



Vliv orientace 3D tisku modelu na dokončovací operace u technologie Polyjet v technickém vývoji Škoda Auto a.s.

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T049 – Výrobní systémy a procesy

Autor práce: **Bc. David Martiš**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Šafka, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David Martiš**
Osobní číslo: **S16000309**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní systémy a procesy**
Název tématu: **Vliv orientace 3D tisku modelu na dokončovací operace u technologie Polyjet v technickém vývoji Škoda Auto a.s.**
Zadávající katedra: **Katedra výrobních systémů a automatizace**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je provést a vyhodnotit experimenty vedoucí ke zlepšení užitných vlastností prototypů vyrobených technologií Polyjet. Součástí práce bude 3D tisk modelů v různé orientaci v pracovním prostoru tiskárny. Dále budou provedeny testy různých typů dokončovacích operací, které povedou ke zkvalitnění vnějšího povrchu modelu. Student musí provést rešerši stávajících postupů čištění dílců od podpor. Hlavní důraz bude kladen na výslednou "čistotu" a rozměrovou přesnost modelu.

1. Provést rešerši dokončovacích operací pro technologii 3D tisku "PolyJet".
2. Navrhnout 3D modely testovacích součástí včetně dvoukomponentního 3D tisku a vybrat vhodné materiály pro testování.
3. Provést 3D tisk modelů v navrhnutých orientacích v pracovním prostoru a různých tiskových módech.
4. Definovat a aplikovat optimalizovaný postup odstranění podpor.
5. Provést kontrolní měření geometrické přesnosti vytištěných dílců, měření tvrdosti materiálů (Shore).
6. Zhodnotit náročnost a kvalitu dokončovacích operací vnějšího povrchu modelu.
7. Navrhnout metodiku čištění dílců pro technologii PolyJet

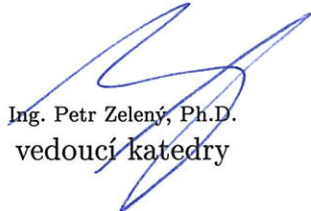
Rozsah grafických prací: **dle potřeb**
Rozsah pracovní zprávy: **60 stran textu včetně příloh**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] NOORANI, R. **Rapid Prototyping: principles and applications**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006. ISBN 0-471-73001-7.
[2] JACOBS, P. F. **Stereolithography and other RPandM technologies: from rapid prototyping to rapid tooling**. New York: ASME Press, 1996. ISBN 0-87263-467-1.
[3] GIBSON, I., D.W. ROSEN a B. STUCKER. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. New York: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-1119-3.
[4] HOPKINSON, N., R. HAGUE a P. DICKENS. **Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age**. Chichester: Wiley, 2006. ISBN 978-0-470-01613-8.
[5] LIU, D., V.V. VALENCIA, a A.B. BADIRU. **Additive manufacturing handbook**. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017. ISBN: 9781482264081.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Šafka, Ph.D.**
Katedra výrobních systémů a automatizace
Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Němeček, MBA**
Škoda Auto a.s.
Ostatní konzultanti: **Martin Sova**
Škoda Auto a.s.
Datum zadání diplomové práce: **15. listopadu 2017**
Termín odevzdání diplomové práce: **15. května 2019**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Petr Zelený, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při vedení diplomové práce.

Za odborný dohled a podporu děkuji Ing. Tomáši Němečkovi, MBA a Martinu Sovovy z firmy Škoda Auto a.s.

Mé poděkování patří též Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. a Ing. Lukáši Voleskému za poskytnuté rady a pomoc s obsluhou měřících zařízení. Ing. Radomíru Mendřickému, Ph.D. děkuji za provedené optické měření.

Za poskytnutou kooperaci děkuji firmě SILROC CZ, a.s. a rovněž firmě OTEC GmbH.

Závěrem bych rád poděkoval mé rodině, manželce a dcerám za podporu a trpělivost po celou dobu mého vysokoškolského studia.

TÉMA: Vliv orientace 3D tisku modelu na dokončovací operace u technologie PolyJet v technickém vývoji ŠKODA AUTO A.S.

ABSTRAKT: Diplomová práce se zabývá různými dokončovacími operacemi u technologie 3D tisku PolyJet Matrix. Testovanými materiály byly fotopolymerní akryláty dostupné pro tuto technologii. Praktická část diplomové práce popisuje jednotlivé užité zkoušky (měření tvrdosti povrchu, měření drsnosti povrchu a postprocessingové dokončovací metody). Testování a vyhodnocení zkoušek probíhalo dle příslušných mezinárodních norem ČSN ISO 7619-1 a ČSN ISO 4287. Výsledkem této diplomové práce je porovnání jednotlivých dokončovacích operací a návržení nové metodiky postprocessingu pro dokončovací operace u technologie PolyJet Matrix.

KLÍČOVÁ SLOVA: (3D tisk, dokončovací operace, postprocessing, metodika, PolyJet Matrix)

THEME: THE IMPACT OF 3D PRINT MODEL ORIENTATION ON FINISHING OPERATION FOR POLYJET TECHNOLOGY IN ŠKODA AUTO A.S. TECHNICAL DEVELOPEMENT

ABSTRACT: Diploma thesis deals with different finishing operations for 3D print technology PolyJet. Tested materials were photopolymer acrylate available for this technology. Experimental part of diploma thesis describes applied tests (surface hardness and surface roughness measurement as well as postprocessing finishing methods). These tests were elaborated in accordance with particular international standards ISO 7619-1 and ISO 4287. The result of this diploma thesis is comparison of particular finishing operations and proposition of new postprocessing methodology for PolyJet Matrix finishing operations.

KEYWORDS: (3D print, finishing operation, postprocessing, methodology, PolyJet Matrix)

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra výrobních systémů a automatizace

Počet stran : 66
Počet příloh : 3
Počet obrázků : 36
Počet tabulek : 3
Počet modelů
nebo jiných příloh: 0

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam grafů.....	9
Seznam tabulek	9
Seznam použitých zkratk a symbolů	9
Úvod.....	10
1 Rešerše dokončovacích operací ve Škoda Auto a.s.	11
2 Testované díly	13
2.1 Dvoukomponentní díl.....	16
2.2 Designový díl.....	18
3 Zkušební metody.....	21
3.1 Stanovení tvrdosti vtláčováním	21
3.1.1 Popis metody a zkušebního zařízení.....	21
3.1.2 Určení zkušebních podmínek a postupu	22
3.2 Struktura povrchu: Profilová metoda	23
3.2.1 Definice parametrů profilu povrchu	24
4 Praktická část	26
4.1 Příprava a výroba testovacích a zkušebních těles.....	28
4.2 Měření tvrdosti Shore	30
4.3 Nekonvenční metoda – omílání.....	34
4.4 Konvenční metody.....	41
4.5 Metodika.....	56
5 Vyhodnocení	58
Závěr	60
Použitá literatura	61
Přílohy	63

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Vyjmutí vytištěného dílu z tiskárny [4].....	11
Obr. 1.2: Čištění vysokým tlakem vody [5].....	12
Obr. 1.3: Ultrazvuková lázeň hydroxidu sodného [6]	12
Obr. 2.1: Schéma výrobního procesu technologie PolyJet Matrix [8].....	13
Obr. 2.2: Materiál TangoBlack [10]	14
Obr. 2.3: Materiál Vero [11].....	15
Obr. 2.4: Dvoukomponentní díl - vedení vzduchu	16
Obr. 2.5: Vedení vzduchu zastavěné v sestavě Frontendu	17
Obr. 2.6: 3D tiskárna Objet Connex 500 [13].....	18
Obr. 2.7: Designový díl – část zadního světlometu	19
Obr. 2.8: Designový díl - zadní světlomet vozu Škoda Kodiaq [14].....	19
Obr. 3.1: Profil povrchu [17]	24
Obr. 3.2: Celková výška profilu [17].....	25
Obr. 4.1: 3D modely testovacích těles	28
Obr. 4.2: Testovací tělesa vyrobená na zařízení Objet Connex 500.....	29
Obr. 4.3: Testovací těleso pro zkoušku omílání a stavební podpora	30
Obr. 4.4: Dvoukomponentní zkušební tělesa vyrobená na zařízení Stratasys J750	30
Obr. 4.5: Průběh stanovení tvrdosti materiálu na zařízení Shore® Durometer	32
Obr. 4.6: Různé druhy omílacích brusných těles [18]	34
Obr. 4.7: Kryogenní omílací zařízení [19].....	35
Obr. 4.8: Stav testovacího tělesa po zkoušce v kryogenní komoře	36
Obr. 4.9: Diskové odstředivé zařízení OTEC [18]	37
Obr. 4.10: Bezdotykový optický 3D skener ATOS [20]	39
Obr. 4.11: 3D mapa rozměrových odchylek materiál Vero.....	40
Obr. 4.12: 3D mapa rozměrových odchylek materiál Tango	40
Obr. 4.13: Vysokotlaké vodní mytí, zařízení PowerBlast [21].....	42
Obr. 4.14: Princip ultrazvukového čištění	44
Obr. 4.15: Stupnice pH	45
Obr. 4.16: Vodní sklo [23].....	46
Obr. 4.17: Zkušební tělesa ponořená ve vysoce zásadité ultrazvukové lázni.....	47
Obr. 4.18: Měření hodnot pH jednotlivých roztoků	49
Obr. 4.19: Zkušební tělesa ponořená v neutralizační lázni glycerolu.....	50

Obr. 4.20: Průběh měření geometrické přesnosti povrchu 2K dílu	51
Obr. 4.21: Pracovní prostředí softwaru Bruker, výsledek měření	52
Obr. 4.22: Pokovené Designové díly	55

Seznam grafů

Graf 1.: Naměřené hodnoty tvrdosti Shore, materiál TangoBlack	33
Graf 2.: Naměřené hodnoty tvrdosti Shore, materiál Agilus30	33
Graf 3.: Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu Designový díl.....	53
Graf 4.: Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu 2K díl	54

Seznam tabulek

Tabulka 1.: Matice výrobních parametrů zkušebních těles	29
Tabulka 2.: Porovnání mechanických vlastností materiálů Tango a Agilus [9], [10]	31
Tabulka 3.: Bodové ohodnocení jednotlivých postprocessingových metod.....	56

Seznam použitých zkratk a symbolů

2K	dvoukomponentní
3D	trojrozměrný
Å	ångström (jednotka délky, 1Å = 0,1 nm)
C ₃ H ₈ O ₃	glycerol
CAD	Computer-aided drafting (počítačem podporované projektování)
ČSN	česká technická norma
HD	high definition (vysoké rozlišení zobrazení)
ISO	mezinárodní norma
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
NaOH	hydroxid sodný
Na ₂ SiO ₃	křemičitan sodný
PC	personal computer (osobní počítač)
pH	potential of hydrogen (potenciál vodíku)
STL	STereoLithography (typ CAD souboru pro stereolitografii)
UV	ultrafialové záření

Úvod

Technický vývoj společnosti Škoda Auto a.s. je komplexní vývojové centrum skládající se z devíti samostatných organizačních jednotek. Společně zajišťujících vývoj vozů značky Škoda. Tato diplomová práce vznikla ve spolupráci s oddělení EGV, které je v rámci technického vývoje zodpovědné za stavbu prototypových vozů a modelů. Při výrobě prototypových dílů v tomto oddělení se značnou měrou využívají metody Rapid prototyping. Konkrétně se jedná o 3D tiskárny pracující na principu technologie PolyJet Matrix (vícemateriálové tryskání fotopolymerů) a technologie Fused Deposition Modeling (výroba vrstvením termoplastického materiálu). Pro účely této diplomové práce byla použita technologie PolyJet Matrix, zajišťující precizní výrobu 3D modelů a prototypů. [1]

Technologie Rapid Prototyping je jedním z mnoha prvků právě probíhající digitální transformace ve společnosti Škoda Auto a.s., vycházející z konceptu Průmysl 4.0. Cílem této transformace je tzv. Digitální továrna. Jedná se o výrobní prostředí kde stroje, výrobky a další „SMART“ objekty dokáží komunikovat samy mezi sebou. Výsledkem této transformace, tak může být vysoce sofistikovaný výrobní proces. Na jehož začátku byl jedinečný požadavek zákazníka a na jehož konci bude stát výrobek vyprodukovaný plně automatizovanými stroji a 3D tiskárnami. [2]

Tato diplomová práce se zabývá analýzou rozdílných dokončovacích operací pro díly vyrobené pomocí technologie 3D tisku – PolyJet Matrix. Úvodní část této práce je věnována rešerši dokončovacích operací u technologie PolyJet Matrix používaných ve společnosti Škoda Auto. Následně je uvedena technická specifikace jednotlivých dílů, jejich materiálů a vlastní popis výrobní technologie. Je zde rovněž uveden seznam užitých testovacích metod, jedná se především o měření tvrdosti povrchu dle mezinárodní normy ČSN ISO 7619-1. Dále pak měření geometrické přesnosti povrchu, mezinárodní norma ČSN ISO 4287. Praktická část této diplomové práce popisuje průběh samotného testování, výběr a výrobu jednotlivých zkušebních těles. V závěru diplomové práce je uvedeno vyhodnocení a celkové shrnutí nově získaných poznatků.

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout, provést a vyhodnotit experimenty vedoucí ke zlepšení užitných vlastností dílců vyrobených technologií PolyJet Matrix. Především pak navržení metodiky založené na zhodnocení náročnosti těchto metod a výsledné kvality vnějšího povrchu dílců.

1 Rešerše dokončovacích operací ve Škoda Auto a.s.

Hlavním představitelem technologie 3D tisku v Technickém vývoji společnosti Škoda Auto a.s. je oddělení EGV – Stavba prototypů a modelů. V rámci tohoto oddělení je ročně interním zákazníkům ve firmě Škoda dodáno přibližně 2 500 modelů, vyrobených prostřednictvím různých technologií 3D tisku. Zhotovené díly jsou určeny pro výrobu prototypů, potřeby designu, ale také v oddělení Motorsportu při stavbě závodních speciálů. V současné době jsou již možnosti 3D tisku využívány ve všech fázích vývoje vozu. To vše s cílem časové a finanční úspory, ale především možností téměř okamžitého dodání fyzického modelu. [3]

Všechny takto vyrobené díly musí po skončení výrobního cyklu a vyjmutí ze stroje podstoupit požadované dokončovací operace. Především se jedná o odstranění stavěcích podpory. V rámci této diplomové práce jsem se zaměřil pouze na ty operace, které se využívají pro technologii PolyJet Matrix. Ve výrobním provozu dílen EGV je v současné době aplikován následující postup:

1. Vyjmutí vytištěného dílu (Obr. 1.1)

- díl pokrytý podpurným materiálem je třeba pozorně vyjmout ze stavebního prostoru 3D tiskárny pomocí speciální stěrky



Obr. 1.1: Vyjmutí vytištěného dílu z tiskárny [4]

2. Manuální odstranění podpor

- ruční očištění větších částí podpurného materiálu

3. Tlaková voda (Obr. 1.2)

- otryskání zbylého podpůrného materiálu vysokým tlakem vody (až 120bar) a to i v těžko přístupných místech (dva druhy trysek)



Obr. 1.2: Čištění vysokým tlakem vody [5]

4. Ultrazvuková lázeň (Obr. 1.3)

- finální úkon představuje ponoření dílu do ultrazvukové vany s náplní 2% hydroxidu sodného na přesně stanovenou dobu



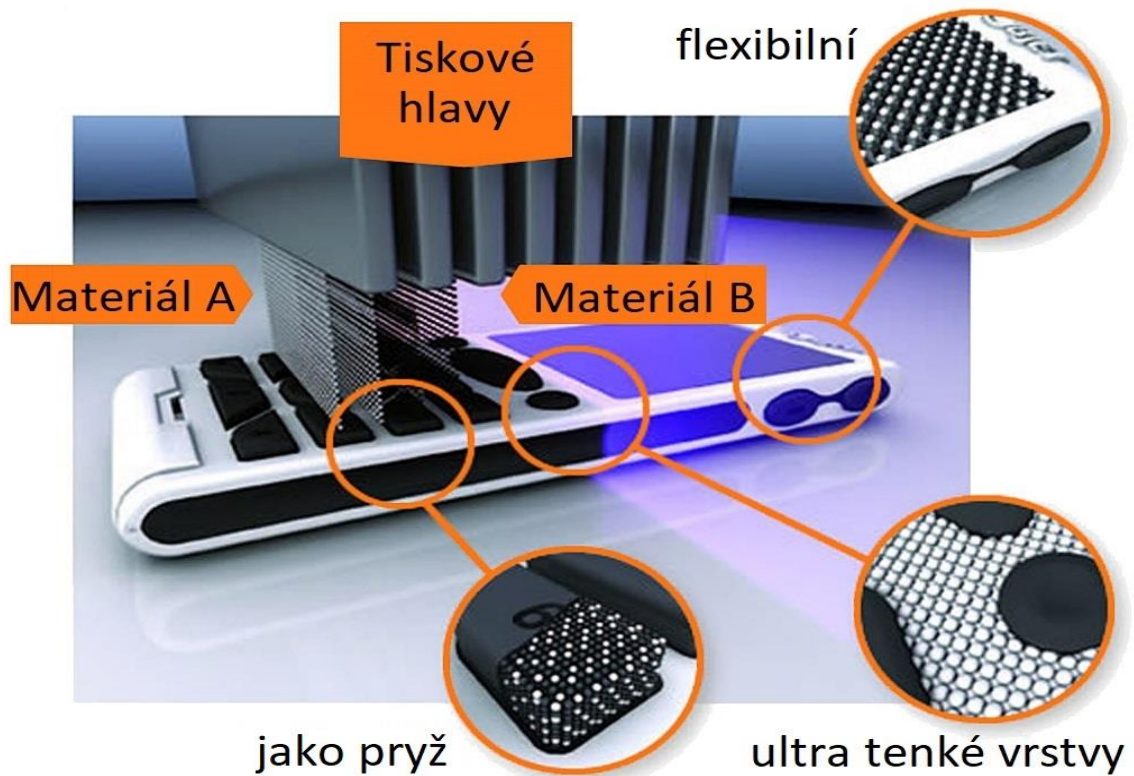
Obr. 1.3: Ultrazvuková lázeň hydroxidu sodného [6]

5. Oplach a osušení

- na závěr je díl omyt tekoucí studenou vodou a osušen tlakovým vzduchem, případně vložen do sušicí pece na 30°C na 24 hodin.

2 Testované díly

Díly zvolené pro účely této diplomové práce, byly vybrány ve spolupráci s oddělením EGV. Cílem bylo zvolit dva tvarově a materiálově odlišné díly, tak aby se testované dokončovací metody osvědčily pro co nejširší spektrum dílů. Finální volba určila dvoukomponentní díl a to vedení vzduchu klima paketu vozu Škoda Octavia. Druhým zvoleným dílem je část zadního světlometu vozu Škoda Kodiaq. Díly budou dále z důvodu přehlednosti označovány zkráceně jako 2K (dvoukomponentní) díl – vedení vzduchu a Designový díl – světlomet. Oba testované díly byly vyrobeny technologií PolyJet Matrix (Obr. 2.1), avšak každý na jiném výrobním stroji. Výroba 2K dílu byla provedena na stroji Objet Connex 500, Designový díl byl vyroben na stroji Objet J750. Důvodem bylo generační porovnání obou strojů s ohledem na velikost tisknuté vrstvy a úspory výrobního materiálu. Díly a výrobní zařízení jsou detailně popsána v kapitole 2.1 a v kapitole 2.2. Pro výrobu obou dílů je použit fotopolymerní materiál. Jedná se o tzv. digitální materiál, který vzniká tryskáním dvou a více základních fotopolymerních materiálů na tiskovou plochu stroje. Materiály jsou nanášeny ve velice tenkých vrstvách v rozmezí 16 a 30 μm . Každá jednotlivá vrstva naneseného materiálu je vzápětí vytvrzena UV zářením. Výsledný dílec je připraven k dalšímu užití bez nutnosti dodatečného vytvrzování. [7]



Obr. 2.1: Schéma výrobního procesu technologie PolyJet Matrix [8]

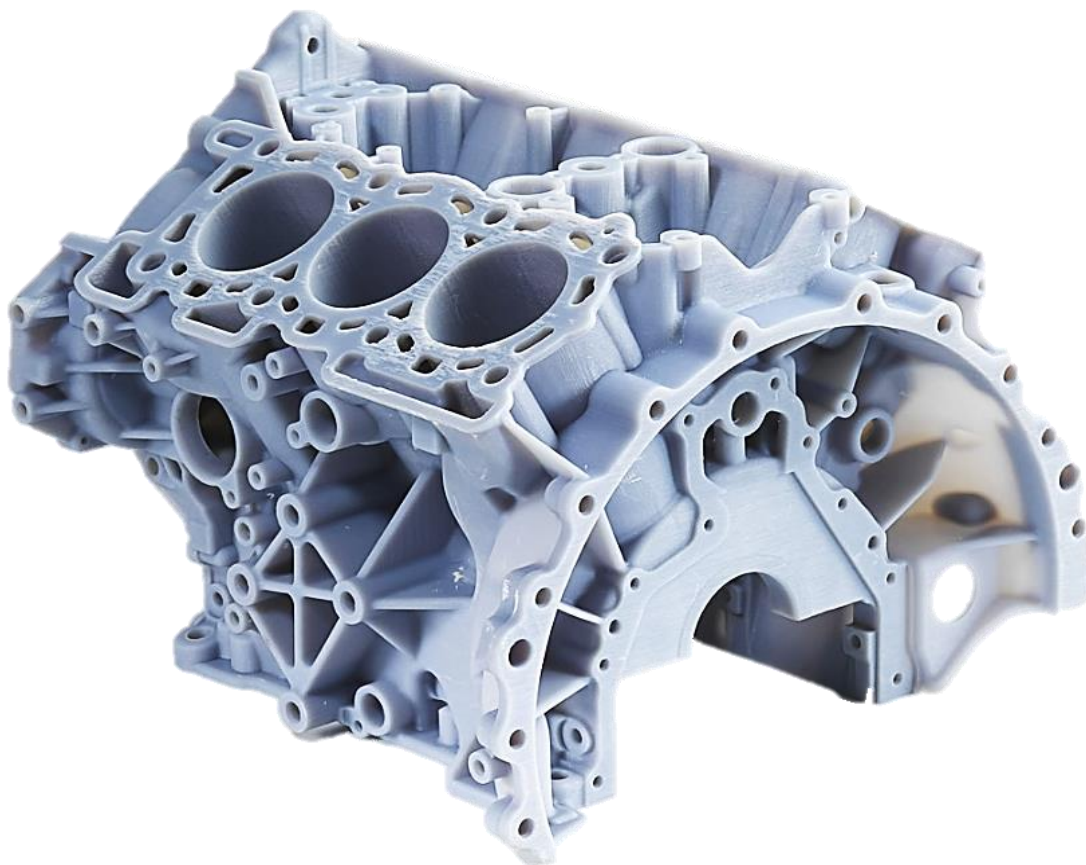
Celkem byly pro výrobu obou testovaných dílců použity dva materiály v různých modifikacích, Tango (TangoBlack) a Vero (VeroBlack, Vero PureWhite).

První zmiňovaný materiál TangoBlack (Obr. 2.2) je ze skupiny fotopolymerů simulujících termoplastické elastomery. Jedná se tedy o elastický, flexibilní materiál s vlastnostmi podobnými pryži. Z těchto důvodů je použit pro výrobu elastické části 2K dílu. Novým členem této skupiny fotopolymerů je Agilus30, který je výrobcem prezentován jako materiál s výjimečnou tažností a pevností v roztržení. Dále pak odolává opakovanému ohýbání a natahování. Oba tyto materiály mají široké uplatnění, například pro aplikace s měkkými povrchy, flexibilní a pružné části anebo nekluzné plochy. Z těchto důvodů a rovněž jako evolučně nástupný materiál je Agilus30 vzat do porovnávacího měření tvrdosti povrchu Shore s materiálem TangoBlack. Oba materiály jsou ve zvoleném pevnostním rozsahu otestovány na povrchovou tvrdost Shore A. Průběh a výsledky tohoto porovnání jsou uvedeny v kapitole 4.2. [9], [10]



Obr. 2.2: Materiál TangoBlack [10]

Druhou zastoupenou materiálovou skupinou jsou materiály Vero (Obr. 2.3). Tyto fotopolymery jsou v této diplomové práci použity pro výrobu obou dílců. Jednak v provedení VeroBlack jako tvrdé jádro 2K dílu, dále pak jako Vero PureWhite pro celý díl světlometu. VeroBlack a Vero PureWhite jsou tuhé odolné materiály neprůhledné černé respektive bílé barvy, které nabízí finální vzhled součástí podobný reálným dílům. Tato materiálová skupina obsahuje celkem sedm nejpoužívanějších materiálů technologie PolyJet (VeroBlue, White, Black, Gray, Cyan, Magenta, Clear). Materiálová charakteristika vyniká především celkovou tuhostí, tepelnou odolností a houževnatostí. Díky těmto vlastnostem lze snadno vyrobit přesné a mechanicky odolné díly. Vero nabízí detailní vizualizaci a je tak vhodné pro výrobu komplexních prototypů a modelů. [11]

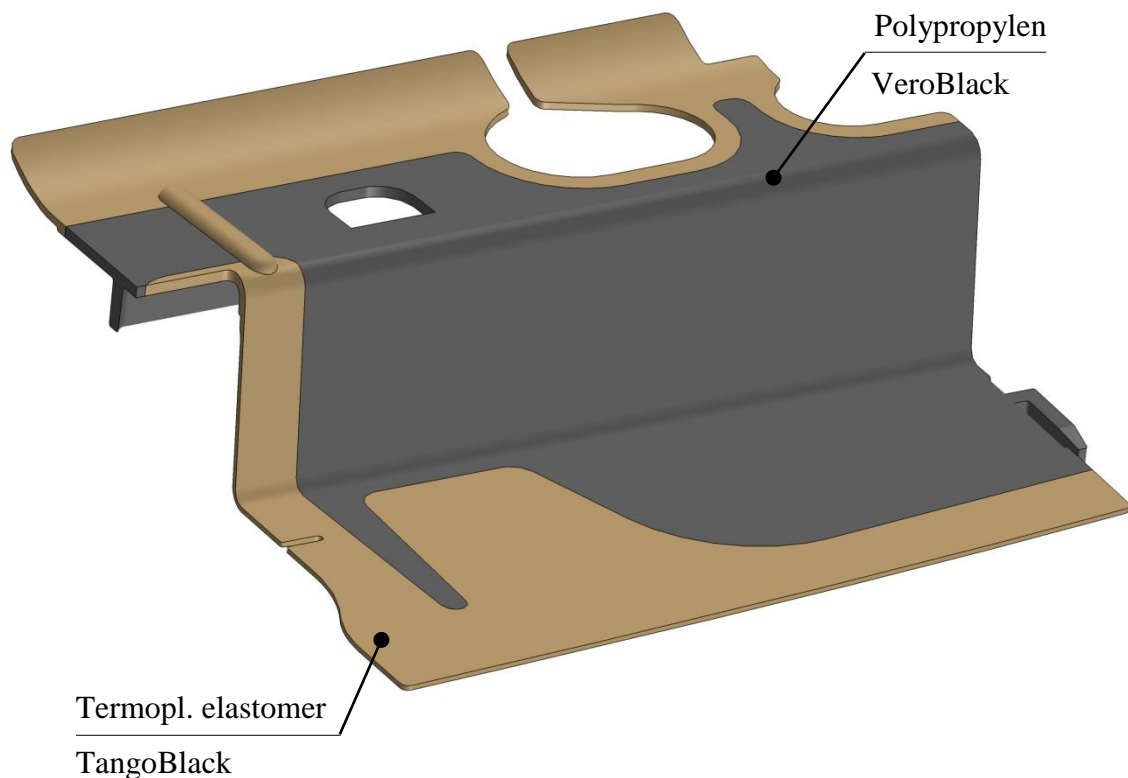


Obr. 2.3: Materiál Vero [11]

Digitální materiály použité pro účely této diplomové práce byly vyvinuty společností Stratasys. Jedná se o fotopolymery v kapalném stavu, které jsou díky procesu zvanému fotopolymerizace vytvrzeny do pevného skupenství. Tato fázová přeměna je zapříčiněna díky elektromagnetickému záření. V tomto konkrétním případě se jedná o ultrafialové záření. [12]

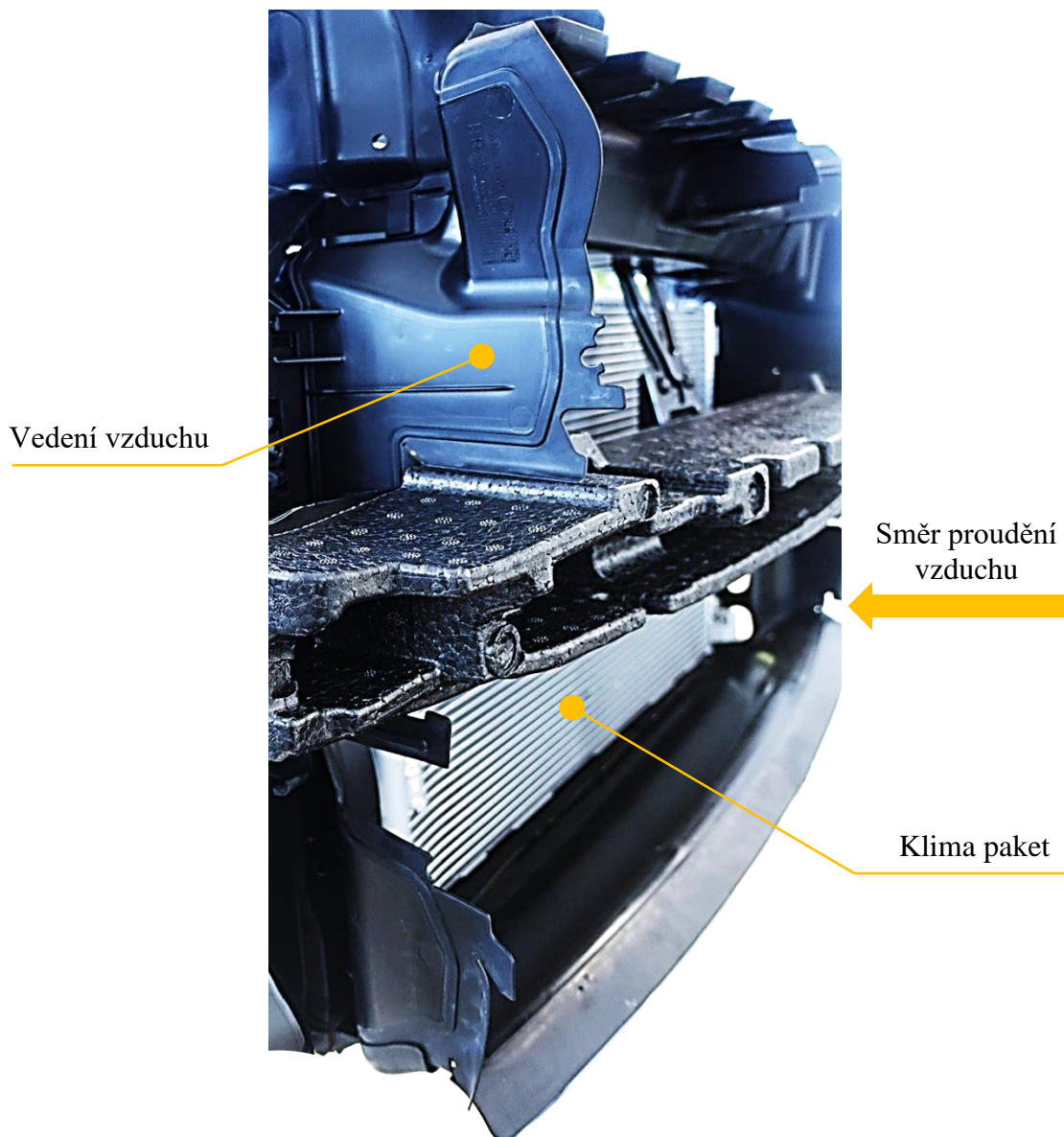
2.1 Dvoukomponentní díl (2K díl)

Vedení vzduchu klima paketu má standartní rozměry (178 x 64 x 503 mm), pro účely diplomové práce byl především z ekonomických důvodů použit zmenšený vzorek o rozměrech (137 x 64 x 197 mm), viz Obr. 2.4. Technologie použitá pro výrobu sériových dílů, je dvoukomponentní vstřikování plastů. Vícekomponentní vstřikování plastů kombinuje různé materiály na výrobu vysoce kvalitních plastových dílů. Dochází tak ke zlepšení designu a funkce výrobku, při vysoké efektivitě výroby. Tento díl je vstřikován najednou do jedné formy, v první fázi tvrdé jádro z materiálu Polypropylen a ve druhé fázi měkká část z materiálu Termoplastický elastomer.



Obr. 2.4: Dvoukomponentní díl - vedení vzduchu

Vedení vzduchu slouží k dotěsnění prostor mezi předním nárazníkem a sestavou „frontendu“ ve voze Škoda Octavia (Obr. 2.5). Tak aby za jízdy docházelo k přímému navádění proudícího vzduchu na klima paket s co nejmenšími ztrátami. Tvar a rozměry vedení vzduchu jsou navrženy s ohledem na aerodynamiku a proudění. Tento díl tak zvyšuje efektivitu a funkčnost celého klima paketu.



Obr. 2.5: Vedení vzduchu zastavěné v sestavě Frontendu

Pro výrobu tohoto zkušebního tělesa bylo použito zařízení Objet Connex 500 (Obr. 2.6) od výrobce Stratasys, které funguje na principu technologie PolyJet Matrix. Jedná se o zařízení, které jako první na světě umožnilo souběžný tisk vícemateriálových součástí. Zjednodušeně se dá tento proces popsat jako výroba všech dílů sestavy, probíhající během jedné výrobní operace. Tyto díly však mohou mít rozdílné mechanické nebo fyzikální vlastnosti. Navíc je možné při výrobě kombinovat tzv. FullCure materiály, čímž dochází k značnému rozšíření palety sedmy základních materiálů a to na více než sto čtyřicet čtyři materiálů Digitálních (viz kapitolu 2). Další předností této tiskárny je vysoká přesnost tisku od 0,1 do 0,3 mm. Tato hodnota je dána nejmenší tloušťkou tiskové vrstvy, která je 16 mikronů. Maximální rozměry vyráběného

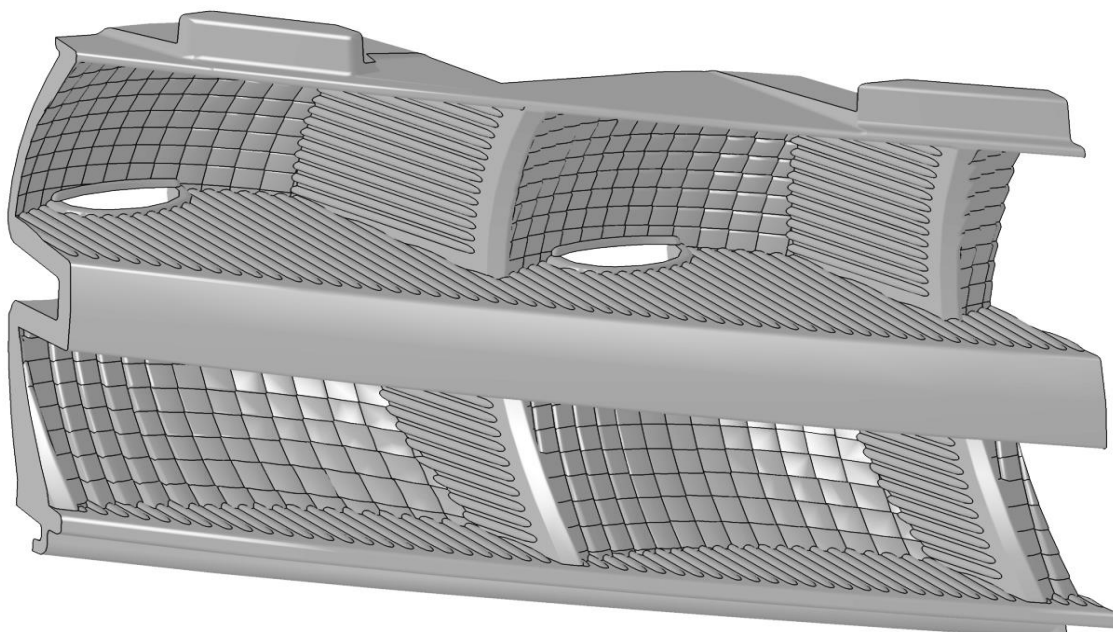
modelů jsou 500x400x200mm. Zařízení Objet Connex 500 tak představuje nástroj pro rychlou výrobu funkčních modelů s vysokým důrazem na kvalitu a co nejvěrnější napodobení reálných dílů. [13]



Obr. 2.6: 3D tiskárna Objet Connex 500 [13]

2.2 Designový díl

Designový díl představuje část zadního světlometu vozu Škoda Kodiaq. Konkrétně se jedná o levé Full LED světlo ukazatele směru. Pro výrobu sériových dílů je použita technologie vstřikování plastů. U tohoto dílu byl pro účely diplomové práce rovněž z ekonomických důvodů použit zmenšený výřez. Standartní rozměry dílu jsou (213 x 133 x 60 mm) zatímco rozměry výřezu (110 x 68 x 60 mm), viz Obr. 2.7. Tento vstřikovaný plastový díl je sériově vyráběn z materiálu Polykarbonát. Díl se vstříkuje do formy, po dokončení výrobní operace se následně vloží do pokovovacího zařízení. Zde se celý díl pokoví velmi tenkou vrstvou hliníku. Metoda použitá k pokovení se nazývá vakuové napařování kovů.



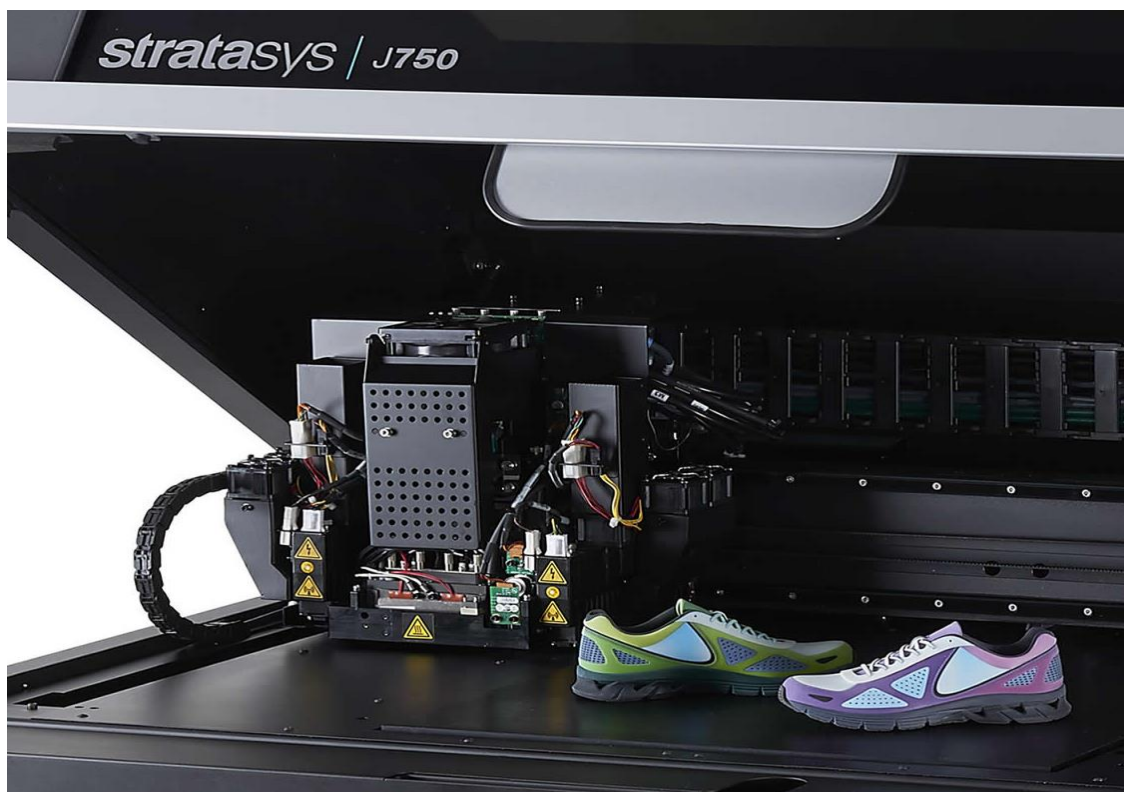
Obr. 2.7: Designový díl – část zadního světlometu

Hlavní funkcí toho dílu, je reflektovat svit LED diod, jedná se tedy o reflektor. Jednotlivé paraboly jsou výpočtem nastaveny tak aby světlomet splňoval náročné požadavky fotometrie. Především svítivost a osvětlení musí z hlediska bezpečnosti plnit náročná kritéria. Pokovení v tomto případě slouží jednak jako dekorativní vrstva simulující chromový povrch, viz Obr. 2.8. Především, ale jako vrstva reflexní. Ta má za úkol vytvořit jednolitý homogenní světelný paprsek. Díl je uchycen pomocí klipů a šroubů do nosiče zadního světlometu.



Obr. 2.8: Designový díl - zadní světlomet vozu Škoda Kodiaq [14]

Pro výrobu Designového zkušebního tělesa bylo použito zařízení Stratasys J750 (Obr. 2.9). Tato 3D tiskárna pracuje na principu technologie PolyJet Matrix. Jedná se o současnou technologickou špičku v oblasti multimateriálového 3D tisku, která nabízí vysoce realistické prototypy s věrnými barvami a kombinací různých materiálů současně. K dispozici je plně barevný 3D tisk s více než 500 000 barevných kombinací a rozdílných materiálů. Zařízení navíc umožňuje načíst až šest různých materiálů současně bez nutnosti vyměňovat jejich tiskové zásobníky. Díky tomu lze bez omezení kombinovat pevné, pružné, transparentní nebo neprůhledné materiály a jejich kompozity v rámci jedné tiskové úlohy. Vysoká přesnost tisku je zaručena díky velice malé tloušťce tiskové vrstvy a to pouhých 0,014 milimetrů. Rovněž výrobní rychlost je o poznání lepší díky tiskovým hlavám nové generace. Maximální velikost vyráběného modelu je u tohoto zařízení 490x390x200mm. [15]



Obr. 2.9: 3D tiskárna Stratasys J750 [15]

3 Zkušební metody

Pro dodržení řádného postupu a korektní stanovení výsledku u obou prováděných zkoušek v této diplomové práci bylo nezbytné postupovat dle norem zabývajících se danou problematikou. Při zkoušce stanovení tvrdosti povrchu byla předlohou mezinárodní norma ČSN ISO 7619-1; Stanovení tvrdosti vtláčováním – Stanovení tvrdoměrem (tvrdost Shore). Tato metoda je popsána v kapitole 3.1. Pro zkoušku měření drsnosti povrchu byla předlohou mezinárodní norma ČSN ISO 4287; Struktura povrchu: Profilová metoda. Tato metoda je popsána v kapitole 3.2

3.1 Stanovení tvrdosti vtláčováním

Mezinárodní norma ČSN ISO 7619-1 popisuje metodiku měření tvrdosti pryže za pomoci tvrdoměru. Výše popsaná hodnota je stanovena jako odezva pryže na použité vtláčování. Naměřená odezva poté závisí na mnoha rozdílných veličinách. Přičemž norma jmenuje následující:

- a) modul pružnosti pryže
- b) viskoelastické vlastnosti pryže
- c) tloušťka zkušebního tělesa
- d) geometrie zkušebního hrotu tvrdoměru
- e) použitý tlak
- f) rychlost nárůstu tlaku
- g) časový úsek měření

Tvrdoměry mohou být použity ruční, přenosné vhodné především pro měření prováděná na výrobcích. Stejně tak stojanové, které poskytují vyšší přesnost. [16]

3.1.1 Popis metody a zkušebního zařízení

Norma specifikuje metodu stanovení tvrdosti vtláčování pro vulkanizované nebo termoplastické elastomery, pomocí těchto typů tvrdoměru:

- tvrdoměr Shore D: typ A pryže s běžnou tvrdostí (20-90 Shore A)
- tvrdoměr Shore A: typ D tvrdé pryže
- tvrdoměr Shore A: typ AO pryže s nízkou tvrdostí a lehčené pryže
- tvrdoměr Shore: typ AM tenká zkušební tělesa s běžnou tvrdostí

Při volbě zkušebního zařízení (tvrdoměru) je výchozí hodnotou typ zkoušeného materiálu. Respektive hloubka vtlačení specifikovaného zkušební hrotu stanovenou silou za stanovených podmínek. Doporučený typ tvrdoměru je uveden v rozpisu tvrdoměrů výše, vždy pro konkrétní typ pryže. Tvrdoměry se skládají z následujících dílů: opěrná patka, indentor, indikační zařízení, kalibrovaná pružina a nepovinné zařízení pro měření času. Indentor neboli zkušební hrot musí být zhotoven z kalené oceli o průměru $1,25\text{mm} \pm 0,15\text{mm}$ pro tvrdoměry Shore A, D. Pro tvrdoměry Shore AO musí mít zakulacený hrot o poloměru $2,5\text{mm} \pm 0,02\text{mm}$. Tvrdoměr Shore AM o průměru $0,79\text{mm} \pm 0,025\text{mm}$. Tvar indentoru všech typů (A, D, AO, AM) je graficky znázorněn v normě. Indikační zařízení pracuje s rozsahem měření 0 - 100 jednotek tvrdosti. Toto zařízení umožňuje stanovit hodnotu vysunutí indentoru, jako odečet vzdálenosti jeho špičky od opěrné patky. Zařízení musí být kalibrováno. Zkušební zařízení může mít pro větší přesnost měření stojan. Pracovní stojan zajišťuje rovnoběžnost celého zkušebního zařízení a také kontakt zkušebního tělesa s indentorem bez nárazu. [16]

3.1.2 Určení zkušebních podmínek a postupu

Zkušební těleso

Základní parametr zkušebního tělesa je jeho tloušťka. Pro stanovení tvrdosti pomocí tvrdoměrů Shore A, D a AO musí být tloušťka zkušebního tělesa nejméně 6mm. Pro tvrdoměr Shore AM nejméně 1,5mm. Pro díly s nižší hodnotou je možné pro dosažení požadované tloušťky složit zkušební těleso z několika tenčích vrstev (ne však více než ze tří). Pro účely srovnání musí být zkušební tělesa shodná. Jiné rozměry zkušebního tělesa musí být takové, aby bylo možné měřit nejméně 12mm od okraje pro Shore A a D, 15mm pro Shore AO a 4,5mm pro Shore AM. Povrch zkušebních těles musí být rovný a rovnoběžný. U povrchu s nerovnostmi, zaoblenými nebo vyšší drsností nelze provést přesné měření tvrdosti. Zkušební těleso musí být kondicionováno bezprostředně před zkouškou po dobu nejméně 1 hodiny dle normy ISO 23529. Pro každou jednotlivou zkoušku nebo sérii zkoušek určených ke srovnání, musí být zajištěna stejná teplota. [16]

Postup zkoušky

Zkušební těleso musí být umístěno na rovný, tvrdý povrch. Tak aby bylo zaručeno, že indentor směřuje kolmo k povrchu pryže. Mezi zkušebním tělesem a zkušební zařízením musí dojít k pevnému kontaktu a při specifikovaném čase měření se odečte indikovaná hodnota tvrdosti. Standardní doba měření pro pryž musí být 3s, pro termoplastický elastomer 15s. U termoplastických materiálů dochází při zatížení k postupnému snižování tvrdosti v závislosti na čase. Z tohoto důvodu je doba měření úměrně vyšší. Norma dále uvádí počet měření pro jednotlivou zkoušku. Pro každé zkušební těleso se provádí pět měření tvrdosti a to na různých místech nejméně od sebe vzdálených 6mm (Shore D, A, AO) a 0,8mm (Shore AM). Z naměřených hodnot se stanoví medián. Zkušební přístroj musí být kalibrován dle ISO 18898 a to nejméně jednou týdně u pravidelně používaných přístrojů. [16]

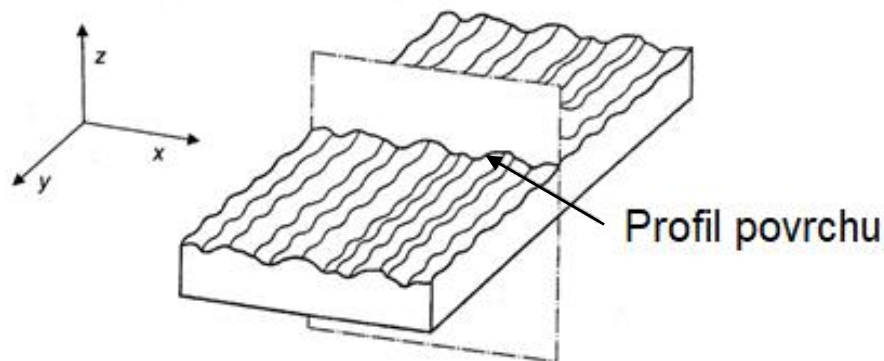
3.2 Struktura povrchu: Profilová metoda

Mezinárodní norma ČSN ISO 4287 se zabývá určením struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. Tato mezinárodní norma je rovněž normou Geometrických požadavků na výrobky neboli GPS. Z odborného hlediska jsou profil drsnosti a jeho parametry pouhou částí charakteristiky struktury povrchu, která je řádně definována. Rozdělení zda se jedná o periodický či neperiodický profil je subjektivní a záleží pouze na uživateli. Tato norma stanovuje ustálené termíny, definice a geometrické parametry, které se používají pro určování struktury povrchu profilovou metodou. [17]

Obecné termíny:

- Snímaný profil – je geometrické místo středu snímacího hrotu
- Filtr profilu – rozděluje složky profilu na dlouhovlnné a krátkovlnné
– používají se tyto filtry povrchu: λ_s , λ_c , λ_f
- Základní profil – základ pro hodnocení parametrů základního profilu
- Profil drsnosti – odvozen ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru λ_c
- Profil vlnitosti – odvozen postupnou aplikací filtru λ_f a λ_c na základní profil
- Souřadný systém – systém pro definování parametrů struktury povrchu
- Skutečný povrch – omezuje těleso a dělí ho od okolního prostředí

- Profil povrchu – průsečnice skutečného povrchu a dané roviny
 - v praxi volíme rovinu kolmou k rovnoběžné rovině povrchu



Obr. 3.1: Profil povrchu [17]

- Základní délka – délka ve směru osy x, použitá pro rozpoznání nerovností
- Vyhodnocená délka – délka ve směru osy x, použitá pro vyhodnocení profilu

Geometrické parametry:

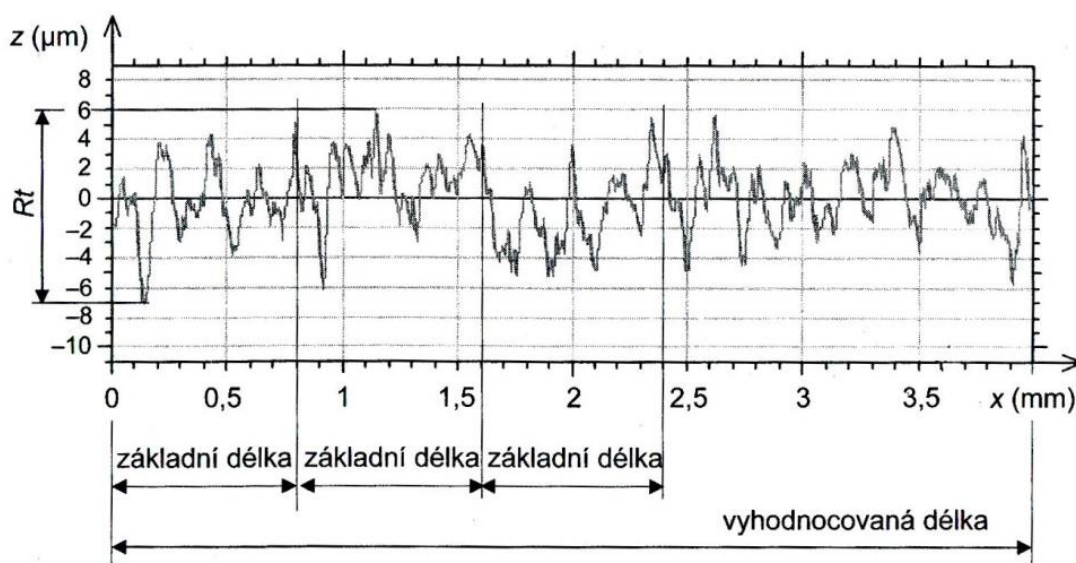
- R (Roughness) – parametr vypočítaný z profilu drsnosti
 - W (Waviness) – parametr vypočítaný z profilu nerovnosti
 - P (profile) – parametr vypočítaný ze základního profilu
- Pozn.: první velké písmeno v symbolu parametru určuje typ vyhodnocovaného profilu
- Výstupek profilu – posuzovaná část profilu směřující ven z povrchu
 - Prohlubeň profilu – posuzovaná část profilu směřující dovnitř z povrchu
 - Prvek profilu – výstupek a přilehlá prohlubeň profilu
 - Pořadnice – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze x
 - Výška výstupku – vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu
 - Hloubka prohlubně – vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu
 - Výška profilu – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu
 - Šířka profilu – délka úseku osy X protínající prvek profilu [17]

3.2.1 Definice parametrů profilu povrchu

Tato část normy uvádí různé metody pro posuzování výškových parametrů profilu povrchu. Každá z těchto metod má své vlastní označení udávané touto normou.

Výškové parametry (výstupky a prohlubně)

1. **Největší výška výstupku profilu R_p** – tento parametr udává výšku nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky
2. **Největší hloubka prohlubně profilu R_v** – tento parametr udává hloubku nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky
3. **Největší výška profilu R_z** – tento parametr udává součet výšky nejvyššího výstupku a nejnižší hloubky prohlubně profilu v rozsahu základní délky
4. **Průměrná výška prvku profilu R_c** – tento parametr udává průměrnou hodnotu výšek prvků profilu v rozsahu základní délky
5. **Celková výška profilu R_t** – tento parametr udává součet výšky nejvyššího výstupku profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (viz Obr. 3.2).



Obr. 3.2: Celková výška profilu [17]

Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)

1. **Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a** – tento parametr udává aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic
2. **Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu R_q** – tento parametr udává kvadratický průměr pořadnic [17]

4 Praktická část

Cílem praktické části diplomové práce je porovnání zvolených dokončovacích operací a jejich vlivu na užité vlastnosti dílců vyrobených technologií PolyJet Matrix. Na základě této studie je vybrána vhodná metoda, ke které je vypracována příslušná metodika.

Cíle a postup řešení praktické části diplomové práce:

Příprava a výroba testovacích a zkušebních těles

1. Určení testovacích těles
2. Určení zkušebních těles
3. Vytvoření 3D modelů testovacích těles
4. Výroba testovacích těles na zařízení Objet Connex 500
5. Výroba zkušebních těles
 - a) 2K díly na zařízení Stratasys J750
 - b) Designové díly na zařízení Objet Connex 500

Experimentální část

6. Měření tvrdosti Shore testovacích těles, analýza
7. Zkouška omílání testovacích těles, analýza
8. Konvenční metody, analýza
9. Měření drsnosti povrchu zkušebních těles
10. Pokovení Designových zkušebních těles, analýza
11. Vytvoření metodiky – nastavení nového technologického postupu
12. Závěrečné vyhodnocení výsledků zkoušek

Za dokončovací operaci se dají obecně označit úkony prováděné po ukončení výrobního procesu a vyjmutí dílců z tiskárny. Tato činnost je odborně nazývána postprocessing a je vždy rozdílná pro jednotlivé výrobní systémy. Pro technologii použitou v této diplomové práci se jedná o odebrání podpurného materiálu. Podpurný materiál se používá jako stavební podpora dílů se složitou geometrií a má konzistenci podobnou gelu. Materiál použitý pro účely této práce se nazývá SUP706. Celkem je v této diplomové práci popsáno pět různých postprocessingových technologických postupů pro odstranění stavebních podpor dílů vyrobených technologií PolyJet Matrix.

Na základě porovnání níže popsaných metod došlo k vybrání jednoho finálního řešení a vytvoření metodiky pro tuto technologii.

Zvolené postprocessingové technologie:

Konvenční metody:

1. Tlaková voda

- základní stupeň očištění stavební podpory
- tryskání vysokotlakým paprskem vody v uzavřeném mycím boxu

2. Tlaková voda → ultrazvuková lázeň NaOH

- druhý, avšak stále základní stupeň očištění stavební podpory
- po tryskání se díl vloží do ultrazvukové lázně 2% hydroxidu sodného po dobu 20 minut

3. Tlaková voda → ultrazvuková lázeň NaOH+Na₂SiO₃

- třetí, nadstavbový stupeň očištění stavební podpory
- po tryskání se díl vloží do ultrazvukové vysoce zásadité lázně 2% hydroxidu sodného a 1% křemičitanu sodného po dobu 20 minut

4. Tlaková voda → ultrazvuková lázeň NaOH+Na₂SiO₃ → lázeň C₃H₈O₃

- čtvrtý, nadstavbový stupeň očištění stavebních podpor
- po tryskání se díl vloží do ultrazvukové vysoce zásadité lázně hydroxidu sodného a křemičitanu sodného, následně se dá stabilizovat do neutrální lázně glycerolu

Nekonvenční metody:

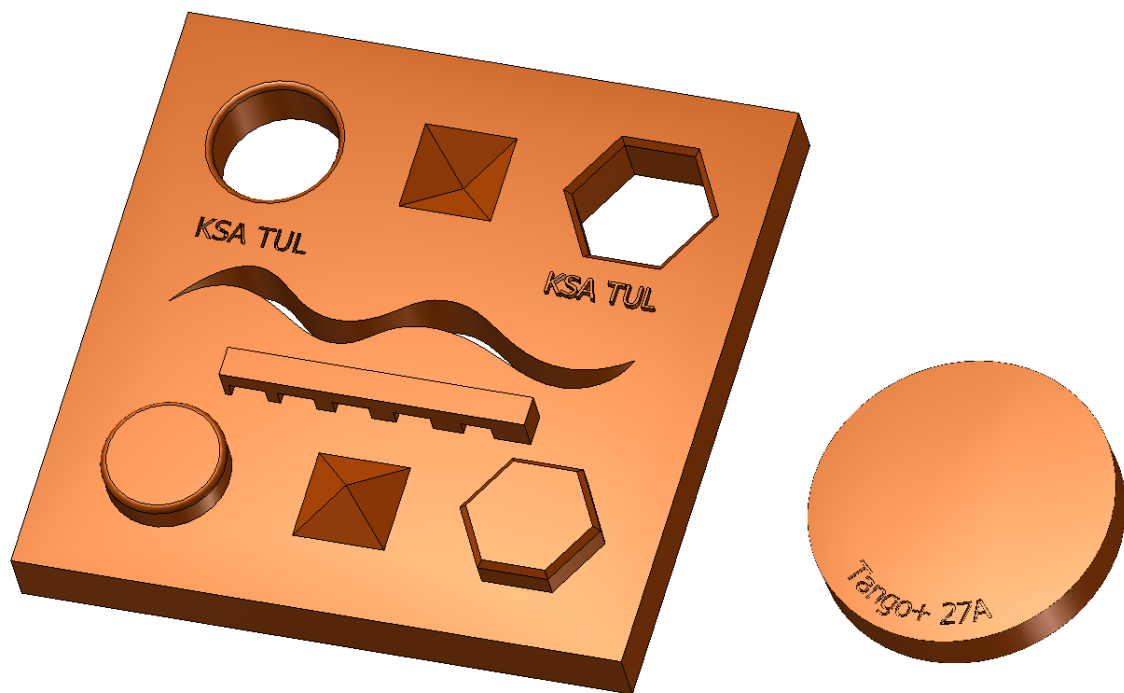
5. Omílání

- díly ošetřené dvěma základními stupni očištění (tlaková voda, ultrazvuková lázeň NaOH) byly následně mechanicky opracovány dvěma rozdílnými technologiemi omílání

Výše popsané postprocessingové technologie jsou detailně popsány v kapitole 4.3 Nekonvenční metody a v kapitole 4.4 Konvenční metody.

4.1 Příprava a výroba testovacích a zkušebních těles

V úvodní části testování došlo k výrobě testovacích těles určených jednak pro zkoušku tvrdosti Shore, dále pak byla vyrobena testovací tělesa pro nekonvenční metodu omílání. Konstrukce testovacích těles byla provedena v programu Autodesk Inventor. Tvar a rozměry prve zmíněných testovacích těles (Obr. 4.1 vpravo) jsou stanoveny dle příslušné mezinárodní normy ČSN ISO 7619-1. Jedná se o válec o tloušťce 6mm a průměru 40mm. Tento díl byl vyroben v počtu 28 ks. Tvar a rozměry testovacích těles pro nekonvenční metodu omílání (Obr. 4.1 vlevo) jsou stanoveny na základě diskuze s vedoucím práce. Cílem bylo provést návrh testovacího tělesa s co nejvíce rozdílnými geometrickými prvky, tak aby bylo možné plně ověřit potenciál testované metody. Výsledný tvar tělesa je nepravidelný kvádr o rozměrech 100 x 100 x 16 mm. Tento díl byl vyroben v počtu 5 ks. Výroba obou dílců probíhala podélným směrem v horizontální poloze s tloušťkou vrstvy tisku 0,030 mm. V obou případech byly použity Digitální materiály.



Testovací těleso - nekonvenční metoda omílání

Testovací těleso - zkouška tvrdosti Shore

Obr. 4.1: 3D modely testovacích těles

Zkušební tělesa (2K díl a Designový díl) byla zvolena na doporučení specialistů oddělení EGV, tak aby vybrané díly zastupovali materiálově a tvarově pokud možno co největší spektrum dílů. Detailní popis těchto zkušebních těles je uveden v kapitolách 2.1 a 2.2. Tyto díly byly vyrobeny v následujícím vyhotovení:

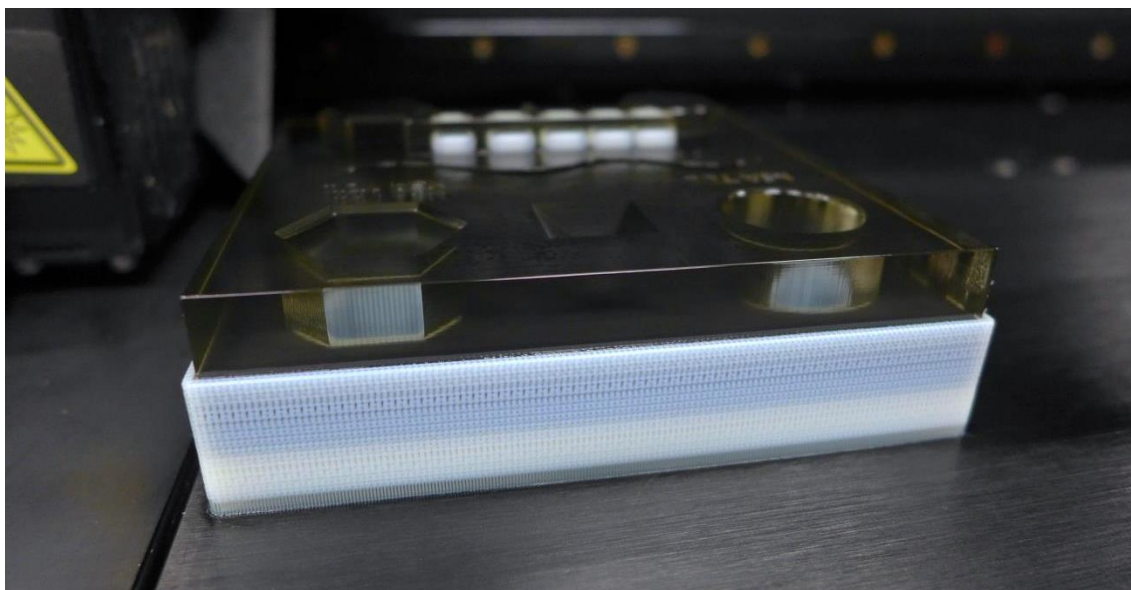
Tabulka 1.: Matice výrobních parametrů zkušebních těles

	Dvoukomponentní díl	Designový díl
Materiál	VeroBlack + TangoBlack	Vero PureWhite
Výrobní orientace	1x - osa x	2x - osa x, y
Výrobní zařízení	Objet Connex 500	Stratasys J750
Tloušťka vrstvy tisku	0,030 mm	0,014 mm
Počet kusů celkem	4 ks	8 ks

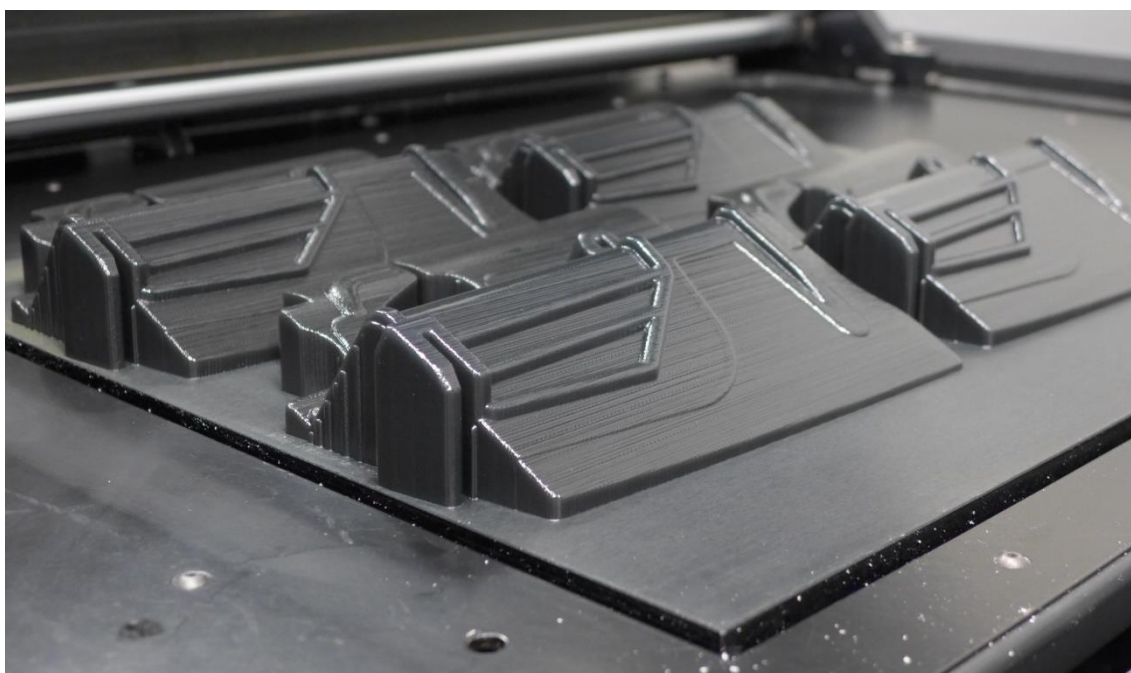
3D modely vytvořené a uložené v CAD datech byly následně převedeny do formátu STL. Jedná se o speciální stereolitografický formát určený pro další zpracování softwarem jednotlivých výrobních technologií. Tento software umožňuje zaměření a následné matematické rozdělení modelu do horizontálních vrstev. Po této úpravě jsou data již připravená k odeslání do výroby. Následný plně automatizovaný výrobní proces probíhal na zařízeních Stratasys J750 a Objet Connex 500. Tato zařízení jsou detailně popsána v kapitolách 2.1 a 2.2. Finální vyrobená tělesa jsou zobrazena na obrázcích 4.2, 4.3, 4.4.



Obr. 4.2: Testovací tělesa vyrobená na zařízení Objet Connex 500



Obr. 4.3: Testovací těleso pro zkoušku omílání (nahore) a stavební podpora (dole)



Obr. 4.4: Dvoukomponentní zkušební tělesa vyrobená na zařízení Stratasys J750

4.2 Měření tvrdosti Shore

V úvodu praktické části diplomové práce bylo pro dva zvolené materiály provedeno měření tvrdosti Shore A. Toto měření bylo provedeno primárně z důvodu ověření hodnot tvrdosti materiálů, tak aby bylo možné potvrdit popřípadě vyvrátit hodnoty udávané výrobcem tiskového materiálu. Samotné měření tvrdosti probíhalo dle mezinárodní normy ČSN ISO 7619-1. Zvolené materiály Tango a Agilus30 byly vždy

testovány ve zvoleném rozsahu tvrdosti a ve dvou povrchových úpravách - Glossy (lesklý) a Matt (matný). Lesklý povrch je vyráběn automaticky, zatímco matný povrch má na svém povrchu ještě navíc natištěnou vrstvu podpůrného materiálu. Zvolený rozsah Shore je plný možný u obou materiálů. Rozsah tvrdosti je následující:

- Tango - 27A, 40A, 50A, 60A, 70A, 80A, 95A
- Agilus30 - 30A, 40A, 50A, 60A, 70A, 85A, 95A

Oba materiály patří do stejné skupiny fotopolymerů – Rubber-like. Jedná se o materiály simulující vlastnosti pryže a to vždy s tvrdostí z výše uvedené stupnice sedmi úrovní. Díky této variabilitě nabízí rodina rubber-like materiálů širokou škálu charakteristik elastomerů. Počínaje již zmíněnou stupnicí Shore, dále se pak jedná o prodloužení, odolnost proti přetržení a pevnost v tahu. Pro srovnání uvádím přehled mechanických vlastností obou materiálů v základní variantě (tzn. Tango – Shore 27A, Agilus30 – Shore 30A), viz tabulku 1. Z tohoto porovnání je patrné, že materiál Agilus30 jakožto evoluční nástupce má co se týká mechanických vlastností navrch.

Tabulka 2.: Porovnání mechanických vlastností materiálů Tango a Agilus [9], [10]

Mechanické vlastnosti	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Pevnost v roztržení [kg/cm]	Tvrdost Shore A [-]
Tango	0,8 – 1,5	170 – 220	2 – 4	26 – 28
Agilus30	2,4 – 3,1	220 – 270	5 – 7	30 – 35

Vlastní měření tvrdosti testovacích těles probíhalo na zkušebním zařízení Shore® Durometer, Model 902B (Obr. 4.5). Zmiňované zařízení splňuje standard mezinárodních norem ISO 868, ISO 7619. Jedná se o plně automatizované digitální měřící zařízení poskytující konstantní zatížení, regulovaný pojezd a sestupný pohyb s prodlevou. Zařízení umožňuje měření vzorků nepravidelných tvarů a o celkové nejmenší tloušťce až 1,25mm. Další předností je hliníkový rám a rovněž hliníková eloxovaná podstava. Díky broušené hřídeli a lineárním ložiskům je zaručen plynulý posuv se zdvihem až 80mm. Toto zařízení se ovládá pomocí digitálního ovladače s vlastním displejem.

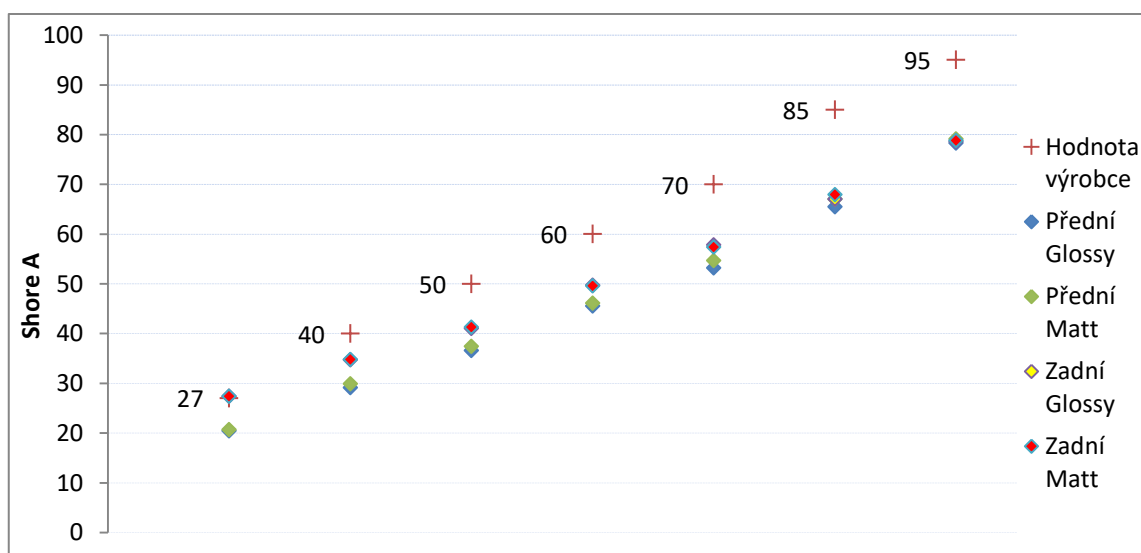


Obr. 4.5: Průběh stanovení tvrdosti materiálu na zařízení Shore® Durometer

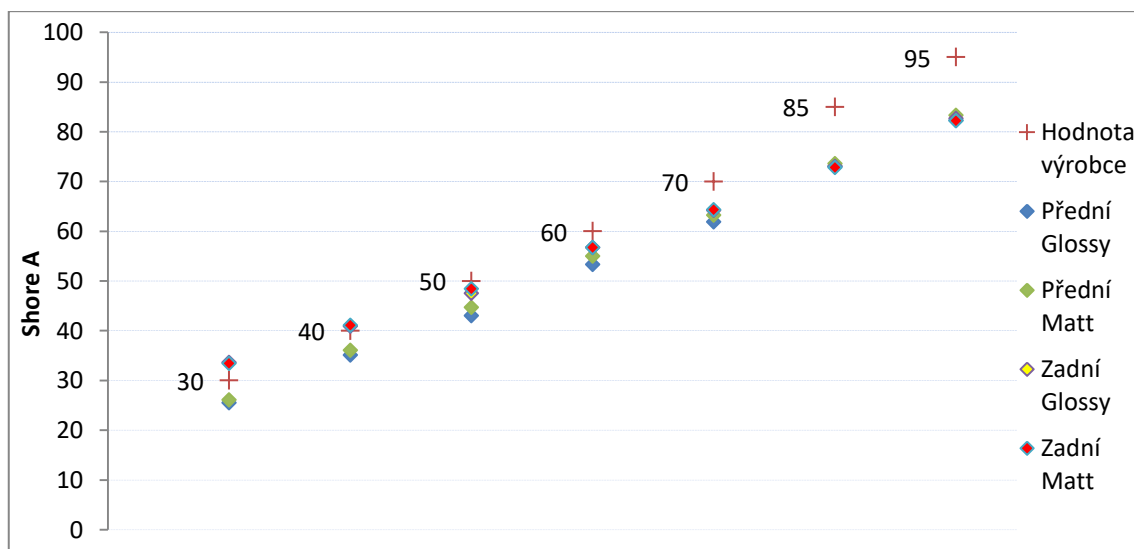
Měření tvrdosti Shore bylo provedeno v laboratoři Katedry strojírenské technologie dle mezinárodní normy ČSN ISO 7619-1. Pro potřeby měření bylo vyrobeno celkem 14 kusů testovacích těles od každého materiálu. Výroba všech dílů probíhala podélným směrem v horizontální poloze. Průběh zkušební metody byl v souladu se zmiňovanou normou. Každé těleso bylo volně uloženo na podstavu zkušebního zařízení a udělením impulsu proběhl automatický cyklus měření. Tvrdost každého tělesa byla měřena samostatně, rovněž dle příslušné výše zmiňované normy. A to vždy z obou stran na celkem deseti náhodně zvolených místech, nejméně však 15mm od okraje měřeného tělesa.

Vyhodnocení naměřených hodnot tvrdosti jednotlivých testovacích těles je provedeno dle příslušné normy. Ta udává stanovit výslednou hodnotu jako medián naměřených hodnot. K tomu byla výpočtem stanovena rozdílová hodnota delta jako rozdíl oproti výrobcem udávané tvrdosti materiálu. První významným poznatkem

je prokazatelně vyšší tvrdost u těles s matným povrchem. Stejně tak můžeme u obou materiálů pozorovat vyšší naměřené hodnoty tvrdosti na zadní straně těles. Zaměříme-li se však na jednotlivé materiály, TangoBlack dosahovalo obecně větších ztrát oproti výrobcem udávané hodnotě (Graf 1). Tento rozdíl se zvyšuje téměř lineárně s rostoucí hodnotou Shore. Materiál Agilus30 oproti tomu vykazoval hodnoty o poznání bližší těm udávaným výrobcem (Graf 2). Nicméně i zde se vyskytuje klesající trend směrem k vyšším hodnotám Shore. Obecně však hodnoty získané napříč všemi vzorky vykazují viditelný pokles tvrdosti vůči hodnotám udávaným výrobcem materiálu. Z tohoto zjištění tak můžeme vycházet například u budoucích aplikací těchto materiálů. Tabulka se všemi naměřenými hodnotami obou materiálů je součástí přílohy.



Graf 1.: Naměřené hodnoty tvrdosti Shore, materiál TangoBlack



Graf 2.: Naměřené hodnoty tvrdosti Shore, materiál Agilus30

4.3 Nekonvenční metoda – omílání

Nekonvenční metoda omílání byla zvolena jako zástupce skupiny netradičních technologií. Význam slova netradiční je v tomto případě míněn z důvodu využití této technologie pro účely diplomové práce. Tedy omílání bylo postaveno proti tradičním metodám odstranění podpůrného materiálu. Další zvažované technologie z této skupiny byly například pískování, tryskání nebo leštění (finišování). Omílání bylo zvoleno především z důvodu získání podpory dvou specializovaných firem. První ze zmiňovaných je společnost SILROC CZ, a.s. sídlící v Tanvaldu. Tato firma se specializuje na výrobu součástí z tekutého silikonového kaučuku na vstřikovacích lisech. Zařízení, která dala firma k dispozici pro potřeby diplomové práce, používá především pro odstranění přelisků na silikonových výrobcích. Druhou společností, jež nabídla své zařízení a know-how je české zastoupení německé firmy OTEC GmbH. Společnost OTEC se zabývá vývojem leštících a omílacích zařízení a v dané problematice má mnohaleté zkušenosti. Po úvodním jednání s odborníky z obou firem a představení jednotlivých technologií byly pro potřeby zkoušky omílání navrženy a vyrobeny testovací tělesa (Obr. 4.3). Zkouška tak probíhala souběžně na dvou různých technologiích.

Definice technologie omílání je následující: Jedná se o mechanickou úpravu povrchů kovových i plastových. Vhodnou pro malé předměty oblých tvarů, ale i větší výrobky upnuté do přípravků. Podstata omílání je otírání obrobků vložených do jedné nádoby společně s brusnými tělisky (Obr. 4.6). To vše vyvoláno oscilačním nebo rotačním pohybem procesní nádoby. [18]



Obr. 4.6: Různé druhy omílacích brusných těles [18]

1. Kryogenní komora, firma SILROC CZ, a.s.

Ve firmě SILROC byla testovací tělesa podrobena zátěži na zařízení Cryogenic SCC 1505. Jedná se o kryogenní zařízení (Obr. 4.7), které pracuje v prostředí s teplotou pod bodem mrazu od -60°C do -100°C . Toto zařízení je primárně určeno pro odstraňování otřepů, přetoků a přelisků plastových výrobků. Zařízení funguje na principu podobnému automatické pračce, rotujícím bubnem však namísto vody proudí kryogenní směs plynného dusíky. Působením snížené teploty dochází ke zkrěnutí plastových obrobků a následným kontaktem s brusnými tělisky k odlomení nežádoucích otřepů a přelisků. Brusné médium je navíc vysokorychlostní rotací vrháno na obrobky.

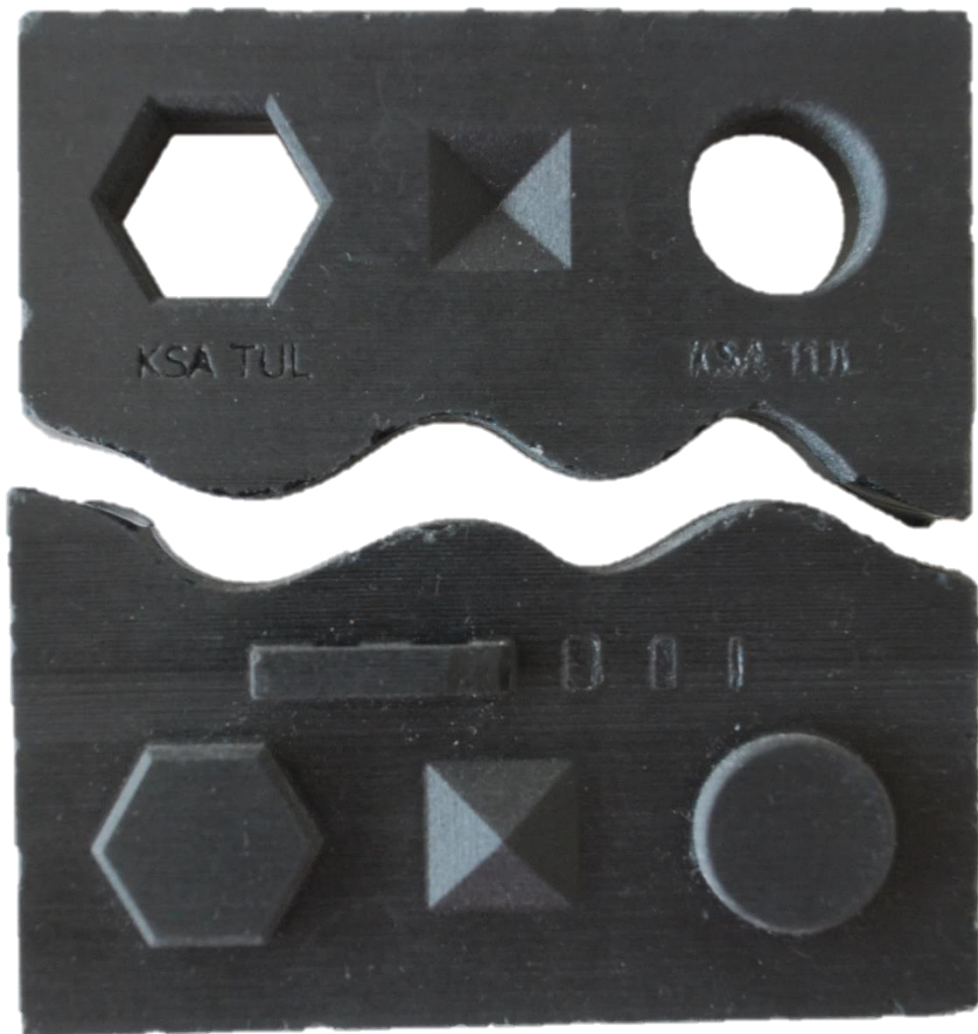


Obr. 4.7: Kryogenní omílací zařízení [19]

Průběh samotné zkoušky započal přípravou a dodáním testovacích těles (Obr. 4.1 vlevo). Ta byla následně vložena do procesní nádoby v tomto případě rotačního koše. Brusné médium použité pro tuto zkoušku mělo pravidelný cylindrický tvar a bylo nasekáno z termoplastického materiálu polykarbonát. Po spuštění zařízení započal plně automatický cyklus. Parametry tohoto procesu (čas, teplota, program) byly zvoleny na základě zkušeností kompetentním specialistou firmy SILROC. Konkrétní hodnoty byly v tomto případě následující:

- Doba omílacího cyklu: 5 min
- Teplota: -80°C
- Brusné médium: 0,5 x 0,5 mm

Po ukončení zkušebního cyklu následovalo vyjmutí testovacího tělesa vně zařízení. Stav testovacího tělesa po vyjmutí je zobrazen na Obr. 4.8. Ze závěrečné analýzy vyplývá, že k rozlomení a osekání hran testovacího tělesa došlo jednak z důvodu působení extrémně nízké teploty a tím způsobenému zkrěhnutí materiálu. Dále pak nevhodnou volbou tvaru a rozměrů omílacích těles pro konkrétní technologii omílání. Z těchto důvodů již žádné další zkoušky s tímto typem omílání neprobíhali. Potenciální hledaná technologie musí umět zpracovávat tělesa větších rozměrů a hmotností, neboť takovými se tato diplomová práce zabývá.



Obr. 4.8: Stav testovacího tělesa po zkoušce v kryogenní komoře

2. Diskové odstředivé zařízení, firma OTEC GmbH

Diskové odstředivé zařízení výrobní řady CF (Obr. 4.9) je technologie doporučená a zvolená firmou OTEC pro zkoušku omílání v rámci této diplomové práce. Jedná se o vysoce výkonné obrábění nejrozličnějších typů povrchů ať už kovových nebo plastových. Technické výrobky z umělých hmot se stále více využívají a aplikují jako náhrada kovových materiálů. Umělé hmoty jsou však velice různorodé a proto je v této oblasti zapotřebí obzvláště mnoho zkušeností a know-how. Pro broušení a leštění s vysokým leskem vyvinula firma OTEC speciální postup omílání, kterým lze dosáhnout hodnot drsnosti povrchu až Ra 0,01. Obrábění probíhá v otevřené nerotující procesní nádobě, která se naplní obrobky společně s vhodným brousícím nebo leštícím médiem. Na dně procesní nádoby se nachází disk, ten po spuštění procesu začne rotovat a tím unášet obsah nádoby. Takto vzniká mezi obrobky a médiem velmi intenzivní obrábění. Jedno zařízení tak umožňuje komplexní obráběcí program vhodný např. pro odjehlení, zaoblování hran anebo broušení. [18]



Obr. 4.9: Diskové odstředivé zařízení OTEC [18]

Poté co byla připravená testovací tělesa (Obr. 4.1 vlevo) předána firmě OTEC, byla započata zkouška omílání. Ta se skládala ze dvou rozdílných částí. Způsob vykonání zkoušky však byl pro obě části stejný. Tělesa byla vložena do procesní nádoby s různými druhy omílacích těles. Následně byl spuštěn plně automatický brusný a poté leštící cyklus. Zařízení umožňuje nastavení většiny parametrů (otáčky, doba zpracování, koncentrace vody a sloučeniny, cykly oplachování, atd.). Všechny tyto veličiny byly nastaveny specialistou firmy OTEC a to na základě dlouhodobých zkušeností s těmito zařízeními a materiály. Konkrétní parametry jednotlivých zkoušek byly následující:

1. Omílací proces A

- použité zařízení CF1x50

- mokré broušení
- keramická tělíska
- délka procesu 30 min
- mokré leštění
- porcelánová tělíska
- délka procesu 60 min

2. Omílací proces B

- použité zařízení CF1x18

- mokré broušení
- keramická tělíska
- délka procesu 360 min
- mokré leštění
- porcelánová tělíska
- délka procesu 60 min

Jednotlivé omílací procesy se tedy odlišovali především v délce procesu broušení. Kdy proces B byl 12x delší než proces A. Použitá zařízení se lišila pouze v objemu procesní nádoby 18 litrů vs. 50 litrů. Tyto diference byly voleny z důvodu zmapovat možnosti dané technologie. Po dokončení obou zkoušek a dodání testovacích těles zpět na univerzitu, proběhlo vlastní vyhodnocení těchto modelů. Toto hodnocení probíhalo jednak vizuálním porovnáním a především pak bezdotykovým optickým měřením na zařízení ATOS II 400 od výrobce GOM.

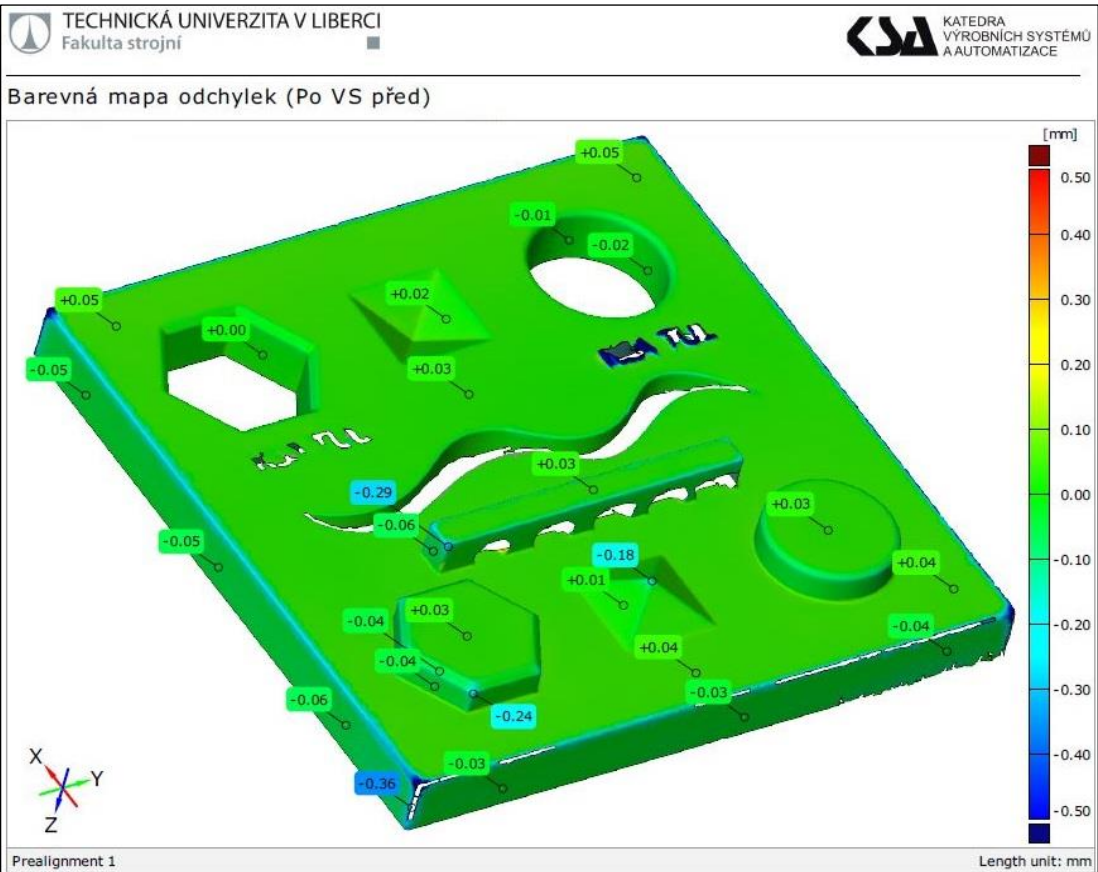
Zařízení ATOS 400 je bezkontaktní měřicí zařízení pracující se speciálně vyvinutou optikou a technologií Modrého světla, poskytující přesnost měření až 0,01 mm. Vlnová délka Modrého světla umožňuje přesné měření, nezávislé na okolních světelných podmínkách. Naskenovaná data jsou dále zpracována softwarem a převedena do polygonální sítě. Zařízení tak ve spolupráci s výkonným softwarem umožňuje rychlý a přesný převod reálných dílů na plošné či objemové CAD modely (Obr. 4.10).



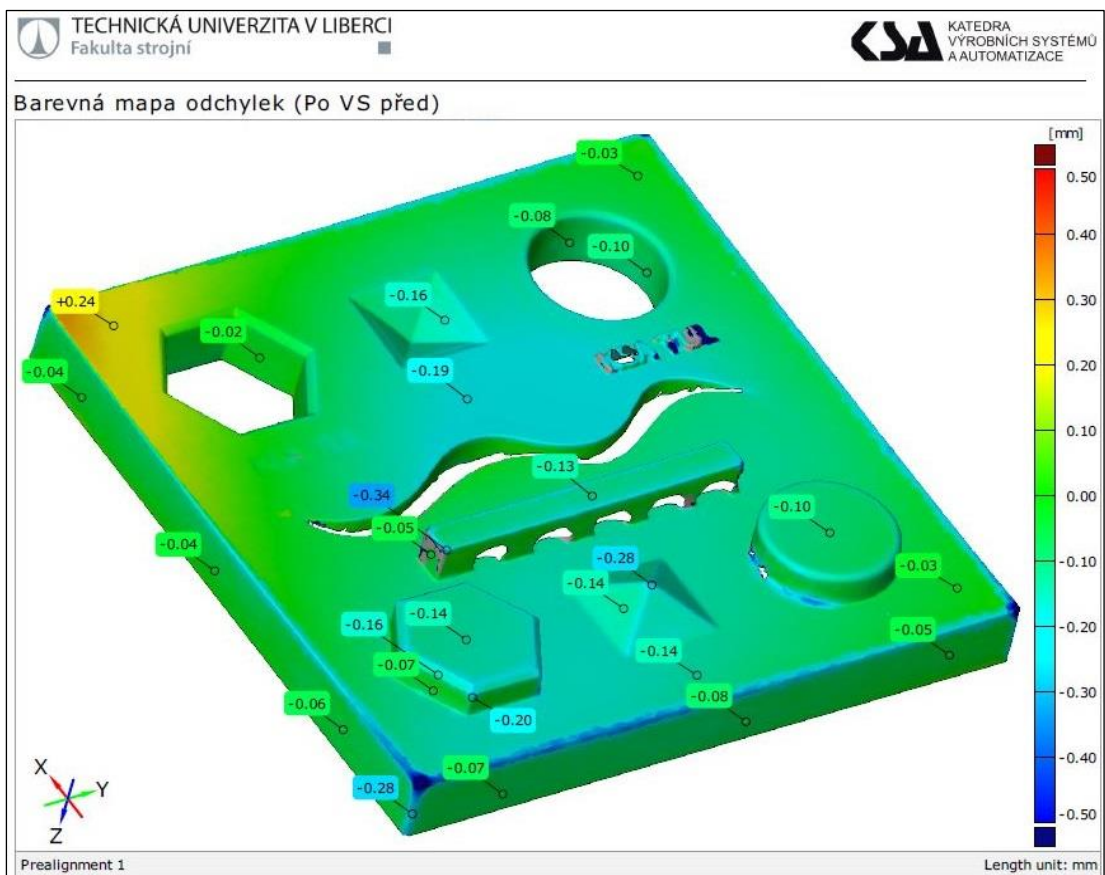
Obr. 4.10: Bezdotykový optický 3D skener ATOS [20]

S využitím zařízení ATOS byla provedena rozměrová inspekce, tedy grafické porovnání nasnímaných dat testovacího tělesa a nominálního CAD modelu. Testovací těleso bylo naskenováno vždy před a po zkoušce omílání. Na snímcích (barevná mapa rozměrových odchylek Obr. 4.12 a Obr. 4.13) je zobrazen rozdíl v naměřených hodnotách. Jedná se tedy o delta (rozdílové) hodnoty, které vypovídají o kolik se těleso skutečně rozměrově a tvarově změnilo vlivem omílání.

Z hodnot naměřených s využitím zařízení ATOS a následnou vizuální kontrolou, bylo zjištěno několik poznatků. Na základě těchto faktů bylo vypracováno závěrečné stanovisko. U obou pozorovaných testovacích těles došlo ke ztlačené tvarové deformaci a to především na vnějších hranách a v rozích. Zjištěné deformace byly jak plusové tak minusové s maximálními hodnotami přesahujícími tři desetiny milimetru. Jak dokládají snímky z měření pro materiál Vero (Obr. 4.11) a pro materiál Tango (Obr. 4.12). Na základě této analýzy nebyla nadále ani tato technologie omílání zvažována pro účely této diplomové práce. Především z důvodu přílišného působení deformačních sil brusných tělísek a to jak pro omílací proces A tak i proces B. Potvrdilo se tedy, že délka omílacího procesu ani objem procesní nádoby není v tomto případě zásadní. Naopak výrazný vliv má typ použitého brusného média. Dalším negativem by byla vysoká počáteční investice do zařízení a také délka omílacího procesu.



Obr. 4.11: 3D mapa rozměrových odchylek materiál Vero



Obr. 4.12: 3D mapa rozměrových odchylek materiál Tango

4.4 Konvenční metody

Hlavní úlohou praktické části této diplomové práce je porovnání odlišných konvenčních metod odstranění podpůrného materiálu z těles vyrobených technologií 3D tisku. Tyto zkoumané technologické směry byly z části převzaty ze stávajících postupů a z části zvoleny z postupů doporučených výrobcem 3D tiskáren Stratasys. Pro objektivní posouzení jednotlivých technologických směrů byly vykonány experimenty. Na základě těchto zkoušek je možné učinit věcné porovnání a vyhodnocení. Pro nejvhodnější metodu je následně vypracována metodika, viz kapitolu 4.5.

Zmiňované experimenty byly vykonány pro všechna zkušební tělesa za stejných předem stanovených podmínek. Tyto zkoušky absolvovaly celkem čtyři kusy Dvoukomponentních těles vytištěných v ose x a osm kusů Designových těles vytištěných v ose x a y . Dodání chemických látek a příprava roztoků byly provedeny pod odborným dozorem kvalifikované osoby. Bylo dbáno na dodržování bezpečnosti práce a správných technologických postupů. Po ukončení zkoušek proběhlo jejich vyhodnocení v několika etapách. Zaprvé bylo u všech těles provedeno kontrolní měření geometrické přesnosti povrchu na přístroji Bruker Dektak XT. Zadruhé, povrch Designových těles byl pokoven velmi tenkou vrstvou hliníku a následně proběhlo slepé hodnocení a porovnání těchto povrchů.

V průběhu vyhotovení praktické části této diplomové práce, se naskytla příležitost využít nový typ technologie 3D tisku od společnosti Hewlett-Packard. Konkrétně se tato technologie nazývá HP Multi Jet Fusion. Jedná se o zcela novou unikátní technologii 3D tisku. Ta je zaměřena především na vysoko objemovou produkci a měla by být konkurenceschopná tradiční sériové výrobě plastových dílů. Princip této technologie spočívá v opakovaném nanášení tenké vrstvy (0,07 – 0,1 mm) termoplastického materiálu, na kterou je následně aplikován finalizační roztok. Zmiňovaný roztok zajistí propojení jednotlivých vrstev a hladkost povrchu. Tato technologie byla z důvodu její výlučnosti přibrána pro porovnání a v závěru této kapitoly vyhodnocena. Byly vyrobeny dva kusy Designového dílů, které byly porovnány společně s díly vyrobenými technologií PolyJet. Nejedná se zde tedy primárně o porovnání vlivu postprocessingových procesů, ale především o porovnání dvou rozdílných (konkurenčních) technologií.

Metoda 1 – Tlaková voda

První popisovanou konvenční metodou postprocessingu je základní stupeň očištění podpůrného materiálu vysokým tlakem vody. Tato technologie je obecně známá a používaná jak v laboratoři prototypových technologií Katedry výrobních systémů, tak i na provozech oddělení Stavby prototypů a modelů. Zařízení PowerBlast (Obr. 4.13) použité pro tyto účely vyrábí firma Balco. Jedná se v podstatě o neprodyšný mycí box s bočním uzavíratelným otvorem. Tělesa vkládaná tímto vstupem, jsou během čištění manipulovatelná pouze za pomoci ochranných rukavic. Spínání tlakové vody je zajištěno pomocí nožního pedálu. Tlak vody se dá nastavit v rozmezí od 20 do 120 bar. K dispozici jsou dva typy rozdílných trysek. Tyto funkce umožňují využít zařízení, jak pro čištění malých nebo tenkostěnných dílů, stejně dobře jako dílů velkých a objemově náročnějších.



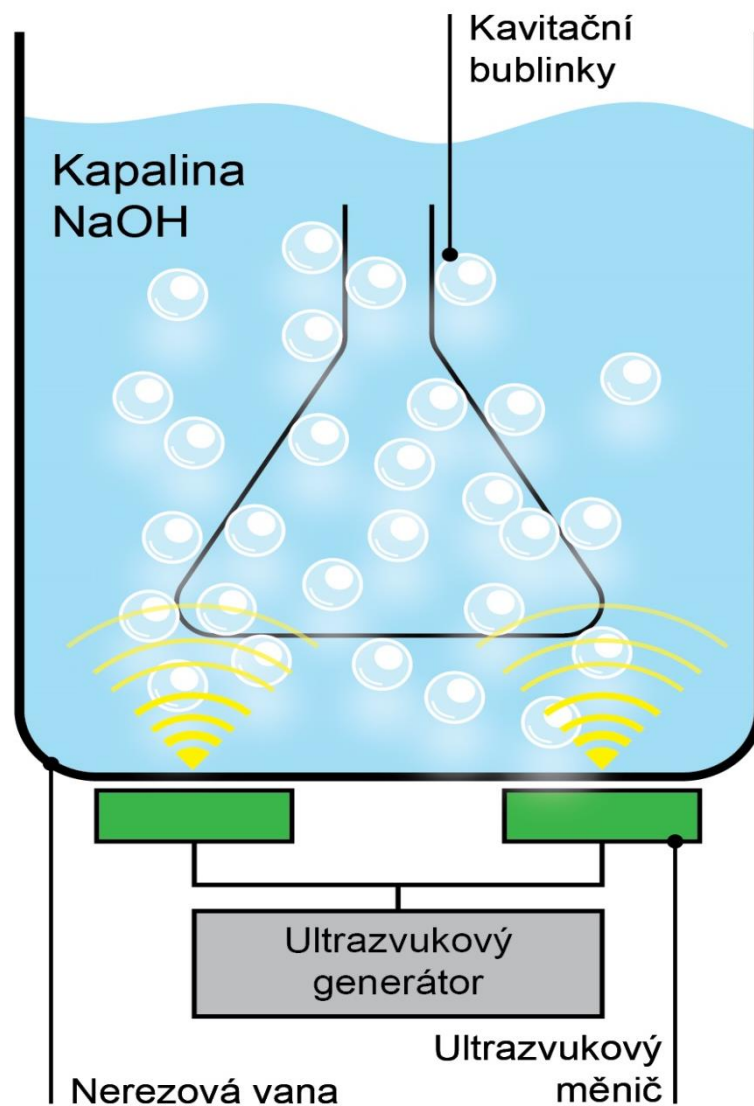
Obr. 4.13: Vysokotlaké vodní mytí, zařízení PowerBlast [21]

Postup této metody je poměrně jednoduchý a rychlý. Zkušební tělesa vytištěná na 3D tiskárně byla po dokončení výrobního procesu vložena do mycího boxu. V případě výskytu větších částí stavebních podpor došlo nejprve k jejich manuálnímu odstranění. Poté bylo zařízení uzavřeno a následně již bylo možné započít čistící proces. Samotné čištění probíhá tak, že díl je uchopen jednou rukou pomocí ochranných rukavic a druhou rukou byla ovládána tryska s vodou. Délka tohoto procesu je závislá na velikosti čištěných těles a na jejich geometrické složitosti. Zkušební tělesa očištěná touto metodou byla následně uložena do sušící pece na 30°C po dobu 24 hodin. Žádné další očištné úkony u metody 1 neprobíhali.

Metoda 1 byla aplikována na **všechna** zkušební tělesa. Jedná se o zcela základní úroveň, která umožňuje pouze to nejhrubší odebrání podpůrného materiálu z dobře dostupných míst. Povrch takto očištěných těles vypadá na první pohled čistý. Zaměříme-li se však detailněji, na povrchu tělesa nalezneme velice tenký film. Jedná se o zbylou vrstvu podpůrného materiálu. I přesto, že je tento materiál dle výrobce plně rozpustný ve vodě k jeho úplnému rozpuštění nedojde. Následně byla u takto očištěných těles změřena geometrická přesnost povrchu. Designové díly byly pokoveny. Vyhodnocení těchto zkoušek je pro všechny čtyři metody v závěru této kapitoly.

Metoda 2 – Ultrazvuková lázeň NaOH

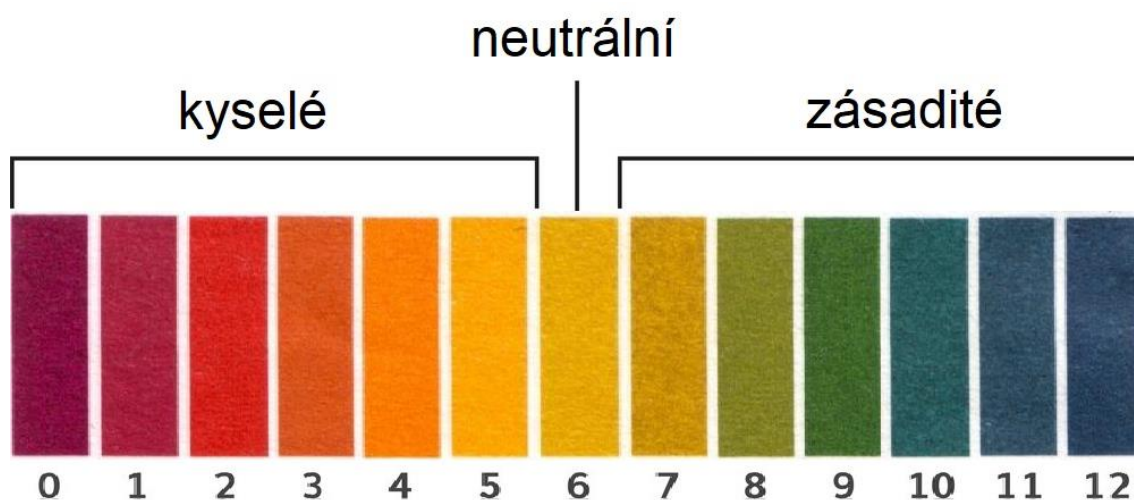
Druhá metoda je již o něco více sofistikovaná, nicméně opět standardně používaná jak laboratoří prototypových technologií, tak i oddělením EGV. U této metody dochází k využití ultrazvukového čistícího zařízení. Toto zařízení využívá ultrazvuk k odstraňování nečistot z povrchu dílů. Hlavní předností ultrazvukového čištění je rychlost, preciznost a dosah (vnitřní a malé prostory). Princip této technologie (Obr. 4.14) je fyzikálně chemický proces. Při kterém ultrazvukový měnič transformuje vysokofrekvenční energii z generátoru na mechanicko-akustické kmity. Tyto kmity poté ve vaně vytvoří ultrazvukové pole, které prochází tekutinou v našem případě hydroxidem sodným. Tento jev způsobuje vznik tepla, ale především vznik miniaturních bublinek. Které svým vznikem a rychlým zánikem narušují vazby mezi povrchem zkušebního tělesa a zbylou vrstvou podpůrného materiálu. Tento jev se nazývá kavitace. Účinnost tohoto procesu záleží na spoustě faktorů, např. kmitočet, teplota, objem vany, výkon ultrazvukového generátoru a především volbě pracovní kapaliny. [22]



Obr. 4.14: Princip ultrazvukového čištění

Právě pracovní kapalina, která zde slouží jako čisticí medium je předmětem dalšího zkoumání. Takováto chemická látka podporuje kavitaci, snižuje povrchové napětí vody a v neposlední řadě rozpouští nečistoty. Dále je však nutné, aby splňovala určitá kritéria. Zaprvé musí mít nízké povrchové napětí a hustotu rovnou přibližně vodě. Zadruhé musí rozpouštět nečistoty a mít dobré akustické vlastnosti. Volba pracovní kapaliny, ale závisí především na materiálu čištěného tělesa a také na druhu nečistoty. U metody číslo dva byl jako pracovní kapalina použit hydroxid sodný (NaOH). Jedná se o silně zásaditou anorganickou sloučeninu též známou pod názvem louh. Tato látka má velice široké spektrum využití od chemického, přes textilní až po potravinářský průmysl. Obecně však využití této látky napříč všemi oblastmi spojuje výraz čištění. Vlastnosti hydroxidu sodného jsou především vysoká zásaditost, viskozita, dobrá rozpustnost v ethanolu a vodě.

Technologický postup metody 2 započal přípravou ultrazvukového čistícího zařízení a čistícího média. V tomto případě 2% roztok hydroxidu sodného. U přípravy roztoku je důležité vždy přidávat hydroxid sodný do vody, v opačném případě hrozí vzplanutí roztoku nebo okolních věcí. Pro přípravu 2% zásaditého roztoku bylo přidáno 400g NaOH do 20l vody a následně ponecháno čtvrt hodiny mísit. Takto připravený vodný roztok měl hodnotu pH 12 a byl tedy vysoce zásaditý, viz stupnici pH (Obr. 4.15). Hodnota pH roztoku byla změřena pomocí univerzálních indikátorových papírků a následně odečtena na stupnici pH.



Obr. 4.15: Stupnice pH

Připravená zkušební tělesa byla následně vložena do této vysoce zásadité lázně. Při tomto úkonu bylo použito ochranných brýlí a rukavic. Následně bylo spuštěno ultrazvukové čistící zařízení. Toto zařízení umožňuje nastavit dvě hodnoty – teplotu a délku procesu. Teplota byla nastavena na 30° Celsia. Délka procesu byla zvolena 20 minut. Hodnoty byly voleny na základě dlouhodobých zkušeností pracovníků v laboratoři. Po ukončení čistícího procesu byla zkušební tělesa vyjmuta z ultrazvukové vany a následně očištěna tlakovou vodou. Tak aby nemohlo dojít k poleptání pokožky působením hydroxidu sodného. Poté byla zkušební tělesa uložena do sušící pece na 30°C po dobu 24 hodin. Žádné další očištné úkony u metody 2 neprobíhali.

Metoda 2 představuje vyšší úroveň čištění, která umožňuje odebrání podpůrného materiálu i z nedostupných míst díky působení ultrazvuku. Dle subjektivního hodnocení se povrch takto očištěných těles jeví jako velmi čistý. Následně byla u takto očištěných těles změřena geometrická přesnost povrchu. Designové díly byly pokoveny. Vyhodnocení těchto zkoušek je v závěru této kapitoly.

Metoda 3 – Ultrazvuková lázeň NaOH + Na₂SiO₃

Metoda číslo tři je technologicky identická jako metoda předchozí (metoda 2). I zde bylo použito ultrazvukové čistící zařízení. Nicméně pracovní kapalina je v tomto případě odlišná. Metoda číslo tři používá jako čistící médium vysoce zásaditý roztok hydroxidu sodného a křemičitanu sodného. Tato metoda není laboratoří prototypových technologií, ani oddělením EGV využívána. Byla vytipována a zvolena jako jedna z postprocessingových technologií doporučených výrobcem 3D tiskáren Stratasys. Zásaditý roztok použitý v této metodě se skládá ze dvou látek. Jelikož hydroxid sodný je popsán v předchozí metodě. Popíši zde druhou použitou chemickou látkou křemičitan sodný. Tato látka se rovněž nazývá vodní sklo (Obr. 4.16). Zjednodušeně si tuto kapalinu můžeme představit jako roztok skla ve vodě. Vodní sklo je poměrně viskózní látka, vše záleží na jeho koncentraci a na vlastnostech výchozího skla. Neboť pevný křemičitan sodný se vyrábí tavením sklářského písku za pomoci alkalických tavidel. Poté se roztavená sklovina prudce schladí a tím popraská, aby se vzápětí mohla za daných podmínek rozpustit. Tak vznikne vodní sklo. Hodnota pH a viskozity této látky je odvislá od chemického složení a koncentrace. Vodní sklo, jakožto roztok solí silné zásady a slabé kyseliny je značně alkalické. Vodní sklo se používá jako přísada do pracích a čistících prostředků, jako pojivo pískových forem ve slévárnách. Dále pak jako odstraňovač těžkých kovů v čistírnách odpadních vod nebo lepidlo v papírenském průmyslu. [23]



Obr. 4.16: Vodní sklo [23]

Technologický postup metody 3 započal přípravou ultrazvukového čistícího zařízení a čistícího média. Počáteční postup, tedy příprava 2% roztoku hydroxidu sodného a vody, byl v tomto případě shodný. Uvedu tedy pouze stručný popis. Do ultrazvukové vany bylo nalito 20l vody, následně přidáno 400g hydroxidu sodného. Po 15 minutách kdy se roztok nechal ustálit, bylo možné pokračovat s další přípravou. Do ultrazvukové vany bylo poté přidáno 200g křemičitanu sodného (Na_2SiO_3). Následujících 15 minut byl roztok ponechán, aby došlo k úplnému promísení. Tímto postupem vznikl roztok 2% hydroxidu sodného a 1% křemičitanu sodného. Vzniklý vodný roztok měl hodnotu pH 12, jedná se tedy o vysoce zásaditý roztok, viz stupnici pH (Obr. 4.15). Hodnota pH roztoku byla změřena pomocí univerzálních indikátorových papírků a následně odečtena na stupnici pH.

Připravená zkušební tělesa byla následně vložena do této vysoce zásadité lázně. (Obr. 4.17). Při tomto úkonu bylo použito ochranných brýlí a rukavic. Následně bylo spuštěno ultrazvukové čistící zařízení. Parametry (teplota a délka procesu) u tohoto čistícího procesu byly nastaveny následovně. Teplota byla nastavena na 30° Celsia. Délka procesu byla zvolena 20 minut. Hodnoty byly voleny na základě dlouhodobých zkušeností pracovníků v laboratoři. Po ukončení čistícího procesu byla zkušební tělesa vyjmuta z ultrazvukové vany a následně očištěna tlakovou vodou. Poté byla zkušební tělesa uložena do sušící pece na 30°C po dobu 24 hodin. Žádné další očištné úkony u metody 3 neprobíhali.



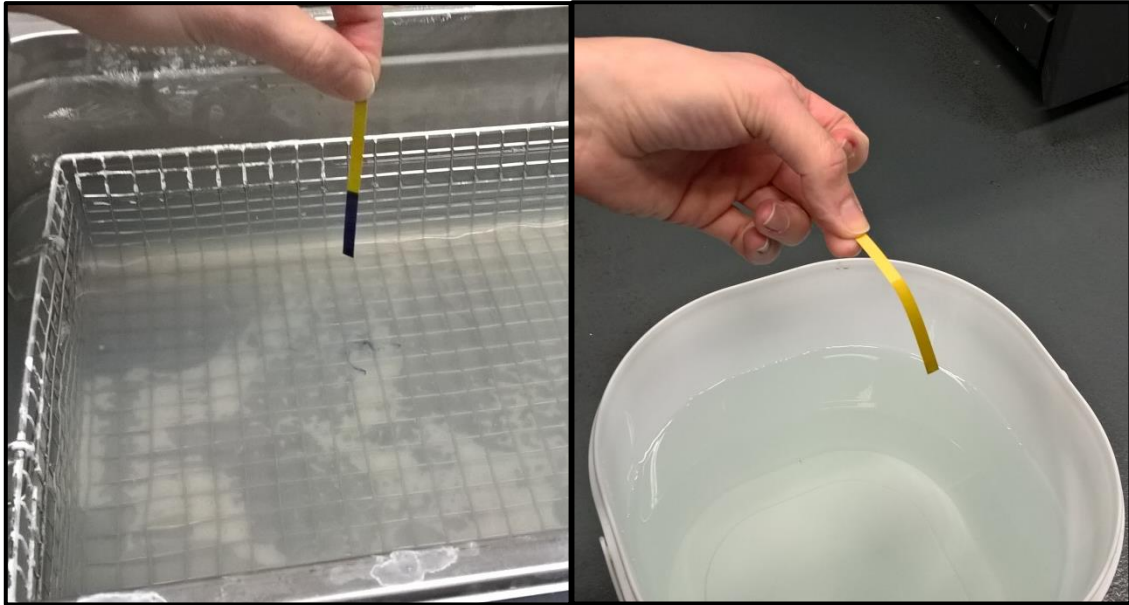
Obr. 4.17: Zkušební tělesa ponořená ve vysoce zásadité ultrazvukové lázni

Metoda 3 představuje rozšíření předchozí metody. Chemická látka byla v tomto případě rozšířena o křemičitan sodný. Vznikl tak velice zásaditý a silný roztok. Při ponoření těles na dobu delší než 1 hodina může u této sloučeniny docházet k deformaci stěn tenčích než 1mm. Doba ponoření je odvislá především od tloušťky vrstvy podpůrného materiálu. Jelikož zkušební tělesa byla před ponoření očištěna tlakovou vodou, byla délka doby ponoru volena stejně dlouhá jako u metody 2. Tak aby mohlo dojít k objektivnímu porovnání výsledných povrchů jednotlivých metod. Povrch těles očištěných metodou 3 se dle subjektivního hodnocení jeví jako velmi čistý. Následně byla u takto očištěných těles změřena geometrická přesnost povrchu. Designové díly byly pokoveny. Vyhodnocení těchto zkoušek je pro všechny čtyři metody v závěru této kapitoly.

Metoda 4 – Lázeň $C_3H_8O_3$

Tato metoda do značné míry vychází z metody 3. Zkušební tělesa absolvovala stejný technologický proces, se stejnou chemickou látkou ($NaOH+Na_2SiO_3$). Nicméně metoda 4 je rozšířena o další stupeň. Zkušební tělesa byla po vyjmutí z ultrazvukového čistícího zařízení vložena do neutralizační lázně glycerolu. Tento technologický postup není využíván laboratoří prototypových technologií, ani oddělení EGV. Rovněž tento technologický postup byl vybrán z metod doporučených výrobcem 3D tiskáren Stratasys. Glycerol použitý pro potřeby této metody zde slouží jako látka pro vytvoření neutralizační lázně. Glycerol neboli glycerín je hygroskopická bezbarvá viskózní kapalina dobře rozpustná ve vodě. Vzniká jako vedlejší produkt při procesu výroby mýdel nebo bionafty z řepkového oleje. Hlavní využití glycerolu je v kosmetickém průmyslu jako hydratační látka a v potravinářském průmyslu jako sladidlo.

Technologický postup metody 4 spočíval především v přípravě glycerolové neutralizační lázně. Jelikož proces ultrazvukového čištění byl vykonán společně se zkušebními tělesy metody 3. Příprava 15% glycerolové lázně spočívala ve smíchání 1260g glycerolu s 7140ml vody. Výsledný roztok měl hodnotu pH 7 (Obr. 4.18 napravo), jedná se tedy skutečně o neutrální látku. Rostok použitý pro ultrazvukové čištění měl hodnotu pH 12 (Obr. 4.18 nalevo). Hodnota pH obou roztoků byla změřena pomocí univerzálních indikátorových papírků a následně odečtena na stupnici pH, viz stupnici pH (Obr. 4.15).



Obr. 4.18: Měření hodnot pH jednotlivých roztoků

Připravená zkušební tělesa byla nejprve vložena do vysoce zásadité lázně ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$). Při tomto úkonu bylo použito ochranných brýlí a rukavic. Tato fáze byla vykonána společně pro zkušební tělesa metody 3 a metody 4. Tudiž i parametry tohoto procesu byly zcela identické, viz metodu 3. Po ukončení čistícího procesu a vyjmutí z ultrazvukové vany, byla zkušební tělesa očištěna tlakovou vodou a vzápětí vložena do neutrální lázně glycerolu (Obr. 4.19). Tento roztok již nebyl v ultrazvukové vaně, ale pouze v nádobě s přichystanou lázní. V této glycerolové lázni byla zkušební tělesa ponechána po dobu 1 minuty. Po uplynutí této doby byla zkušební tělesa vyjmuta. Následný oplach vodou se u této metody neprovádí. Poté byla zkušební tělesa uložena do sušící pece na 30°C po dobu 24 hodin. Žádné další očištné úkony u metody 4 neprobíhali.

Metoda 4 představuje dle technologického postupu nejvyšší úroveň čištění. Zkušební tělesa byla nejprve očištěna tlakovou vodou, poté čistící proces v ultrazvukové lázni a na závěr byla ponořena od neutralizační lázně glycerolu. Tato lázeň slouží jako stabilizační, měla by tedy zajistit ucelený jednolitý povrch. Dle subjektivního hodnocení se takto ošetřený povrch těles jeví jako velmi čistý. Subjektivní hodnocení však není v tomto případě dostačující. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik dalších expertních porovnání (měření geometrické přesnosti povrchu, pokovení Designových dílů). Tak aby bylo zaručeno objektivní posouzení a vyhodnocení jednotlivých metod. Toto vyhodnocení je uvedeno v závěrečné části této kapitoly.

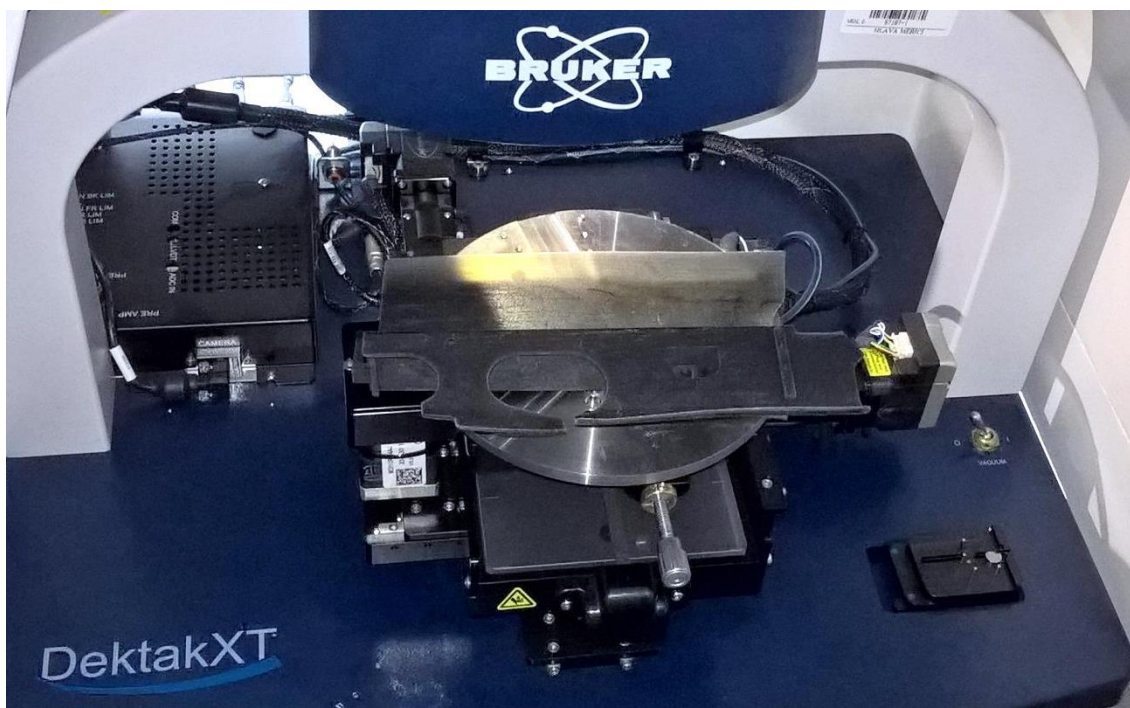


Obr. 4.19: Zkušební tělesa ponořená v neutralizační lázni glycerolu

Vyhodnocení konvenčních metod 1 – 4

Vyhodnocení a porovnání všech čtyř konvenčních metod bylo vykonáno z důvodu získání objektivního posouzení těchto metod. Na základě kterého mohla být vybrána vhodná varianta. Toto vyhodnocení bylo provedeno jednak na základě měření geometrické přesnosti povrchu zkušebních těles. Následně byla Designová zkušební tělesa pokovena, pro vytvoření co nejreálnějšího vzhledu povrchu. Výsledná kvalita povrchu byla hodnocena modeláři z oddělení EGV. Toto hodnocení probíhalo pomocí k tomu účelu vytvořenému dotazníku. Modeláři hodnotily tělesa vždy naslepo, výsledky hodnocení zaznamenávali do dotazníku.

Měření geometrické přesnosti povrchu bylo provedeno na přístroji Bruker Dektak XT (Obr. 4.20). Jedná se o mechanický hrotový profilometr. Toto zařízení umožňuje opakovatelnost měření pod 4\AA s vysokou skenovací rychlostí. Umožňuje provádět kritická měření nanometrových vrstev, schodů a mapování povrchu. Přesnost a opakovatelnost měření je umožněna díky designu zařízení (jedná se o jeden oblouk), barevné HD kameře s vysokým rozlišením a inteligentní elektronice. Vysoká skenovací rychlost je oproti předchozímu modelu o 40% vyšší díky unikátní platformě pro uchycení vzorku. Zařízení dokáže udělat až 120 000 snímků v jednom skenu. Délka tohoto skenu může být od $50\mu\text{m}$ do 50mm.

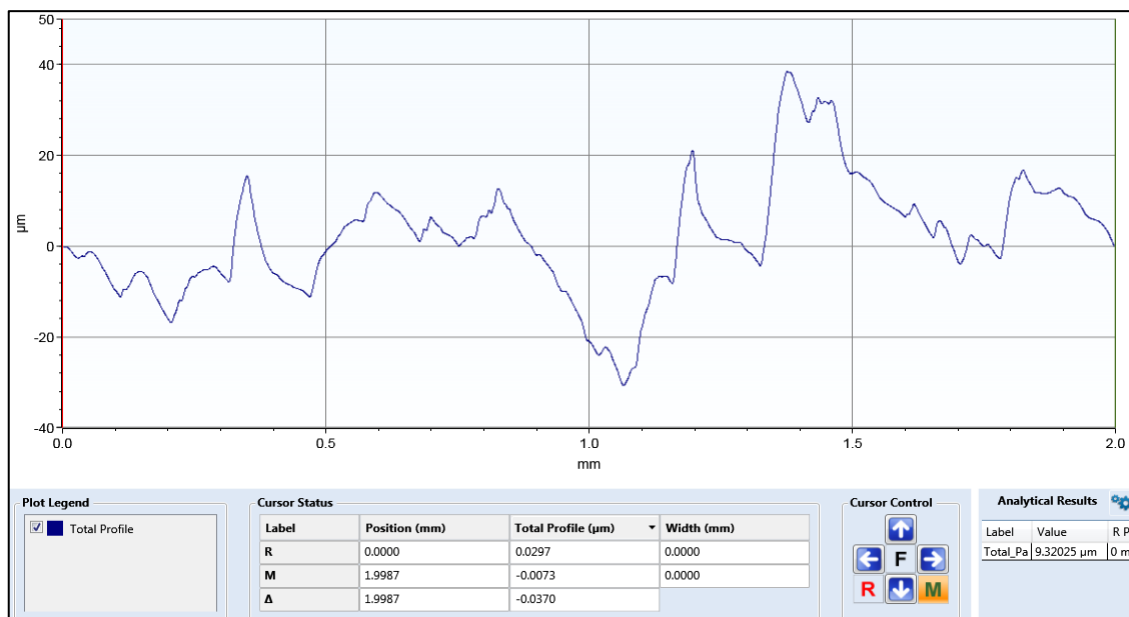


Obr. 4.20: Průběh měření geometrické přesnosti povrchu 2K dílu

Po dokončení všech čtyř konvenčních metod postprocessingových operací byla následně u všech těles změřena geometrická přesnost povrchu. Toto měření probíhalo v laboratoři přípravy a analýzy nanostruktur. Průběh měření byl vykonán v souladu s mezinárodní normou ČSN ISO 4287. Zkušební zařízení bylo nejprve kalibrováno. Poté byla zkušební tělesa jednotlivě usazena na platformu měřicího zařízení. A to tak aby rovina měřeného povrchu byla vždy rovnoběžná s rovinou měření. Pomocí příslušného softwaru byl spuštěn měřicí cyklus. Před zahájením měření geometrické přesnosti povrchu došlo k určení zkušebních podmínek. Pro všechna měření byly na základě doporučení vedoucího laboratoře zvoleny následující parametry:

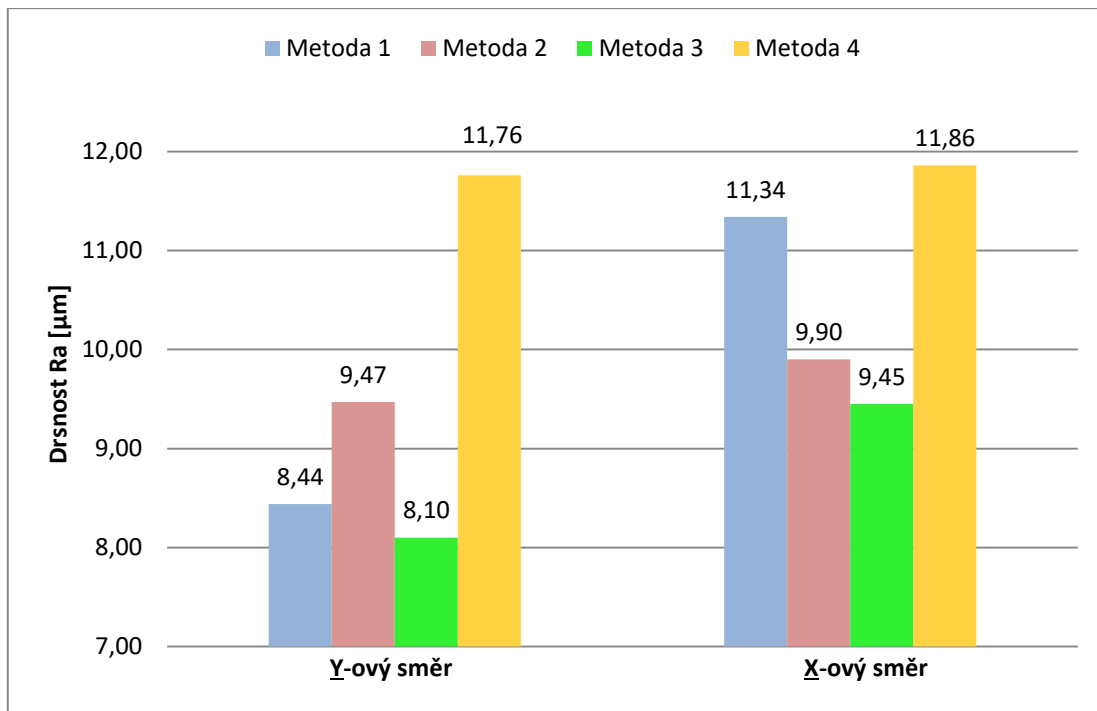
- Délka měřeného úseku: 2000 μm
- Délka měření: 15 s
- Rozlišení: 0,444 $\mu\text{m}/\text{pt}$

Na každém zkušebním tělese bylo provedeno celkem deset měření. Měření probíhalo vždy na jiném místě tak aby bylo zajištěno co největší pokrytí povrchu zkušebních těles. Povrch tělesa byl snímán a promítán pomocí HD kamery na připojené PC. Ovládaní pojezdu, HD kamery a platformy probíhalo rovněž pomocí příslušného softwaru. Po dokončení měření tento software automaticky vypočítal hodnotu drsnosti povrchu a zobrazil grafickou podobu profilu zkoumaného povrchu (Obr. 4.21).



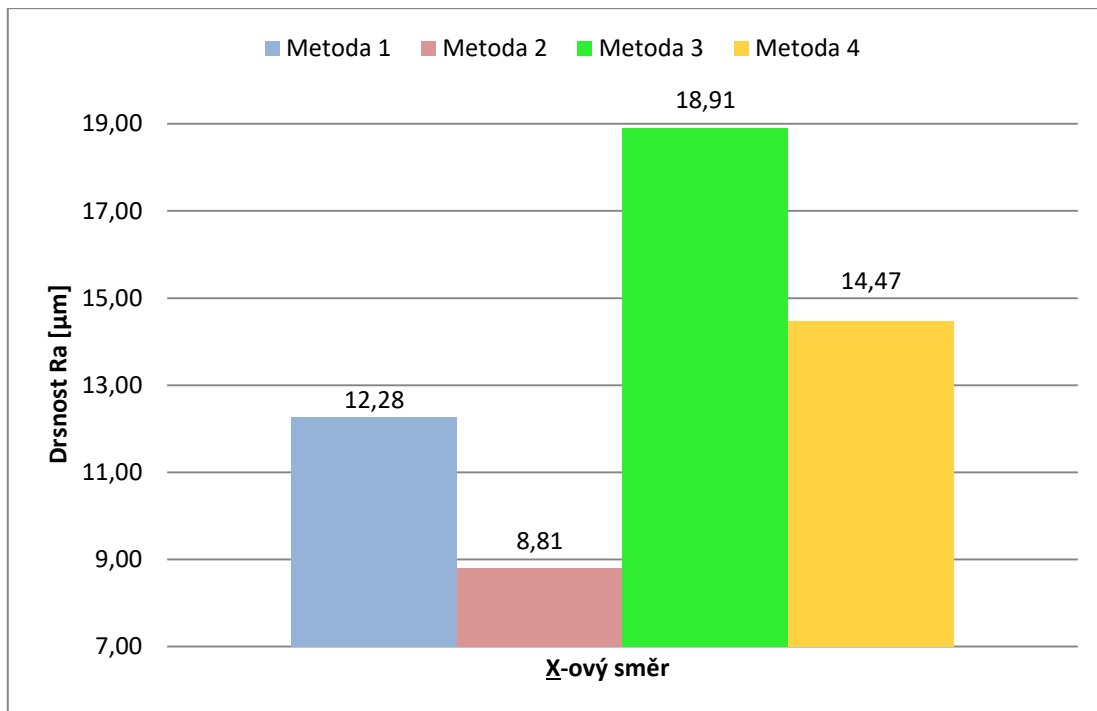
Obr. 4.21: Pracovní prostředí softwaru Bruker, výsledek měření

Vyhodnocení naměřených hodnot geometrické přesnosti povrchu pro jednotlivé postprocessingové metody bylo zpracováno výpočtem z dat získaných měření. Z měření provedených na každém zkušebním tělese (celkem deset měření), byla výpočtem stanovena průměrná hodnota. Na základě těchto hodnot bylo provedeno porovnání jednotlivých metod. Grafické vyhodnocení je zvláště provedeno pro Designový díl a zvláště pro 2K díl. Především z důvodu rozdílných materiálů a z toho vyplívajících hodnot drsností povrchu. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro Designový díl zobrazuje Graf 3. V levé části grafu jsou zobrazeny naměřené hodnoty pro díly vytištěné v podélném (x-ovém) směru, v pravé části grafu pro díly vytištěné v příčném (y-ovém) směru. Z měření vzešla nejlépe pro oba směry metoda číslo 3. Díly ošetřené touto metodou mají průměrnou hodnotu drsnosti povrchu R_a v x-ovém směru $8,10\mu\text{m}$ a v y-ovém $9,45\mu\text{m}$. Naopak nejhůře se jeví metoda 4 kde díly vyrobené v x-ovém směru mají průměrnou hodnotu drsnosti povrchu R_a $11,86\mu\text{m}$ a v y-ovém směru $11,76\mu\text{m}$. Metoda 1 má poměrně výrazný rozdíl mezi jednotlivými výrobními směry ($2,9\mu\text{m}$). Metoda 2 dosahuje středních vyrovnaných hodnot. Porovnáme-li kvalitu povrchu dílů vyrobených v x-ovém a y-ovém směru mezi sebou. Lepších hodnot dosahují díly vyrobené ve směru y-ovém, vyjádřeno procentuálně o 12,7%. Toto zjištění potvrzuje vliv orientace tisku dílů na jednotlivé dokončovací operace a tím i na kvalitu výsledného povrchu dílů. Závěr z měření geometrické přesnosti povrchu Designových dílů je tedy následující: Metoda 3 dosáhla nejlepšího výsledku a to v obou výrobních směrech, na základě tohoto zjištění doporučuji metodu 3.



Graf 3.: Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu Designový díl

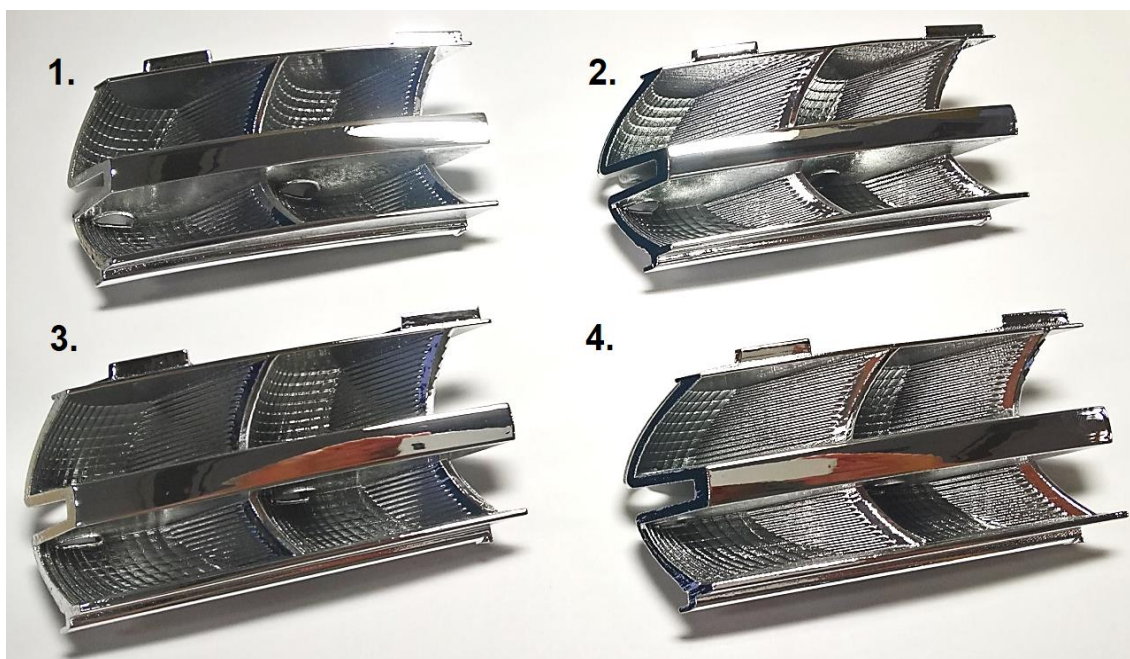
Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu 2K dílu jsou zobrazeny v Grafu 4. Tento díl byl vyrobenou pouze v podélném (x-ovém) směru. Vyhodnocení bylo provedeno na základě hodnot získaných měření. Výrazně nejlepších výsledku kvality povrchu u dvoukomponentního dílu dosáhla metoda 2 (Ra 8,81 μ m). Nedošlo tak k potvrzení teorie, že pro oba testované díly vyjde nejlépe shodná postprocessingové metoda. Naopak u 2K dílu dopadla metoda 3 nejhůře s výslednou průměrnou hodnotou Ra 18,91 μ m. Tuto skutečnost můžeme interpretovat především rozdílným materiálem obou dílů, který s příslušnými chemickými látkami reagoval odlišně. Výrobní postup i prováděné dokončovací operace byly pro oba díly identické, můžeme tak vyloučit jejich vliv. Pro vytvoření uceleného závěru by bylo nutné provést další zkoušky, soustředěné především na možnou vazbu mezi chemickým složením výrobních materiálů a samotných chemických látek. Zaměříme-li se na zbylé technologické postupy, hodnoty drsnosti povrchu naměřené u metody 4 vykazují převážně horší výsledky. Tento poměrně složitý postup se tak dle výsledků měření neosvědčil. Metoda 1 zastupuje ve všech měřeních střední hodnoty, nedosahuje výrazných výsledků. Přestože se však jedná o základní postprocessingový proces jsou výsledné naměřené hodnoty nečekaně dobré. Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu obou testovaných dílů jsou součástí přílohy.



Graf 4.: Naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu 2K díl

Druhým výstupem pro vyhodnocení konvenčních metod bylo hodnocení kvality povrchu pokovených Designových dílů (Obr. 4.22). Tyto díly byl po dokončení všech postprocessingových metod předány k vakuovému pokovení tenkou vrstvou hliníku. Hlavním důvodem k provedení této povrchové úpravy byla snaha docílit co nejvíce reálné podoby povrchu Designových těles. Na základě níž bylo možné nechat kvalitu povrchu dílů ohodnotit. Vyhodnocení bylo provedeno dvěma modeláři oddělení Stavby prototypů a modelů, kteří mají v tomto ohledu značné zkušenosti. Pokovená tělesa byla označena čísly dle příslušné na nich vykonané metody. Byl vytvořen dotazník hodnocení kvality povrchu dílu, vytvořený speciálně k tomu účelu. Modeláři hodnotily jednotlivá tělesa bez toho, aniž by věděli, jaká metoda byla na konkrétním tělese provedena. Výsledky hodnocení zaznamenávali do dotazníku a to jednak hodnocení písemné a dále hodnocení bodové na stupnici 1-5 (1 - nejhorší, 5 - nejlepší). Díly tak mohli nejhůře získat 4 a nejlépe až 20-ti bodové ohodnocení. Výsledná hodnota je zaokrouhlena (viz Tabulku 3). Otázky v dotazníku byly následující:

1. Kvalita povrchu a čištění
2. Vizuální porovnání dílu
3. Nutnost a rozsah Vašeho zásahu před povrchovou úpravou (chromování)
4. Celkové hodnocení dílu



Obr. 4.22: Pokovené Designové díly

Dle tohoto hodnocení a jeho následné analýzy byly zjištěny tyto poznatky. Na úvod popisují nedostatky společné pro všechny metody. Zaprvé u všech dílů bylo provedeno broušení čelní plochy v rozsahu cca. 15 minut. Jedná se o standardní úpravu pohledových ploch před pokovením. Zadruhé u všech hodnocených dílů vyrobených v y-novém směru byla zjištěna viditelná deformace (zkroucení) horní hrany. V tomto případě se jedná o vliv výrobního procesu. Dále se již budu věnovat hodnocení jednotlivých metod. Díly ošetřené metodou 1 vykazovaly po aplikaci pokovení viditelné zbytky podpůrného materiálu. Tento jev je nežádoucí avšak standardně se vyskytující. Pokovení tuto mikrovrstvu nebo jakékoliv další nečistoty nezakryje, ale naopak ještě více zviditelní. Především z tohoto důvodu bylo celkové ohodnocení této metody nejnižší, konkrétně 14 bodů pro oba stavební směry (viz Tabulku 3). Metoda 2 dosáhla celkově lepších výsledků. Na modelu nebyly nalezeny zbytky podpůrného materiálu. Dle vizuálního posouzení se modelářům jako horší jevil díl postavený v x-ovém směru. Na povrchu byly nalezeny viditelné dráhy. Nejlépe co se týká bodového a písemného ohodnocení, dopadla metoda 3. Díly měly velmi dobrou kvalitu povrchu bez viditelných vad. Povrch byl čistý, došlo ke kompletnímu odstranění podpor. Díl vyrobený v y-ovém směru má nižší bodové hodnocení díky deformaci horní hrany (již popsán v úvodu odstavce). Metoda 4 byla dle vyjádření hodnotících kvalitativně velice blízko s metodou 3. Avšak na základě drobných nuancí došlo ke snížení bodového ohodnocení.

Tabulka 3.: Bodové ohodnocení jednotlivých postprocessingových metod

	Metoda postprocessingu			
	1.	2.	3.	4.
Stavební směr x-ový	14	15	18	17
Stavební směr y-ový	14	15	17	16

Celkové vyhodnocení konvenčních metod odstranění podpůrného materiálu bylo provedeno na základě měření geometrické přesnosti povrchu a odborného hodnocení modelářů. Ze závěrečné analýzy vycházející z obou zmiňovaných kontrolních postupů vzešla metoda dosahující nejlepších výsledků. Jedná se o metodu 3. Tato metoda dosáhla pro Designové těleso nejlepších výsledků drsnosti povrchu a rovněž dostala největší bodové ohodnocení modelářů. Pro tuto metodu byla v následující kapitole vypracovaná metodika.

Nad rámec tohoto vyhodnocení bylo provedeno porovnání s díly vyrobenými konkurenční technologií HP Multi Jet popsané v úvodu této kapitoly. Tato technologie byla použita pouze pro výrobu Designových dílů, které byly rovněž pokoveny. Z průměrné naměřené hodnoty geometrické přesnosti povrchu (R_a 13,8 μm) a bodového hodnocení modelářů (11 bodů) vyplývá, že tato technologie co se týká kvality povrchu, není na srovnatelné úrovni s technologií PolyJet Matrix.

4.5 Metodika

Obecně můžeme metodiku charakterizovat jako pracovní postup nebo také jako nauku o metodě. Metodika představuje souhrn doporučených praktik a postupů. Uplatnění metodiky v praxi se používá pro řešení dílčích problémů, kdy uplatňujeme specifické postupy neboli metody. Tyto metody nám pomáhají získávat správné poznatky napříč rozdílnými obory. Metodu tedy můžeme označit také jako cestu vedoucí k poznání.

V této kapitole je popsána metodika, vypracovaná pro konvenční metodu 3 – Ultrazvuková lázeň $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$. Neboť metoda 3 vzešla jako nevhodnější vzhledem k příslušnému vyhodnocení (viz kapitolu 4.4). Tato metodika popisuje kompletní technologický postup pro tuto metodu. Metodika byla sepsána ve stylu pracovního postupu do jednotlivých bodů, které jsou řazeny chronologicky za sebou.

1. Díl vyrobený na 3D tiskárně technologií PolyJet, vyjmeme po ukončení výrobního cyklu a vložíme jej do mycího boxu.
Pozn.: v případě výskytu větších částí stavební podpory, tyto části nejprve manuálně odstraníme
2. Po uzavření a spuštění tlakového mycího zařízení, započneme díl čistit. Délka tohoto procesu je závislá na velikosti a tvarové složitosti dílu.
3. Po ukončení čistícího cyklu vložíme díl do sušicí pece vyhřáté na 30°C po dobu 24 hodin. Po vyjmutí dílu ze sušicí pece provedeme vizuální kontrolu povrchu dílu.
4. Následně dojde k přípravě ultrazvukového čistícího zařízení a chemické lázně. Jedná se o roztok 2% hydroxidu sodného a 1% křemičitanu sodného. Nejprve připravíme 2% roztok hydroxidu sodného. Přidáme 400g NaOH do 20l vody a ponecháme 15 minut mísit. Do ultrazvukové vany poté přidáme 200g křemičitanu sodného. Následujících 15 minut necháme roztok opět mísit. Takto vznikl kompletní roztok 2% NaOH a 1% Na₂SiO₃. Tento roztok má hodnotu pH 12 a jedná se tedy o vysoce zásaditou lázeň.
Pozn.: u přípravy roztoku je důležité vždy přidat první hydroxid sodný do vody, v opačném případě hrozí vzplanutí roztoku nebo okolních věcí
5. Připravený díl vložíme do této vysoce zásadité lázně. Následně spustíme ultrazvukové čistící zařízení. Teplota lázně má hodnotu 30°C, délka procesu je 20 minut. Po ukončení čistícího procesu vyjmeme díly z ultrazvukové vany a očistíme je tlakovou vodou.
Pozn.: při vkládání a vyjmutí dílu ze zásadité lázně je nutné použití ochranných brýlí a rukavic, tak aby nemohlo dojít k poleptání pokožky
6. Po ukončení čistícího cyklu vložíme díl do sušicí pece vyhřáté na 30°C po dobu 24 hodin.
7. Po vyjmutí dílu ze sušicí pece provedeme vizuální kontrolu povrchu dílu, díl předáme k dalšímu zpracování.

5 Vyhodnocení

Vyhodnocení této diplomové práce je rozděleno do třech samostatných částí. Především z důvodu přehlednosti a zřetelnosti.

I. Měření tvrdosti Shore

II. Technologie omílání

III. Konvenční metody

I. V úvodu jsou shrnuty poznatky získané v oblasti měření tvrdosti Shore jednotlivých materiálů. Toto měření bylo vykonáno dle příslušné normy pro elastomerní materiály TangoBlack a Agilus30. Tato měření především potvrdila teorii rozdílných hodnot tvrdosti materiálu (udávané vs. reálné). Hodnoty tvrdosti Shore reálně naměřené vykazovali výrazný pokles vůči hodnotám udávaným výrobcem. Tento rozdíl se zvyšuje téměř lineárně s rostoucí hodnotou tvrdosti Shore. Procentuálně můžeme tento pokles napříč celým rozsahem tvrdosti vyjádřit pro jednotlivé materiály takto:

- TangoBlack - 19,4%
- Agilus30 - 9,6%

Výraznější ztrátu tvrdosti (téměř dvojnásobnou) dosahuje materiál TangoBlack. Detailně jsou naměřené hodnoty zobrazeny v Grafu 1, 2 v kapitole 4.2. Tento poznatek je klíčový při výrobě dílů, kdy můžeme na základě získaných poznatků předcházet pozdějším rozporům tvrdosti materiálu.

II. Dalším zkoumaným směrem bylo možné využití nekonvenční technologie omílání pro odstranění podpůrného materiálu těles vyrobených technologií PolyJet Matrix. V tomto směru byly zpracovány experimenty pro dvě rozdílné technologie omílání, které jsou detailně popsány v kapitole 4.3. První ze zmiňovaných je technologie kryogenní komory. Výstup z této zkoušky je negativní. Prokázalo se, že testovaná tělesa a materiály jsou pro tuto technologii nevhodná. Z důvodu přílišné tvarové a rozměrové objemnosti, ale také díky působení velmi nízkých teplot. Druhou omílací technologií bylo diskové odstředivé zařízení. U této technologie bylo dosaženo o poznání lepších výsledků. I přes to je však závěrečné stanovisko negativní a to především díky provedené rozměrové inspekci bezdotykovým optickým měřicím zařízením. Testovaná tělesa jevila známky znatelné tvarové deformace především na hranách a v rozích. Snímky z měření jsou zobrazeny v kapitole 4.3 (Obr. 4.11, 4.12).

III. Třetí vyhodnocenou částí jsou konvenční metody. Tento celek se skládá ze čtyř rozdílných metod. Jednotlivé metody a způsob jejich vyhodnocení jsou detailně popsány v kapitole 4.4. Z tohoto důvodu jsou zde uváděny pouze získané poznatky.

Zásadní poznatek získaný v první části vyhodnocení – měření geometrické přesnosti povrchu, je potvrzení vlivu orientace tisku dílů na dokončovací operace. Tedy i na kvalitu výsledného povrchu. Testovaná tělesa vyrobená v příčném (y-ovém) směru dosahují nižších hodnot drsnosti povrchu než tělesa vyrobená v podélném (x-ovém) směru. Procentuální rozdíl v těchto měřeních dosahuje hodnoty 12,7%. Vliv jednotlivých konvenčních postprocessingových metod na kvalitu povrchu obou testovaných těles se neprokázal. U Designového dílu vykazovala nejlepší hodnoty metoda 3 u 2K dílu se jednalo o metodu 2. Tento poznatek si může interpretovat rozdílným chemickým složením materiálů obou dílů a tím i rozdílným působením jednotlivých metod potažmo chemických lázní na tyto materiály. Pro úplné potvrzení tohoto závěru je nutné provést další zkoušky s cílem potvrdit tuto vazbu mezi chemickým složením výrobních materiálů a jednotlivých chemických lázní. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu zobrazuje Graf 3 a Graf 4 v kapitole 4.4.

Druhou částí vyhodnocení konvenčních metod je hodnocení povrchu pokovených Designových dílů modeláři dílny EGV – Stavba a výroba prototypů. Na základě tohoto hodnocení byl znovu zjištěn a potvrzen vliv orientace tisku na výslednou kvalitu povrchu dílu. Shodně byla identifikována deformace (zkroucení) u všech dílů vyrobených v y-ovém směru. Nejvyšší bodové a písemné ohodnocení dostala metoda 3. Kvalita povrchu byla dle hodnotících bez viditelných vad velice dobře očištěná s kompletně odstraněnými stavebními podporami. Rozpor, který je patrný mezi výsledky měření drsnosti povrchu a vizuálním hodnocením modelářů má opodstatněnou příčinu. Drsnost povrchu vzrostla v některých případech především s vyšší chemickou zátěží způsobenou jednotlivými postprocessingovými metodami. Díky tomu došlo k výraznějšímu narušení povrchu. Hodnocení modelářů se však zakládá především na vizuální kontrole výsledné kvality pokoveného povrchu. Mikroskopicky narušený povrch tak nepředstavuje zásadní vadu, pokud došlo k odebrání podpůrného materiálu.

Co se týká závěrů získaných v průběhu samotného vyhotovení jednotlivých konvenčních metod. Bylo prokázáno, že podpůrný materiál i přes garanci výrobce není plně rozpustný ve vodě. Z tohoto důvodu je nutné pro dosažení požadované čistoty povrchu provést další čistící proces.

Závěr

Tato diplomová práce si klade za hlavní cíl především zpracovat a vyhodnotit rozdílné postprocessingové metody a jejich vliv na finální kvalitu povrchu dílů vyrobených technologií PolyJet Matrix. K naplnění tohoto cíle došlo vypracováním rozdílných experimentů zabývajících se odstraněním podpůrného materiálu. Výstupem této studie je stanovení vhodné metody, pro kterou je vypracována metodika. Tato metodika bude sloužit jako doporučení nového pracovního postupu pro příslušnou dílnu oddělení Výroby a stavby prototypů ve společnosti Škoda Auto a.s.

Náplní diplomové práce nebylo pouze samotné posouzení postprocessingových metod, nadto bylo vypracováno měření tvrdosti Shore elastomerních materiálů. Z tohoto měření vzešli nové přínosné výstupy, týkající se rozporu v tvrdosti materiálu udávanou výrobcem a skutečně naměřenou. Tyto závěry budou moci být reálně využity příslušnou výrobní dílnou při výrobě modelů z těchto materiálů. Rovněž vyhodnocení jednotlivých postprocessingových metod ať už konvenčních či nekonvenčních poskytlo nové poznatky. Potvrzující především teorii vlivu orientace tisku dílu na výslednou kvalitu povrchu. Tyto nově získané přínosy a zpracované výsledky jednotlivých měření jsou kompletně shrnuty v kapitole 5. Nově vzniklá metodika popisující pracovní postup nejvhodnější metody je detailně popsána v kapitole 4.6. Tato metodika byla vybrána na základě vyhodnocení náročnosti popisovaných metod a výsledné kvality vnějšího povrchu dílů. Nejlépe v těchto kritériích obstála konvenční metoda číslo tři, která dosahovala nejvyššího stupně očištění povrchu. Co se týká technologických požadavků, je možné tuto metodu v současné době zavést na příslušné pracoviště.

Diplomová práce popisuje celkem šest rozdílných metod zaměřených na zlepšení povrchových vlastností dílů vyrobených technologií 3D tisku PolyJet Matrix. Bylo otestováno celkem 8 ks Designových dílů a 4 ks Dvoukomponentních dílů převzatých z vozů značky Škoda. Vyhodnocení jednotlivých postprocessingových metod bylo provedeno na základě opakovatelnosti měření, tak aby bylo možné přesně stanovit vliv těchto metod na testované díly. Některé poznatky však, je nutno ověřit další podrobnou analýzou zaměřenou na konkrétní problematiku.

Použitá literatura

- [1] Nové tiskové materiály do 3D tiskáren Stratasys: Agilus 30 a Nylon 12CF. MCAE [online]. 2017 [cit. 2018-03-05] Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/nove-tiskove-materialy-do-3d-tiskaren-stratasys-agilus-30-nylon-12cf/>
- [2] Využití prvků digitální továrny. Škoda-IT [online]. 2017 [cit. 2018-03-06] Dostupné z: <https://skoda-it.cz/cs/vyuziti-prvku-digitalni-tovarny/>
- [3] ŠKODA Mobil. 2018, 4(03).
- [4] How to Clean Polyjet Parts. Fictiv [online]. 2015 [cit. 2018-03-10] Dostupné z: <https://www.fictiv.com/blog/posts/how-to-clean-polyjet-parts>
- [5] STRATASYS OBJET 3D PRINTER. Fabacademy [online]. 2017 [cit. 2018-03-10] Dostupné z: <http://archive.fabacademy.org/2017/woma/students/238/assignment5.html>
- [6] 3D Printing First Spool. Columbia Blogs [online]. 2014 [cit. 2018-03-10] Dostupné z: http://blogs.cuit.columbia.edu/2014_haptic/2014/03/23/3d-printing-first-spool/
- [7] Photopolymerization. Wikipedia [online]. 2016 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing#Photopolymerization
- [8] La Productique et sa Culture : Impression 3D, le Processus PolyJet. Rocbor [online]. 2014 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://www.rocbor.net/Product/Ressources/NouvellesTechnologies/StereolithographieAndCo/Processus/PolyJet.htm>
- [9] Agilus30. Stratasys [online]. 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/agilus30>
- [10] Tango. Stratasys [online]. 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/tango>
- [11] Vero. Stratasys [online]. 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/search/vero>
- [12] NOORANI, Rafiq. c2006. Rapid prototyping: principles and applications. Hoboken, N.J.: Wiley. ISBN 978-047-1730-019.

- [13] Connex500™ - The First Multi-Material 3D Printing System. 3D Printers Canada [online]. 2014 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.3dprinterscanada.com/connex-3d-printer-family-connex500.php>
- [14] Škoda začala odhalovat kodiaq, ukázala téměř vše. Novinky [online]. 2016 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/411544-skoda-zacala-odhalovat-kodiaq-ukazala-temer-vse.html>
- [15] Stratasys J750. Javelin [online]. 2017 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.javelin-tech.com/3d/stratasys-3d-printer/stratasys-j750/>
- [16] Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tvrdosti vtlačováním – Část 1: Stanovení tvrdoměrem (tvrdost Shore) ČSN ISO 7619-1. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [17] Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu ČSN ISO 4287. 1. vydání. Praha: ÚNMZ, 1999.
- [18] Proces omílání. OTEC [online]. 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.otec.de/cz/produkty/omilani/>
- [19] Cryogenic Deburring Process. Nitro freeze [online]. 2018 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://nitrofreeze.com/services/deburring/cryogenic-deburring-process/>
- [20] Automotive Group Optimizes Production Processes using ATOS Triple Scan. Metrology news [online]. 2016 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://metrology.news/automotive-group-optimizes-processes-using-atos-triple-scan>
- [21] Design and Prototyping. Lewis&Clark [online]. 2018 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://www.lc.edu/fablab/equipment/design/>
- [22] Ultrazvuková čistička. Wikipedia [online]. 2017 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrazvukov%C3%A1_%C4%8Disti%C4%8Dka
- [23] Vodní sklo. Wikipedia [online]. 2017 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_sklo

Přílohy

A Obsah příloženého CD

Text diplomové práce

- diplomová_práce_2018_David_Martiš
- kopie_zadání_diplomová_práce_2018_David_Martiš

Zdrojová data z měření tvrdosti Shore pro jednotlivé materiály

- měření_tvrdosti_Shore

Zdrojová data z měření drsnosti povrchu pro jednotlivé materiály

- měření_drsnosti_povrchu

Zdrojová data z měření rozměrové inspekce pro jednotlivé materiály

- 01_barevná_mapa_rozměrových_odchylek_Vero
- 02_barevná_mapa_rozměrových_odchylek_Tango

Fotografie

- Výroba těles
- Měření tvrdosti Shore
- Měření drsnosti
- Chemická zátěž

B Měření tvrdosti Shore

Přední strana Tango

		1	2	3	4	5	\bar{x}	Δ
Glossy	Tango+ 27A	20,9	19,9	19,7	20,6	20,4	20,4	6,6
	Tango+ 40A	28,6	29,8	29,1	29,1	29,2	29,1	10,9
	Tango+ 50A	36,6	36,6	37,0	36,2	36,2	36,6	13,4
	Tango+ 60A	44,7	45,5	46,5	44,9	46,6	45,5	14,5
	Tango+ 70A	53,2	52,7	53,2	54,4	54,4	53,2	16,8
	Tango+ 85A	65,1	65,5	65,7	64,8	65,5	65,5	19,5
	Tango+ 95A	78,0	78,0	78,3	79,1	79,7	78,3	16,7
Matt	Tango+ 27A	20,7	21,7	20,3	20,7	20,6	20,7	6,3
	Tango+ 40A	29,7	29,7	31,2	29,9	29,9	29,9	10,1
	Tango+ 50A	37,5	36,5	37,8	37,4	37,1	37,4	12,6
	Tango+ 60A	46,1	46,4	6,7	47,0	45,7	46,1	13,9
	Tango+ 70A	54,3	55,7	54,5	55,1	54,7	54,7	15,3
	Tango+ 85A	66,4	66,1	68,2	67,0	67,0	67,0	18,0
	Tango+ 95A	78,8	79,1	79,1	79,0	79,5	79,1	15,9

Zadní strana Tango

		1	2	3	4	5	\bar{x}	Δ
Glossy	Tango+ 27A	27,7	27,8	27,2	27,4	27,1	27,4	-0,4
	Tango+ 40A	33,7	34,9	34,7	34,4	34,9	34,7	5,3
	Tango+ 50A	41,0	41,3	41,6	40,6	40,6	41,0	9,0
	Tango+ 60A	50,1	50,0	49,7	49,1	49,3	49,7	10,3
	Tango+ 70A	57,9	57,8	58,0	56,4	57,0	57,8	12,2
	Tango+ 85A	67,0	67,0	66,3	67,4	66,9	67,0	18,0
	Tango+ 95A	79,1	79,3	78,6	78,5	78,5	78,6	16,4
Matt	Tango+ 27A	26,8	28,4	27,4	27,3	27,4	27,4	-0,4
	Tango+ 40A	34,8	34,5	35,1	35,0	34,4	34,8	5,2
	Tango+ 50A	41,6	41,3	40,9	41,1	41,4	41,3	8,7
	Tango+ 60A	49,6	49,3	50,0	50,0	49,3	49,6	10,4
	Tango+ 70A	57,4	58,4	57,7	56,6	56,7	57,4	12,6
	Tango+ 85A	68,2	68,0	67,9	67,9	66,8	67,9	17,1
	Tango+ 95A	79,4	79,4	78,8	78,8	78,5	78,8	16,2

Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou udávány v jednotkách Shore A.

Přední strana Agilus

		1	2	3	4	5	\bar{x}	Δ
Glossy	Agilus 30A	26,0	25,5	25,3	25,4	26,3	25,5	4,5
	Agilus 40A	35,1	35,5	34,6	35,0	35,5	35,1	4,9
	Agilus 50A	42,8	43,0	42,9	44,0	43,8	43,0	7,0
	Agilus 60A	53,1	52,9	54,1	54,7	53,3	53,3	6,7
	Agilus 70A	61,7	63,7	61,9	61,0	62,8	61,9	8,1
	Agilus 85A	72,4	73,1	73,0	74,0	74,6	73,1	11,9
	Agilus 95A	81,3	80,8	82,4	82,9	82,3	82,3	12,7
Matt	Agilus 30A	26,0	26,3	26,1	26,3	26,1	26,1	3,9
	Agilus 40A	36,2	36,5	36,1	35,9	36,1	36,1	3,9
	Agilus 50A	44,9	44,4	44,5	44,7	44,8	44,7	5,3
	Agilus 60A	55,0	56,6	54,6	54,3	55,0	55,0	5,0
	Agilus 70A	63,0	63,1	63,2	63,9	63,5	63,2	6,8
	Agilus 85A	73,6	74,2	72,3	72,2	74,3	73,6	11,4
	Agilus 95A	83,9	83,3	82,4	82,3	83,8	83,3	11,7

Zadní strana Agilus

		1	2	3	4	5	\bar{x}	Δ
Glossy	Agilus 30A	33,6	34,0	33,8	33,2	33,6	33,6	-3,6
	Agilus 40A	40,9	41,2	40,7	41,8	40,9	40,9	-0,9
	Agilus 50A	47,5	47,3	48,2	48,2	47,0	47,5	2,5
	Agilus 60A	56,9	57,4	56,7	56,1	55,6	56,7	3,3
	Agilus 70A	64,2	64,6	63,6	63,8	64,6	64,2	5,8
	Agilus 85A	73,2	72,5	72,5	73,0	73,7	73,0	12,0
	Agilus 95A	82,7	82,0	82,0	82,9	83,1	82,7	12,3
Matt	Agilus 30A	33,4	33,2	33,3	33,5	33,6	33,4	-3,4
	Agilus 40A	41,4	41,4	40,9	41,1	40,9	41,1	-1,1
	Agilus 50A	48,6	48,0	48,3	48,4	48,5	48,4	1,6
	Agilus 60A	57,2	59,0	56,7	55,6	55,7	56,7	3,3
	Agilus 70A	64,3	64,4	64,4	63,5	62,6	64,3	5,7
	Agilus 85A	73,5	72,6	72,0	72,8	72,9	72,8	12,2
	Agilus 95A	82,6	83,4	82,2	81,3	81,7	82,2	12,8

Všechny naměřené hodnoty tvrdosti jsou udávány v jednotkách Shore A.

C Měření drsnosti povrchu

**PolyJet
Designový díl**

Měření	díl y1.	díl y2.	díl y3.	díl y4.	díl x1.	díl x2.	díl x3.	díl x4.
1	11	9,5	7,3	12,7	13,5	10,7	8,4	11,6
2	9,5	8,1	8,3	13,2	10,5	10,1	10,4	10,8
3	9,9	10,1	9,1	9,9	10,9	11,6	10	11,3
4	7,9	9,3	9,4	10,1	11,8	11,3	9,9	10,7
5	7,3	9	5,6	12,4	10,5	9	12	9,5
6	7,6	9,7	6,5	11,1	10,4	8,9	8,3	10,1
7	9,5	10,8	9,8	12,6	12,4	9,1	8,1	15,9
8	6,9	9,6	8	12,4	11,6	11,2	10,9	15,3
9	7,8	8,7	9	12	11,6	8,5	7,2	12,7
10	7	9,9	8	11,2	10,2	8,6	9,3	10,7
∅	8,44	9,47	8,10	11,76	11,34	9,90	9,45	11,86

**HP Mult Jet
Designový díl**

díl 1.
14,2
16,0
12,0
17,6
11,7
13,0
18,2
11,0
11,8
12,3
13,8

**PolyJet
2K díl**

Měření	díl x1.	díl x2.	díl x3.	díl x4.
1	11,4	7,3	16,6	12,3
2	7,4	8,6	24	14
3	7,7	7,9	15,5	11,2
4	9,3	9,5	19,1	16
5	16,4	9,5	19,3	16,7
6	16,4	9,3	21,2	14,6
7	13,4	9,9	19,9	13,3
8	16,5	9,8	19,1	15,3
9	9	8,97	16,3	15,5
10	15,3	7,3	18,1	15,8
∅	12,28	8,81	18,91	14,47

Všechny naměřené hodnoty drsnosti jsou udávány v jednotkách μm .