



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ ROZMĚROVÉ A TVAROVÉ PŘESNOSTI SOUČÁSTÍ VYROBENÝCH Z PLASTU

EVALUATION OF DIMENSIONAL AND SHAPE ACCURACY OF COMPONENTS MADE OF PLASTIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marek Tuza

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Marek Tuza**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat výzkumem změn rozměrové a tvarové přesnosti po obrábění součástí vyrobených z plastu. Teoretická část bude obsahovat literární rešerši, která se bude zabývat technickými plasty, jejich 3D tiskem a technologií obrábění. V experimentální části bude vybráno několik druhů technických plastů (konvenčních, 3D tisk), u kterých budou připraveny povrchy technologií frézování pro vlastní měření. Pro zachování validity výsledků měření budou všechny vzorky připraveny v unifikované podobě a obrobny při definovaných řezných podmínkách (řezné prostředí). Výstupem práce bude analýza naměřených dat a zhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti jednotlivých plastových součástí s doporučením k jejich praktickému využití.

Cíle diplomové práce:

Teoretická část – rešerše v oblasti technických plastů, jejich 3D tisku a možnosti obrábění.
Experimentální část – příprava vzorků, hodnocení rozměrů a tvarů u vybraných zkušebních vzorků z technických plastů.
Analýza, zpracování a vyhodnocení naměřených dat.
Zhodnocení dosažených výsledků vzhledem k praktickému využití materiálů.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
HUMÁR, A., PÍŠKA, M. Materiály pro řezné nástroje. Vyd. 1. Praha: MM publishing, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ
NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ
NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK
CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical
Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.

PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM,
s.r.o., 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu. K tomu bylo využito celkem 10 vzorků vyrobených dvěma typy výroby, extruzí a 3D tiskem metodou FFF. Polotovary byly po výrobě frézovány, čímž vznikly vzorky o požadovaných rozměrech. Vzorky byly frézované z jedné strany bez chladicí emulze a z druhé strany s chladicí emulzí, která měla významný vliv na výsledné hodnoty tvarové přesnosti. Obrobeno bylo tedy celkem 20 ploch k hodnocení. Pro hodnocení rozměrů byly vybrány dva parametry, a to vzdálenost a rovnoběžnost. Při měření tvarů bylo hodnoceno 11 parametrů, a to pomocí 2D profilu drsnosti a 3D textury povrchu. Jedním z nejpoužívanějších parametrů, který byl hodnocen při měření tvarů, byla průměrná aritmetická odchylka profilu, která se značí Ra. Z výzkumu práce bylo zjištěno, že nejvyšší přesnosti byly naměřeny u materiálu PA, který byl vyrobený 3D tiskem a obrobený s chladicí emulzí. V závěru praktické části autor také vytváří doporučení vzhledem k praktickému využití materiálů.

Klíčová slova

extruze, frézování, obrábění, plast, rozměr, tvar, 3D tisk

ABSTRACT

The aim of this thesis is to evaluate the dimensional and shape accuracy of components made of plastic. A total of 10 samples, produced by two types of production, extrusion and 3D printing using the FFF method, were used for this purpose. The semi-finished products were milled after production, which resulted in samples of the required dimensions. The samples were milled on one side without cooling emulsion and on the other side with cooling emulsion, which significantly affected the resulting shape accuracy values. Thus, a total of 20 surfaces were evaluated. Two parameters were selected to evaluate the dimensions, namely distance and parallelism. When measuring the shapes, 11 parameters were evaluated using a 2D roughness profile and a 3D surface texture. One of the most used parameters that was evaluated when measuring shapes was the arithmetic mean deviation of the roughness profile, which is denoted as Ra. The research found that the highest accuracies were measured for the material PA produced by 3D printing and milled with a cooling emulsion. At the end of the practical part, the author also makes recommendations regarding the practical use of materials.

Key words

Extrusion, Milling, Machining, Plastic, Dimension, Shape, 3D printing,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TUZA, Marek. Hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140245>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Sedlák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

V Brně 20.05.2022

místo, datum

Marek Tuza

Bc. Marek Tuza

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále děkuji Univerzitě obrany v Brně za spolupráci při vyhodnocování měřených parametrů. Rovněž bych rád poděkoval rodině, která mě při studiu podporovala.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	11
2.1 Charakteristika plastů.....	11
2.1.1 Historie plastů.....	12
2.1.2 Rozdělení plastů	13
2.2 Technologie extruze	14
2.3 Technologie 3D tisku	15
2.3.1 Historie 3D tisku.....	16
2.3.2 Metody 3D tisku	17
2.3.3 Využití 3D tisku.....	20
2.4 Třískové obrábění plastů	21
2.4.1 Řezání plastů	21
2.4.2 Frézování plastů.....	22
2.5 Rozměrová a tvarová přesnost.....	24
2.5.1 Definice rozměrů	24
2.5.2 Definice geometrických tolerancí.....	26
2.5.3 Definice tvarů.....	27
2.5.4 Dosažitelné přesnosti dle způsobu výroby.....	30
3 PRAKTICKÁ ČÁST.....	32
3.1 Použité materiály.....	32
3.2 Použité přístroje	35
3.2.1 Technologie 3D tisk.....	35
3.2.2 Technologie řezání.....	36
3.2.3 Technologie frézování	37
3.2.4 Měření rozměrů	38
3.2.5 Měření tvarů obrobených povrchů.....	39
3.3 Výroba vzorků	40
3.3.1 Výroba vzorků extruzí	40
3.3.2 Výroba vzorků 3D tiskem	40
3.4 Třískové obrábění	48
3.5 Měření vzorků.....	50
3.5.1 Výsledky rozměrů.....	52
3.5.2 Výsledky hodnocení obrobených ploch.....	54
3.6 Porovnání výsledků.....	60
3.7 Zhodnocení výsledků vzhledem k praktickému využití.....	62
ZÁVĚR.....	63
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	64
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
SEZNAM PŘÍLOH	73

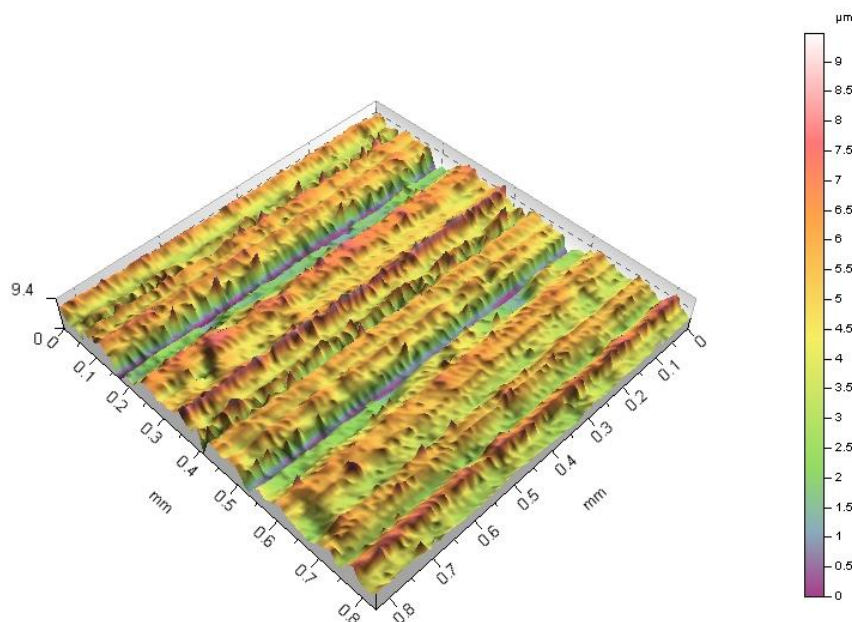
ÚVOD

Plasty jsou běžnou součástí lidstva téměř 70 let, kdy začala jejich masová výroba. Jejich největší výhodou oproti jiným látkám je jejich lehkost, dostupnost a finanční nenákladnost výroby. Hlavní nevýhodou využívání plastů ve výrobě jsou především mechanické vlastnosti, viz tab. 4, kvůli kterým se v určitých případech místo plastů využívají kovové materiály jako např. hliník a ocel. I přes další významné nevýhody plastů, jako je především znečišťování životního prostředí, jsou stále hojně používané a jejich význam je pro výrobní průmysl zásadní. [1; 2]

Možností výroby plastových součástí existuje velká řada. Mezi tradiční způsoby patří výroba extruzí neboli vytlačováním. Mezi stále progresivnější technologie výroby plastových součástí se řadí 3D tisk. Tato metoda nepatří mezi nové technologie, avšak větší pozornosti se jí dostalo až v posledních letech. Výše zmíněné předpoklady vedly autora k porovnání rozdílů obrobenech plastových součástí, které byly vyrobeny pomocí extruze a 3D tisku. Vzorky byly připraveny v podobě menších desek. Technologii obrábění bylo zvoleno frézování. Pro porovnání byl každý vzorek obroben ze dvou největších protilehlých ploch. Z jedné strany byla použita chladicí emulze a z druhé nikoliv. [3]

Autor vybral pro výzkum nejrozličnější druhy plastových materiálů. Z každé technologie výroby bylo zvoleno 5 druhů, takže celkem se jedná o 10 vzorků. Jde např. o polypropylen (PP) a polyamid (PA). Jedním z nejzajímavějších materiálů, který byl vybrán pro tuto práci je polyethylen UHMW (PE-UHMW), ten se používá například pro kloubní náhrady.

Výsledkem této diplomové práce je zhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti vybraných druhů plastů. Rozměry jsou výstupem měření na souřadnicovém měřicím přístroji. Tvary vzorků byly měřeny na optickém měřicím přístroji a vyhodnoceny v závislosti na měření 2D profilu drsnosti a 3D textury povrchu, jejíž příklad je zobrazen na obr. 1. Výsledky empirického výzkumu povedou k vytvoření doporučení, díky kterým se firmy při zohlednění individuálních potřeb budou moci lépe rozhodnout, který způsob výroby plastových součástek zvolit, aby došlo k maximálnímu zvýšení kvality výrobku.



Obr. 1 3D textura povrchu.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Tato práce se zabývá hodnocením rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu. Autor v tomto výzkumu hodnotí 2 rozměrové a 11 tvarových parametrů na každém frézovaném plastovém vzorku. Polovina z nich byla vyrobena extruzí a polovina 3D tiskem metodou FFF. Každý materiál byl frézovaný z jedné strany bez chladicí emulze a z druhé strany s chladicí emulzí. K hodnocení bylo tedy připraveno celkem 20 ploch na 10 vzorcích o rozměrech 35 x 35 x 6 mm.

Pro tento výzkum bylo vybráno 5 vzorků z různých druhů materiálů vyrobených extruzí. Dalších 5 vzorků bylo opět z různých druhů materiálů, avšak některé byly shodné s materiály vyrobenými extruzí. Nejznámějšími plasty, které byly pro tento výzkum využity, byly polypropylen (PP), polyamid (PA), polyethylentereftalát (PET) a kyselina polymléčná (PLA). Poslední zmíněný materiál je nejpoužívanějším plastem pro 3D tisk metodou FFF. PLA se pro 3D tiskáře vyznačuje jako uživatelsky přívětivý materiál, který se však používá pouze při teplotách do 55 °C. Méně známými materiály, které byly použity pro tento výzkum, byly polyethylen ultra-high-molecular-weight (PE-UHMW), akrylonitrilbutadienstyren (ABS), polyethylentereftalát glykol (PETG) a polyoxymethylen (POM).

U rozměrových přesností byla hodnocena vzdálenost a rovnoběžnost dvou protilehlých obrobených ploch. Měření tvarových přesností obou ploch na každém vzorku se provedlo pomocí 2D profilu drsnosti a 3D textury povrchu. Nejznámějším a v praxi nejpoužívanějším parametrem, který zde byl hodnocen byla průměrná aritmetická odchylka profilu (R_a), ta se hodnotila měřením 2D profilu drsnosti. Dále pak byla hodnocena průměrná aritmetická odchylka povrchu (S_a), což je principiálně stejný parametr, jen s tím rozdílem, že S_a se hodnotí pomocí 3D textury povrchu. Dalšími vybranými parametry k měření tvarové přesnosti byly celková výška profilu (R_t), největší výška profilu (R_z), průměrná kvadratická odchylka povrchu (S_q) a další.

Díky tomuto výzkumu mohl vzniknout ucelený přehled, který hodnotí přesnosti dle druhu materiálu, výroby a použití chladicí emulze. Tato diplomová práce bude nápomocná především technologům a frézařům, kteří se budou rozhodovat, jaký plast zvolit pro specifický frézovaný díl, u kterého jsou požadavkem vyšší nároky na rozměrovou a tvarovou přesnost.

2 TEORETICKÁ ČÁST

V této části diplomové práce je vypracována literární rešerše, která tvoří teoretický základ potřebný k vypracování praktické části. Nejprve jsou charakterizovány plasty, jejich historie a význam. Dále je provedeno jejich rozdělení dle chování při působení tepla.

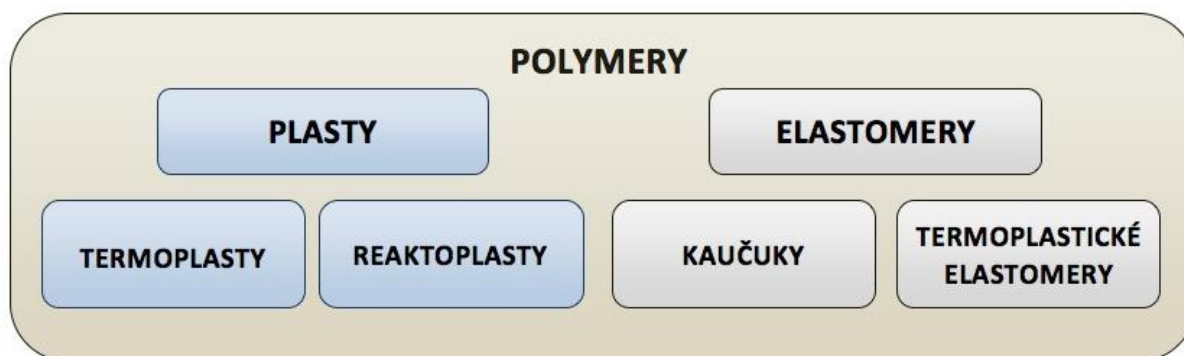
V další podkapitole jsou definovány pro tuto práci relevantní technologie výroby plastových polotovarů. První z nich je klasická extruze, která zhotovuje polotovary dle tvaru vytlačovací hlavy. Dále jsou popsány metody 3D tisku, jež vyrábí součásti dle modelu, který je zhotoven v některém z příslušných programů určených pro modelování. Pro možnost výběru metody 3D tisku je vytvořen jejich ucelený přehled, ze kterého je do praktické části vybrána právě jedna z metod.

Následující podkapitola se věnuje třískovému obrábění. Polotovary, které byly připraveny extruzí, byly dodány ve formě desek, a proto musely být nejprve nařezány na pásové pile. Kromě řezání je zde popsáno také frézování plastů, díky čemuž byly v praktické části zhotoveny povrchy k hodnocení.

V poslední části jsou popsány zásadní parametry pro hodnocení rozměrové a tvarové přesnosti. Rozměry se hodnotí pomocí vzdálenosti dvou bodů nebo ploch. Každý rozměr má svoji toleranci, ve které může být vyroben. Jsou dány buď tzv. nepředepsanými mezními úchytkami, které jsou uvedeny ve výkresové dokumentaci, nebo přímo u rozměrů ve formě mezních úchylek, uložení apod. Pro hodnocení tvarů bylo vybráno několik parametrů. K jejich měření slouží 2D profil drsnosti a 3D textura povrchu.

2.1 Charakteristika plastů

Plasty jsou polymery, které se skládají z řetězce molekul. Vlivem působení síly u nich dochází k deformaci převážně nevratného charakteru. Plasty lze dělit na základě různých kritérií. Jedním z nich je jejich chování při zahřívání. Dle tohoto charakteru se dělí na termoplasty a reaktoplasty, viz obr. 2. [4; 5]



Obr. 2 Základní rozdělení polymerů [4].

Plasty hrají v moderní strojírenské výrobě nezastupitelnou roli. Jejich pokroky jsou nejvíce vidět v automobilovém průmyslu, avšak pronikají i do dalších odvětví. Hlavním důvodem využívání plastových materiálů je jejich nízká hmotnost. Další výhodou je kombinace řady vlastností, které jsou na daný výrobek nebo zařízení vyžadovány. Důraz bývá kladen především na mechanické a kluzné vlastnosti, odolnost proti otěru, hoření, stárnutí a vlhkosti. Dalším požadavkem na výrobky bývá estetický vzhled a kvalita povrchu. Z důvodu inovací postupně vznikají vyšší nároky na materiál. Pro obrábění jsou plastové polotovary většinou dodávány ve formě desek a tyčí, viz obr. 3. [6]



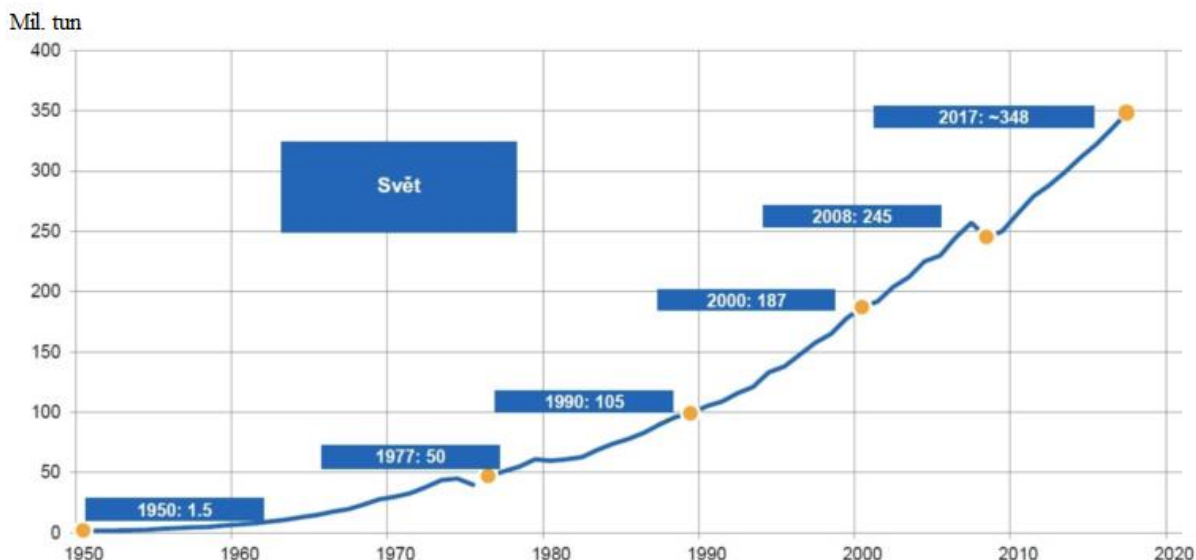
Obr. 3 Příklad plastových polotovarů [7].

2.1.1 Historie plastů

Prvním vynalezeným plastem byla nitrocelulóza, kterou v roce 1833 objevil Francouz Henri Braconnot. Tento plast se začal hojněji používat až v druhé polovině 19. století, a to například pro výrobu kulečnickových koulí. V tu dobu odstartoval rozmach plastů, které nahradily dříve používanou slonovinu. [8]

Dalším významným milníkem v historii plastů bylo objevení prvního syntetického plastu, kterým byl bakelit. Ten byl vynalezen začátkem 20. století a o jeho objevení se postaral chemik Leo Hendrik Baekland. Tento plast se poté začal používat v průmyslu a běžném životě. Největší pokrok ve světě plastů proběhl během první poloviny téhož století, k čemuž přispěly obě světové války. Postupně byl vynalezen také celofán, polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), nylon (PA), polyethylen (PE) a další. V druhé polovině 20. století se výroba plastů zněkolikanásobila. První plastové láhve se objevily v roce 1968 a od té doby jsou nedílnou součástí každodenního života. Průměrné tempo růstu produkce plastů je v posledních letech 8,5 % ročně. Největším producentem plastů je Čína, která představuje jednu třetinu celosvětové produkce. V této zemi se však jedná o nižší podíl produkce než u jiných průmyslových materiálů. [8]

Hlavní nevýhodou některých druhů plastů je nemožnost jejich opětovné recyklace. Dle Evropské komise se v Evropě recykluje pouze 30 % plastů. Ostatní se buď spalují anebo končí na skládkách. Mezi hlavní důvody tohoto faktu patří používání jednorázových přístrojů, sáčků, obalů, lahví od nápojů a jejich následné netřídění. Mezinárodní energetická agentura předpovídá do poloviny 21. století roční produkci kolem 600 milionů metrických tun. V případě, že bude výrobní trend plastů pokračovat, bude do roku 2050 v mořích více plastů než ryb. Postupné zvyšování produkce plastů lze vidět na obr. 4. [8; 9]



Obr. 4 Produkce plastů ve světě [10].

2.1.2 Rozdělení plastů

Dle výše uvedeného v kapitole 2.1, plasty se mohou dělit podle jejich chování při zahřívání na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty při zahřívání měknou tzn. přechází do plastického stavu a lze je vlivem působení vnější síly tvářet. Při zahřátí nad teplotu tání dochází k rozpadu krystalické struktury a tím se mění na taveninu. Teplota tavení většiny druhů termoplastů se pohybuje kolem 150 až 200 °C. Tato teplota se využívá například pro technologie vstřikování a vytlačování. Nejznámějším materiálem, který odolává vysokým teplotám, je teflon. Jeho teplota tavení je přibližně 340 °C. Po ochlazení přechází materiál do tuhého stavu. Při zahřívání termoplastů nedochází ke změně jejich chemické struktury. Procesy změny, kterými materiál prochází, mají čistě fyzikální charakter. Tyto materiály lze tedy tvářet i opakovaně. Mezi termoplasty se řadí polypropylen (PP), polyethylen (PE), polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS), polyethyltereftalát (PET) a další. Na obr. 5 lze vidět příklady aplikací některých termoplastů. [4; 11; 12]



Obr. 5 Příklady aplikací termoplastů [4].

Reaktoplasty, dříve nazývané termosety, jsou naopak druh plastů, který je tvárný pouze určitou dobu po zahřátí. Během procesu ochlazování, který se jinak nazývá vytvrzování, dochází k chemické reakci, díky které vznikne zesíťovaná struktura. Vytvrzený materiál nelze znovu převést do taveniny. Jedná se tedy o nevratný proces, po kterém již není možné materiál znovu tvarovat a jeho stav je konečný. Spotřeba reaktoplastů z celkového množství zpracovaných plastů tvoří zhruba 15 až 20 %. Mezi reaktoplasty patří např. fenol-formaldehydová pryskyřice (PF), melamin-formaldehydová pryskyřice (MF), epoxidová pryskyřice (EP), polyesterová pryskyřice (UP) a další. Příklady aplikací reaktoplastů jsou zobrazeny na obr. 6. [4; 11; 13]

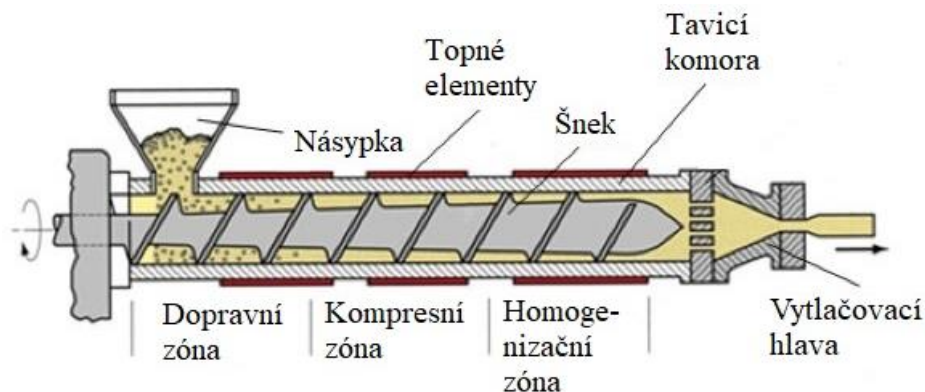
Mezi termoplasty a reaktoplasty existují zásadní rozdíly, které souvisí především s nemožností opětovného tavení reaktoplastů. Je pro ně tedy charakteristická vysoká teplotní odolnost, tvrdost, tuhost, tvarová stálost za působení tepla a dobrá odolnost proti chemikáliím. Na rozdíl od termoplastů, viz tab. 4, mají lepší mechanické vlastnosti vzhledem ke změně teploty. Hlavními nevýhodami reaktoplastů v porovnání s termoplasty jsou malá tažnost a nemožnost recyklace, což má negativní vliv na životní prostředí. [4]



Obr. 6 Příklady aplikací reaktoplastů [4].

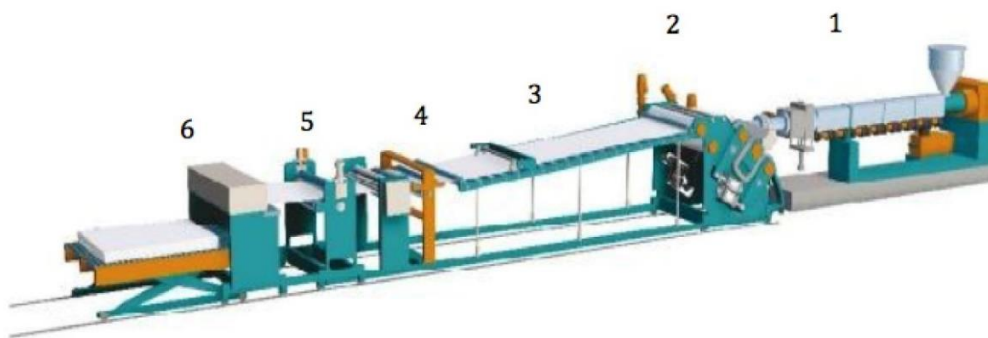
2.2 Technologie extruze

Extruze či vytlačování je technologie, při které je výsledkem požadovaný tvar plastu o konkrétní délce. V první fázi extruze se do násypky přidá materiál, a to většinou ve formě plastového granulátu. Tento materiál je postupně tlačěn tavicí komorou. Pohyb materiálu zajišťuje otáčející se šnek. Po celé délce šneku jsou topné elementy, které zahřívají plast na vysokou teplotu, aby byl dobře tvárný. Po roztavení materiálu dochází k jeho vytlačování pomocí hlavy, čímž se získá požadovaný tvar. Tento proces zobrazuje obr. 7. [14; 15]



Obr. 7 Řez extrudérem [16].

Při vytlačování malých tvarů materiál okamžitě tuhne a vytváří souvislou délku konstantního tvaru. Praktickým příkladem může být vytlačování zubní pasty z tuby. Při vytlačování velkých desek se materiál za tepla válcuje, aby získal požadovaný tvar a velikost. Až poté přechází do chladicí části. U vytlačování menších profilů je výrobní proces podobný, jen s tím rozdílem, že se zde provede pouze malá kalibrace rozměru a materiál rovnou postupuje do chladicí části. V další operaci získává materiál přesné rozměry, a to v ořezávací části. Při spouštění linky musí obsluha navést vytlačovaný materiál k tažným válcům a poté je celý proces automatizován. Poslední operací je dělení materiálu na požadovanou délku. Na obr. 8 je zobrazen příklad linky na vytlačování desek. [14; 15]



1 – extruder, 2 – válcovací část, 3 – chladicí část s válečkovým dopravníkem, 4 – ořezávací část, 5 – tažné válce, 6 – dělicí část.

Obr. 8 Linka na vytlačování desek. [16].

2.3 Technologie 3D tisku

3D tisk je aditivní technologie výroby tzn. opak obrábění. Při obrábění je vstupním materiálem polotovár o určitých rozměrech. Z něho se postupně odebírání materiál až do chvíle, než vznikne finální součást. 3D tisk nemá na začátku procesu žádný polotovár, ale pouze vstupní materiál ve formě drátu, prášku, pryskyřice a další. Na začátku tisku je tedy prázdná pracovní plocha a součást vzniká postupným vrstvením vstupního materiálu. [3; 17; 18]

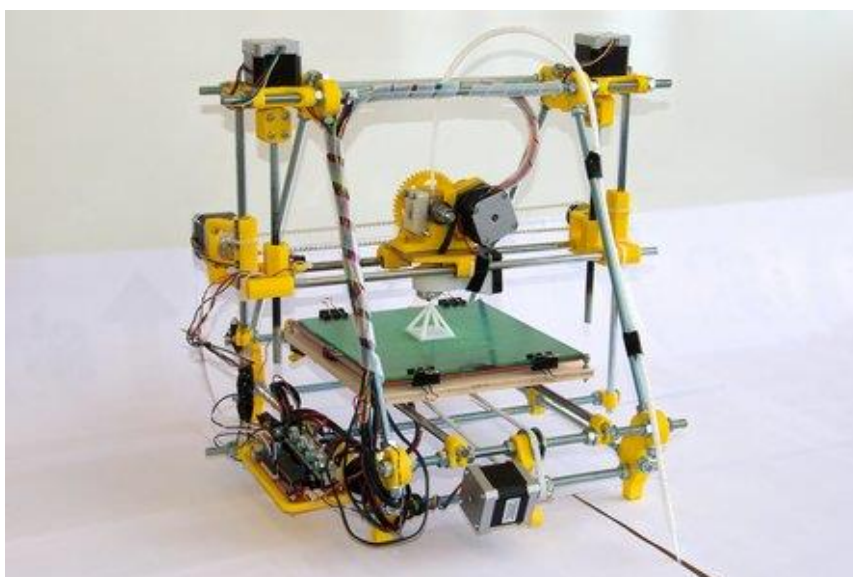
Před tiskem dílu musí být zhotoven trojrozměrný model v některém z konstrukčních programů. Požadovaná součást se po vymodelování přesune do tiskového programu. V tomto programu se upraví základní parametry tisku, jako např. materiál, rychlost, tloušťka vrstvy, hustota výplně a další. Po zadání těchto parametrů se vygeneruje program, který se nahraje do tiskárny. Příprava samotného tisku záleží na konkrétní metodě, avšak po spuštění se jedná o automatizovaný proces, který se dokončí po zhotovení součástí, jež byly zadány do programu. Pokud se jedná o výrobu složitých dílů, je v případě použití podpor nutné jejich odstranění po dokončení tisku. V případě potřeby přesných rozměrů se výrobek po vytisknutí obrábí. Příklady součástí vyrobených 3D tiskem jsou zobrazeny na obr. 9. [3; 17; 18]



Obr. 9 Díly vyrobené technologií 3D tisku [19].

2.3.1 Historie 3D tisku

První 3D tisk digitálních dat proběhl v 80. letech 20. století. Provedl ho Charles W. Hull, který v roce 1986 získal patent na technologii SLA. Touto technologií se v dnešní době vyrábí složité součásti letadel a automobilů. První 3D tiskárny se začaly prodávat v roce 1992. Nabídla je firma 3D Systems, jejímž zakladatelem byl právě Charles W. Hull. Jedním z nejdůležitějších milníků novodobého 3D tisku je rok 2005, kdy byl na University of Bath založen projekt RepRap a to doktorem Adrianem Bowyerem. Jednalo se o projekt, jehož cílem bylo zhotovit 3D tiskárnu, která bude tisknout další tiskárny. Respektive chtěl být schopný si vytisknout většinu komponentů pro nové tiskárny. RepRap tiskárny jsou v dnešní době nejrozšířenějším typem po celém světě. Tyto tiskárny se kupují buď jako stavebnice, anebo již kompletně sestavené. Příkladem RepRap tiskárny je tiskárna Pusa Mendel, která je zobrazena na obr. 10. [3; 20]



Obr. 10 Tiskárna Prusa Mendel [21].

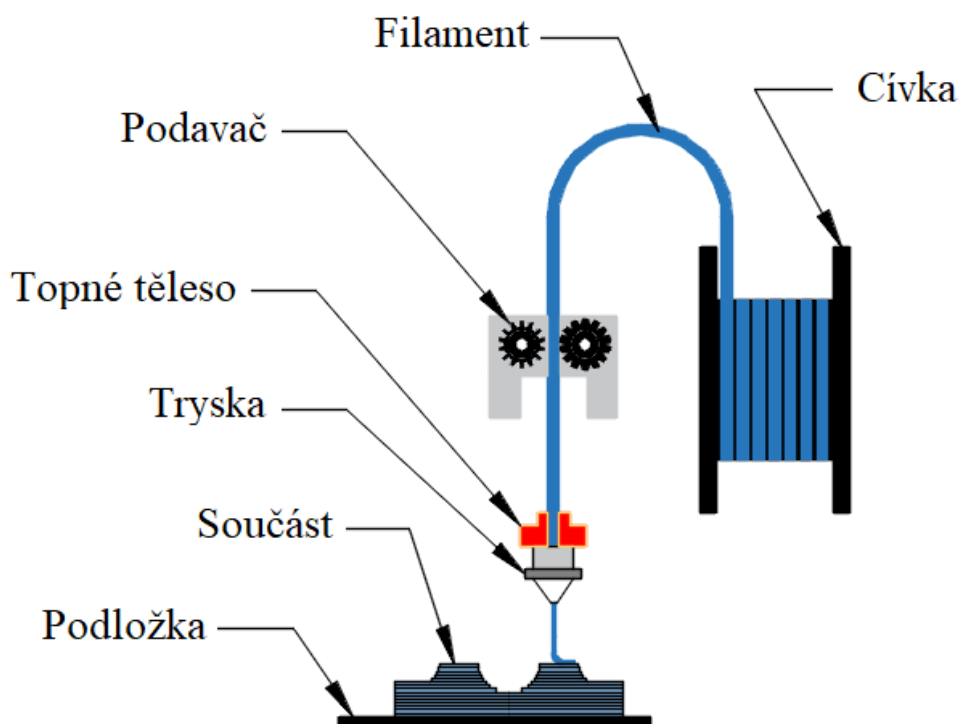
2.3.2 Metody 3D tisku

Kvůli specifickým požadavkům na tisk existuje spousta metod 3D tisku. Mezi nejčastější požadavky patří tisk složitých tvarů s jemným rozlišením a vysokou přesností. Díky možnosti tvorby modelu metodou Rapid Prototyping (RP) lze vyrábět prototypy o různých velikostech. Není tedy nutné vyrábět drahou vstříkovací formu, která se bude postupně upravovat, ale je možnost vytisknutí prototypu, na kterém se vyladí všechny chyby. Nejběžnější metodou 3D tisku je Fused Filament Fabrication (FFF). Mezi další hlavní metody patří Stereolitografie (SLA), Selective Laser Sintering (SLS), Laminated Object Manufacturing (LOM), Multi Jet Fusion (MJF) a další. [11; 22; 23; 24]

Popis metod:

- **Fused Filament Fabrication (FFF)**

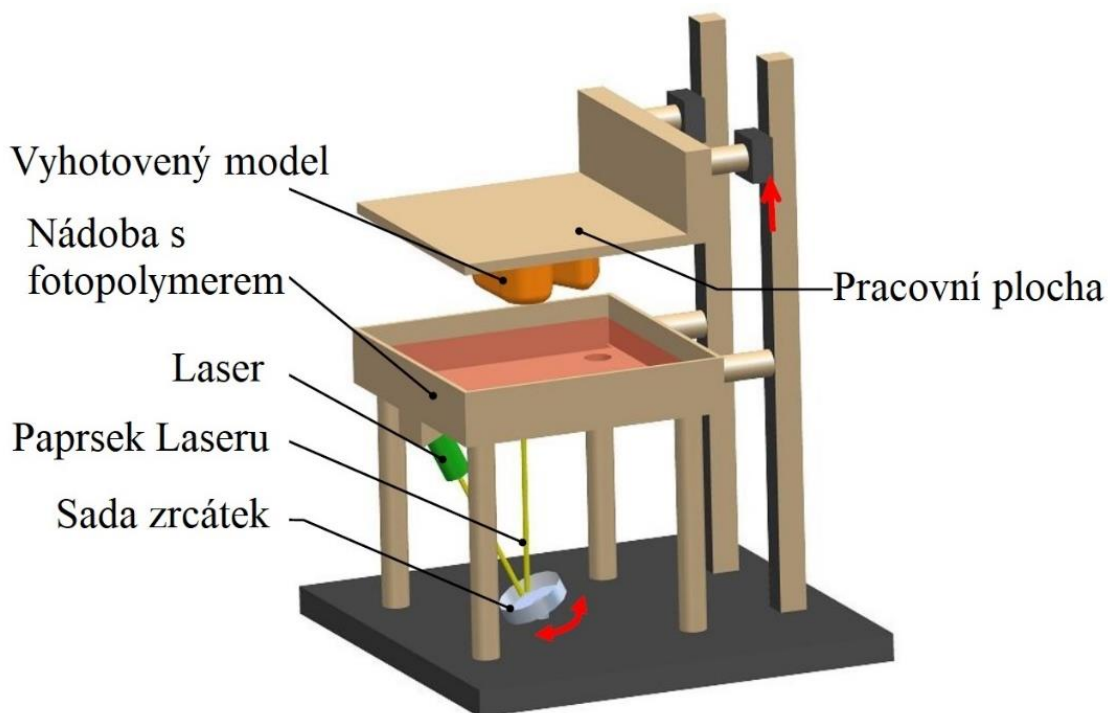
- Principem této metody je postupné natavování vrstev. Vstupním materiálem je drát neboli filament umístěný na cívce. Pohyb filamentu zajišťují podavače, což jsou dvě malá ozubená kola, která jsou umístěna proti sobě. Filament je následně tlačен do extruderové hlavy, kde je topné těleso, které částečně taví drát. Materiál je dále tlačен skrz tryšku na podložku, kde vzniká výsledný díl. Tato metoda je zobrazena na obr. 11. [22; 23; 24]
- Zásadní vlastností pro tuto metodu je termoplasticita polymerního filamentu, která zajišťuje spojení natavovaných vrstev. Vstupní materiál je drát nejčastěji o průměru 1,75 mm. Nejpoužívanější průměr trysky je 0,4 mm. Tloušťka jednotlivých vrstev je většinou v rozsahu 0,05 až 0,3 mm. Tyto hodnoty mají vliv především na kvalitu povrchu. [3; 23]
- Výhodou této technologie je jednoduchá tvorba programu a nízká cena. Mezi nevýhody patří zhoršené mechanické vlastnosti kvůli jednotlivým vrstvám. Další velkou nevýhodou je možnost tisknutí pouze omezeného počtu termoplastických materiálů. Základním předpokladem pro zhotovení 3D výtisku je zajištění přilnavosti materiálu na podložku. [23]



Obr. 11 Metoda FFF [25].

▪ Stereolithography (SLA)

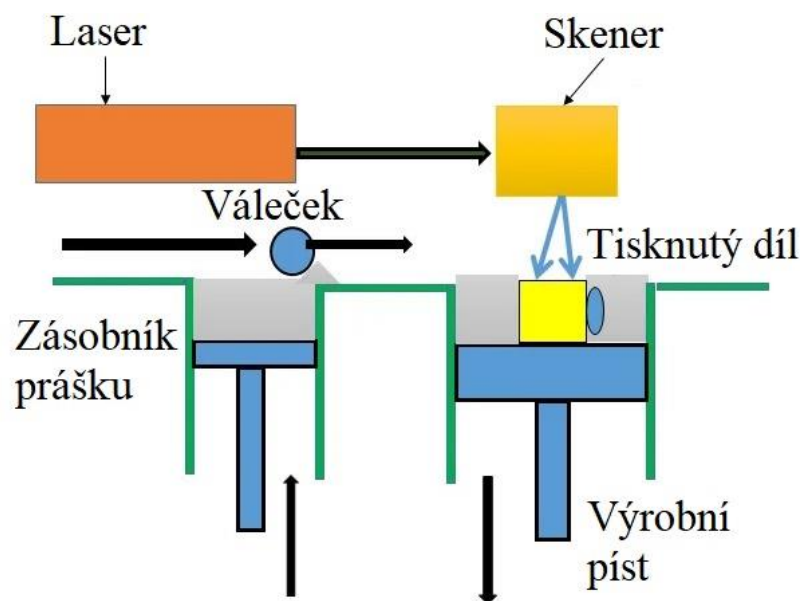
- Metoda je založena na principu postupného vytvrzování jednotlivých vrstev. Na začátku procesu je pracovní plocha ponořena v nádobě s tekutým fotopolymerem. Následně se vrstva po vrstvě vytvrzuje pomocí laseru, který vytvoří UV záření. Pracovní plocha se pohybuje směrem vzhůru, a tím vzniká postupně model. V případě, že jsou požadavkem lepší mechanické vlastnosti, tak se součásti po zhotovení vytvrzují ve speciálních komorách. Tato metoda je zobrazena na obr. 12. [3; 20; 23; 24]
- Dle výše uvedeného v kapitole 2.3.1 je SLA nejstarší metodou 3D tisku. Mezi výhody patří detailní povrch vytisknutého dílu, protože nejdou vidět jednotlivé vrstvy, jako např. u metody FFF. Další výhodou je přesnost dílu a to až 0,01 mm. Mezi nevýhody patří zdoluhavá doba tisku a možnost tisknout spíše menší objekty v závislosti na velikosti tiskárny a pracovní plochy. [3; 11; 20; 23]



Obr. 12 Metoda SLA [26].

▪ Selective Laser Sintering (SLS)

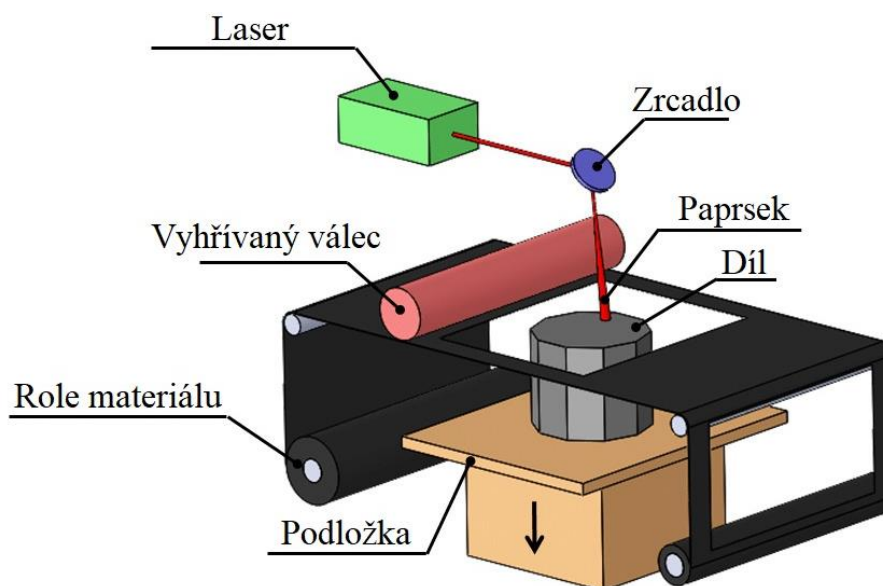
- Principem této metody je spékání jednotlivých vrstev pomocí laseru. Základními komponenty jsou laser, zásobník s práškem a tištěná plocha, kde dochází k celému procesu. V první fázi váleček nanáší prášek na desku, kde je spékán v požadovaném místě pomocí CO₂ laseru. Po vytvrzení se stůl posune o tloušťku vrstvy a je nanесena nová vrstva. Tento proces se opakuje do chvíle, než vznikne výsledný díl. Metoda SLS je zobrazena na obr. 13. [3; 11; 24]
- Mezi výhody patří široká škála použitelných materiálů. Další výhodou je pevnost dílů. Zásadní nevýhodou této metody je nákladné pořízení přístroje, a proto se jeho využití najde spíše ve větších firmách. Dalšími nevýhodami je nízká kvalita povrchu a energetická náročnost. [3; 23]



Obr. 13 Metoda SLS [27].

▪ Laminated Object Manufacturing (LOM)

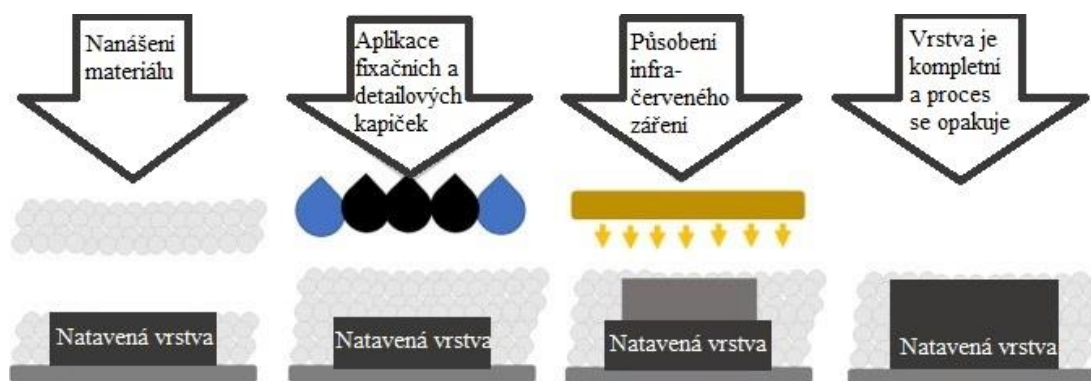
- Jedna z prvních komerčně dostupných aditivních výrobních metod. Principem je postupné nanášení fólie, která je na otočné roli. Fólie je ze spodní strany opatřena přilnavým nátěrem. Fólie se posunuje směrem k vyhřívanému válci, který ji zahřeje a připraví na lepení. Následně se přilepí na tištěný díl a její přebytečná část je v každé vrstvě oříznuta laserem. Proces nanášení jednotlivých vrstev se opakuje do chvíle, než vznikne konečný díl. Oříznutý materiál slouží jako podpory a po dokončení procesu ho lze odstranit a recyklovat. Tato metoda je zobrazena na obr. 14. [20; 23; 24]
- Použitým materiálem může být papír, plast, keramika a další. Mezi výhody této metody patří nižší náklady a využití pro tisk větších předmětů. Hlavní nevýhodou je možnost tisku dílů pouze se silnou stěnou. Vytisknuté díly jsou charakteristické horšími mechanickými vlastnostmi, a proto se používají spíše jako reklamní předměty za účelem vizualizace, marketingu a prezentace výrobků zákazníkům. Další využití nachází ve slévárenství. [20; 23; 24]



Obr. 14 Metoda LOM [28].

▪ Multi Jet Fusion (MJF)

- Jedná se o jednu z nejnovějších a nejmodernějších metod, její princip je zobrazen na obr. 15. V první fázi jsou postupně nanášeny vrstvy prášku na podložku. Po nanesení jedné vrstvy jsou aplikovány fixační kapičky, které jsou z černého inkoustu a ten absorbuje infračervené záření. Při nanášení fixační vrstvy dochází současně i k nanášení detailových kapiček, které mají za úkol při aplikaci kolem obrysů součásti zabránit splnutí částic a zlepšit rozlišení. K zahřívání nanesené vrstvy dochází vlivem působení infračerveného záření. Fixační vrstva vstřebává záření a přeměňuje je na tepelnou energii, která následně spéká a taví nanesený materiál. Tímto postupem vznikne jedna vrstva a poté se proces opakuje až do finálního zhotovení trojrozměrného dílu. [29; 30]
- Tento způsob je určený především pro velkoobjemový tisk. Rychlost tisku součástí je v porovnání s ostatními metodami desetinásobně vyšší. Výhodou je minimum odpadu, protože nejsou zapotřebí podpory, jako například u metody FFF. Mezi další výhody patří přesnost a možnost tisku součástí s drobnými detaily. Hlavní nevýhodou této metody je vysoká pořizovací cena v řádech milionů korun. Z důvodu vyšší rychlosti tisku se jedná o progresivní metodu, která má velký potenciál. V porovnání s metodou SLS se jedná až o 5x rychlejší tisk dílů. [29; 30]



Obr. 15 metoda MJF [29].

2.3.3 Využití 3D tisku

3D tisk je využíván především jako nástroj k rychlému tisku levných prototypů. Větší série plastových dílů se vyrábí převážně vstřikováním, což vyžaduje výrobu ocelového nástroje. Náklady na výrobu někdy i tunových nástrojů se pohybují v řádech milionů korun. Vysoká investice se vyplatí pouze v případě, že jsou výsledným produktem díly, které se budou vyrábět ve velkých sériích. Před výrobou takové formy je dobré vytisknout prototyp právě na 3D tiskárně. Po vytisknutí je možné si na fyzickém dílu ujasnit, zda zákazníkovi vyhovuje tvar a velikost součásti a zda lze započít výrobu velkého nástroje. [3]

Díky 3D tisku za použití vhodné metody lze během krátké doby vyrobit tvarově komplikovaný díl bez využití technologie obrábění. Obrábění se aplikuje spíše pro velmi přesné tvary nebo rozměry, které již 3D tiskárna není schopna vyrobit. Technologie se dále využívají v leteckém a automobilovém průmyslu. 3D tisk je populární ve zdravotnictví, a to z důvodu možnosti aplikace výroby tvarově složitých dílů, jako jsou například kloubní implantáty. Při výrobě dílů některou z metod 3D tisku odpadá nutnost zhotovení výkresové dokumentace, jelikož pro výrobu stačí pouze jeho počítačový model. [24]

3D tisk se dále využívá pro výrobu reklamních předmětů, na kterých může být umístěno reklamní logo firmy. Logo se umísťuje např. na přívěšek na klíče, držák na mobil, stojan na psací potřeby atd. Tuto aditivní technologii výroby implementuje i spousta stavebních

projektantů nebo architektů k zobrazení návrhů staveb. Umožní tím zákazníkovi vidět v reálné podobě objekt, který pro ně návrhář projektuje. V neposlední řadě je třeba zmínit využití FFF tiskáren v domácích dílnách. V dnešní době ji využívá spousta kutilů k opravě opotřebovaných dílů např. u běžných domácích přístrojů a spotřebičů. [3]

2.4 Trískové obrábění plastů

Obrábění je nejrychlejší a nejekonomičtější způsob dosažení hotových plastových součástí. Obráběním lze dosáhnout hotových součástí s extrémně přesnými tolerancemi. Využívají se k tomu CNC frézky, soustruhy nebo pily, které jsou vybaveny speciálními nástroji pro obrábění tvarových součástí z plastových polotovarů nebo předem vyrobených vstřikovaných dílů. [31]

Pro obrábění nevyztužených plastů se používají nástroje z rychlořezné oceli. Naopak pro vyztužené se používají nástroje se slinutým karbidem, které se vyznačují tvrdostí, pevností a houževnatostí. Při obrábění je dobré využít chlazení, aby nedocházelo vlivem tření k vzniku vysokých teplot a tím k nežádoucímu rozpínání obráběných součástí. Tepelná roztažnost je u plastů mnohonásobně větší než u kovů, a proto jsou plasty obráběny s širší toleranční přesností. Nelze tedy aplikovat stejné principy, jako při obrábění kovů. [31; 32]

Firmy stále více hledají zakázky na obrábění plastů, protože při jejich obrábění nevznikají tak velké síly. Na obráběcích strojích a nástrojích tedy vzniká menší opotřebení a tím se prodlužuje životnost nástroje. Při výběru vhodného materiálu se uživateli nabízí mnoho proměnných. Stále existuje rozšířené přesvědčení, že používání běžných kovů je výhodnější než používání plastů, avšak opak je pravdou. Plasty jsou vhodnou náhradou za bronz, korozivzdornou ocel a litiny. Některé plastové materiály mají vysokou odolnost proti působení tepla, což je velice žádoucí vlastnost. Příkladem takového materiálu může být polybenzimidazol (PBI-Celazole). Tento materiál je sice až 15x dražší než korozivzdorná ocel, ale odolává teplotám do 400 °C. Vzhledem k těmto vysokým cenám je nutné šetrné zacházení s tímto materiálem. K obrábění je nutné využít kvalitní obráběcí techniku a snížit počet neshodných součástí na minimum. Výhodou plastů je především nízká hmotnost, což je velký benefit například v leteckém průmyslu. Mezi další výhody patří nízká hladina hluku a v neposlední řadě na nich nevzniká oxidace tak, jak je tomu u kovů. [32; 33; 34]

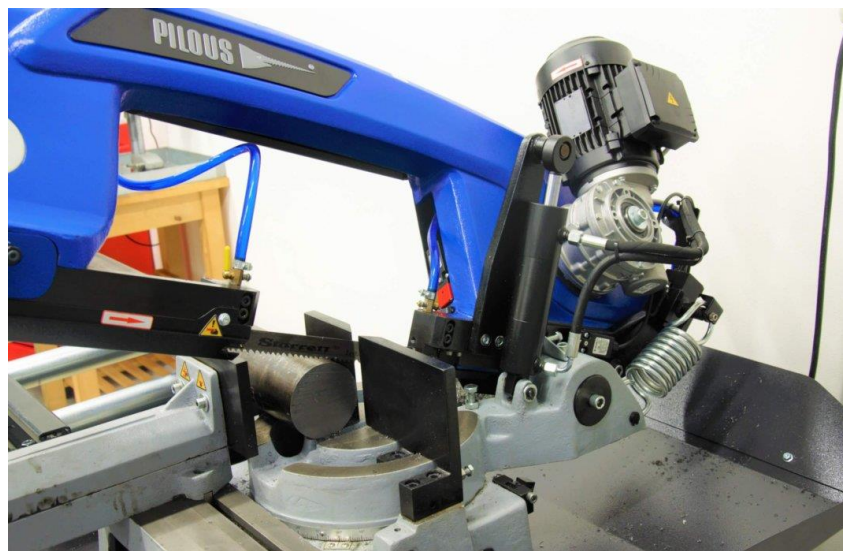
Pro výrobu plastových součástí je nutné projednat, kterou technologii výroby zvolit. Každá má plusy a mínusy. Většina plastových dílů se vyrábí vstřikováním, což je při velké sérii cenově nejvýhodnější metoda. Některé rozměry mohou mít menší tolerance a pro tyto případy se již používá obrábění. Obrábění probíhá buď od polotovaru, nebo se obrábí pouze přesné rozměry již vstřikovaného dílu. Obrábění plastů se používá především v malých sériích a tam, kde nelze využít 3D tisk. Obrábění má totiž nízké náklady. Pro výrobu vstřikovací formy jsou naopak potřeba velké počáteční investice. [32; 33]

2.4.1 Řezání plastů

Řezání je technologie dělení materiálu, při kterém dochází k úběru malých třísek. Jedná se o nejpoužívanější metodu dělení materiálu. Nástrojem je ve většině případů pilový list, který má břity, na jejichž velikosti, hustotě a tvaru závisí výkonnost řezání. Při výrobě součástí se tato technologie používá většinou jako první a rozděluje se na ruční a strojní. [35]

Plasty se nejčastěji řezou pásovou pilou, avšak používají se i další technologie jako např. řezání kotoučovou pilou nebo řezání laserem. Volba technologie závisí na požadovaném tvaru řezu. Největším problémem při řezání plastů je teplo generované nástrojem, které poškozuje materiál. Z tohoto důvodu je nutné použít správný pilový pás nebo kotouč pro každý materiál, dle katalogového listu. [33]

Pro řezání kulatých tyčí a trubek je nejvhodnější pásová pila, která je zobrazena na obr. 16. Pro řezání touto pilou je nutné používat ostré pilové listy s dostatečně vzdálenými břity. Dalším doporučením je odstraňování třísek, které mohou způsobit nepravidelnost řezného procesu. Při dělení materiálu pásovou pilou jsou velkou výhodou dlouhé pilové listy, díky nimž je teplo vznikající při řezání dobře odváděno. Pásové pily lze všestranně využít pro přímé, souvislé nebo nepravidelné řezy. Pro řezání plastových desek s rovnými řeznými hranami se používají spíše kotoučové pily, avšak pro menší rozměry lze využít i pásovou pilu. Pilové kotouče mají obvykle břity ze slinutého karbidu. Dalším způsobem, jak dělit plast, je řezání pomocí laseru. Laser se nevyužívá primárně pro dělení tyčí a desek, ale spíše pro řezání tvarových součástí. [33; 36]



Obr. 16 Řezání plastů na pásové pile [37].

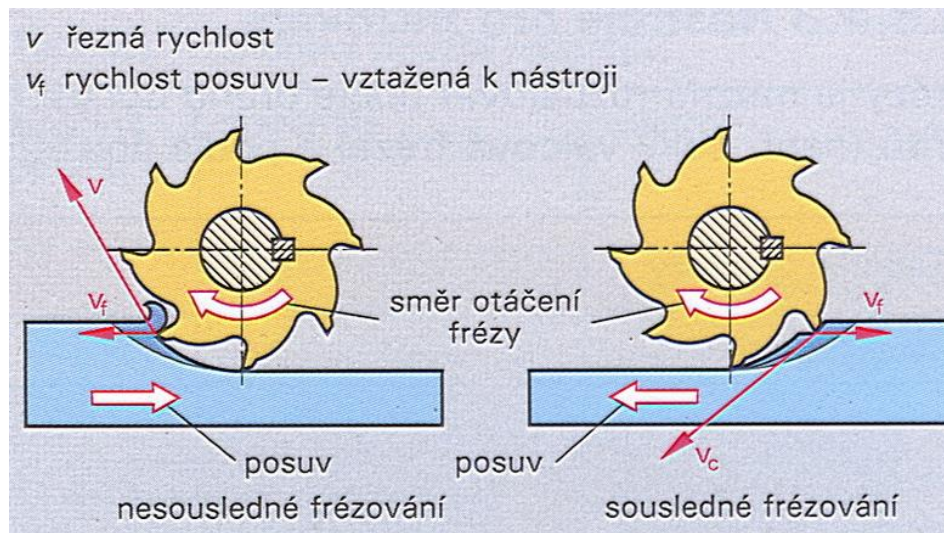
2.4.2 Frézování plastů

Frézování je strojírenská technologie, při které dochází k obrábění polotovarů z různých materiálů. Principem frézování je vnikání otáčejícího se nástroje do materiálu, čímž vzniká tříska, která je odebrána. Posuv většinou zajišťuje stůl, na kterém je upnutý obráběný díl. Stroj je frézka, která může měnit rychlost otáček a posuvu. Modernější frézky mají plynulý přechod rychlosti otáček a lze je automatizovat pomocí NC kódu. Nástroj je fréza, která má různý počet břitů. Každý břit odebrává určité množství materiálu. Dnešní konvenční frézky se používají spíše na základní operace. Tyto frézky využívají např. studenti ve školních dílnách, aby pochopili základní principy obrábění a domácí kutilové nebo méně zdatní obráběči ve strojírenských podnicích. [38; 39]

Zdatnější obráběči na pozici operátora nebo programátora CNC stroje pracují s modernějšími frézkami, které jsou již řízeny počítačem. Lze u nich využít vyšší výkon obrábění, což má za následek rychlejší proces obrábění. Tyto přístroje se dále vyznačují vyšší jakostí obrobených ploch, přesností a flexibilitou při obrábění tvarových ploch. Nejmodernější CNC stroje jsou schopny konat pohyb v několika osách a obsluhují je pouze profesionálové s několikaletou praxí ve strojírenské výrobě. [38; 39]

Frézování lze rozdělit dle pohybu nástroje na sousledné a nesousledné, viz obr. 17. Druh frézování má vliv na výkon stroje, drsnost povrchu a další. Při nesousledném frézování se obrobek posouvá v protisměru pohybu břitů frézy. Velikost třísky se u tohoto frézování mění z nulové hodnoty na hodnotu maximální. Při otáčení frézy vzniká zpevněný povrch. Důsledkem zpevněného povrchu je snížená celková životnost nástroje, protože se jednotlivé břity otírají o zpevněnou vrstvu, a tím se obrušují a odírají. Řezná síla zde působí směrem od stolu

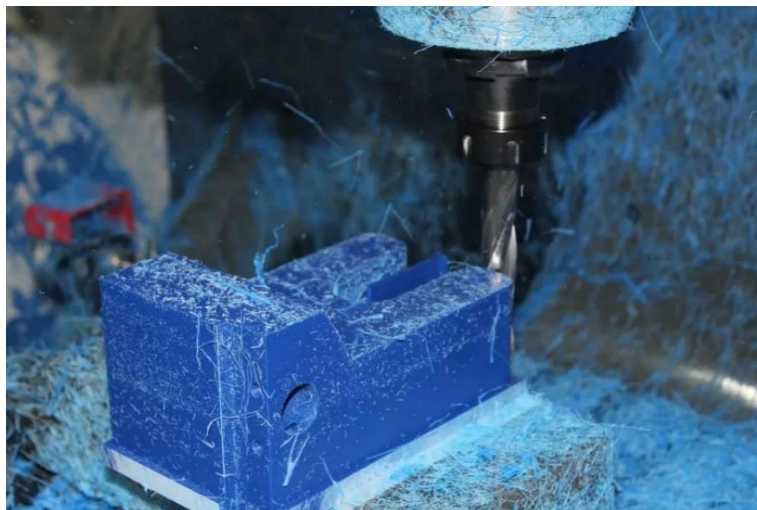
a vytlačuje obrobek směrem vzhůru. Při sousledném frézování je směr posuvu obrobku totožný se směrem pohybu břitů frézy. Maximální tloušťka třísky je odebírána při vnikání nástroje do obrobku a postupně se zmenšuje. Řezná síla působí směrem do obrobku. Sousledné frézování je častěji používané, protože má více výhod, jako například delší životnost nástroje. [39; 40; 41]



Obr. 17 Nesousledné a sousledné frézování [41].

Na konvenčních frézkách lze kromě jiných materiálů obrábět také plasty. Při frézování plastů je však nutné použít nástroje, u kterých je zaručený odvod třísek kvůli přehřívání v řezu. Pro řezné nástroje se doporučují naostřené břity kvůli snížení řezného výkonu a zlepšení kvality obrobeného povrchu. Při frézování plastů se doporučuje čelní frézování a zároveň se nedoporučuje obvodové frézování nástrojem s více než dvěma břity. Následkem vyššího počtu břitů při obvodovém frézování jsou zvýšené vibrace, které snižují kvalitu obrobené plochy. Nástroje na konvenčních frézkách jsou nejčastěji z rychlořezné oceli. Frézování plastů je zobrazeno na obr. 18. [33]

Plastové obrobky je nutné upnout pevně, ale zároveň tak, aby nebyly deformovány přitlačnou silou. Upínání obrobků se nejčastěji provádí do strojních svěráků nebo pomocí upínek. Tenké obrobky se upínají pomocí oboustranné lepicí pásky přímo na stůl frézky. Před použitím lepicí pásky je nutné odmastit všechny plochy, na kterých bude páska. Po frézování se páska odstraňuje např. lihem. [33]



Obr. 18 Frézování plastů [42].

2.5 Rozměrová a tvarová přesnost

S postupným vývojem vědy a techniky se stále zvyšují nároky na jakosti strojních součástí. Jakost je z hlediska technologie výroby třeba chápat jako přesnost rozměrů a tvarů. Je závislá na chemických a fyzikálních změnách materiálu po jejím obrobení. Na jakosti povrchu závisí životnost, spolehlivost provozu, přesnost chodu, hlučnost, přestup tepla, odolnost proti korozi součástí apod. [43; 44]

Hlavními parametry přesnosti jsou tedy rozměry a tvary. Rozměrová přesnost je hodnota délky nebo úhlu, která je požadována pro určitý díl. Tuto hodnotu určuje konstruktér dle následného použití dílu. Rozměrové přesnosti mají různé druhy tolerancí, které předepisují požadovaný rozměr v určitých mezích. Tolerance rozměrů se udává pouze na funkční díly. Příliš přesná výroba nefunkčních dílů zbytečně zvyšuje náklady na výrobu. Tolerování na výkrese se provádí pomocí předepsaných a nepředepsaných mezních úchylek a dále dle uložení. [44; 45; 46]

Tvarová přesnost se nejčastěji určuje na obrobených součástech, avšak ji lze určit i na neobrobených polotovarech, jejichž tvar závisí na typu výroby. Tyto polotovary mají většinou horší kvalitu a jsou nejčastěji vyrobeny pomocí kovadel nebo odléváním. Naopak vysoké kvality je dosahováno nejrůznějšími druhy obrábění. Vysoká přesnost obrábění se používá pro funkční díly, které jsou většinou ve styku s jiným tělesem a je nutné u nich zajistit kluzný povrch. Parametr, jímž se nejčastěji určuje tvarová přesnost je drsnost povrchu. [46]

Při výrobě součástí dochází k neočekávaným poškozením, čemuž se říká nedokonalost povrchu. Vzniklé nedokonalosti povrchu jsou způsobené během výroby, skladování nebo při použití součástí. Poškození, které lze klasifikovat jako nedokonalosti, jsou rýhy, trhliny, koroze apod. [44; 46]

2.5.1 Definice rozměrů

Rozměr je definován jako vzdálenost dvou bodů nebo ploch. Rozměry předepisuje konstruktér ve výkresové dokumentaci. Díly se vyrábí v různých rozměrových přesnostech a k jejich dodržení se volí adekvátní technologie výroby. Rozměrová přesnost je závislá na vlastním procesu výroby a lidském faktoru. Každý rozměr má vždy toleranci, kterou je nutno dodržet. Znalost tolerování je základním předpokladem tvorby výkresové dokumentace a práce s ní. Rozměry, které není nutné vyrábět s vysokou přesností, nemají specifikovanou toleranci. Tyto rozměry se řídí normou ISO 2768-1, která určuje jejich možnou úchylku, viz tab. 1 a tab. 2. Tyto všeobecné tolerance jsou rozděleny do čtyř tříd přesností a zároveň dle rozsahu rozměrů. [45; 46]

Tab. 1 Nepředepsané mezní úchytky délkových rozměrů [47].

Třída přesnosti		Mezní úchytky pro základní rozsah rozměrů [mm]							
Označení	Název	0,5–3	3–6	6–30	30–120	120–400	400–1000	1000–2000	2000–4000
f	Jemná	±0,05	±0,05	±0,1	±0,15	±0,2	±0,3	±0,5	-
m	Střední	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2,0
c	Hrubá	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2,0	±3,0	±4,0
v	Velmi hrubá	-	±0,5	±1	±1,5	±2,5	±4,0	±4,0	±8,0

Tab. 2 Nepředepsané mezní úchytky úhlových rozměrů [47].

Třída přesnosti		Mezní úchytky pro základní rozsah rozměrů				
Označení	Název	Do 10 mm	10–50 mm	50–120 mm	120–400 mm	Přes 400 mm
f	Jemná	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 5'$
m	Střední	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$	$\pm 0^\circ 10'$	$\pm 0^\circ 5'$
c	Hrubá	$\pm 1^\circ 30'$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 15'$	$\pm 0^\circ 10'$
v	Velmi hrubá	$\pm 3^\circ$	$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	$\pm 0^\circ 30'$	$\pm 0^\circ 20'$

Dalším způsobem tolerování rozměrů je pomocí mezních úchylek, které definují minimální a maximální hodnotu pro daný rozměr. Toleranční přesnost se uvádí ve výkresové dokumentaci za jmenovitou hodnotou. Používají se pro rozměry, u kterých je potřeba využít jinou přesnost, než je uvedena v nepředepsaných úchytkách. Mezní úchytky se využívají pro délkové i úhlové rozměry, viz obr. 19. [46]

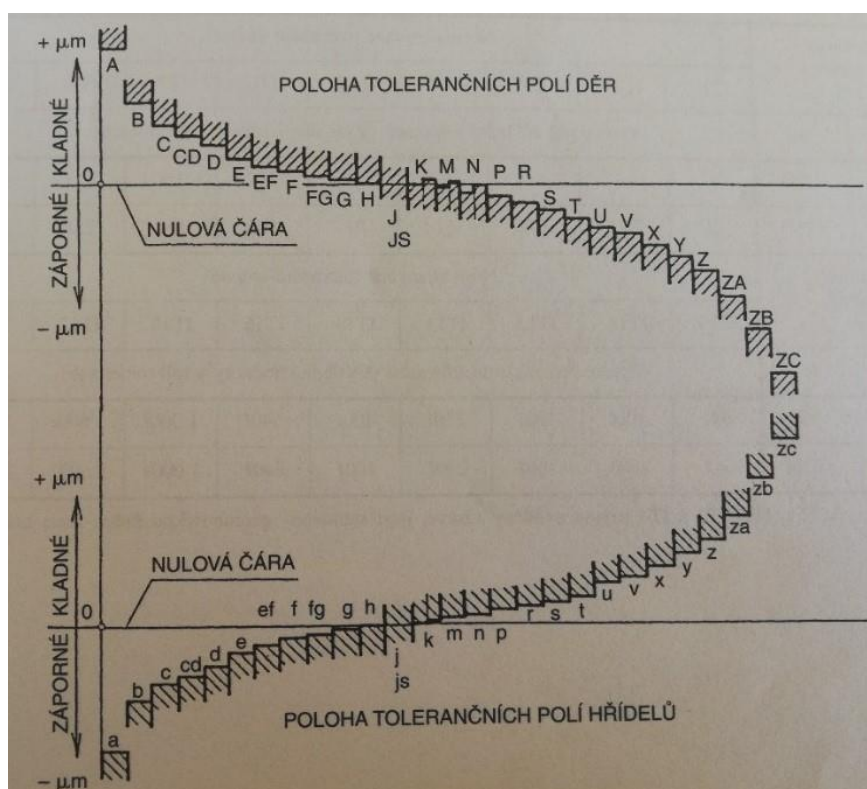


Obr. 19 Mezní úchytky [46].

Dalším typem tolerování je dle uložení, to je založeno na toleranci dvou na sobě závislých strojních součástí, jejímž příkladem je hřídel zasunutá v díře. Celkem mohou nastat 3 případy uložení, a to s vůlí, přesahem nebo přechodné. Většina dílů se vyrábí s vůlí, což znamená, že skutečný průměr hřídele je menší než skutečný průměr díry a součásti se do sebe tak lehce zasunou a vysunou. Dalším typem uložení je s přesahem, jehož příkladem je spojení pera v drážce pro pero. Pero bývá v drážce zalisované, aby vzniklo pevné uchycení a nedošlo ke kolizi. Uložení přechodné je středem mezi dvěma výše zmíněnými uloženími, kdy toleranční pole hřídele a díry se v tomto případě překrývá. Toleranční pole hřídele se značí malými písmeny a pro díry se naopak používají velká písmena. Za písmena se píšou čísla, která určují velikost tolerančního stupně (IT). Celkem lze předepsat 20 tolerančních stupňů, které definují velikost tolerance. Hodnoty tolerance se zapisují od čísel 01, 0, 1 a končí číslem 18. Čím nižší číslo, tím se jedná o vyšší přesnost. Nejpresnější tolerance se používá pro výrobu měřidel a kalibrů. Pro výrobu přesných dílů se používá IT 6–11. Ostatní IT se používají pro výrobu polotovarů. Tolerování rozměrů pomocí uložení se používají dvěma způsoby, a to buď ve formě toleranční značky a jejího stupně, anebo ve formě, kdy jsou za tolerančním stupněm doplněny mezní úchytky, viz obr. 20. V dnešní době již bývají za toleranční značkou právě tyto hodnoty ve formě mezních úchylek uvedeny a pracovníkům ve výrobě to značně ulehčuje práci. Rozměr, ve kterém má být daná součást vyrobena, je tedy určený tolerančním polem a tolerančním stupněm. Toleranční pole předepisuje polohu tolerance vůči jmenovité hodnotě, ke které je tolerance vztažena, viz obr. 21. Hodnota IT určuje rozmezí hodnot, ve kterých probíhá výroba. [46]



Obr. 20 Tolerance rozměrů pomocí uložení.

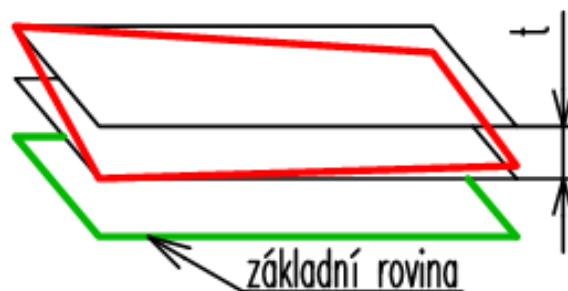


Obr. 21 Poloha tolerančních polí [48].

Pro měření se nejčastěji používá posuvné měřítko, které měří digitálně nebo pomocí nonia. Přesnost posuvných měřítok se pohybuje od 0,1 mm do 0,01 mm. Pro přesnější měření se používají mikrometry, základní měrky nebo různé kalibry. Pracovníci metrologie používají pro nejpresnější kontrolu rozměrů souřadnicové měřicí systémy, které již požadují klimatizované prostředí a časté servisování.

2.5.2 Definice geometrických tolerancí

Geometrické tolerance určují úchylku prvku od jeho tvaru, směru, polohy a házení. Úchylky tolerancí mohou nepříznivě ovlivnit funkci strojních součástí, a proto je nutné zvyšovat požadavky na přesnost výroby. Nepředepsané tolerance na výkresu se řídí normou ISO 2768-2, což jsou všeobecné tolerance, které se dle označení písmen řadí do 3 tříd přesností. Nejpresnější stupeň se značí H, střední K a nejméně přesný je L. Nepředepsané tolerance se zapisují do popisového pole společně s délkovými a úhlovými tolerancemi. Při nutnosti využití vyššího stupně přesnosti se hodnoty tolerancí zapisují ke konkrétním rovinám. Příkladem směru, který se řídí geometrickými tolerancemi je rovnoběžnost. Tolerovaná plocha se vztahuje k základní rovině a musí ležet mezi dvěma rovnoběžnými rovinami, které jsou od sebe vzdálené o hodnotu tolerance, viz obr. 22. [46; 49]



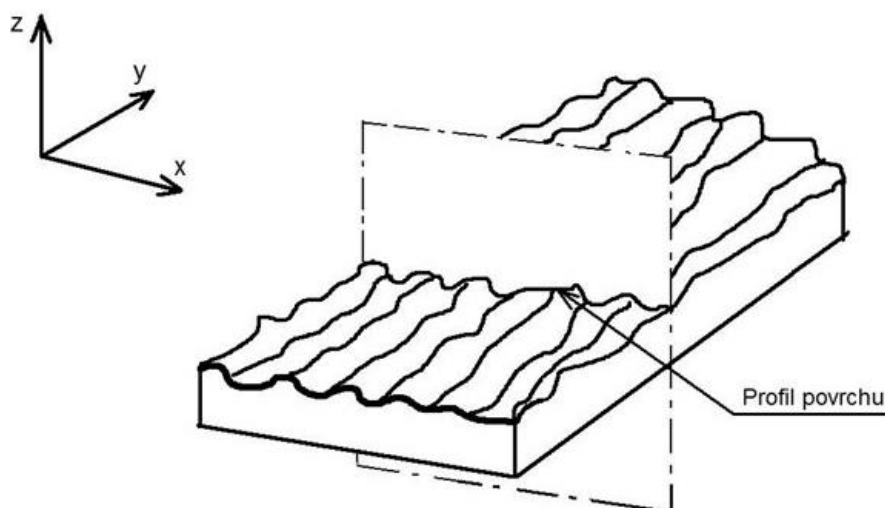
Obr. 22 Geometrická tolerance rovnoběžnosti [50].

2.5.3 Definice tvarů

Na povrchu obrobených strojních součástí vznikají v důsledku používání širokého spektra technologických operací nerovnosti. Posuzují se jako tvarové úchytky. Jejich velikost je závislá právě na technologii obrábění a řezném nástroji, který byl pro danou operaci použit. Měření tvarové přesnosti se určuje z 2D profilu drsnosti a 3D textury povrchu [43; 46].

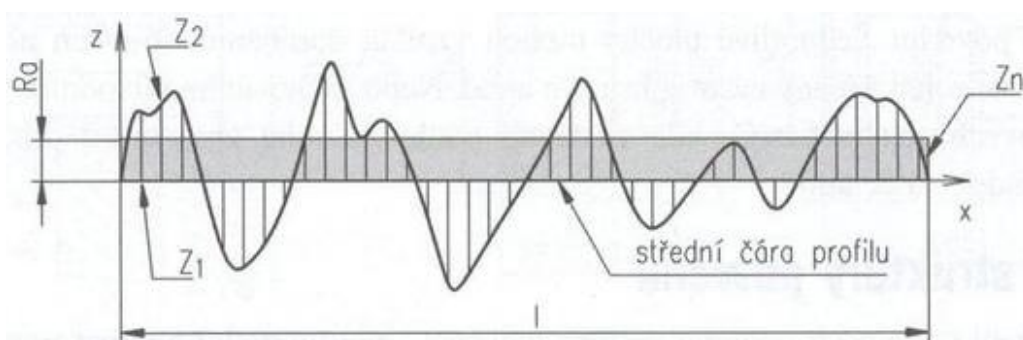
2D profil drsnosti a jeho parametry:

- Pro vyhodnocení textury povrchu ve 2D slouží profil povrchu, který vzniká jako průsečnice hodnocené plochy s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu, viz obr. 23. Na profilu lze vidět stopy po nástroji, který způsobil nerovnost povrchu. Ke zmenšení nerovností se používají dokončovací metody obrábění. [43; 46]



Obr. 23 Hodnocení 2D profilu drsnosti [51].

- Hlavním ukazatelem nerovnosti povrchu je průměrná aritmetická odchylka profilu. Ve výkresové dokumentaci se tato odchylka označuje značkou R_a a obecně se nazývá jako drsnost povrchu. Nerovnosti jsou posuzovány v rozsahu základní délky, viz obr. 24. [43; 46]



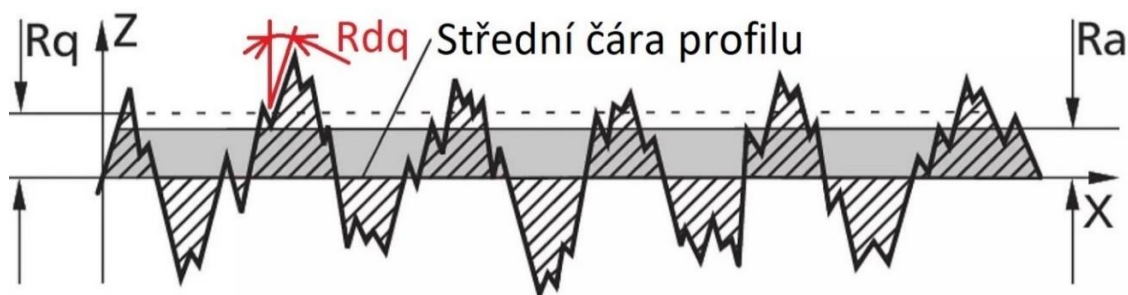
Obr. 24 Průměrná aritmetická odchylka profilu [46].

- Pro výpočet slouží aritmetický průměr absolutních hodnot výšek profilu. Základní jednotkou průměrné aritmetické odchylky R_a je mikrometr a vypočte se ze vztahu [46]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx, \quad (2.1)$$

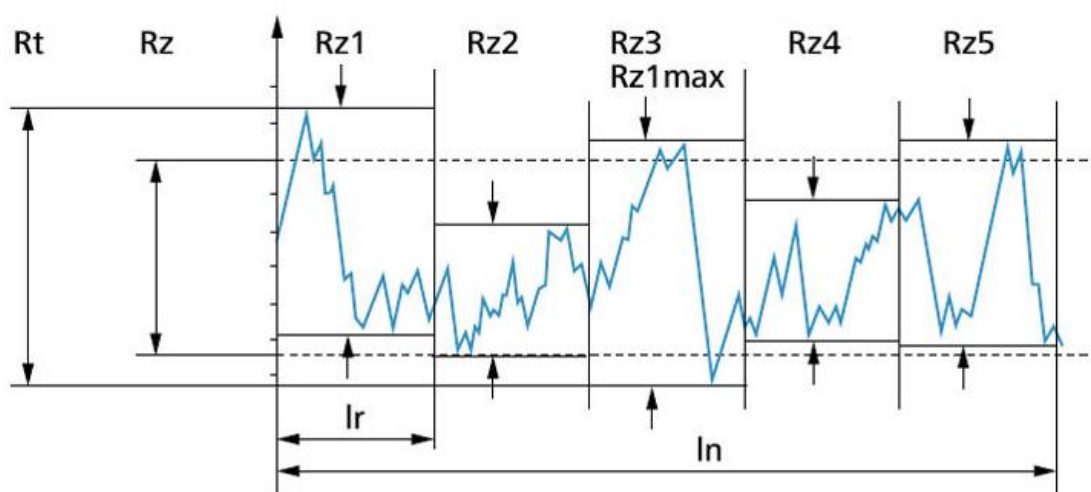
- kde: R_a - průměrná aritmetická odchylka profilu [μm],
 l - základní délka profilu [mm],
 $Z(x)$ - výška posuzovaného prvku v bodě x [μm].

- Průměrná kvadratická odchylka profilu **Rq** se opět hodnotí na 2D profilu a je podobná hodnotě **Ra**. Ve většině případů měření je hodnota **Rq** větší přibližně o 10 %, avšak mohou dosáhnout i 50% nárůstu. Dalším parametrem je průměrný kvadratický sklon profilu **Rdq**, jehož základní jednotkou je stupeň. Tyto parametry jsou zobrazeny na obr. 25. [43; 52; 53]



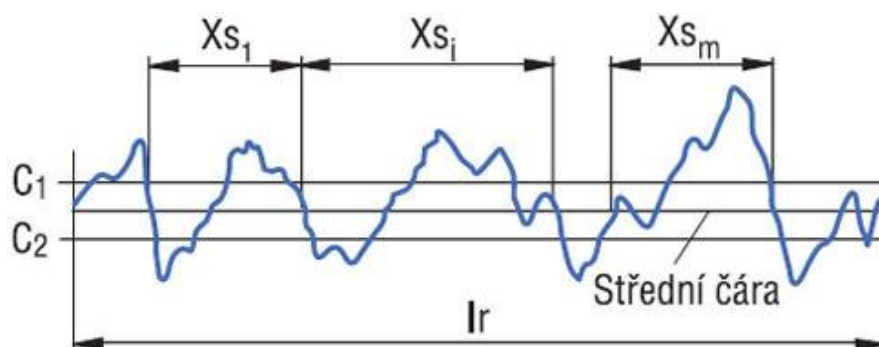
Obr. 25 Průměrná kvadratická úchylka profilu a průměrný kvadratický sklon profilu [53].

- Dalším parametrem je největší výška profilu **Rz**. Jedná se o údaj, který zobrazuje střední hloubku drsnosti povrchu vztahenou k základní délce. Hodnota, která souvisí s **Rz** je celková výška profilu **Rt**, která udává vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na základní délce, viz obr. 26. [52]



Obr. 26 Největší výška profilu a celková výška profilu [46].

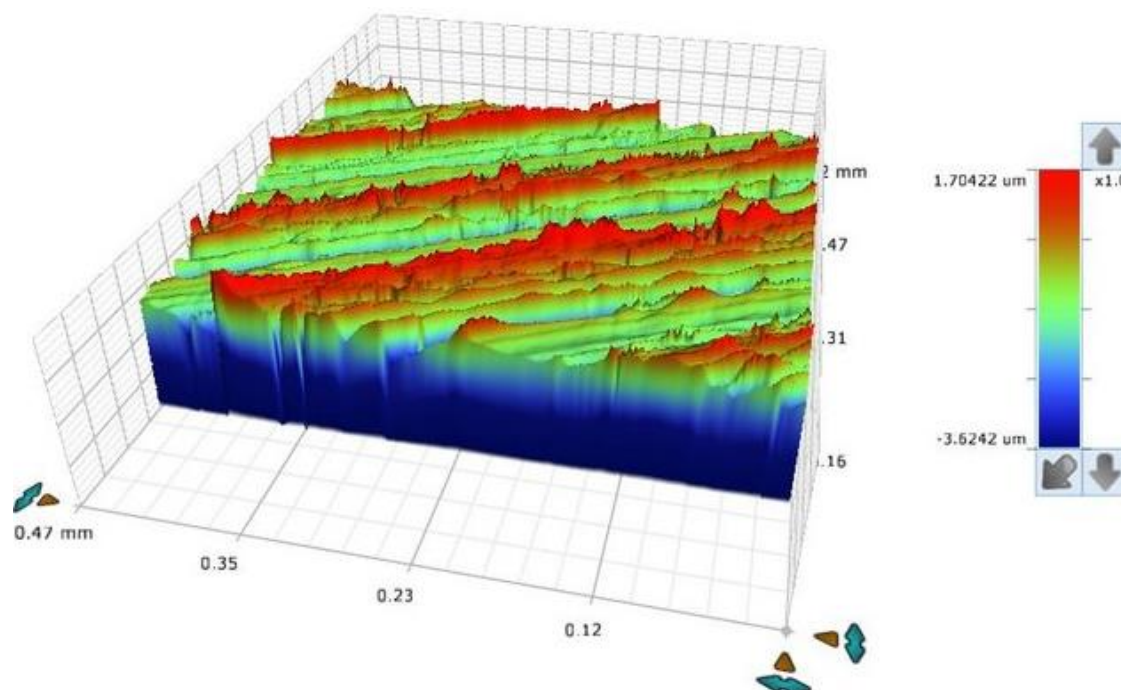
- Průměrná rozteč nerovností profilu **RSm** se určuje z jednotlivých roztečí (**Xs**) na základní délce. Jedná se o charakteristický parametr drsnosti povrchu v podélném směru. Výsledkem je střední hodnota roztečí nerovností profilu, viz obr. 27. [43; 52]



Obr. 27 Průměrná rozteč nerovností profilu [52].

3D textura povrchu a její parametry:

- Tvarová přesnost se hodnotí i pomocí trojrozměrné textury povrchu. Oproti 2D měření se jedná o komplexnější posouzení drsnosti povrchu s relevantnějšími výslednými hodnotami. V praxi se využívá u komponentů, které vyžadují velmi vysokou tvarovou přesnost. Metody 3D kontroly jsou však časově a finančně náročnější, a proto se více využívá hodnocení pomocí roviny řezu, tedy 2D profilu. Příklad zobrazení 3D textury povrchu je zobrazen na obr. 28. [54]



Obr. 28 3D textura povrchu [55].

- Průměrná aritmetická odchylka povrchu **Sa** vyjadřuje aritmetický průměr absolutních hodnot výšek povrchu. Pro její výpočet slouží následující vztah [56; 57]:

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy, \quad (2.2)$$

kde: **Sa** - průměrná aritmetická odchylka povrchu [μm],
A - základní plocha [mm^2],
Z(x,y) - výška v posuzovaném bodě [μm].

- Průměrná kvadratická odchylka povrchu **Sq** je ekvivalentní k hodnotě Rq s tím rozdílem, že se u Sq jedná o trojrozměrné hodnocení. [56; 57]
- Základní měření sklonu na povrchu **Sdq** se vypočítá jako střední hodnota sklonů ve všech bodech definované oblasti. [56]
- Největší výška povrchu **Sz** je definována jako průměrný rozdíl hodnot horního a dolního vrcholu na povrchu. [56; 57]
- Celková výška povrchu **St** udává rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem textury povrchu. [57]

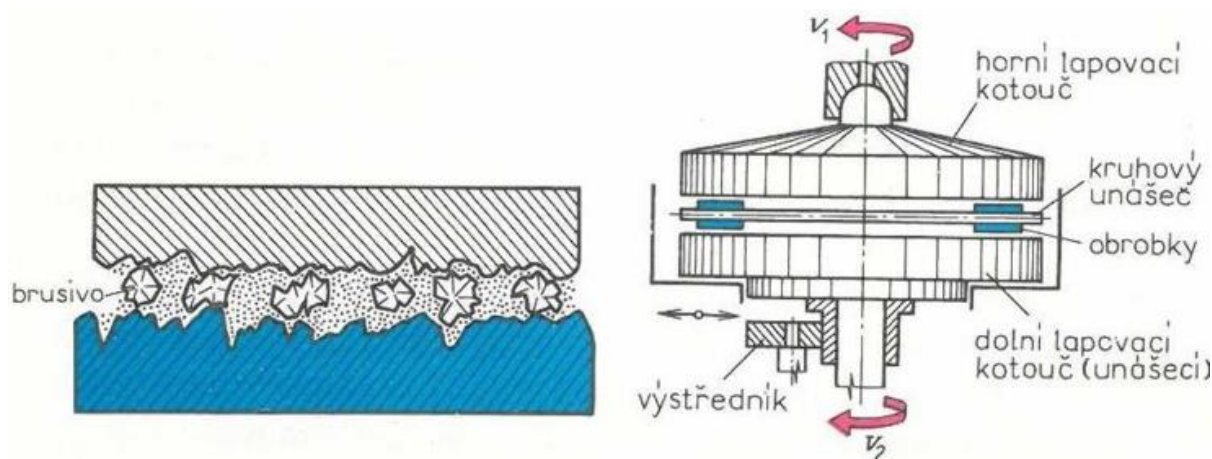
2.5.4 Dosažitelné přesnosti dle způsobu výroby

S postupnou modernizací strojních zařízení rostou i požadavky na jejich výrobu. Jedním z požadavků je rozměrová přesnost IT a druhým tvarová přesnost, která je udávána značkou Ra. Pro každou součást a její rozměrovou a tvarovou toleranci je nutné vybrat vhodnou technologii výroby, která je určována technologem. Každá technologie výroby, tedy způsob obrábění, má maximální mez dosažitelné přesnosti. [38]

Pro hrubování dílů, kdy je požadavkem úběr co největšího množství materiálu za co nejkratší čas, se nejčastěji používá frézování a soustružení. Tyto metody lze využít i jako dokončovací, avšak nejsou schopny dosáhnout takových stupňů přesností jako u jiných dokončovacích metod. Při nejjemnějším soustružení a frézování lze dosáhnout IT 5–7 a Ra 0,2–0,8 μm . Těchto hodnot je dosahováno na nejkvalitnějších obráběcích centrech se speciálními řeznými nástroji, které využívají vysokou řeznou rychlost. [39; 58; 59]

Jednou z běžně dostupných dokončovacích metod obrábění je broušení, což v praxi patří mezi nejrozšířenější typ dokončování. Používá se několik druhů broušení dle typu součásti. Pro broušení ploch je adekvátní využití rovinné brusky a pro broušení průměrů se používá bruska pro válcové plochy, vnitřní a vnější. Jemným broušením se dosahuje IT 3–6 a Ra 0,025–0,2 μm . [39; 58]

Nejpřesnější metodou, která při dokončování dosahuje stupně přesnosti IT 1–3 a Ra 0,012–0,05 μm je lapování. Používá se pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnitřních i vnějších ploch. K obrábění dochází volným brusivem, které je dodáváno mezi otáčející se lapovací nástroj a obrobek, viz obr. 29. Lapování se používá pro funkční plochy měřidel, kalibry, ozubení, součásti motorů automobilů apod. Výhodou je dosažitelnost nejvyšší rozměrové přesnosti a nejmenší drsnosti povrchu. Nevýhodou je velká pracnost, malá produktivita a vysoké náklady v porovnání s ostatními dokončovacími metodami. Existují i další dokončovací metody obrábění jejichž dosažitelné přesnosti porovnává tab. 3. [39; 60]



Obr. 29 Lapování [60].

Tab. 3 Dosahované přesnosti obráběním [39; 47; 59].

Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
		střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační plochy	Broušení				
	hrubování	10	9 až 11	1,6	0,8 až 3,2
	dokončování	5	5 až 6	0,4	0,05 až 0,2
	jemné	4	3 až 5	0,2	
	Lapování				
	dokončování	4	3 až 4	0,1	0,05 až 0,2
	jemné	2	1 až 2	0,05	0,012 až 0,05
	Superfinišování				
	dokončovací	4	3 až 5	0,2	0,05 až 0,4
	jemné	3	2 až 4	0,1	0,025 až 0,1
	Soustružení				
	hrubování	12	11 až 13	12,5	6,3 až 25
	dokončování	10	9 až 11	3,2	1,6 až 3,2
	jemné	6	5 až 7	0,4	0,2 až 0,8
Vnitřní rotační plochy	Broušení				
	hrubování	9	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Honování				
	hrubování	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8
	dokončování	6	5 až 7	0,2	0,1 až 0,2
	jemné	4	3 až 5	0,1	0,05 až 0,1
	Lapování				
	dokončování	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
	Soustružení				
	hrubování	12	11 až 13	12,5	6,3 až 25
	dokončování	10	9 až 11	3,2	1,6 až 3,2
	jemné	6	5 až 7	0,4	0,2 až 0,8
Rovinné plochy	Broušení				
	hrubování	10	9 až 11	1,6	1,6 až 3,2
	dokončování	7	5 až 7	0,8	0,4 až 1,6
	jemné	5	3 až 6	0,2	0,05 až 0,4
	Lapování				
	dokončování	4	3 až 5	0,2	0,1 až 0,4
	jemné	3	1 až 3	0,05	0,012 až 0,05
	Frézování				
	hrubování	13	12 až 14	12,5	12,5 až 25
	dokončování	11	10 až 12	3,2	1,6 až 6,3
	jemné	7	6 až 8	0,4	0,2 až 0,8

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem praktické části je zhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti vzorků vyrobených z plastu. Nejprve je zde uveden výběr vhodných materiálů pro posuzování přesností. Celkem bylo zvoleno 5 vzorků z různých materiálů vyrobených extruzí a 5 vzorků vyrobených 3D tiskem.

V další podkapitole je vytvořen přehled použitých přístrojů k tomuto výzkumu. Je zde popsána 3D tiskárna, kterou bylo vytisknuto 5 vzorků. Dále je zde uveden popis obráběcích strojů pro řezání a frézování. Poslední a hlavní operací v této diplomové práci bylo měření vzorků, které bylo provedeno na dvou měřicích přístrojích, a to optickém a souřadnicovém.

Pro tento výzkum byla z důvodu zaujetí co nejširšího spektra čtenářů zvolena metoda 3D tisku FFF, která je nejpoužívanější a nejdostupnější metodou 3D tisku. Polotovary, které byly dodány ve formě desek, byly nejprve dle vypočtených přídavek na obrábění rozřezány na požadované velikosti. Vzorky připravené 3D tiskem měly rozměry připravené rovnou k frézování, takže zde nebylo nutné použít technologii řezání. Všechny součásti byly nejprve zúhlované a až poté proběhlo frézování ploch určených k měření přesností. Pro rozsáhlejší analýzu byla vždy jedna plocha vzorku frézovaná bez použití chladicí emulze a druhá plocha s jejím použitím.

V praktické části je dále vytvořen přehled parametrů, podle kterých byla analyzována rozměrová a tvarová přesnost. Nejběžnějším parametrem rozměrové přesnosti je vzdálenost dvou bodů nebo ploch. Nejpoužívanějšími tvarovými parametry v praxi jsou průměrná aritmetická odchylka profilu (Ra) a průměrná aritmetická odchylka povrchu (Sa). V celkové analýze jsou celkem zohledněny 2 rozměrové a 11 tvarových parametrů.

V posledních podkapitolách jsou porovnány naměřené jednotlivé hodnoty rozměrových a tvarových přesností a vytvořeno vyhodnocení. Vyhodnocení zohledňuje materiál, druh výroby a použití chladicí emulze. Dále jsou zhodnoceny výsledky vzhledem k praktickému využití materiálů.

3.1 Použité materiály

Pro tento výzkum bylo vybráno 10 termoplastických vzorků, přičemž polovina z nich byla vyrobená extruzí a druhá polovina 3D tiskem metodou FFF. Každý vzorek vyrobený jedním typem výroby je z jiného druhu materiálu, avšak některé materiály jsou podobné či stejné s druhým typem výroby. Každý materiál má jiné vlastnosti, které jsou uvedeny níže:

- **Polypropylen (PP)**

- Tento plast se zařazuje do kategorie termoplastických polymerů. Jeho hlavní vlastností je chemická odolnost a tažnost, která je uvedena v tab. 4. Vhodná teplota pro používání polypropylenu je 0 °C až +100 °C. Jeho využití se najde ve vodovodním, chemickém, textilním a potravinářském průmyslu. Slouží k výrobě bazénů, nádrží, potrubních systémů atd. Jedná se o materiál, který je zdravotně nezávadný, takže se z něho vyrábí např. kelímky od jogurtů a sáčky od chipsů. Mezi další vlastnosti tohoto materiálu patří dobrá svařitelnost, obrobitelnost a ohybatelnost. Materiál není vhodný k lepení. Polypropylen je vhodný pro recyklaci, proto je doporučováno jeho třídění. [61; 62; 63]

- **Polyamid (PA12, dále jen PA)**

- Jiný název tohoto polymeru je nylon. Jedná se o materiál, který má nejnižší míru absorpce vody mezi všemi polyamidy, tzn. ve vlhkém prostředí zůstává stabilní. Míra absorpce vody je 0,9 %. Mezi výhody patří houževnatost, odolnost proti opotřebení a svařitelnost. Používá se v elektronice, strojním inženýrství, leteckém a automobilovém průmyslu. Vyznačuje se vysokou teplotou tání a nízkou hustotou, viz tab. 4. [64; 65; 66; 67]

- **Polyethylentereftalát (PET)**

- Jedná se o termoplast ze skupiny polyesterů. PET má polymerní strukturu a skládá se z řetězce navzájem spojených molekul. Primární surovinou pro jeho výrobu je ropa, jejíž roční spotřeba na výrobu plastů je 8 % celosvětové produkce. Tento materiál primárně slouží k výrobě lahví a obalů. Vyrábí se z něho také vstříkované díly pro elektrotechnický a automobilový průmysl. Výhodou tohoto termoplastu je pevnost v ohybu, která je zobrazena v tab. 4. Tento materiál je vhodný k recyklování a jeho hodnota míry absorpce vody je 0,25 %. Další vlastností je nízká odolnost proti chemikáliím a silným zásadám, což je jeho hlavní nevýhoda. [67; 68; 69]

- **Polyoxymethylen (POM)**

- Tento materiál se nazývá také polyacetal nebo polyformaldehyd. Jeho základní vlastností v porovnání s ostatními materiály je vysoká hustota, viz tab. 4. Patří mezi plasty s vysokou pevností v tahu a ohybu, viz tab. 4. Zásadní nevýhodou je smršťivost, kvůli které je materiál prakticky nevytisknutelný. Polyoxymethylen měl být původně součástí výzkumu z obou typů výroby, ale nebylo možné ho za daných podmínek z důvodu smršťivosti vytisknout, viz obr. 30, a proto byl nahrazen jiným materiálem. Tento materiál se tedy bude hodnotit pouze vyrobený extruzí. Typickými výrobky z tohoto materiálu jsou ozubená kola, šrouby, pružiny, rukojeti atd. [67; 70; 71]



Obr. 30 Smrštění POM.

- **Polyethylen ultra-high-molecular-weight (PE-UHMW)**

- Jedná se o termoplast s vysokou molekulovou hmotností. Tento materiál představuje nejlepší kombinaci odolnosti proti otěru a rázové houževnatosti při teplotách do -200 °C. Dále se vyznačuje chemickou odolností a nízkou hustotou, viz tab. 4. Polyethylen není vhodný pro lepení a lakování. Jeho hlavní nevýhodou je nízká pevnost v tahu, viz tab. 4. Z tohoto materiálu se vyrábí kluzné lišty, mantinely sportovišť, kuchyňské pracovní a krájecí desky, součásti dopravních systémů atd. Tento materiál se také používá ve zdravotnictví a slouží např. jako kloubní náhrady. [4; 67; 72; 73]

- **Polyethylentereftalát glykol (PETG)**

- Patří mezi termoplastické polyestery a je vhodný k 3D tisku. Vyznačuje se chemickou odolností, odolností proti otěru, nízkou smršťivostí při chladnutí a tepelnou stabilitou. Většina komponentů na 3D tiskárnách Prusa jsou právě z tohoto materiálu. Mezi další výhody tohoto materiálu patří cena a pevnost v tahu, viz tab. 4. [74; 75]

▪ **Kyselina polymléčná (PLA)**

- Kyselina polymléčná, jiným názvem také polyaktid, je vyráběna z obnovitelných zdrojů. PLA se používá při teplotě do 55 °C, což komplikuje jeho použití za vyšších teplot. Jedná se o materiál, který se nejčastěji používá k 3D tištěným reklamním předmětům. Dále se používá pro plastové fólie, lahve a biologicky rozložitelné zdravotnické nástroje jako např. šrouby, kolíky a tyče. [76; 77; 78]

▪ **Akrylonitrilbutadienstyren (ABS)**

- Jde o termoplast, který je odolný vůči mechanickému poškození. Používá se pro 3D tisk dílů. Doporučuje se spíše pro zkušenější tiskaře nebo tisknutí v uzavřených komorách. Tento materiál je rozpustný v acetonu a díky němu je možné vyhladit nerovnosti povrchu. Mezi výhody v porovnání s ostatními 3D tištěnými materiály patří teplota použití, viz tab. 4. Nevýhodou tohoto materiálu je zápach při tisku. Jeho uplatnění lze najít především v automobilovém průmyslu. [79; 80; 81]

Pro přehlednost byla vytvořena tab. 4, která zobrazuje hodnoty vlastností použitých materiálů.

Tab. 4 Přehled vlastností použitých materiálů [4; 67; 74; 76; 80; 82; 83; 84; 85]

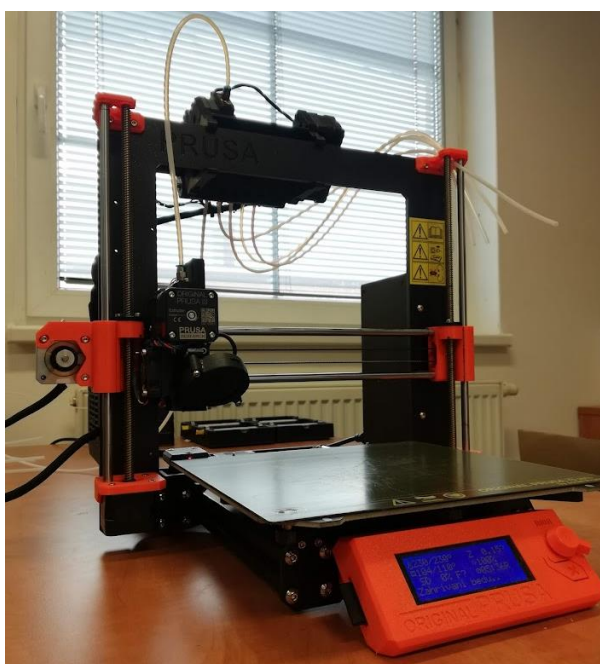
Č. vzorku	Materiál	Hustota [kg·m ⁻³]	Teplota použití [°C]	Teplota tání [°C]	Pevnost v tahu [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]	Tažnost [%]
1, 6	PP	0,91	0 až +100	165	33	26	70
2, 7	PA	1,03	-60 až +80	179	53	90	55
3	PET	1,38	-20 až +100	255	46	125	40
4	POM	1,41	-30 až +100	178	65	115	40
5	PE-UHMW	0,95	-200 až +80	135	33	-	350
8	PETG	1,27	až +70	140	53	64	50
9	PLA	1,25	až +55	160	32	85	40
10	ABS	1,04	až +90	-	39	65	20

3.2 Použité přístroje

V této kapitole jsou popsány přístroje potřebné k uskutečnění tohoto výzkumu. Kromě výroby dodaných plastových desek byly všechny práce výzkumu provedeny autorem či kvalifikovanou obsluhou zařízení. Vzorky pro 3D tisk byly vyrobeny FFF metodou na soukromé 3D tiskárně. Obrábění vzorků proběhlo ve školních dílnách FSI VUT v Brně. Mezi obráběcí operace patřilo řezání na strojní pile a frézování na konvenční frézce. Samotné měření proběhlo v laboratořích Univerzity obrany v Brně, která disponuje měřicími přístroji, které byly pro zhodnocení rozměrové a tvarové přesnosti a naplnění cílů této práce zcela zásadní.

3.2.1 Technologie 3D tisk

Všechny vzorky z 3D tisku byly vyrobeny na soukromé 3D tiskárně od firmy Prusa, viz obr. 31. Celý název této 3D tiskárny je Prusa i3 MK3. Tiskárna disponuje vylepšením v podobě možnosti automatické výměny filamentu, které je umístěno v horní části. Tímto vylepšením lze tisknout až s 5 různými druhy filamentů. Parametry této 3D tiskárny zobrazuje tab. 5.



Obr. 31 3D tiskárna Prusa i3 MK3.

Tab. 5 Parametry 3D tiskárny Prusa i3 MK3 [86].

Rozměry tiskárny	500 x 550 x 400 mm
Váha	7 kg
Tisková plocha	250 x 210 x 210 mm
Tloušťka vrstvy	0,05–0,3 mm
Magnetická vyhřívaná podložka	Ano
Tloušťka filamentu	1,75 mm

3.2.2 Technologie řezání

Desky, které byly vyrobené extruzí byly před frézováním nejprve řezány. Dělení materiálu bylo provedeno na pásové strojní pile Bomar STG 220 G, viz obr. 32. Parametry pásové pily zobrazuje tab. 6.



Obr. 32 Strojní pásová pila Bomar STG 220 G.

Tab. 6 Parametry strojní pásové pily Bomar STG 220 G [87; 88].

Rozměry	800 x 1570 x 1230 mm
Hmotnost	330 kg
Celkový příkon stroje	1 kW
Prořez kruhový	220 mm
Prořez čtvercový	270 mm
Natočení	0°–60°

3.2.3 Technologie frézování

Frézováním se obráběly všechny plochy všech vzorků. K frézování byla využita konvenční frézka FNK 25 A, viz obr. 33. Její parametry zobrazuje tab. 7.



Obr. 33 Konvenční frézka FNK 25 A.

Tab. 7 Parametry konvenční frézky FNK 25 A [89].

Rok výroby	1983
Rozměry stroje	2650 x 1980 x 2260 mm
Hmotnost	1800 kg
Celkový příkon stroje	2,5 kW
Upínací plocha stolu	250 x 1250 mm
Otáčky vřetena	56–4500 min ⁻¹

3.2.4 Měření rozměrů

Měřicí zařízení, které bylo využito k měření rozměrů, se nazývá Werth ScopeCheck a je zobrazen na obr. 34. Na tomto měřicím souřadnicovém přístroji byla vyhodnocována vzdálenost a rovnoběžnost ploch vzorků. Parametry přístroje jsou popsány v tab. 8.



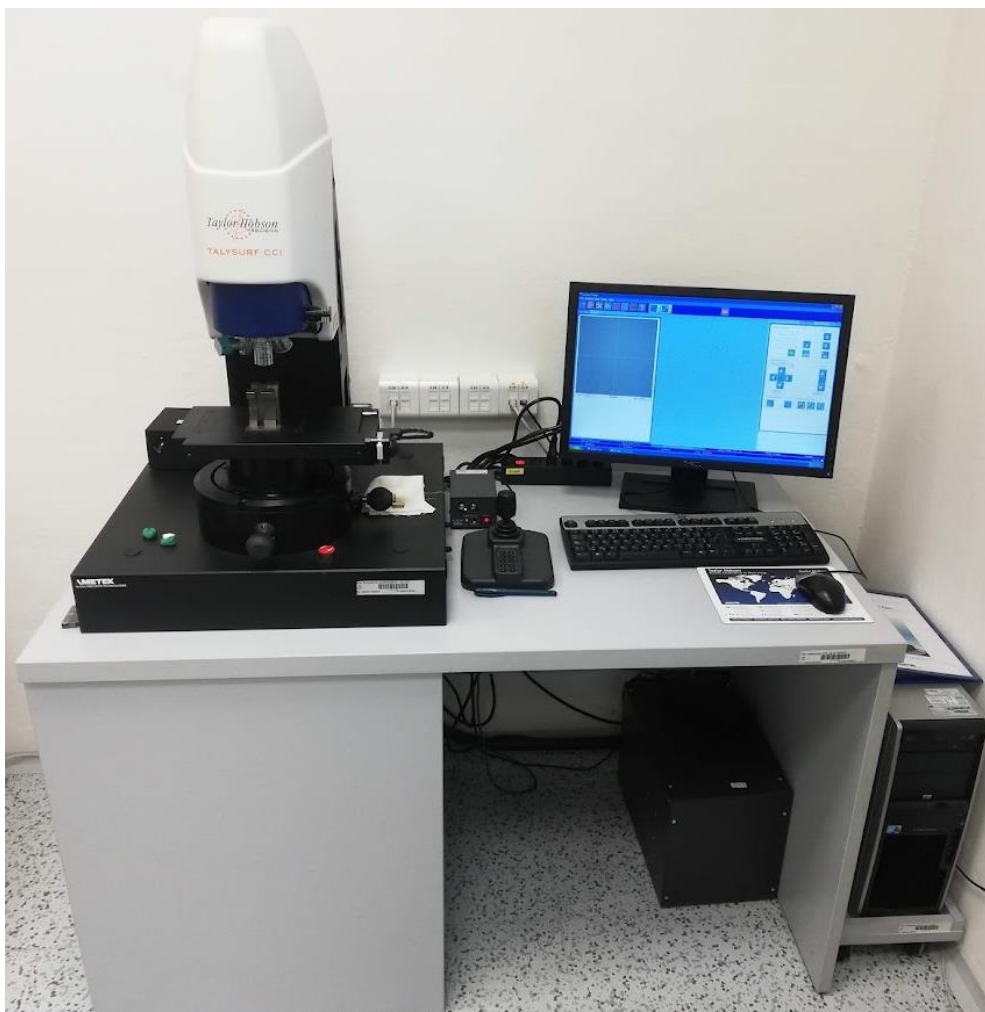
Obr. 34 Měřicí dotykový souřadnicový přístroj Werth ScopeCheck.

Tab. 8 Parametry měřicího dotykového souřadnicového přístroje Werth ScopeCheck.

Rok výroby	2014
Rozsah měření	300 x 200 x 200 mm
Chyba měření	$1,8 + \frac{L}{120} [\mu\text{m}]$, kde L je měřená délka v [mm]

3.2.5 Měření tvarů obrobených povrchů

Měření obrobených povrchů proběhlo na optickém měřicím přístroji Talysurf CCI, viz obr. 35. Na tomto zařízení bylo měřeno celkem 11 parametrů a to pomocí 2D profilu drsnosti a 3D textury povrchu. Parametry tohoto přístroje jsou zobrazeny v tab. 9.



Obr. 35 Optický měřicí přístroj Talysurf CCI.

Tab. 9 Parametry optického měřicího přístroje Talysurf CCI [90].

Vertikální rozsah	2,2 mm
Vertikální rozlišení	0,01 nm
Šum	> 0,08 nm
Oblast měření	0,33–6,6 mm
Počet měřených bodů	1024 x 1024
Optické rozlišení	0,4–0,6 μm
Čas měření	5–40 s

3.3 Výroba vzorků

Po vybrání jednotlivých druhů materiálů v kapitole 3.1 bylo nutné určit velikost obrobených vzorků. Hlavními faktory pro výběr byla dostatečná velikost vzorků, aby bylo možné docílit relevantních výsledků. Zároveň k šetrnosti životnímu prostředí byla zvolena velikost obrobených vzorků 35 x 35 x 6 mm. Po stanovení těchto rozměrů bylo nutné určit velikost polotovarů. K tomu byl využit vztah pro výpočet přídavek:

$$p = \frac{5 \cdot L}{100} + 2, \quad (3.1)$$

kde: p - přídavek na obrábění [mm],
 L - délka [mm].

Výpočet přídavku na tloušťku:

$$p = \frac{5 \cdot 6}{100} + 2 = 2,3 \text{ mm} \rightarrow \text{zvoleno } 3 \text{ mm},$$

Výpočet přídavku na šířku a délku:

$$p = \frac{5 \cdot 35}{100} + 2 = 3,75 \text{ mm} \rightarrow \text{zvoleno } 5 \text{ mm},$$

K požadovaným rozměrům vzorků byla přičtena velikost zvoleného přídavku. Rozměry polotovaru tedy byly stanoveny na 40 x 40 x 9 mm.

3.3.1 Výroba vzorků extruzí

Materiály vyrobené extruzí byly dodány ve formě desek od firmy TechPlasty, s.r.o., což je výrobce polotovarů z technických plastů. Zároveň se zabývají prodejem katalogových a zakázkových součástí. V nabídce mají široké spektrum technických materiálů, ze kterých bylo pro výzkum vybráno 5 konkrétních materiálů, viz tab. 10. Jednotlivé desky měly tloušťku 9 až 12 mm, takže byla zajištěna adekvátní tloušťka desek s požadovaným přírůstkem k provedení výzkumu.

Tab. 10 Materiály k výrobě vzorků extruzí.

Č. vzorku	Název	Zkratka
1	Polypropylen	PP
2	Polyamid	PA
3	Polyethylentereftalát	PET
4	Polyoxymethylen	POM
5	Polyethylen ultra-high-molecular-weight	PE-UHMW

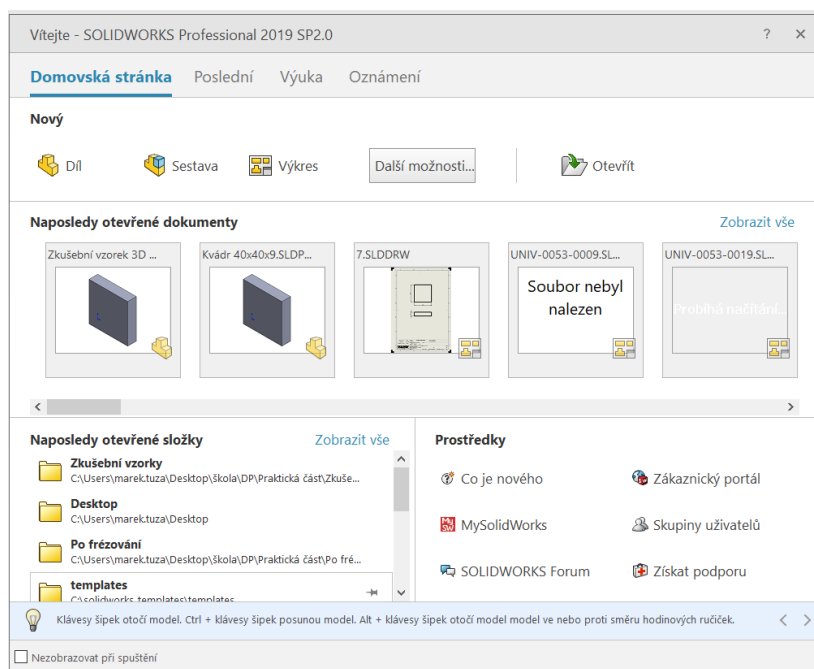
3.3.2 Výroba vzorků 3D tiskem

Pro výrobu vzorků 3D tiskem byla zvolena metoda FFF, která je celosvětově nejpoužívanější a nejdostupnější metodou. Zájemce FFF tiskárny zaujmou především nízké ceny v kombinaci s jednoduchým ovládáním. Cena těchto tiskáren se základními komponenty se pohybuje od 4 000 Kč a zvyšuje se v závislosti na kvalitě komponentů, velikosti tiskárny a případném zakrytování.

Před samotnou výrobou vzorků bylo nejprve nutné vytvořit 3D model jejich polotovarů. K modelování vzorků autor využil program SolidWorks, který slouží k modelování 3D dílů, tvorbu výkresů, práci se sestavami atd. Jedná se o jeden z celosvětově nejpoužívanějších programů určených ke konstruování. [91; 92]

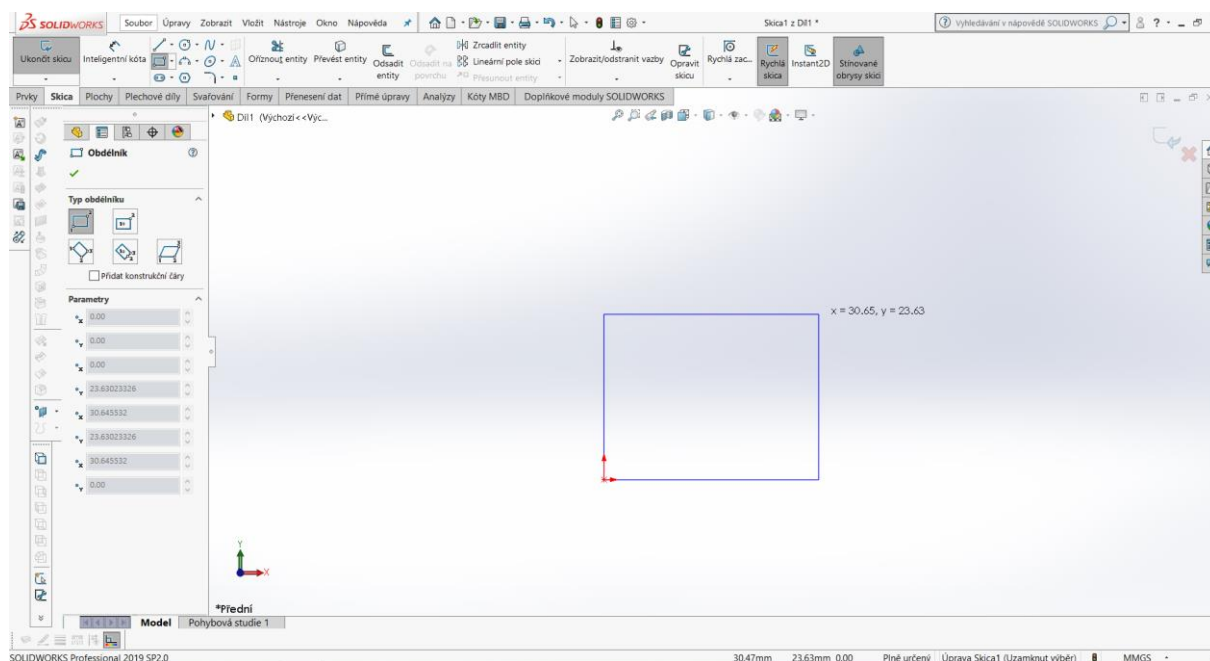
K vytvoření dat pro 3D tiskárnu byl využit program PrusaSlicer od firmy Prusa Research a.s. Tento program má uživatelsky přívětivé prostředí a dokáže si ho rychle osvojit i začátečník. K výrobě vzorků byla zvolena tiskárna od stejné firmy. Postup modelování, přípravy tisku a samotná výroba vzorku je popsána níže. [93]

Po spuštění programu SolidWorks byla nejprve načtena tabulka, která nabízela kromě zobrazení naposledy otevřených dokumentů výběr nové operace. Pro modelování byl zvolen příkaz *Díl*, viz obr. 36.



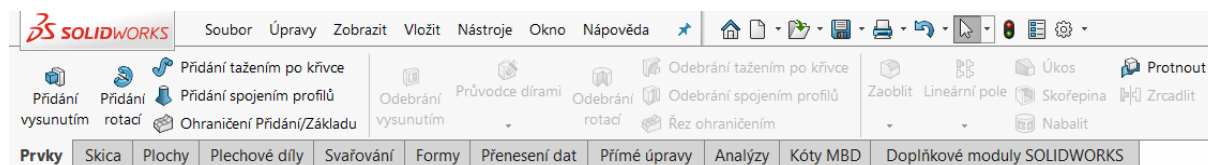
Obr. 36 Spuštění programu SolidWorks.

Tímto se zobrazilo uživatelské rozhraní, které nabízelo celou řadu příkazů k modelování. Následujícím krokem bylo vybrání příkazu *Obdélník*, který byl následně zachycen k červeně označenému nulovému bodu a dále se pohybem myši zvětšil náčrt, viz obr. 37.



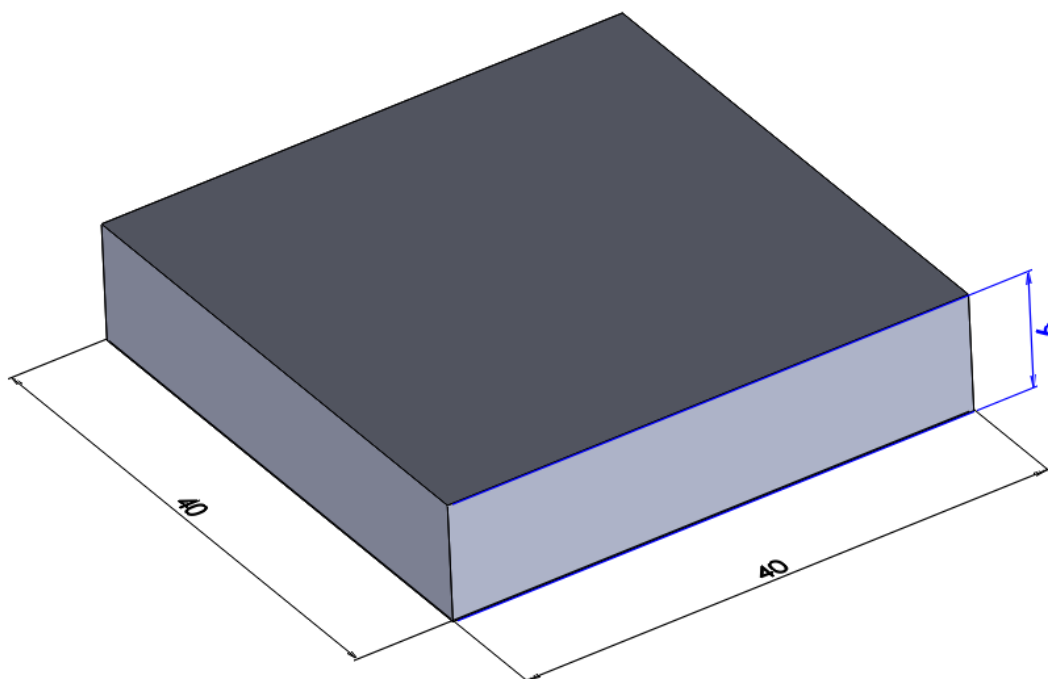
Obr. 37 Uživatelské rozhraní programu SolidWokrs.

Následovala úprava velikosti obdélníku pomocí příkazu *Inteligentní kóta*, díky níž se zapsaly požadované rozměry. Pro tento výzkum byly zvoleny rozměry 40 x 40 mm. Dále bylo nutné zvolit příkaz *Ukončit skicu* a v horní liště si přepnout nabídku na *Prvky*, viz obr. 38.



Obr. 38 Přepnutí nabídky na Prvky.

Po zvolení patřičné záložky bylo možné nárys převést do 3D vizualizace příkazem *Přidání vysunutím* a zapsáním požadované výšky, která byla zvolena na 9 mm. Po potvrzení tohoto příkazu vznikl model o rozměrech 40 x 40 x 9 mm, viz obr. 39.



Obr. 39 Rozměry modelu.

Jednalo se o finální model, a proto byl uložen do formátu *.stl, který požaduje program PrusaSlicer. Před zahájením tvorby programů byly vybrány druhy zkoumaných materiálů, viz tab. 11. Nejprve bylo zvoleno pět materiálů, avšak později musel být polyoxymethylen (POM) vyměněn z důvodu uvedeném v kapitole 3.1. Celkem je zde tedy uvedeno 6 druhů materiálů. Pro přehlednost je u zkratk materiálů uvedeno 3D, což značí technologii výroby 3D tiskem.

Tab. 11 Materiály k výrobě vzorků 3D tiskem.

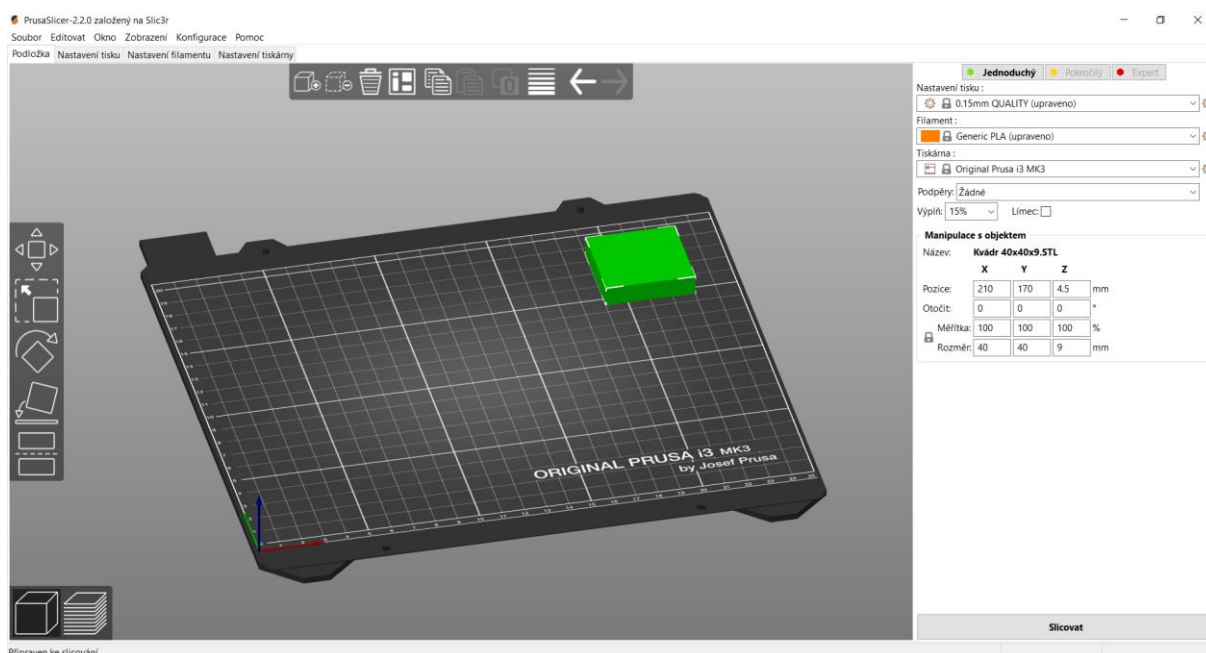
Č. vzorku	Název	Zkratka
6	Polypropylen	PP (3D)
7	Polyamid	PA (3D)
8	Polyethyltereftalát glykol	PETG (3D)
9	Kyselina polymléčná	PLA (3D)
10	Akrylonitrilbutadienstyren	ABS (3D)
11	Polyoxymethylen	POM (3D)

Před nastavením programu musely být nejprve zakoupeny filamentsy, které byly dodány ve formě 20m zkušebních drátů. Všechny byly koupeny z internetových e-shopů zabývajících se 3D tiskem. Zakoupený filament z materiálu PETG je zobrazen na obr. 40.



Obr. 40 Filament PETG určený k 3D tisku.

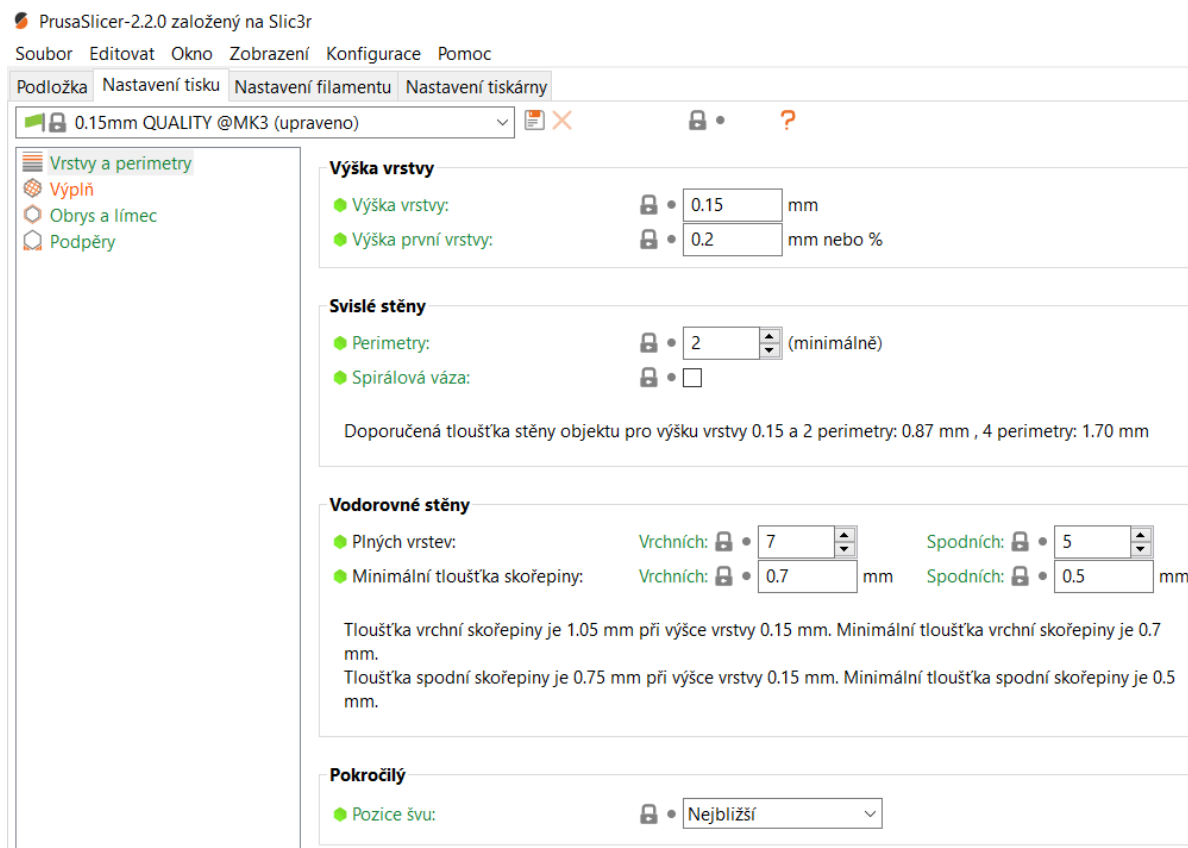
Po zakoupení filamentů byly splněny všechny podmínky pro tvorbu programu v PrusaSlicer. PrusaSlicer byl nejprve spuštěn se zadáním patřičného typu tiskárny. Dále se zobrazilo základní uživatelské rozhraní, kam byl vložen soubor v požadovaném formátu, viz obr. 41.



Obr. 41 Uživatelské rozhraní programu PrusaSlicer.

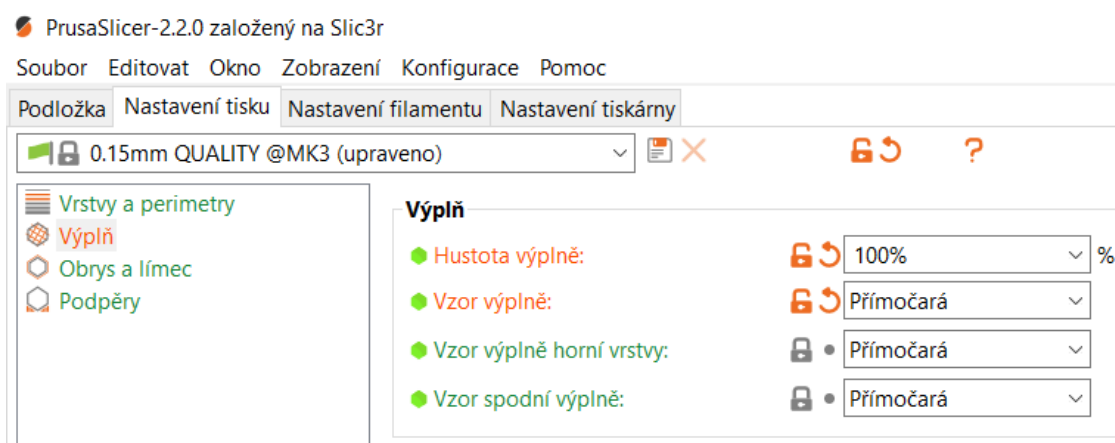
V PrusaSlicer jsou 3 základní úrovně nastavení *Jednoduchá*, *Pokročilá* a *Expert*, mezi těmito úrovněmi lze libovolně přepínat dle kvalifikovanosti uživatele a složitosti dílu. *Jednoduchá* úroveň slouží pro tisk základních předmětů. V rozhraní úrovně *Pokročilý* a *Expert* již lze nastavovat rychlosti tisku v jednotlivých fázích a zároveň je možné upravovat další parametry nutné pro komplikovanější díly. Tisk z více druhů materiálu nebo barev je možné provést výměnou filamentu, ale pouze v nastavení úrovně *Expert*. Pro tisk již zmíněného kvádrů byla použita *Jednoduchá* úroveň nastavení. Pro správný chod tisku byly vždy nastaveny parametry dle etiket jednotlivých filamentů. Nejprve byl tedy v základním uživatelském rozhraní zvolen

Filament. Pro další úpravu bylo nutné přejít v horní liště do *Nastavení tisku*, kde byla zvolena výška vrstvy 0,15 mm, avšak bylo možné upravit i jiné parametry, viz obr. 42. Výška vrstvy byla zvolena pro všechny materiály stejně.



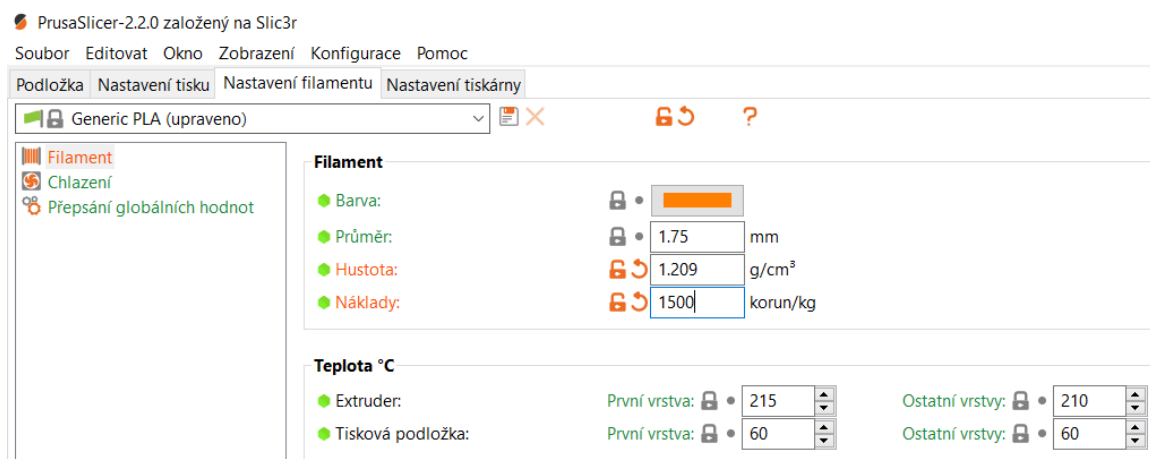
Obr. 42 Nastavení výšky vrstvy.

V dalším nastavení byla zvolena záložka *Výplň*, díky které bylo možné nastavit procentuální vyplnění dutiny vzorku. U tohoto výzkumu byla pro všechny materiály zvolena 100% výplň. Po změně hustoty výplně se automaticky změnil i vzor výplně, viz obr. 43.



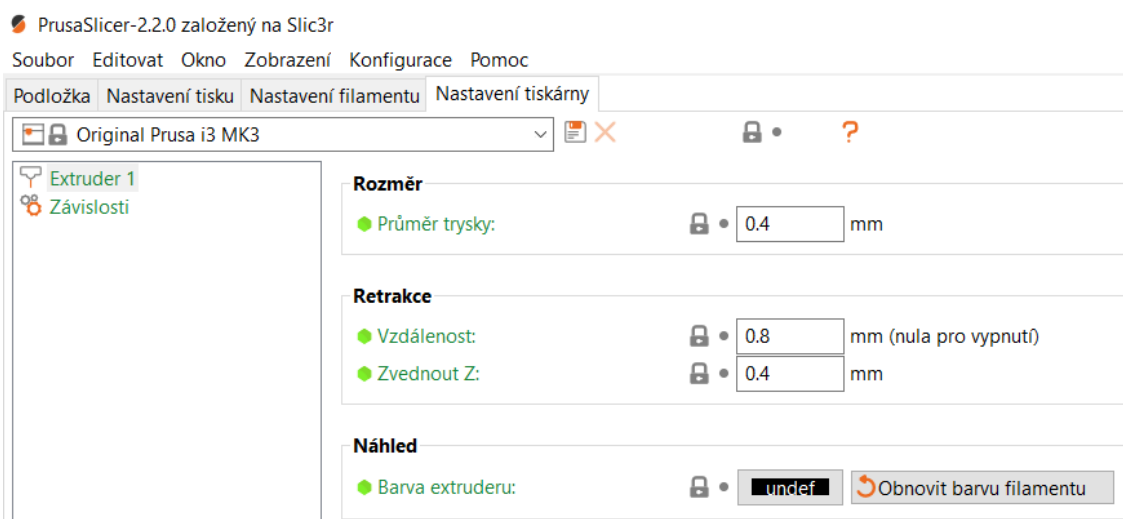
Obr. 43 Nastavení výplně.

Následovalo *Nastavení filamentu*, které bylo nutné opět přepnout v horní liště. V tomto nastavení byly zadávány jedny z nejdůležitějších parametrů pro správný chod tisku. Každý filament má specifické hodnoty teploty určené pro tisk. Tyto hodnoty vždy uvádí výrobce a je doporučeno se jimi řídit. Kromě průměru filamentu zde tedy byly nastaveny i teploty pro *Extruder* a *Tiskovou podložku*, viz obr. 44.



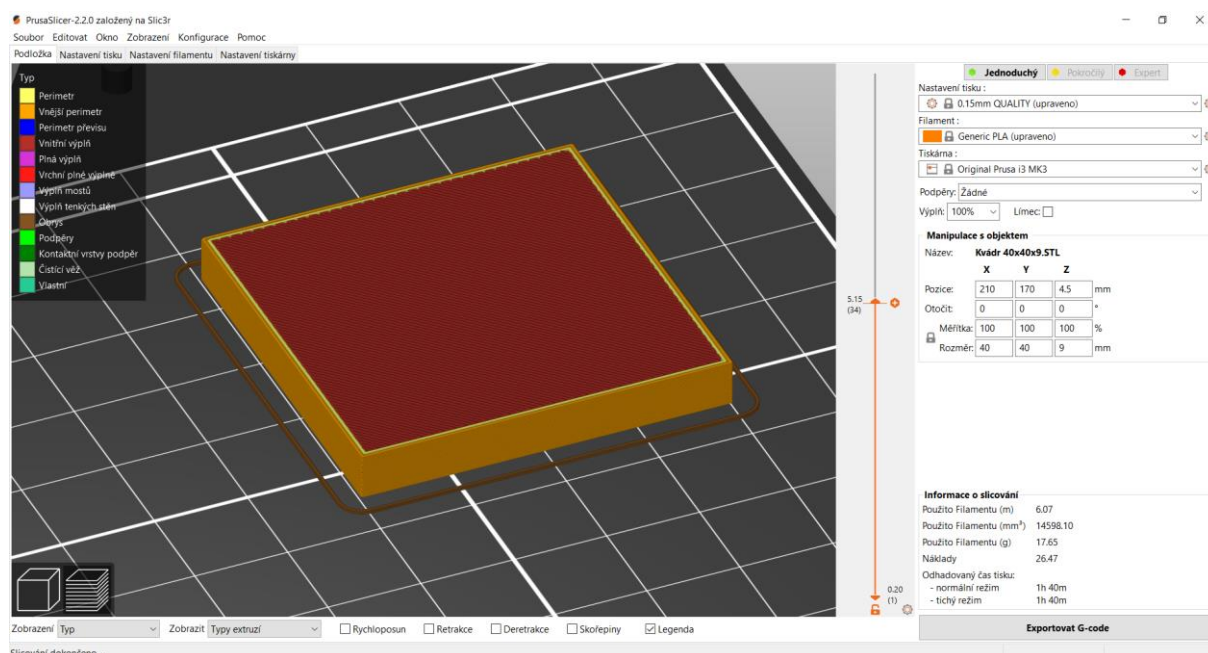
Obr. 44 Nastavení filamentu.

K poslední kontrole byla v horní liště určena záložka *Nastavení tiskárny*. Bylo nutné nastavit správný *Průměr trysky*, který se volí dle požadavků na výrobek. Pro tento výzkum byla zvolena tryska o průměru 0,4 mm, viz obr. 45.



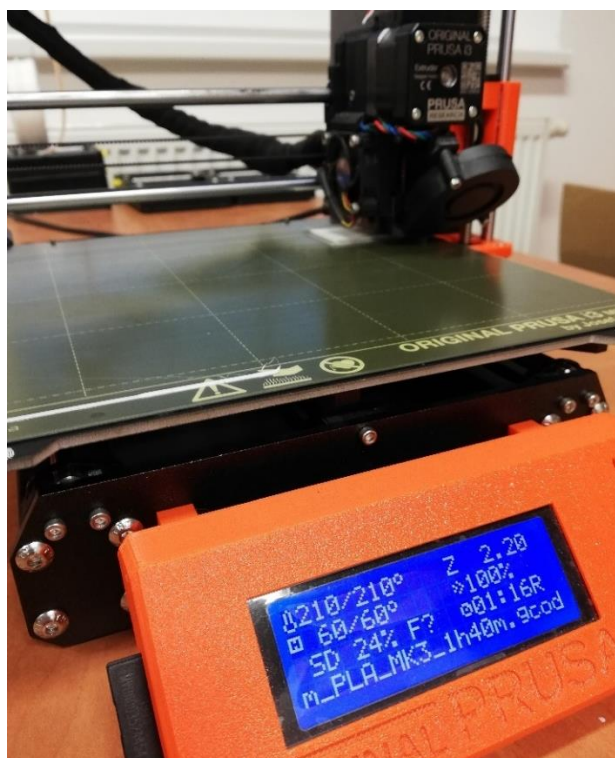
Obr. 45 Nastavení tiskárny.

Ostatní hodnoty zůstaly dle přednastavení neměnné a bylo možné přejít zpět do uživatelského rozhraní, které bylo pod záložkou *Podložka*. Po zobrazení uživatelského rozhraní bylo možné vytvoření G-kódu, k čemuž byl využit příkaz *Slicovat*. Po vygenerování programu se již zobrazil model, u kterého bylo možné zobrazit průběh jednotlivých vrstev. Náhled na jednotlivé vrstvy se zobrazil postupným posouváním kurzoru výšky vrstvy na vertikální přímce s oranžovou barvou. Dále bylo také možné nahlédnout na *Informace o slicování*, které udávají např. *Odhadovaný čas tisku*, který byl pro všechny tisknuté vzorky 1 hodinu a 40 minut, viz obr. 46. Po těchto operacích byl vytvořený program exportován na paměťovou kartu.



Obr. 46 Generování programu.

Po vygenerování programu mohla začít samotná výroba pomocí 3D tiskárny. Nejprve bylo provedeno její spuštění a manuální očištění podložky lihem kvůli lepší přilnavosti tištěného objektu. Dále byla vložena paměťová karta, která se automaticky po zasunutí načetla do systému. Načtením karty byly zobrazeny jednotlivé programy, z nichž byl vybrán právě vygenerovaný program kvádru, čímž došlo ke spuštění tisku. Po spuštění programu se nejprve začaly nahřívat extruder a podložka. Po dosažení požadované teploty byl zasunut filament k podavačům, které regulují rychlost podávání filamentu. Po zasunutí filamentu byla provedena automatická kalibrace podložky pro správné nastavení nulového bodu. Dále začal samotný tisk nejprve první vrstvy s postupným natavováním následných vrstev, viz obr. 47.



Obr. 47 Průběh 3D tisku.

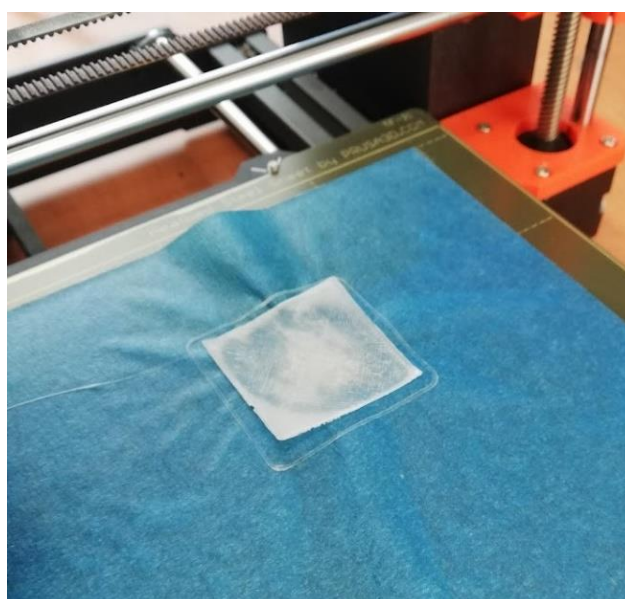
Po zhotovení poslední vrstvy odjela extruderová hlava do bezpečné vzdálenosti, aby zajistila bezproblémovou demontáž vytisknutého dílu. Kvádr byl manuálně odejmut jemnou silou a nachystán k obrábění. Následovalo očištění podložky a připravení 3D tiskárny pro další tisk.

Celý postup byl opakován, než byly vyrobeny všechny vzorky jednotlivých druhů materiálů. Celkem bylo tedy vytisknuto šest kvádrů, přičemž výroba pěti z nich proběhla úspěšně a jednoho neúspěšně. Úspěšně vytisknuté zkušební vzorky jsou zobrazeny na obr. 48.



Obr. 48 Úspěšně vytisknuté zkušební vzorky pomocí technologie 3D tisku.

Při tisknutí vzorku z materiálu polyoxymethylenu (POM) došlo vlivem chladnutí materiálu ke smrštění, a tím k deformaci tvaru vzorku. Autor pro úspěšný tisk tohoto materiálu vyzkoušel několik doporučení zkušených tiskařů jako např. tisk na lepidlo, tisk na adhezni pásku, viz obr. 49, regulaci teploty extruderu a podložky, tisk s límcem. Žádné z těchto doporučení však nevedlo k úspěšnému vytisknutí vzorku, a proto autor doporučuje pro případný výzkum tohoto materiálu použití 3D tiskové komory. Materiály s velkou smrštitivostí při chladnutí by měly být tisknuty v uzavřené komoře, kde není průvan a je tam konstantní teplota, což vede k lepšímu přilnutí tisknutého objektu k podložce. Vzhledem k zachování jednotných podmínek výzkumu a nedostupnosti 3D tiskové komory byl místo polyoxymethylenu (POM) zvolen náhradní materiál akrylonitrilbutadienstyren (ABS).



Obr. 49 Použití adhezni pásky.

3.4 Třískové obrábění

Díky dodaným polotovarům a autorem stanoveným velikostem vzorků bylo možné započít proces obrábění. Nejprve bylo z dodaných desek, viz obr. 50, vyřezáno 5 vzorků. Vzorky byly nařezány na rozměr 40 x 40 mm, aby bylo docíleno stejných rozměrů jako u 3D tisku. K řezání byla využita strojní pásová pila. K dělení materiálu byla použita chladicí emulze, aby nedocházelo k přehřívání v místě řezu.



Obr. 50 Dodané desky po vyříznutí vzorků.

Po nařezání desek bylo k dispozici všech 10 vzorků, které se mohly začít frézovat, avšak bylo nutné nejprve zvolit nástroj, kterým byla nová válcová fréza z rychlořezné oceli. Jednalo se o 12břitou frézu o průměru 80 mm. Opotřebení řezného nástroje při frézování nebylo bráno v potaz. Řezná rychlost byla zvolena dle doporučení firmy PLASTUM Trading s.r.o. V tab. 12 jsou uvedeny výsledné hodnoty otáček k jednotlivým druhům plastů. Výpočet otáček byl proveden dle vzorce:

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D}, \quad (3.2).1)$$

kde: n - otáčky nástroje [min^{-1}],
 v_c - řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$],
 D - průměr nástroje [mm].

Tab. 12 Výpočet otáček nástroje dle druhu materiálu.

Č. vzorku	Materiál	Řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Vypočtené otáčky [min^{-1}]	Zvolené otáčky na stroji [min^{-1}]	Posuv [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$]
1, 6	PP, PP (3D)	230	915	900	315
2, 7	PA, PA (3D)	230	915	900	315
3	PET	150	637	560	224
4	POM	230	915	900	315
5	PE-UHMW	230	915	900	315
8	PETG (3D)	150	637	560	224
9	PLA (3D)	150	637	560	224
10	ABS (3D)	230	915	900	315

Všechny výsledné hodnoty otáček byly zaokrouhleny na nejbližší nižší hodnotu otáček na stroji. Po vypočtení otáček byla fréza upnuta do vřetena a začalo se frézovat. Nejprve bylo provedeno postupné úhlování malých ploch tak, aby byla zajištěna jejich vzájemná kolmost. Proces úhlování je zobrazen na obr. 51.



Obr. 51 Úhlování malých ploch vzorku.

Díky předešlému úhlování bylo možné správné ustavení vzorků do strojního svěráku. Po upnutí vzorků začalo frézování větších ploch, viz obr. 52, které byly později hodnoceny. Z každé strany vzorku bylo ubíráno 1,5 mm, přičemž jedna strana byla frézovaná bez chladicí emulze a druhá s chladicí emulzí. Jako chladicí emulze byl použit koncentrát řezné kapaliny CIMVANTAGE 48FF s 5% koncentrací. Použitím emulze vzniklo k hodnocení tvarů celkem 20 ploch.



Obr. 52 Frézování ploch určených k hodnocení.

Po frézování byly na vzorcích jemně sraženy hrany, aby nedošlo k vzájemnému poškození ploch při manipulaci. Tímto byl dokončen obráběcí proces a všechny vzorky byly připravené k měření. Na hodnocené plochy bylo fixou naznačeno, která strana byla obráběná s emulzí, viz obr. 53, aby nedošlo k jejich záměně.



Obr. 53 Zobrazení obrobených vzorků ze strany s chladicí emulzí.

3.5 Měření vzorků

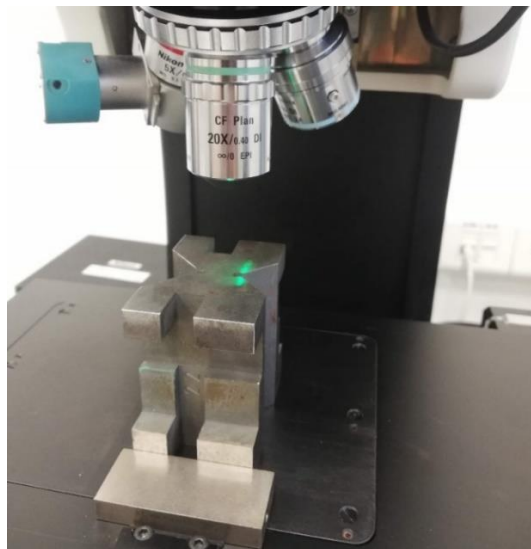
Před samotným měřením rozměrů a tvarů bylo nejprve nutné zvolit, které parametry budou hodnoceny. Autor zvolil v praxi nejpoužívanější a nejznámější parametry, které byly popsány v kapitole 2.5 a jejich podkapitolách.

Nejprve byly měřeny povrchy, a to na optickém měřicím zařízení Talysurf CCI, který využívá bezdotykovou metodu měření s využitím korelační koherenční interferometrie. Měřicí zařízení vyhodnocuje data na připojeném počítači v programu TalyMap Platinum, který je dodáváný k tomuto zařízení. K měření byl využit objektiv s 20násobným zvětšením. U každého vzorku byla velikost měřené plochy 0,825 x 0,825 mm, z níž bylo vždy vyhodnoceno 1024 x 1024 bodů. Aby mohlo dojít k porovnání výsledků, byly použity stejné podmínky měření u všech vzorků. [94; 95]

Metodika měření povrchu je popsána níže [95]:

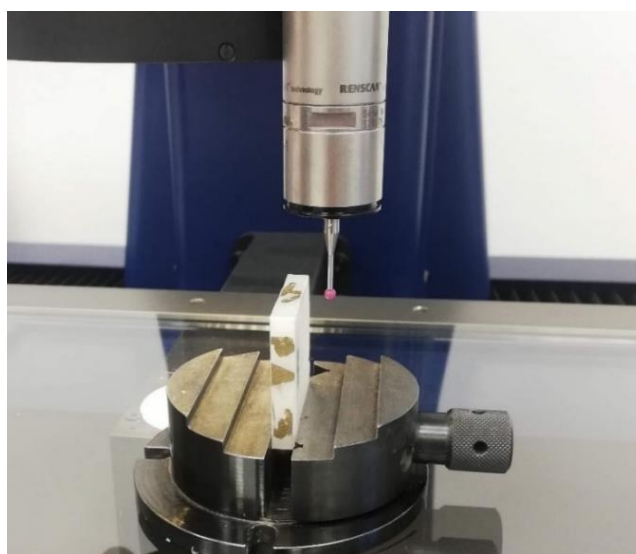
- 1) spuštění měřicího přístroje Talysurf CCI, počítače a programu TalyMap Platinum,
- 2) volba optimálního objektivu,
- 3) očištění povrchu vzorku,
- 4) ustavení vzorku do vhodné vzdálenosti,
- 5) výběr plochy k měření a zaostření,
- 6) spuštění 3D měření povrchu,
- 7) odstranění neměřených bodů a jejich nahrazení plynulým navázáním tvaru pomocí nejbližších vyhodnocených bodů,
- 8) vyrovnaní plochy,
- 9) odstranění dominantních nerovností (0,5 % největších prohlubní a 0,5 % největších vrcholů),
- 10) odstranění tvarových úchylek,
- 11) zobrazení 3D textury povrchu a požadovaných parametrů ploch,
- 12) spuštění 2D měření profilu,
- 13) zobrazení 2D profilu drsnosti a požadovaných parametrů profilu.

Pro získání relevantních výsledků bylo měření 2D profilu drsnosti provedeno 3x. Při měření vzorků bylo časově nejnáročnější změřit první vzorek, jelikož bylo nutné nastavit všechny požadované parametry. Po nastavení programu a změření prvního vzorku byl čas měření ostatních vzorků výrazně kratší. Měření tvarové přesnosti vzorků proběhlo bezdotykově pouze pomocí optického snímače, který je zobrazený na obr. 54.



Obr. 54 Optický měřicí přístroj.

Po měření textury byly vzorky šetrně přesunuty k souřadnicovému měřicímu přístroji, kde proběhlo měření rozměrové přesnosti. Před každým měřením byl vzorek pevně upnut do malého svěráku. Měření bylo realizováno měřicí sondou s dřikem dlouhým 21 mm a rubínovou kuličkou o průměru 3 mm, viz obr. 55. Nejprve byl spuštěn měřicí program, do kterého byly opět zadány požadované parametry k hodnocení, tedy vzdálenost a rovnoběžnost. Při měření každé plochy si sonda nejprve vyhotovila pomyslnou síť 16 naměřených bodů na ploše, ze kterých určovala vzdálenost a úchylku rovnoběžnosti k protilehlé ploše, kde bylo taktéž naměřeno 16 bodů. Poté byly získány hodnoty měření, které byly zaneseny do programu Microsoft Excel, kde byly vyhodnoceny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky parametrů. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tab. 13 a 14. Chyba měření tohoto zařízení je zobrazena v tab. 8. Pro hodnocení rozměrů byly parametry vzdálenosti a rovnoběžnosti hodnoceny na délce 6 mm, a proto byla pro všechna měření stanovena chyba měření 1,85 μm .



Obr. 55 Měření rozměrů na souřadnicovém měřicím zařízení.

3.5.1 Výsledky rozměrů

Dle výše uvedeného v kapitole 3.5 byly pro hodnocení rozměrů zvoleny 2 parametry, kterými byly vzdálenost a rovnoběžnost. Pro lepší přehlednost byla ve výzkumu uvedena také odchylka vzdálenosti, tedy rozdíl hodnot požadovaného a skutečného rozměru v absolutní hodnotě. Dále byla určena směrodatná odchylka. Vzdálenost je označena R a rovnoběžnost LT. Pro přesnější určení parametrů byly všechny vzorky měřeny třikrát, viz tab. 13 a tab. 14.

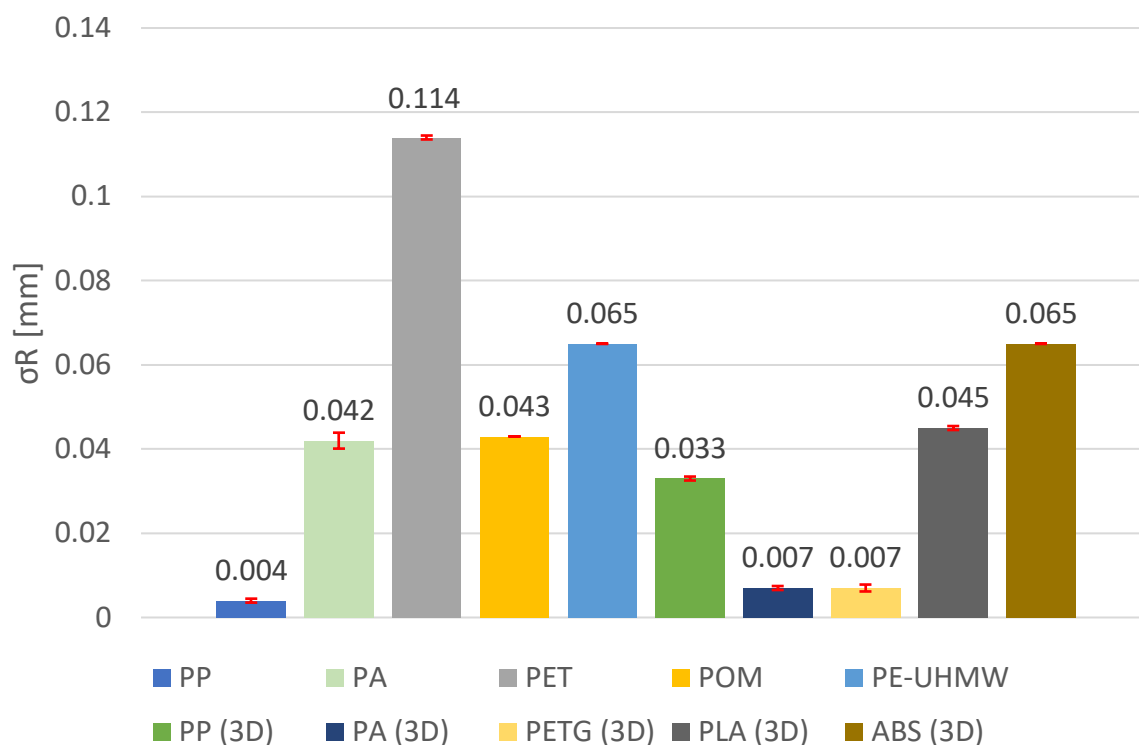
Tab. 13 Výstupní hodnoty měření vzdálenosti.

Č. vzorku	Materiál	Číslo měření – R [mm]			Průměr [mm]	Odchylka σR [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
		1.	2.	3.			
1	PP	5,996	5,996	5,995	5,996	0,004	0,00047
2	PA	6,039	6,043	6,043	6,042	0,042	0,00189
3	PET	6,115	6,114	6,114	6,114	0,114	0,00047
4	POM	6,043	6,043	6,043	6,043	0,043	0
5	PE-UHMW	5,935	5,935	5,935	5,935	0,065	0
6	PP (3D)	6,033	6,033	6,032	6,033	0,033	0,00047
7	PA (3D)	5,994	5,993	5,993	5,993	0,007	0,00047
8	PET-G (3D)	5,994	5,993	5,992	5,993	0,007	0,00082
9	PLA (3D)	6,045	6,045	6,044	6,045	0,045	0,00047
10	ABS (3D)	6,065	6,065	6,065	6,065	0,065	0

Tab. 14 Výstupní hodnoty měření rovnoběžnosti.

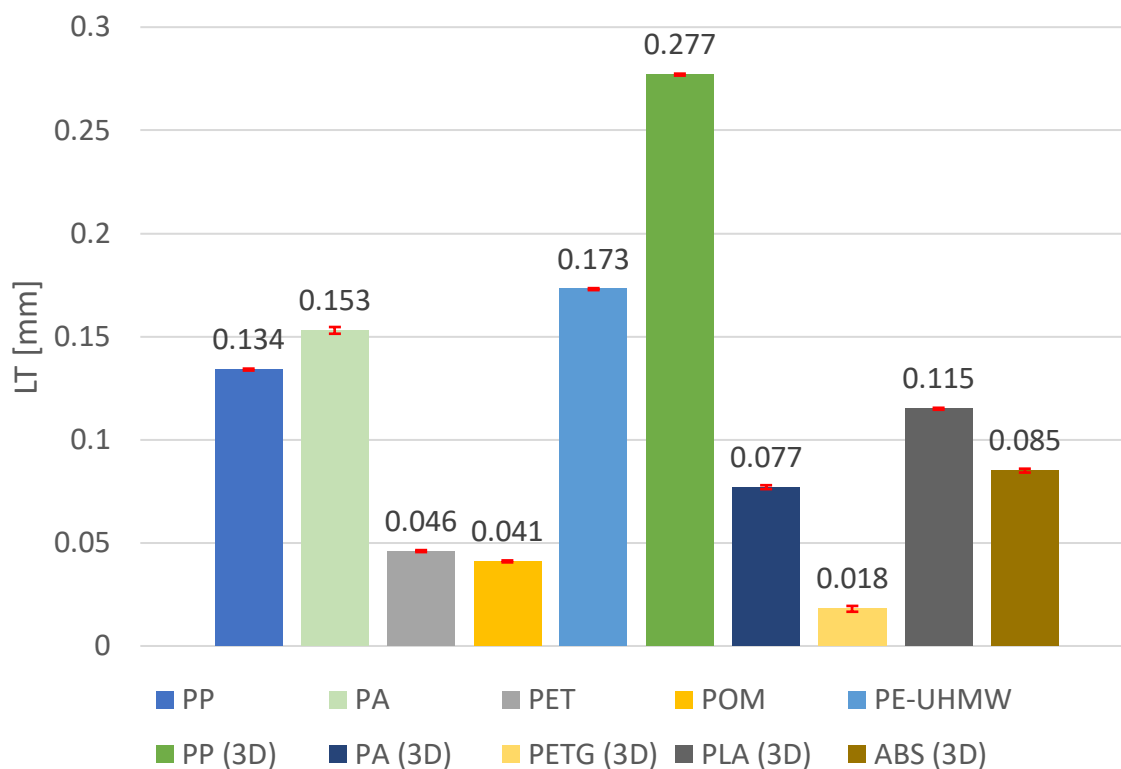
Č. vzorku	Materiál	Číslo měření – LT [mm]			Průměr [mm]	Směrodatná odchylka [mm]
		1.	2.	3.		
1	PP	0,134	0,134	0,133	0,134	0,00047
2	PA	0,151	0,155	0,153	0,153	0,00163
3	PET	0,046	0,046	0,045	0,046	0,00047
4	POM	0,041	0,041	0,040	0,041	0,00047
5	PE-UHMW	0,173	0,172	0,173	0,173	0,00047
6	PP (3D)	0,277	0,276	0,277	0,277	0,00047
7	PA (3D)	0,076	0,076	0,078	0,077	0,00094
8	PET-G (3D)	0,017	0,020	0,017	0,018	0,00141
9	PLA (3D)	0,115	0,115	0,114	0,115	0,00047
10	ABS (3D)	0,086	0,084	0,084	0,085	0,00094

Pro lepší přehlednost výstupních hodnot byla vytvořena grafická závislost, na které jsou zobrazeny odchylky vzdálenosti a rovnoběžnosti. Z výsledků odchylek vzdálenosti je patrné, že největší odchylka byla naměřena u materiálu PET. Důvodů může být hned několik, ale ve většině z nich hraje roli lidský faktor. Příčinou odchylky vzdálenosti u materiálu PET mohlo být nevhodné upnutí ve svěráku. Problém mohl nastat např. při upínání vzorků do svěráku před frézováním nebo nečistotou na nástroji. Možností je několik, avšak je třeba zmínit, že se při frézování plastů nejedná o zvlášť vysokou odchylku. Průměrná hodnota odchylky je 0,0425 mm, což je velmi malá hodnota. Nejmenší hodnoty odchylky byly naměřeny u PP, PA (3D) a PETG (3D), viz obr. 56. Nutno však podotknout, že tyto hodnoty nezávisí pouze na materiálu, ale také na mnoha dalších faktorech. Existuje tedy riziko, že při opětovném výzkumu se mohou výsledky lišit. Velikost směrodatných odchylek je v níže uvedené grafické závislosti naznačena červenou osou.



Obr. 56 Grafická závislost odchylek vzdálenosti.

Dle grafické závislosti odchylek rovnoběžnosti zobrazené na obr. 57 lze konstatovat, že nejhorší naměřené hodnoty byly zjištěny u materiálu PP vyrobeném 3D tiskem. Průměrná hodnota odchylky rovnoběžnosti byla 0,1119 mm, což není při obrábění plastů vysoká hodnota. Nejnižší hodnota odchylky byla naměřena u materiálu PETG vyrobeném 3D tiskem.



Obr. 57 Grafická závislost odchylek rovnoběžnosti.

3.5.2 Výsledky hodnocení obrobených ploch

Dle výše zmíněného bylo k hodnocení připraveno celkem deset vzorků, přičemž se měřily vždy dvě plochy každého vzorku. Důvodem bylo frézování z jedné strany bez chladicí emulze a z protější strany s chladicí emulzí. Výstupem jsou tedy naměřené hodnoty z celkem 20 ploch. Z důvodu vysokého počtu hodnocených ploch byla v práci zobrazena vizualizace pouze části z nich. Všechny parametry, které byly hodnoceny jsou popsány v kapitole 2.5.3. Hodnocení bylo rozděleno do dvou skupin, a to na hodnocení dle 2D profilu drsnosti a hodnocení dle 3D textury povrchu. Pro lepší přehlednost je níže uveden seznam všech parametrů, které byly hodnoceny na 2D profilu:

- průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti – Ra,
- průměrná kvadratická odchylka profilu drsnosti – Rq,
- průměrný kvadratický sklon profilu drsnosti – Rdq,
- největší výška profilu drsnosti – Rz,
- celková výška profilu drsnosti – Rt,
- průměrná rozteč nerovností profilu drsnosti – RSm.

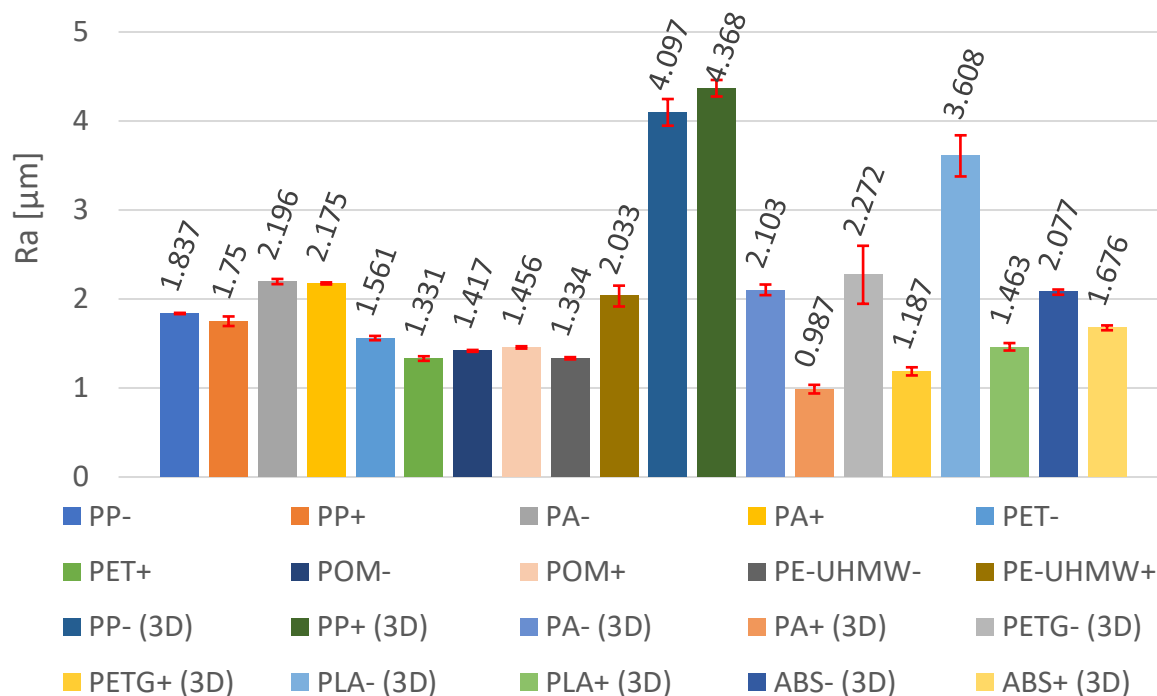
Všechny zmíněné parametry byly měřeny třikrát. Níže jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených parametrů Ra a Rz k jednotlivým materiálům, viz tab. 15. Výsledné hodnoty všech parametrů jsou uvedeny v příloze 21. U některých materiálů je značka 3D, což znamená, že způsob jejich výroby byl 3D tiskem.

Tab. 15 Vyhodnocené parametry Ra a Rz.

Č. vzorku	Materiál	Chlazen	Ra [μm]	Rz [μm]
1	PP	Ne	1,837 $\pm$ 0,007	12,793 $\pm$ 0,505
1	PP	Ano	1,750 $\pm$ 0,054	11,607 $\pm$ 0,135
2	PA	Ne	2,196 $\pm$ 0,029	18,757 $\pm$ 0,686
2	PA	Ano	2,175 $\pm$ 0,012	12,193 $\pm$ 0,309
3	PET	Ne	1,561 $\pm$ 0,024	13,760 $\pm$ 0,942
3	PET	Ano	1,331 $\pm$ 0,026	7,353 $\pm$ 0,222
4	POM	Ne	1,417 $\pm$ 0,011	7,394 $\pm$ 0,045
4	POM	Ano	1,456 $\pm$ 0,013	7,013 $\pm$ 0,167
5	PE-UHMW	Ne	1,334 $\pm$ 0,013	8,643 $\pm$ 0,111
5	PE-UHMW	Ano	2,033 $\pm$ 0,117	13,180 $\pm$ 0,828
6	PP (3D)	Ne	4,097 $\pm$ 0,150	27,770 $\pm$ 0,786
6	PP (3D)	Ano	4,368 $\pm$ 0,093	28,030 $\pm$ 1,097
7	PA (3D)	Ne	2,103 $\pm$ 0,060	14,857 $\pm$ 0,621
7	PA (3D)	Ano	0,987 $\pm$ 0,048	5,211 $\pm$ 0,070
8	PETG (3D)	Ne	2,272 $\pm$ 0,326	24,857 $\pm$ 1,721
8	PETG (3D)	Ano	1,187 $\pm$ 0,046	22,187 $\pm$ 2,534
9	PLA (3D)	Ne	3,608 $\pm$ 0,231	29,810 $\pm$ 1,572
9	PLA (3D)	Ano	1,463 $\pm$ 0,042	18,780 $\pm$ 0,601
10	ABS (3D)	Ne	2,077 $\pm$ 0,029	11,367 $\pm$ 0,366
10	ABS (3D)	Ano	1,676 $\pm$ 0,027	8,201 $\pm$ 0,148

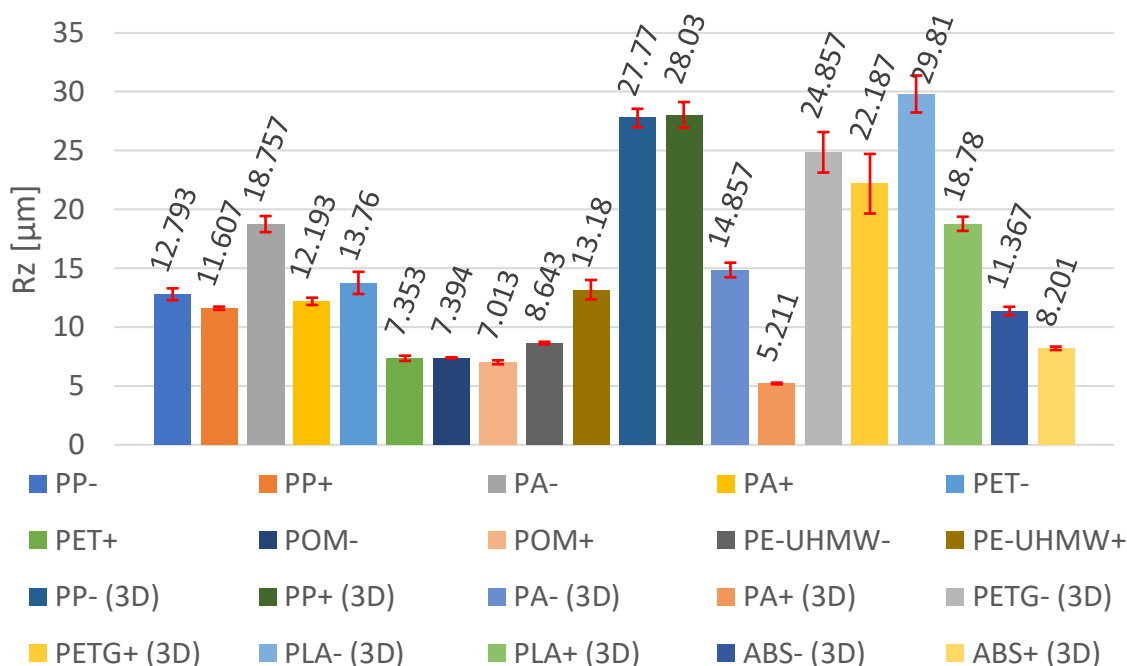
Pro přehlednost byly vybrány 2 nejpoužívanější parametry Ra a Rz, ze kterých byla vytvořena grafická závislost, viz obr. 58 a 59. Nejpoužívanějším parametrem pro měření drsnosti povrchu je Ra. Na obr. 58 lze vidět, že parametr Ra naměřený u materiálů vyrobených extruzí je nízký a víceméně totožný. U vzorků vyrobených 3D tiskem byly naměřené hodnoty více variabilní. V 80 % měření bylo zjištěno nižší Ra u vzorků frézovaných s chladicí emulzí, tím pádem díky emulzi došlo ke zmenšení nerovností. Nejnižší hodnotu Ra měl vzorek z polyamidu (PA) vyrobený 3D tiskem a obrobený s chladicí emulzí. Jeho průměrná naměřená hodnota Ra byla

0,987±0,048 μm . Na obr. 58 až 67 jsou vypsané materiály se značkou – a +, první zmíněná značka znamená frézování bez chladicí emulze a druhá zmíněná znázorňuje plochu, která byla frézovaná s chladicí emulzí, viz obr. 58.



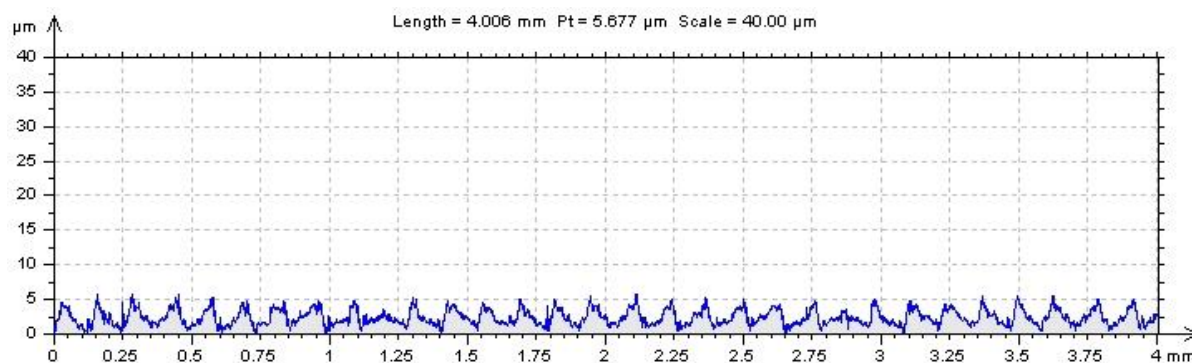
Obr. 58 Grafická závislost průměrných aritmetických odchylek profilu drsnosti.

Druhým pravděpodobně nejčastěji používaným parametrem při měření 2D profilu drsnosti je největší výška profilu Rz. Ze zhotoveného grafického znázornění, viz obr. 59, lze vidět podobné hodnoty, jako na grafu předchozím. U materiálů vyrobených extruzí byla naměřena vyšší hodnota Rz u polyamidu (PA) obráběném bez chladicí emulze. Naopak nízké hodnoty vykazovaly materiály PET frézované s emulzí a POM nezávisle na přítomnosti emulze. U vzorků vyrobených 3D tiskem byly opět u jednotlivých druhů materiálů rozdílné hodnoty, avšak nejnižší hodnotu vykazoval opět polyamid (PA) frézovaný s chladicí emulzí.

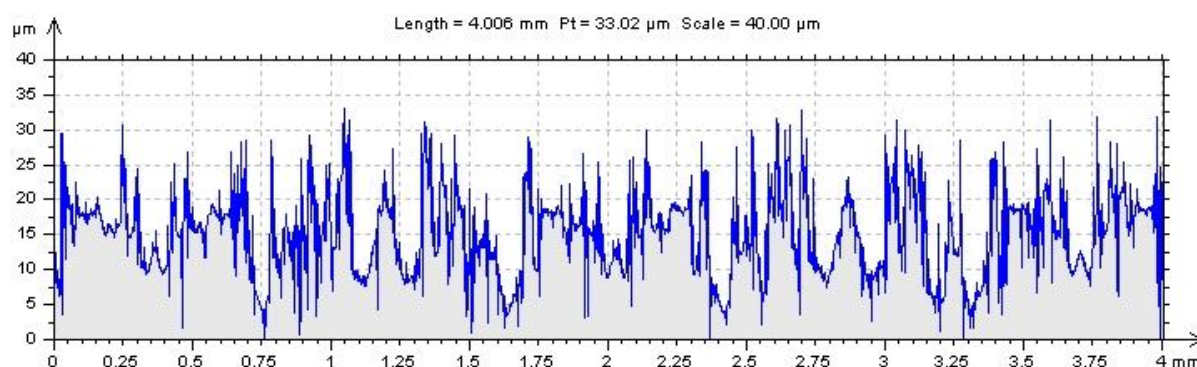


Obr. 59 Grafická závislost největších výšek profilu drsnosti.

Pro představu zde byl vložen nejlepší a nejhorší 2D profil drsnosti. Dle výše zmíněného, nejlepší hodnoty byly naměřeny u vzorku, který byl vyroben 3D tiskem a obroben s chladicí emulzí. Vysoké hodnoty vykazoval polypropylen (PP) vyrobený 3D tiskem. Použití chladicí emulze mělo u tohoto materiálu minimální vliv na kvalitu povrchu. Pro ukázkou je na obr. 60 a 61 profil, který byl frézovaný s použitím chladicí emulze. Na obou profilech je možné vidět stopy po nástroji.



Obr. 60 2D profil drsnosti PA+ (3D).



Obr. 61 2D profil drsnosti PP+ (3D).

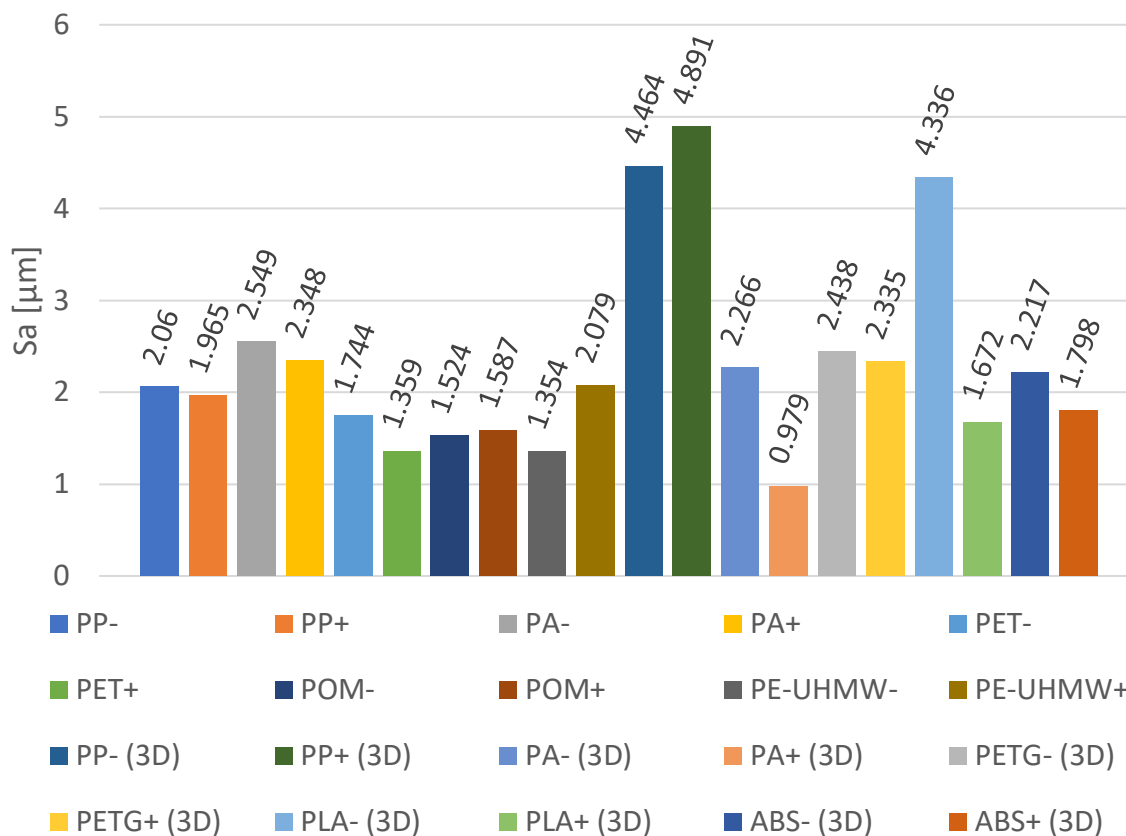
Dále byly plochy hodnoceny pomocí 3D textury povrchu. Přehled měřených parametrů je níže:

- průměrná aritmetická odchylka povrchu – S_a ,
- průměrná kvadratická odchylka povrchu – S_q ,
- základní měření sklonu na povrchu – S_{dq} ,
- největší výška povrchu – S_z ,
- celková výška povrchu – S_t .

Naměřené hodnoty jednotlivých parametrů 3D textury povrchu frézovaných vzorků zobrazuje tab. 16. Pro přehlednost byla opět vytvořena grafická závislost nejpoužívanějších parametrů z naměřených hodnot, viz obr. 62 a obr. 63. Pro názornost byly vybrány stejné parametry jako u 2D měření jen s tím rozdílem, že nyní byla hodnota určena z plochy, tedy 3D. Na obr. 62 je možné vidět mírný nárůst všech hodnot oproti měření pomocí 2D profilu, avšak poměrově se jedná o zcela stejné výsledky. Nehorší výsledky měly opět vzorky vyrobené 3D tiskem, a to PP nehledě na přítomnost emulze a PLA, které bylo frézováno bez emulze. Nejlepší hodnoty vykazoval opět polyamid (PA) vyrobený 3D tiskem a frézovaný s chladicí emulzí.

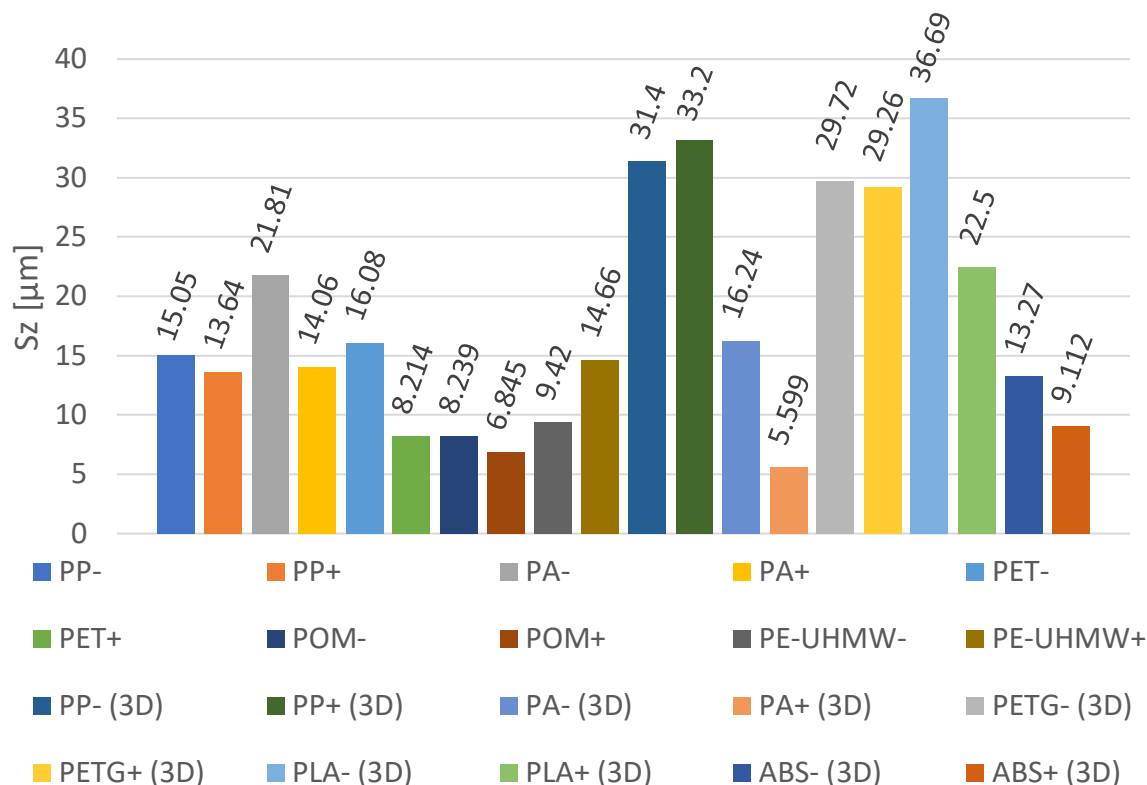
Tab. 16 Hodnoty naměřené pomocí 3D textury povrchu.

Č. vzorku	Materiál	Chlazení	Parametr				
			Sa [μm]	Sq [μm]	Sdq [$^\circ$]	Sz [μm]	St [μm]
1	PP	Ne	2,060	2,458	1,772	15,050	15,050
1	PP	Ano	1,965	2,365	1,809	13,640	13,640
2	PA	Ne	2,549	3,226	2,893	21,810	21,810
2	PA	Ano	2,348	2,773	1,601	14,060	14,060
3	PET	Ne	1,744	2,596	1,436	16,080	16,080
3	PET	Ano	1,359	1,629	0,924	8,214	8,214
4	POM	Ne	1,524	1,861	0,591	8,239	8,239
4	POM	Ano	1,587	1,896	0,466	6,845	7,642
5	PE-UHMW	Ne	1,354	1,722	0,838	9,420	9,478
5	PE-UHMW	Ano	2,079	2,731	1,223	14,660	14,740
6	PP (3D)	Ne	4,464	5,759	4,346	31,400	31,730
6	PP (3D)	Ano	4,891	5,949	4,865	33,200	33,200
7	PA (3D)	Ne	2,266	2,861	1,735	16,240	16,520
7	PA (3D)	Ano	0,979	1,159	0,535	5,599	5,6770
8	PETG (3D)	Ne	2,438	3,833	3,940	29,720	29,800
8	PETG (3D)	Ano	2,335	3,381	3,602	29,260	29,400
9	PLA (3D)	Ne	4,336	5,745	6,053	36,690	36,810
9	PLA (3D)	Ano	1,672	2,673	3,002	22,500	22,720
10	ABS (3D)	Ne	2,217	2,607	1,368	13,270	13,270
10	ABS (3D)	Ano	1,798	2,145	0,819	9,112	9,112



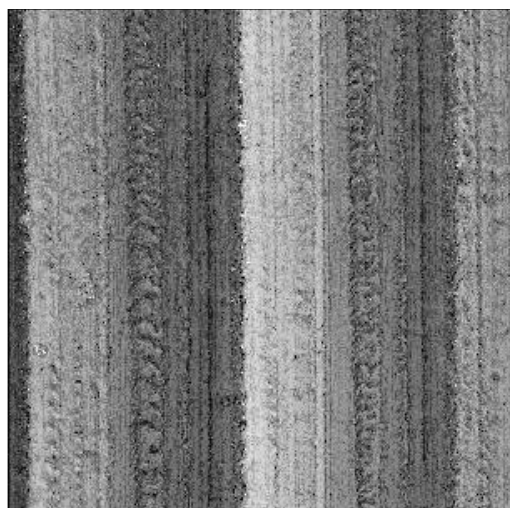
Obr. 62 Graf průměrných aritmetických odchylek povrchu.

Dále byla vytvořena grafická závislost zobrazující největší výšky povrchu, viz obr. 63. Naměřené hodnoty byly oproti největším výškám profilu z měření 2D profilu vyšší. Nejhorší výsledky byly zjištěny u materiálu PLA, který byl frézovaný bez použití chladicí emulze. Nejnížší hodnoty byly naměřeny u materiálu PA vyrobeným 3D tiskem, který byl frézovaný s chladicí emulzí.

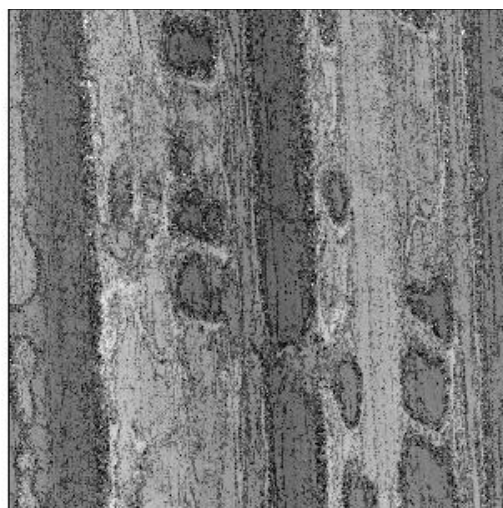


Obr. 63 Graf největších výšek povrchu.

Pro lepší názornost byly vytvořeny detaily povrchu. Z důvodu vysokého počtu hodnocených ploch byly opět vybrány pouze 2 plochy, jako při ukázce 2D profilu drsnosti. Vybranými materiály tedy byly PA a PP, které byly obráběny s použitím chladicí emulze a vyrobeny 3D tiskem. Na detailech povrchu lze vidět stopy po nástroji. Světlé barvy znázorňují prohlubně a tmavé barvy výstupky. Z obr. 64 lze jasně pozorovat kvalitně frézovanou plochu bez výrazných nerovností jaké naopak zobrazuje obr. 65.

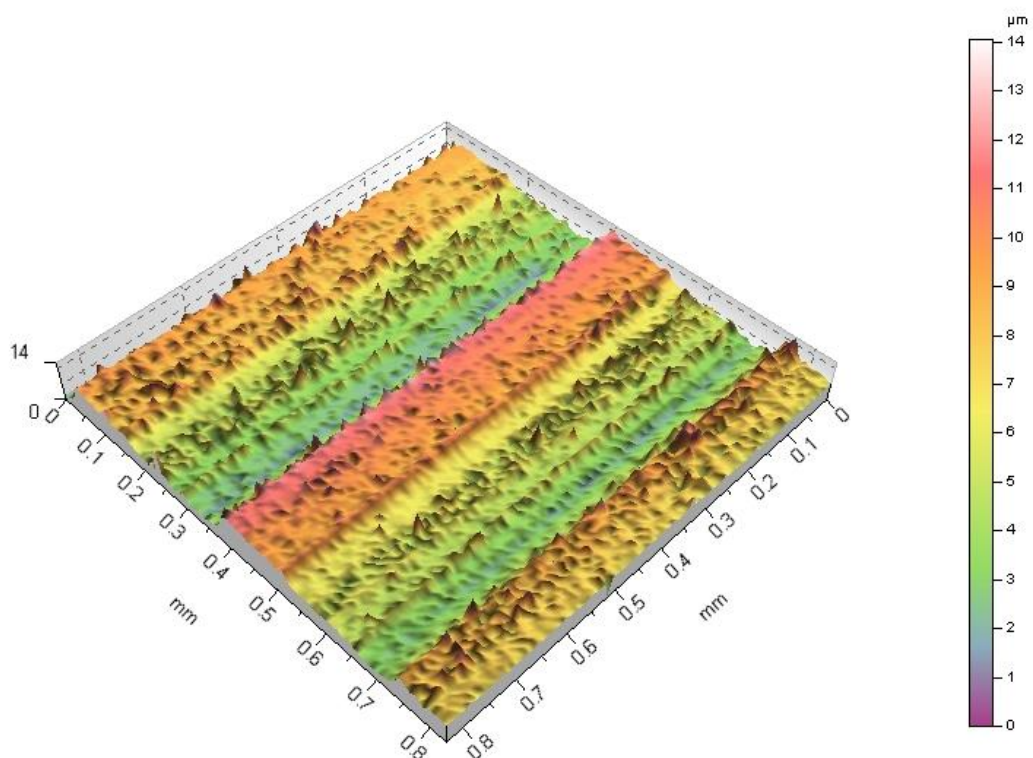


Obr. 64 Detail povrchu PA+ (3D).

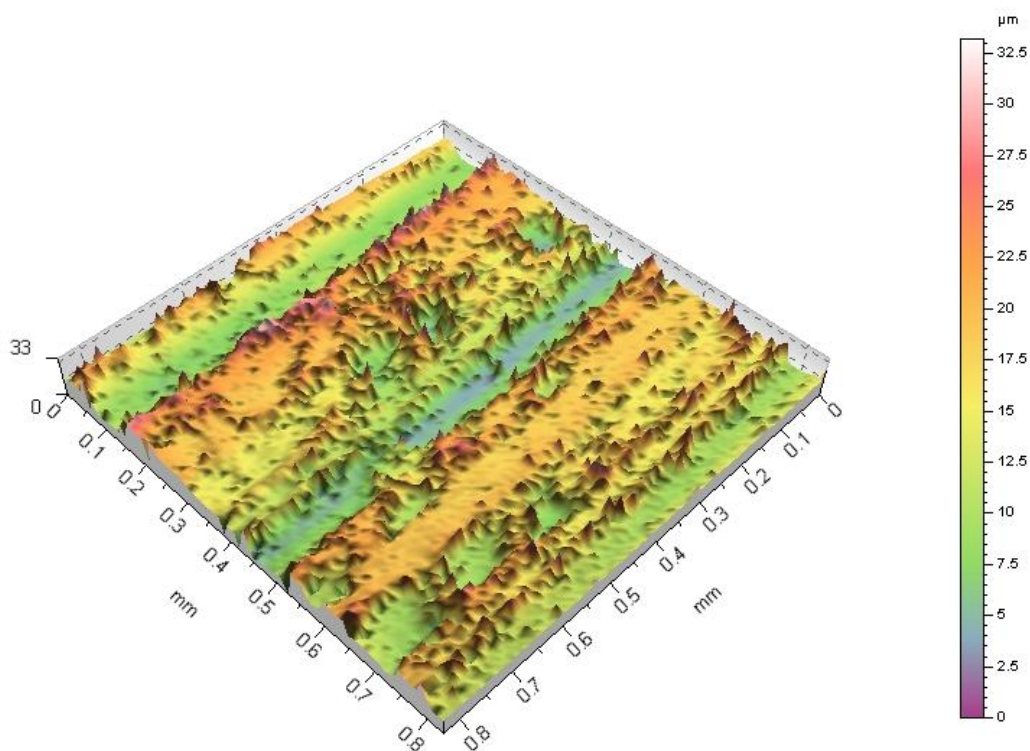


Obr. 65 Detail povrchu PP+ (3D).

V závěru této podkapitoly byla vytvořena vizualizace 3D textury povrchu, která zobrazuje nerovnosti frézovaného vzorku. Na obr. 66 lze vidět rovnoměrně obrobený povrch s minimálními odchylkami. Jedná se o materiál PA frézovaný s chladicí emulzí a vyrobený 3D tiskem. Oproti tomu obr. 67 zobrazuje materiál PP frézovaný s chladicí emulzí a vyrobený 3D tiskem, na jehož povrchu lze vidět velké nerovnosti.



Obr. 66 3D textura povrchu PA+ (3D).



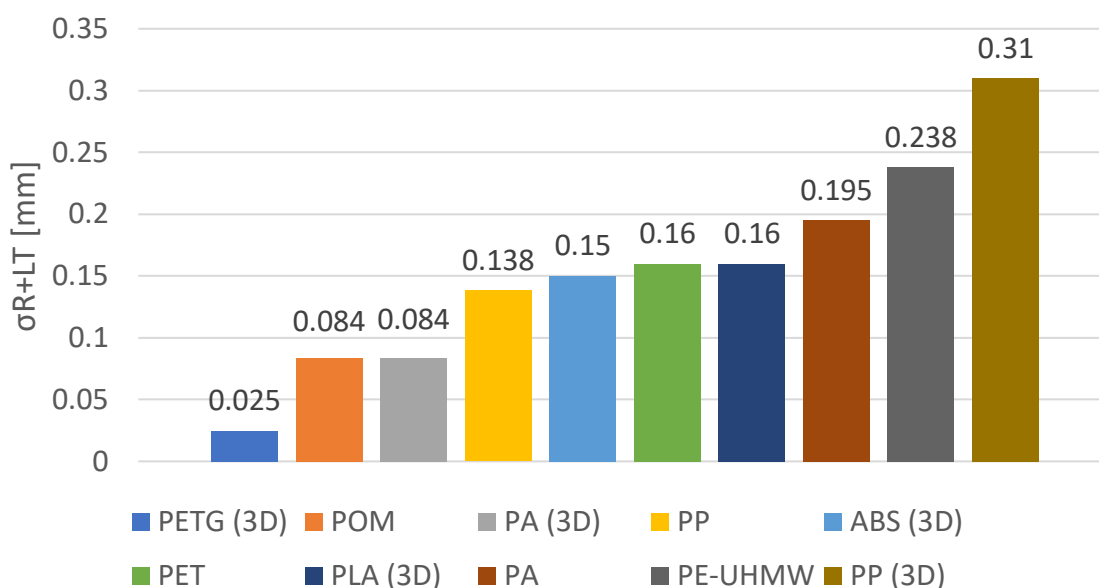
Obr. 67 3D textura povrchu PP+ (3D).

3.6 Porovnání výsledků

Rozměrová přesnost byla hodnocena na souřadnicovém měřicím přístroji. Pro hodnocení rozměrové přesnosti byla měřena vzdálenost a rovnoběžnost ploch. U výsledných hodnot je však potřeba zohlednit fakt, že při měření záleží spíše na kvalifikovanosti a pečlivosti frézaře nežli na druhu obráběného materiálu.

Při vyhodnocování rozměrů byly u obou parametrů naměřeny velmi rozdílné hodnoty, a proto byly pro relevantní porovnání výsledků sečteny odchylky vzdálenosti a rovnoběžnosti. Po sečtení bylo možné určit materiál, který se hodí k frézování přesných rozměrů, a který nikoliv. Pro názornost byla zhotovena grafická závislost, která zobrazuje součet odchylek, viz obr. 68. Nízká hodnota značí nejvíce vyhovující materiál a vysoká hodnota nejméně vyhovující materiál.

Z výsledných hodnot a vytvořených grafických závislostí je třeba vyzdvihnout materiál PETG (3D), který měl výsledné hodnoty obou parametrů velmi nízké. Odchylka vzdálenosti vyšla $0,007 \pm 0,0008$ mm a odchylka rovnoběžnosti $0,018 \pm 0,0014$ mm. Tyto hodnoty bývají těžko dosažitelné i u obrábění na CNC strojích, na kterých se využívají kvalitnější rezné nástroje. Nejvyšší hodnoty odchylek rozměrů byly naměřeny u PP (3D) a PE-UHMW. U PP (3D) byla naměřena odchylka rovnoběžnosti $0,277 \pm 0,0005$ mm, což je relativně vysoká hodnota, která mohla být zapříčiněna nevhodným upnutím obrobku do svěráku.



Obr. 68 Graf odchylek rozměrů.

Obrobené povrchy byly měřeny na interferometru. K jejich hodnocení byl využit 2D profil drsnosti a 3D textura povrchu. Výstupem hodnocení bylo celkem 11 parametrů, které byly zjišťovány na 20 měřených plochách.

Metodu porovnání výsledků nelze provést stejným způsobem jako při porovnání rozměrů, kdy byly sečteny odchylky obou parametrů a dle toho vyhodnoceny. Důvodem je vysoký počet parametrů a jejich rozdílné jednotky. Proto byly materiály hodnoceny dle výsledných hodnot jednotlivých parametrů.

U většiny měřených parametrů byly nejnižší hodnoty naměřeny u PA (3D), který byl frézovaný s chladicí emulzí. Objektivně lze zhodnotit, že tento materiál měl nejlepší tvarovou přesnost. Další materiály, které měly velmi nízké hodnoty, byly PET+, POM+, POM-, PE-UHMW-, ABS+ (3D). Většina materiálů s lepší tvarovou přesností byla vyrobena extruzí.

Vysoké hodnoty byly naměřeny u PP- (3D), PP+ (3D), PLA- (3D). Jedná se o materiály, které byly vyrobeny 3D tiskem a při požadavku vyšší tvarové přesnosti jsou dle výsledků této práce nevhodné. Nejvyšší hodnoty měřených parametrů u vzorků vyrobených extruzí byly zjištěny u polyamidu (PA), který byl frézovaný bez použití chladicí emulze.

Pro celkové vyhodnocení výsledků z naměřených hodnot byla vytvořena tab. 17, v které jsou zapsaná čísla pořadí jednotlivých parametrů. Nejlepší materiál má pořadí 1 a nejhorší 20. Pro každý z naměřených parametrů bylo vytvořeno pořadí daného materiálu vzhledem k ostatním materiálům. Cílem vytvoření tab. 17 bylo získání výsledků komplexnosti jednotlivých materiálů v závislosti na druhu výroby a použití emulze.

Z tab. 17 vyplývá, že nejlepší hodnoty jednotlivých parametrů byly naměřeny u materiálu PA, který byl vyrobený 3D tiskem a frézovaný s chladicí emulzí. Zmíněný materiál PA tedy lze nazvat jako nejkomplexnější materiál výzkumu. Druhé nejlepší hodnoty byly zjištěny u materiálu POM, který byl vyrobený extruzí a frézovaný s chladicí emulzí. Nejhorší hodnoty byly naměřeny u materiálu PLA, který byl vyrobený 3D tiskem a frézovaný bez chladicí emulze. Pro porovnání rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených extruzí a 3D tiskem byla sečtena všechna pořadí všech parametrů dle typu výroby. Výsledkem sečtení všech pořadí pro extruzi je hodnota 1011 a pro 3D tisk 1519. Z tohoto porovnání tedy lze konstatovat, že z hodnocených materiálů byly lepší hodnoty naměřeny u vzorků vyrobených extruzí.

Tab. 17 Vyhodnocení komplexnosti materiálů.

Č. vz.	Materiál	Chlazení	Pořadí dle parametru													Σ	Výsl. poř.
			R	LT	Ra	Rq	Rdq	Rz	Rt	RSm	Sa	Sq	Sdq	Sz	St		
1	PP	Ne	1	7	11	10	12	10	11	12,5	10	8	12	11	11	126,5	9–10
1	PP	Ano	1	7	10	8	11	8	8	14	9	7	13	8	8	112	8
2	PA	Ne	5	8	16	16	15	14	14	12,5	17	15	14	14	14	174,5	16
2	PA	Ano	5	8	15	13	10	9	9	7	15	13	10	9	9	132	12
3	PET	Ne	10	3	8	11	9	12	12	10	7	9	9	12	12	124	9
3	PET	Ano	10	3	3	2	6	3	4	6	3	2	6	3	3	54	4
4	POM	Ne	6	2	5	4	3	4	3	2	4	4	3	4	4	48	3
4	POM	Ano	6	2	6	5	1	2	2	1	5	5	1	2	2	40	2
5	PE-UHMW	Ne	8,5	9	4	3	5	6	6	10	2	3	5	6	6	73,5	5
5	PE-UHMW	Ano	8,5	9	12	14	7	11	10	5	11	12	7	10	10	126,5	9–10
6	PP (3D)	Ne	4	10	19	19	18	18	19	17	19	19	18	18	18	216	18
6	PP (3D)	Ano	4	10	20	20	19	19	18	16	20	20	19	19	19	223	19
7	PA (3D)	Ne	2,5	4	14	15	13	13	13	10	13	14	11	13	13	148,5	13
7	PA (3D)	Ano	2,5	4	1	1	2	1	1	8	1	1	2	1	1	26,5	1
8	PETG (3D)	Ne	2,5	1	17	17	17	17	17	19	16	17	17	17	17	191,5	17
8	PETG (3D)	Ano	2,5	1	2	7	16	16	16	15	14	16	16	16	16	153,5	15
9	PLA (3D)	Ne	7	6	18	18	20	20	20	20	18	18	20	20	20	225	20
9	PLA (3D)	Ano	7	6	7	9	14	15	15	18	6	11	15	15	15	153	14
10	ABS (3D)	Ne	8,5	5	13	12	8	7	7	4	12	10	8	7	7	108,5	7
10	ABS (3D)	Ano	8,5	5	9	6	4	5	5	3	8	6	4	5	5	73,5	5

V 80 % případů byla zjištěna lepší jakost povrchu u vzorků frézovaných s chladicí emulzí. Zároveň lze také konstatovat, že hodnoty naměřené u vzorků vyrobených extruzí jsou relativně nízké, takže při standardních požadavcích tvarové přesnosti je lze využít. V případě požadavku nízkých hodnot drsnosti povrchu u vzorků vyrobených 3D tiskem je vhodné využít výše doporučený materiál a u většiny i chladicí emulzi.

3.7 Zhodnocení výsledků vzhledem k praktickému využití

Plasty jsou klíčové pro inovace a zároveň jsou jednou z hnacích sil pro modernizaci strojírenské výroby. Díly vyrobené z plastu se staly nepostradatelnou součástí v automobilovém průmyslu. V poslední době však lze ve společnosti pozorovat rostoucí averzi k plastům, která je způsobena vlivem nezodpovědného chování lidí k životnímu prostředí. [6]

Z toho vyplývá, že aby bylo možné plně využít potenciál plastů, je důležité znát jejich specifika. Proto se autor rozhodl vytvořit výzkum, který plasty zkoumá z pohledu rozměrové a tvarové přesnosti po obrábění. Tyto vlastnosti by měly zohledňovat všichni, kdo obrábí plasty s požadavkem vysoké kvality. Autor proto uvádí doporučení s ohledem na výsledky výzkumu rozměrové a tvarové přesnosti různých druhů plastů.

Nejvyšší přesnosti byly tedy naměřeny u materiálu PA, který byl vyrobený 3D tiskem a obrobený s chladicí emulzí. Hustota tohoto materiálu je pouze $1,02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, což z něj dělá velmi lehký materiál, který se používá v leteckém průmyslu. Tento materiál je tedy vhodný tisknout na 3D tiskárně metodou FFF a v případě nutnosti vysoké rozměrové a tvarové přesnosti je vhodný k frézování. Tento materiál ve formě filamentu stojí kolem $1\,400 \text{ Kč}\cdot\text{kg}^{-1}$, což je relativně vysoká cena, která se však při vysokých nárocích na rozměrovou a tvarovou přesnost po frézování se podle autora vyplatí. Použití PA v elektronice, strojním inženýrství, leteckém a automobilovém průmyslu autor doporučuje vzhledem k výsledkům výzkumu. [64; 65; 66; 96]

Další materiál, který vykazoval velmi dobré hodnoty rozměrové a tvarové přesnosti frézovaných ploch byl POM, který byl vyrobený extruzí. Chladicí emulze při jeho frézování neměla vliv na tvarovou přesnost. Dle výsledků ji tedy není nutné využívat, avšak při obrábění při vyšších rezných rychlostech může vznikat větší teplo, které může mít negativní vliv na kvalitu povrchu z důvodů vysoké smrštivosti při chladnutí. Autor by chladicí emulzi v těchto případech při obrábění POM doporučil. Komponenty vyrobené z tohoto materiálu by autor doporučil pro použití v mínusových teplotách u strojních komponentů jako jsou ozubená kola, šrouby, pružiny atd. [70; 71]

K frézování komponentů, u nichž je požadována vysoká rozměrová a tvarová přesnost, se nehodí PP, který je vyráběný 3D tiskem. Vzhledem k výsledkům výzkumu mělo použití chladicí emulze minimální vliv na kvalitu povrchu tohoto materiálu. V případě, že je nutné obrábět tento materiál, tak se vždy z hlediska přesnosti vyplatí využít polotovary vyrobené extruzí případně jinou technologií výroby. Tento materiál se však primárně používá v oblastech, kde ho není nutné frézovat např. chemický, textilní a potravinářský průmysl. Dále se také používá pro výrobu bazénů, nádrží a potrubních systémů, kde nehraje tvarová přesnost zásadní roli. Autor tedy tento materiál pro výrobu zmíněných komponentů, kde není požadována vysoká tvarová a rozměrová přesnost doporučuje. [61; 62; 63]

Další materiál, který měl velmi špatné výsledné hodnoty rozměrové a především tvarové přesnosti, je PLA, který byl vyrobený 3D tiskem a obrobený bez chladicí emulze. Tento materiál se primárně používá pro výrobu reklamních předmětů, což je dle autora jeho vhodné využití. Dále se využívá ve zdravotnictví pro biologicky rozložitelné předměty jako např. šrouby, kolíky a tyče. Dle autora je využití tohoto materiálu správné, protože se jedná o materiál, který nebývá příliš často obráběný. V případě nutnosti jeho frézování je výhodnější využít chladicí emulzi, která zvýší výslednou tvarovou přesnost. [76; 77]

Z tohoto výzkumu vyplývá, že v případě obrábění neznámých plastových materiálů se dle výsledků tvarových přesností vyplatí obrábění s chladicí emulzí. Lepší tvarová přesnost při použití chladicí emulze byla zjištěna v 80 % případů frézování.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala hodnocením rozměrové a tvarové přesnosti součástí vyrobených z plastu. Tento výzkum bude sloužit především konstruktérům, technologům a frézařům, kteří se rozhodují, jaký materiál zvolit na výrobu frézovaného dílu vzhledem k požadavkům na rozměrovou a tvarovou přesnost.

U měření rozměrů byly zkoumány dva parametry, a to vzdálenost a rovnoběžnost. Dle naměřených hodnot byla nejmenší odchylka vzdálenosti zjištěna u vzorku z polypropylenu (PP), který byl vyroben extruzí. Další velmi přesně vyrobené vzorky byly z PETG a PA, jenž byly vyrobeny 3D tiskem. Největší odchylka vzdálenosti byla naměřena u materiálu PET. Oproti ostatním vzorkům byla jeho odchylka výrazně větší, čemuž mohlo předcházet špatné upnutí při obrábění. Nejmenší odchylka rovnoběžnosti byla naměřena u vzorku z materiálu PETG, který měl i velmi nízkou hodnotu odchylky u měření vzdálenosti, a proto ho lze považovat za materiál, který je možné vyrobit s nejvyšší rozměrovou přesností v porovnání s ostatními materiály. Naopak nejhorší rozměrová přesnost byla zjištěna u materiálu PP, který byl vyroben 3D tiskem.

Pro hodnocení obrobených povrchů bylo zkoumáno 11 parametrů pro každou z celkem 20 ploch na 10 vzorcích. Hodnocení bylo rozděleno na měření pomocí 2D profilu drsnosti a měření pomocí 3D textury povrchu. Dle vyhodnocených dat byly nejmenší hodnoty tvarových odchylek naměřeny u PA, který byl vyrobený 3D tiskem a obráběný s chladicí emulzí. Výsledné hodnoty tvarových nerovností tohoto vzorku byly nejnižší u většiny parametrů. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny u trojice materiálu PP-, PP+, PLA-, které byly vyrobeny 3D tiskem. Z výsledků výzkumu vyplývá, že tvarové přesnosti u jednotlivých druhů materiálů jsou velmi rozdílné, a proto je důležité správné zvolení vhodného materiálu.

Dle měření rozměrové a tvarové přesnosti byly nejmenší odchylky zjištěny u materiálu PA, který byl vyrobený 3D tiskem a pro tvarovou přesnost obrobený s chladicí emulzí. Tento materiál tedy lze považovat za nejvhodnější z hodnocených druhů materiálů pro vysokou rozměrovou a tvarovou přesnost. Z měření zároveň vyplývá, že při obrábění vzorků bylo v 80 % případů výhodnější z hlediska tvarové přesnosti využít při obrábění chladicí emulzi.

Hlavním přínosem této práce bylo vytvoření doporučení pro praktické využití zkoumaných materiálů na základě jejich tvarové a rozměrové přesnosti. Závěrem lze konstatovat, že byly naplněny cíle diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. GEYER, R. A Brief History of Plastics [online]. 24.7.2020 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-38945-1_2
2. DORMERA, Aaron, Donal P.FINNA, Patrick WARDB a John CULLENB. Carbon footprint analysis in plastics manufacturing. Journal of Cleaner Production [online]. 2013 [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.014>
3. PRŮŠA, Josef. Základy 3D tisku [online]. Praha: Prusa Research, 2019 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/zaklady-3d-tisku-s-josefem-prusou_490/
4. BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. 2016 [cit. 2022-03-02]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
5. HALDEN, Rolf. Plastics and Health Risks [online]. 2010 [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: doi:[10.1146/annurev.publhealth.012809.103714](https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714)
6. STEIDL, Josef. Plasty a kompozity v inovaci strojírenských výrobku. MM Průmyslové spektrum [online]. 2019, 22(4), 50-51 [cit. 2022-02-25]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/SP5ke8vrpC2RcywX>
7. Technické plasty. Haka hydraulika [online]. [cit. 2022-02-28]. Dostupné z: <https://www.hakahydraulika.cz/sortiment/technicke-plasty/>
8. CHALMIN, Philippe. The history of plastics: from the Capitol to the Tarpeian Rock. The Journal of Field Actions. [online]. Institut Veolia, 2019 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://journals.openedition.org/factsreports/5071>
9. EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Environment, Používat plasty jinak, Publications Office [online]. 2018 [cit. 2022-02-22] Dostupné z: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/09937>
10. Povinná recyklace polystyrenu se blíží: Produkce plastů ve světě 1950-2017. In: Tzb [online]. 23.8.2018 [cit. 2022-04-25]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/nakladani-s-odpady/17794-povinna-recyklace-polystyrenu-se-blizi>
11. FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
12. PTÁČEK, L. a kol. Nauka o materiálu I. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2003. 516 s. ISBN 80-7204-193-2.
13. BIRON, Michel. Thermosets and composites: Technical information for plastics users [online]. 2003 [cit. 2022-03-02]. ISBN 1856174115. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=gim_ibLyxJAC&oi=fnd&pg=PP1&dq=thermosets&ots=YhIjF9gRn3&sig=DqAsOaryAgtEhJ6Mf3V0jtmBTIQ&redir_esc=y#v=onepage&q=thermosets&f=false
14. MUSIL Jan a Martin ZATLOUKAL. Historical Review of Die Drool Phenomenon in Plastics Extrusion, Polymer Reviews, DOI: 10.1080/15583724.2013.860987 [online]. 2014 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583724.2013.860987?scroll=top&needAccess=true>

-
15. LEVY, Sidney a James CARLEY. *Plastics extrusion technology handbook*. Industrial Press Inc., 1989. [online]. 2. Industrial Press, 1989 [cit. 2022-03-04]. ISBN 0-8311-1185-2. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Tl99C7oVdrYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=extrusion+of+plastics&ots=heIinqFr2D&sig=nk0U7dFcB7E65K8De5QH3S5C3hk&redir_esc=y#v=onepage&q=extrusion%20of%20plastics&f=false
 16. AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. 2016 [cit. 2022-03-04]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
 17. GEBHARDT, Andreas a Jan-Steffen HÖTTER. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing* [online]. Munich: Hanser Publishers, 2016 [cit. 2022-03-06]. ISBN 978-1-56990-583-8. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpEGPROF13/toc?issue_id=kt010ZI2C1&hierarchy=toggle-content
 18. FLEISNER, Miroslav. Co je 3D tiskárna a jak funguje?. In: *Miroluk* [online]. 14.9.2018 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.miroluk.cz/clanky-co-je-3d-tiskarna-a-jak-funguje.html>
 19. Díly vyrobené technologií 3D tisk. *Indiamart* [online]. [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/3d-printing-service-23074298091.html>
 20. BADIRU, Adedeji B., Vhance V. VALENCIA a David LIU. *Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry* [online]. Boca Raton, 2017 [cit. 2022-03-08]. ISBN 9781315119106.
 21. Tiskárna Prusa Mendel. *Linuxexpres* [online]. 2012 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.linuxexpres.cz/hardware/3d-tisk>
 22. NOORANI, Rafiq. *3D printing: Technology, applications, and selection*. 2017. ISBN 9781498783767. Dostupné z: doi:10.1201/b21228
 23. NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T. Q. NGUYEN a David HUI. *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges* [online]. 2018 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
 24. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
 25. Metoda FDM. *Andcom* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://andcom.erasmus.site/courses/module-2-3d-printing-as-an-adult-education-tool/lessons/basics-of-3d-printing/>
 26. Metoda SLA. *Dk metal* [online]. 2018 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
 27. Metoda SLS. *Think 3D* [online]. 2020 [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: <https://www.think3d.in/difference-between-mjf-and-sls/>
 28. Metoda LOM. *ResearchGate* [online]. 2020 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Laminated-Object-Manufacturing-LOM_fig5_344071560
-

-
29. HEATHER, J. O'Connor, Andrew N. DICKSON a Denis P. DOWLING. Additive manufacturing: Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process [online]. In: . 2018 [cit. 2022-03-30]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.035>
 30. MJF (Multi Jet Fusion). Cotu [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
 31. Engineering plastics. Curbell plastics [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Engineering-Plastics-Manual-Ensinger?fbclid=IwAR07vcfwcQ_I6q03CatHtxKO_49MxvLDCpO4e3a1ik3ltvXU3
 32. Machining plastics. Tristar [online]. 2015 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/00399914/221437.pdf>
 33. Machining Recommendations for Semi-Finished Engineering Plastics. Curbell plastics [online]. [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: <https://www.curbellplastics.com/Research-Solutions/Technical-Resources/Technical-Resources/Machining-Engineering-Plastics>
 34. Celazole PBI. Professional plastics: The Leader in Plastic Sheets, Rods, Tubing, Profiles, & Components [online]. 2022 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.professionalplastics.com/CELAZOLE-PBI>
 35. Řezání materiálu. Eluc [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1124>
 36. Návod na obrábění polotovarů technických plastů. Plastum [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://plastum.cz/navod-na-obrabeni/>
 37. Řezání plastů na pásové pile. Techni Trade [online]. 2020 [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.techni-trade.cz/sluzby/deleni-materialu-pasovou-pilou/>
 38. Příručka obrábění-kniha pro praktiky. Přel. KUDELA, M. AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Praha: Scientia, s.r.o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting – A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
 39. KOČMAN, K., PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
 40. Sousledné frézování nebo nesousledné frézování. Sandvik: Coromant [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>
 41. Frézování. Eluc [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1824>
 42. Frézování plastů. Plast Partner [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.plastpartner.cz/cs/reference>
 43. BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. Drsnost povrchu. Praha: SNTL, 1989, 338 s.
 44. BHUSHAN, Bharat. Modern tribology handbook [online]. CRC Press, 2000 [cit. 2022-03-24]. ISBN 9780849384035. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780849377877-10/surface-roughness-analysis-measurement-techniques>
-

-
45. KUDĚLKA, Vladimír, František DOLÁK a Jan OPLETAL. Kvalita výrobků z pohledu rozměrové přesnosti, úchylek tvaru a polohy, tolerancí a funkčního uložení dílců i součástí výrobků. E-konstrukter [online]. 2018 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/kvalita-vyrobku-z-pohledu-rozmerove-presnosti-uchylek-tvaru-a-polohy-toleranci-a-funkcniho-ulozeni-dilcu-i-soucasti-vyrobku>
 46. KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. Technické kreslení. Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0498-2.
 47. Tolerování délkových a úhlových rozměrů. Eluc [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1092>
 48. LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 4. ALBRA, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.
 49. Úchylky tvaru. Eluc [online]. 2012 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1099>
 50. Geometrické tolerance rovnoběžnosti: Přehled používaných geometrických tolerancí. In: E-konstrukter [online]. 02.06.2014 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/geometricke-tolerance>
 51. Kontrola drsnosti povrchu. In: Eluc: Kontrola drsnosti povrchu [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1102>
 52. Parametry drsnosti. In: Jenoptik [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>
 53. Měření drsnosti povrchu: Volba správného filtru. Mahr [online]. [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.mahr.com/cs/novinky-a-udalosti/zobrazeni-clanku/mereni-drsnosti-povrchu-volba-spravneho-filtru>
 54. DOBROCKÝ, David, Zbyněk STUDENÝ, Zdeněk POKORNÝ, Zdeněk JOSKA a Petr FALTEJSEK. Assessment of Surface Structure of Machined Surfaces. Manufacturing technology [online]. 2019, 19(4) [cit. 2022-04-21]. ISSN 1213-2489. Dostupné z: https://journalmt.com/pdfs/mft/2019/04/04.pdf?fbclid=IwAR0KyaPQtjibqXvfumajqAJu66WYxGYg-I9_25Z7CoS0z68oX3Iqunouo5Q
 55. ZEIN, H. Investigation of Surface Texture and Surface Residual Stresses in the Dry Face Turning Process of AL2024-T351. In: ResearchGate [online]. 02/2020 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/340136978_Investigation_of_Surface_Texture_and_Surface_Residual_Stresses_in_the_Dry_Face_Turning_Process_of_AL2024-T351
 56. Area Roughness Parameters: Surface texture parameters in ISO 25178. Keyence [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
 57. SAURÍ, Jaume, et al. Relationships between surface free energy, surface texture parameters and controlled drug release in hydrophilic matrices: International journal of pharmaceutics. International journal of pharmaceutics [online]. 2015 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijpharm.2014.11.054
 58. Drsnost povrchu. E-konstrukter [online]. 02.06.2014 [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/drsnost-povrchu>
 59. Porovnání dokončovacích metod. Eluc [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1380>
-

-
60. Lapování. In: Eluc [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1385>
 61. ENCYKLOPEDIE PLASTŮ: POLYPROPYLEN (PP). Samosebou [online]. 25.10.2019 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2019/10/25/encyklopedie-plastu-polypropylen-pp/>
 62. Polypropylen - PP. Vmplast [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.vmplast.cz/sortiment/polypropylen>
 63. PP - polypropylen. Techplasty [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/polypropylen/pp-polypropylen>
 64. TECAMID 12 natural. Ensinger [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/plast/pa12-tecamid-12-natural#/product-technical-detail-collapse-item-3-lvl-1>
 65. PA12G - lity polyamid 12. Techplasty [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/polyamid/pa12g-lity-polyamid-12>
 66. BORIĆ, Andrej, Alena KALEDOVÁ a Tomaz PEPELNJAK. Characterisation of Polyamide (PA)12 Nanocomposites with Montmorillonite (MMT) Filler Clay Used for the Incremental Forming of Sheets. Mdpi [online]. 28.6.2019 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/polym11081248>
 67. Technické plasty. Techplasty [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/technicke-plasty>
 68. PET – Polyethylentereftalát. Koplast [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.koplast.cz/pet/>
 69. ENCYKLOPEDIE PLASTŮ: POLYETHYLEN – TEREFTALÁT (PET). Samosebou [online]. 26.02.2021 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2021/02/26/encyklopedie-plastu-polyethylentereftalat-pet/>
 70. SOVA, Miloš. Polyacetál (Polyoxymethylén) - POM. Techportal [online]. 6.2.2015 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/polyacetal-polyoxymethylen-pom-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxHNRpFn129vs/>
 71. POM - POLYOXYMETYLÉN. Resinex [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/pom.html>
 72. PE 1000 -UHMW-. Akplast [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://www.akplast.cz/pe-uhmw>
 73. Polyethylen - PE 1000 (PE - UHMW). Vmplast [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.vmplast.cz/sortiment/polyethylen-pehd/polyethylen-pe-1000-pe-uhmw>
 74. PETG. Filamentpm [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/petg-metalicka-edice-zabi-zlato-1-75-mm-0-5-kg/p176>
 75. PETG. Smart3d [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.smart3d.cz/Filament-AURAPOL-PETG-MODRA-1-75-mm-1-kg-d2466.htm#detail-anchor-description>
 76. PLA. Materialpro3d [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/pla-1-75/pla-extrafill-bily-1-75/>
 77. Bioplasty – Polylaktid (PLA). Bioplasty [online]. 14.11.2018 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://www.bio-plasty.cz/bioplasty-polylaktid-pla/>
-

-
78. Co je PLA a k čemu se používá?. Tombouctou [online]. 2020 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://tombouctou-food.com/cs/kreativni-mechanismy-blog/>
79. ABS [ABS] Akrylonitril-butadien-styren. Plastum [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://plastum.cz/prumyslove-technicke-materialy/abs/>
80. ABS. Filamentpm [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.filament-pm.cz/abs-cerna-1-75-mm-1-kg/p16>
81. ABS (AKRYLONITRILBUTADIENSTYREN) POLYMEROVÉ DESKY. Titanmultiplast [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.titan-multiplast.cz/produkty/strojirenstvi-a-ostatni-prumysl-86/akrylonitrilbutadienstyren-desky-abs-266>
82. Rozdíl mezi ABS, PLA, PETG. Materialpro3d [online]. 20.7.2017 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/blog/rozdiily-abs-pla-petg/>
83. Plasty-mechanické vlastnosti. E-konstrukter [online]. 16.8.2013 [cit. 2022-05-18]. ISSN e-konstrukter. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
84. PAZHAMANNIL, Ribin, P. GOVINDAN a P. SOORAJ. Prediction of the tensile strength of polylactic acid fused deposition models using artificial neural network technique [online]. 27.9.2021 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.199](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.199)
85. Polyaktidová vlákna: Vlastnosti. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 25.1.2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyaktidov%C3%A1_vl%C3%A1kna
86. Prusa i3 MK3. Alza [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/prusa-i3-mk3-d5271426.htm#discussionPosts>
87. Pásová pila Bomar STG 220 G. Poziadavka [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.poziadavka.sk/ponuky/ponuka-200300/Pasova-pila-Bomar-STG-220-G>
88. Dělení materiálu. Kavale [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://kavale.cz/vyroba/deleni-materialu/>
89. FRÉZKA NÁSTROJÁŘSKÁ FNK 25 A. Sovex [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.sovex.cz/component/mtree/frezky/nastrojarske/frezka-nastrojarska-fnk-25-a>
90. Talysurf CCI Lite Non-contact 3D Profiler: Automated non-contact small footprint system [online]. 2008 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://hobbydocbox.com/Photography/78970097-Talysurf-cci-lite-non-contact-3d-profiler.html>
91. SolidWorks [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/solidworks/>
92. PETERSSON, Håkan. Template-Based Design Analysis: An Alternative Approach for the Engineering Designer to Perform Computer-Based Design Analysis [online]. Sweden, 2016 [cit. 2022-05-02]. ISBN 978-91-7623-729-8. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/301765443_TemplateBased_Design_AnalysisAn_Alternative_Approach_for_the_Engineering_Designer_to_Perform_ComputerBased_Design_Analysis
93. Představení a stažení PrusaSlicer. Prusa3d [online]. [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://www.prusa3d.com/cs/stranka/prusaslicer_424/
-

94. GROOT, Peter. Coherence Scanning Interferometry. Springer [online]. 2011 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12012-1_9)
95. KAPLONEK, Wojciech a Czesław LUKIANOWICZ. Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements [online]. 2012 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: [doi:10.5772/35059](https://doi.org/10.5772/35059)
96. Nylon (PA) filament: Nylon PA12 černý 1,75mm 750g Fiberlogy. Materialpro3d [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/nylon-filament/nylon-pa12-cerny-1-75mm-750g-fiberlogy/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
A	Základní plocha	[mm ²]
D	Průměr nástroje	[mm]
L	Délka	[mm]
l	Základní délka profilu	[mm]
LT	Rovnoběžnost	[mm]
n	Otáčky nástroje	[min ⁻¹]
p	Přídavek na obrábění	[mm]
R	Vzdálenost	[mm]
Ra	Průměrná aritmetická odchylka profilu	[μm]
Rdq	Průměrný kvadratický sklon profilu	[°]
Rq	Průměrná kvadratická odchylka profilu	[μm]
RSm	Průměrná rozteč nerovností profilu	[mm]
Rt	Celková výška profilu	[μm]
Rz	Největší výška profilu	[μm]
Sa	Průměrná aritmetická odchylka povrchu	[μm]
Sdq	Základní měření sklonu na povrchu	[°]
Sq	Průměrná kvadratická odchylka povrchu	[μm]
St	Celková výška povrchu	[μm]
Sz	Největší výška povrchu	[μm]
vc	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
Z(x)	Výška posuzovaného prvku v bodě x	[μm]
Z(x,y)	Výška v posuzovaném bodě	[μm]
σR	Odchylka vzdálenosti	[mm]

Zkratky

Označení	Legenda
-	Materiál frézovaný bez chladicí emulze
+	Materiál frézovaný s chladicí emulzí
2D	Dvourozměrný
3D tisk	Materiál vyrobený 3D tiskem
3D	Trojrozměrný
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
CNC	Computer Numeric Control (Číslicové řízení počítačem)
CO2	Oxid uhličitý
EP	Epoxidová pryskyřice
FFF	Fused Filament Fabrication
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
IT	Toleranční stupeň
LOM	Laminated Object Manufacturing
MF	Melamin-formaldehydová pryskyřice
MJF	Multi Jet Fusion
NC	Numeric Control (Číslicové řízení)
PA	Polyamid

PBI	Polybenzimidazol
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PETG	Polyethylentereftalát glykol
PE-UHMW	Polyethylen Ultra-High-Molecular-Weight
PF	Fenol-formaldehydová pryskyřice
PLA	Kyselina polymléčná
POM	Polyoxymethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
RP	Rapid Prototyping
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
UV	Ultraviolet (ultrafialové)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	1_PP_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 2	1_PP_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 3	2_PA_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 4	2_PA_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 5	3_PET_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 6	3_PET_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 7	4_POM_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 8	4_POM_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 9	5_PE-UHMW_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 10	5_PE-UHMW_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 11	6_PP_3D_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 12	6_PP_3D_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 13	7_PA_3D_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 14	7_PA_3D_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 15	8_PETG_3D_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 16	8_PETG_3D_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 17	9_PLA_3D_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 18	9_PLA_3D_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 19	10_ABS_3D_-(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 20	10_ABS_3D_+(Hodnocení tvarové přesnosti)
Příloha 21	Vyhodnocené 2D parametry