

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti implementace aditivních technologií ve slévárně drobných
odlitků

Autor: **Bc. Filip Votava**

Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín KRÍŽ, IWE**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip VOTAVA**
Osobní číslo: **S18N0081P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Možnosti implementace aditivních technologií ve slévárně drobných odlitků**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Analýza současného stavu procesů ve slévárně drobných odlitků
2. Používané technologie a materiály
3. Aditivní technologie a jejich možnosti aplikace ve slévárně
4. Vhodné materiály a možnosti jejich zpracování
5. Experimentální část
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

SOPČAK, J. *HANDBOOK OF LOST WAX OR INVESTMENT CASTING*. PICO RIVERA, CA: GEM GUIDES BOOK CO. ISBN 0-935182-28-4

GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Second edition. London: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.

COLLINI, L. *COPPER ALLOYS*. RIJEKA: INTECH. ISBN 978-953-51-0160-4

SPITTEL, T., SPITTEL, M. AND WARLIMONT, H. (N.D.). *NON-FERROUS ALLOYS – HEAVY METALS*. ISBN 978-3-642-14173-7

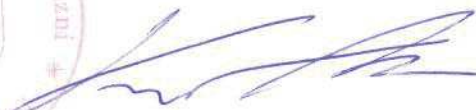
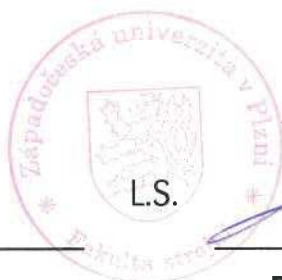
Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. David Bricín**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří přispěli k úspěšnému dokončení této diplomové práce. Díky patří všem, kteří mi ochotně pomohli s vytvořením modelů na odlišných AM zařízeních, dále těm, kteří mi poskytnuli naměřená data, rady, názory, připomínky aj. Velký dík patří zejména Ing. Davidu Bricínovi za vřelé jednání, okamžité řešení problémů a v neposlední řadě za jednání s třetí stranou. Nakonec bych rád poděkoval Katedře materiálů a strojírenské metalurgie za poskytnutí prostředků a použití přístrojů pro řešení experimentální části diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Votava	Jméno Filip	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti implementace aditivních technologií ve slévárně drobných odlitků		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	88	TEXTOVÁ ČÁST	69	GRAFICKÁ ČÁST	19
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Tato práce je zaměřena na možnosti implementace aditivních technologií do procesu slévárny, kde je používána technologie vytavitelného modelu.</p> <p>Cílem práce je určení optimální aditivní technologie pro vytvoření vytavitelného modelu. Tento cíl mimo jiné zahrnuje určení vhodného materiálu a finanční hlediska použitých variant.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Vytavitelný model, aditivní technologie, FDM, SLA, MJM, MJF

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Votava	Name Filip		
FIELD OF STUDY	3911T016 „Material Science and Technology“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Name Antonín		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Possibilities of implemetation of additive manufacturing technologies in the foundry of small castings			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Material Science and Technology	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	88	TEXT PART	69	GRAPHICAL PART	19
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	This thesis is focused on possible implementations of additive manufacturing technologies into the investment casting process.
TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of the work is to determine the optimal additive manufacturing technology for creating a fusible model. This aim also includes identification of appropriate material and financial aspects of used variants.
KEY WORDS	Investment casting, Additive manufacturing, FDM, SLA, MJM, MJF

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	3
Úvod	4
TEORETICKÁ ČÁST.....	5
1 Přesné lití.....	5
1.1 Historie metody vytavitelného modelu	5
2 Technologie vytavitelného modelu.....	7
2.1 Výroba forem na modely.....	8
2.2 Výroba voskových modelů	9
2.3 Sestavení voskových modelů	9
2.4 Výroba keramických forem	9
2.5 Vytavení modelové hmoty	10
2.6 Vypálení keramické skořepiny.....	11
2.7 Odlévání	11
2.8 Dokončovací operace	11
3 Analýza současného stavu procesů ve slévárně drobných odlitků	12
4 Používané materiály ve slévárně.....	21
4.1 Formovací hmoty	21
4.2 Vosky	22
4.3 Sádrový prášek	23
4.4 Kov.....	24
5 Aditivní technologie	24
5.1 Proces tisku	25
5.2 Přehled metod 3D tisku.....	26
5.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)	27
5.2.2 Stereolitografie (SLA)	28
5.2.3 Binder jetting (BJ)	29
5.2.4 Multi-jet modeling (MJM)	30
5.2.5 Laminated object manufacturing (LOM)	31
5.3 Náhrada technologie kovovým tiskem.....	31
5.4 Možnost implementace aditivních technologií do slévárny	33
5.4.1 Přímá metoda (Direct RP method).....	35
5.4.2 Nepřímá metoda (Indirect RP method).....	36
5.4.3 Praskání keramické skořepiny	37
6 Vosk a voskové směsi	39

6.1	Historie a struktura voskových směsí.....	39
6.2	Rozdělení voskových směsí	41
6.2.1	Neplněné vosky	41
6.2.2	Emulgované vosky	41
6.2.3	Plněné vosky.....	41
6.2.4	Ostatní vosky	42
6.3	Vlastnosti voskových směsí a jejich vliv na kvalitu	42
6.4	Voskový tisk.....	43
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST		45
7	Příprava modelů a jejich zpracování	46
8	3D tisk pomocí technologie FDM	48
9	3D tisk pomocí ostatních technologií.....	52
10	Zjišťování obsahu popela	53
11	Hodnocení kvality modelů.....	57
12	Zaformování, vytavení, výpal a odlévání.....	61
13	Odlitky	65
14	Hodnocení kvality odlitků.....	66
14.1	Vizuální hodnocení povrchu odlitků.....	66
14.2	RTG analýza	71
15	Měření drsnosti	72
15.1	Měření drsnosti na vytištěných modelech.....	73
15.2	Měření drsnosti na odlitcích	79
15.3	Srovnání měřených drsností.....	80
16	Ekonomické hledisko použitých variant	82
17	Diskuze výsledků	84
18	Závěr.....	87
Použitá literatura.....		89
Přílohy		95
Data z opticko-skenovacího mikroskopu		95
Data z drsnoměru.....		97
Data z profilometru		112

Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
AM		Additive Manufacturing
	cps	jednotka dynamické viskozity
CAD		Computer Aided Design
FDM		Fused Deposition Modeling
SLA		Stereolitografie
MJM		Multi-Jet Modeling
LOM		Laminted Object Manufacturing
BJ		Binder Jetting
MJF		Multi-Jet Fusion
PLA		kyselina polymléčná
ABS		akrylobutadienstyren
PC		polykarbonát
PET-G		polyethylentereftalát
PVA		polyvinylalkohol
PA 12		polyamid 12
HIPS		high impact polystyrene
Sn		cín
Cu		měď
Si		křemík
Zn		zinek
DPH		daň z přidané hodnoty

Úvod

Cílem této diplomové práce je rozhodnout na základě provedené literární rešerše a provedených experimentů o vhodnosti zavedení aditivních technologií ve slévárně drobných odlitků společnosti AMATI – Denak, s. r. o. (Denak = Dechové nástroje Kraslice). Společnost AMATI – Denak, s. r. o. se zabývá ruční výrobou dechových nástrojů od vstupních materiálů až po kompletně sestavené hudební nástroje. Jedná se o kusovou výrobu, kde každá komponenta daného hudebního nástroje projde řadou operací napříč různými pracovišti, než dosáhne požadovaných vlastností.

První část této diplomové práce je zaměřena na popis technologií přesného lití, zejména pak na technologii odlévání pomocí vytavitelného modelu, která je právě využívána ve společnosti AMATI – Denak, s. r. o. V této části práce je uveden historický vývoj technologie a popsán celý postup výroby odlitku. V další části je na základě poskytnutých informací od společnosti AMATI – Denak, s. r. o. proveden popis a rozbor konkrétních procesů, které jsou ve slévárně používány k výrobě odlitků různých typů klapek pro dechové hudební nástroje. Dále jsou popsány materiály, které jsou používány pro výrobu forem na voskové modely, materiály voskových modelů, sádry pro výrobu forem a slitin pro výrobu odlitků.

Na základě poznatků ze slévárny a provedené literární rešerše bylo možné přistoupit k návrhu možných aditivních technologií, které by se mohly při výrobě klapek uplatnit. Základní popis těchto technologií je uveden v kapitole „Aditivní technologie“, kde je zároveň uvažováno o možnostech implementace v různých etapách výroby odlitku, tj. od možnosti vytisknutí jednotlivých voskových modelů, sestav voskových modelů včetně vtokových soustav, přes tisk keramických forem, až po kompletní náhradu používaného procesu kovovým 3D tiskem.

Aby bylo možné posoudit vliv různých aditivních technologií na kvalitu vytvářených modelů, byly nejprve v rámci experimentální části vytvořeny virtuální modely dvou typů klapek vyráběných ve slévárně. Tyto modely byly následně zpracovány z různých polymerních materiálů vybranými technologiemi 3D tisku. U vytištěných polymerních modelů byla před jejich zaformováním provedena analýza stavu jejich povrchu, a to z hlediska drsnosti a povrchových defektů. Následně byl proveden výpal forem a odlití vybrané slitiny kovu. Na vytvořených odlitcích byly provedeny obdobné analýzy jako u polymerních modelů. Dále pak byla u použitých polymerních materiálů provedena analýza obsahu popelovin, které vznikají při výpalu formy. Na odlitcích byla také provedena metalografická a RTG analýza s cílem určit defekty, které jsou spojené s procesem odlévání. Kromě kvality odlitků bylo při výběru vhodné aditivní technologie přihlédnuto k ekonomické náročnosti výroby polymerních modelů. Na základě všech získaných poznatků z rešeršní části a provedených experimentů, byl proveden výběr nejvhodnější varianty aditivní technologie a její umístění v procesu výroby ve slévárně drobných odlitků společnosti AMATI – Denak, s. r. o.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Přesné lití

Do skupiny přesného lití spadá technologie lití na spalitelný model a technologie lití na vytavitelný model. Podstata přesného lití je v docílení co nejmenších tvarových a rozměrových tolerancí. Diplomová práce je detailně zaměřena na technologii vytavitelného modelu, která je také známá jako metoda ztraceného vosku.

1.1 Historie metody vytavitelného modelu

Metoda ztraceného vosku je lidstvem používána už po dobu přibližně šesti tisíciletí, což z ní dělá jednu z nejstarších technologií vůbec. Mezopotámie byla podle archeologů pravděpodobně první oblastí, kde se tento způsob odlévání praktikoval. Později se znalost tohoto procesu lití rozšířila do celého světa. Mezi nejvýznamnější nález, který je datován přibližně do 11. století našeho letopočtu, patří soška hinduistického boha Šivy (obr. 1). Forem na voskový model bylo nejspíše dosahováno vyřezáváním do kamene, dřeva, či litého bronzu. [1, 2]



Obr. 1: Šiva, bronzová socha o výšce 96 cm [4]

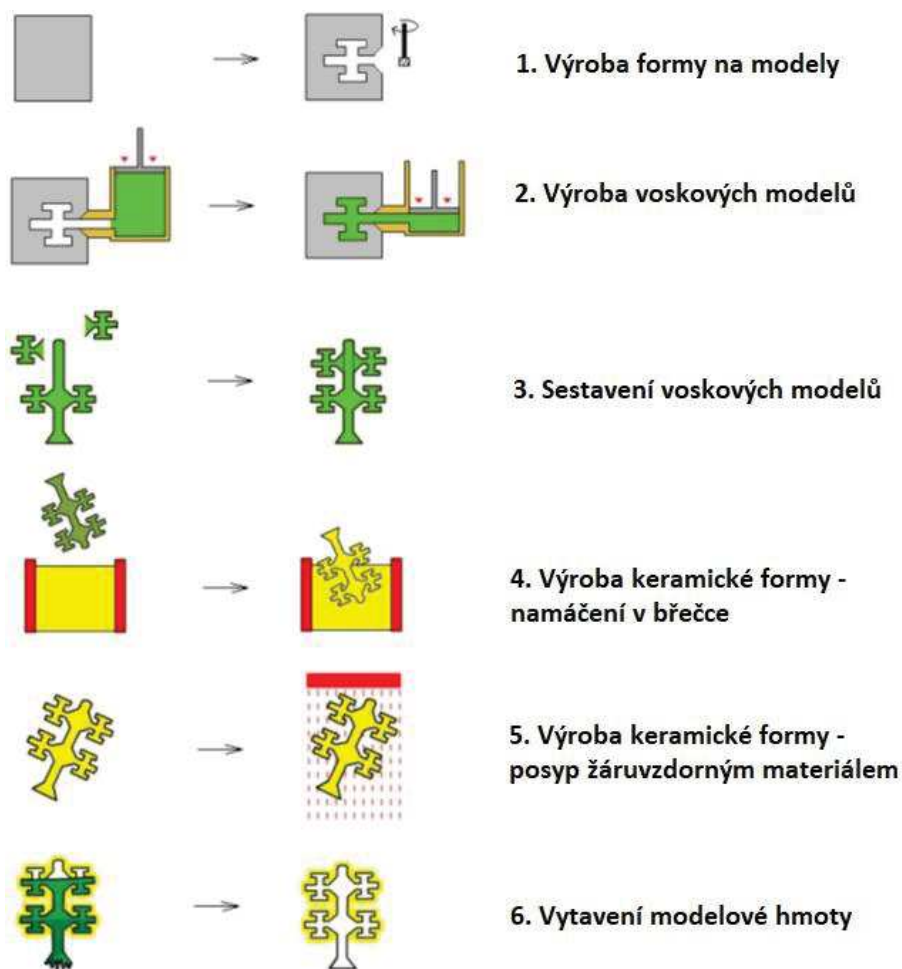
Do konce 19. století se tato metoda používala převážně pro umělecké účely. Na začátku 20. století se začaly vyrábět zlaté falešné zuby. Až s příchodem druhé světové války „byly položeny základy průmyslového lití na vytavitelný model“ a to z důvodu naléhavosti poptávky po částech výzbrojí a součástech do letadel, které byly často tvarově složité, s vysokými nároky na přesnost a potřebnou jakostí povrchu. Vývoj pokračoval přes padesátá léta 20. století, kdy docházelo k rostoucímu počtu možných aplikací a materiálů. V dnešní době má tento způsob přesného lití využití hlavně v leteckém, zbrojním a automobilovém průmyslu, dále pak v lékařství. [1, 2]

2 Technologie vytavitelného modelu

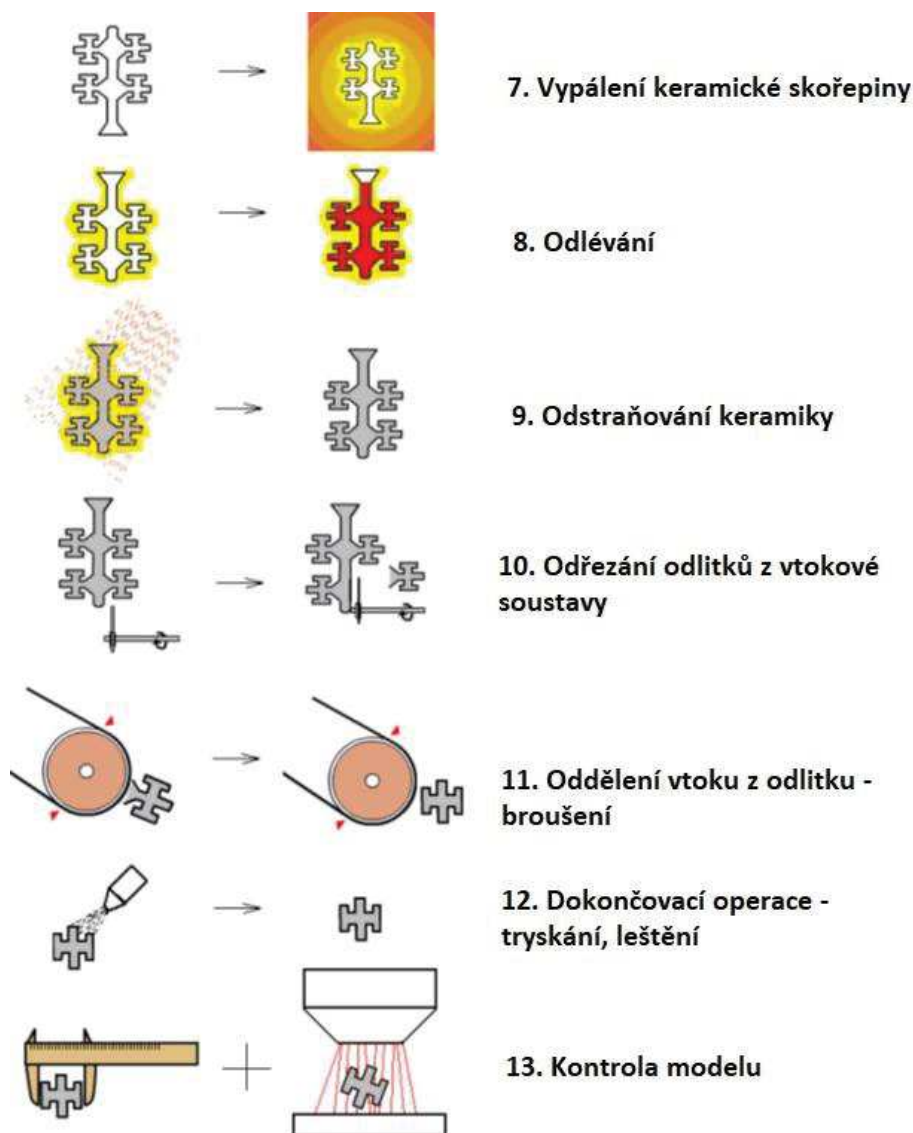
Tímto způsobem výroby se dají zhotovit tvarově složité odlitky s dobrou kvalitou povrchu a malými rozměrovými tolerancemi. V mnoha případech odlitky nemusí projít ani dokončovacími operacemi, protože jejich rozměrová přesnost je dostatečná z hlediska dosažitelnosti velmi úzkých rozměrových tolerancí. [1, 2, 3]

Jedná se o časově náročný, pracný proces, kterým lze vytvářet složité komponenty s vysokou přidanou hodnotou pro řadu specializovaných průmyslových odvětví v širokém spektru slitin. [5]

Jedná se o technologii skládající se z několika kroků (viz obr. 2 a 3), které jsou detailně popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 2: Schéma technologického postupu – 1. část [3]



Obr. 3: Schéma technologického postupu – 2. část [3]

2.1 Výroba forem na modely

Již první krok – výroba formy ke zhotovení modelů – má zásadní vliv na výslednou kvalitu odlitku, jak po stránce jakosti povrchu, tak i přesnosti. Čím kvalitněji a přesněji bude forma udělána, tím bude finální odlitek potřebovat méně dokončovacích operací, resp. dokončovací operace nebudou muset být prováděny vůbec.

Formy jsou vyráběny v závislosti na hromadnosti výroby, koncovém použití odlitku a v neposlední řadě na požadavcích na kvalitu odlitku. Formy lze rozdělit např. podle typu konstrukce: pro jeden či více modelů; podle použití: pro vlastní model nebo vtokovou soustavu; podle materiálu formy: ocelové, formy z nízkotavitelných slitin, z plastických hmot, sádry či kaučuku. Další dělení je podle způsobu výroby forem: formy vyrobené obráběním (jsou ideální pro velkosériovou výrobu díky jejich dlouhé životnosti a dosahování velké přesnosti);

formy odlité (např. forma, která je vyrobena zalitím matečného modelu slitinou, dentakrylem, epoxidovou pryskyřicí nebo sádrou) – na rozdíl od obráběných mají kratší životnost, konkrétně sádrová forma se používá jen pro modely bez nároků na rozměrovou přesnost a její životnost je minimální; formy vyráběné galvanoplasticky (vyrábí se jako kovové skořepiny); formy vyráběné metalizací (pro modely se složitými dělicími rovinami, kde jsou na mateční model nanášeny roztavené částice kovu (často zinek) pomocí metalizační pistole. Následná forma se vyznačuje dlouhou životností). [1, 2, 3]

2.2 Výroba voskových modelů

Voskové modely jsou zhotovovány z voskových směsí lišících se bodem tavení, tvrdostí, viskozitou a smršťováním. Voskové materiály jsou podrobněji popsány v kapitole 6.

Před výrobou voskového modelu je forma na model složena. Voskový model může být vytvořen gravitačním litím voskové směsi. To je používáno zejména pro vytvoření jednodušších modelů, např. vtokový kůl a kanály. Druhou možností je vstřikováním voskové směsi do formy. Tento způsob je prováděn na vstřikovacích lisech pod určitým tlakem. Použitý tlak ke vstřikování závisí na teplotě vosku, při které je vosk vstřikován. Běžně jsou vstřikovány voskové směsi nad teplotou likvidu, případně lehce pod teplotou likvidu za zvýšeného tlaku (do 1 MPa). Další možností vstřikování je za vyššího tlaku (do 5 MPa), kdy se vosková směs nachází v tzv. těstovitém (tuhém) stavu. [1, 2, 3]

Použitý vstřikovací tlak musí být dostatečně velký, aby došlo k zaplnění celého objemu formy. Také doba výdrže na tomto tlaku musí být taková, aby byla zajištěna kvalita povrchu voskového modelu a došlo k zatuhnutí. [1, 2, 3]

2.3 Sestavení voskových modelů

V mnoha případech se vytvořené modely sestavují a vytvářejí tzv. stromeček. Připojení probíhá pomocí pájení či lepení jednotlivých modelů k vtokové soustavě. Vtoková soustava může být vyrobena z regenerovaného vosku, jelikož zde nejsou prakticky žádné nároky na rozměrovou přesnost. Modely by měly být připojeny ke stromečku tak, aby se jich na vtokový kůl vešlo co nejvíce, ale zároveň aby mezi nimi byly dostatečné mezery na obalovou hmotu (v dalším kroku). Také by měly být umístěny tak, aby při vytavování vosku veškerý materiál vytekl (další krok). [1, 2, 3]

2.4 Výroba keramických forem

Poté, co je stromeček kompletní, je ponořen do obalové keramické břečky. Ta se skládá z plniva a pojiva. Jako plniva jsou nejčastěji používány žáruvzdorné materiály. Mezi hlavní zástupce patří Al_2O_3 – oxid hlinitý, ZrO_2 – oxid zirkoničitý, mulit, silimanit a molochit (což je mulit ve sklovité obálce amorfního

oxidu křemičitého – SiO₂). Nejdůležitějšími vlastnostmi této směsi jsou: tepelná roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost vůči odlévanému kovu. Pojiva jsou neméně důležitou součástí. Po vypálení formy musí zaručit dostatečnou pevnost, nesmí snižovat žáruvzdornost formy a také musí být netečné ke svému okolí. Zde jsou nejčastěji používány koloidní roztoky SiO₂ – oxidu křemičitého. [1, 2, 3]

Ponoření do keramické břechky může být doprovázeno manipulací (otáčení, naklánění) se stromečkem, aby se obalový materiál dostal na všechna místa a jeho vrstva byla rovnoměrná. Po vymoření se nechá lehce odkapat. V dalším kroku je nanášeno ostřívo fluidním posypem žáruvzdorného materiálu o vhodné zrnitosti. Na první dvě vrstvy formy je používáno ostřívo s jemnější zrnitostí (většinou 0,1 až 0,25 mm), aby měla výsledná forma co nejlepší rozměrovou přesnost a co nejmenší drsnost povrchu. Na další vrstvy jsou běžně používána ostřiva o zrnitosti do 0,5 mm. Poté dochází k sušení obalu za stanovené teploty, proudění a vlhkosti. Tento proces je opakován, dokud forma nedosáhne požadované tloušťky. Obvykle je proces opakován 5x až 15x. [1, 2, 3]

Moderní metody jsou založeny na chemickém vytvrzování obalů. Zde se používají alkalicky reagující látky – nejčastěji čpavek. Ten zkrátí čas tuhnutí, ale následně musí být z obalu odstraněn působením proudu vzduchu kvůli své toxicitě. [1, 2, 3]

Mezi zásadní požadavky na keramickou skořepinu patří:

- dostatečná pevnost nevypálené formy, která odolá vytavení vosku, aniž by došlo k porušení;
- dostatečná pevnost vypálené skořepiny, aby odolala hmotnosti litého kovu;
- vysoká odolnost proti teplotním změnám, aby se zabránilo praskání během lití kovu;
- vysoká chemická stabilita;
- nízká reaktivita s odlévaným kovem;
- nízká teplotní roztažnost, aby byly změny rozměrů co nejmenší. [5]

2.5 Vytavení modelové hmoty

Když je keramická forma hotová a dokonale vysušená, přechází se ke kroku vytavování voskové hmoty z formy. U tohoto kroku je možné detekovat případné trhliny v keramické formě, protože roztavený vosk by obarvil vnější stranu formy. Samotné vytavení lze provést několika způsoby, nicméně je nutné brát v potaz, že je významný rozdíl v tepelné roztažnosti keramického materiálu a vosku. Pokud by v peci měl být pouze vytaven vosk běžně s teplotou tání do 100 °C, tak by došlo k popraskání křehké keramické formy. Proto jsou používány následující způsoby:

První možností je vytavování za vysoké teploty. Tento způsob spočívá ve vytavování modelové hmoty (na bázi plastu – většinou polystyren) a zároveň ve vypalování skořepinové formy, která tímto získává požadované vlastnosti. Celý proces probíhá při teplotách vyšších než 1000 °C.

Další variantou a zároveň nejčastěji používanou je vytavování v autoklávu (známé také jako „Boilerclave“). Jedná se o plně automatizovaný proces, kde působí pára na formu a dochází k vytavení vosku do sběrné vany. V těchto zařízeních působí tlaky 0,5 až 1 MPa a teploty 160 až 180 °C. Vytavený vosk může být po provedení regenerace dále používán.

Méně používané metody vytavování jsou: dielektrickým ohřevem, rozpouštěním (pro vosky rozpustné ve vodě), nebo horkým vzduchem vedeným přímo na vtok modelu. [1, 2, 3]

2.6 Vypálení keramické skořepiny

Vypalování formy se provádí v plynových nebo elektrických pecích běžně za teplot v rozsahu 950 až 1100 °C, pro slitiny s bodem tavení kolem 850 °C a výjimečně i při teplotě 1500 °C (tím se docílí při odlévání usměrněného tuhnutí kovu). K výpalu skořepiny dochází ze tří hlavních důvodů:

Prvním důvodem je úplné spálení zbytků voskové směsi a odstranění těkavých látek. Toho je možné docílit pouze tehdy, když jsou voskové směsi vysoké jakosti a neobsahují více než 0,1 % zbytkového popela.

Dalším velmi důležitým bodem je, aby skořepina po vypálení dosahovala potřebné pevnosti. To je zapříčiněno přeměnou amorfního oxidu křemičitého (SiO₂) na krystalický.

Poslední bod se vztahuje k následujícímu procesu odlévání daného kovu. A to tak, že vypálení skořepiny zároveň slouží k předehřátí formy před litím na stanovenou teplotu. [1, 2, 3]

2.7 Odlévání

Jak již bylo výše naznačeno, odlévání se ve většině případů provádí bezprostředně po vytažení z vypalovací pece do předehřáté skořepiny. Tím se omezí vznik vnitřních pnutí, sníží se teplotní šok při lití a zároveň se tím předchází vzniku prasklin na skořepinách. Odlévání může být prováděno na vzduchu (otevřené lití), nebo ve vakuu (vakuové lití). [1, 2, 3]

2.8 Dokončovací operace

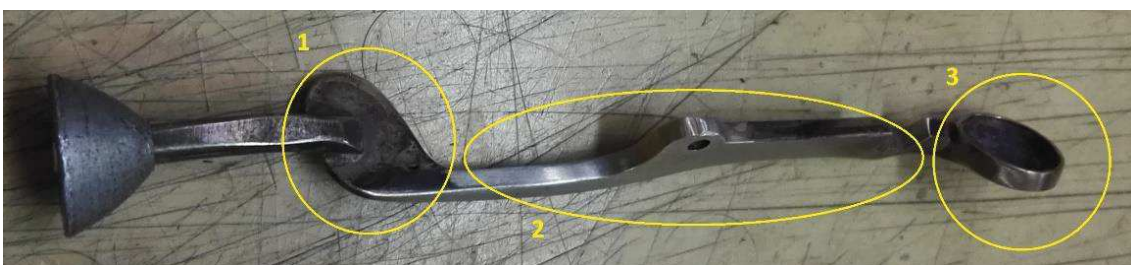
Jedná se o časově nejnáročnější proces v technologii vytavitelného modelu. Ten se typicky skládá z následujících kroků:

- Mechanické odstranění většiny keramické skořepiny – je prováděno vibračními kladivy (hlučné a prašné), sofistikovaným systémem elektrického výboje (bezprašný, ale hlučný a velmi drahý), nebo vodním paprskem.
- Odřezání odlitků od vtokové soustavy (příp. stromečku) – v závislosti na velikosti a dostupnosti. Je možné odřezat ruční nebo kotoučovou pilou.
- Mechanické a/nebo chemické odstranění zbylé keramiky.
- Odřezání vtokového kanálu od modelu.
- Odstranění výstupků z odlitku.
- Konečná úprava (tryskání, broušení, dokončování, aj.), případné tepelné zpracování odlitků. [1, 2, 3]

3 Analýza současného stavu procesů ve slévárně drobných odlitků

V této části práce je zanalyzován současný stav procesů ve slévárně AMATI, kde jsou odlévány bronzové klapky pro různé hudební nástroje. Slévárna disponuje archivem s konkrétními formami na výrobu voskových modelů. V tomto archivu je uloženo přes 600 forem, přičemž některé formy se mohou lišit jen minimálně.

Výroba matečného modelu klapky trvá v rozmezí 3 až 8 hodin, v závislosti na její tvarové složitosti. Nejsložitější klapky mohou být spojeny ze tří částí (viz obr. 4) – první část je odlitá (1), druhá část frézovaná (2) a poslední část je soustružená (3). Takto vyrobené části klapky musí být následně spájeny a klapka musí být co nejpřesněji dokončena, jelikož bude sloužit k výrobě formy na modely.



Obr. 4: Zkušebně odlitý matečný model

Po vytvoření dokonalého matečného modelu, který obsahuje i vtokovou soustavu (viz obr. 4), je model vložen do lepkavé plastické hmoty, kde je zaformován. Tyto hmoty a jejich vlastnosti jsou podrobněji popsány v kapitole 4.1. Samotné zaformování trvá přibližně 10 minut, poté je nutné celou formu zalisovat a provést zapečení. K tomu slouží duplexní gumový vulkanizér. Vulkanizace se provádí při teplotě 120 °C po dobu 1 hodiny (pro silikonovou modrou pryž; v případě žluté pryže byla teplota vulkanizace 152 °C). Po zchlazení formy je přebytečný materiál odřezán a je proveden řez, aby vznikla dělící rovina a matečný model mohl být vyndán z formy. Vyřezání z formy trvá 10 až

20 minut v závislosti na tvaru klapky. Po vyndání matečného modelu je forma opět složena, dokonale do sebe zapadá a dutina perfektně kopíruje požadované tvary.

Na obr. 5 a 6 jsou dva typy rozložených forem na modely. Žlutá hmota se používala dříve, modrá se používá do současnosti. Životnost těchto forem v kusové výrobě je řádově v desítkách let. Na obr. 6 je vidět, že ve formě je vložen kus tuhy (jádro), aby se při vytvoření voskového modelu udělal průchozí otvor na požadovaném místě klapky.

Při lisování a zapečení formy je zároveň na její povrch vytvořena matrice s malými otvory. Do těchto otvorů se následně vloží malé špunty, které dále nesou informaci pro vstřikování vosku.



Obr. 5: Žlutá forma na modely



Obr. 6: Modrá forma na modely s vloženým jádrem (tuhou)

Ještě před složením formy dochází k jejímu vymazání velmi jemným bílým práškem (máskem) v oblasti vstřikování vosku. Vymazání je provedeno za účelem vyhlazení povrchu a k snadnějšímu vyjmutí voskového modelu z formy. Po složení vymazané formy je prováděno vstřikování vosku pomocí vstřikovacího lisu viz obr. 7.

Na obr. 7 jsou zároveň vidět formy na model s otvory, přičemž v některých otvorech jsou již zmiňované špunty. Tyto špunty nesou informaci kódování, která zahrnuje vstřikovací čas vosku (v sekundách), vstřikovací tlak vosku (v barech) a přítlak rámu (v barech). Pro ilustraci, pro žlutou formu na obr. 5 byly použity následující hodnoty: vstřikovací čas vosku: 8 s, vstřikovací tlak vosku: 0,75 bar a přítlak rámu: 2,5 bar. Celý proces vstřikování včetně manipulace trvá asi 30 sekund, s tuhnutím vosku ve formě přibližně 1 minutu pro jeden model. Po ztuhnutí je forma otevřena, model vyndán, forma případně vymazána mastkem a celý proces se opakuje.

Veškeré hodnoty jsou nastavovány v závislosti na používaném voskovém materiálu. Teplota se volí v závislosti na stavu, v jakém se bude vosk vstřikovat (stav tekutý, polotekutý, poloplastický nebo plastický).



Obr. 7: Vstřikovací lis Ecotherm a formy s kódováním

Po vytvoření požadovaného počtu voskových modelů (obr. 8) jsou jednotlivé klapky připojovány na vtokový kanál pájením. Tímto se vytvoří tzv. stromeček. Vtokový kanál bývá částečně z regenerovaného vosku (ze zbylého vosku po vytavení a ze zmetků vzniklých na vstřikovacím lisu) a je umístěn na gumovém podstavci. Vytvoření celého stromečku trvá v závislosti na počtu pájených modelů, obecně 5 až 15 minut – různé typy stromečků jsou na obr. 9. Pájení probíhá tak, aby všechny modely byly vůči vtokovému kanálu pod stejným úhlem, aby se na jeden stromeček vešla celá série,

případně co nejvíce modelů. Jelikož se ve slévárně používá převážně jeden typ bronzu, je zde možnost kombinovat různé typy klapek na jeden vtokový kanál.



Obr. 8: Různé typy voskových modelů klapek



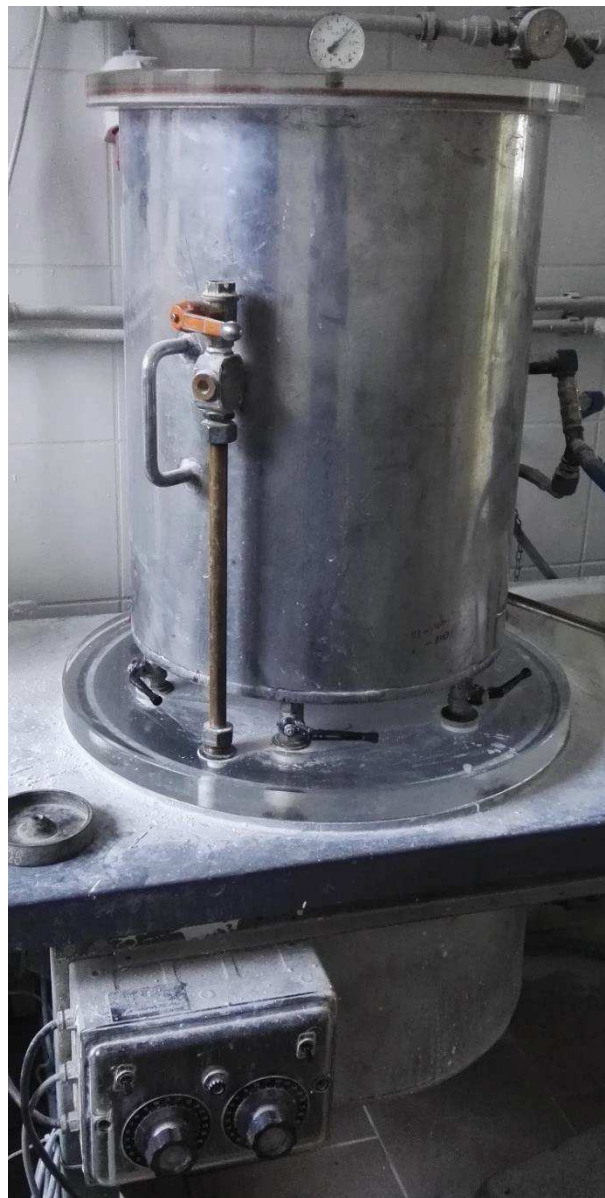
Obr. 9: Série voskových stromečků

Když je stromeček kompletní, zváží se celá sestava (gumový podstavec a voskový stromeček) a samotný gumový podstavec. Rozdíl těchto dvou hodnot uvádí hodnotu použitého vosku a na základě empirických znalostí se vypočte hmotnost potřebné kovové vsázky do pece. Konkrétní příklad pro jeden ze stromečků: váha vosku: 30 g; váha potřebného kovu = $30 * 8,6 + 50 = 308$ g. Po zvážení se celá sestava složí s kyvetou, která je následně obalena voskovým papírem jištěným gumami, zobrazena na obr. 10. Vážení i s následnou instalací kyvety trvá 4 minuty. Tímto krokem je voskový stromeček připraven k zaformování.



Obr. 10: Připravená kyveta k zaformování

V dalším kroku je nutná příprava směsi, ze které se vytvoří konečná forma k odlévání kovu. Proces výroby formy probíhá v sádrovacím zařízení (na snímku 11), kam je do spodní nádoby umístěno max. 6 kyvet, nádoba je následně hermeticky uzavřena a je vytvořen podtlak. Z horní části sádrovacího zařízení vede právě 6 výtoků do spodní nádoby, které jsou prozatím uzavřeny. Do spodní části horní nádoby je nalita voda, která je pomocí lopatek neustále promíchávána. Voda by měla mít ideálně teplotu v rozsahu 21 až 24 °C. (Při nižších teplotách by proces trval déle, naopak při vyšších by byl urychlován.) Nad vodu je vložena vnitřní nádoba s malými otvory a do této nádoby vsypán speciální sádrový prášek – v této nádobě se také nachází lopatky a směs prášku je neustále promíchávána. Díky malým otvorům a neustálému míchání se docílí vytvoření směsi, která je již ve spodní části horní nádoby. Směs je v poměru 2,5:1 vůči vodě. V tuto chvíli se spustí vibrace spodní nádoby, ve které se nachází kyvety a dojde k otevření výtoků. Díky podtlaku směs dobře proudí do kyvet a díky vibracím se minimalizuje obsah bublin ve směsi. Proces přípravy směsi (navážení, promísení), vložení kyvet, odlití a tuhnutí trvá 1 hodinu. Samotné tuhnutí směsi trvá přibližně 30 min. Po tomto kroku jsou z kyvet odstraněny voskové papíry, které zde byly pouze z důvodu nevytečení formovací směsi.



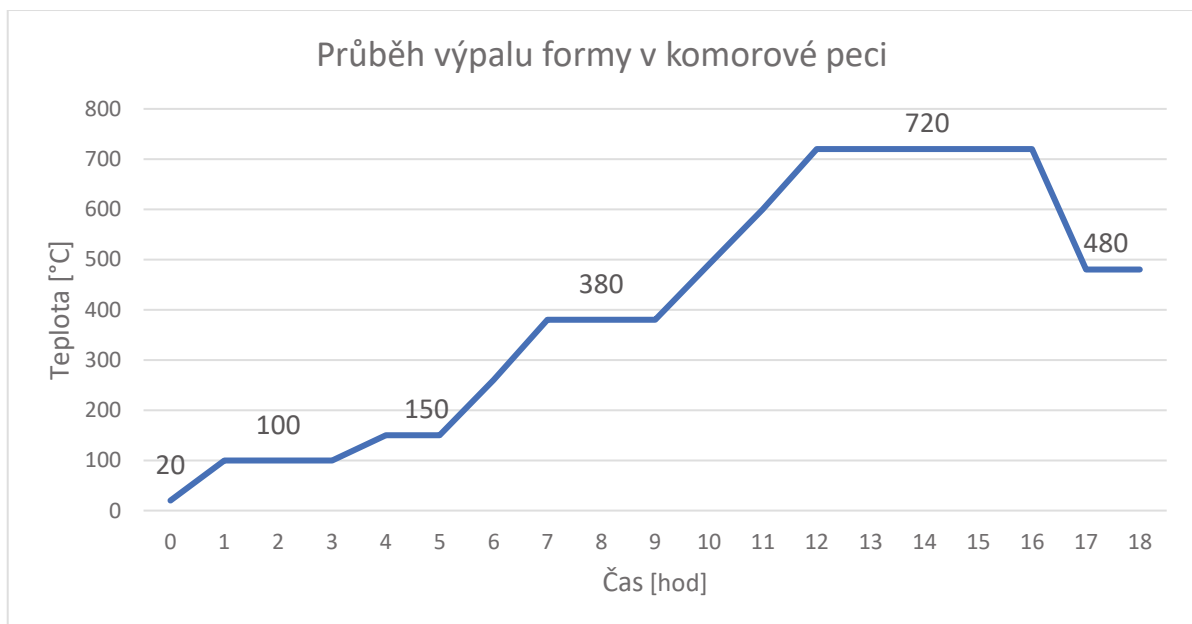
Obr. 11: Sádrovací zařízení

Další operací je vytavení voskového materiálu ze sádrové formy. Jedná se o proces, který vytaví voskový materiál, vysuší sádrovou formu a tím zvýší její pevnost. Ve slévárně jsou používány dvě komorové pece (na snímku 12) – vlevo: pec, kde je teplota řízená vačkovým mechanismem, vpravo: pec, kde je teplota řízena elektronicky. V šuplíkách pod pracovní komorou se nachází vytavený vosk. Zajímavostí je, že ačkoliv průběh výpalu je u obou pecí stejný, tak u starší pece, kde je teplota řízena vačkovým mechanismem, je vyšší podíl zbytkového (vytaveného) vosku, resp. u druhé pece je více spalin.

V grafu 1 je zobrazen přibližný průběh teplot v závislosti na čase při výpalu v komorových pecích. Doba výpalu je přibližně 18 hodin. Většinou se výpal provádí přes noc, zapnutí pecí probíhá v odpoledních hodinách a druhý den se v dopoledních hodinách odlévá. Z teploty 480 °C se forma vyndá z pece a odlévá se do ní kov.



Obr. 12: Komorové pece



Graf 1: Průběh teplot v závislosti na čase při výpalu v komorové peci

Ohřevy kyvet se sádrovými formami jsou doporučeny na přibližně 5 °C za minutu. Při teplotě 100 až 150 °C začíná proces vypařování vody a vosk začíná být vytavován. Při dalším ohřevu na 380 °C dochází k vytavování uvězněného vosku z formy. Při nejvyšších teplotách, tj. 720 °C, dochází ke kompletnímu vytavení vosku a vypálení formy, při kterém získá požadovanou pevnost. Po výdrži na této teplotě se opět zredukuje teplota

na již zmíněných 480 °C a do kyvety je následně provedeno odlévání roztaveného kovu. [6]

Již před ukončením průběhu vypalování je připravováno tavení kovu. Tavení probíhá v zařízení Indutherm VC 500, které je na snímku 13. Jedná se o stacionární indukční vakuovou tavící a licí pec. Jedná se o pec s maximálním výkonem 10 kW a max. dosažitelnou teplotou 1600 °C. [7]



Obr. 13: Indukční vakuová pec Indutherm VC 500

Do horní části, kde probíhá tavení materiálu, je vložen grafitový kelímek a zapnut ohřev na požadovanou teplotu – 1050 °C. Po vyhřátí pece na tuto teplotu, se vloží vsázka ve formě granulátu. Po jejím roztavení se v horní komoře vyvolá přetlak dusíku (až 1 bar), který bude chránit taveninu při odlévání. Mezitím je do spodní části vložena kyveta (z vypalovací pece o teplotě 480 °C) a po uzavření spodní části je naopak vyvolán podtlak až 12 bar. Poté dochází k lití při teplotě 1050 °C, jedná se o gravitační lití v prostředí vakua. Díky vakuu a přetlaku dochází k výbornému plnění formy. Po odlití je vložen další granulát k natavení a celý proces se opakuje pro další kyvetu. Čas k natavení granulovaného materiálu je 10 minut. Mezitím, co se v horní části taví materiál, je ze



Obr. 15: Bronzové odlitky klapek (stav po slévárně)

Každý typ klapky má v dílně list, ve kterém je popsán postup a úprava odlitků. Jedná se o průvodku výrobní dávky. Příklad operací: vrtat průměr 1,2 mm pro závit; řezat závit M 1,4; vrtat trubičku průměr 2,1 mm; uštipnout vtok; zabrousit vtok; ručně pilovat a smirkovat; omílat v keramice; frézovat trubičku oboustranně; montáž šroubu pružiny; kontrola a odstranění zjevných vad; omílat. Pro každý úkon je stanoven čas v normominutách na danou klapku, tzn. čas, za který má být úkon proveden. V momentě, kdy je celá dávka vyhotovena, je již sestavována mechanika na tělo nástroje z různých druhů klapek. V tomto kroku je opět prováděno broušení a leštění tak, aby klapky perfektně zapadaly do dřevěného těla nástroje. Poté, co je nástroj sestavený, se mechanika rozebere, následně se moří, opět se brousí a leští, a nakonec se galvanicky stříbí.

4 Používané materiály ve slévárně

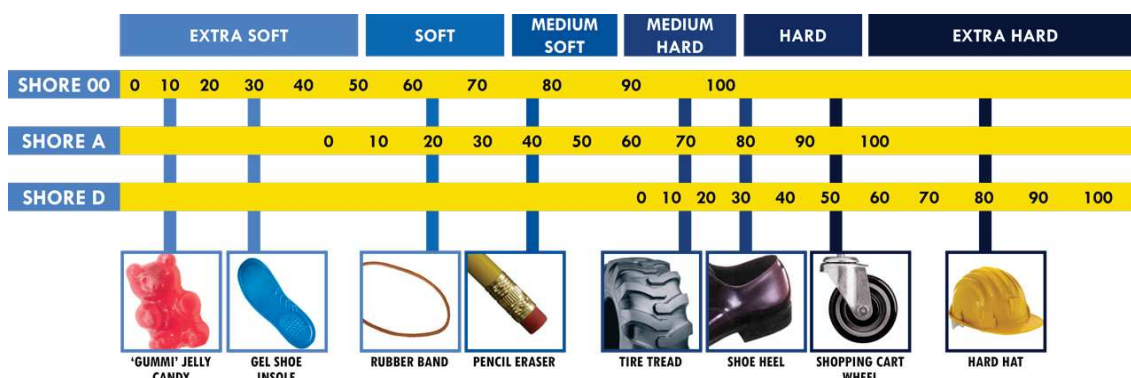
4.1 Formovací hmoty

Ve slévárně jsou používány formy na modely ze dvou různých materiálů, a to tzv. žluté a modré formy. Žlutá guma k výrobě forem byla používána dříve a dnes jsou ještě některé formy z tohoto materiálu stále používány. Nové formy jsou vyráběny již pouze z modré gumy.

Prvním z materiálů je vulkanizační guma (žlutá) – „Castaldo Gold Label“. Jedná se o gumu ideální pro výrobu obtížně tvarovaných forem, kde je vyžadována vyšší pružnost. Vulkanizace je dle výrobce doporučena při teplotě 152 °C, přičemž se za 7,5 minuty zvulkanizuje 3,2 mm. Minimální doba vulkanizace by ovšem neměla být nižší než 30 minut. Smrštění při vulkanizaci je 2,1 %. Tvrdost dle Shore A je 37,3. (pozn. Shore A je stupnice určená pro měření tvrdosti gum, měkkých plastů a polyuretanů), dle obr. 16

je tedy patrné, že se jedná o středně měkkou gumu. Další vlastnosti této gumy jsou: prodloužení do přetržení 706 % a vysoká pevnost v tahu 2,475 psi (cca 17 kPa). Jedná se o velmi ohebnou a odolnou gumu. Cena za 1 kg je přibližně 24 € bez DPH. [8, 9, 10]

Druhým z materiálů, aktuálně používaným, je silikonová modrá pryž – „120 °C silicone blue rubber“. Jedná se také o materiál s dobrou tažností, který je velmi odolný. Vosk v materiálu dobře teče a dá se snadno odstranit. Doporučená vulkanizační teplota je 120 °C, vulkanizace probíhá přibližně 2 až 3 minuty na 1 mm. Udávané smrštění je v rozsahu 1 až 3 %. Tvrdost Shore A je 40. V tomto případě je cena nižší, ačkoliv vlastnosti materiálu jsou podobné. Přibližně 13 €/kg bez DPH. [11, 12]



Obr. 16: Tabulka tvrdostí dle Shore [13]

4.2 Vosky

K výrobě voskových modelů bylo používáno více typů materiálů. Při používání sádrového prášku od dodavatele Goldstar, byly zároveň používány vosky „Goldstar GS 125 Pink“ a „Goldstar GS 110 Aqua“. V případě „GS 110“ se jednalo o univerzální vosk s hladkým povrchem a schopností vytvořit jemné detaily. „GS 125“ je vhodnější pro aplikace se složitějšími strukturovanými vzory. Toho se docílí mj. tím, že se téměř nesmršťuje. Vyznačuje se extrémní flexibilitou a velmi vysokou kvalitou povrchu, což napomáhá vyjmutí voskového modelu z formy bez jeho poškození. Hladký a lesklý povrch je docílen díky jeho dobré tekutosti. [14]

Po ukončení spolupráce s dodavatelem GS produktů, se přešlo na voskové materiály „Freeman Aqua Green Flake Wax“ a „Freeman Flexible Blue Flake Wax“.

„Aqua Green“ je opět univerzální víceúčelový vosk, který nabízí vynikající tekutost a flexibilitu pro vstřikování složitých forem. Má minimální smrštění. [15]

Posledním voskem je „Flexible Blue“, který se v současné době používá ve slévárně jako jediný. Vyznačuje se nejvyšší flexibilitou z vosků dodávaných touto společností a zároveň také nejdelší životností vytvořeného vzoru. Jedná se o unikátní směs vosku a plastu. Tímto voskem je možné vytvoření velmi ostrých detailů. [16]

V tab. 1 jsou uvedeny doporučené parametry pro zpracování vosků a jejich vlastnosti. (Pozn. centipoise [cps] je jednotkou dynamické viskozity). Dříve byly

univerzální vosky používány pro klapky jednodušších tvarů a vosky pro složitější tvary pro komplikovanější modely. V dnešní době se již používá jen vosk „Flexible Blue“ a to z toho důvodu, že je schopen vytvořit komplikovanější tvary a pořizovací cena tohoto vosku je stejná jako vosku „Aqua Green“.

Vosk	Vstřikovací teplota [°C]	Bod tuhnutí [°C]	Viskozita při 70 °C [cps]	Bod vzplanutí [°C]	Obsah popela [%]	Tvrdost [Shore D]
GS 110	70	62	265	x	x	x
GS 125	67 - 70	60	263	x	x	x
Aqua Green	71	61	289	240	0,009	32
Flexible Blue	77	62	615	240	0,007	30

Tab. 1: Vlastnosti a parametry pro jednotlivé vosky [14, 15, 16]

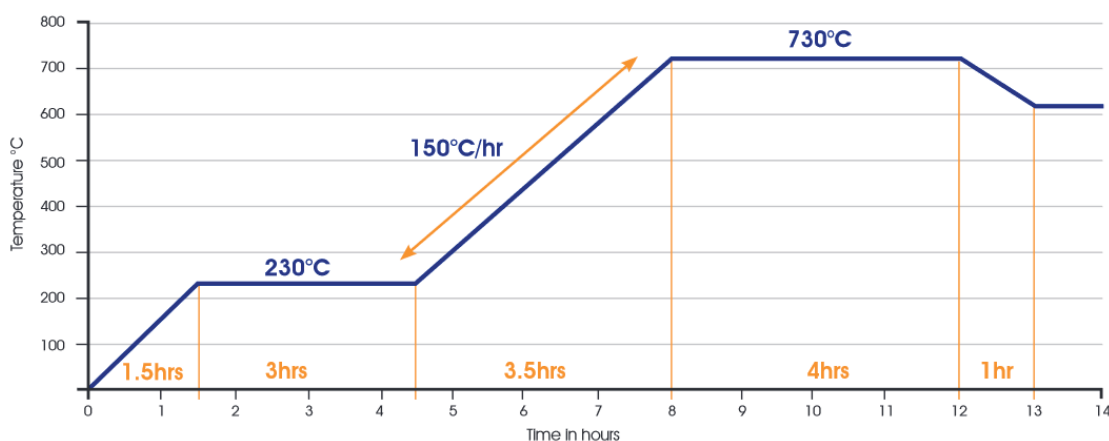
4.3 Sádrový prášek

V posledních letech se ve slévárně používaly různé typy klenotnických licích prášků, tj. sáder. Nejdříve byla používána sádra „KerrCast 2000“, primárně určená k výrobě odlitek ze zlata, stříbra a mosazi. [6] Jednalo se o spolehlivý materiál, nicméně po ukončení dovozu z USA bylo nutné přejít na materiál nový.

Další používanou sádrovou byl produkt „Goldstar Omega+“. V tomto případě se jedná o sádrovou určenou spíše pro matečné pryskyřicové modely vyrobené obráběním nebo stereolitografií. Tato sádra dokáže odolávat velké teplotní roztažnosti pryskyřic. Primárně slouží pro lití zlata, dále pak stříbra a mosazi. [17]

Přechod na aktuálně používanou sádrovou směs – „SRS Eurovest“ – byl z finančního hlediska. Varianta „Omega+“ stojí 1260 Kč/balení bez DPH, přičemž „SRS Eurovest“ stojí 855 Kč/balení. (Pozn. balení je 22,7 kg (50 lb)). [18, 19]

Tato sádrová směs se skládá z cristobalitu, křemene a sádrovce. Udávané pH směsi je 7 až 8. Výrobce směsi uvádí, že právě díky vysoce kvalitnímu nemineralizovanému cristobalitu, jsou odlitky v drtivé většině případů bez vad. Jedná se tedy o spolehlivý materiál s ideálním poměrem cena/výkon. Určení této sádry je zejména pro odlévání mosazi, stříbra a zlata. Teplotní roztažnost sádry při 750 °C je udávána 0,9 %. Na obr. 17 je doporučený průběh výpalu pro tuto směs. Je zřejmé, že průběh se na rozdíl od prováděného výpalu ve slévárně o moc neliší. Doba výpalu závisí na velikosti používané květy. [20, 21, 22]



Obr. 17: Doporučený průběh výpalu pro sádku „SRS Eurovest“ [19]

4.4 Kov

Ve slévárně je používán převážně bronz. Ve výjimečných případech, kdy je jiný požadavek, se používá mosaz.

Do slévárny je dodáván bronz ve formě granulátu. Konkrétně se jedná o bronz spadající do skupiny cínových bronzů – CuSn8. Chemické složení je 8 % cínu (Sn) a 92 % mědi (Cu). Nicméně ve slévárně je tento materiál dále legován a to křemíkem (Si) a zinkem (Zn). Konkrétně je do vstupního materiálu přidáno 4 % Cu, 0,5 % Si a 1 % Zn. Používaný materiál je tedy CuSn8 + 4 % Cu + 0,5 % Si + 1 % Zn.

5 Aditivní technologie

Aditivní technologie, též známé jako 3D tisk jsou výrobním procesem, při kterém dochází k postupnému vytváření 3D modelu z trojrozměrného digitálního návrhu. Ve svých začátcích (v 80. letech 20. stol.) se tento způsob nazýval spíše „rapid prototyping“, jelikož se obvykle používal k výrobě prototypů, na kterých se následně testovaly požadované vlastnosti.

Pomocí aditivních technologií je možné vyrobit široké spektrum struktur a složitých geometrií. Proces sestává z tisku souvislých vrstev materiálu na sebe, dokud není celý díl dokončen. Vývoj a použití těchto technologií se velmi rychle rozvíjí napříč různými průmyslovými odvětvími – od strojírenské výroby, přes stavebnictví, až po biomedicínu, kde jsou vyžadovány jedinečné výrobky přizpůsobené pacientovi. S rostoucími možnostmi aplikací se vyvíjí více materiálů i metod. Již běžně používané materiály jsou termoplasty, dále pak častěji používaným materiálem jsou kovy a jejich slitiny, rozvoj tisku betonu, keramiky aj.

Mezi hlavní výhody, které přináší používání aditivních technologií, patří:

- Nižší hmotnost konstrukcí – díky průběhu tisku vrstvu po vrstvě je možné vytvářet různé vnitřní struktury (mřížky), jejich tvar a hustota záleží na požadovaných mechanických vlastnostech.

- Úspora materiálu – právě díky vnitřní mřížce a přesnosti výroby (téměř žádný odpadový materiál, ten je pouze v případě vytváření podpor). Udává se, že v porovnání s obráběním, se může ušetřit až 25x více materiálu.
- Úspora času – spíše v případě tisknutí složitých součástí, které by pomocí konvenčních metod obrábění zabraly více času k docílení stejného výrobku.
- Možnosti návrhu modelu – opět s odkazováním se na konvenční technologie, kterými by nebylo možné složitou součást vyrobit.
- Vysoká přesnost – liší se podle použité technologie a materiálu.

Naopak mezi nevýhody patří:

- Velikost součásti – v závislosti na zařízení, je zde omezení v maximálních možných rozměrech součásti.
- Sériovost – ačkoliv je snaha zvyšování produktivity výroby, tak se stále aditivní technologie hodí spíše na kusovou či sériovou výrobu, nikoliv na hromadnou.
- Konstrukce – jak již bylo zmíněno, u některých modelů je nutné vytvořit podpůrný systém při tisku, aby nedošlo ke zborcení hlavní součásti. Tím vzniká více odpadového materiálu, roste čas tisku, náklady a následně musí být podpory odstraněny.
- Výběr materiálu – týká se 3D tisku kovů a jejich slitin. Nesvařitelné kovy nemohou být použity, obtížně svařitelné kovy vyžadují specifické přístupy.
- Vlastnosti materiálu – součásti vyrobené aditivní technologií mají tendenci vykazovat anizotropii (horší mechanické vlastnosti ve směru tisku konstrukce), dále se pak v součásti může objevovat vnitřní porozita. [23, 24, 25, 26]

5.1 Proces tisku

Obecně se celý proces výroby rozděluje do tří fází: pre-processing, processing a post-processing.

V první fázi přípravy (pre-processing) se vychází z designového konceptu, který je převeden do CAD (Computer Aided Design) systému. Zde je vytvořen přesný model, který je standardně ukládán ve formátu STL. Soubor STL převádí model na síť trojúhelníků. Jejich počet ovlivňuje přesnost zaoblených ploch. Uživatel může nastavit jejich velikost a počet. STL soubor je následně nahrán do softwaru určeného již k přípravě parametrů 3D tisku. Nastavení tiskárny je klíčovým krokem v procesu. Parametry by měly být správně nastaveny, aby se dosáhlo požadovaných tolerancí vyrobeného dílu. Po nastavení parametrů u technologie FDM je v programu vyhotovena vizualizace průběhu tisku, jednotlivé vrstvy, předpokládaný čas apod. [27]

Ve fázi processingu již dochází k tisku součásti. To je prováděno vrstvu po vrstvě. Tisk je prováděn jedním, či dvěma materiály (filamenty). V případě využití podpěr se často

používají dva materiály. Filament na podpory je většinou levnější, případně může být rozpustný ve vodě, či acetonu. Při tisku je nutné zajistit, aby nedošel vstupní materiál.

Poslední fáze je post-processing. Jedná se o poslední krok, který nemusí být vždy prováděn. Většinou se jedná o odstraňování podpor, případně se součást může dále lakovat, impregnovat, brousit, leštit, vytvrzovat, slinovat apod.

5.2 Přehled metod 3D tisku

V tab. 2 je vidět rozdělení základních metod aditivních technologií. Toto rozdělení je dle ASTM F42, kde je klasifikováno sedm typů procesů. Dělí se podle stavu materiálu při tisku – v tekuté formě, pevné, či ve formě prášku. Dále pak už záleží na způsobu vytvoření spojení mezi jednotlivými vrstvami. [27]

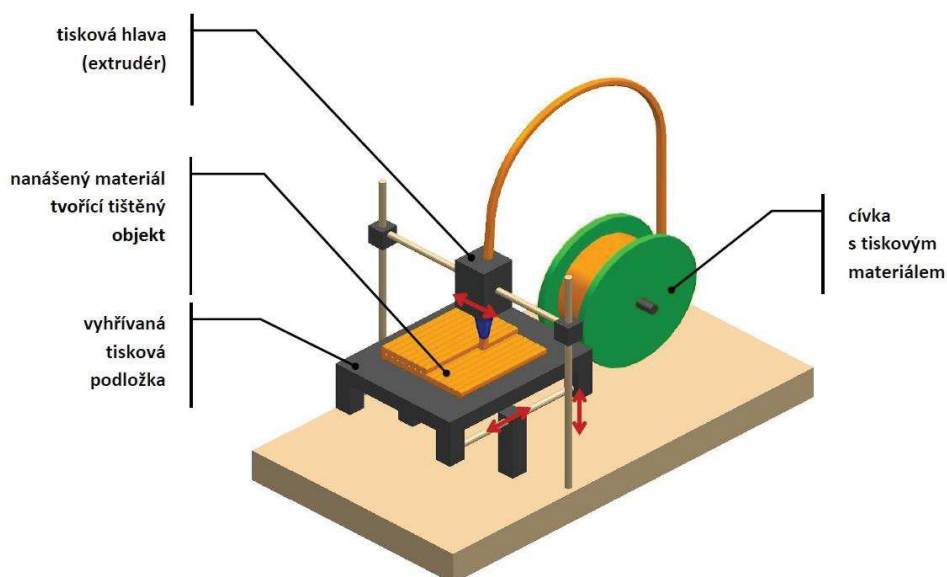
Typ procesu	Stručný popis	Technologie	Materiály
Powder bed fusion	Tepelná energie selektivně natavuje prášek na loži	Electron beam melting (EBM), selective laser sintering (SLS), direct metal laser sintering (DMLS)	Kovy, polymery
Directed energy deposition	Tepelná energie natavuje materiál v místě jeho přivádění	Laser metal deposition (LMD)	Kovy
Material extrusion	Materiál je natavován a vytlačován tryskou	Fused deposition modeling (FDM)	Polymery, vosky
Vat photo polymerization	Tekutý fotopolymer je vytvrzován zářením	Stereolitografie (SLA), digital light processing (DLP)	Fotopolymery
Binder jetting	Prášek je spojován tekutým pojivem	Powder bed and inkjet head (PBIH), plaster-based 3D printing (PP)	Polymery, slévárenské písky, keramika, kovy
Material jetting	Kapky materiálu vytvrzovány zářením	Multi-jet modeling (MJM)	Polymery, vosky
Sheet lamination	Vyřezávání a spojování fólií	Laminated object manufacturing (LOM)	Papír, polymery, kovy

Tab. 2: Metody aditivních technologií [27]

Na základě provedené analýzy ve slévárně byly vybrány některé aditivní technologie, které by bylo možné implementovat do procesu výroby drobných odlitků. V následující části jsou tyto technologie detailněji popsány, tj. jsou uvedeny jejich charakteristické vlastnosti, výhody, nevýhody atd.

5.2.1 Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM spadá do skupiny aditivních technologií, které vytlačují natavený materiál (Material Extrusion). Jedná se o technologii patentovanou již v roce 1992. Dnes jde o nejrozšířenější technologii díky její jednoduchosti a také cenové dostupnosti. Princip této metody spočívá v natavení materiálu ve formě tenkého vlákna (tzv. filamentu, který má nejčastěji průměr 1,75 mm nebo 2,85 mm). Filament z termoplastu je nataven v trysce a po dosažení polotekutého stavu je vytlačován na pracovní podložku, nebo na již vytisknuté vrstvy. Tímto způsobem je model tvořen vrstvu po vrstvě, dokud není hotový, schéma metody je na obr. 18. Teplotní plasticita polymerního filamentu je základní vlastností této metody, která umožňuje, aby se vrstvy filamentu v průběhu tisku spojily a poté při pokojové teplotě opět ztuhly. [23, 24, 25]



Obr. 18: Schéma metody FDM [29]

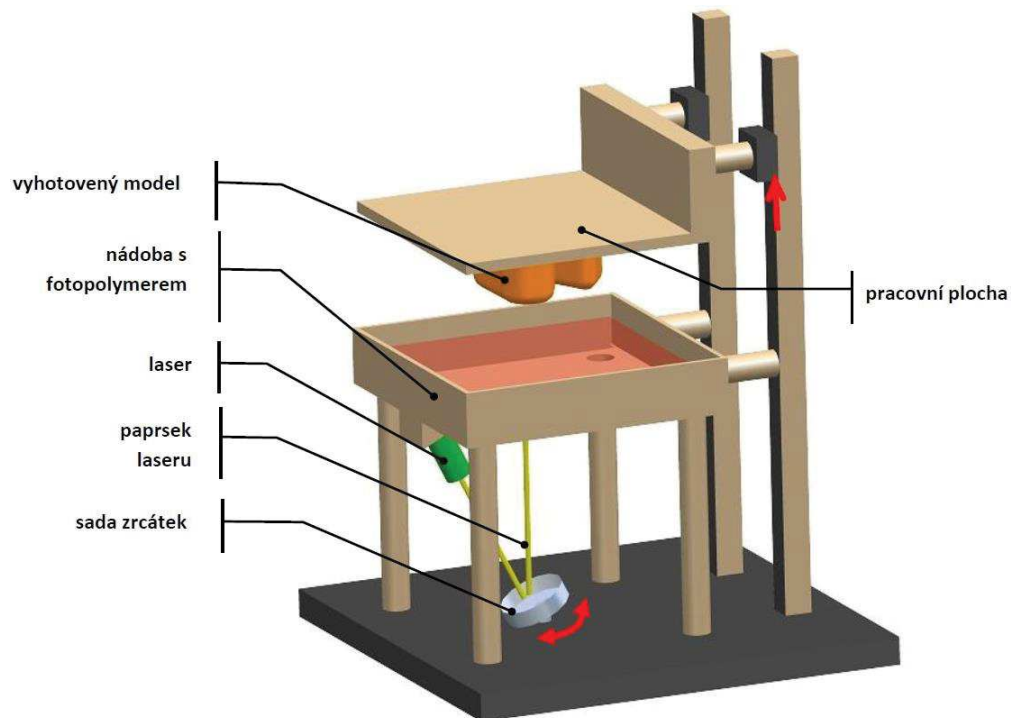
Materiály nejčastěji používané touto technologií jsou: kyselina polymlečná (PLA), polykarbonát (PC), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), směsi PC a ABS, vosky, výjimečně pak kovy a keramika. V dřívější době byly používány tiskárny s jednou tryskou. V dnešní době se již běžně používají tiskárny se dvěma tryskami, což umožňuje tisknout dva materiály najednou. Z první trysky je přiváděn materiál součásti a z druhé trysky podpurný materiál, který je zpravidla levnější a může se později snadno odtrhnout od hotové součásti, případně se dá rozpustit ve vodě. Podpory se používají častěji u náročnějších tisků pro vytváření geometrií s přesahy, kde by mohlo dojít ke zhroucení tisknuté struktury.

Mezi hlavní výhody této technologie patří: minimální produkce odpadního materiálu, rychlost tisku, velké možnosti výběru materiálů a nízké náklady. Naopak mezi nevýhody spadá: hrubší struktura v důsledku tloušťky

vrstvy (obvykle 0,2 mm), s tím spojený horší vzhled a anizotropie (v jednotlivých směrech bude součást vykazovat odlišnou pevnost). [23, 24, 25]

5.2.2 Stereolitografie (SLA)

SLA byla vůbec prvním zástupcem ze skupiny aditivních technologií – patentována v roce 1986. Jedná se o proces laserové technologie využívající tekutou pryskyřici citlivou na ultrafialové (UV) záření. Po jejím ozáření dochází k vytvrzení a tuhnutí fotocitlivého materiálu. SLA tiskárny mohou být založeny na dvou principech. Princip první: pracovní plocha je na začátku tisku úplně ponořena v nádobě s tekutým fotopolymerem, laser působí na pracovní plochu zespoda, skrze nádobu s fotopolymerem. Pracovní plocha se pohybuje směrem nahoru (vždy o výšku jedné nanášené vrstvy), přičemž je vytahován zhotovovaný model ven z nádoby – schéma na obr. 19. V druhém případě působí laser shora a pracovní plocha se pohybuje směrem dolů. [23, 24, 29, 30]



Obr. 19: Schéma metody SLA [29]

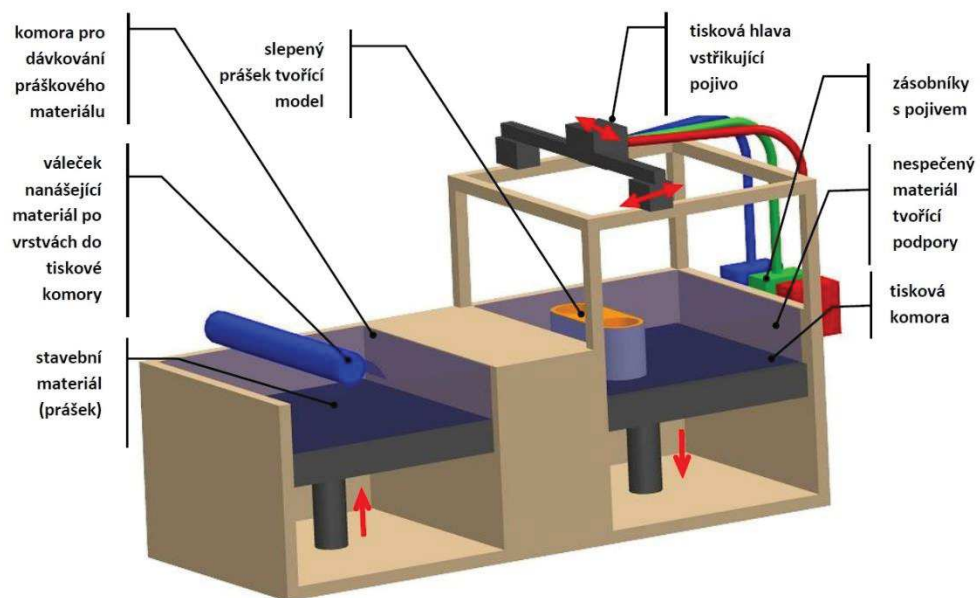
Materiálové možnosti jsou zde, v porovnání s FDM, značně omezené. U SLA je možné použít řadu pryskyřic, které se dále dělí na standardní, konstrukční, šperkařské, dentální a keramické. Jsou kapalné a jejich cena se výrazně liší (od 1000 do 8000 Kč za litr).

Hlavní výhodou SLA je jednoznačně ve kvalitě vytisknuté součásti – velmi vysoká rozměrová přesnost s rozlišením až 10 μm a proto i velmi hladký povrch. Na druhou stranu se jedná o relativně pomalý proces s omezeným výběrem

materiálů, vytisknuté součásti bývají křehké a vždy je zapotřebí vytvoření podpurných struktur. [23, 24, 29, 30]

5.2.3 Binder jetting (BJ)

Tato technologie byla vynalezena v roce 1993 a nabízí mnoho výhod. Pravděpodobně její největší výhodou je fakt, že může pracovat s jakýmkoliv práškovým materiálem (kovy, slévárenské písky, keramika aj.). Navíc rychlost tisku je relativně vysoká, jelikož na stůl je nanášena tenká vrstva prášku a ta je spojována tekutým pojivem – viz schéma obr. 20. Pojivo je nanášeno z tiskové hlavy a celý proces nevyžaduje žádné teplo. Pro představu, tisková hlava se 100 tryskami může vytvářet součásti rychlostí až $200 \text{ cm}^3/\text{min}$. [31] Tiskárny jsou v tomto případě velkých rozměrů, např. s pracovním prostorem $1800 \times 1000 \times 700 \text{ mm}$. [32]



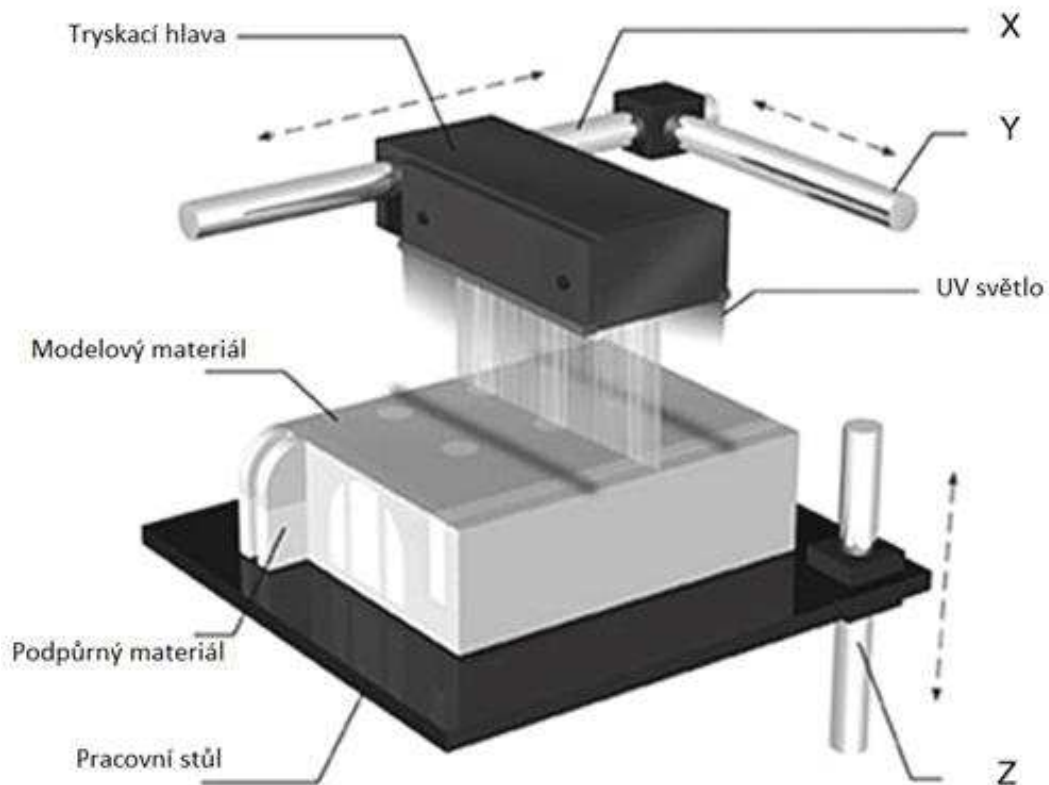
Obr. 20: Schéma metody BJ [29]

Technologii binder jetting by bylo vhodné použít v případě tisku celých keramických skořepin. V tomto případě by se jednalo o použití materiálů slévárenských písků a keramiky, kde by se jako plnivo dal použít např. Al_2O_3 – oxid hlinitý nebo ZrO_2 – oxid zirkoničitý a jako pojivo fenolické pryskyřice. Vytištěná skořepina by dále byla vypálena. Po vypálení je možné dosáhnout hustoty skořepiny přibližně 96 %, smrštění ve svislém směru tisku při použití aluminy (Al_2O_3) se pohybuje kolem 10 %. [31] Přidáním SiO_2 – oxidu křemičitého lze docílit zvýšení hustoty a zvýšení pronikání pojiv. Velikost částic je obvykle mezi 0,2 až $200 \mu\text{m}$. Ideální velikost částic dosud nebyla určena, nicméně velikost a distribuce velikosti částic mají vliv na tekutost, smáčivost s pojivem a výslednou drsnost povrchu. [33]

Ačkoliv se jedná o technologii, která by ušetřila prvních šest kroků z konvenční metody vytavitelného vosku (zařízení, práce, náklady), tak k pořízení této technologie je nutná vysoká vstupní investice. Z toho důvodu tato varianta nebude dále uvažována jako možné řešení, jelikož by se v kusové výrobě nevyplatila.

5.2.4 Multi-jet modeling (MJM)

Multi-jet modeling spadá do procesu material jetting (MJ), který je obecně považován za jeden z nejrychlejších a nejpreciznějších technologií 3D tisku. Proces tisku MJM probíhá nanášením tekutého fotopolymeru ve formě kapek, který je ihned vytvrzován UV světlem (viz obr. 21). Proces vytvrzování je tedy stejný jako u technologie SLA, kde je ovšem potřeba celé nádrže fotopolymeru. Zde je zásobník fotopolymeru součástí 3D tiskárny. Pokročilejší tiskárny mohou mít více trysek, díky kterým je umožněno kombinovat různé materiály a barvy. [28, 34]

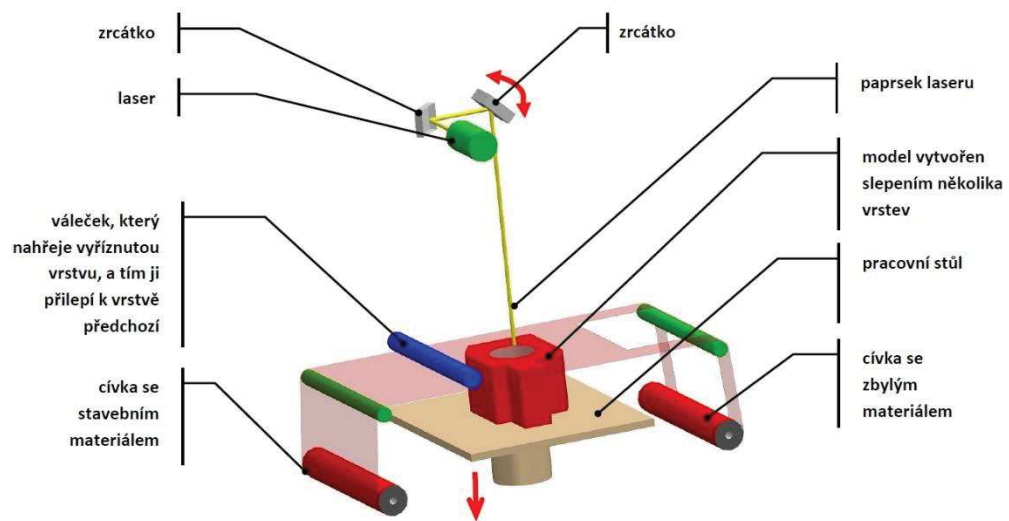


Obr. 21: Schéma metody MJM [28]

Jak je již zmíněno výše, mezi hlavní výhody patří rychlost tisku, rozměrová přesnost a výborná jakost povrchu. Tyto vlastnosti ovšem řadí proces MJ k jednomu z nejdražších v oblasti 3D tisku. Dalším omezením je nízká pevnost tištěných součástí, proto se nehodí na součásti, které musí zvládnout nějaký druh zatížení. Jelikož jsou díly tištěny z pryskyřice, jsou křehké. [28, 34]

5.2.5 Laminated object manufacturing (LOM)

Tato metoda spočívá v postupné laminaci vrstev na sebe. Její schéma je uvedeno na obr. 22. Jsou zde dvě cívky, přičemž z jedné je odvíjena fólie a na druhou je navíjen zbylý materiál. Mezi cívkami se nachází pracovní plocha, kde se fólie vždy zastaví, je vyříznuta nožem, nebo laserovým paprskem. Spojení jednotlivých vrstev mezi sebou může být provedeno několika způsoby. První variantou je fólie, která již obsahuje z jedné strany lepidlo. Další možností je, že po každém vyříznutí je na právě vyříznutý povrch nanášeno lepidlo. Další možností je přítomnost nahřívaného válečku, který po vyříznutí vrstvu přejede a tím tepelně spojí vrstvy k sobě. Poslední možností spojení je použití ultrazvukového svařování s rotační sonotrodou. [23, 24, 28]



Obr. 22: Schéma metody LOM [29]

Byly vyzkoušeny různé materiály, včetně papírů, kovů, plastů, tkanin, syntetických materiálů, a dokonce i kompozitů. V závislosti na druhu materiálu a požadovaných vlastnostech může být provedeno dodatečné zpracování za vysokých teplot.

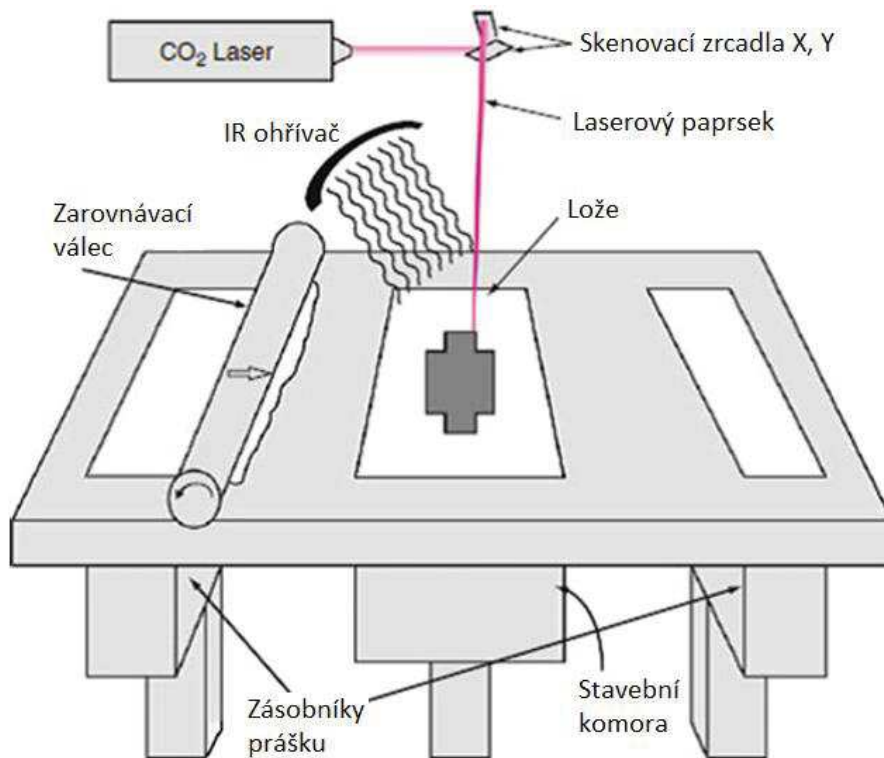
Mezi výhody této metody patří: nízké náklady, není potřeba vytvářet podpory, ani dodatečná zpracování (post-processing), možnost tisku velkých částí. Naopak rozhodně největší nevýhodou je velké množství nevyužitého materiálu. Jakost povrchu je závislá na tloušťce použité fólie. [23, 24, 28]

5.3 Náhrada technologie kovovým tiskem

V případě kovového tisku klapek by bylo možné nahradit kompletně stávající technologii. Zde se nabízí dva typy procesů.

První proces – Powder Bed Fusion (PBF) sestává ze spékání práškového kovu nebo polymeru pomocí laserového nebo elektronového paprsku, který přivádí do

materiálu tepelnou energií. Tisk probíhá v ochranné atmosféře – v inertním argonu, případně dusíku. V případě kovu je nanesený prášek spékán na základní desce (lože), na které je nanesena rovnoměrná vrstva kovového prášku. Po dokončení jedné vrstvy se lože posune o zvolenou výšku níže, dojde k nanesení další rovnoměrné vrstvy a opět k působení paprsku. Tento proces se opakuje až do dokončení celé součásti. Schéma je na obr. 23. Poté je nepoužitý prášek odsán vysavačem a součást je odříznuta od lože. Odsátý prášek může být po prosetí opět použit na další tisk. [35]



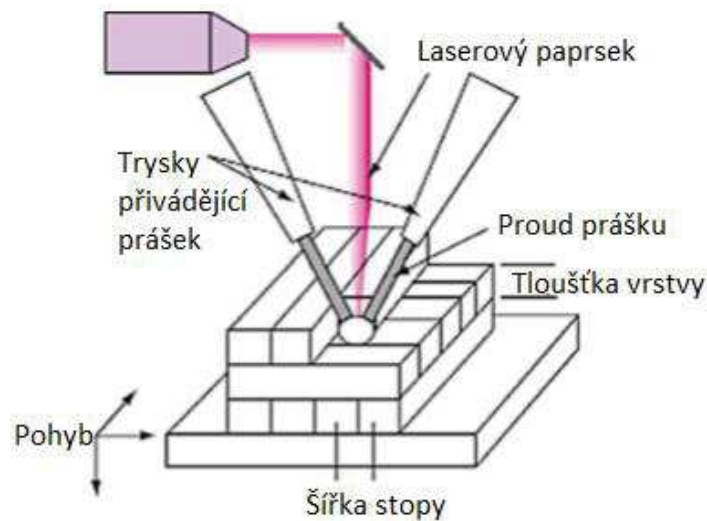
Obr. 23: Schéma SLS procesu [28]

Pomocí PBF lze zpracovat široké spektrum kovů. Obecně jakýkoliv kov, který lze svařovat. Mezi nejčastěji používané materiály patří: oceli – typicky nerezové a nástrojové, titan a jeho slitiny, slitiny na bázi niklu, hliníkové slitiny, aj. [28]

Mezi přednosti této technologie patří maximální využití materiálu, resp. minimální odpadový materiál a poměrně široká škála použití slitin. Naopak mezi nevýhody patří, že celá součást musí být tištěna pouze z jednoho materiálu, tisk je poměrně drahý a maximální možné rozměry součásti jsou limitovány tiskárnou.

Druhý proces – Directed Energy Deposition (DED) využívá fokusovaný zdroj energie (plazmový oblouk, laserový paprsek či elektronový paprsek), schéma na obr. 24. Na rozdíl od procesu PBF je zde materiál přiváděn ve formě drátu nebo prášku přímo do místa působení paprsku a zde je roztaven. Ačkoliv tato aplikace může fungovat pro polymery, keramiku a kompozity s kovovou maticí, používá se převážně pro kovové prášky. Tisk může probíhat ve vakuu, v inertním plynu (většinou argon) v celé komoře, nebo je inertní plyn přiváděn speciální tiskovou hlavou pouze do místa tavení. Tímto

typem procesu se také dají efektivně opravovat poškozené součásti, vytisknout element na již existující součást, či nanášet povlaky. [28, 36, 37]



Obr. 24: Schéma laserového DED procesu [28]

Jedna z výhod tohoto procesu je bezesporu možnost kombinace materiálu v rámci jedné součásti. Některé tiskárny mají až 4 zásobníky odlišných prášků a v průběhu tisku lze tyto prášky v různých vrstvách používat. Obecně se kovové materiály, které vykazují dobrou svařitelnost, dobře zpracovávají. Jedním z příkladů je kombinace niklové superslitiny (IN625) s korozivzdornou ocelí (SS304). Naopak nevýhodou procesu je větší drsnost povrchu vytištěné součásti a menší přesnost. [28, 38]

Měď a její slitiny jsou široce používány v mnoha aplikacích, díky svým vynikajícím vlastnostem, jako je kujnost, vysoká odolnost proti korozi, vysoká elektrická a tepelná vodivost. Nicméně 3D tisk vysoce čisté mědi je stále náročný kvůli tepelným problémům, které jsou způsobeny vysokou vodivostí mědi. Kromě problémů s rychlým rozptylem tepla je zde také problém s odrazivostí laserového svazku, což má za následek nízkou depozici laserové energie do materiálu, která je důležitá k natavení materiálu. Na tuto skutečnost je nutné reagovat zvýšením výkonu laseru, snížením skenovací rychlosti a snížením tloušťky vrstvy. Ovšem tato změna parametrů může být problémem např. u zařízení pracujícím na principu Directed Energy Deposition (DED), kde kvůli zvýšené odrazivosti materiálu může dojít až ke zničení optiky ve 3D tiskárně. [39]

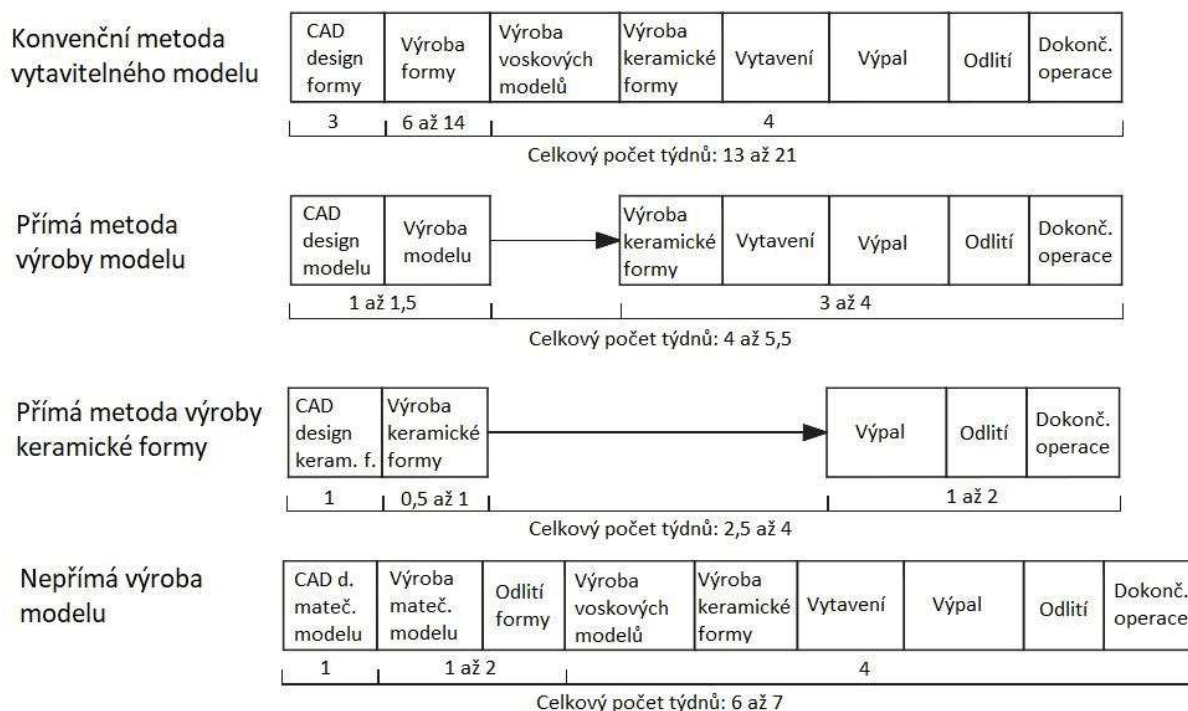
5.4 Možnost implementace aditivních technologií do slévárny

Navzdory své oblibě trpí tradiční metoda vytavitelného vosku vysokými investicemi do výroby nástrojů pro výrobu voskových modelů. Proto ve výrobě o malých objemech (kusová, malosériová), která je typická výrobou na zakázku nebo specializovaná na konkrétní součásti, jsou náklady neúměrně velké. Techniky rapid prototypingu (3D tisku) se rychle stávají standardními nástroji při navrhování a výrobě produktů. Díky revolučním schopnostem rychle vyrábět trojrozměrné součásti se varianta spojení metody vytavitelného vosku (investment casting) a rapid prototypingu

přímo nabízí a klade si za cíl zkrácení časových cyklů návrhu výrobku a vývoje. Toto spojení lze nazývat „rapid investment casting“. Implementace aditivních technologií do slévárny používající metodu vytavitelného vosku je motivována vyhlídkami snížení nákladů na nástroje, pracnosti a dodací lhůty výroby. K výrobě modelů lze prakticky použít jakýkoliv materiál, který může být roztaven nebo spálen bez poškození keramické skořepiny. [40]

Například technologie FDM (Fused Deposition Modeling) je již akceptovatelnou možností. Pro modely z nevoskových materiálů jsou uváděny dvě významné výhody. Zaprvé, odolnost a pevnost nevoskových modelů umožní odlévání tenkých stěn, které bylo dříve obtížné odlít kvůli křehkosti voskových modelů. Zadruhé, tvrdost a tuhost vytištěných modelů umožňují provádění dokončovacích operací pro zlepšení kvality povrchu, která se potom přenáší na odlitky. Aby se zamezilo smrštění odlitků během ochlazování, je nutno odpovídajícím způsobem zvětšit model. Nicméně se u nevoskových modelů objevuje řada nových problémů souvisejících s praskáním keramických skořepin, neúplným vypalováním vzorového modelu či zbytkovým popelem ve formách. I přes tyto nové komplikace se ovšem použití metody FDM vyplácí a existuje celá řada strategií, specializovaných materiálů a nových procesů, jak těmto překážkám čelit, nebo je plně eliminovat. [40]

Z článku zaměřeného na implementaci AM technologií do procesu metody vytavitelného modelu bylo zjištěno, že v případě odlišných přístupů implementací dochází k odlišným úsporám času v rámci celého procesu. Na obr. 25 jsou uvedeny některé z možných implementací. Pro každý proces jsou zde uváděny jednotlivé operace s odhadovanou spotřebou času. Z možných variant se z hlediska nejkratší doby jeví jako optimální varianta využívající přímou metodu výroby keramické formy (např. technologií BJ). Obecně v případě provedení implementace dochází ve všech případech ke zkrácení celého procesu. [40]



Obr. 25: Porovnání konvenčního procesu s procesy používající implementaci AM technologie [40]

Aplikace technik rapid prototypingu může být rozdělena do dvou kategorií: metoda přímého použití rapid prototypingu (Direct RP method) a metoda nepřímého použití rapid prototypingu (Indirect RP method). [41]

5.4.1 Přímá metoda (Direct RP method)

Tato varianta zahrnuje použití technik rapid prototypingu přímo k výrobě plastových, voskových či papírových vzorů modelu. Tento model následně slouží k vytvoření keramické formy, do které se odlévá kov. V současnosti jsou používány nejčastěji technologie: FDM, SLA, LOM, SLS, aj. Vytvoření modelu přímou metodou lze získat pouze jeden odlitek.

Jednou z možností je výroba modelů z ledu technologií rapid freeze prototyping (RFP). Tato technologie využívá selektivního nanesení vrstvy vody, která velmi rychle zamrzne. Tryska a přenosová trubka jsou zahřívány a udržovány na teplotě těsně nad bodem mrznutí vody, takže voda může hladce proudit. V případě potřeby vytvoření podpor se používá slaná voda. Technologie byla vyvinuta jako náhrada voskových modelů, a to z důvodu, že se voskové modely, navzdory tomu, že se jedná o směsi přírodních a syntetických vosků, smršťují. Nicméně pro tuto aplikaci musí být vybráno správné pojivo, keramický prášek a katalyzátor. Model z ledu by měl být od keramické břečky oddělen činidlem, které je nerozpustné ve vodě a zároveň nemrzoucí při teplotách pod 0 °C, aby bylo zamezeno rozpouštění povrchu ledu. Keramická břečka by neměla obsahovat vodu a směs by pod 0 °C neměla zamrznout. Ke zkrácení doby gelovatění keramické břečky se používá katalyzátor.

RFP je vhodné použít při malém až středním množství modelů (tzn. kusová až malosériová výroba). Hlavní aplikace RFP slouží k vizualizaci součástí, výrobě soch z ledu a samozřejmě k výrobě modelů pro technologii vytavitelného modelu. Mezi výhody této technologie patří dobrá povrchová úprava, žádné praskání keramické skořepiny, čistý a levný materiál, rychlý tisk aj. Dle studie, kde byla srovnávána drsnost povrchu kovových odlitků vytvořených na základě modelu pomocí RFP, bylo zjištěno, že drsnost povrchu byla lepší než u technologie používající voskové modely. Na druhou stranu, zde byla zmíněna nevýhoda spojená s nežádoucím namrzáním.

Další možností je výroba modelů na FDM tiskárně. V této studii byl použit materiál ABS pro výrobu dvou zkušebních částí s mnoha prvky. Jak již bylo zmíněno, aby nedošlo k popraskání keramické skořepiny, byl použit řídký obdélníkový vnitřní vzor. Po vypálení keramické formy bylo provedeno propláchnutí formy vodou a stlačeným vzduchem, aby bylo dosaženo úplného odstranění zbytkového popela. Na jednom odlitku z hliníkové slitiny nebyly zjištěny žádné velké vady a všechny prvky byly dobře vytvarovány. Na druhém odlitku se na některých místech objevovala porozita, v tenkých částech a na okraji zkušebního vzorku nedošlo k zaběhnutí kovu v důsledku zbytkového popela. Následně byla řešena rozměrová přesnost ve vztahu odlitku k ABS modelu. ABS model byl vytvořen s rozměry o 1 % většími než požadované rozměry odlitku proto, aby se kompenzovalo smrštění kovu. Bylo zjištěno, že průměrné chyby rozměrů byly v rozsahu 1 až 1,5 %, což umožňuje vytvářet modely s dobrou přesností. V případě povrchové úpravy ABS modelu je možné toto procento ještě snížit. Dále bylo provedeno srovnání s konvenční výrobou kovové formy. V případě implementace FDM tisku dochází k časové úspoře 89 % a nákladové úspoře 60 %. [41, 42]

5.4.2 Nepřímá metoda (Indirect RP method)

Při použití této varianty je vytvořena jednou z RP technologií forma (případně model, dle kterého se forma vytvoří), která následně slouží k výrobě voskových modelů. Formy mohou být použity k výrobě 40 až 50 voskových modelů, poté již povrch formy začíná vykazovat známky opotřebení. Vzhledem k nákladům na materiály jsou používány hojně formy ze silikonového kaučuku.

Použitím metody přímé, či metody nepřímé, lze dosáhnout obrovských časových i nákladových úspor, zejména potom u projektů zahrnujících malý počet odlitků. Kromě toho, úpravy designu lze s časem přizpůsobovat, aniž by tyto změny zvyšovaly náklady. V případě konvenčně vyrobených forem na odlévání jsou ve většině případů změny designu podmíněné vytvořením zcela nové formy.

Možnost použití FDM k nepřímé výrobě modelů byla provedena pro stejné zkušební části jako v již výše zmiňované kapitole přímé výroby modelů – FDM. Tyto modely byly vytvořeny s rozměry o 2 % většími než požadovaný rozměr odlitku (1 % pro kompenzaci smrštění voskového modelu a 1 % pro kompenzaci smrštění kovu). ABS modely byly zaformovány do silikonového kaučuku, následně vyřezány a do silikonové formy byl vstřikován vosk. Průměrná rozměrová chyba u výsledného hliníkového odlitku

byla přibližně 0,9 %. Ve srovnání s konvenční výrobou kovové formy dochází k časové úspoře o 89 % a nákladové úspoře o 50 %.

Ovšem tyto úspory jsou pouze v případě kusové výroby pro přímou výrobu modelů, v případě nepřímé výroby modelů pro malosériovou výrobu. V případě hromadné výroby se stále vyplatí konvenční kovové formy. [41, 42]

V jedné z analýz byla řešena problematika nepřímé výroby modelů. Pomocí SLA technologie byl vytvořen model písmene F, který byl následně zaformován do silikonového kaučuku, který vulkanizuje při pokojových teplotách (RTV – room temperature vulcanization). Po vulkanizaci byl model vyřezán z formy, do které byl následně vstříkovan vosk. Jako optimální podmínky pro vstříkování vosku byly zjištěny: teplota silikonové formy 35 °C, teplota vstříkovaného vosku 85 °C při podtlaku -0,5 bar. Výrazná změna těchto parametrů může vést ke zhoršení kvality povrchu voskových modelů. Analýzou bylo zjištěno, že lze tímto způsobem dosáhnout obdobné rozměrové přesnosti jako u tradičně vytvořených kovových forem obráběním. Dále pak bylo zjištěno, že právě oproti tradiční kovové formě došlo ke snížení doby výroby a ke snížení nákladů. [43]

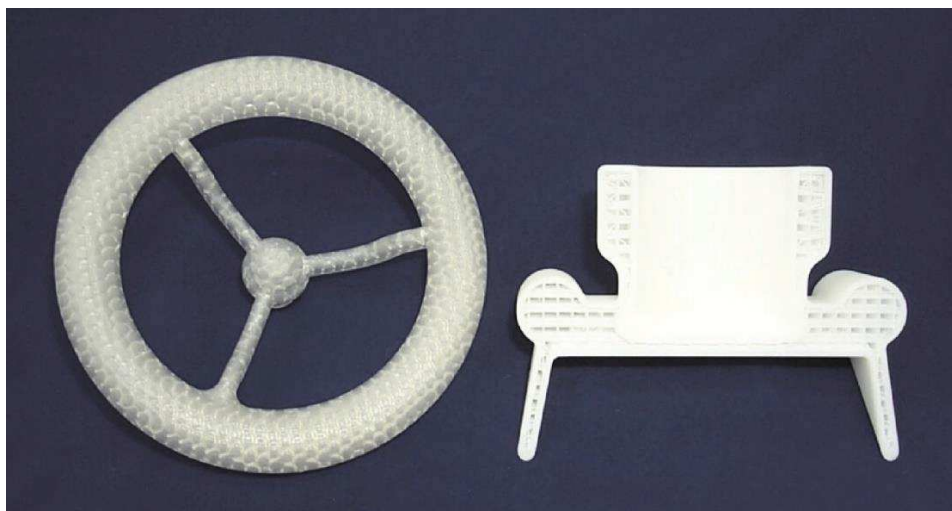
Na základě další provedené studie byl zjišťován rozdíl mezi formou vytvořenou ze silikonového kaučuku a formou z polyuretanu. Formy byly vytvořeny dle vytištěných modelů pomocí SLA. Uvádí se, že každý materiál má své výhody i nevýhody. Voskové modely vytvořené v silikonové formě se vyznačují lepší povrchovou úpravou a schopností vytvořit modely složitějších tvarů. Z hlediska přesnosti je ovšem lepší varianta polyuretanových forem, protože mohou vytvářet přesnější a méně zdeformované voskové modely. [44]

5.4.3 Praskání keramické skořepiny

Modely z vosku jsou běžně vytavovány v autoklávech. Zbýlý vosk, který po tomto procesu zůstane ve skořepině se při vypalování formy odpaří. U nevoskových materiálů jsou hlavním důvodem k praskání skořepiny napětí indukovaná teplotní roztažností modelu, ke kterým dochází při výpalu formy. Důvodem je rozdílnost v koeficientech teplotní roztažnosti modelového a skořepinového materiálu. Nejlepším řešením, jak zabránit praskání skořepiny, je výroba vnitřní struktury s dutinami. Díky dutinám se při zahřívání modelový materiál dříve zhroutl sám do sebe, než aby porušil keramickou formu. Navíc, vytvoření duté struktury vede k úspoře modelového materiálu, času a tím pádem i k celkovému snížení nákladů.

Pro technologii SLA používající epoxidové pryskyřice se jako ideální vzor pro tvorbu vnitřní struktury staly šestiúhelníkové buňky, viz obr. 26. V případě čtvercových a trojúhelníkových buněk byl efekt pouze částečně úspěšný.

Pro technologii FDM používající ABS (akrylobutadienstyren) je vhodný řídký obdélníkový vnitřní vzor. Konkrétní příklad pro tloušťky stěn je: 1,5 mm pro plášť a 0,254 mm pro vnitřní vzor (viz obr. 18). [40]



Obr. 26: Porovnání struktur pro SLA (vlevo) a pro FDM (vpravo) [40]

Ze studie zaměřené na kolapsibilitu (zhroucení se) ABS modelů byl pozorován rozdíl mezi modely dutými a modely plnými při různých teplotách. Modely ve tvaru „H“ byly zaformovány do keramických skořepin s průměrnou tloušťkou stěny 5 mm. Po jejich vysušení při pokojové teplotě byly vloženy do pece. Při dosažení požadované teploty byla výdrž na teplotě 15 minut, poté následovalo přirozené ochlazení v peci. Na obr. 27 jsou zobrazeny výsledky měření. Dále bylo pozorováno, že do teploty 500 °C byly na vnitřní stěně keramické skořepiny zbytky popela. Od teploty 550 °C již zbytky popela nebyly viditelné. V případě plných vzorů do teploty 500 °C včetně došlo k popraskání keramické skořepiny. Pravděpodobně z důvodu krátké doby na vytečení materiálu z formy. Proto materiál kvůli teplotní roztažnosti poruší keramickou skořepinu. V případě dutých modelů nedošlo při žádné teplotě k porušení keramické skořepiny. Z výsledků plyne, že jednoznačně lepší možností je volba dutých modelů s výpalem teplot nad 550 °C, aby zde bylo menší % zbytkového popela. Navíc se v případě dutého modelu uspoří čas spojený s tiskem i použitý materiál. [45]

Výsledky	Modely z ABS (FDM)		
	Plné	Duté	
Kolapsibilita při teplotách	300°C	Popraskané	Neporušené
	400°C	Popraskané	Neporušené
	450°C	Popraskané	Neporušené
	500°C	Popraskané	Neporušené
	550°C	Neporušené	Neporušené
	600°C	Neporušené	Neporušené
Doba tisku	183 min	± 100% kratší	
Spotřeba ABS	35,10 g	± 150% méně	

Obr. 27: Výsledky studie kolapsibility ABS materiálu [45]

V další studii, která byla zaměřena na porovnání použití vnitřní struktury ve formě šestiúhelníkových buněk s vnitřní strukturou osmiúhelníkových buněk, bylo zjištěno, že právě osmiúhelníková mřížová struktura je ještě lepší variantou. Osmiúhelníková struktura umožňuje zhroucení se během výpalu již dříve (tzn. při nižších teplotách), což snižuje i další riziko popraskání keramické skořepiny. Dále bylo zjištěno, že dojde ke snížení hmotnosti vnitřní struktury, což vede k žádoucí úspoře materiálu. [46]

6 Vosk a voskové směsi

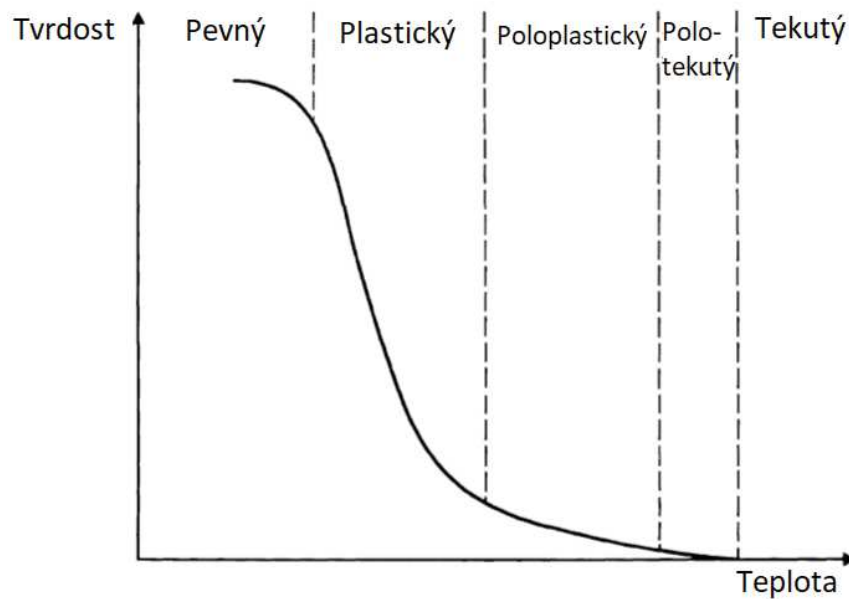
6.1 Historie a struktura voskových směsí

Cílem této kapitoly je prozkoumat možnosti používaných vosků, jejich struktury, vlastnosti a způsoby jejich regenerace.

Vosk je nejstarším termoplastickým materiálem, který je člověku znám. Jelikož může být odléván nebo formován v kapalném, polotekutém nebo pevném stavu, jeho historie je úzce spjata s uměním, řemesly a s rozvojem metody vytavitelného modelu v průmyslu. V raných dobách byl proces ztraceného vosku používán řemeslníky z Číny a Egypta, ale proces se nazýval pouze „včelí vosk“. V dnešní době se však v průmyslu přesného lití název vztahuje na jakoukoli látku mající voskovitou vlastnost.

Moderní voskové směsi určené k vytvoření vytavitelného modelu jsou komplexní sloučeniny skládající se z mnoha složek, jako je přírodní uhlovodíkový vosk, přírodní esterový vosk, syntetický vosk, přírodní a syntetické pryskyřice, organická plniva a voda. Mnoho kombinací takovýchto sloučenin bylo vyvinuto tak, aby vyhovovaly různým požadavkům. Mezi těmito požadavky se nachází např.: bod tavení, tvrdost, viskozita, teplotní roztažnost, kontrakce, rychlost tuhnutí aj. Většinou se jedná o sloučeniny s přímým řetězcem uhlíkových atomů (uhlovodíkový, esterový vosk a mnoho typů syntetických vosků a pryskyřic), nicméně některé z použitých pryskyřic a plniv mohou být také sloučeniny atomů uhlíku strukturovaných v kruhu. Obecně platí, že čím kratší jsou tyto řetězce, tím nižší je bod tání vosku a tvrdost vosku. S rostoucí délkou řetězce stoupá jak tvrdost, tak i bod tání nebo tuhnutí. Délka řetězce má dále vliv i na viskozitu a rozpustnost vosku.

Skutečnost, že vosky určené k odlévání mají velký počet složek o různých délkách řetězců, vede k tomu, že se vosk netaví okamžitě při jeho zahřívání, ale prochází přechodným stavem. Toto chování je znázorněno na obr. 28. [1]

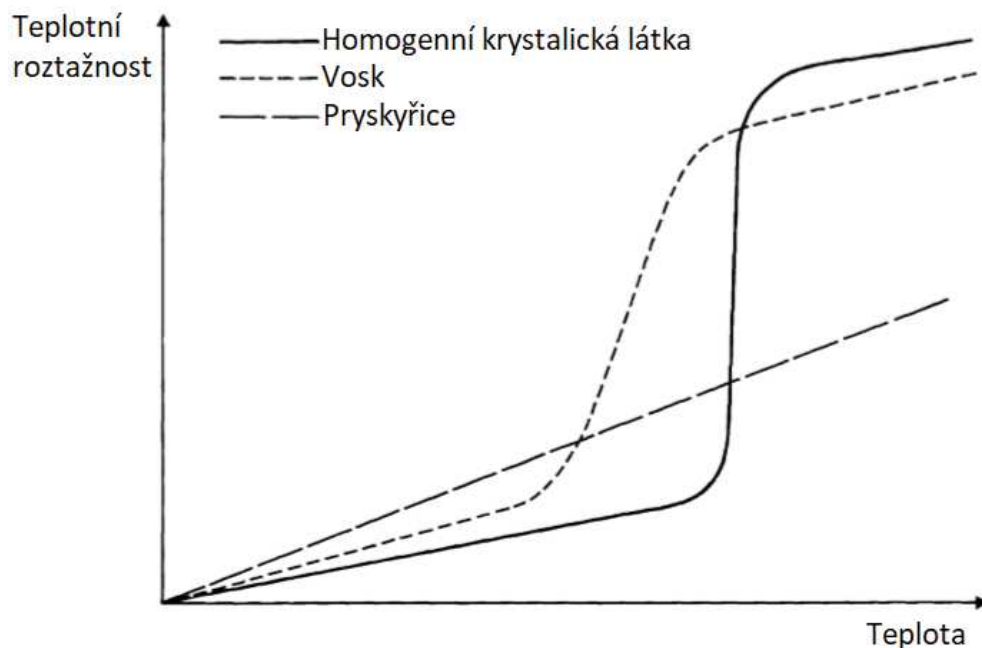


Obr. 28: Stavy vosku (změna tvrdosti) v závislosti na změně teploty [1]

Jak je vidět z tvaru křivky na obr. 24, při postupném zahřívání vosk měkne, stává se plastickým, dalším zahříváním poloplastickým. Při vyšší teplotě dosahuje polotekutého stavu, při dalším zahřívání již tekutého stavu. Skutečný tvar křivky a teplotní rozmezí každého stavu se pro každou směs liší a záleží na jejím specifickém složení. Při ochlazování bude samozřejmě docházet k opačnému průběhu, v kratším nebo delším teplotním rozmezí, v závislosti na složení směsi.

Struktura nebo složky vosku ovlivní jeho teplotní roztažnost a kontrakci. Ve srovnání s kovem je roztažnost vosku relativně vysoká. U vosků rychlost teplotní roztažnosti a kontrakce v rozmezí zhruba 20 °C a teplotou tání není rovnoměrná, ale mění se v teplotním rozsahu v závislosti na jejich struktuře.

Na obr. 29 jsou pro ilustraci zobrazeny tři odlišné typy materiálů: homogenní krystalická látka, vosk a nekystalická pryskyřice. Krystalická látka podléhá relativně malé teplotní roztažnosti, v bodu tání se krystalická struktura náhle rozpadne a dojde k přechodu do kapalného stavu, což se vyznačuje náhlým zvýšením objemu. V kapalném stavu jsou již změny opět malé. Ve vosku se frakce krátkých řetězců stávají měkkými i při nízkých teplotách, čímž se postupně zvyšuje objem materiálu. Při teplotě, kdy dochází k strmějšímu růstu křivky, se začínají natavovat krystalické frakce vosků o vyšší molekulové hmotnosti. Nekystalická pryskyřice se vyznačuje rovnoměrným růstem teplotní roztažnosti po celou dobu zahřívání. Nedochází k prudkému nárůstu expanze, protože v pryskyřici nejsou přítomny žádné krystalické prvky. Proto přidáním některých pryskyřic do vosku může snížit krystalickou strukturu a tím pomoci snížit teplotní roztažnost, resp. kontrakci voskové směsi. [1]



Obr. 29: Porovnání průběhu teplotní roztažnosti [1]

6.2 Rozdělení voskových směsí

Voskové směsi pro výrobu modelů se dělí do tří skupin: neplněné vosky, emulgované, plněné a ostatní. [1]

6.2.1 Neplněné vosky

Jedná se o složité sloučeniny složené z mnoha vosků a pryskyřic. Povrch modelů z těchto vosků obvykle bývá lesklý. Tyto směsi mohou být ve většině případů regenerovány a znovu použity na vytvoření jak vtokové soustavy, tak i samotných modelů. [1]

6.2.2 Emulgované vosky

Tyto vosky obsahují podobné základní materiály jako vosky neplněné, ale jsou emulgovány vodou, obvykle v rozmezí mezi 7 až 12 %. Voda zde působí částečně jako plnivo a díky tomu dochází pouze k velmi malému vzniku dutin ve směsi (kavitaci). Povrch modelů je velmi hladký. Díky své všestrannosti jsou široce používány. Mohou být opětovně regenerovány a dále použity na modely i vtokové soustavy. [1]

6.2.3 Plněné vosky

I v této skupině jsou základní materiály podobné dvěma předchozím skupinám, ovšem zde je do těchto směsí vmíšeno inertní plnivo ve formě prášku, které je v základním vosku nerozpustné. Tento krok zvýší stabilitu vosku a sníží vznik dutin ve směsi (kavitaci). Je nezbytné, aby bylo použito organické plnivo z důvodu zajištění úplného vyhoření a nezanechání žádného popela. Dalším důležitým parametrem je velikost částic. Čím jemnější částice budou, tím hladší bude povrch. Hustota plniva by se

měla blížit hustotě voskové směsi z důvodu minimální separace složek v tekutém stavu. Tyto vosky mohou být regenerovány a taktéž znovu použity na modely i vtokové soustavy. [1]

6.2.4 Ostatní vosky

- Vosky na vtokové soustavy – jsou z podobných základních materiálů jako vosky neplněné a jsou smíchány s plnivou, které zaručí dostatečnou pevnost vtokové soustavy.
- Zregenerované vosky – jsou důkladně vyčištěné a dále namíchané na dohodnuté specifikace. Většinou je regenerace vosků prováděna jejich výrobcem.
- Vosky rozpustné ve vodě – jsou používány pro vytvoření vnitřních tvarů. Vosky jsou rozpustné ve vodě, případně v mírně kyselých roztocích.
- Ostatní speciální vosky – jedná se o neplněné vosky používané na ponořování, opravování a lepení. [1]

6.3 Vlastnosti voskových směsí a jejich vliv na kvalitu

Jak je již výše uvedeno, voskové směsi se skládají z komplexních sloučenin. Každá složka ovlivňuje vlastnosti voskové směsi. Ideální směs by měla mít následující vlastnosti:

- co nejnižší teplotní roztažnost při ohřevu a co nejnižší smrštění při chladnutí;
- co nejnižší obsah popela (v ideálním případě do 0,05 %);
- dostatečnou tvrdost a elasticitu, aby se při další manipulaci snížila možnost ohybu, zlomení, či jiného porušení;
- co nejlépe reprodukovat tvar formy;
- nelepit se na formu;
- optimální viskozitu vztahenou k aplikaci vosku – v případě nutnosti vytvoření velmi jemných detailů je vhodné mít směs s nízkou viskozitou, aby do daných míst mohl vosk dobře proniknout;
- schopnost vytvořit kvalitní povrch (v ideálním případě hladký a lesklý), nežádoucí povrch může být měkký, snadno poškoditelný, se štěrbinami (ty se většinou vytvoří v důsledku použití moc hrubých částic plniva);
- co nejkratší dobu tuhnutí;
- stabilitu vůči oxidaci;
- chemickou inertnost vůči materiálu keramické břechky;
- co nejvyšší smáčivost ve styku s keramickou břechkou;

- dobrou recyklovatelnost;
- netoxicitu, aj. [1, 2, 3]

Na základě znalosti bodu tání a bodu tuhnutí dané směsi je nastavena teplota, při které je vosk vstříkovan.

6.4 Voskový tisk

Jednou z variant nejpřesnějšího voskového tisku je oblast šperkařského průmyslu. Například společnost Solidscape vyrábí vysoce přesné 3D tiskárny pro výrobu voskových vzorů, které se vyznačují vysokou kvalitou povrchu, přesností a eliminují potřebu post-processingových operací po samotném odlití metodou ztraceného vosku. Vedle použití ve šperkařském průmyslu se těchto tiskáren využívá také k výrobě biomedicínských výrobků, v ortopedii, výrobě zubních protéz aj.

Jedná se o technologii spadající do procesu material jetting, konkrétně technologie „DoD“ (Drop on Demand). DoD je charakteristická tím, že materiál je nanášen pouze v jednom bodě v podobě mikro kapiček. Tiskárny mají dvě tiskové hlavy, které se používají pro tryskání dvou různých materiálů najednou – voskového materiálu a podpůrného materiálu. [47]

Konkrétně model S390 dokáže udělat tloušťku vrstvy od 0,0254 mm do 0,0508 mm, při rozlišení 197 x 197 bodů/mm v osách X a Y. Přesnost tisku může být až 25,4 μm mezi jednotlivými vrstvami. (Např. u technologie FDM je obvyklá tloušťka vrstvy 0,2 mm). Tyto parametry jsou samozřejmě vykoupeny pořizovací cenou i provozními náklady. Pořizovací cena modelu S390 je 55 650 \$. Voskový materiál Midas se vyznačuje čistým vyhořením, žádnou tepelnou roztažností a stojí 200 \$/balení (360 g). Podpůrný materiál Melt, který se rozpouští v kapalném roztoku, stojí 165 \$/balení (230 g). Na obr. 30 je stromček modelů vytvořený pomocí této technologie a materiálu. [48, 49, 50]



Obr. 30: Stromeček modelů prstenů vyrobený technologií DoD [51]

Z důvodu vysokých pořizovacích nákladů se tato technologie vyplatí zejména ve šperkařství, jelikož se zde odlévají drahé kovy, jako je zlato, stříbro a platina.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentální části bude určit optimální AM technologii, která by byla použita pro výrobu vytavitelného modelu. Tento cíl v sobě zahrnuje vytvoření modelů zvolených klapků pomocí rozdílných AM technologií. U vytvořených modelů bude provedeno jejich porovnání. Mezi významné parametry, které budou při tomto porovnávání hodnoceny, patří kvalita povrchu vytvořených modelů, tj. jejich drsnost, profil a množství a typy defektů, které do značné míry ovlivňují kvalitu odlitku, a pracnost jeho dalšího opracování. Protože budou modely vytvořeny z různých typů materiálů, bude u nich vybranou zkouškou stanoven nespalitelný podíl, který opět ovlivňuje konečnou jakost odlitku, zejména pak množství povrchových, ale i podpovrchových defektů, které mohou do značné míry zvýšit náročnost opracování odlitku a ve svém důsledku mohou vést až ke zkrácení jeho životnosti. Po realizaci výše uvedených experimentů bude provedeno experimentální odlití cínové kompozice. Na vytvořených odlitcích bude hodnocena jakost povrchu, která bude ovlivněna jednak použitými AM technologiemi a materiály použitými k výrobě modelů, ale také interakcí tekutého kovu s formovacím materiálem. Konečné rozhodnutí o nevhodnější variantě použitelnosti AM technologií pro slévárnu drobných odlitků bude vycházet z výsledků získaných v rámci experimentů provedených v této práci a dále na základě ekonomického hodnocení použitých AM technologií.

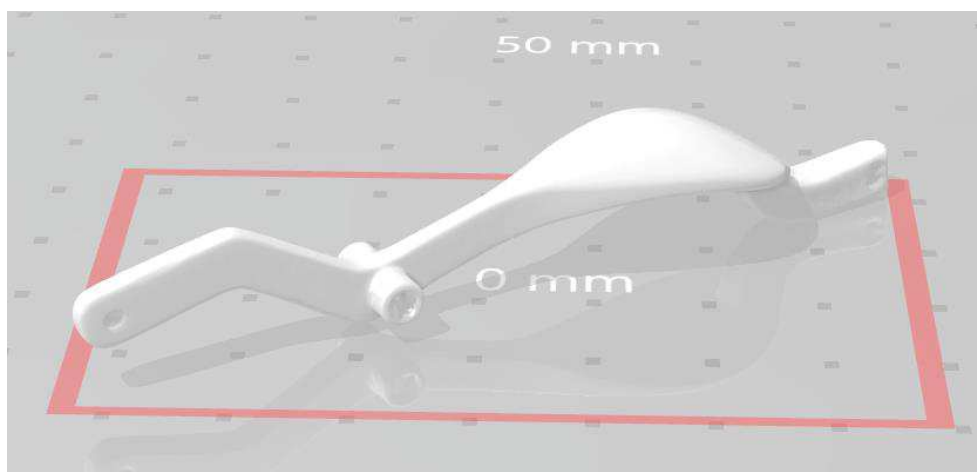
7 Příprava modelů a jejich zpracování

Ze slévárny byly pro tvorbu virtuálních modelů dodány dva typy klapek – klapky 1 a 2, viz obr. 31.



Obr. 31: Bronzové odlitky klapek (stav po slévárně)

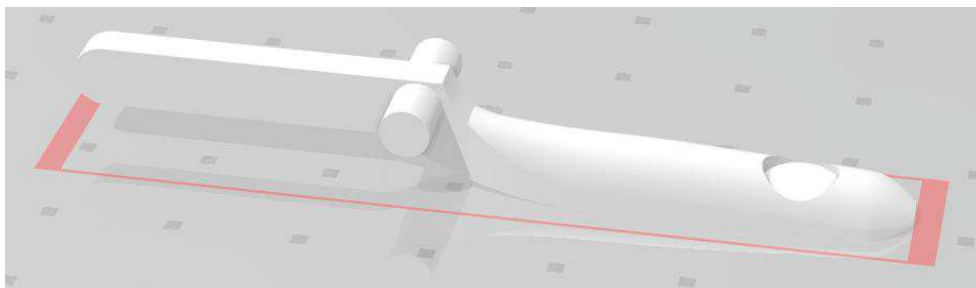
Z obr. 31 je patrné, že se tyto klapky lišily svojí geometrií. Tvar ploch u „klapky 1“ neumožňoval její proměření pomocí běžně používaných metod. Z toho důvodu byl její virtuální model vytvořen pomocí 3D měřicího ramena se skenerem. Níže, viz obr. 32, je zachycen vytvořený virtuální model, který byl pro další zpracování uložen ve formátu stl.



Obr. 32: Model – Klapka 1

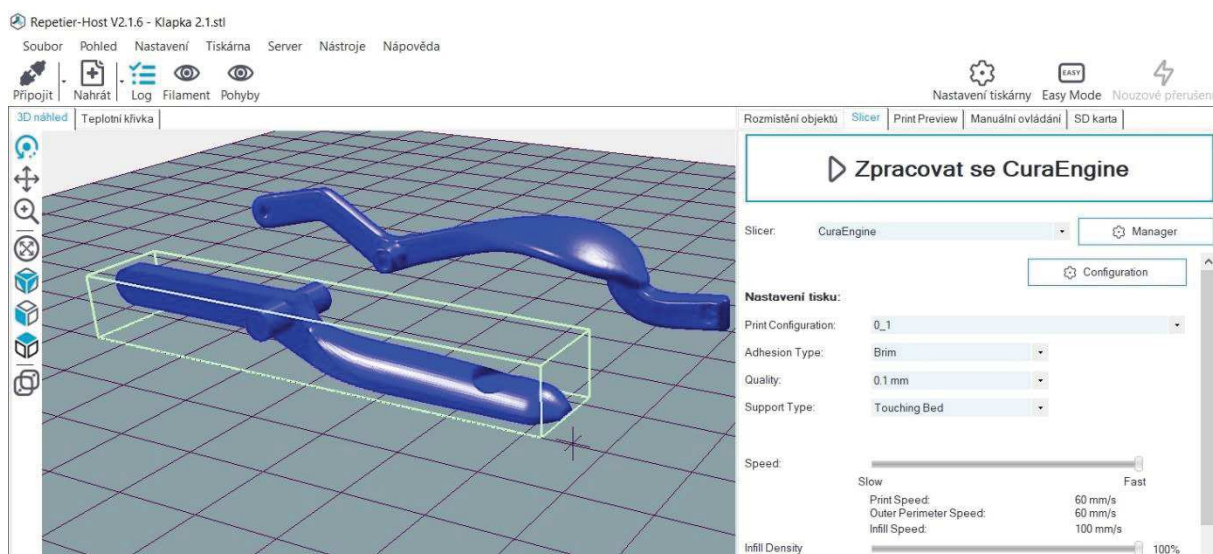
V případě druhého dodaného vzorku klapky („klapka 2“) byl její virtuální model vytvořen na základě jejího proměření pomocí různých typů ručních měřících nástrojů. Níže, viz obr. 33, je zachycen vytvořený virtuální model, který byl vytvořen v CAD systému a uložen v co nejvyšší kvalitě ve formátu stl. Dva různé typy virtuálních modelů

s různě složitou strukturou povrchu byly vybrány proto, aby bylo možné určit kvalitu jejich tisku při použití různých AM technologií, a tak zjistit, jak ovlivňuje geometrie modelu konečnou kvalitu zpracování výrobku.



Obr. 33: Model – Klapka 2

Po vytvoření obou virtuálních modelů byly stl soubory nahrány do softwaru určeného pro jeho zpracování před 3D tiskem. V dnešní době těchto softwarů existuje mnoho. Příkladem může být fakt, že u každého zařízení použitého pro tisk klapek, byť pracujícím na stejném principu, byl použit rozdílný software. V případě tisku klapek z PLA (FDM) a MoldLay (FDM) byl pro zpracování vytvořených modelů použit volně dostupný software „Repetier-Host V2.1.6“ spolu s tiskárnou „Geetech A10M“. Tento software byl vybrán, jelikož už byl pro tiskárnu dříve použit, a tím pádem v něm byly uloženy parametry tiskárny. V programu, který je určený pro FDM tiskárny, je možné měnit pozici nahraných modelů na pracovní podložce, jejich rotaci, měřítko, duplikovat je aj. Po provedení jejich rotace a posunutí na požadované místo (viz obr. 34), přichází na řadu nastavení parametrů pro tisk. Toto nastavení bylo provedeno ve sliceru „CuraEngine“. Slicer provede rozvrstvení daných modelů do ploch. Tyto plochy jsou poté postupně tištěny (vrstva po vrstvě). V podstatě se jedná o převedení formátu stl do G-Kódu, podle kterého se extrudér tiskárny pohybuje, vytlačuje materiál, nahřívá materiál a podložku atd.



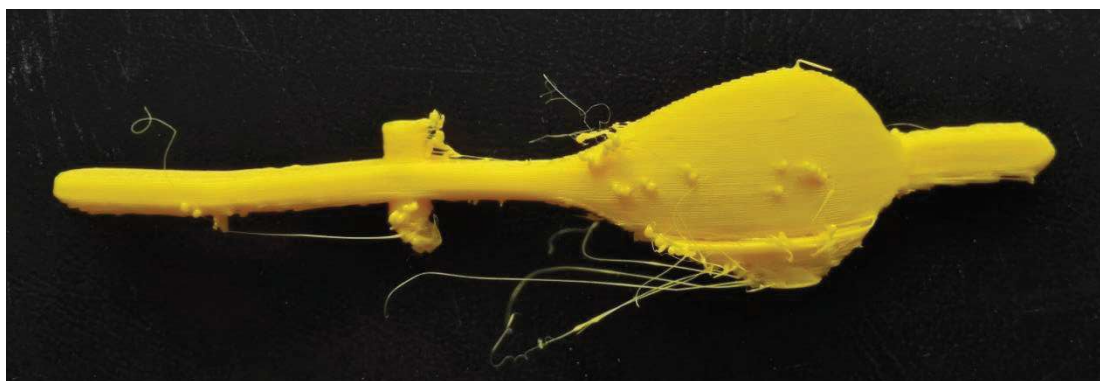
Obr. 34: Výřez z prostředí programu Repetier-Host

Po provedení slicingů jsou programem zobrazeny následující parametry: přibližná doba tisku, počet vrstev a potřebný filament v mm. Celý průběh tisku je možné si projít vrstvu po vrstvě ještě před tím, než se spustí samotný tisk. V případě, že je tisk spuštěn, je možné v jeho průběhu měnit parametry pomocí manuálního ovládání.

8 3D tisk pomocí technologie FDM

Tato kapitola se zaměřuje na popis tisku pomocí technologie FDM. Jedná se o samostatnou kapitolu z toho důvodu, že byla použita tři různá zařízení, přičemž na jedné tiskárně docházelo k odladění parametrů. Je zde tedy popsán postup přípravy tisku a tisku samotného.

Tisk modelů z materiálu PLA (FDM) a MoldLay (FDM) probíhal na tiskárně „Geetech A10M“. Zpočátku byly modely klapek tištěny podle výchozích (doporučených) nastavení, která byla v programu „Repetier-Host“ přednastavena. Ovšem výsledky prvních hotových modelů byly špatné. První modely byly velmi hrubé, měly velké množství povrchových vad, spousty otřepů, případně byly na úzkých místech zkroucené, viz obr. 35 a 36. Z toho důvodu byly nejdříve hledány optimální teploty pro extrudér a podložku. Tyto parametry byly poměrně rychle odladěny, jelikož pro každý materiál je výrobcem doporučené rozmezí teplot pro tisk. Nalezení optimální kombinace teplot bylo viditelné zejména na přilnavosti k podložce. Tím se zatím kvalita tisku nijak výrazně nezlepšila.



Obr. 35: Detail otřepů



Obr. 36: Detail povrchových děr (model je průhledný)

V tab. 3 jsou uvedeny úkony, které byly provedeny a dále jsou detailněji popsány.

Úkon	Výsledek	
	Výhody	Nevýhody
Snížení výšky vrstvy	Zlepšení kvality povrchu, snížení drsnosti	Zvýšení doby tisku
Snížení rychlosti tisku	Zmenšení množství otřepů	Zvýšení doby tisku
Zpětné vtažení filamentu	Eliminace otřepů	x
Zvýšení tloušťky pláště	Snížení děr na povrchu, větší pevnost modelu	Zvýšení doby tisku, větší spotřeba materiálu
Snížení % podpor	Snazší odstranění podpor, úspora času a materiálu	Horší přilnavost první vrstvy modelu na podpory
Zvýšení % výplně (infill)	Snížení děr na povrchu, větší pevnost modelu	Nežádoucí, větší spotřeba materiálu a času
Zvýšení průtoku plastu	Eliminace děr, zvýšení pevnosti při zachování vnitřního dutého vzoru	Větší spotřeba materiálu

Tab. 3: Provedené úkony spolu s jejich vlivem na výsledek

V dalším kroku byla změněna výška vrstvy z původních 0,4 mm na 0,2 mm. Tím se snížila výsledná drsnost povrchu modelů, na druhou stranu se zvýšil čas tisku a přibýly otřepy, které byly způsobeny vysokou rychlostí pohybu extrudéru. Proto byly v dalším nastavení sníženy veškeré rychlosti. Snížení rychlostí významně snížilo množství otřepů (obr. 35), ale přineslo další prodloužení doby tisku. Pro téměř úplné odstranění otřepů byly nastaveny parametry zpětného vtažení (retrakce) filamentu při přejezdech extrudéru.

Po provedených změnách byly v modelech na horní straně viditelné díry dovnitř klapky (obr. 36), dále pak bylo obtížné odstranit podpory. Z toho důvodu byl vyzkoušen tisk klapky otočených o 90° podle osy y. Bylo vytisknuto několik řad modelů se změnami parametrů, ale v každém případě problém s dírami dovnitř klapky přetrvával, byť na menší ploše. Po vizuální kontrole modelů bylo zjištěno, že model je od poloviny své výšky kvalitnější než ve spodní polovině. Tento jev je způsoben špatnou přilnavostí spodní části k vytvořeným podporám. V horní části, kde se již klapky sbíhají k sobě, jsou vytvořeny kvalitní plochy, na které extrudér bezproblémově vytlačuje další materiál. Z tohoto poznání vychází další varianta tisku. Modely stl byly v CAD systému rozděleny na dvě poloviny. Tímto krokem se lehce prodloužil čas tisku, ale jednalo se o tisk bez podpor. Kvalita tisku byla až na drobné díry na povrchu dobrá. Po vytisknutí byly poloviny modelů

k sobě přiloženy, avšak nebylo možné dokonale eliminovat mezeru mezi nimi. Navíc by musela být řešena problematika vytvoření jejich trvalého spojení. Proto tato varianta byla zavrhnuta.

Po těchto experimentech a vizuálním porovnání modelů vytištěných v různých variantách, se dospělo k závěru, že modely ve vodorovné poloze jsou prozatím nejlepším řešením. Problematika děr v povrchu stále nebyla vyřešena, proto byly změněny parametry pro tloušťku pláště modelu. Společně s touto úpravou bylo sníženo % podpor. Tyto změny vyvolaly kladné výsledky. Došlo ke zmenšení děr na povrchu a ke snazšímu odstraňování podpor při zachování podobné kvality povrchu klapek.

Je třeba říci, že dalším krokem k odstranění povrchových děr byla změna % výplně (infill). Tato úprava ale neměla velký vliv na výsledek, navíc byla v rozporu s poznatky získanými v rešeršní části. Proto byl po celou dobu používán řídký obdélníkový vzor, konkrétně s 15 % výplně.

Pro získání co nejkvalitnějších modelů byla výška vrstvy nastavena na 0,1 mm, což je nejmenší možná výška, kterou tato tiskárna zvládne vytvořit. Kvalita povrchu klapky se opět zvýšila, ale stále přetrvával problém děr. Eliminace děr byla provedena zvýšením průtoku plastu na 130 % v průběhu tisku pomocí manuálního ovládání.

I přes odladění parametrů pro co nejlepší kvalitu modelů, se zde objevovaly lehké deformace na malých částech klapky a asi největší vadou byly plochy, které byly v kontaktu s podporami. Tento fakt je limitujícím parametrem metody FDM. Tyto plochy byly v porovnání s ostatními povrchy mnohem hrubší. Proto byly také voleny na strany klapky, které jsou méně důležitými z hlediska dalšího použití. V tab. 4 jsou uvedeny optimální parametry, které byly odladěny pro tiskárnu „Geetech A10M“.

Zjištěné optimální parametry tisku na zařízení „Geetech A10M“		
	Parametr	Hodnota
Rychlost	tisku	50 mm/s
	přejezdu	90 mm/s
	tisku pláště	30 mm/s
	tisku výplně	40 mm/s
Výška	vrstvy	0,1 mm
	první vrstvy	0,4 mm
	Tloušťka pláště	1,2 mm
	Výplň	15 %
	Rychlost retrakce	20 mm/s
	Retrakce	2 mm
	Průtok plastu	130 %
	Podpory	všude

Tab. 4: Odladěné parametry tisku pro „Geetech A10M“

Prvním z použitých materiálů byl PLA. Jedná se o kyselinu polymléčnou, která je biologicky plně odbouratelná. Vyrábí se z kukuřičného nebo bramborového škrobu, případně z cukrové třtiny. Jedná se o materiál pružný, tvrdý a odolný. Teplota tisku je doporučována v rozmezí 185 až 235 °C s teplotou podložky v rozmezí od pokojové teploty do 60 °C. Nevýhodou je, že po vytištění modelu je obtížné odstranit podpory. Vlastnosti materiálu: teplota tání v rozmezí 145 až 160 °C, bod vzplanutí 388 °C, je nerozpustný ve vodě a hustota je 1,24 g/cm³. [52, 53] Cena tiskové struny se liší podle výrobců. Jelikož se jedná o jeden z nejpoužívanějších materiálů, je mnoho možností. Cena je přibližně 300 až 1200 Kč/750 g. U levnějších strun nejsou zaručené vlastnosti materiálu, např. průměr struny se může mírně lišit. To při tisku může znamenat nerovnoměrný průvod filamentu a vytvoření nežádoucích vad.

Dalším materiálem je MoldLay. Jedná se o plastovou tiskovou strunu s vlastnostmi vosku. Při pokojové teplotě je materiál tuhý a pevný, ale při zahřátí nad 270 °C zkapalní. Tiskne se podobně jako PLA, teplota tisku je doporučena v rozmezí od 170 do 180 °C s podložkou okolo 40 °C. Jedná se o materiál nerozpustný ve vodě. Cena je 1770 Kč/750 g. [54, 55]

Dalším materiálem je ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Jedná se o amorfní termoplast, který je tuhý, houževnatý a odolný vůči mechanickému poškození. Vytištěné modely lze vyhladit použitím acetonu. Doporučená teplota tisku je 220 až 240 °C s teplotou podložky v rozmezí od 100 do 130 °C (v závislosti na velikosti modelu). Hustota ABS je 1,1 g/cm³ a ve vodě je nerozpustný. [56, 57] Rozlišení cen strun je podobná jako u PLA, přibližně od 400 do 2000 Kč/750 g.

Modely z ABS byly vytištěny na tiskárně „Original Prusa i3 MK3S“. Ačkoliv se jedná o konstrukčně stabilnější tiskárnu, než byla použita pro tisk již zmiňovaných materiálů, výsledné modely ABS byly více zdeformované, pravděpodobně z důvodu vyšších teplot při tisku. Aby bylo možné zhodnotit odlišnosti jiné tiskárny, byly na této tiskárně také vytisknuté modely z PLA, které předčily svou kvalitou modely vytištěné na tiskárně „Geetech A10M“.

Posledním z materiálů vytištěným na FDM tiskárně je PVA. Tyto modely byly vytištěné na tiskárně „Ultimaker S5“. PVA (polyvinylalkohol) je především určený jako podpůrný materiál pro dvouhlavé tiskárny, kde slouží k tisku podpor. Po vytištění je model vložen do vody a podpory z PVA se rozpustí, jelikož materiál je rozpustný ve vodě. V případě tisku klapek byly modely vytištěné pouze z PVA, včetně podpor. Podpory bylo poměrně obtížné odstranit. Doporučené teploty pro tisk jsou 180 až 200 °C s podložkou do 50 °C. Bod tání PVA je 163 °C. Hustota materiálu je 1,23 g/cm³. Cena tiskové struny je přibližně 1200 Kč/750 g. [58, 59, 60, 61]

V tab. 5 jsou přehledně uvedeny doporučené teploty tisku a teploty použité, odladěné pro tisk klapkek.

Materiál	Doporučený rozsah teplot tisku [°C]	Použité teploty [°C]	
		tisku	podložky
PLA	185 až 235	210	42
MoldLay	170 až 180	180	40
ABS	220 až 240	240	100
PVA	180 až 200	190	40

Tab. 5: Doporučené teploty a použité teploty pro tisk klapkek

9 3D tisk pomocí ostatních technologií

Modely z materiálu „Castable Wax“ byly vytištěné na tiskárně „Original Prusa SL1“. Tato SLA tiskárna má doporučenou výšku vrstvy 0,025 až 0,1 mm, což je v porovnání s FDM tiskárnami zásadní rozdíl. Castable Wax je fialový z 20 % voskem plněný fotopolymer vytvrditelný UV zářením. Výrobce zaručuje schopnost vytvoření složitých prvků s hladkým povrchem. Hustota materiálu je 1,11 g/cm³. Cena materiálu je 299 \$/litr. [62, 63] Modely vytvořené na této tiskárně byly plné. V případě, že by byly větší, bylo by možné použít dutých vnitřních struktur.

Modely z materiálu „VisiJet M3 Crystal“ byly vytištěné na profesionální tiskárně „ProJet 3510 HD“. Přesnost tiskárny je udávána na 0,025 až 0,05 mm na každých 25,4 mm. Tiskárna může používat dva materiály mezi kterými přepíná. [64] V případě tisku klapkek byla využita kombinace již zmiňovaného „VisiJet M3 Crystal“ a „VisiJet S300“. V případě M3 Crystal se jedná o průsvitný plast k vytvoření konečných modelů s dobrou odolností. Další vlastnosti tohoto materiálu jsou: teplota tání v rozmezí od 55 do 65 °C, bod vzplanutí při 185 °C, je mírně rozpustný ve vodě a jeho hustota je udávána na 1,1 g/cm³. Cena balení (2 kg) je 600 €. [65, 66]

V případě S300 se jedná o vosk určený k tvorbě podpor. Tento materiál je po tisku odstraněn. V případě, že by klapky nepotřebovaly žádné podpory, bylo by možné modely tisknout přímo tímto materiálem. Vlastnosti materiálu jsou: teplota tání v rozmezí od 55 do 65 °C, bod vzplanutí při 185 °C, je nerozpustný ve vodě a jeho hustota je udávána na 0,85 až 0,91 g/cm³. Cena balení (2 kg) je 350 €. [67, 68]

V obou případech, při tisku podpor i při tisku modelu, je materiál plný, resp. nejsou zde vytvářeny žádné duté vnitřní vzory.

Poslední modely klapkek byly vytištěné na tiskárně „HP Jet Fusion 4200“. Vstupní materiál je zde ve formě prášku, v tomto případě konkrétně „HP 3D High Reusability PA 12“. Jedná se o polyamid 12 (nylon 12). Je to odolný termoplast s vynikající chemickou odolností vůči olejům, tukům a zásadám. Výhodou tohoto tisku je, že nejsou používány podpory. Po vytištění je odstraněn nepoužitý prášek, který může být recyklován a znovu použit. Výtisky vyžadují odstranění tenké vrstvy nenataveného

materiálu, který ulpí na povrchu modelů. Toho je docíleno na tryskacím zařízení otryskáním. Vlastnosti materiálu jsou: teplota tání prášku je v rozmezí od 184 do 187 °C, bod vzplanutí je při dosažení teploty nad 400 °C, ve vodě je nerozpustný a hustota prášku je 1,01 g/cm³. Cena vytištěného materiálu se pohybuje v rozmezí 8 až 10 Kč/cm³. Cena balení (13 kg) by se tedy mohla reálně pohybovat okolo 104 000 Kč/balení, potom 1 kg prášku bude stát 8000 Kč. [69, 70, 71]

10 Zjišťování obsahu popela

Cílem této analýzy bylo určit podíl nespalitelných složek materiálů použitých k výrobě modelů klapek. Pro zjištění obsahu popela se jevila jako nejvhodnější metoda termogravimetrické analýzy (TGA). Ze získaných křivek TGA by byl patrný úbytek hmotnosti materiálu v závislosti na teplotě, resp. času. Nicméně metodu TGA nakonec nebylo možné provést, jelikož na již smluveném pracovišti došlo k poškození zařízení. Po dalším hledání místa, kde by bylo možné metodu TGA provést, došlo k dalšímu neúspěšnému pokusu, protože se v dané firmě zabývající se výrobou keramických obkladů analyzují pouze anorganické sloučeniny. Nicméně po vysvětlení problematiky byl firmou doporučen odborník pracující ve slévárně, který se tímto zabýval. Dle jeho doporučení byla vytvořena následující analýza.

Analýza spočívala v použití glazovaných porcelánových spalovacích kelímků, které byly důkladně očištěny a následně zváženy na analytické váze Radwag AS 220/C/2. Poté byl do každého kelímku vložen konkrétní materiál a kelímek s materiálem opět zvážen (viz obr. 37).



Obr. 37: Navážka před a po spálení (vpravo ve stejném pořadí)

Takto připravené kelímky byly vloženy do atmosférické komorové pece. Zde byl nastaven ohřev s rychlostí 10 °C/min na teplotu 720 °C. Teplota 720 °C byla vybrána na základě maximální dosažené teploty při výpalu formy ve slévárně AMATI – Denak. Výdrž na této teplotě byla zvolena 30 min, jelikož se jednalo o velmi malé množství materiálů. Během náběhu na teplotu docházelo přibližně od 200 °C k poměrně mohutné tvorbě dýmu, i přes to, že navážky byly pouze několikagramové. Následné ochlazování probíhalo v peci, aby nedošlo k případnému popraskání kelímků. Po jejich vyjmutí byly kelímky se zbytkovým popelem opět převáženy. Byly provedeny dva výpaly pro každý materiál. Při čištění kelímků nebyl téměř žádný problém s odstraněním zbytkového popela, pouze v případě tří materiálů došlo k přilnutí zbytkového obsahu popela ke kelímku a jeho odstranění bylo, v porovnání s ostatními materiály, o poznání obtížnější. Tento fakt by mohl v případě odlévání kovu do formy znamenat případný vznik vad. Na základě navážených hodnot byly vytvořeny tabulky 6 a 7, ve kterých jsou vidět hodnoty

jednotlivých navážek a vypočtený obsah zbytkového popela v %. V tabulce 8 je uveden aritmetický průměr z těchto dvou měření spolu se směrodatnou odchylkou. Obsah popela je uveden v % a je zaokrouhlen na tři desetinná místa.

Materiál	Kelímek [g]	Kelímek + materiál [g]	Kelímek + popel [g]	Materiál [g]	Popel [g]	Obsah popela [%]
Flexible Blue	13,297	15,483	13,298	2,186	0,001	0,046
Castable Wax (SLA)	12,513	14,618	12,515	2,105	0,002	0,095
PLA (FDM)	13,329	16,112	13,34	2,783	0,011	0,395
ABS (FDM)	13,235	14,374	13,238	1,139	0,003	0,263
MoldLay (FDM)	12,962	15,248	12,97	2,286	0,008	0,35
M3 Crystal - plast (MJM)	12,377	16,645	12,378	4,268	0,001	0,023
S300 - vosk (MJM)	13,61	17,243	13,611	3,633	0,001	0,028
PA 12 (MJF)	12,5146	14,7759	12,5246	2,2613	0,01	0,442
PVA (FDM)	13,2976	15,0785	13,2988	1,7809	0,0012	0,067

Tab. 6: Obsah popela – 1. měření

Materiál	Kelímek [g]	Kelímek + materiál [g]	Kelímek + popel [g]	Materiál [g]	Popel [g]	Obsah popela [%]
Flexible Blue	13,297	16,1779	13,2978	2,8809	0,0008	0,028
Castable Wax (SLA)	12,5142	14,1764	12,5153	1,6622	0,0011	0,066
PLA (FDM)	13,3292	15,2229	13,3365	1,8937	0,0073	0,385
ABS (FDM)	12,8935	14,0288	12,8967	1,1353	0,0032	0,282
MoldLay (FDM)	12,9616	14,7439	12,9681	1,7823	0,0065	0,365
M3 Crystal - plast (MJM)	12,3773	14,5599	12,378	2,1826	0,0007	0,032
S300 - vosk (MJM)	13,6094	16,0337	13,6096	2,4243	0,0002	0,008
PA 12 (MJF)	13,6093	16,0701	13,6201	2,4608	0,0108	0,439
PVA (FDM)	13,2356	15,2353	13,2368	1,9997	0,0012	0,06

Tab. 7: Obsah popela – 2. měření

Materiál	1. měření	2. měření	Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka [±]
	Obsah popela [%]			
Flexible Blue	0,046	0,028	0,037	0,009
Castable Wax (SLA)	0,095	0,066	0,081	0,015
PLA (FDM)	0,395	0,385	0,39	0,005
ABS (FDM)	0,263	0,282	0,273	0,009
MoldLay (FDM)	0,35	0,365	0,358	0,008
M3 Crystal - plast (MJM)	0,023	0,032	0,028	0,005
S300 - vosk (MJM)	0,028	0,008	0,018	0,01
PA 12 (MJF)	0,442	0,439	0,441	0,002
PVA (FDM)	0,067	0,06	0,064	0,004

Tab. 8: Souhrn procentuálního podílu popela

V tabulce uvedený vosk „Flexible Blue“ byl brán jako referenční materiál, jelikož je standardně používán ve slévárně AMATI – Denak, s.r.o. a vykazuje perfektní výsledky při tvorbě modelů a výpalu formy. Výrobce je obsah popela uváděn 0,007 %. [16] V rámci provedeného experimentu však vyšel obsah popela pro stejný materiál přibližně 5x vyšší (0,037 %). Zjištěná hodnota byla použita k porovnání s ostatními materiály.

Lepších výsledků dosahují materiály pro MJM – M3 Crystal (plast) a S300 (vosk), jeví se tedy jako ideální materiálová varianta pro použití ve slévárně.

Přibližně s dvojnásobným obsahem popela oproti „etalonu“ jsou materiály PVA (FDM) a Castable Wax (SLA). Nicméně obsah popela je pod hranicí 0,1 % a to se stále jeví jako velmi dobrý předpoklad pro použití ve slévárně. V případě materiálu z SLA výsledek navíc koresponduje s hodnotou uváděnou výrobcem. V datovém listě uvádí obsah popela v rozmezí od 0,0 do 0,1 %. [62] V případě materiálu PVA bylo kvůli jeho přilnutí k porcelánovému kelímku téměř nemožné odstranit zbytky popela.

Skupina materiálů používaných na tiskárnách FDM (až na PVA) se vyznačuje horšími výsledky o jeden řád. Vůbec nejhorším zástupcem je co do hmotnostního zbytku popela PLA. O něco lepší je MoldLay, ale zde by se daly očekávat nižší hodnoty zbytkového popela, protože se jedná o materiál přímo určený k následnému vytavení. Ze třech použitých materiálů pro FDM vychází nejlépe ABS. Na druhou stranu právě ABS se stal nejobtížněji odstranitelným materiálem z kelímku. Dá se předpokládat, že u ostatních materiálů, kde byl popel relativně volně přichycen, případně byl naprosto volně v kelímku, by došlo k podobnému průběhu i ve formě. Tyto zbytky by mohly být taveninou „pohlcneny“, čímž by způsobily zvýšení porézności vznikajícího odlitku. V případě pevně uchyceného popela z ABS na formě lze předpokládat, že dojde spíše ke vzniku povrchových vad.

Nevhodnost použití ABS je podpořena výsledky ze studie zaměřené na emisi nebezpečných ultrajemných částic a nebezpečných těkavých látek. V této studii byly porovnány nejčastěji používané materiály od různých výrobců (ABS, PLA, HIPS, nylon a

další). Z výsledků plyne, že při tisku ABS je produkován v relativně velkém množství styren, který je řazen mezi karcinogeny. [72] Proto z bezpečnostních důvodů nebude materiál ABS použit k tvorbě formy, jelikož již při jeho tisku vznikají škodlivé látky a při jeho spalování by se mohlo jednat ještě o větší hodnoty karcinogenních látek.

Materiál PA 12 (MJF) vykazoval nejvyšší hodnoty obsahu zbytkového popela (v průměru 0,441 %). Jedná se tedy o nejméně vhodný materiál, co se obsahu popelovin týče. Navíc bylo prakticky nemožné tyto zbytky odstranit z porcelánového kelímku.

11 Hodnocení kvality modelů

Tato kapitola je zaměřena na vizuální hodnocení povrchu polymerních modelů před jejich zaformováním. V případě modelů tištěných s použitím podpor, došlo před hodnocením povrchu k jejich odstranění.

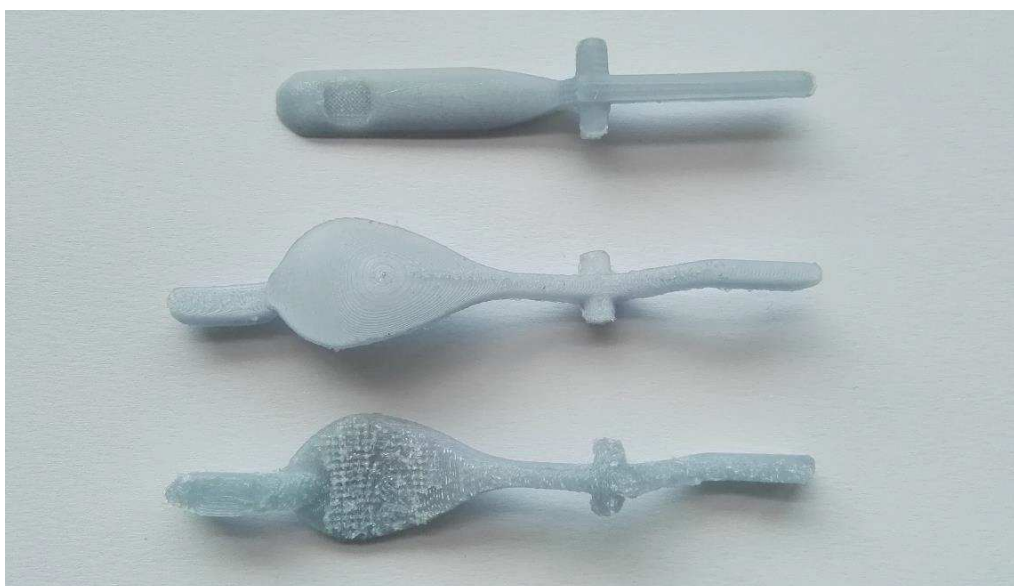
Nejprve jsou uvedeny klapky získané pomocí technologie FDM. V prvním případě se jedná o červené klapky z materiálu PLA (viz obr. 38) získané z tiskárny „Geetech A10M“. Při použití výšky vrstvy 0,1 mm bylo dosaženo relativně dobrých výsledků. Odstranění podpor nečinilo větší problém, nicméně po jejich odstranění, zejména u „klapky 1“, se objevovalo zdrsnění oproti zbytku povrchu. U těchto klapek bylo také pozorováno drobných deformací v oblasti čepů kolmých k ose klapky. Tato deformace byla vyvolána právě malou velikostí části, která neumožňovala dostatečné přilnutí první vrstvy k podložce/podpoře, a proto se v průběhu tvorby dalších vrstev deformovala. Na povrchu klapek jsou viditelné jednotlivé vrstvy, jak model vznikal.



Obr. 38: Klapky z PLA z tiskárny Geetech A10M

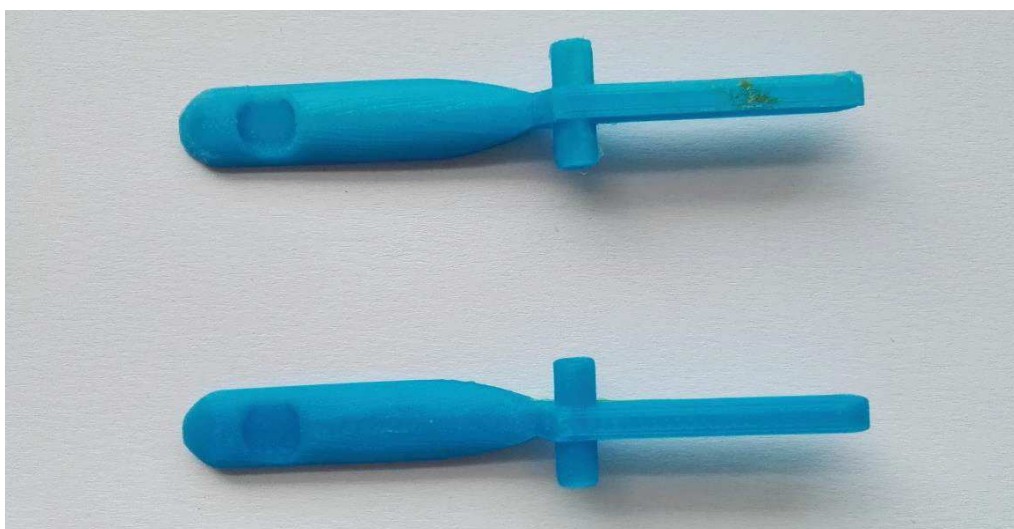
Další klapky tištěné na stejném zařízení jsou šedé klapky z materiálu MoldLay (viz obr. 39). Parametry tisku, až na teploty, byly stejné jako v prvním případě. Odstraňování podpor ihned po provedení tisku nečinilo problém. V případě, že byly podpory odstraňovány po úplném vychladnutí materiálu, již bylo jejich odstraňování náročnější.

Drsnější povrch po podporách a drobné deformace byly stejné jako v případě klapky z PLA. Na povrchu byly také viditelné jednotlivé vrstvy.



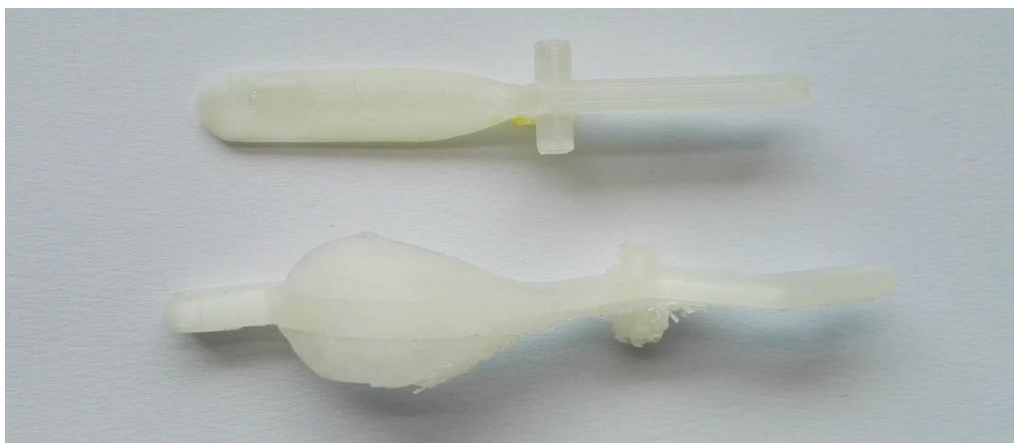
Obr. 39: Klapky z MoldLay z tiskárny Geetech A10M

Další sadou jsou klapky opět z materiálu PLA (tentokrát modré), ovšem ze zařízení „Original Prusa i3 MK3S“. V tomto případě byly vytištěny pouze modely „klapky 1“ při dvou nastaveních. Na obr. 40 je horní klapka při nastavení výšky vrstvy 0,05 mm a spodní při výšce 0,1 mm. Odstraňování podpor bylo bez problému, stopy po podporách téměř neznatelné. V případě horní klapky došlo k mírné deformaci čepů. Spodní model bez deformací. Nehledě na nastavení tisku, u obou klapky jsou viditelné jednotlivé vrstvy. Na stejné tiskárně byly vytištěny modely z ABS, nicméně modely byly velmi zdeformované, proto byly vyřazeny. Když k se k tomu přičte nevhodnost použití ABS z důvodu karcinogenity při výpalu, případně i jeho přilnutí k formě po výpalu, nejsou modely z ABS dále použity pro další experimenty.



Obr. 40: Klapky z PLA z tiskárny Original Prusa i3 MK3S

Poslední sada tištěná pomocí technologie FDM jsou čiré klapky z PVA. Tisk byl proveden na tiskárně „Ultimaker S5“ s nastavením výšky vrstvy 0,2 mm. V tomto případě došlo k nejobtížnějšímu odstraňování podpor vůbec. Vytisknuté modely jsou velmi křehké a snadno praskají podél vytvořených vrstev. Na obr. 41 byl horní model tištěn v poloze jako všechny předchozí, spodní model byl tištěn „na boku“. Právě na spodním modelu jsou viditelné zbytky podpor v oblasti čepu a na těle klapky jsou viditelné dvě podélné praskliny. Deformace v oblasti čepů jsou naprosto zanedbatelné. Opět jsou zde viditelné linie tisku. Na rozdíl od jiných materiálů tištěných na FDM tiskárnách, byly modely z PVA plné.



Obr. 41: Klapky z PVA z tiskárny Ultimaker S5

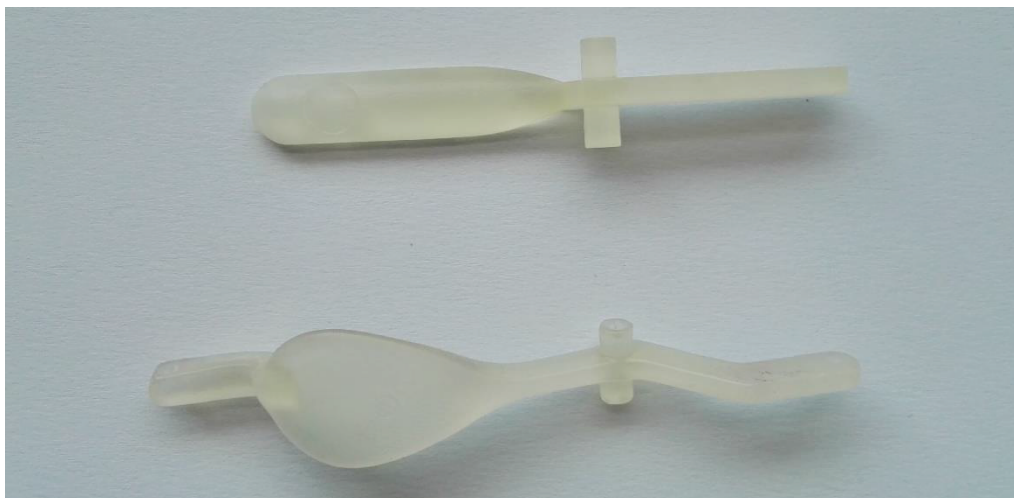
Další sada byla již vytištěna pomocí technologie SLA na zařízení „Original Prusa SL1“. Voskové fialové klapky z materiálu CastableWax jsou zobrazeny na obr. 42. Odstraňování podpor bylo bez potíží. Povrch je hladký, nejsou viditelné žádné defekty, až na jemné stopy po podporách pouze v několika bodech.



Obr. 42: Klapky z CastableWax z tiskárny Original Prusa SL1

Pomocí technologie MJM byly na zařízení „ProJet 3510 HD“ vytištěny čiré klapky, viz obr. 43. V této práci se jedná o jediné použití tisku využívajícího dvou materiálů – plastu „VisiJet M3 Crystal“ (klapky) a vosku „VisiJet S300“ (podpor). Odstranění voskové

podpory probíhá při zahřátí celku na teplotu v rozmezí od 55 do 65 °C, kdy při teplotě 60 °C dochází k tání vosku. Povrch je hladký, bez jakékoliv vady.



Obr. 43: Klapky z VisiJet M3 Crystal z tiskárny ProJet 3510 HD

Poslední sada klapek byla vytvořena pomocí procesu powder bed fusion, technologií Multi Jet Fusion (MJF) na zařízení „HP Jet Fusion 4200“. Na obr. 44 jsou zobrazeny šedo-černé klapky z materiálu PA 12, které jsou na omak jemně drsné. Klapky jsou bez defektů, pouze v jednom místě se nachází vada o průměru cca 1 mm, zasahující do přibližně 2 mm hloubky.



Obr. 44: Klapky z PA 12 z tiskárny HP Jet Fusion 4200

12 Zaformování, vytavení, výpal a odlévání

Před samotným zaformováním modelů bylo potřeba navrhnout vtokovou soustavu. Ta byla vytvořena v CAD systému a následně vytištěna na tiskárně „Geotech A10M“. Vtoková soustava byla navržena pouze z licí jamky a svislého vtokového kanálu. Zvoleným materiálem byl černý PET-G, který byl tištěn při teplotě podložky 80 °C a teplotě trysky 250 °C. Modely byly tištěny s výškou vrstvy 0,4 mm z důvodu úspory času. Černý filament byl vybrán z důvodu barevné odlišnosti vůči všem typům modelů. Po vytištění byly vtokové soustavy lepidlem spojeny s jednotlivými klapkami, viz obr. 45.



Obr. 45: Modely „klapky 2“ s vtokovou soustavou (první série)

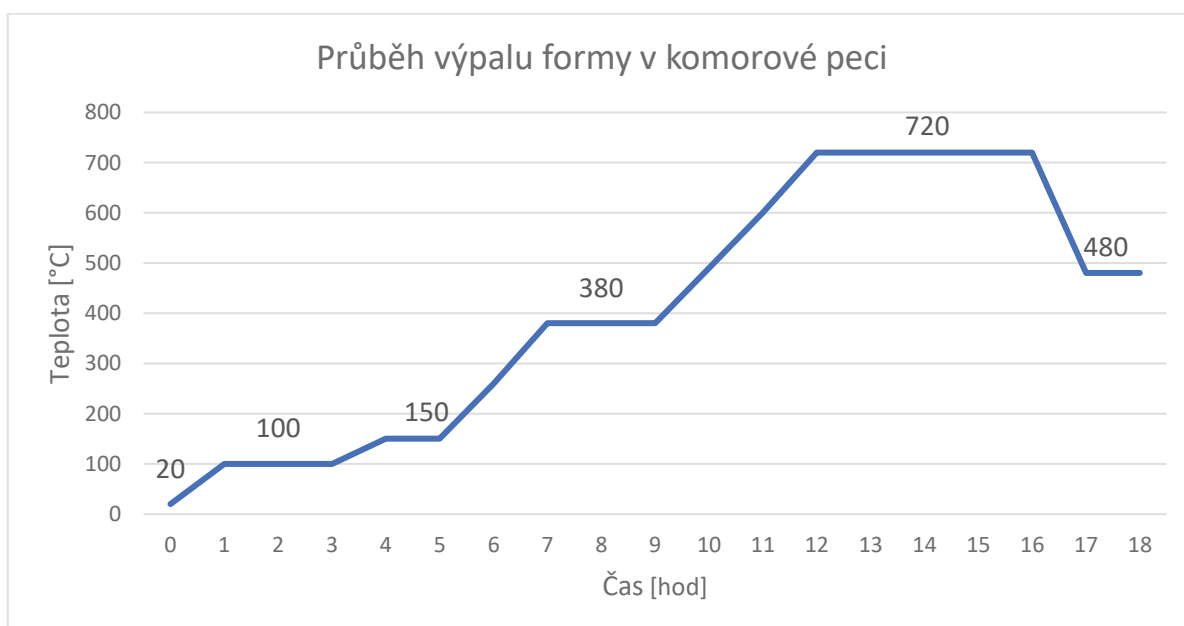
V dalším kroku bylo nutné vytvořit formu, do které bude odlita sádra a zaformován model. Tato forma byla vytvořena ze skleněných nádob, voděodolné pevné fólie a plastelíny. Na dno skleněné nádoby byla po okrajích umístěna rovnoměrná vrstva plastelíny, do které byla zasunuta fólie z důvodu zamezení vytékání sádrové směsi.

Poté bylo provedeno namíchání sádrové směsi s vodou. Byla použita sádra „Gold Star XL“, která je k tomuto účelu přímo určená. Sádrová směs byla navážena a smíchána s vodou. Poměr vody vůči sádře byl 4:10. Po důkladném promísání byla směs nalita do vytvořených forem a do směsi byly zasunuty modely spolu s vtokovou soustavou. K přípravě jedné dávky pro sérii tvořenou ze sedmi forem bylo použito 2400 g sádry a 960 g vody. Po odlití sádry docházelo k relativně rychlému tuhnutí směsi. U třech modelů z první série došlo k obtížnějšímu vsunutí modelů do směsi, právě z důvodu tuhnutí. Tento fakt se následně projevil na odlitcích (popsáno níže).

Po zaformování se vytvořené formy nechaly odstat po dobu 2 hod. Po jejich zatuhnutí byla sádra vyjmuta z formy, odstraněna plastelína, vyjmuty vtokové soustavy a sádrové formy byly označeny, viz obr. 46. Následoval výpal sádrových forem. Ten probíhal dle vzoru vypalovací křivky používané ve slévárně AMATI – Denak, viz graf 2.



Obr. 46: Sádra ve formách (nahore) sádrové formy po odstranění vtokové soustavy (dole)



Graf 2: Průběh teplot v závislosti na čase při výpalu v komorové peci

Jelikož odlévaným materiál měl být cín, s teplotou tání 232 °C, tak jedinou změnou ve vypalovací křivce byl pokles z maximální teploty 720 °C na teplotu 300 °C. Celý proces výpalu proběhl v komorové peci, ve které byly na dně umístěny porcelánové kelímky, na které byly vloženy sádrové formy otvorem dolů. Umístění forem na porcelánové kelímky bylo provedeno, aby v průběhu výpalu mohl materiál vytékat z formy. Při ustálení teploty na 300 °C, byly formy vyjmuty z pece a byl do nich odlit roztavený cín. Z první série proběhlo odlévání do 6 forem z celkových 7. Sedmá forma se v průběhu výpalu roztrhla, jednalo se o formu s modelem z materiálu M3 Crystal (MJM).

V tomto případě se jednalo o plný model klapky. Na obr. 47 je umístění forem v komorové peci a formy po odlévání, včetně zmiňované roztržené formy.



Obr. 47: Umístění forem na kelímcích v peci (vlevo), formy po odlití (vpravo)

Na základě získaných poznatků z první série byla připravena druhá série. V přípravě druhé série došlo k úpravě zaformování modelu včetně vtokové soustavy. To převážně z důvodu rychlého tuhnutí sádrové směsi, kvůli kterému bylo obtížné vsunout model do sádrové směsi (popsáno výše). Druhá série obsahovala jednu „klapku 2“ a šest „klapek 1“, u kterých byl již vytištěn i vtokový kanál, proto byla přilepena pouze licí jamka. Tentokrát byly připravené modely umístěny rovnou do formy vzhůru nohama (viz obr. 48), do které byla po vložení fólie nalita sádrová směs.



Obr. 48: Příprava druhé série před odlitím sádry

Výhodou této varianty byla možnost setřesení forem po odlití sádry. Při střešení docházelo k úniku bublin z ještě tekuté sádry, což eliminovalo vznik defektů na odlitcích. Následný postup byl již stejný – odstání, vyjmutí z forem, vyjmutí licích jamek, označení sádrových forem a vložení do pece. Při vyjmutí z pece byla forma, ve které byl plný model z PA 12, v horní polovině prasklá. Při odlévání do této formy z ní roztavený kov vytékal. U ostatních forem došlo k odlití kovu bez problému.

Varianta zaformování jednotlivých klapek byla vybrána z experimentálních důvodů. Úspornější variantou je vytvoření vtokové soustavy s vtokovým kulem, na který budou připojeny všechny ostatní modely, a vytvoření jedné větší sádrové formy. Nicméně v případě že jsou zaformovány modely z různých materiálů, by mohlo dojít k poškození této formy, a to vést ke znehodnocení výsledků.

V případě zaformovaného materiálu PVA byl uvažován ještě zcela jiný přístup odstranění vytištěného modelu z formy. PVA je ve vodě rozpustný, proto se nabízela varianta model rozpustit. Na zkušební fólii o šířce 5 mm byla vyzkoušena rozpustnost materiálu. Rozpouštění probíhalo relativně pomalu, a to navíc při působení tekoucí vody. Dále pak po zaformování modelu byl ve formě pouze malý otvor a za předpokladu rozpouštění by tato operace trvala hodiny. Nehledě na chování sádrové směsi s vodou, které by mohlo formu porušit.

13 Odlitky

Po vychladnutí byly sádrové formy rozbity dlátem a odlitky z nich byly vyjmuty. Na obr. 49 jsou vidět „rozpůlené“ formy první série vzorků. Rozbití forem bylo jednoduché, po vyjmutí odlitků se z klapek snadno odstranila zbylá sádrová směs. V dalším kroku byly odřezány vtokové soustavy a z méně přístupných míst na modelech klapek byly důkladně očištěny zbytky sádrové směsi.



Obr. 49: „Rozpůlené“ sádrové formy s odlitky

Na obr. 50 jsou viditelné klapky z první série odlévání včetně vtokových soustav. Jak již bylo zmíněno výše, u prvních tří klapek došlo k zasunutí modelů do již více ztuhlé sádrové směsi. Tento krok zanechal na odlitcích nežádoucí stopy směrem od čepů nahoru (myšleno směrem k licí jamce – zvýrazněno na obr. 50). Při zasunutí čepy vytvořily v sádrové směsi drážky, které se již kvůli viskóznějšímu chování sádrové směsi nestihly zcela zacelit. Tyto defekty byly částečně odstraněny odřezáním a odbroušením, jelikož se jednalo o defekty vzniklé chybou v přípravném procesu, nikoliv chybou materiálu.



Obr. 50: Odlitky z první série, u prvních tří označena místa defektů

14 Hodnocení kvality odlitků

Tato kapitola je zaměřena na vizuální hodnocení povrchu odlitků, jehož cílem je určit typy defektů, které jsou spojeny s procesem odlévání vybrané slitiny kovu. Toto hodnocení v sobě zahrnuje hodnocení povrchových vad a hodnocení podpovrchových vad pomocí RTG analýzy.

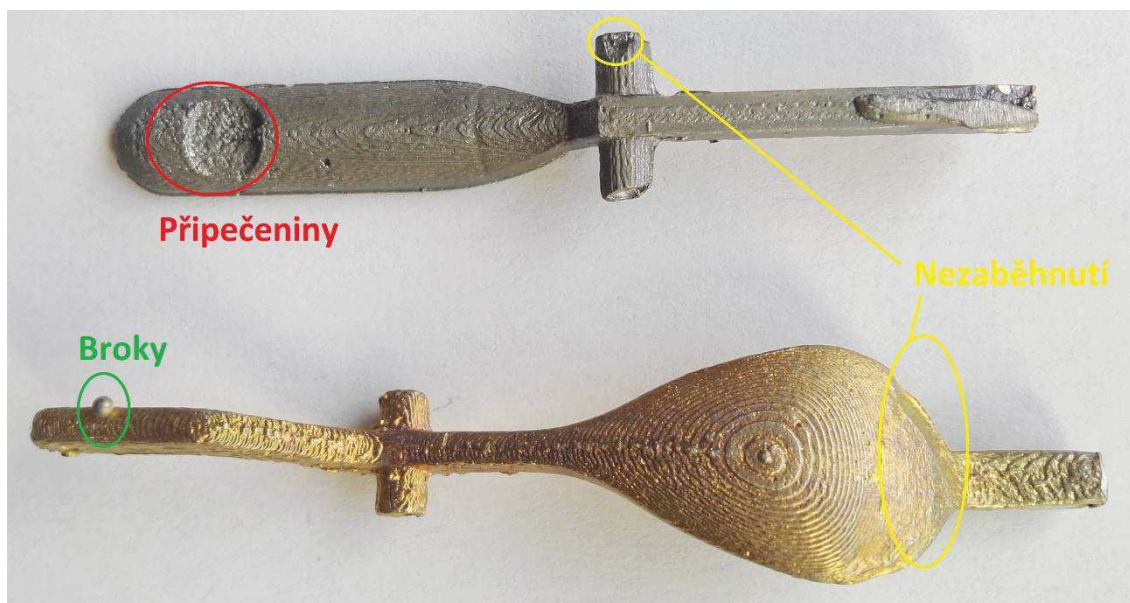
14.1 Vizuální hodnocení povrchu odlitků

Vady odlitků jsou popsány v normě ČSN 42 1240 – „Vady odlitků. Názvosloví a třídění vad“, která je dělí do 7 základních skupin. Každá skupina má svoje číselné označení (100 až 700), jednotlivé vady jsou označeny konkrétním číslem. V tab. 9 jsou popsány nejčastěji se vyskytující vady a jejich pravděpodobné příčiny.

Skupina vad	Podskupina vad	Název druhu vady	Příčina	Odstranění
Vady tvaru, rozměrů a hmotnosti (100)	Chybějící část odlitku bez lomu (110)	Nezaběhnutí (111)	Zatuhnutí vtokového kanálu dříve než samotného odlitku; zamezení přívodu taveniny	Návrh vhodnější vtokové soustavy
Vady povrchu (200)	Přípečeniny (210)	Drsný povrch (211)	Interakce kovu se zbytkovým popelem a se sádrovou formou	Volba optimálního materiálu
	Zatekliny (260)	Prasklá forma (263)	Plný model	Návrh dutého modelu
Makroskopické vměstky a vady mikrostruktury (500)	Broky (540)	Broky (540)	Zaformování bez setřesení	Úprava technologie zaformování

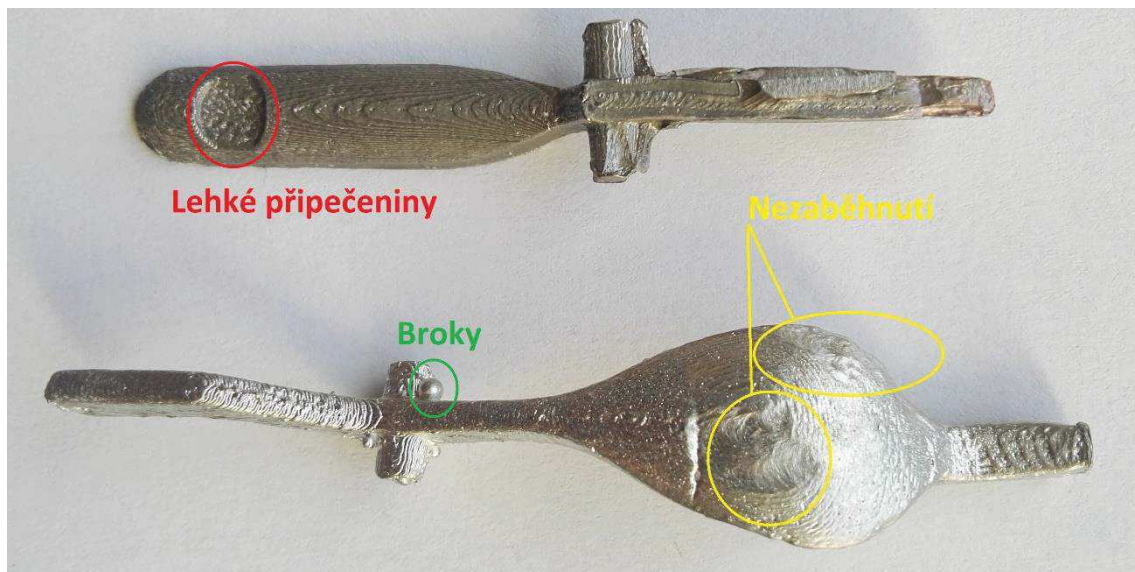
Tab. 9: Vyskytující se vady odlitků vybrané z normy ČSN 42 1240 – „Vady odlitků. Názvosloví a třídění vad“

Nejprve jsou uvedeny klapky získané pomocí technologie FDM. V prvním případě se jedná o klapky z předlohy z materiálu PLA z tiskárny „Geetech A10M“. U těchto odlitků se objevují konkrétní vady vždy jen na malé ploše, vady jsou označeny na obr. 51. Na odlitcích jsou patrné jednotlivé vrstvy dané technologií tisku.

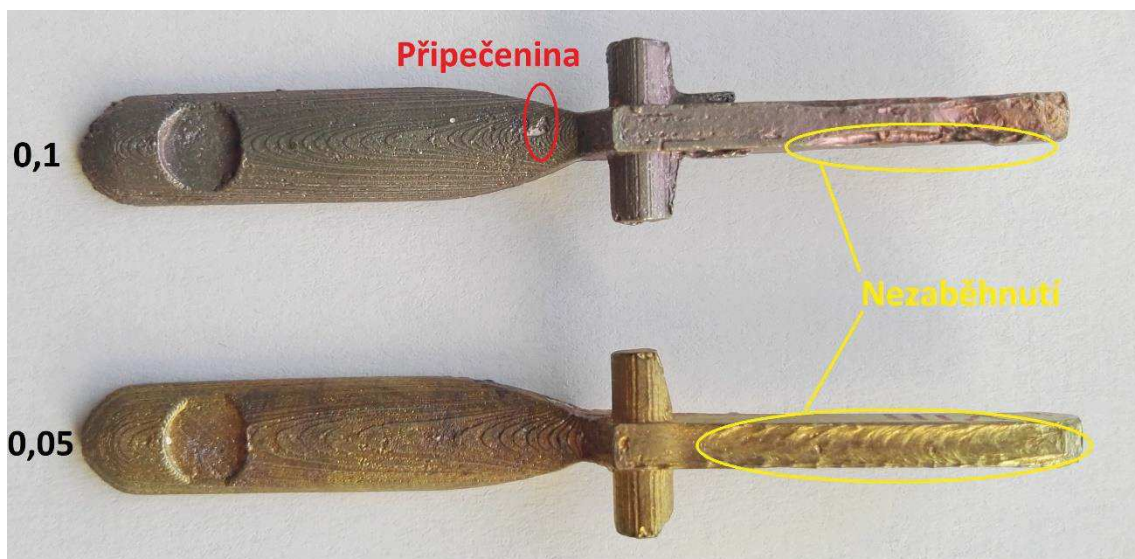


Obr. 51: Klapky z PLA z tiskárny Geetech A10M

V dalším případě se jedná o odlitky vytvořené vytavením modelů z MoldLay (FDM), viz obr. 52. Opět jsou zde viditelné jednotlivé vrstvy, nezaběhnutí na „klopce 1“ ve více oblastech.

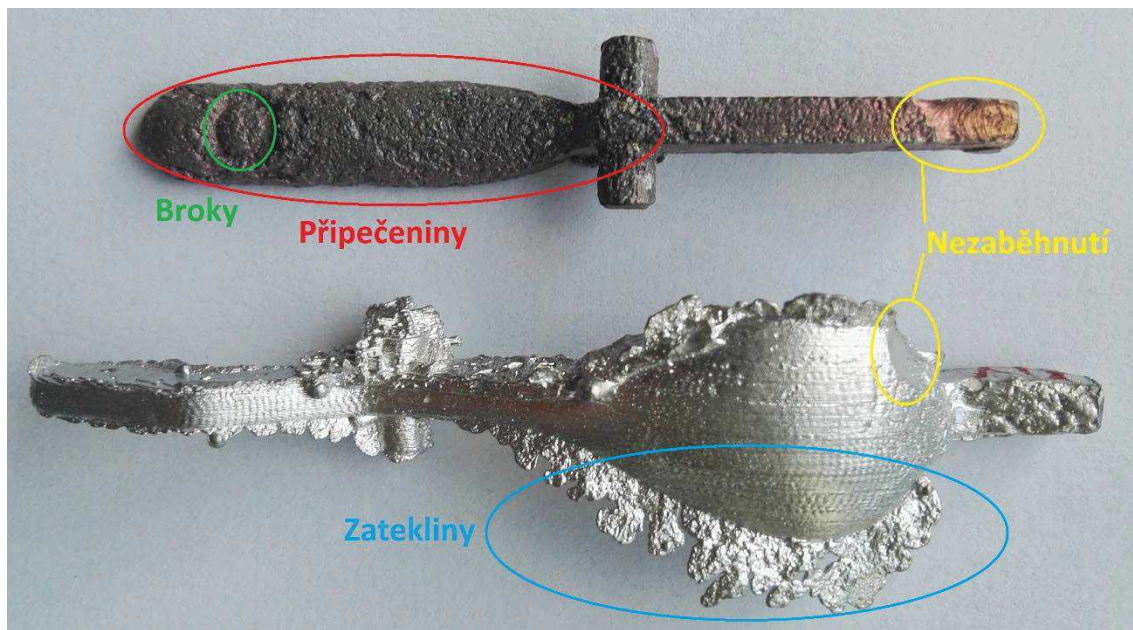


Obr. 52: Klapky z MoldLay z tiskárny Geetech A10M



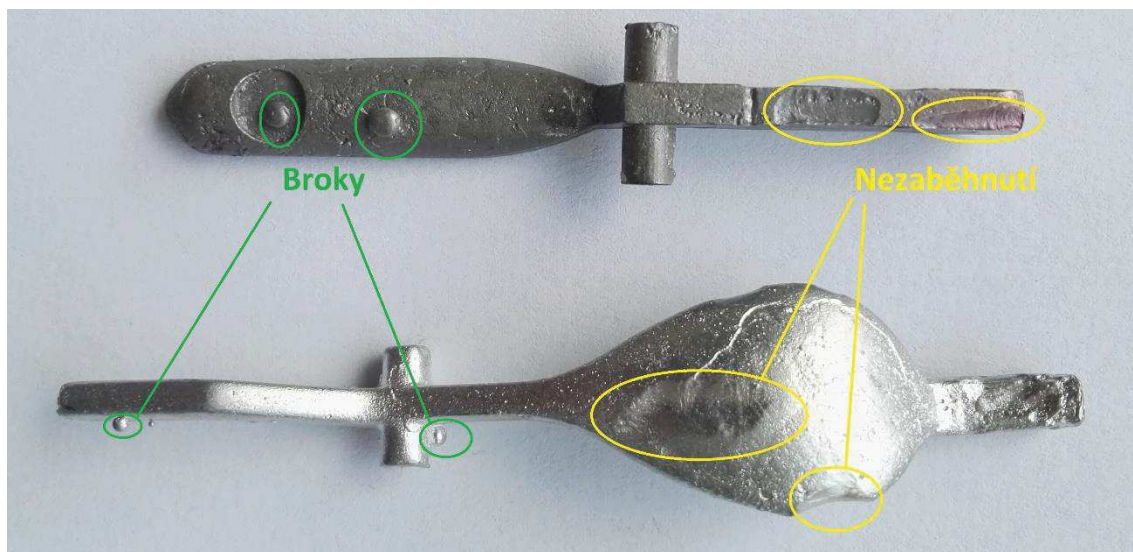
Obr. 53: Klapky z PLA z tiskárny Original Prusa i3 MK3S

V případě odlitků vytvořených vytavením modelů z PLA při rozdílných nastaveních výšky vrstvy (na obr. 3) došlo pouze ke vzniku připečeniny na malém místě jedné klapky a v obou případech k mělkému nezaběhnutí. V obou případech jsou patrné jednotlivé vrstvy tisku.



Obr. 54: Klapky z PVA z tiskárny Ultimaker S5

Poslední odlitky, pro které byly vytvořeny modely na FDM tiskárně, jsou dle předlohy z materiálu PVA, viz obr. 54. V tomto případě bylo dosaženo velmi odlišných výsledků v rámci modelů klapků. V případě „klapky 1“, která byla tištěna „na boku“, došlo k vytvoření zateklin v důsledku prasklé formy, nicméně zbylý povrch je v porovnání s „klapkou 2“ hladký. V druhém případě se objevují na velké ploše odlitku hluboké přípečeniny. Důvodem těchto nerovností může být částečné rozpuštění modelu při zaformování do sádrové směsi, jelikož se jedná o materiál rozpustný ve vodě. Druhá verze vzniku přípečenin může být spjata s tiskem „naležato“ a ulpíváním zbytkového popela na formě. V obou případech jsou slabě viditelné jednotlivé vrstvy.



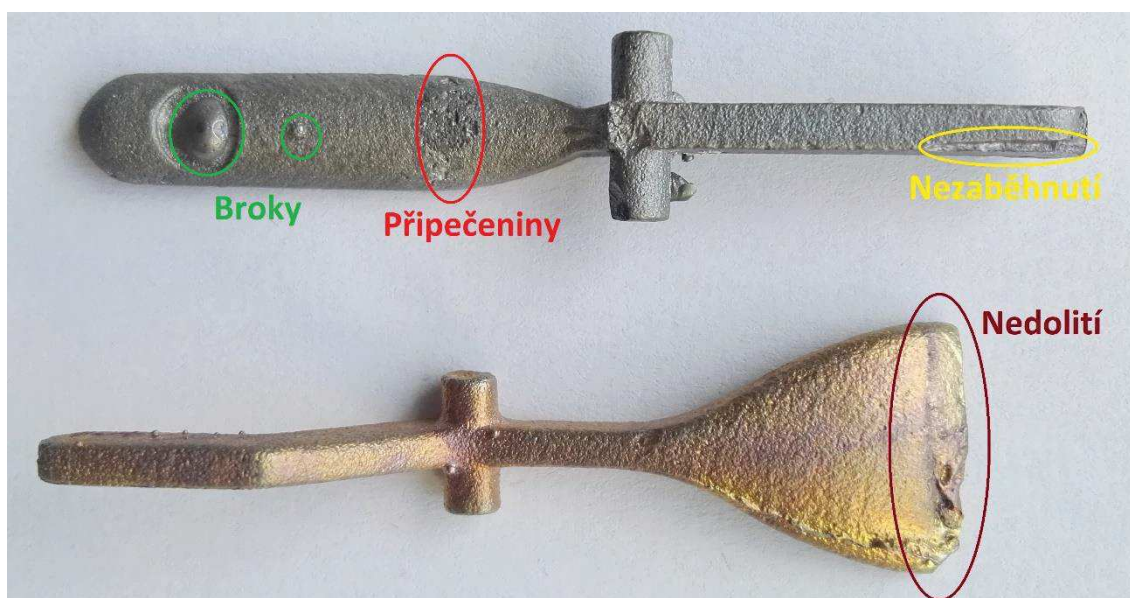
Obr. 55: Klapky z CastableWax z tiskárny Original Prusa SL1

Na obr. 55 jsou odlitky vytvořené po vypálení materiálu Castable Wax (SLA). Na odlitcích se téměř neobjevují připečeniny, pouze broky a nezaběhnutí na několika místech. Povrch působí celistvě a hladce.



Obr. 56: Klapka z M3 Crystal z tiskárny ProJet 3510 HD

Na obr. 56 je zobrazen odlitek vytvořený dle modelu z M3 Crystal (MJM). Absence modelu „klapky 2“ je z důvodu prasknutí formy při výpalu. V tomto případě se jedná o relativně hladký povrch s mírnými připečeninami. Při porovnání se všemi klapkami se zde nachází oblast největšího nezaběhnutí.



Obr. 57: Klapky z PA 12 z tiskárny HP Jet Fusion 4200

Posledními odlitky, pro které byly použity modely z PA 12 (MJF), jsou zobrazeny na obr. 57. Z vad se zde objevují broky, lehká nezaběhnutí a v polovině „klapky 2“ oblast připečenin. V případě „klapky 1“ došlo při výpalu k naprasknutí sádrové formy v její horní části, proto bylo možné provést odlití pouze spodní části. Při dalším odlévání již kov vytékal z formy. Jedná se tedy o nedolití z důvodu prasklé formy.



Obr. 58: Spodní část modelů „klopek 1“ z tiskáren typu FDM

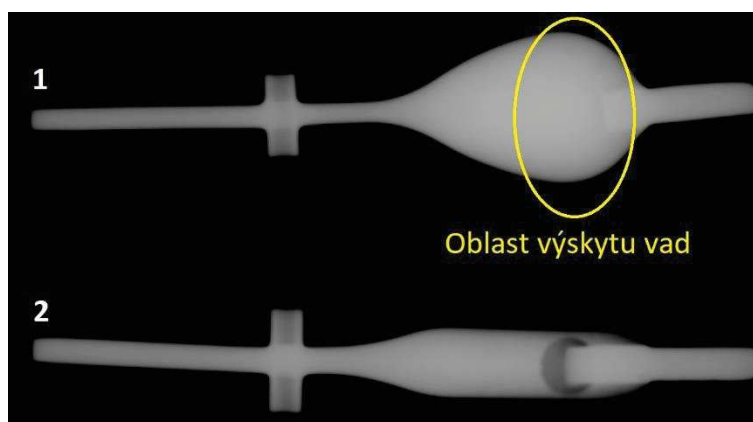
Na obr. 58 jsou zobrazeny spodní části odlitků vytvořených dle předloh z FDM tiskáren. Jedná se o hrubý povrch, který na modelech zůstane v důsledku odstranění podpor. Tato skutečnost je velmi limitující pro vytvoření hladkého povrchu odlitků. Pokud by byly modely po odstranění podpor obroušeny, výsledný povrch se zkvalitní.

U všech odlitků se objevovaly vady. Některé vady se zde objevovaly hlavně z důvodu způsobu zaformování a přípravy sádrové směsi. Dá se předpokládat, že při použití standardního postupu formování, který je používán ve slévárně, by došlo k odstranění/eliminaci vad typu: broky a nezaběhnutí. Z tohoto hlediska jsou nejvíce nežádoucí připečeniny, které by se na dílně musely opravovat. V případě použití plných modelů došlo ve třech případech ze čtyř k poškození či zničení formy. V případě použití materiálu Castable Wax (SLA) na plný model k porušení nedošlo z důvodu, že materiál je přímo k této aplikaci určený. Z toho vyplývá nevhodnost zbylých tří variant plných modelů. Proto je vždy žádoucí vyrobit dutý model, pokud to daná technologie dovoluje, viz kapitola 5.4.3.

14.2 RTG analýza

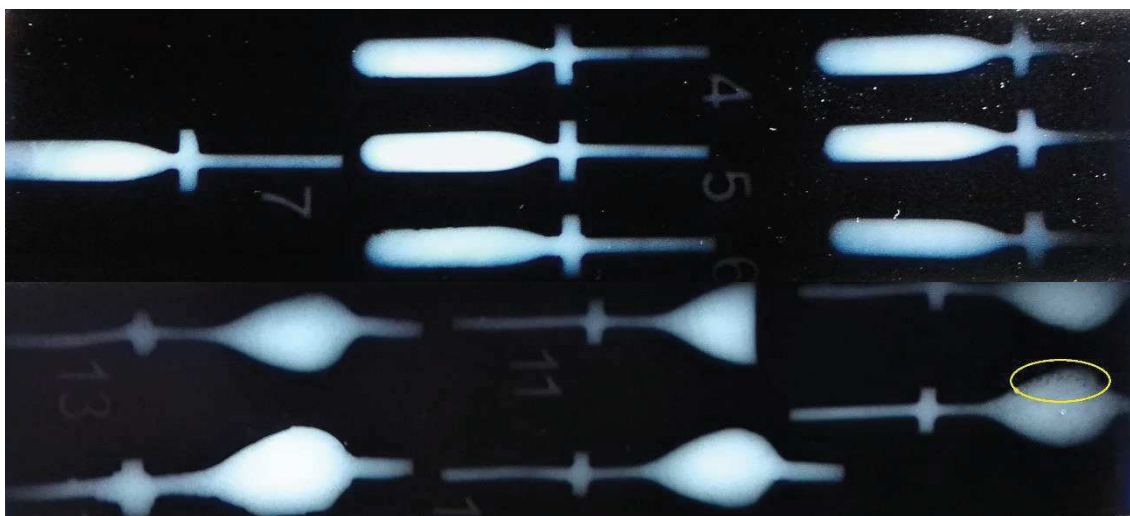
Všechny odlitky byly podrobeny nedestruktivní kontrole prozařovací metodou. Konkrétně za použití digitální radiografie s přímým plošným detektorem. Parametry pro získání snímků byly následující: žhavicí proud 4,5 mA; předpětí 90 kV; expoziční čas jednoho snímku 0,2 s; konečný obraz složený z pěti obrazových průchodů. Nicméně kvůli nízkému rozlišení plošného detektoru a velikosti ohniska (3 mm) použitého RTG zdroje, nebylo možné kvalitně zobrazit vnitřní strukturu materiálů. Proto bylo rozhodnuto, že bude expozice provedena na RTG film. V tomto případě byly parametry následující: žhavicí proud 4,5 mA; předpětí 130 kV; doba expozice 40 s; film Indux R5. Po vyvolání filmů byly snímky prosvíceny pomocí negatoskopu a bylo možné provést hodnocení vnitřních vad u klopek. U malých odlitků klopek bylo zjištěno velmi málo vnitřních vad o velmi malých rozměrech. Vady se vyskytovaly zpravidla jen u typu „klopek 1“ a to

v nejširším místě klapky (místo největšího objemu kovu), toto místo je zobrazeno na obr. 59.



Obr. 59: Ilustrační snímek z plošného detektoru bronzových klapek ze slévárny s poukázáním na oblast výskytu vad

V oblasti výskytu vad se objevovaly malé nečistoty, kterými mohly být zbytky nespáleného materiálu. Nejvyšší obsah nečistot měla klapka vytvořená dle předlohy z materiálu „M3 Crystal“ (MJM), viz obr. 60. V žádné z klapek se neobjevoval žádný typ vnitřních dutin.



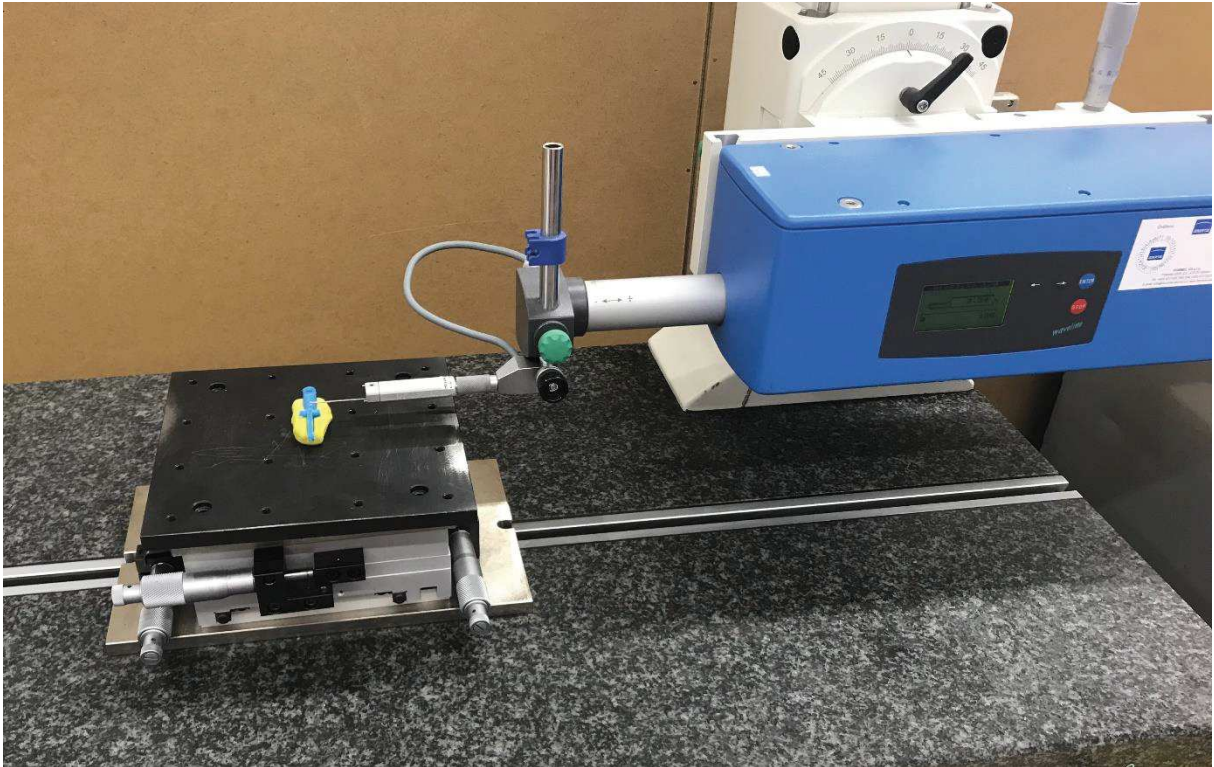
Obr. 60: Prosvícené filmy negatoskopem, zvýrazněná oblast klapky s nejvyšším obsahem nečistot

15 Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo provedeno ve dvou fázích. První měření proběhlo na vtištěných modelech, které byly následně použity pro vytvoření sádrových forem. Druhé měření pak bylo provedeno na odlitcích.

15.1 Měření drsnosti na vytištěných modelech

Měření drsnosti bylo provedeno na drsnoměru „Hommel-Etamic T8000“ (viz obr. 61) s diamantovým hrotem 2 μm při vrcholovém úhlu 90 $^\circ$. Měření bylo provedeno na osmi modelech „klapky 2“. Každá klapka byla před měřením upevněna do plastické hmoty, aby byla zajištěna její poloha.



Obr. 61: Drsnoměr Hommel-Etamic T8000 s klapkou v plastické hmotě

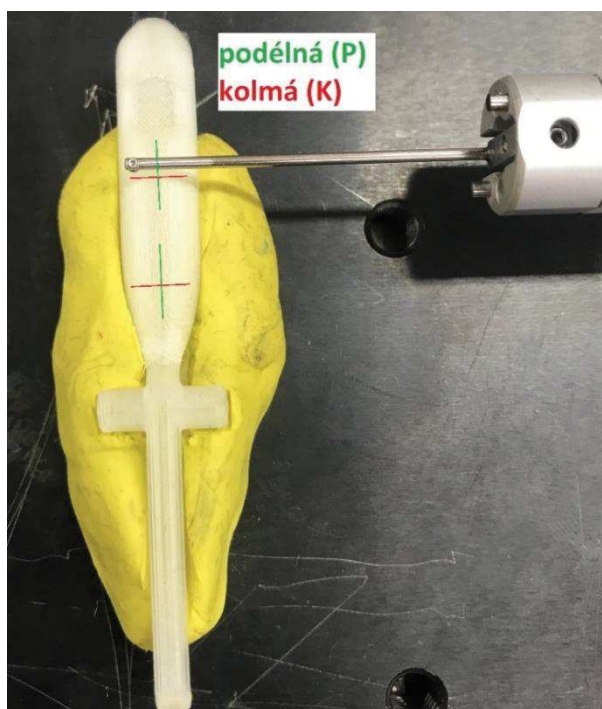
Na každé klapce byla provedena 4 měření a to: dvě měření podélná v ose klapky (P) a dvě měření na ně kolmá (K), viz schéma měření na obr. 62. Dvě měření v každém směru byla provedena z důvodu následného vyhodnocení dle normy ČSN EN ISO 4287:1999 – „Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu“. Vyhodnocení probíhalo na základě zkráceného náměru. Zkrácení základního profilu bylo provedeno z důvodu tvaru „klapky 2“, kde by při plné délce základního profilu došlo k překročení rozsahu měřidla ($\pm 400 \mu\text{m}$).

V případě podélného měření (P) byla měřená délka 4,8 mm s rychlostí posuvu 0,5 mm/s a byl použit filtr Gaussův lineární filtr ČSN EN ISO 16610-21 (dříve ČSN EN ISO 11 562) s hodnotou cut-off 2,5 mm.

V případě kolmého měření (K) byla měřená délka 3,2 mm, rychlost posuvu 0,5 mm/s. Použitý filtr byl stejný jako v případě měření podélného (P), s rozdílem hodnoty cut-off, která zde byla 0,8 mm.

Měřené parametry drsnosti byly:

- Ra – střední aritmetická hodnota drsnosti;
- Rz – největší výška profilu;
- Rv – hloubka největší prohlubně;
- Rp – výška největší špičky;
- RSm – střední vzdálenost rýh;
- Veličiny nosného podílu – parametry Abbotovy křivky (Rpk – redukovaná výška špiček; Rvk – redukovaná hloubka rýh; Mr1 – podíl materiálu nad profilem jádra a Mr2 – podíl materiálu pod profilem drsnosti).



Obr. 62: Měřící hrot na klapce s vyznačenými místy měření

Hodnoty ze dvou provedených měření byly zprůměrovány a v tabulkách 10 a 11 jsou vidět výsledné hodnoty měření dle ČSN EN ISO 4287.

Modely (P)	RSm	Rv	Rp	Rz	Ra	Rvk	Rpk	Mr1	Mr2
	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_P	0,94	29,2	23,9	53,1	14,3	31,9	11,5	11,6	77,8
MoldLay (FDM)_P	1,14	27,1	42,1	69,3	17,9	39,6	23,8	13,4	80,3
PLA-M_0,05 (FDM)_P	0,63	25,2	25,7	50,8	11,7	18,6	10,1	8,3	86,9
PLA-M_0,1 (FDM)_P	0,8	23,7	28,6	52,2	13,6	8,2	12,2	6,8	81
PVA (FDM)_P	1,43	40	39,2	79,2	22	20,5	36,6	7,3	83,1
Castable Wax (SLA)_P	0,28	5,9	6,3	12,1	2,3	3,5	5	9,9	90,5
M3 Crytal (MJM)_P	0,6	8,6	7,1	15,7	4,1	3,1	2,8	9,3	91,8
PA 12 (MJF)_P	0,25	21,9	22,9	44,7	8,5	13,2	11,5	10,4	89,7

Tab. 10: Hodnoty drsností a veličin nosného podílu pro podélné měření (P) na modelech

Modely (K)	RSm	Rv	Rp	Rz	Ra	Rvk	Rpk	Mr1	Mr2
	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_K	0,41	31,4	35,8	67,2	15	37	19,7	14,4	80,2
MoldLay (FDM)_K	0,52	30,3	30,8	61,1	14,2	34,4	16,2	13,9	80,2
PLA-M_0,05 (FDM)_K	0,45	21,5	26,2	47,6	10,1	24,5	20,6	12,2	83,6
PLA-M_0,1 (FDM)_K	0,29	19,3	26	45,3	9,6	16,2	12,1	13,2	81,3
PVA (FDM)_K	0,67	33,1	32,6	65,7	14,9	33	15,6	18,6	75,2
Castable Wax (SLA)_K	0,3	1,7	8,7	10,4	3,3	8,9	2,9	9,6	83,9
M3 Crytal (MJM)_K	0,39	3,1	9	15	4,1	10,6	2,6	11,4	84,6
PA 12 (MJF)_K	0,24	14,4	17,9	32,3	6,8	11,2	7,6	9,2	85

Tab. 11: Hodnoty drsností a veličin nosného podílu pro kolmé měření (K) na modelech

Dle hodnoty RSm byly nastaveny použité hodnoty cut-off při měření. Obecně platí, že v rozmezí RSm od 0,13 do 0,4 mm je použit filtr 0,8 mm (pro kolmé měření). V tomto případě byl použit, ačkoliv jsou u „K“ měření některé hodnoty RSm vyšší než 0,4 mm. To proto, aby pro všechny modely bylo stejné nastavení a výsledky se daly srovnávat mezi sebou.

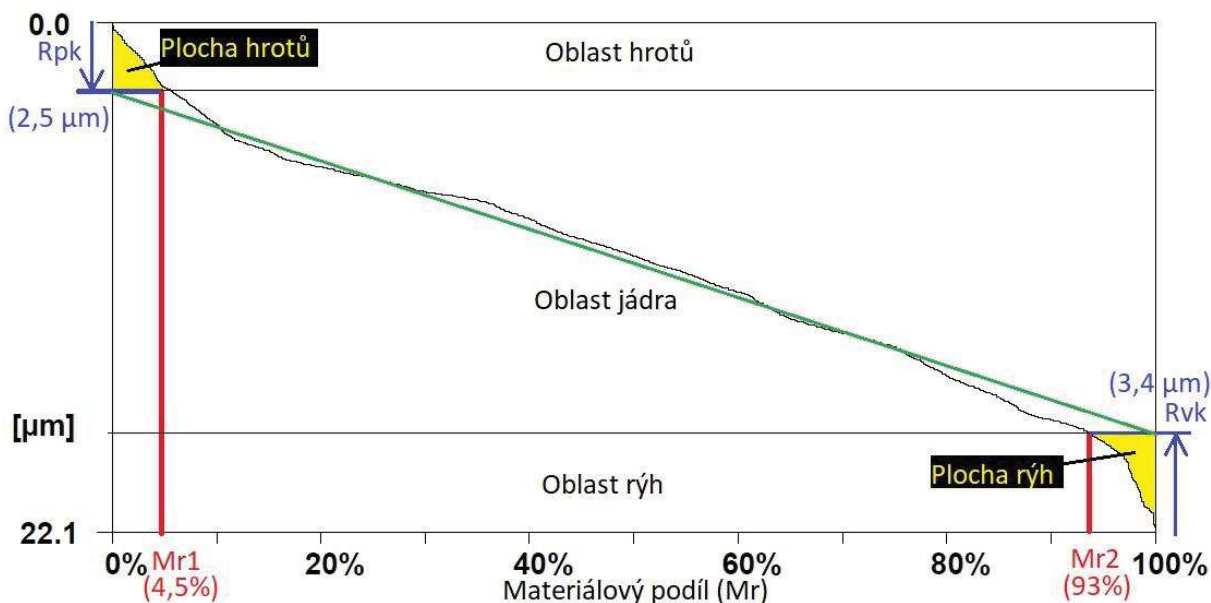
Obdobně je tomu u měření „P“. Zde byl použit filtr 2,5 mm, který se běžně používá v rozmezí RSm 0,4 až 1,3 mm.

Dle hodnot z výše uvedených tabulek plyne, že nejhladší povrch má model z materiálu „Castable Wax“ z SLA, respektive dosahuje nejnižších hodnot Rz a Ra v obou měřených směrech. O několik mikrometrů hrubší je pak model z materiálu „M3 Crystal“ (MJM). Další je model klapky z materiálu PA 12 (MJF), který je přibližně středem mezi nejhladším a nejhrubším modelem. Poté následuje další skok v naměřených hodnotách a ostatní klapky jsou již hrubší, jedná se o modely z PLA z tiskárny „Original Prusa i3 MK3S“ (FDM). Zbývající klapky z ostatních FDM tiskáren mají největší drsnost povrchu. Ostatně toto je vidět i na tvarech Abbotovy křivky, kde je u všech klapek velký podíl nosného jádra a prohlubní na kontrolovaném povrchu, viz obr. 63 a 64.

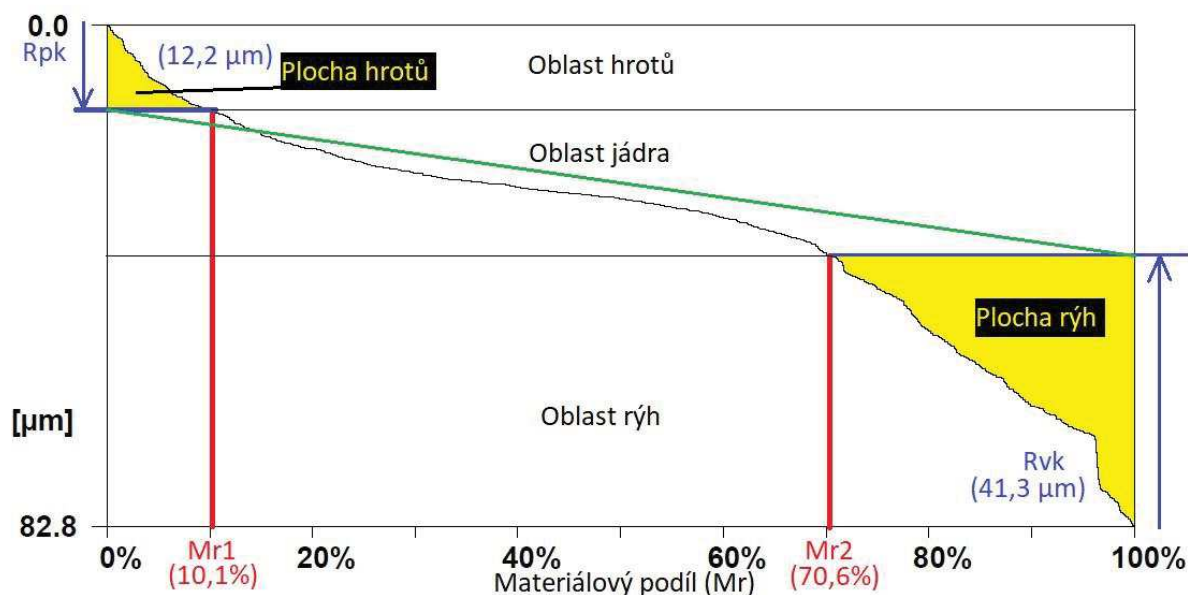
Jelikož je počítáno s tím, že modely budou zaformovány, vytaveny a ze vzniklé formy vzejde odlitek, je vhodné poukázat zvláště na parametr Rv. Drsnost Rz je součtem hodnot Rv a Rp, resp. součet největší prohlubně a největší špičky. Protože odlitek bude zcela určitě obráběn (broušen), nehraje hodnota výstupků tak zásadní roli ve výsledné kvalitě. To proto, že při obrábění se z povrchu snadněji odstraní výstupky. Naopak prohlubně by mohly být i po obrábění stále viditelné. Proto je vhodné hledět jak na parametr Rz, tak i na parametr Rv.

V případě veličin nosného podílu je vhodné ukázat Abbotovu křivku. Pro ilustraci byly vybrány dvě Abbotovy křivky z jednoho podélného měření. U obou křivek jsou uvedeny naměřené hodnoty spolu s popisem. Nejprve byly vyneseny hodnoty materiálového podílu (Mr), v místě průsečíku s křivkou byly vyneseny kolmice na úsečky Mr. Tyto kolmice nesou informaci Rpk (redukované výšky špiček), resp. Rvk (redukované hloubky rýh). Tímto vzniknou plochy hrotů a rýh. Na obr. 63 je zobrazena Abbotova

křivka pro model z „M3 Crystal“ (MJM), na obr. 64 pro model z PLA z tiskárny „Geotech A10M“ (FDM).



Obr. 63: Abbotova křivka pro model z „M3 Crystal“ (MJM)

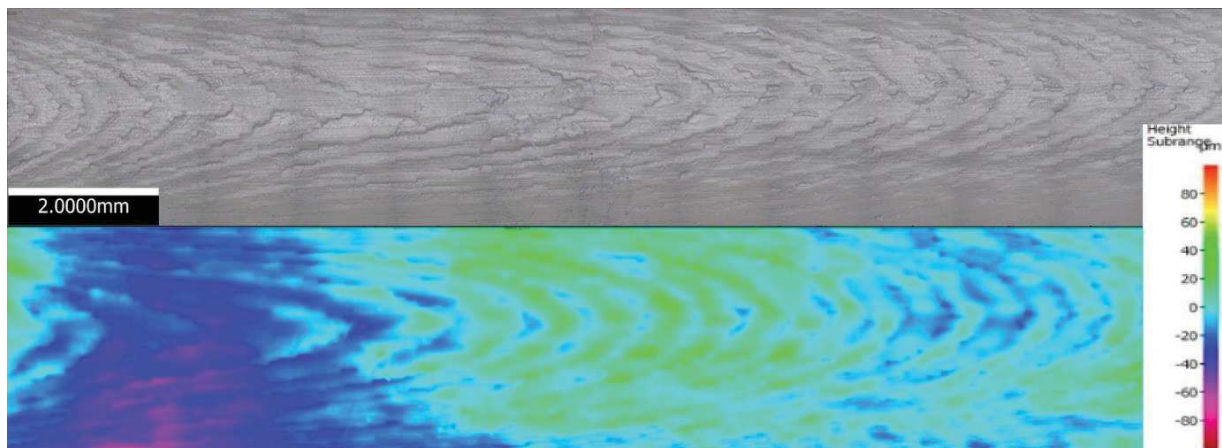


Obr. 64: Abbotova křivka pro model z PLA z tiskárny „Geotech A10M“ (FDM)

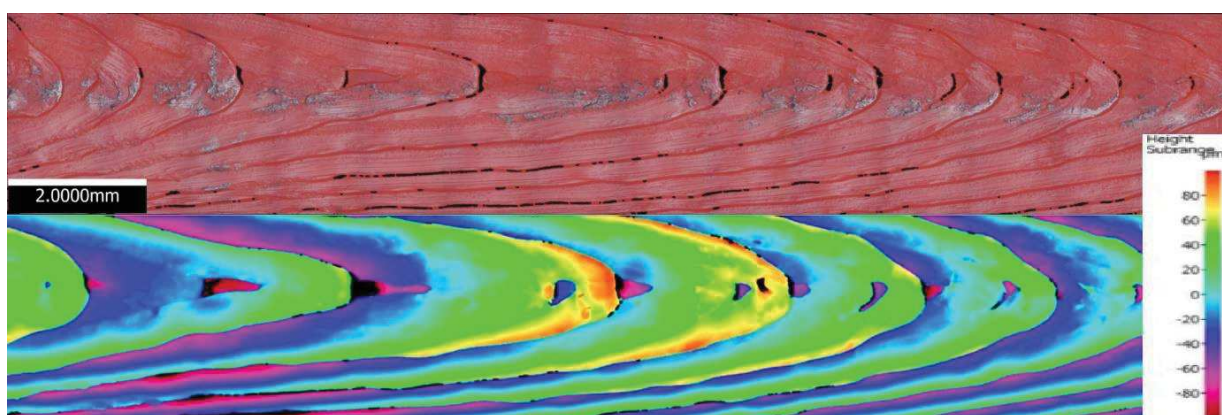
Z obr. 63 a 64 je na první pohled jasný rozdíl v plochách rýh. V případě, že je žádoucí mít co největší oblast jádra, případně hrotů, resp. co nejmenší plochu rýh, je první varianta ideální volbou.

K podpoření výsledků měření drsnosti byla na modelech klapek zachycena topografie povrchu. Topografie povrchu byla získána na opticko-skenovacím mikroskopu IFM G4 při konfiguraci s 10x objektivem, vertikálním rozlišením 2,0249 μm

a laterálním rozlišením $1,9012 \mu\text{m}$. Snímání povrchu bylo provedeno na hřbetu modelu „klapky 2“ (tzn. v místě jako probíhalo jedno z podélných měření na drsnoměru). Výsledkem měření jsou jak 2D snímky s reálným povrchem modelu, tak i barevné snímky zobrazující výškové rozdíly. Uvedené snímky, viz obr. 65 a 66, jsou pro stejné modely klapek, pro které jsou výše zobrazeny Abbotovy křivky.



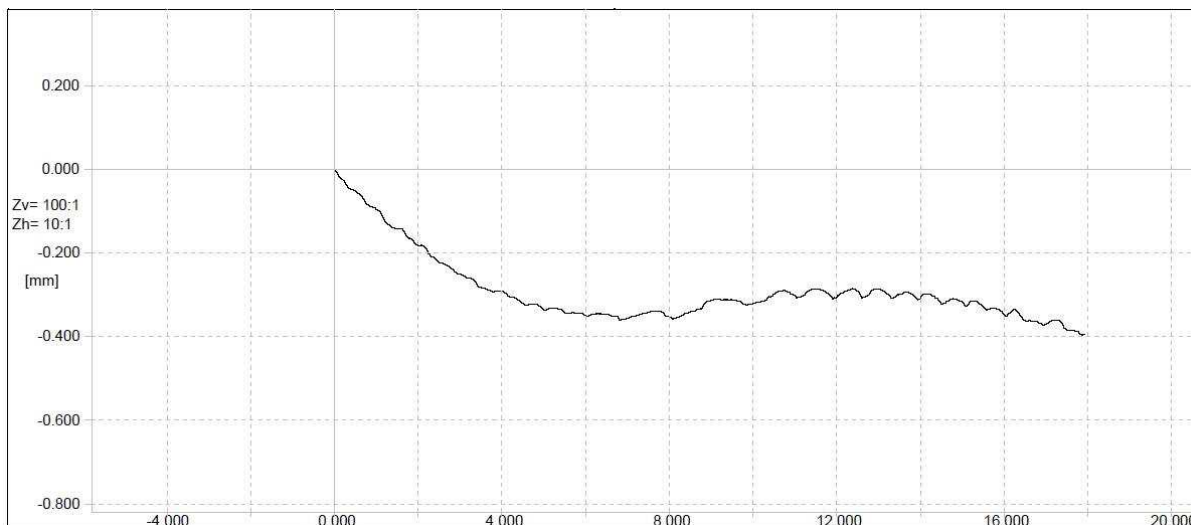
Obr. 65: Topografie povrchu modelu z „M3 Crystal“ (MJM)



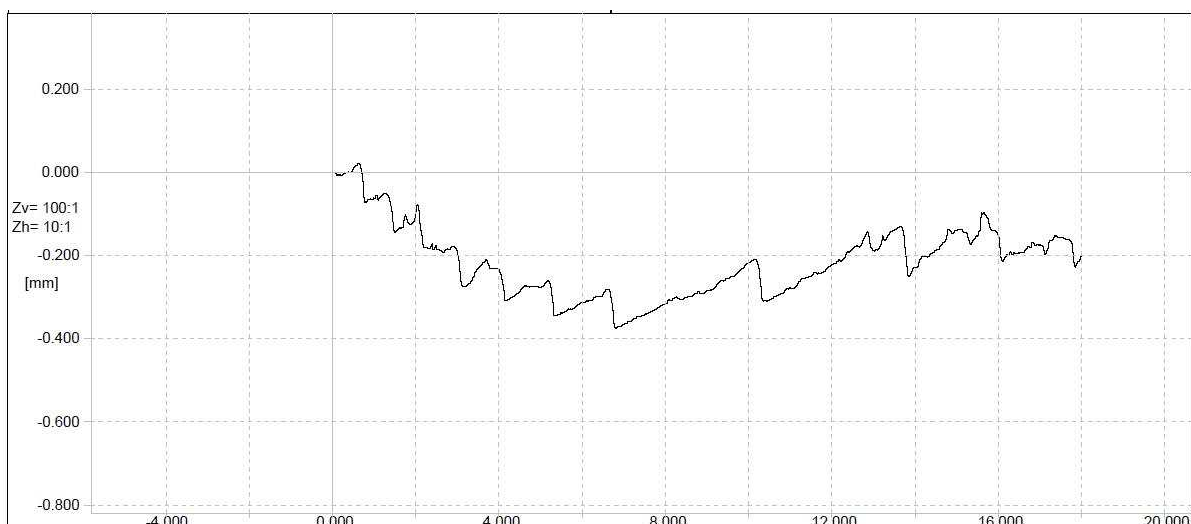
Obr. 66: Topografie povrchu modelu z PLA z tiskárny „Geetech A10M“ (FDM)

V obou případech je pro barevné mapy rozsah výšek od -100 do $100 \mu\text{m}$. V případě topografie povrchu na obr. 65 se rozsah pohybuje přibližně od -40 do $+40 \mu\text{m}$. V případě obr. 66 se zde rozptyl pohybuje v téměř celém rozsahu stupnice, cca -90 až $90 \mu\text{m}$.

K doplnění informace o drsnosti povrchu modelů klapek bylo provedeno měření na profilometru. Jedná se o stejné zařízení jako pro měření drsnosti, pouze s použitím jiného snímače. V tomto případě je snímačem jehla. Měřicí dráha byla 18 mm a posuvová rychlost $0,2 \text{ mm/s}$. Měření bylo provedeno v ose „klapky 2“ v místě, kde dochází k poklesu profilu. Na obr. 67 a 68 jsou zobrazeny záznamy z měření pro stejné modely, jako pro které byla uvedena topografie povrchu.



Obr. 67: Profil modelu z „M3 Crystal“ (MJM)



Obr. 68: Profil modelu z PLA z tiskárny „Geetech A10M“ (FDM)

Z uvedených křivek na obr. 67 a 68 je na první pohled patrný rozdíl v jejich „hladkosti“. Žádoucí je mít křivku co nejhladší. V případě FDM tisku je tento požadavek značně limitován v závislosti na výšce vrstvy při tisku, proto jsou na druhé křivce viditelné jednotlivé „zuby“, které kopírují právě jednotlivé vrstvy.

Závěrem z provedených měření je fakt, že výsledky, nehledě na to, pomocí které metody byly získány, spolu korespondují. V případě drsnosti je vyhodnocení časově náročnější, ale data se dají později snadno porovnávat, jelikož jsou k dispozici konkrétní hodnoty. V případech dat z opticko-skenovacího mikroskopu a profilometru jsou výsledky na první pohled snadno pochopitelné a pro pouhé srovnání výsledků mezi sebou postačují. V příloze se nachází veškerá data z měření drsnosti, zbylé topografie povrchu a zbylé profily modelů klapků.

15.2 Měření drsnosti na odlitcích

Měření drsnosti na odlitcích bylo provedeno na stejném drsnoměru, jako v případě vytištěných modelů, i při použití stejných parametrů. Měření bylo provedeno opět pro typ „klapky 2“. Celkově bylo provedeno na sedmi modelech.

Hodnoty ze dvou provedených měření byly zprůměrovány a v tabulkách 12 a 13 jsou vidět výsledné hodnoty měření dle ČSN EN ISO 4287.

Odlitky (P)	RSm	Rv	Rp	Rz	Ra	Rvk	Rpk	Mr1	Mr2
	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_P	0,35	30,5	21,9	52,4	9,3	25,1	13,5	12,3	80,8
MoldLay (FDM)_P	0,57	39,5	24,2	63,6	12	45,3	16,5	16,5	76,6
PLA-M_0,05 (FDM)_P	0,32	14,6	14	28,6	5,2	14,3	8,8	11,3	80,5
PLA-M_0,1 (FDM)_P	0,36	19,8	16,1	35,8	7,4	7,7	9,7	3,8	90,6
PVA (FDM)_K	0,51	40,2	25,9	66,1	13,1	41,2	12,8	7,1	81,5
Castable Wax (SLA)_P	0,18	14,8	8	22,7	3,4	11,7	2,7	6,9	88,6
PA 12 (MJF)_K	0,34	27,7	28,4	56,1	12,5	60,3	30,1	11,7	84,2

Tab. 12: Hodnoty drsností a veličin nosného podílu pro podélné měření (P) na odlitcích

Odlitky (K)	RSm	Rv	Rp	Rz	Ra	Rvk	Rpk	Mr1	Mr2
	[mm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_K	0,42	30,7	28,3	58,9	13,2	32,2	15,8	12	77,7
MoldLay (FDM)_K	0,49	23,3	27,2	50,5	12,6	32,6	17,4	17,7	77,8
PLA-M_0,05 (FDM)_K	0,36	17,8	17,9	35,7	9,2	16,5	12,9	8,1	84,1
PLA-M_0,1 (FDM)_K	0,27	14,6	17,7	32,2	7,9	15	8,7	11,2	81,6
PVA (FDM)_K	0,37	29,9	29,2	59,1	15,1	19,1	2,8	2,2	88,4
Castable Wax (SLA)_K	0,29	13,4	16,7	30,1	8	21,3	11,9	11,2	90,8
PA 12 (MJF)_K	0,31	18,7	21,4	40	9,6	13,3	7,4	7,3	86,4

Tab. 13: Hodnoty drsností a veličin nosného podílu pro kolmé měření (K) na odlitcích

Z dat uvedených v tabulkách 12 a 13 vychází jako nejhladší odlitek vytvořený z modelu na SLA tiskárně, následuje odlitek vytvořený na FDM tiskárně „Original Prusa i3 MK3S“ s nejnižší výškou vrstvy (0,05 mm), poté ze stejné tiskárny s výškou vrstvy 0,1 mm. Dalším odlitkem s větší drsností je odlitek vytvořený na základě modelu z PA 12 (MJF). Zbylé tři odlitky z FDM tiskáren mají podobné hodnoty Rp a Rz, nejhrubším odlitkem je ten, který byl vytvořený na základě modelu z materiálu PVA.

Jak již bylo zmíněno, je žádoucí mít co nejmenší plochu rýh. Aby tato plocha byla co nejmenší, je dobré mít co nejvyšší hodnotu Mr2 a naopak co nejnižší hodnotu Rvk. Této podmínky dosahují v obou měřených směrech nejlépe odlitky z předlohy získané z tiskárny SLA spolu s odlitky z modelů FDM z tiskárny „Original Prusa i3 MK3S“ při výšce vrstvy 0,05 a 0,1 mm.

15.3 Srovnání měřených drsností

Srovnání naměřených dat drsností proběhlo z pohledu dvou zásadních parametrů pro následné opracování klapek. Prvním parametrem je změna drsností Rz, resp. Ra. Změna těchto dvou parametrů vypovídá o celkovém zdrsnění, případně snížení drsnosti odlitku oproti modelu. Druhým porovnávaným parametrem byla změna plochy rýh.

V tabulkách 14 a 15 jsou zobrazeny naměřené hodnoty z podélného měření na modelech a odlitcích. Na základě těchto hodnot je vypočítána procentuální změna daných hodnot, která je vztažena k hodnotám naměřeným na modelech. Tzn. v případě, že došlo ke snížení drsnosti odlitku, je změna zobrazena zelenými políčky a došlo k žádoucímu jevu. V případě, že se drsnost odlitku zvýšila v porovnání s původní hodnotou naměřenou na modelu, je políčko červené a dochází k nežádoucímu jevu.

Podélné	Modely		Odlitky		Změna Rz	Změna Ra
	Rz	Ra	Rz	Ra		
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_P	53,1	14,3	52,4	9,3	1	35
MoldLay (FDM)_P	69,3	17,9	63,6	12	8	33
PLA-M_0,05 (FDM)_P	50,8	11,7	28,6	5,2	44	56
PLA-M_0,1 (FDM)_P	52,2	13,6	35,8	7,4	31	46
PVA (FDM)_K	79,2	22	66,1	13,1	17	40
Castable Wax (SLA)_P	12,1	2,3	22,7	3,4	-88	-48
M3 Crytal (MJM)_P	15,7	4,1	X	X	X	X
PA 12 (MJF)_P	44,7	8,5	56,1	12,5	-26	-47

Tab. 14: Procentuální změna hodnot Rz a Ra pro podélné měření (P)

Kolmé	Modely		Odlitky		Změna Rz	Změna Ra
	Rz	Ra	Rz	Ra		
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[%]	[%]
PLA-Č (FDM)_P	67,2	15	58,9	13,2	12	12
MoldLay (FDM)_P	61,1	14,2	50,5	12,6	17	11
PLA-M_0,05 (FDM)_P	47,6	10,1	35,7	9,2	25	9
PLA-M_0,1 (FDM)_P	45,3	9,6	32,2	7,9	29	18
PVA (FDM)_K	65,7	14,9	59,1	15,1	10	-1
Castable Wax (SLA)_P	10,4	3,3	30,1	8	-189	-142
M3 Crytal (MJM)_P	15	4,1	X	X	X	X
PA 12 (MJF)_P	32,3	6,8	40	9,6	-24	-41

Tab. 15: Procentuální změna hodnot Rz a Ra pro kolmé měření (K)

Jak je z hodnot patrné, lze konstatovat, že v případě odlitků, pro které byly předlohou modely získané z FDM tiskáren, došlo k paradoxnímu snížení drsnosti povrchu. Tato skutečnost vyplývá z faktu, že na modelech jsou viditelné jednotlivé vrstvy, které použitá sádrová směs nedokáže do nejmenšího detailu zaplnit. To závisí na distribuci rozložení částic dané sádrové směsi. V případě modelů získaných ze všech

jiných AM zařízení dochází ke zvýšení drsnosti, nicméně to je do jisté míry ovlivněno výskytem vad na měřených délkách. Pro odlitek získaný z předlohy z MJM tiskárny bohužel nejsou dostupná data, jelikož při výpalu došlo k prasknutí formy. Nicméně při pohledu na odlitek klapky 1 i v tomto případě došlo zcela určitě ke zvýšení drsnosti.

Jak již bylo zmíněno výše, plochu rýh je ideální mít co nejmenší, aby i po opracování nebyly rýhy patrné. Z tohoto důvodu byl pro toto porovnání vytvořen vzorec pro výpočet plochy rýh vycházející z tvaru Abbotovy křivky. U vzorce se vychází z předpokladu, že plocha rýh má tvar pravoúhlého trojúhelníku, z toho tedy:

$$Plocha\ rýh\ [\mu m^2] = ((100 - Mr2) * Rvk) / 2$$

Výpočty pouze aproximují reálný výsledek plochy rýh, nicméně k přibližnému procentuálnímu porovnání tyto hodnoty postačují.

V tabulkách 16 a 17 jsou na základě hodnot Rvk a Mr2 vypočteny přibližné plochy rýh na modelu a na odlitku. Následně je vypočtena změna této plochy vůči naměřeným hodnotám na modelu. V případě snížení plochy je hodnota zobrazena v zeleném políčku, při zvýšení plochy je políčko červené.

Podélné	Modely			Odlitky			Změna plochy rýh [%]
	Rvk	Mr2	Plocha rýh	Rvk	Mr2	Plocha rýh	
	[μm]	[%]	[μm^2]	[μm]	[%]	[μm^2]	
PLA-Č (FDM)_P	31,9	77,8	354	25,1	80,8	241	32
MoldLay (FDM)_P	39,6	80,3	390	45,3	76,6	530	-36
PLA-M_0,05 (FDM)_P	18,6	86,9	122	14,3	80,5	139	-14
PLA-M_0,1 (FDM)_P	8,2	81	78	7,7	90,6	36	54
PVA (FDM)_K	20,5	83,1	173	41,2	81,5	381	-120
Castable Wax (SLA)_P	3,5	90,5	17	11,7	88,6	67	-294
M3 Crytal (MJM)_P	3,1	91,8	13	X	X	X	X
PA 12 (MJF)_P	13,2	89,7	68	60,3	84,2	476	-600

Tab. 16: Procentuální změna ploch rýh pro podélné měření (P)

Kolmé	Modely			Odlitky			Změna plochy rýh [%]
	Rvk	Mr2	Plocha rýh	Rvk	Mr2	Plocha rýh	
	[μm]	[%]	[μm^2]	[μm]	[%]	[μm^2]	
PLA-Č (FDM)_P	37	80,2	366	32,2	77,7	359	2
MoldLay (FDM)_P	34,4	80,2	341	32,6	77,8	362	-6
PLA-M_0,05 (FDM)_P	24,5	83,6	201	16,5	84,1	131	35
PLA-M_0,1 (FDM)_P	16,2	81,3	151	15	81,6	138	9
PVA (FDM)_K	33	75,2	409	19,1	88,4	111	73
Castable Wax (SLA)_P	8,9	83,9	72	21,3	90,8	98	-36
M3 Crytal (MJM)_P	10,6	84,6	82	X	X	X	X
PA 12 (MJF)_P	11,2	85	84	13,3	86,4	90	-7

Tab. 17: Procentuální změna ploch rýh pro kolmé měření (K)

Zde je vhodné poukázat na rozdíly mezi výslednými hodnotami v podélném a kolmém měření. Budeme-li brát v potaz všechna měření spjatá s FDM modely, došlo v podélném směru k nárůstu plochy ve třech případech z pěti. Naopak v kolmém směru došlo pouze k jednomu nárůstu plochy, a to pouze minimálně. Důvodem je, že v kolmém směru je při měření překonáno mnohonásobně více vrstev, po kterých byl model tištěn, oproti směru podélnému, kde se jedná pouze o několik vrstev. Obrovský nárůst ploch, v případech podélného měření na odlitcích vytvořených dle modelů z SLA a MJF, je způsoben výskytem vad na měřené délce.

16 Ekonomické hledisko použitých variant

Tato kapitola se zaměřuje na ekonomické hledisko použitých variant. Pro zjednodušení této jinak komplexní záležitosti, jsou uvažovány pouze provozní náklady ve formě použitého materiálu (viz tab. 18) a pořizovací náklady za zařízení v tab. 19. Ostatní náklady, zejména náklady na údržbu, na energie, výrobní plochu, aj. budou zcela odlišné pro každou tiskárnu. Například FDM tiskárny v porovnání s MJF tiskárnou. Tyto náklady by bylo možné stanovit na základě dat z praxe. Dalším rozdílným parametrem v použitých zařízeních je maximální výrobní kapacita, která je do jisté míry ovlivněna konstrukčním provedením jednotlivých zařízení. Lze předpokládat, že s rostoucím pracovním prostorem zařízení poroste i jeho výrobní kapacita.

Materiál	Cena s DPH za balení		Cena s DPH [Kč/kg; Kč/l]
	Cena s DPH [Kč]	Balení [kg; l]	
Flexible Blue	240	0,454	529
Castable Wax (SLA)	7624,5	1	7625
PLA (FDM)	485	0,75	647
ABS (FDM)	580	0,75	773
MoldLay (FDM)	1770	0,75	2360
M3 Crystal - plast (MJM)	16500	2	8250
S300 - vosk (MJM)	9625	2	4813
PA 12 (MJF)	104000	13	8000
PVA (FDM)	1200	0,75	1600

Tab. 18: Ceny uvedených materiálů včetně DPH za kg (resp. l)

Pro přepočítání některých uváděných cen bylo nutné použít aktuální kurz měny. Pro přepočítání byly použity hodnoty ze dne 14. 5. 2020 – 1 € = 27,50 Kč; 1 \$ = 25,50 Kč. V případě žlutě označených polí byly vybrány nejčastěji se objevující ceny, jelikož nabídka trhu je relativně velká. Z dat z tabulky 18 plyne, že v porovnání s používaným materiálem ve slévárně, jsou všechny ostatní materiály dražší. Nicméně pokud bude bráno v potaz, že se v případě použití materiálů na tiskárnách FDM vyrábí duté modely, bude výsledná cena za materiál použitý na jednu klapku přibližně stejná. V případech složitějších a větších modelů klapky může dokonce být cena nižší, nicméně je nutno uvažovat spotřebovaný materiál na vytvoření podpor. V každém případě je z použitých materiálů pomocí aditivních technologií nejlevnější varianta PLA (FDM), následuje

materiál ABS (FDM). Na druhou stranu nejdražšími materiály jsou Castable Wax (SLA), PA 12 (MJF) a vůbec nejdražší variantou je kombinace plastu a vosku z technologie MJM. Jelikož v případě vytvoření modelu na MJM jsou použity oba materiály pro vytvoření jednoho modelu.

Zařízení	Cena s DPH [Kč]
Geetech A10M (FDM)	8799
Original Prusa i3 MK3S (FDM)	19990
Ultimaker S5 (FDM)	187550
Original Prusa SL1 (SLA)	43990
ProJet 3510 HD (MJM)	1986450
HP Jet Fusion 4200 (MJF)	5100000

Tab. 19: Ceny uvedených zařízení včetně DPH

V tab. 19 jsou uvedeny ceny jednotlivých zařízení. I zde byly pro přepočet cen na Kč použity kurzy měny k datu 14. 5. 2020. Ceny zařízení se liší až o více než pětisetnásobek pořizovací ceny. Nejlevnější varianty jsou z řad FDM tiskáren v řádech tisíců Kč, následuje SLA tiskárna řádově v desetitisících Kč, poté je velký cenový skok pro tiskárnu Ultimaker S5 (FDM) ve statisících Kč. U zbylých dvou variant se pořizovací částky pohybují již v řádech milionů Kč. [73, 74, 75, 76, 77, 78]

17 Diskuze výsledků

Na základě provedených experimentů a rešeršní práce byla vyhotovena tabulka 20, ve které jsou uvedeny všechny parametry ovlivňující finální odlitek. Dále jsou pak v tabulce uvažovány ceny spojené s výrobou na jednotlivých zařízeních.

Z hlediska vhodnosti materiálu s nejnižším obsahem popela jsou ideálními variantami materiály M3 Crystal (MJM), S300 (MJM), PVA (FDM), které ovšem po výpalu příliš k formě, a Castable Wax (SLA).

Při vizuální kontrole byly nejkvalitnějšími polymerními modely z tiskáren SLA, MJM a MJF. Tento fakt se potvrdil i při měření drsnosti na modelech. Tyto modely dosahovaly nejhladších povrchů. Nejhladší povrch v podélném měření pro model z Castable Wax (SLA) dosahoval hodnoty R_a 2,3 μm , naopak nejhrubší povrch byl u modelu z PVA (FDM) s hodnotou R_a 22 μm . V kolmém směru byly rozdíly drsností menší.

Limitujícím hlediskem pro modely získané z tiskáren MJM a MJF se stala skutečnost, že byly vyrobeny plné. To bohužel mělo za následek, že při výpalu v případě materiálu M3 Crystal (MJM) došlo k úplnému prasknutí formy, a v případě materiálu PA 12 (MJF) došlo k částečnému naprasknutí sádrové formy. Jak bylo popsáno v kapitole: „5.4.3 Praskání keramické skořepiny“ důvodem proč k tomu došlo, byla rozdílná tepelná roztažnost materiálu modelu a formy.

Z hlediska následné vizuální kontroly odlitků se zde u všech vzorků objevovaly stejné vady, které byly spjaté se způsobem formování a odlévání. V menší míře se vady objevovaly u odlitků vytvořených dle předlohy modelů z PLA, MoldLay (obě FDM) a Castable Wax (SLA). Výsledky měření drsnosti na odlitcích potvrdily kvalitu povrchu v případě materiálu Castable Wax (SLA), PLA z tiskárny „Original Prusa i3 MK3S“ (FDM) a PA 12 (MJF).

Z ekonomického hlediska se jeví jako nejvhodnější varianty zařízení používající technologii FDM – tiskárna Geetech A10M a original Prusa i3 MK3 a tiskárna Original Prusa SL1 (SLA). Kombinace FDM tiskáren s materiály PLA a ABS jsou nejlevnější možnou variantou z hlediska použitých materiálů.

V rozhodovací tabulce byly k zadaným parametrům přiřazovány hodnoty 1 (nejlepší) až 5 (nejhorší). V případě žlutých polí jsou hodnoty fiktivní, jelikož nebyl experiment pro daný materiál proveden. Nicméně se jedná o hodnoty, které vycházejí z logické úvahy podle předchozího vývoje výsledků. Hodnoty všech parametrů jsou následně sečteny.

Zařízení	Materiál	Obsah popela	Adheze popela	Kvalita modelu	Povrch modelu	Kvalita odlitku	Povrch odlitku	Cena zařízení	Cena materiálu	Součet
Geetech A10M (FDM)	PLA-Č	4	2	4	4	4	4	1	1	24
	MoldLay	4	2	4	4	4	4	1	3	26
Original Prusa i3 MK3S (FDM)	PLA-M_0,05	4	2	2	3	3	3	1	1	19
	PLA-M_0,1	4	2	2	3	3	3	1	1	19
	ABS	3	5	5	5	5	5	1	1	30
Ultimaker S5 (FDM)	PVA	1	5	4	4	5	5	2	2	28
Original Prusa SL1 (SLA)	Castable Wax	1	2	1	1	2	2	2	5	16
ProJet 3510 HD (MJM)	S300+M3 Crystal	1	2	1	1	3	2	4	5	19
HP Jet Fusion 4200 (MJF)	PA 12	5	5	2	2	3	2	5	5	29

Tab. 20: Rozhodovací tabulka

Nejnižšího součtu dosahuje varianta zařízení s materiálem Castable Wax (SLA), z tohoto hlediska se jeví jako optimální varianta. Další skupinou jsou tiskárny Original Prusa i3 MK3S (FDM) pro obě nastavení tisku používající materiál PLA, spolu s tiskárnou ProJet 3510 HD používající kombinaci dvou materiálů. Horší variantou se jeví použité materiály PLA a MoldLay z tiskárny Geetech A10M (FDM). Nejhoršími variantami jsou technologie používající materiály ABS, PVA (FDM) a PA 12 (MJF). Rozhodovací tabulka (tab. 20) bere v potaz všechny uvedené parametry a přiřazuje jim stejnou váhu. Z toho důvodu je vytvořena tabulka 21 hodnotící pouze výstupní kvalitu odlitku spolu s pořizovacími náklady a provozními náklady ve formě ceny materiálu.

Zařízení	Materiál	Výstupní kvalita		Cena zařízení		Cena materiálu		Součet vážených hodnot
		Váha hlediska = 0,4		Váha hlediska = 0,4		Váha hlediska = 0,2		
		Známka	Celk. váha	Známka	Celk. váha	Známka	Celk. váha	
Geetech A10M (FDM)	PLA-Č	4	1,6	1	0,4	1	0,2	2,2
	MoldLay	4	1,6	1	0,4	3	0,6	2,6
Original Prusa i3 MK3S (FDM)	PLA-M_0,05	3	1,2	1	0,4	1	0,2	1,8
	PLA-M_0,1	3	1,2	1	0,4	1	0,2	1,8
	ABS	5	2	1	0,4	1	0,2	2,6
Ultimaker S5 (FDM)	PVA	5	2	2	0,8	2	0,4	3,2
Original Prusa SL1 (SLA)	Castable Wax	1	0,4	2	0,8	5	1	2,2
ProJet 3510 HD (MJM)	S300+M3 Crystal	2	0,8	4	1,6	5	1	3,4
HP Jet Fusion 4200 (MJF)	PA 12	2	0,8	5	2	5	1	3,8

Tab. 21: Rozhodovací tabulka s váhovými koeficienty

V tab. 21 bylo použito pro vyhodnocení variant váhových koeficientů. Koeficienty byly zvoleny na základě předpokladu důležitosti daných kritérií. Známky byly následně konkrétním koeficientem vynásobeny a vážené hodnoty byly sečteny. I v této tabulce se jedná o minimalizační kritérium (tzn. čím nižší součet hodnot, tím lépe). Dle zvolených koeficientů vychází jako optimální varianta technologie FDM tisku na zařízení „Original Prusa i3 MK3S“ při použití materiálu PLA. Dalšími méně vhodnými variantami jsou varianta druhé FDM tiskárny používající materiál PLA a tiskárna SLA používající materiál Castable Wax. Ostatní varianty jsou již méně vhodné. Nicméně je nutné brát v potaz, že součet vážených hodnot je prakticky z 60 % závislý na cenách zařízení a materiálu. Tento fakt v případě drahých technologií převládá parametr kvality, který činí zbylých 40 %.

V praxi by mohly být uplatněny přístupy s odlišnou volbou koeficientů, případně s uvažováním dalších parametrů. Dále by pak mohl být uplatněn přístup, který uvažuje minimální požadavky na jakost. V případě, že by nebyla splněna podmínka jakosti, nebyly by dané varianty dále uvažovány. V každém případě by záleželo na požadavcích a preferencích výrobce, resp. zákazníka.

18 Závěr

V teoretické části této diplomové práce byla popsána technologie vytavitelného modelu, její historický vývoj a celý postup výroby odlitku. V další části byla provedena analýza současného stavu ve slévárně drobných odlitků společnosti AMATI – Denak, s.r.o. Dále byly zmíněny používané materiály napříč slévárnou. V následující kapitole byly uvedeny aditivní technologie a jejich popis spolu s možností implementace v různých etapách výroby odlitku.

V experimentální části této práce, zabývající se možnostmi implementace aditivních technologií do slévárny drobných odlitků, byl popsán celý proces od tvorby virtuálních modelů až po vytvoření odlitků, které by dále pokračovaly k opracování na dílnu.

Pomocí čtyř různých technologií tisku, na šesti AM zařízeních, s použitím sedmi různých materiálů byly vytištěny modely určené pro následné zaformování a vytavení. Po výpalu sádrových forem proběhlo odlévání cínové kompozice. Na získaných odlitcích byla hodnocena drsnost povrchu a jejich vady. Stejně hodnocení bylo provedeno u vytištěných modelů. Mimo jiné byla provedena zkouška na zjištění obsahu popela pro každý materiál.

Dále bylo řešeno ekonomické hledisko použitých variant. To se skládalo z pořizovací ceny a provozních nákladů ve formě cen materiálů. Ostatní hlediska byla z důvodu nedostatku dat zanedbána.

Na základě veškerých získaných dat, provedených měření a rešerše byly sestaveny rozhodovací tabulky. Pokud bude vzat průnik dvou použitých rozhodovacích metod, optimálními technologiemi pro implementaci do slévárny drobných odlitků budou technologie FDM a SLA. Konkrétně zařízení „Original Prusa i3 MK3S“ používající materiál PLA a „Original Prusa SL1“ používající materiál Castable Wax. Optimální varianta pro praxi by ale záležela na reálně stanovených požadavcích.

S jistotou lze říci, že doporučená implementace aditivních technologií do slévárny je vhodná hlavně v případě kusové výroby při výrobě rozlišného sortimentu (zde míněno různých typů klapek). V momentě, kdy bude výroba přecházet ve výrobu malosériovou, ztrácí implementace na váze, a to zejména z důvodu vyšší spotřeby času konkrétního počtu modelů v porovnání s konvenční (stávající) výrobou. Na druhou stranu, dané AM zařízení lze vytěžovat i mimo pracovní dobu, zde je limitujícím faktorem pouze velikost pracovního prostoru a s tím spjatá výrobní kapacita. V případě levnějších

variant tiskáren lze uvažovat implementaci více zařízení, aby došlo k navýšení max. výrobní kapacity.

Implementace AM zařízení do slévárny v podobě vytvoření vytavitelného modelu ušetří výrobu matečného modelu a výrobu formy na tvorbu voskových modelů. Nahrazení těchto dvou kroků může znamenat úsporu práce a náhradu za drahé stroje k těmto úkonům potřebné (soustruh, frézka, vulkanizér, vstřikovací lis, aj.).

Použitá literatura

- [1] BEELEY, Peter R., SMART, Robert F. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 0901716669.
- [2] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu*, Brno, 2009. [Online]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>, [vid. 18. 10. 2019]
- [3] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model*, Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze, 2007. [Online]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>, [vid. 18. 10. 2019]
- [4] Dostupné z: *Shiva* [online]. Wikipedia [cit. 12. 10. 2019]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Shiva as the Lord of Dance_LACMA edit.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Shiva_as_the_Lord_of_Dance_LACMA_edit.jpg)
- [5] JONES, Santhana & YUAN, Chen. (2003). *Advances in shell moulding for investment casting*. Journal of Materials Processing Technology. ISSN 0924-0136.
- [6] *Satin Cast 20 / KerrCast 2000 Directions For Use* [online]. USA: Kerr Corporation [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://youngjintool.cafe24.com/web/pdf/DFU+SC20+KC2000.pdf>
- [7] *Overview VC 500* [online]. Germany: Indutherm [cit. 29. 11. 2019]. Dostupné z: <http://www.indutherm.de/en/products/vacuum-pressure-casting-machines-vc/vc-500/>
- [8] *Technical Data Sheet of Rubbers* [online]. Castaldo [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.castaldo.com/english/use/u_techpage/tech001.html
- [9] *Rubber for molds in reels - CASTALDO - 701-111* [online]. Italy: FOV Shop [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: http://europe.fovshop.it/en_US/products/1878-903250-rubber-for-molds-in-reels-castaldo-701-111
- [10] *Natural Rubber Technical Data Sheet* [online]. England: Castaldo [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: [http://castaldo.com/pdf_techs/Natural Rubber Tech Sheet.pdf](http://castaldo.com/pdf_techs/Natural_Rubber_Tech_Sheet.pdf)
- [11] *120 °C SILICONE BLUE RUBBER* [online]. Legor Group [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: <http://products.legor.com/EN/item/14538#multimedia>
- [12] *120 °C silicone blue rubber - FOV* [online]. Italy: FOV Shop [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: http://europe.fovshop.it/en_US/products/1948-903285-120-c-silicone-blue-rubber-fov
- [13] *Durometerchart* [online]. Josef Prusa [cit. 3. 12. 2019]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/wp-content/uploads/2019/02/durometerchart.png>

- [14] *Injection Waxes* [online]. England: Gold Star Powders [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.goldstarpowders.com/downloads/gs-waxes.pdf>
- [15] *Technical Data Sheet Freeman Aqua Green Flake Wax* [online]. Freeman Manufacturing and Supply Company [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <http://www.freemanwax.com/pdfs/FreemanAqua.pdf>
- [16] *Technical Data Sheet Freeman Flexible Blue Flake Wax* [online]. Freeman Manufacturing and Supply Company [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <http://www.freemanwax.com/pdfs/FreemanFlexibleBlue.pdf>
- [17] *Goldstar OMEGA +* [online]. England [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.goldstarpowders.com/downloads/gold-star-omega-plus.pdf>
- [18] *Licí prášek - sádra Goldstar OMEGA +* [online]. Auren [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://auren.cz/home/1647-lici-prasek-sadra-goldstar-omega-.html>
- [19] *Klenotnický licí prášek Eurovest 22,7 kg* [online]. Advantage [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://eshop.advantage-fl.cz/eshop/liti-a-taveni/spotrebni-material/sadra/klenotnicky-lici-prasek-eurovest-22-7-kg/>
- [20] *Investment Powders Eurovest* [online]. England: Specialist Refractory Services [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.srs-ltd.co.uk/doc/powders/SRS-UK%20EuroVest%20A4.pdf>
- [21] *Investment Casting Powder Safety Data Sheet* [online]. England: Specialist Refractory Services, 2019 [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.srs-ltd.co.uk/doc/datasheets/msds/SRS-%20Investment Powder-R11.pdf>
- [22] *Eurovest* [online]. England: Specialist Refractory Services [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.srs-ltd.co.uk/products/investment-powder/eurovest>
- [23] SRIVATSAN, T. S., SUDARSHAN, T. S. *Additive manufacturing: Innovations, advances, and applications*, CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-1478-5.
- [24] NGO, T. D. et al. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges*. Composites part B, 2018. ISSN 1359-8368.
- [25] *Introduction to FDM 3D printing* [online]. 3D HUBS [cit. 25. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/>
- [26] EPMA (european powder metalurgy association), *Introduction to additive manufacturing technology*. 2. vydání, 2017. Shrewsbury: EPMA, 2017.
- [27] REDDY K. S., DUFERA, S. *Additive manufacturing technologies*. BEST Journals, 2016. ISSN(P) 2348-0513, ISSN (E) 2454-471X.
- [28] GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Druhé vydání. London: Springer, 2015. ISBN 978-1-4939-2112-6.

- [29] *Přehled technologií 3D tisku* [online]. dk metal prominent, 2018 [cit. 25. 10. 2019]. Dostupné z: <http://dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [30] *Introduction to SLA 3D printing* [online]. 3D HUBS [cit. 25. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/>
- [31] ZIAEE, Mohsen & CRANE, Nathan. (2019). *Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods*. Additive Manufacturing. ISSN 2214-8604.
- [32] *S-Max* [online]. ExOne [cit. 30. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/sand-3d-printers/S-Max>
- [33] LV, YE, CHENG, FAN, LIU, *Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment*, Ceramics International (2019). ISSN 0272-8842.
- [34] *PolyJet/MultiJet Modeling* [online]. Protiq [cit. 28. 10. 2019]. Dostupné z: <https://www.protiq.com/en/3d-printing/processes/polyjet-multijet-modeling/>
- [35] *Technologie 3D tisku kovů (SLM)* [online]. Konstrukter, 2016 [cit. 20. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [36] ASHISH, NABEEL, GOPINATH, VINOGRADOV. *Chapter 1 - 3D Printing in Medicine: Current Challenges and Potential Applications*. 3D Printing Technology in Nanomedicine, 2019. bISBN 9780128158906.
- [37] *Directed Energy Deposition (DED)* [online]. Digital Alloys, 2019 [cit. 24. 2. 2020]. Dostupné z: <https://www.digitalalloys.com/blog/directed-energy-deposition/>
- [38] BANDYOPADHYAY, A., HEER, B. *Additive manufacturing of multi-material structures*, Materials Science and Engineering: R: Reports, 2018. ISSN 0927-796X.
- [39] TRAN, T. & CHINNAPPAN, A. & LEE, J. & NGUYEN, H. L. & TRAN, L. & WANG, G. & VIJAY KUMAR, V. & JAYATHILAKA, W. A. D. M. & JI, D. & DODDAMANI, M. & RAMAKRISHNA, S. (2019). *3D Printing of Highly Pure Copper*. Metals. 9. 756. 10.3390/met9070756.
- [40] CHEAH, C.M. & CHUA, C.K. & LEE, C.W. & FENG, C. & TOTONG, K. (2005). *Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting*. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 25. 308-320. 10.1007/s00170-003-1840-6.
- [41] PATTNAIK, S., JHA, P. K., & KARUNAKAR, D. B. (2014). *A review of rapid prototyping integrated investment casting processes*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.
- [42] LEE, C.W. & CHUA, C.K. & CHEAH, C. M. & TAN, L.H. & FENG, C. (2004). *Rapid investment casting: Direct and indirect approaches via fused deposition modelling*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

- [43] RAHMATI, S. & AKBARI, J. & BARATI, E. (2007). *Dimensional accuracy analysis of wax patterns created by RTV silicone rubber molding using the Taguchi approach*. Rapid Prototyping Journal.
- [44] YARLAGADDA, P. & HOCK, T. (2003). *Statistical analysis on accuracy of wax patterns used in investment casting process*. Journal of Materials Processing Technology.
- [45] HARUN, W. S. W. SHARIF, S., IDRIS, M. H. KADIRGAMA, K. (2009). *Characteristic studies of collapsibility of ABS patterns produced from FDM for investment casting*. Materials Research Innovations.
- [46] RAHMATI, S. & NOROUZI, Y. & HOJJAT, Y. (2009). *A novel lattice structure for SL investment casting patterns*. Rapid Prototyping Journal.
- [47] *Wax 3D Printing – How To 3D Print Wax* [online]. ALL3DP, 2018 [cit. 17. 2. 2020]. Dostupné z: <https://all3dp.com/2/wax-3d-printing-how-to-3d-print-wax/>
- [48] *SOLIDSCAPE PRECISION FASTER* [online]. SOLIDSCAPE, 2018 [cit. 17. 2. 2020]. Dostupné z: https://1b8sr42k958n325cggk296qbd-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/04/Solidscape390_product_sheet_DIGITAL.pdf
- [49] *Midas Build Material* [online]. SOLIDSCAPE [cit. 17. 2. 2020]. Dostupné z: <https://store.solidscape.com/product/midas-build-material-tray-of-10-sticks/>
- [50] *Melt Support Material* [online]. SOLIDSCAPE [cit. 17. 2. 2020]. Dostupné z: <https://store.solidscape.com/product/melt-support-material-tray-of-10-sticks/>
- [51] *CASTING* [online]. Timothy Roe [cit. 5. 7. 2020]. Dostupné z: https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5c053b45266c073b74692d82/1551531639838-ZR1FDQ4AX2QMLYRZITGS/ke17ZwdGBToddI8pDm48kL1vuyNmC4WxSfRp7C-nhYV7gQa3H78H3Y0txjaiv_0fDoOvxcdMmMKkDsyUqMSsMWxHk725yihHCLlfrh8O1z5QHYNQqBUUEtDDsRWrJLTmv1ihXzK27xJYOPbUG3fJT37KEqMiAviPbi94xIphufpN1xGWcqtVomqHQALA23s8/Screen+Shot+2019-03-02+at+12.55.41.jpg?format=1500w
- [52] *Materiálový slovník - PLA* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
- [53] *Safety Data Sheet PLA* [online]. Ultimaker, 2018 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://ultimaker.com/download/74613/UM180816%20SDS%20PLA%20RB%20V11.pdf>
- [54] *MoldLay Safety Data Sheet* [online]. Germany: CC - products, 2015 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://shop.3dfilaprint.com/ekmps/shops/billyboyclyde/resources/Other/msds-moldlay-9-2015-a.pdf>

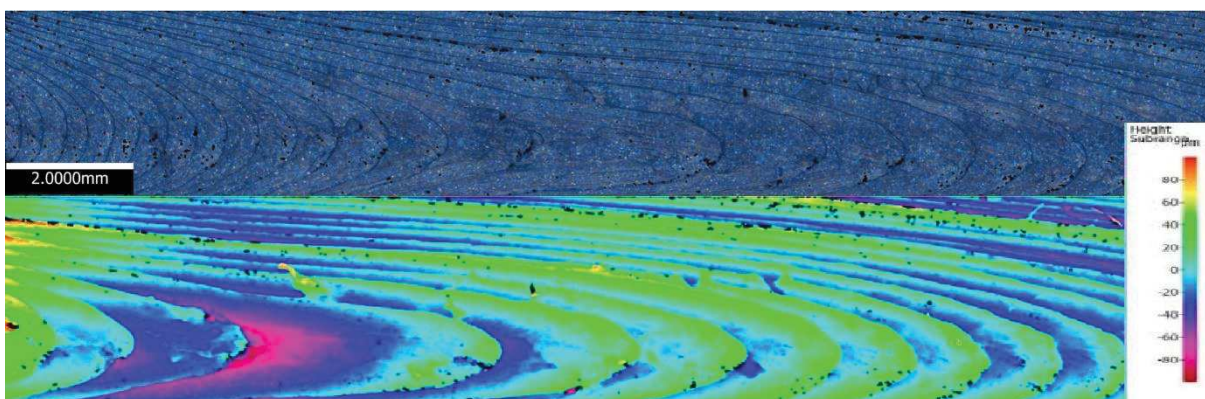
- [55] *MOLDLAY VOSKOVÝ (WAX-ALIKE) FILAMENT 1,75MM 750G* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/moldlay-voskovy-filament-1-75mm-750g/>
- [56] *Materiálový slovník - ABS* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/abs/>
- [57] *Ultimaker ABS SDS* [online]. Ultimaker Support, 2020 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011962900-Ultimaker-ABS-SDS>
- [58] *Ultimaker PVA TDS* [online]. Ultimaker Support, 2020 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360011963160-Ultimaker-PVA-TDS>
- [59] *Ultimaker PVA SDS* [online]. Ultimaker Support, 2020 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012664920-Ultimaker-PVA-SDS>
- [60] *Materiálový slovník - PVA* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pva/>
- [61] *Podpůrné materiály - PVA* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/pva/>
- [62] *Materials Library Castable Wax* [online]. FORMLABS [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/Castable_Wax_Technical_Data_Sheet.pdf
- [63] *Bezpečnostní list Castable Wax Resin* [online]. FORMLABS, 2020 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/1801034-SDS-CS-0.pdf>
- [64] *ProJet® 3500 SD & HD* [online]. 3DSYSTEMS [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.protocom3dp.com/file/400/projet-3500-plastic.pdf>
- [65] *Safety Data Sheet VisiJet® EX 200, VisiJet M3 Crystal* [online]. 3DSYSTEMS, 2016 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: http://infocenter.3dsystems.com/materials/sites/default/files/sds-files/professional/VisiJet_EX200/24184-S12-02-B%20CSDS%20GHS%20English%20VisiJet%20EX%20200%20and%20M3%20Crystal.pdf
- [66] *VisiJet M3 Crystal* [online]. PLM Group [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://plmgroup.lv/produkti/3d-printer-cartridges-supplies/3dsystems-mjp/visijet-m3-crystal/>
- [67] *Safety Data Sheet VisiJet®S300* [online]. 3DSYSTEMS, 2017 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: http://infocenter.3dsystems.com/materials/sites/default/files/sds-files/professional/VisiJet_S300/23126-S12-05-A%20CSDS%20GHS%20English%20VisiJet%20S300.pdf

- [68] *VisiJet S300* [online]. PLM Group [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://plmgroup.lv/produkti/3d-printer-cartridges-supplies/3dsystems-mjp/visijet-s300/>
- [69] *HP JET FUSION 4200 series* [online]. 3Dees [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>
- [70] *HP 3D High Reusability PA 12* [online]. HP Development Company, 2017 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/images/pdf/HP-JET-FUSION-PA12-CZ.pdf>
- [71] *SAFETY DATA SHEET HP 3D HR PA12 Powder* [online]. HP, 2019 [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: http://h22235.www2.hp.com/hpinfo/globalcitizenship/environment/productdata/Countries/us/3d_v1r10series_us_eng_v18.pdf
- [72] AZIMI, P., ZHAO, D., POUZET, C., CRAIN, N. E., STEPHENS, B.; *Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments*; Environmental Science & Technology **2016** 50 (3), 1260-1268; DOI: 10.1021/acs.est.5b04983
- [73] *GEEETECH A10M, DUAL MIX, ČERNÝ HLINÍKOVÝ RÁM, RYCHLOSTAVEBNICE* [online]. Levné 3D Tiskárny [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.levne3dtiskarny.cz/cs/archiv/206-geeetech-a10m-dual-mix-cerny-hlinikovy-ram-rychlostavebnice-800-001-0542.html>
- [74] *STAVEBNICE 3D TISKÁRNY ORIGINAL PRUSA I3 MK3S* [online]. MATERIALPRO 3D [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/3d-tiskarny/stavebnice-3d-tiskarny-original-prusa-i3-mk3s/>
- [75] *Ultimaker S5* [online]. 3D wiser [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <https://eshop.3dwiser.com/3d-tiskarny/ultimaker-s5/>
- [76] *Original Prusa SL1* [online]. Alza [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/original-prusa-sl1-d5714292.htm>
- [77] *3D Systems Projet 3510HD 3D Printer* [online]. The3DShop [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <http://www.the3dshop.com/product-view.aspx?i=62999>
- [78] *HP Jet Fusion 3D 4200* [online]. Treatstock [cit. 6. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.treatstock.com/machines/item/403-hp-jet-fusion-3d-4200>

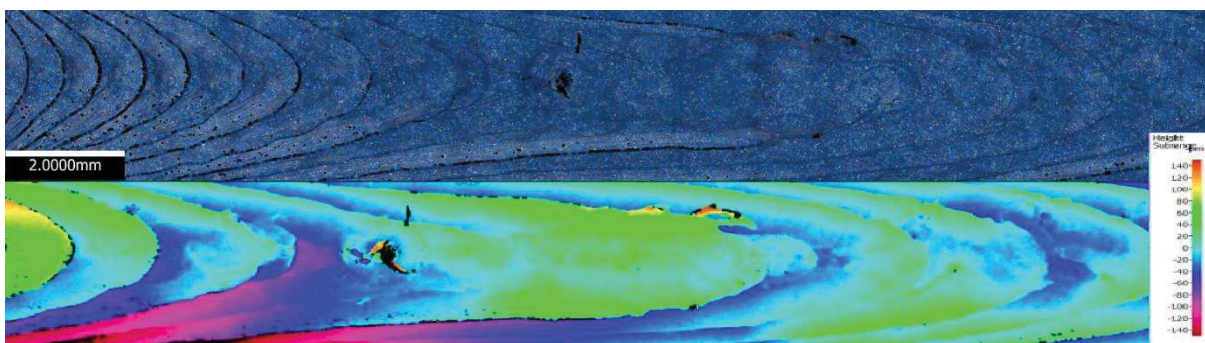
Přílohy

Zde jsou uvedena veškerá data z měření drsnosti, dle kterých byly vytvořeny tabulky. Data z opticko-skenovacího mikroskopu a z profilometru jsou doplněním informace k praktické části, do které byla použita jen část z nich.

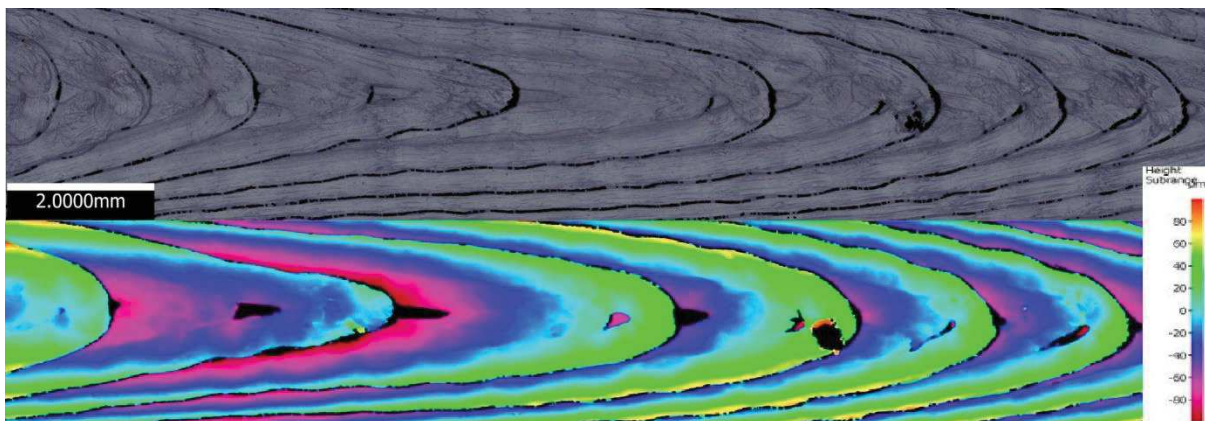
Data z opticko-skenovacího mikroskopu



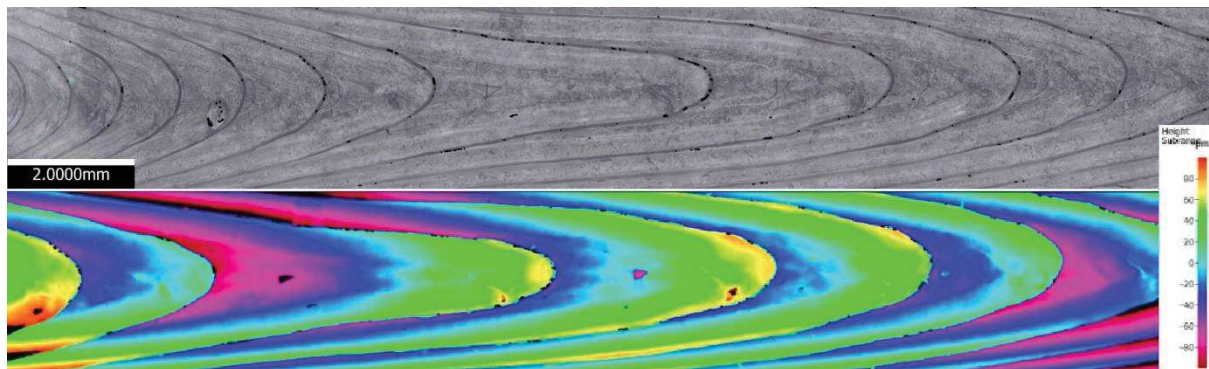
Obr. I: Topografie povrchu modelu z materiálu PLA-M_0,1 (FDM)



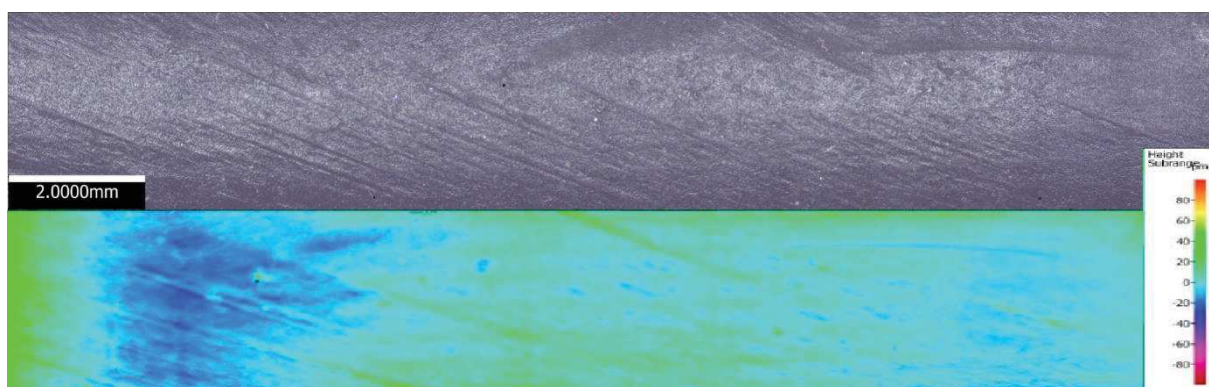
Obr. II: Topografie povrchu modelu z materiálu PLA-M_0,05 (FDM)



Obr. III: Topografie povrchu modelu z materiálu MoldLay (FDM)

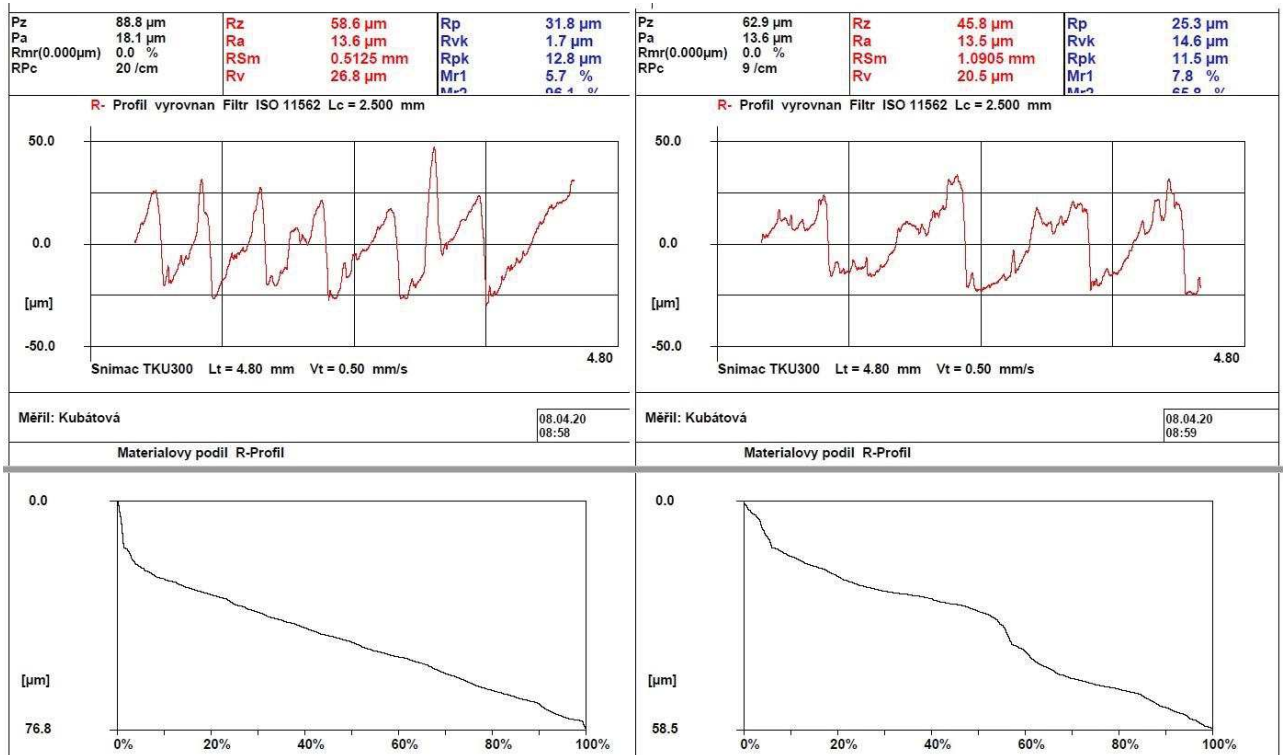


Obr. IV: Topografie povrchu modelu z materiálu PVA (FDM)

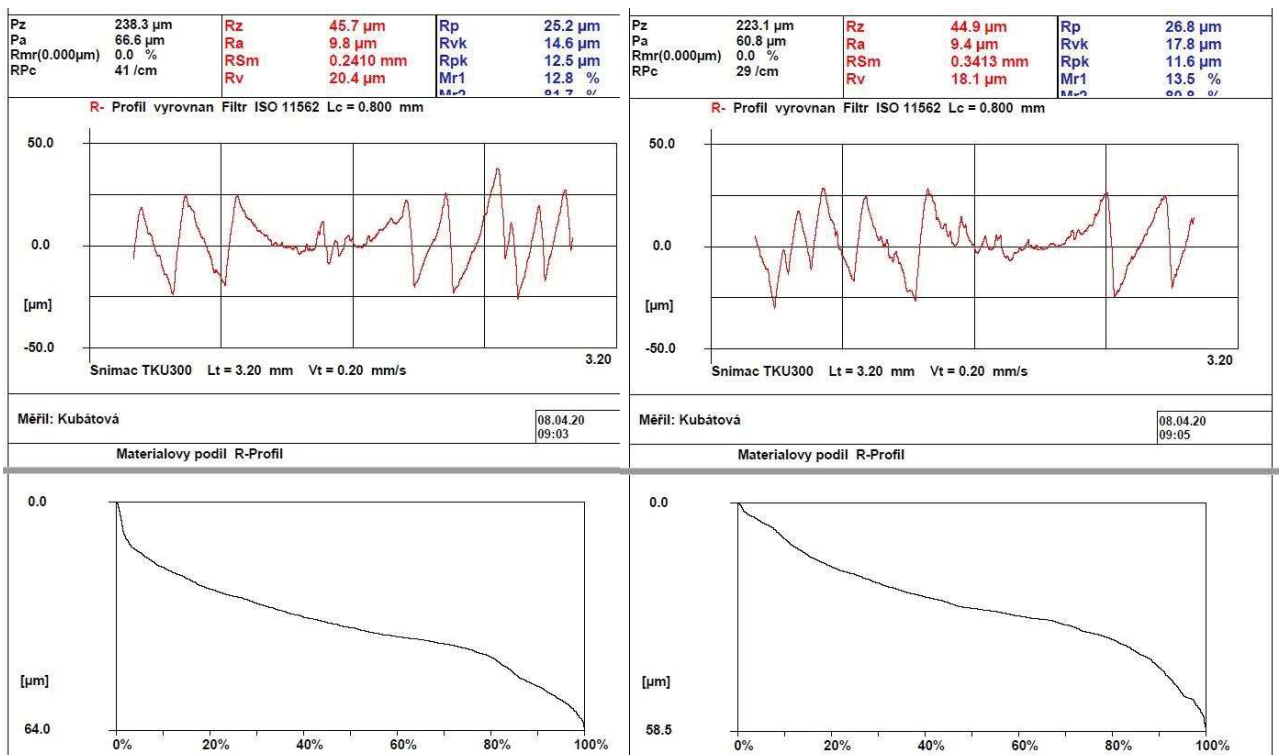


Obr. V: Topografie povrchu modelu z materiálu Castable Wax (SLA)

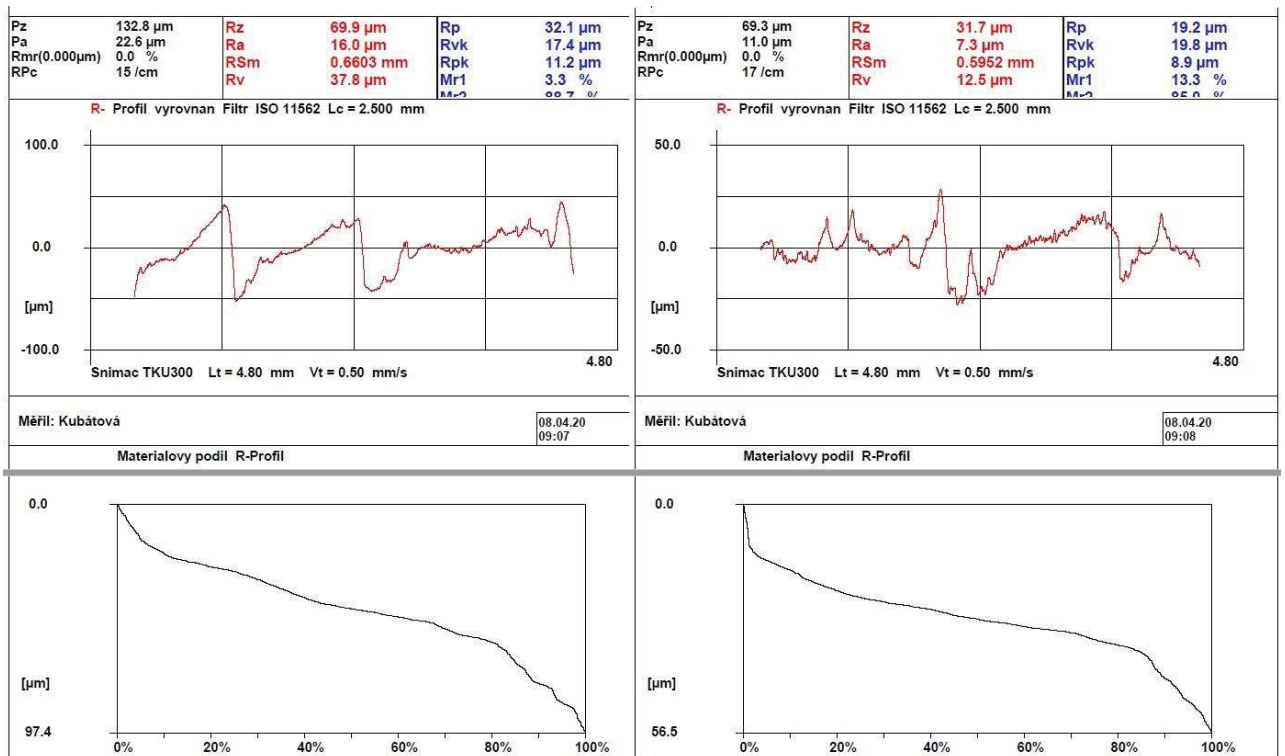
Data z drsnoměru



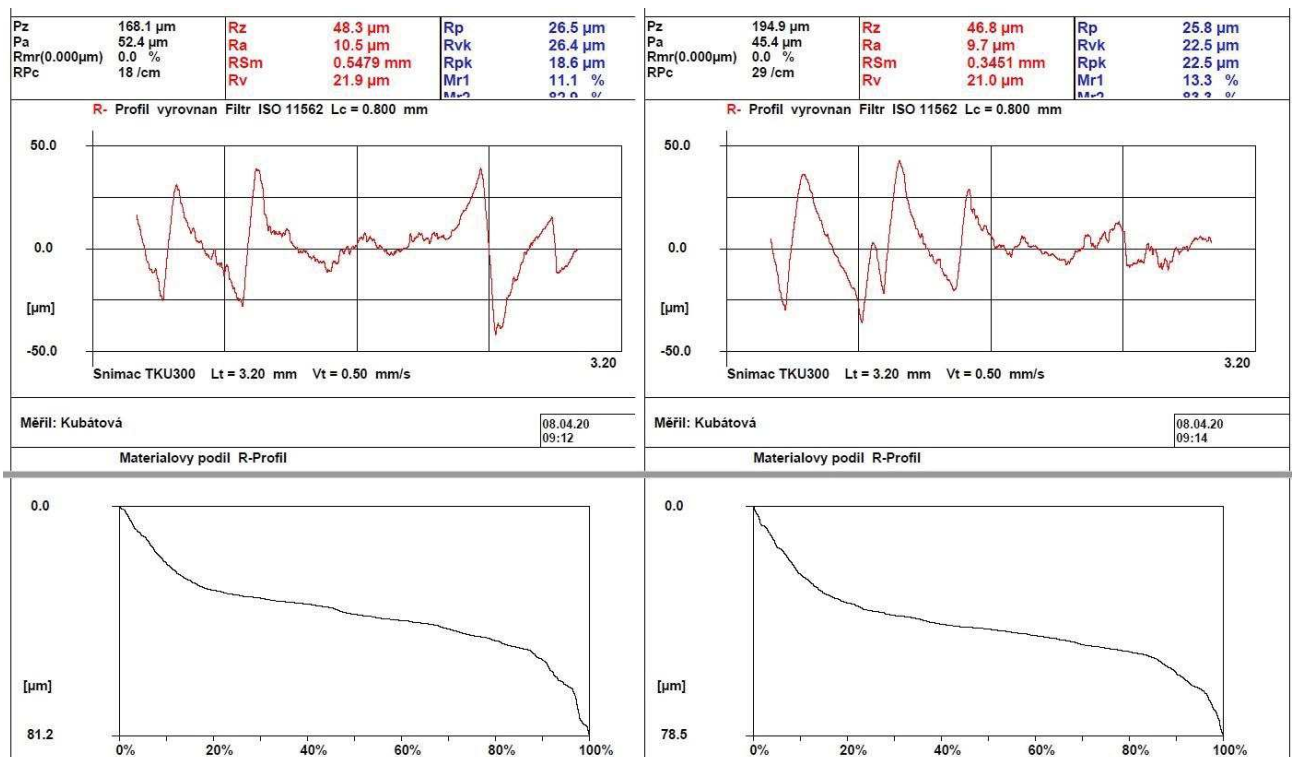
Obr. VI: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-M_0,1 (FDM)



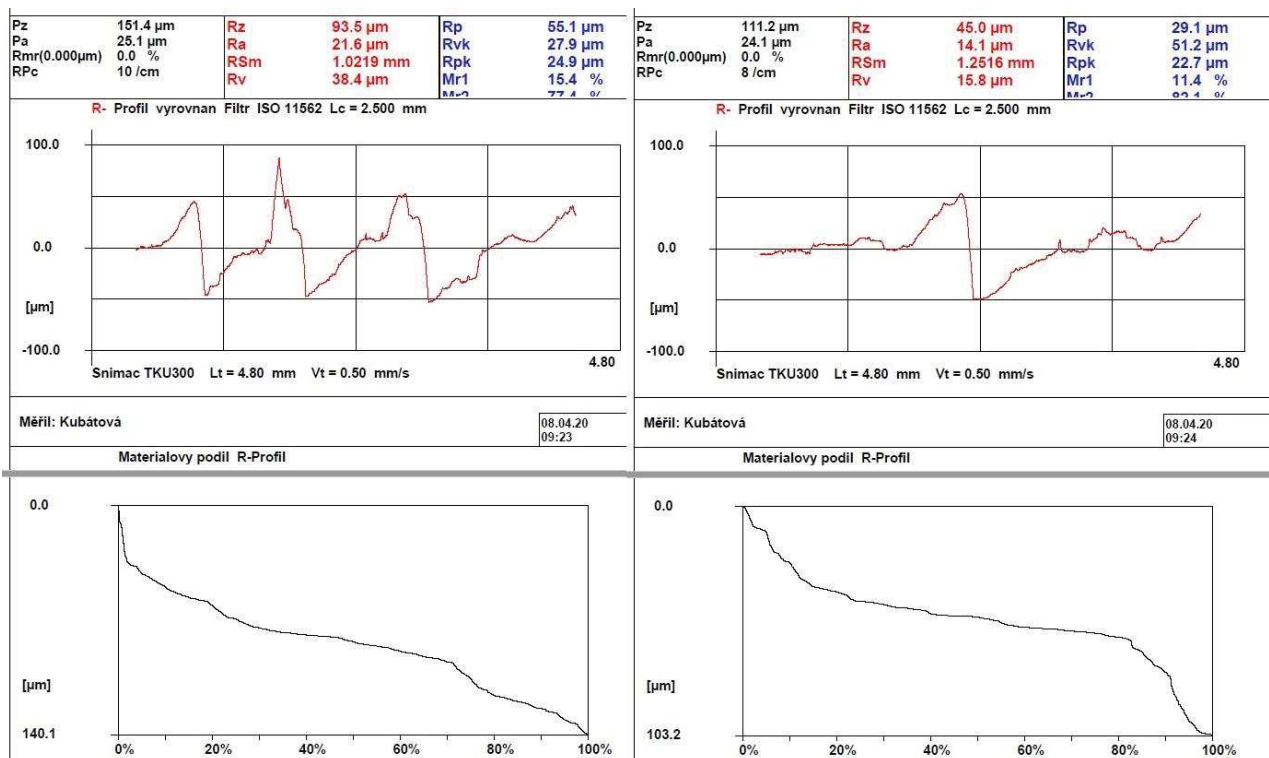
Obr. VII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-M_0,1 (FDM)



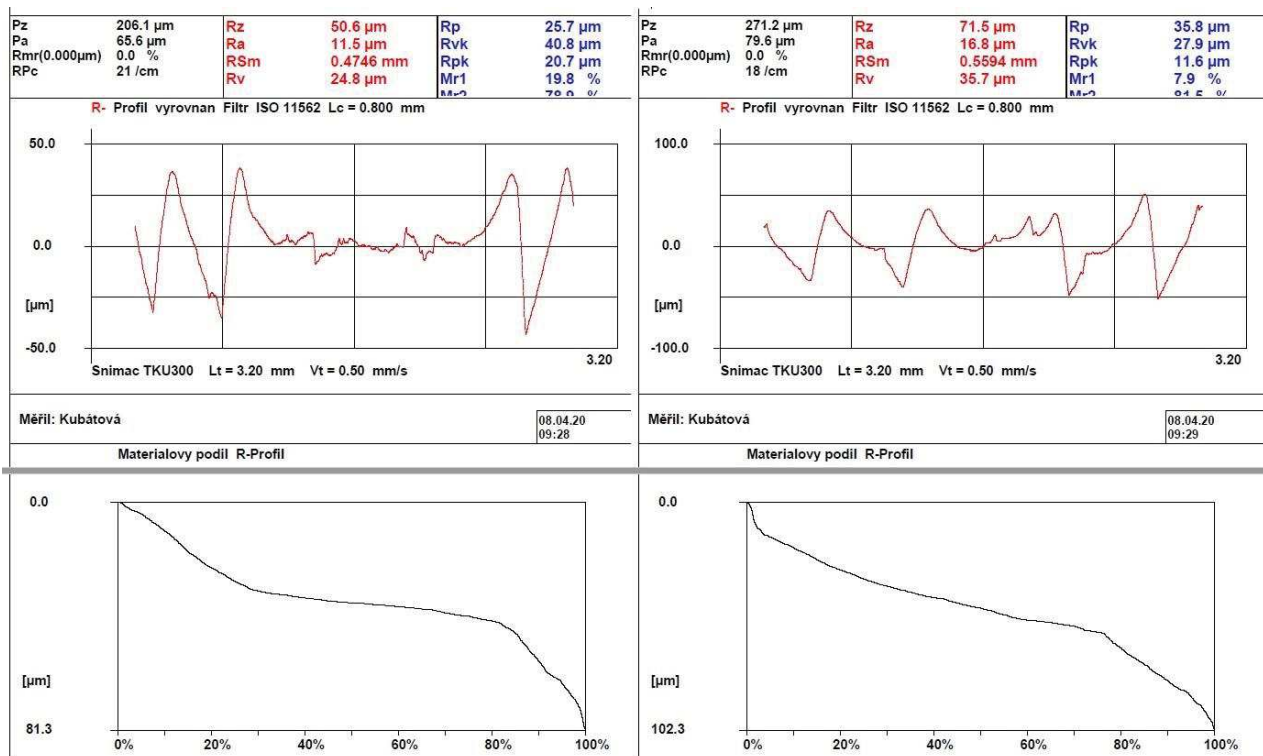
Obr. VIII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-M_0,05 (FDM)



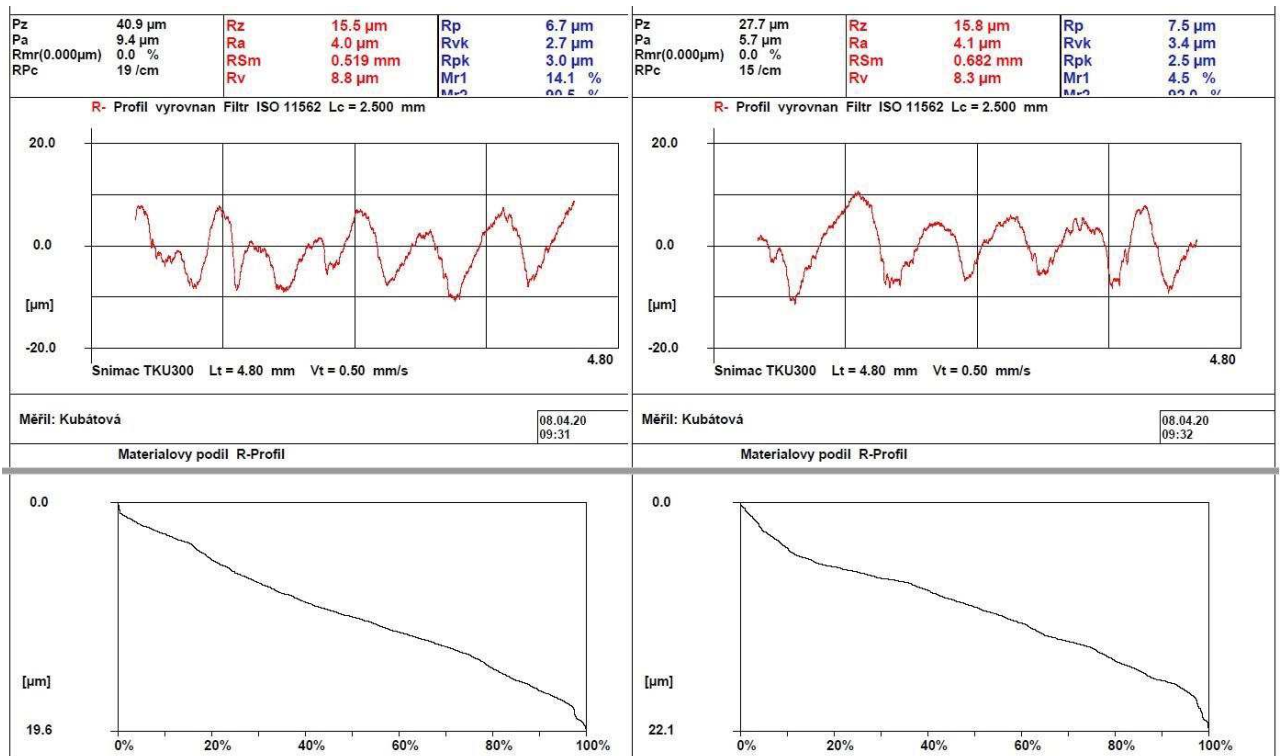
Obr. IX: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-M_0,05 (FDM)



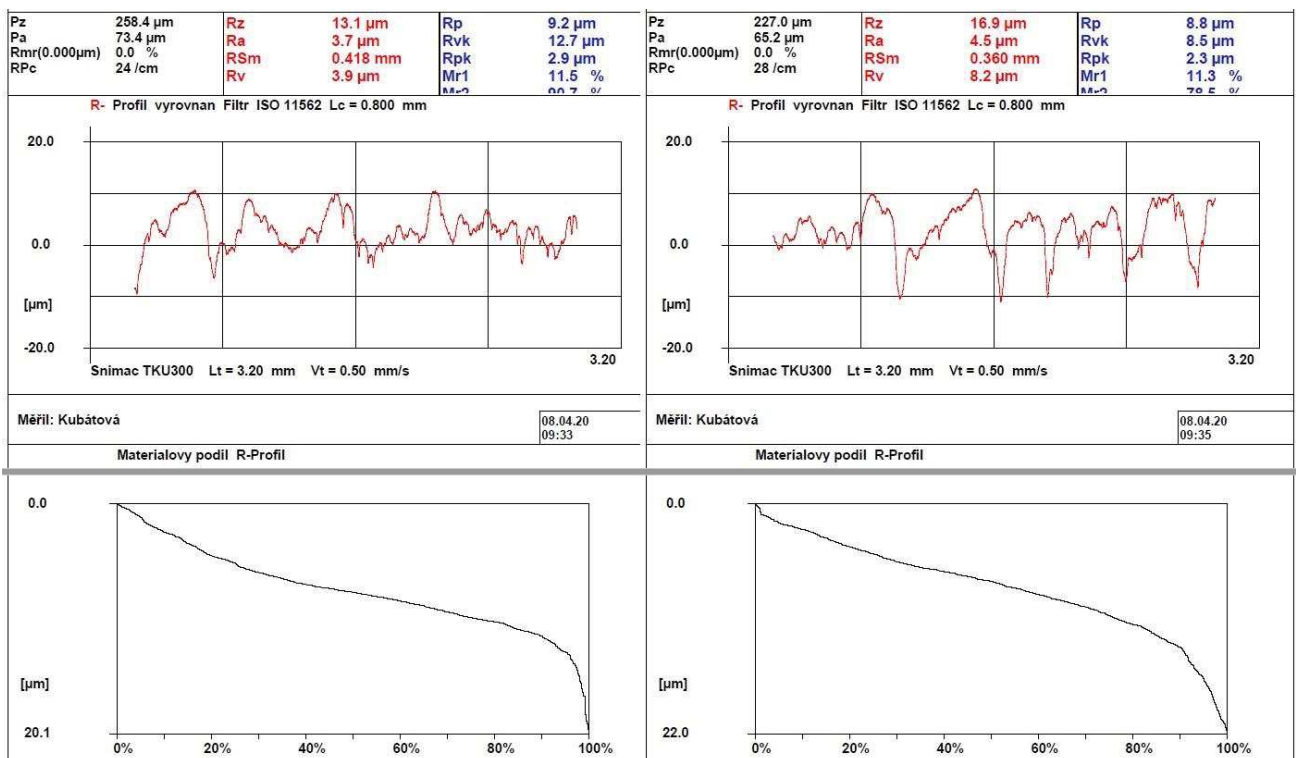
Obr. X: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu MoldLay (FDM)



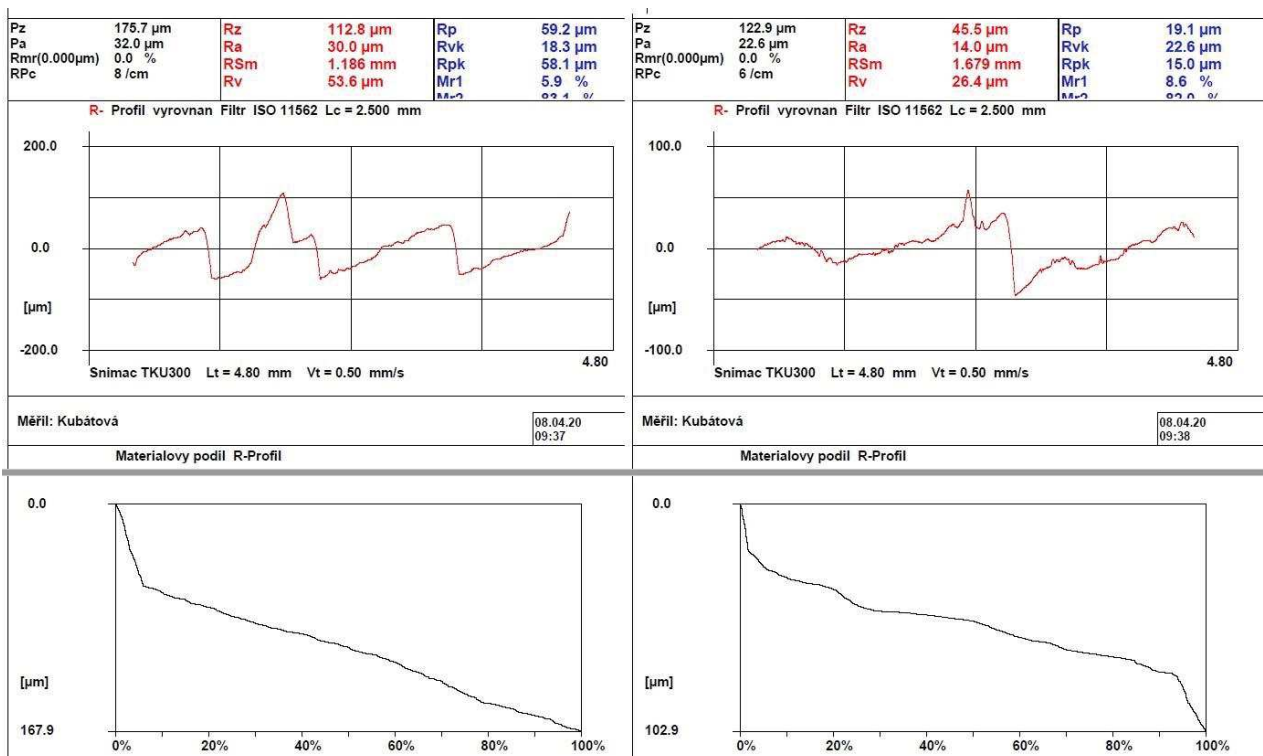
Obr. XI: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu MoldLay (FDM)



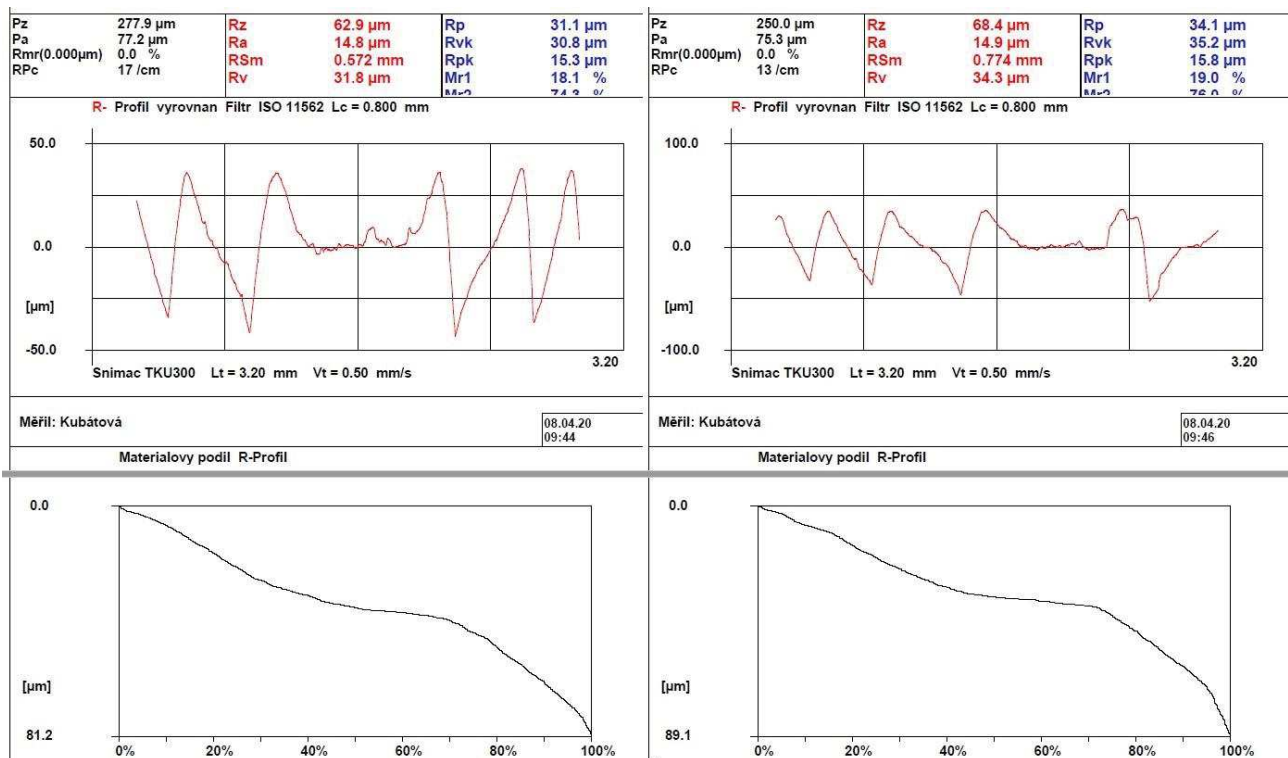
Obr. XII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu M3 Crystal (MJM)



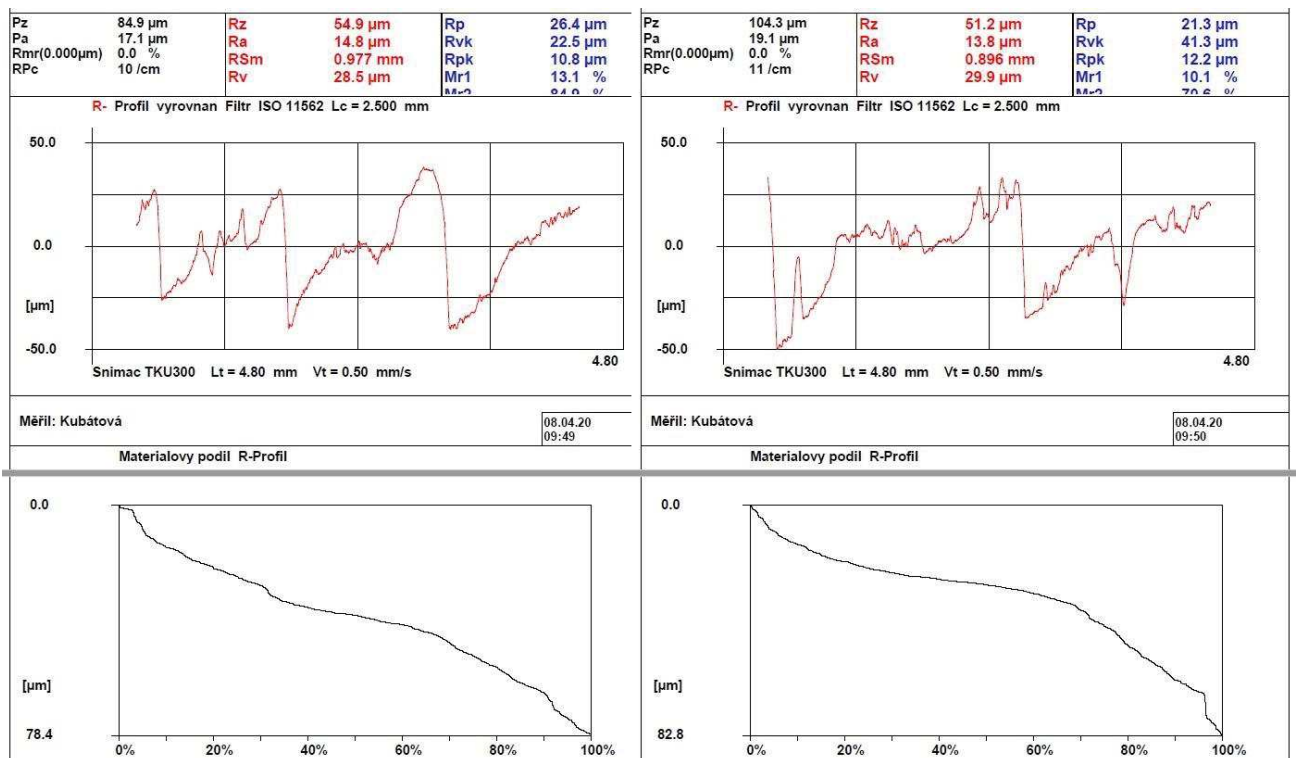
Obr. XIII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu M3 Crystal (MJM)



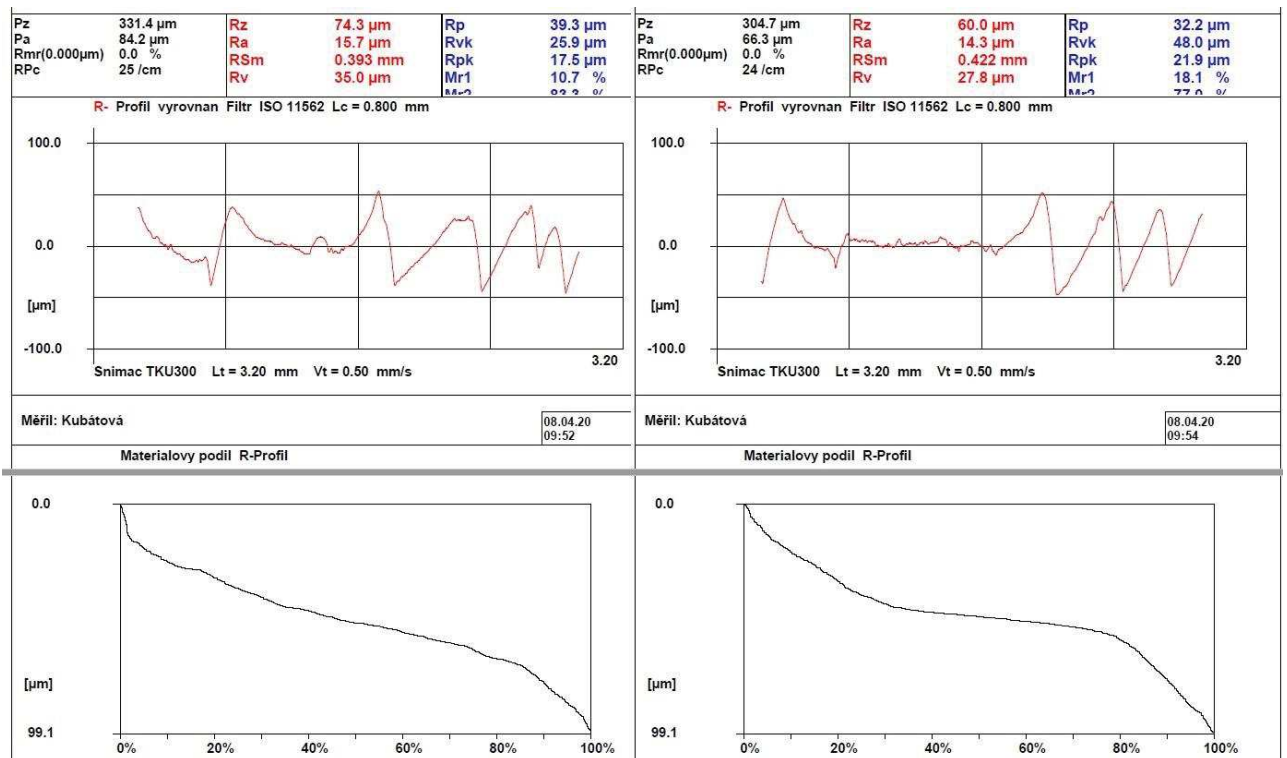
Obr. XIV: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu PVA (FDM)



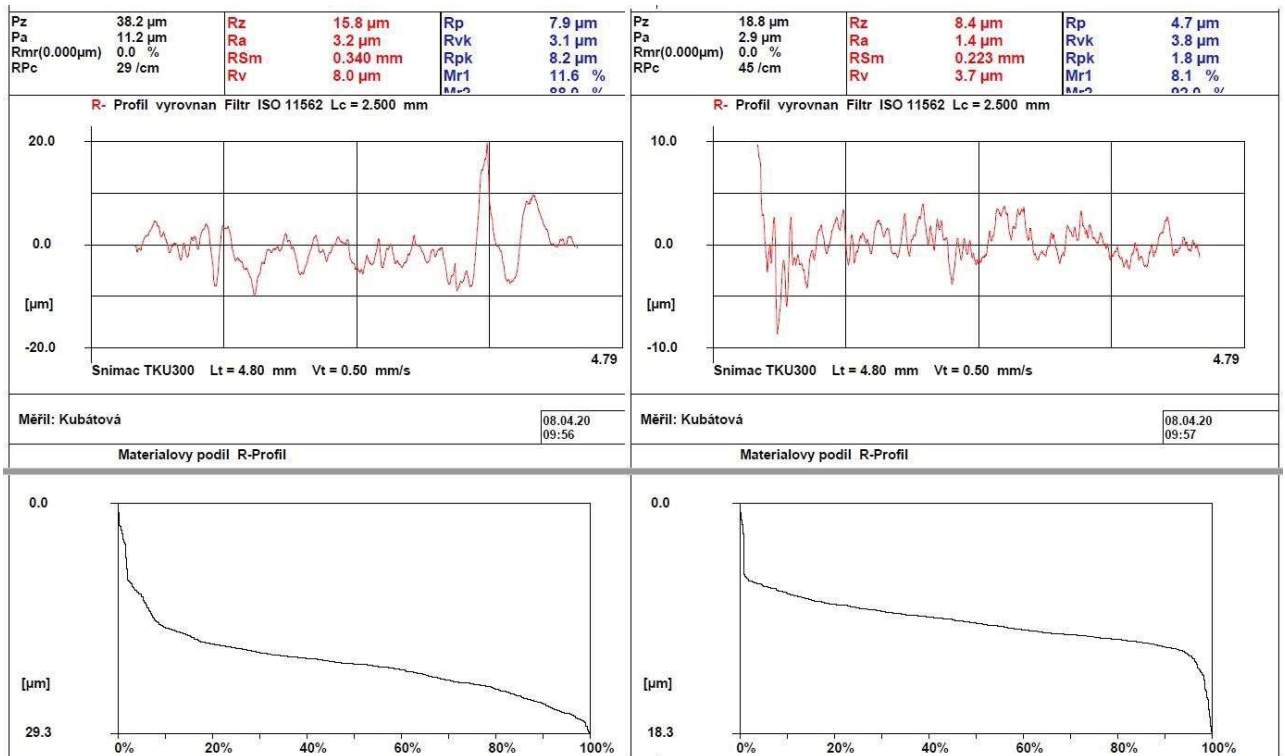
Obr. XV: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu PVA (FDM)



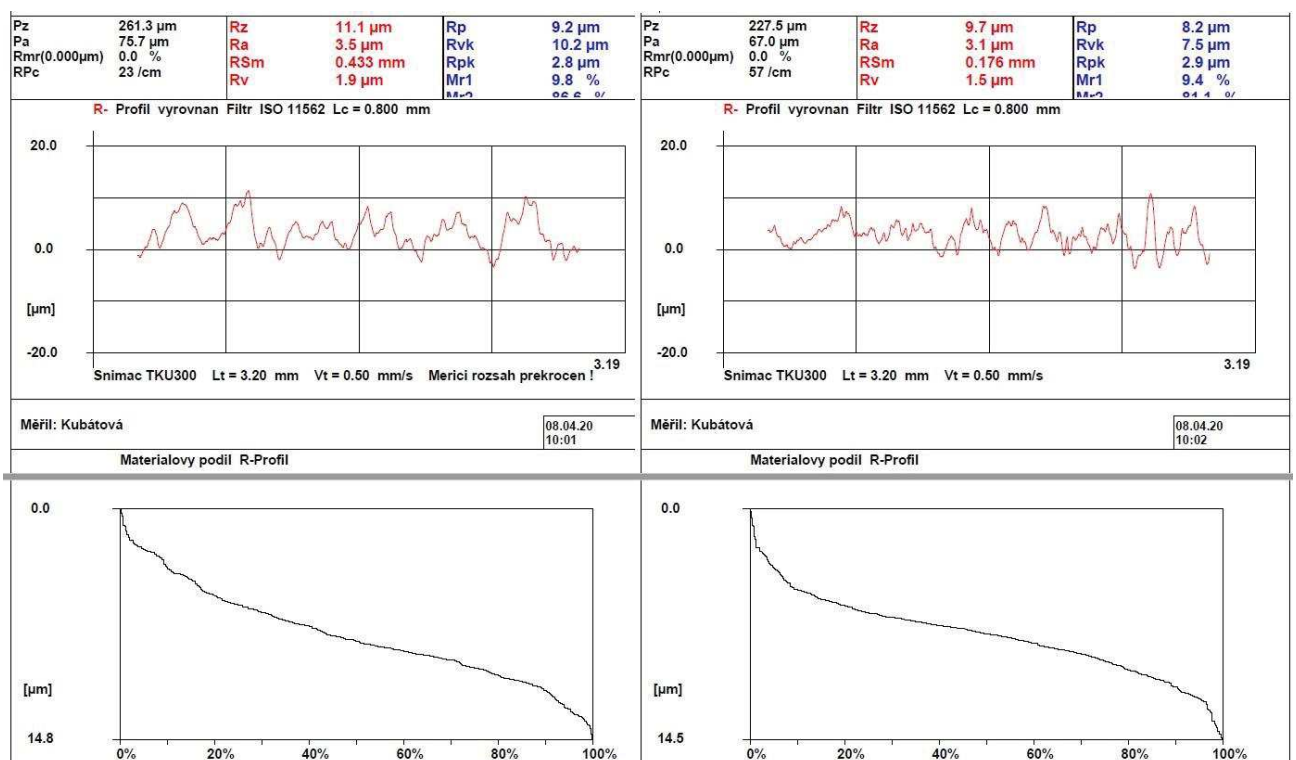
Obr. XVI: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-Č (FDM)



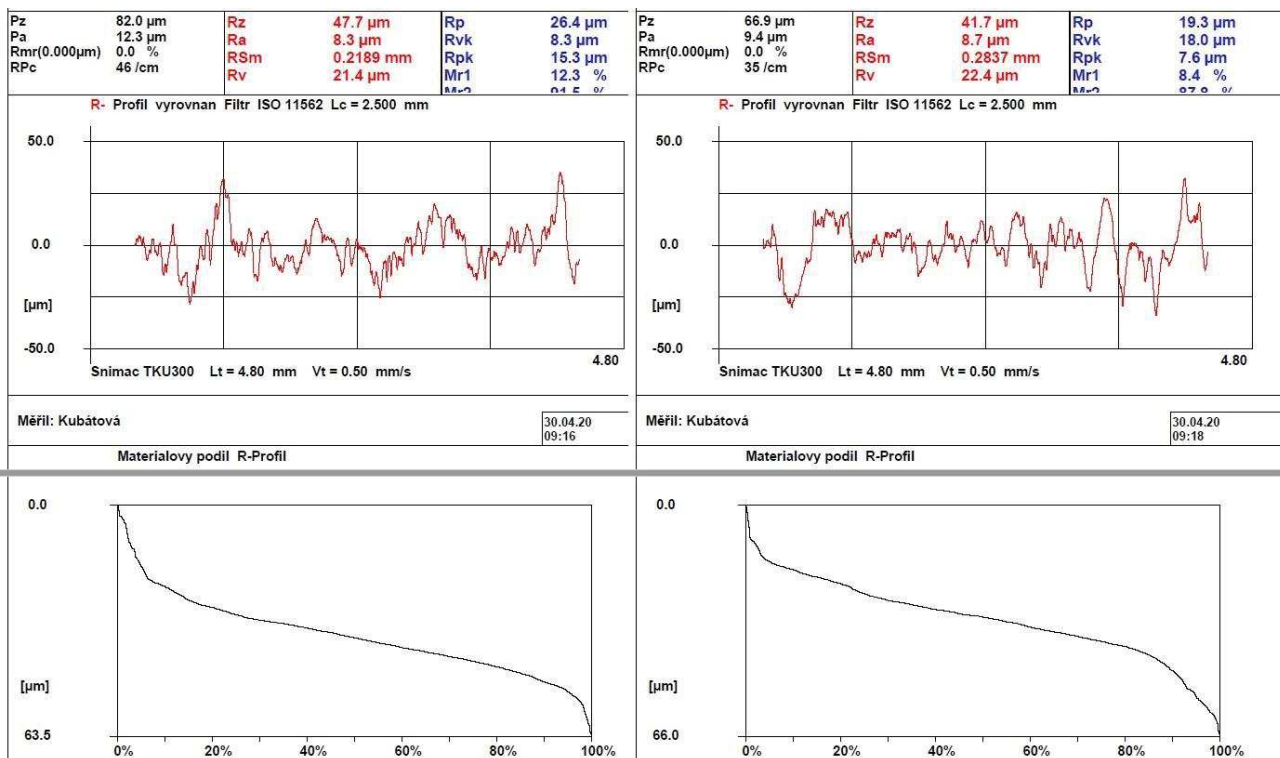
Obr. XVII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu PLA-Č (FDM)



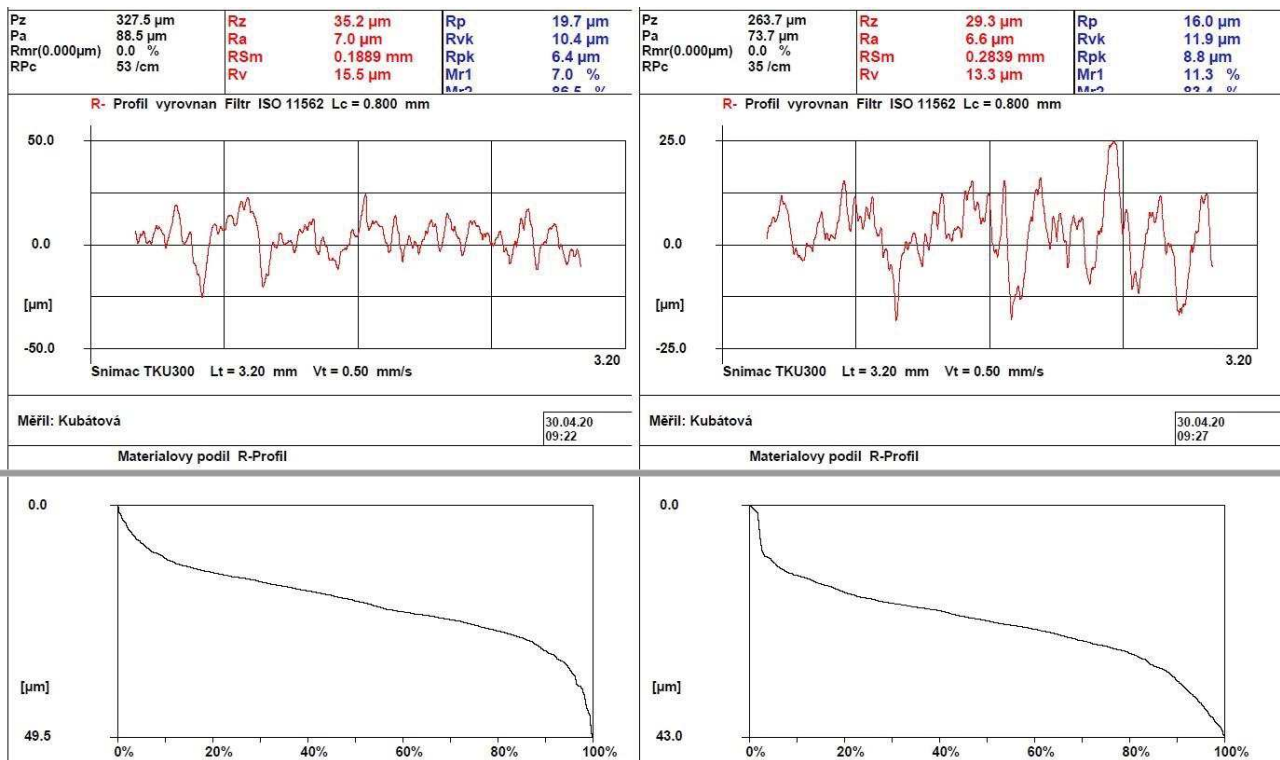
Obr. XVIII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu Castable Wax (SLA)



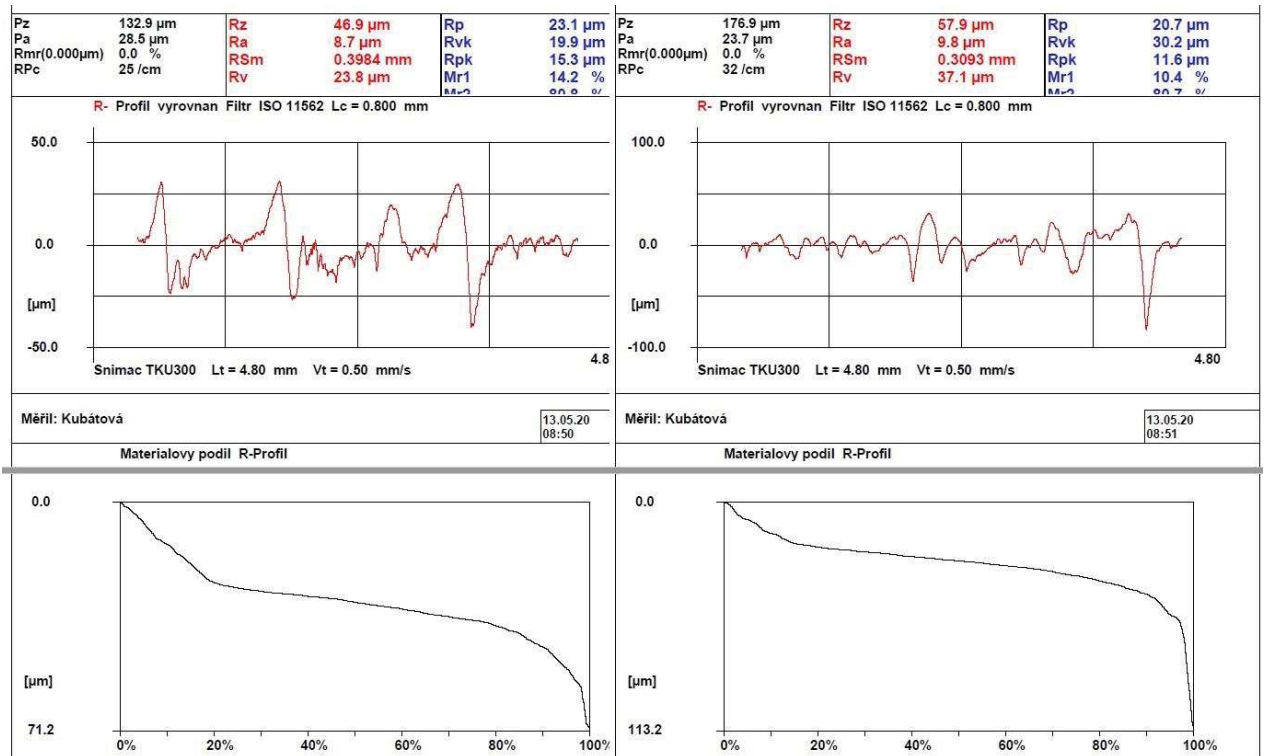
Obr. XIX: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu Castable Wax (SLA)



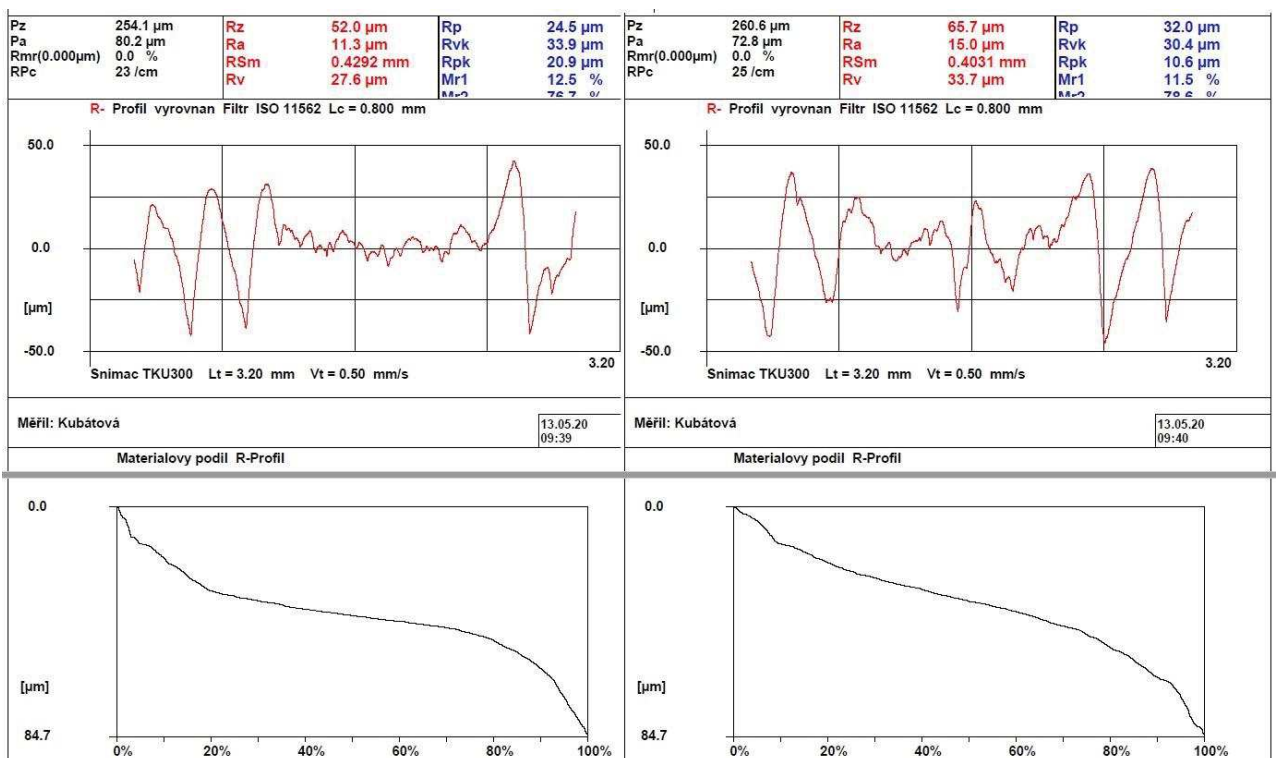
Obr. XX: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – model z materiálu PA 12 (MJF)



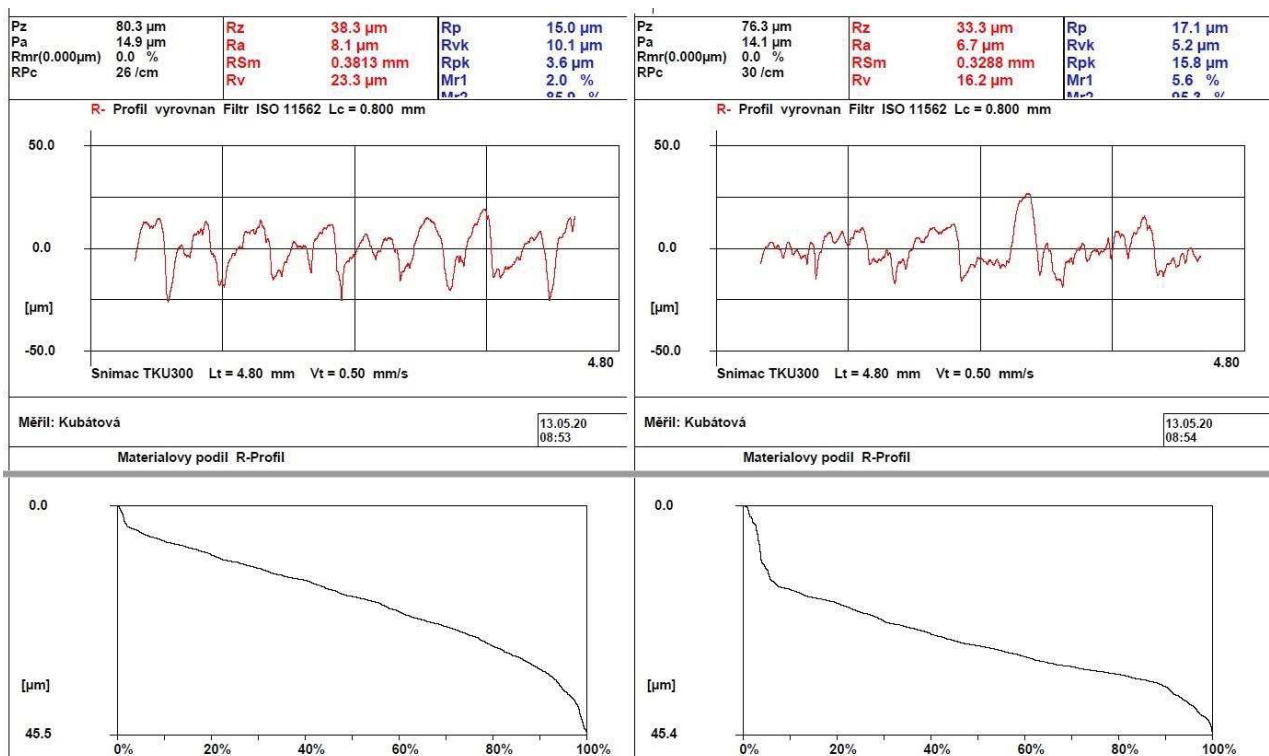
Obr. XXI: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – model z materiálu PA 12 (MJF)



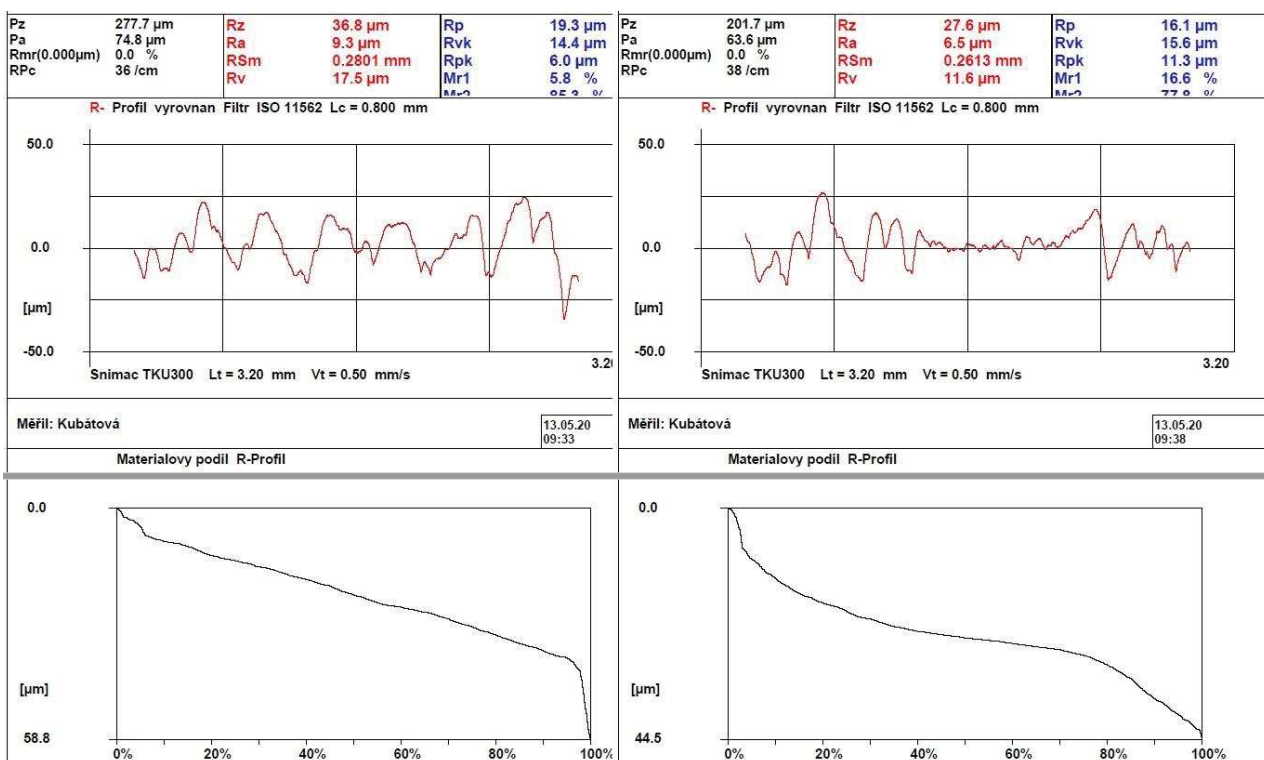
Obr. XXII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-Č (FDM)



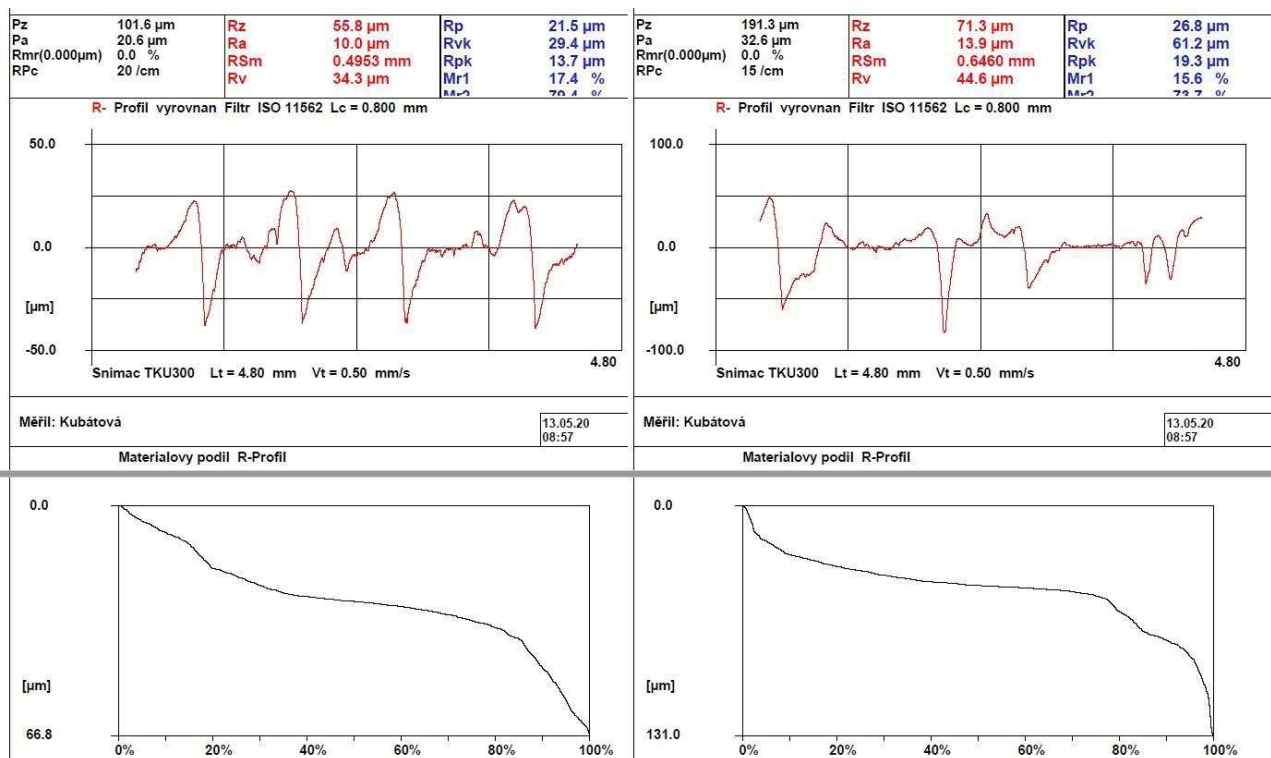
Obr. XXIII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-Č (FDM)



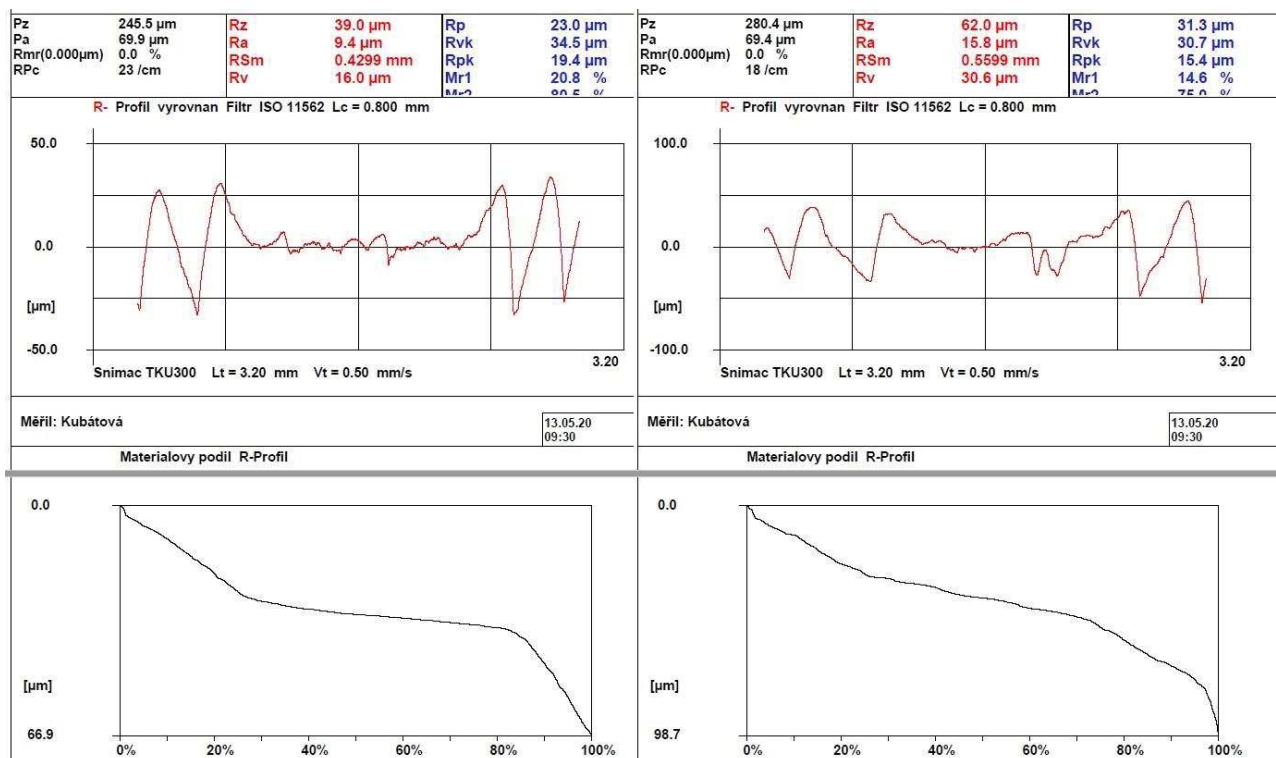
Obr. XXIV: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-M_0,1 (FDM)



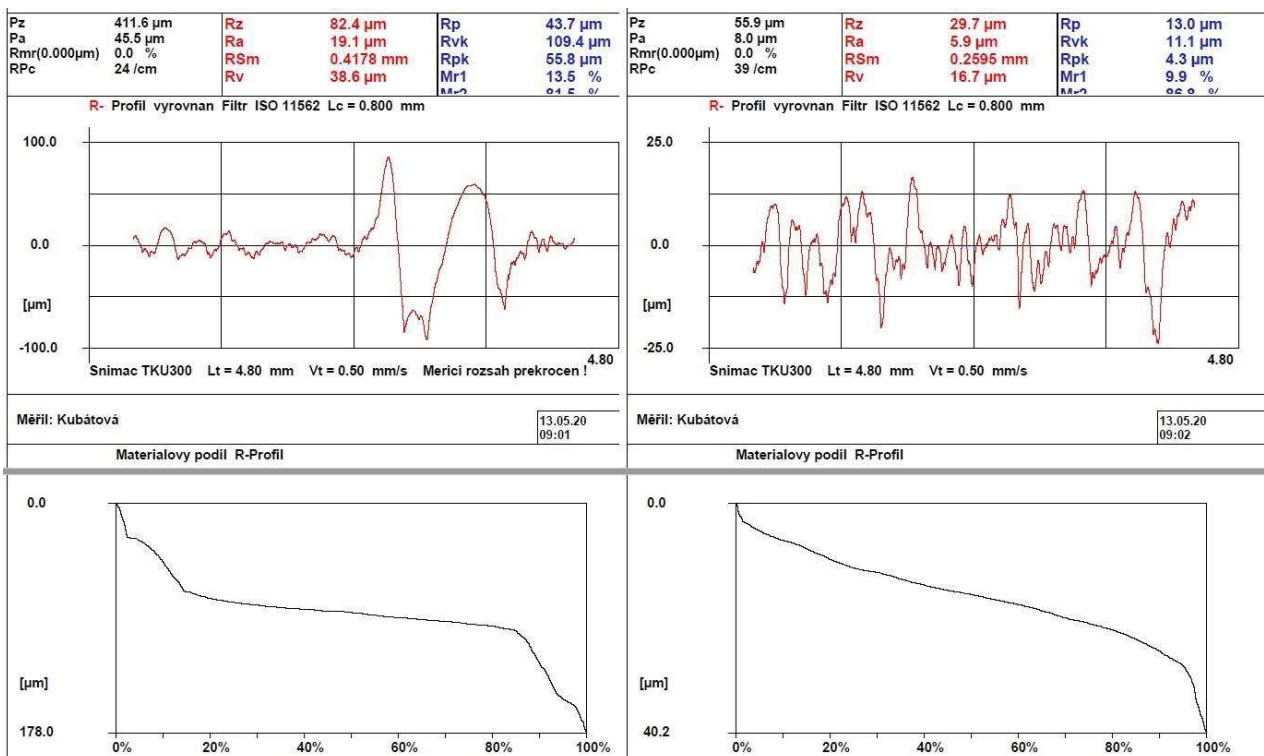
Obr. XXV: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-M_0,1 (FDM)



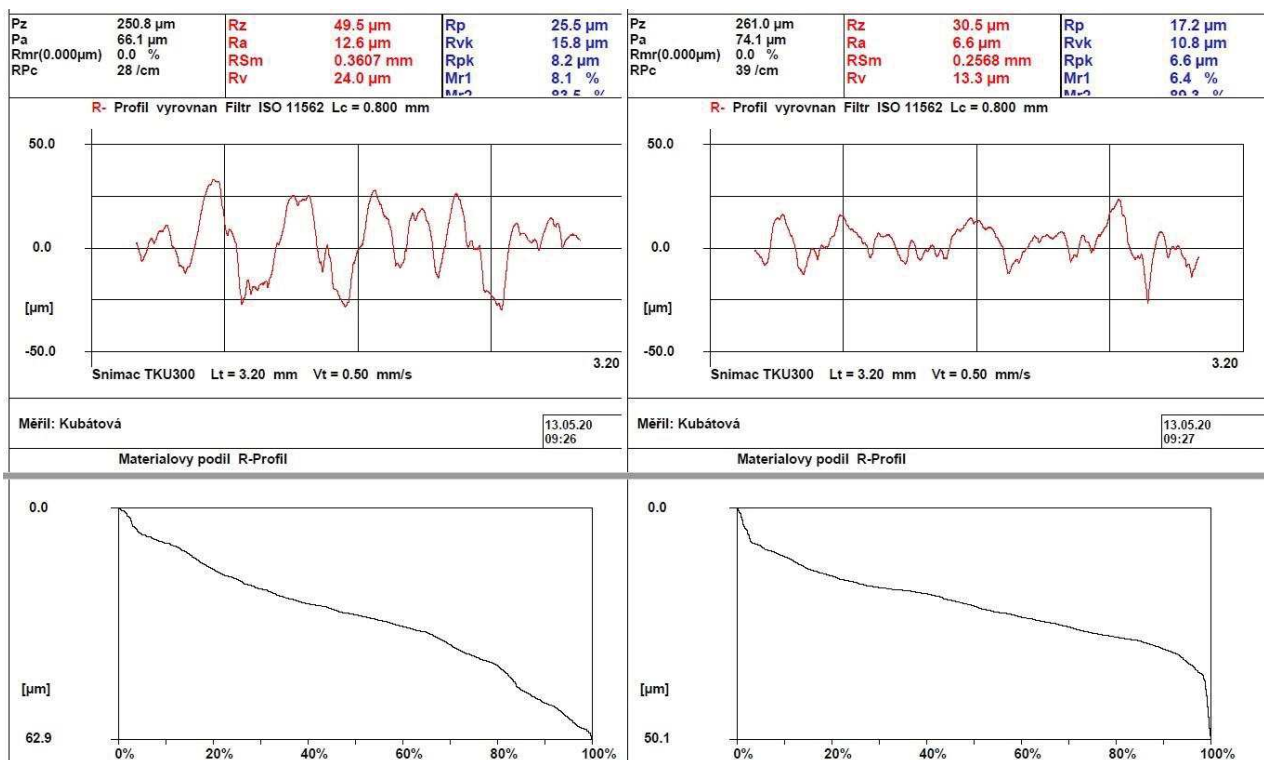
Obr. XXVI: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu MoldLay (FDM)



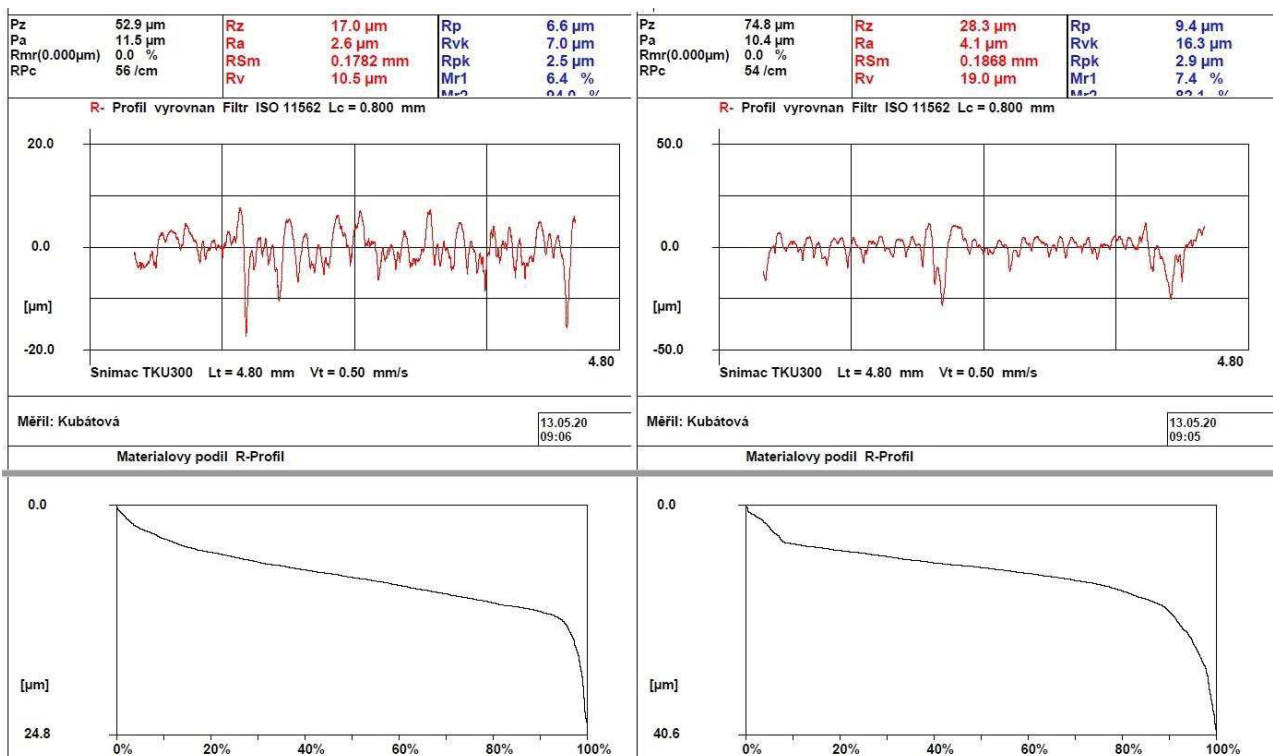
Obr. XXVII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu MoldLay (FDM)



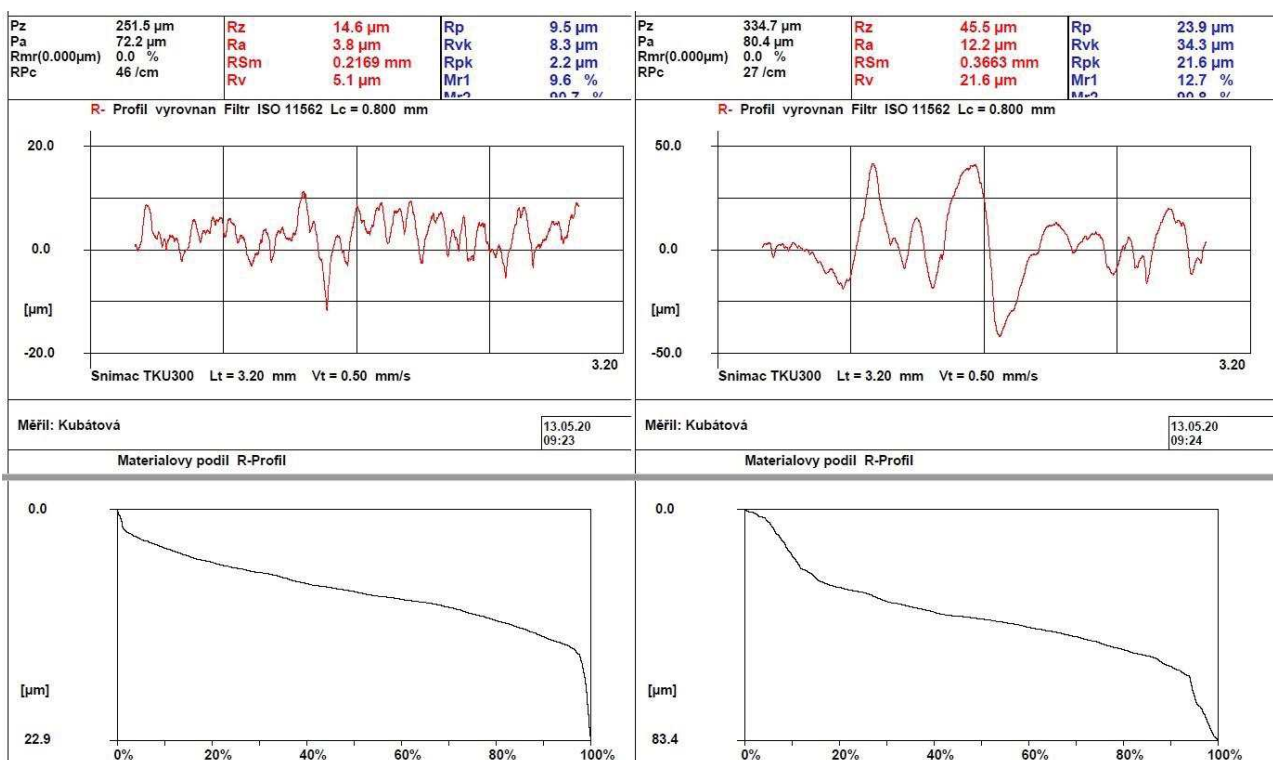
Obr. XXVIII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PA 12 (MJF)



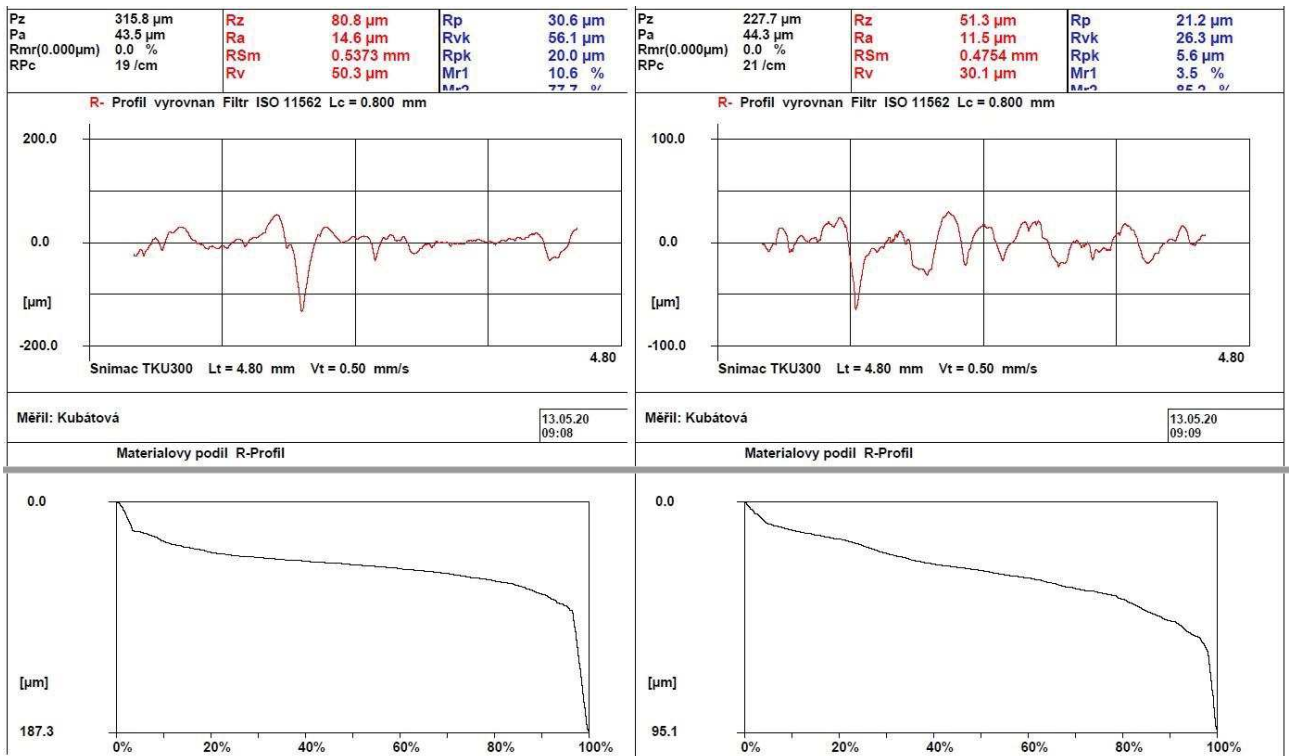
Obr. XXIX: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PA 12 (MJF)



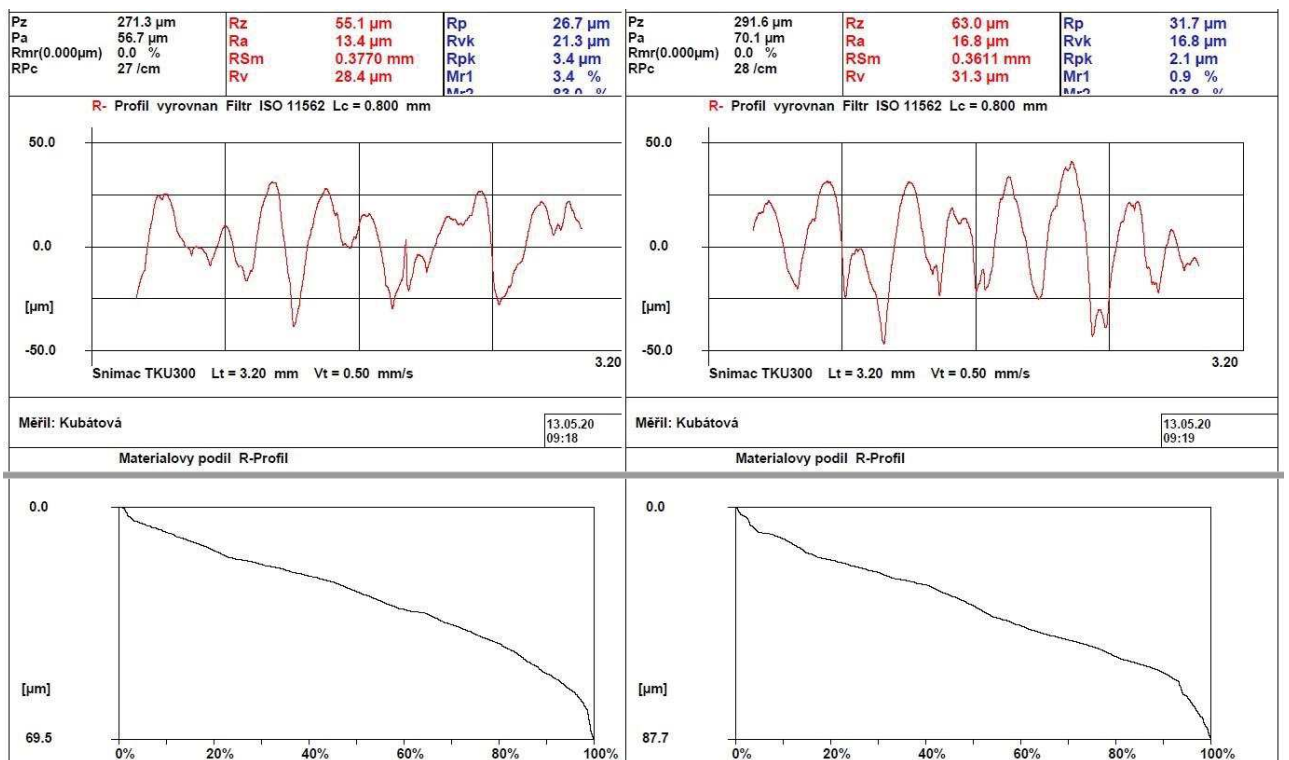
Obr. XXX: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu Castable Wax (SLA)



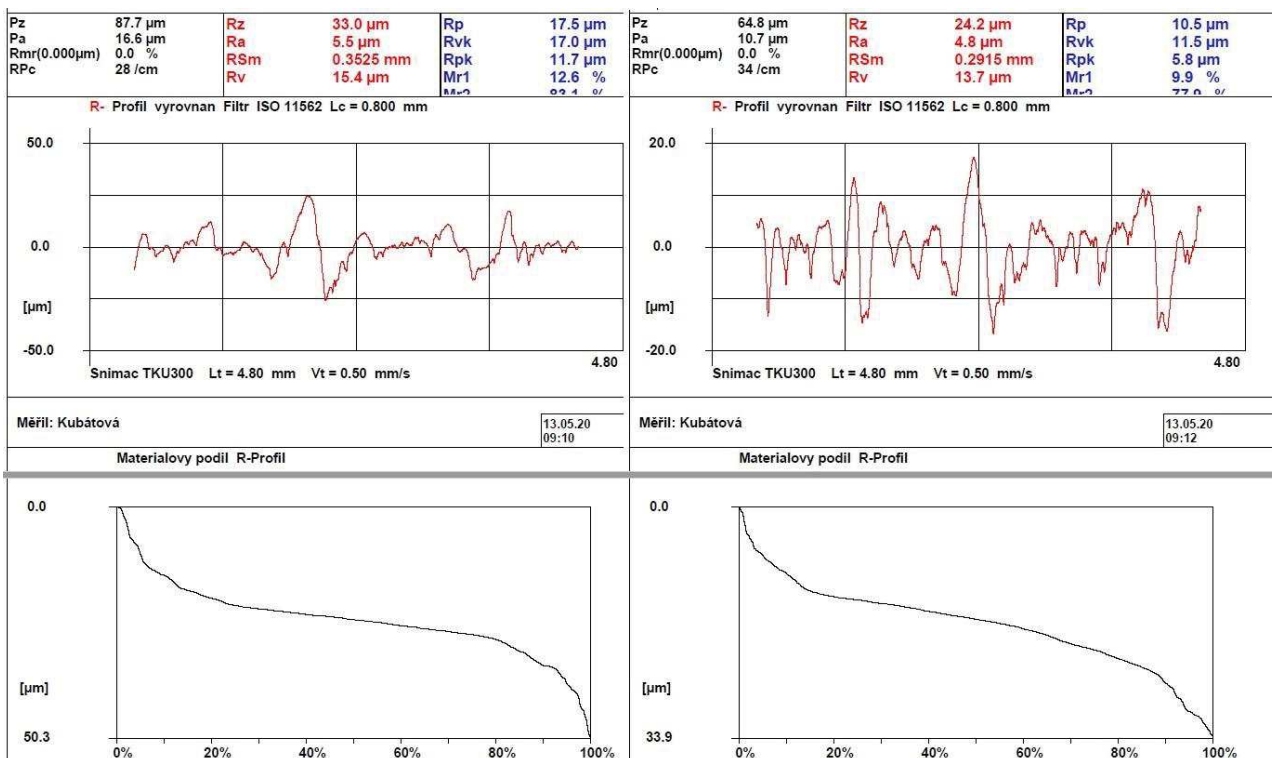
Obr. XXXI: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu Castable Wax (SLA)



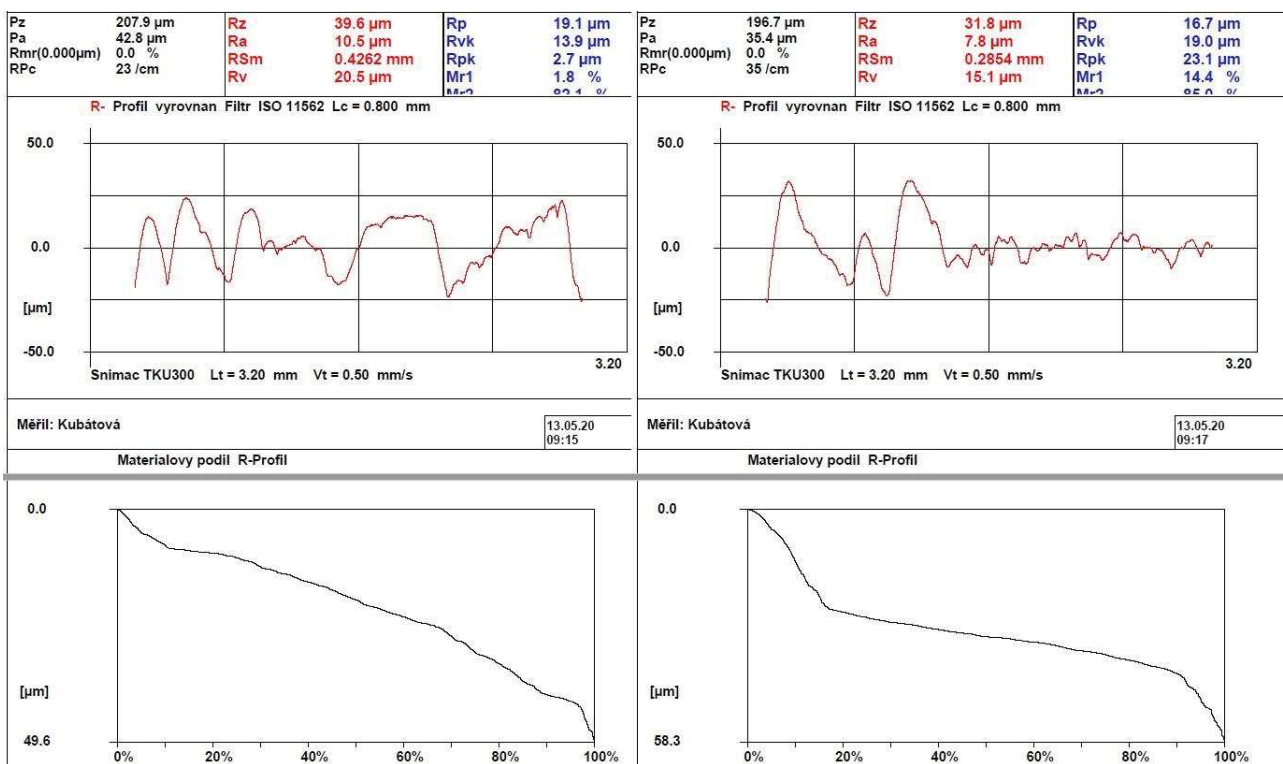
Obr. XXXII: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PVA (FDM)



Obr. XXXIII: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PVA (FDM)

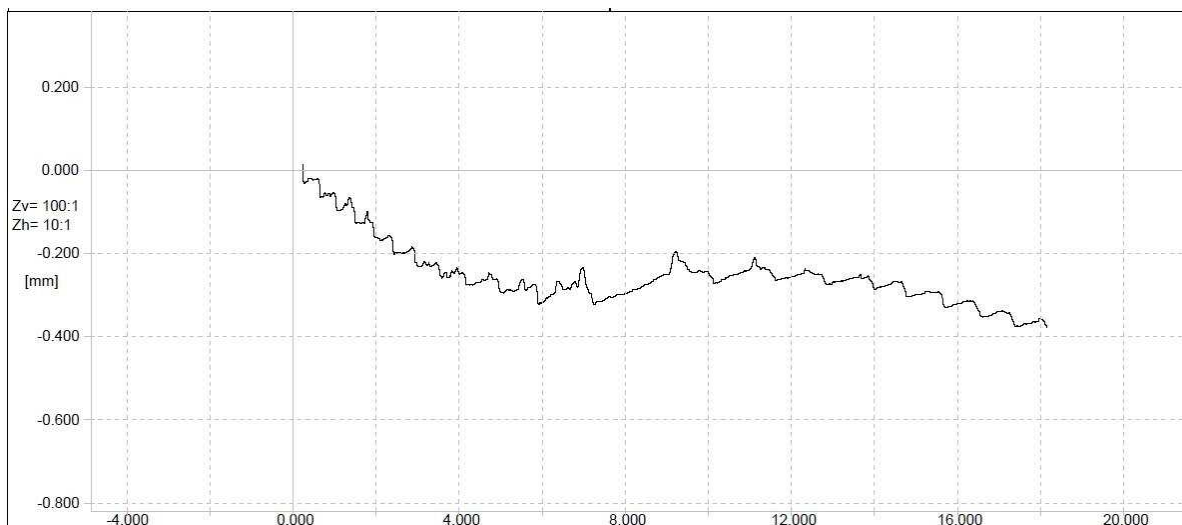


Obr. XXXIV: Data z podélného (P) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-M_0,05 (FDM)

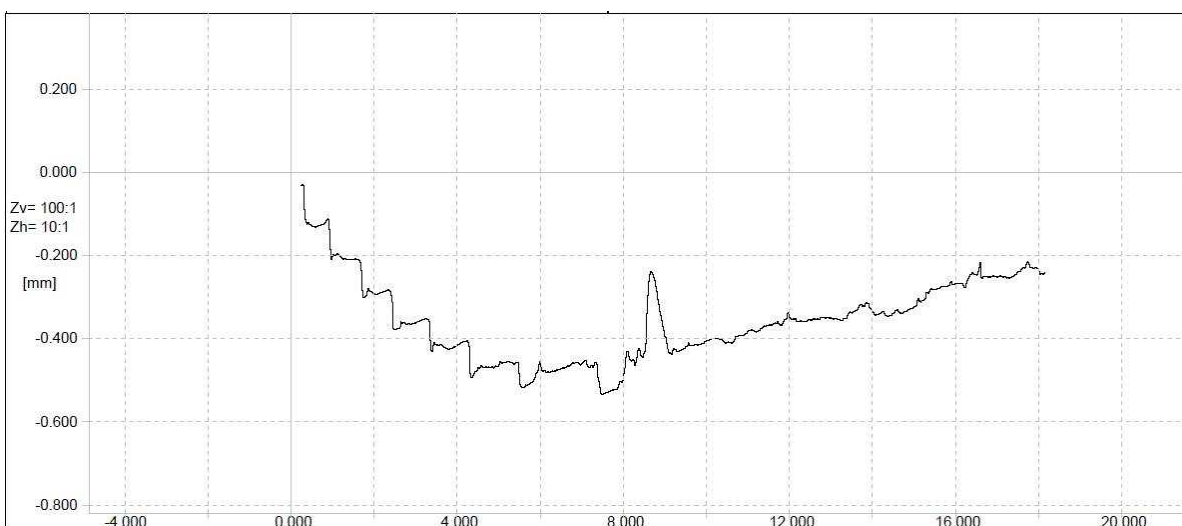


Obr. XXXV: Data z kolmého (K) měření na drsnoměru – odlitek dle modelu z materiálu PLA-M_0,05 (FDM)

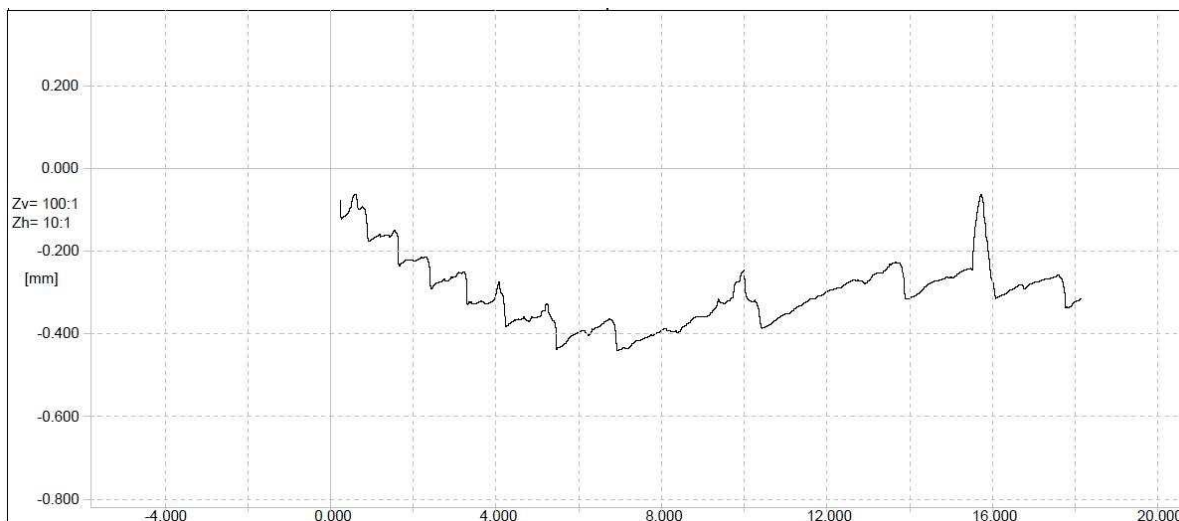
Data z profilometru



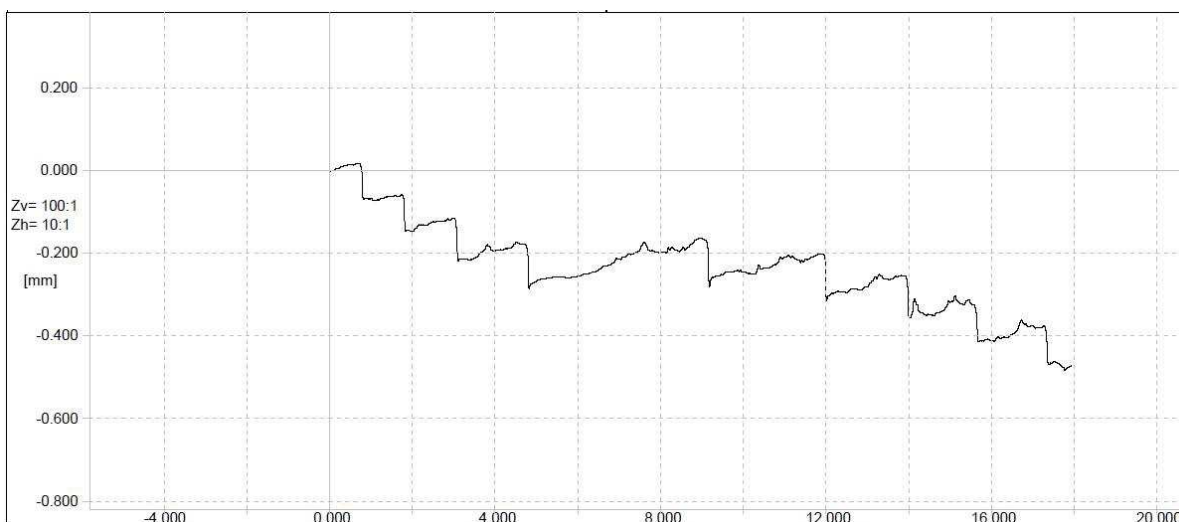
Obr. XXXVI: Profil modelu z PLA-M_0,1 (FDM)



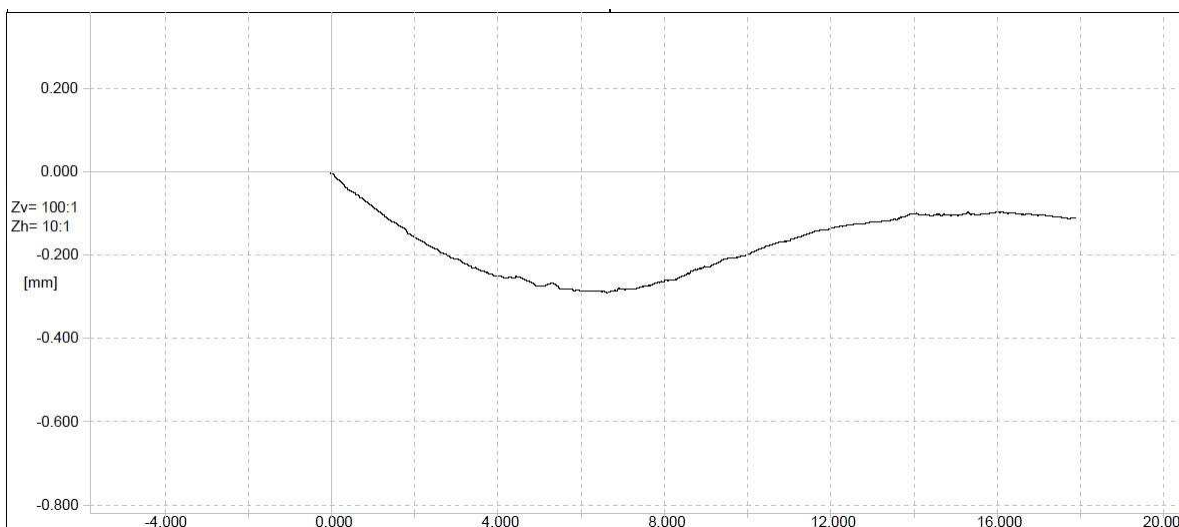
Obr. XXXVII: Profil modelu z PLA-M_0,05 (FDM)



Obr. XXXVIII: Profil modelu z MoldLay (FDM)



Obr. XXXIX: Profil modelu z PVA (FDM)



Obr. XL: Profil modelu z Castable Wax (SLA)