

Výroba části formy 3D tiskem s různou materiálovou kvalitou formy

Bc. Radek Šimek

Diplomová práce
2019



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Šimek**
Osobní číslo: **T17584**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Výroba části formy 3D tiskem s různou materiálovou kvalitou formy**

Zásady pro vypracování:

- 1. Zpracování literární rešerše**
- 2. Výroba části formy 3D tiskem různými technologickými parametry výroby**
- 3. Ověření kvality povrchu technologií lisování**
- 4. Vyhodnocení získaných výsledků**

Rozsah diplomové práce: **cca 60 stran**
Rozsah příloh: **dle pokynů VDP**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **SRIVATSAN, T. S a T. S SUDARSHAN. Additivemanufacturing: innovations, advances, and applications. BocaRaton: CRC Press, Taylor& Francis Group, [2016], xv, 444. ISBN 978-1-4987-1477-8.**
2. **NOORANI, Rafiq. 3D printing: technology, applications, and selection. BocaRaton: CRC Press, Taylor& Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4987-8375-0.**
3. **PACKHAM, D. E. Mould sticking, fouling and cleaning. Shawbury, U.K.: Rapra Technology Ltd., 2002. Rapra review reports, v. 13, no. 6.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dana Shejbalová, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**

Ve Zlíně dne 7. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 20.3.2019

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou znečišťování forem vyrobených metodou 3D tisku od vulkanizačních zbytků. V teoretické části jsou popsány aplikace 3D tisku, jednotlivé tiskové technologie a jejich využití, materiály pro 3D tisk kovů, jejich způsoby výroby a vlastnosti. V teoretické části jsou také popsány faktory ovlivňující kontaminaci forem, možné analýzy kontaminace a hodnocení jakosti povrchu dutiny forem. V praktické části jsou popsána použitá zkušební tělíska reprezentující dutinu formy, vulkanizační směs a postup lisování. V praktické části jsou dále analyzována zkušební tělíska před, v průběhu a po dokončení lisování. Výsledky jsou v praktické části analyzovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova: 3D tisk, rychlé prototypování, kaučuk, kaučuková směs, lisování, kontaminace, znečištění, forma.

ABSTRACT

The thesis deals with the problematics of the contaminations of the molds made with the 3D methods from vulcanized rests. In the theoretical part, the application of the 3D printing, individual technologies, and their use is described as well as the materials used for the 3D print, their production, and their characteristics. The theoretical part also describes factors that influence the contamination of the molds and the qualification of the quality of the cavity surface of the forms. The practical part deals with the test corpuscles which represent the mold cavities, vulcanization mixture, and the process of pressing. It also analyses the test corpuscles before, during and after the pressing. The results are processed and evaluated in the practical part.

Keywords: 3D print, Rapid Prototyping, rubber, rubber compound, molding, contamination, fouling, mold.

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucí mé diplomové práce Ing. Daně Shejbalové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a cenné rady. Děkuji také Ing. Jaroslavovi Malochovi, CSc. za pořízení fotografií zkušebních tělísek. Poděkování také patří mé manželce Mgr. Heleně Šimkové za podporu v průběhu celého studia na vysoké škole.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 3D TISK.....	12
1.1 APLIKACE 3D TISKU	13
1.1.1 Rapid Prototyping	13
1.1.2 Rapid Tooling.....	14
1.1.3 Rapid Manufacturing	14
1.2 3D TISKOVÉ TECHNOLOGIE.....	15
1.2.1 Laminated Object Manufacturing (LOM).....	16
1.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM).....	17
1.2.3 Stereolithography (SLA).....	18
1.2.4 Polyjet	19
1.2.5 Selective Laser Sintering (SLS)	19
1.2.6 Electron Beam Melting (EBM).....	19
1.2.7 Laser Engineered Net Shaping (LENS)	20
1.2.8 3D Printing.....	20
1.2.9 ProMetal.....	21
1.3 VYUŽITÍ 3D TISKU.....	21
1.3.1 Využití 3D tisku v automobilovém průmyslu.....	22
1.4 TECHNIKY 3D TISKU POUŽÍVANÉ PRO KOVOVÉ MATERIÁLY	23
1.4.1 Prášková báze.....	24
1.4.1.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	25
1.4.1.2 Laser Beam Melting (LBM)	26
1.4.1.3 Electron Beam Melting (EBM).....	28
1.4.2 Direct energy deposition	30
1.4.2.1 Laser Metal Deposition (LMD)	31
1.4.2.2 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	32
1.5 MATERIÁLY PRO 3D TISK KOVU	34
1.5.1 Výroba práškových materiálů pro metodu Laser Beam Melting	34
1.5.1.1 Atomizace plynem	35
1.5.1.2 Atomizace vodou	36
1.5.1.3 Atomizace odstředivou silou	37
1.5.2 Vlastnosti a charakterizace kovového prášku	38
1.5.3 Kovové práškové materiály vhodné pro Laser Beam Melting.....	38
1.5.3.1 Kovové prášky - jednosložkové.....	38
1.5.3.2 Kovové prášky - vícesložkové.....	39
2 KONTAMINACE POVRCHU DUTIN FOREM.....	42
2.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ KONTAMINACI POVRCHU DUTIN FORMY	42
2.1.1 Kaučuková směs.....	42
2.1.2 Tepelné zpracování a povrchové úpravy dutiny formy.....	43
2.1.3 Procesní podmínky zpracování kaučukové směsi.....	44
2.1.4 Adheze kaučukové vrstvy, použití separačních vrstev, povrchové napětí	44

2.2	ANALÝZA KONTAMINACE POVRCHU DUTIN FOREM	45
2.2.1	FTIR	45
2.2.2	RAMAN	45
3	HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU DUTIN FOREM	46
3.1	ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY JAKOSTI POVRCHU	46
3.2	ZPŮSOBY MĚŘENÍ JAKOSTI POVRCHU	47
3.2.1	Kontaktní měření jakosti povrchu	47
3.2.2	Bezkontaktní snímání jakosti povrchu	48
3.3	VYHODNOCOVÁNÍ DAT O JAKOSTI POVRCHU	48
3.3.1	Parametr drsnosti Ra	49
3.3.2	Parametr drsnosti Rz	50
3.3.3	Parametry prostorového hodnocení drsnosti povrchu	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
4	CÍLE PRÁCE	52
5	POPIS EXPERIMENTU	53
6	ANALÝZA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	54
6.1	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA	54
6.2	MĚŘENÍ JAKOSTI POVRCHU	56
6.3	ANALÝZA FTIR	57
7	PŘÍPRAVA KAUKUKOVÉ SMĚSI A LISOVÁNÍ	59
7.1	KAUKUKOVÁ SMĚS	59
7.2	VULKANIZAČNÍ CHARAKTERISTIKA	59
7.3	VÁLCOVÁNÍ	61
7.4	LISOVÁNÍ KAUKUKOVÉ SMĚSI	62
7.5	VULKANIZAČNÍ LIS	63
7.6	LISOVACÍ FORMA	63
8	DISKUSE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	64
8.1	JAKOST POVRCHU ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	64
8.2	FTIR ANALÝZA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	77
8.3	FOTOGRAFIE ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	86
	ZÁVĚR	90
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	91
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	97
	SEZNAM OBRÁZKŮ	98
	SEZNAM TABULEK	101

ÚVOD

Aditivní technologie výroby, označovaná dnes také jako 3D tisk, zažívá v posledních letech velký rozvoj a zdokonalování. Aditivní technologie výroby, na rozdíl od konvenčních metod obrábění, které určují výslednou geometrii výrobku odebráním materiálu nebo přetvořením polotovaru, materiál při výrobě produktu přidávají. Díky tomuto principu přidávání materiálu tato technologie otevírá nové možnosti ve schopnosti vytvářet komplexní tvary, dutiny, složitě tvarované vnitřní otvory a také odlehčené struktury.

V teoretické části této diplomové práce jsou popsány různé metody 3D tisku, jejich rozdělení a možné využití. Vybrané metody vhodné pro 3D tisk kovu jsou rozepsány do větších podrobností. Díky zvětšujícím se možnostem použití různých materiálů, přesnosti a kvalitě tisku se již dnes tyto technologie nepoužívají pouze pro výrobu prototypů, ale také pro výrobu finálních produktů. Dnešní možnosti technologie 3D tisku dovolují vyrábět složité konečné součásti, které by bylo obtížné nebo i nemožné vyrobit jinou technologií výroby.

Cílem této diplomové práce je porovnání kontaminace zkušebních tělísek vyrobených metodou Selective Laser Melting různými parametry tisku a s různým následným opracováním při lisování běhounové kaučukové směsi. Kontaminace zkušebních tělísek je sledována po 100 a 200 cyklech lisování.

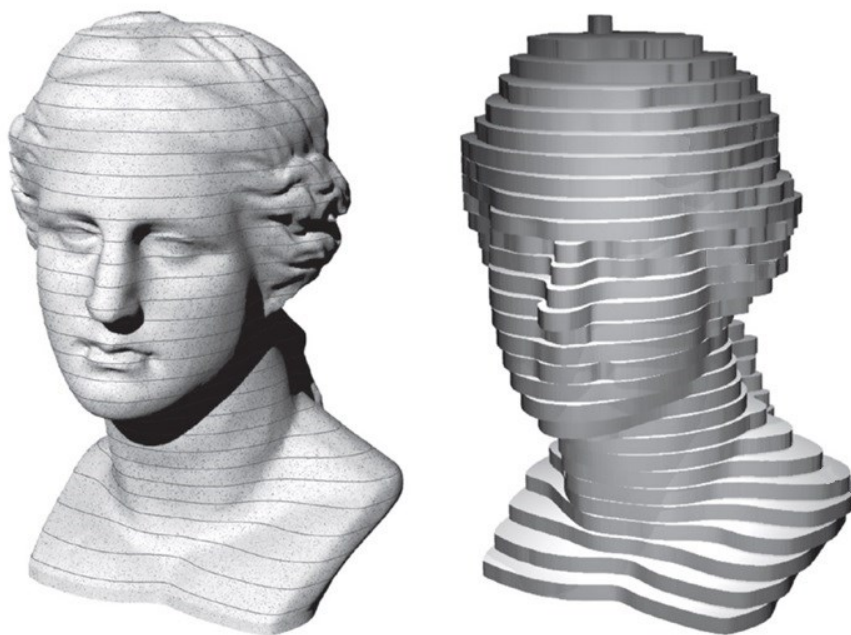
V praktické části této diplomové práce jsou popsána jednotlivá zkušební tělíska a vyhodnoceny jejich vstupní parametry. Mezi sledovanými parametry jsou jakost povrchu, spektrální analýza FTIR a fotografie zkušebních tělísek. Kontaminace zkušebních tělísek po 100 cyklech lisování je vyhodnocena spektrální analýzou FTIR. Kontaminace po 200 cyklech lisování je vyhodnocena změřením jakosti povrchu, spektrální analýzou FTIR. Byly také pořízeny fotografie zkušebních tělísek.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 3D TISK

Norma ISO/ASTM 52900 [1] definuje aditivní výrobu jako proces spojování materiálu k vytvoření dílu z 3D dat modelu, obvykle vrstvu po vrstvě, na rozdíl od subtraktivních a formativních výrobních technologií.

Aditivní výroba vytváří požadovaný tvar přidáním materiálu, přednostně tím, že se navzájem překrývají ohraničené vrstvy. Princip aditivní výroby je založen na skutečnosti, že jakýkoli objekt, alespoň teoreticky, může být rozřezán do vrstev a znovu složen s použitím těchto vrstev bez ohledu na složitost jeho geometrie, jak lze vidět na obrázku (Obr. 1). Aditivní výroba je automatizovaný proces, který zahrnuje dva hlavní procesy: fyzické vytváření každé jednotlivé vrstvy a spojování následných vrstev v celek za účelem vytvoření dílu. Oba tyto procesy běží současně. Charakteristickým znakem této technologie je, že během procesu výroby se negeneruje pouze geometrie dílu, ale také jeho materiálové vlastnosti. [2]



Obr. 1. Základní princip aditivní výroby [2]

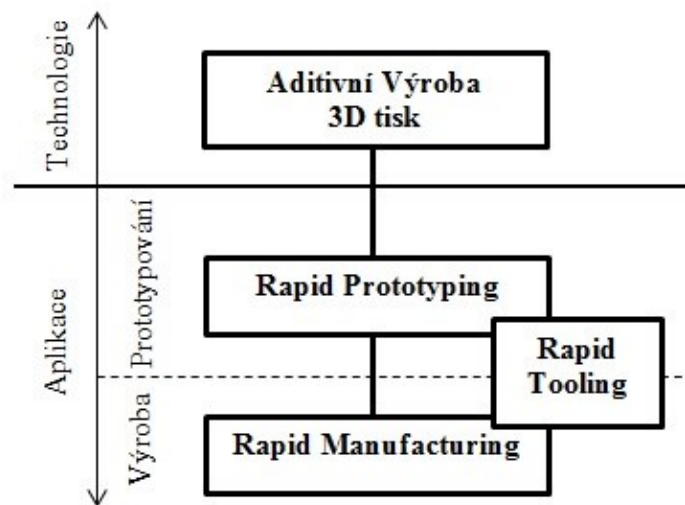
V poslední době se setkáváme spíše s termínem 3D tisk, dle Gebhardta a Höttera [2] se termín 3D tisk chystá nahradit všechny dříve používané termíny (aditivní výroba, technologie nanášení vrstev) a stát se všeobecně uznávaným obecným pojmem pro aditivní výrobu. Hlavně z toho důvodu, že lze tento termín velmi jednoduše pochopit. Každý, kdo umí pracovat s textovým editorem a kancelářskou tiskárnou, snadno pochopí, že bude

schopen vytisknout 3D objekt pomocí 3D designového programu a 3D tiskového stroje bez ohledu na to, jak tento stroj funguje. [2]

"3D tiskárna je specifické zařízení, které vytváří (po jednotlivých vrstvách tiskne) trojrozměrné objekty z různých vhodných materiálů, jako jsou například polymer, kov nebo keramika." [3] Pohyb tiskárny jsou řízeny programem v počítači. 3D tiskáren dnes existuje mnoho druhů, vzájemně se odlišují svou velikostí i druhem materiálu, ze kterého tisknou objekty. Všechny 3D tiskárny ale vždy tisknou výrobek postupně po jednotlivých vrstvách.

1.1 Aplikace 3D tisku

Aditivní výroba / 3D tisk lze rozdělit na tři aplikace: Rapid Prototyping (rychlé prototypování), Rapid Manufacturing (rychlá výroba) a Rapid Tooling (rychlá výroba nástrojů). Rozdělení aditivní výroby je graficky znázorněno na obrázku (Obr. 2). [2]



Obr. 2. Základní rozdělení aditivní výroby / 3D tisku [2]

1.1.1 Rapid Prototyping

Rapid prototyping (RP), jeden z prvních aditivních výrobních procesů, umožňuje vytvářet tištěné součásti, prototypy, modely a makety. Tyto součásti jsou funkčními prototypy, nikoliv konečnými produkty. Napodobují pouze některé vlastnosti později vyráběného produktu za účelem ověření designu a umožňují testování vybraných vlastností produktu, a tím zlepšují a urychlují proces vývoje produktu. Cílem je předem navrhnout díl tak,

aby byl co nejjednodušší, rychle vyrobitelný a levný. Proto se RP části obecně nemohou používat jako finální produkty. [2]

Mezi hlavní výhody, které tento proces nabízí ve vývoji a výrobě produktů lze zařadit:

- snížení času a nákladů výrobního procesu;
- dřívější odhalení chyb v průběhu vývoje dílu;
- možnost vyrobit téměř jakýkoliv tvar, který by jinak byl velmi obtížně vyrobitelný;
- zkrácení vývojového cyklu produktu. [4]

Norma ISO/ASTM 52900 [1] definuje Rapid Prototyping jako aplikaci aditivní technologie výroby, která je určena ke zkrácení doby potřebné pro výrobu prototypů.

1.1.2 Rapid Tooling

Do skupiny aditivní technologie výroby zvané Rapid Tooling řadíme výrobu nástrojů, nástrojových vložek, měřidel a forem. Tyto díly jsou označovány jako nástroje. V závislosti na aplikaci a procesu mohou být prototypy, sériové nástroje nebo jejich části. [4]

Norma ISO/ASTM 52900 [1] definuje Rapid Tooling jako aplikaci aditivní technologie výroby určené k výrobě nástrojů nebo součástí nástrojů s kratší dodací lhůtou ve srovnání s běžnou výrobou nástrojů.

Aditivní technologie výroby je v této oblasti používána zejména proto, aby byl nástroj vyroben v co nejkratším čase a za nižší cenu. Mezi hlavní výhody, které tento proces nabízí ve výrobě nástrojů lze zařadit:

- snížení nákladů na výrobu nástroje;
- zkrácení času potřebného pro výrobu nástroje;
- možnost vyrobit konvenční metodou nevyrobitelné, nebo obtížně vyrobitelné nástroje. [5]

1.1.3 Rapid Manufacturing

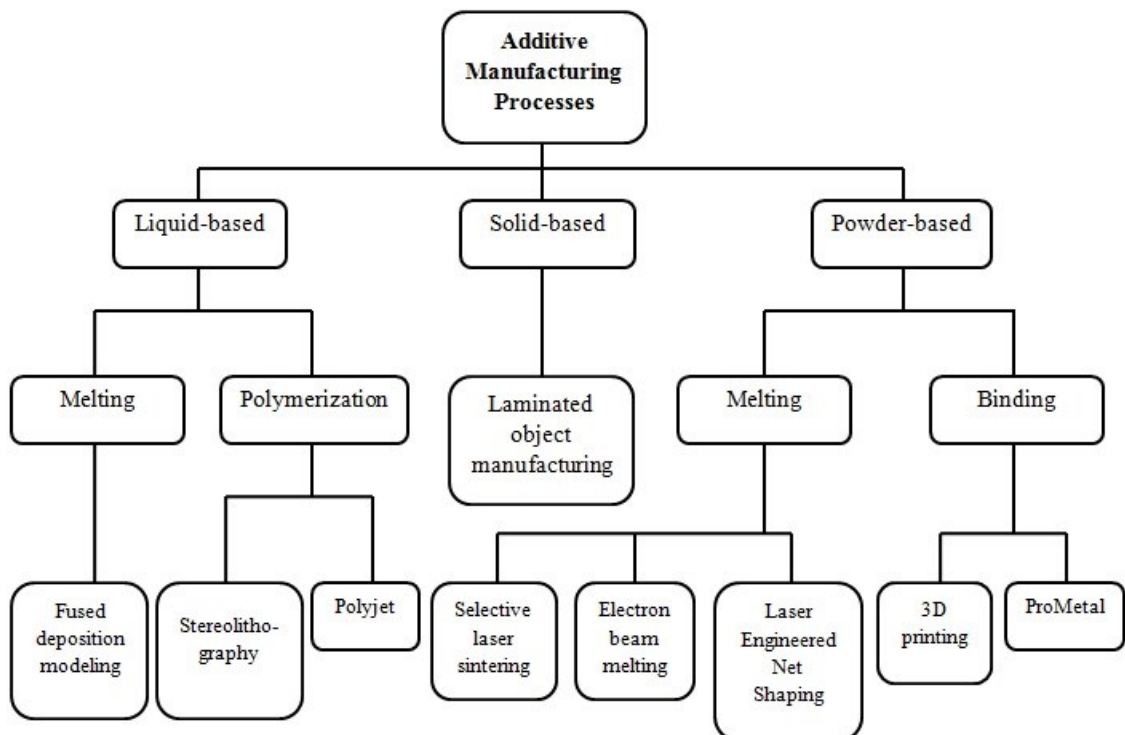
Aditivní výroba / 3D tisk finálních dílů či produktů se nazývá Rapid Manufacturing. Lze se také setkat s termínem Direct Manufacturing, který výše zmíněnému termínu také odpovídá. Rapid Manufacturing je založen na stejné technologii jako Rapid Prototyping a také používá stejné 3D tiskárny. Cílem Rapid Manufacturing je na rozdíl od Rapid Prototyping výroba finálního produktu. [2]

Dle Gebhardta a Höttera [2] lze rozdíl mezi Rapid Prototyping a Rapid Manufacturing popsat následovně:

- Rapid Manufacturing zahrnuje výrobu finálních produktů (dílů). Za finální produkt lze označit díl, který byl navržen pro aditivní výrobu z daného materiálu, z tohoto materiálu byl také vyroben aditivní výrobou a vykazuje všechny relevantní vlastnosti tak, jak byl navržen.
- Rapid Prototyping zahrnuje výrobu prototypových dílů. Prototypový díl je výrobek, který byl navržen pro jiný výrobní proces z daného materiálu, byl vyroben aditivní výrobou a to z jiného materiálu než pro který byl navržen. Geometrie tohoto dílu odpovídá geometrii navrženého výrobku.

1.2 3D tiskové technologie

Dle Srivatsana a Sudarshana [4] můžeme rozdělit aditivní výrobní technologie do tří hlavních skupin. Jedná se o technologie založené na tekuté bázi (Liquid-based), technologie založené na pevné bázi (Solid-based) a technologie založené na práškové bázi (Powder-based) viz obrázek (Obr. 3).



Obr. 3. Grafické rozdělení aditivní výroby dle Srivatsana a Sudarshana [4]

Technologie založené na tekuté bázi dále dělíme na technologie založené na tavném procesu (Melting) a technologie založené na procesu polymerizace (Polymerization). Mezi technologie založené na tavném procesu řadíme metodu Fuseddeposition modeling. Mezi technologie založené na polymerizaci řadíme metodu Stereolitography a Polyjet.

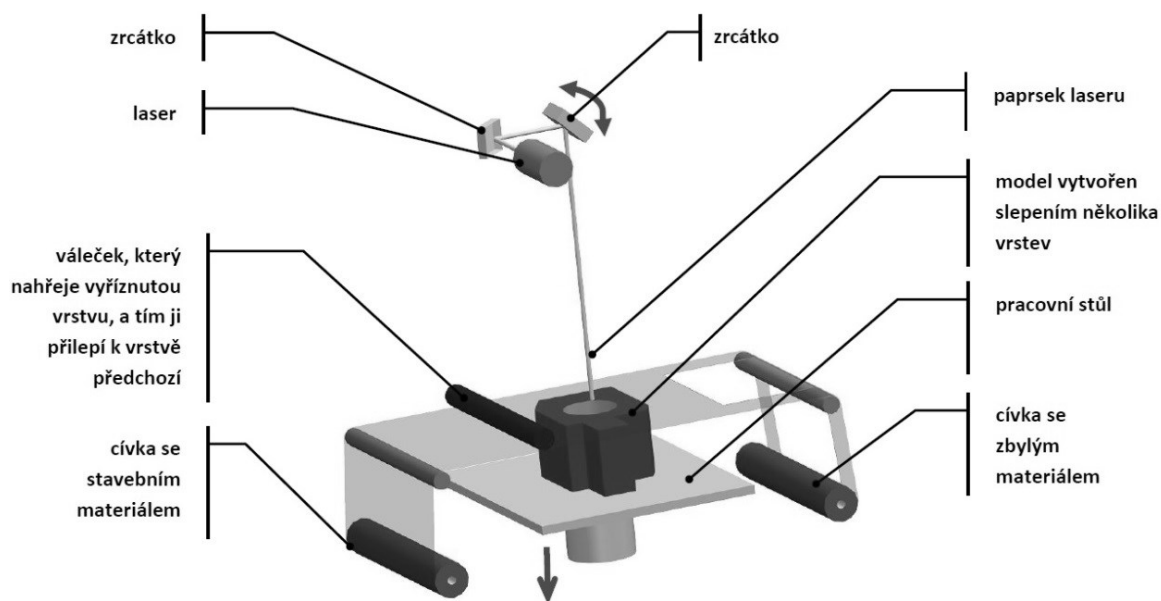
Mezi technologie založené na pevné bázi řadíme metodu Laminated object manufacturing.

Technologie založené na práškové bázi dělíme na technologie založené na tavném procesu (Melting) a technologie založené na spojování (Binding). Mezi technologie založené na tavném procesu řadíme metody Selective laser sintering, Electron beam melting a Laser Engineered Net Shaping. Mezi technologie založené na spojování řadíme metody 3D printing a ProMetal.

1.2.1 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Základním principem metody Laminated Object Manufacturing je vrstvení jednotlivých lepivých fólií na sebe. Místo fólie lze také použít papír napuštěný zpevňující hmotou. Tyto fólie se přilepí na předchozí vrstvu pomocí vyhřívaného válečku, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 4). Jednotlivé vrstvy jsou oříznuty do požadovaného tvaru laserem, přebytečná fólie je rozdělena laserem na čtverce a později odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka posune směrem dolů o tloušťku fólie a tento postup se opakuje až do vytvoření celé součásti. [6]

„Touto metodou se tisknou i velké modely, jejich struktura připomíná dřevo. Výsledný tvar se musí ručně opracovat. Nevýhodou je velké množství odpadu.“ [3]

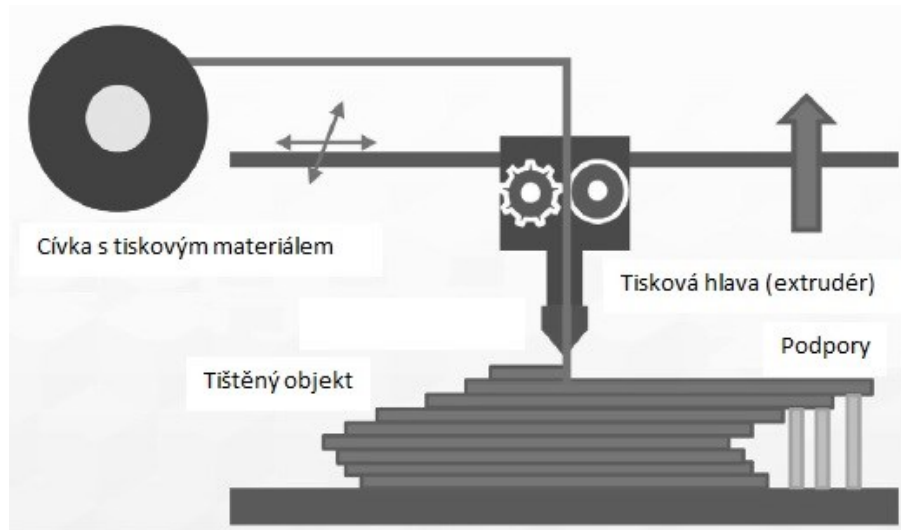


Obr. 4. Základní princip metody Laminated Object Manufacturing [7]

1.2.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

Základní princip metody Fused Deposition Modeling je protlačování struny, namotané na cívce, vyhřívanou tryskou. Princip této metody lze vidět na obrázku (Obr. 5). Při průchodu tryskou je materiál nahřátý na teplotu o něco nižší, než je teplota tavení daného materiálu. Po protlačení tryskou se materiál přilepí na spodní vrstvu a okamžitě ztuhne. Tisk modelu probíhá postupně po jednotlivých vrstvách. Pro převislé části modelu je nutné tisknout podpory, které se po dokončení tisku musí odstranit. [3]

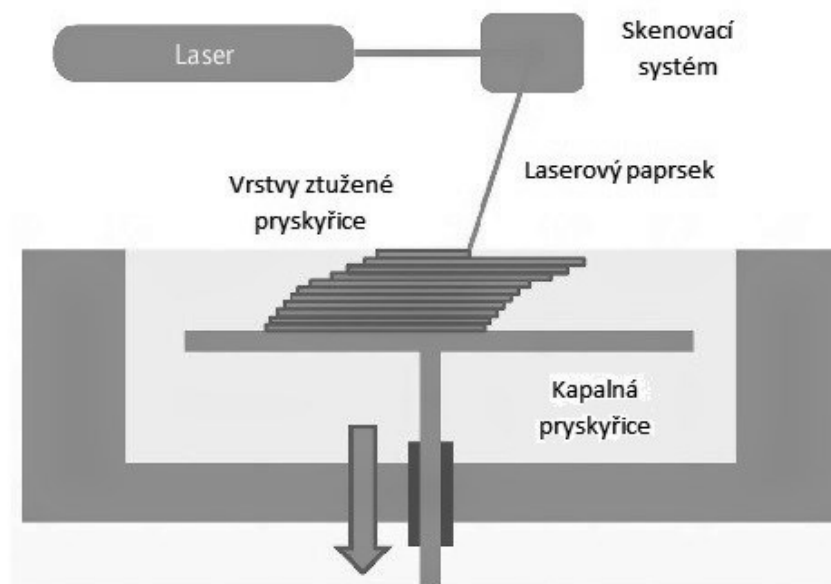
„Nejčastěji používaným materiálem jsou různé druhy plastů (ABS, nylon, PLA). Experimentuje se i s dalšími materiály, jako je kov nebo keramika.“ [3]



Obr. 5. Základní princip metody Fused Deposition Modeling [8]

1.2.3 Stereolithography (SLA)

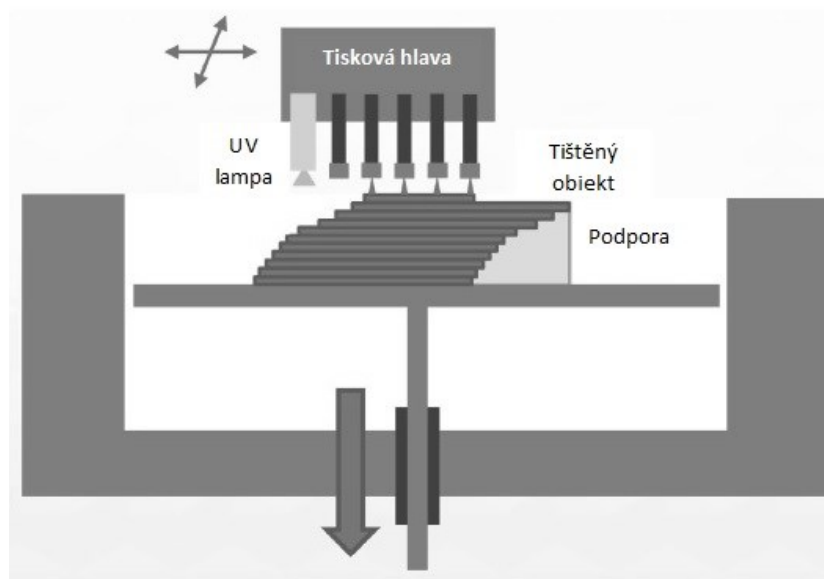
Stereolitografie je nejstarší metodou 3D tisku. Tištěný objekt vzniká postupným vytvrzováním tekutého fotopolymery za pomoci UV laseru. Jak je znázorněno na obrázku (Obr. 6) laserový paprsek vytvrdí fotopolymer v místech, kde vzniká model. Po vytvrzení jedné vrstvy je model ponořen o tloušťku jedné vrstvy do tekutého fotopolymery. Tento proces se opakuje až do vytvoření konečného výrobku. [7]



Obr. 6. Základní princip metody Stereolitography [8]

1.2.4 Polyjet

Technologie Polyjet umožňuje tisk z velkého množství tekutých materiálů (od zářivě barevných a neprůhledných až po průsvitné). Jak je znázorněno na obrázku (Obr. 7), materiál je nanášen po vrstvách, každou vytištěnou vrstvu je nutné vytvrdit UV lampou. Tato metoda také vyžaduje u převislých tvarů tisknout podpory, které je nutné po dokončení tisku odstranit. Velkou výhodou této metody je možnost tisku z několika různých materiálů s různými fyzikálními vlastnostmi. [3]



Obr. 7. Základní princip metody Polyjet [8]

1.2.5 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda Selective Laser Sintering patří do oblasti technologií založených na práškové bázi. Laser postupně po jednotlivých vrstvách spéká do určitého tvaru materiál v podobě prášku (plastový, kovový, keramický prášek či slévárenský písek). Výhodou této metody je, že vyráběný objekt nepotřebuje žádné opory, po celou dobu procesu držen hmotou nespečeného práškového materiálu, který se po dotisknutí z výrobní vany odstraní. [3]

Podrobněji je tato metoda popsána v kapitole 1.4 Techniky 3D tisku používané pro kovové materiály.

1.2.6 Electron Beam Melting (EBM)

Jedná se o aditivní výrobní proces pro slinování čistého kovového prášku. Kovový prášek se nanese na povrch práškového lože a roztaví se pomocí elektronového paprsku podle

kontury aktuální vrstvy. Charakteristické pro tento proces je úplné roztavení kovového prášku ve vakuu, doprovázené velmi přesnou regulací teploty. [2]

Podrobněji je tato metoda popsána v kapitole 1.4 Techniky 3D tisku používané pro kovové materiály.

1.2.7 Laser Engineered Net Shaping (LENS)

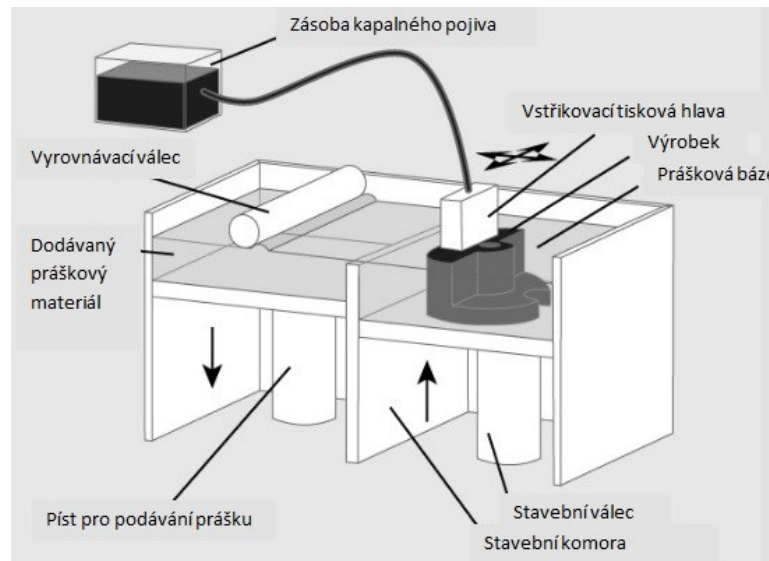
Při použití této metody je díl vyráběn zaostřením vysoce výkonného laserového paprsku na substrát, jehož hlavním cílem je vytvoření roztavené lázně, do které se vhání částice kovového prášku, aby postupně vytvářely jednotlivé vrstvy. Technika LENS (Laser Engineered Net Shaping) může být použita k opravě stávajících částí a konstrukcí, ale je primárně používána k výrobě nových dílů. [4]

Podrobněji je tato metoda popsána v kapitole 1.4 Techniky 3D tisku používané pro kovové materiály.

1.2.8 3D Printing

"Technologie založená na práškové bázi. Opět se postupuje po jednotlivých vrstvách, které se k sobě lepí. Velkou výhodou této technologie je možnost kombinování více materiálů v rámci jednoho tisku. Z materiálů lze použít i kov, různé kompozitní materiály (složené z více směsí) či polymer.“[3]

Výhodou této metody je možnost plnobarevného tisku, lze docílit plnobarevných, tvarově a barevně až fotorealistických objektů. Z tohoto důvodu je metoda 3D Printing často využívána k tisku portrétů a figurek. Nevýhodou metody je však fakt, že se zde nedosáhne lesklého povrchu. Stejně jako u ostatních metod založených na práškové bázi, není nutné stavět podpory. Základní princip této metody je znázorněn na obrázku (Obr. 8). [3]



Obr. 8. Základní princip metody 3D Printing [14]

1.2.9 ProMetal

System Pro-Metal se používá k vytváření kovových modelů, kde je kovový prášek spojován pomocí kapalného polymerního materiálu. Po dokončení musí být modely sintrovány, aby se odstranilo polymerní pojivo. Následně jsou infiltrovány bronzem, za účelem odstranění nebo významného snížení pórovitosti. Modely mají vysokou pevnost a při tisku není potřeba vytvářet podpory. [15]

1.3 Využití 3D tisku

Přestože aditivní technologie výroby nemůže zcela nahradit konvenční technologie výroby, v posledních letech se dostává do popředí a možnosti využití jsou široce otevřené. Existuje řada průmyslových odvětví, která by mohla být touto technologií přeměněna. Aditivní technologie výroby nabízí díky flexibilitě designu, fyzikálním vlastnostem výrobku, které dříve nebyly možné a ekonomickým výhodám, řadu praktických aplikací a použití. [16]

Výhody využití 3D tisku ve výrobě:

- Výrobky lze navrhnout, vytisknout, vyzkoušet a inovovat v krátkém čase. Konstruktor již pár hodin po návrhu drží svůj výrobek v ruce, může vyzkoušet jeho funkčnost a následně zapracovat do 3D modelu úpravy. Výsledkem je zrychlení inovačního procesu a vývoje finálního produktu.
- Konstruktor má více možností, co se týče tvaru výrobku. Nemusí se tolik ohlížet na to, z čeho je bude vyrábět (obrábět) a jestli má suroviny na skladě nebo kde je

koupí. Využitím 3D tisku má na cívce s tiskovou strunou, nebo v podobě prášku celý „sklad materiálu“. Navíc se vytiskne jenom tolik materiálu, kolik výrobek spotřebuje. [17]

Hlavní odvětví, ve kterých se využívá 3D tisku:

- elektrotechnika;
- automobilový průmysl;
- zdravotnictví;
- strojírenství;
- letecký průmysl;
- vojenský průmysl;
- architektura. [16]

1.3.1 Využití 3D tisku v automobilovém průmyslu

V automobilovém průmyslu je 3D tisk využíván pro různé aplikace. Tisknout lze od okrasných individuálních prvků karoserie, přes speciální brzdové třmeny, až po části forem určených pro výrobu pneumatik.

Příkladem použití 3D tisku v automobilovém průmyslu je první vytištěné kolo určené pro vůz McLaren (Obr. 9). Toto kolo bylo vytištěné metodou Electron Beam Melting ze speciálního titanového kovového prášku. [18]



Obr. 9. První vytištěné kolo [18]

Dalším příkladem použití 3D tisku v automobilovém průmyslu je tisk části formy na výrobu pneumatik. Na obrázku (Obr. 10) je forma, která obsahuje lamely. Tyto lamely byly vyrobeny metodou Selective Laser Melting z kovového prášku z nástrojové oceli. [19]



Obr. 10. Forma na výrobu pneumatik [19]

Příkladem dílu s požadavkem na extrémní namáhání je vytištěný brzdový třmen určený pro vůz Bugatti Chiron. Tento brzdový třmen (Obr. 11) byl vytištěn metodou Laser Beam Melting z titanového kovového prášku. Třmen váží pouhých 2,9 kg a nahrazuje původní brzdový třmen, který byl vyroben z hliníku a vážil 4,9 kg. [20]



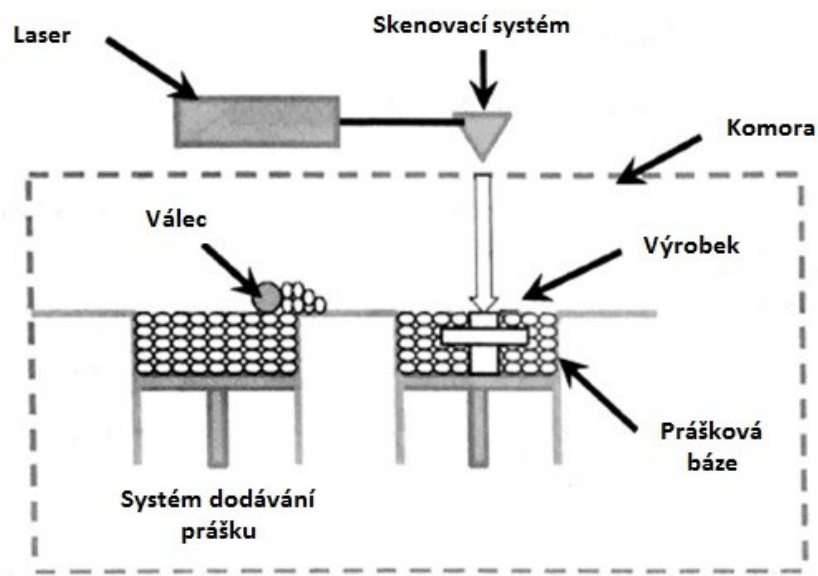
Obr. 11. Brzdový třmen [20]

1.4 Techniky 3D tisku používané pro kovové materiály

Při aditivní technologii výroby kovů je prášková surovina nebo vzácně drát zcela roztaven vstupem energie laserového nebo elektronového paprsku a transformován vrstvu po vrstvě na pevnou část téměř jakékoliv geometrie. [3]

1.4.1 Prášková báze

Technologie práškové báze byla vyvinuta pro technologii Selective Laser Sintering a postupně se vyvinula do různých technik, které mají podobné pracovní principy, ale používají různé mechanismy pro vazbu prášku a vrstev. Metody založené na kombinaci laserových paprsků a práškové báze zahrnují původní metodu Selective Laser Sintering (SLS) a metodu Laser Beam Melting (LBM), která je dnes používaná přednostně. Výměna nebo nahrazení laserového paprsku za elektronový paprsek vedla k technice Electron Beam Melting (EBM). Schéma základního principu technologií založených na práškové bázi je znázorněno na obrázku (Obr. 12). [4]

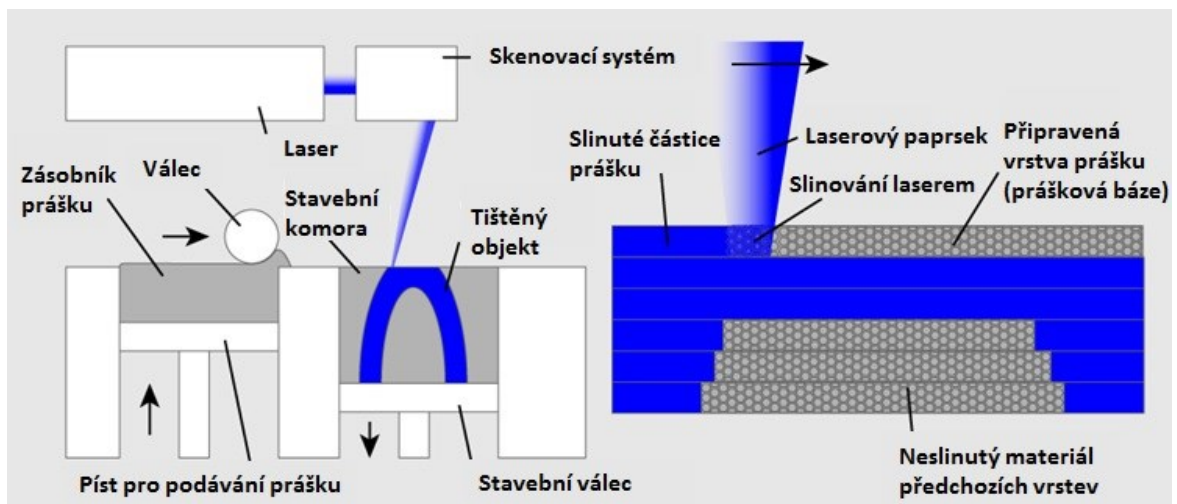


Obr. 12. Základní princip metod založených na práškové bázi [4]

Základními prvky tohoto procesu jsou laserový skenovací systém, systém pro dodávání prášku, válec a výrobní píst. Před zahájením procesu tvorby nové vrstvy se píst pro dodávání prášku posune směrem nahoru a výrobní píst směrem dolů o jednu tloušťku vrstvy. Prášek se rozprostře a následně lehce stlačí za pomoci válce, na povrchu výrobního pístu. Laserový paprsek je potom veden přes práškové lůžko tak, aby selektivně taval prášek pod vedením skenovacího systému. Po dokončení vrstvy se výrobní píst pohybuje dolů o další tloušťku vrstvy a na ní se rozprostře nová vrstva prášku. Proces se opakuje, dokud nebude vybudován celý výrobek. Po dokončení se výrobní píst vysune směrem nahoru a zdvihne konečný výrobek. [4]

1.4.1.1 Selective Laser Sintering (SLS)

Technologie Selective Laser Sintering byla patentována v roce 1987. Tento proces aditivní výroby využívá vysoce výkonný laser pro spojení malých částic materiálu (kovu, keramiky, polymeru, skla nebo jakéhokoli materiálu, ze kterého lze snadno vyrobit prášek). Vrstva prášku se ohřívá těsně pod bod tání použitého prášku, částice prášku se slinují. Po dokončení jedné vrstvy se stavební plošina spustí dolů, tento pohyb odpovídá tloušťce jedné vrstvy, obvykle do 0,1 mm. Další vrstva prášku se nanese (roztáhne) pomocí válce do vyrovnané vrstvy. Každá vrstva se potom znovu slinuje pomocí laseru. Slinutý materiál tvoří součást, zatímco neslinutý prášek zůstává na svém místě jako podpůrná struktura, lze ji vyčistit a recyklovat po dokončení dílu. Základní princip této metody je znázorněn na obrázku (Obr. 13). [9]



Obr. 13. Základní princip metody Selective Laser Sintering [10]

Tento proces selektivního slinování laserem nabízí možnost vytvářet složité součásti, které jsou často odolnější a poskytují lepší funkčnost ve srovnání s jinými existujícími a přednostně používanými výrobními postupy aditivní výroby. Materiály, které jsou obvykle používány, jsou plasty, kovy, kombinace kovů, kombinace kovů a polymerů a kombinace kovů a keramiky. Další materiály, které mohou být použity, jsou kompozitní materiály a vyztužené polymery. [11]

Na obrázku (Obr. 14) jsou uvedeny různé součástky vyrobené metodou Selective Laser Sintering.



Obr. 14. Produkty vyrobené metodou SLS [12]

Mezi hlavní výhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- široké množství použitelných materiálů;
- nízká pořizovací cena materiálu;
- neslinutý prášek lze použít v procesu výroby dalšího výrobku;
- není nutné budovat podpěry;
- po vytištění se součást nemusí kalit. [9]

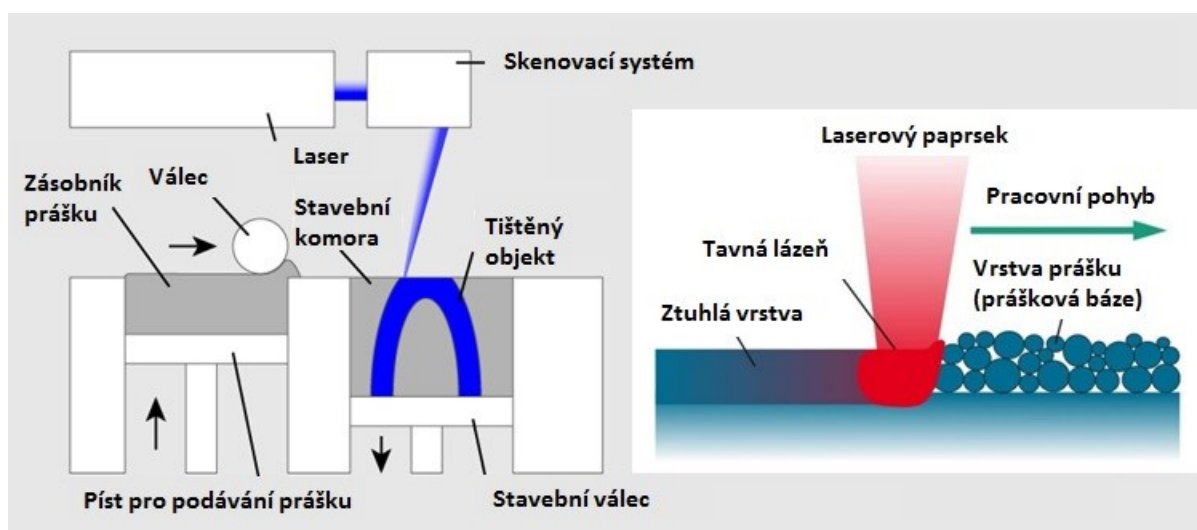
Mezi hlavní nevýhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- vysoká pořizovací cena stroje;
- nutná kvalifikovaná obsluha;
- horší mechanické vlastnosti výrobku;
- nedokonalý povrch. [9]

1.4.1.2 Laser Beam Melting (LBM)

Tato metoda je také velmi často označována jako Selective Laser Melting (SLM). Laser Beam Melting je proces založený na práškové bázi, ve kterém je kovový prášek rozprostřen v tenkých vrstvách s tloušťkou vrstvy 20 μm až 100 μm přes pracovní plochu s rozsahem dosahujícím od 50 mm x 50 mm do 400 mm x 800 mm. Schéma typického systému LBM je znázorněn na obrázku (Obr.15). [13]

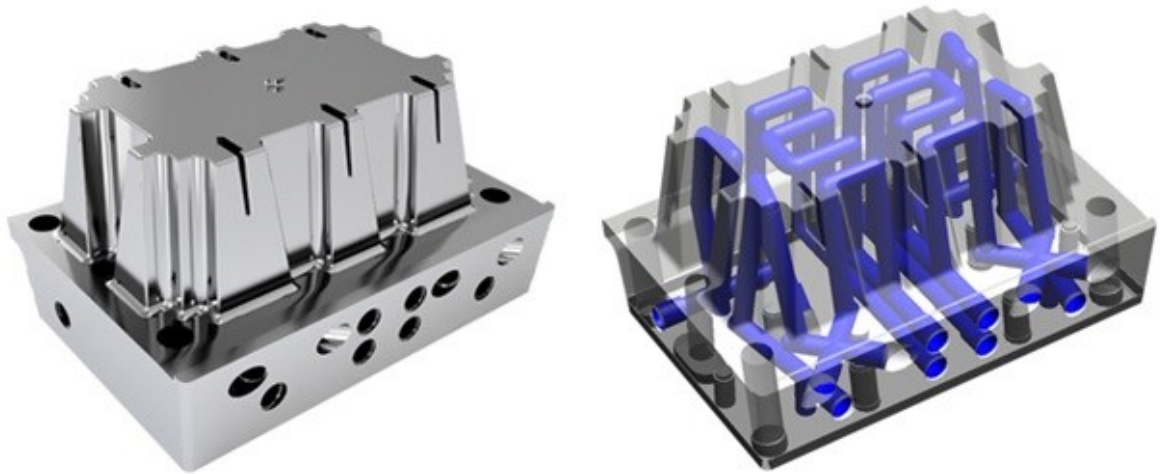
Metoda Laser Beam Melting je založena na stejném principu jako metoda Selective Laser Sintering, jak bylo uvedeno v kapitole 1.4.2. Pro tisk z kovových materiálů je častěji používána metoda LBM. Hlavním rozdílem mezi těmito dvěma metodami je výkon laseru. U metody LBM je kovový prášek roztaven, tak aby byla vytvořena tavná lázeň, u metody SLS práškový materiál není roztaven, ale zahřátý těsně pod bod tání, tak aby byl materiál slinován. Výhodou této metody je celkové tavení prášku do kapalného stavu, čímž je zaručena vynikající homogenita výtisku a lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s metodou Selective Laser Sintering. Metodou Laser Beam Melting je docíleno redukce pórovitosti a lepší kontroly nad krystalovou strukturou použitého materiálu. [7]



Obr. 15. Základní princip metody Laser Beam Melting [9, 13]

Základní princip metody Laser Beam Melting je zobrazen na obrázku (Obr. 1). Tento proces probíhá v ochranné atmosféře argonu, nebo dusíku. Pracovní komora je před zahájením procesu zbavena vzduchu a vlhkosti a následně vyplněna inertním plynem. Píst pro podávání prášku je nadzvednut o jednu tloušťku vrstvy, stavební válec klesne o jednu tloušťku vrstvy a prášek je rovnoměrně rozprostřen po stavební komoře. Následně probíhá tavení vrstvy práškového kovu laserem podle předem připraveného programu. Výška vrstvy je závislá na nastavení parametrů a použitém prášku. Po dokončení každé vrstvy se stavební válec posune níže přesně o výšku další vrstvy a celý proces se opakuje do doby, než je výrobek dokončen. [21]

Na obrázku (Obr. 16) je tvárník vytištěný metodou Laser Beam Melting. Tvárník je vytištěn na základní desce, která byla před tiskem obrobena. Na obrázku je znázorněný sofistikovaný chladičový systém, který bylo možné vyrobit právě díky metodě 3D tisku.



Obr. 16. Tvárník s chladicími kanály vytištěný metodou LBM [22]

Mezi hlavní výhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

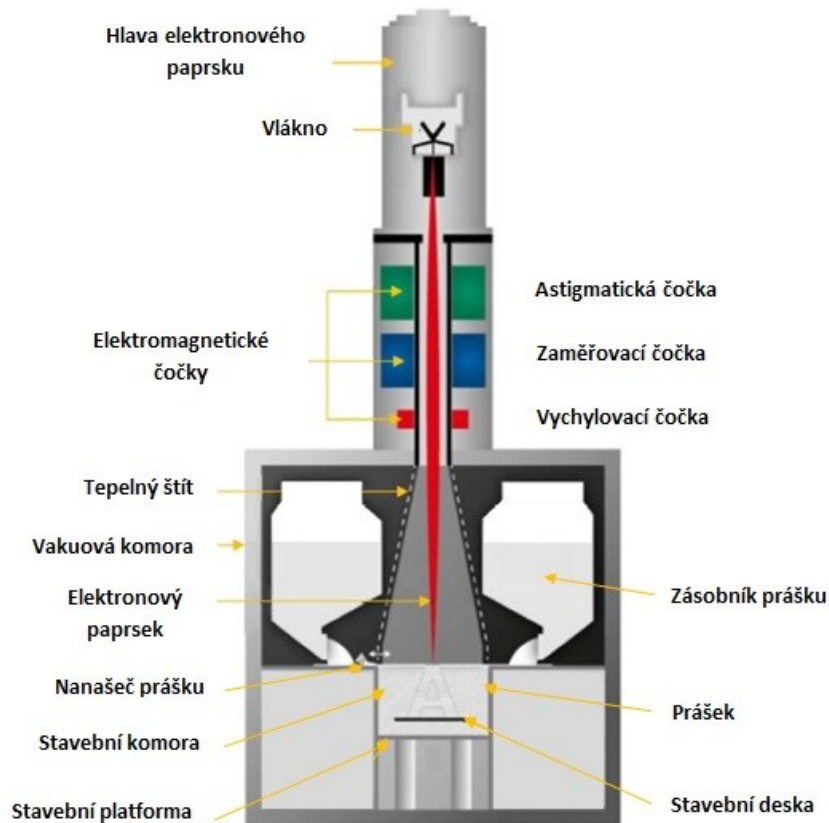
- výroba složitých tvarů;
- neslinutý prášek lze použít v procesu výroby dalšího výrobku;
- není nutné budovat podpěry;
- kvalitní povrch, s vysokým rozlišením;
- po vytištění se součást nemusí kalit. [9]

Mezi hlavní nevýhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- vysoká pořizovací cena stroje;
- nutná kvalifikovaná obsluha. [9]

1.4.1.3 Electron Beam Melting (EBM)

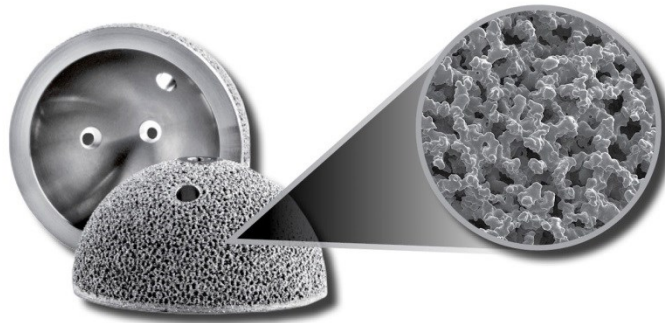
Pro metodu Electron Beam Melting je vstupním materiálem také materiál v podobě prášku. Povrchové vrstva práškového lůžka se selektivně roztaví za pomoci elektronového paprsku, která po ztuhnutí vytvoří novou vrstvu. Komponenta je vytvořena vrstvou po vrstvě podle příslušné geometrie dílu. Celý proces probíhá ve vakuu. [2]



Obr. 17. Základní princip metody Electron Beam Melting [23]

Na obrázku (Obr. 17) je zobrazen základní princip metody Electron Beam Melting. Kovový prášek je nanesen na povrch práškového lože a roztaví se pomocí elektronového paprsku podle geometrie aktuální vrstvy. Po dokončení jedné vrstvy se stavební platforma posune o jednu tloušťku vrstvy směrem dolů a je nanesena nová vrstva prášku. Tento proces se opakuje až do vytvoření celého dílu. Největší rozdíl ve srovnání s ostatními metodami založenými na práškové bázi je v možnosti dosáhnout různých teplot v různých místech vrstvy. Toho je dosaženo speciálním řízením elektronového paprsku. Díky tepelnému vedení v částečně hotové části a okolním prášku tavenina ztuhne a vytvoří pevnější vrstvu. Celý proces probíhá ve vakuu. Charakteristickým znakem této metody je úplné roztavení prášku ve vakuu, doprovázené velmi přesnou regulací teploty.[2]

Na obrázku (Obr. 18) je ortopedický implantát vyrobený metodou Electron Beam Melting. Tato metoda je často používána v biomedicíně.



*Obr. 18. Ortopedický implantát vyrobený metodou
Electron Beam Melting [24]*

Mezi hlavní výhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- rychlost výroby;
- předběžné zahřátí vrstvy před roztavením omezuje deformace;
- po vytištění se součást nemusí kalit. [25]

Mezi hlavní nevýhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- vysoké provozní náklady;
- možnost vyrobit pouze menší díly oproti metodám SLS a SLM;
- vysoká pořizovací cena stroje. [25]

1.4.2 Direct energy deposition

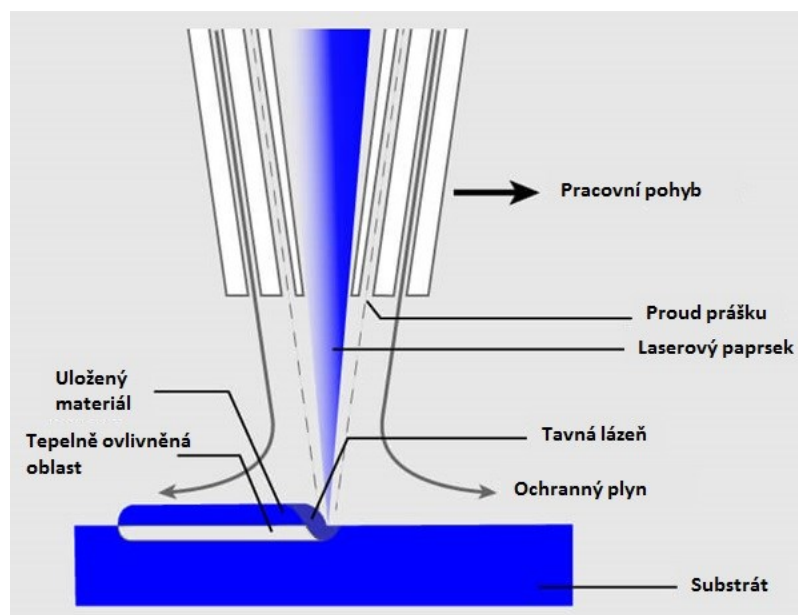
Pomocí systémů Direct energy deposition je vytvářen větší objem ve srovnání se systémy založenými na práškové bázi. V tomto systému je materiál v podobě prášku, nebo jako drát přiváděn tryškou, nebo podavačem do tavné lázně na konstrukční plochu. K roztavení vrstvy, nebo většího množství prášku, do požadovaného tvaru se používá laser. Existují dvě varianty tohoto systému:

- Obrobek je stacionární, zatímco se pohybuje tisková hlava.
- Tisková hlava je stacionární a pohybuje se obrobek. [12]

1.4.2.1 Laser Metal Deposition (LMD)

Tato metoda je také často označována jako Direct Metal Deposition (DMD), Laser Engineered Net Shaping (LENS), nebo Laser Deposition Welding. [13]

Základním principem metody Laser Metal Deposition je vytvoření tavné lázně na povrchu dílu, do této tavné lázně je pomocí trysky přiváděn materiál v podobě kovového prášku. Spojením tavné lázně a přiváděného materiálu vznikají svařené housenky, které vytvářejí celé součásti, nebo struktury na stávajících základních tělesech.[15]

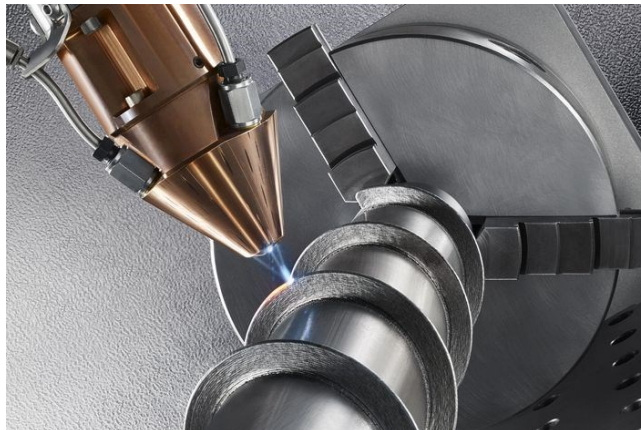


Obr. 19. Základní princip metody Laser Metal Deposition [10]

Na obrázku (Obr. 19) je znázorněn základní princip této metody. Laserový paprsek je přes navádění laserového paprsku, středem nanášecí hlavy, nasměrován k definovanému místu na dílu, kde je vytvořena tavná lázeň. Tavná lázeň je proti oxidaci chráněna ochrannou atmosférou argonu nebo hélia. Do této tavné lázně je po obvodu nanášecí hlavy přiveden ze zásobníku materiál v podobě prášku. [13]

Tato metoda může mít ve srovnání s ostatními metodami aditivní výroby vysokou rychlost, právě díky možnosti nanesení potřebného tvaru výrobku na jiné základní těleso, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 20), kde je tištěna pouze spirála po obvodu rotačního tělesa. Do tohoto procesu lze zapojit několik nádob na práškový materiál, ze kterých lze podle potřeby vytvořit vlastní slitinu, případně sendvičové struktury. [26]

Díky možnosti navařovat materiál na již existující díl je tato metoda vhodná mimo výrobu nových dílů také k povlakování, opravám, při procesu spojování a kombinaci různých výrobních metod. [27]



Obr. 20. Použití metody *Laser Metal Deposition* [26]

Mezi hlavní výhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

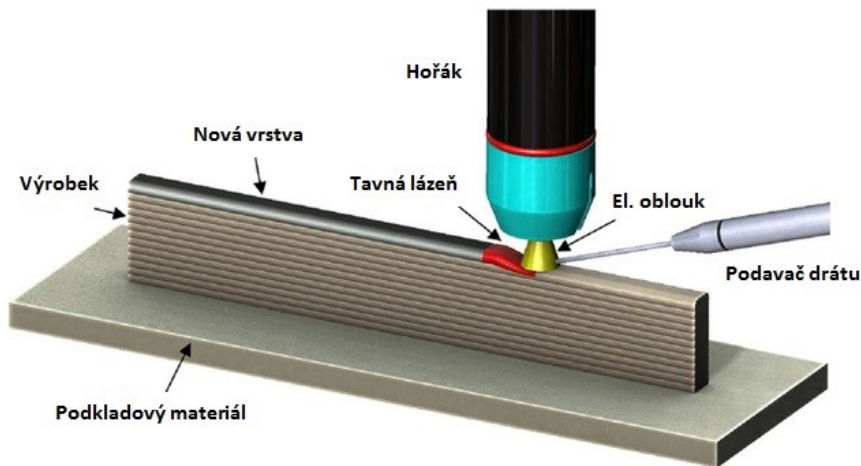
- nízké tepelné ovlivnění okolí tisku;
- možnost kombinace materiálů;
- rychlejší výrobní čas a snížené náklady na výrobu součástí;
- možnost využití také pro opravy stávajících dílů;
- možnost povlakování. [28]

Mezi hlavní nevýhody tohoto výrobního procesu lze zařadit:

- vysoká pořizovací cena stroje. [28]

1.4.2.2 Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Princip metody WAAM spočívá v ukládání velkého počtu jednotlivých návarových housenek na sebe, nebo vedle sebe. Součásti jsou tvořeny postupným navařováním jednotlivých vrstev po trajektorii obrysu budoucího dílu, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 21). Tento proces navařování je prováděn vždy zezdola nahoru, kde může být vyrobena konstantní, nebo adaptivní tloušťka návarové stěny. [29]



Obr. 21. Základní princip metody WAAM [30]

Na obrázku (Obr. 18) je znázorněna metoda kombinující elektrický oblouk s využitím přídatného materiálu. „Nejčastěji jsou pro metodu WAAM používány metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách – TIG a MIG/MAG. Rychlost nanášení (výkon navaření) pro WAAM může být při použití TIG navařování okolo jednoho kilogramu za hodinu, zatímco při použití metody MIG/MAG to může být za hodinu i několik kilogramů.“ [29]

Díky těmto možnostem metody WAAM lze vyrábět velké kovové součásti s vysokou rychlostí ukládání materiálu, nízkými náklady na zařízení a vysokým využitím materiálu. Součást vyrobená metodou WAAM je zobrazena na obrázku (Obr.22). Ve srovnání s tradiční subtraktivní výrobou může metoda WAAM snížit výrobní čas součásti o 40-60 %. [30]



Obr. 22. Porovnání metody WAAM (a) s obráběním (b) [29]

1.5 Materiály pro 3D tisk kovu

Kov je jeden z materiálů, který lze využít pro aditivní technologii výroby. Častěji než čisté kovy se používají slitiny kovů. Slitiny kovů se skládají ze dvou nebo více prvků, z nichž alespoň jeden je kovový prvek. Ke slitině kovu se přidávají legující prvky, které zlepšují jejich fyzikální vlastnosti. Kovy lze rozdělit na dva druhy:

- železné kovy;
- neželezné kovy. [31]

Mezi železné kovy řadíme surové železo, ocel a litinu. Nejběžnějším železným kovem používaným pro aditivní technologie výroby je ocel. Základním prvkem slitiny železa je uhlík, obsah uhlíku ve slitině vhodné pro aditivní výrobu se pohybuje mezi 0,1 % a 0,7 %. Dalšími běžnými legujícími prvky jsou chrom, mangan, nikl a molybden. Každý legující prvek zvyšuje zvláštní vlastnosti slitiny. [31]

Neželezné slitiny zahrnují všechny ostatní neželezné kovy. Mezi neželezné kovy patří hliník, nikl, měď, zlato, hořčík, stříbro, cín, zinek a titan. Některé barevné slitiny jsou snadno zpracovatelné, některé ne. Mezi snadno zpracovatelné slitiny neželezných kovů lze zařadit hliníkové slitiny. Mezi slitiny, které nejsou snadno zpracovatelné, lze zařadit slitiny titanu a niklu. [31]

Kovy mají různé vlastnosti, díky nimž jsou v průmyslu atraktivní. Poskytují dobrou kombinaci pevnosti, tuhosti a obrobitelnosti oproti keramice, která je křehká a polymerům, které nelze použít pro vysokoteplotní aplikace. Kromě toho mají kovy dobrou elektrickou a tepelnou vodivost a také dobrou tažnost. [31]

Existuje řada metod, používaných v rámci aditivní výroby, každá z nich vystavuje kovové prášky různým tokům a stresovým režimům. Toto je rozhodující faktor pro volbu správného kovového prášku pro konkrétní aplikaci. [32]

1.5.1 Výroba práškových materiálů pro metodu Laser Beam Melting

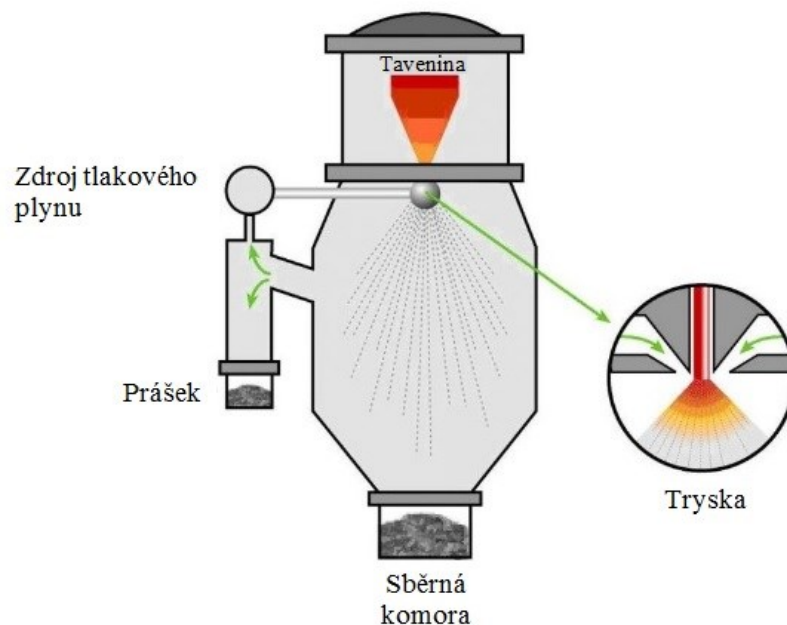
Pro metodu Laser Beam Melting je základním stavebním materiálem jemný kovový prášek. „Způsob výroby práškových materiálů do značné míry ovlivňuje jeho fyzikální a technologické vlastnosti. Téměř všechny materiály lze vyrobit ve formě prášku, ale volba technologie výroby závisí na specifických vlastnostech materiálu. Existují čtyři základní způsoby výroby: mechanický, fyzikálně-mechanický, chemický a fyzikálně chemický.“ [33]

Pro výrobu kovového prášku vhodného pro metodu Laser Beam Melting se nejčastěji využívá metody zvané rozstříkávání neboli atomizace. Atomizace patří do fyzikálně-mechanického způsobu výroby prášku. Pro výrobu kovového prášku vhodného pro metodu Laser Beam Melting se nejčastěji prášek vyrábí těmito způsoby:

- atomizace plynem;
- atomizace vodou;
- atomizace odstředivou silou. [34]

1.5.1.1 Atomizace plynem

Základním principem atomizace plynem, graficky znázorněném na obrázku (Obr. 23), je dezintegrace proudu taveniny vzduchem, dusíkem, héliem nebo argonem, který proudí pod tlakem z trysek.



Obr. 23. Atomizace plynem [34]

Výsledné vlastnosti prášku jsou ovlivněny řadou parametrů procesu, mezi které patří: typ plynu, teplota tavení a viskozita, typ slitiny, rychlost dávkování taveniny, tlak plynu, rychlost a viskozita plynu, geometrie trysek a teplota plynu. Výhodou atomizace taveniny plynem je homogenita výroby a dobré vlastnosti prášku díky sférickému tvaru částic. Na obrázku (Obr. 24) je zobrazena struktura částic po atomizaci plynem. Střední velikost částic

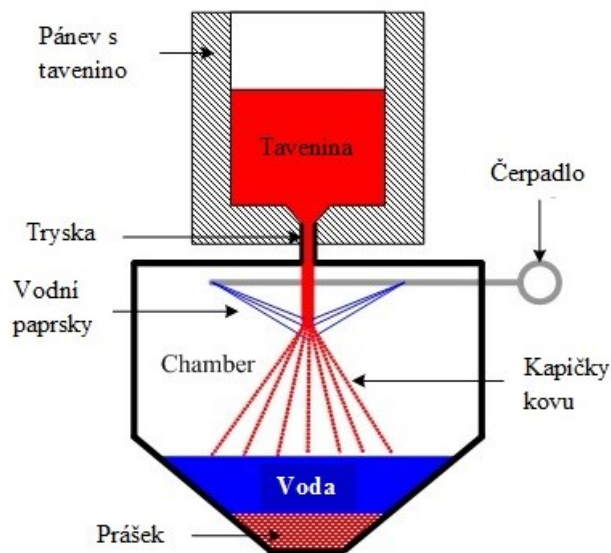
se pohybuje v rozmezí 20 - 300 μm . Mezi nevýhody tohoto procesu lze zařadit neekonomičnost procesu z důvodu velké spotřeby plynu. [33]



Obr. 24. Tvar a struktura částic po atomizaci plynem [33]

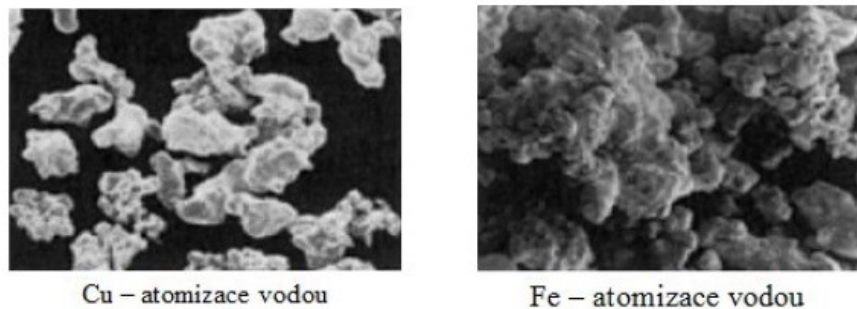
1.5.1.2 Atomizace vodou

Základním principem atomizace vodou je roztříštění proudu taveniny vodou. Princip atomizace vodou je znázorněn na obrázku (Obr. 25). Tento proces se vyznačuje vysokou rychlostí ochlazování a tvorbou páry v místě kontaktu vody s taveninou. Získaný prášek je sušen ve vakuu.



Obr. 25. Atomizace vodou [35]

Mezi výhody atomizace vodou lze zařadit ekonomickou výhodnost z důvodu nízké ceny rozstřikovacího média (vody) a velmi vysoké produktivity (až 30 tun za hodinu). Získané částice se vyznačují nepravidelným tvarem (Obr. 26). 95 % získaných částic nepřesahuje rozměr 150 μm . [33]

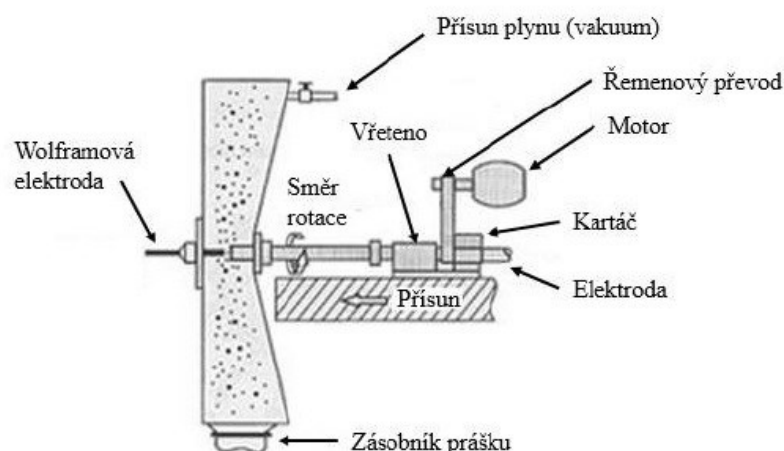


Obr. 26. Tvar a struktura částic po atomizaci vodou [33]

1.5.1.3 Atomizace odstředivou silou

Základní princip metody atomizace odstředivou silou je zobrazen na obrázku (Obr. 27). U této metody jsou v aparatuře umístěny dvě elektrody - anoda z příslušné slitiny, ze které se vyrábí prášek a wolframová katoda. „Přiložením napětí vzniká mezi elektrodami oblouk a dochází k natavení povrchu slitinové elektrody. Rotací této elektrody (1000 až 20000 ot.min⁻¹) se kapky nataveného kovu rozprašují v objemu tanku, který má chlazený plášť.“ [33]

Vliv na velikost částic mají rotační rychlost a hustota taveniny. S rostoucí rotační rychlostí se kapky zmenšují a naopak s rostoucí hustotou taveniny se kapky zvětšují. Hotové atomizované částice prášku mají sférický tvar a jejich střední velikost je 150 - 250 μm . [33]



Obr. 27. Atomizace odstředivou silou [36]

1.5.2 Vlastnosti a charakterizace kovového prášku

Důležitým faktorem při výběru kovového prášku pro aditivní technologie výroby jsou jeho vlastnosti. Většina základních vlastností prášku závisí na jeho způsobu výroby a následných úpravách. Při výběru kovového prášku je velmi důležitá kontrola jeho vlastností. Jak uvádí Skotnicová [33]: „čím lépe bude možné kontrolovat vlastnosti výchozího práškového materiálu, tím přesněji bude možné zhotovit konečný výrobek, s menšími dovolenými odchylkami jeho vlastností.“

Vlastnosti kovových prášků lze rozdělit na:

- základní vlastnosti;
- technologické vlastnosti;
- sdružené vlastnosti. [33]

Mezi základní vlastnosti kovových prášků lze zařadit velikost a tvar zrn, distribuce velikosti částic, mikrostruktura, mikrotvrdost, pórovitost částic, měrný povrch částic.

Mezi technologické vlastnosti kovových prášků lze zařadit sypanou hustotu, lisovatelnost, tekutost, sypaný objem, objem po střešení, hmotnost po střešení, slisovatelnost, slinovatelnost a krycí schopnost prášku. [33]

Mezi sdružené vlastnosti kovových prášků lze zařadit elektrickou a tepelnou vodivost, magnetické vlastnosti, teplotu tání a strukturu krystalů. [33]

1.5.3 Kovové práškové materiály vhodné pro Laser Beam Melting

Kovové prášky pro metodu Laser Beam Melting musí splňovat určité vlastnosti. Tyto materiály musí snadno uvolňovat vzduch, po rozprostření na lůžko musí být vrstva jednotná, homogenní a bez vzduchových kapes. Tyto aspekty zajistí, aby konečný výrobek odpovídal definované kvalitě. [32]

Kovové prášky vhodné pro metodu Laser Beam Melting lze rozdělit do dvou skupin:

- jednosložkové;
- vícesložkové. [32]

1.5.3.1 Kovové prášky - jednosložkové

Jednosložkové kovové prášky jsou vyrobeny z jednoho druhu kovového materiálu.

Ocelové prášky

Ocel je nejpoužívanějším materiálem ve strojírenství, proto ocelový prášek lze řadit mezi jednosložkové materiály, i když se nejedná o jednosložkový materiál. Základem ocelového prášku je železo, které dále obsahuje legující prvky, jako jsou uhlík, nikl, chrom, měď a jiné.

Výrobky z nástrojových nebo nerezavějících ocelí mají vysokou tvrdost a vysokou tažnost. Díky aplikaci legujících prvků lze přesně nastavit požadované vlastnosti materiálu. Korozi vzdorné slitiny se používají v lékařských aplikacích, automobilovém a leteckém průmyslu. Nástrojová ocel se pak používá především pro výrobu nástrojů a forem. Dobré mechanické vlastnosti výrobků je činí vhodnými pro použití na místech, která jsou vystavena silnému namáhání. Mezi tyto vlastnosti patří zejména odolnost vůči opotřebení a možnosti použití při vysokých provozních teplotách. [37]

Hliníkové prášky

Hliník je jednoduše zpracovatelný na kovový prášek a je používán například v tenkostěnných součástech se složitými geometriemi. Mezi dobré vlastnosti výrobků z hliníkového prášku patří dobrá elektrická vodivost. Díky své nízké pevnosti se používá především ve slitinách. [37]

Titanové prášky

Podobně jako u ocelových a hliníkových prášků se titanový prášek používá převážně ve formě práškových směsí, ale používá se i čistý titanový prášek. Čistý titan je používán především v chemickém průmyslu, procesním inženýrství nebo v lékařských technologiích a kdekoli je nutná zejména dobrá odolnost proti korozi. Další výhodou je nízká tepelná roztažnost titanu. Díky bio-kompatibilitě je také titan vhodný pro použití v lékařských aplikacích. [37]

1.5.3.2 Kovové prášky - vícesložkové

Pro metodu aditivní technologie výroby Laser Beam Melting jsou častěji využívány vícesložkové kovové prášky. Těchto vícesložkových kovových prášků je na trhu velké množství. Liší se chemickým složením, ale také mechanickými vlastnostmi. Vícesložkový prášek lze vyrábět dvěma odlišnými způsoby a to přímo ze slitiny, nebo smícháním více druhů prášků. Vícesložkový prášek má vždy jeden hlavní prvek (největší hmotnostní podíl) a další legující prvky, které zlepšují jeho vlastnosti. [32]

Směsi prášků na bázi železa

Základem těchto prášků je železo, ke kterému jsou za účelem zlepšení vlastností přidány legující prvky. Společnou vlastností těchto prášků a také výrobků jsou magnetické vlastnosti. [32]

Nejčastěji používanou směsí pro prášky na bázi železa je směs Fe-Ni (železo - nikl), která se vyznačuje výbornými magnetickými, mechanickými a elektrickými vlastnostmi. Další používanou směsí je Fe-Cr-Al (železo - chrom - hliník), která se vyznačuje dobrou odolností proti oxidaci i při vysokých provozních teplotách, právě díky příměsi chromu a hliníku. Směs Fe-SiC (železo - karbid křemíku) se vyznačuje vysokou tvrdostí, kterou si zachovává i při vysokých teplotách. [32]

Směsi prášků na bázi hliníku

Typické přísady legování jsou křemík, hořčík, měď nebo mangan. V legovaných formách se hliník používá k výrobě komponent s vysokou pevností a vysokou dynamickou zatížitelností. Komponenty jsou optimální pro použití v leteckém a automobilovém průmyslu. [37]

Směsi prášků na bázi titanu

Díky vysoké pevnosti a relativně nízké hustotě, stejně jako vynikající odolnosti proti korozi, mají výrobky z titanu uplatnění v širokém spektru aplikací. Vlastnosti směsí jsou ovlivněny zejména titanem. [32]

Nejběžnější slitina titanu je Ti6Al4V, kde jsou legujícími prvky vanad a hliník. Hlavním důvodem jsou dobře vyvážené mechanické vlastnosti, výborná odolnost proti korozi a dlouholetá zkušenost s tímto materiálem. Další používanou směsí je Ti6Al7Nb, kde niob zlepšuje zejména biokompatibilitu. Jako další legující prvky pro směsi titanového prášku lze použít hliník, boridy titanu nebo nikl. [37]

Směsi prášků na bázi niklu

Směsi prášků na bázi niklu jsou díky niklu zejména odolné proti zásadám, jsou feromagnetické a dobře svařitelné. Jako legující prvek pro tyto směsi lze použít titan. Výrobky této směsi mají vysokou pevnost a tažnost. Používají se zejména jako implantáty v biomedicíně s výbornou mechanickou stabilitou v kostní tkáni. [37]

Směsi prášků na bázi kobaltu

Jako legujícími prvky v prášcích na bázi kobaltu lze použít chrom a molybden. Tyto směsi jsou biokompatibilní a používají se v lékařství pro výrobu implantátů a protéz. Tento materiál je také používán pro aplikace v prostředí s vysokou teplotou, například v tryskových motorech. [37]

2 KONTAMINACE POVRCHU DUTIN FOREM

Během procesu vulkanizace kaučukové směsi v dutině formy dochází ke kontaminaci povrchu dutiny formy. Tato kontaminace má negativní vliv na vzhled a fyzikální vlastnosti výrobku, ale také způsobuje problémy s uvolňováním výrobku z dutiny formy. Z tohoto důvodu je nezbytné pravidelné čištění formy, které prodlužuje délku výrobního cyklu, a tedy zvyšuje náklady na výrobek. Při čištění dutiny formy je určité riziko poškození formy, z tohoto důvodu je výhodné co nejvíce snížit samotnou kontaminaci formy. [38]

2.1 Faktory ovlivňující kontaminaci povrchu dutin formy

Mezi faktory, které ovlivňují kontaminaci dutiny formy lze zařadit následující:

- složení kaučukové směsi;
- geometrie vulkanizační formy;
- materiál dutiny formy, tvrdost, drsnost, povrchové úpravy;
- technologie výroby;
- technologické parametry procesu;
- počet již provedených výrobních cyklů;
- adheze kaučukové směsi, separační činidla. [39]

2.1.1 Kaučuková směs

Mezi hlavní důvody kontaminace dutiny formy lze zařadit chemické reakce mezi kaučukovou směsí a povrchem dutiny formy a obsah tuhých částic v kaučukové směsi, které mohou přilnout ke kovovému povrchu dutiny vulkanizační formy. [40]

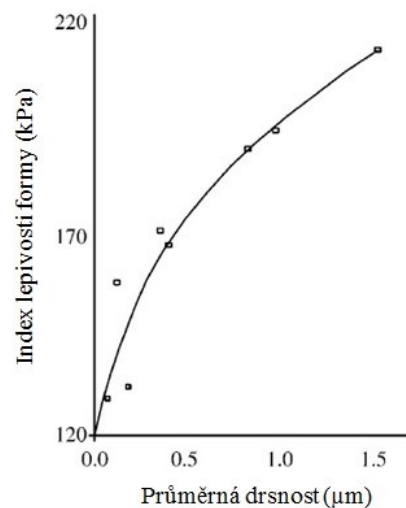
Během procesu vulkanizace se na stěnách dutiny formy usazuje vrstva, která se s každým dalším cyklem zvětšuje. Dle Baarleho [41] je při vulkanizaci pomocí síry a oxidu zinečnatého největším zdrojem znečištění, vedlejší reakční produkt, sulfid zinečnatý. Sulfid zinečnatý způsobuje usazování šedé vrstvy v dutině formy. Kontaminace může být minimalizována změnou složení kaučukové směsi nebo úpravou povrchu dutiny formy.

2.1.2 Tepelné zpracování a povrchové úpravy dutiny formy

Kontaminace formy z pohledu samotné formy je závislá na tvaru a složitosti dutiny formy, materiálu použitého na samotnou formu, tepelném zpracování, jeho povrchové úpravě a drsnosti.

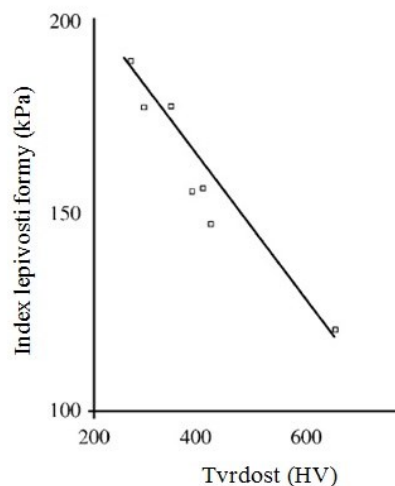
Povrch formy a její povrchová úprava má významný vliv na adhezi pryže k dutině formy a z toho plynoucí kontaminaci dutiny formy. Se zvyšující se kvalitou povrchové úpravy se stává vyjmutí vylisku z formy snadnější a tím se kontaminace dutiny formy snižuje. [38]

Vliv drsnosti povrchu dutiny formy na adhezi pryže k dutině formy je znázorněn na obrázku (Obr. 28). Se zvyšující se drsností dutiny formy se zvyšuje adheze a tím se zvyšuje kontaminace formy. Tento faktor je jeden z důvodů, proč je časté čištění formy nežádoucí. Při čištění formy může dojít ke zhoršení drsnosti povrchu dutiny formy. [39]



Obr. 28. Lepivost směsi NBR v závislosti na drsnosti dutiny formy [39]

Tvrдость povrchu formy je další faktor, který ovlivňuje adhezi pryže. Jak je znázorněno na obrázku (Obr. 29), s rostoucí tvrdostí povrchu dutiny formy se adheze k ní snižuje. [39]



Obr. 29. Lepivost směsi NBR v závislosti na tvrdosti materiálu dutiny formy [39]

2.1.3 Procesní podmínky zpracování kaučukové směsi

Velký vliv na kontaminaci dutiny formy má vulkanizační teplota a čas lisování. Kontaminace formy se zvyšuje s rostoucí vulkanizační teplotou, zvyšuje se také s rostoucí dobou lisování. Dalším faktorem ovlivňujícím kontaminaci formy je počet proběhlých cyklů. Čím více cyklů ve formě proběhlo, tím více nečistot se usazuje v dutině formy. Dalšími procesními podmínkami, které ovlivňují kontaminaci formy je teplota a vlhkost okolí. [39]

2.1.4 Adheze kaučukové vrstvy, použití separačních vrstev, povrchové napětí

Povrchové napětí formy ovlivňuje adhezi vulkanizátu k dutině formy a tím tedy kontaminaci formy. Čím vyšší je povrchové napětí formy, tím vyšší je adheze vulkanizátu k jejímu povrchu. Pro snížení tohoto efektu lze použít dva druhy separačních činidel:

- vnitřní;
- vnější. [39]

Vnější separační činidla jsou nanášena na povrch dutiny formy. Tato činidla musí být aplikována velmi často, někdy i po každém cyklu. [39]

Vnitřní separační činidla jsou látky, které jsou přidávány do kaučukové směsi za účelem snížení adheze vulkanizátu k dutině formy. Nevýhoda vnitřních separačních činidel je, že tyto látky mohou ovlivnit vlastnosti výsledného výrobku. [38]

2.2 Analýza kontaminace povrchu dutin forem

Při hodnocení znečištění dutiny formy může být informace o složení usazenin velmi přínosná. Po analyzování usazenin lze změnit složení kaučukové směsi tak, aby byla snížena kontaminace dutiny formy. Za účelem zjištění složení usazenin lze použít metodu infračervené spektroskopie, nebo Ramanovu spektroskopii.

2.2.1 FTIR

Infračervená spektroskopie je analytická metoda určená pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických a anorganických látek. Tato metoda patří do skupiny nedestruktivních analytických metod, kdy vzorek není analýzou nijak poškozen. Principem infračervené spektroskopie je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem. Při průchodu vzorkem dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekul v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. [42]

Infračervená spektroskopie s Furierovou transformací (FTIR) převede interferometricky získaný signál na infračervené spektrum pomocí Furierovy transformace. Při měření pomocí FTIR spektrometru dopadá na detektor vždy celý svazek záření, díky čemuž je možné měření i silně absorbujících vzorků. Také lze provádět měření s nastavci pro analýzu pevných i kapalných vzorků v odraženém světle. [43]

2.2.2 RAMAN

Ramanova spektrometrie je metodou vibrační molekulové spektroskopie. Tato metoda je vhodná pro identifikaci látek, při určování jejich složení a struktury. Ramanovu spektrometrii lze využít pro analýzu pevných látek, kapalin, plynů, povrchů nebo při analýze biologických systémů. [44]

Podstatou Ramanova rozptylu je zářivý dvou-fotonový přechod mezi dvěma stacionárními vibračními stavy molekuly, jejichž energie jsou E_1 a E_2 , vyvolaný interakcí s fotonem dopadajícího záření a provázený vyzářením fotonu rozptýleného záření. Tento rozptylový efekt si lze zjednodušeně představit jako současnou absorpci fotonu budícího záření molekulou, kdy molekula přechází na virtuální energetickou hladinu, a emisi sekundárního fotonu tak, aby byla splněna podmínka zachování energie. [44]

3 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU DUTIN FOREM

Pojem jakost povrchu lze chápat jako přesnost rozměru, přesnost geometrického tvaru, polohy a drsnosti povrchu. K těmto hodnotám lze připojit ještě sledování chemických a fyzikálních změn vlastností materiálu v povrchové vrstvě vyrobené součásti, vzniklých v důsledku vlastní výroby součásti. [45]

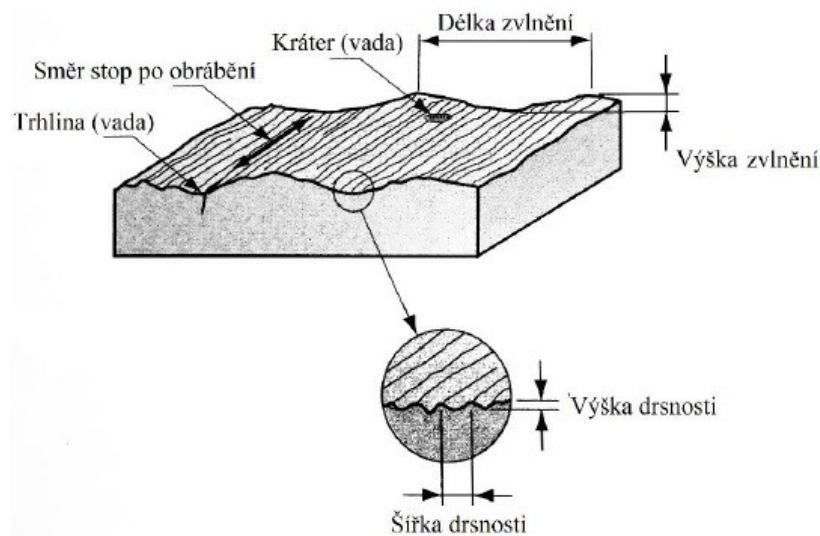
Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1.2. Tepelné zpracování a povrchové úpravy dutiny formy, povrch formy potažmo drsnost povrchu dutiny formy má významný vliv na adhezi pryže k dutině formy a z toho plynoucí kontaminaci formy.

3.1 Základní charakteristiky jakosti povrchu

Jakost povrchu se skládá z náhodných nebo opakujících se odchylek od jmenovitého povrchu. Jakost povrchu je definována čtyřmi parametry:

- drsnost povrchu;
- vlnitost
- směr stop po obrábění
- vady povrchu [46]

Na obrázku (Obr. 30) jsou zobrazeny parametry jakosti povrchu. Drsnost povrchu lze definovat jako nerovnost povrchu, která vzniká při výrobě součásti. Je ovlivněna technologií a technologickými podmínkami při výrobě součásti. Vlnitost povrchu lze definovat jako nerovnosti povrchu mnohem většího rozestupu. Zvlnění je ovlivněno zejména pracovními pohyby obrobku, tvarovou odchylkou nástroje, kmitáním nástroje, nepřesným upnutím obrobku a dalšími technologickými vlivy. Směr stop po obrábění je určen způsobem výroby, který je použit pro výrobu součásti, obvykle z důvodu působení řezného nástroje. Vady lze definovat jako odchylky, které se vyskytují nepravidelně na povrchu. Mezi vady na povrchu lze zařadit praskliny, škrábance a vměstky. [46]



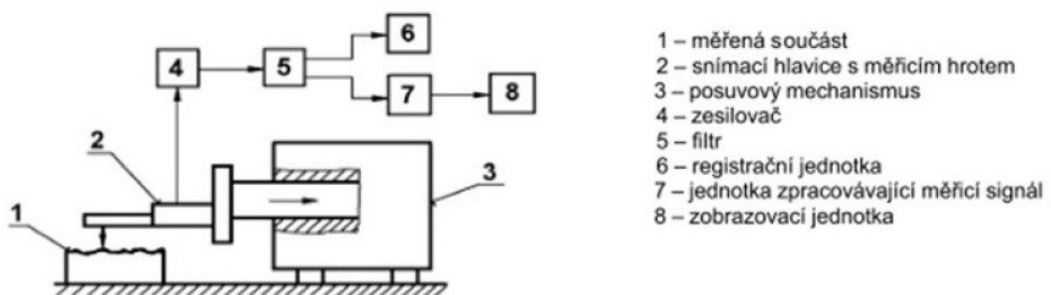
Obr. 30. Jakost povrchu [46]

3.2 Způsoby měření jakosti povrchu

Dle normy ČSN EN ISO 25178-2 lze rozdělit měření jakosti povrchu na snímání kontaktní a bezkontaktní. [47]

3.2.1 Kontaktní měření jakosti povrchu

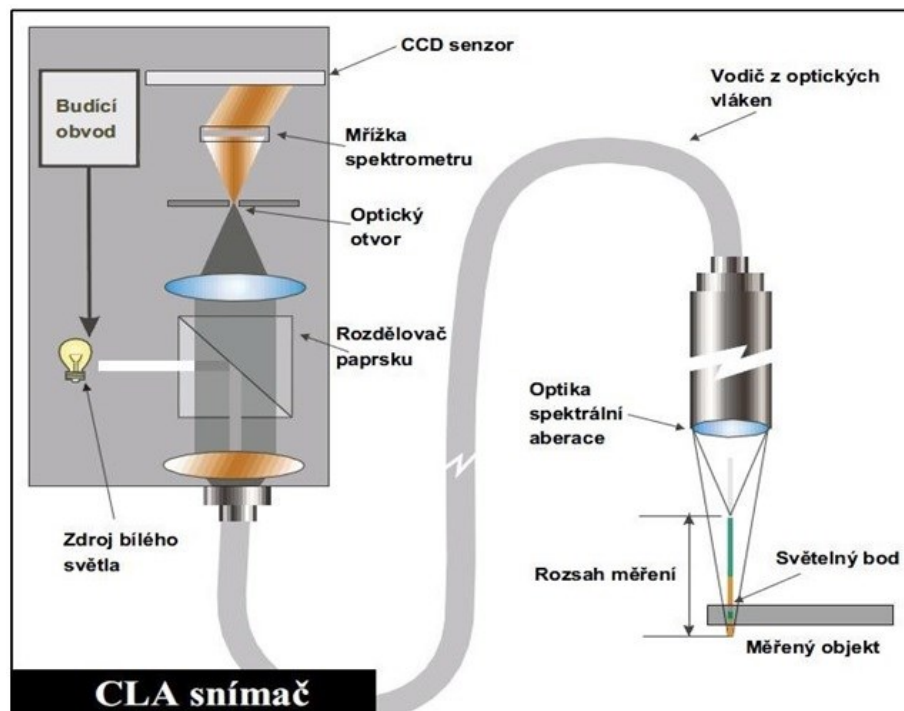
Kontaktní měřicí přístroj (Obr. 31) snímá souřadnice vyhodnocovaného povrchu pomocí speciálně upraveného hrotu a ty následně počítačově zpracovává. Kontaktní měřicí přístroj se skládá z mechanické a elektronické části. Mechanická část se skládá ze stolku, na který se umísťuje měřený předmět a rameno se snímacím hrotem. Elektronická část slouží k transformaci mechanického signálu generovaného snímacím hrotem na elektrický signál. [48]



Obr. 31. Schéma kontaktního měřicího přístroje [48]

3.2.2 Bezkontaktní snímání jakosti povrchu

Bezkontaktní snímání jakosti povrchu je využíváno především v laboratorní a vědecké praxi. Pro bezkontaktní snímání se nejčastěji využívá CLA (Chromatic Length Aberration) snímač. Základní princip této metody je zobrazen na obrázku (Obr. 32). [48]



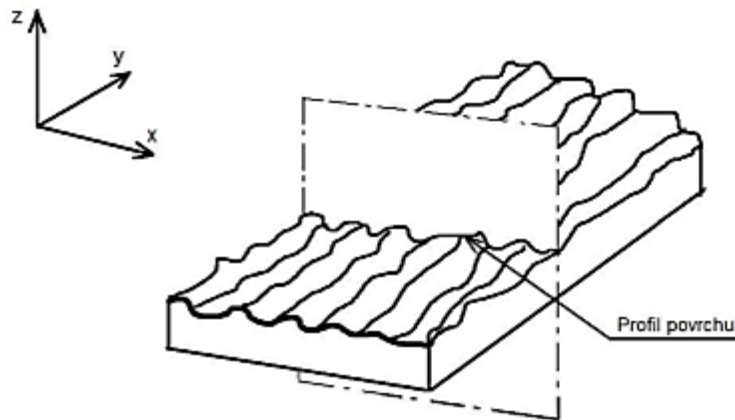
Obr. 32. Základní princip bezkontaktního snímání jakosti povrchu [48]

Bezkontaktní snímání jakosti povrchu pracuje na následujícím principu. Bílé světlo je pomocí optiky rozloženo dle vlnových délek, v každém bodě snímaného povrchu je pak zaostřena pouze určitá vlnová délka. Světlo se odráží od povrchu měřeného objektu a prochází otvorem, který propustí pouze světlo zaostřené vlnové délky. Světlo je vychýleno pomocí spektrometru a dopadá na maticový senzor, kde je každému bodu připravena prostorová poloha. Tato poloha je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. Nasnímané prostorové polohy jsou zpracovány softwary, které umožňují 3D zpracování dat, včetně 3D vizualizace. [48]

3.3 Vyhodnocování dat o jakosti povrchu

Norma ČSN EN ISO 4288 se zabývá se postupy a pravidly pro určování struktury povrchu profilovou metodou. Hodnocení kvality povrchu profilovou metodou se provádí na základním profilu, který vychází z úplného profilu měřeného vzorku. Profil povrchu vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a roviny, která je kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným profilem

ve správném směru (Obr. 4) je základním zdrojem informací pro posuzování struktury povrchu. [49]

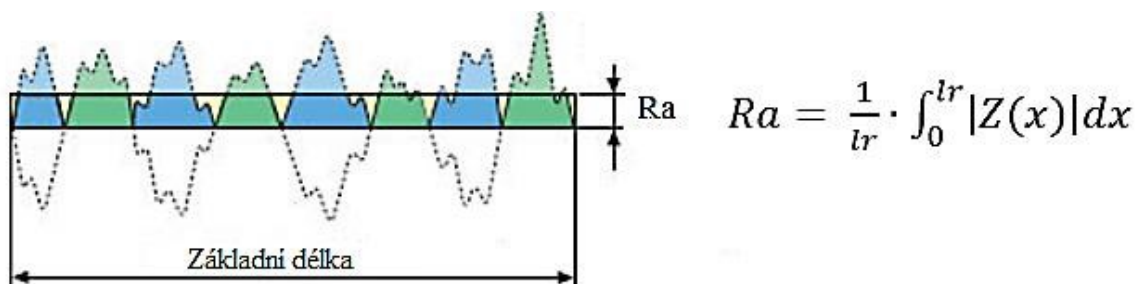


Obr. 33. Profil povrchu [50]

Mezi nejčastěji používané a zároveň také nejznámější parametry vypočítané z profilu drsnosti lze zařadit parametry R_a a R_z . [51]

3.3.1 Parametr drsnosti R_a

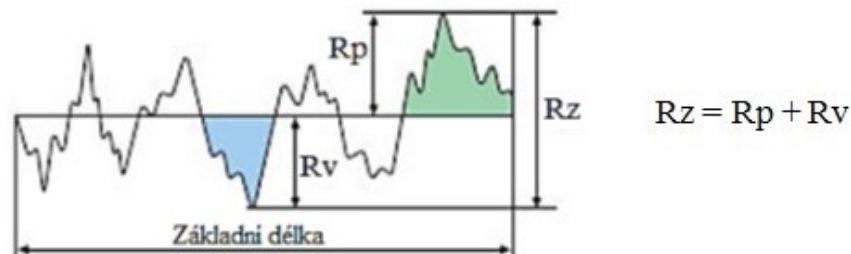
Střední aritmetická úchylka profilu R_a je vypočítána jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (Obr. 34). Není tedy brán ohled na vertikální směr odchylek, tedy pomocí parametru R_a nelze určit, zda mají odchylky charakter prohlubně nebo výstupků. Hodnota parametru drsnosti R_a není významně ovlivňována ojedinělými odchylkami, může tedy dojít k zanedbání velkého výstupku nebo velké prohlubně. [52]



Obr. 34. Parametr drsnosti R_a [53]

3.3.2 Parametr drsnosti Rz

Parametr drsnosti Rz je vypočítán jako součet výšek nejvyššího výstupku profilu Rp a nejnižší prohlubně profilu Rv v rozsahu základní délky l_r (Obr. 35). [52]



Obr. 35. Parametr drsnosti Rz [53]

3.3.3 Parametry prostorového hodnocení drsnosti povrchu

Prostorovým hodnocením drsnosti povrchu se zabývá norma ČSN EN ISO 25178-2. Parametry prostorového hodnocení drsnosti povrchu lze rozdělit do čtyř skupin: výškové, délkové, hybridní a funkční. Skutečnost, že parametry jsou definovány pro plochu, ne pro jeden profil, jsou označovány písmenem S (Surface), podobně jako jsou parametry drsnosti povrchu označeny písmenem R (Roughness, například: Ra, Rz, Rp, Rv). [54]

Výškové parametry analogicky odpovídají parametrům 2D. Jako příklad lze uvést následující parametry prostorového hodnocení drsnosti povrchu. Parametr Sa odpovídá parametru Ra, parametr Sp odpovídá parametru Rp, parametr Sv odpovídá parametru Rv a parametr Sz odpovídá parametru Rz. [54]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍLE PRÁCE

Pro diplomovou práci byly stanoveny tyto cíle:

- vypracování literární rešerše se zaměřením na aditivní technologie výroby;
- ověření kvality povrchu zkušebních tělísek vyrobených 3D tiskem různými technologickými parametry výroby lisováním;
- vyhodnocení vstupních vlastností zkušebních tělísek;
- vyhodnocení vulkanizační charakteristiky vybrané směsi a procesních parametrů lisování;
- lisování na zkušebních těliscích s monitorováním kontaminace dutiny formy po 100 a 200 cyklech pomocí metody FTIR;
- vyhodnocení výstupních vlastností zkušebních tělísek;
- diskuze výsledků provedených experimentů.

5 POPIS EXPERIMENTU

Zkušební tělíska byla vyrobena metodou aditivní technologie výroby z práškové nástrojové oceli s rozdílnou garantovanou jakostí povrchu. Do experimentu bylo také pro účely porovnání s těmito tělíska zařazeno tělísko vyrobené technologií třískového obrábění z nástrojové oceli.

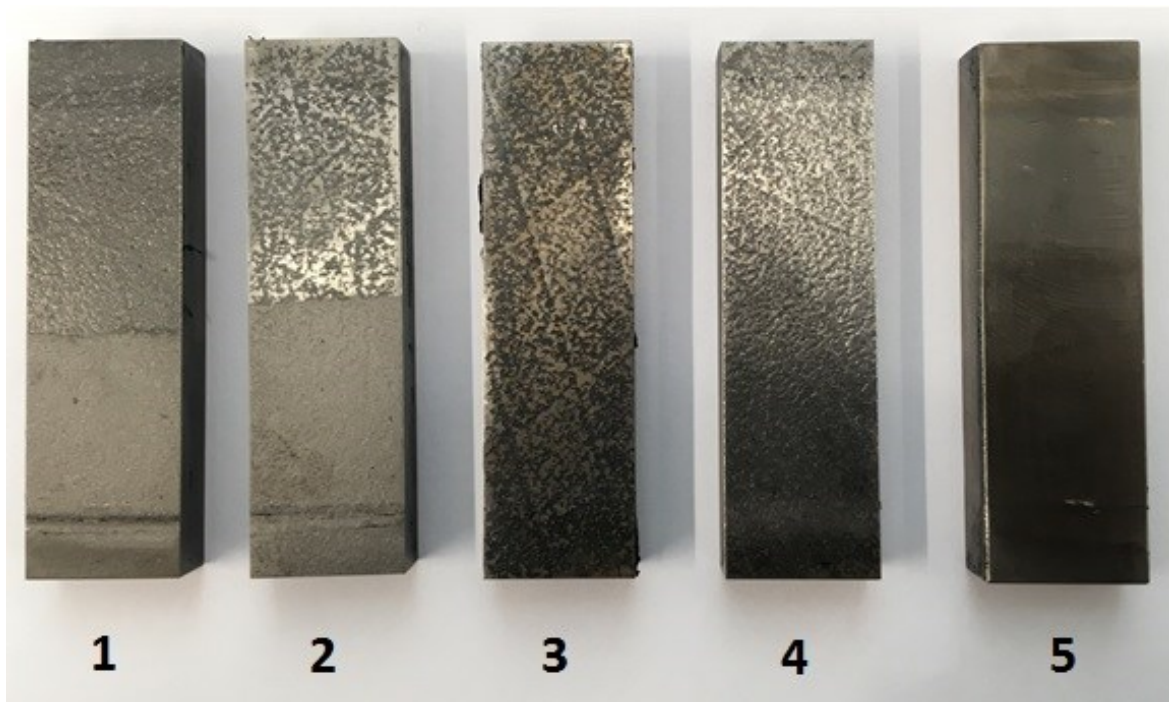
Před samotným lisováním kaučukové směsi byla u zkušebních tělísek změřena jakost povrchu, spektrální analýza FTIR a byly pořízeny fotografie zkušebních tělísek. Před zahájením lisování byla také vyhodnocena dodaná kaučuková směs a stanoveny optimální podmínky vulkanizace.

V první fázi lisování kaučukové směsi bylo provedeno 100 lisovacích cyklů. Po tomto lisování byla u zkušebních tělísek provedena spektrální analýza FTIR. Následně bylo ve druhé fázi lisování provedeno opět 100 lisovacích cyklů, dohromady bylo tedy provedeno se zkušebními tělíska 200 lisovacích cyklů.

Po lisování druhé stovky lisovacích cyklů byla u zkušebních tělísek opět změřena jakost povrchu, spektrální analýza FTIR a byly pořízeny fotografie zkušebních tělísek. Výsledky měření byly zpracovány a porovnány.

6 ANALÝZA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK

Zkušební tělíska (Obr. 36) 1 – 4 byla vyrobena metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Zkušební tělísko 5 bylo vyrobeno z nástrojové oceli 1.2780 obráběním. Zkušební tělísko č. 5 bylo do experimentu zařazeno pro porovnání se zkušebními tělísky vytištěnými. Zkušební tělíska nebyla nová, tato tělíska již byla pro lisování použita v předchozích experimentálních pracích.



Obr. 36. Zkušební tělíska

6.1 Zkušební tělíska

Zkušební tělísko č. 1 bylo vyrobeno metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Maximální jakost povrchu deklarovaná výrobcem je Ra 3,1. Celá plocha tělíska byla opracována ocelovým kartáčem a polovina tělíska byla pískována korundem 0,2. Tělísko bylo použito při lisování běhounové směsi, kde bylo provedeno 150 lisovacích cyklů. Vulkanizační podmínky lisování byly 170 °C - 4,5 minuty. Tělísko bylo vyčištěno acetonem a skladováno standardním způsobem, který odpovídá skladování forem v praxi.

Zkušební tělísko č. 2 bylo vyrobeno metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Maximální jakost povrchu deklarovaná výrobcem je Ra 6. Celá plocha tělíska byla opracována smirkovým papírem 160 a polovina tělíska byla pískována korundem 0,2. Tělísko bylo použito při lisování běhounové směsi, kde bylo provedeno 150 liso-

vacích cyklů. Vulkanizační podmínky lisování byly 170 °C - 4,5 minuty. Tělísko bylo vyčištěno acetonem a skladováno standardním způsobem, který odpovídá skladování forem v praxi.

Zkušební tělísko č. 3 bylo vyrobeno metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Maximální jakost povrchu deklarovaná výrobcem je Ra 6. Celá plocha tělíška byla opracována ocelovým kartáčem. Tělísko bylo použito při lisování běhounové směsi za použití separátoru VG 262 AEROSOL – Suchý PTFE Kluzný lak, kde bylo provedeno 150 lisovacích cyklů. Vulkanizační podmínky lisování byly 170 °C – 7 minut. Tělísko bylo vyčištěno acetonem a skladováno standardním způsobem, který odpovídá skladování forem v praxi.

Zkušební tělísko č. 4 bylo vyrobeno metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Maximální jakost povrchu deklarovaná výrobcem je Ra 3,1. Celá plocha tělíška byla opracována ocelovým kartáčem. Tělísko bylo použito při lisování běhounové směsi, kde bylo provedeno 150 lisovacích cyklů. Vulkanizační podmínky lisování byly 170 °C – 7 minut. Tělísko bylo vyčištěno acetonem a skladováno standardním způsobem, který odpovídá skladování forem v praxi.

Zkušební tělísko č. 5 bylo vyrobeno obráběním z nástrojové oceli 1.2080. Tělísko bylo použito při lisování běhounové směsi, kde bylo provedeno 150 lisovacích cyklů. Vulkanizační podmínky lisování byly 170 °C – 7 minut. Tělísko bylo vyčištěno dvěma čistícími roztoky (čirým a modrým), poté vyčištěno acetonem a skladováno standardním způsobem, který odpovídá skladování forem v praxi.

Chemické složení práškové nástrojové oceli 1.2709 v % je uvedeno v tabulce (Tab. 1).

Tab. 1. Chemické složení oceli 1.2709 v % [55]

C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Mo	Ni	Ti
≤ 0,03	≤ 0,01	≤ 0,15	≤ 0,01	≤ 0,01	8,5 - 10	≤ 0,25	4,5 – 5,2	17 - 19	0,8 – 1,2

Chemické složení nástrojové oceli 1.2080 v % je uvedeno v tabulce (Tab. 2).

Tab. 2. Chemické složení oceli 1.2080 v % [56]

C	Cr	Si	Mn	Ni
1,80 – 2,05	11,00 – 12,50	0,20 – 0,45	0,20 – 0,45	≤ 0,5

6.2 Měření jakosti povrchu

Pro měření jakosti jednotlivých zkušebních tělísek byl použit bezkontaktní optický přístroj NewView 8000 a příslušný software od společnosti Zygo (Obr. 37).



Obr. 37. Optický měřicí přístroj NewView 8000

Zkušební tělíska byla měřena optikou s 5 násobným zvětšením a fokusací 0,15. Zoom byl nastaven na hodnotu 0,5. Velikost oblasti měření byla nastavena na 3 x 3 mm. Délka měření byla nastavena na 22 s.

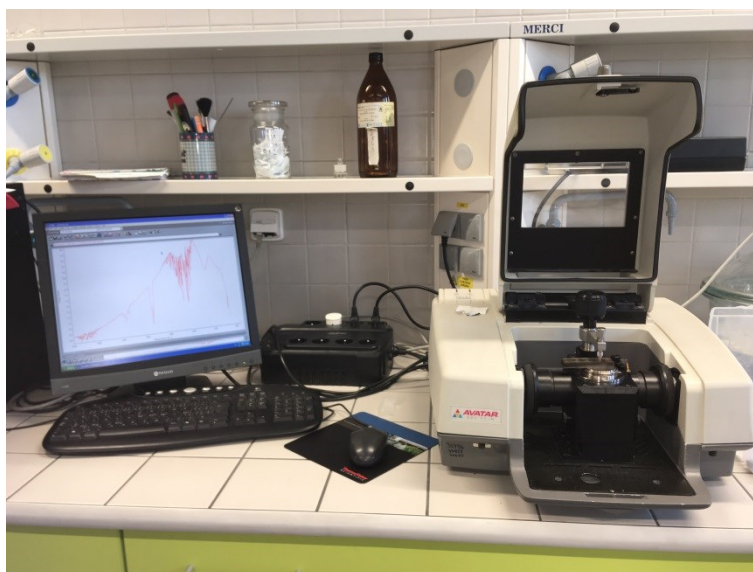
Měření samotných tělísek bylo realizováno vždy na dvou oblastech tělíska (pravá a levá část tělíska). V případě opracování poloviny tělíska pískováním byly zvoleny 4 oblasti měření (pravá a levá část každé poloviny tělíska). Vyznačení oblastí měření je uvedeno na obrázku (Obr. 38).



Obr. 38. Oblasti měření

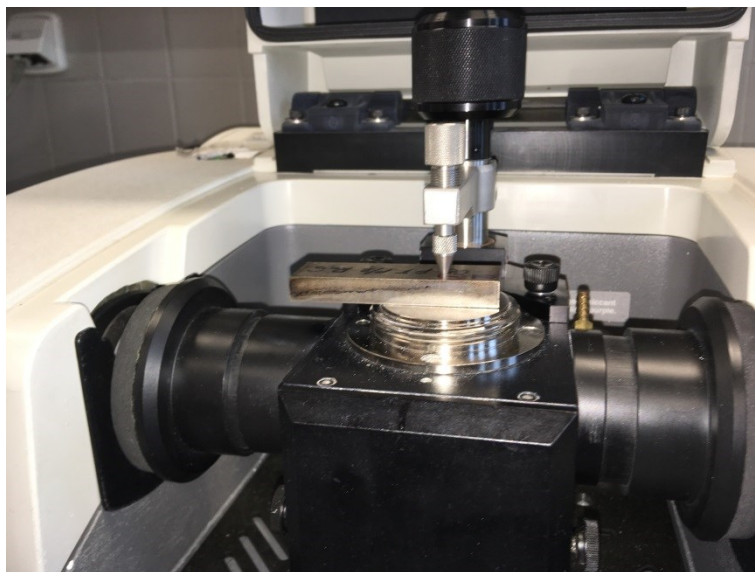
6.3 Analýza FTIR

K analýze jednotlivých zkušebních tělísek byla použita metoda infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací. Tělíska byla měřena na jedno-paprskovém spektrometru Nicolet AVATAR 320 FTIR (Obr. 39). Měřicí přístroj se ovládá přes připojený počítač s příslušným softwarem OMNIC. K měření byla použita metoda ATR. Měření spekter proběhlo v rozsahu vlnočtů $4000 - 750 \text{ cm}^{-1}$ s rozlišením 2 cm^{-1} a počtem skenů 64. K měření byl použit ZnSe krystal.



Obr. 39. Spektrometr Nicolet AVATAR 320 FTIR

Pro správné nastavení spektrometru se musí nejdříve změřit spektrum pozadí bez tělíska, následně je možné měřit dané tělísko. Měření spektra pozadí musí předcházet před každým měřeným tělískem. Naměřené hodnoty pozadí se pomocí softwaru odečítají od hodnot měřených tělísek. Po každém změřeném tělísku je nutné krystal očistit alkoholem, aby byl měřicí ATR krystal dokonale čistý. Přístroj automaticky spočítá spektrum tělíska a výsledky zobrazí na monitoru připojeného počítače.



Obr. 40. Spektometr s měřeným tělískem

7 PŘÍPRAVA KAUKČUKOVÉ SMĚSI A LISOVÁNÍ

7.1 Kaučuková směs

Pro lisování byla použita běhounová kaučuková směs. Konkrétní složení kaučukové směsi výrobce neuvádí, jedná se o výrobní tajemství. Obecné složení použité kaučukové směsi je:

- Roztokový SBR olejovaný (+ 37 dílů oleje);
- saze – 110 DSK;
- olej – 50 DSK;
- vulkanizační systém: CBS a síra v poměru 1:1.

Fyzikálně mechanické hodnoty dodané běhounové kaučukové směsi udává tabulka (Tab. 3)

Tab. 3. Fyzikálně mechanické hodnoty kaučukové směsi

Zkouška	Hodnota
Optimum vulkanizace	30/150 min/°C
Pevnost v tahu	10* MPa
Tažnost	650* %
Tvrдость	50* ShA
Hustota	1150* kg/m ³

* střední hodnota

7.2 Vulkanizační charakteristika

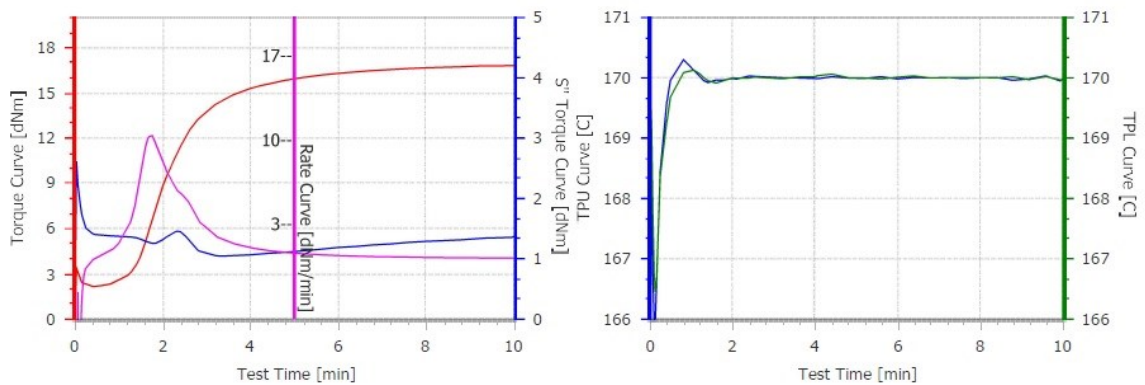
Pro stanovení vulkanizační charakteristiky byl použit rotační reometr firmy Alpha Technologies, typ Premier MDR (Obr. 41). Tento reometr se nachází na FT UTB ve zkušební laboratoři firmy Alpha Technologies.



Obr. 41. Rotační reometr Premier MDR

Vulkanizační křivka, uvedená na obrázku (Obr. 42), slouží pro stanovení základních vulkanizačních charakteristik, mezi které patří:

- ML – minimální krouticí moment, který odpovídá viskozitě kaučukové směsi;
- MH – maximální krouticí moment, charakterizující tuhost vulkanizátu;
- T_{s1} – zpracovatelská bezpečnost, která je označována jako doba kdy začíná růst krouticí moment;
- T10 – označuje čas, potřebný k dosažení 10% rozdílu mezi maximálním a minimálním krouticím momentem (MH – ML);
- T50 - označuje čas, potřebný k dosažení 50% rozdílu mezi maximálním a minimálním krouticím momentem (MH – ML);
- T90 - označuje čas, potřebný k dosažení 90% rozdílu mezi maximálním a minimálním krouticím momentem (MH – ML) a je označována jako optimum vulkanizace.



Obr. 42. Vulkanizační křivka použité běhounové směsi

Hodnoty vulkanizačních charakteristik jsou uvedeny v tabulce (Tab. 3).

Tab. 4. Vulkanizační charakteristiky použité běhounové směsi

Proměnná	Výsledek	Jednotky
ML	2,17	dNm
MH	16,82	dNm
T _{s1}	1,29	min
T10	1,40	min
T50	2,08	min
T90	4,06	min

Na základě naměřených vulkanizačních charakteristik byla stanovena doba vulkanizace pro použitou běhounovou směs o tloušťce 3 mm na 4,5 minuty při teplotě 170 °C.

7.3 Válcování

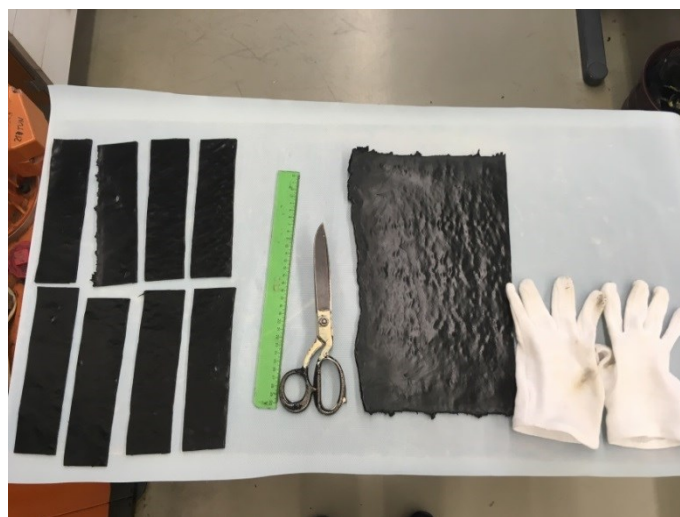
Dodaná kaučuková směs byla vyválcována na dvouválci FARREL G 2603 150 x 330 mm na požadovanou tloušťku 3,2 mm. Dvouválec byl přehřátý na teplotu 70 °C.



Obr. 43. Dvouválec FARELL G 2603 150 x 300 mm

7.4 Lisování kaučukové směsi

Aby nedošlo ke znečištění kaučukové směsi před vulkanizací, byly při práci s kaučukovými pláty používány bavlněné rukavice. Nálož pro vulkanizaci byla nastříhána do tvaru výsledného výrobku (obdélník 200 x 50 mm) a navážena (Obr. 44). Hotový výrobek vážil 41 g, nálož by měla mít o 5-10 % větší hmotnost.



Obr. 44. Připravená nálož do vulkanizační formy

Lis s vulkanizační formou byl přehřátý na požadovanou teplotu 170 °C. Doba vulkanizace byla podle vulkanizačních křivek stanovena na 4,5 minuty. Při nedodržení teploty formy, nebo času lisování by se kaučuková směs nedovulkanizovala.

7.5 Vulkanizační lis

Pro lisování byl použit hydraulický vulkanizační lis IGTT (Obr. 45), který se nachází v laboratoři UIP FT UTB.



Obr. 45. Hydraulický vulkanizační lis IGTT

7.6 Lisovací forma

Pro lisování byla použita lisovací forma, která je majetkem UVI FT UTB a byla vyrobena v rámci jiné absolventské práce (Obr. 46).



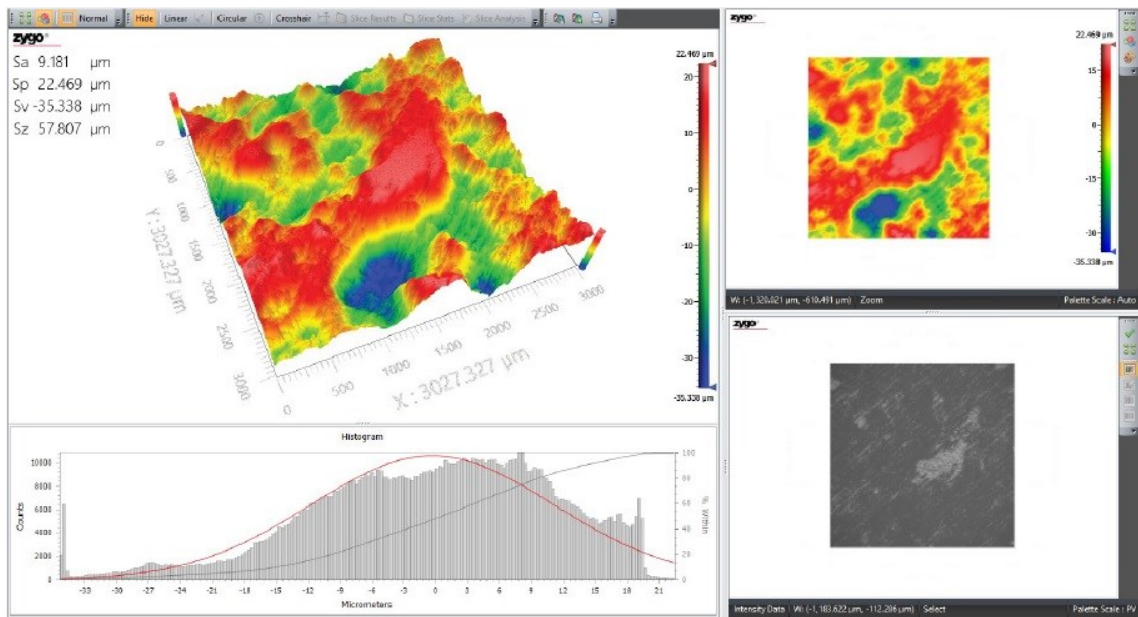
Obr. 46. Vulkanizační forma se zkušebními tělisky

8 DISKUSE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

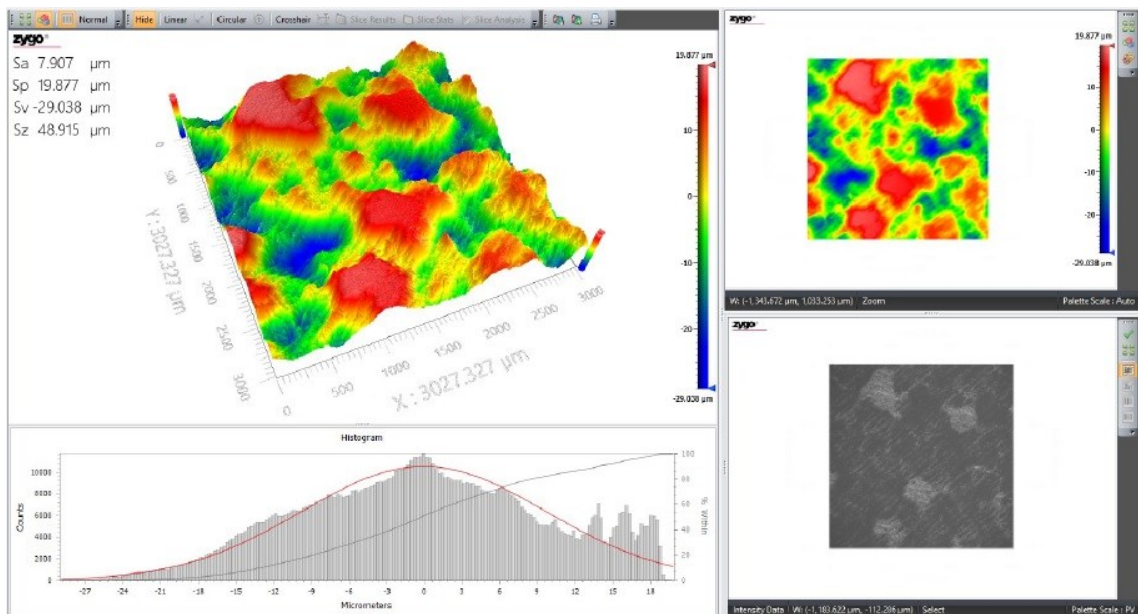
8.1 Jakost povrchu zkušebních tělísek

Zkušební tělísko č. 1:

- na obrázcích (Obr. 47, 48) jsou zobrazeny 2 výsledky měření nepískované poloviny tělíska před lisováním;

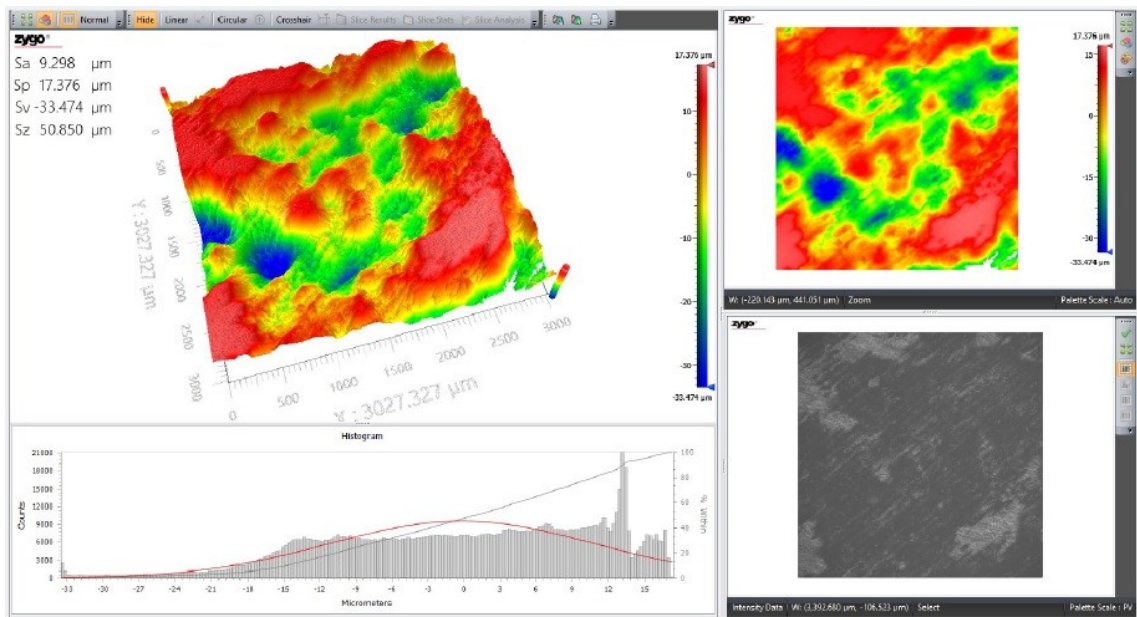


Obr. 47. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 1. oblast měření, před lisováním

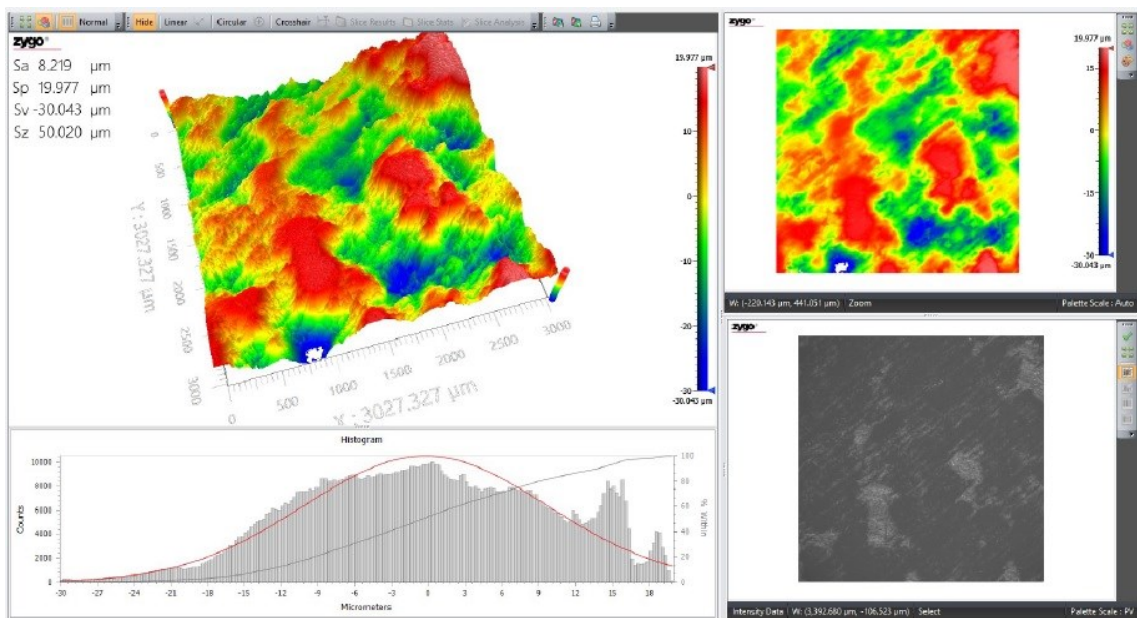


Obr. 48. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 49, 50) jsou zobrazeny 2 výsledky měření nepískované poloviny tělíska po 200 lisovacích cyklech;

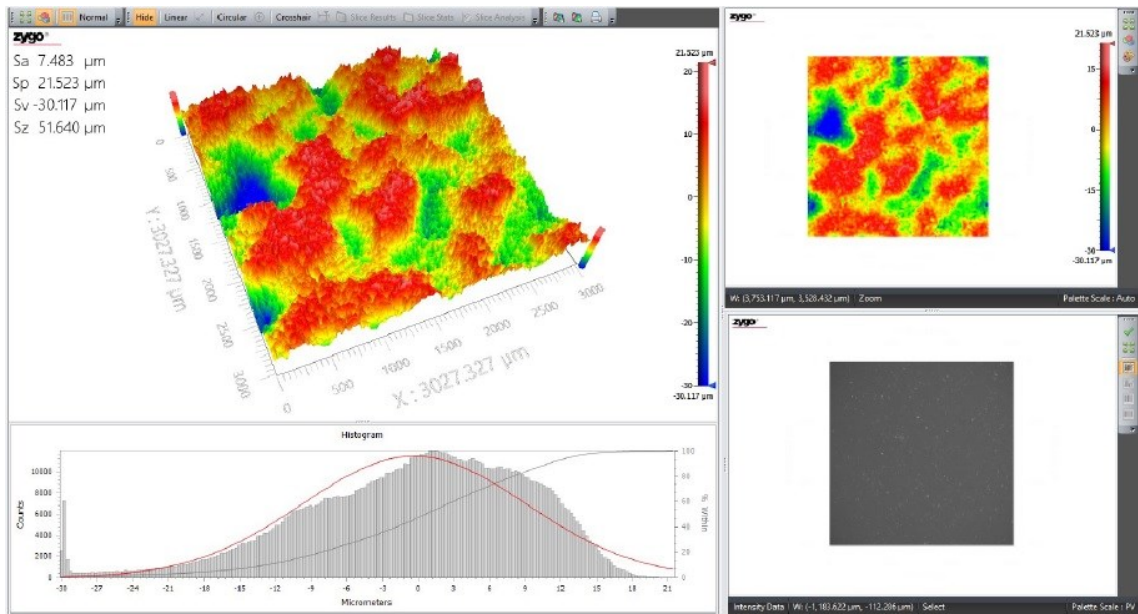


Obr. 49. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 1. oblast měření, po lisování

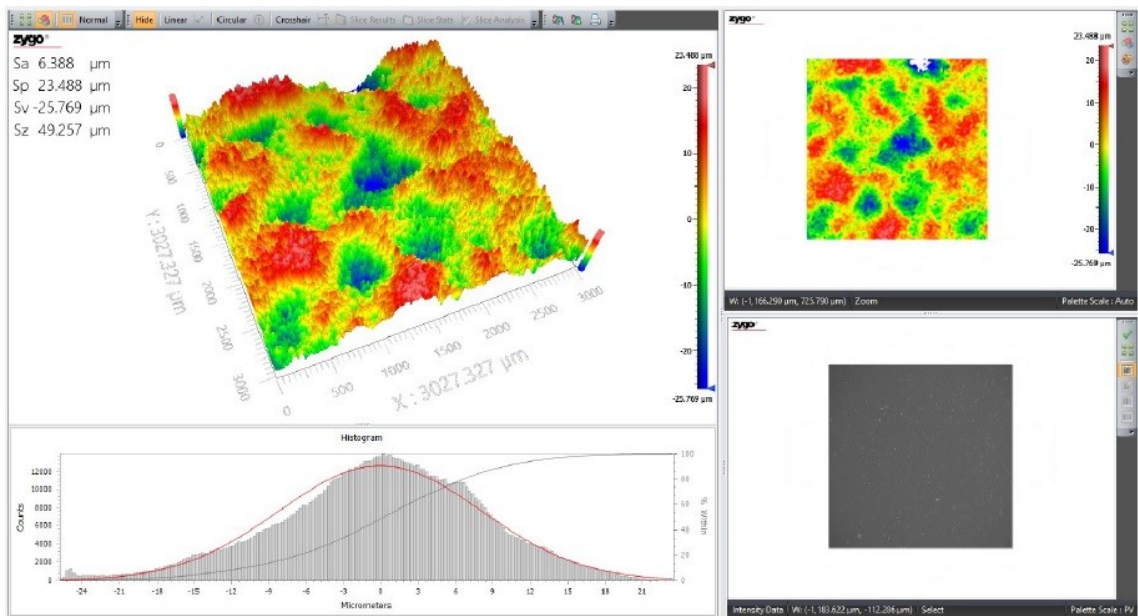


Obr. 50. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 2. oblast měření, po lisování

- na obrázcích (Obr. 51, 52) jsou zobrazeny 2 výsledky měření pískované poloviny tělíska před lisováním;

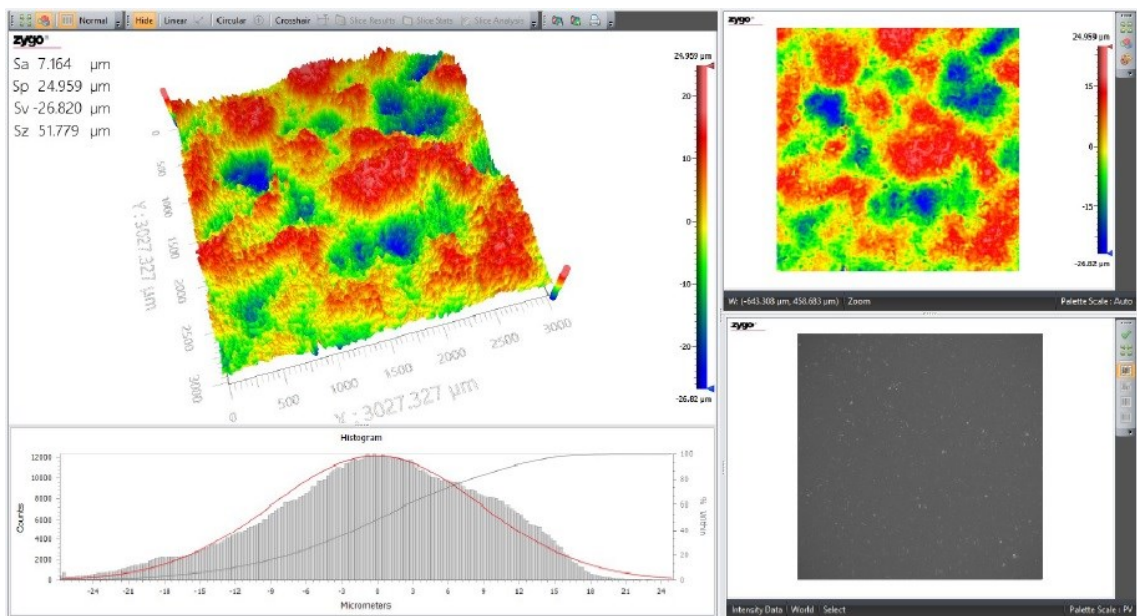


Obr. 51. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 1. oblast měření, před lisováním

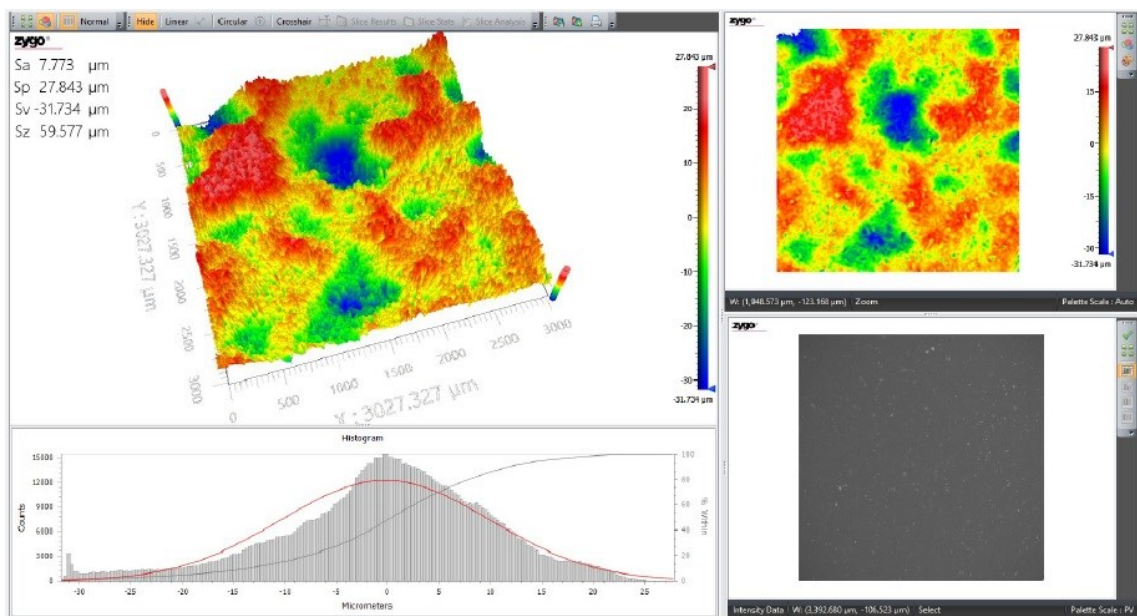


Obr. 52. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 53, 54) jsou zobrazeny 2 výsledky měření pískované poloviny tělíska po 200 lisovacích cyklech;



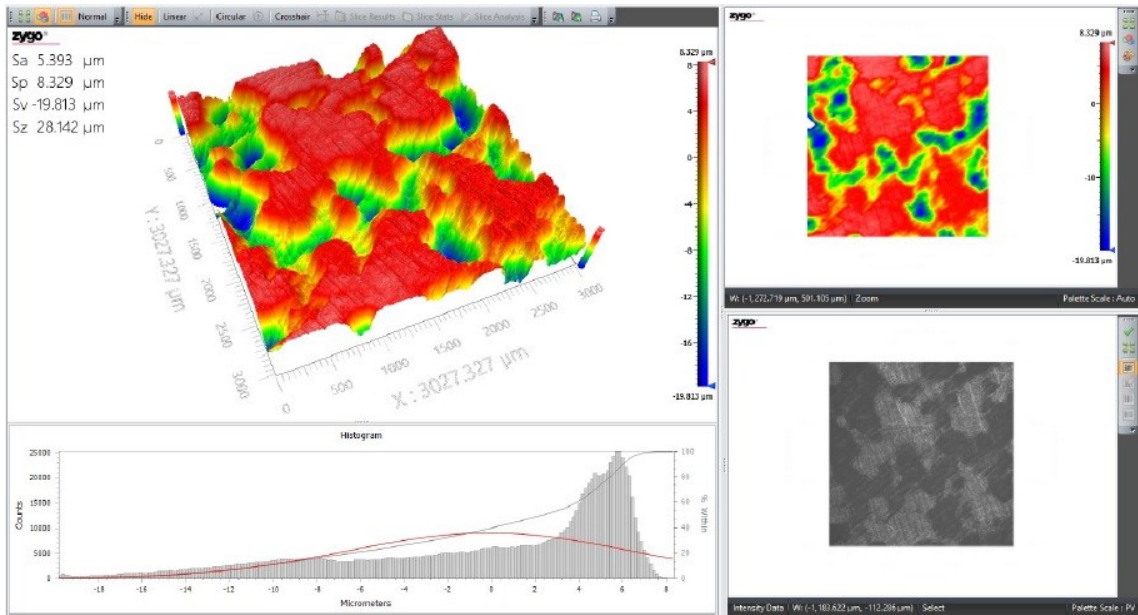
Obr. 53. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 1. oblast měření, po lisování



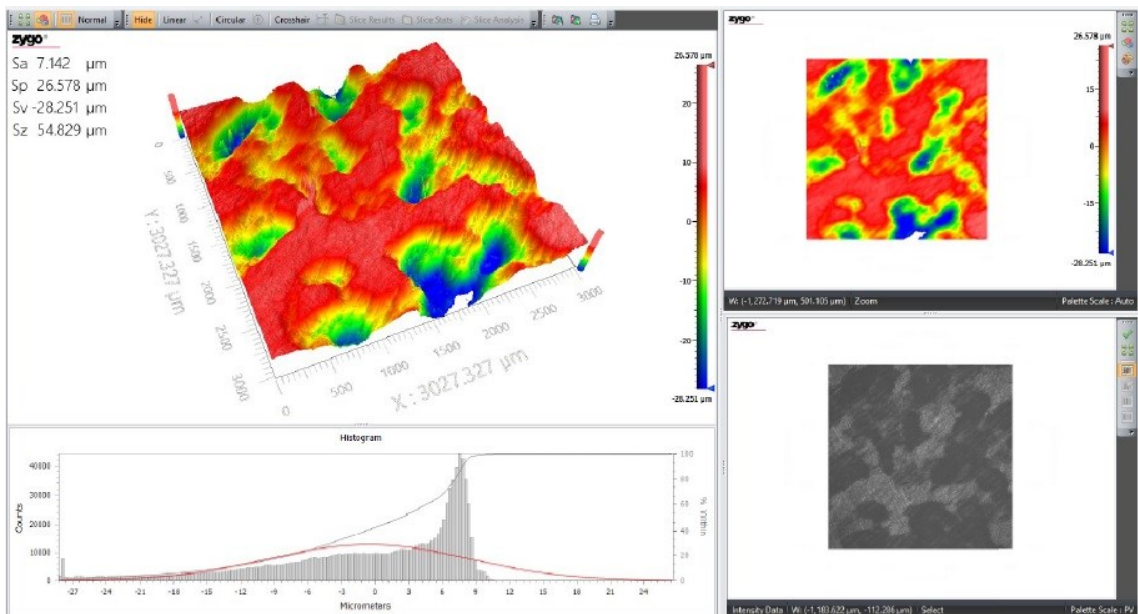
Obr. 54. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 2. oblast měření, po lisování

Zkušební tělísko č. 2:

- na obrázcích (Obr. 55, 56) jsou zobrazeny 2 výsledky měření nepískované poloviny tělíska před lisováním;

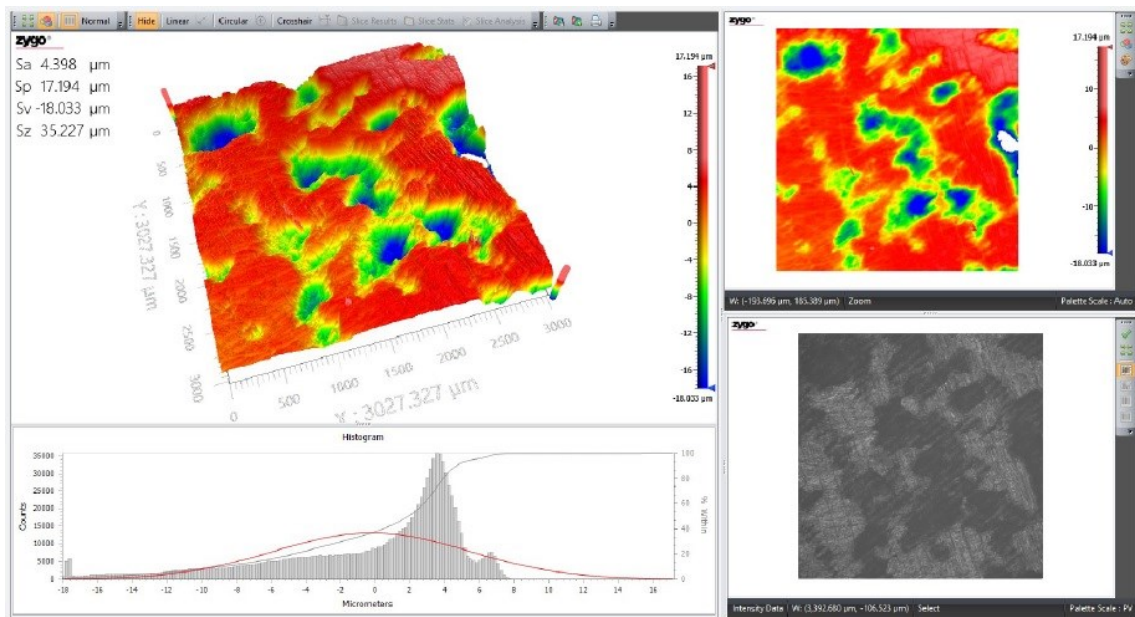


Obr. 55. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 1. oblast měření, před lisováním

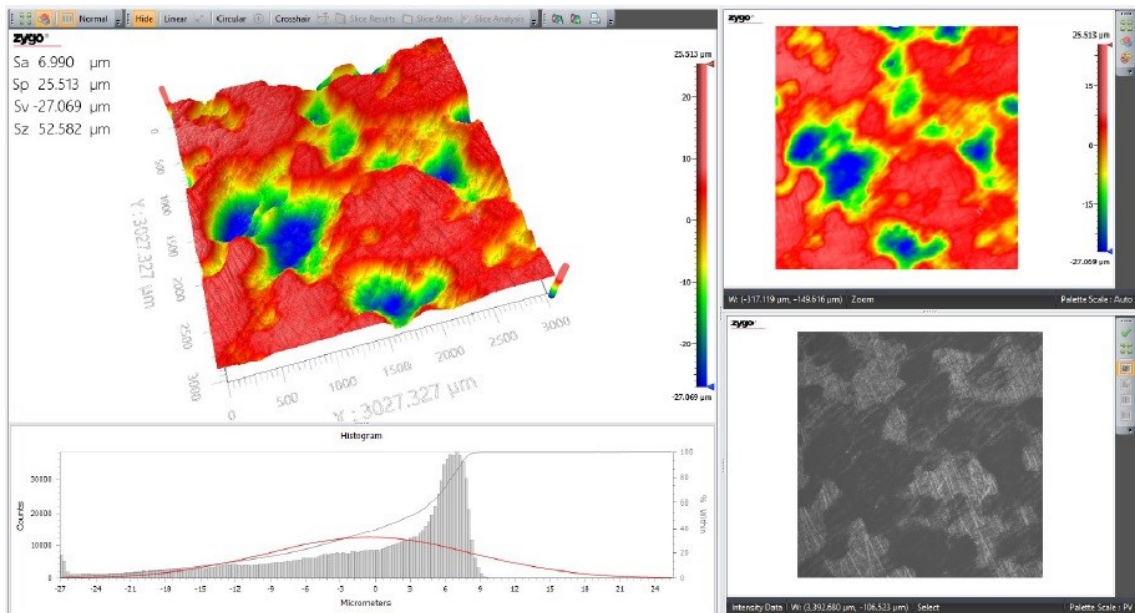


Obr. 56. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 57, 58) jsou zobrazeny 2 výsledky měření nepískované poloviny tělíska po 200 lisovacích cyklech;

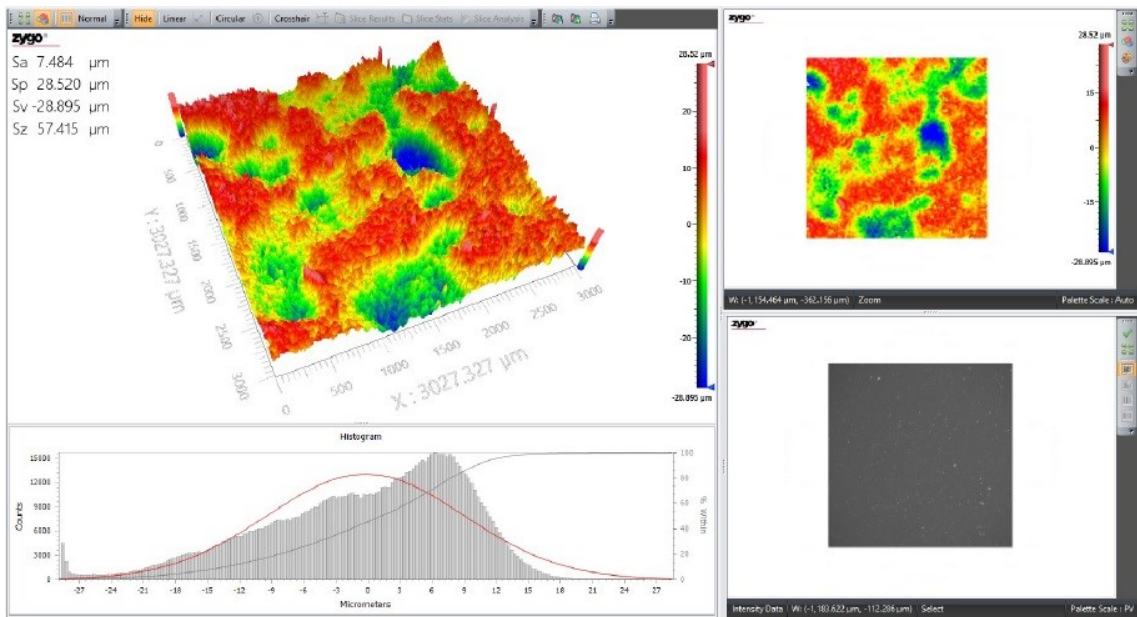


Obr. 57. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 1. oblast měření, po lisování

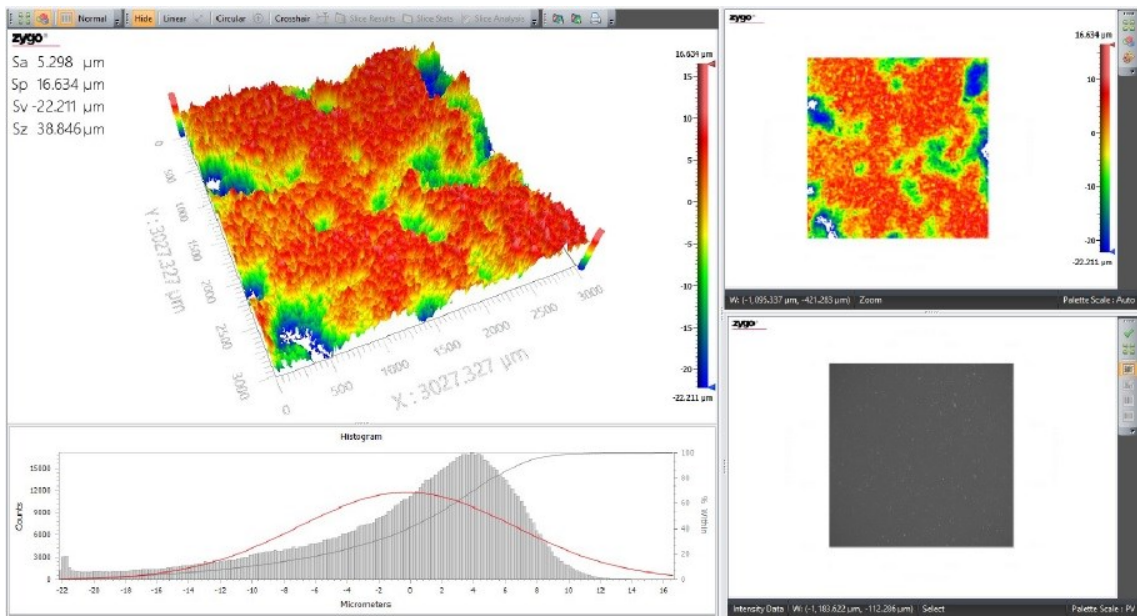


Obr. 58. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 2. oblast měření, po lisování

- na obrázcích (Obr. 59, 60) jsou zobrazeny 2 výsledky měření pískované poloviny tělíska před lisováním;

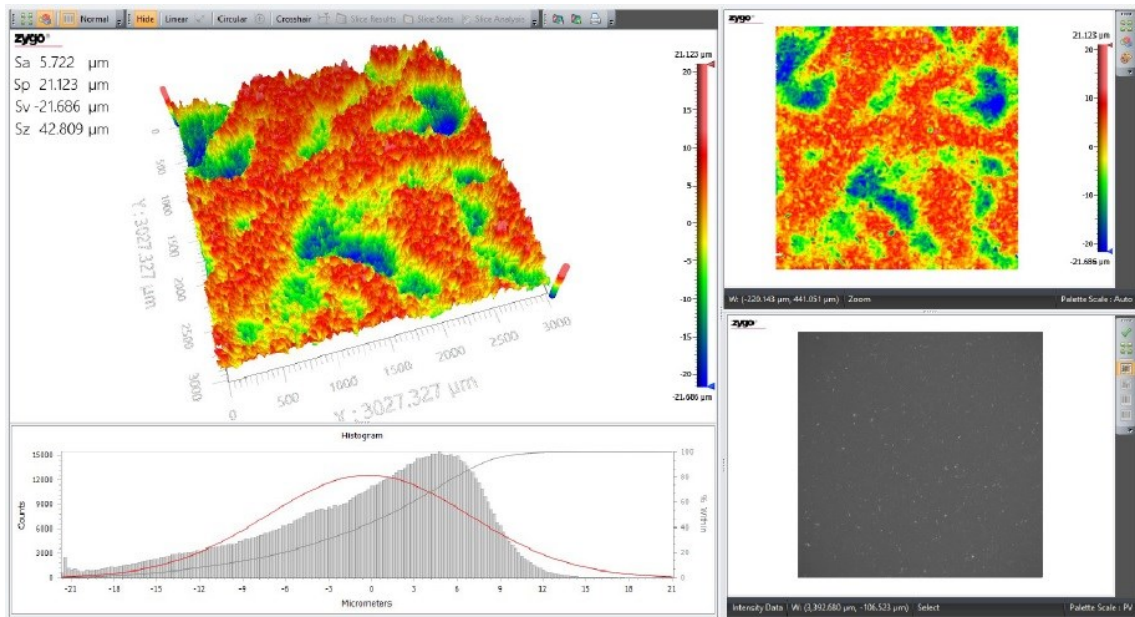


Obr. 59. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 1. oblast měření, před lisováním

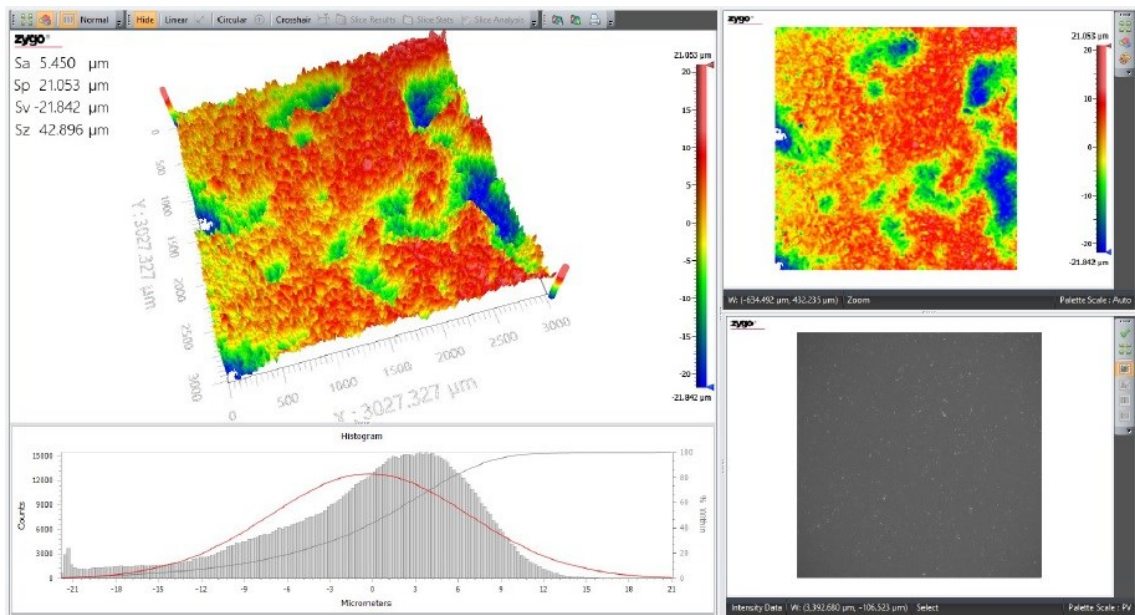


Obr. 60. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 61, 62) jsou zobrazeny 2 výsledky měření pískované poloviny tělíska po 200 lisovacích cyklech;



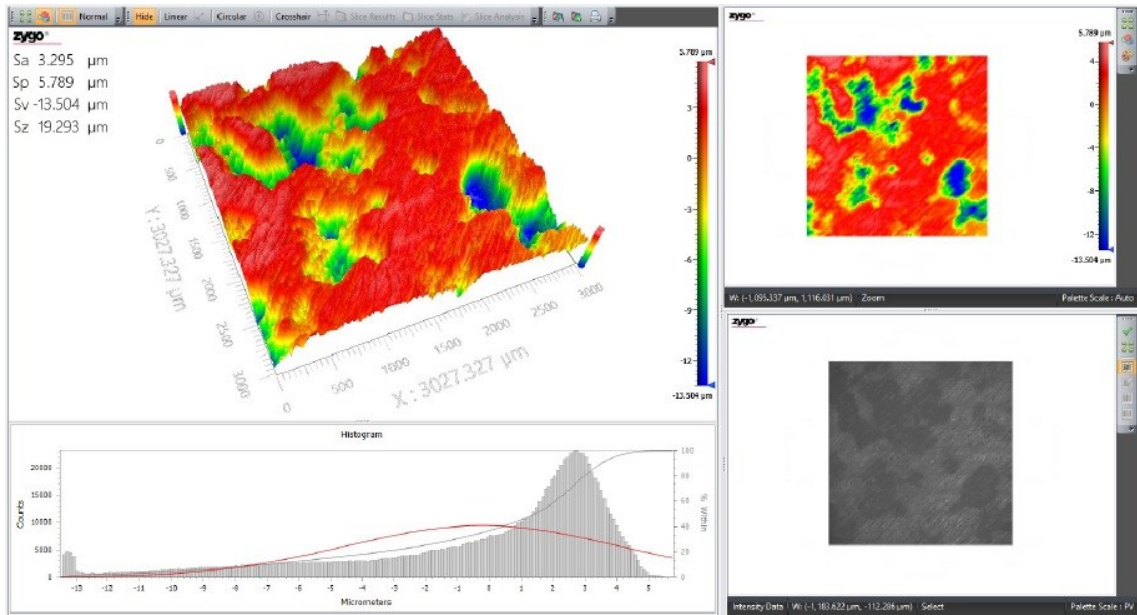
Obr. 61. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 1. oblast měření, po lisování



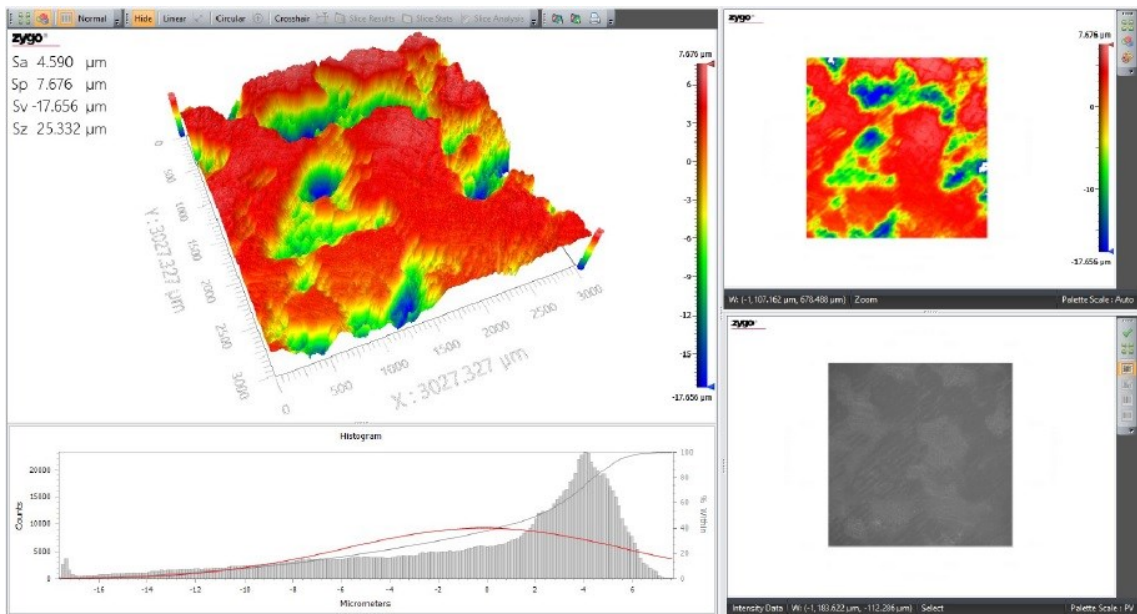
Obr. 62. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 2. oblast měření, po lisování

Zkušební tělísko č. 3:

- na obrázcích (Obr. 63, 64) jsou zobrazeny 2 výsledky měření tělíska před lisováním;

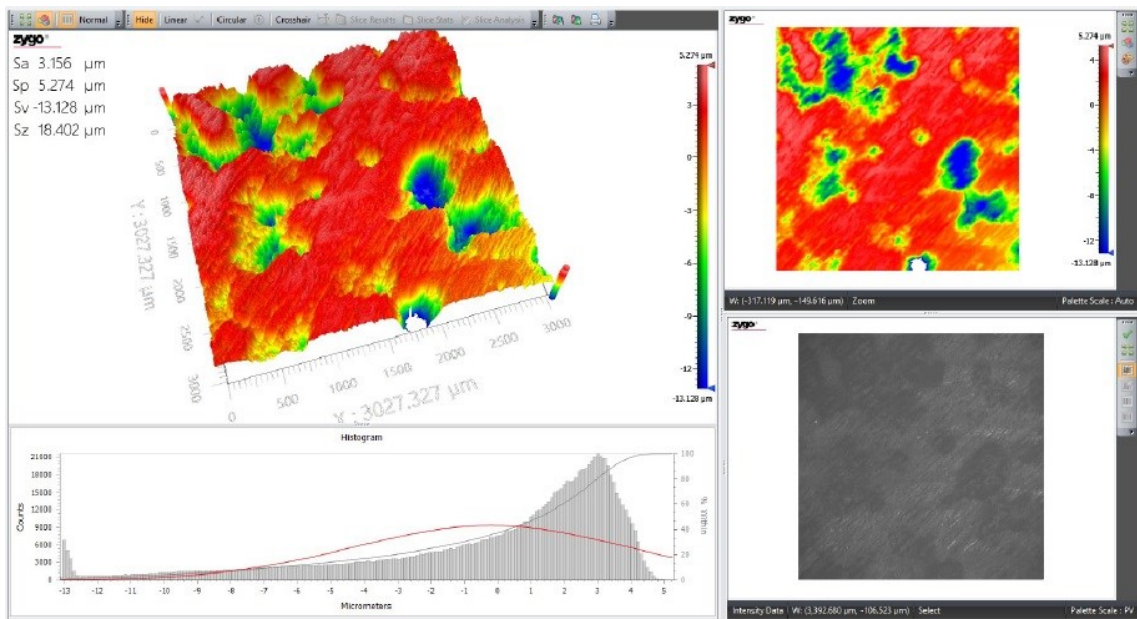


Obr. 63. Zkušební tělísko č. 3 – 1. oblast měření, před lisováním

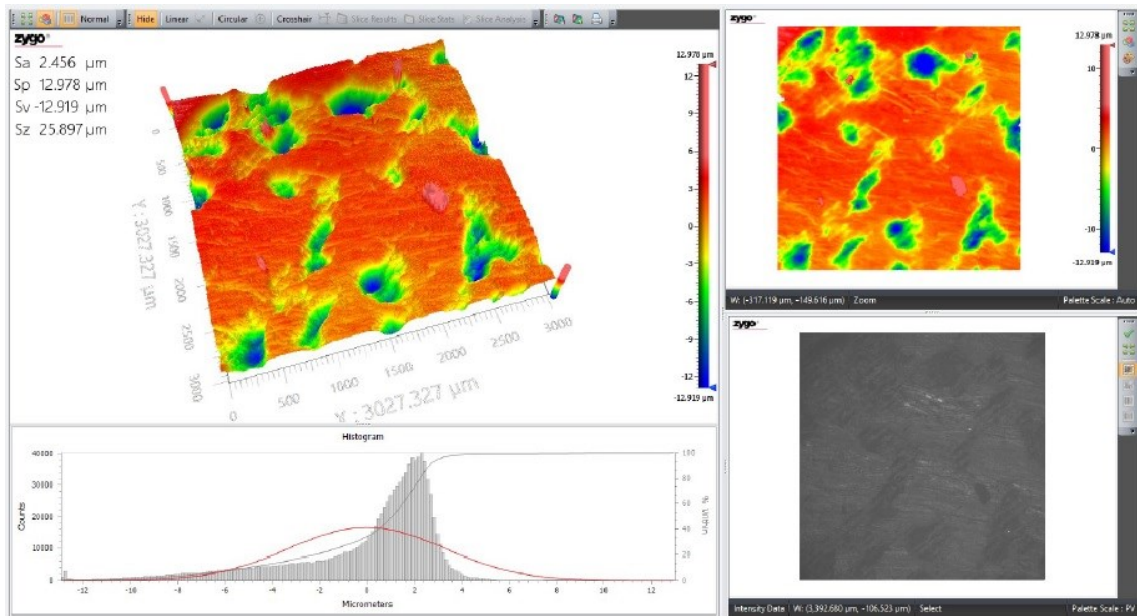


Obr. 64. Zkušební tělísko č. 3 – 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 65, 66) jsou zobrazeny 2 výsledky měření tělíska po 200 lisovacích cyklech;



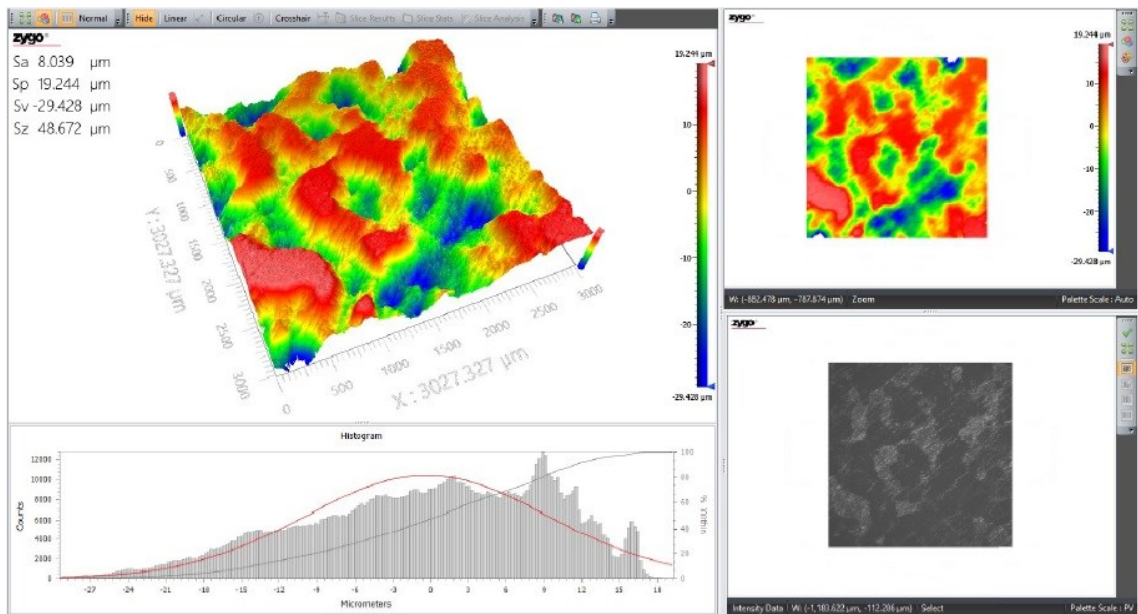
Obr. 65. Zkušební tělísko č. 3 – 1. oblast měření, po lisování



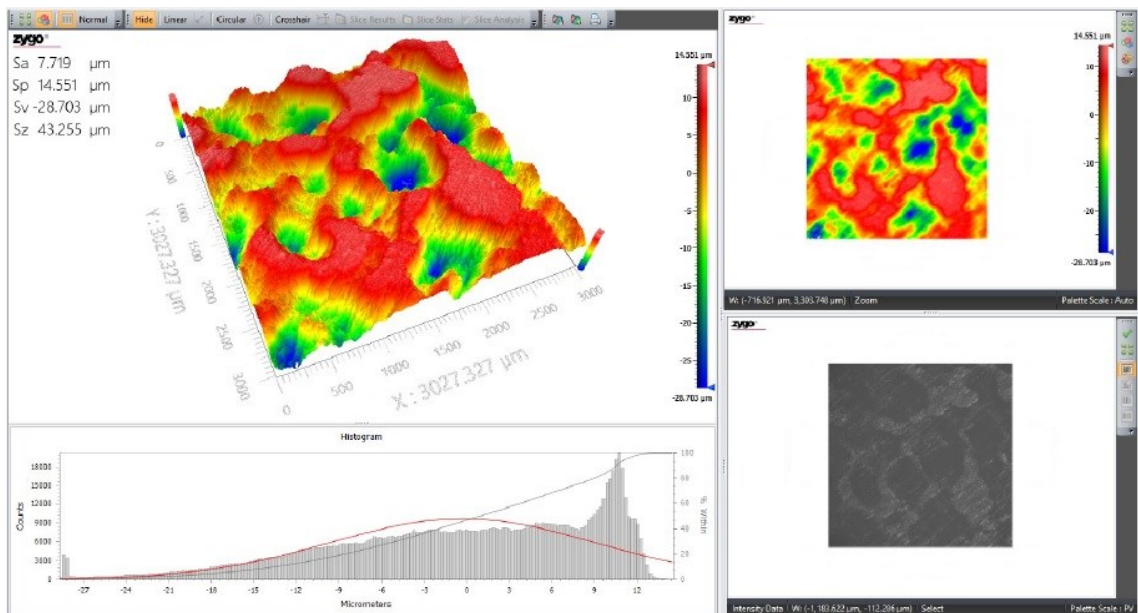
Obr. 66. Zkušební tělísko č. 3 – 2. oblast měření, po lisování

Zkušební tělísko č. 4:

- na obrázcích (Obr. 67, 68) jsou zobrazeny 2 výsledky měření tělíska před lisováním;

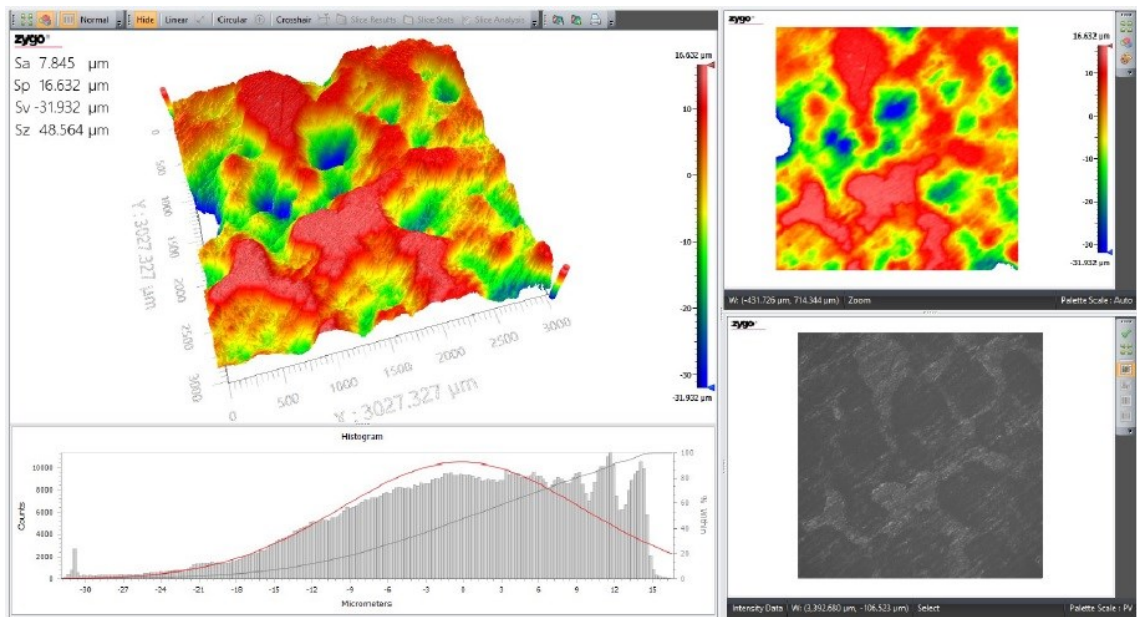


Obr. 67. Zkušební tělísko č. 4 – 1. oblast měření, před lisováním

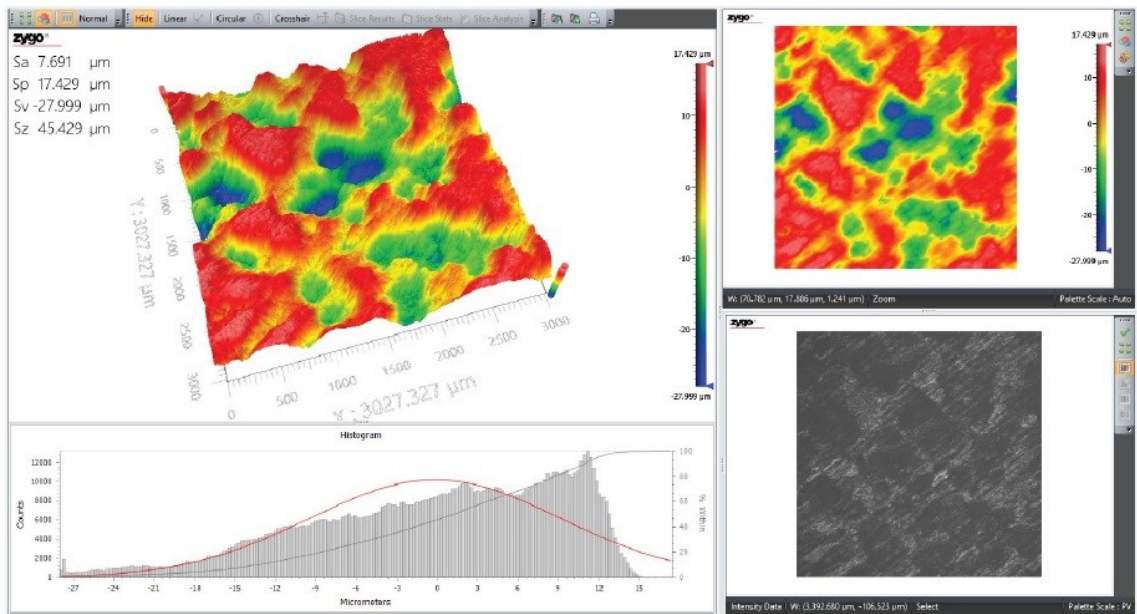


Obr. 68. Zkušební tělísko č. 4 – 2. oblast měření, před lisováním

- na obrázcích (Obr. 69, 70) jsou zobrazeny 2 výsledky měření tělíska po 200 lisovacích cyklech;



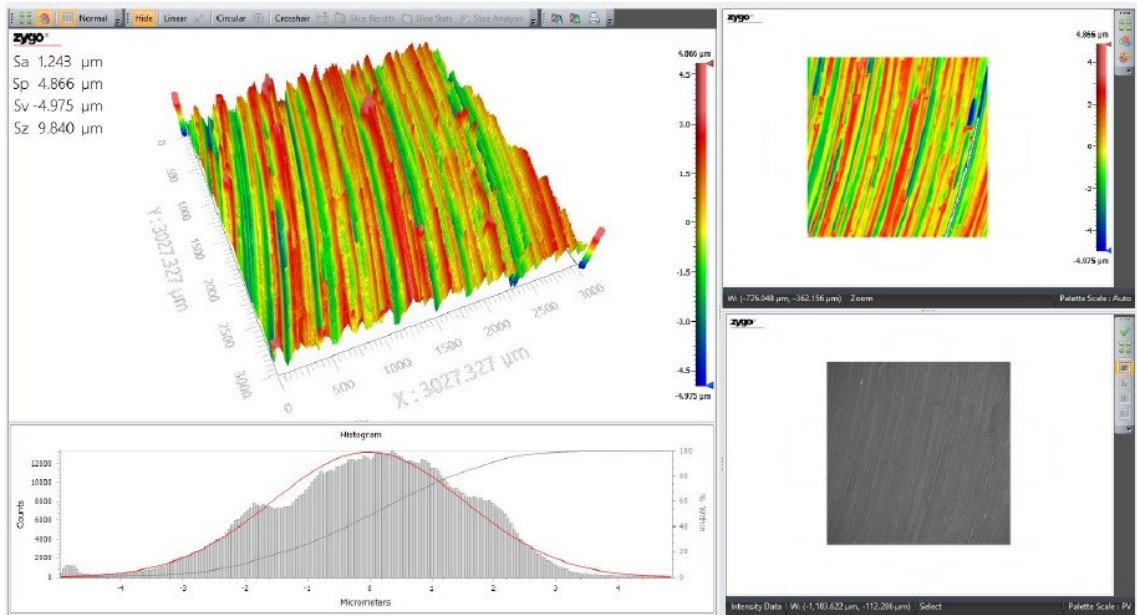
Obr. 69. Zkušební tělísko č. 4 – 1. oblast měření, po lisování



Obr. 70. Zkušební tělísko č. 4 – 2. oblast měření, po lisování

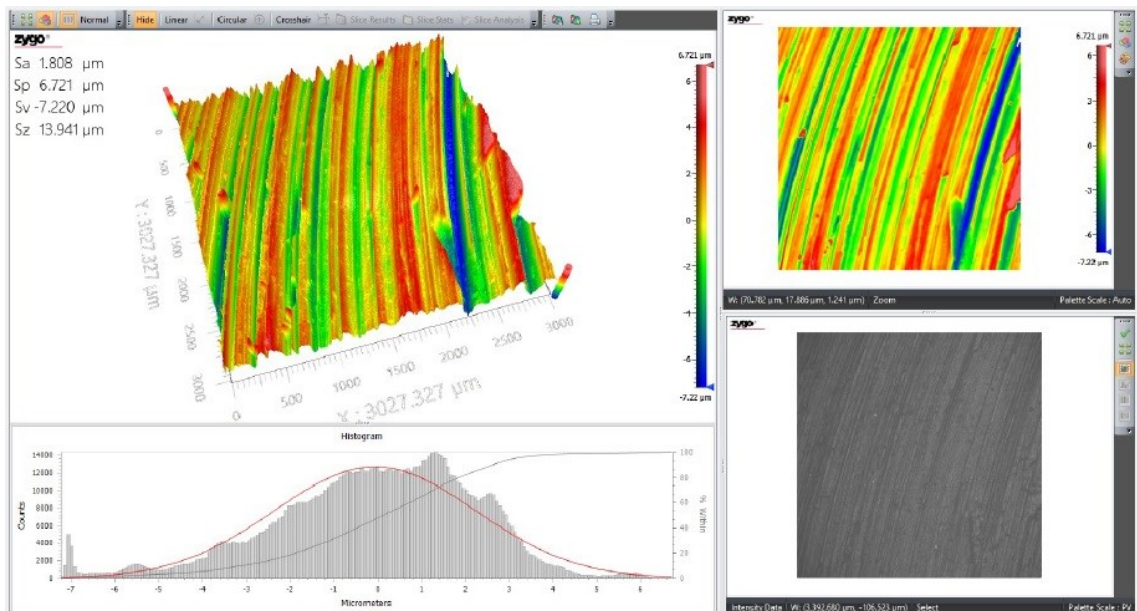
Zkušební tělísko č. 5:

- na obrázku (Obr. 71) je zobrazen výsledky měření tělíska před lisováním;



Obr. 71. Zkušební tělísko č. 5 – před lisováním

- na obrázku (Obr. 72) je zobrazen výsledek měření tělíska po 200 lisovacích cyklech;



Obr. 72. Zkušební tělísko č. 5 – po lisování

Výsledky měření jakosti povrchu zkušebních tělísek před a po lisování jsou porovnány v tabulce (Tab. 4).

Tab. 5. Jakost povrchu zkušebních tělísek před a po lisování

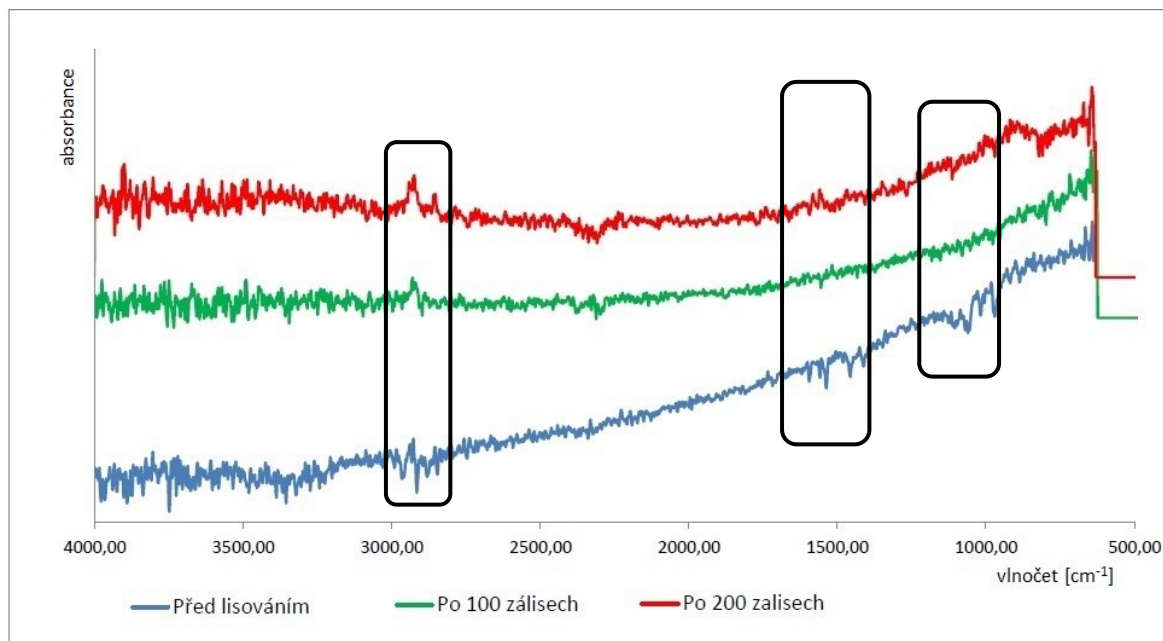
Zkušební tělísko č.	Před lisováním				Po lisování			
	Sa (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)	Sa (μm)	Sp (μm)	Sv (μm)	Sz (μm)
1 - nepískovaná	9,181	22,469	35,338	57,807	9,298	17,376	33,474	50,850
	7,907	19,877	29,038	48,915	8,219	19,977	30,043	50,020
1 - pískovaná	7,483	21,523	30,117	51,640	7,164	24,959	26,820	51,779
	6,388	23,488	25,769	49,257	7,773	27,843	31,734	59,577
2 - nepískovaná	5,393	8,329	19,813	28,142	4,398	17,194	18,033	35,227
	7,142	26,578	28,251	54,829	6,990	25,513	27,069	52,582
2 - pískovaná	7,484	28,520	28,895	57,415	5,722	21,123	21,686	42,809
	5,298	16,634	22,211	38,845	5,450	21,053	21,842	42,895
3	3,295	5,789	13,504	19,293	3,156	5,274	13,128	18,402
	4,590	7,676	17,656	25,332	2,456	12,978	12,919	25,897
4	8,039	19,244	29,428	48,672	7,845	16,632	31,932	48,564
	7,719	14,551	28,703	43,254	7,691	17,429	27,999	45,428
5	1,243	4,866	4,975	9,841	1,808	6,721	7,220	13,941

Na základě výsledků 3D drsnosti povrchu změřené pomocí bezkontaktního optického přístroje lze říci, že očekávaný závěr, kterým bylo snížení drsnosti povrchu, se nepotvrdil.

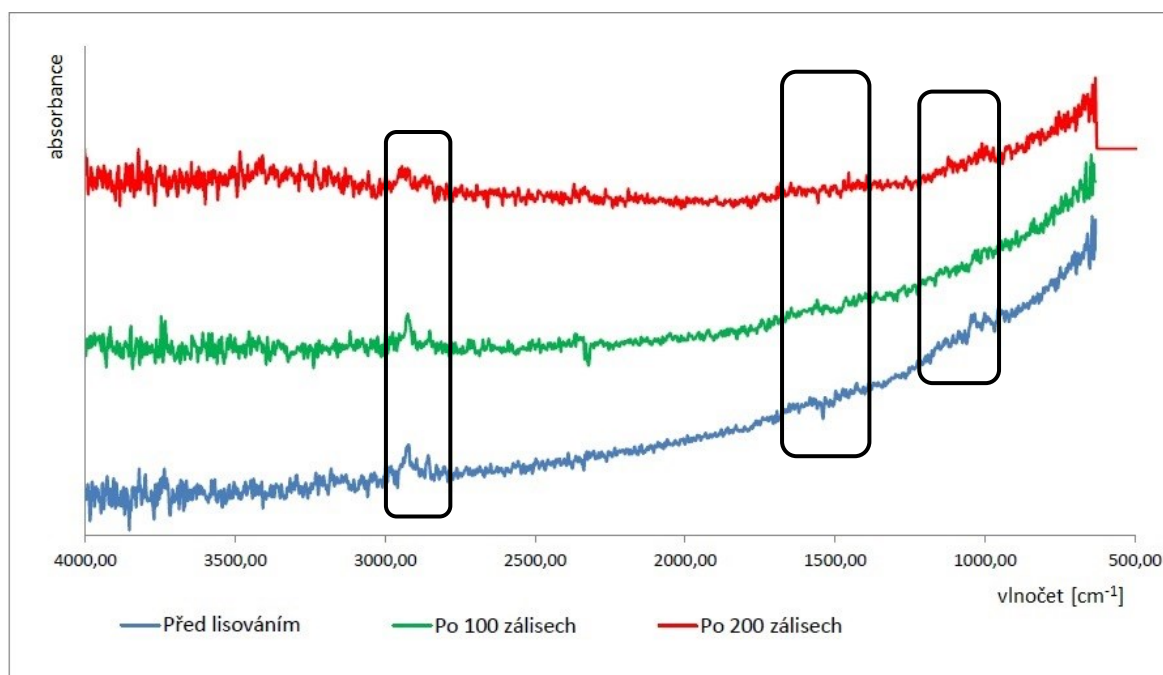
Předpokládanou příčinu tohoto stavu je možno rozdělit do dvou částí: vznik kontaminace v omezené hloubce profilu drsnosti a změna průmětu plochy před a po experimentu.

8.2 FTIR analýza zkušebních tělísek

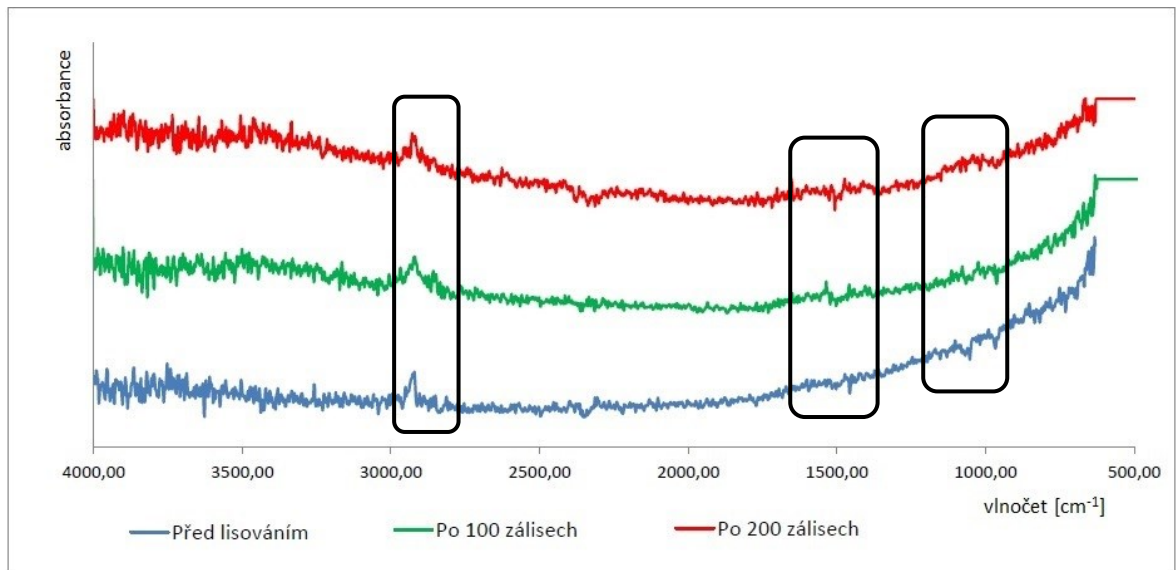
Spektra získaná analýzou FTIR byla porovnána se spektry v dostupných databázích, které obsahují spektra anorganického i organického původu. Pro vyhodnocení vlnočtů byla použita publikace od Kani [57] zabývající se problematikou infračervené spektrometrie. Vyhodnocované oblasti spekter jsou v jednotlivých grafech vyznačeny.



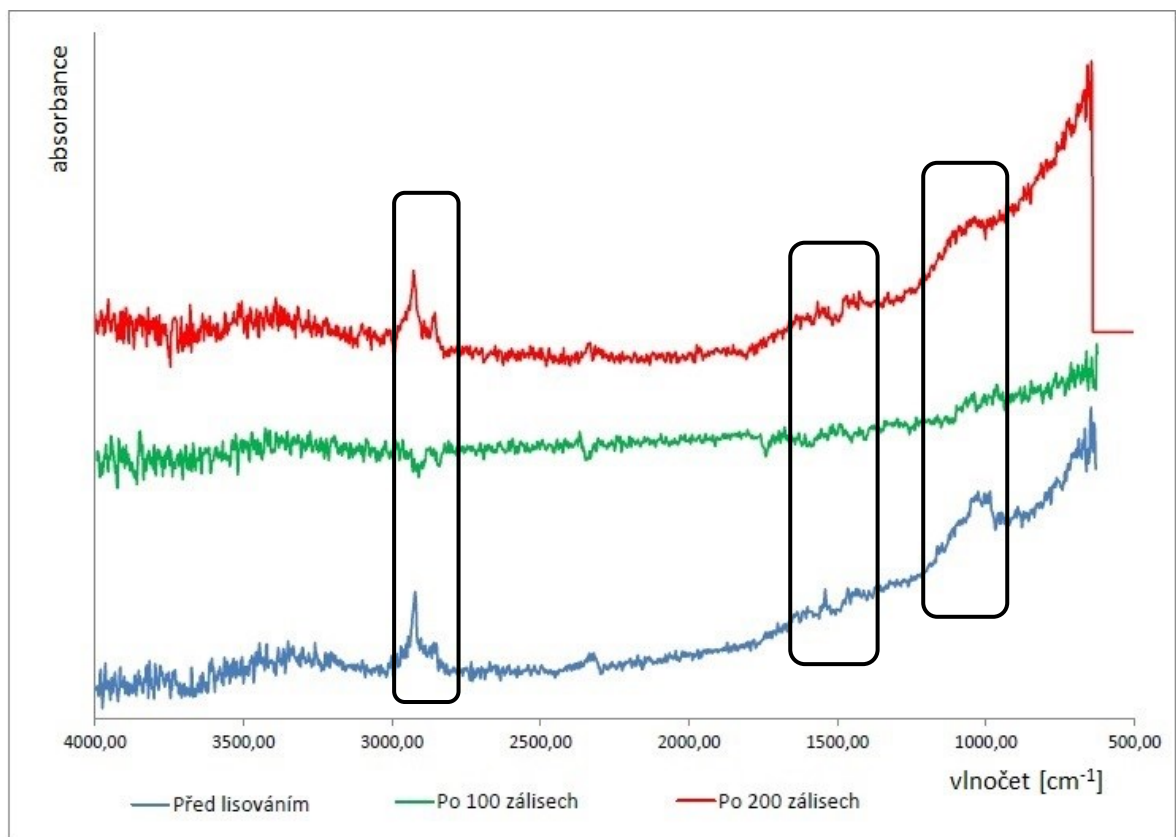
Obr. 73. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná



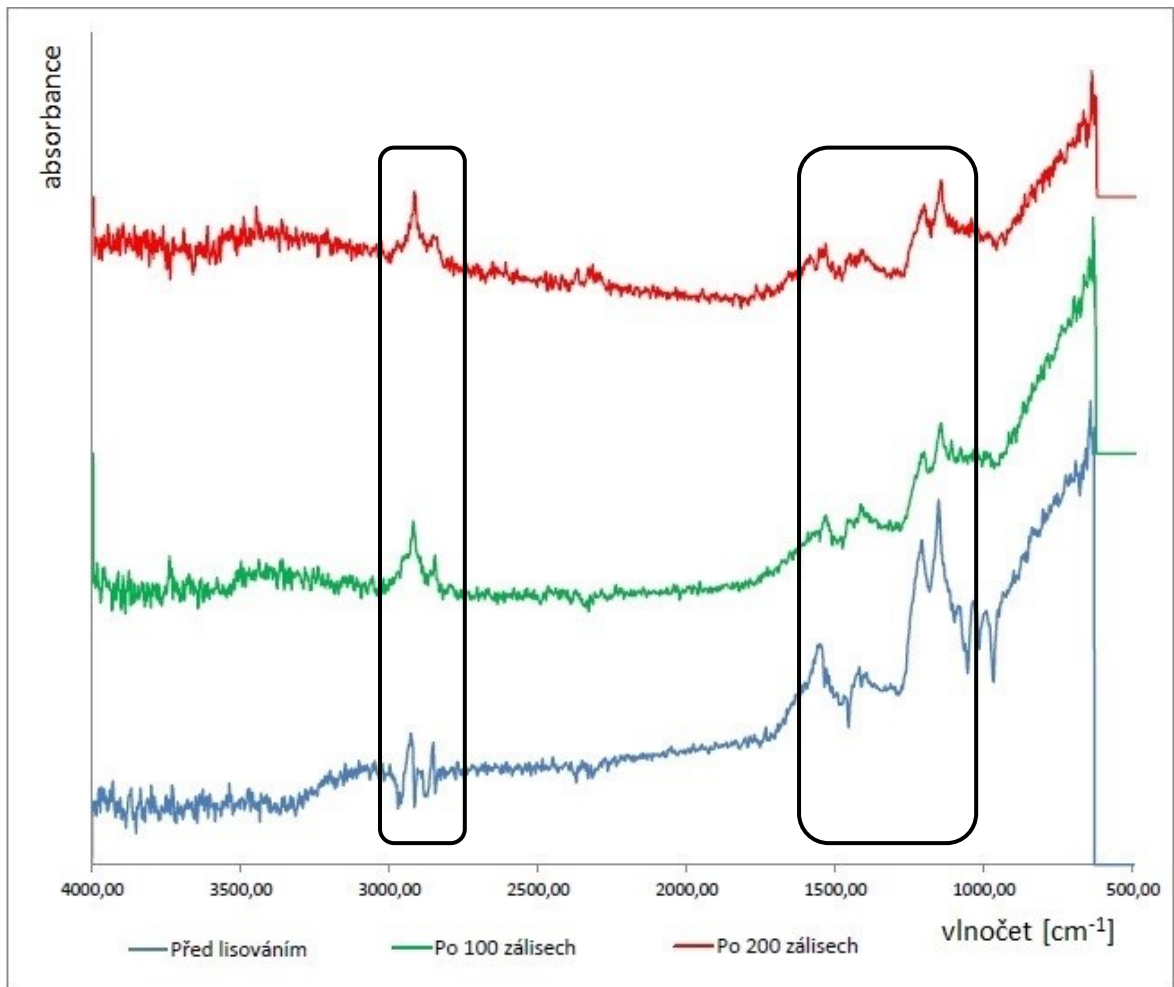
Obr. 74. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná



Obr. 75. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná

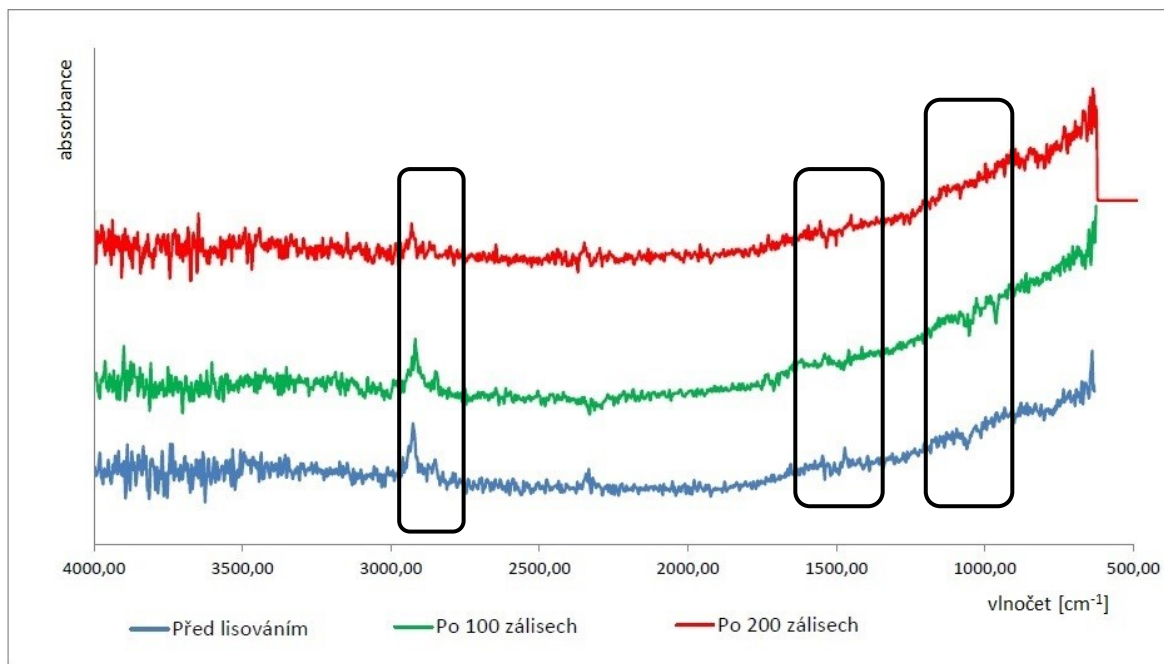


Obr. 76. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná

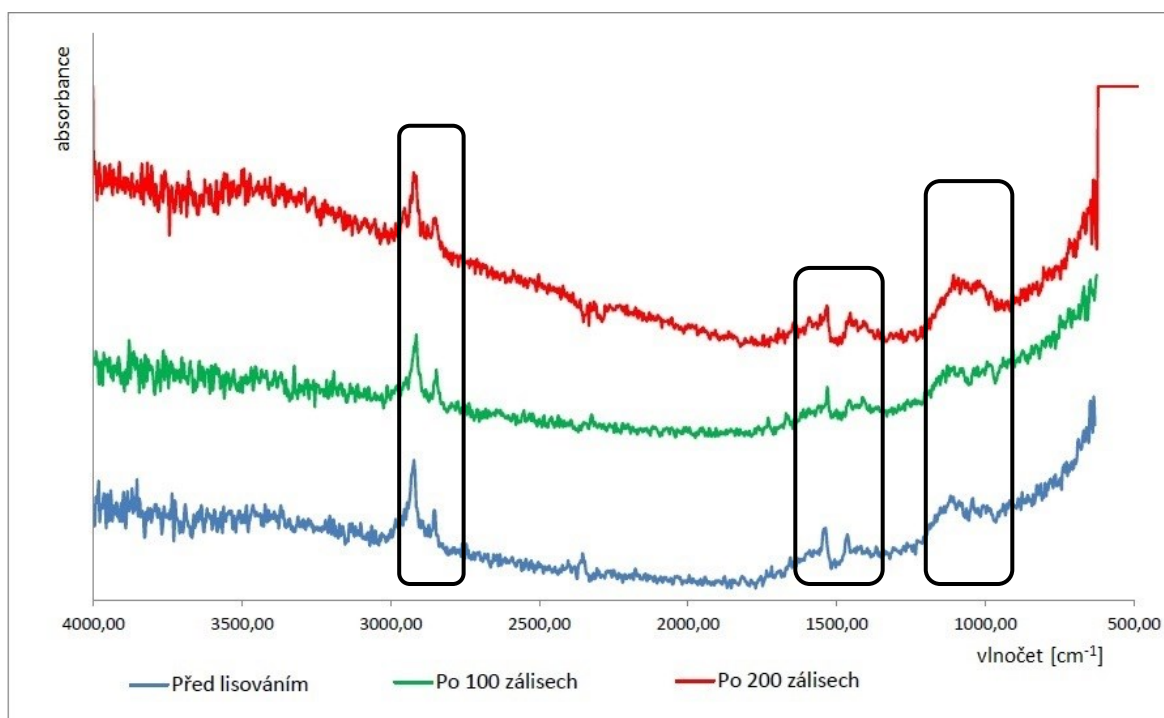


Obr. 77. Zkušební tělísko č. 3

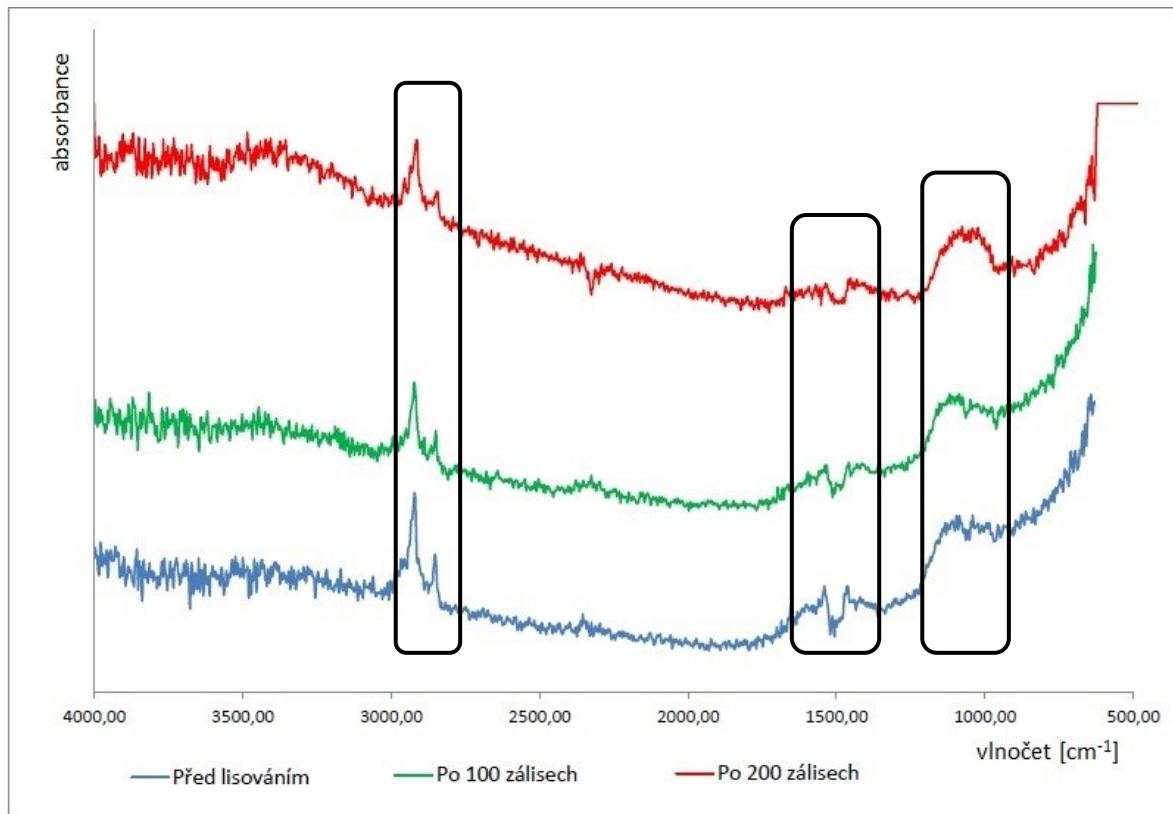
Spektrální pásy zjištěné u zkušebního tělíska č. 3 (Obr. 77) v oblasti 1600-1000 cm⁻¹ značí odrazy separačního prostředku, který byl použitý v minulém experimentu. Ze snižování výšky píku lze usoudit, že se separátor postupně zanášel dalšími produkty vulkanizace.



Obr. 78. Zkušební tělísko č. 4



Obr. 79. Zkušební tělísko č. 5 – čirý



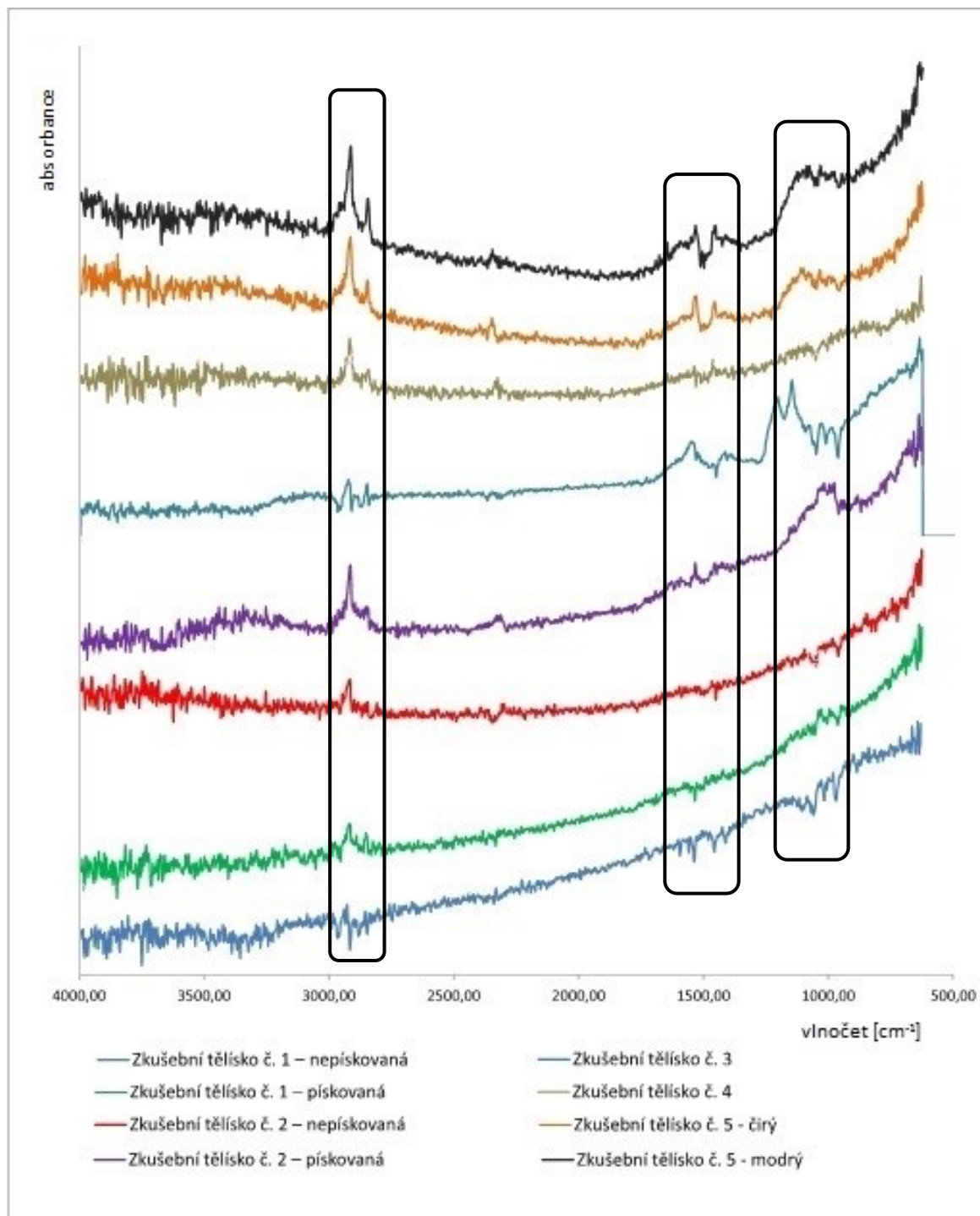
Obr. 80. Zkušební tělísko č. 5 – modrý

U zkušebních tělísek č. 2 (pískovaná polovina vzorku), č. 3, č. 4 a č. 5 (Obr. 76, 77, 78, 79 a 80) je patrný pík charakteristický pro absorbanci projevující se ve spektrálním pásmu $2830\text{-}2810\text{ cm}^{-1}$, který odpovídá -CHO skupinám – aldehydy. Tyto skupiny reagují s kyslíkem, produktem je příslušná karboxylová kyselina, což odpovídá spektrálnímu pásmu $2995\text{-}2915\text{ cm}^{-1}$, zde se jedná o -CH_2 a -CH_3 skupiny. Předpokládá se, že tyto skupiny se vyskytují ve změkčovadlech, které se přidávají do kaučukových směsí z důvodu jejich lepší zpracovatelnosti.

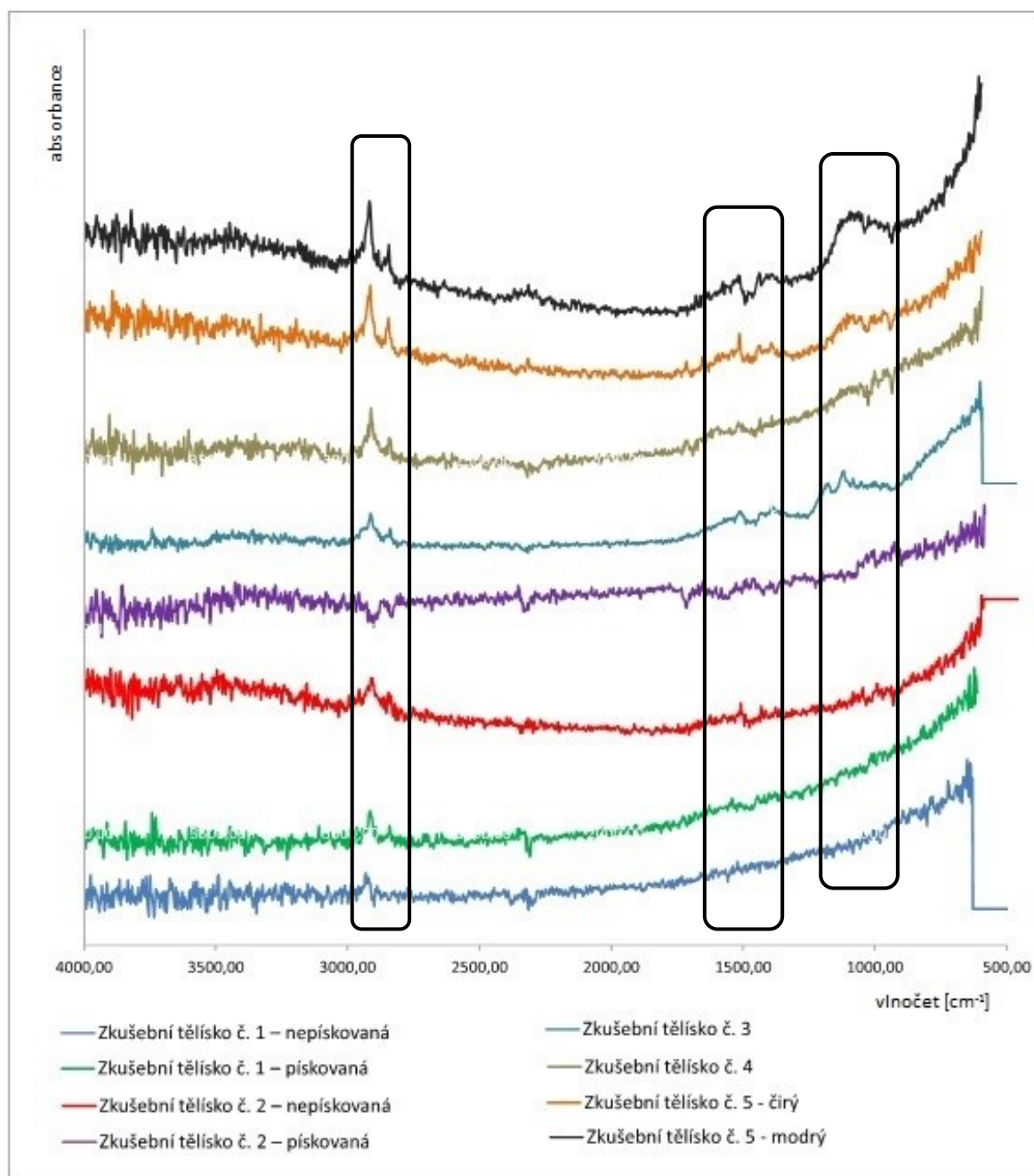
U zkušebních tělísek č. 1 a zkušebního tělíska č. 2 (nepískovaná polovinu vzorku) uvedených na obrázcích (Obr. 73, 74 a 75) se tyto píky projeví omezeně. Nelze tedy u těchto zkušebních tělísek plně potvrdit předcházející závěry.

U zkušebního tělíska č. 5 uvedeného na obrázku (Obr 79 a 80) se projevil spektrální pás $1200\text{-}950\text{ cm}^{-1}$, který je charakteristický pro amidy karboxylových skupin, které vznikají náhradou skupiny -OH za amidovou skupinu -NH_2 . Ze spektrální analýzy tělísek vyplývá, že v případě výskytu karboxylových -CH skupin se v čase vytváří amidová skupina -NH_2 . Tuto skutečnost potvrzují výsledky zjištěné z experimentů.

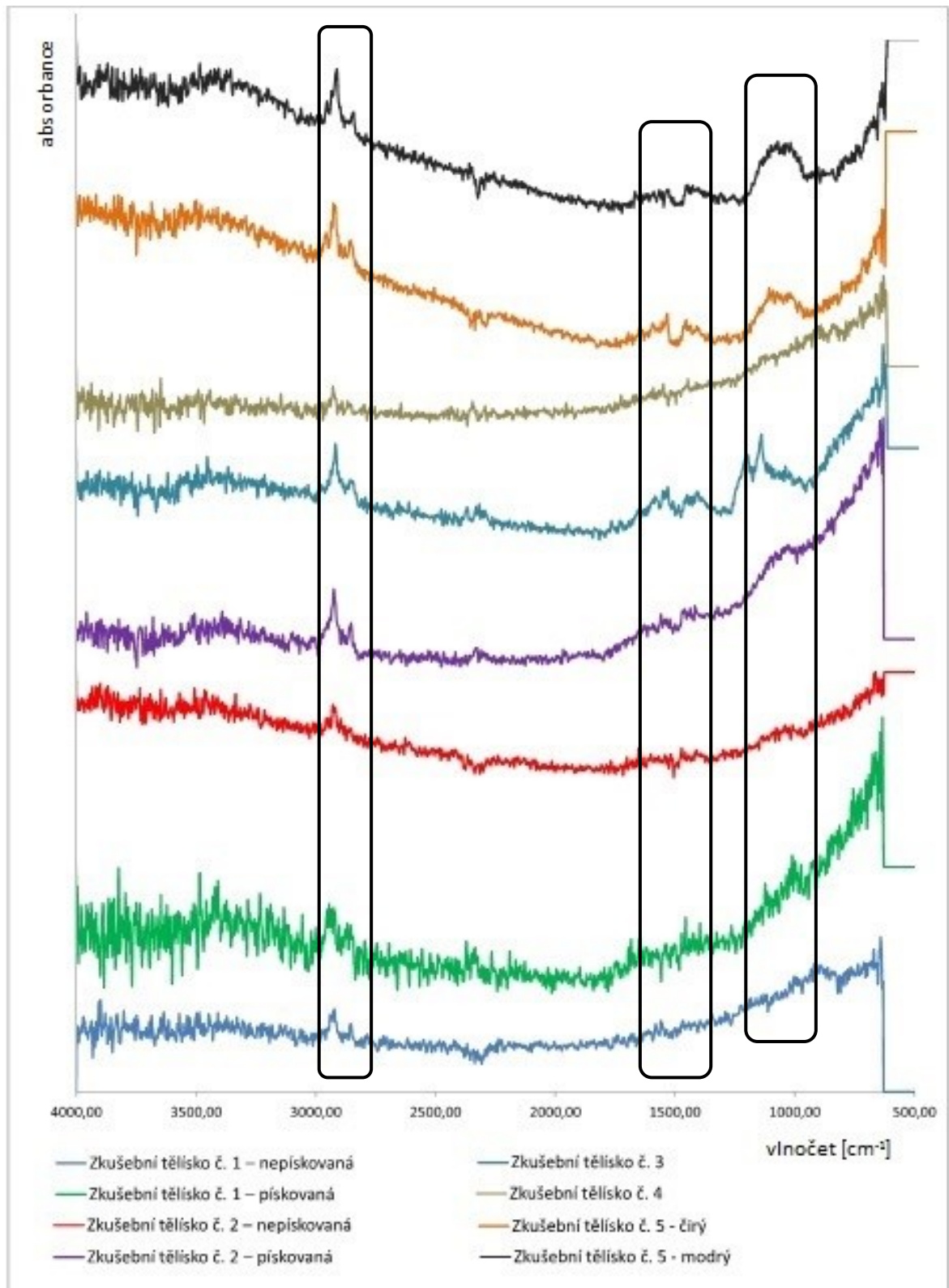
Spektrální pás v rozmezí $1700\text{--}1350\text{ cm}^{-1}$ s vrcholy 1540 cm^{-1} a 1450 cm^{-1} poukazuje na převahu --CH skupin.



Obr. 81. Porovnání zkušebních tělísek před lisováním



Obr. 822. Porovnání zkušebních tělísek po 100 zálisech



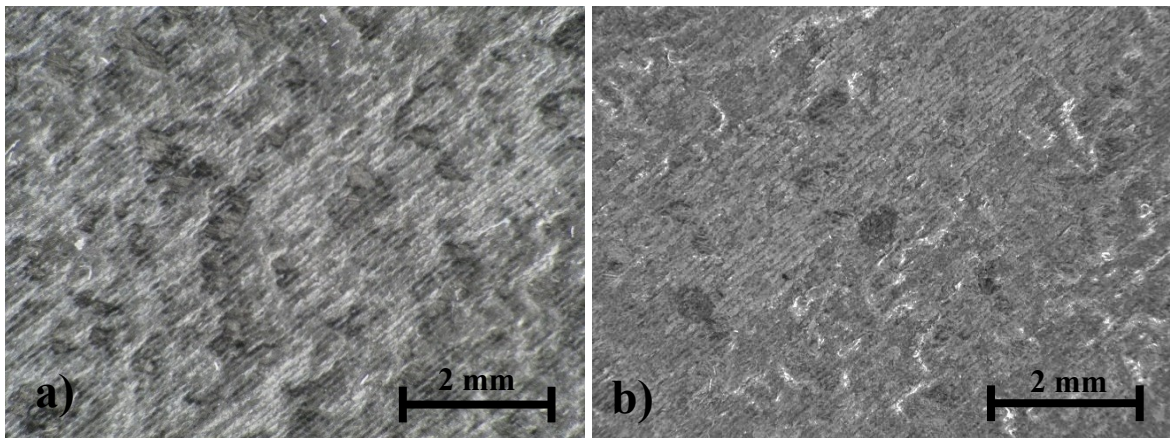
Obr. 83. Porovnání zkušebních tělísek po 200 zálisech

Srovnání spektrální analýzy materiálů, ze kterých jsou formy vyráběny, je uvedeno na obrázcích (Obr. 81,82 a 83). Z výsledku vyplývá, že nejmenší kontaminace povrchu po 200 lisovacích cyklech byla zjištěna u zkušebních tělísek č. 1, č. 2 a č. 4, které jsou vyrobeny

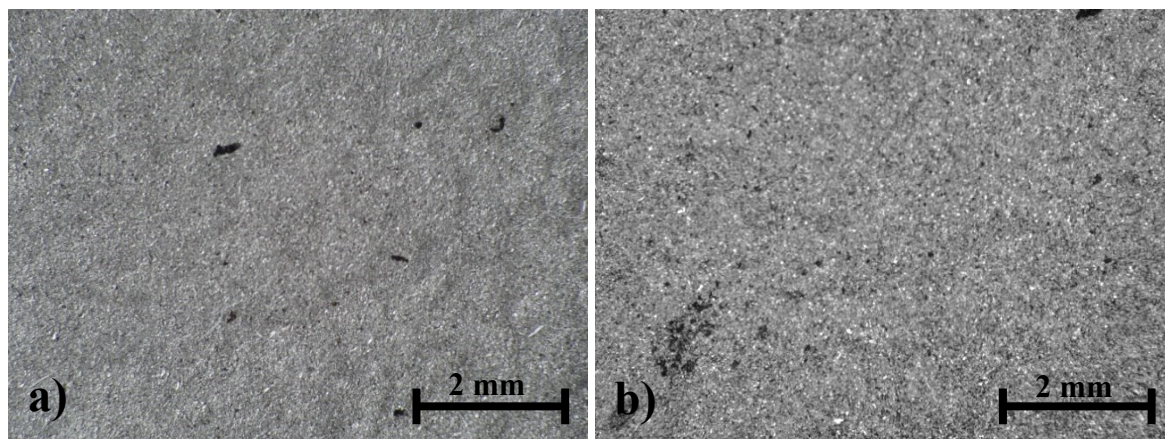
z oceli a na kontaktní povrch je nanášena vrstva 3D tiskem. Tento povrch byl zkoušen jako surový bez obrobení a dalších povrchových úprav. Jako další materiály lze uvést zkušební tělíska č. 1 a č. 2, jejichž povrch byl pískován korundem 0,2. Horší výsledky byly zjištěny u zkušebního tělíska č. 3, u něhož byl použit vnější separační prostředek. Nejhorších výsledků bylo dosaženo u srovnávacího zkušebního tělíska č. 5, který byl vyroben technologií třískového obrábění. Tento vzorek byl použit v předcházejících pracích a jeho povrch byl před experimentem chemicky očištěn.

8.3 Fotografie zkušebních tělísek

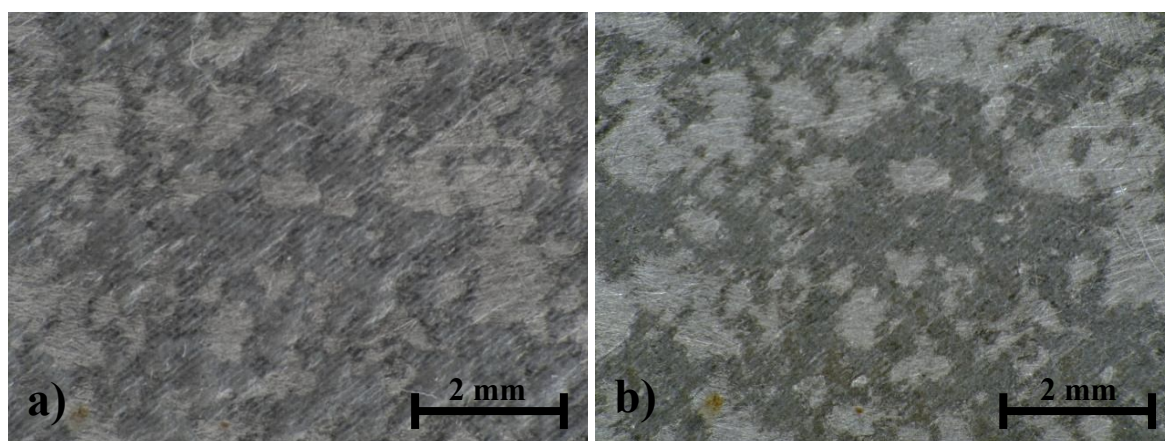
Fotografie byly pořízeny se zvětšením 30x fotoaparát Panasonic Lumix FZ82 s makro předsádkou Raynox 250. Při pořizování fotografií byla snaha fotografii zkušebního tělíska pořídít ve stejném místě před i po lisování. Fotografie s označením a) byly pořízeny před lisováním, fotografie s označením b) byly pořízeny po 200 lisovacích cyklech. Fotografie byly pořizovány za účelem doplnění informací získaných měřením drsnosti povrchu a analýzou FTIR.



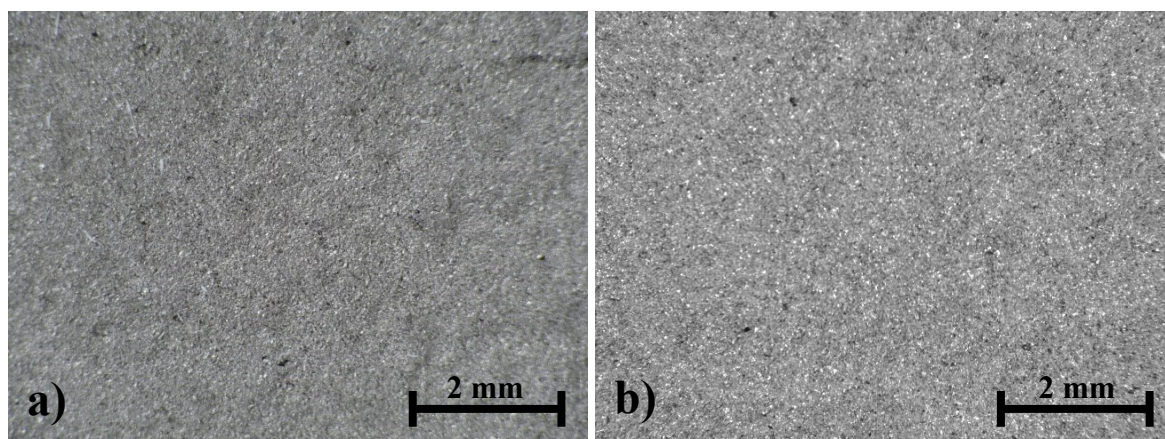
Obr. 84. Zkušební tělíska č. 1 - nepískovaná



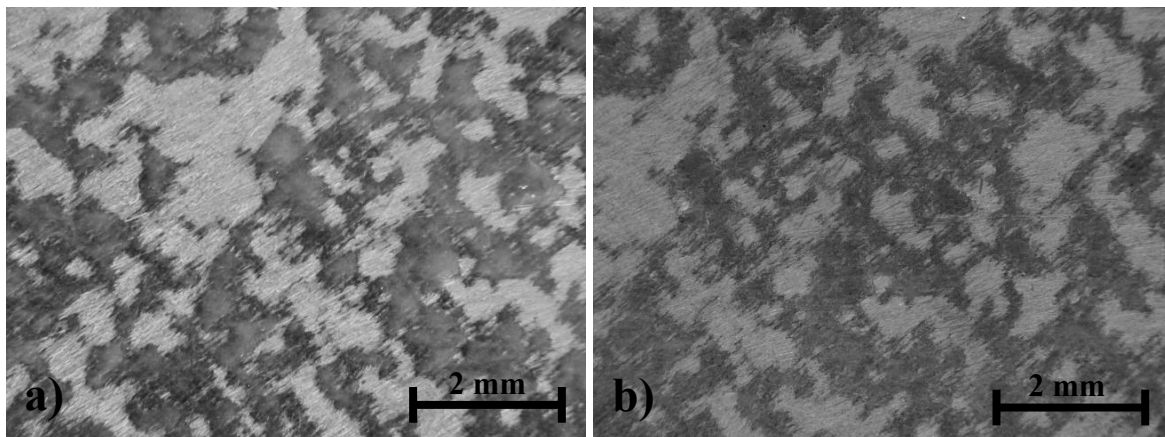
Obr. 85. Zkušební tělísko č. 1 - pískovaná



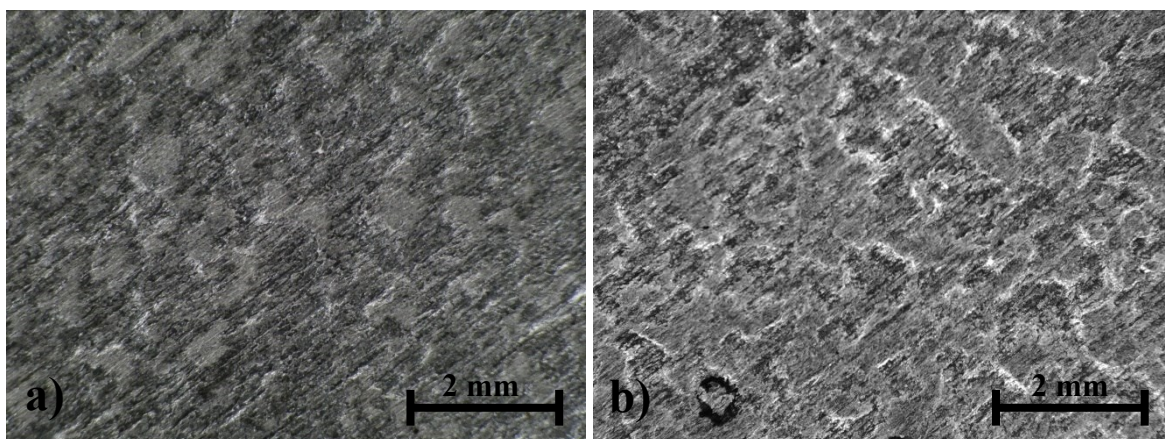
Obr. 86. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná



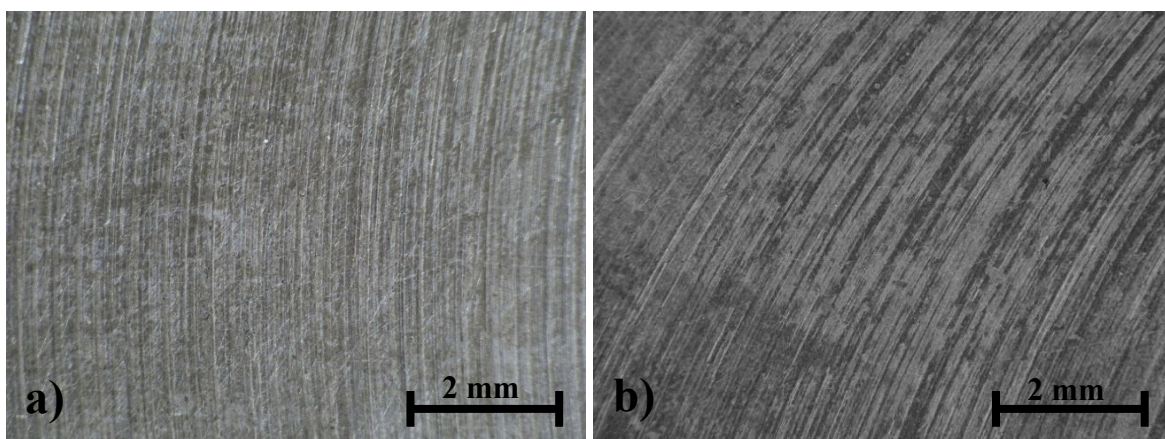
Obr. 87. Zkušební tělísko č. 2 - pískovaná



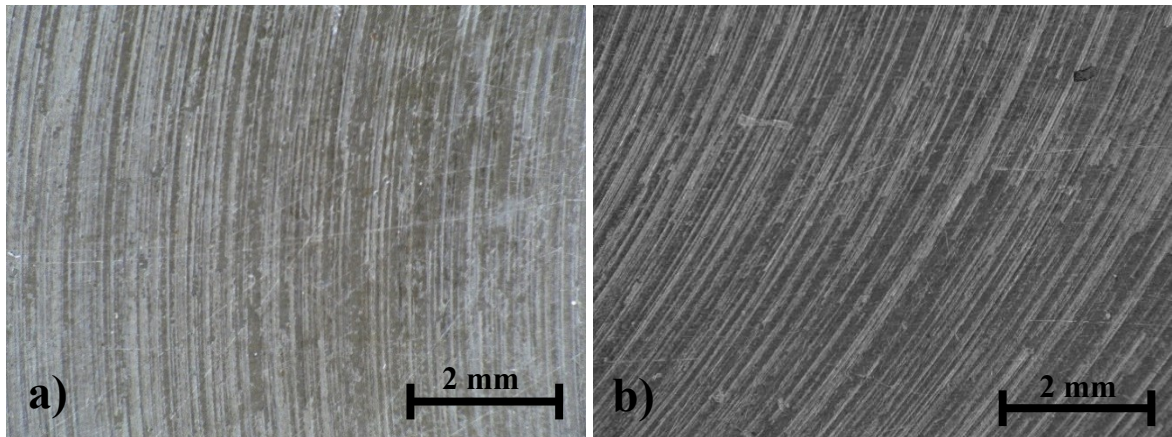
Obr. 88. Zkušební tělísko č. 3



Obr. 89- Zkušební tělísko č. 4



Obr. 90. Zkušební tělísko č. 5 - čirý



Obr. 91. Zkušební tělísko č. 5 - modrý

Pořízené fotografie zkušebních tělísek 1, 2 a 4 vyrobených metodou 3D tisku a následně nijak neopracovaných potvrzují závěry analýzy FTIR. Zkušební tělíska nebyla po 200 lisovacích cyklech významně kontaminována zpracovávanou kaučukovou směsí. Ani u pořízených fotografií zkušebních tělísek 1 a 2, jejichž povrch byl pískován korundem 0,2, není kontaminace zpracovávanou kaučukovou směsí patrná. Na fotografiích zkušebního tělíska č. 5 pořízených po 200 lisovacích cyklech jsou patrné ve stopách po nástroji stopy kontaminace zpracovávanou kaučukovou směsí.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo otestovat a vyhodnotit povrchy imitující dutinu formy vyrobené 3D tiskem. Zkoušení daných povrchů bylo provedeno pomocí lisování běhounové kaučukové směsi. U zkušebních tělísek byla zjišťována míra kontaminace povrchu a vyhodnocována pomocí měření drsnosti povrchu, analýzy FTIR a pořízením fotografií povrchů.

V rámci diplomové práce byla použita zkušební tělíska vyrobená metodou Selective Laser Melting z práškové nástrojové oceli 1.2709. Zkušební tělíska č. 1 a č. 2 byla z poloviny opracována pískováním. Pro porovnání s těmito vytištěnými zkušebními tělisky bylo použito zkušební tělísko č. 5 vyrobené třískovým obráběním z nástrojové oceli 1.2080.

Před lisováním kaučukové směsi byla u zkušebních tělísek měřena drsnost povrchu, byla provedena analýza FTIR a byly pořízeny fotografie povrchu. Po 100 lisovacích cyklech byla provedena analýza FTIR. Po dalších 100 lisovacích cyklech bylo opět provedeno měření drsnosti povrchu, byla provedena analýza FTIR a byly pořízeny fotografie povrchu.

Z měření drsnosti povrchu zkušebních tělísek se očekávané zlepšení drsnosti povrchu nepotvrdilo. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést další experimenty, které by ověřily, zda má lisování vliv na změnu drsnosti povrchu.

Z analýzy FTIR bylo zjištěno, že dochází k ulpívání aldehydů (-CHO skupin). Z aldehydů se reakcí s kyslíkem vytvoří karboxylová kyselina (-CH₂ a -CH₃ skupiny). Tyto látky mohou pocházet ze změkčovadel. Z karboxylových -CH skupin se v čase vytváří amidová skupina -NH₂. Nejmenší kontaminace povrchu byla zjištěna u zkušebních tělísek č. 1, č. 2 a č. 4, které byly vyrobeny metodou 3D tisku a následně nijak neopracovány. Tato skutečnost poukazuje na vhodnost použití těchto materiálů v dutině formy.

Pořízené fotografie zkušebních tělísek podporují výsledky získané analýzou FTIR.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ISO/ASTM 52900. *Additive manufacturing - General Principles - Terminology*. Geneva: ISO/ASME International, 2015.
- [2] GEBHARDT, Andreas a Jan Steffen HÖTTER. *Additive manufacturing: 3D printing for prototyping and manufacturing*. Munich: Hanser Publishers, 2016. ISBN 978-1-56990-582-1.
- [3] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *3D tisk*. Přeložil Petra MILLAROVÁ. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2015. ISBN 978-80-7414-936-8.
- [4] SRIVATSAN, T. S a T. S SUDARSHAN. *Additive manufacturing: innovations, advances, and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2016], XV, 444. ISBN 978-1-4987-1477-8.
- [5] What is Rapid Tooling. *Additive3d.com* [online]. 13.10.2016 [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <https://www.additive3d.com/what-is-rapid-tooling/>
- [6] Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, (12) [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
- [7] Přehled technologií 3D tisku. *DKMP.cz* [online]. 9.1.2018 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [8] SANGWOOK, Lee, Kim HAEEKANG, YangHyun DONG, et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean Journal of Radiology* [online]. 2016, (17), 182-197 [cit. 2018-11-26]. ISSN 2005-8330. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/297605485_Three-Dimensional_Printing_Basic_Principles_and_Applications_in_Medicine_and_Radiology
- [9] Selective Laser Sintering, SLS: Additive manufacturing method that uses laser sintering for the creation of porous 3D objects. *Manufacturingguide.com* [online]. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>
- [10] What is 3D printing?. *3DPrinting.com* [online]. c2018 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [11] JAIGANESH, V., Andrew Anthony CHRISTOPHER a E. MUGILAN. Manufacturing of PMMA Cam Shaft by Rapid Prototyping. *Procedia Engineering* [online]. 2014, **97**,

- 2127-2135 [cit. 2018-11-08]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814035267>
- [12] Selective Laser Sintering 3D Printing Services For Metal Prototype Printing. *Cncmachinedprototypes.com* [online]. c2015-2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: <http://www.cncmachinedprototypes.com/sale-7497347-selective-laser-sintering-3d-printing-services-for-metal-prototype-printing.html>
- [13] HERZOG, Dirk, Vanessa SEYDA, Erik WYCISK a Claus EMMELMANN. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* [online]. 2016, **117**, 371-392 [cit. 2018-11-06]. ISSN 1359-6454. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645416305158>
- [14] MUELLER, Bernhard, Roland MALEK, Ralf HUND, Mathias GEBAUER, Stefan POLSTER, Mathias KOTZIAN a Reimund NEUGEBAUER. Added Value in Tooling for Sheet Metal Forming through Additive Manufacturing. *COMA 2013* [online]. Univ. of Stellenbosch, 2013, January 2013, (01) [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312164881_Added_Value_in_Tooling_for_Sheet_Metal_Forming_through_Additive_Manufacturing
- [15] CHUA, CheeKai, KahFai LEONG a ChuSing LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. New Jersey: WorldScientific, c2010. ISBN 978-981-277-897-0.
- [16] Practical Applications and uses for Additive Manufacturing. *Spilasers.com* [online]. 2018, c2018 [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: <https://www.spilasers.com/whitepapers/practical-applications-and-uses-for-additive-manufacturing/>
- [17] Překvapivé možnosti 3D tisku ve výrobě. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12.4.2017, 2017(4) [cit. 2019-02-09]. DOI: 170451. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prekvapive-moznosti-3d-tisku-ve-vyrobe.html>
- [18] McLaren dostal neuvěřitelná kola, vznikla pomocí 3D tiskárny. *Novinky.cz* [online]. 2018, 15.11.2018 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/489169-mclaren-dostal-neuveritelna-kola-vznikla-pomoci-3d-tiskarny.html>
- [19] JELÍNEK, Matouš. Vyráběli jsme formy na pneumatiky: 3D tisk jak v kosmickém průmyslu!. *Auto.cz* [online]. 26.11.2017, **2017** [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/vyrabeli-jsme-formy-na-plaste-z-kosmu-do-pneumatik-111503>

- [20] VÍTEK, Jan. Bugatti si pro Chiron tiskne brzdové třmeny. *Svět hardware* [online]. 2018, 24.1.2018 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/bugatti-si-pro-chiron-tiskne-brzdove-trmeny/45924>
- [21] PAGÁČ, Marek. Začínáme s 3D tiskem kovů 2: Technologie 3D tisku kovů (SLM). In: *Konstrukter.cz* [online]. 23.11.2016 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [22] SLM inserts - Selective Laser Melting. *Hrsflow.com* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.hrsflow.com/eng/prodotti/slm-inserts-selective-laser-melting/slm-inserts-selective-laser-melting.php>
- [23] BAHRAMINASAB, Marjan a Farzam FARAHMAND. Stateofthe art review on design and manufacture of hybrid biomedical materials: Hip and knee prostheses. *Journal of Engineering in Medicine* [online]. 2017, May 2017, 29 [cit. 2018-12-03]. DOI: 10.1177/0954411917705911. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316832644_State_of_the_art_review_on_design_and_manufacture_of_hybrid_biomedical_materials_Hip_and_knee_prostheses
- [24] EBM for Orthopedic Implants: quality of lifebuilt with Additive Manufacturing. *Arcam.com* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/solutions/orthopedic-implants/>
- [25] The Complete Guide to Electron Beam Melting 3D Printing (EBM). *3dnatives.com* [online]. c2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/>
- [26] Navařování jako aditivní výrobní postup. *trumpf.com* [online]. 2018 [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/aditivni-vyroba/laser-metal-deposition-lmd/
- [27] BOHLEN, A., H. FREIßE, M. HUNKEL a F. VOLLERTSEN. Additive manufacturing of toolsteel by laser metal deposition. *Procedia CIRP* [online]. 2018, 74, 192-195 [cit. 2018-11-07]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118308783>
- [28] SOFFAR, Heba. Laser Metal Deposition uses, types, advantages and disadvantages. *Science online* [online]. APRIL 22, 2017 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z:

<https://www.online-sciences.com/technology/laser-metal-deposition-uses-types-advantages-and-disadvantages/>

[29] Navařování metodou WAAM. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018, 07.02.2018, (1) [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>

[30] MCANDREW, Anthony R., Paul A. COLEGROVE, Marta Alvarez ROSALES, et al. Interpass Rolling of Ti-6Al-4V Wire + Arc Additively Manufactured Features for Microstructural Refinement. *Additive Manufacturing* [online]. 2018, 03.2018, (21), 340-349 [cit. 2018-11-21]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323567305_Interpass_Rolling_of_Ti-6Al-4V_Wire_Arc_Additively_Manufactured_Features_for_Microstructural_Refinement

[31] NOORANI, Rafiq. *3D printing: technology, applications, and selection*. BocaRaton: CRC Press, Taylor& Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4987-8375-0.

[32] CLAYTON, Jamie. Optimising metal powders for additive manufacturing. *Metal Powder Report* [online]. 2014, 69(5), 14-17 [cit. 2018-11-09]. ISSN 0026-0657. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026065714702231>

[33] SKOTNICOVÁ, Kateřina. *Prášková metalurgie: studijní opory: učební text, scénáře, testy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3378-1.

[34] Methods of AM metal Powder production. *LPW technology* [online]. 2016 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://www.lpwtechnology.com/technical-library/powder-production/>

[35] KOPELIOVICH, Dmitri. Powder preparation. *SubsTech* [online]. 31.5.2012 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation&s=atomization

[36] REJEESH, C. R. Powder Metallurgy-Module III. *Slide Share* [online]. 13.3.2014 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/rejeeshcrajendran/module-iii-32259859>

[37] SLM Metal Powder. *SLM Solutions* [online]. 2018 [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://slm-solutions.com/products/accessories-consumables/slmr-metal-powder/>

[38] MAY, Yong-jin, Xiao-hua JIE, Li-li LIU, Neng YUB a Xiang-xin ZHENG. The study on vulcanization fouling behavior of nanocrystalline layer. *Surface and Interface Analy-*

sis [online]. 2012(44), 282-287 [cit. 2019-02-19]. DOI: 10.1002/sia.3799. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sia.3799>

[39] PACKHAM, David. *Mould Sticking, Fouling and Cleaning*. Shropshire: iSmithers Rapra Publishing, 2012. ISBN 1-85957-357-6.

[40] HORNSBY, Peter R., Inderjeet SINGH, John R. DALEY a John FIRTH. *Mould fouling of elastomers during injection moulding* [online]. 19.7.2013 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/174328906X143831>

[41] BAARLE, B. Mold fouling during rubber vulcanization. *Rubber world akron* [online]. 2004 (3) [cit. 2019-02-20]. ISSN 0035-9572. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293723285_Mold_fouling_during_rubber_vulcanization

[42] KANIA, Patrik. Infračervená spektrometrie. In: *VŠCHT* [online]. [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf?redirected>

[43] Infračervená spektroskopie. In: *VŠCHT* [online]. [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>

[44] DENDISOVÁ, Marcela, Pavel ŽVÁTORA a Pavel MATĚJKA. Ramanova Spektrometrie. In: *VŠCHT* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/lach2/RAMAN.pdf>

[45] BUMBÁLEK, Leoš. Jakost povrchu a její význam pro funkci ploch součástí [online]. *Verlag Dashöfer*, 11.4.2008 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.qmprofi.cz/33/jakost-povrchu-a-jeji-vyznam-pro-funkci-ploch-soucasti-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Ep8JmSoMEhJcGWz4k4nRY1-w9PBWuC7BmQ/>

[46] GROOVER, Mikell P. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, c2013. ISBN 978-1-118-231463

[47] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2012.

[48] Měření drsnosti povrchu. In: *ELUC* [online]. 28.8.2015 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>

- [49] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura po-vrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český norma-lizační institut, 1999.
- [50] EVANS, Chris J. a James B. BRYAN. Structured textured or engineered sur-faces. *CIRP Annals: Manufacturing Technology* [online]. Elsevier, 1999, **48** (2), 541-556 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607632338?via%3Dihub>
- [51] ČECH, J., PERNIKÁŘ, J., PODANÝ, K. *Strojírenská metrologie*. 4. vyd. Brno: CERM, 2005. 175 s. ISBN 80-214-3070-2
- [52] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie: část 1. VUT* [online]. 2004 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>
- [53] Roughness (2D) parameter . *Olympus-ims.com*. [online]. © 2015 [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/
- [54] Prostorové hodnocení struktury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, 15.6.2005, **2005**(6) [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prostorove-hodnoceni-struktury-povrchu.html>
- [55] 1.2709 / X3NiCoMoTi18-9- 5. *TOOLSTEEL* [online]. c2016 [cit. 2019-04-18]. Do-stupné z: <http://toolsteel.cz/?s=1.2709>
- [56] 1.2080 / 19 436 / X210Cr12 / D3. *TOOLSTEEL* [online]. c2016 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/?s=1.2080>
- [57] KANIA, Patrik. Infračervená spektrometrie. In: *VŠCHT* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
ATR	Zeslabený úplný odraz (Attenuated Total Reflection)
CLA	Chromatic Length Aberration
DSK	Díl na sto dílů kaučuku
EBM	Electron Beam Melting
FTIR	Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací
LBM	Laser Beam Melting
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LMD	Laser Metal Deposition
MAG	Poloautomatické svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu
MH	Maximální krouticí moment [Nm]
MIG	Poloautomatické svařování kovů v ochranné atmosféře inertního plynu
ML	Minimální krouticí moment [Nm]
NBR	Nitril-Butadien kaučuk
PLA	Polyaktodová vlákna
RAMAN	Ramanova spektrometrie
RP	Rychlé prototypování (Rapid Prototyping)
SLA	Stereolitografie (Stereolithography)
SLS	Selective Laser Sintering
TIG	Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
T _{s1}	Zpracovatelská bezpečnost [min]
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní princip aditivní výroby [2]	12
Obr. 2. Základní rozdělení aditivní výroby / 3D tisku [2]	13
Obr. 3. Grafické rozdělení aditivní výroby dle Srivatsana a Sudarshana [4]	15
Obr. 4. Základní princip metody Laminated Object Manufacturing [7]	17
Obr. 5. Základní princip metody Fused Deposition Modeling [8]	18
Obr. 6. Základní princip metody Stereolithography [8]	18
Obr. 7. Základní princip metody Polyjet [8].....	19
Obr. 8. Základní princip metody 3D Printing [14]	21
Obr. 9. První vytištěné kolo [18]	22
Obr. 10. Forma na výrobu pneumatik [19]	23
Obr. 11. Brzdový třmen [20]	23
Obr. 12. Základní princip metod založených na práškové bázi [4]	24
Obr. 13. Základní princip metody Selective Laser Sintering [10].....	25
Obr. 14. Produkty vyrobené metodou SLS [12]	26
Obr. 15. Základní princip metody Laser Beam Melting [9, 13]	27
Obr. 16. Tvárník s chladicími kanály vytištěný metodou LBM [22]	28
Obr. 17. Základní princip metody Electron Beam Melting [23]	29
Obr. 18. Ortopedický implantát vyrobený metodou Electron Beam Melting [24].....	30
Obr. 19. Základní princip metody Laser Metal Deposition [10]	31
Obr. 20. Použití metody Laser Metal Deposition [26]	32
Obr. 21. Základní princip metody WAAM [30].....	33
Obr. 22. Porovnání metody WAAM (a) s obráběním (b) [29]	33
Obr. 23. Atomizace plynem [34]	35
Obr. 24. Tvar a struktura částic po atomizaci plynem [33]	36
Obr. 25. Atomizace vodou [35]	36
Obr. 26. Tvar a struktura částic po atomizaci vodou [33]	37
Obr. 27. Atomizace odstředivou silou [36].....	37
Obr. 28. Lepivost směsi NBR v závislosti na drsnosti dutiny formy [39].....	43
Obr. 29. Lepivost směsi NBR v závislosti na tvrdosti materiálu dutiny formy [39]	44
Obr. 30. Jakost povrchu [46]	47
Obr. 31. Schéma kontaktního měřicího přístroje [48]	47
Obr. 32. Základní princip bezkontaktního snímání jakosti povrchu [48].....	48

Obr. 33. Profil povrchu [50]	49
Obr. 34. Parametr drsnosti Ra [53]	49
Obr. 35. Parametr drsnosti Rz [53]	50
Obr. 36. Zkušební tělíska	54
Obr. 37. Optický měřicí přístroj NewView 8000	56
Obr. 38. Oblasti měření	57
Obr. 39. Spektrometr Nicolet AVATAR 320 FTIR	57
Obr. 40. Spektrometr s měřeným tělískem	58
Obr. 41. Rotační reometr Premier MDR	60
Obr. 42. Vulkanizační křivka použité běhounové směsi	61
Obr. 43. Dvouválec FARELL G 2603 150 x 300 mm	62
Obr. 44. Připravená nálož do vulkanizační formy	62
Obr. 45. Hydraulický vulkanizační lis IGTT	63
Obr. 46. Vulkanizační forma se zkušebními tělísky	63
Obr. 47. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 1. oblast měření, před lisováním	64
Obr. 48. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 2. oblast měření, před lisováním	64
Obr. 49. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 1. oblast měření, po lisování	65
Obr. 50. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná, 2. oblast měření, po lisování	65
Obr. 51. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 1. oblast měření, před lisováním	66
Obr. 52. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 2. oblast měření, před lisováním	66
Obr. 53. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 1. oblast měření, po lisování	67
Obr. 54. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná, 2. oblast měření, po lisování	67
Obr. 55. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 1. oblast měření, před lisováním	68
Obr. 56. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 2. oblast měření, před lisováním	68
Obr. 57. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 1. oblast měření, po lisování	69
Obr. 58. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná, 2. oblast měření, po lisování	69
Obr. 59. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 1. oblast měření, před lisováním	70
Obr. 60. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 2. oblast měření, před lisováním	70
Obr. 61. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 1. oblast měření, po lisování	71
Obr. 62. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná, 2. oblast měření, po lisování	71
Obr. 63. Zkušební tělísko č. 3 – 1. oblast měření, před lisováním	72
Obr. 64. Zkušební tělísko č. 3 – 2. oblast měření, před lisováním	72
Obr. 65. Zkušební tělísko č. 3 – 1. oblast měření, po lisování	73

Obr. 66. Zkušební tělísko č. 3 – 2. oblast měření, po lisování.....	73
Obr. 67. Zkušební tělísko č. 4 – 1. oblast měření, před lisováním	74
Obr. 68. Zkušební tělísko č. 4 – 2. oblast měření, před lisováním	74
Obr. 69. Zkušební tělísko č. 4 – 1. oblast měření, po lisování.....	75
Obr. 70. Zkušební tělísko č. 4 – 2. oblast měření, po lisování.....	75
Obr. 71. Zkušební tělísko č. 5 – před lisováním	76
Obr. 72. Zkušební tělísko č. 5 – po lisování	76
Obr. 73. Zkušební tělísko č. 1 – nepískovaná	78
Obr. 74. Zkušební tělísko č. 1 – pískovaná.....	78
Obr. 75. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná	79
Obr. 76. Zkušební tělísko č. 2 – pískovaná.....	79
Obr. 77. Zkušební tělísko č. 3	80
Obr. 78. Zkušební tělísko č. 4	81
Obr. 79. Zkušební tělísko č. 5 – čirý.....	81
Obr. 80. Zkušební tělísko č. 5 – modrý	82
Obr. 81. Porovnání zkušebních tělísek před lisováním	83
Obr. 82. Porovnání zkušebních tělísek po 100 zálisech	84
Obr. 83. Porovnání zkušebních tělísek po 200 zálisech	85
Obr. 84. Zkušební tělísko č. 1 - nepískovaná.....	86
Obr. 85. Zkušební tělísko č. 1 - pískovaná	87
Obr. 86. Zkušební tělísko č. 2 – nepískovaná	87
Obr. 87. Zkušební tělísko č. 2 - pískovaná	87
Obr. 88. Zkušební tělísko č. 3	88
Obr. 89- Zkušební tělísko č. 4.....	88
Obr. 90. Zkušební tělísko č. 5 - čirý	88
Obr. 91. Zkušební tělísko č. 5 - modrý	89

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Chemické složení oceli 1.2709 v % [55].....	55
Tab. 2. Chemické složení oceli 1.2080 v % [56].....	56
Tab. 3. Fyzikálně mechanické hodnoty kaučukové směsi.....	59
Tab. 4. Vulkanizační charakteristiky použité běhounové směsi.....	61
Tab. 5. Jakost povrchu zkušebních tělísek před a po lisování.....	77