



Diplomová práce

Mechanické vlastnosti a kvalita povrchu struktur polymer-kov s využitím 3D tisku

Studijní program:

N0715A270015 Materiály a technologie

Autor práce:

Bc. Radek Tuček

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultanti práce:

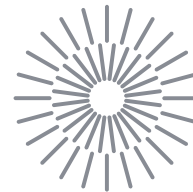
Ing. Jakub Macháček

Ústav nových technologií a aplikované informatiky

doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.

Electroforming s.r.o.

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Mechanické vlastnosti a kvalita povrchu struktur polymer-kov s využitím 3D tisku

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Radek Tuček
<i>Osobní číslo:</i>	S21000208
<i>Studijní program:</i>	N0715A270015 Materiály a technologie
<i>Zadávací katedra:</i>	Katedra strojírenské technologie
<i>Akademický rok:</i>	2022/2023

Zásady pro vypracování:

- 1) Prostudujte metody pro hodnocení mechanických vlastností struktur polymer-kov, vyráběných s využitím galvanotechnologií.
- 2) Prostudujte metody pro hodnocení kvality povrchů struktur polymer-kov, vyráběných s využitím galvanotechnologií.
- 3) Prostudujte dostupné technologie 3D tisku polymerů z pohledu kvality realizovaného povrchu dílů.
- 4) Navrhněte, realizujte a otestujte zkušební součásti polymer-kov s různými 3D texturami povrchů a s využitím galvanotechnologií ve spolupráci s firmou Electroforming s.r.o.
- 5) Určete vztah mezi typem 3D textury a výslednými mechanickými vlastnostmi a také kvalitou povrchu.
- 6) Zhodnoťte provedenou studii pro řešení výroby pohledových dílů polymer-kov ve firmě Electroforming s.r.o.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] WOHLERS ASSOCIATES, ed. *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins (Colo.): Wohlers Associates, 2019. ISBN 978-0-9913332-5-7.
- [2] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*. London ; New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
- [3] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich : Cincinnati: Hanser Publishers ; Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [4] COTELL, Catherine M., John B. SPRAGUE a F. A. SMIDT Jr. *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*. Novelty, Ohio, United States: ASM International, 1994. ISBN 978-0-871-384-2.
- [5] SCHLESINGER, Mordechai a Milan PAUNOVIC, ed. *Modern electroplating*. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010. The electrochemical society series, 52. ISBN 978-0-470-16778-6.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultanti práce: Ing. Jakub Macháček
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
doc. Ing. Lukáš Vojtěch, Ph.D.
Electroforming s.r.o.

Datum zadání práce: 30. listopadu 2022
Předpokládaný termín odevzdání: 30. května 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Iva Nováková, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou 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 diplomová 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.

Název diplomové práce:

Mechanické vlastnosti a kvalita povrchu struktur polymer – kov s využitím 3D tisku

Anotace

Diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a testováním struktur polymer – kov s různými typy 3D povrchových textur, které byly aplikovány na povrch polymerních dílů. Účelem této modifikace bylo umožnění efektivního „zakotvení“ následně naneseného kovového povlaku pomocí galvanického pokovování. Pro zhotovení těchto dílů byly použity aditivní technologie stereolitografie (SLA) a maskované stereolitografie (MSLA). Dále byla pro porovnání zhotovena i tělesa aditivní technologií Multi Jet Fusion (MJF), a to bez povrchových textur. Připravené vzorky byly galvanicky pokoveny a poté podrobeny různým materiálovým zkouškám. Na základě vyhodnocení provedených zkoušek byly vybrány struktury polymer – kov s tzv. perspektivními texturami, které jsou v závěru práce vyhodnoceny s doporučením pro jejich využití v technické praxi.

Klíčová slova

aditivní technologie, galvanické pokovování, adheze povlaku, modifikace povrchu, zkoušení materiálu

Diploma thesis title:

Mechanical properties and surface quality of polymer – metal structures using 3D printing

Annotation

The diploma thesis deals with the design, implementation and testing of polymer – metal structures with various types of 3D surface textures that were applied to the surface of polymer parts. The purpose of this modification was to enable effective „anchoring“ of the subsequently applied metal coating through galvanic plating. Additive manufacturing technologies stereolithography (SLA) and masked stereolithography (MSLA) were used to make these parts. Furthermore, for comparison, parts were also produced using additive technology Multi Jet Fusion (MJF), without any surface textures. The prepared samples were electroplated and then subjected to various material tests. Based on the evaluation of the performed tests, polymere – metal structures with so-called perspective textures were selected, which are evaluated at the end of the work with a recommendation for their utilization in technical practise.

Key Words

additive technologies, galvanic plating, coating adhesion, surface modification, material testing

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za jeho odborný přístup a cenné rady v průběhu zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Jakubovi Macháčkovi za poradenství v oblasti aditivních technologií. Velké díky patří také společnosti Electroforming s.r.o., v čele s panem doc. Ing. Lukášem Vojtěchem, Ph.D., za vstřícnou spolupráci a poskytnutí cenných informací.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni, kteří mě trpělivě podporovali po celou dobu mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
1 Úvod	13
2 Teoretická část.....	15
2.1 Aditivní výroba – 3D tisk	15
2.1.1 Obecný výrobní proces 3D tisku	17
2.1.2 Dělení 3D tisku podle technologie	18
2.1.3 Stereolitografie (SLA)	19
2.1.4 Maskovaná stereolitografie (MSLA).....	22
2.1.5 Porovnání metod SLA a MSLA	23
2.1.6 Materiály určené pro metody SLA a MSLA	24
2.2 Elektrochemické pokovování	25
2.2.1 Princip metody Elformplate.....	26
2.2.2 Faradayovi zákony.....	27
2.2.3 Parametry ovlivňující vlastnosti nanesených povlaků.....	28
2.2.4 Galvanické mědění	34
2.2.5 Galvanické niklování.....	35
2.3 Vybrané metody hodnocení jakosti povlaků	36
2.3.1 Stanovení vnitřního pnutí v kovových povlacích.....	36
2.3.2 Adheze vrstev a metody jejího měření	39
2.3.3 Určení typu textury povrchu – standard VDI 3400	41
3 Experimentální část	43
3.1 Výběr materiálů a jejich charakteristika	43
3.2 Návrh a modifikace povrchu zkušebních těles	44
3.2.1 Zkušební tělesa – vzorkovníky	45
3.2.2 Zkušební tělesa – kostky.....	46
3.2.3 Zkušební ohybová tělesa	49

3.3 Výroba zkušebních těles aditivními technologiemi.....	50
3.3.1 Zhotovení zkušebních těles metodou SLA.....	50
3.3.2 Zhotovení zkušebních těles metodou MSLA	51
3.3.3 Zhotovení zkušebních těles metodou MJF	52
3.4 Příprava zkušebních těles před pokovením	54
3.5 Funkční zkouška galvanických lázní.....	54
3.6 Pokovení zkušebních těles.....	55
3.7 Měření drsnosti povrchu povlaku a výběr textur.....	58
3.8 Teplotně – cyklická zkouška	62
3.9 Stanovení vnitřního pnutí v povlacích.....	64
3.10 Stanovení ohybových vlastností struktur polymer – kov	65
4 Diskuze a vyhodnocení výsledků	67
4.1 Vyhodnocení měření drsnosti povrchu povlaku a výběr textur.....	67
4.2 Vyhodnocení teplotně – cyklické zkoušky.....	71
4.3 Vyhodnocení metody jednostranně pokovovaného pásku	74
4.4 Vyhodnocení ohybových vlastností.....	75
5 Závěr.....	82
Použitá literatura.....	85
Seznam příloh	90

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_e	konstanta úměrnosti	$[g \cdot A^{-1} \cdot s^{-1}]$
E_f	modul pružnosti ohybu	[MPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Faradayova konstanta	$[C \cdot mol^{-1}]$
HDT	teplota tvarové stálosti	$[^{\circ}C]$
I	elektrický proud procházející elektrolytem	[A]
J	proudová hustota	$[A \cdot dm^{-2}]$
M	molární hmotnost kovů	$[g \cdot mol^{-1}]$
R_a	střední aritmetická odchylka povrchu	$[\mu m]$
R_m	pevnost v tahu	[MPa]
R_z	výška nerovnosti povrchu	$[\mu m]$
T	teplota galvanické lázně	$[^{\circ}C]$
a	tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
b	šířka zkušebního tělesa	[mm]
c	plocha pokovení	$[mm^2]$
h	tloušťka povlaku	[mm]
m	hmotnost vyloučených látek	[g]
$m_{skut.}$	hmotnost skutečně vyloučeného kovu	[g]
$m_{teor.}$	hmotnost kovu vypočteného dle Faradayova zákona	[g]
n	mocenství kovového kationtu v lázni	[-]
$r_{kat.(anod.)}$	proudový výtěžek (katodický nebo anodický)	[%]
t	čas pokovení	[s]
v_n	rychlost tvorby krystalových center	$[\mu m \cdot min^{-1}]$

v_r	vlastní krystalizační rychlost	$[\mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$
$\varepsilon_{f1,2}$	poměrné prodloužení	[%]
ε_b	poměrné prodloužení při přetržení	[%]
ρ	hustota nanášeného kovu	$[\text{g}\cdot\text{mm}^{-3}]$
ρ_A	koncentrace iontů vylučovaného kovu	$[\text{g}\cdot\text{l}^{-1}]$
ρ_E	hustota elektrolytu	$[\text{g}\cdot\text{l}^{-1}]$
ρ_P	hustota polymeru	$[\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$
$\sigma_{f1,2}$	napětí v ohybu	[MPa]
σ_{fM}	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
Cl^-	aniont chloridu	
$\text{Cr}(\text{H}_2\text{SO}_4)_3$	kyselina chromsírová	
Cu	měď	
Cu^{2+}	kationt měďnatý	
CuSO_4	síran měďnatý	
ELF – Cu01-02	přísady do léčebných lázní (receptura společnosti Electroforming s.r.o.)	
ELF – Ni01-03	přísady do niklovacích lázní (receptura společnosti Electroforming s.r.o.)	
H_2SO_4	kyselina sírová	
H_3BO_3	kyselina boritá	
Ni	nikl	
NiCl_2	chlorid nikelnatý	
NiSO_4	síran nikelnatý	
SO_4^{2-}	aniont síranový	

ABS	akrylonitril–butadien–styren
PA	polyamid
PPJet	flexibilní propylen
3DP	3D Printing
AM	Additive Manufacturing
ASTM	The American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
DLP	Digital Light Deposition
DOD	Drop On Demand
EDM	Electric Discharge Machining
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
HCD	High Current Density
LCD	Low Current Density
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJF	Multi Jet Fusion
MSLA	Maskovaná Stereolitografie
SLA	Stereolitografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SHS	Selective Heat Sintering
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Úvod

S růstem významu aditivní technologie 3D tisku pro výrobu polymerních součástí, se objevují požadavky na další zpracování vytištěných dílů, jako jsou např. povrchové úpravy. Do této oblasti lze zařadit např. lakování, barvení, chemické nebo galvanické pokovování apod. Povrchové úpravy polymerů hrají důležitou roli pro dosažení konečných užitných vlastností výrobků. Nedostatečná nebo nevhodná povrchová ochrana může znehodnotit jak samotný polymerní díl, tak i ovlivnit jeho funkčnost a v neposlední řadě také vzhled. Poptávka po povrchové úpravě polymerních pohledových dílů, jenž mohou sloužit jako náhrada kovových součástí, stále roste. Právě technologie galvanického (elektrochemického) pokovování je jedna z alternativ povrchových úprav, která umožňuje zhotovení výrobku, jenž kombinuje nízkou hmotnost polymeru při zajištění jeho kovového vzhledu. Výsledná kvalita a vzhled kovového povlaku však závisejí nejen na vlastnostech samotného polymeru, ale také na adekvátní předúpravě povrchu polymeru, na adhezi mezi polymerem a kovovým povlakem apod.

Pro pokovování polymerních dílů (ABS) vyráběných technologií vstřikování se sice běžně používá galvanické pokovování, avšak tato technologie nedosahuje uspokojivých výsledků pro pokovení obecných 3D tištěných dílů. Z toho důvodu byla vyvinuta technologie Elformplate, která částečně řeší galvanické pokovování 3D tištěných dílů. Touto technologií disponuje společnost Electroforming s.r.o., se kterou byla ve spolupráci tato práce řešena, a která je současně konzultantem této práce. Technologie Elformplate je optimalizovaná pro pokovování dílů tiskovou metodou Multi Jet Fusion (spékání práškovitého materiálu). Díly vytištěné touto metodou jsou charakteristické reliéfním povrchem, který je však zobrazen do dalších vrstev povlaku, což zapříčiní jeho polomatný vzhled. Tento nedostatek může být nahrazen použitím jiných tiskových metod. Nabízí se aditivní metody tisknoucí součásti (s vysokou rozměrovou přesností) z kapalných fotopolymerů. Součásti zhotovené těmito metodami se vyznačují hladkým povrchem, který ovšem může způsobit nedostatečné „zakotvení“ kovového povlaku na jejich povrchu. Jako jedno z možných řešení se nabízí upravit (modifikovat) povrch modelu součásti již ve fázi jejího návrhu. Jedním z cílů předložené práce je proto návrh a generování dílů s 3D povrchovou texturou, která tak umožní efektivní zakotvení a nanesení kovového povlaku na polymerní díly z fotopolymeru. To vše jak při odpovídající pohledové kvalitě povlaku, tak i výsledných mechanických vlastnostech struktur polymer – kov.

Teoretická část diplomové práce se zabývá problematikou aditivních technologií 3D tisku, galvanického (elektrochemického) pokovování a také metodami pro hodnocení jakosti povlaků. V experimentální části předložené práce je popsán návrh a provedení 3D povrchových textur,

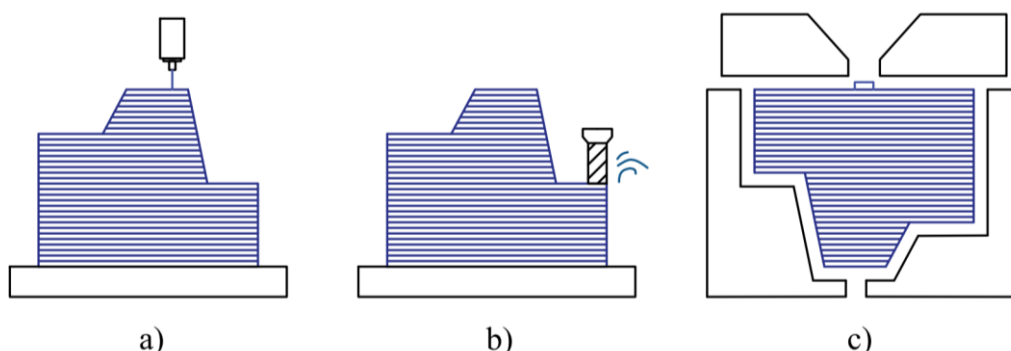
kteře byly vygenerovány na povrchu polymerních dílů. Tyto díly byly následně realizovány pomocí aditivních technologií – stereolitografie a maskované stereolitografie. Další technologický krok spočíval v galvanickém pokovení dílů. Kvalita pokovení byla vyhodnocena s využitím měření drsnosti povlaků. Na základě tohoto měření byly následně vybrány tzv. perspektivní povrchové textury. Dále byla provedena teplotně – cyklická zkouška, po jejímž ukončení byl posouzen její dopad na adhezi mezi kovovým povlakem a povrchem dílů. V neposlední řadě byly na základě ohybové zkoušky hodnoceny mechanické vlastnosti v ohybu. V závěru práce jsou formulovány doporučení pro technickou praxi a návrhy, jakými směry lze pokračovat ve výzkumu a vývoji těchto moderních struktur polymer – kov.

2 Teoretická část

Tato část diplomové práce se zabývá principem aditivní technologie 3D tisku a galvanickým (elektrochemickým) pokovováním, pomocí nichž je realizována výroba struktur polymer – kov. V rámci experimentální části byly pro zhotovení polymerních dílů použity aditivní metody stereolitografie (SLA) a maskovaná stereolitografie (MSLA), proto se těmto technologiím věnují samostatné kapitoly. Ke 3D tisku polymerních dílů byla použita rovněž metoda Multi Jet Fusion (MJF). Vzhledem ke zpracování problematiky o této metodě v autorově předchozí práci [1], tak není tato metoda v předložené práci podrobněji rozepsána. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na metody hodnotící kvalitu nanesených kovových povlaků struktur polymer – kov.

2.1 Aditivní výroba – 3D tisk

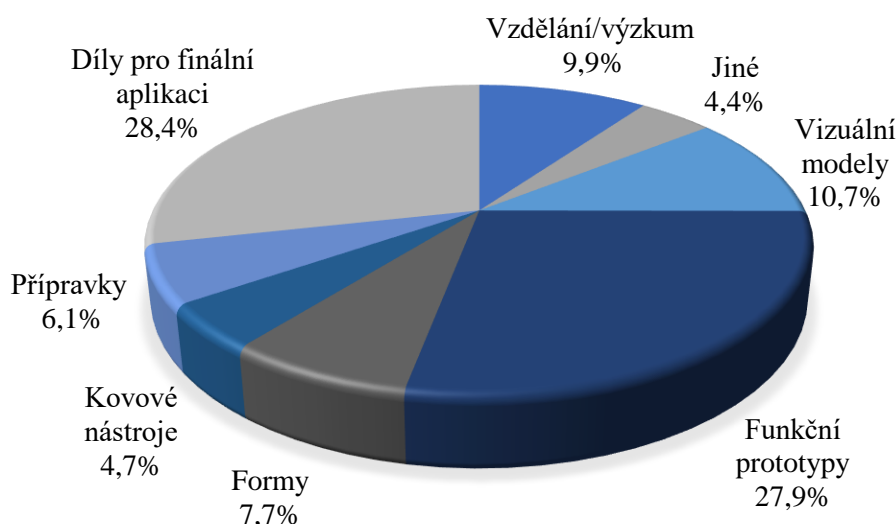
Americká organizace ASTM (The American Society for Testing and Materials) dle normy ISO/ASTM 52900 zavádí a definuje pojmy používané v oblasti aditivních technologií. Podle tohoto standardu je aditivní výroba (AM – Additive Manufacturing) označována jako proces, který vytváří trojrozměrné objekty z 3D virtuálních modelů postupným nanášením vrstev materiálu a jejich následným spojením (viz obr. 1a). Opačnými metody výroby oproti AM jsou metody subtraktivní a formativní (viz obr. 1b a obr. 1c). Pomocí subtraktivních technologií je požadovaná geometrie výrobku dosažena postupným odebíráním materiálu z polotovaru nástrojem. Mezi tyto výrobní metody se řadí obrábění (např. frézování, soustružení nebo vrtání). U formativních metod probíhá výroba změnou tvaru výrobku definovaným způsobem, a to působením vnějších sil nebo tepla. Do této skupiny patří tvarování kovu (např. ohýbání, kování nebo odlévání). [2, 3]



Obr. 1 Základní výrobní procesy [4]
a) aditivní výroba, b) subtraktivní výroba, c) formativní výroba

Dále norma ISO/ASTM 52900 uvádí používání pojmu 3D tisku v netechnickém kontextu jako synonyma pro aditivní výrobu. Dříve se tento termín používal zejména k označení tiskáren nižší ceny s omezenými možnostmi tisku, ale v současnosti jsou pojmy aditivní výroba a 3D tisk zcela zaměnitelné. Termín aditivní výroba se uplatňuje především v technické oblasti, zatímco široká veřejnost častěji využívá pojem 3D tisk. [3]

Aditivní výroba se poprvé objevila v 80. letech minulého století, kdy byla primárně využívána pro tzv. rapid prototyping, což je označení pro rychlou výrobu nástrojů. Takto zhotovené modely nejsou většinou vhodné pro jejich použití v technické praxi a slouží především pro vizuální testování designu a geometrie. Prototypy lze rovněž použít např. k identifikování chybných tolerancí. Některé aditivní technologie mohou produkovat tzv. funkční prototypy. Ty slouží k ověřování návrhu součástí za provozních podmínek finálního produktu. Přesto, že se 3D tisk stále hojně využívá právě pro tvorbu prototypů, v současnosti je již dostupný na takové úrovni, že umožňuje zhotovovat funkční díly. [3–5] Následující graf na obr. 2 znázorňuje procentuální zastoupení aplikací, ve kterých je výroba dílů realizována pomocí AM. Z těchto hodnot je patrné, že největší podíl na využití AM představuje tvorba funkčních dílů určených pro finální aplikaci (prodej dílů a jejich používání konečným zákazníkem). Druhé nejčetnější zastoupení zaujímá výše zmíněné zhotovování prototypů. Tyto dvě oblasti společně představují více jak polovinu (56,3%) všech aplikací aditivní výroby. [3]



Obr. 2 Procentuální zastoupení aplikací aditivní výroby [3]

Aditivní výroba by měla být použita k výrobě finálních dílů v případech, kdy lze efektivně uplatnit její výhody v porovnání s konvenčními výrobními procesy. Na rozdíl od technologií vstřikování polymerů nebo odlévání kovů AM nevyžaduje, v některých případech časově

náročnou, výrobu nástrojů (forem), čímž snižuje náklady a dodací lhůty. S tím souvisí možnost rychlého přechodu a přizpůsobení výroby na odlišný typ dílu bez potřeby výroby nástrojů nebo jejich výměny. Díky tomu je navýšena agilita výroby s možností tvorby dílů „just-in-time“. To umožňuje přizpůsobit výrobu aktuální poptávce, což může vést k redukci nadbytečných zásob materiálu na skladě, zvýšení efektivity výroby, snížení nákupních cen materiálu apod. [6] Stroje AM umožňují vyrábět díly s téměř libovolnou geometrií, což otevírá nové možnosti pro konstrukční řešení součástí. S vhodným návrhem je také možné zjednodušit stávající konstrukci sestav, kdy je možné sloučit několik dílů do jednoho celku. Snížením počtu komponent lze docílit ušetření výrobního času a menší množství práce na sestavení výrobku při současně nižší spotřebě materiálu a vzniku menšího množství odpadu. Ačkoliv aditivní výroba nabízí mnohé výhody oproti konvenční výrobě a řeší některá její omezení, nemůže ji zcela nahradit. Například pro velkoobjemovou výrobu se stále preferují technologie jako odlévání nebo vstřikování, které se (i přes velkou počáteční investici do forem), vyplatí díky produkci velkého množství výrobků. Díly zhotovené aditivní výrobou nedosahují takové kvality a přesnosti povrchu, jako je docíleno při obrábění. Většina metod 3D tisku staví součásti ve směru daném principem konkrétní technologie. Tato orientace při tvorbě dílu může u některých tiskových technologií, např. u metody Fused Deposition Modeling (FDM), zapříčinit anizotropii dílu. Kvůli tomu tak tyto díly obvykle postrádají mechanické vlastnosti materiálu vyrobených subtraktivními nebo formativními metodami. [3–5]

2.1.1 Obecný výrobní proces 3D tisku

Obecný postup při zhotovování součástí metodami aditivní výroby zahrnuje několik kroků, které vycházejí z 3D virtuálního modelu a postupně přecházejí k vytvoření reálného dílu. Výrobní proces začíná tvorbou 3D modelu. K tomu lze využít libovolný software CAD (Computer Aided Design) nebo tzv. reverzní inženýrství, kdy je za pomoci např. 3D skeneru nasnímán fyzický objekt a ten převeden na digitální model. [7, 8] V obou případech musí být výstupem 3D digitální reprezentace tělesa, která plně definuje jeho vnější geometrii. Další krok představuje převedení virtuálního modelu do formátu *.stl, jenž se stal standardem pro tiskové technologie. Formát *.stl popisuje uzavřené povrchy a je základem pro výpočet řezů. Následuje přenos dat do programu určeném k 3D tisku, který slouží k definování velikosti, polohy a orientace modelu v pracovním prostoru tiskárny. Zároveň se v tomto softwaru definují tiskové parametry, např. generování podpor, nastavení výšky jednotlivých vrstev, parametry výplně apod. Poté již proběhne samotná výroba dílu. Po dokončení tisku následuje závěrečný krok, tzv. post-processing, který je typický pro konkrétní tiskovou technologii. V průběhu

post-processingu lze dotvrdit vytisknutý díl, odstranit podpůrné konstrukce, případně provést některou z povrchových úprav jako může být broušení, lakování, leštění nebo barvení. [7]

2.1.2 Dělení 3D tisku podle technologie

Aditivních technologií existuje celá řada. Norma ISO/ASTM 52900 rozděluje technologie 3D tisku na základě použitého principu výroby součásti do sedmi kategorií, které se liší principem tvorby vrstev, použitých zdrojích energie nebo tavným materiálem [3, 7, 9]:

a) Vat photopolymerization (fotopolymerace)

Aditivní metoda, která využívá k tvorbě součástí tzv. fotopolymeraci. Jedná se o proces, při němž se vytvrzují fotopolymerní pryskyřice (lze se také setkat s pojmy fotopolymer nebo resin), jenž nastává po vystavení fotopolymerů UV zářením (ve většině případů). To znamená, že procesem fotopolymerace dochází u fotopolymerů k přeměně jejich skupenství z kapalného na pevné. Do této kategorie metod patří stereolitografie (SLA), maskovaná stereolitografie (MSLA) a digitální zpracování světla (DLP – Digital Light Processing). [7, 9] Podrobněji jsou metody SLA a MSLA rozepsány v kap. 2.1.3 a v kap. 2.1.4.

b) Powder bed fusion (spékání práškové vrstvy)

Jedná se o metodu, při které jsou tepelnou energií selektivně (v předem definované oblasti) spojovány oblasti ve vrstvě prášku. Nejčastějšími zdroji tepelné energie jsou laser nebo elektronový paprsek. Představiteli této metody, při nichž lze tisknout termoplasty, jsou selektivní laserové sintrování (SLS – Selective Laser Sintering), selektivní tepelné sintrování (SHS – Selective Heat Sintering) nebo Multi Jet Fusion (MJF), která je detailněji rozepsána v autorově předchozí práci. [1] Do kategorie metod spékání práškové vrstvy patří také metody zpracování kovových prášků, např. selektivní laserové tavení (SLM – Selective Laser Melting). [9]

c) Material extrusion (vytlačování materiálu)

Aditivní technologie, při které je materiál protlačován ve formě filamentu (kontinuálního vlákna) přes vyhřátou trysku nebo otvor a postupně kladen vrstvu po vrstvě na tiskovou podložku. Tato technologie je registrována ochrannou značkou společnosti Stratasys, Inc. pod názvem FDM (Fused Deposition Modeling). Do stejné kategorie vytlačování materiálu spadá metoda FFF (Fused Filament Fabrication), která je prakticky totožná s metodou FDM a liší se pouze tím, že zkratku FFF již mohou používat všichni výrobci 3D tiskáren. [9]

d) Material jetting (tryskání materiálu)

Aditivní proces selektivního nanášení kapek stavěného materiálu, který je ukládán vrstvu po vrstvě na podložku tak, aby se vytvořil trojrozměrný díl. Jakmile je vrstva nanášena, dochází, v případě fotopolymeru, k vytvrzení vrstvy UV zářením. Lze také nanášet keramické nebo kovové prášky, které jsou vytvrzovány teplem. K technologiím tryskání materiálu je možné zařadit metody jako digitální barevný tisk (DOD – Drop On Demand) nebo PolyJet. [9]

e) Binder jetting (tryskání pojiva)

Při této metodě je do práškovitého materiálu prostřednictvím trysek selektivně nanášeno kapalné pojivo, a to za účelem spojení prášku a vytvoření požadovaného tvaru součásti. Tento proces je označován jako 3D printing (3DP) a funguje na podobném principu jako standardní inkoustové tiskárny s tím rozdílem, že v tomto případě je tisknut trojrozměrný díl. Existuje několik druhů pojiv, které je možné použít. Jejich výběr závisí na spojovaném materiálu a požadovaných vlastnostech vytisknutého dílu. [7, 9]

f) Sheet lamination (laminování deskovitého materiálu)

Tento způsob výroby dílů funguje na principu pokládání jednotlivých listů deskovitého materiálu na sebe a jejich následným spojením, které může být realizováno různými způsoby, např. slepením, svařováním nebo slisováním. K laminaci deskovitého tvaru lze použít širokou škálu materiálů, jako např. papír, polymer, keramika nebo kov. První komerčně dostupnou technologii se stala metoda Laminated Object Manufacturing (LOM). [3, 9]

g) Direct energy depositon (přímé nanášení)

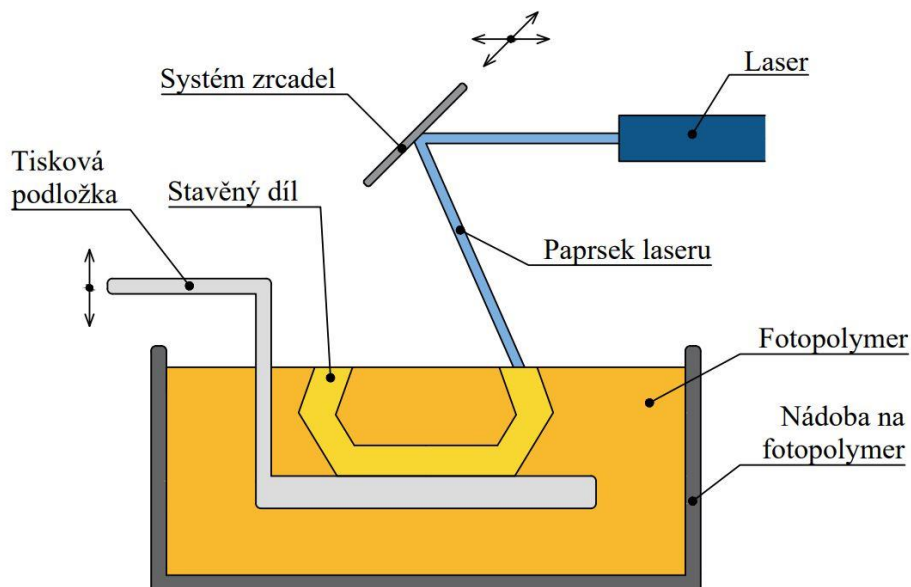
Aditivní metoda, při níž je využíváno soustředěné tepelné energie dodané pomocí laseru, elektronového paprsku či plazmového oblouku k tavení materiálu v okamžiku jeho nanášení. Materiál je dodáván ve formě kovového prášku nebo drátu. Ačkoliv je možné touto technologií vyrábět zcela nové díly, tak v dnešní době se používá převážně k opravám – navařením materiálu na stávající díl. Jako zástupce této technologie lze zmínit např. metodu Laser Engineered Net Shaping (LENS), která jako hlavní zdroj energie k natavení materiálu používá laser. [3, 9]

2.1.3 Stereolitografie (SLA)

Stereolitografie (SLA) je první vynalezená technologie 3D tisku. Historie SLA tisku sahá do počátku 80. let minulého století, kdy byl v roce 1981 tento princip poprvé představen prací japonského vědce Dr. Hidea Kodamy. [10] Ten vynalezl techniku vrstveného přístupu využívající UV záření k vytvrzení fotopolymerů. Dnes je však za vynálezce 3D tisku považován

Charles W. Hull, který zavedl termín stereolitografie a v roce 1986 mu na tuto technologii byl uznán patent. Založil společnost 3D Systems Corporation, aby technologii SLA zkomercializoval. Nedlouho poté byla v roce 1987 uvedena na trh první komerčně dostupná 3D tiskárna SLA-1. [11, 12]

Technologie SLA je založena na selektivním vytvrzování jednotlivých vrstev kapalného fotopolymeru umístěného v nádobě. Výrobní proces je schematicky znázorněn na obr. 3 (konkrétně princip tisku top-down, viz níže). K vytvrzení dílů slouží UV laserový paprsek, který je na příslušné souřadnice v ose X a ose Y nasměrován sadou zrcadel v předem stanovené dráze. Jak se laser pohybuje po hladině fotopolymeru, dochází k postupnému vytvrzování průřezu součásti v dané vrstvě vlivem fotopolymerace (viz kap. 2.1.2). Jakmile je vrstva vytvrzena, dojde k posunutí tiskové podložky v ose Z o vzdálenost rovnající se tloušťce vrstvy. Ta se obvykle pohybuje v rozmezí mezi 25 až 100 μm . Celý cyklus se takto opakuje až do okamžiku, dokud není vytisknut celý díl. V závislosti na geometrii součásti a její orientaci na podložce lze tisknout podpurnou konstrukci, která zamezuje jejímu propadu nebo zkroucení. Nevytvrzená kapalina slouží částečně jako podpora pro stavěnou součást a lze ji po ukončení tisku znovu použít. Dokončený díl je nutné opláchnout v izopropylalkoholu ke smytí přebytečného fotopolymeru. Následuje vysušení dílu a v některých případech (v závislosti na materiálu) jeho umístění ke konečnému dotvrzení do UV komory, které má za cíl stabilizaci dílu, navýšení jeho mechanických vlastností a teplotní odolnosti. Poslední krok představuje případné odstranění podpěr a dle potřeby broušení, barvení či jiná úprava povrchu. [11, 13, 14]



Obr. 3 Schéma principu tisku top-down metody stereolitografie (SLA) [3]

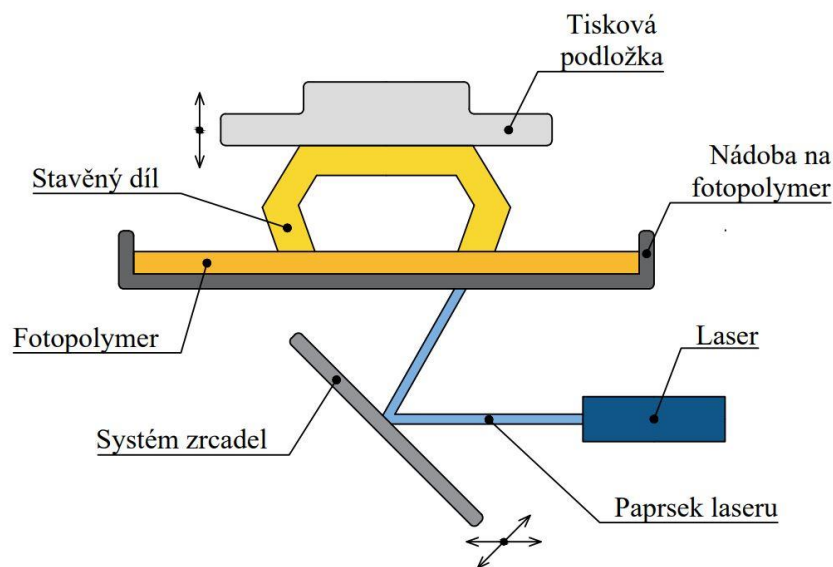
Podle druhu SLA tiskárny může probíhat tisk dvěma způsoby [11, 13]:

- Tisk top-down

Tiskárny pracující na principu top-down (viz obr. 3) mají zdroj světla umístěn nad nádobou s tekutou pryskyřicí. Laser působí na stavěný díl ze shora. Tisková podložka je při zahájení tisku ponořena těsně pod hladinu do hloubky o hodnotu výšky vrstvy. Po ztuhnutí vrstvy dojde k posunutí tiskové podložky směrem dolů vždy o výšku vrstvy.

- Tisk bottom-up

Oproti předešlé metodě se při tisku bottom-up laser nachází pod nádobou s fotopolymerem (viz obr. 4). Nádoba je opatřena průhledným dnem, jenž propouští světlo laseru. Zároveň je dno nádoby upraveno tak, aby na jeho povrchu neulpíval fotopolymer (např. potažením dna vany silikonovým potahem). Na začátku tisku je podložka v nádobě zcela ponořena a prostor mezi podložkou a dnem nádoby je roven jedné výšce vrstvy. Během tisku laser působí na tiskovou podložku ze spoda a jak je postupně stavěn díl, podložka se pohybuje směrem vzhůru.



Obr. 4 Schéma principu tisku bottom-up metody stereolitografie (SLA) [15]

Princip tisku bottom-up se uplatňuje především u stolních tiskáren. Dovolují tisknout objemově menší díly. Důvod tohoto omezení je dán silami působícími na díl během tisku, které by mohly zapříčinit, že by se příliš hmotný díl uvolnil od tiskové podložky. To by vedlo k selhání stavby dílu. Velikost pracovního prostoru může být až (145 x 145 x 175) mm, nicméně tato velikost se může u jednotlivých tiskáren lišit. [13] Tisk top-down se obecně používá u průmyslových tiskáren s větší zastavovací plochou a vyšším objemem nádrže, který může

v závislosti na výrobci tiskárny dosahovat velikosti až (1500 x 750 x 500) mm. V porovnání se stolními tiskárnami, umožňují průmyslové tiskárny tisk větších dílů a sestav bez ztráty přesnosti. Zároveň dosahují vyšší přesnosti. Tyto vlastnosti jsou ovšem spojeny s vyššími náklady na provoz a údržbu těchto strojů. Cenově dostupnější a více rozšířené tak jsou stolní tiskárny. [13]

Mezi největší přednosti technologie SLA patří její vysoká rozměrová přesnost, která z ní dělá jednu z rozměrově nejpřesnějších metod 3D tisku. U stolních tiskáren je udávána přesnost v rozmezí ($\pm 0,010 - 0,250$) mm. [13] Tato metoda zároveň umožňuje výrobu dílů s hladkým povrchem s vysokými (jemnými) detaily. Díly tisknuté metodou SLA mohou rovněž vykazovat složité geometrické tvary. Dalšími vlastnostmi, kterými se díly zhotovené stereolitografií vyznačují, jsou vodotěsnost a izotropní mechanické vlastnosti. Právě díky těmto charakteristikám je stereolitografie ideální pro aplikace, které kladou vysoké požadavky na kvalitu povrchu. SLA tisk tak nachází široké uplatnění v celé řadě oborů, jako je např. tvorba prototypů, nástrojů, v oblasti stomatologie a zdravotnictví, šperkařství apod. [11, 13] Příklady použití technologie SLA k tvorbě součástí jsou znázorněny na obr. 5.

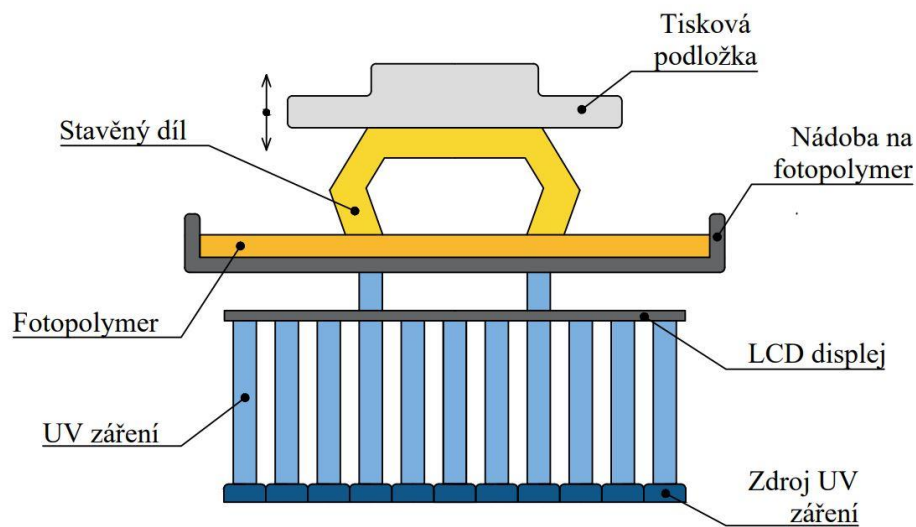


Obr. 5 Příklady využití tiskové technologie stereolitografie (SLA) [9]

2.1.4 Maskovaná stereolitografie (MSLA)

Aditivní metoda maskovaná stereolitografie vychází z technologie SLA. K vytvrzení pryskyřice je u MSLA rovněž docíleno UV zářením, ovšem její rozdíl oproti SLA spočívá v použitém zdroji záření a samotném procesu vytvrzování fotopolymeru (viz obr. 6). MSLA tiskárny využívají místo UV laseru výkonný UV světelný zdroj. Ten zajišťuje osvit displeje LCD obrazovky, na kterém se jako poloprůhledná maska promítá tvar každé jednotlivé vrstvy součásti. Procházející UV záření je selektivně maskováno, jelikož prochází pouze aktivovanými (bíle svítícími) pixely na obrazovce LCD displeje. Fotopolymer je tak vytvrzován pouze v tom místě, kam prostoupí UV záření. Tištěné objekty mají pevné rozlišení v osách X a Y, protože se LCD displej skládá ze čtvercových pixelů s daným rozlišením. Z toho důvodu se

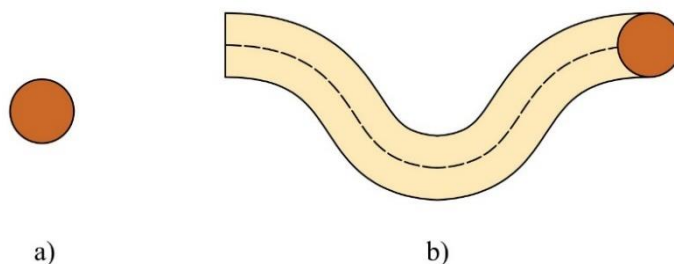
pro vyhlazení hran zobrazovaného obrazce používá tzv. antialiasing, který odstraní ostré přechody v oblasti hran zprůměrováním barev okolních pixelů. [15, 16]



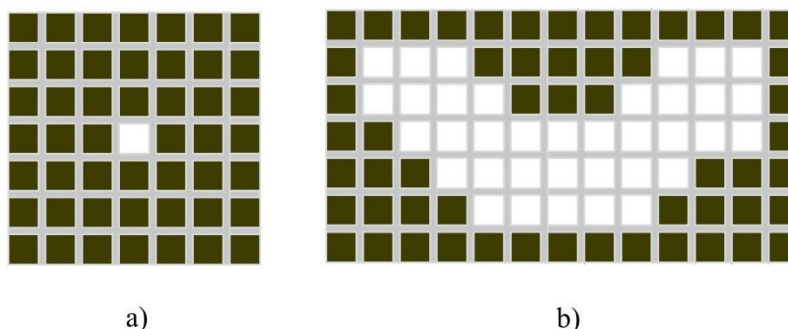
Obr. 6 Schéma metody maskované stereolitografie (MSLA) [15]

2.1.5 Porovnání metod SLA a MSLA

Proces vytvrzování u MSLA umožňuje ozářit celou vrstvu najednou, díky čemuž nemá vliv na rychlost tisku množství objektů, které jsou umístěné na tiskové ploše, ale pouze počet vrstev. Tiskový čas jedné vrstvy zůstává stále stejný. Tuhnutí vrstvy u stereolitografie probíhá postupně, jak laser „vykresluje“ průřez každé součásti v jednotlivých vrstvách. Čas potřebný pro vytvrzení každé vrstvy je tak závislý na její velikosti (ploše), což vede při větším počtu tištěných objektů k nárůstu tiskového času. Tento rozdíl v procesech vytvrzování znamená, že MSLA umožňuje dosáhnout rychlejšího tisku, a to zejména jedná-li se o tisk rozměrnějších dílů a při stavbě většího množství dílů současně. Technologie SLA a MSLA se rovněž liší v horizontálním rozlišení, a to i v případě, pokud je nastavená výška vrstvy u obou metod totožná. U tiskáren SLA je detail vykreslení dán průměrem laserového paprsku, a jelikož je vychylován pomocí zrcadel, nejsou v osách X a Y viditelné žádné kroky (viz obr. 7). Výtisk tak může mít libovolné rozlišení. Naopak, jak již bylo zmíněno výše, u MSLA je rozlišení tisku obvykle dáno pevným rozlišením LCD obrazovky, tzn. na hustotě pixelů (viz obr. 8). [15, 16]



Obr. 7 Schéma vykreslování vrstev metodou SLA [15]
 a) minimální velikost a tvar laserového bodu,
 b) dráha laserového paprsku při „vykreslování“ průřezu součásti



Obr. 8 Schéma vykreslování vrstev metodou MSLA [15]
 a) velikost a tvar minimálního bodu (pixelu),
 b) průřez součásti vytvořené pomocí voxelů metodou MSLA

2.1.6 Materiály určené pro metody SLA a MSLA

Fotopolymer (používá se rovněž označení fotopolymerní pryskyřice nebo resin) je tiskový materiál určený pro SLA, DLP a MSLA tiskárny. Používá se v kapalné formě a je vytvrzován UV zářením. Resiny se skládají z několika hlavních složek [15, 17]:

- matrice pryskyřice – tvořena monomery a oligomery,
- fotoiniciátory – jedná se o molekuly, které reagují na dopad UV záření, čímž iniciují reakci vytvrzování,
- aditiva – změny charakteristiky výtisku,
- pigmenty a barviva – změna vzhledu (barvy) výtisku.

Výběr vlastností fotopolymerů je prováděn v souladu s požadavky na tištěný díl. K dispozici je několik typů resinů, které se liší jednak svými mechanickými, optickými nebo teplotními vlastnostmi a jednak cenou, jenž se odvíjí od vlastností resinů. Např. resiny pro speciální použití, jako jsou odlévací nebo dentální resiny, mají obecně vysokou cenu. Při výběru fotopolymeru je také důležité věnovat pozornost vlnové délce pryskyřice, při které začíná proces tuhnutí, jelikož každý resin začne tuhnout při hodnotě jiné vlnové délky. [15, 17]

Pryskyřice používané pro tisk metodami SLA a MSLA představují hlavní nevýhody obou těchto metod. Resiny bývají většinou křehké s nízkou tepelnou a mechanickou odolností (v závislosti na druhu materiálu). [13] Tyto materiály mohou být také v jejich tekuté formě nebezpečné pro zdraví člověka a životní prostředí. [18] Součásti vytištěné z resinů mohou po jejich dodatečném vystavení UV záření postupem času degradovat, tzn. postupně snižovat jejich mechanické a optické vlastnosti. [13]

2.2 Elektrochemické pokovování

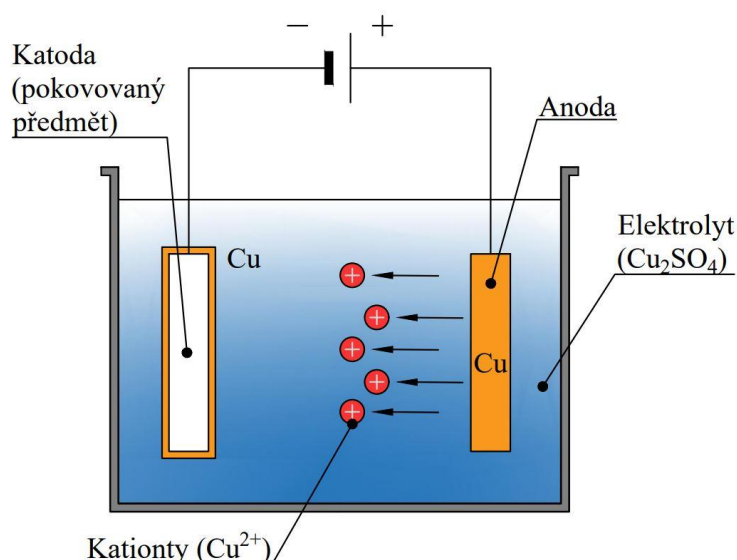
Elektrochemické (galvanické) pokovování patří do kategorie technologických postupů, při kterých jsou na povrch součásti vylučovány vrstvy kovu. Tyto procesy se podle hlavních rysů mohou rozdělit na chemické, galvanické, vakuové a speciální způsoby pokovování. [19] Vzhledem k aplikaci technologie elektrochemického pokovování v rámci experimentální části této diplomové práce, je této metodě věnována kapitola 2.2.

Galvanické pokovování je elektrochemický proces, při němž se vylučují na povrchu součásti tenké kovové povlaky, které mohou sloužit ke korozní ochraně nebo k získání požadovaných užitných a estetických vlastností pokovované součásti. Vznikají tak struktury polymer – kov, které mohou vykazovat vyšší odolnost např. vůči mechanickému namáhání v ohybu a tahu. Mohou být rovněž odolnější vůči tepelnému namáhání. Nanesením kovových povlaků lze také docílit ochrany dílů proti stárnutí vlivem působení UV záření, jakožto i dalších fyzikálních nebo chemických vlivů. Rozhodujícím faktorem pro úspěšné nanesení kovu na polymer je zejména zajištění dostatečné přilnavosti (problematika přilnavosti povlaku – viz kap. 2.3.2) vrstvy kovu na jeho povrch. Běžným postupem k zakotvení kovu na povrchu polymeru je narušení jeho povrchové vrstvy leptáním v kyselině chromsírové – $\text{Cr}(\text{H}_2\text{SO}_4)_3$, což má za následek vytvoření nerovností a dutin na povrchu polymeru, jejichž velikost se pohybuje v řádu desetin až jednotek μm . Zvýší se tak adheze mezi polymerním dílem a aplikovanými kovovými vrstvami. Tento proces pokovování plastů je ovšem velice náročný, jelikož vyžaduje použití vysokého množství chemikálií, oplachů a udržení dostatečné stability výrobních technologií. Proces galvanického pokovení polymerů se většinou skládá z těchto kroků: moření, trojnásobný oplach, neutralizace plastu, trojnásobný oplach, předaktivace a následná aktivace povrchu, oplach, odstranění cínu, trojnásobný oplach, chemické niklování, trojnásobný oplach, imerzní mědění, oplach, kyselé mědění, trojnásobný oplach, niklování, trojnásobný oplach a případné další niklování a chromování. Vylučované vrstvy kovu obvykle dosahují tloušťek okolo $50 \mu\text{m}$. Tento postup je zpravidla optimalizovaný pro díly z materiálu akrylonitril–butadien–styren (ABS), které jsou vyráběny technologií vstřikování. Ostatní materiály vykazují nedostatečnou adhezi, a to

obzvlášť při neuvolněném vnitřním pnutí součásti zabraňující jejímu odpovídajícímu naleptání. [20–22] Z toho důvodu selhávají pokusy o standardní galvanické pokovení dílů vyrobených pomocí 3D tisku. Kvůli výše zmíněným problémům byla vyvinuta metoda pokovování Elformplate, která řeší pokovování polymerních dílů zhotovených 3D tiskem. [22]

2.2.1 Princip metody Elformplate

Základem technologie Elformplate (a obecně elektrochemického pokovování) je elektrolytický děj, který probíhá v roztoku elektrolytu při průchodu stejnosměrného proudu. Schematicky je tento proces znázorněn na obr. 9. Přivedení stejnosměrného proudu je realizováno prostřednictvím dvou elektrod, které jsou ponořeny do roztoku elektrolytu. Kladně polarizovaná elektroda (anoda) představuje kov, který je nanášen na pokovovaný předmět. Jako záporně polarizovaná elektroda (katoda) je zapojen díl, na jehož povrchu se vylučuje kovový povlak. Elektrolyt se skládá z vody, anorganických solí (CuSO_4), kyseliny sírové a přísad. Po zavedení stejnosměrného proudu do elektrolytu dojde ke štěpení elektrolytického roztoku anorganické soli na kladně a záporně nabitě ionty soli. Při galvanickém procesu se na anodě vylučují záporné ionty (Cl^- , SO_4^{2-}) a nastává jejich oxidace, tj. odevzdání elektronů (zvýšení jejich kladného mocenství). Naopak na katodě jsou vylučovány kladně nabitě ionty (Cu^{2+}), kde dochází k jejich redukci (přijímání elektronů), čímž se na katodě začne vylučovat kovová vrstva. V průběhu pokovovacího procesu je úbytek iontů z roztoku elektrolytu doplňován rozpouštěním anody. [23, 24]



Obr. 9 Schéma galvanického pokovování mědi [24]

V porovnání s elektrolyzou se opačnou charakteristikou průběhu elektrochemického děje vyznačuje galvanický článek, jenž slouží k výrobě elektrického proudu. V galvanickém článku mají elektrody opačná znaménka (polaritu), tzn. katoda má kladný pól a anoda záporný. Elektrolyza může také nastat mezi dvěma nerozpustnými elektrodami při průchodu elektrického proudu elektrolytem. Nicméně tento děj je časově omezen na dobu, dokud nejsou vyčerpány jednotlivé složky soli obsažené v roztoku elektrolytu. Poté je průchod elektrického proudu limitován odporem elektrolytu. K zabránění tohoto jevu je nutné pravidelně doplňovat koncentrace solí příslušného kovu. [23]

2.2.2 Faradayovi zákony

Hmotnost vyloučeného a rozpuštěného kovu při galvanickém procesu vyjadřují Faradayovi zákony. První Faradayův zákon je označován jako zákon stálého elektrochemického působení. Vyjadřuje přímo úměrný vztah mezi hmotností vyloučené látky účinkem elektrického proudu a velikostí elektrického náboje prošlého elektrolytem a je vyjádřen rovnicí (1) [23]:

$$m = A_e \cdot I \cdot t \quad (1)$$

kde značí: m – hmotnost látek vyloučených vlivem elektrického proudu [g],

A_e – konstantu úměrnosti (tzv. elektrochemický ekvivalent,
tzn. množství látky vyloučené nábojem 1C) [g·A⁻¹·s⁻¹],

I – elektrický proud [A],

t – čas pokovení [s].

Druhý Faradayův zákon popisuje, že hmotnost různých látek vyloučených na elektrodách průchodem stejného elektrického náboje jsou přímo úměrné jejich elektrochemickým ekvivalentům. Tento zákon je popsán vztahem (2) [23]:

$$A_e = \frac{M}{n \cdot F} \quad (2)$$

kde značí: M – molární hmotnost kovů [g·mol⁻¹],

n – mocenství kovového kationtu v lázni [-],

F – Faradayovu konstantu [C·mol⁻¹].

Pro výpočet hmotnosti vyloučeného povlaku lze následně oba Faradayovy zákony vyjádřit rovnicí ve tvaru (3) [23]:

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{n \cdot F} \quad (3)$$

2.2.3 Parametry ovlivňující vlastnosti nanesených povlaků

Proudový výtěžek r [%]

Primární elektrochemické reakce během galvanického pokovování doprovází také vedlejší reakce na obou elektrodách. Ty zapříčiňují, že nedojde ke kompletnímu spotřebování množství dodaného elektrického proudu na vylučování a rozpuštění kovu. Množství skutečného elektrického proudu, které je spotřebované na vyloučení nebo rozpouštění kovu, se nazývá proudový výtěžek r , pro něhož platí vztah (4) [23]:

$$r_{kat.(anod.)} = \frac{m_{skut.}}{m_{teor.}} \cdot 100 \quad (4)$$

- kde značí: $r_{kat.(anod.)}$ – proudový výtěžek (katodický nebo anodický) [%],
 $m_{skut.}$ – hmotnost skutečně vyloučeného kovu,
 popř. rozpuštěného kovu [g],
 $m_{teor.}$ – hmotnost kovu vypočteného dle Faradayova zákona [g].

Hodnota proudového výtěžku se u jednotlivých druhů galvanických lázní liší. V případě slabě kyselých lázní se pohybuje v rozmezí mezi 95 až 98 %, u kyanidových lázní mezi 60 až 90 % a u chromových lázní s kyselinou sírovou činí výše proudového výtěžku pouze 10 až 20 %. Katodová proudová účinnost je ovlivněna také proudovou hustotou a teplotou galvanické lázně, kdy při rostoucí proudové hustotě a mírně klesající teplotě nastává její výrazné navýšení. Katodický proudový výtěžek je rovněž snižován vylučováním vodíku, jenž dále působí nepříznivě na kovový povlak, v horším případě dokonce na samotný pokovovaný díl. Problematice vylučování vodíku a s tím spojené tzv. vodíkové křehkosti byla věnována samostatná kapitola v autorově předchozí práci. [1] Naproti tomu anodický proudový výtěžek často činí více jak 100 %, což je dáno povahou chemického rozpouštění anod v lázni. Proudová účinnost katodového a anodového výtěžku hraje při galvanickém pokovení klíčovou roli z ekonomického hlediska, podle kterého lze posuzovat úspěšnost procesu pokovování. [23, 25]

Vezme-li se v potaz proudový výtěžek a hmotnost vyloučeného povlaku, lze následně odvodit vlastní rovnici (5) [23]:

$$h \cdot s \cdot c = A_e \cdot I \cdot t \cdot r \quad (5)$$

resp. úpravou rovnice (5) lze získat vztah (6) mezi časem pokovování (t) a ostatními veličinami, který je možné využít pro praktické účely [23]:

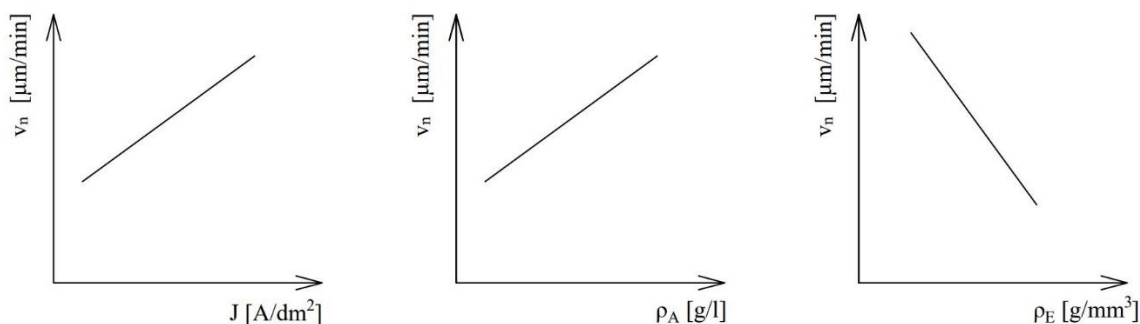
$$t = \frac{h \cdot \rho \cdot c}{A_e \cdot I \cdot r} \quad (6)$$

kde značí: h – tloušťku povlaku [mm],
 c – plochu pokovení [mm²],
 ρ – hustotu nanášeného kovu [g·mm⁻³].

Krystalická stavba povlaků

Strukturu, jakou budou vykazovat nanesené kovové povlaky, určuje krystalická stavba povlaků, která závisí především na dvou parametrech. Jedná se o rychlost tvorby krystalových zárodků (nukleí – v_n) a vlastní krystalizační rychlosti (v_r). Pokud je cílem pokovování vylučování jemnozrnných povlaků, je obecně zapotřebí zajistit vysokou rychlost nukleace krystalových center a současně nízkou krystalizační rychlost, čehož lze dosáhnout vhodnou volbou proudové hustoty (J), teplotou lázně, přísadami, případně reverzním zapojením, kdy je pokovovaný předmět střídavě zapojen jako katoda a anoda. Při katodickém zapojení dochází na předmětu k ulpívání kovu a při zapojení pokovovaného předmětu jako anoda, se z něho naopak kovový povlak rozpouští. Podstatné je, že k prvotnímu rozpouštění dochází na vrcholcích nerovností povlaku. Díky tomuto jevu nastává vyhlazení povlaku, čímž je docíleno jeho rovnoměrného a lesklého povrchu. [23]

První krystalizační zárodky povlaku vznikají na tzv. aktivních centrech. Tyto centra se mohou nacházet na různých geometrických výčnělcích, trhlinách a jiných místech katody, jenž mají vyšší energetickou hladinu než ostatní plochy katody. Tvorbou těchto center (např. pomocí leštění) lze zvýšit spontánní krystalizační rychlost, která zapříčiní vznik jemnější struktury povlaku. Spontánní krystalizační rychlost je také silně ovlivněna proudovou hustotou, koncentrací iontů vylučovaného kovu (ρ_A) a hustotou elektrolytu (ρ_E). Tyto závislosti jsou znázorněny na obr. 10. [23]



Obr. 10 Závislost proudové hustoty J , koncentrace iontů ρ_A a hustoty elektrolytu ρ_E na nukleační rychlosti zárodků v_n [23]

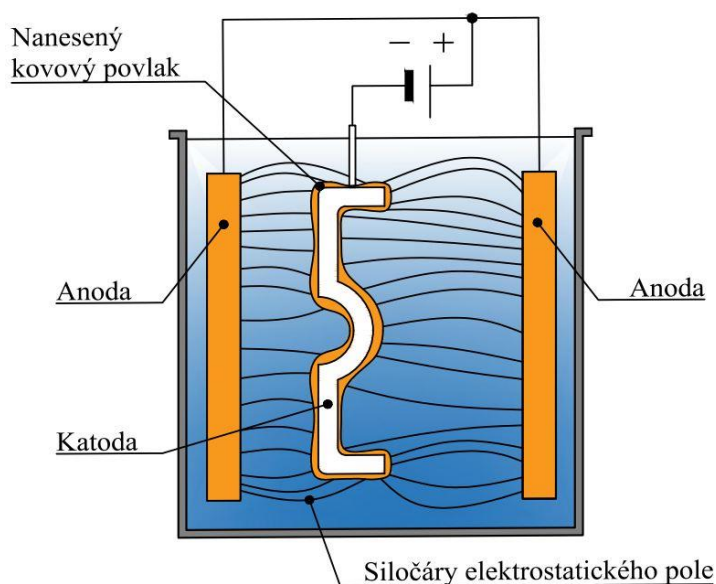
Z obr. 10 je zjevné, že pouhým zvyšováním proudové hustoty a koncentrací iontů by mělo dojít k nárůstu rychlosti nukleace zárodků a tím k rychlejšímu dosáhnutí požadovaného (jemnozrného) povlaku. Ve skutečnosti tento jev ovšem nenastává. Po překročení optimálních hodnot koncentrace iontů vylučovaného kovu a proudové hustoty pro konkrétní typ lázně, začnou vznikat hrubozrné povlaky, které mohou navíc vykazovat nízkou adhezi k pokovovanému dílu. Zároveň si lze z výše uvedeného obr. 10 povšimnout, že snižující se hustota elektrolytu má nepříznivý vliv na rychlost nukleace zárodků. Z výše uvedeného vyplývá, že neexistuje univerzální galvanická lázeň, která by splňovala všechny technologické požadavky pokovování. [23]

Hloubková účinnost

Hloubková účinnost je ovlivňována několika faktory, jenž mají vliv na to, že poměr elektrolyticky vylučovaného kovu na různě vzdálených místech pokovovaného předmětu od anody není roven poměru těchto vzdáleností. Skutečná tloušťka povlaku v kterémkoliv bodě závisí především na proudové hustotě v daném bodě (viz obr. 11). Rozložení proudové hustoty na povrchu katody je do značné míry určeno rozložením elektrostatického pole, tedy na tvaru pokovované součásti, její poloze v elektrolytu vzhledem k anodám, případným umístěním pomocných anod nebo stínících elementů apod. Intenzita proudové hustoty je vyšší na výčnělcích součásti (hranách) a v oblastech nejbliže k anodám. Jedná se o místa s velkou proudovou hustotou (tzv. HCD – High Current Density). V oblastech s HCD jsou vylučovány silnější vrstvy kovu. Tento jev nastává díky sníženému odporu proti toku elektrického proudu vlivem kratší vzdálenosti mezi anodou a katodou. Naopak v oblastech s prohlubněmi (otvory, štěrbinami) nebo v zastíněných a odvrácených oblastech směrem od anody, je elektrický proud nižší. To je dáno vyšším odporem vůči toku elektrického proudu, který zapříčiní vylučování slabší vrstvy kovového povlaku v těchto místech s nízkou proudovou hustotou (tzv. LCD – Low Current Density). Rozložení proudové hustoty je primárním činitelem ovlivňující distribuci

kovu, jenž může být do určité míry řízen vhodným umístěním pokovované součásti v galvanické lázni, anod a výše zmíněných pomocných anod. Ty by měly být umístěny tak, aby směřovaly tok elektrického proudu do oblastí, kde je potřeba navýšit proudovou hustotu a tím tloušťku povlaku. Také lze použít k usměrnění proudu stínící elementy zhotovené z nevodivých materiálů a umístit je mezi anodu a katodu. [23, 26, 27]

Vzhledem k tomu, že neexistuje obecný popis hloubkového účinku pro jednotlivé elektrolyty, je proto nutné experimentálně ověřit účinnost každé složky elektrolytu za daných podmínek pokovování (teplota, proudová hustota, charakter proudu). Obvykle platí skutečnost, že elektrolyty založené na jednoduchých solích vykazují nízký hloubkový účinek a vylučují nerovnoměrné povlaky, jenž mají na hranách nebo výstupcích větší tloušťku, než je tomu na plochách rovných. K těmto lázním se řadí např. lázně chromovací, které mají sice jednu z nejnižších hloubkových účinností, ale naopak dosahují výborné vyrovnávací schopnosti. V porovnání s těmito mají lázně složené z komplexních solí vyšší hloubkovou účinnost, přičemž tou nejvyšší se vyznačují mědicí a zinkovací kyanidové elektrolyty. [23, 26, 27]

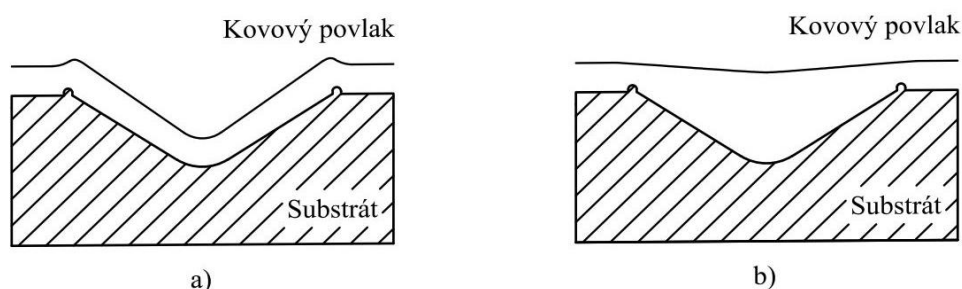


Obr. 11 Variace tlouštěk naneseného kovu vlivem rozdílné proudové hustoty [27]

Vyrovnávací schopnost

Dalším významným parametrem je vyrovnávací schopnost, jenž patří mezi klíčové faktory k dosažení dokonale zobrazivých (lesklých) povlaků. Popisuje schopnost galvanické lázně vyrovnat vyloučeným povlakem nerovnosti povrchu pokovovaného předmětu a tím snižovat jeho drsnost. Negativní vyrovnávací schopnost mají lázně vylučující matné povlaky, tzn. při pokovování zvětšují mikronerovnosti povrchu pokovované součásti (viz obr. 12a).

Vyrovňovací schopnost lázně lze ovlivnit organickými částicemi koloidního charakteru. Koloidy jsou drobné částice o velikostech v rozmezí mezi 1 až 1000 nm. [28] Do této kategorie patří leskutvorné přísady, které díky své adsorpční schopnosti obalují jednotlivá krystalizační centra na katodovém kovu a tím zamezují tvorbě rozměrných, nežádoucích krystalů. Přidáním leskutvorných přísad do galvanických lázní se podpoří vylučování rovnoměrných povlaků, jenž mají velmi dobrou vyrovňovací schopnost a lesk (viz obr. 12b). Tím jsou sníženy nároky na mechanickou předúpravu povrchu pokovovaného objektu, které by jinak měly za cíl snížení nerovnosti povrchu. [23, 29]

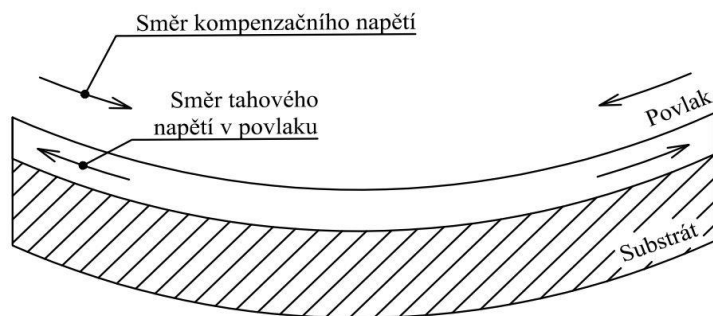


Obr. 12 Schematické znázornění vyrovnávacího účinku galvanických lázní [23]
a) bez leskutvorných přísad, b) s přidavkem leskutvorných přísad

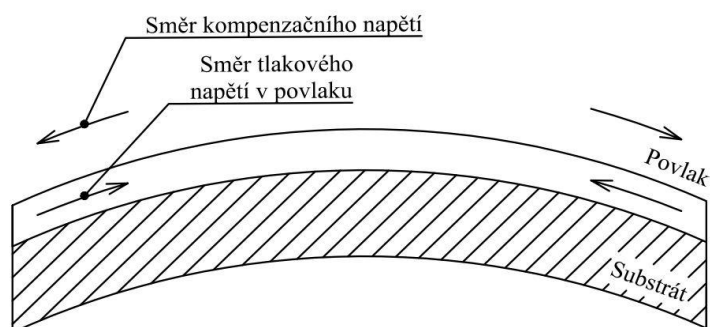
Vnitřní pnutí v povlacích

Jedním z hlavních problémů vyskytujícím se při galvanického pokovování je vnitřní pnutí, které může být dvojího druhu – tahové nebo tlakové napětí. Vysoké hodnoty vnitřního pnutí mohou způsobit mikrotrhliny a praskání v celém objemu kovového povlaku a nedostatečnou adhezi povlaku k povrchu pokovovaného dílu. Tato snížená přilnavost se projevuje v podobě odlupování, puchýřů nebo zvlnění. [30, 31] K ilustraci rozdílu mezi vnitřními pnutími lze použít analogii s jednorozměrnou pružinou, která je připevněna k podkladu bez vnitřního napětí (tj. před pokovováním). Tahové pnutí v povlaku má za následek jeho rozpínání (obdobně jako natahování pružiny – viz obr. 13). Systém substrát//vrstva¹ se ovšem snaží toto pnutí kompenzovat a povlak tak má tendenci se vzhledem k podkladu smršťovat, což může vyvolat průhyb celého systému. Naopak tlakové pnutí vyvolává kompresi v povlaku, takže povlak bude připomínat stlačenou pružinu. Jak se systém substrát//vrstva snaží kompenzovat toto tlakové pnutí, tak má podklad s povlakem sklon k vypouknutí (viz obr. 14). [32]

¹ V této práci se používají k označení povlakového systému lomítka, kdy objekt před dvěma lomítky značí substrát. Po ukončení těchto dvou lomítek následuje označení vrstvy nebo značky pro jednotlivé nanesené povlaky, které jsou oddělené lomítkem.



Obr. 13 Schéma modelu vnitřního tahového pnutí v galvanicky vyloučených povlacích s využitím [32]



Obr. 14 Schéma modelu vnitřního tlakového pnutí v galvanicky vyloučených povlacích s využitím [32]

Rozdílné vlastnosti galvanicky vyloučeného kovu jsou způsobeny velkým rozpětím ve stavbě mikroskopické struktury. Toto rozpětí je dáno přítomností cizích nekovových složek nacházejících se v elektrolytu, jenž se částečně zabudovávají do vylučovaného kovu a způsobují tak široký rozptyl vlastností povlaku. Důvodem vzniku vnitřního pnutí v povlacích v průběhu pokovování může být např. srůstání malých krystalů ve větší, změny mřížkových parametrů, nerovnoměrné rozmístování cizích částic v mřížce a po hranicích zrn a jejich následné přemístování difuzí. Riziko představuje také tvorba chemických sloučenin kovů s příměsemi doprovázenou objemovými změnami. Vnitřní pnutí závisí na vlastnostech a složení elektrolytu a lze jej ovlivnit výběrem elektrolytu a udržováním jeho čistoty. Významnou roli může hrát také přidavek organických přísad. V neposlední řadě je pro regulaci vnitřního pnutí rovněž klíčové kontrolování teploty galvanické lázně, proudové hustoty a dalších procesních parametrů. [31, 33]

2.2.4 Galvanické mědění

Galvanicky vyloučené měděné povlaky nacházejí široké uplatnění v celé řadě aplikací. Tím důvodem jsou především fyzikální a chemické vlastnosti mědi, jež je charakteristická svou výbornou tepelnou a elektrickou vodivostí, z termodynamického hlediska je měď stálá a nerozpouští se ani v některých koncentrovanějších kyselinách. Vzhledem ke své vynikající vyrovnávací schopnosti, kterou dosahují i na těžko pokovovatelných dílech, se měděné povlaky používají jako základová vrstva a mezivrstva především v systému Cu/Ni/Cr. [29, 34] Další oblastí, kde se lze s měděnými povlaky setkat, je tvorba funkčních povlaků. Do této oblasti patří např. galvanoplastika, výroba měděných fólií pro tištěné spoje nebo použití měděné vrstvy jako ochranného povlaku při cementaci oceli. Galvanicky vyloučené měděné povlaky lze také využít jako samostatný dekorativní povlak, který je ovšem obvykle potřeba chránit vhodným povlakem nebo pasivací proti koroznímu účinku vnější atmosféry. Ve většině případů se k vylučování mědi používají dva typy mědicích lázní, a to kyanidové a kyselé lázně na bázi síranu měďnatého (CuSO_4). Druh lázně a její složení určuje strukturu a tím pádem tak vlastnosti nanášených měděných povlaků. [23, 29]

V kyselých mědicích lázní je nositelem kovu síran měďnatý. Měď se v roztoku vyskytuje ve formě dvojmocného kationtu Cu^{2+} . Elektrolyt obsahuje ke zvýšení vodivosti kyselinu sírovou. Důležitá je také přítomnost chloridů, protože v daném rozmezí příznivě ovlivňují lesk a vyrovnávací schopnost galvanických lázní vylučující lesklé povlaky. Kyselé lázně se vyznačují výbornou vyrovnávací schopností, což vede k vylučování velmi lesklých povrchů s dobrou zobrazivostí. Mezi další výhody kyselých lázní patří vysoká vylučovací rychlost, široké rozmezí použitelných proudových hustot a pozitivní aspekt přináší také ekologicky šetrná likvidace odpadních vod. Nicméně tyto lázně mají nízkou hloubkovou účinnost a nelze je použít pro přímé pokovení ocelí a jiných méně ušlechtilých kovů. Toto omezení je způsobeno faktem, kdy při ponoření těchto materiálů do kyselé mědicí lázně, dojde na jejich povrchu k vysrážení vrstvičky mědi, která má nízkou adhezi, což zapříčiní její odlupování od povrchu. Naopak kyanidové lázně jsou díky svým vlastnostem vhodné pro přímé pokovování méně ušlechtilých materiálů. I přes svoji toxicitu a jedovatost se stále využívají ve výrobě, ačkoli se čím dál tím více opouští od jejich použití. Kyanidové lázně jsou rovněž těžko nahraditelné pro pokovení hliníku, zinku a jejich slitin. [23, 29, 34]

2.2.5 Galvanické niklování

Technologie galvanického niklování patří k nejstarším procesům elektrolytického pokovování kovů. Ročně se po celém světě spotřebuje zhruba 10^8 kg niklu pro potřeby galvanického pokovování, z čehož lze usoudit významnou roli niklu v této oblasti. [29, 34] Aplikace niklu v rámci procesu galvanického pokovení lze rozdělit do tří kategorií: dekorativní, funkční a galvanoplastické. Během výroby dekorativně ochranných systémů se jako hlavní složka často používá nikl, jenž díky svým fyzikálním vlastnostem dokáže plnit funkce mezipovlaku nebo předúpravy pro finální vrstvu při chromování. Tyto systémy musí splňovat požadavky na výborné vzhledové vlastnosti a dobrou korozní odolnost při relativně nízké tloušťce povlaku. Přitom je nutné zachovat ekonomičnost provozu z důvodu relativně vyšší ceny niklu. Funkční aplikace niklového pokovování zahrnují ty, které nevyžadují lesklý vzhled pokovené součásti. Existuje mnoho technických aplikací galvanického niklování, jejichž účel může spočívat v navýšení odolnosti součásti proti korozi a opotřebení, ve změně magnetických vlastností, k přípravě povrchů pro smaltování nebo organický nátěr a jiné. S těmito povlaky se lze setkat např. v chemickém, jaderném nebo elektrotechnickém průmyslu. [25, 34]

Třetí oblastí galvanického niklování je galvanoplastika. Jedná se o proces, kterým lze vytvořit silné kovové vrstvy na povrchu předmětu, podobně jako tomu je u galvanického pokovení. Rozdílem je však tloušťka vrstvy, která se u galvanoplastiky pohybuje v rozmezí desetin až jednotek milimetrů, zatímco u galvanického pokovení dosahuje řádově mikrometry. V průběhu galvanoplastiky je nikl nanášen na vhodný model (tzv. trn) ze kterého je po ukončení pokovování sejmuto. Nanesený povlak se tak stane samostatným výrobkem. [25, 35] Příklady použití galvanického niklování jsou uvedeny na obr. 15.



Obr. 15 Příklady použití galvanického niklování [27, 36]

V současné době se na trhu vyskytuje více druhů niklovacích lázní mající různé vlastnosti. Tyto lázně jsou oproti jiným druhům galvanických lázní citlivější na znečištění, které má vliv na výsledný vzhled a barvu povlaku, jeho adhezi k substrátu a někdy také na hloubkovou účinnost lázně. Obvyklé složení niklovací lázně je na bázi síranu nikelnatého (NiSO_4), chloridu nikelnatého (NiCl_2) a kyseliny borité (H_3BO_3). [29, 34]

2.3 Vybrané metody hodnocení jakosti povlaků

Tato kapitola pojednává o metodách, kterými lze stanovit materiálové vlastnosti jednak samotného kovového povlaku, ale také struktur polymer – kov.

2.3.1 Stanovení vnitřního pnutí v kovových povlacích

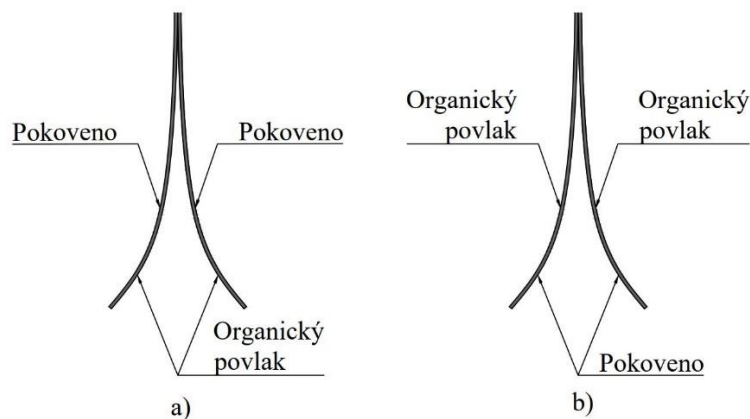
V současné době je možné pro stanovení vnitřního pnutí v galvanicky vyloučených povlacích použít některé z následujících metod: rentgenografické, magnetické a mechanické. Mezi nejrozšířenější patří mechanické metody, jejichž princip spočívá v měření deformace nebo deformační síly vyvolané pnutím ve vyloučeném povlaku. Lze je rozdělit do dvou následujících skupin [33]:

- 1) První skupinou jsou metody stanovující velikost a typ vnitřních napětí v povlaku až po ukončení pokovování. Hodnoty vnitřního pnutí jsou měřeny v celé tloušťce povlaku a následně zprůměrovány. Tyto metody jsou vhodné pro orientační měření a kontrolu funkce provozu galvanických lázní.
- 2) Druhou skupinu představují metody, jenž umožňují měřit velikost vnitřního pnutí galvanických povlaků již v průběhu pokovování. Nabízejí detailnější analýzu elektrokrystalizačních procesů, vlivu složení lázně, teploty, proudové hustoty atd. Během pokovování je důležité sledovat průběh vnitřního napětí. Z toho důvodu je následující část práce zaměřena pouze na ty metody, které tento požadavek splňují.

Mezi základní metody mechanického měření vnitřního pnutí v kovových povlacích patří metoda jednostranně ohýbaného pásku a metoda spirálové katody. Zkušební postup jednostranně ohýbaného pásku je v této práci popsán dle normy ASTM B975 – 15. [37] Metoda spirálové katody se řídí standardem ASTM B636 – 84. [30] Pro stanovení vnitřního pnutí lze využít také metodu měření pomocí IS – metru. [38]

Metoda jednostranně pokovovaného pásku

Během této metody se do lázně zavěsí tenký kovový pásek, který je v koncové oblasti rozdělen na dvě ramena. Na testovací pásek je poté nanesen vhodný organický povlak tak, aby izoloval vždy přední stranu jednoho ramena, zadní stranu druhého ramena a obě strany vzorku nad místem, kde se ramena rozdělují. Tím je zajištěno, že se v těchto oblastech nebude vylučovat kovová vrstva. Na začátku zkoušky se konec pásku bez ramen pevně upevní a celý vzorek se ponoří do galvanické lázně. Jakmile je zkušební vzorek pokovován, ramena se ohýbají, aby uvolnily napětí vznikající při nanášení povlaku. Podle směru ohybu izolovaných nebo pokovených stran lze určit typ vnitřního napětí v nanášeném povlaku. Tahové napětí ohýbá ramena pásku tak, že se pokovená strana bude nacházet na vnějších stranách ohybu (viz obr. 16a), zatímco tlakové pnutí deformuje ramena tak, že se naopak plochy s organickým povlakem budou nacházet na vnější straně ohybu (viz obr. 16b). V průběhu pokovovacího procesu se rovněž měří odklon volného konce pásku od jeho počáteční polohy a po přepočtu lze stanovit velikost indukovaného napětí v kovové vrstvě. Každá zkouška touto metodou se provádí za specifických podmínek, které se zpravidla volí tak, aby co nejvíce odpovídaly podmínkám výroby. Předností této metody je její jednoduchost, kterou představuje nejenom tvar vzorků, ale také jejich příprava. Metoda jednostranně pokovovaného pásku naopak skýtá dva základní nedostatky. Prvním z nich je nutnost izolování určených ploch vzorku organickým nátěrem, což může představovat riziko vyloučení organických látek z nátěru do elektrolytu. Tyto látky poté negativně ovlivňují proces vylučování kovu. Druhým a závažnějším nedostatkem je skutečnost, že již samotná metodika ovlivňuje podmínky pokovování. Deformace vzorku a s ní spojené uvolňování vnitřního pnutí v povlaku má za následek, že každá nanášená vrstva je vylučována na kov, ve kterém je již indukováno určité zbytkové napětí a výsledné napětí tak může být zkreslené těmito zbytkovými napětími. [33, 37]



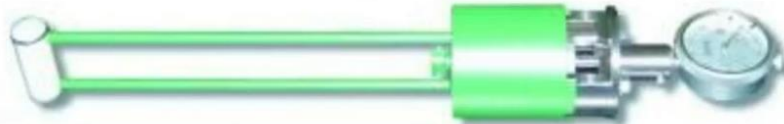
Obr. 16 Testovací vzorky (proužky) metody jednostranně pokovovaného pásku [37]
a) proužek namáhaný tahem, b) proužek namáhaný tlakem

Metoda spirálové katody

Jak již název napovídá, tato metoda používá jako zkušební vzorek, který má tvar spirály z korozivzdorné oceli. Během testovací procedury je horní konec spirály upevněn tak, aby bylo zamezeno jeho pohybu, zatímco spodní konec se může volně otáčet. Nanášený kovový povlak způsobuje indukované tahové nebo tlakové napětí. Tahové napětí svým působením smršťuje spirálu, díky čemuž se spirála navine těsněji. Naopak při tlakovém napětím se spirála roztahuje. Pohyby spirály jsou přenášeny do kruhového kotouče, který svým pohybem zajistí zobrazení změny polohy spirály na měřící stupnici. Deformace vzorku se stanovuje mechanicky nebo pomocí optických metod (tj. zrcátkové indikace). Mezi výhody metody spirálové katody lze uvést její velkou citlivost a snadné zjištění mechanických vlastností povlaku pro výpočet vnitřního pnutí. Na druhou stranu je pro tuto metodu charakteristická obtížnější příprava zkušebních vzorků a (podobně jako u metody jednostranně pokovovaného pásku) i zde sama metodika měření a deformace zkušebního vzorku ovlivňují proces samotného vylučování kovového povlaku. [30, 33]

Měření IS – metrem

Princip stanovení vnitřního pnutí v povlacích pomocí IS – metru (viz obr. 17) spočívá v tom, že se v průběhu pokovování vzorku sleduje jeho prodlužování nebo zkracování, jenž bylo vyvolané účinkem vnitřního napětí ve vyloučeném povlaku. Tyto deformace vzorku se měří pomocí úchylkoměru. Metoda měření IS – metrem používá předpjaté, tenké a rovné páskové nebo drátové vzorky. Vzorky by měly být vyžíhané kvůli odstranění vnitřních pnutí, které vznikly v materiálu plastickými deformacemi v průběhu jeho zpracování. Díky naměřenému prodloužení nebo zkrácení vzorku a znalosti modulu pružnosti materiálu, ze kterého byl vzorek vyroben, lze určit typ vnitřního pnutí a jeho velikost. Tato metoda nabízí v porovnání se dvěma výše uvedenými metodami několik výhod, např. v průběhu měření pomocí IS – metru se nanáší kov na celou plochu vzorku, čímž se nemusí na vzorek nanášet organický nátěr, tak jako tomu je u metody jednostranně pokovovaného pásku. Díky tomu je eliminováno případné vylučování nežádoucích organických látek do elektrolytu. Jako další přednost této metody lze zmínit, že se příprava vzorku vyznačuje výrazně nižší pracností (v řádu jednotek minut), oproti několika hodinám v případě přípravy vzorku pro metodu měření spirálovou katodou. [38]



Obr. 17 IS – metr pro měření vnitřního pnutí v kovových povlácích [39]

2.3.2 Adheze vrstev a metody jejího měření

Adheze (přilnavost) představuje komplexní soubor fyzikálních, chemických a mechanických sil, které působí na jednotku plochy zajišťující vazbu mezi dvěma rozdílnými fázemi. Americká organizace ASTM definuje adhezi jako stav, při kterém dva povrchy drží společně vazebnými silami působícími na rozhraní těchto dvou povrchů. Tato vlastnost je klíčová pro vytvoření pevné vazby mezi polymerním substrátem a kovovým povlakem. Adheze systému substrát//vrstva závisí na druhu substrátu, technologii pokovování, předúpravě povrchu apod. Kritickou veličinou pro posouzení adheze je energie potřebná k překonání vazeb působících mezi substrátem a vrstvou. Pro posouzení přilnavosti existují různé metody, které spočívají v aplikaci definovaného napětí na rozhraní substrát//vrstva a následném stanovení kritického napětí, při němž dojde k delaminaci vrstvy od substrátu. [40, 41]

Podle vzniku je adheze dělena na pět následujících mechanismů [40, 41]:

- mechanická adheze – lze ji přirovnat k suchému zipu, kdy jsou dvě fáze spojeny čistě mechanicky zapadnutím vrstvy do nerovností substrátu,
- chemická adheze – pokud jsou atomy dvou fází ve vhodných polohách pro vzájemné sdílení elektronů, vytvoří sloučeninu a díky tomu drží pohromadě,
- elektrostatická adheze – nastává mezi dvěma opačně nabitými povrchy vytvořením elektrické dvojvrstvy mezi substrátem a vrstvou,
- difuzní adheze – vzájemná difuze fází substrátu a povlaku do sebe,
- disperzní adheze – dána přitažlivostí Van der Waalsových sil.

Do výčtu metod v oblasti zkoušek kvality nanesených vrstev se řadí např. scratch test (vrypová zkouška), mercedes test, odtrhávací zkouška, ohybová nebo tahová zkouška a další. Pro posouzení adheze lze také použít tepelnou cyklickou zkoušku. [27, 41] Níže jsou uvedeny metody stanovení kvality a vlastností nanesených kovových vrstev, které byly použity v rámci experimentální části.

Tepelně – cyklická zkouška

Tato zkouška vychází z normy ČSN ISO 4525. Aplikuje se na pokovené polymerní materiály k posouzení přilnavosti vrstev k substrátu a sledování efektivity pokovovacího procesu. Zkouška by měla být provedena 24 ± 2 hod po ukončení galvanického pokovování. Zkušební postup jednoho kompletního cyklu by se měl skládat z následujících kroků [42]:

- 1) vystavení zkoušeného systému substrát//vrstva vyššímu teplotnímu limitu po dobu 1 hodiny (teplota dle volby stupně provozních podmínek – viz tab.1),
- 2) ochlazení vzorku na teplotu 20 ± 3 °C a výdrž na této teplotě po dobu jedné hodiny,
- 3) vystavení součásti nižšímu teplotnímu limitu,
- 4) ochlazení struktury na teplotu 20 ± 3 °C a výdrž při této teplotě po dobu 30 min.

Zkouška se skládá celkem ze 3 cyklů, po jejichž ukončení nesmí struktury polymer – kov vykazovat žádné vady povlaku viditelné pouhým okem. Mezi tyto defekty patří např. praskliny, puchýře, propady nebo deformace. [42]

Tab. 1 Mezní teploty tepelně - cyklické zkoušky [42]

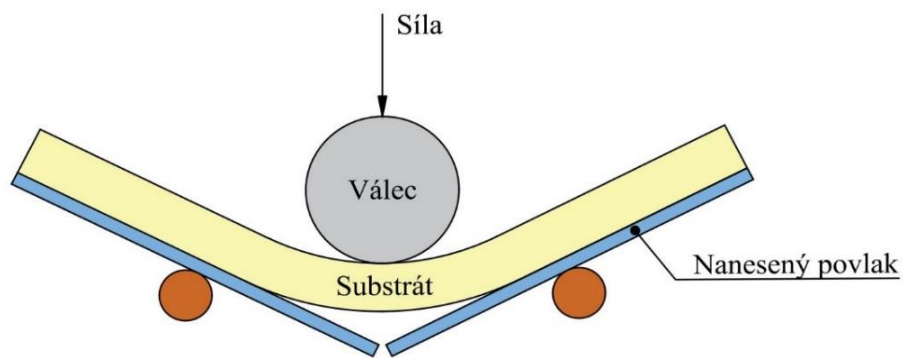
Stupeň provozních podmínek	Mezní teploty [°C]	
	Nižší	Vyšší
1.	-30	60
2.	-30	75
3.	-30	80
4.	-40	80
5.	-40	85

Podle prostředí a okolností, kterými jsou systémy substrát//vrstva vystaveny, jsou následovně rozděleny stupně provozních podmínek [42]:

1. budovy/provoz umístěné v suché a teplé atmosféře,
2. budovy, ve kterých je možný výskyt kondenzace,
3. venkovní prostředí, kde může dojít k občasnému nebo častému smočení deštěm, popř. vodou,
4. venkovní prostředí ve velmi náročných podmínkách,
5. venkovní prostředí ve výjimečně náročných podmínkách s požadavkem na dlouhodobé uchování dekorativního povlaku po dobu více jak 5 let.

Ohybová zkouška

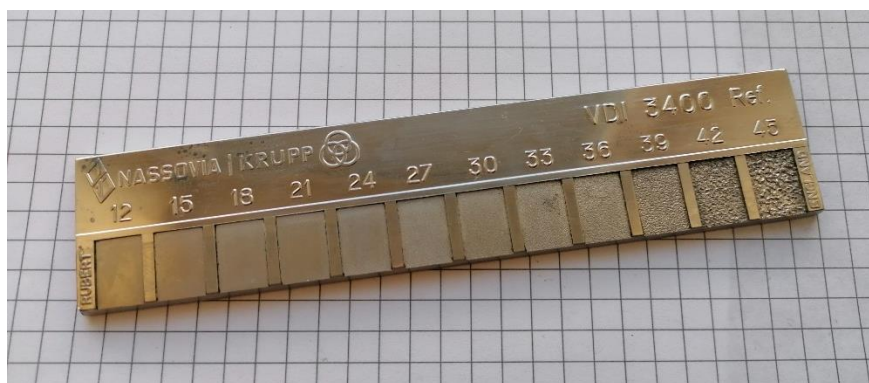
Zkouška v ohybu je založena na aplikaci smykového napětí podél rozhraní substrát//povlak prostřednictvím ohýbání testovaného systému přes válec. Princip samotné ohybové zkoušky je znázorněn na obr. 18. Nanesený povlak praská a delaminuje od povrchu substrátu v ohnuté oblasti. Při této proceduře se sleduje stav povrchu vrstvy. Výsledky ohybové zkoušky se mohou analyzovat pomocí lomové mechaniky. Vyhodnocení napěťového pole, které se vytváří při ohybu, je jednoduché a přehledné. Zkouška je omezena geometrií vzorků. [43, 44] Ohybovou zkoušku lze také použít pro stanovení mechanických vlastností vzorku v ohybu, jako např. pružnost nebo pevnost v ohybu, čehož bylo následně využito pro potřeby této práce. [45]



Obr. 18 Schéma ohybové zkoušky [43]

2.3.3 Určení typu textury povrchu – standard VDI 3400

Pro hodnocení typu úpravy povrchu např. forem, které jsou určeny k výrobě polymerních dílů technologií vstřikováním, odkazuje standard VDI 3400 stanovený Společností německých inženýrů (VDI – Verein Deutscher Ingenieure), jenž se uplatňuje po celém světě. Tento standard se používá především k hodnocení kvality dezénu vložek forem, které jsou obráběny elektroerozivním obráběním (EDM – Electric Discharge Machining). Hodnoty drsnosti povrchu (např. střední aritmetická odchylka R_a) jsou rozděleny do 45 tříd dle standardu VDI 3400, jenž slouží k porovnání povrchů po EDM obrábění. Pro určení třídy VDI 3400 lze použít vzorkový etalon (viz obr. 19) a tuto hodnotu následně převést na parametr R_a , popř. na výšku nerovnosti profilu R_z pomocí převodní tabulky (viz tab. 2). Obecně platí, že čím vyšší je třída VDI 3400, tím matnější je povrch a naopak. [46–48]



Obr. 19 Vzorkovník drsnosti standardu VDI 3400

Tab. 2 Převodní tabulka mezi vybranými třídami VDI 3400 a hodnotou Ra [46, 47]

VDI3400 [-]	Ra [μm]	Rz [μm]	VDI3400 [-]	Ra [μm]	Rz [μm]
12	0,40	1,50	30	3,15	12,50
15	0,56	2,40	33	4,50	17,50
18	0,80	3,30	36	6,30	24,00
21	1,12	4,70	39	9,00	34,00
24	1,60	6,50	42	12,50	48,00
27	2,24	10,50	45	18,00	69,00

Ke zjištění hodnoty Ra lze také využít vztah (7) [48, 49]:

$$VDI_třída = 20 \cdot \log(10 \cdot Ra) \quad (7)$$

kde značí: *VDI_třída* – třídu drsnosti povrchu

Ra – střední aritmetickou odchylku povrchu [μm].

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se věnuje návrhu, zhotovení a následnému testování struktur polymer – kov, jež byly vytištěny pomocí aditivních technologií a galvanicky pokoveny (měděním a niklováním). Galvanické pokovování bylo realizováno autorem této práce ve firmě Electroforming s.r.o. Na základě cílů práce byly na povrchy polymerů aplikovány různé typy 3D povrchových textur. Jak se však ukázalo, struktury s některými typy povrchových textur nevyhovovaly z hlediska adheze mezi polymerním substrátem a kovovým povlakem. Vzhledem k tomuto pozorování a také s ohledem na měření drsnosti povrchu kovových povlaků, byly vybrány tzv. perspektivní povrchové textury, jež byly použity v dalších krocích v rámci experimentální studie. Jelikož je adheze na rozhraní substrát//vrstva klíčový faktor definující soudržnost struktur polymer – kov, byla provedena teplotně – cyklická zkouška, jejíž úkolem bylo posoudit vliv teplotní objemové roztažnosti na nízkou přilnavost povlaků k některým povrchovým texturám. Delaminace kovového povlaku mohla být způsobena rovněž vnitřním napětím v povlacích. Z toho důvodu byla provedena zkouška ke stanovení typu vnitřního napětí ve vyloučených povlacích. Na závěr experimentální části byly struktury polymer – kov podrobeny mechanické zkoušce v ohybu, která definovala vztah mezi typem 3D textury a výslednými mechanickými vlastnostmi v ohybu.

3.1 Výběr materiálů a jejich charakteristika

Pro experimentální část byly použity polymerní vzorky zhotovené různými technologiemi 3D tisku. Jednalo se celkem o tři odlišné materiály. První z nich byl High Temp V1 od společnosti Formlabs Inc. určený k výrobě dílů metodou stereolitografie. Další z materiálů představoval Prusa Tough Resin od společnosti Prusa Polymers a.s., který byl použitý pro tisk dílů technologií MSLA na tiskárně Original Prusa SL1. Třetí vybraný polymer představoval polyamid 12 (PA 12), ze kterého se tiskly díly metodou Multi Jet Fusion. S ohledem na vyšší teploty galvanických lázní, které by mohly způsobovat degradaci polymerů v průběhu jejich pokovování, byla při výběru materiálů zohledněna jejich teplotní odolnost (teplota tvarové stálosti). Tento parametr polymerů použitých pro zhotovení vzorků je, spolu s obecnými vlastnostmi polymerů, uveden v tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti polymerů použitých pro výrobu struktur polymer – kov [50–52]

Vlastnosti		High Temp V1	Prusa Tough Resin	PA 12
Hustota	ρ_p [g·cm ⁻³]	-	-	1,01
Pevnost v tahu	Rm [MPa]	51,1	28,5 – 41,6	48
Modul pružnosti v tahu	E _t [MPa]	3600	1200 – 1600	1700 – 1800
Poměrné prodloužení při přetržení	ϵ_b [%]	2	4,6 – 5,8	15 – 20
Teplota tvarové stálosti	HDT (0,45 MPa) [°C]	289	55	175

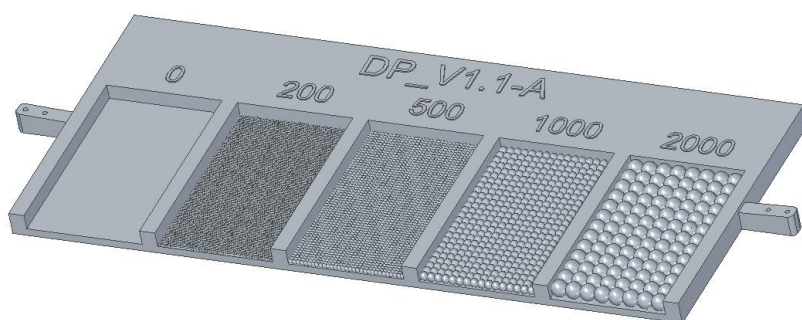
3.2 Návrh a modifikace povrchu zkušebních těles

Pro zhotovení vzorků bylo nejdříve potřeba vytvořit jejich 3D model. Příprava těchto modelů proběhla v CAD softwaru SolidEdge 2020. Jakmile byly modely předpřipraveny, byly na jejich povrchy aplikovány elementy různých tvarů a velikostí (modifikování povrchu těles), pomocí nichž bylo dosaženo odlišných typů textur. Povrchové textury se rovněž lišily v počtu použitých elementů, ze kterých byly vytvořeny.

Při modifikování povrchu vzorků bylo zohledňováno několik níže uvedených požadavků, které hrají důležitou roli ve výrobním procesu struktur polymer – kov a jejich výsledných vlastnostech. První požadavek se týkal zhodnocení proveditelnosti tisku těles s povrchovou texturou, tj. zda bylo možné realizovat jejich výrobu pomocí 3D tisku. Další požadavek představoval vytvoření takové povrchové textury, která by po následně naneseném kovovém povlaku vykazovala reprodukovatelnou a uspokojivou adhezi mezi povlakem a povrchem dílu. Zároveň byl na modifikovaný povrch kladen požadavek na dosažení požadovaných optických vlastností, především vysoký lesk vyloučených povlaků. Při tvorbě povrchových textur byl také brán zřetel na mechanické vlastnosti struktur polymer – kov, přičemž byla zohledněna zejména adheze na rozhraní substrát//povlak a pevnost. Z těchto požadavků na povrchové textury vyvstala potřeba nalezení optimálního způsobu modifikování povrchu dílů, vhodné geometrie elementů a umístění elementů vůči povrchu dílů.

3.2.1 Zkušební tělesa – vzorkovníky

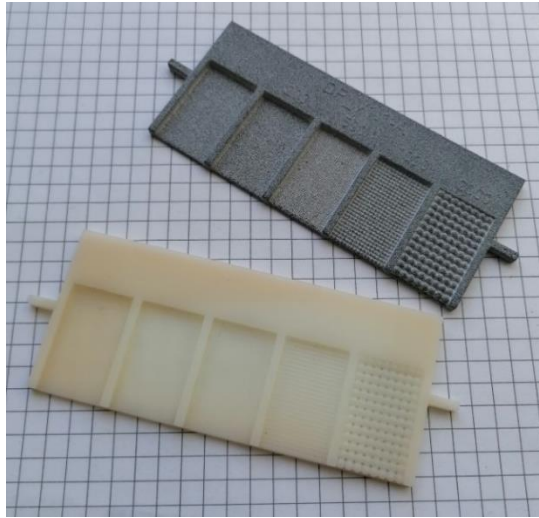
První navržená zkušební tělesa pro uvažované zkoušky byla inspirovaná vzorkovníkem drsnosti VDI 3400 (viz obr. 19). Vzorkovníky byly zkonstruovány v CAD softwaru SolidEdge 2020, a to včetně modifikace jejich povrchu. První varianta textur odpovídala periodicky rozmístěným elementům usazených na povrchu vzorkovníku. Elementy byly aplikovány tak, aby se dotýkaly tečně mezi sebou navzájem a zároveň s povrchem vzorkovníku. Použité elementy měly tvar koule o průměrech 0,20; 0,50; 1 a 2 mm (viz obr. 20). Vzorkovníky byly použity pro 2D studium textury, ze kterého se vychází v další části této práce.



Obr. 20 CAD model vzorkovníku se vzory modifikovaných povrchů v prostředí softwaru SolidEdge 2020

Vzorkovníky byly zhotoveny na 3D tiskárně Original Prusa SL1 metodou MSLA. Použitý materiálem byl Prusa Tough Resin (viz kap. 3.3.2). Rovněž proběhl tisk vzorkovníků pomocí technologie MJF z materiálu PA 12 na stroji HP Multi Jet Fusion 4200 (viz kap. 3.3.3). Vytisknuté vzorkovníky jsou zobrazeny na obr. 21. Takto připravené vzorkovníky však nebyly z níže uvedených důvodů v rámci experimentální části této práce dále použity, tzn. nebyly po jejich vytištění pokoveny a dále testovány. Konstruování periodicky se opakujících elementů v CAD softwaru SolidEdge 2020 se ukázalo jako neefektivní z hlediska časové náročnosti samotného konstruování a generování pole elementů. Rovněž byl tento typ tvorby textury povrchu příliš náročný na výpočty, kdy s menší velikostí a vyšším počtem elementů docházelo k selhání softwaru SolidEdge 2020. Použití takto zkonstruovaných elementů bylo navíc omezeno pouze na rovinné plochy. Pokud by těleso vykazovalo geometrii s obecnými plochami (např. zaoblením apod.), tak by tato metoda modifikace povrchu selhala. Zároveň textura složená z koulí o velikostech 0,20 a 0,50 mm zcela zanikla. Povrchovou texturu tvořenou z koulí o průměrech 1 a 2 mm se sice podařilo vytisknout, ale na vzorkovnicích se přesazením a slitím koulí dohromady vytvořily dutiny. V dutinách by se mohl v průběhu pokovování hromadit elektrolyt, který by mohl následně znehodnocovat strukturu naneseného kovového povlaku a způsobit krystalizaci zbytků galvanických a oplachových lázní na povrchu těles.

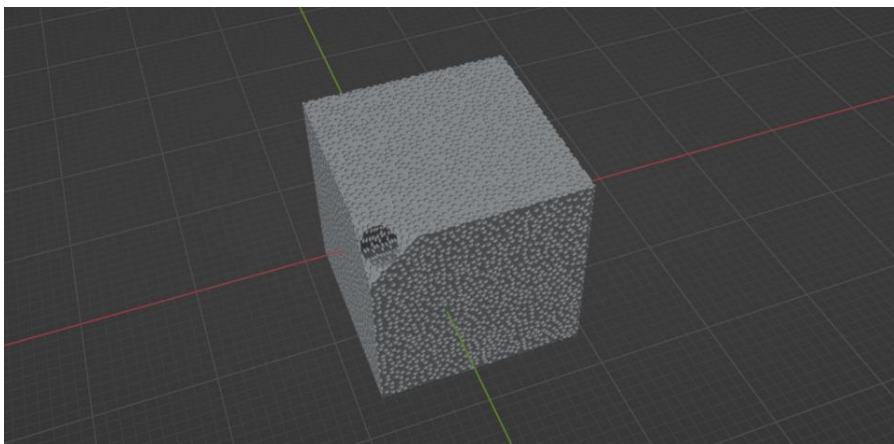
Z výše popsaných důvodů se tak ukázalo jako nevhodné použít CAD softwaru SolidEdge 2020 pro modifikaci povrchů vzorkovníků a usadit elementy na jejich povrch.



Obr. 21 Vzorkovníky zhotovené pomocí aditivních metod MJF (nahore) a MSLA (dole)

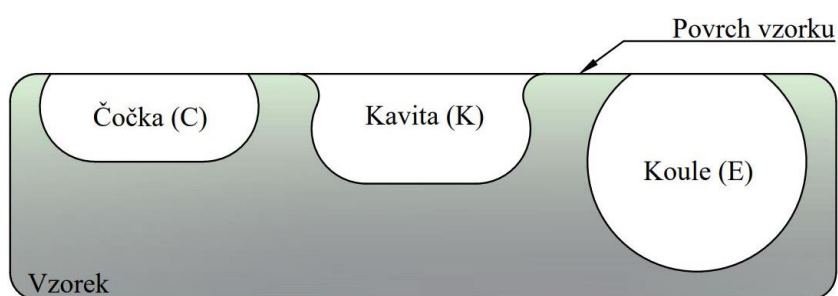
3.2.2 Zkušební tělesa – kostky

Po výše popsaných nedostatcích realizace modifikování povrchu bylo nezbytné nalézt vhodnější nástroj pro tyto úpravy a také vytvořit textury odlišným způsobem. Z toho důvodu byl vybrán software Blender, který se používá např. pro modelování a simulace, dokonce lze pomocí tohoto softwaru tvořit také videa nebo hry. [53] V této práci je software Blender použit ke generování povrchových textur. Při návrhu nové textury bylo opuštěno jednak od varianty, která by byla tvořena periodicky rozmístěnými elementy, ale také od tvorby textury usazením elementů na povrch těles. Byl proto proveden návrh textury náhodným rozmístěním elementů a jejich zapuštěním do povrchu vzorků. Takto nově navržená textura vychází z neperiodického povrchu, kterým se vykazují povrchy hodnocené standardem VDI 3400. Na obr. 22 je znázorněna plná kostka s povrchovou texturou v prostředí softwaru Blender.



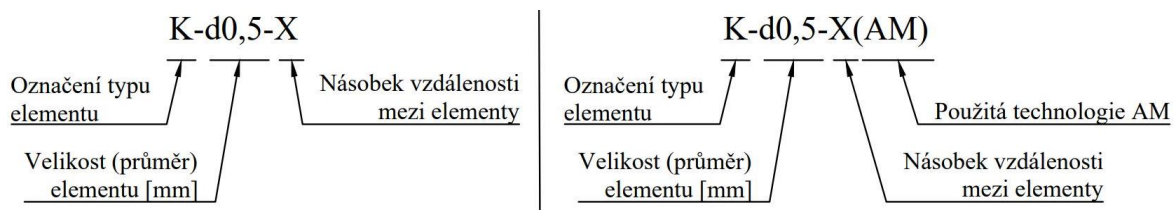
Obr. 22 Model plné kostky s povrchovou texturou v prostředí softwaru Blender

Další inovací bylo rozšíření portfolia elementů. Motivací k tomuto kroku bylo nalezení takové geometrie, jejíž použitím by bylo dosaženo textury, která by splňovala požadavky na povrchové textury, o kterých bylo zmíněno v úvodu kap. 3.2. K dosavadnímu jednomu typu elementu (koule – E), přibyly další dva typy ve tvaru kavity (K) a čočky (C), které rovněž vykazují rotační geometrii. Všechny použité elementy, spolu s jejich umístěním vůči povrchu těles, jsou zobrazeny na obr. 23. Při návrhu tvaru elementů bylo primární snahou optimalizovat jejich tvar a minimalizovat výskyt ostrých hran. Vlivem lokálního extrému elektrostatického pole na ostrých hranách by totiž mohlo docházet k vylučování větší tloušťky povlaku oproti zbytku plochy elementu (viz kap. 2.2.3), což by mohlo negativně ovlivnit drsnost vyloučeného povlaku.



Obr. 23 Schematické znázornění (v řezu) tvaru použitých elementů pro tvorbu povrchových textur a jejich zapuštění do povrchu vzorku

Podobně jako u vzorkovníku, tak i v tomto případě byly jednotlivé typy elementů (celkem tři) zhotovené ve čtyřech různých velikostech (tedy 12 variant povrchových textur). Definované průměry elementů byly opět odstupňované ve velikostech 0,2; 0,5; 1 a 2 mm. Zároveň byly zhotoveny dvě množstevní sady vzorků. Vzdálenost mezi jednotlivými elementy v první množstevní sadě se rovnala jejich průměru, kdežto v druhé množstevní sadě byla tato vzdálenost dvojnásobná. Celkem tak mělo vzniknout 24 odlišných povrchových textur. Ovšem ve skutečnosti jich bylo zhotoveno 22, protože při tvorbě textur tvořenými elementy ve tvaru kavit a čoček o průměru 0,2 mm docházelo k selhání softwaru Blender. V této práci je způsob označování použitých povrchových textur a struktur polymer – kov s aplikovanou texturou zobrazen na obr. 24. Celkový přehled vygenerovaných textur je zanesen do tab. 4. V této práci je rovněž používáno ještě další označování, a to pro povlakové systémy. Toto označování využívá lomítka, kdy objekt před dvěma lomítky značí substrát. Po ukončení těchto dvou lomítek následuje označení vrstvy nebo značky pro jednotlivé nanesené povlaky, které jsou oddělené lomítkem.

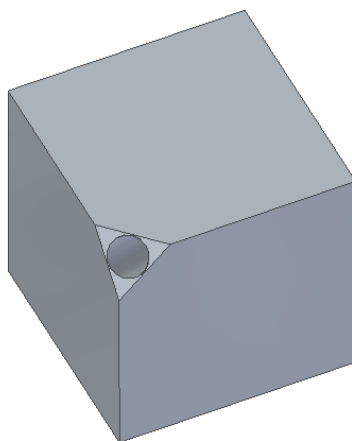


Obr. 24 Kódování typu provedení povrchové textury (vlevo),
kódování typu provedení struktury polymer – kov s povrchovou texturou (vpravo)

Tab. 4 Přehled vygenerovaných povrchových textur

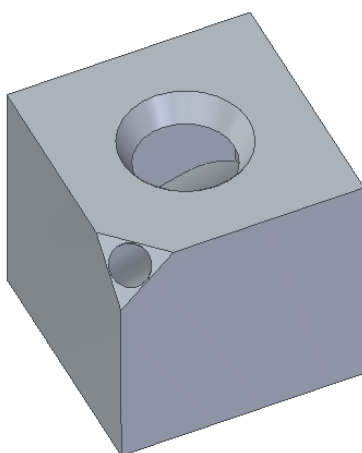
Typ	Kavita	Čočka	Koule	Typ	Kavita	Čočka	Koule
d0,2-1	-	-	E-d0,2-1	d0,2-2	K-d0,2-2	C-d0,2-2	E-d0,2-2
d0,5-1	K-d0,5-1	C-d0,5-1	E-d0,5-1	d0,5-2	K-d0,5-2	C-d0,5-2	E-d0,5-2
d1-1	K-d1-1	C-d1-1	E-d1-1	d1-2	K-d1-2	C-d1-2	E-d1-2
d2-1	K-d2-1	C-d2-1	E-d2-1	d2-2	K-d2-2	E-d2-2	E-d2-2

Pro stanovení drsnosti naneseného povlaku (viz kap. 3.6) byla zhotovena sada plných kostek o rozměrech (20 x 20 x 20) mm. CAD model kostky je zobrazen na obr. 25. S ohledem na technologický postup pokovování byly kostky upraveny tak, aby jejich úhlopříčkou vedl otvor, pomocí něhož bylo možné kostky upevnit k rotujícímu závěsu. Pro zefektivnění procesu tisku byly kostky tištěny v sestavách po šesti kusech. Toto řešení si vyžádalo zkosení dvou rohů kostek, čímž se mezi nimi vytvořila styčná plocha, přes kterou byly kostky spojeny do jednotlivých sestav. Plné kostky byly zkonstruovány jednak bez textur a jednak se všemi vygenerovanými povrchovými texturami (viz tab. 4).



Obr. 25 CAD model plné kostky v prostředí softwaru SolidEdge 2020

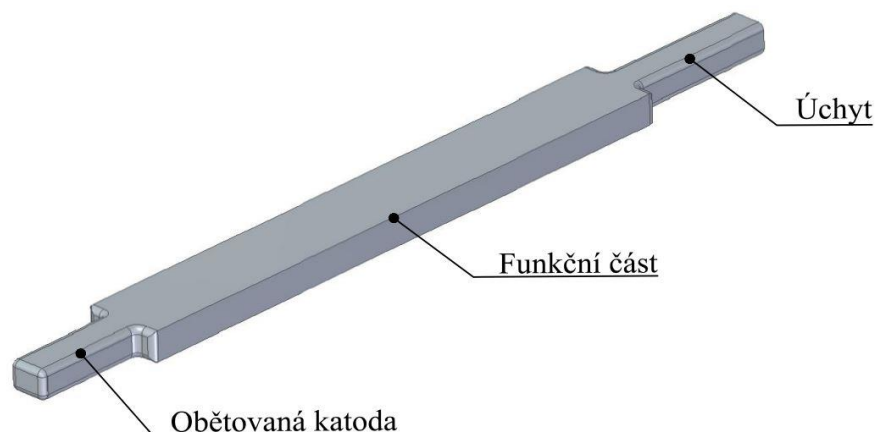
Po zhodnocení, jenž probíhalo po pokovení plných kostek (viz kap. 3.6) a rozhodnutí provést teplotně – cyklickou zkoušku (viz kap. 3.8), byla sada vzorků rozšířena o další tělesa, která měla shodné rozměry jako kostky plné. Nová tělesa se ovšem vyznačovala odlehčenou (skořepinovou) konstrukcí – viz obr. 26. Na jedné z ploch těchto těles (odlehčených kostek) byl rovněž umístěn otvor umožňující efektivní post-processing skořepinového tělesa zvolenými technologiemi 3D tisku. Realizovaným otvorem tak bylo možné během post-processingu odstranit z dutiny skořepinových kostek přebytečný nevytvrzený materiál. Odlehčené kostky nebyly zkonstruovány se všemi povrchovými texturami, ale pouze s těmi, které se ukázaly jako perspektivní (viz kap. 3.7).



Obr. 26 CAD model odlehčené kostky v prostředí softwaru SolidEdge 2020

3.2.3 Zkušební ohybová tělesa

Dále byla pro zvolenou mechanickou zkoušku v ohybu vytištěna zkušební tělesa o rozměrech (80 x 10 x 4) mm dle normy ČSN EN ISO 178. Geometrie těchto těles byla upravena přidáním úchytu (viz obr. 27), kterým bylo dosaženo připevnění vzorku k rotujícímu závěsu, jeho zvodivění a následné vložení do galvanických lázní. Navíc byl na konci těchto těles vysunut tvar materiálu, jenž fungoval v průběhu pokovování jako tzv. obětovaná katoda. Tento krok byl nutný k tomu, aby na hraně vzorků nenarostl během procesu pokovování kovový nárůstek, který by mohl negativně ovlivnit průběh zkoušky v ohybu. Tělesa určená pro ohybovou zkoušku byla generována s povrchovými texturami, které byly určeny jako perspektivní (viz kap. 3.7). Po dokončení všech 3D modelů byly tyto exportovány ve formátu *.stl pro další operace.



Obr. 27 CAD model zkušebního tělesa určeného pro ohybovou zkoušku v prostředí softwaru SolidEdge 2020

3.3 Výroba zkušebních těles aditivními technologiemi

V autorově předchozí bakalářské práci [1] byla řešena problematika pokovování pomocí galvanoplastiky, kde byla tato technologie optimalizována na pokovení dílů z materiálu PA 12 ve formě prášku vytisknutých metodou MJF (technologie Elformplate). Z této práce vyplynulo, že metoda MJF principem tisku zanechává reliéfní povrch těles, který sice přispívá k velmi dobré adhezi povlaku, ale příliš se nehodí pro tvorbu povrchových textur. Ve zmiňované práci se dále jako nevhodná aditivní technologie pro galvanické pokovení ukázala metoda FDM (3D tisk z materiálu ve formě filamentu). Vzhledem k těmto poznatkům a skutečnosti, že ve společnosti Electroforming s.r.o. ještě nebyla řešena problematika pokovování dílů vytištěných z resinů, byly pro zhotovení zkušebních těles, v rámci této diplomové práce, použity metody SLA a MSLA. Tyto technologie byly rovněž vybrány s ohledem na vysokou kvalitu povrchu vytištěných dílů, která je tiskem těmito metodami dosahována. Zkušební tělesa tištěná metodami SLA a MSLA byla generována s 3D povrchovými texturami (viz kap. 3.2). Jako zajímavé porovnání k těmto metodám byla rovněž zhotovena zkušební tělesa pomocí technologie MJF z materiálu PA 12, avšak bez modifikovaného povrchu, viz výše.

3.3.1 Zhotovení zkušebních těles metodou SLA

V rámci experimentální části byly vzorky z materiálu High Temp V1 zhotoveny pomocí technologie SLA na 3D tiskárně Form 2 (viz obr. 28) od společnosti FormLabs Inc. Tiskárna je vybavená laserem s vlnovou délkou 405 nm a průměrem laserového bodu 0,1397 mm. Zařízení Form 2 umožňuje tisk součástí s výškou vrstvy od 0,25 do 0,1 mm a velikosti až (145 x 145 x 175) mm. [54] Před samotným 3D tiskem těles byl jejich model importován ve formátu *.stl do softwaru PreForm, kde byly nastaveny tiskové parametry výrobce, materiál,

výška vrstvy (25 μm), umístění modelu v pracovním prostoru tiskárny apod. Poté byl model rozdělen na jednotlivé vrstvy v předem nastavené tloušťce. Takto připravená tisková data byla nahrána do tiskárny a byl zahájen tisk těles. Jakmile byla zkušební tělesa vytištěna, byl proveden jejich post-processing. Nejprve byly z těchto těles mechanicky odstraněny podpory (plné a odlehčené kostky) a poté byla zkušební tělesa vložena do nádoby s izopropylalkoholem po dobu 5 min. Po vyjmutí z nádoby došlo k přirozenému oschnutí těles. Následně byla zkušební tělesa přemístěna na 30 min do UV komory Form Cure (viz obr. 28) k jejich vytvrzení při teplotě 60 °C.



Obr. 28 3D tiskárna Form 2 (vlevo), UV komora Form Cure (vpravo)

3.3.2 Zhotovení zkušebních těles metodou MSLA

Tisk vzorků metodou MSLA z materiálu Prusa Tough Resin byl realizován ve spolupráci s Fakultou elektrotechnické ČVUT v Praze. Vzorky byly vytisknuty na stroji Original Prusa SL1 od společnosti Prusa Research a.s. (viz obr. 29). Jedná se o 3D tiskárnu používající k 3D tisku dílů metodu MSLA. Disponuje 5,5“ LCD panelem s rozlišením 2560 x 1440 p, jenž umožňuje dosáhnout rozlišení tisku 0,047 mm na jeden pixel (tj. rozlišení v osách X a Y). Original Prusa SL1 nabízí tiskovou plochu o velikosti (120 x 68 x 150) mm. [55] Pro přípravu dat k tisku byl použit software PrusaSlicer 2.5.0, kde byly nastaveny tiskové parametry (viz tab. 5), poloha tisknutých těles prostoru pracovního stroje (metodou MSLA byla všechna tělesa tištěna bez podpor) apod. Poté následovalo přenesení dat do stroje a zahájení 3D tisku. Po vytištění zkušebních těles byl proveden jejich post-processing, který se skládal z 5 min oplachu těles v izopropylalkoholu v mycí stanici CW1 následovaným oplachem těles vodou. Závěrečným krokem bylo vytvrzení těles UV zářením po dobu 10 min při pokojové teplotě.



Obr. 29 Příslušenství (vlevo) určené k mycí stanici CW1 (uprostřed), 3D tiskárna Original Prusa SL1 (vpravo)

Tab. 5 Tiskové parametry metody MSLA a materiál Prusa Tough Resin (Original Prusa SL1)

Materiál	Výška vrstvy [mm]	Doba osvitů jedné vrstvy [s]	Doba osvitů počátečních 10-ti vrstev [s]
Prusa Tough Resin	0,025	6	25

3.3.3 Zhotovení zkušebních těles metodou MJF

Pro výrobu zkušebních těles z materiálu PA 12 technologií Multi Jet Fusion byla použita 3D tiskárna HP Multi Jet Fusion 4200 (viz obr. 30). Toto zařízení od společnosti Hewlett-Packard (HP) Development Company, L.P. nabízí pracovní prostor o velikosti (380 x 284 x 380) mm. [56] Tisková data byla pro výrobu zkušebních těles připravena v softwaru Materialise Magics a k 3D tisku zpracována pomocí softwaru SmartStream 3D Build Manager. Před zhotovením těles byla provedena běžná kalibrace stroje. K udržení optimálních vlastností materiálu byla při výrobě těles použita směs PA 12 ve formě prášku v poměru 80/20 (použitý/nový). Dle doporučení výrobce byla tělesa tištěna spolu s jinými díly v tiskové sestavě s celkovým zaplněním stavebního prostoru z 5 – 8 %. Po výrobním procesu proběhlo chlazení výrobní jednotky volným chlazením po dobu 48 h. K odstranění nespečeného polyamidového prášku z povrchu těles bylo využito pískování. Na zkušebních tělesech nebyl proveden žádný další krok post-processingu. Tiskové parametry společně s vlastnostmi materiálu PA 12 byly zaneseny do tab. 6.



Obr. 30 3D tiskárna HP Multi Jet Fusion 4200

Tab. 6 Vlastnosti PA 12 a tiskové parametry metody MJF (HP Multi Jet Fusion 4200) [50]

Materiál	Velikost částic prášku [μm]	Bod tání prášku [$^{\circ}\text{C}$]	Tloušťka vrstvy [mm]	Rozlišení tisku [dpi]
PA 12	60	187	0,08	1200

Celkový přehled vytištěných zkušebních těles byl zanesen do tab. 7.

Tab. 7 Celkový přehled vytištěných zkušebních těles

Zkušební těleso	Povrchová textura	Počet těles [-]		Povrchová textura	Počet těles [-]
		SLA	MSLA		MJF
Vzorkovník	Koule	0	4	Koule	4
Plná kostka	Všechny	44	44	Bez textury	2
Odlehčená kostka	Perspektivní	10	10	Bez textury	2
Ohybové těleso	Perspektivní	35	35	Bez textury	14

3.4 Příprava zkušebních těles před pokovením

Po zhotovení těles z materiálu PA 12 byla provedena jejich kondicionace dle normy ČSN EN ISO 1110. Tělesa byla umístěna po dobu 10 dní do klimatizační komory s řízenými podmínkami, při kterých dosahovala teplota v komoře 70 °C a relativní vlhkost 60 %. [57]

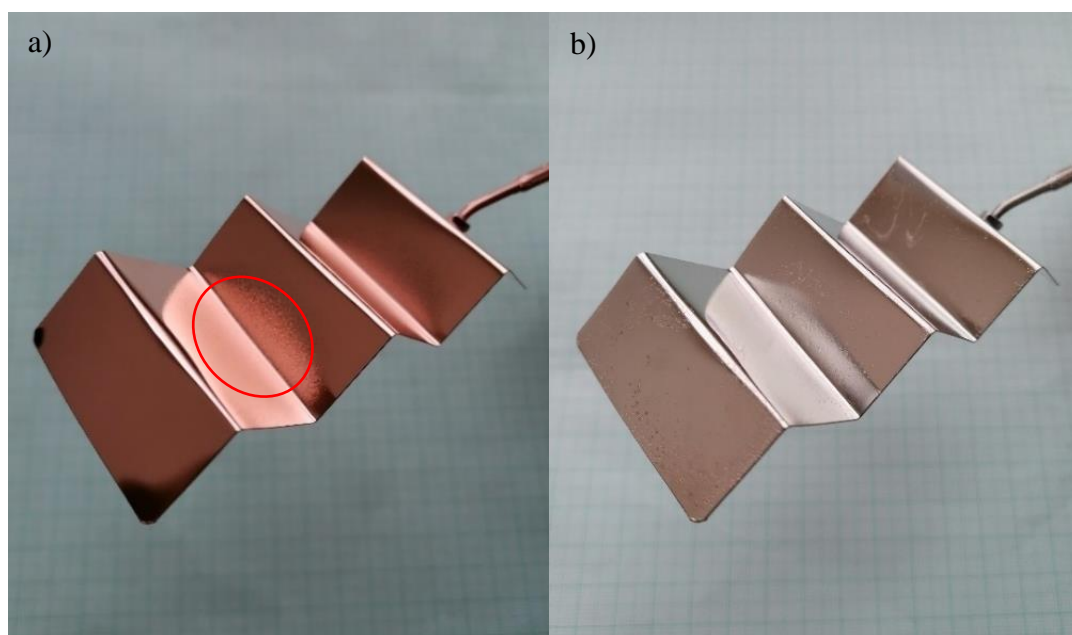
Jelikož nejsou polymerní materiály vodivé, což je ovšem nutná vlastnost pro elektrochemické nanesení kovu na díl, bylo potřeba jejich povrch zvodivět. Z toho důvodu byl použit systém redukčního stříbření dle interní receptury společnosti Electroforming s.r.o. Před samotným stříbřením těles bylo nutné uskutečnit několik kroků, které vedly k zajištění nanesení odpovídající kvality stříbrného povlaku na povrch těles vedoucí ke zvodivění povrchu dílů. Nejdříve byly plochy u kostek zhotovených metodou SLA (plných i odlehčených), na kterých se nacházely stopy po podporách, zbrušeny pomocí brusného papíru se zrnitostí P320. Následně byly kostky s totožným typem povrchové textury nasazeny na závitovou tyč. Takto připravené závitové tyče s kostkami (a také ohybová tělesa) byla na několik sekund ponořena do nádoby s izopropylalkoholem a posléze usušena. Tímto krokem bylo zajištěno odmaštění povrchu těles, jenž by jinak mohlo zabránit nanesení kovového povlaku na díl. Následně již byla tělesa připravena k předúpravě povrchu, který spočíval v jejich ponoření do aktivační lázně po dobu 24 hodin. Po uplynutí této doby byly vzorky vyjmuty z aktivační lázně, opláchnuty a pomocí technologie redukčního stříbření postříbřeny. Po stříbření byly vzorky umístěny do nádoby s DEMI vodou a připraveny ke galvanickému pokovení.

3.5 Funkční zkouška galvanických lázní

Souběžně s přípravou zkušebních těles pro jejich pokovení proběhla zkouška funkčnosti galvanických schopností galvanických lázní. Cílem této zkoušky bylo na základě pozorování identifikovat nevyváženost složení lázní, určit optimální rozmezí proudových hustot a případnou potřebu korekčních zásahů ve složení lázní. Pro kontrolu kvality lázní lze použít Hullovu zkoušku, jenž se řídí dle normy ČSN EN ISO 03 8530. [58] Zkouška je založena na sledování odchylek ve vzhledu povlaku projevující se rozdílnou proudovou hustotou. Hullova zkouška se realizuje v malých elektrolytických nádobách (tzv. Hullových vaničkách) o objemu 250 ml s odebranými vzorky zkoušených lázní. Kovový povlak se nanáší na katodu, která je umístěna v šikmé poloze. [23]

Vzhledem k dostupnému vybavení a potřebám této práce bylo, po domluvě se společností Electroforming s.r.o., rozhodnuto vycházet z metody Hullový vaničky v její upravené podobě. Zkouška proběhla přímo v galvanických lázních. Testovací vzorek představoval tvarovaný

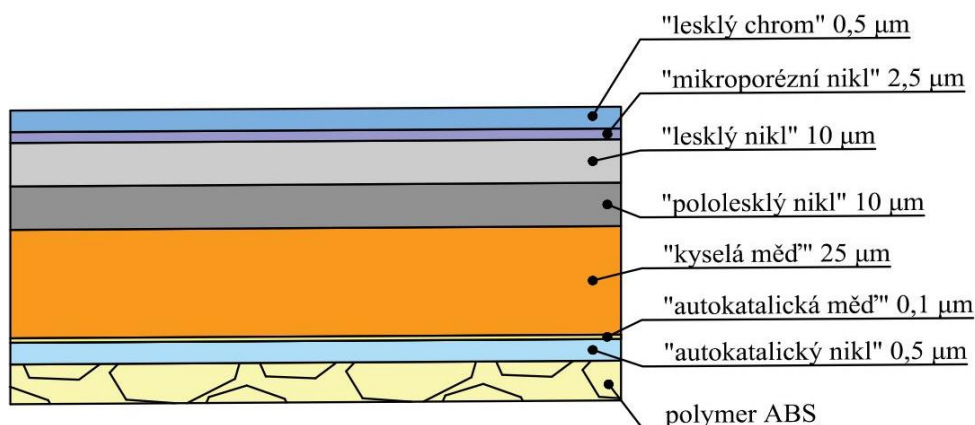
plech z korozivzdorné oceli. S ohledem na technologický postup pokovení zkušebních těles (viz následující kap. 3.6), byl vzorek nejdříve pokovován v kyselé mědicí a následně v niklovací lázni. V průběhu galvanického pokovování se pro obě lázně hledaly optimální procesní parametry (proudová hustota, množství vyrovnávacích a leskutvorných přísad apod.) tak, aby bylo dosaženo vysoké vyrovnávací a hloubkové účinnosti lázní vylučujících lesklé povlaky po celé ploše vzorku. Na obr. 31a je vyznačena oblast vzorku s LCD, kde nebyl při úvodním testování lázní vyloučen lesklý povlak. Tato oblast s matným povlakem byla po sérii několika testů odstraněna. Vzorek s již vyloučeným lesklým povlakem je po vyjmutí z niklovací lázně zobrazen na obr. 31b.



Obr. 31 Testovací vzorek pro upravenou metodu Hullový vaničky
a) po vyjmutí z mědicí lázně s vyznačenou oblastí s LCD, b) po vyjmutí z niklovací lázně

3.6 Pokovení zkušebních těles

Za účelem pokovení zkušebních těles bylo spolupracováno s firmou Electroforming s.r.o. V rámci experimentální části této práce vycházela skladba kovového povlaku z normy ČSN ISO 4525 pro povlakové systémy Cu/Ni/Cr. Norma také definuje minimální tloušťky jednotlivých povlaků. [42] Typická skladba povlaku vyloučeného na polymer ABS, jak uvádí autoři v např. [20, 59], je spolu s obvyklými tloušťkami jednotlivých povlaků znázorněna na obr. 32. Nicméně vzhledem k technologiím, jimiž disponuje společnost Electroforming s.r.o., nebylo na struktury polymer – kov aplikováno chromování. Tloušťka měděného povlaku byla zvolena 25 μm a tloušťka niklového povlaku byla stanovena na 20 μm .



Obr. 32 Příklad typické skladby povlaků na polymeru ABS s obvyklými tloušťkami jednotlivých povlaků [20]

Po odzkoušení a přípravě galvanických lázní mohly být provedeny jednotlivé kroky vedoucí k pokovení zkušebních těles. V případě pokovování odlehčených kostek byla do jejich otvorů nejprve umístěna vytištěná ucpávka z flexibilního polypropylenu (PPJet). Na závitovou tyč s nasazenými kostkami byla našroubována mosazná příruba. Takto složená katoda byla připevněna k rotujícímu závěsu, kterým bylo zajištěno vložení a poloha vzorků v galvanických lázních (viz obr. 33). Zároveň byl pomocí rotujícího závěsu zajištěn otáčivý pohyb vzorků v průběhu jejich pokovování. Otáčky rotujícího závěsu byly ovládány pomocí regulátoru. Ohybová tělesa byla připevněna k rotujícímu závěsu přímo přes mosaznou redukci, která plnila stejnou funkci jako v případě kostek. Přivedení pomocného přívodu bylo realizováno u všech vzorků totožně, a to upevněním měděného drátu k mosazné redukci a jeho zajištění pomocí šroubu. Parametry galvanických lázní jsou zobrazeny v tab. 8.

Obecný technologický postup pokovení platný pro všechna zkušební tělesa probíhal podle následujících kroků:

- a) vyjmutí vzorku z DEMI vody (kam byl umístěn po jeho zvodivění – viz kap 3.4) a připevnění mosazné příruby,
- b) oplach v DEMI vodě,
- c) pokovení tělesa v kyselé mědicí lázni po dobu 42 min k dosažení požadované tloušťky měděného povlaku (25 μm),
- d) mezioperační vícestupňový oplach zkušební tělesa v DEMI vodě sestávající ze třech oplachů – každý v délce trvání 30 s,
- e) pokovování tělesa v niklovací lázni po dobu 33 min k dosažení požadované tloušťky niklového povlaku (20 μm),

- f) dvojnásobný oplach zkušebního tělesa v DEMI vodě – každý po dobu 1 min,
 g) sejmutí mosazné příruby ze vzorku a vysušení jeho povrchu.

Tab. 8 Parametry galvanických lázní

Typ lázně	Složení lázně				Přísady [ml/l]			Proudová hustota J [A·dm ⁻²]	Teplota lázně T [°C]
	Objem lázně [l]	Cu ²⁺ [g/l]	H ₂ SO ₄ [g/l]	Cl [mg/l]	ELF – Cu01	ELF – Cu02			
Cu	20	45	100	70	2	2	3	24	

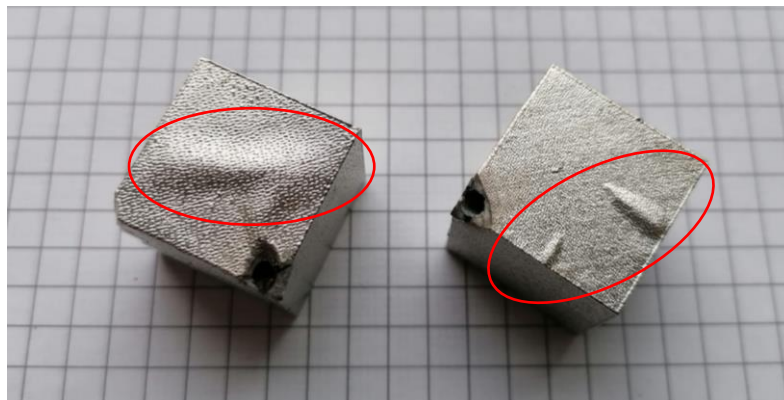
Typ lázně	Složení lázně				Přísady [ml/l]			Proudová hustota J [A·dm ⁻²]	Teplota lázně T [°C]
	Objem lázně [l]	Ni [g/l]	H ₃ BO ₃ [g/l]	Cl [g/l]	ELF – Ni01	ELF – Ni02	ELF – Ni03		
Ni	20	75	40	80	18	0,6	3	3	24



Obr. 33 Pracoviště galvanických (mědicích a niklovacích) lázní v průběhu pokovování

Plné kostky byly zkonstruovány se všemi vygenerovanými povrchovými texturami. U těch kostek, které vykazovaly texturu s dvojnásobnou vzdáleností mezi elementy, byly ovšem po jejich pokovení pozorovány puchýře a zvlnění – viz obr. 34. Tyto povrchové vady byly rovněž pozorovány u struktur s povrchovou texturou E-d0,2-1 zhotovených metodami 3D tisku SLA a MSLA. Odlupování kovového povlaku od podkladového materiálu obecně značí nedostatečnou adhezi na rozhraní substrát//vrstva. Jednalo se tedy o nepoužitelný systém substrát//vrstva. Z toho důvodu bylo, po konzultaci se společností Electroforming s.r.o., rozhodnuto tyto nefunkční textury nepoužít (kromě textur E-d0,2-1). Namísto toho měly být použity funkční

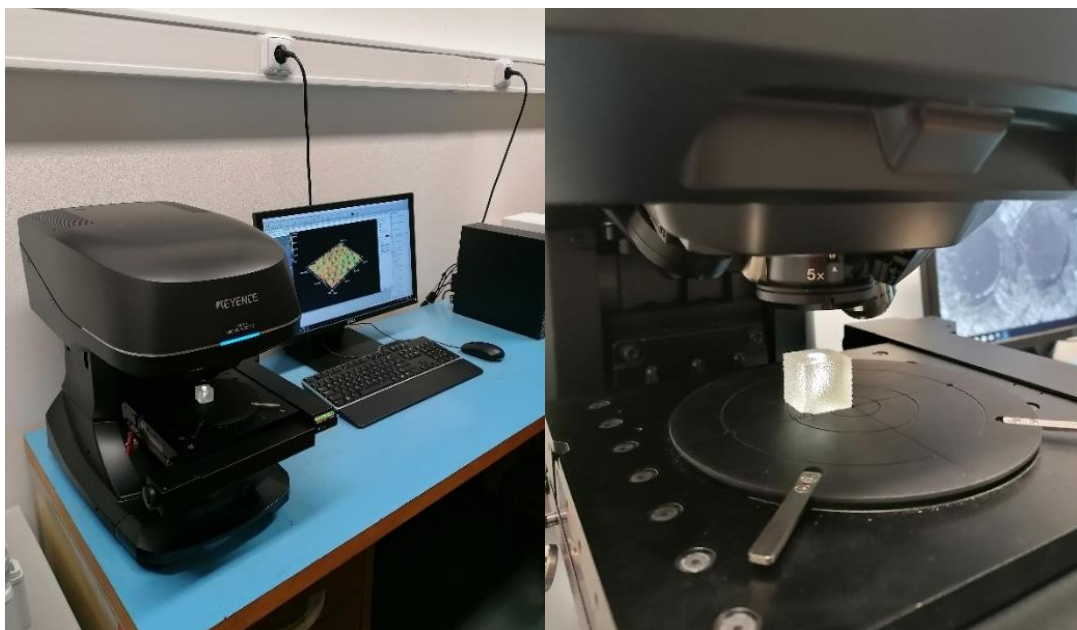
textury, u kterých nedocházelo k delaminaci kovového povlaku od substrátu, a které byly dále selektovány na základě naměřených hodnot drsností povrchu (viz následující kap. 3.7). Takto vybrané perspektivní textury byly považované za vhodné pro další testování struktur polymer – kov. Po rozhodnutí provést teplotně – cyklickou zkoušku, jejíž úkolem bylo posoudit vliv teplotní objemové roztažnosti na soudržnost struktur polymer – kov, byly perspektivní povrchové textury aplikovány také na odlehčené kostky (viz kap. 3.8) a dále na zkušební tělesa určena pro mechanickou zkoušku v ohybu (viz kap. 3.10).



Obr. 34 Plné kostky s nefunkční povrchovou texturou s vyznačenými puchýři

3.7 Měření drsnosti povrchu povlaku a výběr textur

K definování kvality povrchu pokovení struktur polymer – kov byly změřeny drsnosti kovových povlaků plných kostek s funkčními texturami před a po galvanickém pokovování. Plné kostky byly vytištěny aditivními technologiemi SLA a MSLA. Hodnoty drsnosti byly poté přepočteny dle standardu VDI 3400, čímž bylo dosaženo porovnání mezi jednotlivými typy povrchových textur a jejich vlivu na drsnost povrchu vzorků po jejich pokovení. Ačkoliv se standard VDI 3400 používá primárně pro stanovení drsnosti dezénu vložek forem určených pro technologii vstřikování (viz kap. 2.3.3), byl tento standard shledán jako vhodný i pro hodnocení povrchových textur struktur polymer – kov, protože se běžně používá v technické praxi. Bezkontaktní měření drsností proběhlo pomocí laserového skenovacího mikroskopu VK-X1000 od společnosti Keyence Corporation (viz obr. 35). Naměřená data byla zpracována v softwaru MultiFileAnalyzer. Na kostkách byly měřeny vždy dvě plochy (horní a boční), na kterých byla vytyčena měřící oblast o velikosti (5 x 5) mm. V této definované oblasti probíhalo měření drsnosti povrchu ve dvou směrech – horizontálním a vertikálním. Naměřené hodnoty střední aritmetické odchylky R_a před a po pokovování byly zprůměrovány, přepočteny na třídu standardu VDI 3400 dle rovnice (7) a zaneseny do tab. 9 – 14, ve kterých jsou rovněž vyznačeny vybrané perspektivní povrchové textury.



Obr. 35 Laserový skenovací mikroskop VK-X1000 (vlevo), detail měření střední aritmetické odchylky R_a na povrchu plné kostky (vpravo)

Výběr perspektivních textur proběhl pro každou tiskovou technologii zvlášť. V rámci tohoto výběru byly mezi sebou porovnávány jednotlivé typy elementů – a to vždy pro jeden daný rozměr. Výběrovým kritériem byl minimální rozptyl tříd VDI 3400 mezi horní a boční plochou kostek pro daný směr měření drsností – horizontální a vertikální. Důvodem výběru perspektivních textur podle tohoto kritéria, bylo vykompenzovat rozdílnost drsností povrchu kostek, jejichž odlišnost byla dána polohou kostek při 3D tisku a použitou aditivní technologií.

Tab. 9 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 0,5 mm – SLA

Technologie – SLA/materiál High Temp V1											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d0,5- 1	Před	17,5	65,6	45	56	11	16,9	49,3	45	54	9
	Po	12,5	41,3	42	52	10	10,8	43,1	41	53	12
C- d0,5- 1	Před	21,7	54,8	47	55	8	20,7	56,6	45	55	10
	Po	16,2	49,5	44	54	10	16,2	50,4	44	54	10
E- d0,5- 1	Před	22,8	50,0	47	54	7	22,0	49,3	47	54	7
	Po	15,4	40,8	44	52	8	14,7	43,0	43	53	10

Tab. 10 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 1 mm – SLA

Technologie – SLA/materiál High Temp V1											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d1-1	Před	48,7	159,2	54	64	10	50,1	174,0	54	65	11
	Po	36,8	150,9	51	64	13	37,5	161,7	51	64	13
C- d1-1	Před	30,2	134,2	50	63	13	28,5	132,0	49	62	13
	Po	19,5	109,5	46	61	15	19,1	108,8	46	61	15
E- d1-1	Před	48,0	141,3	54	63	9	48,2	153,7	54	64	10
	Po	45,4	144,3	53	63	10	42,5	157,4	53	64	11

Tab. 11 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 2 mm – SLA

Technologie – SLA/materiál High Temp V1											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d2-1	Před	279,3	318,3	69	70	1	264,5	323,2	68	70	2
	Po	267,1	317,8	69	70	1	280,3	323,3	69	70	1
C- d2-1	Před	190,4	232,4	66	67	1	153,5	199,4	64	66	2
	Po	179,8	232,2	65	67	2	150,5	181,5	64	65	1
E- d2-1	Před	225,1	310,3	67	70	3	225,2	296,1	67	69	2
	Po	210,2	302,0	66	70	4	230,0	286,1	67	69	2

Tab. 12 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 0,5 mm – MSLA

Technologie – MSLA/materiál Prusa Tough Resin											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d0,5- 1	Před	38,1	51,0	52	54	2	44,6	47,4	53	54	1
	Po	21,7	36,7	47	51	4	24,2	35,8	48	51	3
C- d0,5- 1	Před	40,7	34,0	52	51	1	37,7	30,9	52	50	2
	Po	24,2	31,6	48	50	2	26,0	29,8	48	49	1
E- d0,5- 1	Před	38,3	53,5	52	55	3	41,8	52,4	52	54	2
	Po	18,5	42,5	45	53	8	22,5	35,5	47	51	4

Tab. 13 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 1 mm SLA

Technologie – MSLA/materiál Prusa Tough Resin											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d1-1	Před	156,3	137,7	64	63	1	137,0	128,2	63	62	1
	Po	166,3	137,9	64	63	1	158,0	129,4	64	62	2
C- d1-1	Před	110,5	85,1	61	59	2	99,2	82,8	60	58	2
	Po	98,5	85,0	60	59	1	111,3	77,1	61	58	3
E- d1-1	Před	142,9	133,6	63	63	0	122,2	124,3	62	62	0
	Po	159,0	124,4	64	62	2	149,3	120,9	63	62	1

Tab. 14 Průměrné hodnoty drsnosti povrchu a standardu VDI 3400 pro měřené směry a plochy plných kostek s texturami z elementů o velikostech 2 mm – MSLA

Technologie – MSLA/materiál Prusa Tough Resin											
Povrchová textura před/po pokovování		Horizontální směr					Vertikální směr				
		Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]	Ra [μm]		Přepočet VDI [-]		Rozptyl VDI [-]
		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha		Horní plocha	Boční plocha	Horní plocha	Boční plocha	
K- d2-1	Před	270,1	318,2	69	70	1	333,3	256,9	70	68	2
	Po	303,1	315,4	70	70	0	303,3	277,7	70	69	2
C- d2-1	Před	196,5	207,0	66	66	0	204,3	180,0	66	65	1
	Po	214,4	203,1	67	66	1	213,7	175,0	67	65	2
E- d2-1	Před	249,9	301,8	68	70	2	223,9	245,8	67	68	1
	Po	298,9	317,2	70	70	0	270,3	230,1	69	67	2

3.8 Teplotně – cyklická zkouška

V experimentální části této práce probíhalo galvanické mědění v lázni o teplotě 24 °C a galvanické niklování v lázni o teplotě 56 °C. Vyšší teplota niklovací lázně mohla mít nežádoucí vliv na teplotní objemovou roztažnost substrátu (polymeru), která mohla dále negativně ovlivňovat adhezi mezi substrátem a kovovým povlakem. Objemové změny ve strukturách polymer – kov, ke kterým mohlo docházet v průběhu a po galvanickém niklování, mohly zapříčinit tvorbu puchýřů. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o provedení teplotně – cyklické zkoušky. Pro potřeby této zkoušky byly zkonstruovány skořepinové kostky s perspektivními texturami, které měly díky své odlehčené konstrukci prokázat nebo vyvrátit vliv teplotní objemové roztažnosti na přilnavost mezi substrátem a kovovým povlakem. Teplotně – cyklická zkouška byla rovněž vykonána s plnými kostkami s perspektivními texturami, které měly, spolu s odlehčenými kostkami, definovat perspektivní texturu s nejvyšší mírou adheze k povlaku.

Po dohodě se společností Electroforming s.r.o. byly vytištěny metodami SLA a MSLA plné a odlehčené kostky s nefunkční texturou E-d0,2-1, které podstoupily teplotně – cyklické namáhání. Textura E-d0,2-1 je typ povrchové textury, u které docházelo k delaminaci povlaku. Motivací k použití nefunkční textury bylo určení, zda na nízkou adhezi měla vliv samotná 3D povrchová textura. Pro hodnocení teplotně – cyklického namáhání byly použity také plné a odlehčené kostky zhotovené aditivní technologií MJF.

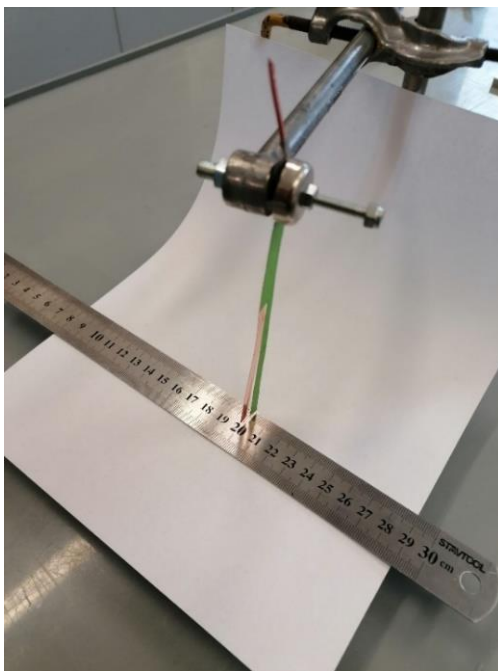
Vzhledem k poruše klimatických komor na TUL v Liberci a na ČVUT v Praze v době konání experimentální části diplomové práce, bylo rozhodnuto provést test ve společnosti Electroforming s.r.o. Teplotně – cyklická zkouška vycházela z normy ČSN ISO 4525 v její upravené podobě. Využitím dostupného vybavení bylo dosahováno teploty $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (namísto teploty $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vzorky byly nejprve zkoušeny dle prvního stupně provozních podmínek, které jsou uvedeny v tab. 1. Za tímto účelem byly vzorky při teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ umístěny do sušárny Venticell (viz obr. 36) a postupně ohřívány na vyšší mezní teplotu, jenž činila $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po dosažení této teploty následovala hodinová výdrž při konstantní teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po uplynutí 60 min byly vzorky vyjmuty z komory a přemístěny do místnosti s pokojovou teplotou $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde setrvaly po dobu 60 min. Následovalo vložení vzorků do mrazáku s teplotou dosahující $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (nižší mezní limit), kde setrvaly po dobu 60 min. Poté byly vzorky vyjmuty z mrazáku a opět přemístěny do místnosti s pokojovou teplotou o $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celkem byly takto provedeny tři cykly. Mezi jednotlivými kroky zkoušky byly vizuálně sledovány povrchové změny povlaků struktur polymer – kov. Pro hlubší analýzu vlivu teplotní objemové roztažnosti na přilnavost povlaků, byla po dokončení testování provedena série zkoušek podle druhého a třetího stupně provozního zatížení, při kterých byla zvýšena vyšší mezní teplota podle tab. 1.



Obr. 36 Sušárna Venticell

3.9 Stanovení vnitřního pnutí v povlacích

Delaminace kovového povlaku pozorovaná na určitých strukturách polymer – kov mohla vznikat nejen v důsledku teplotní roztažnosti polymeru, jenž mohl dále negativně působit na rozhraní substrát/vrstva, ale také vlivem vnitřního napětí indukovaného ve vyloučených povlacích, případně kombinací obou těchto vlivů. Ke stanovení typu vnitřního napětí byla použita metoda jednostranně pokovovaného pásku, jenž se řídí dle normy ASTM B975 – 15 (viz kap. 2.3.1). Provedení a postup zkoušky neproběhlo přesně dle výše zmíněné normy, což bylo dáno podmínkami vykonání zkoušky a skutečností, že pro potřeby této práce bylo postačující definovat pouze typ vnitřního napětí bez výpočtu jeho velikosti. Pro tuto zkoušku byly připraveny dva testovací proužky s plošnými rozměry dle normy ASTM – 75, jež neměly strany izolované pomocí organického nátěru, ale připevněním samolepící fólie. Galvanické pokovování proběhlo v galvanických lázní s totožnými pokovovacími parametry, které byly stanoveny v technologickém postupu pokovování zkušebních těles. Připravené testovací proužky byly upevněny pomocí mosazné příruby k rotujícímu závěsu a galvanicky pokovovány stejnou dobu, jakou se pokovovala zkušební tělesa. Po vyjmutí vzorků z lázně byly usušeny a zavěšeny na stojan (viz obr. 37). Podle směru ohybu ramen vzorků byl určen typ vnitřního pnutí indukovaného ve vyloučeném měděném povlaku. Následně byl vzorek umístěn do niklovací lázně, přičemž po jeho zavěšení na stojan proběhlo vyhodnocení galvanického niklování totožně jako po jeho vyjmutí z mědicí lázně.



Obr. 37 Stanovení typu vnitřního napětí v galvanicky vyloučených povlacích

3.10 Stanovení ohybových vlastností struktur polymer – kov

K vyhodnocení mechanických vlastností v ohybu struktur polymer – kov a ke stanovení jejich pevnosti v ohybu (σ_{fM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f) byla použita ohybová zkouška dle metody tříbodového ohybu, jenž je uvedena v normě ČSN EN ISO 178. Zkouška v ohybu byla provedena na zkušebním ohybovém zařízení HOUNSFIELD H10KT, které je zobrazeno na obr. 38. Zkušební tělesa o rozměrech (80 x 10 x 4) mm byla symetricky uložena na dvou podporách o rozpětí 64 mm a zatěžována přítlačným trnem o konstantní rychlosti posuvu 2 mm/min. Jakmile bylo v průběhu zkoušky dosaženo meze pevnosti v ohybu, zatěžování zkušebního tělesa bylo ukončeno. Na měřícím zařízení byla následně odečtena hodnota meze pevnosti v ohybu a napětí v ohybu při deformacích $\varepsilon_{f1} = 0,05 \%$ a $\varepsilon_{f2} = 0,25 \%$. Výpočet modulu pružnosti v ohybu byl proveden podle rovnice (8). [60] Od každé varianty povrchové textury bylo zkoušeno celkem 7 zkušebních těles. Naměřené průměrné hodnoty jsou spolu s jejich výběrovými směrodatnými odchylkami uvedeny v tab. 15 – 17. Dílčí výsledky jsou zobrazeny v přílohách P1 – P3.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \cdot 100 \quad (8)$$

kde značí: E_f – modul pružnosti v ohybu [MPa],

σ_{f1} – napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f1} = 0,05 \%$ [MPa],

σ_{f2} – napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f2} = 0,25 \%$ [MPa].



Obr. 38 Ohybové zkušební zařízení HOUNSFIELD H10KT (vlevo), detail průběhu ohybové zkoušky (vpravo)

Tab. 15 Průměrné hodnoty ohybových vlastností struktur polymer – kov (High Temp V1)

Technologie – SLA/materiál High Temp V1		
Varianta povrch. textury	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
Nepokovený	97,6 ± 11,1	3133 ± 171
Pokovený (bez textury)	148,1 ± 9,4	10 469 ± 455
E-d0,5-1	151,4 ± 17,8	12 736 ± 264
E-d1-1	72,9 ± 10,3	6 832 ± 325
K-d2-1	50,7 ± 3,8	3564 ± 203

Tab. 16 Průměrné hodnoty ohybových vlastností struktur polymer – kov (Prusa Tough Resin)

Technologie – MSLA/materiál Prusa Tough Resin		
Varianta povrch. textury	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
Nepokovený	71,3 ± 7,6	2379 ± 286
Pokovený (bez textury)	64,9 ± 12,0	6305 ± 914
C-d0,5-1	69,3 ± 10,6	4000 ± 527
E-d1-1	34,8 ± 3,1	2393 ± 145
K-d2-1	28,0 ± 4,3	2090 ± 214

Tab. 17 Průměrné hodnoty ohybových vlastností struktur polymer – kov (PA 12)

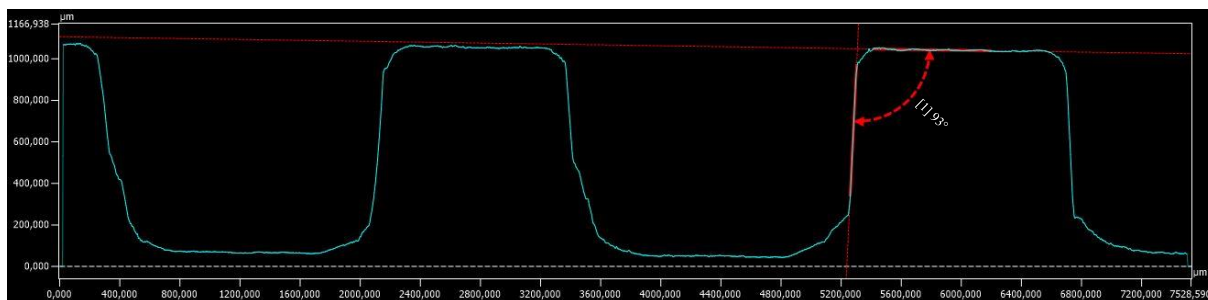
Technologie – MJF/materiál PA 12		
Varianta povrch. textury	σ_{fM} [MPa]	E_f [MPa]
Nepokovený	43,4 ± 1,2	1042 ± 51
Pokovený (bez textury)	63,3 ± 1,3	5341 ± 761

4 Diskuze a vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení vztahu mezi typem 3D povrchové textury a dosažených kvalit povrchu, spolu s mechanickými vlastnostmi struktur polymer – kov, je provedeno na základě dosažených experimentálních výsledků. Nejprve je vyhodnoceno měření drsnosti povrchu povlaku funkčních textur, na základě kterého byly vybrány perspektivní povrchové textury. Dále je posouzena soudržnost struktur polymer – kov po jejich vystavení teplotně – cyklické zkoušce. Rovněž je učiněn rozbor metody jednostranně pokovovaného pásku, pomocí které byl stanoven typ vnitřního napětí ve vyloučených povlacích. Na závěr je vyhodnocen nejen vliv jednotlivých 3D perspektivních povrchových textur, ale také použitých tiskových technologií a materiálů na ohybových vlastnostech struktur polymer – kov.

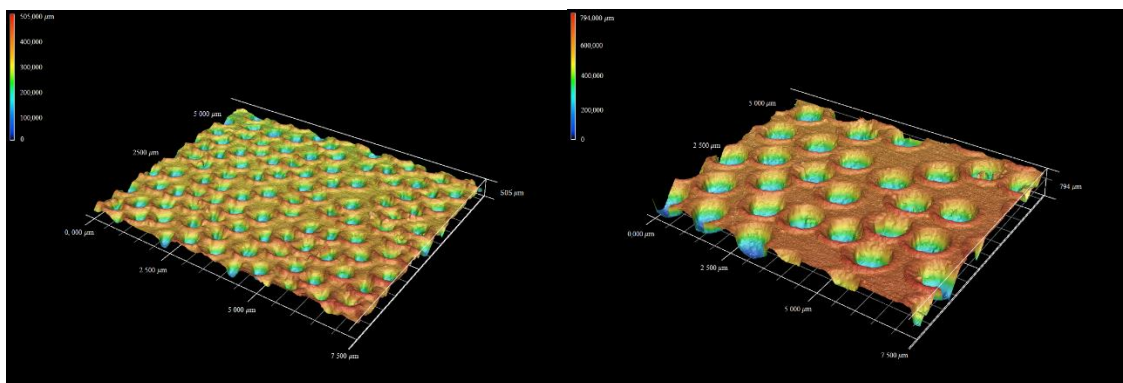
4.1 Vyhodnocení měření drsnosti povrchu povlaku a výběr textur

V rámci měření drsností povrchu před pokovením plných kostek bylo provedeno vyhodnocení jejich profilu (řezu) povrchu (viz obr. 39). Motivací k tomu byla kontrola mezi navrženou (virtuální) povrchovou texturou a skutečnou texturou, která byla vytištěna pomocí aditivních technologií. Jak vyhodnocení profilu ukázalo, použité tiskové metody nedokázaly zhotovit navržené negativní úhly, kterými se elementy vykazují (viz obr. 23). Negativní úhly měly sloužit k „uzamknutí“ kovového povlaku k povrchu dílů. Podstatné bylo to ovšem to, že bylo možné generovat navržené textury se zapaštěnými elementy, což byl rozdíl oproti prvním navrženým texturám na vzorkovnicích. Důležitá byla rovněž skutečnost, že takto vytištěné textury dokázaly zvýšit adhezi povlaku k povrchu u funkčních textur – viz kap. 3.6. Díky tomu bylo možné díly s takto modifikovaným povrchem galvanicky pokovit. Pokud by u všech navržených textur galvanické pokovování nefungovalo, bylo by poté nutné navrhnout odlišného řešení 3D povrchových textur. Vzhledem k výše zmíněným faktům bylo, po konzultaci s vedoucím práce a společností Electroforming s.r.o., rozhodnuto pokračovat v experimentální části dál bez ohledu na to, že elementy nebyly vytištěny přesně dle jejich virtuálního návrhu.

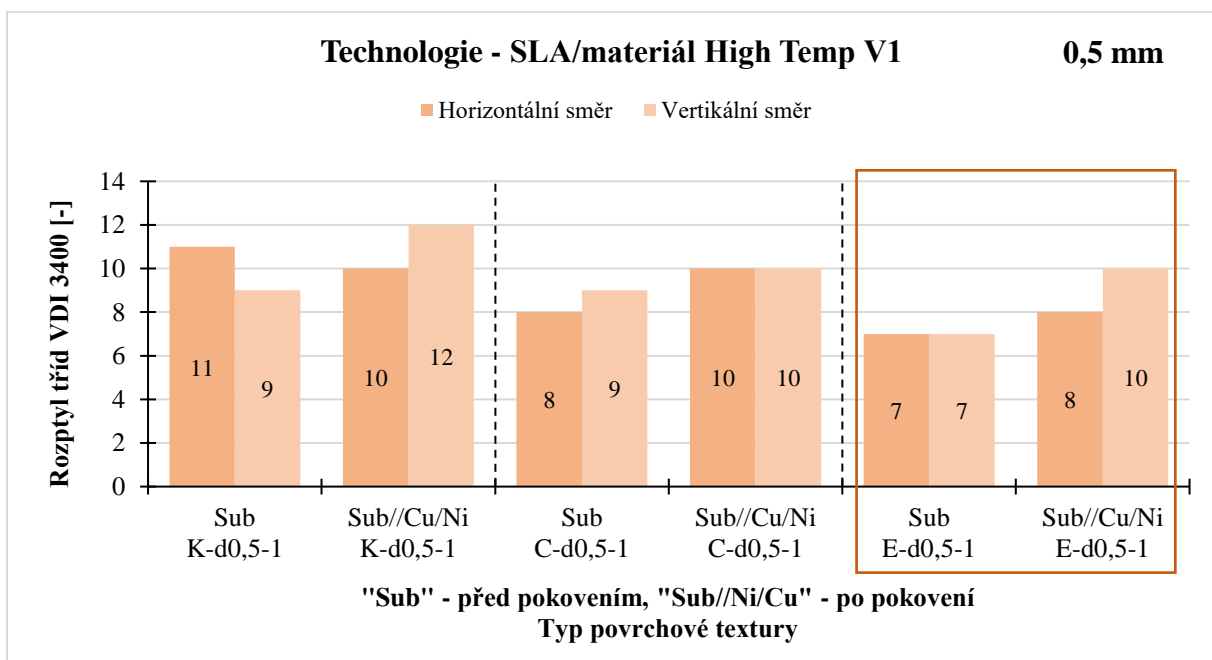


Obr. 39 Příklad kontroly profilu navržené povrchové textury

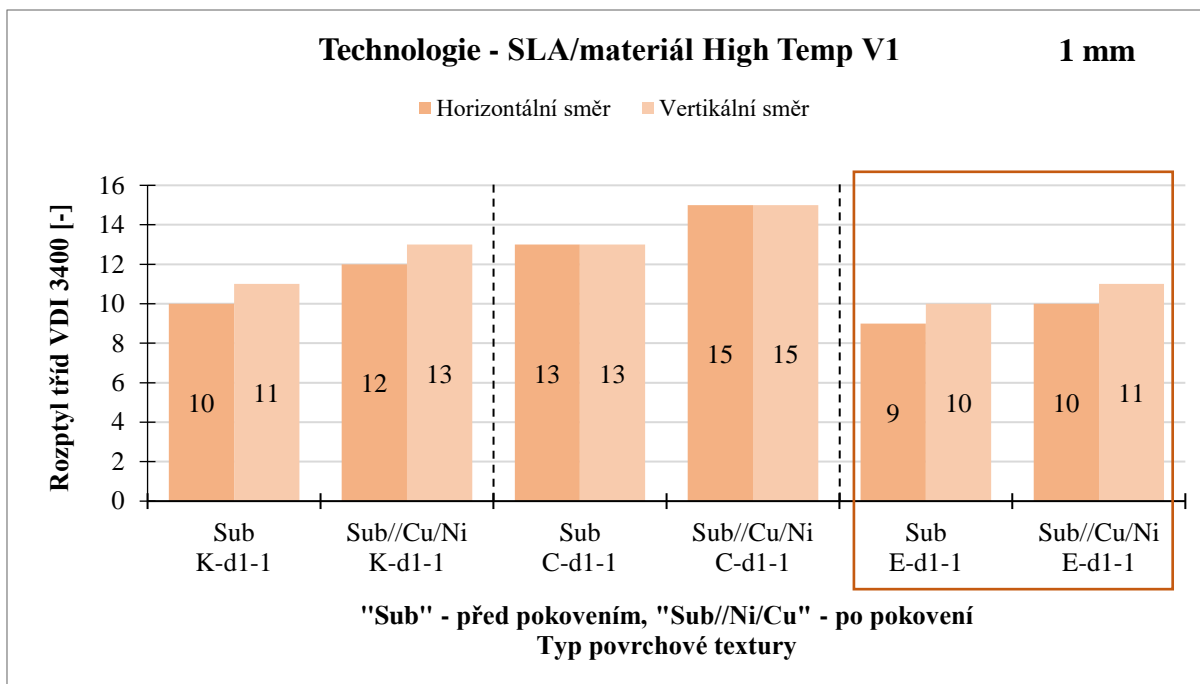
Jak již bylo zmíněno v kap. 3.7, výběr perspektivních struktur proběhl primárně na základě minimálního rozptylu tříd VDI 3400 mezi horní a boční plochou kostek pro daný směr měření drsností (horizontální a vertikální). Jako perspektivní textura byla tedy zvolena taková, která po pokovení vykazovala nejmenší rozptyl tříd VDI 3400 v horizontálním a vertikálním směru měření drsnosti pro danou velikost elementu a aditivní technologii. Podle tohoto kritéria byly zvoleny všechny perspektivní textury. Pokud by byly rozdíly tříd VDI 3400 v porovnávaných směrech totožné, o výběru perspektivní textury by bylo rozhodnuto na základě druhého porovnávaného kritéria, jímž by byla nejnižší třída standardu VDI 3400 v hodnoceném směru měření. Příklady nasnímaných povrchů kovových povlaků struktur polymer – kov jsou zobrazeny na obr. 40. Grafické závislosti rozptylů tříd VDI 3400, spolu s vyznačenými perspektivními texturami, jsou zobrazeny na obr. 41 – 46.



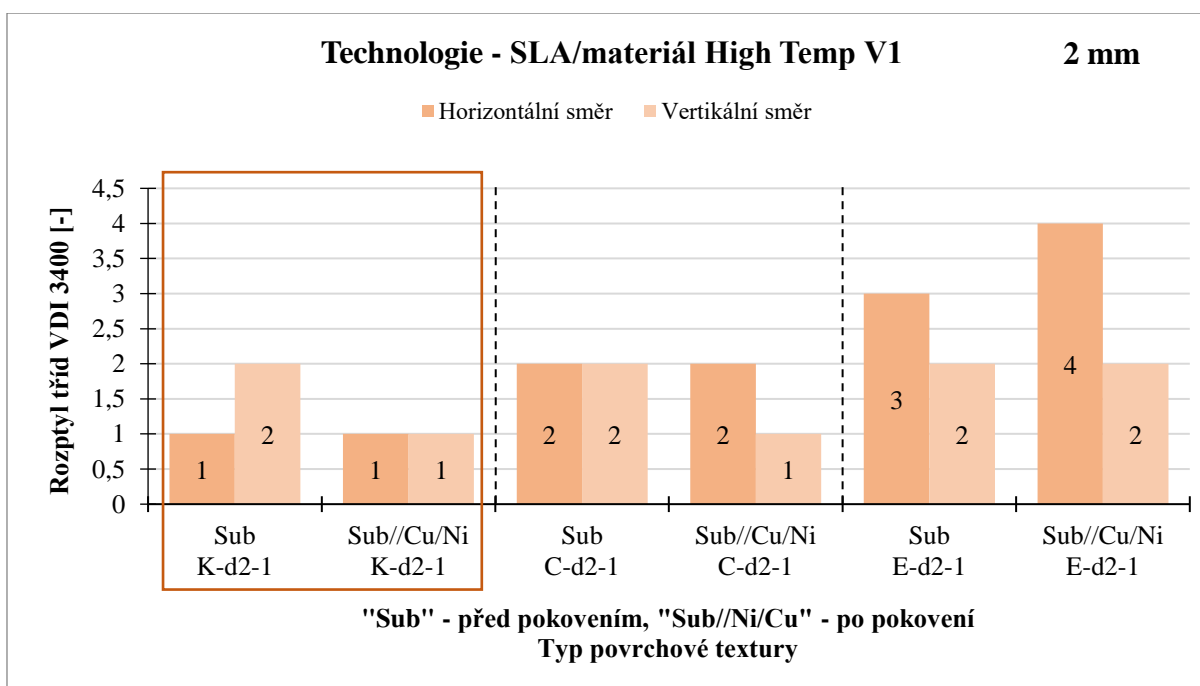
Obr. 40 Příklady nasnímaných povrchů kovových povlaků struktur polymer – kov



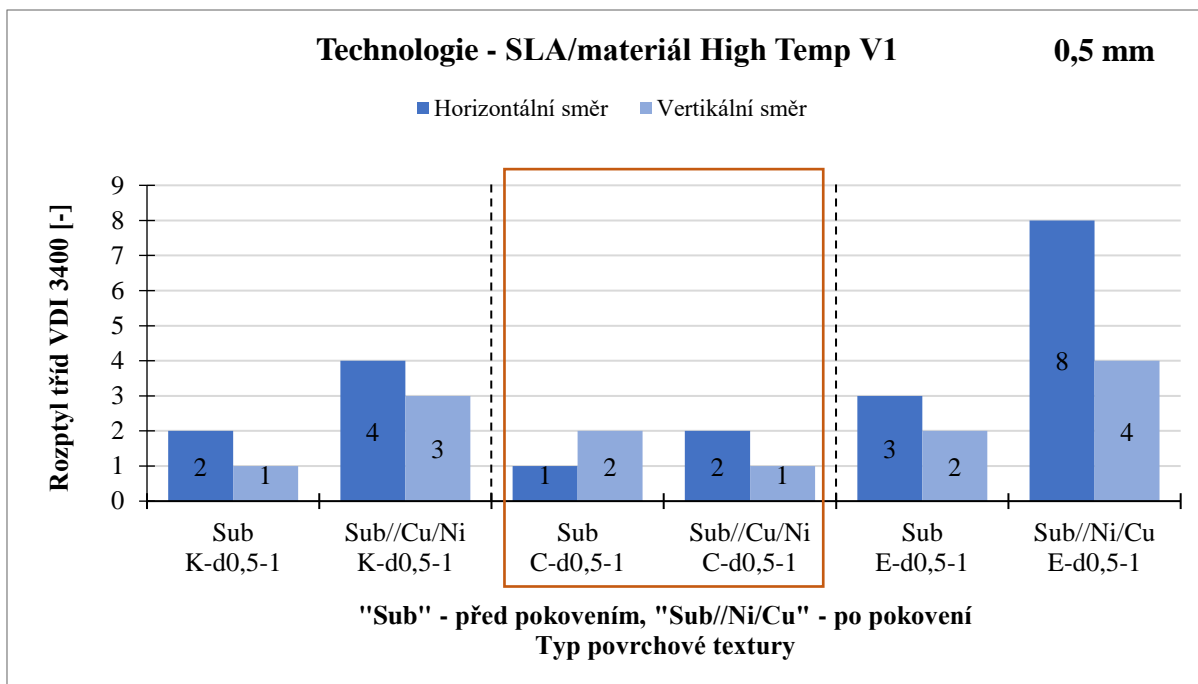
Obr. 41 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu High Temp V1 s texturou tvořenou elementy o velikostech 0,5 mm a vyznačenou perspektivní texturou



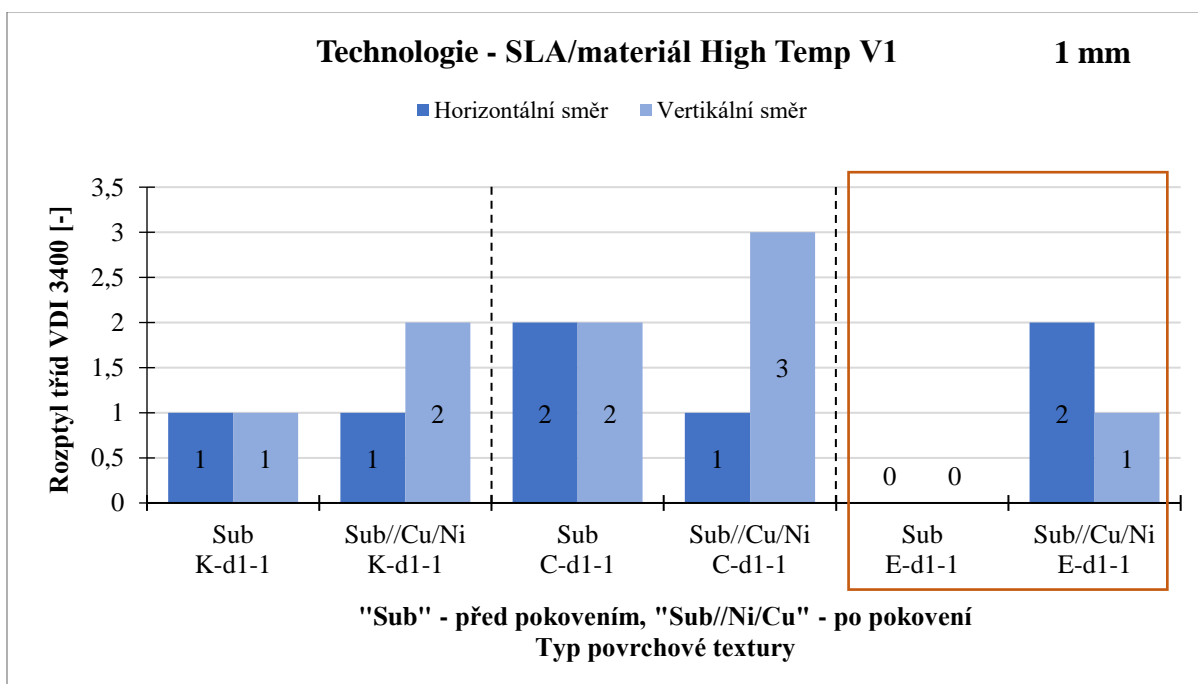
Obr. 42 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu High Temp V1 s texturou tvořenou elementy o velikostech 1 mm a vyznačenou perspektivní texturou



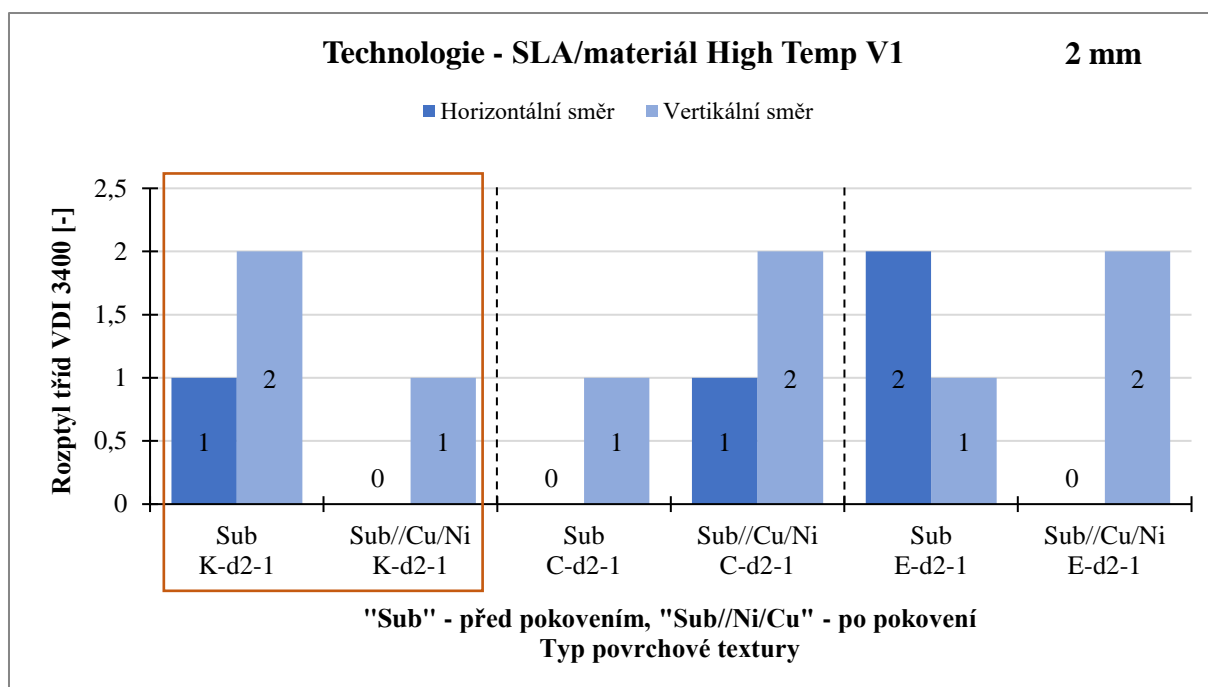
Obr. 43 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu High Temp V1 s texturou tvořenou elementy o velikostech 2 mm a vyznačenou perspektivní texturou



Obr. 44 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu Prusa Tough Resin s texturou tvořenou elementy o velikostech 0,5 mm a vyznačenou perspektivní texturou



Obr. 45 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu Prusa Tough Resin s texturou tvořenou elementy o velikostech 1 mm a vyznačenou perspektivní texturou



Obr. 46 Rozdíly tříd VDI 3400 struktur z materiálu Prusa Tough Resin s texturou tvořenou elementy o velikostech 2 mm a vyznačenou perspektivní texturou

4.2 Vyhodnocení teplotně – cyklické zkoušky

Hodnotící postupy teplotně – cyklické zkoušky byly provedeny v souladu s normou ČSN ISO 4525. Zkouška byla hodnocena vizuálně a tato pozorování byla zanesena do tab. 18.

V průběhu teplotně – cyklické zkoušky dle prvního provozního stupně (první série zkoušek) došlo u některých struktur polymer – kov ke změnám v jejich soudržnosti. Z tab. 18 je zřejmé, že na plných i odlehčených kostkách zhotovených metodami SLA a MSLA s nefunkční texturou E-d0,2-1 došlo k delaminaci povlaků. Lze tak vyvodit, že na nízkou přilnavost povlaku struktur s texturou E-d0,2-1 mohla mít vliv spíše samotná 3D povrchová textura, než-li teplotní objemová roztažnost. K tvorbě puchýřů mohlo rovněž přispět vnitřní tlakové pnutí v povlacích (viz následující kap. 4.3), které mohlo vlivem nízké adheze na rozhraní substrát//vrstva způsobovat vypouknutí povlaku. Puchýře se v průběhu zatížení dle prvního provozního stupně vyskytly také u struktur C-d0,5-1(MSLA), a to na většině jejich ploch. Textura C-d0,5-1 aplikovaná na plnou kostku vykazovala rovněž nízkou přilnavost. Ačkoliv se po první sérii teplotního namáhání objevily puchýře na povrchu pokovených plných kostek struktur E-d1-1(MSLA), tento jev nenastal na odlehčených kostkách s totožnou povrchovou texturou. Odlehčení kostky tak zřejmě mohlo v tomto případě přispět k lepší adhezi povlaku k substrátu. Ze získaných poznatků lze také uvést, že u struktur polymer – kov vytisknutých technologií MJF a zhotovených z plných kostek, došlo k zvrásnění povlaku po druhém cyklu a

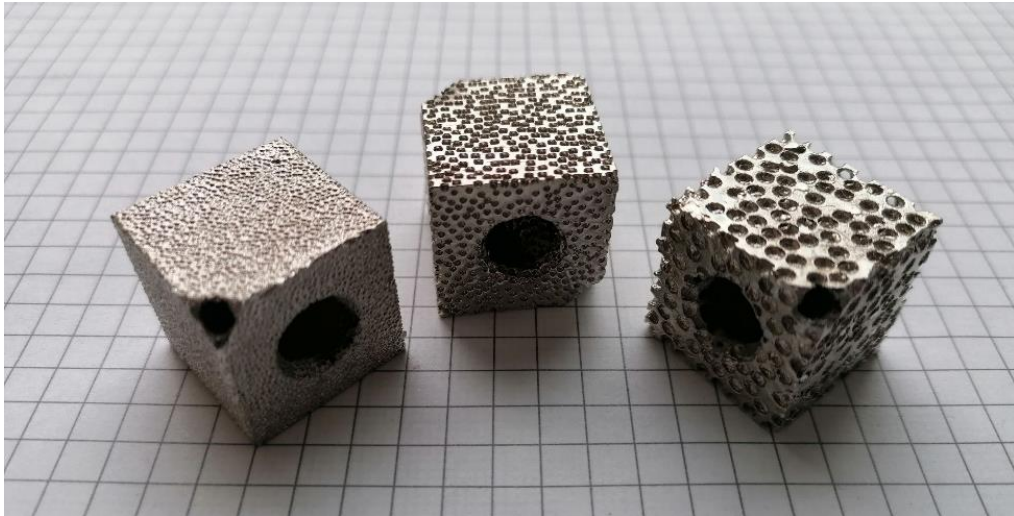
u odlehčených kostek k tomu došlo po třetím (závěrečném) cyklu. Nicméně, tento výsledek je odlišný od závěrů, které byly dosaženy v autorově předchozí práci, kdy byly struktury polymer – kov z PA 12 zhotovené aditivní technologií MJF vystaveny cyklické – teplotně vlhkostní zkoušce dle standardu PV 1200 koncernu VW. Během tohoto testu došlo k teplotně – vlhkostnímu namáhání vzorků, při kterém se na zkoušených strukturách ani po 5 dnech klimatického stárnutí neobjevily známky delaminace nebo prasklin povlaku. [1] Vysvětleno to může být tím, že v případě diplomové práce se na povrchy dílů z PA 12 nanášela přibližně 10x slabší vrstva kovového povlaku a byla zkoušena tělesa s odlišnou geometrií a větším objemem materiálu (kostky oproti tělesům určeným pro mechanické zkoušky).

Tab. 18 Vyhodnocení adheze povlaků struktur polymer – kov po teplotně – cyklické zkoušce („NOK“ – delaminace povlaku; „OK“ – bez delaminace povlaku; „X“ – nezkoušeno)

Typ povrchové textury		SLA / High Temp V1		MSLA / Prusa Tough Resin		
		Kostka		Kostka		
		Plná	Odlehčená	Plná	Odlehčená	
Nefunkční	E-d0,2-1	NOK	NOK	NOK	NOK	
	E-d0,5-1	NOK	OK	X	X	
	Perspektivní	C-d0,5-1	X	X	NOK	NOK
		E-d1-1	OK	OK	NOK	OK
		K-d2-1	OK	OK	OK	OK
MJF / PA 12						
Typ povrchové textury		Plná kostka		Odlehčená kostka		
Bez textury		NOK		NOK		

V průběhu druhé série teplotně – cyklické zkoušky nastala delaminace povlaků u plných kostek struktur E-d0,5-1(SLA). Vzhledem k tomu, že na odlehčených kostkách z těchto struktur nebyly pozorovány známky povrchových vad po ukončení teplotního namáhání, lze se domnívat, že teplotní objemová roztažnost polymeru mohla mít vliv na soudržnost struktur E-d0,5-1(SLA). Závěrečná série testování dle třetího provozního stupně, při které dosahovala vyšší mezní teplota hodnoty 80 °C, již nepřinesla žádné změny v soudržnosti struktur.

Příklady struktur polymer – kov, na kterých nedošlo vlivem teplotně – cyklického namáhání k povrchovým vadám, jsou zobrazeny na obr. 47.

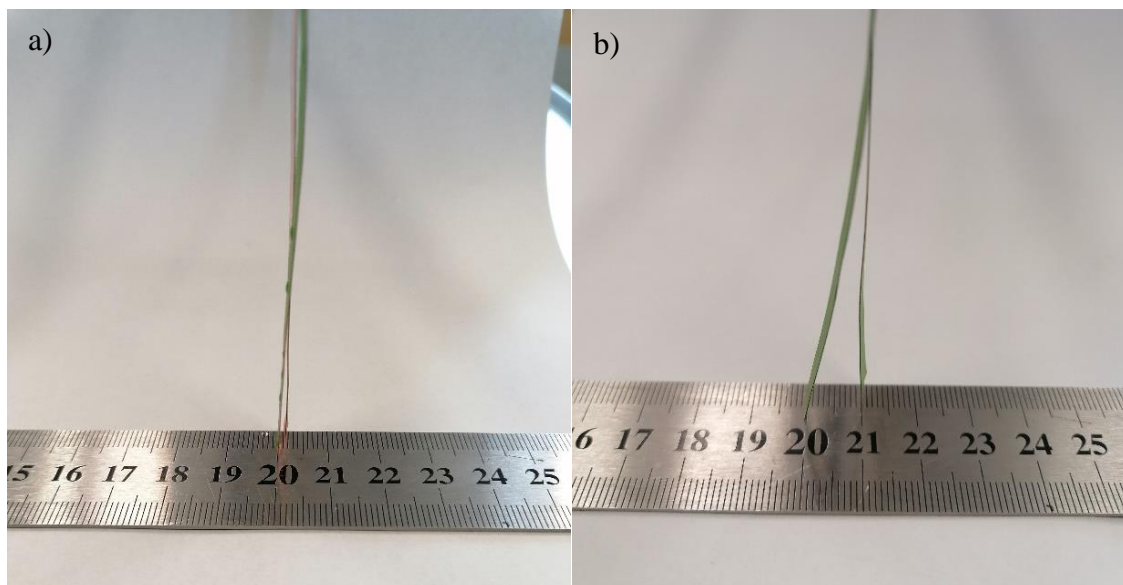


Obr. 47 Pokovené struktury polymer – kov E-d0,5-1(SLA), E-d1-1(SLA) a E-d2-1(SLA) zhotovené z odlehčených kostek

Po každém vyjmutí zkoušených vzorků ze sušárny Venticell bylo pozorováno vyhlazení stávajících puchýřů, což potvrzuje domněnku o objemových změnách struktur polymer – kov v průběhu teplotního namáhání. Při pohledu na výše uvedenou tab. 18 je patrné, že u struktur s texturami tvořenými kavitami o velikostech 2 mm nedošlo ani v jednom případě k delaminaci kovových povlaků. To může být vysvětleno tím, že se nanesený kovový povlak mohl „uzamknout“ v kavitách a zvýšit tak svoji adhezi k povrchu dílu. Podobný jev nastal u struktur E-d1-1(SLA), kdy kovový povlak vykazoval dostatečnou adhezi k tomuto typu textury. Podle vizuálního hodnocení, po provedení teplotně – cyklické zkoušky, dosáhly vyšší četnosti soudržnosti struktury vytištěné pomocí metody SLA. Toto pozorování koresponduje s vyšší teplotní odolností materiálu High Temp V1, který byl použit pro tisk dílů pomocí metody SLA (v porovnání s Prusa Tough Resinem pro 3D tisk metodou MSLA – viz tab. 3). U některých typů povrchových textur hrála pro vyhovující adhezi mezi substrátem a povlakem roli také teplotní objemová roztažnost polymeru. Zároveň si lze z tab. 18 povšimnout trendu, že s rostoucí velikostí elementů se zároveň zvyšuje četnost dostatečné přilnavosti na rozhraní substrát/vrstva.

4.3 Vyhodnocení metody jednostranně pokovovaného pásku

Z dosažených pozorování při vyhodnocování metody jednostranně pokovovaného pásku lze poznamenat, že po nanesení měděného povlaku na testované vzorky nedošlo k výraznému ohybu jejich ramen. Příklad takto vyhodnocovaného vzorku je zobrazen na obr. 48a. Z tohoto pozorování lze předpokládat, že v nanesených měděných povlacích nebylo indukováno žádné nebo minimální vnitřní napětí, které by mohlo způsobit delaminaci povlaku od povrchu zkušebních těles. Toto tvrzení koresponduje s pozorováními, jež byla uskutečněna v průběhu pokovování zkušebních těles. V průběhu mezioperačních víceúrovňových oplachů zkušebních těles totiž nebyla pozorována delaminace měděného povlaku. Navíc se lze domnívat, že samotná provozní teplota mědicí lázně negativně neovlivnila teplotní objemovou roztažnost zkušebních těles. Při pohledu na obr. 48b, jenž reprezentuje testovací vzorek po jeho galvanickém niklování, je zřejmé, že v tomto případě již nastala opačná situace, kdy došlo k indikaci vnitřního napětí v povlaku. Ramena vzorku se ohnula tak, že se na vnější straně ohybu nacházela izolovaná strana vzorku, tzn. v niklových povlacích se indukovalo tlakové vnitřní napětí. Ohyb ramen byl po galvanickém niklování pozorován na obou testovaných vzorcích. Charakteristika vnitřního tlakového napětí, kdy dochází k vypouknutí povlaku (viz kap. 2.2.3), tak mohla přispět k tvorbě puchýřů a zvlnění kovových povlaků, jenž byly pozorovány na všech strukturách, které vykazovaly povrchovou texturu s dvojnásobnou vzdáleností mezi elementy a strukturách E-d0,2-1(SLA) a E-d0,2-1(MSLA).



Obr. 48 Vyhodnocování metody jednostranně pokovovaného pásku
a) vzorek po nanesení měděného povlaku, b) vzorek po nanesení niklového povlaku

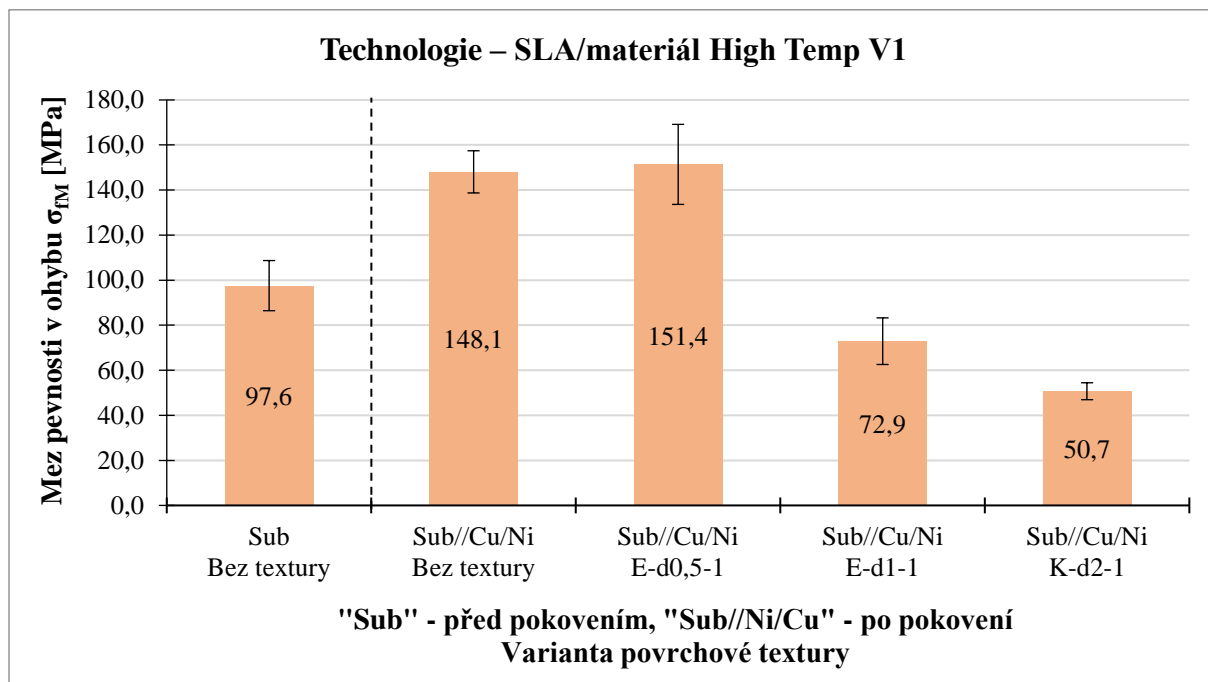
4.4 Vyhodnocení ohybových vlastností

Při stanovení ohybových vlastností struktur polymer – kov byly dodrženy zásady normy ČSN EN ISO 178. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tab. 15 – 17 a na základě těchto dat byly sestrojeny na následujících stránkách grafické závislosti pevnosti v ohybu (σ_{FM}) a modulu pružnosti v ohybu (E_f) pro jednotlivé varianty struktur polymer – kov. Aby byl eliminován vliv pokovení, vyhodnocení ohybové zkoušky je provedeno dvěma způsoby. Nejprve je vyhodnocen dopad galvanického pokovení na mechanické vlastnosti struktur polymer – kov, a to porovnáním nepokovených zkušebních těles s pokovenými tělesy bez povrchových textur (v grafech se jedná vždy o první dva sloupce vlevo). Poté jsou porovnávány pouze pokovené struktury (v grafech vždy vpravo od svislé čárkované přímký) s ohledem na vliv textury (ne)použité textury. Tímto je stanoven vztah mezi 3D povrchovou texturou a výslednými mechanickými vlastnostmi v ohybu. Porovnání je provedeno vždy pro danou aditivní technologii a materiál.

Z obr. 48 je zřejmé, že pokovením dílů tisknutých metodou SLA z materiálu High Temp V1 bez textury došlo k 52% nárůstu meze pevnosti v ohybu oproti nepokoveným dílům. Pokovením tak mohlo dojít ke zpevnění nepokoveného polymerního dílu.

Pokovená povrchová textura tvořená elementy koulí o průměrech 0,5 mm (E-d0,5-1) zvýšila mez pevnosti v ohybu o 2 % (oproti pokovené struktuře bez textury). Vzhledem k rozptýlům hodnot lze prohlásit, že se jedná o obdobné navýšení porovnávaného parametru jako u pokovených dílů bez textury (viz obr. 49). Nepatrně vyšší nárůst meze pevnosti v ohybu u struktur E-d0,5-1(SLA) mohl být způsobený dobrou adhezí povlaku k povrchu zkušebních těles (viz obr. 54), která tak mohla vykompenzovat zásah elementů do jejich konstrukce. To je rozdíl oproti strukturám bez textury, které sice vykazovaly nízkou adhezí povlaku k povrchu zkušebních těles, avšak tělesa neměla zeslabenou konstrukci (narušenou celistvost). Zásahy do konstrukce zkušebních těles tak mohly zapříčinit snížení mechanických vlastností v ohybu struktur polymer – kov. K poklesu meze pevnosti v ohybu došlo u struktur z materiálu High Temp V1, které vykazovaly povrchovou texturu E-d1-1 a Kd-2-1. V porovnání se strukturami bez textur, tak toto snížení meze pevnosti v ohybu činilo u struktur vytištěných metodou SLA s texturou E-d1-1 (cca 2krát) a s texturou K-d2-1 (cca 2,9krát). Tyto poklesy mohly zřejmě nastat vlivem většího zeslabení konstrukce zkušební tělesa, což bylo dáno zapuštěním jednotlivých elementů do povrchu zkušebních těles. Zeslabení konstrukce těles tak nemusel nanesený povlak, i s velmi dobrou adhezí k povrchu, vykompenzovat (viz obr. 54). Tuto

domněnku podporuje fakt, že u struktur K-d2-1(SLA), kde byly tyto zásahy největší, byl zaznamenán nejvyšší pokles meze pevnosti v ohybu.

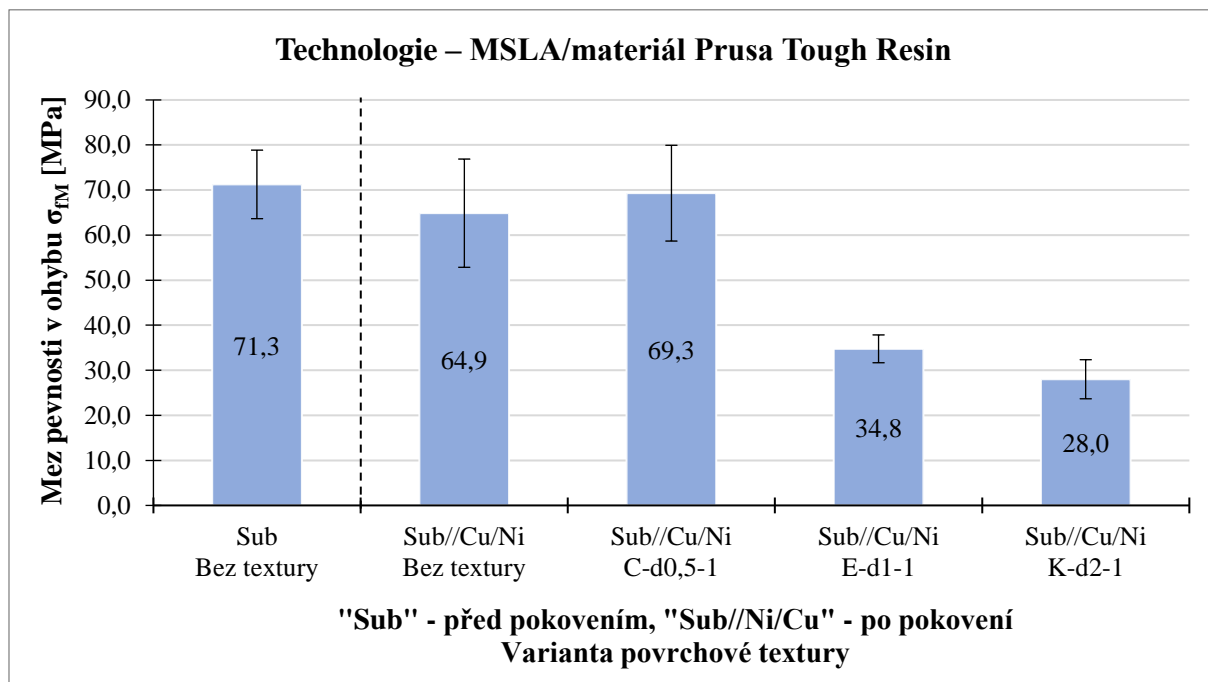


Obr. 49 Mez pevnosti v ohybu struktur z materiálu High Temp V1 (bez pokovení, pokovení bez textury, struktury E-d0,5-1; E-d1-1 a K-d2-1)

Při porovnání výsledků z ohybové zkoušky struktur z materiálu Prusa Tough Resin je patrné, že pokovením nedošlo u struktur bez textury k navýšení jejich ohybových mechanických vlastností (viz obr. 50). Mez pevnosti v ohybu těchto struktur oproti nepokoveným tělesům byla snížena o 10 %. Vzhledem k směrodatným odchylkám se jedná o nepatrný pokles meze pevnosti v ohybu. V průběhu ohybové zkoušky mohla, po narušení adheze na rozhraní substrát/vrstva a následně kovového povlaku, mez pevnosti odpovídat již samotnému polymeru.

Z obr. 50 je zřejmé, že u struktur C-d0,5-1(MSLA) bylo dosaženo 7% navýšení meze pevnosti v ohybu oproti strukturám bez povrchové textury. Vzhledem k rozptýlům hodnot jsou však tyto rozdíly nepatrné a lze vyvodit, že nebylo dosaženo výraznějšího rozdílu mezi těmito variantami struktur. Pokovené struktury C-d0,5-1(MSLA) již vykazovaly vyšší míru adheze oproti strukturám bez textury – viz obr. 55. Zásah do konstrukce těles těchto struktur ovšem nemusel být vykompenzován dostatečným zpevněním díky jejich pokovení. Tím je možné vysvětlit, proč nedošlo u struktur C-d0,5-1(MSLA) k výraznějšímu navýšení jejich meze pevnosti v ohybu. Poklesy hodnoty meze pevnosti v ohybu byly zaznamenány u struktur s modifikovaným povrchem elementy o velikostech 1 mm (E-d1-1) a 2 mm (K-d2-1),

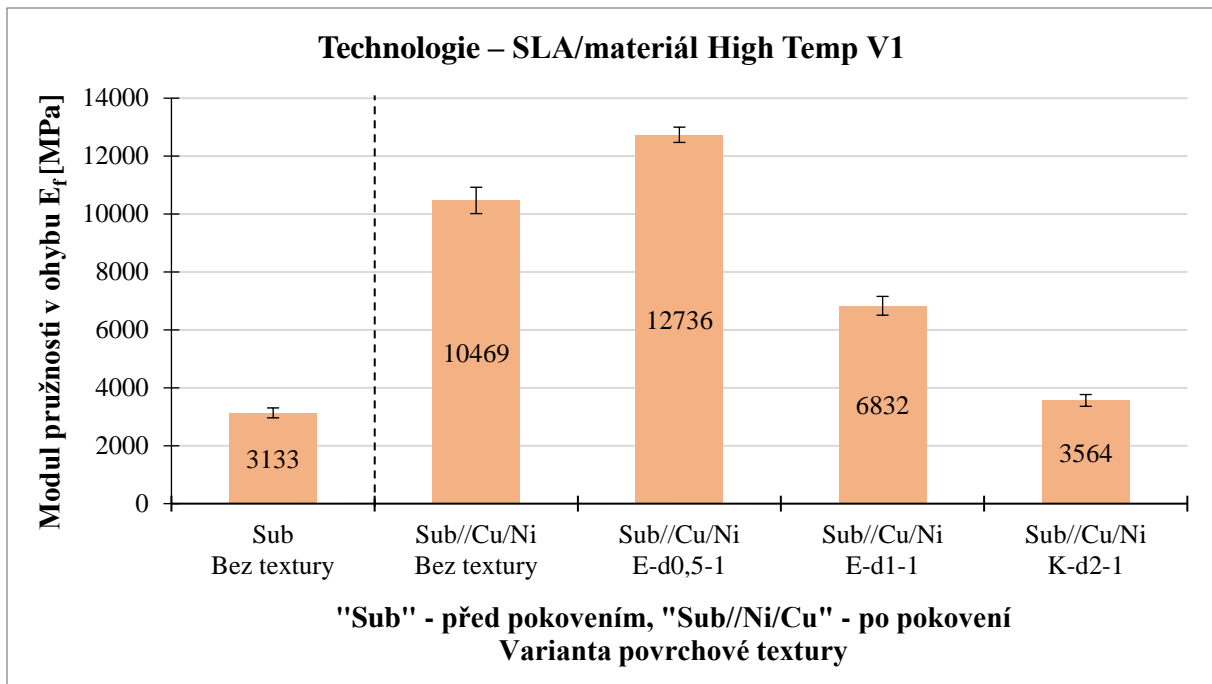
což potvrzuje hypotézu o narušení celistvosti povrchu tělesa zapuštěním elementů do jejich povrchu.



Obr. 50 Mez pevnosti v ohybu struktur z materiálu Prusa Tough Resin (bez pokovení, pokovení bez textury, pokovení textur C-d0,5-1; E-d1-1 a K-d2-1)

Druhou hodnocenou ohybovou vlastností struktur polymer – kov představoval modul pružnosti v ohybu (tuhost). Jak dokládá obr. 51, porovnávající tuhosti struktur z materiálu High Temp V1, došlo vlivem pokovení k vysokému navýšení tuhosti u struktur bez povrchové textury (cca 3,3krát). To může být vysvětleno dobrou adhezí mezi povlakem a povrchem zkušebních těles (viz obr. 54).

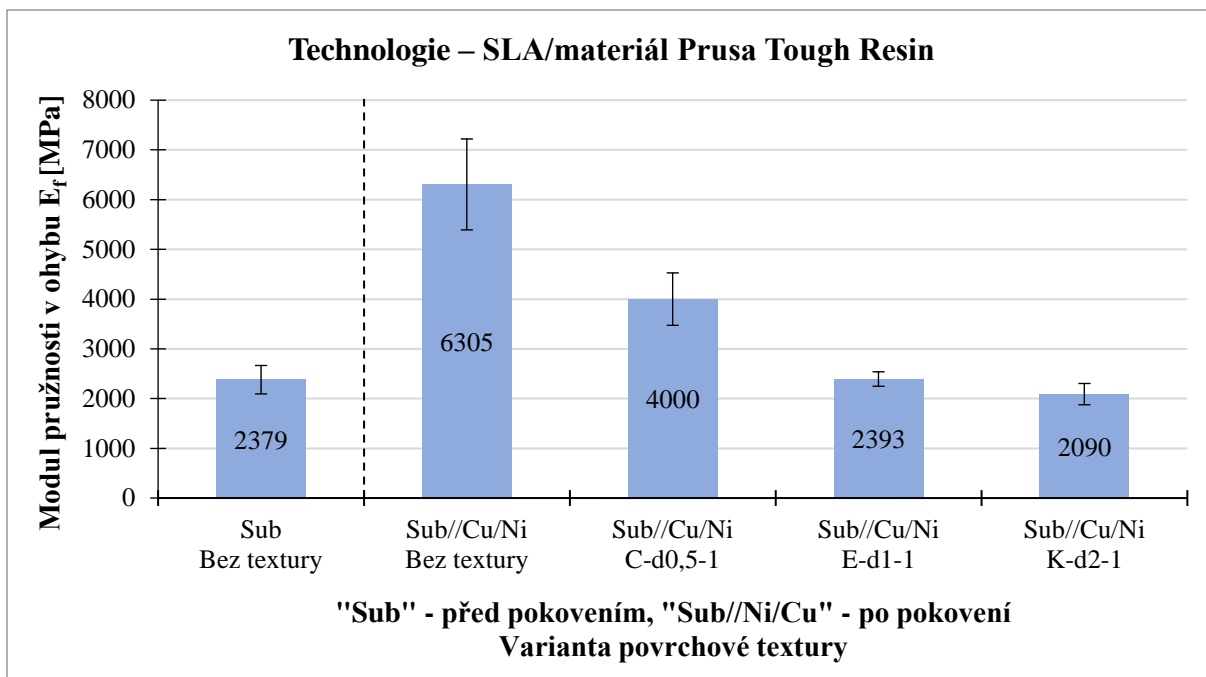
Z grafické závislosti na obr. 51, porovnávající vliv 3D povrchových textur na povrchu materiálů z High Temp V1, lze vyvodit, že u struktur E-d0,5-1(SLA) došlo k 22% navýšení tuhosti oproti strukturám bez textur. Tento nárůst je patrně zapříčiněn dobrou přilnavostí mezi povlakem a povrchem dílů (viz obr. 54). Díky tomu mohlo nastat zpevnění těchto struktur, čímž mohl být vykompenzován zásah do celistvosti zkušebních těles. Zároveň nedošlo k takovému zeslabení konstrukce zkušebních těles jako v případě struktur E-d1-1(SLA) a E-d2-1(SLA). U těchto struktur mělo, s největší pravděpodobností, aplikování elementů o velikostech 1 a 2 mm za následek snížení jejich tuhostí.



Obr. 51 Modul pružnosti v ohybu struktur z materiálu High Temp V1 (bez pokovení, pokovení bez textury, pokovení textur E-d0,5-1; E-d1-1 a K-d2-1)

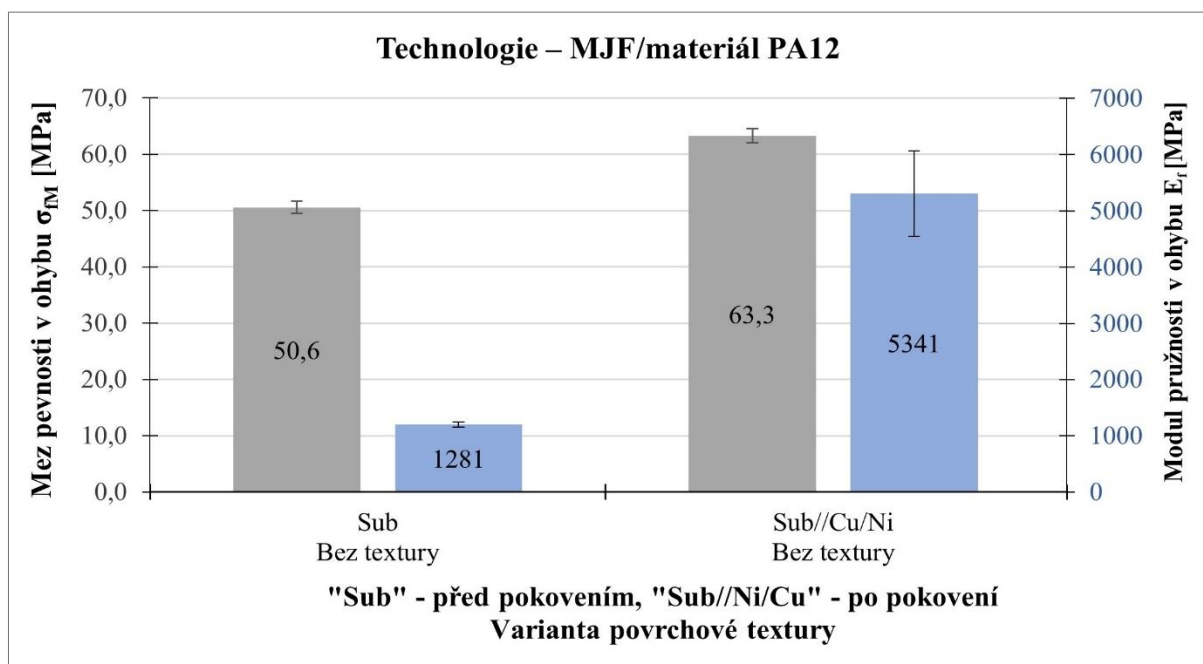
Při pohledu na obr. 52 reprezentující porovnání jednotlivých variant struktur polymer – kov z materiálu Prusa Tough Resin, je zřejmé, že u struktur bez povrchové textury došlo k nárůstu modulu pružnosti v ohybu (cca 2,7krát), a to i přes nízkou adhezi povlaků. Důvod tohoto nárůstu lze spatřovat v nenarušení konstrukce zkušebních těles.

Na obr. 52 je zřejmý trend, kdy s rostoucí velikostí elementů dochází k postupnému snižování modulu pružnosti v ohybu struktur polymer – kov z materiálu Prusa Tough Resin. V případě struktur C-d0,5-1(MSLA) se hodnota tuhosti snížila o 57 %. Lze se domnívat, že důvodem k takovému poklesu tuhosti mohlo dojít, stejně jako v případě struktur z materiálu High Temp V1, kvůli zeslabení konstrukce zkušebních těles elementy – viz obr. 55. Dle očekávání byly poklesy hodnot tuhosti zaznamenány také u struktur E-d1-1(MSLA), u kterých poklesl tento parametr cca 2,6krát. Tuhost se v případě struktur K-d2-1(MSLA) snížila výrazněji – cca 3krát.



Obr. 52 Model pružnosti v ohybu struktur z materiálu Prusa Tough Resin (bez pokovení, pokovení bez textury, pokovení textur C-d0,5-1; E-d1-1 a K-d2-1)

Z obr. 53 je patrné, že se mez pevnosti v ohybu struktur z PA 12 po galvanickém pokovení zvýšila o 25 %. Pokovení polymeru PA 12 způsobilo nejvyšší nárůst tuhosti ze všech porovnávaných struktur polymer – kov (cca 4,4krát). Z dosažených výsledků se lze domnívat, že tento nárůst mohl být způsobený nezeslabením jejich konstrukce elementy a velmi dobrou adhezí povlaku k povrchu zkušebních těles.



Obr. 53 Modul pružnosti v ohybu struktur z materiálu PA 12 (bez pokovení, pokovení bez textury)

Pro ilustraci závislosti typu 3D povrchové textury na deformaci struktur polymer – kov z materiálu High Temp V1 po vykonání zkoušky v ohybu, jsou příklady těchto struktur zobrazeny na obr. 54. Lze tak pozorovat příklad struktury z materiálu High Temp V1 bez textury, na které došlo v průběhu zkoušky v ohybu k prasknutí její funkční části (viz obr. 54a). Patrné je také zvlnění povlaku v místech poblíž lomu. Příčinu těchto závěrů lze pravděpodobně přičítat nižší přilnavosti povlaku k povrchu dílu, kdy sice došlo k navýšení mechanických vlastností v ohybu struktur bez textury, ovšem tyto struktury vykazovaly nižší přilnavost povlaků oproti ostatním porovnávaným variantám povrchových textur.

Z obr. 54 je zřejmý trend, při kterém se při rostoucí velikosti elementu zmenšuje průhyb (deformace) těles. Toto pozorování koresponduje s vyhodnocením tepelně – cyklické zkoušky (viz kap. 4.2). Ačkoliv větší velikost elementů mohla oproti nepokoveným dílům zapříčinit pokles mechanických vlastností v ohybu struktur E-d1-1(SLA) a E-d2-1(SLA), mohla na druhou stranu naopak přispět k navýšení přilnavosti povlaků těchto struktur.

Obdobně příklady struktur polymer – kov z materiálu Prusa Tough Resin jsou znázorněny na obr. 55. Postupné snižování míry deformace (průhybu) se vzrůstající velikostí elementů je podobné jako u struktur z materiálu High Temp V1. V tomto případě jsou ovšem patrné větší ohyby těles, které byly pravděpodobně způsobeny nižší adhezí povlaků k povrchům substrátů.



Obr. 54 Příklady zkušebních těles struktur polymer – kov z materiálu High Temp V1 po zkoušce v ohybu; a) bez textury, b) E-d0,5-1(SLA), c) E-d1-1(SLA), d) K-d2-1(SLA)



Obr. 55 Příklady zkušebních těles struktur polymer – kov z materiálu Prusa Tough Resin po zkoušce v ohybu; a) bez textury, b) C-d0,5-1(SLA), c) E-d1-1(SLA), d) K-d2-1(SLA)

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, zhotovit a otestovat struktury polymer – kov s různými typy 3D povrchových textur, které byly aplikovány na povrch polymerních dílů. Účelem této modifikace bylo umožnění efektivního „zakotvení“ následně naneseného kovového povlaku na povrch polymerních dílů, které byly vytištěny pomocí technologií stereolitografie (SLA) z materiálu High Temp V1 a maskované stereolitografie (MSLA) z materiálu Prusa Tough Resin. Nanesení kovového povlaku bylo realizováno ve spolupráci se společností Electroforming s.r.o. Vzorky byly galvanicky pokoveny v mědicí a poté v niklovací lázni. Vzhledem k vytyčeným cílům práce byly zkonstruovány 3D povrchové textury s následujícími požadavky: zajištění dostatečné a reprodukovatelné adheze mezi polymerním dílem a naneseným kovovým povlakem, a také realizovatelnost výroby dílů s povrchovými texturami pomocí 3D tisku. Při návrhu povrchových textur byly dále zohledněny požadavky na mechanické vlastnosti struktur polymer – kov. Z tohoto hlediska byl hodnocen zejména vliv textur na pevnost struktur a již zmíněná adheze na rozhraní substrát//vrstva. Pro porovnání byla k výše zmíněným tělesům navíc zhotovena tělesa z materiálu PA 12 aditivní technologií Multi Jet Fusion (MJF), a to bez povrchových textur.

Po prvotně získaných poznacích z návrhu povrchových textur (výběr vhodného softwaru, způsob generování textur, umístění elementů apod.) byla zkonstruována zkušební tělesa inspirovaná vzorkovníkem drsnosti standardu VDI 3400. Celkem bylo navrženo 22 typů povrchových textur. Textury byly vytvořeny zapuštěním jednotlivých elementů o různých velikostech (0,2; 0,5; 1 a 2 mm) a geometriích (kavit, čoček a koulí) do povrchu těles. Výsledky kontroly galvanického pokovení zkušebních těles ukázaly, že k tvorbě puchýřů nedocházelo pouze na povrchu povlaků určitých struktur. Na základě měření drsnosti povlaků, a také s ohledem na tvorbu zmíněných puchýřů, bylo následně vybráno šest tzv. perspektivních povrchových textur. Pomocí těchto textur byl modifikován povrch těles zhotovených metodami SLA a MSLA. Tato tělesa byla použita v dalších krocích experimentální studie. Konkrétně se jednalo o struktury: E-d0,5-1(SLA), E-d1-1(SLA), K-d2-1(SLA), C-d0,5-1(MSLA), E-d1-1(MSLA) a K-d5-1(MSLA).

Za účelem posouzení vlivu teplotní objemové roztažnosti substrátu (polymeru) na tvorbu puchýřů byla provedena teplotně – cyklická zkouška, neboť znalost kvality adheze na rozhraní substrát//vrstva je klíčovým faktorem pro hodnocení soudržnosti struktur polymer – kov. Této zkoušce byla vystavena plná tělesa ve tvaru kostek. Navíc byla pro potřeby této zkoušky zkonstruována odlehčená tělesa s totožnou geometrií. Porovnáním plných kostek

s odlehčenými měl být stanoven vliv plného a odlehčeného tělesa na tvorbu puchýřů. Nicméně výsledky zkoušky neprokázaly, že by na nízkou přilnavost povlaků nefunkčních textur (textury, na nichž se objevily puchýře) měla mít vliv teplotní objemová roztažnost polymeru. Tvorba puchýřů tak byla pravděpodobně způsobená nevyhovující 3D povrchovou texturou. Z průběžného vizuálního hodnocení zkoušky je patrné, že se puchýře objevily také u plných vzorků struktur E-d0,5-1(SLA) a E-d1-1(MSLA). Naopak u odlehčených vzorků s totožnou texturou k tomuto jevu nedocházelo. Lze se tak domnívat, že odlehčení těles již mělo pozitivní vliv na jejich soudržnost. Z výsledků zkoušky lze vyvodit, že s rostoucí velikostí elementů byla zaznamenána vyšší přilnavost povlaků na rozhraní substrát//vrstva. Na základě vizuálního hodnocení zkoušky bylo zjištěno, že vyšší míry soudržnosti dosáhly struktury polymer – kov vytištěné metodou SLA. Rovněž na povrchu struktur z materiálu PA 12 byly v průběhu teplotně – cyklické zkoušky pozorovány povrchové vady povlaků. K tvorbě těchto vad mohlo přispět také indukované tlakové napětí v povlacích, jenž bylo stanoveno pro všechny vyloučené povlaky metodou jednostranně pokoveného pásu.

V závěrečné části experimentu byly ohybovou zkouškou stanoveny mechanické vlastnosti v ohybu struktur polymer – kov. Při porovnání struktur bez textury (SLA a MSLA) lze uvést, že galvanickým pokovením bylo dosaženo uspokojivější adheze na rozhraní substrát//vrstva u struktur zhotovených metodou SLA. Při hodnocení ohybových vlastností struktur s perspektivními texturami byly naměřeny poklesy meze pevnosti v ohybu. V případě struktur E-d1-1(SLA) tento pokles byl cca dvojnásobný a u struktur K-d2-1(SLA) cca trojnásobný. Změny byly zaznamenány také u struktur E-d1-1(MSLA), u kterých byl snížen modul pružnosti v ohybu cca 2,6krát a u struktur K-d2-2(MSLA), kdy došlo ke snížení tohoto parametru cca 3krát. Naopak k nárůstu ohybových vlastností došlo u struktur E-d0,5-1(SLA), u kterých bylo docíleno 3% nárůstu meze pevnosti v ohybu a 22% navýšení tuhosti oproti pokoveným vzorkům bez textury. Nanesením kovových povlaků na polymery PA 12 bylo dosaženo nejvyššího nárůstu tuhosti ze všech porovnávaných struktur, a to cca 4,4krát.

Na základě dosažených výsledků diplomové práce lze konstatovat, že tvorbou 3D povrchových textur bylo na strukturách polymer – kov s perspektivními (resp. vyhovujícími texturami) docíleno dobrých výsledných mechanických vlastností v ohybu a také dobré adheze na rozhraní substrát//vrstva. Na základě těchto výsledků lze pro technickou praxi doporučit struktury E-d0,5-1(SLA). Po provedení teplotně – cyklické zkoušky vykazovaly odlehčené struktury dostatečnou přilnavost povlaku k povrchu zkušebních těles. Zároveň docházelo u struktur E-d0,5-1(SLA) k navýšení ohybových vlastností. Pokles těchto vlastností

byl naopak zaznamenán u struktur tvořených většími elementy, které ovšem vykazovaly velmi dobrou adhezi povlaku k povrchu polymerního dílu. Byl tak pozorován trend, kdy se s rostoucí velikostí elementů navyšovala dostatečná přilnavost na rozhraní substrát//vrstva, ovšem při současném zhoršení ohybových vlastností daných struktur. Výše zmíněné vyhovující textury lze tak doporučit do provozní praxe. Pro následující výzkum lze doporučit hlubší analýzu rozdílu mezi navrhnutou povrchovou texturou a vytisknutou. Zajímavé by rovněž mohlo být aplikovat povrchové textury na díly vytisknuté metodou MJF z materiálu PA 12 a dále zkoumat jejich vliv na mechanické a pohledové vlastnosti.

Použitá literatura

- [1] TUČEK, Radek. *Pevnostní charakteristiky materiálových struktur polymer-kov* [online]. Liberec, 2021. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/161300>.
- [2] GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich : Cincinnati: Hanser Publishers ; Hanser Publications, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [3] WOHLERS ASSOCIATES, ed. *Wohlers report 2019: 3D printing and additive manufacturing state of the industry*. Fort Collins (Colo.): Wohlers Associates, 2019. ISBN 978-0-9913332-5-7.
- [4] What is 3D printing? How does 3D printing work? *Hubs* [online]. [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>
- [5] *Aditivní výroba (Rapid prototyping, tooling)* [online]. [vid. 2023-03-12]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [6] JIT (Just In Time). *Česká logistika* [online]. 15. únor 2021 [vid. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.ceskalogistika.cz/jit/>
- [7] GIBSON, Ian, David ROSEN a Brent STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second Edition. New York Heidelberg Dodrecht London: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-4455-2.
- [8] *[FAQ] Co je to reverzní inženýrství? | 3Dees* [online]. [vid. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/faq/75-co-je-to-reverzni-inzenyrstvi>
- [9] What is Additive Manufacturing (AM)? *Engineering Product Design* [online]. [vid. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/additive-manufacturing-processes/>
- [10] *Historie 3D tisku | ČVUT Fakulta strojní* [online]. [vid. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/historie-3d-tisku/>
- [11] Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing. *Formlabs* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>
- [12] *Historie 3D tisku | 3D Tisk* [online]. [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: <http://3dtisk.vujo.cz/historie-3d-tisku/>
- [13] What is SLA 3D printing? *Hubs* [online]. [vid. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>
- [14] Formlabs Customer Support. *Formlabs Customer Support* [online]. [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: <http://support.formlabs.com/>
- [15] STRŽÍTESKÝ, Ondřej. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou*. Praha: Prusa Research a.s., 2019.

- [16] P, Madeleine. What is the Difference Between SLA and MSLA 3D Printing? *3Dnatives* [online]. 1. srpen 2022 [vid. 2023-03-08]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/difference-between-sla-and-msla-020820224/>
- [17] Resiny. *Prusa Knowledge Base* [online]. [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/resiny_1977
- [18] KOČÍ, Jakub. Everything You Always Wanted to Know About Resins and Safety SLA Printing (But Were Afraid to Ask). *Original Prusa 3D Printers* [online]. 13. září 2022 [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: https://blog.prusa3d.com/everything-you-always-wanted-to-know-about-resins-and-safety-sla-printing-but-were-afraid-to-ask_70758/
- [19] *Katedra tváření kovů a plastů - Skripta* [online]. [vid. 2021-11-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#013
- [20] POKORNÝ, P., J. ŠVADLENA, P. NOVÁK, P. SZELAG a L. ŠUBERT. Zhodnocení příčin vzniku defektních kovových povlaků na polymerním systému ABS / The assessment of causes of formation of defective metallic coatings on the ABS polymer system. *KOM – Corrosion and Material Protection Journal* [online]. 2014, 58(3), 75–83. Dostupné z: doi:10.2478/kom-2014-0014
- [21] *Technologie | Electroforming - Galvanoplastika* [online]. [vid. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.electroforming.cz/cs/technologie>
- [22] VOJTĚCH, Lukáš a Radek TUČEK. Unikátní technologie galvanického pokovování 3D tištěných plastových dílů. *Strojirenství.cz*. duben, 2021(4), s. 44-45. ISSN 2570-7205.
- [23] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 978-80-7082-668-3.
- [24] Elektrolýza a její aplikace. *ELUC* [online]. [vid. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/2285?PageSpeed=noscript>
- [25] COTELL, Catherine M., John B. SPRAGUE a F.A. SMIDT JR. *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*. Novelty, Ohio, United States: ASM International, 1994. ISBN 978-0-871-384-2.
- [26] GARAY, Jan. *Návrh galvanické linky pro kontinuální elektrochemické pokovení drátu povlaků Fe a Ni*. Ostrava, 2010. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie.
- [27] *Nickel plating handbook* [online]. 2014. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/lxxh1zwr/2023-nickelplatinghandbooka5_printablepdf.pdf
- [28] *Koloidy* [online]. [vid. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.antibakterin.cz/koloidy/>
- [29] SZELAG, Petr, Závěš CYRUS, Zdeněk PŘIKRYL, Jaromír VÍTEK a František KRISTOFORY. *Kurz galvanizérů 3*. B.m.: VŠB - TU OSTRAVA. 1999

- [30] *Methods and Formulas to Determine Internal Deposit Stress in Applied Metallic Coatings* [online]. 20. prosinec 2014 [vid. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.pfonline.com/articles/methods-and-formulas-to-determine-internal-deposit-stress-in-applied-metallic-coatings>
- [31] SARALOĞLU GÜLER, Ebru a Ishak KARAKAYA. Taguchi Design of Internal Stress and Friction Measurements during Electrodeposition. *Journal of Material Science & Engineering* [online]. 2017, 06. Dostupné z: doi:10.4172/2169-0022.1000353
- [32] A Practical Guide to Understanding, Measuring and Controlling Stress in Electroformed Metals. In: [online]. 2006 [vid. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Practical-Guide-to-Understanding%2C-Measuring-and/dd53c94beda72b17661e3c524e915e802faba060>
- [33] PAKOSTA, Michal, Vratislav ŽÁK a Dušan LOŠONSKÝ. Metody vnitřního pnutí galvanických vrstev. *Povrcháři* [online]. Březen, 2008(3), s. 10-11. ISSN 1802-9833. Dostupné z: doi:http://www.povrchari.cz/kestazeni/200803_povrchari.pdf
- [34] SCHLESINGER, Mordechai a Milan PAUNOVIC, ed. *Modern electroplating*. 5th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010. The electrochemical society series, 52. ISBN 978-0-470-16778-6.
- [35] SCHIEFERDECKER, Pavel. *Vývoj technologie výroby galvanoplastických forem*. Zlín, 2008. Diplomová práce. Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství.
- [36] Nabízené technologie. *KOH-I-NOOR HARDTMUTH a.s.* [online]. [vid. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.galvanovny.eu/nabizene-technologie>
- [37] ASTM B975-15 - Standard Test Method for Measurement of Internal Stress of Metallic Coatings by Split Strip Evaluation (Deposit Stress Analyzer Method)
- [38] LOŠONSKÝ, Dušan. *Galvanoplastika Ni-speed*. Praha, 2007. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [39] STOKLÁSEK, Jiří. Galvanoplastická výroba forem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007 [vid. 2023-05-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/galvanoplasticka-vyroba-forem>
- [40] SOUSEDÍK, Radim. *Studium vlivu reliéfu ocelového substrátu na adhezi ochranných povlaků*. Ostrava, 2011. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojí, Katedra mechanické technologie.
- [41] SOSNOVÁ, Martina. *Kluzné vrstvy a metody hodnocení adhezivně-kohezivního a tribologického chování* [online]. 2006. Dostupné z: <https://adoc.pub/kluzne-vrstvy-a-metody-hodnoceni-adhezivn-kohezivniho-a-trib.html>
- [42] ČSN ISO 4525. *Kovové povlaky - Elektrolytický vyloučené povlaky nikl-chrom na plastech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2004. Třídící znak: 03 8531

- [43] KOPELIOVICH, Dmitri. Adhesion tests. *SubsTech* [online]. [vid. 2023-04-15]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesion_tests#bend_test
- [44] ŠILINGOVÁ, Lucie. *Měření adheze tenkých vrstev*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky.
- [45] Ohybové a torzní zkoušky. *Eurolab* [online]. [vid. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.eurolab.com.tr/cs/testler/elektriksel-guvenlik-testleri/bukme-ve-burma-testi>
- [46] Injection Moulding Surface Finishes: SPI and VDI. *Xometry Europe* [online]. 8. červenec 2021 [vid. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://xometry.eu/en/injection-moulding-surface-finishes-spi-and-vdi/>
- [47] VDI 3400 Mold Texture and Drafting Angle. *Ecomolding* [online]. 23. listopad 2019 [vid. 2023-04-18]. Dostupné z: <https://www.ecomolding.com/vdi-3400-texture/>
- [48] BARTKOWIAK, Tomasz, Michał MENDAK, Krzysztof MROZEK a Michał WIECZOROWSKI. Analysis of Surface Microgeometry Created by Electric Discharge Machining. *Materials* [online]. 2020, 13(17), 3830. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13173830
- [49] DRMELA, Radim. *Aplikace elektroerozivního obrábění v kombinaci s frézováním* [online]. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/444400644.pdf>
- [50] *Technický list HP-PA12* [online]. [vid. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://cimquest-inc.com/resource-center/HP/Materials/HP-PA12-Datasheet.pdf>
- [51] *Technický list Prusa Tough Resin* [online]. [vid. 2023-05-15]. Dostupné z: https://prusament.com/media/2021/09/prusament_resin_tough_TDS_EN.pdf
- [52] *Technický list High Temp V1* [online]. [vid. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://assets.ctfassets.net/q2hzhfkp3j57e/b9100a8dcfe0113261806fc7bc50bee6a19438439426bad36647053ebf72813b/9646c4639a274337d9db4c847155d610/datasheets-formlabs-high-temp-resin.pdf>
- [53] The Freedom to Create. *Blender* [online]. [vid. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://www.blender.org/about/>
- [54] Technical Specifications for the Form 2. *Formlabs* [online]. [vid. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/tech-specs/>
- [55] PRŮŠA, Josef. Představujeme Original Prusa SL1 - novou open-source SLA 3D tiskárnu. *Josef Průša - 3D tisk a tiskárny* [online]. 25. září 2018 [vid. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/original-prusa-sl1-nova-sla-3d-tiskarna/>
- [56] Průmyslová 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200. *3Dees* [online]. [vid. 2023-05-27]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d#196>

- [57] ČSN EN ISO 1110. Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1997. Třídící znak: 64 3607
- [58] ČSN 03 8530 - Ochrana proti korozi. Elektrolytické pokovování v Hullově vaničce. Metoda zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1992. Třídící znak: 03 8530
- [59] PAJR, Aleš. *Optimalizace procesu vakuového tvarování pro zlepšení kvality galvanického pokovení plastového dílu z ABS*. Liberec, 2020. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- [60] ČSN EN ISO 178. Plasty - Stanovení ohybových vlastností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011. Třídící znak: 64 0607

Seznam příloh

Příloha P1: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu High Temp V1	91
Příloha P2: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu Prusa Tough Resin	92
Příloha P3: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu PA 12	94

Příloha P1: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu High Temp V1

Technologie SLA/materiál High Temp V1 (Sub – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_1	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	3,90	9,85	9,1	2,3	108	3409
2.	3,87	9,81	8,6	2,7	85,7	2957
3.	3,87	9,86	8,9	2,7	92,6	3067
4.	3,87	9,85	9,1	2,7	113,8	3182
5.	3,86	9,88	8,9	2,7	90,7	3067
6.	3,90	9,84	9,3	2,7	104,9	3297
7.	3,87	9,84	8,6	2,7	87,3	2957
x	3,88	9,85	8,9	2,7	97,6	3133
s	0,02	0,02	0,3	0,2	11,1	171

Technologie SLA/materiál High Temp V1 (Sub//Cu/Ni – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_1	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	3,96	10,01	21,6	2,2	139,3	9684
2.	3,94	9,99	27,0	6,0	142,7	10500
3.	3,94	10,01	24,8	4,1	154,7	10365
4.	3,93	10,02	27,6	5,5	151,5	11095
5.	3,95	9,98	26,9	5,5	156,1	10730
6.	3,94	9,99	25,5	5,1	134,0	10180
7.	3,95	9,99	26,9	5,5	158,2	10730
x	3,94	10,00	25,8	4,8	148,1	10469
s	0,01	0,01	2,1	1,3	9,4	455

Technologie SLA/materiál High Temp V1 (Sub//Cu/Ni – E-d0,5-1)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_1	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,02	10,09	31,6	6,9	154,0	12365
2.	4,03	10,12	30,9	6,2	149,8	12365
3.	4,05	10,11	32,4	6,6	118,7	12905
4.	4,01	10,12	32,4	6,6	175,1	12920
5.	4,04	10,09	32,1	6,2	147,6	12955
6.	4,03	10,12	32,0	6,2	148,1	12920
7.	4,04	10,13	32,0	6,6	166,5	12725
x	4,03	10,11	31,9	6,4	151,4	12736
s	0,01	0,02	0,5	0,3	17,8	264

Technologie SLA/materiál High Temp V1 (Sub//Cu/Ni – E-d1-1)						
Vzorek	a	b	σ_f	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,11	10,12	17,6	4,7	93,8	6457
2.	4,15	10,19	18,0	4,2	65,0	6909
3.	4,16	10,11	19,1	4,9	63,7	7091
4.	4,17	10,12	18,9	4,5	72,3	7183
5.	4,16	10,11	18,9	4,7	73,2	7092
6.	4,12	10,11	17,8	4,4	66,1	6728
7.	4,17	10,15	16,9	4,2	76,3	6364
x	4,15	10,13	18,2	4,5	72,9	6832
s	0,02	0,03	0,8	0,3	10,3	325

Technologie SLA/materiál High Temp V1 (Sub//Cu/Ni – K-d2-1)						
Vzorek	a	b	σ_f	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,14	10,11	9,4	2,5	52,5	3478
2.	4,15	10,10	9,7	2,7	55,9	3477
3.	4,10	10,11	10,8	3,3	46,2	3749
4.	4,17	10,09	9,8	2,9	47,82	3480
5.	4,15	10,07	9,4	2,9	54,1	3273
6.	4,16	10,09	10,2	3,0	51,3	3609
7.	4,10	10,07	10,5	2,7	46,96	3887
x	4,14	10,09	10,0	2,8	50,7	3564
s	0,03	0,02	0,5	0,3	3,8	203

Příloha P2: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu Prusa Tough Resin

Technologie MSLA/materiál Prusa Tough Resin (Sub – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_f	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,08	9,99	7,0	2,3	76,5	2327
2.	4,07	10,01	6,8	2,3	72,9	2257
3.	4,09	9,99	5,8	2,2	59,0	1819
4.	4,06	9,99	7,4	2,5	75,3	2474
5.	4,06	10,00	7,4	2,3	72,0	2547
6.	4,08	9,99	7,9	2,5	80,2	2689
7.	4,07	10,00	7,3	2,2	62,9	2544
x	4,07	10,00	7,1	2,3	71,3	2379
s	0,01	0,01	0,6	0,1	7,6	286

Technologie MSLA/materiál Prusa Tough Resin (Sub//Cu/Ni – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,19	10,17	20,2	4,8	65,9	7704
2.	4,18	10,18	15,4	4,2	52,3	5592
3.	4,20	10,19	16,8	4,4	57,8	6203
4.	4,17	10,20	14,3	4,6	73,9	4842
5.	4,20	10,18	18,0	4,2	84,9	6887
6.	4,20	10,20	17,1	4,4	51,9	6363
7.	4,17	10,17	17,6	4,5	67,4	6548
x	4,19	10,18	17,1	4,4	64,9	6305
s	0,01	0,01	1,9	0,2	12,0	914

Technologie MSLA/materiál Prusa Tough Resin (Sub//Cu/Ni – C-d0,5-1)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,16	10,17	12,4	2,9	86,8	4726
2.	4,14	10,17	10,4	3,1	57,2	3635
3.	4,16	10,18	7,6	1,1	63,0	3275
4.	4,17	10,19	11,8	3,1	74,3	4365
5.	4,18	10,19	10,9	3,1	62,3	3910
6.	4,19	10,17	12,2	3,3	78,1	4454
7.	4,19	10,20	10,2	2,9	63,5	3636
x	4,17	10,18	10,8	2,8	69,3	4000
s	0,02	0,01	1,6	0,8	10,6	527

Technologie MSLA/materiál Prusa Tough Resin (Sub//Cu/Ni – E-d1-1)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_{f1}	σ_{fM}	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,19	10,19	7,0	2,6	31,9	2213
2.	4,21	10,21	7,4	2,4	36,0	2510
3.	4,21	10,22	6,9	2,3	35,1	2343
4.	4,22	10,24	6,8	2,3	31,5	2217
5.	4,24	10,23	7,1	2,3	32,7	2402
6.	4,22	10,22	7,2	2,0	35,7	2593
7.	4,23	10,24	7,4	2,5	40,4	2474
x	4,22	10,22	7,1	2,3	34,8	2393
s	0,02	0,02	0,2	0,2	3,1	145

Technologie MSLA/materiál Prusa Tough Resin (Sub//Cu/Ni – E-d1-1)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_1	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,25	10,29	5,9	2,1	26,0	1891
2.	4,28	10,34	6,4	2,2	33,0	2114
3.	4,28	10,33	5,5	2,0	26,0	1747
4.	4,30	10,31	6,4	2,1	29,5	2146
5.	4,30	10,32	6,7	2,3	28,5	2218
6.	4,30	10,31	6,8	2,0	32,6	2402
7.	4,29	10,29	6,3	2,1	20,5	2111
x	4,29	10,31	6,3	2,1	28,0	2090
s	0,02	0,02	0,5	0,1	4,3	214

Příloha P3: Naměřené ohybové vlastnosti struktur z materiálu PA 12

Technologie MJF/materiál PA 12 (Sub – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_1	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	3,90	10,03	4,4	1,9	49,9	1228
2.	3,97	10,02	4,4	2,0	50,9	1160
3.	3,97	10,05	4,4	1,9	52,4	1228
4.	3,89	9,98	4,4	2,0	51,6	1160
5.	3,91	10,02	4,5	1,9	49,7	1296
6.	3,97	10,04	4,4	1,9	49,2	1228
7.	3,98	10,10	4,5	2,0	50,3	1228
x	3,94	10,03	3,8	1,7	50,6	1218
s	0,04	0,04	0,1	0,1	1,1	47

Technologie MJF/materiál PA 12 (Sub//Cu/Ni – bez textury)						
Vzorek	a	b	σ_2	σ_n	σ_M	E_f
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1.	4,05	10,37	11,5	3,1	62,5	4157
2.	4,18	10,39	19,0	7,5	64,9	5725
3.	4,11	10,34	15,6	3,8	62,5	5866
4.	4,12	10,32	10,9	1,9	64,7	4506
5.	4,12	10,40	15,6	3,1	64	6222
6.	4,18	10,45	16,9	5,5	63	5730
7.	4,02	10,30	14,2	3,8	61,4	5181
x	4,11	10,37	14,8	4,1	63,3	5341
s	0,06	0,05	2,9	1,8	1,3	761