

Pevnostní charakteristiky materiálových struktur polymer-kov

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Radek Tuček

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Electroforming s.r.o.





Zadání bakalářské práce

Pevnostní charakteristiky materiálových struktur polymer-kov

Jméno a příjmení: **Radek Tuček**
Osobní číslo: S18000128
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Návrh experimentální studie a vhodných struktur polymer-kov ve spolupráci s firmou Electroforming s.r.o.
3. Zhotovení polymerní struktur pomocí aditivních technologií.
4. Nanášení povrchové vrstvy kovu na polymerní struktury metodou elektroformování.
5. Analýza pevnostních charakteristik.
6. Zhodnocení dosažených výsledků, jejich diskuse a závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] KRISTOFORY, František, Zdeněk PŘIKRYL, Petr SZELAG a Jaromír VÍTEK. *Elektrochemické povlakování*: 3. díl niklování, mědění, chromování, pokovení méně obvyklých materiálů, závěsy pro galvanotechniku. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0913-3.
- [2] SCHLESINGER, Mordechai a Milan PAUNOVIC. *Modern electroplating*. Hoboken: John Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-16778-6.
- [3] KANANI, Nasser. *Electroplating: basic principles, processes and practice*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004. ISBN 9781856174510.
- [4] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. 3. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1217-7.
- [5] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HEOTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [6] ZHANG, Jing a Yeon-Gil JUNG, eds. *Additive manufacturing: materials, processes, quantifications and applications*. Oxford: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-812155-9.

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
Electroforming s.r.o.

Datum zadání práce:

15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

23. června 2021

Radek Tuček

Název bakalářské práce:

Pevnostní charakteristiky materiálových struktur polymer – kov

Anotace

Bakalářská práce se zabývá návrhem, realizací a studiem pevnostních charakteristik struktur polymer – kov zhotovených aditivními technologiemi Fused Deposition Modeling a Multi Jet Fusion, u kterých bylo pokovení realizováno galvanoplastikou. Pro srovnání technologií přípravy polymerních dílů a jejich následného pokovení byly v dílčí části experimentu tyto zhotoveny také vstřikováním. Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. V teoretické části je charakterizována aditivní výroba a galvanoplastika. Experimentální část popisuje zhotovení polymerních vzorků, jednotlivé kroky před jejich pokovením a následné pokovení. Dále jsou hodnoceny změny mechanických vlastností po nanesení kovové vrstvy na polymerní díly při tahovém a ohybovém namáhání. Pomocí optické mikroskopie, mikrotvrdosti a plošné drsnosti je hodnocena také integrita povrchu struktur polymer – kov před i po klimatickém stárnutí, které bylo realizováno cyklickou teplotně – vlhkostní zkouškou dle standardu PV 1200 koncernu VW.

Klíčová slova: pokovení polymeru, galvanoplastika, polyamid 12, integrita povrchu

Title of bachelor thesis:

Strength characteristics of polymer – metal material structures

Annotation

The bachelor thesis deals with the design, implementation and study of strength characteristics of polymer – metal structures made by additive technologies Fused Deposition Modeling and Multi Jet Fusion, in which the plating was realized by electroplating. In order to compare the technologies of preparation polymer parts and their subsequent plating, they were also made by injection molding in a partial part of the experiment. The bachelor thesis is divided into theoretical and experimental part. The theoretical part characterizes additive production and electroplating. The experimental part describes the preparation of polymer samples, individual steps before the plating and subsequent plating. Furthermore, changes in mechanical properties after the application of a metal layer on polymer parts under tensile and bending stress are evaluated. Using optical microscopy, microhardness and surface roughness, the surface integrity of polymer – metal structures before and after climatic aging is also evaluated, which was carried out by cyclic temperature – humidity test according to the PV 1200 standard of the VW group.

Keywords: plating of polymer, electroplating, polyamid 12, surface integrity

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za odborné vedení a ochotu, která velmi přispěla při zpracování této práce. Velké díky patří společnosti Electroforming s.r.o. v čele s panem doc. Ing. Lukášem Vojtěchem, Ph.D. za možnost realizování této bakalářské práce, poskytnutí informací a také příjemnou spolupráci.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivou a tolik cennou podporu během mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
1 Úvod	12
2 Teoretická část.....	13
2.1 Aditivní výroba – 3D tisk	13
2.1.1 Obecný výrobní proces 3D tisku	14
2.1.2 Rozdělení metod 3D tisku	15
2.1.3 Metoda Fused Deposition Modeling (FDM).....	16
2.1.4 Metoda Multi Jet Fusion (MJF)	18
2.2 Galvanoplastika	20
2.2.1 Princip metody	20
2.2.2 Vnitřní napětí kovové vrstvy a vodíková křehkost	21
2.2.3 Zvodivění povrchu modelu	23
2.2.4 Popis zařízení	23
2.2.5 Aplikace Faradayových zákonů	24
3 Experimentální část	26
3.1 Charakteristika polymerů.....	26
3.2 Aditivní výroba zkušebních těles.....	27
3.2.1 Výroba zkušebních těles technologií FDM.....	28
3.2.2 Výroba zkušebních těles technologií MJF	30
3.3 Výroba zkušebních těles vstřikováním	31
3.4 Příprava zkušebních těles před pokovením.....	32
3.5 Pokovení zkušebních těles	34
3.6 Stanovení tahových vlastností	39
3.7 Stanovení ohybových vlastností	40
3.8 Klimatické zatížení struktur polymer – kov	42
3.9 Stanovení tloušťky kovové vrstvy	45

4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze	49
4.1 Vyhodnocení tahových vlastností	50
4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností	55
4.3 Vyhodnocení vlivu klimatického stárnutí na integritu povrchu polymer – kov	58
4.4 Vyhodnocení tloušťky kovové vrstvy	63
5 Závěr	66
Použitá literatura	69
Seznam příloh	73

Seznam použitých zkratk a symbolů

E_f	modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
G	hmotnost vyloučeného kovu	[g]
I	elektrický proud procházející elektrolytem	[A]
S	plocha pokovovaného předmětu	[cm ²]
Sa	aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	[μ m]
a	tloušťka zkušební tělesa	[mm]
b	šířka zkušební tělesa	[mm]
h	tloušťka vrstvy naneseného kovu	[μ m]
k	elektrochemický ekvivalent pokovovaného kovu	[mg·A ⁻¹ ·s ⁻¹]
r	proudový výtěžek (účinnost)	[%]
t	čas elektrolyzy	[s]
$\varepsilon_{1,2}$	poměrné prodloužení	[%]
ε_{tb}	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ρ	hustota povlakového kovu	[g·cm ⁻³]
$\sigma_{1,2}$	napětí v tahu	[MPa]
$\sigma_{f1,2}$	napětí v ohybu	[MPa]
σ_{fM}	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
σ_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
Cu	měď	
Cu ²⁺	kationt měďnatý	
CuSo ₄	síran měďnatý	

CuSO ₄ x 5H ₂ O	pentahydrát síranu měďnatého
ELF – D1	přísada do pokovovacích lázní (receptura Electroforming s.r.o.)
H ₂ SO ₄	kyselina sírová
Ni	nikl
LA	kyselina mléčná
SiC	karbid křemíku
ABS	akrylonitril–butadien–styren
PA	polyamid
PET	polyethylentereftalát
PET–G	polyethylentereftalát–glykol
PLA	kyselina polymléčná
TPU	termoplastický polyuretan
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
DLP	Digital Light Processing
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
MJF	Multi Jet Fusion
MJP	Multi Jet Printing
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
SHS	Selective Heat Sintering

1 Úvod

Během návrhu nové aplikace konstrukční součásti uplatňující se v technické praxi je potřeba zohlednit dvě kritéria, do určité míry vzájemně se omezující, která mají vliv na její mechanickou odezvu. Těmito kritérii jsou: druh použitého materiálu a geometrie, která je většinou jasně definovaná pro dané použití, zohledňující například zachování určitého poměru tuhosti a hmotnosti součásti. Z těchto důvodů může být při návrhu nové konstrukce obtížné dosáhnout požadovaných mechanických vlastností při zachování požadované geometrie dílu, zvláště pokud je tvarově složitý a má mít nízkou hmotnost.

Aditivní výroba (3D tisk) se jeví jako slibná technika pro rychlou malosériovou výrobu součástí se složitou geometrií a nízkou hmotností. Nicméně tyto technologie mohou nabízet určitou variabilitu ve výsledných hodnotách mechanických vlastností dílů, které jsou dále vystaveny různým podmínkám atmosférického stárnutí, jako jsou UV záření, teplota nebo vlhkost, což může způsobovat u polymerů degradaci jejich molekulové struktury a s ní spojenou ztrátu užitečných vlastností. Možným řešením pro vytvoření struktury, jež by zajistilo požadované mechanické vlastnosti při zachování geometrických parametrů a odpovídající požadavkům kladeným na hmotnosti dílů, je nanesení kovové vrstvy na polymerní součást, která by zlepšila mechanické, případně další užitečné vlastnosti strukturního systému. Technologie galvanoplastiky nabízí přijatelné řešení aplikace kovové vrstvy na základní polymerní materiál. Takováto řešení vyvíjí v současné době např. společnost Electroforming s.r.o., která je zadavatelem a konzultantem této bakalářské práce.

Práce je zaměřena na možné řešení popsaného problému nanesením kovové vrstvy na polymerní díl. V teoretické rešeršní části bude pozornost věnována základním poznatkům o aditivních technologiích a principu galvanoplastiky. V experimentální části budou pomocí aditivních technologií 3D tisku (Fused Deposition Modeling a Multi Jet Fusion) připraveny polymerní vzorky, které budou dále elektrochemicky pokoveny (metodou galvanoplastiky) a podrobeny analýze mechanických vlastností při tahovém a ohybovém namáhání. Hodnocena bude také přílnavost kovové vrstvy k polymerní součásti po vystavení dílu cyklické teplotně vlhkostní zkoušce, která bude realizována dle standardu PV 1200 koncernu VW.

Cílem práce je tedy pevnostní analýza struktur polymer – kov, které budou zhotoveny aditivními technologiemi a galvanoplastikou a najít optimalizované řešení, které povede k automatizaci nanášení kovové vrstvy.

2 Teoretická část

Tato část se věnuje charakteristice výrobních procesů struktury polymer – kov pomocí aditivní technologie 3D tisku a galvanoplastiky. Vzhledem k aplikaci technologií Fused Deposition Modeling (FDM) a Multi Jet Fusion (MJF) pro 3D tisk polymerní součásti je v rámci experimentální studie těmto procesům věnována samostatná kapitola. Hlavními sledovanými parametry pro aplikaci součásti polymer – kov je nízká hmotnost dílu a jeho odpovídající užitné a povrchové vlastnosti.

2.1 Aditivní výroba – 3D tisk

Aditivní výroba představuje termín pro všechny výrobní technologie, které lze charakterizovat tak, že požadovaný tvar a rozměr výrobku je vytvořen skládáním jednotlivých elementů materiálu na sebe. Tímto se aditivní výroba liší od tzv. subtraktivních nebo formativních metod výroby. U subtraktivních metod je výsledné geometrie součásti dosaženo úběrem materiálu od obrobku nástrojem. Mezi tyto metody patří např. soustružení, frézování nebo vrtání. Formativní metody výroby mění tvar součásti definovaným způsobem působením vnějších sil nebo tepla. Mezi tyto metody patří např. kování, ohýbání, vstřikování nebo odlévání. Formativní metody tak nemění objem součásti polotovaru. [1, 2]

Aditivní výroba představuje „rychlejší“ metodu výroby než běžné výrobní procesy. Výroba běžným způsobem se může prodloužit navrhnutím speciálních nástrojů k výrobě, jako jsou například formy pro vstřikování. U konvenčních technologií není nízkosériová výroba příliš ekonomicky výhodná pro svoje vysoké počáteční náklady, spojené se strojem, nástroji a zdoluhavým nastavením procesních parametrů. Oproti tomu k aditivní výrobě je potřeba minimální nastavení parametrů a součást vychází pouze z 3D CAD (Computer Aided System) modelu. Z těchto důvodů se používá pro kusovou, malosériovou výrobu a výrobu prototypů (někdy se také používá termín „rapid prototyping“). [2, 3] Subtraktivní metody mohou při srovnání dosahovat stejného výrobního času součásti, ale u složitých dílů s komplikovanou geometrií se může tento čas výrazně navýšit. V některých případech není ani možné součást se složitou geometrií konvenční technologií vyrobit. U aditivních technologií je to možné díky tomu, že se jednotlivé tenké vrstvy materiálu nanášejí přímo na sebe. Pomocí aditivních metod lze vyrábět díly z kovů, plastů, kompozitů apod. Dokonce je možné vytvářet součásti z více druhů materiálů. [1, 2]

I přes svoje nesporné výhody nemůže aditivní výroba nahradit konvenční způsoby výroby součásti v každé aplikaci. Nehodí se například pro výrobu velkých součástí, kdy je potřeba

k vytvoření jednotlivé vrstvy více času a také materiálu, který má v současnosti vysokou cenu. Součásti vyrobené aditivní technologií nedosahují ani takových přesností a kvality povrchu, jako při obrábění. Pro velkoobjemovou výrobu se stále upřednostňují formativní technologie (např. odlévání a vstřikování), kde se vysoké počáteční investice navrátí v podobě vysokého počtu vyrobených dílů. [1, 2]

Aditivní výroba je automatizovaný proces, který spočívá ve dvou hlavních podprocesech: samotném vytvoření jednotlivé vrstvy a poté jejím spojení s dalšími vrstvami do výsledného tvaru. Vychází tak ze skutečnosti, že je teoreticky možné jakýkoli předmět virtuálně rozřezat na jednotlivé vrstvy a pomocí nich sestavit objekt bez zřetele na jeho geometrii. [1]

2.1.1 Obecný výrobní proces 3D tisku

Pro vytisknutí součásti je potřeba její 3D virtuální model, pomocí něhož dojde k vytvoření reálné součásti. K vytvoření reálného dílu z virtuálního 3D modelu, lze použít mnoha způsobů, které probíhají v několika krocích. Ty lze popsat následujícím způsobem: [1, 2]

a) Tvorba CAD modelu

Téměř všechna geometrie součástí musí vycházet ze softwarového modelu. Po generaci virtuálního 3D modelu lze využít libovolný CAD modelový software nebo fotogrammetrii, která spočívá ve vyfotografování skutečného objektu a jeho následné transformaci do digitální podoby. [2, 4]

b) Převod CAD modelu do formátu STL

Jakmile je model součásti dokončen, převede se do podporovaného formátu. Každý stroj používaný pro aditivní výrobu používá formát souboru STL, který se stal v dnešní době standardem pro aditivní technologie. Tento formát lze exportovat z každého CAD systému. Podstatou pro výpočet řezů (viz bod c) je právě formát STL, který popisuje uzavřené povrchy vygenerovaného 3D modelu.

c) Rozdělení modelu na vrstvy

V dalším kroku se zvolí poloha a orientace součásti v prostoru, kterou ovlivňuje více parametrů včetně výrobního procesu, přesnosti a pevnosti součásti. Specializovaný software následně rozčlení model pro potřeby tisku na velmi tenké vrstvy v rovině xy. Jednotlivé vrstvy se potom vrství na sebe ve směru osy z. V tomto programu jsou také generovány podpory pro převisy modelů, možnosti výplně, ale také tloušťka jednotlivých vrstev.

d) Výroba 3D modelu a jeho úprava

Samotná výroba probíhá sestavením vrstev na již vytvořené vrstvy. Po nanesení všech vrstev se díl ze stroje vyjme. Pokud byly během 3D tisku použity podpory, tak se odstraní. Jako poslední krok je možné provést čištění, případně povrchovou úpravu dílů, jako je např. broušení, leštění, lakování nebo barvení. [1, 2]

2.1.2 Rozdělení metod 3D tisku

Existuje řada technologií pro nanesení jednotlivých vrstev. Ty se mohou dělit podle způsobu nanesené vrstvy, principu výrobního procesu, druhu nebo podoby materiálu:

Polymery na tekuté bázi

Principem těchto metod je přeměna kapalné fáze materiálu na pevnou vytvrzováním fotopolymerů (pryskyřic). Díly zhotovené pomocí těchto metod mají relativně nízkou pevnost, ale vysokou rozměrovou přesnost. Mezi tyto metody patří stereolitografie (SLA), digitální zpracování světla (DLP – Digital Light Processing) a technologie Polyjet. [1, 2]

Polymery na práškové bázi

Pomocí těchto metod dochází k tavení části materiálu ve formě jemného prášku, který se poté ochladí a následně ztuhne. Takto jsou vytvořené všechny vrstvy součásti. Podle způsobu tavení a spékání práškového polymeru se jedná o metody selektivního laserového sintrování (SLS – Selective Laser Sintering) a selektivního tepelného sintrování (SHS – Selective Heat Sintering). Metoda SLS využívá laserového paprsku a metoda SHS topného tělesa. Mezi aditivní technologie, které využívají polymery na bázi prášku, patří také technologie tryskání pojiva (MJP – Multi Jet Printing), kde je práškový materiál s pojivem vytvrzován pomocí UV světla, nebo technologie Multi Jet Fusion (MJF), kde je prášek taven pomocí infračerveného světla (viz kap. 2.1.4). Výrobní procesy jsou relativně pomalé, přesto se často využívají pro svoji vysokou přesnost a kvalitu povrchu. [5, 6]

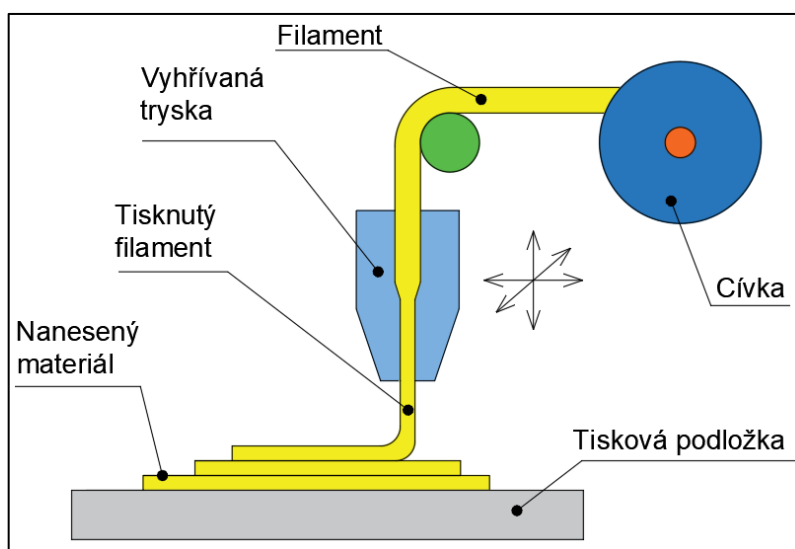
Pevné polymery

Výrobní procesy 3D tisku používající pevné polymery využívají k jeho tavení zahřívanou trysku. Materiál, který se používá pro výrobu součásti je ve formě struny (filamentu). Po vytlačení materiálu z trysky dojde k jeho nanesení na předchozí vrstvu, ochlazení a následnému ztuhnutí. Pro tisk složitějších součástí se navíc musí použít podpurný materiál. Tento výrobní proces je označován jako FFF/FDM technologie (Fused Filament Fabrication/Fused Deposition Modeling). Obě tyto zkratky znamenají téměř to stejné, pouze s tím rozdílem, že FDM je

registrovaná ochranná značka společnosti Stratays, tudíž ji ostatní výrobci FDM tiskáren nesmějí používat. [5, 7]

2.1.3 Metoda Fused Deposition Modeling (FDM)

Proces Fused deposition modeling patří v dnešní době mezi nejpoužívanější metody 3D tisku na světě. [8] Během této metody se materiál v podobě struny (filamentu), který je navinut na cívce, přivádí do vyhřívané trysky, kde se roztaví (viz obr. 1). Následně je materiál vytlačen na vyhřívanou tiskovou podložku nebo na předchozí vrstvu, se kterou se spojí. Tryska se pohybuje v rovině xy a nanáší materiál podle geometrie aktuální vrstvy. Jakmile je vrstva hotova, tryska se zvedne ve směru osy z o hodnotu tloušťky vrstvy a začne s vytlačováním další vrstvy, případně se vertikálně pohybuje tisková podložka. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,127 mm do 0,33 mm, záleží na použitém materiálu a typu 3D tiskárny. Takto se vytvoří celá součást z předchozího CAD modelu (již bylo vysvětleno v kap. 2.1.1). V závislosti na geometrii tištěného dílu mohou být vytištěny i vertikální podpory, které zabrání zhroucení dílu v průběhu tisku. Tyto podpory je nutné po vytištění odstranit buď mechanicky nebo rozpuštěním v lázni. [1, 9, 10] Technologie FDM představuje nízkou investici jak do 3D tiskárny, tak materiálů samotných. Díky své rozměrové přesnosti a vysoké pevnosti je typickou oblastí pro použití této metody testování prototypů, kde na základě jejich testování dochází k vyhodnocení tvarového a funkčního řešení. Ve velké míře se tedy využívá například v designu, tvorbě přípravků apod. Mezi nevýhody patří poměrně dlouhá doba tisku u tvarově složitých a velkých modelů. [10, 11]



Obr.1 Schéma principu metody FDM [12]

V technické praxi existuje celá řada materiálů, které se používají pro 3D tisk technologií FDM. Každý má své užité vlastnosti, vzhled, povrch a cenu. Mezi nejpoužívanější patří akrylonitril–butadien–styren (ABS), kyselina polyléčná (PLA) a polyethylentereftalát–glykol (PET–G). [13]

Akrylonitril–butadien–styren (ABS) je amorfní termoplast, který je vytvořen kopolymerací akrylonitrilu, styrenu a butadienu. Každý z těchto monomerů udává tomuto termoplastu specifické vlastnosti. K navýšení chemické odolnosti a tepelných vlastností se využívá akrylonitrilová složka, pro větší houževnatost a pevnost butadienová složka a styren zaručuje tuhost a zpracovatelnost. ABS se vyznačuje odolností proti mechanickému poškození, tuhostí, houževnatostí a malou nasákavostí. Díky těmto vlastnostem se používá v aplikacích jako jsou různé automobilové kryty, domácí spotřebiče, trubky, díly v elektrotechnice apod. [14] Je také zdravotně nezávadný, proto se může použít jako náhrada kloubů. Poměrně dobře odolává kyselinám, olejům a dalším chemikáliím. Pro jeho mechanické vlastnosti se používá v technologiích FDM a SLA. [14, 15] Mezi jeho nevýhody patří unikání zápachu při jeho zahřívání během 3D tisku a pokud je vystavený po delší dobu slunečnímu záření, dochází k jeho fotodegradaci. [7]

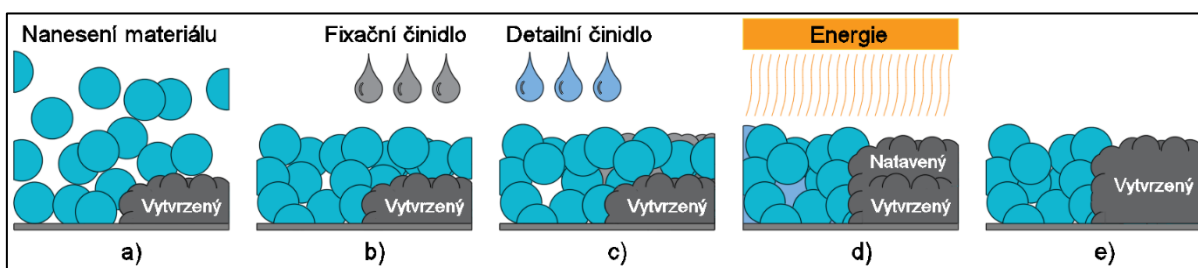
Kyselina polyléčná (PLA) je spolu s ABS nejvyužívanějším polymerem pro 3D tisk a představuje nejuniverzálnější materiál pro technologii FDM. [7] Jedná se o termoplastický polyester, který je biologicky odbouratelný, jelikož je vyráběn polymerací kyseliny mléčné (LA), která je získávána fermentací bramborového nebo kukuřičného škrobu, cukrové třtiny a další biomasy. Kyselina polyléčná je nejpoužívanější biodegradovatelný polymer a používá se jako náhrada polymerů na bázi ropy při výrobě obalových folií, nádob, potravinářských výrobků a dalších součástí s krátkou trvanlivostí. [16] Vyniká velmi dobrou pevností, avšak mezi její nevýhody patří pohlcování vzdušné vlhkosti a nízká tepelná odolnost a křehkost. [13]

Polyethylentereftalát–glykol (PET–G) je termoplastický polyester vyznačující se dobrou tvrdostí, rázovou a chemickou odolností, průhledností a tažností. Vychází z polyethylentereftalátu (PET), který představuje 18% celosvětové produkce polymerů na světě. Používá se hlavně pro výrobu plastových lahví a obalů. [17] Písmeno „G“ v názvu označuje „glykol“ přidaný během chemické syntézy (polykondenzace), který modifikuje vlastnosti PET. Přibližuje tak tento materiál blíže k požadovaným vlastnostem pro 3D tisk, kterými jsou nižší teplota tání a menší míra krystalizace. [18] Glykol také snižuje viskozitu, díky tomu je polymer více „tekutější“, což mnohonásobně zlepšuje jak proces tisku, tak i jeho

rychlost. Po modifikaci je polymer méně křehký a snáze se používá než PET. Polyethyltereftalát–glykol má podobné vlastnosti jako ABS (odolnost vyšším teplotám, trvanlivost) a PLA, který se snadno tiskne. Může se použít pro výrobu funkčních prototypů a dílů, které jsou mechanicky namáhané, jako jsou ochranné kryty nebo pro součásti, které jsou vystaveny velkým povětrnostním vlivům. [7, 13, 18]

2.1.4 Metoda Multi Jet Fusion (MJF)

Multi Jet Fusion je aditivní technologie vycházející z technologie SLS, která ovšem namísto laseru využívá k zahřívání a natavení práškového materiálu infračervenou lampu. Tato technologie je patentem společnosti Hewlett Packard (HP) Inc. [19, 20] Výrobní proces je schematicky znázorněn na obr. 2. Nejdříve se materiál nanese na celou tiskovou plochu, případně na předchozí vrstvu, kde se dále zahřeje na teplotu blízkou teplotě tání (viz obr. 2a). Poté tisková hlava, která se pohybuje nad tiskovou plochou, přesně aplikuje fixační činidlo (tzv. pojivo) ve formě drobných kapiček na místa, kde má dojít ke spojení částic prášku. Tím se definuje geometrie dílu (viz obr. 2b). Zároveň tisková hlava nanáší po obvodu kontur tzv. detailní činidlo k tvorbě hladkého povrchu a jemných povrchových detailů budoucího dílu (viz obr. 2c). Následně je celý povrch vystaven energii v podobě záření světla vysoce účinné infračervené lampy (viz obr. 2d), kdy dochází k interakci mezi činidly a materiálem a dojde tím ke spojení částic materiálu (viz obr. 2e). Tisková plocha se posune o hodnotu jedné vrstvy níž, a takto se proces opakuje do doby, dokud není vytisknut celý díl. Přebytný prášek, který nebyl použitý pro tvorbu dílu, lze po vychladnutí výtisků opět použít. Takto lze využít až 80 – 85 % prášku. [20, 21] Technologie MJF je schopna vyrobit díly s vysokou kvalitou, rychlostí a přesností rozměrů jako žádná jiná současná technologie 3D tisku. Oproti technologiím SLS a FDM má být MJF desetkrát rychlejší a o polovinu levnější. Díly zhotovené touto metodou (viz příklady na obr. 3) jsou takřka izotropní (mechanické vlastnosti mají stejné ve všech směrech) a jejich poloha při tisku nemá téměř žádný vliv na výsledné mechanické vlastnosti. [22, 23]



Obr. 2 Schéma principu technologie Multi jet fusion [21]



Obr. 3 Příklady využití technologie Multi Jet Fusion [24]

Nejvíce používanými materiály metodou MJF jsou polyamid 12 (PA12) a termoplastický polyuretan (TPU). [20]

Polyamid 12 (PA 12) je semikrystalický termoplast vyznačující se vysokou houževnatostí a dobrou chemickou odolností se sníženou korozí za napětí. Vzniká polykondenzací ω – aminolaurikové kyseliny nebo polymerací monomerů laurilaktamu. PA 12 má výborné mechanické vlastnosti, převážně pevnost v tahu a tuhost. Díky dlouhé uhlíkaté části monomeru dosahuje výsledný polymer menší hustoty aminových skupin. Oproti jiným komerčním polyamidům tak má nejnižší nasákavost a strukturou se blíží polyolefinům. Menší hustota polárních vazeb také způsobuje nižší počet vodíkových můstků mezi makromolekulami, což se projevuje nejnižší teplotou tání mezi běžnými polyamidy, která činí přibližně 179 °C. [25, 26] Vedle toho PA 12 vykazuje také vysokou odolnost proti nárazům, rozměrovou a tvarovou stálost. Uplatnění nachází v automobilovém průmyslu, při výrobě součástek pro elektrotechniku a také vzhledem k dobré odolnosti vůči organickým kapalinám při výrobě trubek. [26, 27]

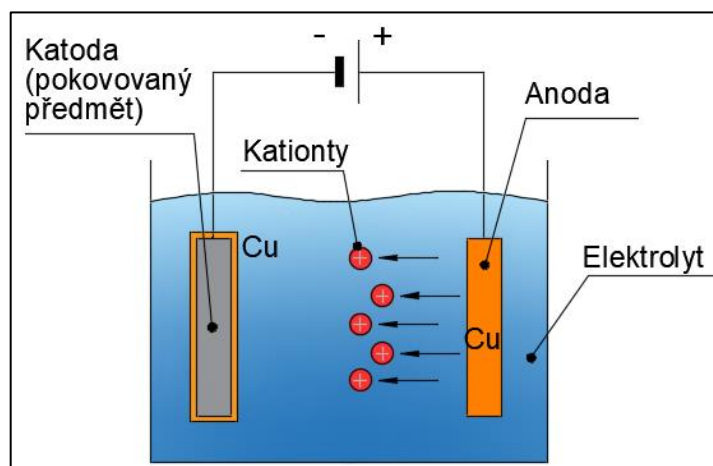
Termoplastický polyuretan (TPU) je polymer, který je připravován kopolymerací. Jeho struktura je tvořena z tvrdých aromatických nebo alifatických segmentů a měkkých polyesterových nebo polyetherových segmentů, které tvoří pružnou matici. Tvrdé segmenty fyzikálně zesilují a vyztužují polymer. Jedná se o vysoce houževnatý materiál, který tlumí rázy a spojuje stálou elasticitu s dobrou odolností vůči opotřebení a otěru, čímž se stává vhodným materiálem pro výrobu dílů vyžadující dobrou nárazuvzdornost a pryži podobnou elasticitu za působení různých teplot. [28, 29]

2.2 Galvanoplastika

Galvanoplastika představuje technologii, která umožňuje nanést vrstvu kovu na jádro, které nemusí být pouze z polymeru. Pomocí jiných strojírenských technologií by to bylo velmi náročné nebo nemožné. Zkombinovat tak lze více materiálů nebo jeden materiál s různými fyzikálními nebo mechanickými vlastnostmi a ovlivnit výsledné vlastnosti výrobku. [30]

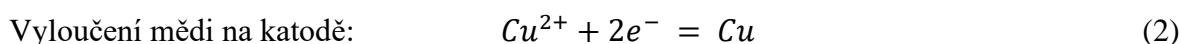
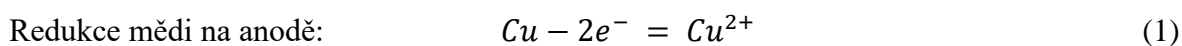
2.2.1 Princip metody

Metoda využívá principu elektrolýzy při průchodu stejnosměrného proudu (viz obr. 4). Předmět, který se pokovuje, je ponořený v elektrolytu a funguje jako záporná elektroda (katoda). Druhou kladně polarizovanou elektrodu (anodu) představuje kov, kterým je pokovován požadovaný předmět. Díky průchodu stejnosměrného proudu dochází k redukci záporných iontů na katodě z roztoku a jejich pokles doplňuje anoda svým rozpouštěním. [31]



Obr. 4 Princip galvanického pokovování [31]

Například při rozpouštění měděné anody v roztoku síranu měďnatého dochází k přechodu mědi z anody do roztoku a k jejímu vyloučení na katodě, kterou je pokovovaný předmět. Reakci mědi při elektrolýze lze popsat rovnicemi (1) a (2) [31]:



Galvanoplastika principiálně funguje podobně jako galvanické pokovování, ale liší se od sebe tloušťkou nanesené vrstvy, která u galvanického pokovení činí řádově mikrometry, kdežto u galvanoplastiky se pohybuje obvykle v rozmezí desetin až jednotek milimetrů. [32]

Zatímco u povrchových úprav je pro určení vlastností povrchu dílu cílem jeho vzhled a korozní odolnost, u galvanoplastiky to jsou tvrdost, tažnost a nízké vnitřní napětí nanesené vrstvy. [32]

Mezi technologické parametry galvanoplastiky patří: složení a koncentrace lázně, proudová hustota, délka pracovního cyklu a teplota. Výběr materiálu je založený na aplikačních požadavcích.

Oproti konvenčním technologiím výroby struktur polymer – kov nabízí tato technologie řadu výhod. Patří mezi ně zejména:

- výroba složitých tvarových dílů při jedné operaci – pro výrobu takových tvarů by jinak bylo potřeba více výrobních operací jako je lisování, obrábění, vrtání apod,
- velký rozměrový rozsah zhotovených dílů – velikost určuje pouze velikost pokovovací lázně,
- výroba tenkostěnných součástí,
- vysoká rozměrová přesnost,
- hromadná výroba – během výrobního procesu lze zároveň pokovovat více součástí,
- malý dopad na životní prostředí – lázně pro pokovení lze opakovaně použít. [32, 33]

Nevýhody spojené s galvanoplastikou se mohou částečně eliminovat správnou volbou technologických podmínek. Mezi tyto nevýhody patří nanesení nerovnoměrné tloušťky kovové vrstvy, která je způsobena rozložením katodické proudové hustoty na jednotlivých místech pokovovaného dílu. V rozích nebo okrajích se totiž může deponovat více materiálu, proto se může využít maskování, aby se nárůst kovu zpomalil. Naopak pro prohlubně, záhyby apod. se využívá pomocných anod, a to z důvodu zvýšení pokovení v těchto místech. Galvanoplastika je kvůli oxidaci, křehkosti a vnitřnímu napětí vhodná pouze pro určité materiály. Z těchto důvodů se nejvíce používají měď a nikl. [32, 33]. Protože je vnitřní napětí významným faktorem určující kvalitu vyloučené vrstvy, je mu věnována samostatně následující kapitola 2.2.2.

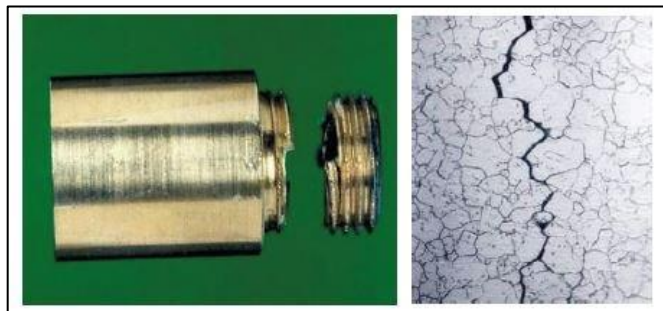
2.2.2 Vnitřní napětí kovové vrstvy a vodíková křehkost

Během galvanoplastiky je věnována pozornost velikosti vnitřního napětí v nanesené vrstvě kovu. Jestliže jeho hodnota překročí mez pevnosti nanesené vrstvy, může to podnítit její praskání, deformaci nebo odlupování od součásti. Mezi faktory ovlivňující velikost vnitřního napětí patří teplota, proudová hustota, složení lázně, nebo přídavná činidla a nečistoty. [32]

Vnitřní napětí jsou způsobena deformací krystalické mřížky a mřížkových poruch vyloučeného kovu. Podle působení ve výšce vrstvy se dají dělit na:

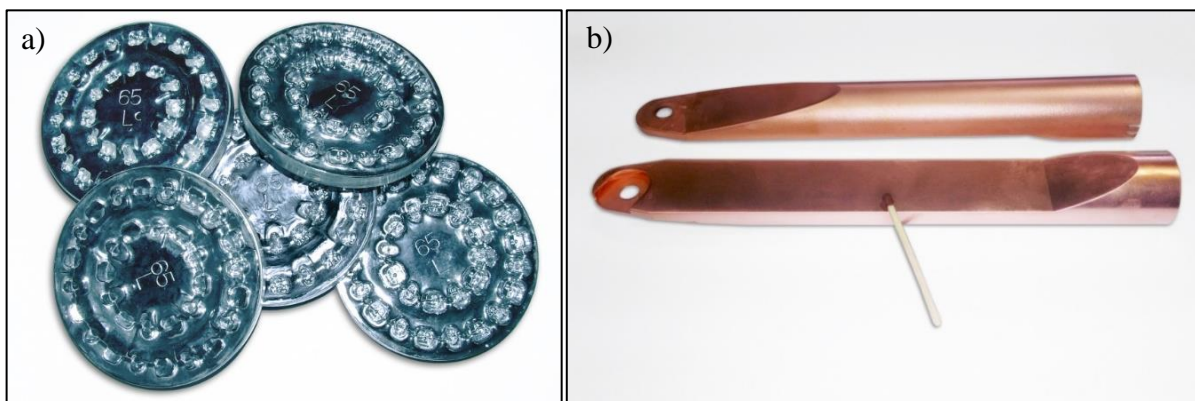
- Makronapětí (označována jako napětí 1. druhu).
Makronapětí se nachází se v celém objemu vrstvy nebo v části, kde se nachází více počet zrn. Dochází k nim vlivem cizích částic, které rostou převážně na hranicích zrn, kde jsou naakumulované dislokace. Pokud v kovové vrstvě převládají tahová napětí, tak dochází ke zvýšení odolnosti proti opotřebení, pokud tlaková, tak ke zvýšení pevnosti v tahu. [32, 34]
- Mikronapětí (označována jako napětí 2. a 3. druhu).
Mikronapětí 2. druhu se nachází v oblasti krystalitů a zrn tam, kde se na jejich hranicích objevují stavební chyby nebo různé cizí vměstky. Napětí 3. druhu působí v oblastech obsahujících několik atomových vzdáleností. Dochází k němu vlivem vakancí, dislokacemi nebo cizími atomy, například vodíkem. Mikronapětí ovlivňuje tvrdost vyloučených vrstev. Čím je napětí vyšší, tím roste i tvrdost materiálu. [32, 34]

Vnitřní napětí může být způsobeno vodíkem, který se vylučuje zároveň s většinou kovů. Kvůli svému nízkému atomovému číslu může lehce difundovat vyloučenou vrstvou a dostat se až do základního materiálu. To může podnítit jeho praskání a negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti, především pevnost. Tento jev je nežádoucí především u ocelí, kde způsobuje „vodíkovou křehkost“ (viz obr. 5). Vodíkové křehnutí se používá pro obecný popis větší škály poruch, které mají jako zdroj vodík. Pro vypuzení vodíku z materiálu a eliminaci vodíkové křehkosti, je potřeba součást ohřát. Podstatným problémem je i plyný vodík, který se tvoří rekombinací atomárního vodíku, jestliže je na fázovém rozhraní katoda – elektrolyt vylučovaný vodík. Vlivem vysokého povrchového napětí se plyný vodík v podobě bublinky z povrchu katody neuvolní a tím pádem znemožňuje růst krystalu a samotné bublinky jsou obrůstány kovem. Vytváří se tak defekt, který je označován jako „vodíkový pitting“. Pro jeho eliminaci se do galvanických lázní přidávají ionogenní nebo neionogenní smáčedla. [34, 35]



Obr. 5 Příklady projevu vodíkové křehkosti v napadeném materiálu [34]

Příklady použití galvanoplastiky jsou uvedeny na obr. 6.



Obr.6 Příklady použití galvanoplastiky [30]

a) vložky forem Ni/Cu pro výrobu zubních náhrad, b) Cu bezešvé krytky pro mikroskopy

2.2.3 Zvodivění povrchu modelu

V případě elektricky vodivých materiálů jako je hliník, mosaz, korozivzdorné oceli a další není potřeba zvodivění povrchu. Naopak polymery, které nejsou elektricky vodivé, je nutné před pokovením upravit.

Zvodivění se může realizovat více způsoby. Nejjednodušší možností je po vyčištění povrchu nanést nástřikem nebo natřením vodivý lak. Aby došlo k předejití nedostatečnému styku a tím nedostatečnému spojení s kovem, musí lak přilnout k povrchu. To se může provést tzv. aktivací, kdy na se povrch součásti nanese aktivační činidlo.

Další možností, jak zvodivět povrch modelu, je aplikace jemného grafitového, popřípadě bronzového prášku či laku. Aby se nanesená vrstva nepoškodila a tím i výsledný povrch modelu, je potřeba s ním zacházet obezřetně. [32]

2.2.4 Popis zařízení

Vybavení, které se používá pro galvanoplastiku, zahrnuje anody, elektrolyt, elektrolyzér (vanu), regulovatelný zdroj stejnosměrného elektrického proudu, filtrační aparát, topná tělesa a míchadlo. Ke zkvalitnění mechanických vlastností součásti je potřeba, aby se elektrolyt promíchal. [36]

Anody mají tvar různých tělísek, která jsou zpravidla umístěna v titanových koších s oky. Během galvanoplastiky dochází k postupnému rozpouštění anod, proto jsou průběžně doplňovány tak, aby jejich plocha zůstala konstantní. Nejčastěji používanými materiály jsou v dnešní době měď a nikl. [32]

Charakteristickými vlastnostmi pro měď jsou vysoká tepelná a elektrická vodivost, odolnost proti atmosférické korozi a dobrá mechanická zpracovatelnost. K mědění se využívají alkalické kyanidové lázně nebo kyselé lázně. Ty mají výhody oproti kyanidovým, že nejsou jedovaté, mají jednoduché složení, snadno se udržují atd. Nositel kovu je síran měďnatý (CuSO_4). [37, 38]

Nikl dovoluje aplikaci i na tvarově složité součásti, kde jsou nanesené vrstvy více rovnoměrné, než kdyby byla použita měď. Vyznačuje se vysokou ořezuvzdorností a tvrdostí. Je vhodný pro zdravotnický a potravinářský průmysl, jelikož jeho povrch není toxický. Niklování probíhá zpravidla ve fluoroboritanových nebo sulfátových lázních. [37, 38]

2.2.5 Aplikace Faradayových zákonů

Pro výpočet hmotnosti vyloučeného kovu, resp. proudového výtěžku a tloušťky nanesené vrstvy, se vychází ze dvou Faradayových zákonů elektrolýzy:

a) hmotnost látky vyloučené na elektrodě je přímo úměrná množství elektrického proudu, který prošel elektrolytem,

b) hmotnosti různých látek vyloučených při elektrolýze na elektrodě stejným elektrickým nábojem jsou přímo úměrné jejich chemickým ekvivalentům.

Oba zákony lze vyjádřit matematicky rovnicí (3):

$$G = k \cdot I \cdot t \cdot r \quad (3)$$

kde značí: G – hmotnost vyloučeného kovu [g],

I – elektrický proud procházející elektrolytem [A],

r – proudový výtěžek (účinnost) [%],

k – elektrochemický ekvivalent povlakového kovu [$\text{mg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],

t – čas elektrolýzy [s].

Pro praxi lze z těchto zákonů vypočítat dobu galvanického pokovení (t) a tloušťku naneseného kovu (h) dle rovnic (4) a (5) [36]:

$$h = \frac{I \cdot t \cdot k \cdot r}{10 \cdot S \cdot \rho} \quad (4)$$

$$t = \frac{10 \cdot h \cdot S \cdot \rho}{I \cdot k \cdot r} \quad (5)$$

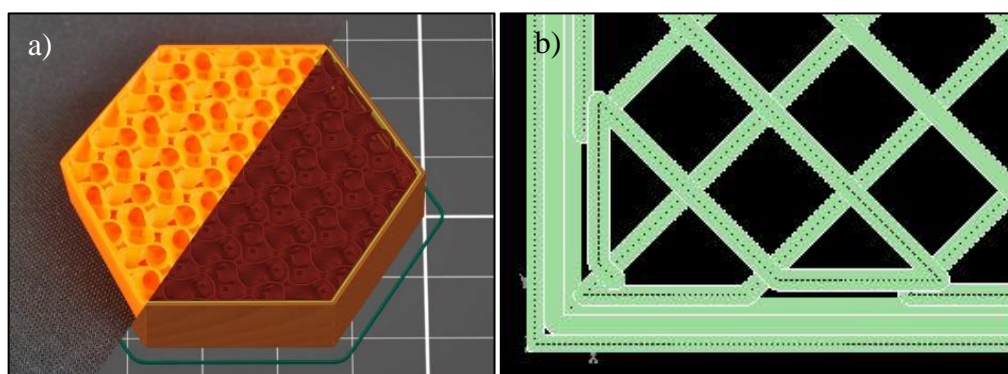
kde značí: h – tloušťka vrstvy naneseného kovu [μm],
 S – plochu pokovovaného předmětu [cm^2],
 ρ – hustotu povlakového kovu [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$].

3 Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá návrhem, realizací a následným studiem pevnostních charakteristik struktur polymer – kov vytvořených pomocí aditivních technologií a pokovením pomocí galvanoplastiky. Vzhledem k vytyčeným cílům práce bylo potřeba najít optimální řešení pro aktivaci povrchu polymeru, jeho zvodivění a následně vyvinout opakovatelný postup pro aplikaci kovu na polymerní součást. Takto připravené vzorky se podrobily mechanickým zkouškám za účelem posouzení změn mechanických vlastností dílu po nanesení kovové vrstvy. Proveden byl také klimatický test, během kterého byla struktura polymer – kov vystavena cyklickému působení vysoké a nízké teploty i vlhkosti dle PV 1200. Zároveň byla před tímto testem, v průběhu testu a po něm sledována integrita povrchu pomocí optické mikroskopie, měřením plošné drsnosti a tvrdosti kovové vrstvy.

3.1 Charakteristika polymerů

Pro experimentální výzkum bylo použito několik dílů z polymerních materiálů zhotovených aditivními technologiemi 3D tisku. Jednalo se celkem o tři materiály. První z nich byl PET-G pro výrobu dílů technologií FDM s použitím filamentu o průměru $(1,75 \pm 0,02)$ mm od společnosti Prusa Polymers a.s. Vzorky z tohoto materiálu byly vytisknuty s 5 % a s 50 % gyroidní výplní (viz obr. 7a) a plnou strukturou. Gyroidní výplň byla zvolena pro svoji schopnost rozložit napětí do všech směrů a krátkou dobou tisku. [39] Další vybraný materiál byl ABS, který byl opět použit pro tisk metodou FDM, ovšem na tiskárně Fortus 450mc od společnosti Stratasys. Vzorky byly vytvořeny s odlehčenou a plnou strukturou. Odlehčená struktura byla vybrána „sparse – double dense“ (viz obr. 7b), která minimalizuje množství použitého materiálu, ale pro zvýšení pevnosti využívá rastrový vzor šrafování. Třetí z materiálů byl PA 12, který byl použit pro výrobu vzorků metodou Multi Jet Fusion. Typické užité vlastnosti polymerů použitých v experimentální studii jsou uvedeny v tab. 1.



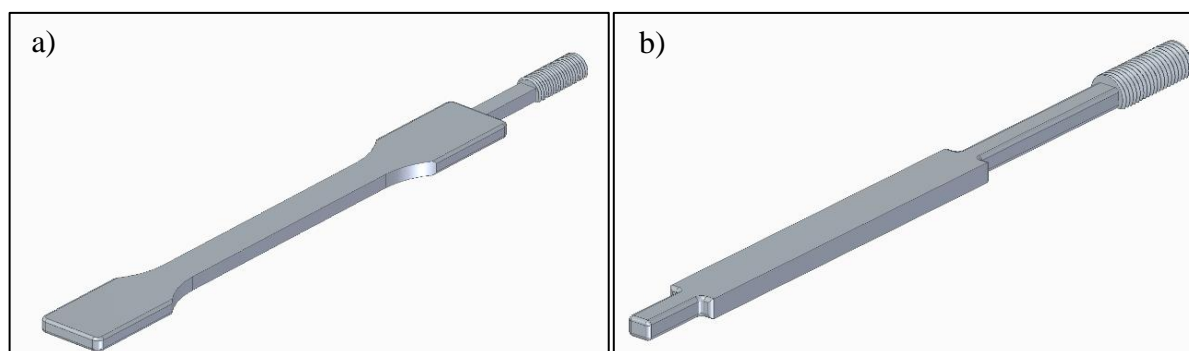
Obr. 7 Struktury výplní zkušebních těles pro materiály PET-G a ABS
a) gyroidní struktura [39], b) struktura sparse – double dense

Tab. 1 Užité vlastnosti polymerů použité pro přípravu struktur polymer – kov [40–42]

Vlastnosti	PET-G	ABS	PA 12
Hustota [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,27	1,05	1,01
Pevnost v tahu [MPa]	-	27,5 – 30,8	48
Modul pružnosti v tahu [MPa]	1400 – 1500	2300 – 2400	1700 – 1800
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 – 50	27,5 – 30,8	-
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	2,5 – 5	1,8 – 8,1	15 – 20

3.2 Aditivní výroba zkušebních těles

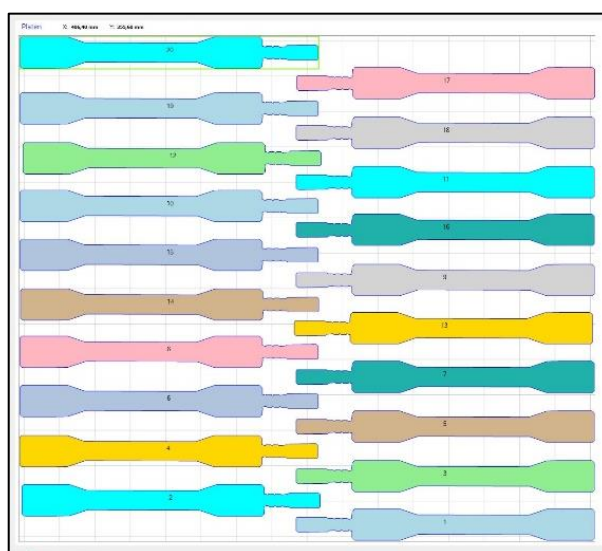
Před samotným 3D tiskem bylo nejprve nutné připravit 3D modely vzorků. Pro zvolené mechanické zkoušky, použité v této práci, byly zhotoveny 3D modely zkušebních těles typu 1A podle normy ČSN EN ISO 527–2 pro tahovou zkoušku a zkušební tělesa o rozměrech (80 x 10 x 4) mm dle normy ČSN EN ISO 178 pro ohybovou zkoušku. 3D modely zkušebních těles byly vytvořeny v CAD softwaru SolidEdge 2020. Z důvodu vyvinutého postupu nanášení kovu na povrch zkušebních těles, byla geometrie všech zkušebních těles modifikována o úchyt s vnějším závitem, díky kterému je bylo možno upevnit k robotickému elektrolyzáru, zvodivět a následně pohybem robotického elektrolyzáru zajistit jejich vložení do lázní (viz obr. 8). U tělesa určeného pro ohybovou zkoušku byl také navíc na jeho konci přidán objem materiálu, který během pokovování sloužil jako tzv. obětovaná katoda. Bez tohoto přidání materiálu by na hraně tělesa narostl v průběhu pokovování nárůstek kovu, který by mohl negativně ovlivnit průběh ohybové zkoušky. Po takto vytvořených 3D modelech se data z CAD softwaru exportovala ve formátu STL (viz kapitola 2.1.1) pro další úpravy.



Obr. 8 Modely zkušebních těles v softwaru SolidEdge 2020
a) modifikovaný 3D model zkušebního tělesa typu 1A pro tahovou zkoušku,
b) modifikovaný 3D model zkušebního tělesa pro ohybovou zkoušku

3.2.1 Výroba zkušebních těles technologií FDM

Pro tvorbu programu 3D tisku technologií FDM bylo nejdříve potřeba nahrát data do patřičného softwarového programu 3D tiskáren. Jelikož výroba dílů pomocí technologie FDM probíhala na odlišných zařízeních od dvou výrobců, bylo využito dvou softwarů a to PrusaSlicer 2.3 a software INSIGHT. V obou softwarech byly definovány konkrétní parametry pro tisk jako byly typy materiálů, výška tisku, teplota tisku, výplň vzorku apod. Dále se určila poloha modelu v pracovním prostoru 3D tiskáren, kde se poté vygenerovaly jednotlivé vrstvy v předem dané tloušťce. Na obr. 9 je znázorněna ukázka rozmístění modelů v pracovním prostoru 3D tiskárny Fortus 450mc. Po stanovení parametrů pro výrobu zkušební vzorku se tyto zkopírovaly pro ostatní tělesa.



Obr. 9 Ukázka rozmístění modelů v pracovním prostoru 3D tiskárny

Pro výrobu zkušebních těles z PET-G metodou FDM byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S+ od firmy Prusa Research a.s., v současné době nejnovější verze tiskárny MK3S, která je ve své kategorii hodnocena jako jedna z nejlepších. [43] Nabízený pracovní prostor je ve velikosti (250 x 210 x 210) mm. Tato tiskárna umožňuje tisknout všechny termoplasty s výškou vrstvy v rozmezí 0,05 – 0,35 mm. [43] Příprava STL formátu modelu byla provedena v softwaru PrusaSlicer 2.3, kde byly nastaveny parametry tisku, které jsou uvedené v tab. 2. Následně se tyto parametry spolu s modelem ve formátu .gcode nahrály do tiskárny. Poté byl zahájen 3D tisk zkušebních těles. Po vytisknutí byly tělesa ručně odstraněna z podložky. Z materiálu PET-G bylo vytisknuto 72 vzorků zkušebních těles typu 1A dle ISO 527 a 72 vzorků zkušebních těles o rozměrech (80 x 10 x 4) mm dle ISO 178, což představovalo pro každou variantu struktury vzorků zhotovení 24 těles.

Tab. 2 Parametry 3D tisku pro materiál PET-G (Original Prusa i3 MK3S+)

Materiál	Teplota trysky při tisku [°C]	Teplota podložky [°C]	Tloušťka vrstvy [mm]	Struktura vzorku [%]		
PET-G	265	90	0,30	5	50	100

Zkušební vzorky z materiálu ABS byly zhotoveny na zařízení Fortus 450mc od společnosti Stratasys. Jedná se o tiskárnu schopnou tisknout ve standardních tolerancích, ale je opatřena dotykovým displejem pro efektivnější a plynulejší ovládání. Zařízení umožňuje tisk dílů s výškou vrstvy od 0,127 do 0,33 mm a o rozměrech až (406 x 355 x 406) mm. Obsahuje dvě tiskové hlavy. První slouží pro extruzi stavebního materiálu a druhá pro podpurný materiál. [44] Před samotným tiskem bylo potřeba zkalibrovat 3D tiskárnu, což bylo provedeno vytisknutím zkušební kalibračního čtverce na podložku. Po vytisknutí byl díl opticky zkontrolován a změřily se tloušťky podpor dílu. Po této kontrole byly naměřené hodnoty následně zaneseny do zařízení. Tímto byla provedena kalibrace pro daný materiál. Po skončení tisku stačilo vyjmout podložku z pracovního prostoru 3D tiskárny (viz obr. 10) a samotná tělesa z podložky odstranit. V případě zkušebních těles z materiálu ABS byly vytištěny dvě odlišné sady zkušebních vzorků, a to s odlehčenou a plnou strukturou. Celkem bylo takto zhotoveno 48 vzorků typu 1A dle ČSN EN ISO 527 a 48 vzorků o rozměrech (80 x 10 x 4) mm dle ČSN EN ISO 178. Parametry tisku pro vytisknutí zkušebních těles tiskárnou Fortus 450mc jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 10 Vytisknutá zkušební tělesa z materiálu ABS těsně před vyjmutím z 3D tiskárny Fortus 450mc

Tab. 3 Parametry 3D tisku pro materiál ABS (Fortus 450mc)

Materiál	Teplota komory [°C] (při tisku / max.)	Teplota trysky [°C] (při tisku / max.)	Tloušťka vrstvy [mm]	Struktura vzorku	
ABS	90 / 95	315 / 320	0,330	Odlehč.	Plná

3.2.2 Výroba zkušebních těles technologií MJF

Pro 3D tisk vzorků z PA 12 (dále značených PA 12 – MJF) bylo v experimentální části použito zařízení HP Multi Jet Fusion 4200 (viz obr. 11), jehož technické parametry spolu s obecnými parametry materiálu PA 12 jsou uvedeny v tab. 4. Před zahájením samotného tisku bylo potřeba převést 3D modely zkušebních těles na tiskový soubor. Převod byl realizován v softwaru SmartStream 3D Build Manager. Poté byla podle instrukcí na ovládacím panelu 3D tiskárny provedena kalibrace, která byla uskutečněna pro zajištění rozměrové a geometrické přesnosti. Dále bylo potřeba připravit výrobní jednotku, která byla naplněna v procesní stanici dostatečným množstvím polyamidového prášku. Jakmile byla výrobní jednotka připravena, byla zavezena do 3D tiskárny a po přípravných pracích bylo možné zahájit samotný 3D tisk. Po skončení 3D tisku bylo potřeba zchladit výrobní jednotku. To bylo učiněno ve dvou krocích. První krok zahrnoval přirozené chlazení, kdy je teplo z výrobní jednotky předáváno okolnímu prostředí. Druhý krok představoval rychlé chlazení. Pro tento krok bylo potřeba umístit výrobní jednotku do procesní stanice. Po zchlazení výrobní jednotky následovalo čištění dílů. Nejprve byl odsán přebytečný prášek z výrobní jednotky a poté byly povrchy jednotlivých dílů mechanicky očištěny. V rámci experimentální části bylo metodou MJF vytisknuto 24 vzorků zkušebních těles typu 1A dle ISO 527 a 24 vzorků zkušebních těles o rozměrech (80 x 10 x 4) mm dle ISO 178.



Obr. 11 3D tiskárna HP Multi jet fusion 4200

Tab. 4 Obecné parametry materiálu PA 12 – MJF
a technické parametry 3D tiskárny HP Multi Jet Fusion 4200 [24, 42]

Materiál	Bod tání prášku [°C]	Velikost částic prášku [μm]	Tloušťka vrstvy [mm]	Rozlišení tisku [dpi]
PA 12	187	60	0,08	1200

3.3 Výroba zkušebních těles vstřikováním

Nad rámec původního zadání bakalářské práce byla také zhotovena zkušební tělesa vstřikováním z materiálu PA 12 (dále značeno vstřikovaný PA 12) jako zajímavé porovnání k výrobě těles ze stejného materiálu pomocí metody Multi Jet Fusion pro zhotovení struktur polymer – kov. Výroba probíhala způsobem odpovídající normě ČSN EN ISO 294–1 na vstřikovacím zařízení ARBURG Allrounder 320 C Golden Edition. K vstřikování zkušebních těles typu 1A byla použita ISO forma obsahující dvojici tvarových dutin, rozváděcí kanály ve tvaru T a kuželový vtok se šterbinovým ústím vtoku (viz obr. 12). Tyto hlavní konstrukční prvky tvarové části formy jsou v souladu s předpisem ČSN EN ISO 294–1. Chlazení tvarových částí zajišťovala voda cirkulující v temperačních kanálech vstřikovací formy. Technologické parametry výroby zkušebních těles, které jsou uvedeny v tab. 5, byly stanoveny v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 16396–2. Polyamidový prášek byl před samotným vstřikováním sušen po dobu 12 hodin ve vakuové sušárně Binder VD 53 při teplotě 80 °C z důvodu snížení jeho zbytkové vlhkosti na hodnotu $\leq 0,02$ %, která byla po jeho sušení ověřena pomocí halogenového analyzátoru HX 204 Mettler Toledo. Pro tahové zkoušky struktur polymer – kov zhotovených vstřikováním a galvanoplastikou byla použita zkušební tělesa typu 1A, pro stanovení ohybových vlastností byly mechanicky obrobena ze střední části těchto těles vzorky o rozměrech (80 x 10 x 4) mm. Vstřikováním bylo zhotoveno celkem 24 zkušebních těles.



Obr. 12 Tvarová část vstřikovací formy ISO dle normy ČSN EN ISO 294–1

Tab. 5 Technologické parametry pro vstřikování zkušebních těles z PA 12

Parametr	Nastavená hodnota
Uzavírací síla formy [kN]	400
Přítlačná síla trysky [kN]	30
Rychlost vstřikování [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	25
Dávkování [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	25
Zpětný tlak [MPa]	0,15
Bod přepnutí na dotlak [cm]	11
Velikost dotlaku [MPa]	70
Doba dotlaku [s]	40
Doba chlazení po dotlaku [s]	15
Teplota temperačního média [$^{\circ}\text{C}$]	60
Doba cyklu [s]	60
Teplotní profil (směrem od násypky) [$^{\circ}\text{C}$]	190/200/205/210/210

3.4 Příprava zkušebních těles před pokovením

Po vytisknutí a vstřikování zkušebních vzorků z PA 12 byly tyto vzorky následně kondicionovány dle normy ČSN EN ISO 1110. [45] Zkušební tělesa byla uložena do klimatizační komory s kontrolovaným prostředím o teplotě 70°C a relativní vlhkosti 62 % po dobu 10 dní.

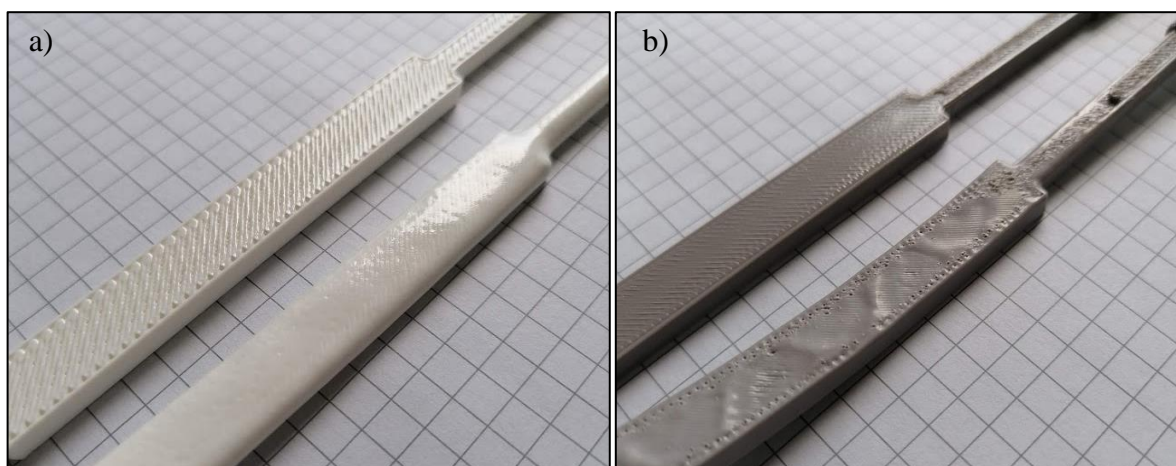
Geometrie všech zkušebních těles z 3D tisku byla pro potřebu jejich pokovení modifikována o úchyt (viz kap. 3.2). Vzhledem ke konstrukci vstřikovací formy, kde tento úchyt není, bylo nutné vstřikované díly dodatečně opatřit uchycením, které bylo zkonstruováno v softwaru SolidEdge 2020 a zhotoveno na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ z materiálu PET-G (viz příklady pokovených vzorků v příloze P1, obr. P1.4).

Před samotným pokovením polymerů bylo potřeba provést několik kroků k zajištění nanesení kovové vrstvy na jejich povrch: odmaštění, aktivace povrchu a stříbření. U těles z materiálů PET-G a ABS, vytisknutých technologií FDM, které se vyznačují vysokou pórovitostí zapříčiněnou tloušťkou tisknutých vrstev, tomu předcházela ještě úprava, jejímž cílem bylo vytvořit hladký a kompaktní povrch dílu. Pórovitost dílu na povrchu může zapříčinit nasakování pokovovacích lázní do vzorků a tím narušit kompaktnost celé struktury, což může mít za následek krystalizaci síranu měďnatého, oxidačních produktů a dalších reziduí na povrchu tělesa během jejich vysoušení, viz obr. 13. Tento problém mělo vyřešit krátké namočení těles do rozpouštědla na bázi acetonu, který je schopný povrch těles z těchto dvou materiálů částečně

rozpustit a umožnit jeho vyhlazení. Přes počáteční úspěchy, kdy došlo k vyhlazení povrchu, se po přibližně 48 hodinách tato tělesa zdeformovala (pravděpodobně v důsledku vnitřní napjatosti). Z toho důvodu bylo od dalšího použití těchto vzorků opuštěno a pouze z čistě experimentálních důvodů, po dohodě s firmou Electroforming s.r.o., byly pokoveny vzorky ABS s odlehčenou strukturou, které by měly mít lepší poměr hmotnosti k pevnosti oproti tělesům ze stejného materiálu s plnou strukturou a také kratší tiskový čas. Tato tělesa vykazovala současně menší míru deformace geometrie a hladší povrch než tělesa z PET-G. Detaily povrchu těles před a po namočení do acetonu je znázorněn na obr. 14.



Obr. 13 Krystalizace síranu měďnatého s tvorbou oxidů mědi na povrchu nanesené kovové vrstvy na zkušebních tělesech z PET-G s nevhodně upraveným povrchem



Obr. 14 Porovnání vyhlazení povrchu zkušebních těles před a po namočení v acetonu
a) zkušební tělesa z materiálu ABS, b) zkušební tělesa z materiálu PET-G

Jelikož polymerní materiály nejsou vodivé a k elektrochemickému nanesení kovu na model je tato vlastnost nezbytná, bylo potřeba najít optimální řešení k jejich zvodivění. Využito bylo systému redukčního stříbření dle vnitropodnikové receptury Electroforming s.r.o. Nejdříve byl na povrch těles aplikován odmašťovací prostředek „Simplegreen“, tím došlo k odmaštění povrchu, které by jinak zabraňovalo nanesení kovu. Dalším krokem byla předúprava vzorků ponořením v aktivační lázni po dobu 24 hodin. Po vyjmutí vzorků z aktivační lázně, byly tyto opláchnuty a za využití technologie redukčního stříbření postříbřeny.

3.5 Pokovení zkušebních těles

Pokovení zkušebních těles bylo realizováno ve spolupráci s firmou Electroforming s.r.o. Pro tyto účely bylo vyvinuto zařízení, které bylo schopné dosahovat následujících parametrů:

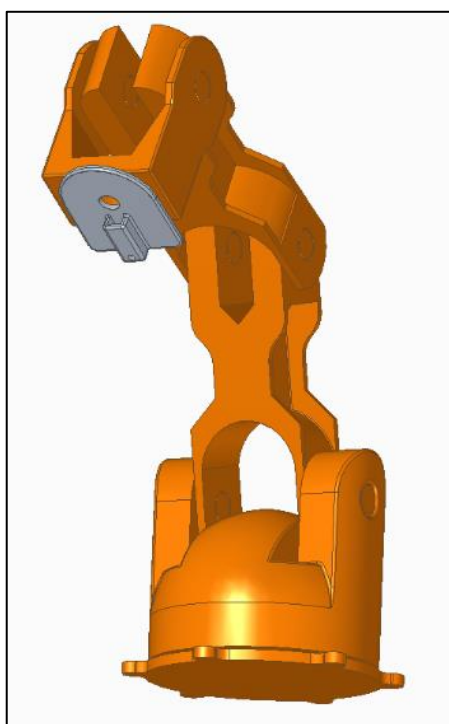
- přesné, automatizované a zároveň v čase proměnné nastavení souřadnic katody v závislosti na anodě,
- robotizovanou manipulaci katody mezi jednotlivými pokovovacími lázněmi a oplachy,
- volitelné časové změny a nastavení provozních teplot a proudů,
- počítačem řízené automatické pokovování vzorků úlohou CAM (Computer Aided Manufacturing).

Pro realizaci řízeného elektrolyzéry, byla po analýze dostupných prostředků vybrána robotická paže Arduino TinkerKit Braccio. S přihlédnutím na konstrukční požadavky bylo potřeba provést několik hardwarových a softwarových úprav.

Zprvu byly odstraněny robotické kleště spolu se servomotorem M6. Ty byly nahrazeny modulem, který se připevnil k robotické paži namísto kleští. Modul byl zkonstruován v softwaru SolidEdge 2020 a poté vytisknut na 3D tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ z materiálu PET-G. V tomto modulu (viz obr. 15) se nachází uložení pro grafitový sběrač, přes který se na katodu přivádí elektrický proud. Na katodu byl následně přišroubován pokovovaný vzorek. Samotná katoda se skládala ze dvou částí. První část představovala mosazná příruba nasazená napevno na upravený servomotor M5 opatřená na konci vnějším závitem. Úprava servomotoru spočívala v náhradě trimru, který neumožňoval otáčení servomotoru v plném rozsahu a drobných úpravách převodovky. Druhá část katody byla vyrobena z mosazné tyče s tím rozdílem, že na obou jejích koncích byl vyříznut vnitřní závit a ve středu byla opatřena šroubem pro upevnění a zajištění měděného drátu (pomocné připojení pokovovaného vzorku – katody). Tato část katody byla našroubována na vzorek, který byl opatřen úchytem s vnějším závitem a spolu se vzorkem byla našroubována na první část katody. Takto tvořená katoda byla

vedena otvorem v modulu. Otáčky servomotoru bylo možné ovládat v samotném programu pokovení a tím regulovat rychlost otáčení katody se vzorkem v lázních. Celá robotická paže byla umístěna na stojanu, který sloužil k vyrovnávání sil působících na paži během jejího pohybu a zároveň umožňoval paži (díky své vyšší poloze) bezproblémový přístup vzorků do pracovních (galvanizačních) a oplachových lázní.

Softwarová úprava byla uskutečněna výměnou standartní knihovny *<Braccio.h>* uložené ve složce *\Arduino\libraries\Braccio* za knihovnu z veřejné databáze. [46] Ta umožňuje lepší volbu počáteční polohy robotické paže a dovoluje řídit rychlost pohybu jednotlivých servomotorů.



Obr. 15 3D model robotické paže s modulem pro uložení grafitového sběrače

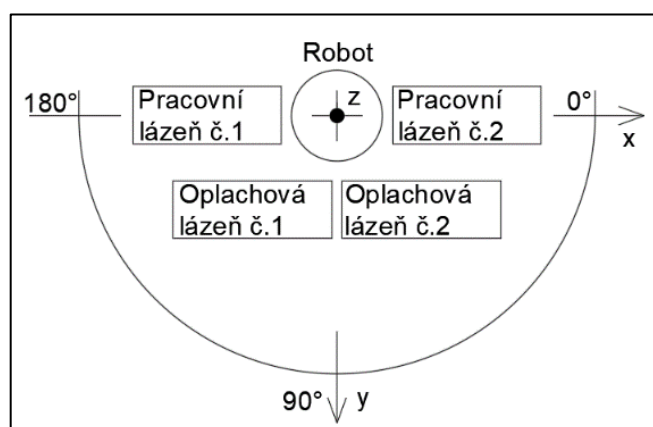
Robotická paže byla ovládána pomocí programu vytvořeného v programovacím jazyce Wiring v softwaru Arduino (viz příloha P2). Jako první bylo potřeba definovat časové proměnné vyjadřující dobu vzorku stráveného v jednotlivé pracovní nebo oplachové lázni. Dále byl určen pracovní cyklus vykonaný robotickou paží, který představoval jeden celý technologický proces. Pohyb robotické paže byl realizován pomocí příkazu *BraccioRobot.moveToPosition(pos, x)*. Parametr „*pos*“ definoval nastavení jednotlivých pracovních úhlů servomotorů a parametr „*x*“ představoval číselné vyjádření hodnoty rychlosti pohybu udávaný ve stupních za sekundu. Rychlost pohybu byla omezena na 20 až 200 stupňů za sekundu. Jednotlivým servomotorům byly pokyny udávány v milisekundách. Paže byla po výše uvedených úpravách ovládána

celkem čtyřmi servomotory, přičemž každý z nich měl omezený rozsah pohybu daný konstrukcí robotické paže, viz tab. 6.

Tab. 6 Dovolené hodnoty pohybu robotické paže [47]

Servomotor	Pohyb	Rozsah pohybu [°]
M1	Základna	0 – 180
M2	Rameno	15 – 165
M3	Loket	0 – 180
M4	Zápěstí	0 – 180

Relativní poloha robotické paže v rovině xy byla určena pomocí pohybu servomotoru M1. Z důvodu omezeného pohybu tohoto servomotoru bylo potřeba umístit operační vany tak, aby se nacházely v pracovním rozsahu robotické paže (schematicky znázorněno na obr. 16). Počátek souřadnicového systému byl zvolen v místě umístění robotické paže, od kterého byl dále určen její pohyb. Ostatní servomotory zajišťovaly pohyb a natáčení robotické paže v rovinách xz a yz. Pohybem v těchto rovinách byl regulován pohyb modulu s katodou (a připevněným vzorkem) do lázní. Zde bylo potřeba správného seřízení pracovních úhlů servomotorů, aby došlo k optimálnímu ponoru vzorku do lázní a nedošlo k ponoření kompletního modulu nebo některé z části robotické paže. Vzorek se během pokovování nacházel ve svislé poloze a jeho rotace, jak již bylo zmíněno, byla ovládána servomotorem M5 v rámci pokovovacího programu příkazem *wrist_ver.write*.



Obr. 16 Schéma pracovního prostředí robotické paže

Samotný pokovovací proces probíhal v několika krocích. Po spuštění ovládací stanice CAM s operačním systémem Windows 10 byla ke stanici připojena robotická paže pomocí USB rozhraní. Po přivedení elektrické energie zapojením robotického elektrolyzéro do napájení a tím jeho aktivaci, byl na robota upevněn vzorek. Takto vytvořená rotující katoda byla ve

vodivém styku s grafitovým sběračem připojeným ke zdroji galvanizačního proudu. Aby bylo zajištěno dostatečné propojení povrchu vzorku, bylo využito měděného drátu, který byl připevněn k druhé části katody a vzorku. Dalším krokem bylo spuštění programu určeného pro pokovení v softwaru Arduino, který specifikuje procesní parametry: dobu ponoření vzorku v lázni, druh lázně apod. Po spuštění programu došlo k sepnutí servomotorů a robotická paže najela do výchozí polohy. Poté už samotný pokovovací proces probíhal automaticky. Jakmile skončil celý pokovovací proces, robotická paže se vysunula nad oplachovou lázeň do konečné polohy, kde se vzorek odebral (viz obr. 17).



Obr. 17 Robotický elektrolyzátor po skončení pokovovacího procesu s ovládací stanicí CAM a se zdroji elektrické energie

V rámci experimentálního vývoje byly vytvořeny tři ovládací programy robotického elektrolyzátoru pro odlišné technologické postupy nanesení kovové vrstvy na polymerní vzorek (viz tab. 7). Programy, resp. technologické postupy 1 a 2 byly rozdílné v použité pokovovací lázni (viz tab. 8). V rámci těchto dvou programů se vzorek pokovoval vždy v jedné dané pokovovací lázni příslušné konkrétnímu programu. Technologický postup použitý u programu 3 se lišil tím, že v průběhu pokovovacího procesu docházelo ke střídání lázní. Robotická paže se vzorkem se přesunula po 25 minutách z jedné pokovovací lázně do druhé. Jednotlivé programy se skládaly z několika sekvencí. Během první sekvence samotného pokovovacího programu se robotická paže přemístila do výchozí polohy nad jednu z pracovních lázní. Po ní následovala druhá sekvence, která byla rozdělena na několik dílčích kroků. Nejdříve bylo pohybem robotické paže z počáteční polohy dosaženo ponoření vzorku do pracovní lázně, poté setrvání po určité době vzorku v lázni a po uplynutí požadované doby jeho vysunutí z lázně.

Třetí sekvence představovala přesun vzorku nad oplachovou lázeň, jeho ponoření, setrvání v lázni a následné vysunutí nad oplachovou lázeň do konečné polohy. Pomocí programů 1 až 3 byly pokoveny vzorky z PA 12 zhotovené aditivní technologií. Vstříkované vzorky PA 12 a odlehčené aditivní díly z ABS byly pro vzájemné porovnání pokovovány pouze podle programu 2.

Tab. 7 Technologické parametry pokovovacích programů

Technologický postup	Čas pokovování [min]	Čas oplachu [min]	Čas přejezdu [s]	Číslo pracovní lázně
Program 1	400	10	10	1
Program 2	400	10	10	2
Program 3	200 a 200	10	102	1 a 2

Parametry technologických postupů pro elektrochemické nanášení silných vrstev mědi vychází ze zkušeností pracovníků společnosti Electroforming s.r.o. V rámci těchto postupů byly použity pracovní lázně, které se liší jak svým chemickým složením, tak i fyzikálními podmínkami, jež jsou udržovány během procesu pokovení (koncentrací H_2SO_4 , $CuSO_4$, koncentrací a složením přísad, teplotou, proudovou hustotou atd.). Parametry složení pracovních lázní jsou uvedeny v tab. 8. Množství přísad bylo záměrně zvoleno tak, aby pracovní lázeň č. 1 měla nižší koncentraci přísad, než pracovní lázeň č. 2. Díky tomu umožňovala lázeň č. 1 nanesení měkčí mědi (dále značená jako měkká lázeň), než pracovní lázeň č. 2 (dále značena jako tvrdá lázeň). Dále bylo potřeba umístit do pracovních lázní měděné anody. Z toho důvodu byl navržen anodový koš, do kterého se anody vložily. Zkonstruován byl v softwaru SolidEdge 2020 a pro každou pracovní lázeň vytisknut na 3D tiskárně Original Prusa i3+ MK3S z materiálu PET-G. V dolní polovině anodového koše se nacházejí otvory, přes které byla z vnitřní strany koše přichycena filtrační tkanina, která zamezovala proniknutí anodového kalu do pracovní lázně během rozpuštění anody. Teplotu pracovních lázní regulovala ponorná topná tělesa s termostatem. V operačních vanách, které sloužily pro oplach vzorků po ukončení pokovování, se nacházela DEMI voda.

Tab. 8 Parametry složení pracovních lázní

Číslo prac. lázně	Složení lázně			Přísady	Teplota lázně [°C]	Proudová hustota [$A \cdot dm^{-2}$]
	DEMI voda do objemu [l]	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$ [kg]	H_2SO_4 [kg]	ELF – D1 [ml]		
1.	20	4	1,4	100	22	1
2.				400		

3.6 Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška byla použita pro vyhodnocení chování pokovených zkušebních těles při namáhání tahovou silou. Z měření tahových vlastností byla stanovena mez pevnosti v tahu (σ_m), modul pružnosti v tahu (E_t) a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (ε_{tb}). Měření bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 527–1, 2. [48] Použita byla modifikovaná zkušební tělesa (viz kap. 3.2) typu 1A v souladu s normou ČSN EN ISO 527–2. Tělesa byla upnuta do čelistí zkušebního trhačího zařízení TiraTest 2300 (viz obr. 18) tak, aby osa zkušebních těles byla rovnoběžná s osou stroje a tím bylo docíleno jednoosého namáhání. Pro stanovení modulu pružnosti v tahu byla zkušební tělesa zatěžována konstantní rychlostí 1 mm/min, pro stanovení meze pevnosti v tahu a jmenovitého poměrného prodloužení rychlostí 50 mm/min do okamžiku svého porušení v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 19062–2 a ČSN EN ISO 16396–2. V průběhu zkoušky se zaznamenávaly hodnoty působícího zatížení (napětí), prodloužení počáteční délky vzorku (poměrné prodloužení) a prodloužení zkušebního tělesa mezi čelistmi (jmenovité poměrné prodloužení), resp. závislost napětí v tahu na (jmenovitém) poměrném prodloužení. Celkem bylo pro každou šarži nebo materiál zkoušeno 6 pokovených zkušebních těles. Výsledné průměrné hodnoty jsou včetně směrodatných odchylek uvedeny v tab. 9. Dílčí záznam měření je dokladován v přílohách P3 – P5.



Obr. 18 Trhačí zařízení TiraTest 2300 (vlevo), detail měření tahových vlastností (vpravo)

**Tab. 9 Průměrné hodnoty tahových vlastností dílů z PA 12 a ABS
(PA 12 – MJF, ABS a vstřikovaný PA 12)**

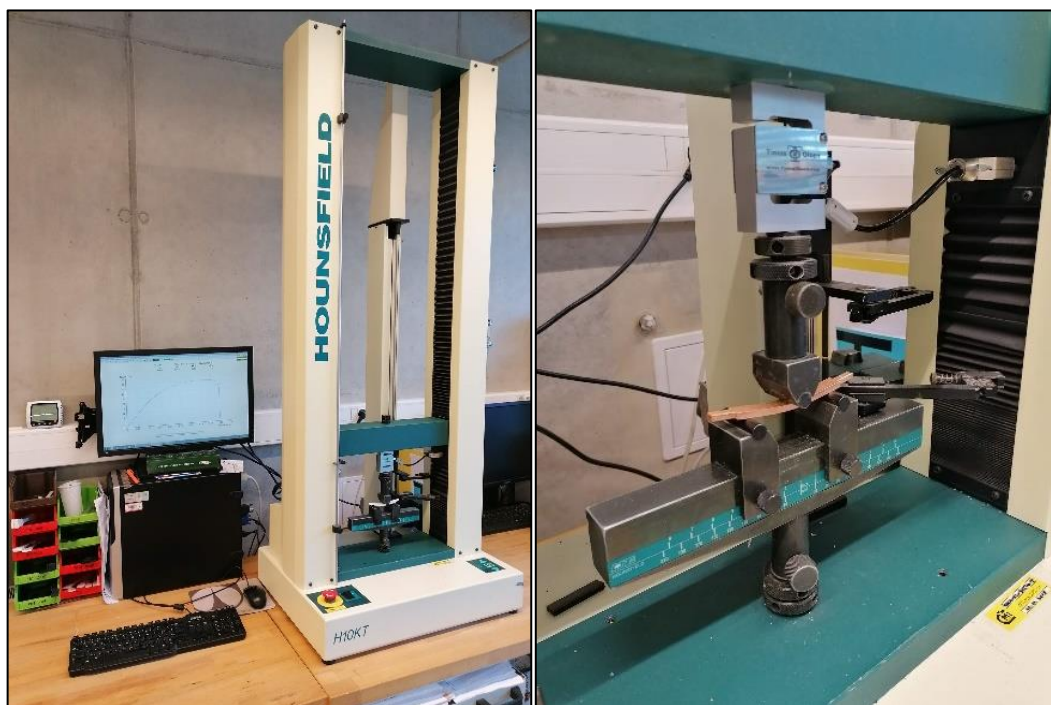
Materiál		PA 12 – MJF		
Šarže	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]	
Nepokoven	46,8 ± 0,9	1301 ± 74	18,4 ± 3,8	
Program 1	59,3 ± 2,1	4451 ± 333	8,6 ± 2,2	
Program 2	55,0 ± 3,0	4284 ± 526	9,9 ± 2,5	
Program 3	61,8 ± 2,6	5353 ± 583	5,4 ± 0,9	
Šarže		Nepokovený		
Materiál	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]	
PA 12 - MJF	46,8 ± 0,9	1301 ± 74	18,4 ± 3,8	
PA 12 - vstřikovaný	40,8 ± 0,3	1098 ± 24	330,7 ± 25,3	
ABS - odlehčené	18,9 ± 0,2	1364 ± 19	2,9 ± 0,3	
Šarže		Program 2		
Materiál	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]	
PA 12 - MJF	55,0 ± 3,0	4284 ± 526	9,9 ± 2,5	
PA 12 - vstřikovaný	38,7 ± 1,8	4327 ± 164	341,1 ± 35,1	
ABS - odlehčené	35,2 ± 6,8	5308 ± 557	1,7 ± 0,3	

3.7 Stanovení ohybových vlastností

Ohybové zkoušky byly použity pro vyhodnocení chování pokovených zkušebních těles při namáhání ohybem a pro určení jejich pevnosti v ohybu (σ_{fM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f), který byl stanoven z rovnice (6). Zkouška byla provedena dle zásad a podmínek stanovených v normě ČSN EN ISO 178 metodou tříbodového ohybu. [49] Ohybová zkouška byla realizována na zkušebním zařízení HOUNSFIELD H10KT (viz obr. 19). Principem zkoušky bylo zatěžování zkušebního tělesa o rozměrech (80 x 10 x 4) mm přítláčným trnem. Zkušební těleso bylo symetricky uloženo na dvou podporách o rozpětí 64 mm. Trn působil na těleso uprostřed rozpětí podpěr konstantní rychlostí 2 mm/min v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 19062–2 a ČSN EN ISO 16396–2. Zatěžování bylo ukončeno při dosažení meze pevnosti v ohybu. Měření bylo provedeno na 6 vzorcích od každé šarže nebo materiálu. Výsledné průměrné hodnoty jsou včetně směrodatných odchylek uvedeny v tab. 10 a v tab. 11. Dílčí výsledky jsou zobrazeny v přílohách P6 – P8.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \cdot 100 \quad (6)$$

kde značí: E_f – modul pružnosti v ohybu [MPa],
 σ_{f1} – napětí v ohybu [MPa] při deformaci $\varepsilon_{f1} = 0,05 \%$,
 σ_{f2} – napětí v ohybu [MPa] při deformaci $\varepsilon_{f2} = 0,25 \%$.



Obr. 19 Zkušební zařízení HOUNSFIELD H10KT (vlevo), detail měření ohybových vlastností (vpravo)

Tab. 10 Průměrné hodnoty ohybových vlastností dílů z PA 12 a ABS (PA 12 – MJF, ABS a vstříkovaný PA 12)

Materiál	PA 12 – MJF	
Šarže	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
Nepokoven	$53,1 \pm 2,1$	1301 ± 74
Program 1	$78,8 \pm 3,2$	5185 ± 517
Program 2	$82,0 \pm 4,0$	5677 ± 397
Program 3	$74,6 \pm 3,8$	5305 ± 490
Šarže	Nepokovený	
Materiál	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
PA 12 – MJF	$53,1 \pm 2,1$	1301 ± 74
PA 12 - vstříkovaný	$48,2 \pm 0,8$	1075 ± 27
ABS – odlehčené	$30,6 \pm 0,9$	908 ± 43

Tab. 11 Průměrné hodnoty ohybových vlastností dílů z PA 12 a ABS
(PA 12 – MJF, ABS a vstříkovaný PA 12)

Šarže	Program 2	
Materiál	σ_{FM} [MPa]	E_f [MPa]
PA 12 – MJF	82,0 ± 4,0	5677 ± 397
PA 12 - vstříkovaný	72,4 ± 5,2	7419 ± 218
ABS – odlehčené	66,0 ± 4,8	5558 ± 377

3.8 Klimatické zatížení struktur polymer – kov

Prokazování jakosti výrobků, správnosti jejich konstrukčně – technologického návrhu a schopnosti odolávat v požadované míře všem vnějším vlivům po celou dobu jeho předpokládané životnosti patří dnes mezi standartní nástroje hodnocení kvality výrobního procesu. Z tohoto důvodu byly plastové díly s měděnou povrchovou vrstvou vystaveny cyklické vlhkostně teplotní klimatické zkoušce odolnosti proti změnám podnebí dle standardu PV 1200 koncernu VW. Motivací k aplikaci této zkoušky byla možnost posouzení chování struktur polymer – kov při zatížení změnou podnebních podmínek. Simulací vysokých a nízkých teplot změn relativní vlhkosti v čase došlo k jejich umělému stárnutí. Po skončení zkoušky (po 10 dnech) a také v jejím průběhu (po 5 dnech) byla hodnocena integrita povrchu pokovovaného plastového dílu pomocí konfokálního mikroskopu Sensofar S neox, jímž byla bezkontaktně sledována plošná drsnost povrchu (S_a), resp. aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu dle ČSN EN ISO 25 178–2, viz obr. 20. Ve spolupráci s pracovníky Fakulty strojní a Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze byla hodnocena také změna tvrdosti povrchové úpravy zkouškou mikrotvrdosti dle Vickerse (HV 0,01) na zařízení DuraScan 20 G5.



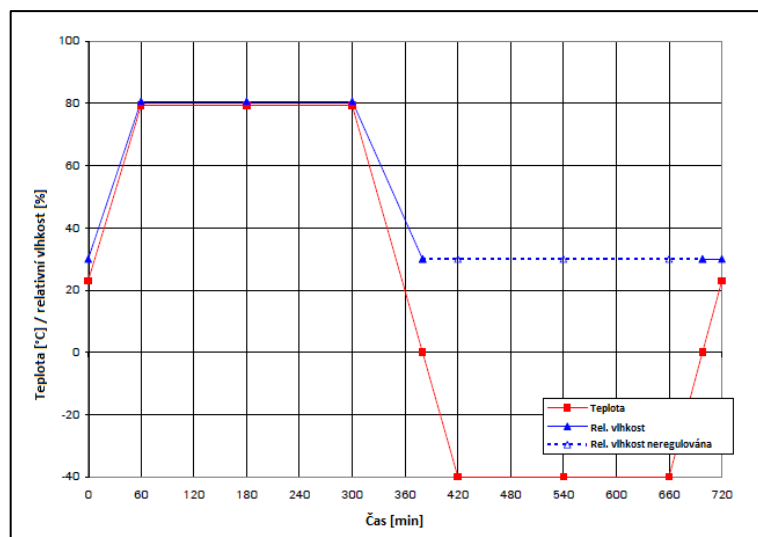
Obr. 20 Konfokální mikroskop Sensofar S neox (vlevo),
detail sledování integrity povrchu struktur polymer – kov (vpravo)

Při klimatické zkoušce PV 1200 byly vzorky umístěné v klimatické komoře SUN 3600 Vötsch, viz obr. 21, vystaveny střídavému teplotnímu cyklu v rozsahu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ při regulované relativní vlhkosti vzduchu. Zkouška se standartně skládá z 20 stejných cyklů, přičemž doba jednoho cyklu je 12 hodin. V rámci experimentální studie byly vzorky vystaveny klimatické komoře po dobu 10 a 20 cyklů, tj. 120 a 240 hodin. Grafické znázornění průběhu zkoušky je uvedeno na obr. 22. Před začátkem testu byla klimatická komora temperována na standartní teplotu $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 30 %RH. Následně byly vzorky umístěny na rošty klimatické komory a byl zahájen lineární ohřev na teplotu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 80 %RH v čase 60 minut. Následoval izotermický ohřev při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 240 minut. Po uplynutí této doby došlo k lineárnímu ochlazení, nejprve na teplotu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 30 %RH v čase 80 minut a bezprostředně poté na teplotu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ v čase 40 minut. Od teploty $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebyla relativní vlhkost vzduchu regulována. Při dosažení teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bylo provedeno izotermní chlazení po dobu 240 minut, které bylo následováno lineárním ohřevem do teploty $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (v čase 60 minut), přičemž od teploty $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla relativní vlhkost opět regulována na hodnotu 30 %. [50]



Obr. 21 Klimatická komora SUN 3600

Pro hodnocení vlivu klimatického zatížení na povrchovou úpravu polymerního dílu byly použity pokovené vzorky z PA 12 – MJF a vstříkované vzorky z PA 12, které byly ve všech případech pokoveny programem 2 (v tvrdé lázni). Vzorky byly hodnoceny v polovině testu (5 dní od zahájení zkoušky) a po jeho skončení, tj. po 10 dnech.



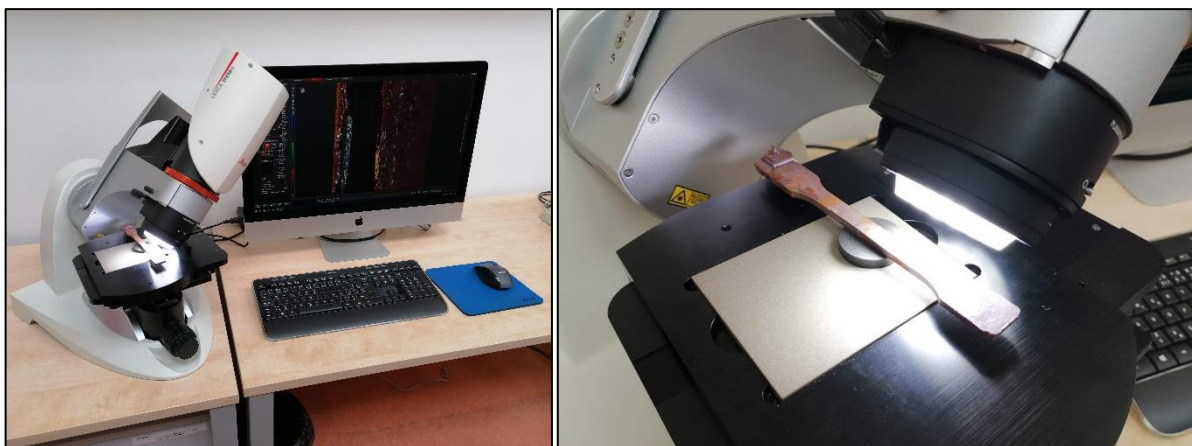
Obr. 22 Grafické schéma jednoho cyklu klimatické zkoušky dle PV 1200 [50]

Naměřené hodnoty integrity povrchu (plošná drsnost a tvrdost) před, během a po klimatickém stárnutí, které byly stanoveny vždy ve stejné oblasti dílu, byly zprůměrovány a zaneseny do tab. 12.

Tab. 12 Hodnoty plošné drsnosti a tvrdosti měděné vrstvy před, během a po klimatickém testu

Délka testu	5 dní			
Polymerem vytvořené struktury	Před testem		Po testu	
	Plošná drsnost Sa [μm]	Tvrdost HV	Plošná drsnost Sa [μm]	Tvrdost HV
PA 12 – MJF	20,3 ± 0,3	99,0 ± 5,3	17,2 ± 2,0	81,1 ± 0,9
vstřík. PA 12	15,0 ± 3,7	75,3 ± 4,2	22,4 ± 8,0	77,7 ± 10,5
Délka testu	10 dní			
Polymerem vytvořené struktury	Před testem		Po testu	
	Plošná drsnost Sa [μm]	Tvrdost HV	Plošná drsnost Sa [μm]	Tvrdost HV
PA 12 - MJF	19,9 ± 0,7	130,5 ± 0,7	17,6 ± 0,6	89,2 ± 9,0
vstřík. PA 12	9,9 ± 3,6	82,3 ± 6,9	13,0 ± 2,9	81,1 ± 6,4

Pro hodnocení vlivu klimatického stárnutí na integritu povrchu byla dále sledována soudržnost kovové vrstvy k polymernímu dílu během stárnutí i po jeho ukončení. Hodnocení bylo provedeno na digitálním optickém mikroskopu Leica DVM6 (viz obr. 23), se softwarem LasX, viz kap. 4.3.



Obr. 23 Digitální optický mikroskop Leica DVM6 (vlevo), detail snímání povrchu kovové vrstvy zkušební tělesa (vpravo)

3.9 Stanovení tloušťky kovové vrstvy

Za účelem stanovení tloušťky kovové vrstvy struktury polymer – kov byly na vytvořených vzorcích provedeny metalografické výbrusy. Použitými vzorky byly dvě pokovená zkušební tělesa typu 1A dle ČSN EN ISO 527–2, které byly zhotoveny metodou MJF a vstříkáním. Třetím použitým vzorkem bylo těleso o rozměrech (80 x 10 x 4) mm určené pro ohybovou zkoušku dle ČSN EN ISO 178 vyrobené technologií MJF. Všechna tři zkušební tělesa byla z materiálu PA 12. Pro bližší určení tloušťky kovové vrstvy po celé délce pokovených zkušebních těles, byly na každém zkušebním tělese nařezány podélně k jeho ose tři vzorky o délce 11,5 mm. Nařezání vzorků bylo provedeno na kotoučové rozbrušovací pile Secotom – 50 od firmy Struers (viz obr. 24) chlazené vodou s kotoučem s označením 50A15 ze slinutých karbidů, rychlostí otáčení $4000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a posuvem $0,3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Takto připravené vzorky byly následně pomocí fixační pasty Technovit 2000 LC přichyceny na formu, aby nedošlo k jejich uvolnění ve formě při zalití pryskyřicí. Do jedné formy byly umístěny tři vzorky z jednoho zkušební tělesa. Zalévací hmota byla použita jednosložková čirá pryskyřice Technovit 2000 LC vytvrditelná UV světlem. Následně byly formy se vzorky umístěny do UV pece Technotray POWER (viz obr. 24) po dobu 20 minut, aby došlo k vytvrzení pryskyřice. Po uplynutí prvních 10 minut, byly vzorky z UV pece vyjmuty a zality krycím lakem Technovit 2000 LC v tloušťce několika milimetrů pro zajištění nelepivého, tvrdého a průhledného povrchu vzorků. Po aplikaci krycího laku byly vzorky přesunuty zpět do UV pece, kde strávily zbylých 10 minut. Poté byly vzorky z pece vyjmuty a zbaveny formy.



Obr. 24 Kotoučová rozbrušovací pila Secotom – 50 od společnosti Struers (vlevo), dva ze tří vzorků po vytvrzení v UV peci Technotray POWER (vpravo)

K broušení a leštění metalografických výbrusů byla použita bruska a leštička Tegramin – 25 od firmy Struers (viz obr. 25). Na tomto zařízení byly nejdříve vykonány dva brousící cykly a poté tři lešticí cykly s délkou trvání jednotlivých cyklů 120 sekund. Vzorky byly přitlačovány silou 15 N. Pro první čtyři cykly byl použit adaptér MD – Gekko pro fixaci SiC fólií se zrnitostí 500, 1200, 2000 a 4000, které byly po jednotlivých cyklech postupně měněny. Během broušení a leštění byla jako smáčedlo a chladicí médium přiváděna voda. Mezi jednotlivými cykly byly vzorky opláchnuty vodou, aby byly zbaveny částic brusiva, které mohly ulpět uvnitř porů vzorků. Poslední (pátý) cyklus představoval finální leštění s plátnem MD – Nap se zrnitostí 1 μ m za použití diamantové pasty DiaDuo–2 s velikostí zrn 1 μ m. Finální úprava vzorků spočívala v opláchnutí vodou, nanesení isopropanolu na jejich povrch a následném vysušení z důvodu vyčištění povrchu vzorků a jejich odmaštění. Takto připravené vzorky jsou po metalografickém výbrusu znázorněny na obr. 25.



Obr. 25 Metalografická bruska Tegramin – 25 od společnosti Struers (vlevo), vzorky po metalografickém výbrusu připravené pro měření tloušťky kovové vrstvy (vpravo)

Pro vyhodnocení tloušťky kovové vrstvy byl použit digitální optický mikroskop Leica DVM6. Optická data se zpracovala v softwaru LasX. Jak již bylo zmíněno, v jedné vytvrzené pryskyřici se nacházely tři vzorky. Měřeno bylo 9 vzorků, kde na každé ze čtyř hran vzorků (jedna hrana vzorku představovala jednu sadu měření) bylo provedeno osm měření tloušťky vrstvy. Naměřené hodnoty z každé sady se zprůměrovaly a se směrodatnými odchylkami jsou uvedeny v tab. 13 a v tab. 14. Ze čtyř sad změřených pro jeden vzorek byla zprůměrována konečná hodnota, která představovala průměrnou hodnotu tloušťky měděné vrstvy pro jeden vzorek.

Tab. 13 Průměrné hodnoty tlouštěk kovových vrstev struktur polymer – kov tvořených PA 12 – MJF a měděnou vrstvou v tvrdé lázni (program 2)

Typ tělesa: PA 12 - MJF (ohybové těleso)			
Sada měření	Průměrná tloušťka vrstvy [μm]		
	1. Vzorek	2. Vzorek	3. Vzorek
1.	49,1 ± 9,6	60,9 ± 8,1	66,4 ± 19,7
2.	66,4 ± 12,9	71,1 ± 17,8	62,3 ± 11,5
3.	69,3 ± 12,1	65,1 ± 21,1	58,3 ± 16,6
4.	69,0 ± 9,1	70,9 ± 12,5	62,1 ± 10,7
x	63,4 ± 10,9	67,0 ± 14,9	62,3 ± 14,6
Typ tělesa: PA 12 - MJF (tahové těleso)			
Sada měření	Průměrná tloušťka vrstvy [μm]		
	1. Vzorek	2. Vzorek	3. Vzorek
1.	101,4 ± 33,7	81,4 ± 13,0	79,5 ± 15,9
2.	97,1 ± 10,8	83,6 ± 14,2	93,7 ± 23,1
3.	120,2 ± 27,1	90,5 ± 16,1	92,3 ± 11,0
4.	101,9 ± 17,7	93,2 ± 5,0	98,3 ± 12,8
x	105,1 ± 22,3	87,2 ± 12,1	90,9 ± 15,7

Tab. 14 Průměrné hodnoty tloušťek kovových vrstev struktur polymer – kov tvořených vstříkovaným PA 12 a měděnou vrstvou v tvrdé lázni (program 2)

Typ tělesa: Vstříkovaný PA 12 (tahové těleso)			
Sada měření	Průměrná tloušťka vrstvy [μm]		
	1. Vzorek	2. Vzorek	3. Vzorek
1.	$94,8 \pm 4,3$	$110,4 \pm 5,7$	$88,3 \pm 1,9$
2.	$109,3 \pm 4,6$	$116,3 \pm 3,7$	$105,0 \pm 3,0$
3.	$101,5 \pm 3,6$	$114,1 \pm 3,4$	$83,4 \pm 2,5$
4.	$104,6 \pm 3,8$	$112,0 \pm 4,2$	$108,0 \pm 3,5$
x	$102,6 \pm 4,1$	$113,2 \pm 4,3$	$96,2 \pm 2,7$

4 Vyhodnocení výsledků a jejich diskuze

V této části bakalářské práce jsou vyhodnoceny dosažené výsledky provedených zkoušek vlastností struktury polymer – kov. Na základě naměřených hodnot z experimentální části získaných tahovou a ohybovou zkouškou, které byly provedeny v souladu s mezinárodními normami, je vyhodnocen vliv jednotlivých technologických postupů pokovení na výsledné mechanické vlastnosti struktury polymer – kov. Následně je posouzen dopad klimatického testu na integritu povrchu hodnocením plošné drsnosti a tvrdosti kovové vrstvy, ale také z hlediska její delaminace a povrchových trhlin. Na závěr je proveden rozbor dosažených hodnot měření tloušťek kovových vrstev z hlediska geometrie a metody výroby zkušebního tělesa.

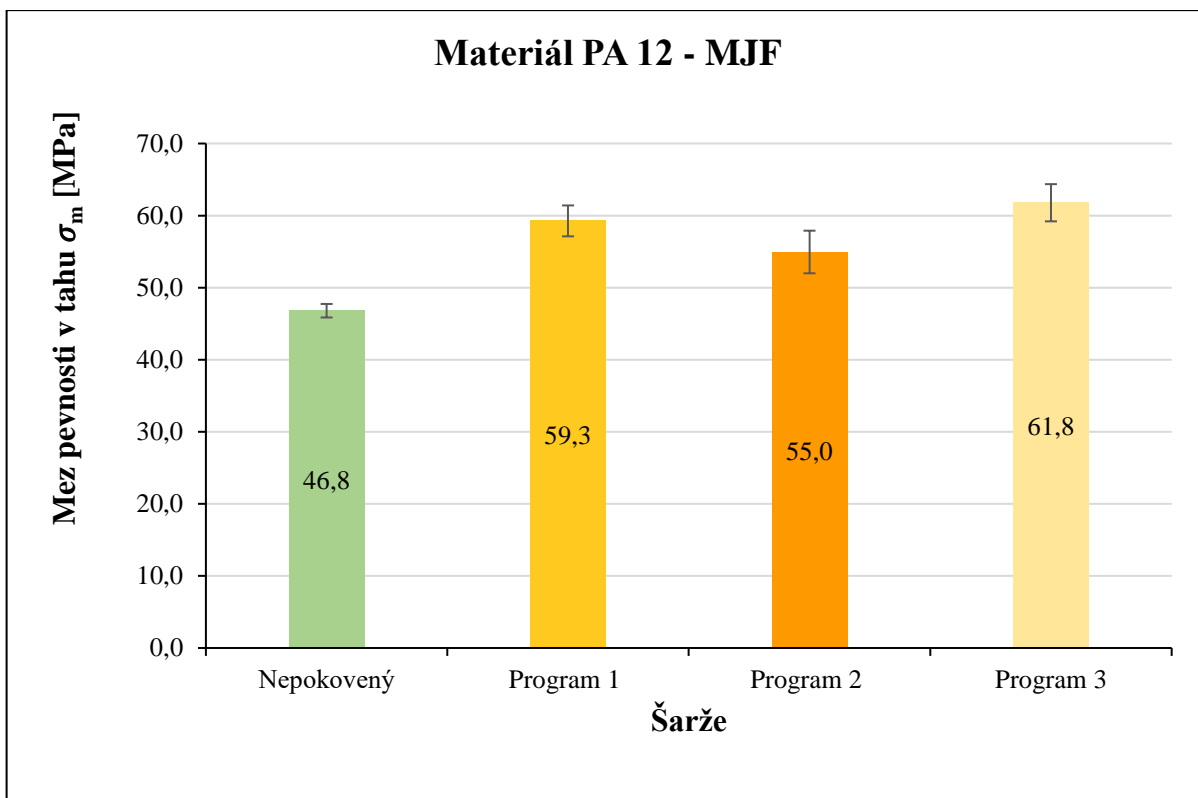
V průběhu přípravných prací před pokovením bylo zjištěno, že tělesa vytisknutá metodou FDM z materiálů PET-G a ABS nejsou vhodná pro pokovení galvanoplastikou za využití testovaného technologického procesu (viz kap. 3.4). K jejich pokovení by bylo potřeba najít takový způsob úpravy povrchu, který by zajistil bezproblémovou aplikaci kovové vrstvy na jejich povrch. Naopak polymery vyrobené metodou MJF z materiálu PA 12 nebylo potřeba před stříbřením nijak speciálně upravovat a stříbření samotné probíhalo bez větších komplikací. Tyto okolnosti zapříčinily, že pro hodnocení jednotlivých technologických postupů, byly pokoveny pouze zkušební tělesa z PA 12 – MJF. Pro porovnání chování kovové vrstvy nanesené na díly z PA 12, byly tyto díly vyrobeny nejen aditivní technologií MJF, ale také vstřikováním. To umožní také zhodnocení vlivu technologie použité k přípravě polymerních dílů, které mají být pokovovány. U vstřikovaných dílů byl použit pouze jeden ze tří způsobů nanášení kovu, a to konkrétně program tvrdé lázně (program 2), který odpovídá technologickým standartům firmy Electroforming s.r.o. Z čistě experimentálních důvodů byla, po konzultaci pracovníků TUL a Electroforming s.r.o., pro hodnocení mechanických vlastností struktur polymer – kov, použita také pokovená (rovněž pomocí programu 2) odlehčená tělesa z materiálu ABS zhotovená 3D tiskem metodou FDM.

4.1 Vyhodnocení tahových vlastností

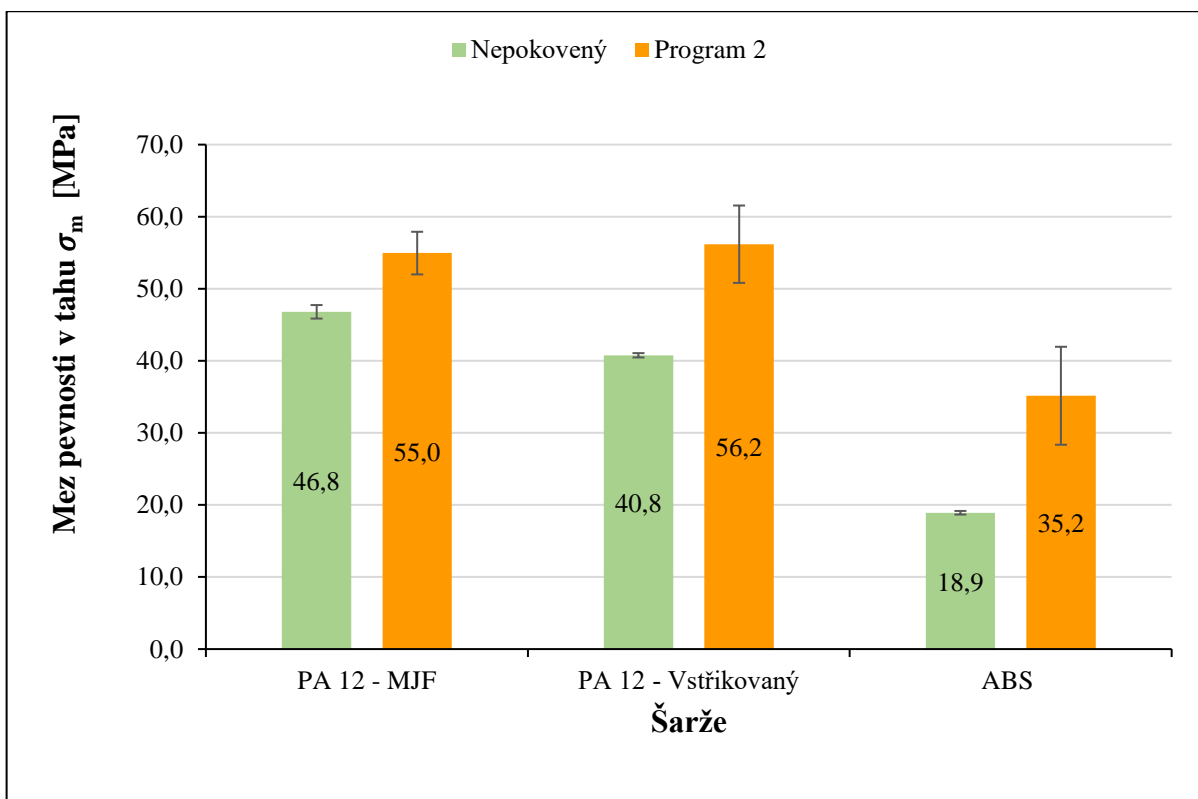
Tahové vlastnosti struktur polymer – kov byly stanoveny podle normy ČSN EN ISO 527–1, 2. Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v tab. 9, byly sestrojeny grafické závislosti pevnosti v tahu (σ_m), modulu pružnosti v tahu (E_t) a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení (ε_{tb}) na metodě (programu) povrchové úpravy polymerního dílu.

Z obr. 26 je patrné, že pokovením 3D tisknutých dílů z PA 12 pomocí programu 1 (měkká lázeň), došlo k 27% navýšení meze pevnosti v tahu. Program 2 (tvrdá lázeň) zvýšil mez pevnosti v tahu struktury polymer – kov pouze o 18 %. Vzhledem k rozptylům měřených hodnot je však rozdíl mezi pevnostmi struktur zhotovených programem 1 a 2 na hranici statistické významnosti. Mez pevnosti v tahu u struktur dosažených pokovením PA 12 programem 3, se zvýšila o 32 %. Vzhledem k rozptylům měřených hodnot jsou pevnosti struktur pokovených programem 1 a 3 téměř shodné. Z naměřených výsledků lze konstatovat, že pokovením PA 12 zhotoveného metodou Multi Jet Fusion došlo při použití všech pokovovacích programů k jednoznačnému nárůstu meze pevnosti v tahu. Nepatrně vyšší mez pevnosti v tahu bylo dosaženo programem 3, přičemž důvod nárůstu by mohl být vysvětlen použitým technologickým postupem, kdy se na polymer střídavě nanášely vrstvy mědi. To mohlo mít za důsledek usměrnění napětí mezi jednotlivými měděnými vrstvami a tím ho rozložit na menší složky. Naopak u programu 2 dosáhla mez pevnosti v tahu nejnižšího navýšení, které bylo způsobeno vyšší tvrdostí lázně.

Při pohledu na obr. 27, který reprezentuje porovnání šarží pokovených programem 2, došlo k nejvyššímu nárůstu meze pevnosti v tahu u polymeru ABS, jehož hodnota se zvýšila o 86 %. V případě vstřikovaného PA 12 došlo ke zvýšení meze pevnosti v tahu o 38 %, zatímco u dílu PA 12 z aditivní technologie MJF byl tento nárůst pouze 18 %. Z výsledků průměrné tloušťky měděné vrstvy (viz tab. 13 a tab. 14) nelze vyloučit, že příčinou vyššího nárůstu pevnosti v tahu u vstřikovaných dílů může být vyšší tloušťka měděné vrstvy (cca o 10 μm).



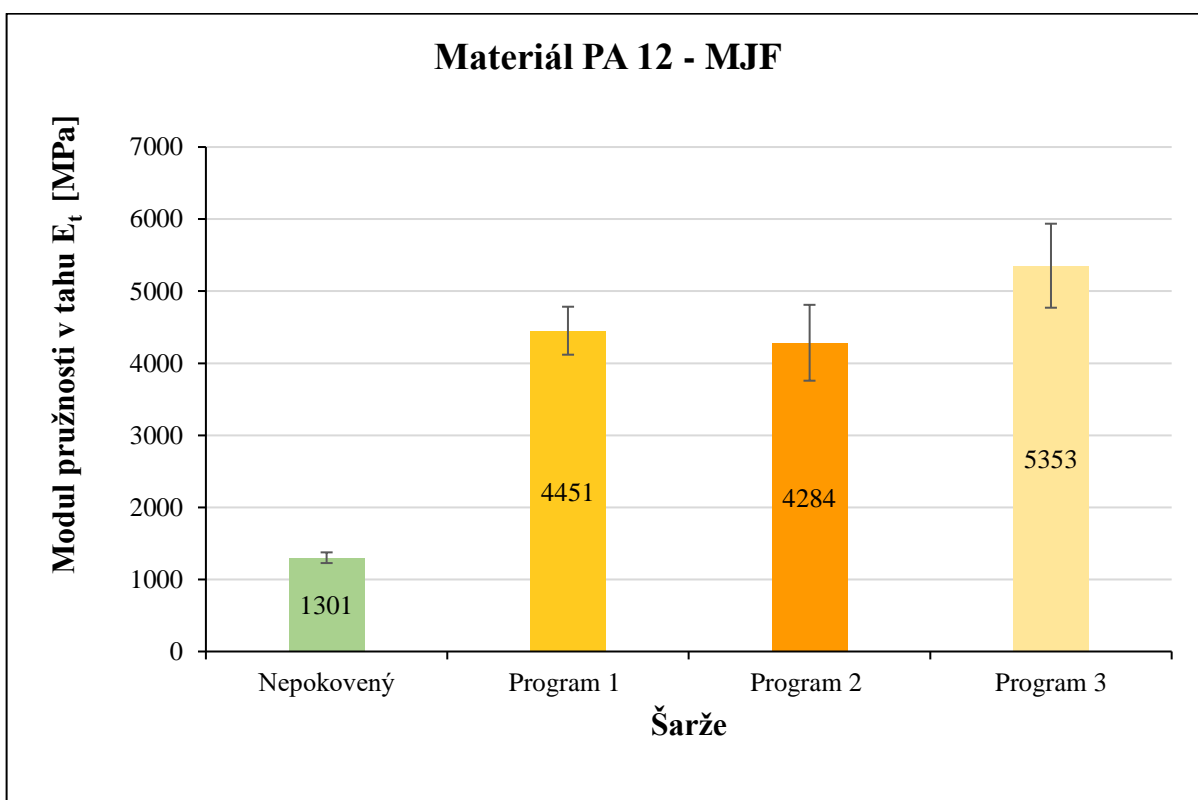
Obr. 26 Mez pevnosti v tahu struktury z materiálu PA 12 – MJF (bez pokovení a s pokovením dle programu 1 až 3)



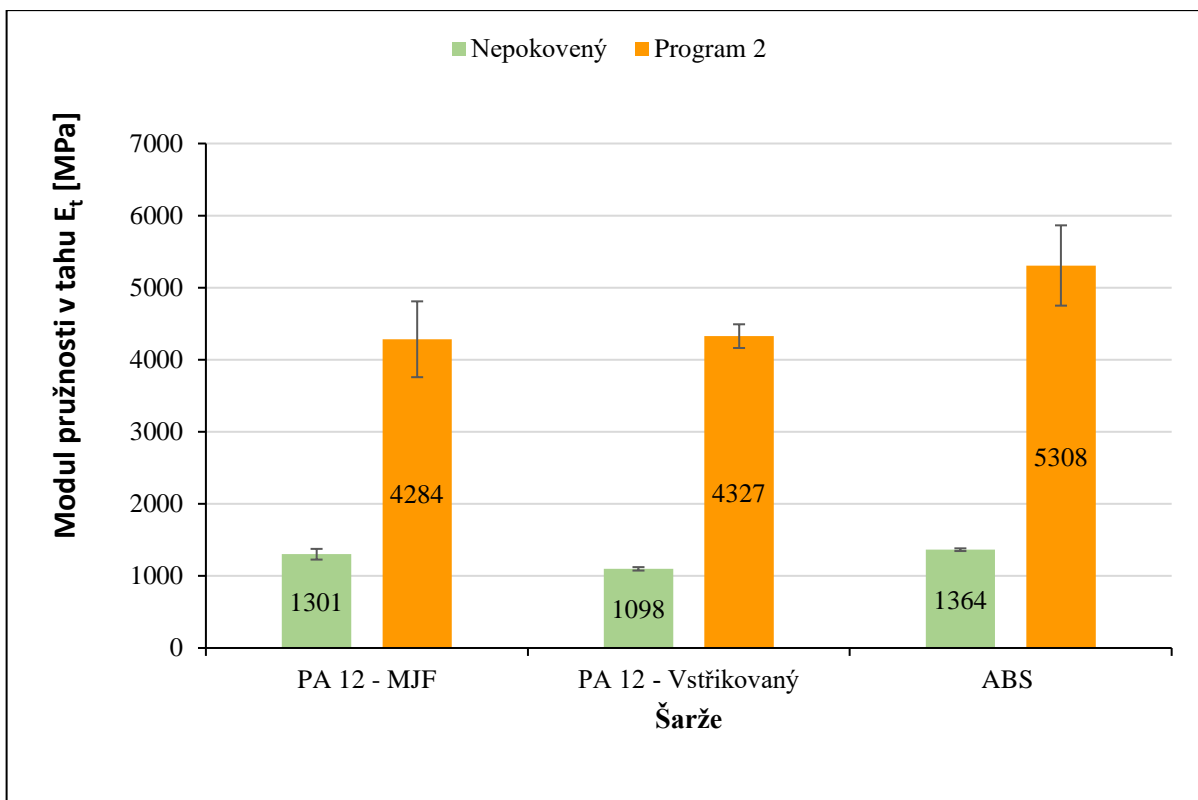
Obr. 27 Porovnání meze pevnosti v tahu struktur z PA 12 – MJF, PA 12 – vstřikovaného a ABS pokovených programem 2

Další hodnocenou vlastností při tahovém zatížení byl modul pružnosti v tahu. Z obr. 28 je patrné, že nanesením měděné vrstvy na PA 12 – MJF pokovovacím programem 1, bylo docíleno zvýšení modulu pružnosti 3,4krát, obdobně jako u programu pokovení 2, kde byl tento nárůst 3,3krát. Použitím programu 3 (střídání měkké a tvrdé lázně) došlo ke zvýšení modulu pružnosti v tahu 4,1 krát. Pokovením došlo k navýšení modulu pružnosti v tahu ve všech případech použitých technologických postupů pokovení. K nejvyššímu nárůstu došlo u programu 3. To může být vysvětleno principem tohoto programu, kdy docházelo ke střídání lázní. Důsledkem toho by se během působení zatížení mohlo napětí rozložit mezi nanesené vrstvy mědi.

U struktury polymer – kov, kde bylo realizováno nanesení měděné vrstvy programem 2, došlo k nejvyššímu nárůstu modulu pružnosti u struktur s polymerem na bázi ABS a PA 12 vyrobených vstřikováním (cca 3,9krát), což je zobrazeno na obr. 29. Nepatrně vyšší nárůst modulu pružnosti u vstřikovaného polyamidu (oproti aditivní výrobě) může být dán tloušťkou měděné vrstvy.



Obr. 28 Modul pružnosti v tahu struktury z materiálu PA 12 – MJF (bez pokovení a s pokovením dle programu 1 až 3)



Obr. 29 Porovnání modulu pružnosti v tahu struktur z PA 12 – MJF, PA 12 – vstřikovaného a ABS pokovených programem 2

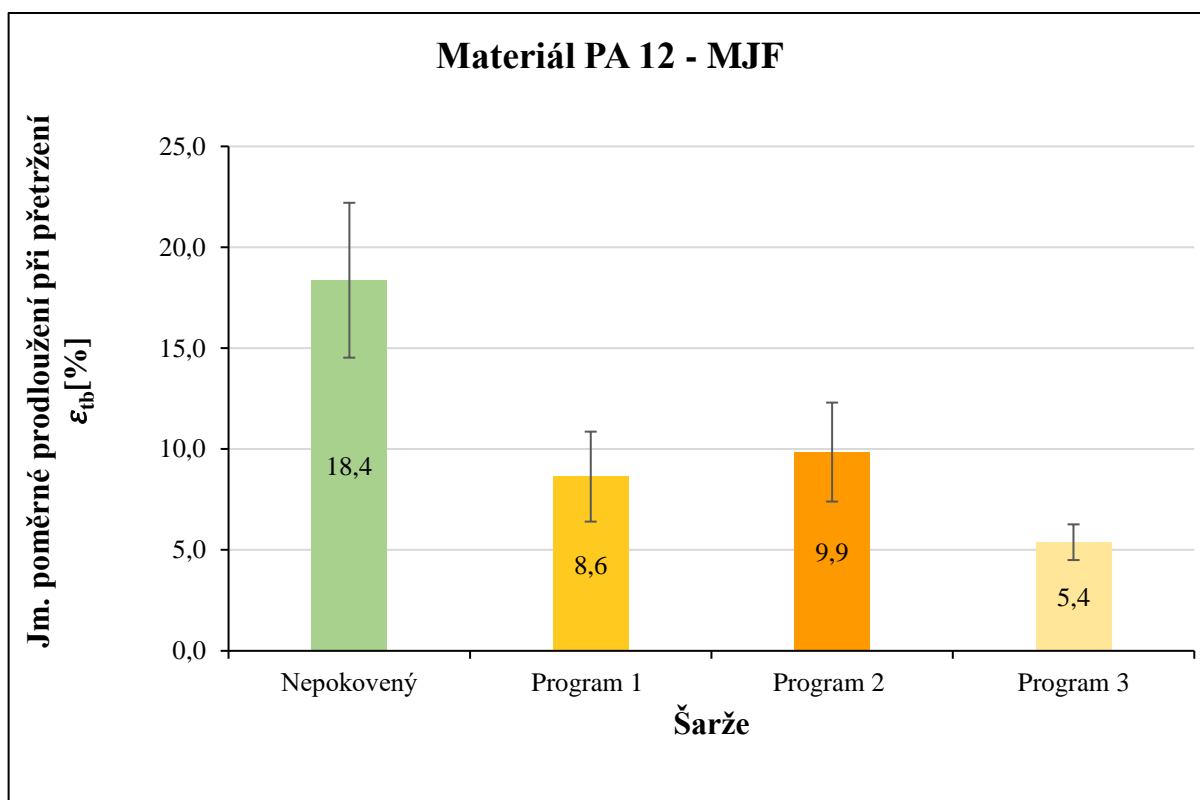
Z naměřených výsledků tahových zkoušek lze dále konstatovat, že nanesením měděné vrstvy na PA 12 – MJF programem 1 a 2, se jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (tj. celková tažnost struktury polymer – kov) snížila cca 2krát (vzhledem k směrodatným odchylkám není v celkové tažnosti u vytvořených struktur programem 1 a 2 rozdíl), viz obr. 30. Oproti tomu při nanesení kovové vrstvy programem 3 se celková tažnost snížila 3,4krát, což koresponduje s nejvyšším nárůstem pevnosti a modulu pružnosti v tahu u těchto vzorků, viz obr. 26 a obr. 28. Pokovením PA 12 – MJF měděnou vrstvou vedlo ke snížení celkové tažnosti ve všech třech případech technologických postupů bez ohledu na volbu pokovovacího programu. Pokles celkové tažnosti struktur polymer – kov je způsoben zvýšením jejich pevnosti a tuhosti v důsledku velmi dobré adheze měděné vrstvy k povrchu polymeru PA 12 zhotoveného aditivní technologií MJF.

Při porovnání polymerních struktur PA 12 pokovených postupem odpovídající programu 2 (tvrdá lázeň), je zřejmé, že struktury se vstřikovaným PA 12 dosahují výrazně vyšších hodnot celkové tažnosti než struktury, kde je díl z PA 12 vyroben aditivní technologií MJF. Toto je dáno principem technologie MJF, kdy je při 3D tisku aplikováno na polyamidový prášek fixační činidlo ve formě drobných kapiček obsahující uhlík (viz kap. 2.1.3), které působí jako barvivo,

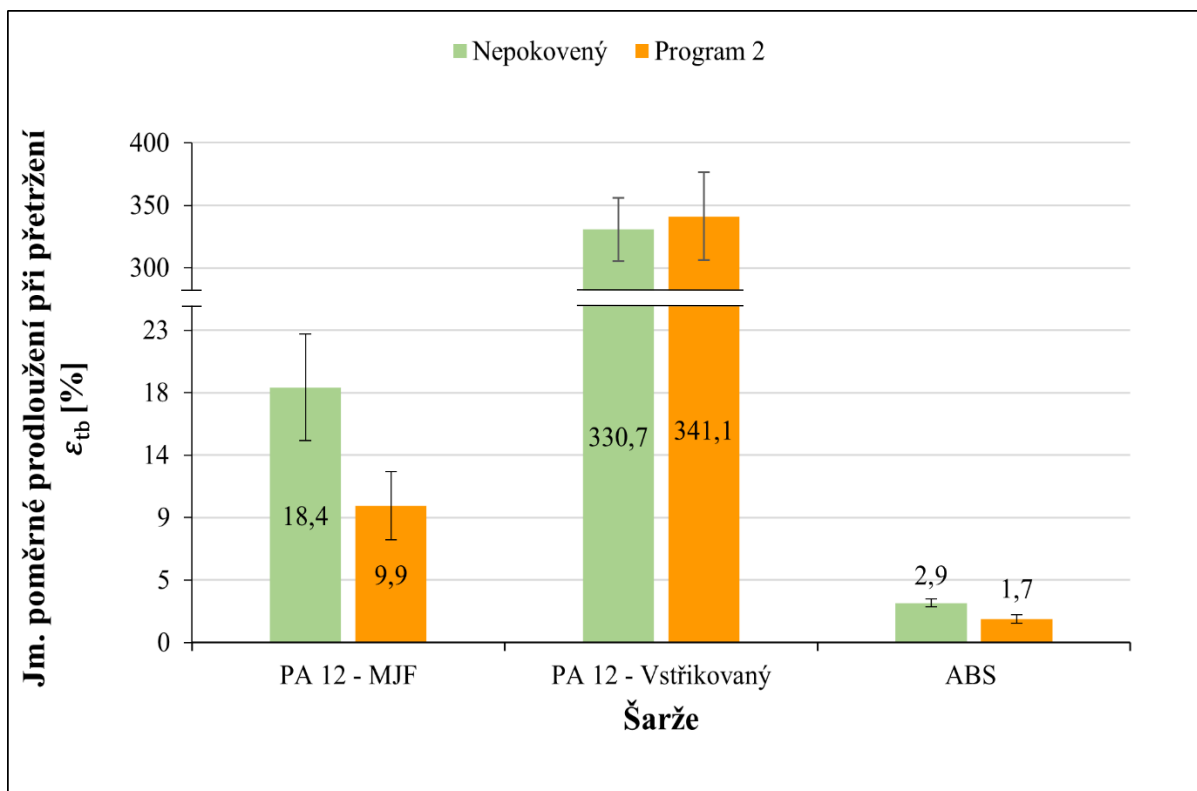
aby došlo k vyšší absorpci záření z infračervených lamp [51]. To způsobuje tavení a spojování polymeru a díky uhlíku se zvyšuje jeho pevnost a tuhost, současně snižuje celkovou tažnost. Svědčí o tom ostatně také mechanické vlastnosti uvedené na obr. 27 a obr. 29. Vstříkované díly z PA 12 odpovídají struktuře bez fixačního činidla obsahující uhlík.

Vlivem špatné adheze měděné vrstvy k polyamidovým výstřikům a vysoké tažnosti polyamidu (na rozdíl od aditivních dílů) nedochází u těchto struktur ke snížení celkové tažnosti. Při tahovém zatěžování, po překonání meze pevnosti, dochází k nehomogenní plastické deformaci, která se projeví zúžením průřezu tělesa a porušením kovové vrstvy, z tohoto důvodu pak celková tažnost odpovídá tažnosti vlastního polyamidu, viz obr. 31.

Pokovení polymeru ABS programem 2 mělo za následek snížení celkové tažnosti struktury o 71 %, tento pokles je způsoben obdobně jako u PA 12 – MJF v důsledku zvýšení pevnosti a tuhosti připravené struktury a dobrou adhezí měděné vrstvy na upravený povrch polymeru ABS.



Obr. 30 Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení struktury z materiálu PA 12 – MJF (bez pokovení a s pokovením dle programu 1 až 3)



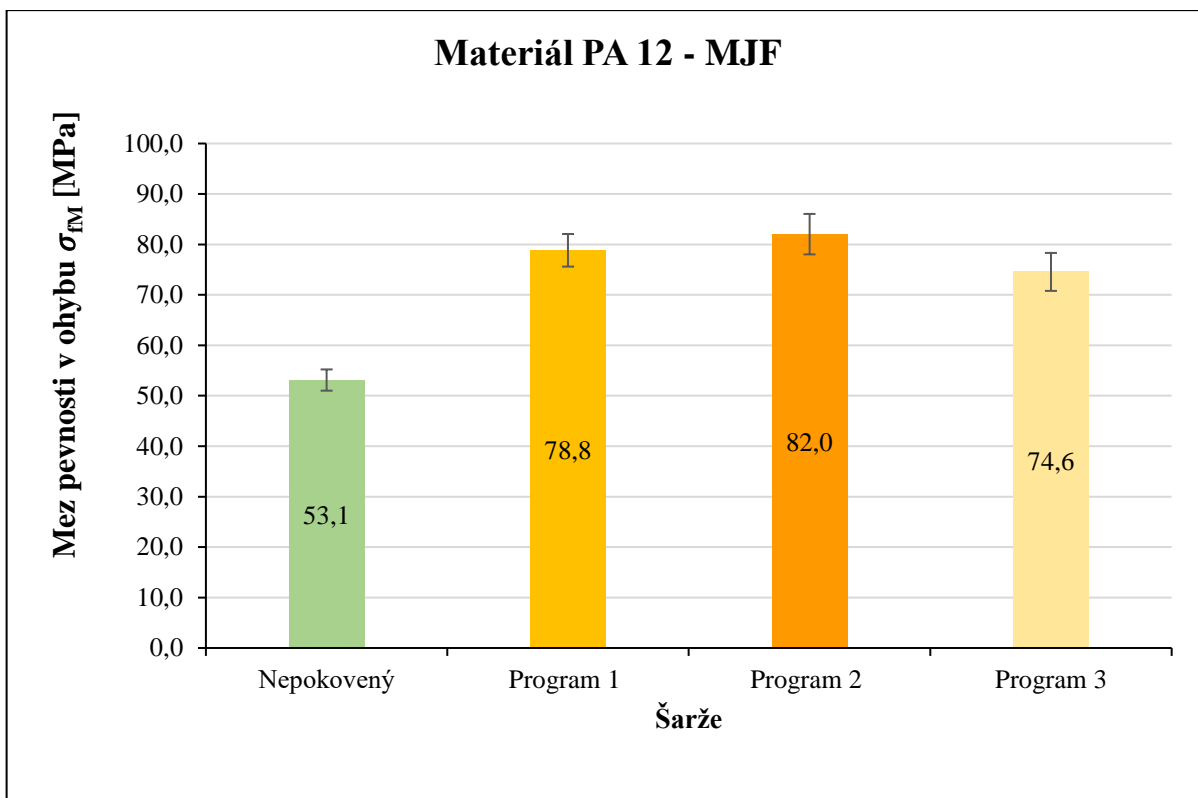
Obr. 31 Porovnání jmenovitých poměrných prodloužení při přetržení struktur z PA 12 – MJF, PA 12 vstřikovaného a ABS pokovených programem 2

4.2 Vyhodnocení ohybových vlastností

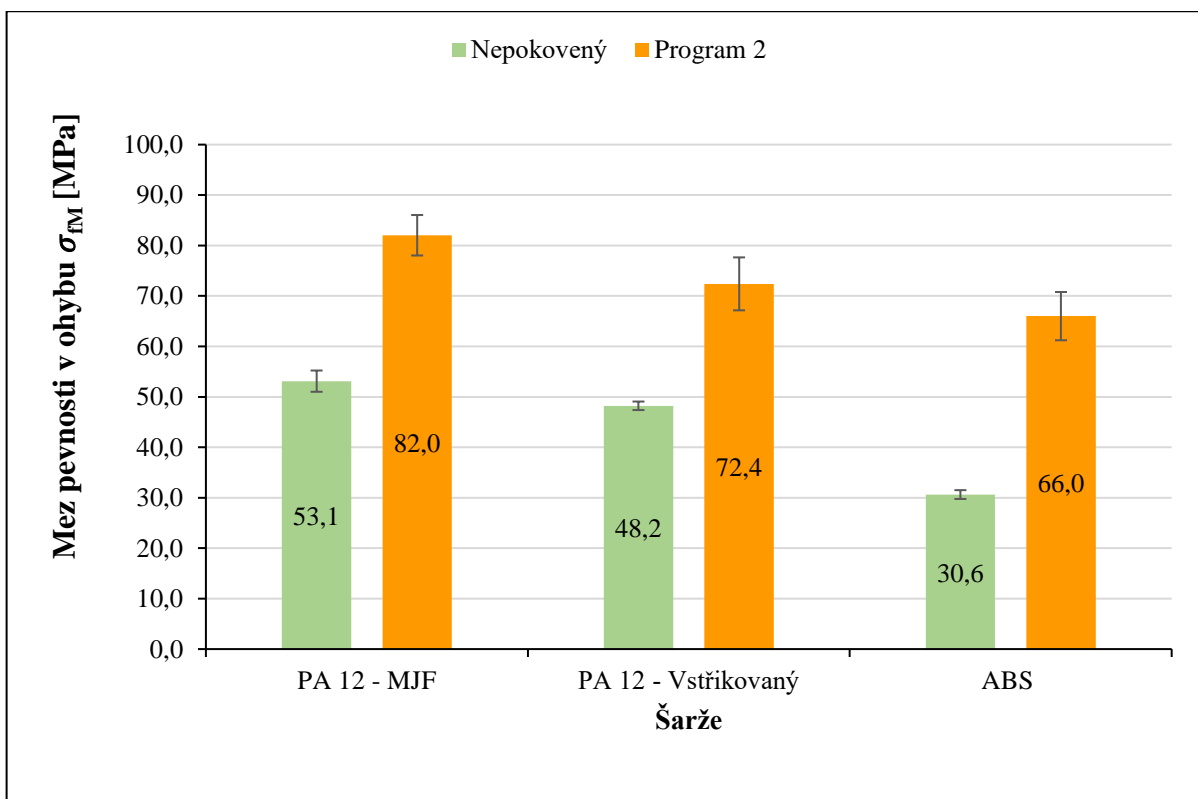
Stanovení ohybových vlastností pokovených zkušebních vzorků bylo provedeno v souladu s ČSN EN ISO 178. Z naměřených hodnot, které byly naměřeny a zaneseny do tab. 10 a tab. 11, byly vytvořeny grafické závislosti pevnosti v ohybu (σ_{FM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f) jednotlivých šarží struktur polymer – kov.

Ze stanovení ohybových vlastností lze u struktur s PA 12 – MJF, uvést, že u programu 1 byl zaznamenán 48% nárůst meze pevnosti v ohybu a u programu 2 činil tento nárůst 54 % (viz obr. 32). Vzhledem k rozptýlům měřených hodnot je rozdíl pevnosti struktur zhotovených postupem pokovení dle programu 1 a 2 statisticky nevýznamný. Při použití programu 3 došlo k navýšení meze pevnosti v ohybu „pouze“ o 41 %. Použití technologického postupu pokovení dle programu 2, kdy se na polymer PA 12 – MJF nanasla tvrdá měď, zapříčinilo nejvyšší hodnotu meze pevnosti v ohybu.

Z obr. 33 je patrné, že pokovením vstřikovaného i aditivního polyamidového dílu došlo k navýšení meze pevnosti oproti původní hodnotě o 50 %. U struktur s polymerem na bázi ABS se tato hodnota zvýšila 2,2krát.



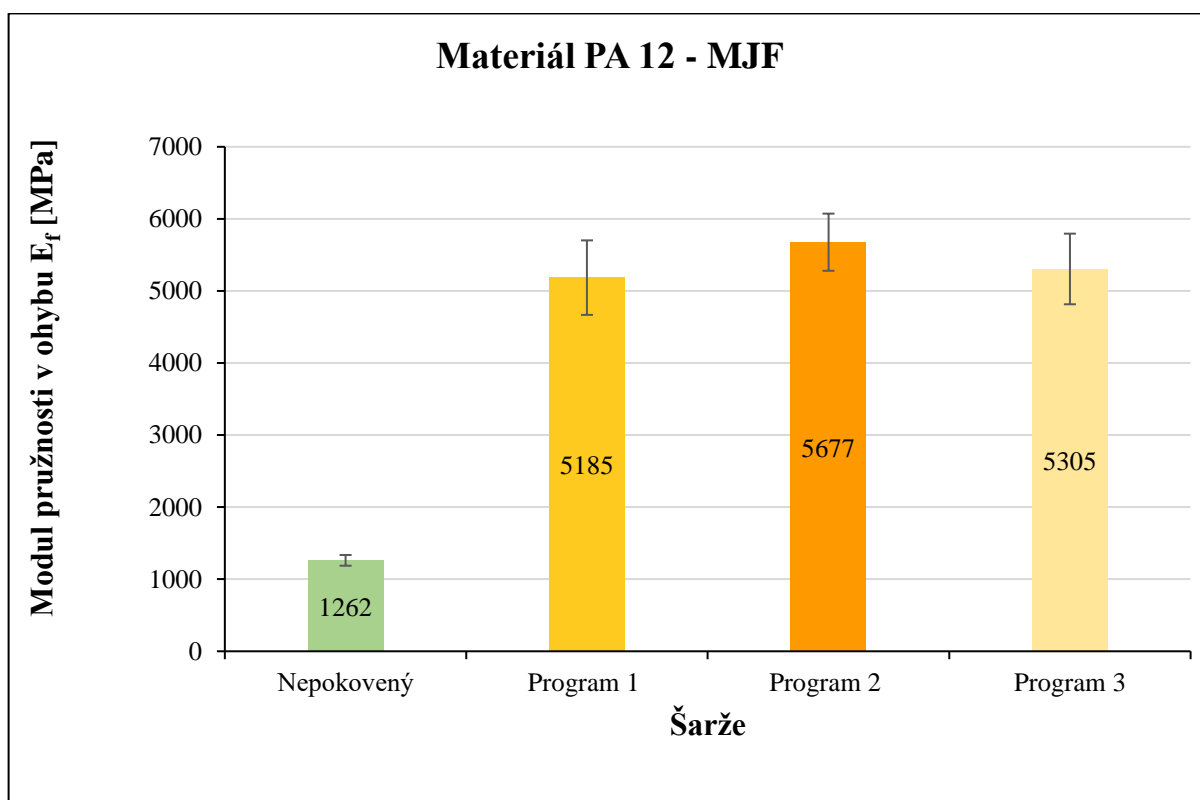
Obr. 32 Mez pevnosti v ohybu struktury z materiálu PA 12 – MJF (bez pokovení a s pokovením dle programu 1 až 3)



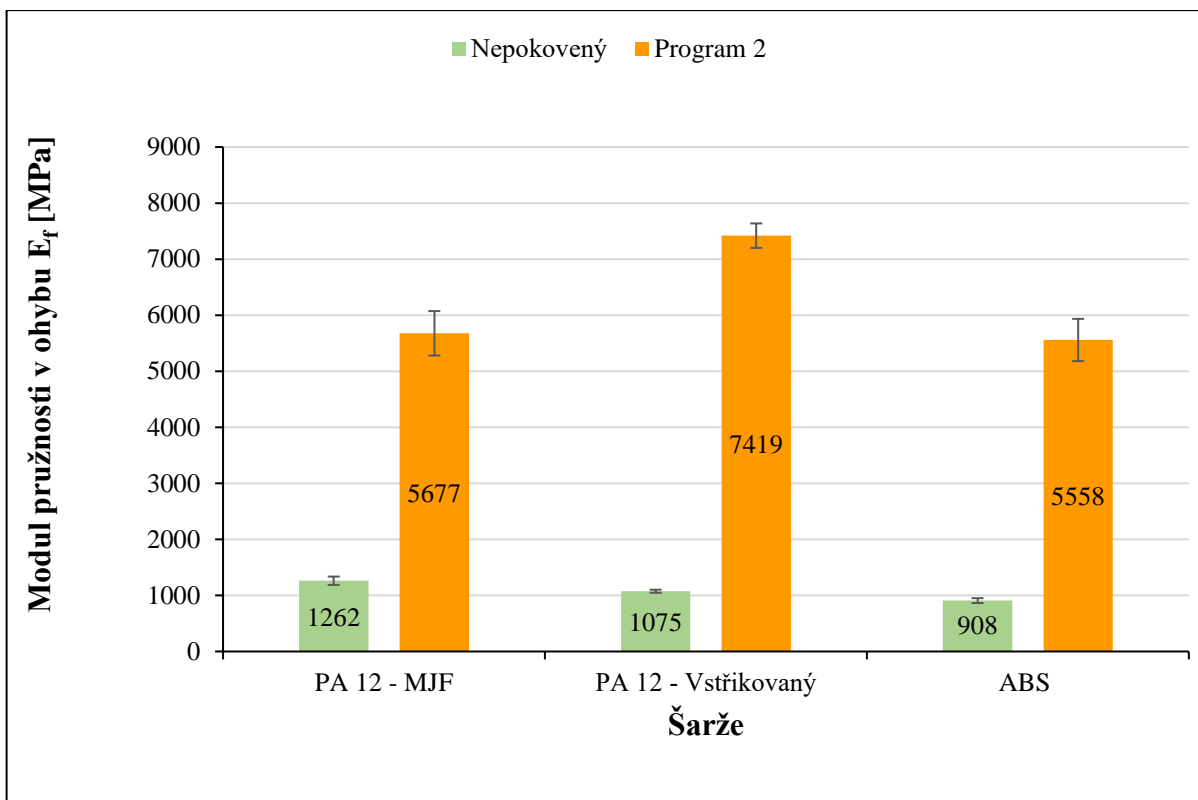
Obr. 33 Porovnání meze pevnosti v ohybu struktur z PA 12 – MJF, PA 12 – vstřikovaného a ABS pokovených programem 2

Na základě výsledků modulu pružnosti v ohybu lze konstatovat, že u struktury polymer – kov došlo v souladu s očekáváním k podstatnému zvýšení její hodnoty (viz obr. 34) a to zejména u postupu pokovení dle programu 2 (tvrdá měď), kde byl zaznamenán nárůst až 4,5krát.

Při porovnání struktur, které se liší polymerem nebo technologií jeho zpracování, je při aplikaci postupu pokovení odpovídající programu 2 zřejmé, že nejvyšších změn v tuhosti bylo zaznamenáno u struktury se vstříkovaným PA 12 (viz obr. 35), obdobně jako při hodnocení modulu pružnosti v tahu. Tuhost v ohybu se u vstříkovaného PA 12 v důsledku pokovení zvýšila 6,9krát, zatímco u aditivovaného PA 12 byl tento nárůst „pouze“ 4,5krát. Opět je to s největší pravděpodobností dáno větší tloušťkou měděné vrstvy u vstříkovaných dílů (cca 104 μm) oproti strukturám s polymerním dílem zhotoveným aditivní technologií (kde je průměrná tloušťka měděné vrstvy u tělesa pro ohybovou zkoušku 64 μm), viz tab. 13 a tab. 14.



Obr. 34 Modul pružnosti v ohybu struktury z materiálu PA 12 – MJF (bez pokovení a s pokovením dle programu 1 až 3)



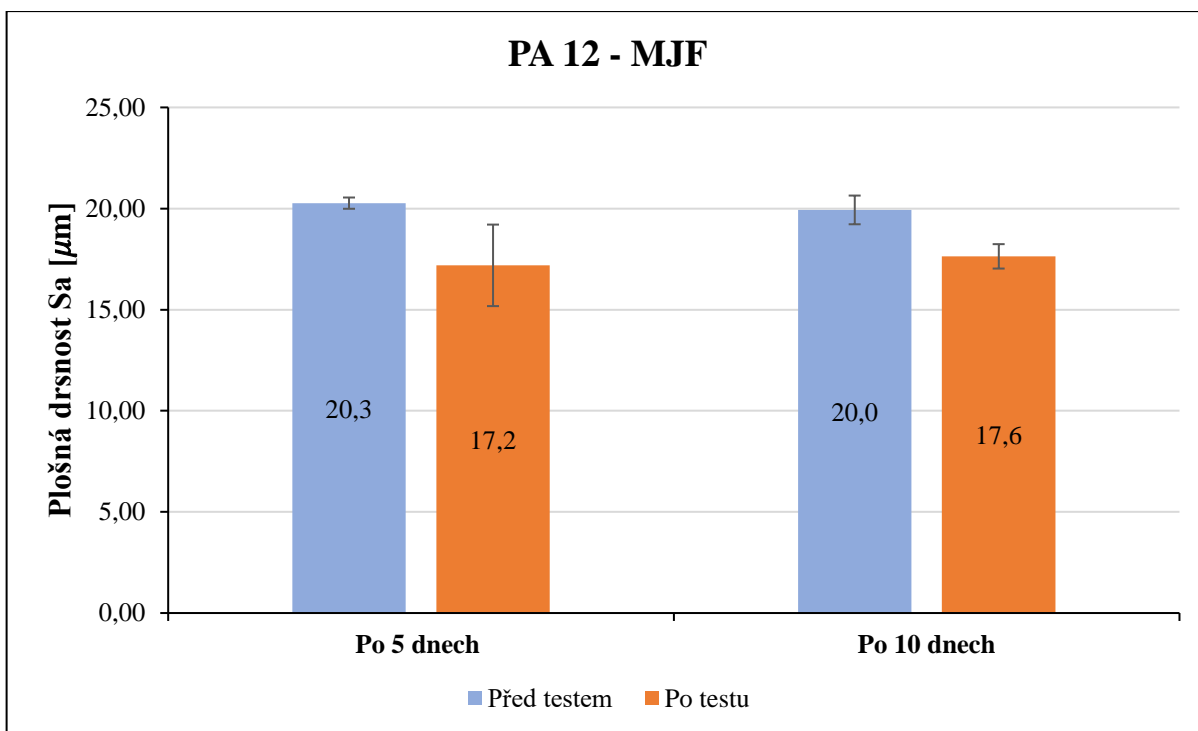
Obr. 35 Porovnání modulu pružnosti v ohybu struktur z PA 12 – MJF, PA 12 – vstřikovaného a ABS pokovených programem 2

4.3 Vyhodnocení vlivu klimatického stárnutí na integritu povrchu polymer – kov

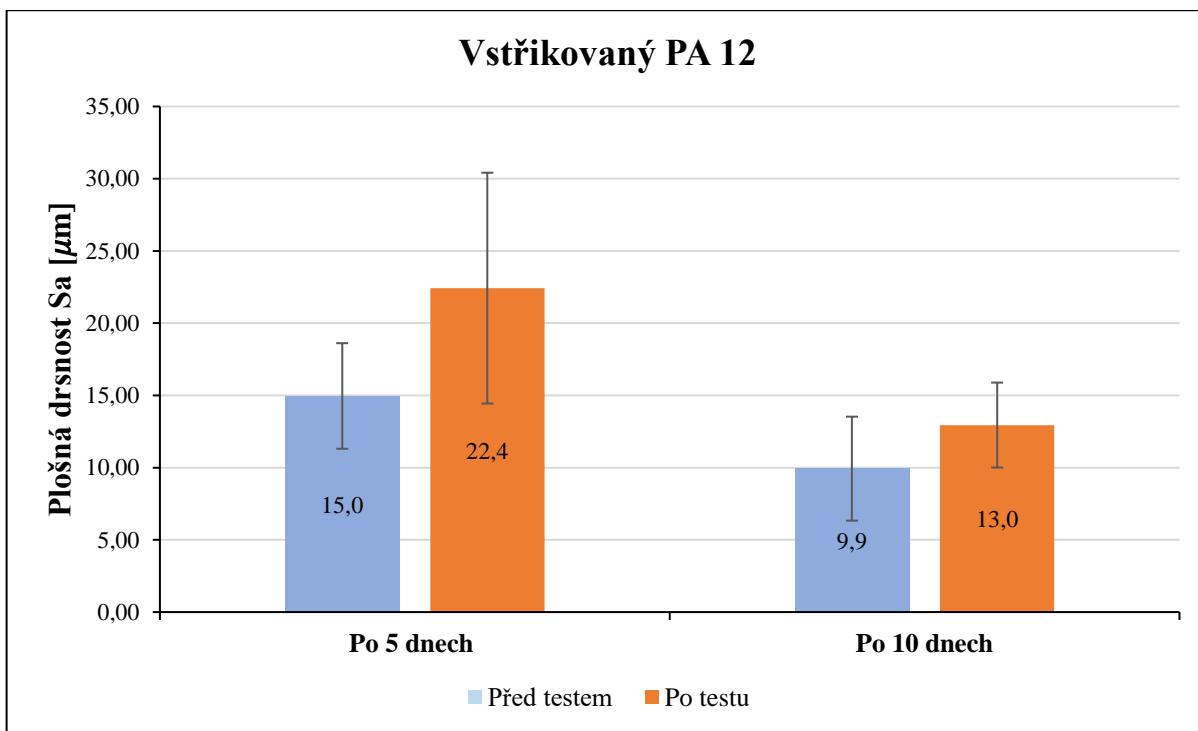
Vyhodnocení zkoušky klimatických změn kovových vrstev, které byly na polymer PA 12 naneseny elektrochemicky (galvanoplastikou), je provedeno na základě změny plošné drsnosti povrchu, jeho tvrdosti a mikroskopickým studiem povrchu i adheze kovové vrstvy k polymeru.

Z naměřených hodnot plošných drsností vzorků z PA 12 – MJF vyplývá, že v průběhu klimatického stárnutí dochází ke snížení plošné drsnosti měděné vrstvy (viz obr. 36). Vysvětleno to může být tím, že během testu, kdy byly vzorky vystaveny cyklickým změnám teploty a vlhkosti, se na povrchu naneseného kovu tvořil kondenzát. Zároveň docházelo k jeho oxidaci, která zapříčinila tvorbu korozních produktů na povrchu měděné vrstvy. Kvůli nerovnoměrnému profilu měděné vrstvy došlo při tvorbě korozních produktů ke spojitému zaplnění prohlubní v místech s nejnižší nanesenou tloušťkou mědi. Tím mohlo dojít k vyhlazení povrchu, které ještě mohl umocnit tvořící se kondenzát. V důsledku těchto vlivů na měděnou vrstvu se mohla snížit plošná drsnost u struktury polymer – kov z PA 12 – MJF. Opačná situace nastala u vzorků ze vstřikovaného PA 12, kdy plošná drsnost povrchové vrstvy naopak vzrostla (viz obr. 37). S ohledem na velikost směrodatné odchylky to je ovšem spíše informativní výsledek, vzhledem k nekvalitnímu povrchu kovové vrstvy už před uskutečněním

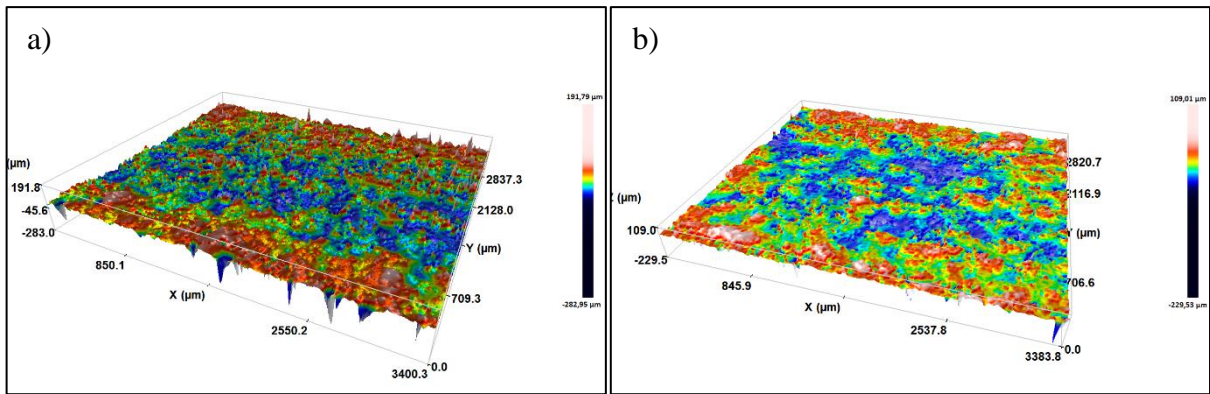
klimatického testu. Na obr. 38 a obr. 39 jsou pro porovnání znázorněny příklady měření plošné drsnosti vzorků před a po 10 cyklech klimatického testu, kde lze vidět změny v drsnosti povrchu.



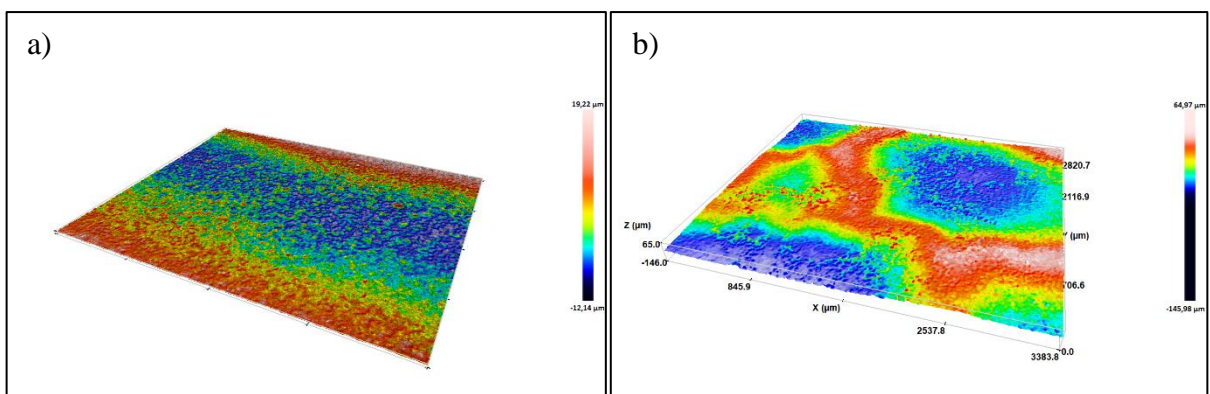
Obr. 36 Plošná drsnost struktury z materiálu PA 12 – MJF před klimatickým testem PV 1200, v průběhu testu (po 5 dnech) a po jeho ukončení (po 10 dnech)



Obr. 37 Plošná drsnost struktury ze vstříkovaného PA 12 před klimatickým testem PV 1200, v průběhu testu (po 5 dnech) a po jeho ukončení (po 10 dnech)

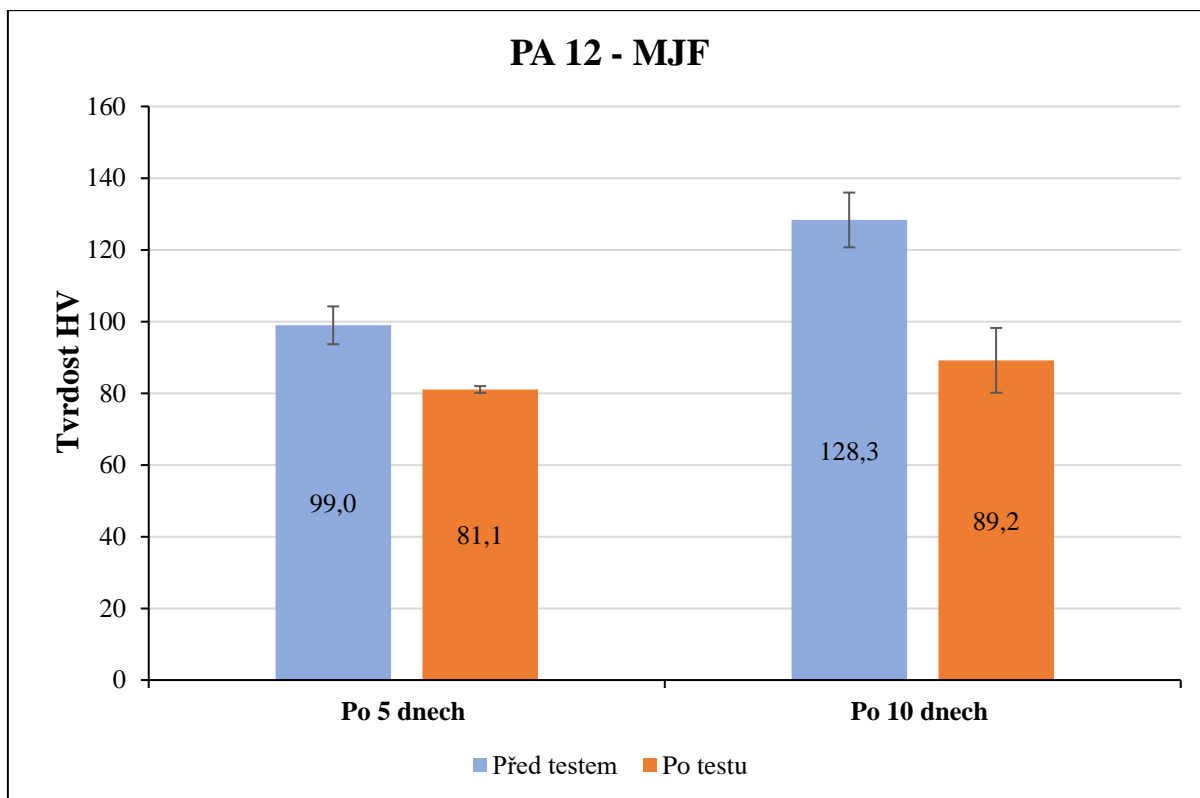


Obr. 38 Porovnání plošné drsnosti struktury z materiálu PA 12 – MJF
a) před začátkem klimatického testu, b) po 10 cyklech klimatického testu

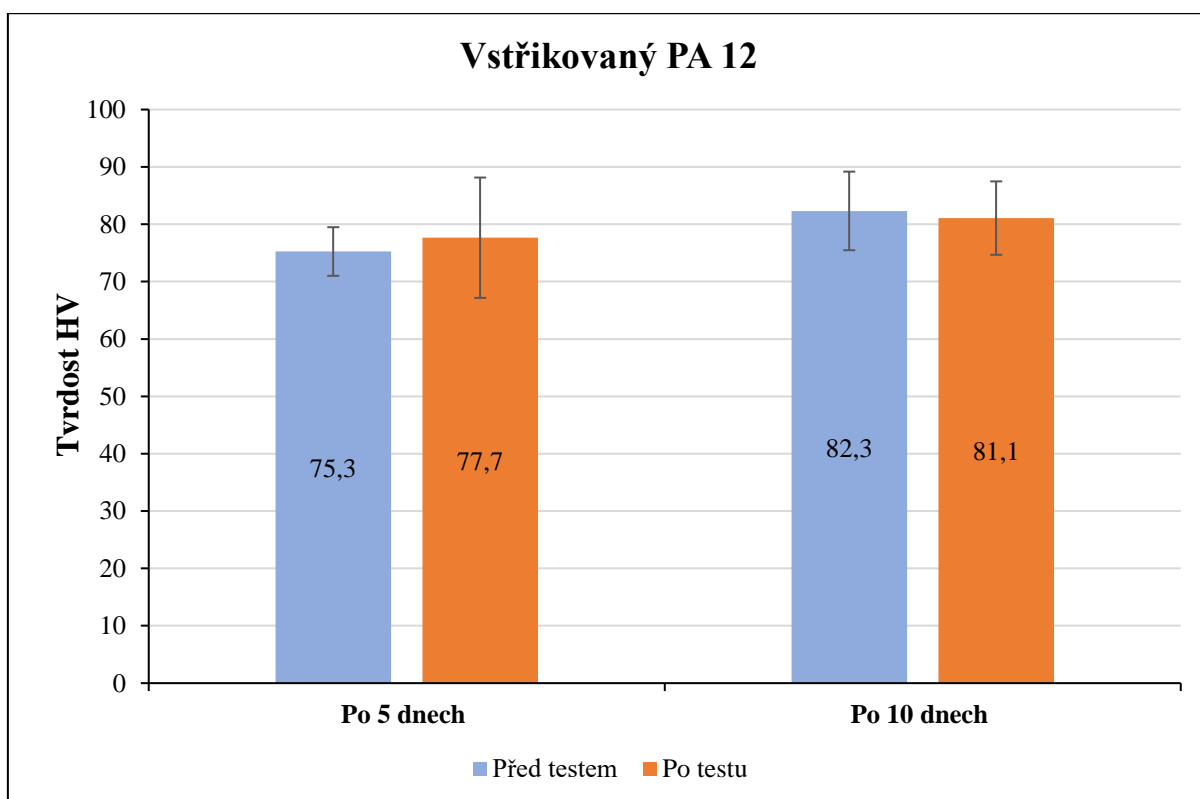


Obr. 39 Porovnání plošné drsnosti struktury ze vstřikovaného PA 12
a) před začátkem klimatického testu, b) po 10 cyklech klimatického testu

Z obr. 40 je patrné, že tvrdost nanesené měděné vrstvy u struktur polymer – kov na bázi PA 12 – MJF se v průběhu klimatického stárnutí snížila. To může být vysvětleno mechanickým namáháním měděné vrstvy díky rozdílné teplotní roztažnosti polymeru a měděné vrstvy. Během testu došlo k teplotně – vlhkostnímu namáhání, což mohlo zapříčinit rozměrové změny polymeru a vést ke snížení tvrdosti nanesené vrstvy. Naměřené hodnoty tvrdostí měděných vrstev struktur ze vstřikovaného PA 12 jsou zobrazeny na obr. 41. Z těchto hodnot je, vzhledem k velikosti jejich rozptylů, zřejmé, že se tvrdost vrstvy v průběhu klimatického stárnutí nezměnila. Důvodem může být špatná přilnavost měděné vrstvy ke vstřikovanému PA 12, kvůli které by měděná vrstva této struktury nebyla během klimatického stárnutí mechanicky namáhána (vlivem rozdílné roztažnosti nanesené mědi a vstřikovaného PA 12). Díky tomu by nedošlo ke změně její tvrdosti.

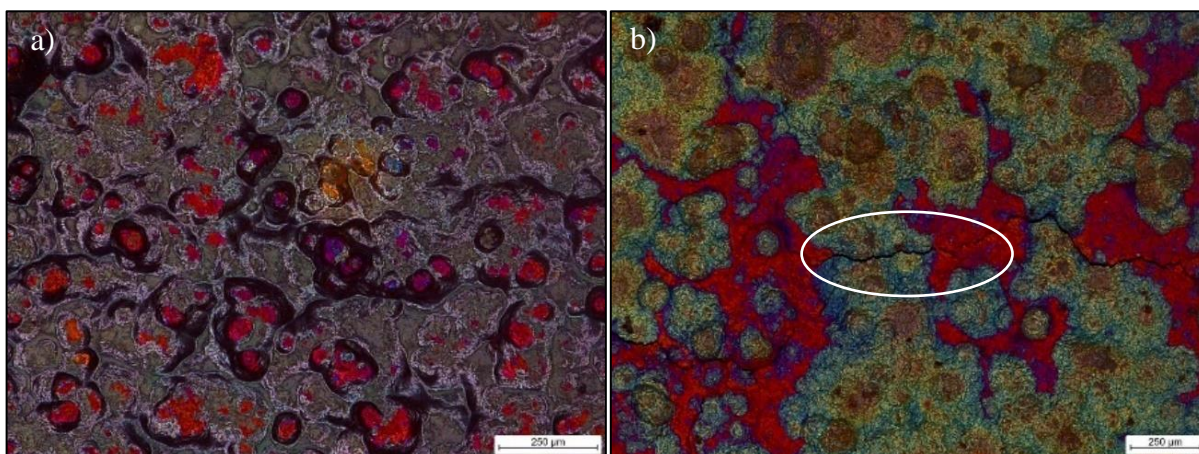


Obr. 40 Tvrdość struktury z materiálu PA 12 – MJF před klimatickým testem PV 1200, v průběhu testu (po 5 dnech) a po jeho ukončení (po 10 dnech)



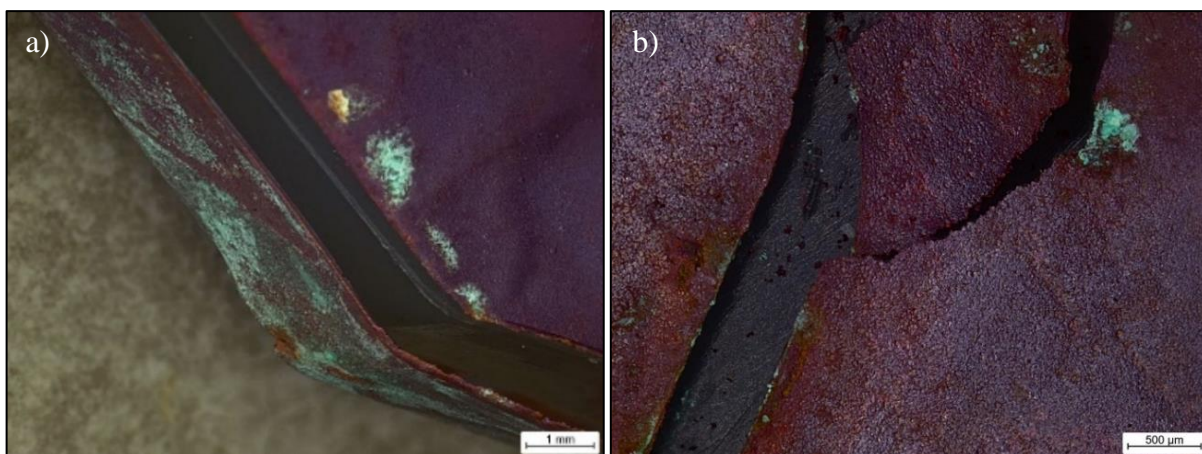
Obr. 41 Tvrdość struktury ze vstřikovaného PA 12 před klimatickým testem PV 1200 v průběhu testu (po 5 dnech) a po jeho ukončení (po 10 dnech)

Povrch struktury polymer – kov byl hodnocen také mikroskopicky a získané poznatky jsou zobrazeny na obr. 42 až obr. 44. Z mikroskopické studie lze uvést, že nanosená kovová vrstva na dílu z PA 12 – MJF zatíženého 5 dní, nepopraskala a ani nedošlo k její delaminaci od polymeru. U tohoto dílu nastala pouze oxidace na jeho povrchu (viz obr. 42a). Na nanosené měděné vrstvě zkoušeného vzorku z PA 12 – MJF umístěného v klimatické komoře 10 dní se objevily praskliny, které mohly být způsobeny, podobně jako u změn tvrdostí, mechanickým namáháním měděné vrstvy díky rozdílné teplotní roztažnosti polymeru a měděné vrstvy. Na obr. 42b je na tomto tělese znázorněna prasklina na povrchu kovové vrstvy v důsledku klimatického zatížení. Během testu došlo k teplotně – vlhkostnímu namáhání, což mohlo zapříčinit rozměrové změny polymeru a vést k prasklinám v místech, kde byla nanosená vrstva mědi nejslabší. Měděná vrstva ovšem nedelaminovala od povrchu polymeru, takže porušení povrchové vrstvy zřejmě nebylo způsobeno špatnou adhezí mezi kovovou vrstvou a polyamidovým dílem.



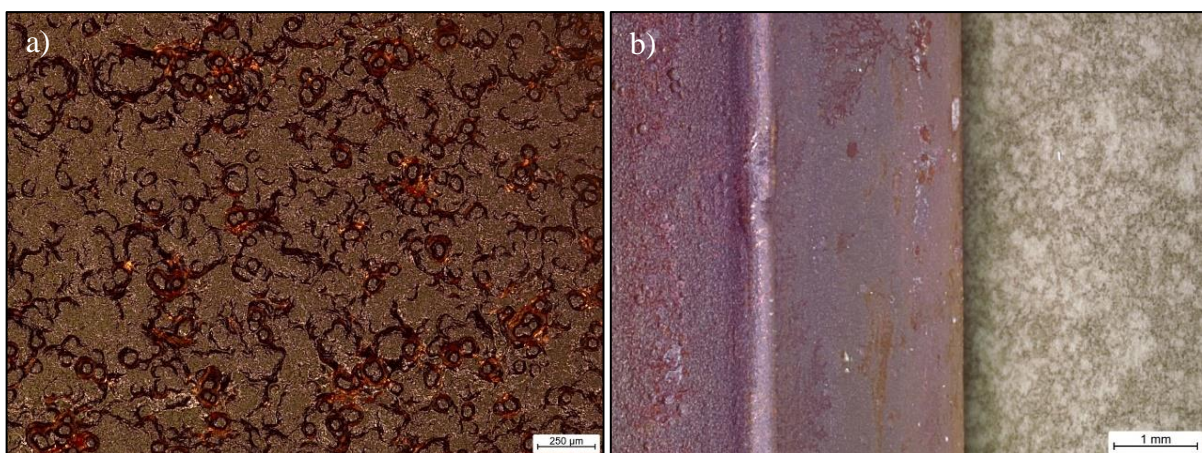
Obr. 42 Povrch struktury z materiálu PA 12 – MJF
*a) v průběhu klimatického testu (po 5 dnech),
 b) s vyznačenou prasklinou po ukončení klimatického testu (po 10 dnech)*

U vstříkovaného PA 12 vlivem nedostatečné adheze a nekvalitního povrchu kovové vrstvy již před testem klimatického stárnutí, bylo v podstatě jisté, že působením klimatického testu dojde k zásadnímu narušení soudržnosti povrchové vrstvy kovu s polymerním dílem. U vzorku vystavenému stárnutí 5 dnů (10 cyklům) došlo podle očekávání ke značnému popraskání a delaminaci kovové vrstvy od polymeru, která nastala převážně na hranách vzorku (viz obr. 43a). Přibližně stejně velký rozsah delaminace a poškození povrchu nastalo i u vzorku, který podstoupil všech 20 cyklů klimatické zkoušky po dobu 10 dnů (viz obr. 43b).



Obr. 43 Povrch struktury z materiálu vstřikovaného PA 12
a) v průběhu klimatického testu (po 5 dnech), b) po ukončení klimatického testu (po 10 dnech)

Pro porovnání povrchových změn struktur polymer – kov před a po klimatickém stárnutí dle PV 1200 jsou na obr. 44 zobrazeny mikroskopické snímky povrchu aditivovaného a vstřikovaného dílů pokovených mědí.



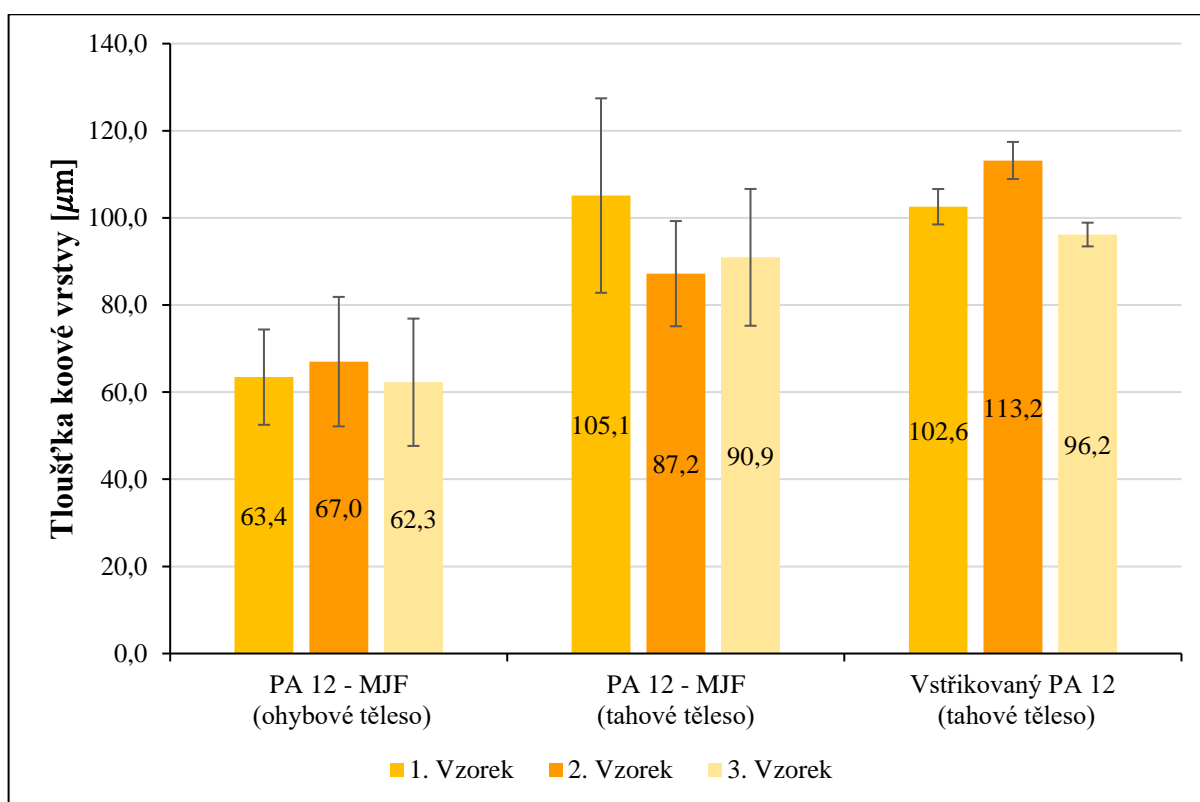
Obr. 44 Povrch struktury polymer – kov před klimatickým testem
a) z materiálu PA 12 – MJF, b) z materiálu vstřikovaného PA 12

4.4 Vyhodnocení tloušťky kovové vrstvy

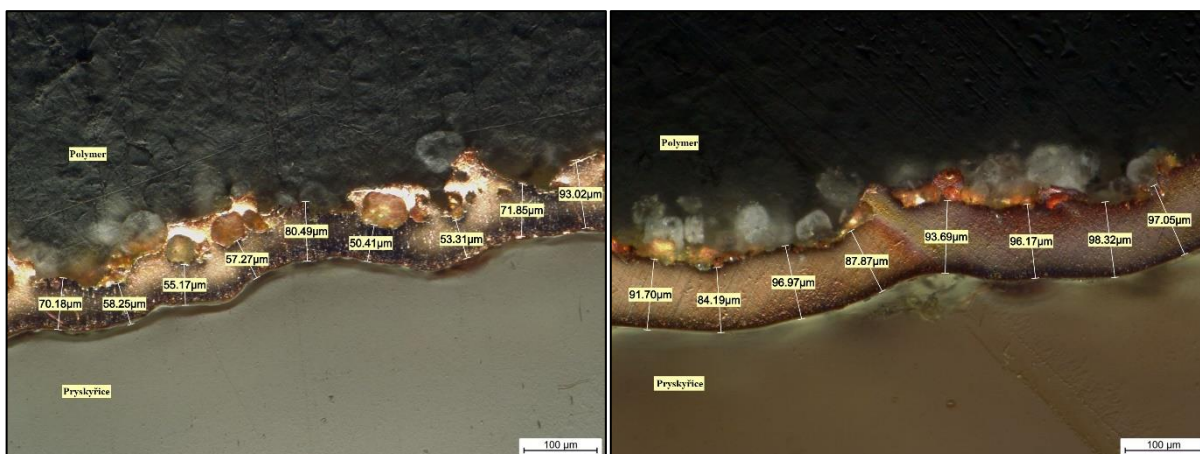
Pro vyhodnocení tlouštěk měděné vrstvy (viz obr. 45) byly použity snímky z optického mikroskopu Leica DVM. Při porovnání tlouštěk jednotlivých těles je patrné, že se naměřené hodnoty liší. U struktur polymer – kov zhotovených z PA 12 – MJF mohou být rozdíly v tloušťkách způsobeny nerovnoměrností povrchu aditivovaného dílu, který nanesená kovová vrstva více méně kopíruje. To má u těchto struktur za následek proměnlivou tloušťku kovové vrstvy. Na obr. 46, který zobrazuje měření tloušťky vrstev u struktur z materiálu PA 12 – MJF, je zřejmé, že záleželo, na jakém místě v řezu se dané měření provede. Z toho důvodu mohou být naměřené hodnoty tlouštěk vrstev u těchto struktur poměrně nepřesné. Na obr. 46 lze také

vidět velmi dobrou adhezi měděné vrstvy k polymernímu materiálu, ke které mohl naopak nesouměrný povrch výrazně pomoci. Nanášená měděná vrstva se mohla „uzamknout“ za nesouměrností na povrchu tělesa a tím vytvořit kompaktní strukturu polymer – kov.

Struktury, na jejichž zhotovení byl použit vstříkovaný PA 12, mají naopak relativně malý rozptyl naměřených hodnot tloušťek měděných vrstev. Tyto struktury mají díky hladkému povrchu vstříkovaného PA 12 (hladký povrch je dán výrobní technologií vstříkovaní polymeru a kvalitou povrchu použité formy) poměrně rovnoměrnou tloušťku nanesené vrstvy, která je zobrazena na obr. 47. Na obr. 47 lze také spatřit špatnou adhezi měděné vrstvy ke vstříkovanému PA 12, která se přichytila převážně k hranám dílu (viz obr. 47b). Důvodem špatné přilnavosti kovové vrstvy ke vstříkovanému PA 12 může být hladký povrch a povrchové napětí. Vstříkovaný díl sice umožnil nanesení poměrně stejné tloušťky kovové vrstvy, ovšem s minimální adhezí k polymeru. To mohlo zapříčinit její delaminaci od polymerního dílu. Tuto skutečnost mohly ještě umocnit maziva, která slouží k bezproblémovému odformování vstříkovaných těles z formy a mohla tak zamezit správnému nanesení stříbra na povrch polymeru. Z toho důvodu by bylo potřeba najít adekvátní způsob úpravy povrchu vstříkovaných dílů, který by přizpůsobil jejich povrchové napětí pro nanesení kovové vrstvy.



Obr. 45 Tloušťky nanesené měděné vrstvy na jednotlivých tělesech



Obr. 46 Měření tloušťky měděné vrstvy struktur z materiálu PA 12 – MJF
 a) ohybové těleso, b) tahové těleso



Obr. 47 Měření tloušťky měděné vrstvy struktur z materiálu vstřikovaného PA 12
 a) měření tloušťky měděné vrstvy, b) pohled na hranu měřeného vzorku

5 Závěr

Cílem bakalářské práce byla pevnostní analýza struktur polymer – kov. Pokovované polymerní díly byly primárně zhotoveny aditivními technologiemi: Fused Deposition Modeling a Multi Jet Fusion. Nanesení kovu na připravené polymerní díly bylo realizováno ve spolupráci s firmou Electroforming s.r.o., a to elektrochemickým nanesením silných vrstev mědi (metodou galvanoplastiky) pomocí třech technologických postupů: v lázních vylučujících měkčí měď, tvrdší měď a vzájemným střídáním těchto lázní. V rámci experimentálního vývoje byl také hledán adekvátní způsob aktivace, zvodivění a následného pokovení polymerních dílů, které by mohlo navíc vést v budoucnu k automatizované výrobě struktur polymer – kov. Nad rámec zadání bakalářské práce byly rovněž zhotoveny vzorky vstřikováním, které byly použity pro porovnání užitečných vlastností pokovených dílů ze stejného materiálu, ovšem vyrobených rozdílnými technologiemi (3D tiskem a vstřikováním).

Aditivní metodou FDM byly zhotoveny vzorky z materiálů PET-G a ABS. Aby mohly být u těchto těles zahájeny přípravné kroky před jejich pokovením (odmaštění, aktivace a zvodivění povrchu), bylo potřeba upravit jejich povrch, který byl po výrobě pórovitý. To by mohlo zapříčinit nežádoucí nasakování chemikálií z pracovních lázní do pokovované součásti. Úprava povrchu spočívala v krátkém ponoření těchto těles do rozpouštědla na bázi acetonu, čímž mělo dojít k vyhlazení jejich povrchu. Došlo ovšem k deformaci geometrie těles, což zapříčinilo, že tento postup úpravy jejich povrchu není vhodný pro pokovení pomocí galvanoplastiky. Z toho důvodu byla po konzultaci s firmou Electroforming s.r.o., z čistě experimentálních důvodů, pokovena technologickým postupem nanášení tvrdé mědi (programem 2) pouze tělesa z materiálu ABS s odlehčenou strukturou. Aditivní technologií MJF byly vytištěny vzorky z materiálu PA 12, u kterých byl optimalizován reprodukovatelný způsob zvodivění (postříbření) jejich povrchu. Tyto důvody vedly k tomu, že všemi třemi technologickými postupy nanášení měděné vrstvy byla pokovena pouze tělesa z materiálu PA 12 – MJF. V rámci takto připravených struktur byl poté hodnocen vliv jednotlivých technologických postupů nanášení mědi na výsledné mechanické vlastnosti struktur polymer – kov (struktura PA 12 – MJF // měď). Vzorky z materiálu PA 12 byly zhotoveny taktéž vstřikováním s následným pokovením technologickým postupem odpovídající tvrdé lázni (program 2).

Pro hodnocení mechanických vlastností byla pokovená zkušební tělesa vystavena tahovým a ohybovým zkouškám. Při vyhodnocení tahových vlastností byl zjištěn nárůst meze pevnosti v tahu (pro PA 12 o 38 % a pro ABS o 86 %) a značné navýšení modulu pružnosti v tahu (až 4krát). V případě jmenovitého poměrného prodloužení (tj. celkové tažnosti) je patrné, že

u struktur s omezenou tažností (PA 12 – MJF a ABS) došlo ke snížení celkové tažnosti (až 3,4krát pro PA 12 – MJF). U struktur ze vstřikovaného PA 12, který vykazuje vysokou tažnost, odpovídá jeho celková tažnost vlastní polymerní matici. To je dáno v důsledku poškození kovové vrstvy při vysoké tažnosti polyamidu. Z výsledků ohybových vlastností lze uvést, že pevnost v ohybu se u struktur polyamidů pokovených mědi zvýšila 1,5krát a u dílů z ABS až 2,2krát. Výrazného navýšení dosáhl modul pružnosti v ohybu, kde se tato hodnota zvýšila 4,5krát u struktury s PA 12, resp. 6,1krát u ABS.

Při porovnání nanesených kovových vrstev na strukturách polymer – kov z materiálu PA 12 vyrobených odlišnými technologiemi, byly při pouhém pohledu zřetelné jejich kvalitativní rozdíly. Toto ostatně potvrdila cyklická teplotně – vlhkostní zkouška, která proběhla dle standardu PV 1200 koncernu VW, v jejímž průběhu byla sledována soudržnost kovové vrstvy k polymernímu dílu pomocí optického mikroskopu. Měděná vrstva na dílech z PA 12 – MJF vykazovala v průběhu zkoušky velmi dobrou adhezi kovové vrstvy k polymernímu dílu. Na jejím povrchu došlo pouze k oxidaci. U dílu, který byl vystaven klimatickému testu 5 dní (polovině standardní doby trvání zkoušky), se na jeho povrchu neobjevily žádné praskliny. Ty se objevily u dílu vystavenému klimatickému zatěžování po celou dobu jeho trvání, tj. 10 dnů. Nanesené měděné vrstvy struktur na bázi vstřikovaného PA 12 vykazovaly špatnou adhezi k polymernímu dílu a nekvalitní povrch již před klimatickým zatížením a tudíž došlo v průběhu klimatického zatížení k popraskání kovové vrstvy a její výrazné delaminaci od polymerního dílu.

V rámci bakalářské práce bylo dosaženo uspokojivých výsledků při pokovení pomocí automatického nanášení kovu (mědi) na polymerní díly. Na základě získaných výsledků z experimentální části práce lze konstatovat, že z hlediska dosažené kvality a použité technologie přípravy struktur polymer – kov se pokovení dílů z PA 12 zhotovených metodou Multi Jet Fusion jeví jako nejvhodnější. U těchto struktur bylo docíleno zvýšení hodnot pevnosti a modulu pružnosti v tahu (vyššího nárůstu bylo zaznamenáno při použití technologického postupu, kde se střídaly použité pracovní lázně), i zlepšení ohybových vlastností (vyššího navýšení došlo při použití technologického postupu s nanášením tvrdé mědi). Zároveň u těchto struktur nedošlo vlivem klimatického zatížení k delaminaci měděné vrstvy od polymerního dílu. Pro pokovení ostatních druhů aditivovaných polymerů, nebo polyamidu zhotoveného vstřikováním, by bylo potřeba do budoucna vyřešit úpravu jejich povrchu. S ohledem na statistické výsledky, resp. rozdíly měřených hodnot u pokovovaných polyamidů, by bylo vhodné v rámci dalšího vývoje vytvořit větší množství vzorků, které by přispělo k zpřesnění

analýzy vlivu typu technologického procesu pokovení polymerů na jejich vlastnosti. Zajímavý by byl také výzkum, při kterém by se hodnotil vliv různé koncentrace přísad v pracovních lázních na mechanické vlastnosti struktur polymer – kov.

Použitá literatura

- [1] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. B.m.: Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2016. ISBN 978-1-56990-664-4.
- [2] Additive Fabrication (Rapid prototyping, tooling). *Custompart.net* [online]. [vid. 2021-01-21]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [3] 3D tisk. *3D-tisk.cz* [online]. 25. únor 2013 [vid. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/3d-tisk/>
- [4] PRŮŠA, Josef. Fotogrammetrie - 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu. *Josef Prusa - 3D tisk a tiskárny* [online]. 23. březen 2018 [vid. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>
- [5] BIKAS, H., P. STAVROPOULOS a G. CHRYSOLOURIS. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, 83(1–4), 389–405. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-015-7576-2
- [6] What is Selective Heat Sintering (SHS)? *Additive-X* [online]. 6. duben 2016 [vid. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.goprint3d.co.uk/blog/selective-heat-sintering-shs-work/>
- [7] Seznam materiálů pro 3D tisk. *MATERIALPRO3D.CZ* [online]. [vid. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/>
- [8] HOMOLA, Jan. *Budoucnost 3D tisku je v praktických a specializovaných aplikacích* [online]. 6. duben 2020 [vid. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/budoucnost-3d-tisku-je-v-praktickyh-a-specializovanych-aplikacich>
- [9] DUDEK, P. FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. *Archives of Metallurgy and Materials* [online]. 2013, 58(4), 1415–1418. ISSN 1733-3490. Dostupné z: doi:10.2478/amm-2013-0186
- [10] CHALUPA, Michal. *GEObUSINESS - Novinky od ČÚZK* [online]. Ostrava. 2021. ISBN 1802 - 4521. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/images/geobusiness-2012-01-3Dtisk.pdf>
- [11] Jak vybrat správnou 3D tiskárnu. *Rádce 3D tisku* [online]. [vid. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.radce3d.cz/>
- [12] ZOU, Rui, Yang XIA, Shiyi LIU, Ping HU, Wenbin HOU, Qingyuan HU a Chunlai SHAN. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2016, 99, 506–513. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2016.06.009
- [13] Náplně do 3D tiskárny (filamenty) | Použití a jejich vlastnosti. *For3dtisk* [online]. 2. únor 2020 [vid. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://for3dtisk.cz/naplne-do-3d-tiskarny/>

- [14] *ABS plast: výhody, aplikace a další* [online]. 5. listopad 2019 [vid. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.unipipes.com/blog/abs-plastic>
- [15] DANIEL J. THOMAS, DEEPTI SINGH. *3D Printing in Medicine and Surgery* [online]. B.m.: Elsevier, 2020 [vid. 2021-05-15]. ISBN 978-0-08-102542-0. Dostupné z: doi:10.1016/C2017-0-01048-0
- [16] SADASIVUNI, Kishor Kumar, Deepalekshmi PONNAMMA, Jaehwan KIM, Mariam Ali ALMAADEED a J.-J. CABIBIHAN, ed. *Biopolymer composites in electronics*. Amsterdam ; Boston ; Heidelberg ; London ; New York ; Oxford ; Paris ; San Diego ; San Francisco ; Singapore ; Sydney ; Tokyo: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-809261-3.
- [17] VALDIVIESO, Carlota. All you need to know about PETG for 3D printing. *3Dnatives* [online]. 18. prosinec 2019 [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/petg-3d-printing-guide-181220194/>
- [18] Was ist PETG? Alles über das 3D-Druckmaterial! *Filament World* [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.filamentworld.de/3d-druck-wissen/was-ist-petg/>
- [19] MELE, Mattia, Giampaolo CAMPANA a Gian Luca MONTI. Modelling of the capillarity effect in Multi Jet Fusion technology. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, 30, 100879. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100879
- [20] MJF (Multi Jet Fusion). *Cotu* [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [21] KIM, Hokeun, Yan ZHAO a Lihua ZHAO. Process-level modeling and simulation for HP's Multi Jet Fusion 3D printing technology. In: *2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS): 2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)* [online]. 2016, s. 1–4. Dostupné z: doi:10.1109/CPPS.2016.7483916
- [22] HABIB, F. N., P. IOVENITTI, S. H. MASOOD a M. NIKZAD. Fabrication of polymeric lattice structures for optimum energy absorption using Multi Jet Fusion technology. *Materials & Design* [online]. 2018, 155, 86–98. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.05.059
- [23] *Unikátní průmyslová 3D tiskárna HP Jet Fusion vstupuje na český trh* [online]. [vid. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/unikatni-prumyslova-3d-tiskarna-hp-jet-fusion-vstupuje-na-cesky-trh>
- [24] Průmyslová 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200. *3Dees* [online]. [vid. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d#196>
- [25] TOMAN, Filip. *Rozdíly v mechanických vlastnostech Polyamidů PA 6, PA 11, PA 12, v závislosti na jejich zpracování* [online]. Pardubice, 2020. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/76162/TomanF_RozdilyvMechanickych_MV_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [26] *EMS-GRIVORY nabízí alternativní materiály k PA12* [online]. 4. září 2018 [vid. 2021-05-28]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.eu/cs/ems-grivory-nabizi-alternativni-materialy-k-pa12/c/5099>
- [27] *Polyamidy* [online]. [vid. 2021-06-03]. Dostupné z: <https://www.prumysloveplasty.cz/polyamidy/>
- [28] *What Does TPU Stands For?* [online]. 2019 [vid. 2021-06-05]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/thermoplastic-polyurethanes-tpu>
- [29] FRICK, Achim a Arif ROCHMAN. Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC). *Polymer Testing* [online]. 2004, 23(4), 413–417. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2003.09.013
- [30] *Technologie | Electroforming - Galvanoplastika* [online]. [vid. 2021-02-17]. Dostupné z: <http://www.electroforming.cz/cs/technologie>
- [31] Elektrolýza a její aplikace. *ELUC* [online]. [vid. 2021-02-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2285?PageSpeed=noscript>
- [32] SCHIEFERDECKER, Pavel. *Vývoj technologie výroby galvanoplastických forem*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [33] MCGEOUGH, J. A., M. C. LEU, K. P. RAJURKAR, A. K. M. DE SILVA a Q. LIU. Electroforming Process and Application to Micro/Macro Manufacturing. *CIRP Annals* [online]. 2001, 50(2), 499–514. ISSN 0007-8506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)62990-4
- [34] OBR, Ladislav. *Vstup do technologie povrchových úprav* [online]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-62015/vstup-do-technologie-povrchovych-uprav.html>
- [35] SCHLESINGER, Mordechai a ELECTROCHEMICAL SOCIETY, ed. *Modern electroplating*. 5. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010. The ECS series of texts and monographs. ISBN 978-0-470-16778-6.
- [36] LOŠONSKÝ, Dušan. *Galvanoplastika Ni-speed*. Praha, 2007. Diplomová práce. ČVUT Fakulta strojní.
- [37] *Spínaný zdroj pro galvanické pokovování* [online]. [vid. 2021-02-11]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38790
- [38] *Závod povrchových úprav - MAGNETON a.s.* [online]. [vid. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://www.magneton.cz/24925-zavod-povrchovych-uprav>
- [39] Infill patterns. *Prusa Knowledgebase* [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/en/article/infill-patterns_177130
- [40] Technický list Prusament PETG od Prusa Polymers [online]. [vid. 2021-05-17]. Dostupné z: https://prusament.com/media/2020/05/PETG_TechSheet_CZ_22052020.pdf

- [41] ABS-M30. *Stratasys* [online]. [vid. 2021-05-27]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/materials/search/abs-m30>
- [42] Technický list HP-PA12 [online]. [vid. 2021-06-13]. Dostupné z: <https://cimquest-inc.com/resource-center/HP/Materials/HP-PA12-Datasheet.pdf>
- [43] 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3S. *Prusa Research* [online]. [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/3d-tiskarny/181-3d-tiskarna-original-prusa-i3-mk3s.html>
- [44] Fortus 450mc. *Stratasys* [online]. [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.stratasys.com/3d-printers/fortus-450mc>
- [45] ČSN EN ISO 1110. Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles. 1997
- [46] STRÖMBERG, Stefan G. *stefangs/arduino-library-braccio-robot* [online]. C++. 2021 [vid. 2021-06-05]. Dostupné z: <https://github.com/stefangs/arduino-library-braccio-robot>
- [47] *Getting Started with the TinkerKit Braccio Robot* [online]. [vid. 2021-06-05]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Braccio>
- [48] ČSN EN ISO 527-1,2 (64 0604). Plasty - Stanovení tahových vlastností. 2012
- [49] ČSN EN ISO 178 (64 0607). Plasty - Stanovení ohybových vlastností. 2012
- [50] PV 1200. Testing for Resistance to Enviromental Cycle Test (+80°C/-40°C). 2004.
- [51] RIEDELBAUCH, Julius, Dominik RIETZEL a Gerd WITT. Analysis of material aging and the influence on the mechanical properties of polyamide 12 in the Multi Jet Fusion process. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, 27, 259–266. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.03.002

Seznam příloh

Příloha P1: Příklady pokovených vzorků	74
Příloha P2: Ukázka pokovovacího programu pro tvrdou lázeň	77
Příloha P3: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur z PA 12 – MJF	79
Příloha P4: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur ze vstřikovaného PA 12.....	80
Příloha P5: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur z ABS	81
Příloha P6: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur z PA 12 – MJF	81
Příloha P7: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur ze vstřikovaného PA 12	83
Příloha P8: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur z ABS	83

Příloha P1: Příklady pokovených vzorků



Obr. P1.1 Pokovená tělesa určená pro ohybovou zkoušku z materiálu PA 12 – MJF



Obr. P1.2 Pokovená tělesa určená pro ohybovou zkoušku z materiálu ABS



Obr. P1.3 Pokovená tělesa určená pro tahovou zkoušku z materiálu PA 12 – MJF



Obr. P1.4 Pokovená tělesa určená pro tahovou zkoušku ze vstřikovaného PA 12 s připevňujícími uchyceními



Obr. P1.5 Pokovená tělesa určená pro tahovou zkoušku z materiálu ABS

Příloha P2: Ukázka pokovovacího programu pro tvrdou lázeň

2_Program | Arduino 1.8.13

Soubor Úpravy Projekt Nástroje Nápověda

```
2_Program
1 #include <BraccioRobot.h>
2 #include <Servo.h>
3
4 Servo base;
5 Servo shoulder;
6 Servo elbow;
7 Servo wrist_rot;
8 Servo wrist_ver;
9
10 int i = 1;
11
12 int t0 = 5000;
13
14 unsigned long t1 = 1500000;
15
16 unsigned long t2 = 300000;
17
18 int t3 = 500;
19
20 int n = 1;
21
22 void setup() {
23
24     wrist_ver.attach(5);
25     BraccioRobot.init();
26 }
27
28 Position pos;
29
30 void loop() {
31
32     wrist_ver.write(100);
33
34     // Pocatecni poloha
35                                     // (M1, M2, M3, M4, M5, M6), speed)
36
37     BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 90, 70, 175, 0, 0), 90);
38     delay(t0);
39
40     // Pokovovaci lazen c.2
41
42     BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 70, 50, 150, 0, 0), 90);
43
44     BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 50, 40, 150, 0, 0), 70);
45     delay(t3);
46
47     for (int j = 0; j < 16; j++) {
48         BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 15, 25, 145, 0, 0), 35);
49         delay(t1);
50     }
```

```
51
52 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 50, 40, 150, 0, 0), 40);
53 delay(t3);
54
55 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(0, 70, 50, 170, 0, 0), 90);
56
57 // Oplachova lazen c.2
58
59 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 70, 50, 150, 0, 0), 90);
60
61 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 50, 40, 150, 0, 0), 70);
62 delay(t3);
63
64 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 22, 22, 145, 0, 0), 35);
65 delay(t2);
66
67 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 50, 40, 150, 0, 0), 40);
68 delay(t3);
69
70 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 70, 50, 150, 0, 0), 90);
71
72 // Konecna poloha
73
74 while(i>=n) {
75
76 BraccioRobot.moveToPosition(pos.set(60, 80, 40, 165, 0, 0), 90);
77 delay(t0);
78
79 }
80
81 i++;
82 }
```

Příloha P3: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur z PA 12 – MJF

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Nepokovený				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]
1.	3,98	10,24	46,2	1365	13,8
2.	3,89	10,22	45,7	1257	21,8
3.	3,99	10,32	47,7	1405	15,1
4.	3,98	10,28	48,0	1297	16,0
5.	3,98	10,27	47,1	1199	22,7
6.	3,98	10,27	46,1	1284	20,8
x	3,97	10,27	46,8	1301	18,4
s	0,04	0,03	0,9	74	3,8

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 1 (měkká lázeň)				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]
1.	4,21	10,63	62,3	4886	7,0
2.	4,21	10,52	59,2	4491	9,0
3.	4,13	10,51	60,4	4550	10,3
4.	4,14	10,51	56,5	4390	6,1
5.	4,13	10,52	60,0	4526	12,0
6.	4,14	10,51	57,2	3865	7,4
x	4,16	10,53	59,3	4451	8,6
s	0,04	0,05	2,1	333	2,2

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 2 (tvrdá lázeň)				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]
1.	4,07	10,39	54,2	5139	8,9
2.	4,14	10,57	59,0	3589	13,8
3.	4,08	10,54	56,4	4320	10,1
4.	4,14	10,53	56,5	4239	9,8
5.	4,13	10,52	52,9	3929	6,2
6.	4,22	10,67	50,7	4488	10,3
x	4,13	10,54	55,0	4284	9,9
s	0,05	0,09	3,0	526	2,5

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 3 (střídání lázní)				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1.	4,21	10,51	59,0	4570	6,2
2.	4,14	10,49	61,1	5283	6,4
3.	4,07	10,44	64,4	5732	5,5
4.	4,21	10,57	65,4	5724	4,5
5.	4,15	10,56	59,6	6035	5,5
6.	4,12	10,56	61,2	4775	4,2
x	4,15	10,52	61,8	5353	5,4
s	0,05	0,05	2,6	583	0,9

Příloha P4: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur ze vstříkovaného PA 12

Materiál / Šarže	PA 12 - Vstříkovaný / Nepokovený				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1.	4,26	10,02	40,7	1100	339,4
2.	4,26	10,02	41,3	1115	312,9
3.	4,26	10,02	40,8	1130	357,7
4.	4,26	10,02	40,6	1101	314,2
5.	4,26	10,02	40,4	1079	359,9
6.	4,26	10,02	40,8	1064	299,9
x	4,26	10,02	40,8	1098	330,7
s	0,00	0,00	0,3	24	25,3

Materiál / Šarže	PA 12 - Vstříkovaný / Program 2 (tvrdá lázeň)				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ϵ_{tb} [%]
1.	4,07	10,39	58,3	4380	357,8
2.	4,14	10,57	59,7	4367	359,4
3.	4,08	10,54	58,0	4357	350,0
4.	4,14	10,53	58,9	4452	360,5
5.	4,13	10,52	56,8	4409	348,9
6.	4,22	10,67	45,4	3999	270,1
x	4,13	10,54	56,2	4327	341,1
s	0,05	0,09	5,4	164	35,1

Příloha P5: Naměřené hodnoty tahových vlastností struktur z ABS

Materiál / Šarže	ABS / Nepokovený				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]
1.	4,12	9,94	18,5	1376	2,4
2.	4,13	9,94	18,8	1343	2,8
3.	4,11	9,92	19,0	1351	2,8
4.	4,13	9,93	19,1	1355	2,9
5.	4,11	9,91	18,9	1365	3,2
6.	4,10	9,93	19,2	1394	3,0
x	4,12	9,93	18,9	1364	2,9
s	0,01	0,01	0,2	19	0,3

Materiál / Šarže	ABS / Program 2 (tvrdá lázeň)				
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_m [MPa]	E_t [MPa]	ε_{tb} [%]
1.	4,22	10,04	31,9	4535	1,5
2.	4,35	10,05	39,2	5414	1,7
3.	4,27	10,06	34,5	5295	1,5
4.	4,29	10,04	31,9	5442	1,8
5.	4,34	9,96	27,0	4957	1,4
6.	4,37	9,93	46,4	6203	2,2
x	4,31	10,01	35,2	5308	1,7
s	0,06	0,05	6,8	557	0,3

Příloha P6: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur z PA 12 – MJF

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Nepokovený					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{f2} [MPa]	σ_{f1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	3,94	10,24	4,3	1,9	54,5	1214
2.	3,96	10,23	4,3	1,9	53,7	1203
3.	3,89	10,23	4,4	1,9	54,5	1270
4.	3,84	10,17	4,6	2,0	52,6	1313
5.	3,99	10,26	4,3	1,6	54,3	1381
6.	3,97	10,24	3,9	1,5	49,1	1189
x	3,93	10,23	3,6	1,5	53,1	1262
s	0,06	0,03	0,2	0,2	2,1	75

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 1 (měkká lázeň)					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{t2} [MPa]	σ_{t1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,07	10,53	12,8	3,6	74,7	4584
2.	4,06	10,52	14,0	3,3	80,9	5354
3.	4,08	10,53	14,3	3,8	81,2	5256
4.	4,04	10,49	13,9	2,1	74,8	5889
5.	4,08	10,50	12,8	3,6	79,7	4573
6.	4,04	10,44	15,1	4,2	81,7	5453
x	4,06	10,50	13,8	3,4	78,8	5185
s	0,02	0,03	0,9	0,7	3,2	517

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 2 (tvrdá lázeň)					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{t2} [MPa]	σ_{t1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,10	10,52	15,6	2,9	79,1	6310
2.	4,08	10,41	15,3	4,3	80,3	5485
3.	4,03	10,45	14,0	3,4	86,3	5138
4.	4,05	10,42	14,9	3,9	78,5	5517
5.	4,03	10,44	15,4	3,7	80,1	5817
6.	4,14	10,54	15,4	3,8	87,9	5792
x	4,07	10,46	15,1	3,7	82,0	5677
s	0,04	0,05	0,6	0,5	4,0	397

Materiál / Šarže	PA 12 – MJF / Program 3 (střídání lázní)					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{t2} [MPa]	σ_{t1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,01	10,54	14,6	3,9	74,4	5351
2.	4,02	10,54	16,2	3,7	80,7	6215
3.	4,11	10,55	14,5	3,8	73,5	5371
4.	4,04	10,53	13,6	3,6	69,1	4995
5.	4,12	10,52	13,2	3,1	75,8	5043
6.	4,06	10,52	14,6	3,9	73,8	4856
x	4,06	10,53	14,2	3,6	74,6	5305
s	0,05	0,01	1,2	0,3	3,8	490

Příloha P7: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur ze vstříkovaného PA 12

Materiál / Šarže	PA 12 – vstříkovaný / Nepokovený					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{f2} [MPa]	σ_{f1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,26	10,02	3,6	1,5	47,1	1050
2.	4,26	10,02	3,9	1,7	49,6	1100
3.	4,26	10,02	3,8	1,7	48,0	1050
4.	4,26	10,02	3,9	1,8	48,2	1050
5.	4,26	10,02	3,9	1,7	47,9	1100
6.	4,26	10,02	3,9	1,7	48,5	1100
x	4,26	10,02	3,8	1,7	48,2	1075
s	0,00	0,00	0,1	0,1	0,8	27

Materiál / Šarže	PA 12 – vstříkovaný / Program 2 (tvrdá lázeň)					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{f2} [MPa]	σ_{f1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,49	10,29	20,2	5,8	77,7	7175
2.	4,52	10,30	17,9	2,3	63,6	7801
3.	4,47	10,32	18,9	4,2	76,1	7355
4.	4,51	10,36	17,1	2,2	75,8	7471
5.	4,47	10,32	20,6	5,7	71,1	7450
6.	4,53	10,31	17,8	3,3	70,1	7261
x	4,50	10,32	18,8	3,9	72,4	7419
s	0,03	0,02	1,4	1,6	5,2	218

Příloha P8: Naměřené hodnoty ohybových vlastností struktur z ABS

Materiál / Šarže	ABS / Nepokovený					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{f2} [MPa]	σ_{f1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,28	9,94	3,5	1,5	32,4	988
2.	4,29	9,95	3,3	1,5	30,1	877
3.	4,30	9,94	3,4	1,6	30,3	921
4.	4,31	9,95	3,3	1,5	30,3	877
5.	4,29	9,94	3,4	1,6	30,4	906
6.	4,31	9,94	3,3	1,5	30,3	877
x	4,30	9,94	3,4	1,5	30,6	908
s	0,01	0,01	0,1	0,1	0,9	43

Materiál / Šarže	ABS / Program 2 (tvrdší lázeň)					
Vzorek	a [mm]	b [mm]	σ_{t2} [MPa]	σ_{f1} [MPa]	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
1.	4,28	10,29	15,0	3,7	68,6	5614
2.	4,32	10,30	14,7	3,4	64,3	5655
3.	4,39	10,31	13,5	2,8	68,1	5363
4.	4,38	10,38	12,6	2,6	57,3	4998
5.	4,54	10,35	13,9	2,8	66,8	5571
6.	4,35	10,34	15,5	3,2	70,9	6146
x	4,38	10,33	14,2	3,1	66,0	5558
s	0,09	0,03	1,1	0,5	4,8	377