/>
- [29] SAM DAVIES, „ARBURG presents updates to Freeformer 3D printing platform“, <https://www.tctmagazine.com/>. [Online]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/arburg-presents-updates-to-freeformer-3d-printing-platform/>
- [30] K. S. Johansson, „Surface Modification of Plastics“, in *Applied Plastics Engineering Handbook*, Elsevier, 2017, s. 443–487. doi: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00020-1.
- [31] R. A. Wolf, *Plastic surface modification: surface treatment and adhesion*. Munich [Germany] ; Cincinnati [Ohio]: Hanser, 2010.

- [32] National Center for Biotechnology Information., „PubChem Compound Summary for CID 180, Acetone“, *PubChem*, úno. 2024, [Online]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Acetone>.
- [33] M. R. Khosravani, J. Schüürmann, F. Berto, a T. Reinicke, „On the Post-Processing of 3D-Printed ABS Parts“, *Polymers*, roč. 13, č. 10, s. 1559, kvě. 2021, doi: 10.3390/polym13101559.
- [34] Jakub Kočí, „Jak vyhladit 3D tisky pomocí chemického vyhlazování“, Prusa Research.
- [35] L. Ptáček, *Nauka o materiálu I.*, 2., opr.Rozš. vyd. Brno: CERM, 2003.
- [36] L. Ptáček, *Nauka o materiálu II.*, 2., opr.Rozš. vyd. Brno: CERM, 2002.
- [37] Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, „Dynamické zkoušky“, UFMI-FT-UTB. [Online]. Dostupné z: https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf
- [38] VĚCHET, S, „Mechanické vlastnosti a charakteristiky materiálů I.“ [Online]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/113525464-Mechanicke-vlastnosti-a-charakteristiky-materialu-i.html>
- [39] J. DUŠEK, „Tvrlost, mikrotvrlost, nanotvrlost - čisté kovy měřené metodou DSI.“ Masarykova univerzita v Brně, 2008.
- [40] ČTVRTLÍK, R, „Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev.“ Univerzita Palackého v Olomouci., 2012.
- [41] BLÁHOVÁ, O, „Nanoindentační měření povrchových vrstev“. Habilitační práce na strojní fakultě Západočeské univerzity v Plzni, 2007.
- [42] OLIVER, W. C., PHARR, G. M., „Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology.“ *Journal of Materials Research*, 2004.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	polylactic acid – kyselina polymléčná
PETG	polyetyléntereftalát
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
SLA	Stereolitografie
DLP	Digital Light Processing
mm	milimetr
Mpa	Megapascal
Gpa	Gigapascal
Rm	Mez pevnosti v tahu
s	sekunda

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stavba domu aditivní technologií [10]	14
Obr. 2 Další příklad využití aditivní technologie [10].....	15
Obr. 3 Princip fungování FDM [12]	16
Obr. 4 Princip fungování LOM [15].....	18
Obr. 5 Princip metody SLS [17]	19
Obr. 6 Princip metody SLA[18]	20
Obr. 7 Příklady termoplastů[20]	21
Obr. 8 Příklady vybraného užití reaktoplastů [12]	21
Obr. 9 Příklady vybraného užití termoplastických elastomerů[22]	22
Obr. 10 Ukázka tvorby z tisku kovových materiálů [26]	24
Obr. 11 Stroj Arburg Freeformer [29]	26
Obr. 12 Detailní pohled do pracovní části [28]	27
Obr. 13 Granulát přiváděný do Freeformeru[28].....	28
Obr. 14 Princip metody freeformeru.....	28
Obr. 15 Více-komponentní zařízení dopravující granulát [28].....	29
Obr. 16 Leptané povrchy ABS [34].....	34
Obr. 17 Jednoduché schéma stroje pro tahovou zkoušku [35]	36
Obr. 18 Křivky napětí a deformace pro polymerní materiály[36]	37
Obr. 19 Charpyho kladivo [38].....	38
Obr. 20(a) Indentační křivka, (b) Časový diagram indentační zkoušky	39
Obr. 21 Průběh zatěžování a odlehčování indentoru: a) zatížení,	40
Obr. 22 Binder FD 53	43
Obr. 23 Náčrt testovacího dílu pro tahovou zkoušku	44
Obr. 24 Prostor pro vložení držáku s testovacími díly.....	46
Obr. 25 Umístění vzorku v nádobě ve 3D prostředí	47
Obr. 26 Návrh konstrukce držáku v aplikaci Inventor.....	47
Obr. 27 Návrh držáku v obou polohách.....	48
Obr. 28 Umístění držáku v pohledu zepředu	49
Obr. 29 Sestava návrhu upevnění testovacích dílců v nádobě.....	50
Obr. 30 Držák ze stavebnice Merkur	51
Obr. 31 Vrchní pohled na držák ze stavebnice Merkur	52
Obr. 32 Aceton.....	53
Obr. 33 Proces leptání většího testovacího dílce	54
Obr. 34 Pracovní prostředí s míchačkou a testovacími díly	55

Obr. 35 Tvrdnutí materiálu po vyjmutí z mlhy.....	56
Obr. 36 Kapky vytvořené v mlze na povrchu držáku a rozleptaná část držáku	57
Obr. 37 Proces relaxace materiálu	57
Obr. 38 Uchovávací pytlíky s odpočinitými materiály	58
Obr. 39 Velké testovací dílce po leptání.....	58
Obr. 40 Tahová zkouška	60
Obr. 41 Průběh tahové zkoušky	61
Obr. 42 Výsledky měření závislosti meze pevnosti v tahu a doby leptání acetonu.....	63
Obr. 43 Křehký lom	63
Obr. 44 ZwickRoell HIT25P	64
Obr. 45 ZwickRoell HIT25P s testovacím tělesem	65
Obr. 46 Vrubová houževnatost	67
Obr. 47 Vtisková tvrdost.....	69
Obr. 48 Vtiskový modul	70
Obr. 49 Měřidlo Micro-Combi Tester	71
Obr. 50 Detail měřidla pro mikrotvrdot	71
Obr. 51 3D tiskárna Prusa i3 MK3	72
Obr. 52 3devo Composter 450.....	73
Obr. 53 Systém extrudéru a zapojení aplikace Devovision	74
Obr. 54 Cívka se strunou a nastavené teploty pásem	75
Obr. 55 Detail ofuku a odtahu struny extrudéru	75
Obr. 56 Závislost tloušťky struny na čase	76
Obr. 57 Přidané magnetky do 3D tisku.....	77
Obr. 58 Tisk vzorků.....	77
Obr. 59 Výsledky meze pevnosti v tahu a doby leptání acetonu.....	80
Obr. 60 Vrubová houževnatost	82
Obr. 61 Vtisková tvrdost.....	84
Obr. 62 Průměrné hodnoty vtiskového modulu.....	84

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Technické informace o acetonu</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 2 Naměřené výsledky pro zkouškou tahem pro arburg freeforming.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 3 Průměrné hodnoty tahové zkoušky</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 4 výsledky měření zkoušky Charpyho kladivem.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 5 Průměrné výsledky vrubové houževnatosti.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 6 Výsledky zkoušky mikortvrlosti- Vtiskový modul</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 7 Průměry hodnot z vtiskového modulu.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 8 Výsledky zkoušky mikortvrlosti- Vtisková tvrdost.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 9 Průměry hodnot z vtiskové tvrdosti.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 10 Výsledky tahové zkoušky 3D Prusa.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabulka 11 Výsledky tahové zkoušky 3D Prusa s průměry</i>	<i>80</i>
<i>Tabulka 12 Výsledky vrubové houževnatosti</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 13 Průměrné výsledky vrubové houževnatosti.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabulka 14 Výsledky zkoušky mikrotvrlosti- Vtiskového modulu</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 15 Průměry hodnot z vtiskového modulu.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 16 Výsledky zkoušky mikrotvrlosti- Vtisková tvrdost.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 17 Průměry hodnot z vtiskové tvrdosti.....</i>	<i>83</i>

