



ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Čištění a úprava drsnosti povrchů
vyrobených 3Dtiskem

Cleaning and repairs of surfaces produced by a 3D
printer

Autor: Zbyněk Vávra

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Konzultant práce: Ing. Jiří Kuchař

Praha

2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce. Nemám závažný důvod proti užití tohoto díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Datum:.....

Podpis:.....

Poděkování

Rád bych poděkovala panu doc. Ing. Viktorovi Kreibichovi, CSc. a Ing. Jiřímu Kuchařovi za jejich odborné vedení a konzultace v průběhu zpracování bakalářské práce. Dále společnosti METAL 3D za poskytnutí vzorků k experimentální části bakalářské práce a také firmě ACO Industries k.s za elektrolytické vyleštění vzorků.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zkoumáním povrchů součástí vyrobených 3D tiskem a to zejména součástí tištěných z korozivzdorné oceli 316L. Udává představu o strukturách a drsnostech povrchů po různých dokončovacích operacích, jako například tryskání, omílání a elektrolytické leštění.

Abstract

This bachelor thesis deals with the surfaces on components made by 3D technology especially components made from stainless steel 316L. It gives an idea about structure and surface roughness after different finishing process for example blasting, tumbling and electrolytic polishing..

Obsah

ÚVOD	8
1. ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	10
1.1. RAPID PROTOTYPING	10
1.1.1. Význam prototypování	11
1.1.2. Postup při prototypování	11
1.1.3. Druhy prototypů	11
1.2. Základná technologie rapid prototyping podle materiálu	12
1.2.1. Stereolitografie SLA	12
1.2.2. Solid Ground Curing – SGC.....	13
1.2.3. 3D Printing – 3DP.....	14
1.2.4. Laminated Object Manufacturing – LOM.....	15
1.2.5. Fused Deposition Modeling – FDM.....	16
1.2.6. Multi Jet Modeling – MJM.....	17
1.2.7. Selective Laser Sintering/Melting (SLA/SLM)	18
2. HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU	19
2.1. Drsnost povrchu.....	20
3. DOKONČOVACÍ OPERACE	24
3.1. Broušení.....	24
3.2. Tryskání.....	27
3.2.1. Druhy abraziv	27
3.3. Omílání	30
3.3.1. Druhy abrazivních tělísek pro omílání	30
3.4. Acetonové napařování.....	31
3.5. Elektrolytické leštění	32
3.6. Lepení kovů	35
3.6.1. Technologie lepení kovů	36
3.6.2. Příprava materiálu na lepení	36
3.6.3. Hlavní zásady navrhování lepených kovových konstrukcí	37
3.6.4. Lepidla vhodná k lepení kovů.....	37
3.7. Technologie tekutého kovu	39
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	40
4.1. Použité vzorky.....	40
4.2. Měření drsnosti vzorků	42
5. ZÁVĚR	53

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Schéma SLA tiskárny [15]	13
Obrázek 2 - Schéma SGC tiskárny [38]	14
Obrázek 3 - Schéma 3DP tiskárny [25]	15
Obrázek 4 - Schéma LOM tiskárny [35]	16
Obrázek 5 - Schéma FDM tiskárny [15]	17
Obrázek 6 - Schéma MJM tiskárny [10]	18
Obrázek 7 - Schéma SLA/SLM tiskárny [15]	19
Obrázek 8 - Profil povrchu [37]	20
Obrázek 9 - Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [37]	21
Obrázek 10 - Základní profil a odvozené profily vlnitosti a drsnosti [37]	21
Obrázek 11 - Základní a vyhodnocovaná délka, délka rozběhu a doběhu	22
Obrázek 12 - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra [37]	22
Obrázek 13 - Průměrná kvadratická úchylka profilu Rq	23
Obrázek 14 - Největší výška profilu RZ	23
Obrázek 15 - Největší výška nerovnosti profilu Ry	24
Obrázek 16 - Broušení po 3D tisku [12]	25
Obrázek 17 - Struktura brusného kotouče [17]	26
Obrázek 18 - Tryskání tištěné součásti broky [12]	27
Obrázek 19 - Organická abraziva [36]	28
Obrázek 20 - Minerální abraziva [36]	29
Obrázek 21 - Kovová abraziva [36]	29
Obrázek 22 - Vibrační omílací stroj [41]	30
Obrázek 23 - Keramická omílací tělíska (vlevo) a plastová omílací tělíska (vpravo) [19]	31
Obrázek 24 - Výrobek před (vlevo) a po parním vyhlazováním (vpravo)[14]	32
Obrázek 25 - Schéma procesu elektrolytického leštění [16]	33
Obrázek 26 - Schéma pracovního postupu při elektrolytickém leštění [16]	34
Obrázek 27 - Implantáty po elektrolytickém leštění (vlevo) a reaktor na výrobu léčiv (vpravo) [16]	34
Obrázek 28 - Lepená konstrukce	35
Obrázek 29 - Automobilová maska stříkaná chromem [40]	39
Obrázek 30 - Tiskárna RENISHAW AM250 [33]	40
Obrázek 31 - Vzorek s technologickými podpěrami	41
Obrázek 32 - Vzorek po odstranění podpěr	41
Obrázek 33 - Měřicí přístroj Mitutoyo sj201p	42
Obrázek 34 - Směry měření drsnosti	42
Obrázek 35 - Graf drsností jednotlivých vzorků	43
Obrázek 36 - Tryskač Barth UNI 322	44
Obrázek 37 - Srovnání drsností vzorku před a po tryskání	45
Obrázek 38 - Výchozí vzorek č.1 (vlevo) a vzorek č.1 po tryskání (vpravo)	46
Obrázek 39 - Struktura povrchu vzorku č.1 před (vlevo) a po tryskání (vpravo)	46
Obrázek 40 - Omílací stroj RÖSLER	47
Obrázek 41 - Naměřené drsnosti před a po omílání	48
Obrázek 42 - Struktura povrchu po omílání vzorek č.1 (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo)	48
Obrázek 43 - Porovnání drsností před a po elektrolytickém leštění	49
Obrázek 44 - Struktura povrchu vzorku č.2 před (vlevo) a po elektrolytickém (vpravo)	50
Obrázek 45 - Výchozí vzorek č.2 (vlevo) a vzorek po tryskání a elektrolytickém leštění (vpravo)	50
Obrázek 46 - Drsnosti vzorku č.3 před a po tryskání a omílání	51
Obrázek 47 - Struktura povrchu vzorku č.3 po tryskání (vlevo) a po následném omílání (vpravo)	51
Obrázek 48 - Vzorky po aplikaci stříkaného chromu	52

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1- Rozdělení technologie rapid prototyping podle materiálu	12
Tabulka 2 - Přehled výchozích drsností	43
Tabulka 3 - Porovnání drsností před a po tryskání.....	45
Tabulka 4 - Porovnání drsností před a po omílání	47
Tabulka 5 - Naměřené drsnosti před a po elektrolytickém leštění	49
Tabulka 6 - Porovnání drsností před a po tryskání.....	51

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na čištění a úpravu drsnosti povrchů vyrobených 3D tiskem. Práce je v teoretické části zaměřena převážně na 3D technologie tisku, hodnocení kvality povrchu a následné dokončovací operace, jako je broušení, omílání, tryskání a elektrolytické leštění. V experimentální části je popsána výroba, příprava vzorků a následná aplikace dokončovacích operacích na těchto vzorcích.

Hlavním předmětem experimentu bylo provedení dokončovacích operací (tryskáním, omíláním a elektrolytickým leštěním) za účelem dosažení co nejlepší drsnosti povrchu.

Výsledky by měly dát představu o nejvhodnější dokončovací operaci pro součásti vytisknuté 3D technologií, a to konkrétně pro výrobky z nerezové oceli 316L.

TEORETICKÁ ČÁST

1. ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Již více než 30 let je snahou technologů realizovat možnosti výpočetní techniky do technologie výroby a přenášet počítačová data nejen na papír ale i do prostoru. Jinými slovy tisknout a přenášet informace nejen ve dvou směrech ale ve skutečném prostorovém tvaru. Vyrobít prototyp, součást, poslat data kamkoliv na světě a zákazník si ji může vytisknout na své tiskárně. Současný stav vývoje tohoto snažení vědy i výroby, ale i přenosu informací je na začátku budoucího rychlého rozvoje. Nacházíme se přechodu tisku z plastů do využívání kovů a dalších materiálů, zrychlení procesu tisku a zlevnění výroby. Díky rozvoji výpočetní techniky, materiálů a vzdělanosti nám umožňuje přidávání informací a poznatků do výroby. Stále totiž platí, že jen ta aplikovaná poznání mají cenu a smysl.

1.1. RAPID PROTOTYPING

Od konce 80.let minulého století jsou technologií Rapid Prototyping (rychlý vývoj prototypu) označovány technologie, které vytváří výrobek tzv. aditivním způsobem. Tyto technologie umožňují výrobu fyzických 3D modelů a prototypů z počítačových dat. Při tomto způsobu výroby se materiál neubírá, jak je tomu například při obrábění ani se nepřidává materiál najednou jako se to děje například u slévání, ale výrobek je vytvářen postupným spojováním resp. skládáním po vrstvách materiálu na sebe.

Takovou výrobu dělíme na několik druhů:

- podle charakteru výroby
- podle druhu nástroje pro výrobu
- podle objemu výroby

Prototyp vyrobený technologií rapid prototyping, se snaží přebrat charakteristiky sériového výrobku, je však vyroben náhradní technologií, někdy také i z náhradního materiálu. Tento výrobek bývá obvykle několikanásobně dražší, než je to u sériové výroby, ale zásadní výhodou je rychlost zhotovení a také přesná představa o podobě výrobku. [1]

1.1.1. Význam prototypování

- **Koncept** - Sdílení všech nápadů
- **Vhodnost** - Testování rozměrů na návrhu
- **Tvar** - Zhodnocení estetičnosti a ergonomie dílů
- **Funkčnost** - Testování v pracovním prostředí
- **Nabídka** - Ocenění produktu z hlediska nabídky
- **Marketing** - Komunikace o designu se zákazníky. [2]

1.1.2. Postup při prototypování

- **Návrh** - vytvoření digitalizovaného fyzického modelu
- **Vrstvení** - tvorba řezů, podpurné konstrukce, orientace
- **Stavba** - nanášení vrstev, tvorba fyzického modelu
- **Dokončovací operace** - dotvrzení, úprava drsnosti povrchu
- **Testování** - vizuální hodnocení, testy funkčnosti, testy montáže. [2]

1.1.3. Druhy prototypů

- **Konstrukční prototypy** - Kontrola geometrie a montáže
- **Prototypy designu** - Ve skutečné velikosti či v měřítku zlepšují komunikaci mezi partnery – výhodné pro kontrolu návrhu / estetiky atd., přesnost není podstatná
- **Funkční prototypy** - Dovolují testování a analýzy typu obtékání, modely do větrných tunelů atd.
- **Technické prototypy** - Mají všechny funkční rysy, výrobní proces může být lehce odlišný. [2]

1.2. Základná technologie rapid prototyping podle materiálu

Tabulka 1- Rozdělení technologie rapid prototyping podle materiálu

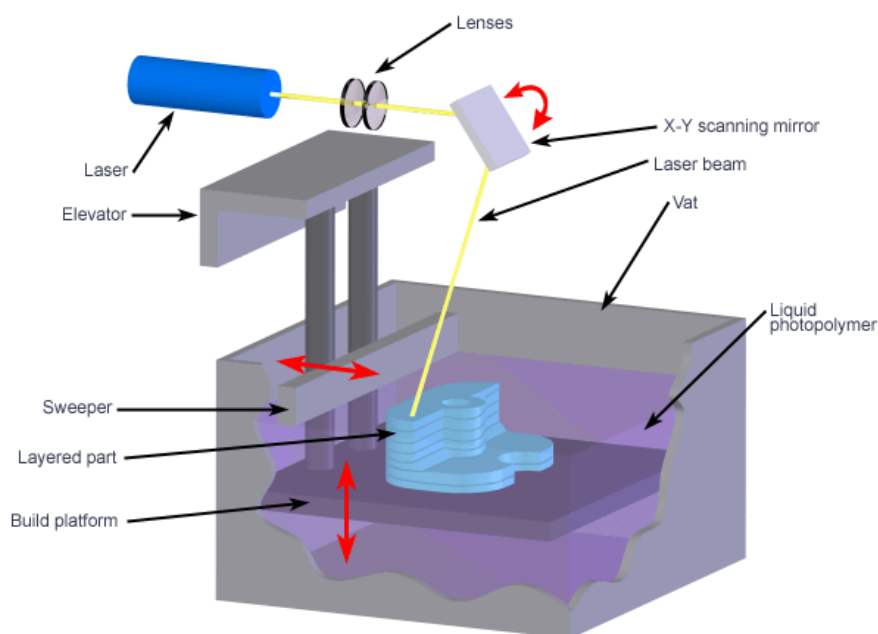
Základní technologie RP	Zkratka	Materiál modelu
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
Solid Groud Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering/Melting	SLS/SLM	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednovrstvým pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonat
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer

1.2.1. Stereolitografie SLA

Stereolitografie (SLA) je nejrozšířenější technologií rapid prototyping. Tato technologie může produkovat vysoce přesné a detailní díly. Jedná se o první rapid prototyping proces, který byl zaveden v roce 1988 firmou 3D Systems, která byla založena vynálezcem Charlesem Hullem. Modely jsou tvořeny v nádobě s kapalnou fotosenzitivní pryskyřicí, kdy pod hladinou dochází k postupnému vytvrzení jednotlivých vrstev pomocí UV záření. Je-li vrstva dokončena, vyrovnávací nůž vyhladí povrch před nanesením další vrstvy. Tyto vrstvy mají tloušťku zhruba 0,05 až 0,15 mm. O tuto hodnotu je po každém vytvrzení snížena nosná deska. Po skončení celého výrobního procesu je přebytek pryskyřice odveden. V mnoha případech se konečné vytvrzení modelu provádí v UV peci. Po konečném vytvrzení, se odstraní podpory a povrch výrobku je dále leštěn, broušen nebo jinak upravován. [3], [4]

Výhody: Zhotovení objemnějších modelů, dostatečná přesnost, jakost povrchu, široký výběr materiálů, plynulý průběh procesu, není třeba obsluhy během procesu.

Nevýhody: Metoda požadující úpravu povrchu modelu a následné sušení. [3]



Copyright © 2008 CustomPartNet

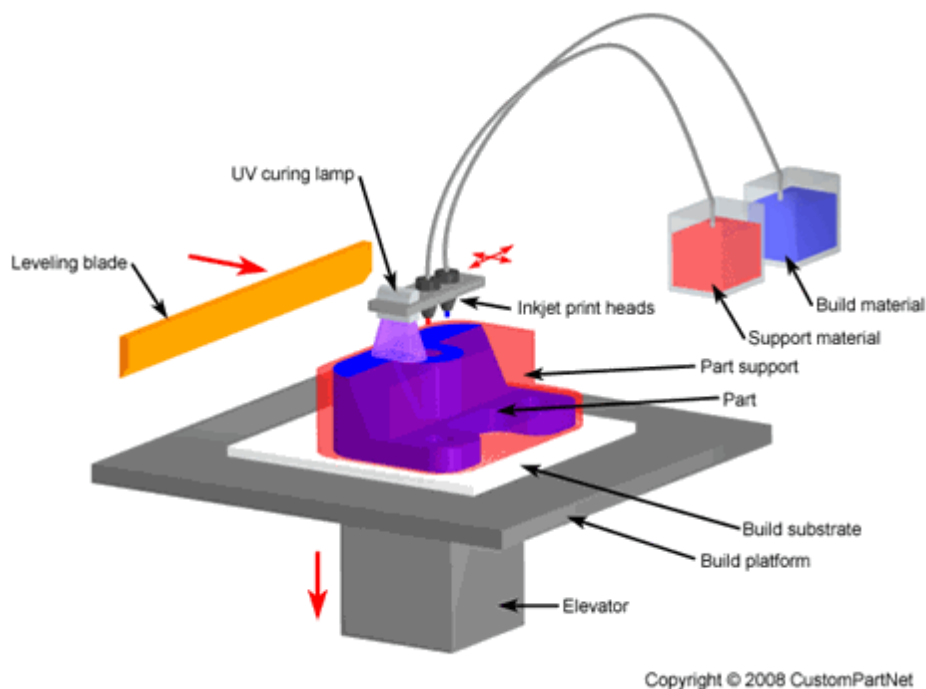
Obrázek 1 - Schéma SLA tiskárny [15]

1.2.2. Solid Ground Curing – SGC

Po zpracování dat projde šablonová deska ionografickým procesem nanášení speciálního toneru. Na nosnou desku je nanášena tenká vrstva fotopolymerní pryskyřice, nad kterou je umístěna šablonová deska. Krátkodobým působením UV lampy je pryskyřice vytvrzena. Po odstranění šablony je nevytvrzená pryskyřice vakuově odsáta. Na místa, ze kterých byla odsáta nevytvrzená pryskyřice je nanášen roztavený výplňový vosk, který slouží jako podpora pro další vrstvu. Materiál modelů je na bázi fotopolymerů nebo pryskyřice. Dokončená součást je v některých případech ještě závěrečně vytvrzována pomocí ozařování speciální UV lampou. Po konečném vytvrzení je nutné ze součásti chemicky odstranit podpory a přebytečný materiál ve formě vosku, tento proces obstarává kyselina listová. Hlavní oblast použití této metody je v oblasti designu, funkce a smontovatelnosti strojních součástí. Používá se také v medicíně např. pro výrobu chirurgických pomůcek na míru pacientovi, výrobu zakázkových protéz apod.

Výhody: Malé smrštění modelu, dobrá struktura a stabilita modelu, proces neprodukuje žádný zápach.

Nevýhody: Velké rozměry zařízení, problém s usazeninami vosku, tvorba odpadu. [3]



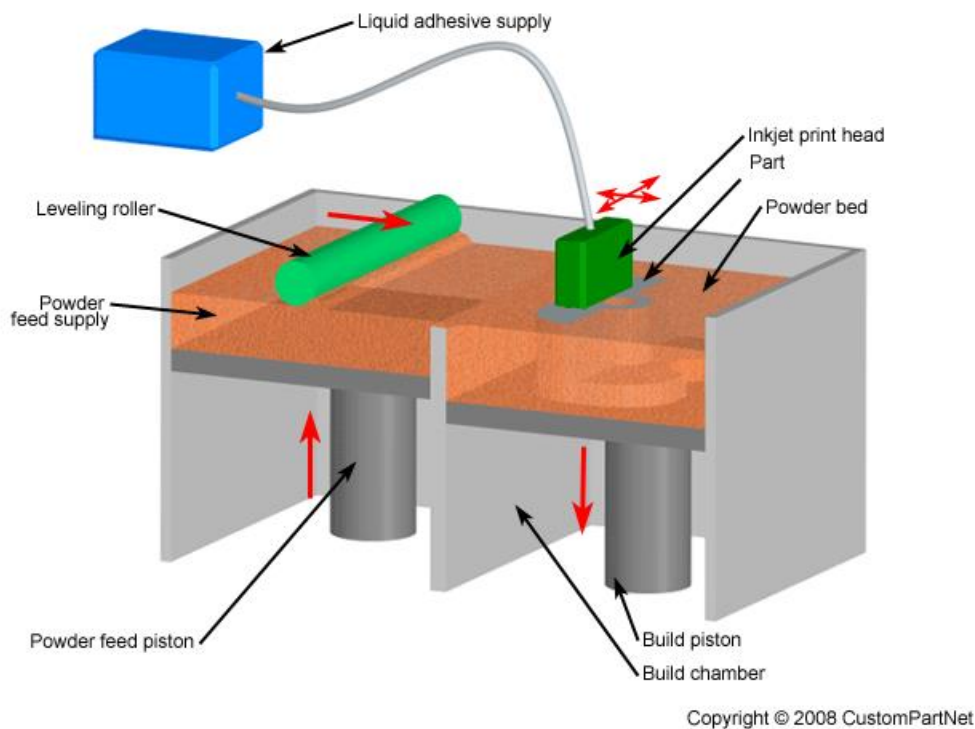
Obrázek 2 - Schéma SGC tiskárny [38]

1.2.3. 3D Printing – 3DP

Trojrozměrná technologie tisku (3DP) byla vyvinuta na Massachusettském technologickém institutu. Tento proces je podobný procesu SLS, ale místo spékání prášku pomocí laseru, je zde použita inkjetová hlava. Práškový materiál je pomocí rotujícího válce na základnu nanášen v tenkých vrstvách. Inkjetová hlava, pohybující se v rovině XY, nanáší pojivo do daných oblastí vrstvy. Tím dochází ke spojení jednotlivých částic a vytváření celku po vrstvách. Po zhotovení je model napuštěn tvrdidlem pro zvýšení pevnosti před dalším využitím. Podobně jako u SLS není z principu funkce nutná žádná tvorba podpor. Tiskárny jsou vybaveny automatickým vibračním a odprašovacím systémem, který odstraní až 80% přebytečného prášku, který se dále recykluje pro další použití. Průmyslově nejrychlejší zařízení na výrobu prototypů - 2 až 4 vrstvy za minutu. Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti, pro účely vizualizací, prezentací a designu nových případně inovovaných výrobků.

Výhody: Vysoká kvalita povrchu výsledného modelu. Lze vyrábět Součásti s velmi tenkou stěnou, modely je možné použít jako formy pro odlévací nebo vstřikovací technologie.

Nevýhody: dražší pořizovací náklady, ne tak velká přesnost jako u jiných technologií. [7]



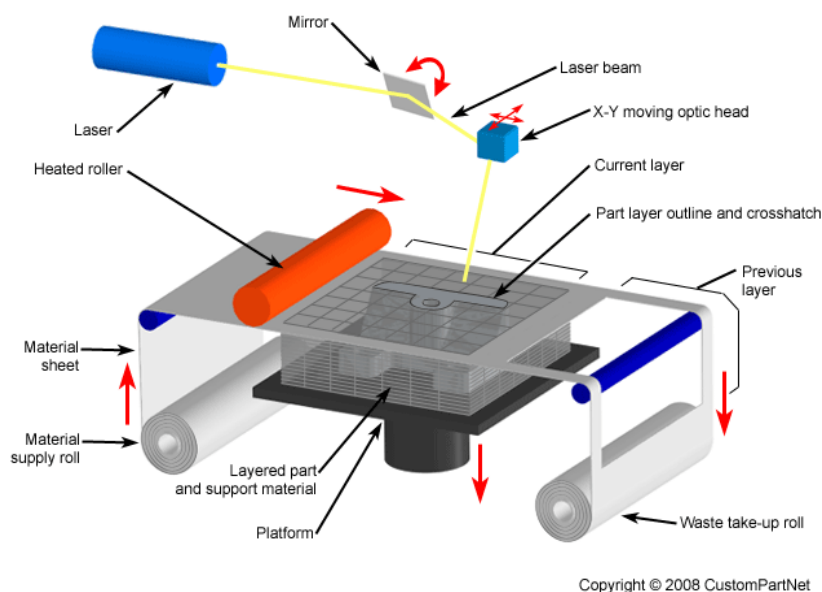
Obrázek 3 - Schéma 3DP tiskárny [25]

1.2.4. Laminated Object Manufacturing – LOM

Tato technologie je založena na laserovém vyřezávání kontury modelu do fólie. Fólie jsou na jedné své straně opatřeny lepidlem, které zaručuje přilnavost k předchozí vrstvě. Po vyřezání obrysu modelu jednotlivé vrstvy je přebytečný materiál rozřezán na kvádry, které odstraníme na závěr celého procesu. Jako materiál lze použít fólie tvořené papírem, plasty (nylon, polyester) nebo keramikou. Pro součásti vyrobené technologií LOM se jako dokončovací operace používají běžné obráběcí metody, soustružení, frézování a vrtání. Většinou se pro stálost rozměrů na výrobek nanáší silikonový, uretanový nebo epoxidový nástřik, kvůli zabránění absorpci vlhkosti. Využití součásti je hlavně pro účely vizualizace, marketing a prezentaci nových výrobků potenciálním zákazníkům. Modely lze také využít ve slévárství jako formy pro nejrůznější odlévací a vstřikovací technologie. [8]

Výhody: Široká škála používaných materiálů ve formě fólie – nejčastější je papír, ale lze použít také materiály např. plastové, kovové ale i keramické a kompozitní. Další výhodou je rychlost zařízení a není zapotřebí podpor. Jedná se o ekologický proces.

Nevýhody: Tato metoda není vhodná pro tenkostěnné výrobky. Pevnost modelu je dána materiálem, ale je omezena použitým pojivem mezi jednotlivými vrstvami. Časově náročné odstraňování přebytečného materiálu, hrozí nebezpečí poškození součástí. [3]



Obrázek 4 - Schéma LOM tiskárny [35]

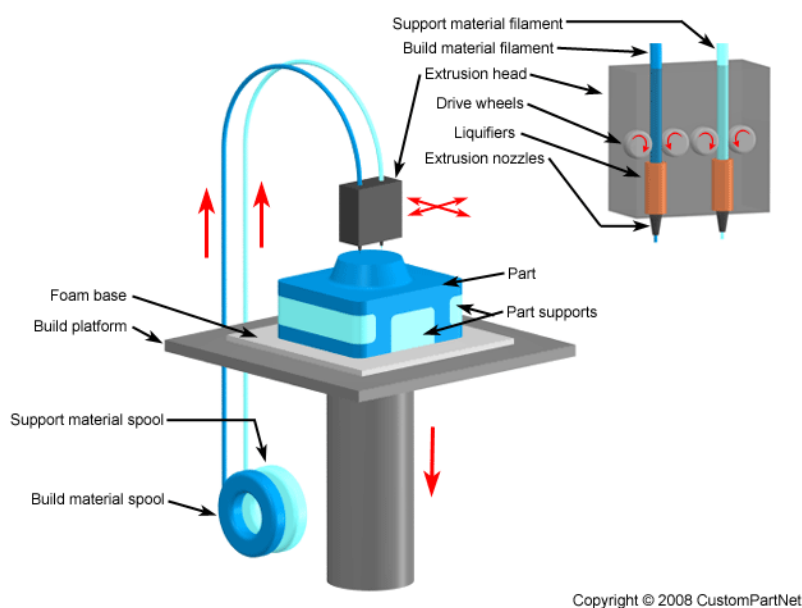
1.2.5. Fused Deposition Modeling – FDM

Principem této technologie, je nanášení vrstev roztaveného materiálu na pracovní desku. Materiál je ve formě tenkého vlákna navinutého na cívce nanášen po vrstvách na pracovní desku pomocí vyhřívaných trysek. Hlava těchto trysek se pohybuje nad pracovním prostorem v osách XY. Pohyb po ose Z zajišťuje nosná deska, která vždy po vytvoření jedné vrstvy klesne o úroveň níž. Nejčastěji používaným materiálem je ABS plast, polykarbonát, elastomer, vosku atd. Ty jsou v tryskách zahřáty na teplotu mírně vyšší, než je jejich teplota tavení. Při styku s povrchem součásti se vlákna vzájemně spojují a vytvářejí tenkou vrstvu, která ihned tuhne. Typická tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,1 -0,25 mm. Je zde také nutná tvorba podpor pro vnější plochy modelu a oblasti, které nejsou při tvorbě modelu po částech samonosné. To zajišťuje druhá tryska, která nanáší

dle potřeby podpurný materiál. Oba materiály se vzájemně nemísí a lze je tak po dokončení procesu snadno oddělit. Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti a designu nových případně inovovaných výrobků. [9]

Výhody: Výroba funkčních prototypů, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. Při výrobě vzniká minimální odpad, pouze mat. podpor.

Nevýhody: Omezená přesnost daná tvarem materiálu a průměrem výstupní trysky. Proces výroby nelze urychlit z důvodu principu metody a vlastností materiálu. [3]



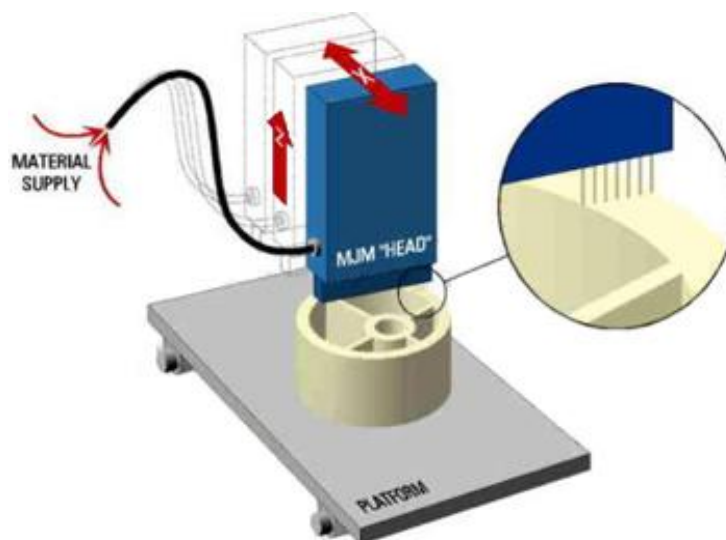
Obrázek 5 - Schéma FDM tiskárny [15]

1.2.6. Multi Jet Modeling – MJM

Tato technologie je unikátní, protože používá jednu velkou tiskovou hlavu, s mnoha lineárně uspořádanými tryskami, které pokrývá celou šířku stavebního platformy. Funguje podobně jako inkoustová tiskárna. Nanášená vrstva materiálu po styku s předchozí vrstvou ihned tuhne. MJM používá akrylový fotopolymer, který nabízí velmi kvalitní povrch, přesnost a preciznost. V závislosti na volbě materiálu, tato technologie se používá v aplikacích, kde je zapotřebí vysoká přesnost a pevnost. [10]

Výhody: Jednoduchost, malá ekonomická a časová náročnost.

Nevýhody: Pro menší součásti, malá škála používaných materiálů. [3]



Obrázek 6 - Schéma MJM tiskárny [10]

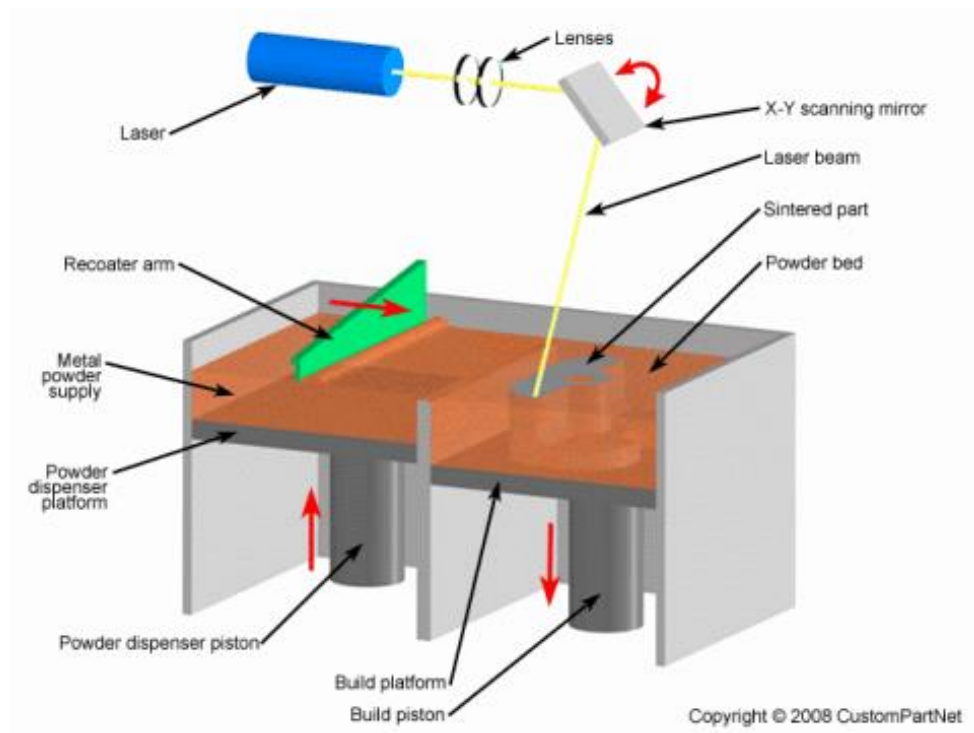
1.2.7. Selective Laser Sintering/Melting (SLA/SLM)

Selective Laser Sintering (zkratka SLS) je označení procesu aditivní výroby nebo 3D tisku. Česky lze přeložit jako selektivní spékání laserem – v praxi se často setkáte s kratším termínem „sintrování“. Technologii vyvinuli v polovině osmdesátých let vědci na texaské univerzitě v Austinu, kteří následně založili společnost DTM zaměřenou na výrobu SLS strojů. V roce 2001 tuto firmu koupila konkurenční 3D Systems. Výrobek zde vzniká tavením práškového materiálu (tím může být např. plast, kov, keramika nebo sklo), který je po tenkých vrstvách spékán v ploše řezů dle digitálního modelu vysoce výkonným laserem.

Nejprve je nanesena vrstva prášku v celé ploše stavěcí platformy a stroj tento materiál přehřeje na teplotu blízkou jeho bodu tání, aby laseru umožnil využít veškeré jeho energie ke spečení materiálu v ploše právě vytvářeného řezu modelem. Jakmile laser osvítil příslušnou plochu, klesne stavěcí platforma o tloušťku jedné stavební vrstvy níže, nanese se další vrstva materiálu a takto se celý proces opakuje až do dokončení výrobku. Výhodou tohoto postupu, kdy je vytvářený model neustále obklopen zbytkovým práškovým materiálem, je eliminace potřeby dočasných podpor [5]. Metoda umožňuje vyrábět plně funkční kovové díly, které jsou srovnatelné s obráběnými či odlévanými díly. Proces 3D tisku vytváří vysoce odolné, ale přitom jemné komponenty, které nachází využití v mnoha odvětvích, včetně leteckého, automobilového, elektronického a medicíny. [3], [6]

Výhody: Dobrá pevnost výrobků, lze použít širokou škálu materiálů, bez použití podpor. Také software nabízí široké možnosti nastavení i během tisku.

Nevýhody: Zařízení náročné, jak energeticky, tak prostorově. Nízká kvalita povrchu. [3]



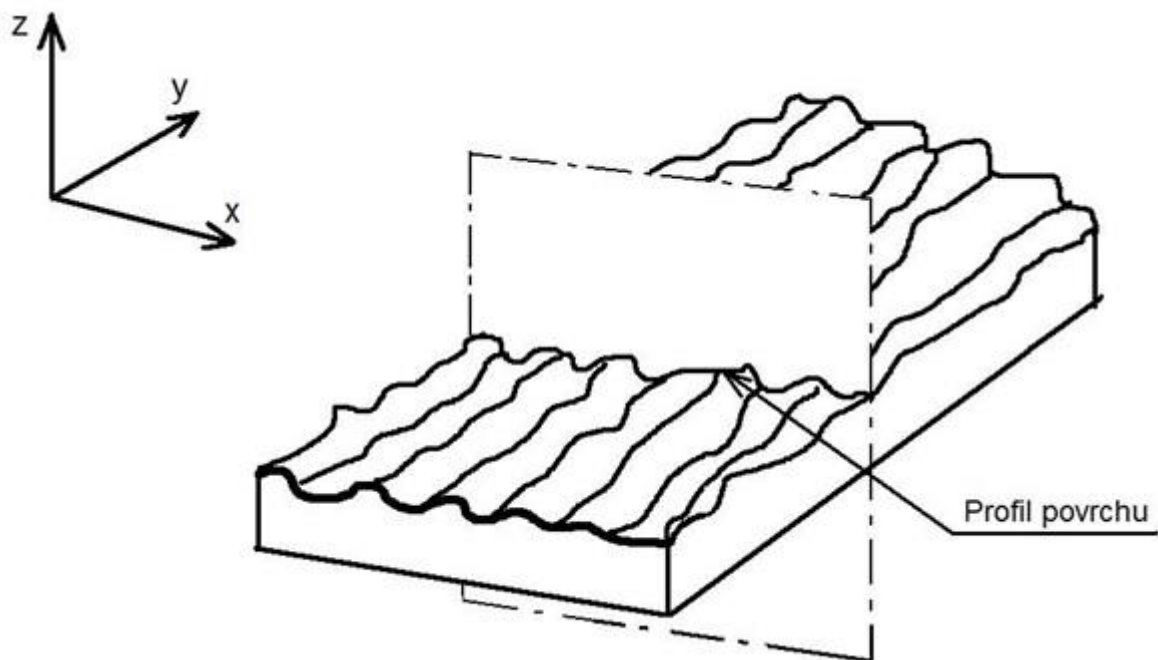
Obrázek 7 - Schéma SLA/SLM tiskárny [15]

2. HODNOCENÍ KVALITY POVRCHU

S rozvojem vědy a techniky a s uplatňováním jejich výsledků dochází ke zvyšování nároků na kvalitu povrchů výrobků nebo součástí. Kvalitu povrchu do značné míry ovlivňuje jak jejich životnost, tak spolehlivost a závisí na ni především přesnost chodu, hlučnost, odolnost proti korozi a opotřebení, ztráty třením či únavová pevnost těchto komponent. Reliéf vzniklý na povrchu obrobků je nejen nositelem jednotlivých informací, ale je také obrazem jeho tvorby danou technologií. Hodnocením parametrů drsnosti lze predikovat sled operací nutný k dosažení finální požadované kvality povrchu a také optimalizovat, či zdokonalit proces jeho tvorby. Hodnocením kvality a struktury povrchu se zabývají normy ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. [29], [30]

2.1. Drsnost povrchu

Struktura povrchu součásti se posuzuje redukcí do roviny řezu rovinou kolmou k povrchu. Tímto způsobem získáme profil povrchu, který je složen z profilu vlnitosti, profilu drsnost a kratších a delších složek vln, které jsou přítomny na povrchu. Filtrací lze jednotlivé složky od sebe separovat, a to použitím různých druhů filtrů o různých vlnových délkách tak, jak je znázorněno jejich přenosovou charakteristikou na obr. 9. [29], [30]



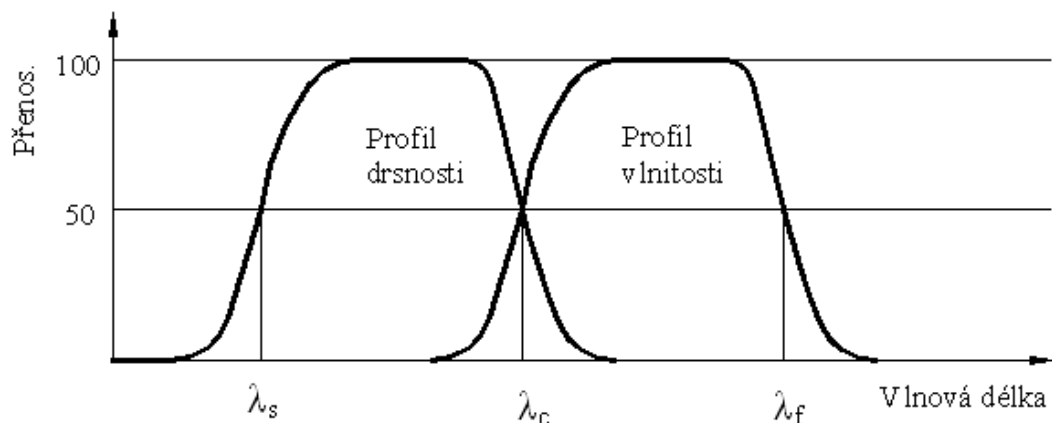
Obrázek 8 - Profil povrchu [37]

Používané filtry dělíme na:

λ_s filtr - tento filtr nám definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomných na povrchu.

λ_c filtr - filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti.

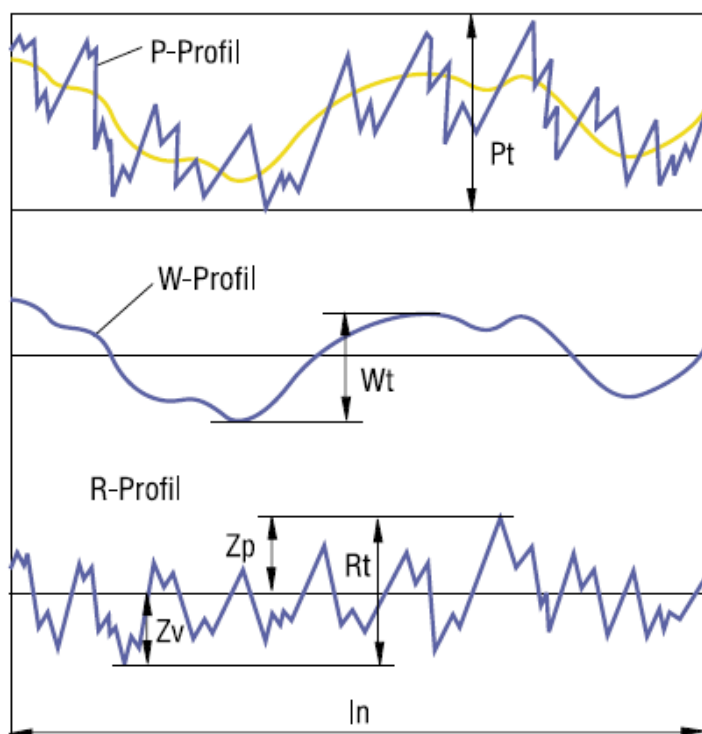
λ_f filtr – definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. [29], [30]



Obrázek 9 - Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [37]

Norma ČSN EN ISO 4287 rozlišuje 3 typy profilů povrchu:

- **základní profil** – P-profil (primary profile) - profil vzniklý aplikací filtru λ_s pro odfiltrování krátkovlnných složek;
- **profil drsnosti** – R-profil (roughness profile) - profil odvozený ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek užitím filtru λ_c ;
- **profil vlnitosti** – W-profil (waviness profile) - profil odvozený postupnou aplikací λ_f filtru pro odstranění dlouhovlnných složek a λ_c filtru pro odstranění krátkovlnných složek.



Obrázek 10 - Základní profil a odvozené profily vlnitosti a drsnosti [37]

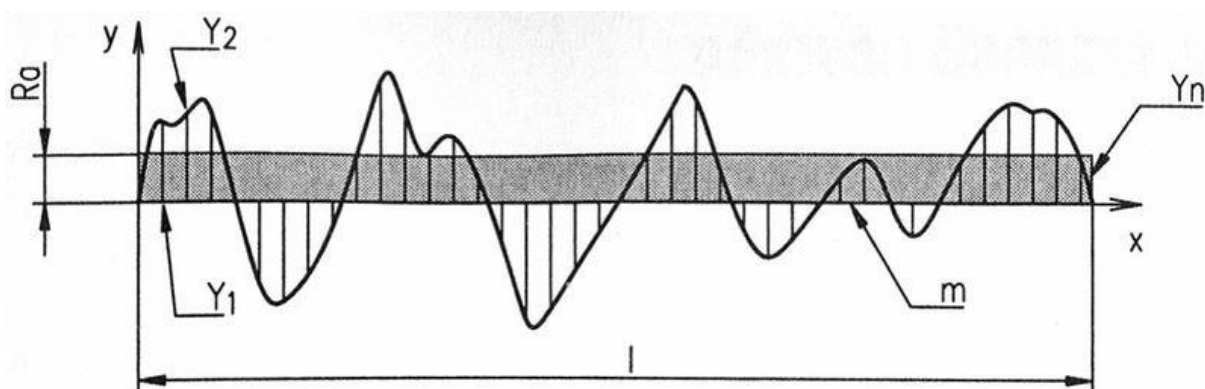
Velký význam pro objektivní měření a vyhodnocení jakosti povrchu má správný výběr základní a vyhodnocované délky. Důležité je, aby základní délka byla dostatečně velká, tak aby zahrnovala měřené parametry statisticky významné, ale současně ne tolik, aby zahrnovala nepodstatné detaily povrchu či vlivy vlnitosti nebo úchylek tvaru. Dle normy je vyhodnocovaná délka složena s jedné nebo více délek základních, přičemž je nejčastěji užíváno násobku pěti (viz. obr. 1.84). Do snímané dráhy měřicího přístroje se také zahrnuje délka rozběhu a délka doběhu, z nichž nejsou parametry povrchu vyhodnocovány. [29], [30]



Obrázek 11 - Základní a vyhodnocovaná délka, délka rozběhu a doběhu

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a

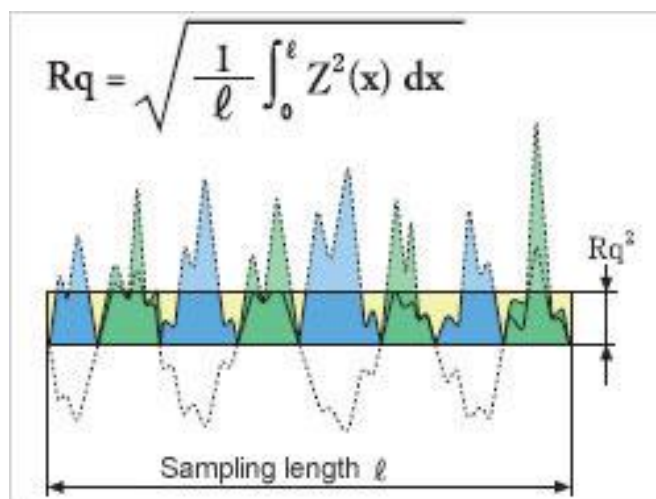
Je jednou z nejpoužívanějších charakteristik drsnosti povrchu ve strojírenské praxi. Jedná se o přednostní výškový parametr, jež je získáván jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ od střední čáry v rozsahu základní délky. Nevýhodou je nízká vypovídací schopnost parametru je, R_a nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu. [29], [30]



Obrázek 12 - Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu R_a [37]

Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q

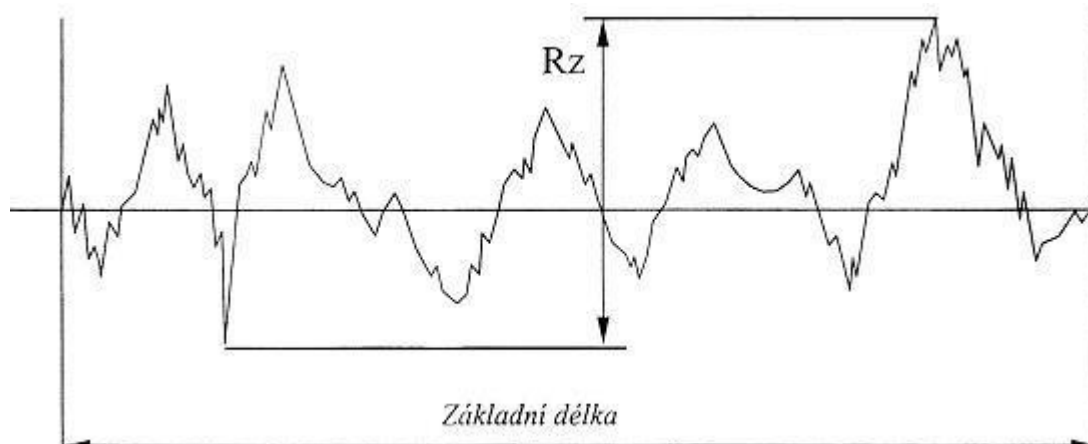
Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Hodnota R_q je citlivější na nežádoucí výstupky a prohlubně kontrolovaného povrchu, a proto zpravidla vykazuje vyšší hodnoty než R_a .



Obrázek 13 - Průměrná kvadratická úchylka profilu R_q

Největší výška profilu R_z

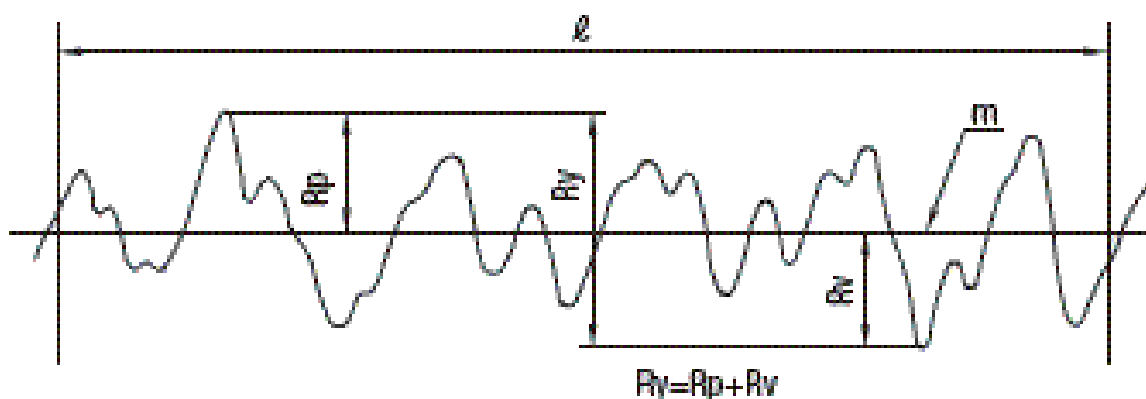
R_z je střední vzdálenost mezi pěti nejvyššími a pěti nejnižšími body zjištěného profilu od jeho střední čáry v délce měřeného úseku. Parametr R_z není tak citlivý na rušivé vlivy na povrchu, jako jsou prach, otřepy nebo rýhy. Definice tohoto parametru se může lišit podle roku výroby měřicího přístroje. Pro hodnověrnou analýzu měření je důležité použití R_z v souladu s jeho přesnou definicí. Význam parametru R_z se během let měnil. Uvedená definice je rovnocenná starším parametrům R_z (DIN) a R_{tm} (ISO). Parametr R_z (DIN) byl stanoven s použitím 2CR filtru. [29], [30]



Obrázek 14 – Největší výška profilu R_z

Největší výška nerovnosti profilu R_y

R_y je největší výška nerovnosti profilu.



Obrázek 15 - Největší výška nerovnosti profilu R_y

3. DOKONČOVACÍ OPERACE

Dokončovací operace, označují procesy, které se provádí na již zhotoveném 3D modelu, respektive na výrobku za účelem úpravy povrchu. Slouží k odstranění podpor, které jsou u většiny druhů těchto výrobků nutné, dále k aplikaci povrchových vrstev, povlaků, ale také ke zjemnění struktury povrchu výrobku. Nejčastější dokončovací operace jsou broušení, tryskání, omílání, různé druhy leštění ale také tavení povrchové vrstvy pomocí acetonu. Většina těchto operací je prováděna ručně, proto se výroba složitějších částí může prodloužit i o několik hodin [11].

3.1. Broušení

Ačkoli jsou 3D tiskárny navrženy tak, aby vyráběly vysoce kvalitní výrobky, většinou jsou na povrchu viditelné jednotlivé vrstvy, a to může zákazníky odradit od použití hlavně tam, kde je kladen důraz na estetiku. Procesem broušení lze tento problém odstranit. Brousit lze ručně pomocí smirkových papírů nebo pomocí pásových brusek. Broušení je levná, efektivní a osvědčená metoda k dosažení hladkého povrchu. Je to nejrozšířenější povrchová úprava pro tiskový plastový materiál. Nevýhodou tohoto způsobu je časová náročnost úpravy větších součástí (z čehož vyplývá použití pouze pro kusovou či malosériovou výrobu), omezená možnost broušení těžko dostupných míst a malých součástí. V kombinaci s užitím plničů lze zkrátit čas potřebný pro dokončení povrchu a zlepšit výsledný vzhled povrchu součástí. [12]

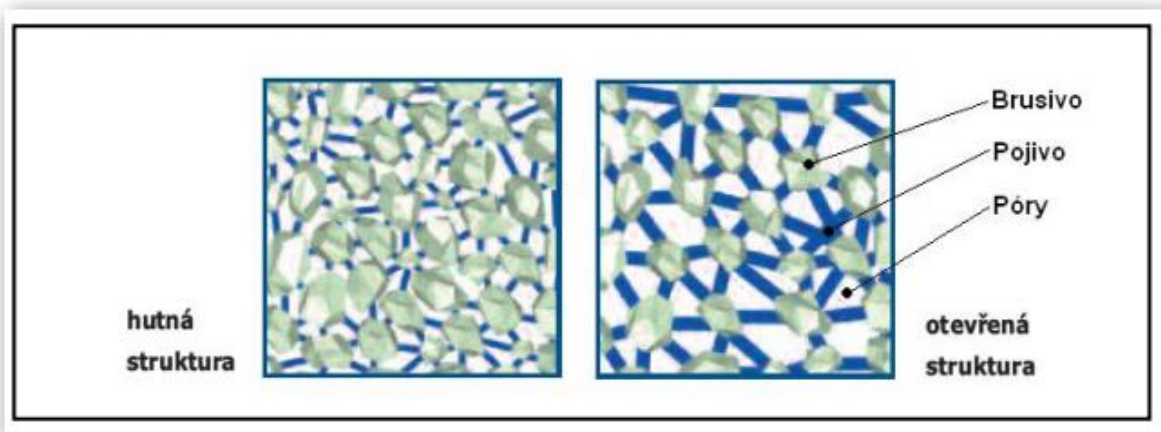


Obrázek 16 - Broušení po 3D tisku [12]

Brusné nástroje jsou složeny z brusiva, pojiva a pórů ve vhodném poměru. Jako brusné nástroje používáme:

- Brousící kotouče
- Brousící tělíska
- Brusné segmenty
- Brousící kameny
- Brusné pásy
- Brusná plátna a papíry
- Honovací a superfinašovací brusné kameny apod.

Dále je možné použít i volné brusivo zpravidla rozptýlené v brusné či leštící pastě, kde nástroj nahrazujeme, pryžovým či textilním rotačním kotoučem apod.



Obrázek 17 - Struktura brusného kotouče [17]

Brusný kotouč je charakterizován:

- Typem kotouče
- Druhem brousícího materiálu
- Zrnitostí
- Tvrdostí
- Strukturou
- Druhem pojiva
- Maximální řeznou rychlostí

Materiály používané k výrobě brusných zrn dělíme na přírodní a umělé:

Přírodní brusné materiály:

- Granát – G
- Smirek – S
- Pazourek – P

Umělé brusné materiály:

- Umělý korund Al_2O_3 – 99A, 98A, 96A, 85A
- Karbid křemíku SiC – 49C, 48C
- Karbid bóru B_4C - B
- Kubický nitrid bóru N_2B_3 - BN
- Diamant umělý i přírodní – D. [17]

3.2. Tryskání

Tryskání je široce používáno v průmyslu pro odhrotování, čištění a úpravu drsnosti povrchů. První patent byl vydán v Americe roku 1870. Byl vyvinut pro izotropní povrchovou úpravu povrchu u tvrdých obrobků. Prostřednictvím proudu médií jako je písek nebo křemen, která dopadaly na cílový povrch, byl vytvářen konečný produkt. V průběhu minulého století se tato technologie velmi vyvinula. Velké množství druhů a velikostí, materiálů a geometrie abraziv umožňuje vytvoření velmi přesných drsností povrchů. Oproti broušení je tryskání rychlejší variantou, lze tryskat i malé součásti. Jediným omezením pro velikost upravované součásti jsou vnitřní rozměry komory, ve které je tryskání prováděno. Výsledkem tryskání je hladký a matný povrch. [12]



Obrázek 18 - Tryskání tištěné součásti broky [12]

3.2.1. Druhy abraziv

Abraziva jsou obvykle suché, sypké materiály různého chemického složení a fyzikálních vlastností (tvrdość, ostrość). A v případě samostatných volných zrn plní funkci jako nedílná součást náplně tryskacích zařízení, kde významnou roli abraziv a jejich použití

má i jejich čistota, tudíž mají nezastupitelný vliv na výkon a účinnost, respektive kvalitu a ekonomiku, tedy efektivitu tryskání/pískování pro různé účely zpracování povrchů dílů z různých materiálů (čištění, odstranění starých povlaků a rzí, sjednocení povrchu, zbavení okují a otřepů po strojním opracování, vyhlazení svárů, zdrsnění nebo leštění, zdokonalení vzhledu, zvýšení kvality výrobků, aj.).

Organická abraziva

Abraziva organická, jsou obvykle sypké tryskací materiály, kulatého nebo ostrohranného typu, organického původu, získávají přírodně (skořápky, kukuřičný granulát) nebo synteticky (plast). Nejčastěji používaná pro šetrné tryskání drobných dílů, jemné mechaniky, optiky atd.



Obrázek 19 - Organická abraziva [36]

Minerální abraziva

Abraziva minerální, jsou obvykle sypké, nekontaminující tryskací materiály, oválného nebo ostrohranného typu, chemický prvek minerálního, nerostného původu, získávají přírodně (např. granát) nebo synteticky, výrobou (např. korund Al_2O_3). Nejčastěji používaná pro běžné tryskání drobných dílů, ale i k pískování různých větších a těžších dílů jako jsou ocelové profily a konstrukce. Pro použití jak v mobilních, tak v kabinových i bubnových tryskačích.



Obrázek 20 - Minerální abraziva [36]

Kovová abraziva

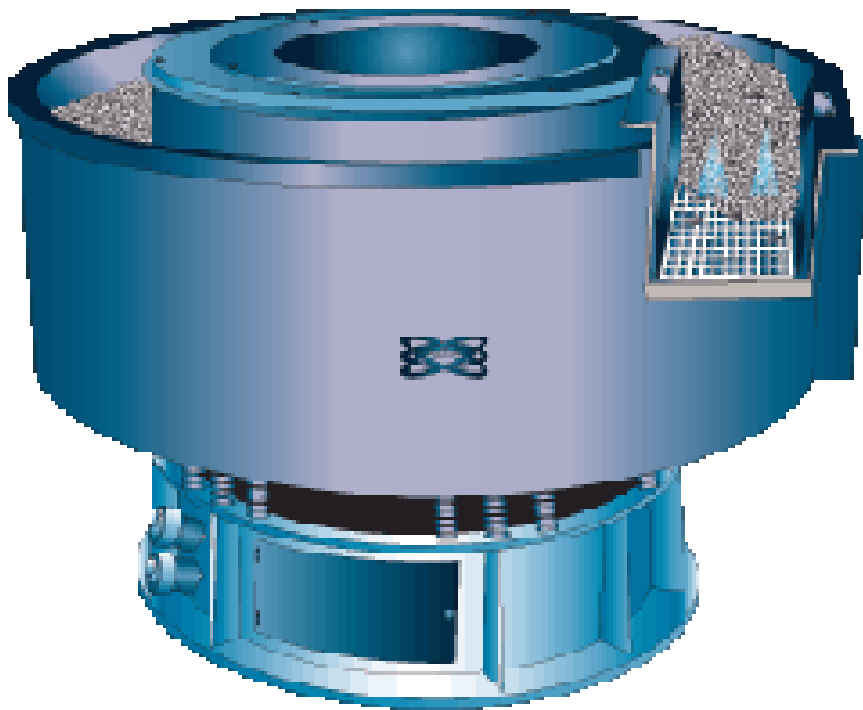
Jsou to sypké tryskací materiály, kulatého nebo ostrohranného typu, kovového původu, tedy oxidující Fe vhodné pro prosté tryskání hutních materiálů a neoxidující Cr, CrNi vhodné pro nekontaminující tryskání. Získávají se účelovou výrobou nebo jako druhotný produkt nebo recyklát. Nejčastěji se používají pro vysoce efektivní tryskání menších dílů ale také k tryskání různých větších a těžších dílů jako jsou ocelové profily a svařence. Použití je možné v mobilních, tak v kabinových a průběžných tryskačích. [18]



Obrázek 21 - Kovová abraziva [36]

3.3. Omílání

Základem omílání je vzájemný pohyb a z toho vyplývající tření omílacích tělísek a součástí. Omílacích tělísek je mnoho druhů, ať už přírodních či umělých, které se liší materiálem, tvarem a účinností. Tato dokončovací operace se používá pro větší množství menších součástí, u kterých je potřeba zbavit se nerovností a dosáhnout požadované drsnosti povrchu ale také pro dosažení určitého designu. Omílání se používá téměř ve všech odvětvích a je vhodné pro širokou škálu materiálů vytištěných na 3D tiskárně. Nahrazuje drahou ruční práci (broušení, leštění) a to mnohdy i v lepší technické kvalitě. [13]



Obrázek 22 – Vibrační omílací stroj [41]

3.3.1. Druhy abrazivních tělísek pro omílání

Keramická omílací tělíška

Abrazivní minerální zrna jsou spojena keramickou vazbou. Vyšší měrná hmotnost keramiky způsobuje větší tlak masy tělísek při omílacím procesu. Typické pro keramická tělíška jsou schopnost agresivního odjehlování a světlý, lesklý povrch obrobku po omílání.

Plastová tělíska

V plastových omílacích těliscích jsou minerální zrna spojena polyesterovou pryskyřicí. Charakteristickým rysem je jejich barevnost. Vyznačují se vysokým brusným účinkem a tvorbou jemné struktury povrchu zejména u obrobků z neželezných kovů. Nejčastěji se používá se pro odstranění povrchové vrstvy nebo povlaku.

Speciální média

Zatímco pro tlakové odjehlování nebo kuličkování jsou používány nerezové kuličky o průměru 2,5 až 5,0 mm, satelity nebo válečky, jemné otřepy u tvarově velmi složitých obrobků (i uvnitř) lze odstranit skleněnými kuličkami o průměru 2 až 10 mm. Pro sušení obrobků ve vibračních suškách se používá speciální granulát vyráběný drcením kukuřičných stvolů. Jde prakticky o čistou celulózu s vynikajícími absorpčními i adsorpčními účinky. Kromě vysušení poskytuje tento granulát i dodatečný čistící a leštící efekt. Ploché tenké obrobky, mající tendenci se při mokřém omílacím procesu slepovat, jsou spolehlivě oddělovány speciálními plastovými mikrokuličkami. [19]



Obrázek 23 - Keramická omílací tělíska (vlevo) a plastová omílací tělíska (vpravo) [19]

3.4. Acetonové napařování

Acetonové napařování je metoda dokončovací operace, kdy dochází k vyhlazení výrobku pomocí páry acetonu, která rozpustí materiál a následným stékáním se povrch vyhladí. Tato dokončovací technologie je vhodná pouze pro plastové výrobky. Samotné napařování se provádí v komoře, kam je přiváděna acetonová pára. Povrchové vrstvy se začnou rozpouštět a následně stékat vlivem gravitační síly a vytvářet hladký povrch. Po vyjmutí z komory se začíná aceton odpařovat a povrch tvrdnout. Po cca 3 hodinách je možná manipulace s výrobkem, nicméně proces odpařování může trvat až 2 dny. Takto chemicky vyhlazená součást má také vyšší pevnost v ohybu, tahu a jen velmi malé rozměrové

změny ve srovnání s mechanickou úpravou povrchu. Po acetonovém napařování je povrch extrémně hladký. Rozpustnost v acetonu je využíváno k opravám poškozených výrobků a také ke spojení dílců, které nemohly být kvůli svým rozměrům vytisknuty najednou. [14]



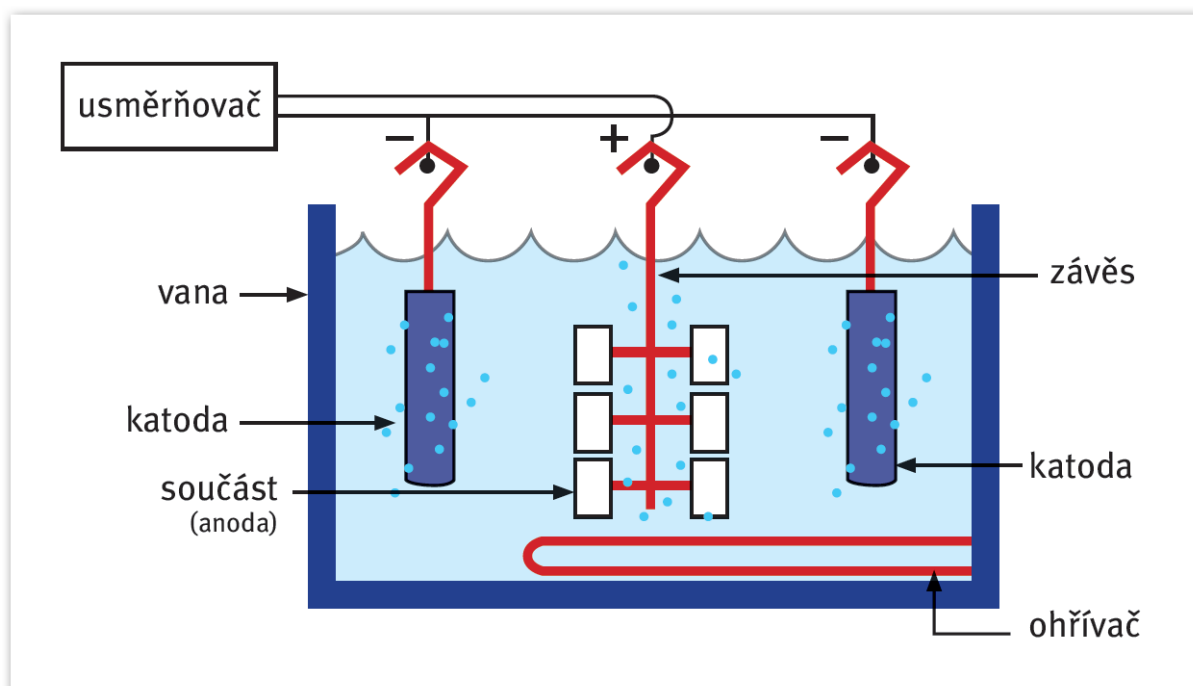
Obrázek 24 - Výrobek před (vlevo) a po parním vyhlazováním (vpravo)[14]

3.5. Elektrolytické leštění

Elektrolytické leštění je proces odstraňování kovu ze součásti pomocí průchodu elektrického proudu. Součást je ponořena do speciálně navrženého elektrolytu. Tento proces je v podstatě opakem galvanického pokovení. Při pokovování dochází k přechodu kovových iontů z roztoku na součást a vytváří na ní povlak. Při elektrolytickém leštění se kov na anodě rozpouští a přechází do roztoku ocelí v mědi. Tyto reakce probíhají takto obdobně u všech materiálů postupně (korozivzdorných ocelí železa, chromu i niklu) a přitom se povrch za řízených podmínek vyhlazuje. Výsledkem je čistý a mikroskopicky hladký povrch. Naproti tomu i velmi jemně mechanicky leštěné povrchy vykazují, nerovnosti a orientovaná poškození nebo efekty. [20]

Střídavý proud se převádí na nízkonapěťový stejnosměrný proud. Vana pro chemickou lázeň bývá většinou plastová. Součást je zavěšena na závěsy a připojena na kladnou anodu. Katodu (-) tvoří obvykle korozivzdorná ocel. Jak katoda, tak i anoda jsou ponořeny

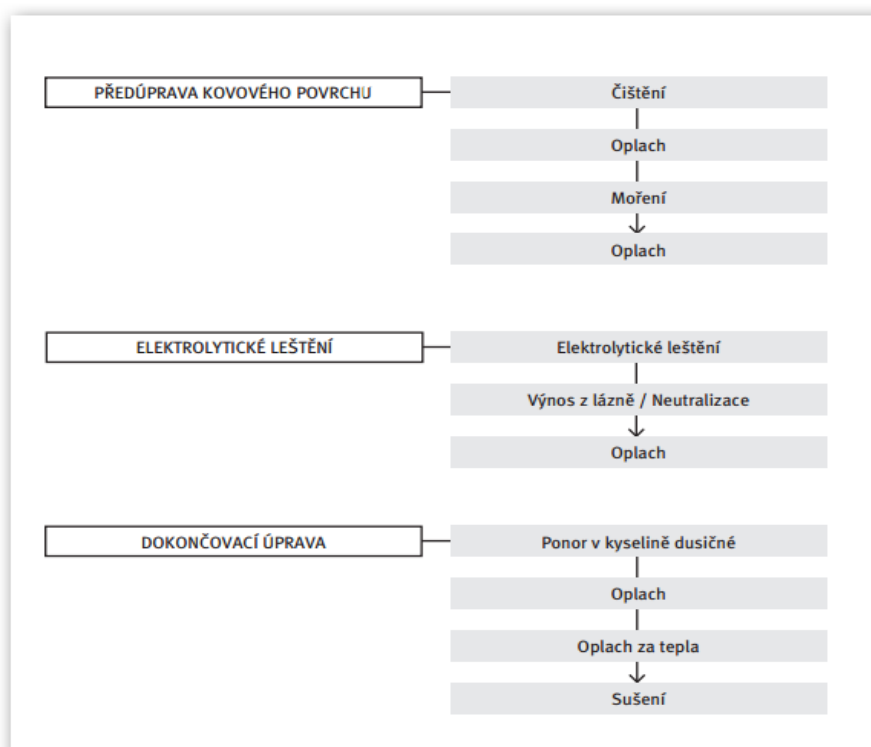
do elektrolytu a tvoří kompletní elektrický obvod. Množství kovu odstraněného ze součástí je přímo úměrné intenzitě proudu a době trvání procesu. V průběhu elektrolytické leštění, se v místech otřepů a dalších výstupku na povrchu dosahuje velmi vysoké proudové hustoty a díky tomu se rychle rozpustí. Je třeba správně nastavit pracovní podmínky procesu, aby se dalo řídit množství odebíraného kovu v důsledku zachování rozměrové tolerance. [21]



Obrázek 25 - Schéma procesu elektrolytického leštění [16]

Pro získání vysoce kvalitní povrchové úpravy je třeba, aby proces elektrochemického leštění probíhal prostřednictvím tří hlavních operací:

- **Předúprava povrchu:** Odstranění olejů, maziv, oxidů a jiných nečistot, které by bránily rovnoměrnému elektrolytickému leštění.
- **Elektrolytické leštění:** K dosažení vyhlazeného povrchu, zvýšení lesku a odstranění otřepů
- **Dokončovací operace:** K odstranění zbytků elektrolytu a vedlejších produktů z elektrolytické reakce a vysušení kovu. [22]



Obrázek 26 - Schéma pracovního postupu při elektrolytickém leštění [16]

Elektrolytické leštění se uplatňuje všude tam, kde se vyžadují povrchy, o vysoké kvalitě. Jedná se o farmaceutický, chemický, energetický a mnohé další. Jednou z největších oblastí využívání této dokončovací úpravy je právě lékařský průmysl. Jedná se o veškeré lékařské a chirurgické vybavení, svorky, pily, skalpely, kostní a kloubní implantáty a protézy. Hlavní výhodou je pak snadné čištění a udržování nízké míry kontaminace.

Další oblastí využití je při výrobě polovodičů a léčiv. Tato čistá pracoviště musí být vybaveny povrchy, na kterých se neulpívají a nezadržují nečistoty. Pro kovovou výbavu čistého pracoviště jako jsou stoly, nosné kozole, dopravníkové soustavy, rovody plynů, vnitřní povrchy mixérů atd., je elektrolytické leštění nejlepší volba. [21]



Obrázek 27 - Implantáty po elektrolytickém leštění (vlevo) a reaktor na výrobu léčiv (vpravo) [16]

3.6. Lepení kovů

Lepení kovů je proces, při kterém se dochází k trvalému spojení stejných nebo různých druhů materiálů prostřednictvím lepidel. Lepidlo na kovy je látka schopná vytvořit pevné a trvalé spojení mezi kovovými materiály. Lepení kovů má v porovnání s jinými technologiemi spojování materiálů, jako je například svařování nebo pájení spojování materiálů nesporné výhody. Velkou výhodou je, že lepení tepelně neovlivňuje spojované součásti. Dalšími výhodami jsou vysoká pevnost, těsnost spojů, odolnost vůči korozi, možnost spojování různých kovových materiálů navzájem, možnost spojování velmi tenkých kovových materiálů, výroba lepených spojů s velmi dobrou tepelnou, zvukovou, elektrickou izolací, ale také s možnou elektrickou vodivostí. Lepené spoje se často používají při spojování slitin lehkých kovů a lepení neželezných kovů. Lepené spoje ocelových materiálů mají, v porovnání se svarovými spoji, v některých případech vyšší pevnost. Velmi důležitým faktorem lepených spojů je jejich vysoká bezpečnost. [23]



Obrázek 28 - Lepená konstrukce

3.6.1. Technologie lepení kovů

Na základě teorie lepení můžeme určit tyto základní podmínky na tvorbu vyžadovaného lepeného spoje:

- **správná volba lepeného materiálu a lepidla**
- **správný návrh konstrukce spoje**
- **vhodná povrchová úprava materiálů**
- **dodržování předepsaného postupu při lepení**
- **utvoření fyzikálně-chemických a jiných podmínek vzniku pevných vazeb.**

Při volbě materiálů na lepení se přihlíží na jejich chemickou povahu (chemické složení), polaritu, mechanické, povrchové, fyzikální a chemicko-fyzikální vlastnosti. V případě lepidel jsou to: chemická povaha, viskozita lepidla, povrchové napětí, bod vzplanutí, způsob vytvrzování, tepelná roztažnost a mechanické vlastnosti. Pracovní postup při lepení se skládá z přípravy povrchu lepených materiálů, přípravy lepidla, nanášení lepidla, montáže spoje a utvoření pevného spoje (např. vytvrzování). Kvalitu lepeného spoje můžeme ovlivnit: způsobem nanášení lepidla, tloušťkou nanesené vrstvy, podmínkami při vytvrzování (tlak, teplota, čas), použitím ultrazvuku, tepelného ovlivnění lepidla různými zdroji ohřevu (např. infračervený anebo laserový paprsek), přípravou povrchu materiálu a úpravou lepidla na jeho použití. [24]

3.6.2. Příprava materiálu na lepení

Příprava materiálů na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění, odmašťování a slícování lepených dílců. Základní funkcí přípravy povrchu je snaha dosáhnout co největší adheze. Asi nejdůležitější operací při lepení je povrchová úprava lepeného spoje. Navrhuje se dle druhu a stavu lepeného materiálu, druhu použitého lepidla, provozních požadavků a životnosti spoje, únosnosti výrobních nákladů apod. Na čištění a odmašťování se používají: alkalická odmašťovadla, tamponování rozpouštědly a odmašťování v párách rozpouštědla. Vhodná odmašťovadla jsou např. IPA (isopropylalkohol), technický aceton, (MEK - metyletylketon), perchloretylen. Nevhodná jsou laková rozpouštědla a benzín. Poměrně často se používá moření materiálů v různých kyselinách (hliník a jeho slitiny). V případě moření se obvykle dosahuje vyšší pevnost spojů jako při mechanické úpravě povrchu. Z hlediska kvality lepených spojů je důležitá také drsnost povrchu lepených ploch. [24], [28]

3.6.3. Hlavní zásady navrhování lepených kovových konstrukcí

Lepenou konstrukci je nutné rozdělit na části co nejméně složité a vhodné k lepení. Při lepení je třeba přísně dodržet technologický předpis a vyhnout se dvojitému lepení, které je při montáži vystavené odlupujícím silám. Na lepení se nehodí dílce s velikým a složitým zakřivením. Nejběžnější jsou jednoduše přeplátované spoje. Lepší výsledky z hlediska pevnosti se dosahují u tenčích plechů. Spoje třeba situovat tak, aby byly namáhány ve smyku. Lepidlo si konstruktér vybírá dle požadované pevnosti spojů, podle technologie zpracování a samozřejmě podle ceny. [27]

3.6.4. Lepidla vhodná k lepení kovů

Při výběru lepidla pro lepení kovů vycházíme z toho, že jde o zcela nepropustné materiály. Proto taková lepidla, tmely a metody lepení, které zaručují, že se v průběhu lepení neuvolní těkavé látky, které by snižovali kohezi a adhezi filmu lepidla. Z tohoto důvodu nelze použít roztoková a disperzní lepidla. Pro běžné lepení kovů se používají lepidla reaktivní. Nejčastěji se používají epoxidová reaktivní lepidla, která se velmi dobře hodí jak pro havarijní opravy, renovační technologie, tak pro konstruování.

Epoxidová lepidla se vyrábí jako jednosložková, dvousložková a vícesložková. V běžné praxi se používají zejména epoxidová lepidla dvousložková neplněná vhodná pro konstrukční spoje a epoxidová lepidla plněná práškovými plnivými vhodná zejména pro havarijní opravy a renovační technologie. Lepidla plněná práškovými plnivými (kovová, minerální plniva) se vyrábějí v různých viskozitách od tekutých typů, která se používají pro lepicí svařování za studena (např. oprava trhlin) až po tzv. epoxidovou plastelínu, která slouží pro opravy nádrží, chladičů, větších proražených otvorů aj. Pro lepení a opravy malých ploch se používají epoxidová lepidla rychlá, která dosahují manipulační pevnosti po 2 až 10 minutách, pro konstrukční spoje a renovační technologie se používají epoxidová lepidla s dobou zpracovatelnosti 30 minut až 3 hodiny a manipulační pevnosti je dosaženo po 5 až 6 hodinách, funkční pevnosti je obvykle dosaženo po 24 hodinách. Teplotní odolnost epoxidových lepidel neplněných je od -50°C až do $+100^{\circ}\text{C}$, plněných od -50°C až do $+150^{\circ}\text{C}$. Při výběru epoxidového lepidla je pro nás důležitá pevnost (smyková pevnost v tahu). Pevnost lepidel pro domácí použití bývá kolem 13-15 MPa. Lepidla s pevností nad 20 MPa jsou označována jako vysokopevnostní. S těmito hodnotami lze počítat u oceli

a chemicky upravených hliníkových slitin. U barevných kovů a jejich slitinách jsou pevnosti výrazně nižší.

Další skupinou lepidel pro lepení kovů jsou dvousložková reaktivní polyuretanová lepidla. Jsou zpracovatelná i za nízkých teplot, lepené spoje jsou pevné, pružné a odolné dynamickému namáhání. Smyková pevnost v tahu je cca 16 MPa a teplotní odolnost do 100°C. Moderní lepidla pro konstrukční lepení kovů jsou dvousložková lepidla na bázi methakrylátových esterů, která vykazují vysokou smykovou pevnost v tahu až 24 MPa, vysokou rázovou pevnost, tepelnou (od -50°C až do +150°C) a chemickou odolnost. Tyto lepidla vykazují excelentní pevnosti při lepení oceli, chromu a hliníku. K těsnění a stabilizaci polohy rozebíratelných dílců slouží anaerobní akrylátová lepidla. Slouží výhradně k lepení kovů. Vytvrzují po zamezení přístupu vzduchu do spoje za katalytického působení kovových iontů. Hlavní oblastí použití anaerobních lepidel je zajišťování šroubových spojů proti vibracím a korozi, těsnění závitových spojů, upevňování ložisek na hřídele i do otvorů, těsnění dělicích rovin aj. Akrylátová anaerobní lepidla se dodávají v několika pevnostních kategoriích od 5 do 40 MPa a v několika viskózních třídách, od kapilárních typů s maximální šířkou spáry 0,08mm do tixotropních pastovitých typů s maximální šířkou spáry 0,5mm.

Pro plošné a elastické montážní lepení kovů se v současnosti používají lepidla na bázi MS – polymerů, která patří mezi ty nejmodernější a mají široké uplatnění zejména v automobilovém, leteckém, lodním průmyslu, strojírenství apod. Jsou vhodná nejenom pro lepení kovů navzájem, ale také pro kombinační lepení zejména s plasty, pěnovým polystyrenem, glazovanými materiály, sklem, zrcadly, keramikou apod. MS-polymery vykazují vysokou pevnost a elasticitu, nepotřebují podkladový nátěr, mají výbornou tepelnou a chemickou odolnost. [26], [27]

3.7. Technologie tekutého kovu

Tato technologie se také označuje jako technologie stříkaného chromu. Spočívá v chemické reakci, při které se vysráží na předem připraveném povrchu vrstva stříbra, která utvoří zrcadlový efekt. Tato vrstva je poté překryta jednou nebo více vrstvami tvrdého laku. Většinou se používá třívrstvý nástřik - 1. základná vrstva, která vytváří hladký povrch. 2. mezivrstva - víceúrovňový proces (nanesení aktivátoru, oplach deionizovanou vodou, chromový nástřik, znovu oplach deionizovanou vodou a následné sušení) 3. vrchní ochranný nástřik. Mezi výhody patří vysoká životnost, šetrnost k životnímu prostředí, nižší cena oproti galvanickému chromování. Tato technologie je využívána k aplikaci na kov, plasty, dřevo, sklo nebo keramiku.



Obrázek 29 - Automobilová maska stříkaná chromem [40]

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Ačkoli jsou 3D tiskárny navrženy tak, aby vyráběly vysoce kvalitní výrobky, většinou jsou na povrchu viditelné jednotlivé vrstvy, to je dáno technologickým postupem při výrobě součástí. Pro dosažení lepší drsnosti a estetického vzhledu je nutné provést dokončovací operace. V této části práce proběhne seznámení s experimentem, při kterém se vyhodnocovala kvalita povrchu po dokončovacích operacích. [12]

4.1 Použité vzorky

Vzorky byly vytisknuty na tiskárně RENISHAW AM250. Tato tiskárna umožňuje flexibilní použití materiálu, díky externímu práškovému zásobníku s ventilem je možná změna materiálu i při běžícím procesu. Nevyužitý materiál může být přefiltrován a znovu vrácen do procesu pomocí násypky, zatímco je systém v provozu. Tisková plocha je 250 mm x 250 mm x 300 mm a tloušťka tisknuté vrstvy se pohybuje mezi 20 – 100 mikrony. [33]



Obrázek 30 - Tiskárna RENISHAW AM250 [33]

Konkrétní vzorek (Obr. 32) je součást spojující kolo s rámem jízdního kola. Jako materiál byla použita korozivzdorná ocel 316L. Ze vzorku byly odstraněny technologické podpěry a následně broušením odstraněny zbytky těchto podpěr. Vzorek po odstranění podpěr



Obrázek 31 - Vzorek s technologickými podpěrami



Obrázek 32 - Vzorek po odstranění podpěr

4.2 Měření drsnosti vzorků

Měření probíhalo na přístroji Mitutoyo sj201p (Obrázek 33). Je to přenosné zařízení, které slouží k měření drsnosti. Přístroj se skládá z procesorové jednotky s digitálním displejem, který zobrazuje naměřené hodnoty a z měřicí hlavy, která obsahuje sklopný diamantový hrot (průměr 5 μm). Přístroj pracuje pod zatížením 4 mN. Měřené parametry: Ra, Rq, Ry, Rz. [34]



Obrázek 33 – Měřicí přístroj Mitutoyo sj201p

Měření probíhalo ve dvou směrech (po směru vrstev 1, 3 a proti směru vrstev tisku 2, 4) z obou stran vzorku, jak ukazuje obrázek (Obr.34).



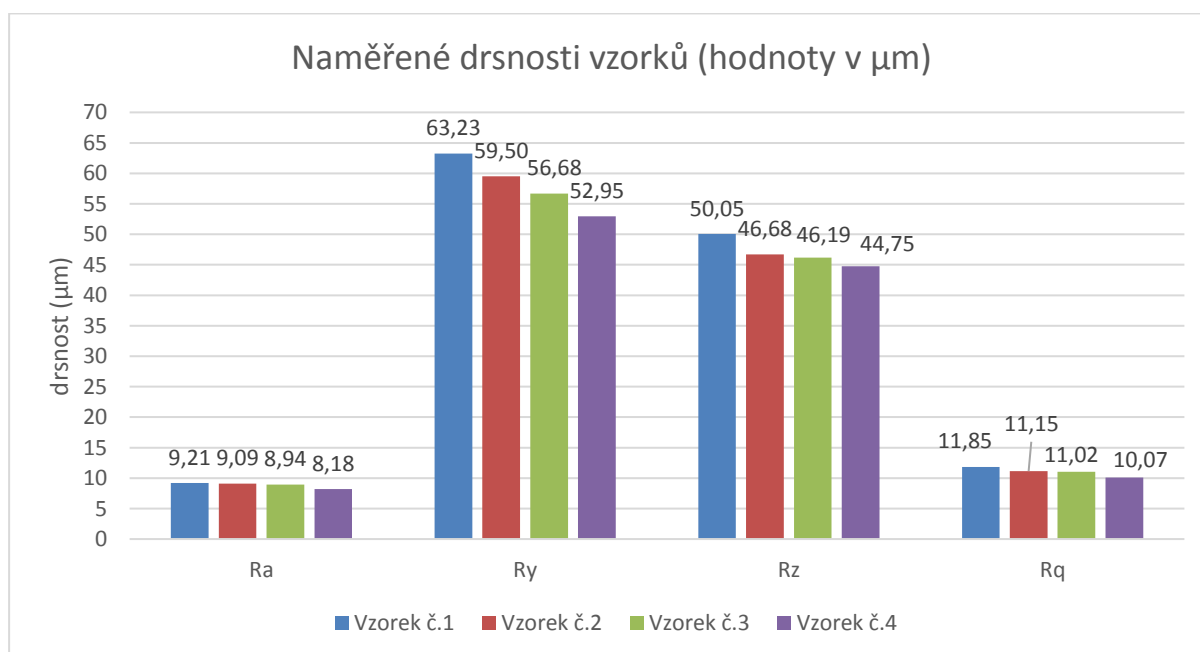
Obrázek 34 – Směry měření drsnosti

4.3 Naměřené hodnoty

Nejprve byly naměřeny výchozí hodnoty drsnosti vzorků. K dispozici byly 4 vzorky.

Tabulka 2 - Přehled výchozích drsností

Průměrné hodnoty v [μm]	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3	Vzorek č.4
Ra	9,21	9,09	8,94	8,18
Ry	63,23	59,50	56,68	52,95
Rz	50,05	46,68	46,19	44,75
Rq	11,85	11,15	11,02	10,07



Obrázek 35 - Graf drsností jednotlivých vzorků

Následně byl vzorek č.1 tryskán, 2 minuty z každé strany součásti a vzorek č.3 celkem 10 minut z každé strany, kdy po 5ti minutách proběhlo vždy měření drsnosti. Byla použita tryskačí komora Barth UNI 322 (Obr. 36) a jako tryskačí médium balotina B7 (zrnitost 600 - 800 μm).



Obrázek 36 – Tryskač Barth UNI 322

Univerzální tryskáč Barth UNI 322 je určena pro všechny tryskáčské média do velikosti částic cca 250 μ . Funguje na principu sací trysky, má stabilní svařované ocelové pouzdro. Ovládá se pneumatickým nožním spínačem. Regulátor tlaku a manometr nainstalován v připojení zařízení k odsávání.

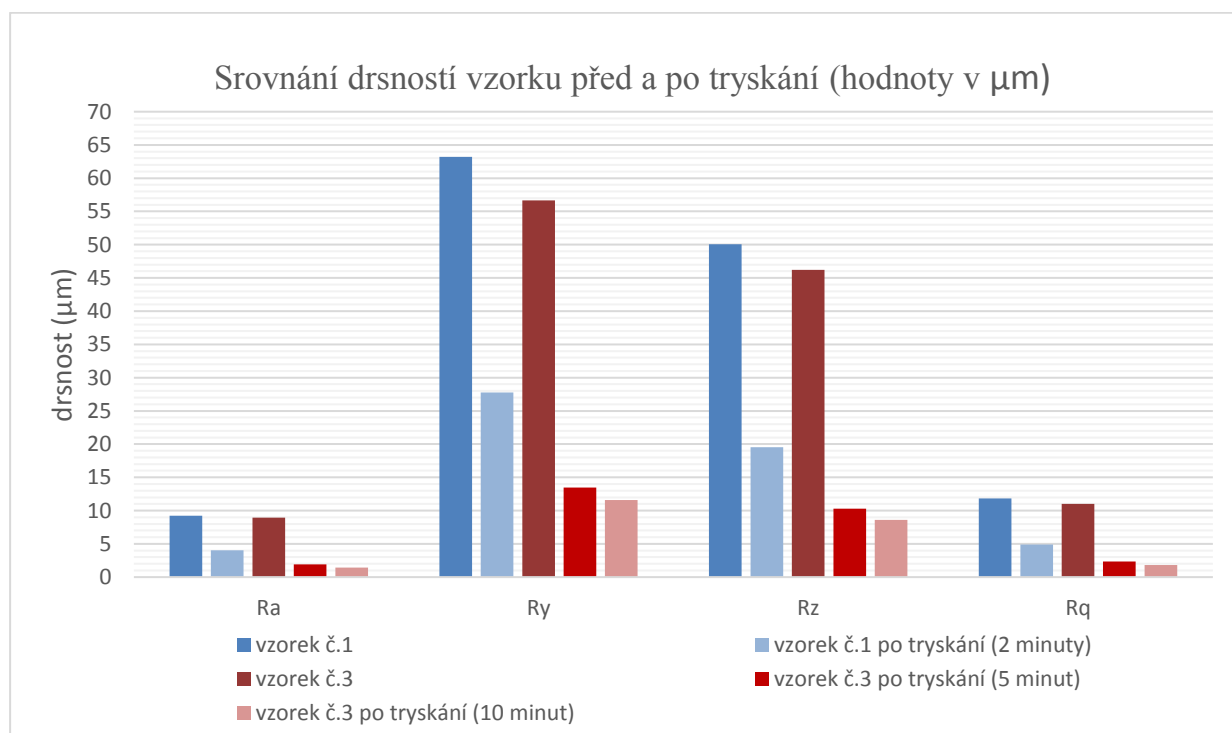
Technické parametry:

- Šířka: 330 mm
- Hloubka: 410 mm
- Výška: 570 mm
- Váha: 15 kg
- Pracovní tlak 0,5 - 10 bar (1 bar = 100 000 pascalů)
- Spotřeba vzduchu: 270 litrů na 10 bar

Tabulka 3 - Porovnání drsností před a po tryskání

Průměrné hodnoty v [μm]	Ra	Ry	Rz	Rq
vzorek č. 1	9,209167	63,23	50,05333	11,84917
vzorek č. 1 po tryskání 2 minuty	4,02	27,76833	19,55	4,898333
vzorek č.3	8,94	56,68	46,19	11,02
vzorek č.3 po tryskání 5 minut	1,92	13,48	10,28	2,37
vzorek č.3 po tryskání 10 minut	1,44	11,57	8,62	1,80

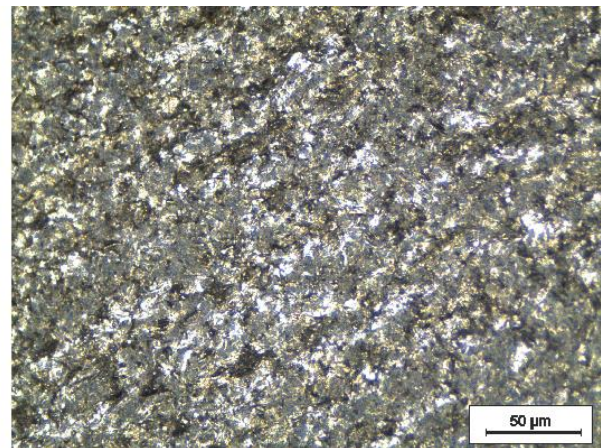
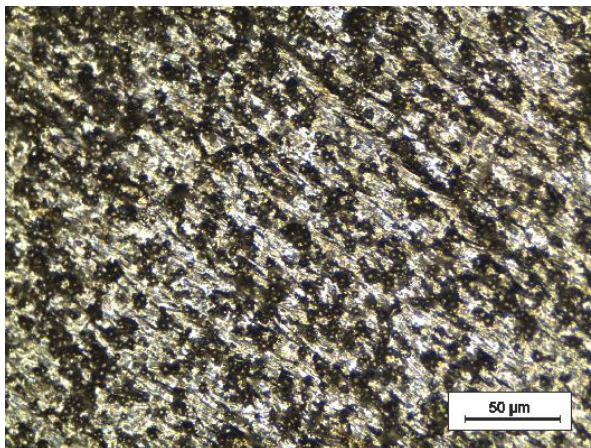
Z tabulky (Tabulka 3) a grafu (Obr.37) je patrné, že se po otryskání součásti výrazně zlepšila drsnost povrchu a jak je vidět na (Obr. 38) zlepšil se také estetický vzhled povrchu.



Obrázek 37 - Srovnání drsností vzorku před a po tryskání



Obrázek 38 - Výchozí vzorek č.1 (vlevo) a vzorek č.1 po tryskání (vpravo)



Obrázek 39 - Struktura povrchu vzorku č.1 před (vlevo) a po tryskání (vpravo)

Další prováděnou dokončovací operací bylo omílání. Vzorek č.1 a vzorek č.2 byly omílány po dobu dvou hodin ve vibračním omílacím stroji RÖSLER (Obr.40) za použití keramických brousících tělísek a přípravku pro omílání PRAGOPOL 809 a následně byla změřena drsnost těchto vzorků (Tabulka 4).

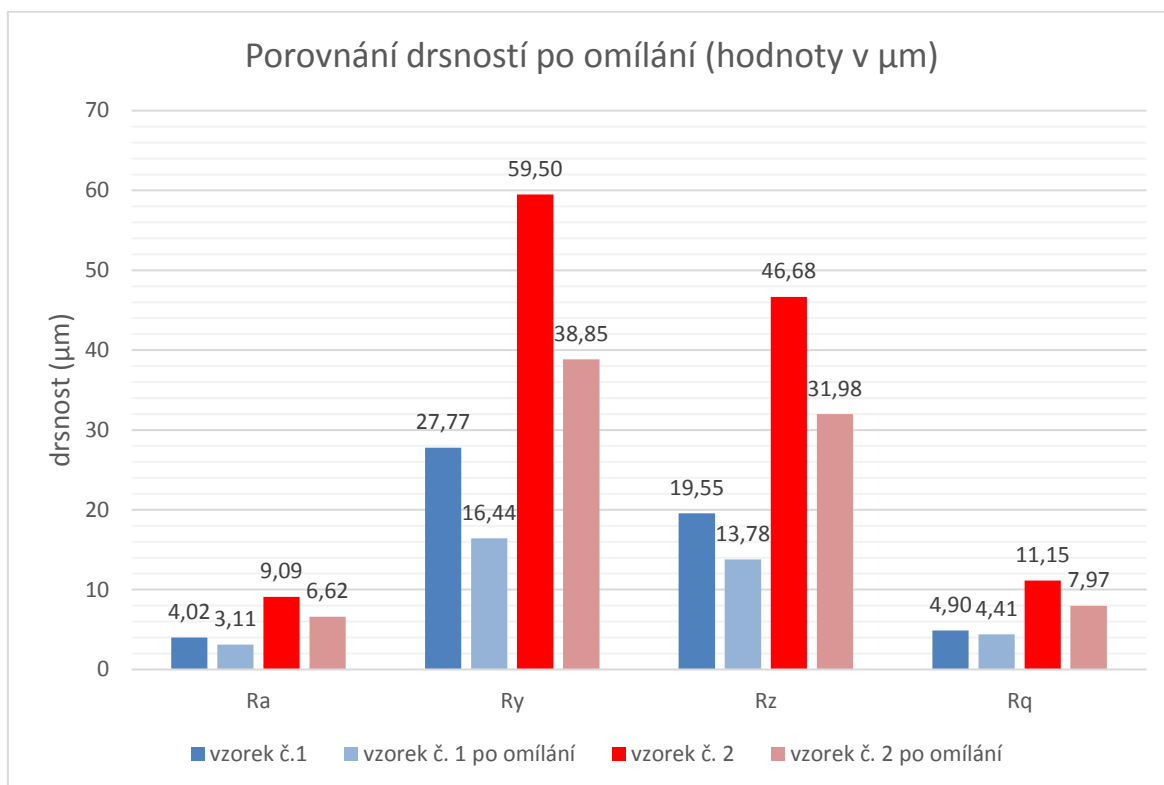
PRAGOPOL 809 je kapalný koncentrát vhodný pro broušení a odhroťování zboží z austenitických nerezavějících ocelí, mědi a jejích slitin za použití keramických omílacích tělísek. [42]



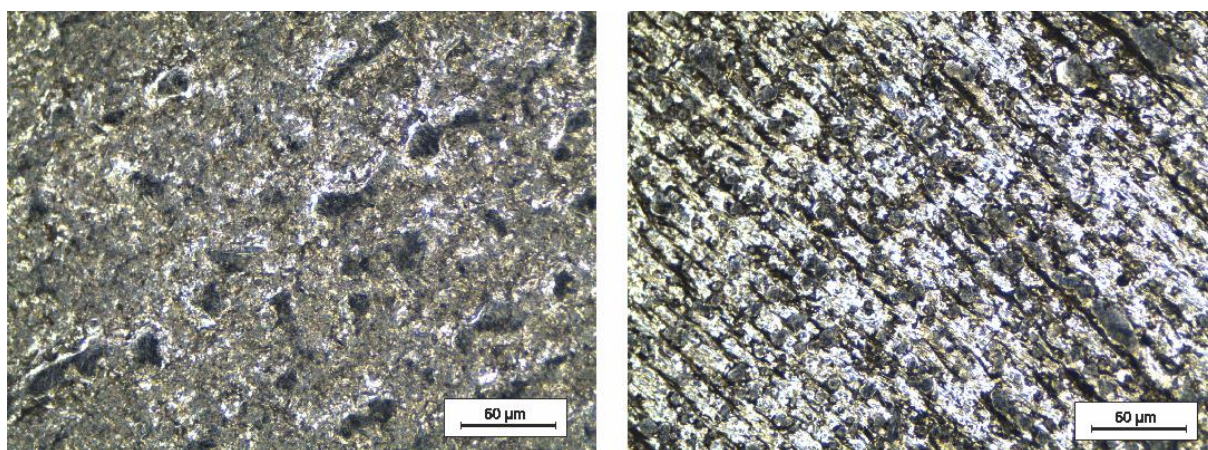
Obrázek 40 – Omílací stroj RÖSLER

Tabulka 4 - Porovnání drsností před a po omílání

Průměrné hodnoty v [μm]	Ra	Ry	Rz	Rq
vzorek č. 1 po tryskání	4,02	27,77	19,55	4,90
vzorek č.1 po tryskání a omílání	3,11	16,44	13,78	4,41
vzorek č. 2	9,09	59,50	46,68	11,15
vzorek č.2 po omílání	6,62	38,85	31,98	7,97



Obrázek 41 - Naměřené drsnosti před a po omílání



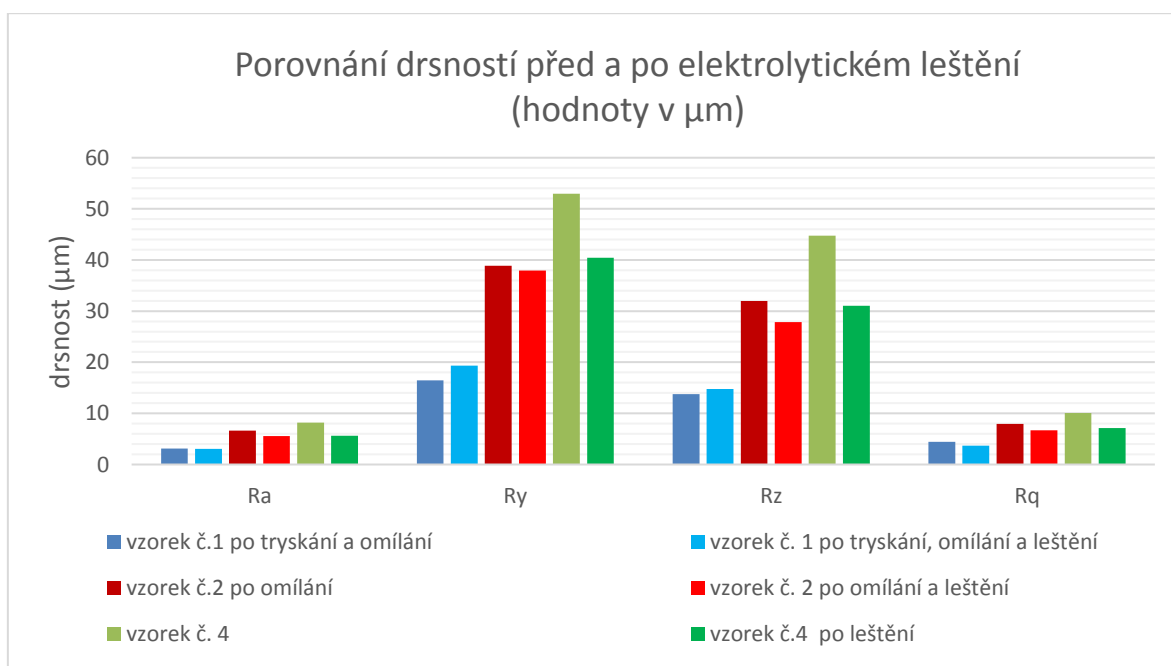
Obrázek 42 - Struktura povrchu po omílání vzorek č.1 (vlevo) a vzorek č. 2 (vpravo)

Vzorky č.1,2 a 4 byly elektrolyticky vyleštěn u firmy ACO Industries k.s. Vzorky byly leštěny po dobu 18-ti minut v roztoku kyseliny sírové a dusičné.

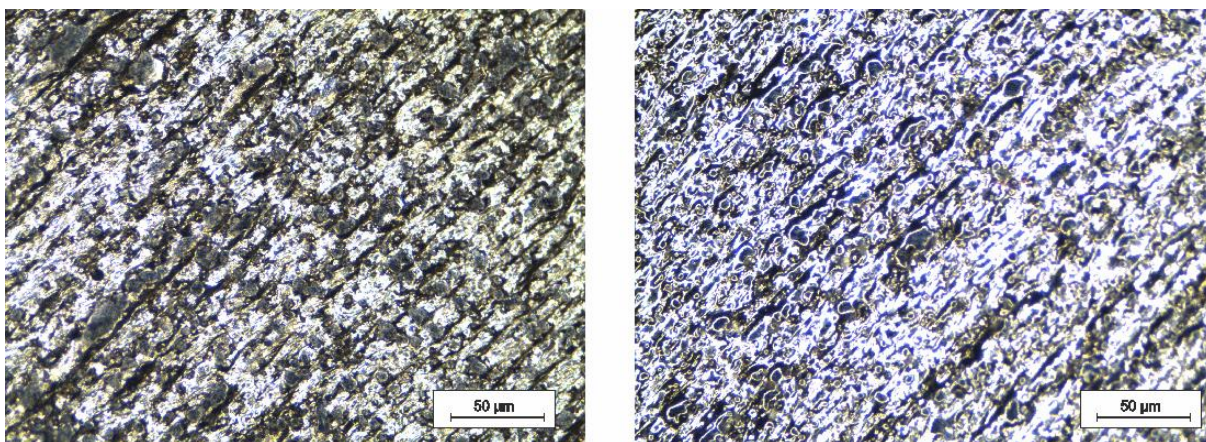
Tabulka 5 - Naměřené drsnosti před a po elektrolytickém leštění

Průměrné hodnoty v [μm]	Ra	Ry	Rz	Rq
vzorek č.1 po tryskání a omílání	3,11	16,44	13,78	4,41
vzorek č. 1 po leštění	3,05	19,31	14,79	3,66
vzorek č.2 po omílání	6,62	38,85	31,98	7,97
vzorek č. 2 po omílání a leštění	5,53	37,93	27,86	6,69
vzorek č. 4	8,18	52,95	44,75	10,07
vzorek č.4 po leštění	5,61	40,45	31,05	7,13

Z tabulky č.5 je patrné, že elektrolytické leštění příliš nezměnilo drsnost povrchu u zkoušených vzorků. Největší zlepšení drsnosti povrchu bylo u vzorku č.4, to je nejspíše dáno tím, že u něj nebyla provedena žádná předúprava povrchu na rozdíl od vzorků č.1, který byl před elektrolytickým leštěním tryskán a omílán. Vzorek č.2 byl také před leštěním omílán.



Obrázek 43 - Porovnání drsností před a po elektrolytickém leštění



Obrázek 44 - Struktura povrchu vzorku č.2 před (vlevo) a po elektrolytickém (vpravo)

Z obrázku č.44 je patrná změna vzhledu povrchu, co se týče lesku, ale drsnost se změnila jen minimálně.



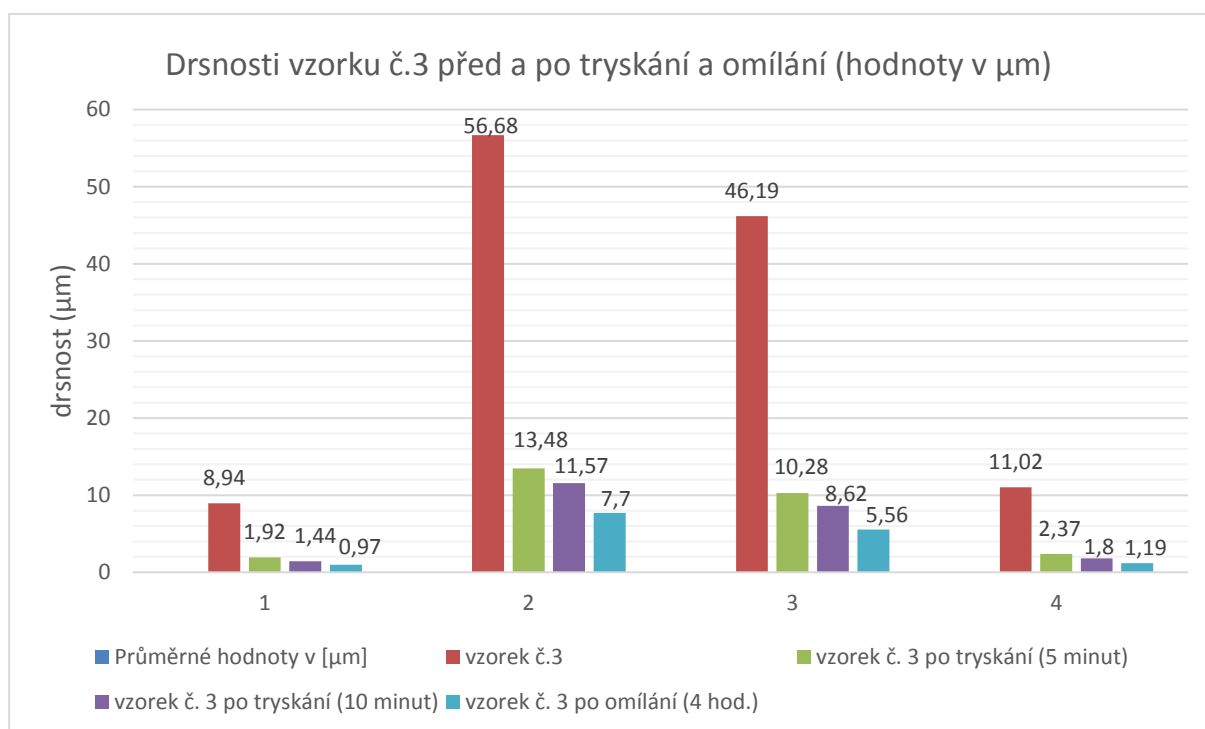
Obrázek 45 - Východí vzorek č.2 (vlevo) a vzorek po tryskání a elektrolytickém leštění (vpravo)

Posledním experimentem bylo omílání vzorku č.3 po dobu 4 hodin za použití keramických brousících tělísek a přípravku pro omílání PRAGOPOL OB 32 a následně byla změřena drsnost tohoto vzorku (Tabulka 6).

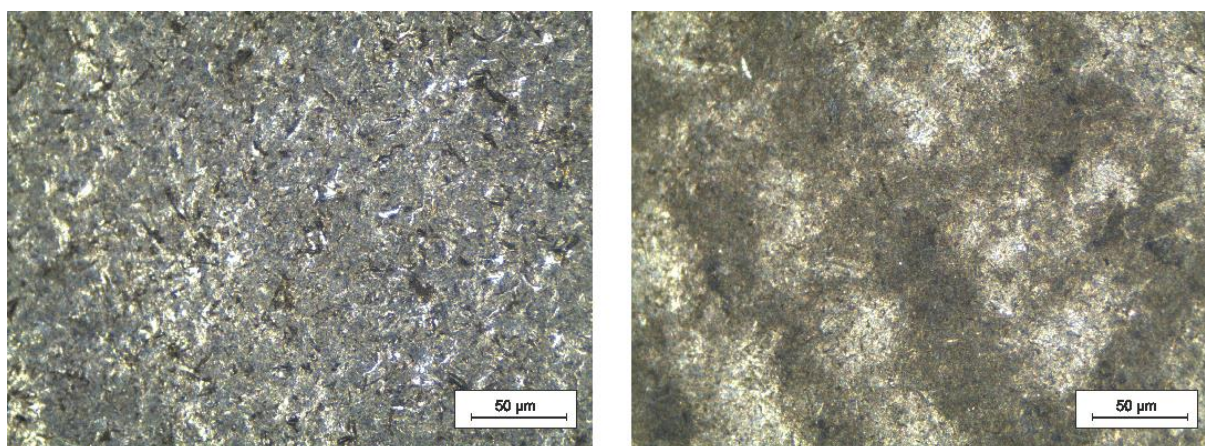
Pragopol OB 32 je práškový omílací přípravek s tříštivým brusivem, které se v průběhu omílání dělí na menší ostrohranné částice, ty si zachovávají schopnost brousit omílaný povrch kovů. Po určité době omílání se částice roztříští natolik, že přípravek začne povrch jemně brousit až leštit. Přípravek se používá v kombinaci s keramickými brusnými tělísky. Umožňuje upravovat všechny běžné kovové materiály včetně korozivzdorných ocelí a slitin hliníku a zinku. [42]

Tabulka 6 - Porovnání drsností před a po tryskání

Průměrné hodnoty v [μm]	Ra	Ry	Rz	Rq
vzorek č.3	8,94	56,68	46,19	11,02
vzorek č. 3 po tryskání (5 minut)	1,92	13,48	10,28	2,37
vzorek č. 3 po tryskání (10 minut)	1,44	11,57	8,62	1,80
vzorek č. 3 po omílání (4 hod.)	0,97	7,70	5,56	1,19



Obrázek 46 - Drsnosti vzorku č.3 před a po tryskání a omílání



Obrázek 47 - Struktura povrchu vzorku č.3 po tryskání (vlevo) a po následném omílání (vpravo)

Z grafu (Obr. č 46) lze vyčíst, že díky tryskání a následnému omílání se snížily hodnoty drsnosti Ra z 8,97 μm na 0,97 μm .

Na jeden zkušební vzorek byla aplikována technologie stříkaného chromu. Vzhledem k tomu, že firma neprovádí tento proces pravidelně, nestihla se změřit drsnost u tohoto vzorku. Pro představu je přiložena fotografie aplikované technologie a možnosti její využití v různých barevných odstínech (Obr. č. 47).



Obrázek 48 - Vzorky po aplikaci stříkaného chromu

5. ZÁVĚR

Na základě provedených experimentů byly zjištěny následující závěry:

- 1) Nejlepší drsnosti bylo dosaženo u vzorku č.3 a to, když Ra výchozího vzorku bylo 8,94 μm . Výrazné zlepšení drsnosti Ra u vzorku č.3, došlo již po 5-ti minutách tryskání a to z 8,94 μm na 1,92 μm , dalších 5 minut tryskání přineslo snížení drsnosti na 1,44 μm . Omílání probíhalo za použití omílacího prostředku Pragopol OB 32 po dobu 4 hodin a u tohoto vzorku se docílilo hodnoty drsnosti Ra 0,97 μm .
- 2) Jako nejvhodnější varianta pro dosažení minimální drsnosti povrchu součástí po 3D tisku se ukázala kombinace dokončovacích operací tryskání a následné omílání. Tryskání bylo prováděno balotinou B7 a jako omílací prostředek se ukázal Pragopol OB 32 lepší než Pragopol 809.
- 3) Elektrolytické leštění nevykazovalo příliš velkou efektivitu pro dosažení lepší drsnosti povrchu, proto bych tuto technologii nedoporučil jako dokončovací operaci ihned po 3D tisku. Jak je vidět na Obr. 44 došlo k výraznému zlepšení vzhledu součásti, proto bych tuto dokončovací operaci doporučoval jako následnou operaci po tryskání a omílání pro výrobky, kde je kladen důraz na design.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] STREJČKOVÁ, Barbora. Rapid Prototyping a jeho využití. In: *CAD.cz* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/6569-rapid-prototyping-a-jeho-vyuziti.html>
- [2] MAŠÍN, Doc. Dr. Ing. Ivan. *Přehled technik využívaných při Rapid Prototyping* [online]. Liberec, 2012 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://www.kvs.tul.cz/download/rapid_prototyping/Přehled%20technik%20využívaných%20při%20Rapid%20Prototyping.pdf.
- [3] Aditivní technologie: metody Rapid Prototyping. In: *Vysoké učení technické: Ústav strojírenské technologie* [online]. Brno, 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/podklady/sto_bak/cv_STV_04_Aditivni_techologie_metody_Rapid_Prototyping
- [4] CUSTOMPART: *Stereolithography* [online]. 2008 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>
- [5] 3D-tisk: *Selective Laser Sintering* [online]. 2013 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [6] DMLS: *DIRECT METAL LASER SINTERING*[online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.dmls.cz>
- [7] CHUA, Chee Kai, Kah Fai LEONG a Chu Sing LIM. Rapid prototyping: principles and applications. 2nd ed. New Jersey: World Scientific,[online], 2003, xxv, 420 s. [cit. 2012-05-16]. ISBN 98-123-8120-1. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/49852558/Rapid-Prototyping>
- [8] Laminated Object Manufacturing (LOM). *Custompart* [online]. © 2008 [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/images/rapidprototyping/lom.png>
- [9] PALERMO, Elizabeth. Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method. *Livescience*[online]. 2013 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>
- [10] 3D-labs: *MultiJet – Modeling (MJM)* [online]. 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://3d-labs.de/mjm/?lang=en>
- [11] 3D-tisk aditivná výroba a rapid prototyping: *Dokončovací operace* [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/dokoncovaci-operace/>
- [12] FRICK, Lindsey. How to Smooth 3D-Printed Parts. In: *Machine Design* [online]. 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/3d-printing/how-smooth-3d-printed-parts>

- [13] HLAVÁČEK, M.: Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. 2002, 32s. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-proupravu-povrchu.html>.
- [14] MAKE: We are all Makers: *Smoothing Out Your 3D Prints With Acetone Vapor* [online]. 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://makezine.com/2014/09/24/smoothing-out-your-3d-prints-with-acetone-vapor/>
- [15] Techniques in 3D printing. *Rapidprototyping* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://en.rapidprototyping.nl/3d-printing/techniques-in-3d-printing/sls-as-technology-for-3d-printing/>
- [16] Euro inox: *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/1102531-Elektrolyticke-lesteni-korozivzdornych-oceli.html>
- [17] Types of Abrasives Products. Inclusive Science and Engineering [online]. 2012 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.inclusive-science-engineering.com/types-of-abrasives-products/>
- [18] Blasting media. *Cerablast* [online]. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.cerablast.de/english/brownfesi.html>
- [19] Tumbling media. *Kramer Industries, Inc.* [online]. [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.kramerindustriesonline.com/tumbling-media.htm>
- [20] ELECTROPOLISHING: A User's Guide to Applications, Quality Standards and Specifications. In: *DELSTAR* [online]. 2003 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <https://www.delstar.com/assets/pdf/epusersguide.pdf?r=false>
- [21] KOSMAČ, Alenka. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. 2009 [cit. 2017-01-06]. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf
- [22] ELECTROPOLISHING PROCESS REQUIREMENTS. *KEPCO* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://kepcoinc.com/?page=serviceselectropolishing>
- [23] *"Metal glue" could replace welding and soldering – in some applications* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://newatlas.com/mesoglue-metal-glue/41292/>
- [24] Surface Preparation For Bonding Metals. *MASTERBOND* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.masterbond.com/resources/surface-preparation-bonding-metals>
- [25] 3D printing. *CUSTOMPART* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>
- [26] Metal Bonding Adhesives. *MASTERBOND* [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.masterbond.com/applications/metal-bonding-adhesives>

- [27] *Design Guide for Bonding Metals* [online]. [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: http://na.henkel-adhesives.com/us/content_data/LT3771_Metal_Bonding_Guide_v5_LR404796.pdf
- [28] *Preparation of Metal Substrates for Bonding with LORD® Adhesives* [online]. In: . [cit. 2016-12-05]. Dostupné z: <http://www.lord.com/sites/default/files/AG1004.pdf>
- [29] ČSN EN ISO 4287:1997. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [30] ČSN EN ISO 4288:1996. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. Praha : Český normalizační institut, 1999. 16 s.
- [31] Hommel-Etamic.cz [online]. ©2002-2005 [cit. 2010-04-11]. Plakát - Drsnost povrchu. Dostupné z WWW:<<http://www.hommeletamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>.
- [32] THOMAS, Tom R. *Rough surfaces*. 2nd edition. London : Imperial College Press, 1999. 278 s. ISBN 1-86094-100-1.
- [33] *AM250: Flexible material use and ease of changeover* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.renishaw.com/en/am250--15253>
- [34] *Mitutoyo drsnoměr SURFTEST SJ-201P* [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.elcometer.cz/priprava-povrchu-drsnost/elcometer-7060-mitutoyo-drsnomer>
- [35] LOM. 3D PRINTERS AUSTRALIA [online]. [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.3d-printers.com.au/technologies/lom/>
- [36] Inertní brusné a tryskací materiály - abraziva - organická, minerální, kovová. *Abraziva* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.abraziva.cz/>
- [37] Měření jakosti povrchu. *Učíme v prostotu* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=1985
- [38] 3D printing: Material Jetting. *WANHAO 3D PRINTER* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.wanhao3dprinter.com/FAQ/ShowArticle.asp?ArticleID=62>

[39] CHROME FX INDUSTRIAL SYSTEM APPLICATION GUIDE. *ALSA* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://alsacorp.com/wp-content/uploads/2015/10/chrome-fx-industrial-system.pdf>

[40] Photo Gallery: car chrome components. *Cosmichrome* [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://cosmichrome.com/photo-gallery/#prettyPhoto>

[41] STROJ NA OMÍLÁNÍ V BUBNU. *Allbiz* [online]. [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://moskva.all.biz/cs/stroj-na-omilani-v-bubnu-g520377#.WHoUQxt97IU>

[42] Přípravky pro hromadné omílání a leštění. *PRAGOCHEMA* [online]. [cit. 2017-01-14]. Dostupné z: <http://www.pragochema.cz/?start=2&lan=cz&vyr=Pripravky-pro-hromadne-omilani-a-lesteni>