



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**ANALÝZA ROZMĚROVÉ PŘESNOSTI A MECHANICKÝCH
VLASTNOSTÍ PLASTOVÝCH KOMPONENTŮ
ZHOTOVENÝCH 3D TISKEM**

ANALYSIS OF DIMENSIONAL ACCURACY AND MECHANICAL PROPERTIES OF PLASTIC COMPONENTS
MADE BY 3D PRINTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Horák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Horák**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

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:

Analýza rozměrové přesnosti a mechanických vlastností plastových komponentů zhotovených 3D tiskem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat analýzou rozměrové přesnosti a mechanických vlastností vybraných plastových komponentů vyrobených aditivní metodou FDM s využitím dostupných 3D tiskáren. Testované vzorky budou vytisknuty z různých druhů aditivního materiálu od jednotlivých dodavatelů. Vytisknuté normalizované vzorky budou analyzovány s využitím výpočetní techniky a dostupných testovacích zařízení. Práce bude ukončena technicko–ekonomickým zhodnocením dosažených výsledků a celkovým doporučením pro uživatele.

Cíle diplomové práce:

- Teoretická část – rozbor aditivních technologií, aplikovaného aditivního materiálu, rozměrové přesnosti a mechanických zkoušek.
- Experimentální část – zhotovení vzorků, analýza rozměrové přesnosti a mechanických vlastností.
- Technicko–ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. CERM, 1. vyd. 246 s. 2009. ISBN 978-80--4-4025-8.

CHUA, C. K., LEONG, K. F., LIM, C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, c2010. 512 pp. ISBN 978-981-277-897-0.

JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. Professional Engineering Publishing, 2004. pp. 112. ISBN 186-058-465-9.

PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH 2004. Bratislava: STU, 2004. s. 160. ISBN 80-227-2121-2.

GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing. New York: Springer, 2010. ISBN 14-419-1120-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývala stanovením mechanických vlastností materiálů používaných pro 3D tisk společností ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. (PETG, PLA, ABS, PLA ESD), doplněné o nové materiály (ASA, PC/ABS). Zhotovené zkušební vzorky, vyrobené pomocí 3D tiskové technologie Fused Deposition Modeling byly analyzovány pomocí mechanických zkoušek (zkouška tahem a dvou zkoušek tvrdosti), drsnosti povrchu a rozměrové přesnosti. U jednotlivých materiálů bylo provedeno statistické zhodnocení vybraných parametrů (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost, tvrdost Shore, tvrdost vtlačování kuličkou). V závěru práce byly aditivní materiály mezi sebou porovnány vybranými parametry a výrobními náklady. Nejlépe se se svými vlastnostmi a druhou nejnižší cenou osvědčil aditivní materiál PLA Filament Plasty Mladeč.

Klíčová slova

Aditivní technologie, mechanické vlastnosti, rozměrová přesnost, Fused Deposition Modeling, polymerní materiál.

ABSTRACT

The Master's thesis deals with the determination of mechanical properties of materials used for 3D printing by ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. (PETG, PLA, ABS, PLA ESD), extended of new materials (ASA, PC / ABS). The prepared test samples, produced by 3D printing technology Fused Deposition Modeling, were analyzed using mechanical tests (tensile test and two hardness tests), surface roughness and dimensional accuracy. Statistical evaluation was performed for individual materials of selected parameters (tensile strength, modulus of elasticity in tension, elongation, Shore hardness, hardness of ball indentation). The conclusion of the thesis is devoted to the comparison of materials by selected parameters and production costs. The additive material PLA Filament Plasty Mladeč proved to be the best with its properties and the second lowest price.

Key words

Additive technology, mechanical properties, dimensional accuracy, Fused Deposition Modeling, polymeric material.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HORÁK, Ondřej. *Analýza rozměrové přesnosti a mechanických vlastností plastových komponentů zhotovených 3D tiskem*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124927>. 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 **Analýza rozměrové přesnosti a mechanických vlastností plastových komponent zhotovených 3D tiskem** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19. 6. 2020

Datum

Bc. Ondřej Horák

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále děkuji společnosti ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. za poskytnutí zázemí, materiálů a tiskárny.

Mé poděkování patří také Univerzitě obrany v Brně za provedení mechanických zkoušek a vyhodnocení textury povrchu.

Děkuji panu Ing. Josefu Bednářovi, Ph.D. za cenné rady v oblasti statistického vyhodnocení naměřených dat.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za jejich podporu během mého studia.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 TEORETICKÁ ČÁST	9
1.1 Charakteristika aditivní technologie Rapid Prototyping	9
1.1.1 Konvenční technologie	9
1.1.2 Technologie Rapid Prototyping	9
1.1.3 Porovnání tradiční výrobní metody a technologie Rapid Prototyping	10
1.1.4 Rozdělení metod Rapid Prototyping	10
1.2 Charakteristika polymerní látky	14
1.2.1 Struktura polymerních materiálů	14
1.2.2 Plastové materiály	15
1.2.3 Termoplast a reaktoplast	15
1.2.4 Aplikovaný aditivní materiál	16
1.3 Rozbor rozměrové přesnosti	17
1.4 Rozbor mechanických zkoušek.....	18
1.4.1 Tahová zkouška	19
1.4.2 Zkouška tvrdosti	26
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH ZKOUŠKY	30
2.1 Použitá 3D tiskárna	30
2.1.1 Tiskové parametry	30
2.2 Použité materiály.....	30
2.3 Zkouška tahem	31
2.3.1 Výběr zkušební vzorku pro tahovou zkoušku.....	31
2.3.2 Vyhotovení modelu zkušební vzorku	32
2.3.3 Zhotovení zkušebních vzorků	33
2.3.4 Provedení tahové zkoušky	35
2.4 Stanovení textury povrchu	38
2.4.1 Výběr zkušební vzorku pro měření textury povrchu	38
2.4.2 Vyhotovení modelu zkušební vzorku	38
2.4.3 Zhotovení zkušebních vzorků.....	38

2.4.4	Provedení měření drsnosti povrchu	38
2.5	Zkouška tvrdosti.....	40
2.5.1	Výběr zkušebního vzorku pro zkoušky tvrdosti	40
2.5.2	Vyhotovení modelu zkušebního vzorku	40
2.5.3	Zhotovení zkušebních vzorků	40
2.5.4	Provedení zkoušek tvrdosti metodou Shore D.....	40
2.6	Stanovení rozměrové přesnosti	41
2.6.1	Výběr zkušebního vzorku pro určení rozměrové přesnosti	41
2.6.2	Vyhotovení modelu zkušebního vzorku	42
2.6.3	Zhotovení zkušebních vzorků	42
2.6.4	Měření vzorků.....	42
3	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	45
3.1	Vyhodnocení výsledků materiálu ABS	45
4	TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	54
	ZÁVĚR	59
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	64
	SEZNAM PŘÍLOH.....	68

ÚVOD

Složitá geometrie výsledného produktu byla vždy největším problémem designérů, až do chvíle příchodu aditivní technologie *Rapid Prototyping*. Technologie *Rapid Prototyping* též označovaná jako 3D tisk se skládá z několika metod vyvinutých koncem 80. let minulého století. Tato technologie se dlouhou dobu používala pouze v konstrukci a v profesionálním průmyslovém prostředí k vytváření prototypů nebo i hotových součástek. 3D tisk je velmi široký pojem, který zahrnuje mnoho výrobních metod. Jednou z nich je aditivní metoda Fused Deposition Modeling (FDM).

V poslední letech se situace prudce změnila a 3D tisk byl díky snížení pořizovacích nákladů postupně zpřístupněn pro běžné spotřebitele. Díky tomu došlo k rychlému vývoji nových tiskových metod. Velkým vývojem prochází i aditivní materiály používané při 3D tisku. Z toho důvodu vznikl záměr sepsání této diplomové práce.

Jedná se o ověření vlastností běžně používaných materiálů na oddělení *Manufacturing Engineeringu* společnosti ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o., rozšířených o nově používané materiály.

Společnost využívá 3D tiskárny ke snížení časové a finanční náročnosti náhradních součástí potřebných k výrobě koncového produktu. Mechanické vlastnosti, drsnost povrchu a rozměrová přesnost hrají významnou roli v jejich použití a životnosti.

1 TEORETICKÁ ČÁST

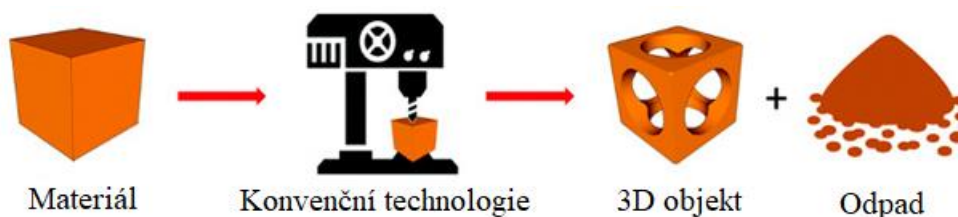
V první kapitole bude popsáno, co je to aditivní technologie, jakým způsobem jsou rozděleny jednotlivé výrobní metody a rozdělení polymerů obecně s následným podrobnějším rozбором materiálů použitých v experimentální části. Rozměrová přesnost tisknutých dílů a na závěr rozbor mechanických zkoušek.

1.1 Charakteristika aditivní technologie Rapid Prototyping

Aditivní technologie Rapid Prototyping (RP), též známá jako 3D tisk, je technologický pokrok, který byl umožněn díky přechodu z analogových procesů na digitální. Aditivní technologie využívá digitální data získána z CAD softwarů nebo skenerů. Datový soubor je následně pomocí příslušného zařízení přeměněn na výsledný objekt [1], [2], [3].

1.1.1 Konvenční technologie

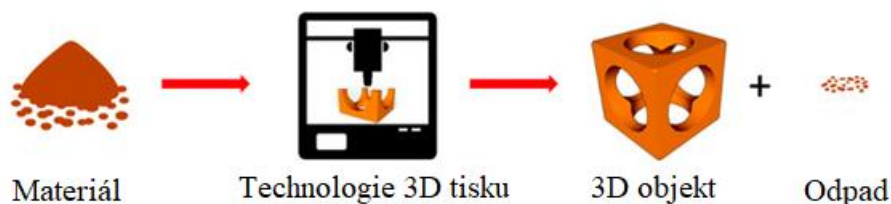
Prototypy se v dnešní době vyrábějí tradičními výrobními metodami, mezi které se řadí vstřikování, obrábění, tváření a svařování. Všechny tyto technologie jsou velmi časově náročné a vyžadují odebírání z většího bloku materiálu, viz obr. 1, ať už je to k dosažení výsledného produktu, k výrobě nástroje pro odlévání nebo formování, což je v rámci výrobního procesu omezující. Tradiční výrobní procesy dále představují řadu nežádoucích omezení, jako jsou drahé nástroje, přípravky nebo montáže složitých dílů. Kromě toho mohou vést tradiční výrobní procesy ke ztrátě až 90 % základního materiálu [4], [5], [6].



Obr. 1 Postup výroby prototypu konvenční technologií [6].

1.1.2 Technologie Rapid Prototyping

Oproti tradičním výrobním metodám se u technologie RP materiál neodebírá, nýbrž dochází k přímému vytváření objektu postupným nanášením aditivního materiálu po jednotlivých vrstvách konstantní výšky do chvíle, kdy je zhotoven výsledný 3D objekt, viz obr. 2. V závislosti na tvaru a velikosti se snižuje časová náročnost výroby do řádů hodin. Vzniklá komponenta může být zhotovena z různého druhu materiálu (kov, plast, fotopolymer, bio materiál) [1], [4], [5], [6], [7].



Obr. 2 Postup výroby technologií 3D tisku [6].

1.1.3 Porovnání tradiční výrobní metody a technologie Rapid Prototyping

Z tradičních výrobních metod, které byly zmíněny v kap. 1.1.1, se častěji přechází na technologii RP. Stejně jako tradiční technologie má i RP své výhody a nevýhody. Až z nároků, které jsou na výrobek kladeny, lze teprve říci, zda je technologie vyhovující [1], [6], [8].

Výhody tradičních výrobních technologií:

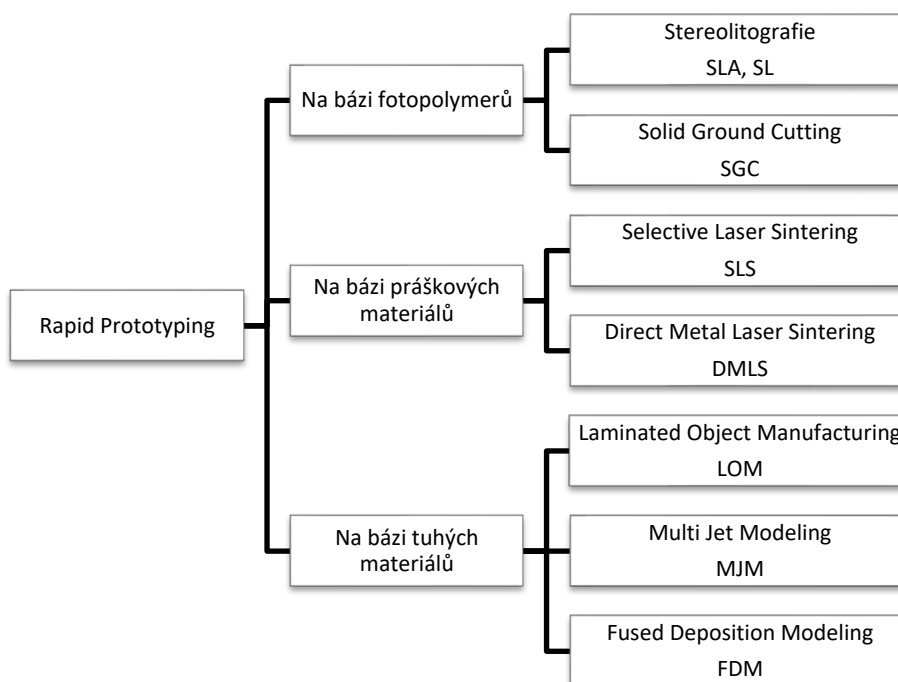
- Rozmanitost použitelného materiálu,
- využití sériové výroby,
- vysoká kvalita opracovaného povrchu,
- velikost vyráběného dílce není tolik limitována.

Výhody technologie RP:

- Levná a rychlá výroba,
- minimum odpadového materiálu,
- neomezené tvarové možnosti.

1.1.4 Rozdělení metod Rapid Prototyping

Všechny metody RP pracují na společném principu, postupném nanášení aditivního materiálu. Až následně podle druhu použitého aditivního materiálu se rozlišuje metoda 3D tisku, viz obr. 3 [1], [4], [5], [7].



Obr. 3 Rozdělení metod Rapid Prototyping [1].

- **Technologie 3D tisku na bázi fotopolymery**

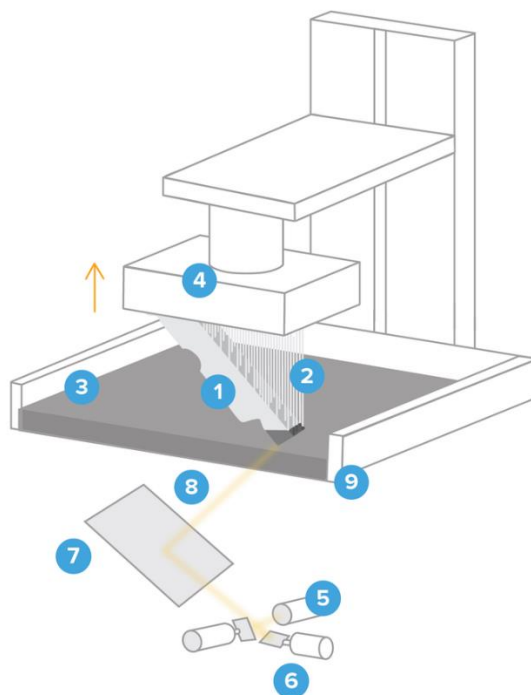
Hlavním znakem prototypu vytvářeného na bázi fotopolymery je nádoba s kapalnou pryskyřicí. Pryskyřice slouží jako aditivní materiál a pod její hladinou dochází k vytvrzování jedné vrstvy. Jakmile je vrstva vytvrzena, dochází k posuvu tiskové plochy o výšku vrstvy. Celý výrobní proces je opakován do chvíle, kdy je prototyp zcela hotov. Na konci procesu je přebytečná pryskyřice odvedena [1], [9], [10].

Stereolitografie (SLA) je první a zároveň nejstarší metodou 3D tisku. Historie patentu metody SLA sahá až do roku 1986 [1], [11].

Při vytváření objektu metodou SLA je polymerní pryskyřice vytvrzována pomocí ultrafialového (UV) laserového paprsku po jednotlivých vrstvách. Tloušťka jedné vrstvy je v rozmezí 0,05 mm až 0,15 mm. Po vytvrzení jedné vrstvy dochází pomocí stírací lišty k zarovnání pryskyřice na požadovanou tloušťku. Následně se nosná deska sníží nebo zvýší o požadovanou vrstvu. Výrobní proces, zobrazený na obr. 4, se opakuje do doby, než je výsledný objekt zcela hotov. Po dokončení tisku dochází k vyjmutí objektu z tiskárny a následnému odstranění přebytečné pryskyřice (tiskové podpory). Dále musí být objekt vystaven UV záření v oddělené komoře, aby bylo docíleno barvy a tvrdosti dle požadovaných parametrů [1], [11], [12], [13].

Hlavními výhodami technologie SLA je možnost výroby objemných objektů, dosažení velké přesnosti a kvality povrchu, velká různorodost materiálů [1], [12].

Mezi nevýhody se řadí nutná úprava povrchu po vytisknutí a velké množství materiálů na tvorbu podpor [1], [12].



Obr. 4 Princip metody SLA [13]: 1) Tisknutý objekt, 2) Tiskové podpory, 3) Tekutá pryskyřice, 4) Nosná deska, 5) UV Laser, 6) Galvanometr, 7) X-Y zrcadlo, 8) Laserový paprsek, 9) Nádoba pryskyřice.

- **Technologie 3D tisku na bázi práškových materiálů**

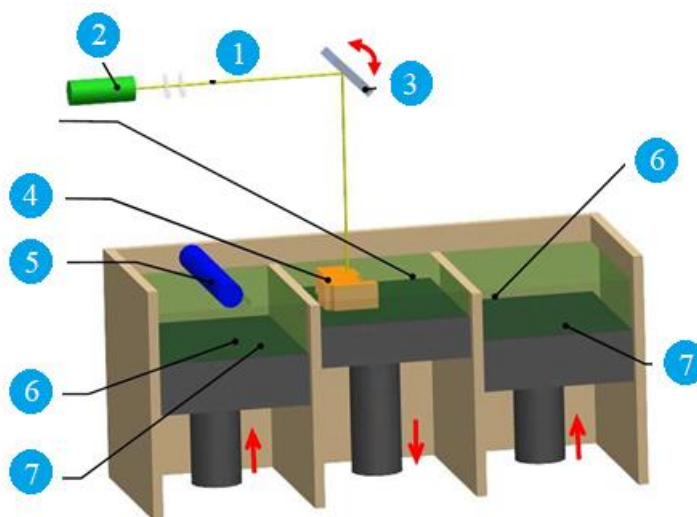
Do této výrobní technologie vstupuje výrobní materiál ve formě prášku. Ten je následně natavován a spékán (sintrován) [1], [12].

Selective Laser Sintering (SLS) je 3D tisková metoda využívající k procesu sintrování CO₂ laser. Vstupní práškový materiál je předehřát na teplotu blízkou bodu tavení. Následně laser osvítl požadovaná místa, tím dochází k sintrování a vzniku výsledného objektu. Materiál nevystavený laserovému paprsku se využívá jako nutná podpora vytvářeného objektu. Po sintrování jedné vrstvy se nosná deska posune o výšku vrstvy směrem dolů. Následně je pomocí válečkovacího mechanismu nanесena nová vrstva prášku. Tento pracovní postup, znázorněný na obr. 5, se opakuje do chvíle, než je objekt zcela hotov. Na konci procesu je následně nanесena několikacentimetrová vrstva prášku, která docílí rovnoměrného ochlazování. Aby bylo zamezeno oxidaci, probíhá celý výrobní proces v komoře vyplněné inertním plynem (zpravidla dusíkem). Metodou SLS lze vytvořit objekt z plastu, kovu, keramiky i pryže. Metoda SLS dokáže poskytnout výrobky srovnatelné kvality, jako při konvenčním obrábění [1], [12], [14], [15].

Na konci výrobního procesu je nutné provést dokončovací operace. Nejprve odstranit podpory objektu vzniklé při tisku. Poté je povrch objektu tryskán, broušen nebo leštěn stejnými způsoby jako běžný kovový materiál [1], [12], [14], [15].

Mezi hlavní výhody technologie SLS se řadí vysoká pevnost (možnost vytvářet funkční prototypy), při tisku nejsou nutné podpory (klesá *post-processing*), možnost měnit tiskové parametry i během tisku [1], [12].

Nevýhodami jsou velikost a energetická náročnost zařízení, nízká kvalita povrchu (je nutné použít dokončovací operace) [1], [12].



Obr. 5 Princip metody SLS [15]: 1) Laserový paprsek, 2) CO₂ Laser, 3) Zrcátko, 4) Tisknutý objekt, 5) Válečkovací mechanismus, 6) Komora dávkovaného prášku, 7) Práškový materiál.

- **Technologie 3D tisku na bázi tuhých materiálů**

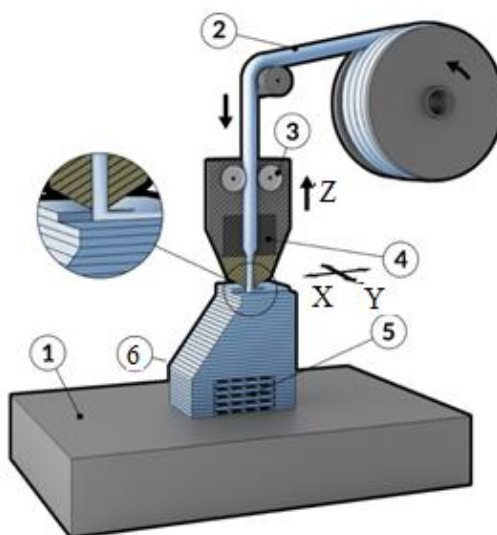
Tato technologie se od předešlých odlišuje svým vstupním materiálem. V tomto případě vstupuje materiál ve formě tuhé fáze. Mohou to být fólie nebo drát navinutý na cívce, též označovaný jako filament [1], [12].

Fused Deposition Modeling (FDM) je tisková metoda, jejíž výrobní proces spočívá v natavování vstupního materiálu. Filament navinutý na cívce je pomocí vtačovacího mechanismu (dvě ozubená kola spojená k motoru) vtačován do vyhřívané trysky (hotend), ve které je filament ohřát do polotekutého stavu. Natavený materiál je následně po jednotlivých vrstvách nanášen na vyhřívanou podložku, kde je okolním vzduchem ochlazován až do chvíle ztuhnutí. Tisk jedné vrstvy probíhá v souřadnicích X a Y. Po této vrstvě se tryska posune na ose Z o tloušťku vrstvy směrem vzhůru a dochází k tisku nové vrstvy. Tímto způsobem je celý proces opakován, než dojde k vytvoření výsledného objektu. Na konci výrobního procesu je nutné odstranit tiskové podpory. Výrobní proces lze vidět na obr. 6 [1], [12], [14].

Filament jakožto vstupní materiál se vyrábí z mnoha druhů materiálu. FDM metoda vyžaduje u složitých tvarů tiskové podpory. Ty jsou vytvářeny stejným způsobem jako objekt, pouze s nižší hustotou výplně a menším počtem okrajových smyček (perimetr). Tiskové podpory lze tisknout ze stejného materiálu jako výsledný objekt, nebo speciálního stavebního materiálu rozpustného ve vodě. Prototypy vyrobené touto metodou jsou používány při testování designu nebo v inovacích výrobku. Lze je také vystavit mechanickým a povětrnostním podmínkám odpovídajícím realitě [1], [12], [14].

Hlavními výhodami technologie FDM jsou minimální odpad (podpory), vysoká rychlost tisku, dobré mechanické vlastnosti [1], [12].

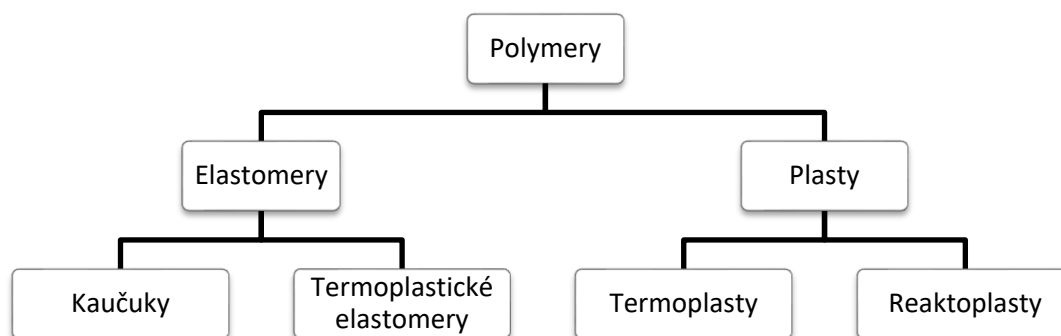
Mezi nevýhody se řadí omezená rozměrová přesnost v závislosti na materiálu a průměru tiskové trysky a náchylnost na smrštění během chladnutí [1], [12], [16].



Obr. 6 Princip metody FDM [17]: 1) Vyhřívaná podložka, 2) Filament, 3) Vtačovací mechanismus, 4) Vyhřívaná tryska, 5) Podpory, 6) Tisknutý objekt.

1.2 Charakteristika polymerní látky

Materiál, který obsahuje mnoho chemicky spojených látek (makromolekul) tvořící pevný materiál, je označován jako polymerní látka. Podle původu jsou polymery rozdělovány na dva druhy, a to polymery syntetické (silikon, plasty) a polymery přírodní (kaučuk, bílkoviny, škrob). Nejdůležitějšími průmyslovými polymerními materiály jsou elastomery a plasty. Jejich další rozdělení je zobrazeno na obr. 7 [18], [19].

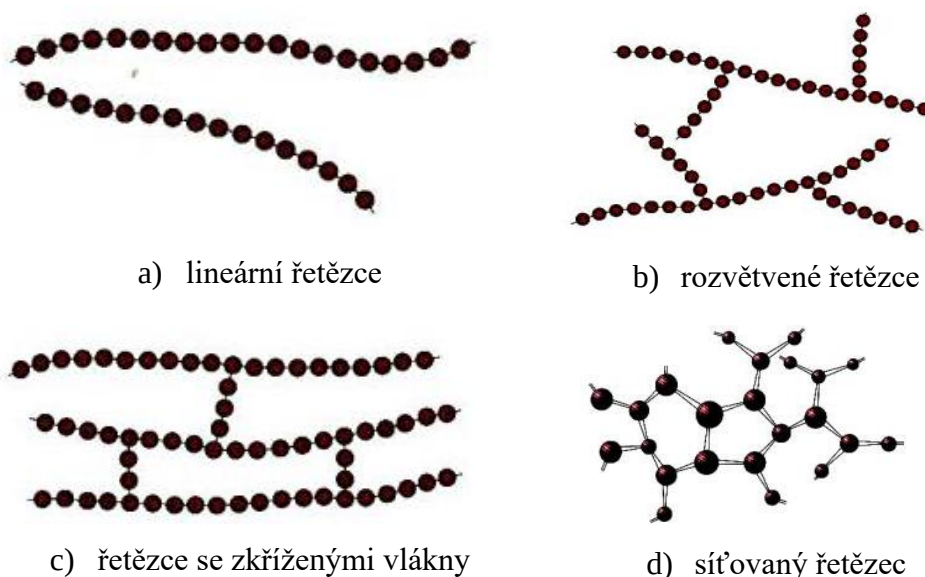


Obr. 7 Základní rozdělení polymerů [18].

Polymerní materiál má mnoho vlastností, díky kterým je velmi používán a částečně nahrazuje i kovové materiály. Jeho hustota je mnohem menší než u kovů nebo keramiky, díky tomu je komponenta lehčí, dokáže odolávat atmosférickým a dalším druhům koroze, nabízí dobrou kompatibilitu s lidskou tkání a vyznačuje se vynikajícím odporem vůči elektrickému proudu [19].

1.2.1 Struktura polymerních materiálů

Základní stavební jednotka polymerního materiálu je makromolekula, skládající se z jednotlivě opakujících monomerních jednotek (atomů uhlíku). Díky schopnosti uhlíku vázat na sebe další atomy vznikají dlouhé řetězce. Polymerní materiály se dle seřazení monomerů rozdělují dle obr. 8 [20].



Obr. 8 Druhy řetězců polymerního materiálu [21]: a) lineární řetězce, b) rozvětvené řetězce, c) řetězce se zkříženými vlákny, d) síťovaný řetězec.

1.2.2 Plastové materiály

Plasty jsou složeny z látek polymerní povahy a aditiv, která slouží ke specifické úpravě vlastností materiálu. Vnější namáhání nejčastěji způsobuje nevratné deformace. Plastové materiály se rozlišují dle několika hledisek [18]:

a) Podle teplotního chování:

- termoplasty,
- reaktoplasty.

b) Podle složení:

- plněné,
- neplněné.

c) Podle uspořádání molekul:

- amorfni (náhodné uspořádání makromolekul),
- semikrystalické (pravidelné uspořádání makromolekul).

1.2.3 Termoplast a reaktoplast

Hlavní rozdíl mezi termoplasty a reaktoplasty spočívá v reakci na teplotu. Zatímco termoplasty lze přetavit zpět do tekuté podoby, reaktoplasty zůstávají v pevném stavu. Termoplasty se obvykle přirovnávají k máslu. Máslo může být několikrát roztaveno a znovu zpět ochlazen za vzniku nových tvarů. Zatímco reaktoplasty, označované jako chléb, nelze po dosažení konečného stavu nijak upravovat. Jakákoliv snaha o další zahřátí by vedla k degradaci a zuhelnatění [22], [23].

Termoplast je polymerní materiál, který při zahřívání měkne a přechází do tekutého stavu (plastický stav) a lze znovu tvářet. Při ohřevu zároveň nedochází k žádné chemické reakci a struktura termoplastu zůstává zachována. Tato vlastnost dovoluje termoplastickému materiálu být znovu rozpuštěn a recyklován, aniž by se změnila fyzikální vlastnosti. Termoplastické materiály se vyznačují vysokou pevností, odolností proti smršťení a dobrou ohebností. Ve většině případů slouží v místech s vysokým namáháním. Hlavními výhodami termoplastů jsou recyklovatelnost, estetičnost, nárazová odolnost, možnost přetváření, chemická odolnost a ekologičnost. Nevýhodou termoplastu je vyšší cena oproti reaktoplastu a nižší bod tání [22], [23].

Reaktoplast je polymerní materiál, u kterého dochází při ohřevu k chemické reakci a původní molekuly se spojují, tím dochází k procesu vytvrzování. Reaktoplasty mají výrazně lepší mechanické vlastnosti, chemickou odolnost a tepelnou odolnost. Komponenty z reaktoplastu se nejčastěji používají jako utěšňující prvky, elektronické komponenty v automobilovém průmyslu. Výhodou reaktoplastů je větší odolnost vůči teplu, chemická odolnost, dobré mechanické vlastnosti, malá smršťitelnost, nízká cena. Naopak hlavními nevýhodami jsou nerecyklovatelnost, složitá povrchová úprava a nemožnost opětovného tváření [23].

1.2.4 Aplikovaný aditivní materiál

Filament se rozumí materiál určený pro výrobu objektu tiskovou metodou FDM. V současnosti se filament nevyrábí jen z plastu, ale i z dalších druhů materiálu, jako jsou plast, dřevo nebo z příměsí kovů. Filament se nejčastěji vyrábí v tloušťce vlákna 1,75 mm a 2,85 mm [24].

Při výrobě prototypu i výsledné komponenty je důležitý výběr vhodného materiálu. Každý materiál nabízí odlišné vlastnosti a je tedy vhodný k jinému použití. Musí být brán ohled i na ovlivnění mechanických vlastností při procesu tisku [24], [25].

Akrylonitril-Butadien-Styren (ABS) je nejčastěji používaný materiál u FDM tiskové metody. Je poměrně jednoduše tisknutelný, vykazuje dobré mechanické vlastnosti, trvanlivost, jak ve vnitřních, tak i venkovních podmínkách, odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám, chemikáliím, odolnost proti nárazům a jiným mechanickým poškozením. Jelikož je ABS rozpustný v acetonu, lze jednotlivé tisknuté komponenty lehce slepovat dohromady. Povrch materiálu je pomocí acetonu možné i vyhlazovat, a vytvářet tím nižší drsnost povrchu. ABS je citlivější na UV záření, proto se nedoporučuje komponenty vystavovat přímému světlu. Není vhodný pro tisk rozměrných dílů. Jelikož je ABS vyrobeno z ropy, vzniká při tisku zápach a uvolňují se škodlivé látky, proto je zapotřebí dobré odvětrávání tiskového prostoru [24], [26].

Akrylonitril-Butadien-Styren+ (ABS+) je varianta ABS plastu. Mezi hlavní výhody ABS+ se řadí odolnost vůči mechanickému poškození, odolnost vůči UV záření, chemická odolnost a zdravotně nezávadný materiál. Oproti ABS má dvojnásobně větší pevnost, větší přesnost tisknutých částí, hladší povrch. Díky těmto výhodám jsou vyráběné komponenty z materiálu ABS+ využívány jako funkční části [27].

Polykarbonát/Akrylonitril-Butadien-Styren (PC/ABS) je materiál vyrobený ze směsi PC a ABS. Díky zastoupení dvojice materiálů získává od ABS dobré zpracovatelské vlastnosti a vynikající mechanické vlastnosti, rázovou odolnost a tepelnou odolnost díky PC. PC/ABS se využívá v místech s nízkou i vysokou teplotou při zachování své tuhosti a pevnosti [28].

Akrylonitril – Styren – Akryl (ASA) je termoplastický materiál, primárně určený k zastoupení ABS. Vyznačuje se snadnou zpracovatelností při tisku, výslednou kvalitou vytisknuté komponenty se složitými detaily, dobré mechanické vlastnosti, tepelná odolnost, rozměrová stabilita při chladnutí, chemická odolnost. Materiál je dále velmi odolný vůči povětrnostním podmínkám, vlhkostní nasákavosti i UV záření, což zároveň nezpůsobuje postupné žloutnutí materiálu, proto se používá v místech, kde je kladen důraz na vzhled povrchu. ASA je používána jak při výrobě prototypů, tak i hotového výrobku využívaného ve venkovním prostředí. Tuhost je zároveň vyšší než u ABS, proto se využívá pro náročné operace a umožňuje použít dokončovací operace po dokončení tisku. Při tisknutí je nutné zajistit dobré odvětrávání, jelikož je produkován silný zápach a škodlivé látky, nedoporučuje se používat pro medicínské aplikace [29].

Polyethylentereftalát – Glykol (PET-G) svým složením se podobá materiálu určenému k výrobě PET lahví a lze recyklovat. Jedná se o pružný materiál s dobrou tepelnou odolností, který je vhodný především pro tisk mechanických částí. Je odolný vůči kyselinám a rozpouštědlům. Díky svým vlastnostem je ideální pro tisk velkých objektů a je možné ho používat v interiéru i v exteriéru. Jedná se o netoxický zdravotně nezávadný materiál, o čemž svědčí např. i jeho použití v potravinářském průmyslu [24].

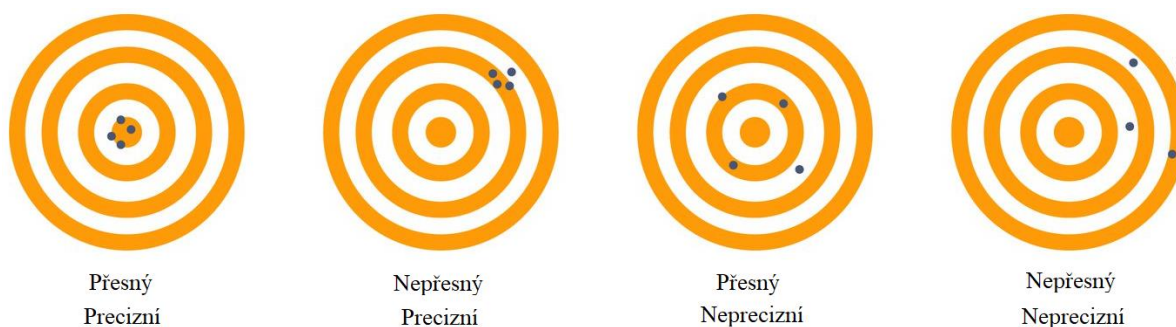
Polylactic Acid (PLA) je materiál vyráběný z kukuřičného nebo bramborového škrobu. Jelikož neobsahuje ropu je PLA zcela biologicky odbouratelné. Tyto předpoklady ovšem způsobují nízkou chemickou odolnost. Materiál se vyznačuje velkou tvrdostí, musí se ovšem počítat i s křehkostí. Pro svou tvrdost jsou u materiálu také velmi často používané technologie broušení, vrtání, lepení a frézování (s nutností chlazení). Jelikož má nižší teplotu tavení než všechny ostatní materiály, tisknuté komponenty se při ochlazování nijak nekrouží a smrštění při chladnutí je minimální, proto je vhodný jak pro tisk rozměrných objektů, tak i malých s velkými detaily. Materiál velmi pohlcuje vzdušnou vlhkost, a tím dochází k jeho degradaci (vytváření bublinek na povrchu komponenty), proto se musí materiál skladovat v suchém prostředí [24].

Polylactic Acid Electrostatic Discharge (PLA ESD) je materiálová směs založená na stejné bázi jako normální PLA s příměsí bezpečného ESD materiálu. Používá se na místech, která vyžadují ochranu proti elektrostatickému výboji a v čistém prostředí. Při tisku není vyžadována vyhřívaná tisková podložka. Vyznačuje se nízkou smrštitelností a snadným tiskem. Materiál PLA ESD lze nalézt u přípravku a komponent dostávajících se do styku s elektro součástkami [30].

1.3 Rozbor rozměrové přesnosti

Přesnost je definována, jako vzdálenost naměřené hodnoty vůči skutečné. V oblasti 3D tisku je skutečná hodnota rovna rozměrům na 3D modelu navrhnutého v modelovacím programu. Přesnost lze jednoduše popsat pomocí terče na obr. 9. Čím blíže je výstřel středu, tím přesnější byl. Přesnost je označována procentuálním rozdílem [31], [32].

Preciznost značí konzistentnost měření. Vysvětlení je provedeno pomocí terče, ve kterém by výstřely měly zasáhnout pokaždé blízké místo ve svém okolí. Místem zásahu nemusí být striktně střed. U 3D tisku se preciznost projevuje ve spolehlivosti tiskárny a definuje, zdali je možné splnit požadavky každým výtiskem [31].



Obr. 9 Rozdělení přesnosti a preciznosti [31].

I technologie 3D tisku je nedokonalý výrobní proces. U tiskové metody FDM jsou jednotlivé vrstvy chlazené různými rychlostmi v závislosti na jejich velikosti a struktuře. Jelikož jsou jednotlivé oblasti chlazené různými rychlostmi, vzniká v materiálu vnitřní napětí, které vede k deformaci nebo smrštění. Před samotným tiskem musí být stanovena rozhodnutí, která mají vliv na rozměrovou přesnost tisknuté komponenty [33], [34], [35]:

Přesnost stroje je pro každou tiskárnu individuální a hraje významnou roli v rozměrové přesnosti vytisknuté komponenty,

tiskové parametry se řadí mezi nejdůležitější rozhodnutí před tiskem samotným. Musí být zvoleny správné teploty jak podložky, tak i vyhřívané trysky, průměr trysky, výška vrstvy a procentuální zaplnění vnitřní výplně,

design tisknutého dílce do značné míry ovlivňuje přesnost výsledného dílce. Aby nedocházelo k vnitřnímu napětí jsou volena zaoblení v místě ostrých rohů a vyhřívané podložky zamezí rychlé ochlazování,

materiál stejně jako design úzce souvisí s přesností, jakou může být komponenta vytisknuta. Jednotlivé materiály jsou vůči deformacím náchylné individuálně. Je známo, že ABS je více náchylné na deformaci než PLA,

velikost objektu úzce souvisí s přesností komponenty. Přesnost se bude také snižovat s tím, jak se velikost dílů zvětšuje,

zkroucení a smrštění je následkem výrobního procesu 3D tisku důsledkem velkého odvodu teplot nebo tenkých stěn. Rozměrné objekty, rovné plochy se mohou deformovat a je třeba se jich vyvarovat. Změny v chlazení a vytvrzování mají za následek vnitřní napětí, které může vést k deformaci nebo smrštění,

podpory jsou nezbytnou součástí tisknutých dílů, aby bylo dosaženo vysoké úrovně přesnosti, jsou vyžadovány pro převisy větší než 45°. Odstranění těchto podpor ovšem značně ovlivňuje povrchovou úpravu výrobku.

1.4 Rozbor mechanických zkoušek

Je velmi obtížné klasifikovat plasty mezi konkrétní druh materiálu, jako je pevná látka nebo viskózní kapalina, jelikož jsou jejich mechanické vlastnosti velmi závislé na podmínkách zkoušek (např. rychlost zatěžování, teplota a velikost napětí). Plasty mohou vykazovat vlastnosti všech druhů materiálů, jako jsou sklovité látky, křehké látky, elastické gummy nebo viskózní kapalina [36], [37].

Mechanické vlastnosti obecně hodnotí chování materiálu při působení vnějších mechanických deformací. Základní mechanické vlastnosti jsou pevnost, pružnost, plasticita a houževnatost [36], [37].

Je několik způsobů, jak měřit mechanické vlastnosti materiálu. Metoda měření se odvíjí od tvaru zkušebního tělesa, podmínek zkoušky a doby měření. Velké množství mechanických zkoušek je normalizovaných a lze je rozdělit dle obr. 10 [36], [20], [38].

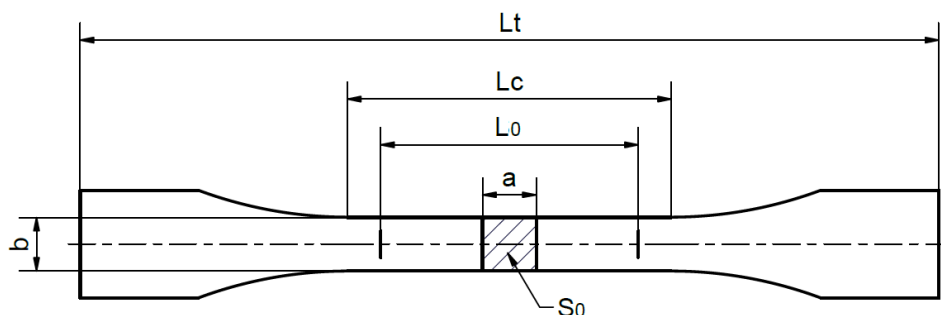


Obr. 10 Rozdělení mechanických zkoušek [20].

1.4.1 Tahová zkouška

Statická tahová zkouška se řadí k nejzákladnější mechanické zkoušce. Princip tahové zkoušky je předepsán normou ČSN EN ISO 6892-1, spočívá v zatěžování zkušební vzorku konstantní rychlostí a postupně se zvyšující zátěžnou silou až do chvíle lomu materiálu, nebo dosažení předem definované hodnoty. Obvykle je zkouška prováděna za pokojové teploty (23 °C). Tahová zkouška se používá pro stanovení pevnosti v tahu, meze kluzu, smluvní meze pružnosti, modulu pružnosti v tahu a dalších charakteristik závislých na tahovém napětí [39], [40].

Zkušební vzorky, častěji nazývané zkušební tyče, jsou definovány pro každý materiál zvlášť. U plastů jsou používány zkušební tyče obdélníkového průřezu, viz obr. 11 [41].



Obr. 11 Zkušební tyč pro tahovou zkoušku plastů [42]: S_0 – průřez zkušební tyče, L_c – zkušební délka tyče, L_t – celková délka tyče, L_0 – výchozí délka, a – tloušťka tyče, b – šířka tyče.

Zkušební tyče jsou děleny na krátké a dlouhé. Výchozí délka zkušební tyče je stanovena ze vztahu 1 [41]:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Délka dlouhé obdélníkové zkušební tyče je stanovena dle vztahu 2 [41]:

$$L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0} \text{ [mm]} \quad (2)$$

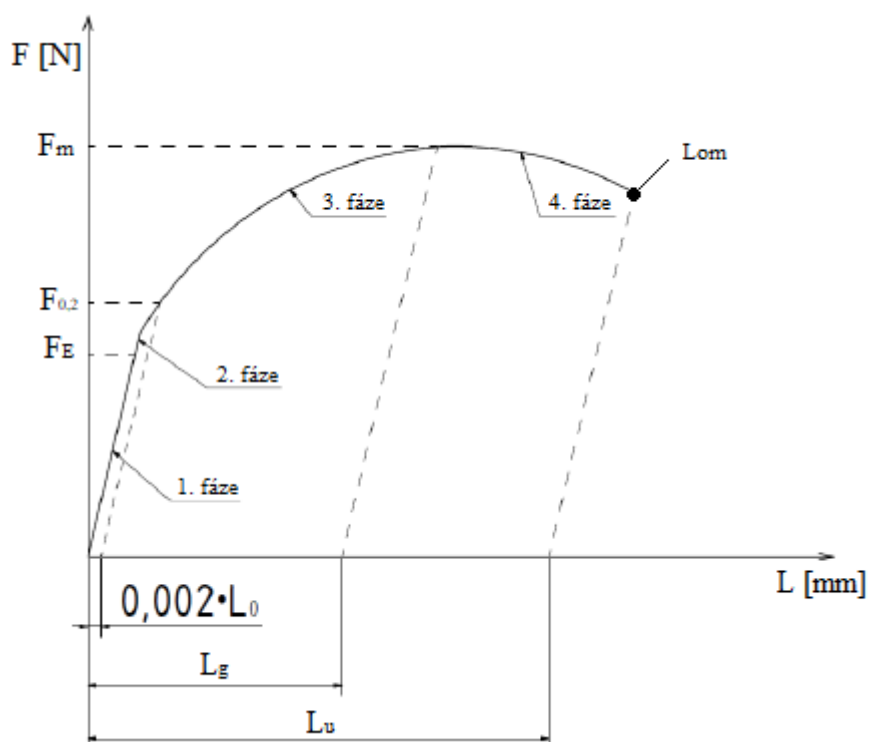
Vzorek je nejprve upnut do čelistového mechanismu zkušebního zařízení a namáhán jednoosým tahovým zatížením. Během měření je zaznamenáván pracovní tahový diagram závislosti zátěžné síly (F) na délce (L). Zkušební materiál prochází během tahové zkoušky čtyřmi fázemi a je zobrazen na obr. 12 [37], [42]:

1. fáze (oblast elastické deformace): v první fázi zatěžování dochází k deformaci vratné (elastické). Zkušební tyč je prodlužována přímo úměrně vůči zátěžné síle (přímka). Po odlehčení se zkušební tyč vrací do původního stavu. Konec první fáze je určen silou na mezi úměrnosti (F_E). Tato síla není běžně určována [41], [42], [43].

2. fáze (oblast meze úměrnosti až meze kluzu): síla na mezi kluzu ($F_{0,2}$) ukončuje druhou fázi. Po překročení $F_{0,2}$ dochází k trvalé (plastické) deformaci [41], [42], [43].

3. fáze (oblast rovnoměrně trvalých deformací): ve třetí fázi je zkušební tyč rovnoměrně deformována a dochází k trvalé změně jejího tvaru. Při poklesu zátěžné síly dochází zároveň ke tvorbě krčku. Během třetí fáze je získána největší síla celé tahové zkoušky, síla na mezi pevnosti (F_m) [41], [42], [43].

4. fáze (oblast nerovnoměrných trvalých deformací): čtvrtá oblast je vyznačována poklesem zátěžné síly a vznikem krčku. Deformace vzniká pouze na krčku a zkušební tyč není dále nikterak deformována. I přes to, že je velikost zátěžné síly zmenšována, dochází k postupnému prodlužování zkušební tyče v oblasti krčku. Je to způsobeno zmenšováním průřezové plochy v krčkové oblasti. Čtvrtá fáze je ukončena přetržením (lomem) zkušební tyče [41], [42], [43].



Obr. 12 Pracovní diagram tahové zkoušky [44], [45].

Smluvní tahový diagram je v praxi používán, jelikož pracovní tahový diagram neumožňuje srovnávat mechanické vlastnosti jednotlivých materiálů mezi sebou. Z toho důvodu je přepočítáváno napětí (σ) a relativní prodloužení (ϵ) [44], [45].

Vlivem zatěžování dochází u zkušební tyče ke vzniku tahového napětí (skutečné tahové napětí), viz vztah 3, a poměrného prodloužení, viz vztah 4 [42], [43]:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

σ – tahové napětí [MPa],

F – zátěžná síla [N],

S – aktuální průřez vzorku [mm²],

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} [-] \quad (4)$$

ϵ – poměrné prodloužení [-],

L – konečná délka vzorku [mm],

ΔL – změna délky zkušební tyče [mm],

L_0 – počáteční délka vzorku [mm] [42], [43].

Jelikož je zatěžovací síla vztahována k aktuálnímu průřezu zkušební tyče, je pro praxi vztah 3 nevyhovující. Důvodem je neustálá změna průřezu, který je obtížné během zkoušky měřit. Z tohoto důvodu bylo stanoveno smluvní tahové napětí (R), viz vztah 5 [41]:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

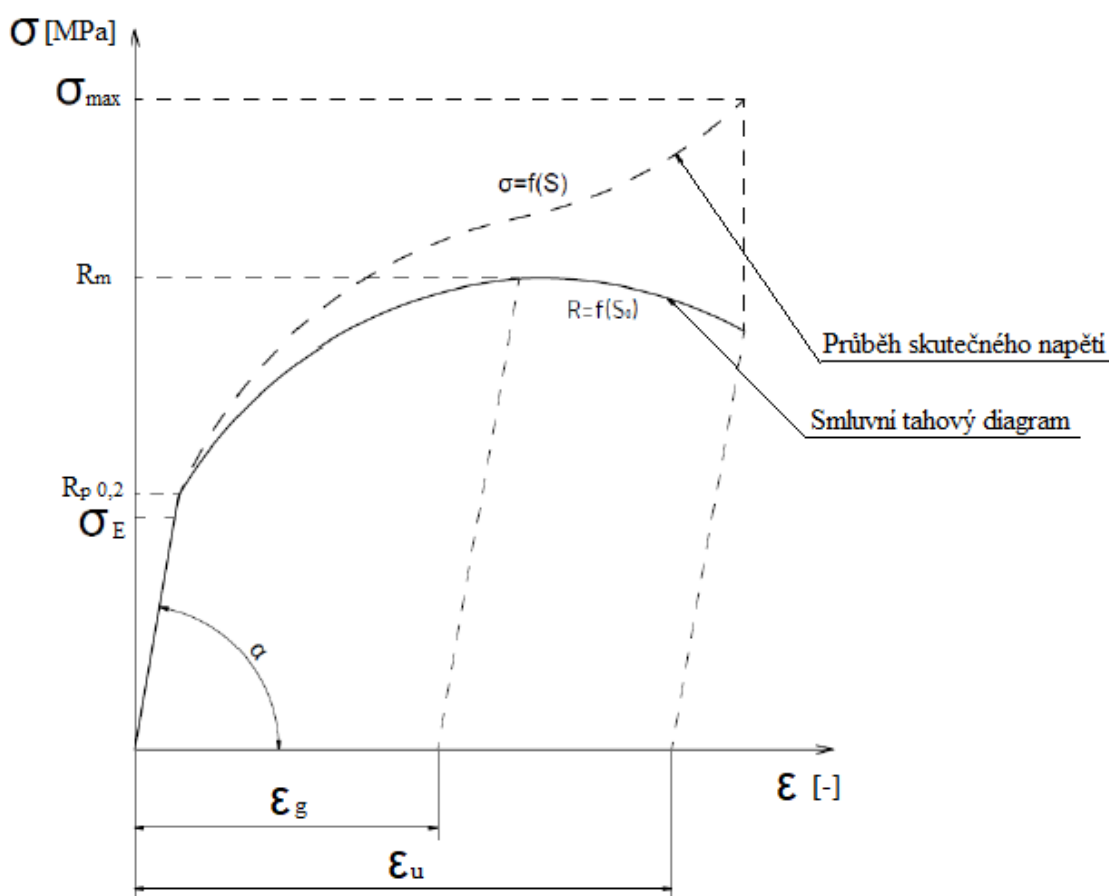
σ – smluvní tahové napětí [MPa],

F – zátěžná síla [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²] [43].

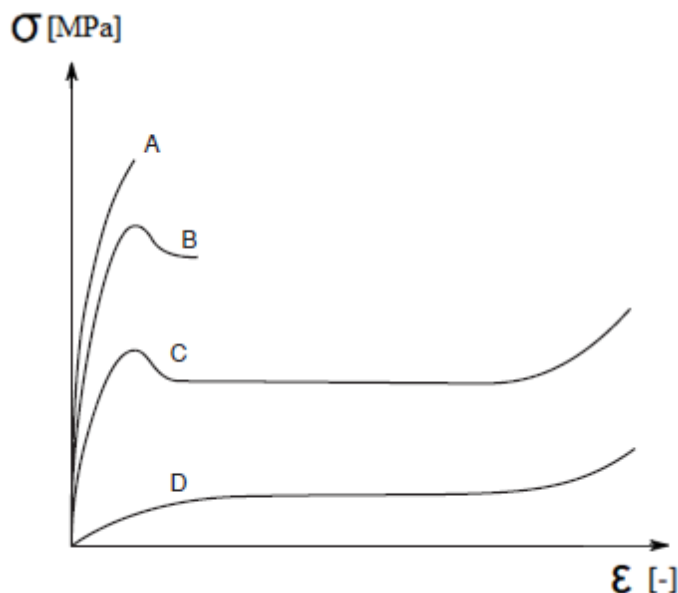
Smluvní tahový diagram, viz obr. 13, představuje závislost smluvního napětí, vycházejícího ze vztahu 5, na poměrném prodloužení, viz vztah 4. Z diagramu je patrné, že hodnota σ a R jsou do meze kluzu téměř totožné, materiál je deformován elasticky a platí zde lineární závislost napětí na poměrném prodloužení, která je popsána pomocí Hookova zákona [44], [45], [46].

K odchylce hodnot dochází po překročení meze pevnosti (R_m). U zkušební tyče začíná vznikat krček (změna průřezu tyče). Smluvní napětí poté klesá a skutečné napětí roste [44], [45], [46].



Obr. 13 Srovnání skutečného a smluvního tahového diagramu [44], [46].

Zatěžovací křivky plastů nabývají odlišného tvaru oproti kovovým materiálům. Jelikož dochází u plastů ve střední teplotní fázi ke skelnému přechodu, materiál mění své mechanické vlastnosti, a tím i tvar zatěžového diagramu, viz obr. 14 [37], [43].



Obr. 14 Zatěžové křivky plastu při různých teplotách [37], [43]: A) Křehký plast (4 °C), B) Houževnatý plast s mezí kluzu (20 °C), C) Houževnatý plast s mezí kluzu (50 °C), D) Houževnatý plast bez meze kluzu (60 °C).

Hookův zákon představuje vztah mezi napětím a relativním prodloužením, viz vztah 7. Ve smluvním tahovém diagramu je Hookův zákon vykreslen jako přímka. Směrnice přímky je dána pomocí modulu pružnosti v tahu (E) a lze vyjádřit pomocí vztahu 6 [44], [45], [46]:

$$E = \tan(\alpha) \quad (6)$$

E – modul pružnosti v tahu [MPa],

α – úhel přímky s vodorovnou osou [°],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²] [44], [45], [46].

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (7)$$

σ – tahové napětí [MPa],

F – zatěžující síla [N],

S – aktuální průřez vzorku [mm²],

E – modul pružnosti v tahu [MPa],

ΔL – změna délky zkušební vzorku [mm],

L_0 – počáteční délka vzorku [mm],

ϵ – poměrné prodloužení [-] [44], [45], [46].

Mez kluzu (R_e), je hodnota napětí, do kterého platí Hookův zákon o elastické deformaci. Po překročení meze kluzu dochází k plastické (nevratné) deformaci zkušební tyče. Jedná se o velmi důležitou hodnotu tahového diagramu. Z meze kluzu se vychází při výpočtu dovoleného namáhání, jelikož je pro konstrukci nebo stroj nežádoucí vznik plastické deformace. Výrazná mez kluzu lze určit z diagramu tahové zkoušky (obr. 15) nebo dle vztahu 8 [41], [43].

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} [MPa] \quad (8)$$

R_e – napětí na mezi kluzu [MPa],

F_e – zatěžující síla na mezi kluzu [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²] [41], [43].

Jestliže materiál neprojevuje výraznou mez R_e je určována smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$). Tahový diagram s nevýraznou mezí kluzu je zobrazen na obr. 16. Jedná se o napětí, velikosti 0,2 %, vyvolávající plastickou deformaci. Smluvní mez kluzu se stanoví dle vztahu 9 [41], [43]:

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} [MPa] \quad (9)$$

$R_{p0,2}$ – smluvní napětí na mezi kluzu [MPa],

$F_{p0,2}$ – zatěžující síla na smluvní mezi kluzu [N],

S_0 – počáteční průřez vzorku [mm²] [42].

Výjimečně je zaváděna dolní mez kluzu (viz vztah 10) a horní mez kluzu (viz vztah 11) [42]:

$$R_{eD} = \frac{F_{eD}}{S_0} [MPa] \quad (10)$$

$$R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} [MPa] \quad (11)$$

Tažnost (A_x) určuje měřítko tvářítečnosti materiálu. Hodnotu tažnosti lze po přetržení zkušební tyče stanovit z ε pomocí vztahu 13 [42], [43].

$$A_x = 100 \cdot \frac{L_u - L_0}{L_0} = 100 \cdot \frac{\Delta L_u}{L_0} [\%] \quad (13)$$

A_x – tažnost [%],

L_u – konečná délka [mm],

L_0 – počáteční délka [mm],

ΔL_u – absolutní přírůstek počáteční délky po přetržení [mm] [42].

Index (X) představuje druh zkušební tyče. U krátkých zkušebních tyčí se X neudává. U dlouhých zkušebních tyčí se tažnost označuje $A_{11,3}$. Tažnost materiálu měřená na nepoměrných zkušebních tyčích je označována oproti své počáteční délce ($L_0 = 50$ mm je označováno A_{50}). Čím je zkušební tyč kratší, tím je hodnota tažnosti vyšší [42], [43].

Lom zkušební tyče se musí nacházet v prostřední třetině měřené délky. Jestliže se nachází v jiné oblasti, může se naměřená hodnota A lišit od skutečné [42], [43].

Kontrakce (Z) je definována jako změna velikosti ploch v příčném průřezu zkušební tyče. Stejně jako A je měřená až po přetržení a stanoví se ze vztahu 14 [42], [43].

$$Z = 100 \cdot \frac{S_u - S_0}{S_0} = 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_0} [\%] \quad (14)$$

Z – kontrakce [%],

S_u – konečný průřez [mm²],

S_0 – počáteční průřez [mm²],

ΔS – rozdíl počátečního a konečného průřezu [mm²] [42], [43].

1.4.2 Zkouška tvrdosti

Tvrdost je nejčastěji používanou zkouškou definující mechanické vlastnosti polymerního materiálu. Provedení zkoušky je velmi snadné a rychle realizovatelné. Definuje odpor povrchu vůči vniknutí jiného tvrdšího materiálu a rozděluje je na materiály tuhé, tvrdé a houževnaté. Nejvyšší tvrdost mezi plasty dosahují reaktoplasty a nejnižší kaučuky [18], [47], [42], [48].

Měření lze zároveň provést na zkušebním vzorku či výchozí strojní komponentě. Při zkoušce dochází k minimálnímu porušení měřeného povrchu [42].

Používá se mnoho způsobů měření tvrdosti založených na různých principech. Nejčastěji používané zkoušky tvrdosti jsou [42]:

- a) Vrypové – zkouška využívající diamantový hrot, kterým se provádí zkušební vrypy do zkoumaného materiálu. Tvrdost je hodnocena pomocí šířky vrypu a zatěžující silou.
- b) Odrazové – metoda založena na hodnocení odrazové výšky zkoušeného dílce. Měření není ovšem tak přesné a je používáno ve speciálních případech.
- c) Vtiskovací (vnikací) – Nejvýznamnější zkouška tvrdosti spočívající na vtlačování vnikajícího tělesa. Hodnotu tvrdosti určuje velikost deformace na povrchu měřeného tělesa.

Měření tvrdosti vnikací metodou je principiálně vtlačení vnikajícího tělíska (indentoru) různého tvaru předem definovanou silou do povrchu zkoušeného materiálu. Podle tvaru indentoru (kulička, kužel) je rozdělena metoda měření. Po definovaném časovém intervalu je následně měřena hloubka vniknutí indentoru (zpravidla při zatížení). Jelikož nelze v materiálu po odlehčení měřit, dochází k elastickému zotavení. V tom spočívá největší rozdíl měření tvrdosti plastového a kovového materiálu. Míra elastické deformace je u kovového materiálu minimální a nehraje tak významnou roli. Oproti tomu je u plastového materiálu brána v potaz jak deformace plastická, tak i elastická [18].

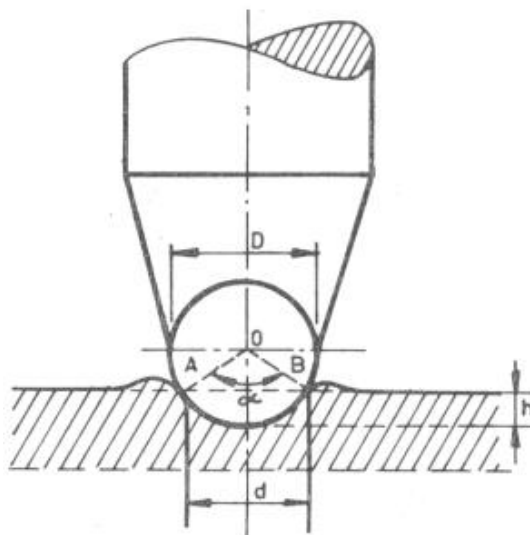
Pro správné výsledky zkoušky tvrdosti je nutné uvažovat o faktorech, které negativně ovlivňují výsledky měření. Především se jedná o přesnost měřicího zařízení, teplotu měřeného vzorku, dobu zatížení, povrch a tloušťku měřeného vzorku. Tvrdost materiálu bývá zpravidla u okraje menší a se snižující se tloušťkou dochází k ovlivnění tvrdosti podložkou, a tím i k nepřesnosti měření. Jestliže je hrot umístěn na dutinu nebo na shluk vyztužujících částic, může dojít vlivem nehomogenity povrchu k nechtěným odchylkám. Z tohoto důvodu se doporučuje provést alespoň deset měření na jednom vzorku [18], [49].

Pro měření tvrdosti plastového materiálu se v praxi nejčastěji používají dvě standartní vnikací zkoušky, a to metodou vtlačování kuličky a metodou Shore [18], [47].

Zkoušky tvrdosti plastového materiálu se dělí dle zátěžné síly [42]:

- a) statické – měření tvrdosti dle Brinella, Vickerse, Rockwella,
- b) dynamické – Poldi kladívko, Shoreho skleroskop.

Metoda vtlačování kuličky, definována normou ČSN EN ISO 2039-1: Plasty – Stanovení tvrdosti – Část 1: Metoda vtlačování kuličky, je způsob měření, při kterém je do zkušebního materiálu vtlačována kalená ocelová kulička o průměru D (5 mm), viz obr. 17 [40], [49], [50].



Obr. 17 Měření tvrdosti metodou vtlačování kuličky [40].

Nejdříve je zkušební těleso zatíženo počátečním zatížením o velikosti 9,8 N a poté zatížením zkušebním o velikosti 49 N až 961 N. Velikost zkušebního zatížení se odvíjí dle výsledné hloubky vtlačení, která musí být v rozmezí 0,15 mm až 0,35 mm. Tvrdost je odečtena po 30 s měření a vypočtena dle vztahu 15 [40]:

$$H = \alpha \cdot \frac{F_c}{h - 0,46} \text{ [N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (15)$$

α – faktor (0,0535) [mm^{-1}],

F_c – celkové zatížení [N],

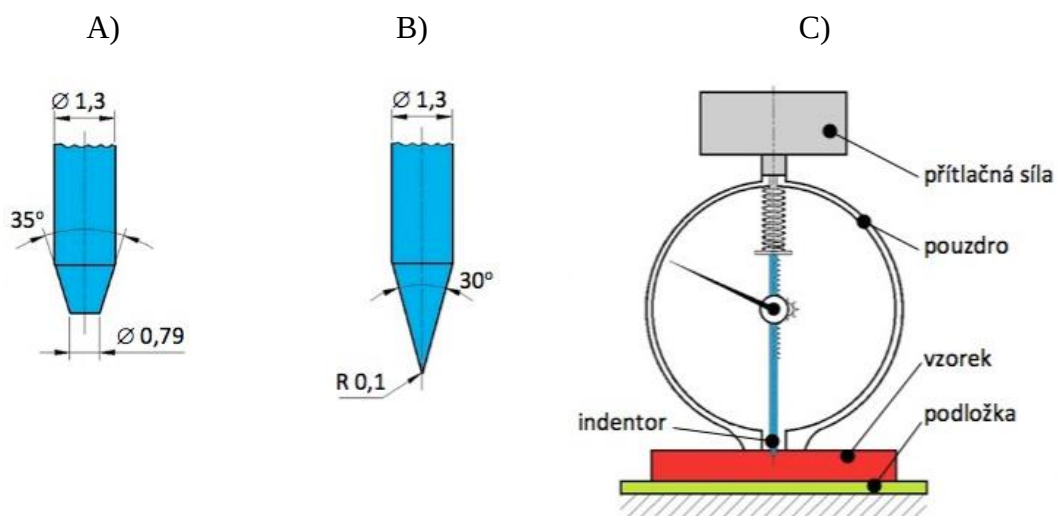
h – hloubka vniknutí kuličky do materiálu [mm],

H – Tvrdost vtlačení kuličky [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$] [40].

Výsledná hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu je uváděna ve tvaru $H \ 132 / 30 = 20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ (velikost zkušebního zatížení v N / čas měření tvrdosti v s = výsledná hodnota tvrdosti v $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$) [40].

Tvrdost metodou Shore se řadí k nejvíce rozšířenému měření tvrdosti v praxi. Dle rozsahu tvrdosti se rozlišuje měření tvrdosti Shore A, používaná pro měkké materiály, a Shore D, pro tvrdší materiály. Metody měření Shore A a Shore D se liší tvarem vtlačovaného hrotu. Tvar hrotů pro obě metody je zobrazen na Obr. 18. Hroty jsou vtlačovány pomocí pružiny, jak lze vidět na obr. 18. Hloubka, do které je měřicí hrot

vtlačení určuje míru tvrdosti. Tvrdost plastového materiálu nabývá u metody Shore hodnot v intervalu 0 až 100 HSh [40].



Obr. 18 Metoda měření tvrdosti Shore [18]: A) Tvar indentoru metody Shore A, B) Tvar indentoru metody Shore D, C) Princip měření tvrdosti metodou Shore.

Tloušťka zkušebního materiálu musí být pro obě metody minimálně 6 mm. Při měření metodou Shore A je hodnota odečtena po 3 s (měřeno od prvního dotyku s povrchem) a tvrdost metodou Shore D je získána po 15 s měření [40].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST – ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A JEJICH ZKOUŠKY

Tato část práce bude obsahovat poznatky získané z části teoretické se zaměřením na vyhotovení zkušebních vzorků a provedení jednotlivých zkušebních měření mechanických vlastností a rozměrové přesnosti.

2.1 Použitá 3D tiskárna

Jednotlivé zkušební vzorky byly vyhotoveny na FDM 3D tiskárně Original Prusa MK3. Hlavní předností tiskáren společnosti Prusa Research je jejich nízká pořizovací hodnota, jednoduchá montáž a servis. Oproti profesionálním tiskárnám jsou její hlavní nedostatky v rozměrové přesnosti tisknutého modelu, kvalitě povrchu a tisk neprobíhá v teplotní komoře.

2.1.1 Tiskové parametry

Tiskové parametry pro jednotlivé druhy materiálů byly voleny s ohledem na informace získané z materiálových listů a dat jednotlivých výrobců (teplota extruderu a podložky), viz Příloha 1 až Příloha 13. Ostatní potřebné parametry, jako rychlost tisku, extruze a chlazení, jsou předem definované výrobcem tiskárny a nachází se již v počítačovém softwaru PrusaSlicer.

2.2 Použité materiály

Aby byl zjištěn vhodný materiál pro použití, byly pro jednotlivé zkoušky zvoleny běžně používané aditivní materiály společností ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. (PLA, PLA ESD, PETG, ABS) s následným rozšířením o nově využívané druhy materiálu (PC ABS, ASA, ABS+). Pro námi použitou 3D tiskárnu byly zvoleny filamenty o průměru 1,75 mm. Kromě rozdílných druhů aditivního materiálu jsou testovány materiály od vícero dodavatelů. Použité aditivní materiály včetně dodavatelů a základních mechanických vlastností jsou v tab. 1.

Tab. 1 Použité aditivní materiály.

Materiál	Výrobce	Rm [MPa]	E [MPa]	At [%]	Tvrđost
ABS	Prusa	-	-	-	-
ABS+	Devil Design	-	-	30	105 HRC
PC/ABS	Filament Plasty Mladeč	-	-	-	-
ASA	Devil Design	-	-	20	107 HRC
	Filament Plasty Mladeč	-	-	-	-
	Fillamentum	40	1726	35	92 HRC
PETG	Filament Plasty Mladeč	-	-	-	-
	Prusament	-	1500	-	-
	Spectrum	27,1	360	9,5	-
PLA	Filament Plasty Mladeč	-	-	-	-
	Fillamentum	53	3600	6	-
	Prusament	-	2200	-	-
PLA ESD	3DXSTAT	55	2560	10	-

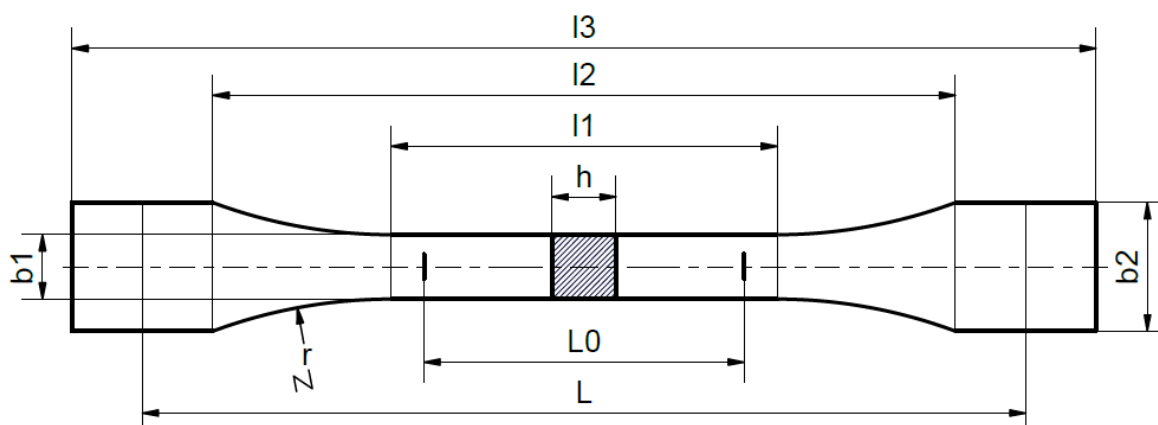
2.3 Zkouška tahem

V této kapitole bude nejdříve zvolen vhodný zkušební vzorek pro tahovou zkoušku plastového dílce vyrobeného pomocí 3D tisku a následným detailním popisem provedení tahové zkoušky.

2.3.1 Výběr zkušební vzorku pro tahovou zkoušku

Tvar a rozměry zkušební vzorku byly zvoleny dle normy ČSN EN ISO 527-2. V této normě jsou stanoveny podmínky pro zkoušky z plastového materiálu a stanovení jejich mechanických vlastností při zkoušce tahem. Norma byla zvolena i přes to, že popisuje zkušební tělesa vytvořená vstřikováním, lisováním nebo odléváním z toho důvodu, jelikož doposud neexistuje norma, která by popisovala tahovou zkoušku vzorků vytvořených 3D tiskem [51], [52].

Pro tahovou zkoušku byla dle normy ČSN EN ISO 527-2 zvolena zkušební tyč s označením 1BA, jejíž náčrt se nachází na obr. 19 a předepsané rozměry jsou v tab. 2. Zkušební tyč 1BA byla zvolena z důvodu úspory použitého aditivního materiálu na výrobu a nižší tiskový čas [51], [52].



Obr. 19 Náskres zkušební tyče 1BA [51].

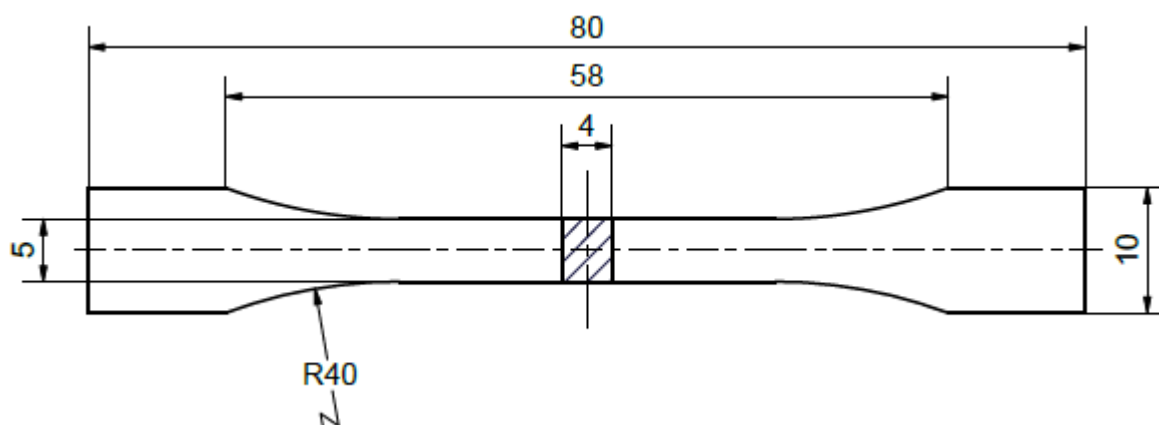
Tab. 2 Rozměry zkušební tyče 1BA [51], [52].

Parametry	Název	Rozměr [mm]
l_3	Celková délka	≥ 75
l_2	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami	58 ± 2
l_1	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami	$30,0 \pm 0,5$
r	Poloměr	≥ 30
b_2	Šířka konců	$10,0 \pm 0,5$
b_1	Šířka zúžené části	$5,0 \pm 0,5$
L_0	Počáteční měřená délka	$25,0 \pm 0,5$
L	Počáteční vzdálenost mezi čelistmi	$l_2 \begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}$
h	Tloušťka	≥ 2

2.3.2 Vyhotovení modelu zkušební vzorku

První krok tvorby tisknuté komponenty se nazývá *pre-processing*. Jedná se o tvorbu digitálního trojrozměrného modelu.

Model zkušební tyče pro tahovou zkoušku, zvolený dle normy EN ISO 527-2:2012, byl vyhotoven ve 3D modelovacím softwaru Autodesk Inventor Professional o rozměrech dle obr. 20.



Obr. 20 Rozměry zkušební tyče tahové zkoušky.

Nejprve byla vytvořena 2D skica základních rozměrů s následným vysunutím na požadovanou tloušťku. Na závěr bylo provedeno zaoblení zkušební tyče k zužující se části. Jakmile byl zkušební vzorek hotov, následoval převod souboru do formátu STL. Převedený soubor ve formátu STL byl následně vložen do programu PrusaSlicer. Na závěr bylo nutné určit jednotlivé parametry tisku. Zkušební tyče byly tisknuty se třemi perimetry, 100 % vnitřní přímočarou výplní, jejíž orientace byla 45 ° o výšce vrstvy 0,15 mm. Jelikož byla zvolena výplň pod úhlem 45 °, nebylo zapotřebí tisknout zkušební tyče orientované na tiskové podložce dvěma způsoby (vertikálně a horizontálně), dostačoval horizontální tisk. Před samotným tiskem je ze softwaru PrusaSlicer exportován soubor ve formátu g.code, se kterým samotná tiskárna pracuje.

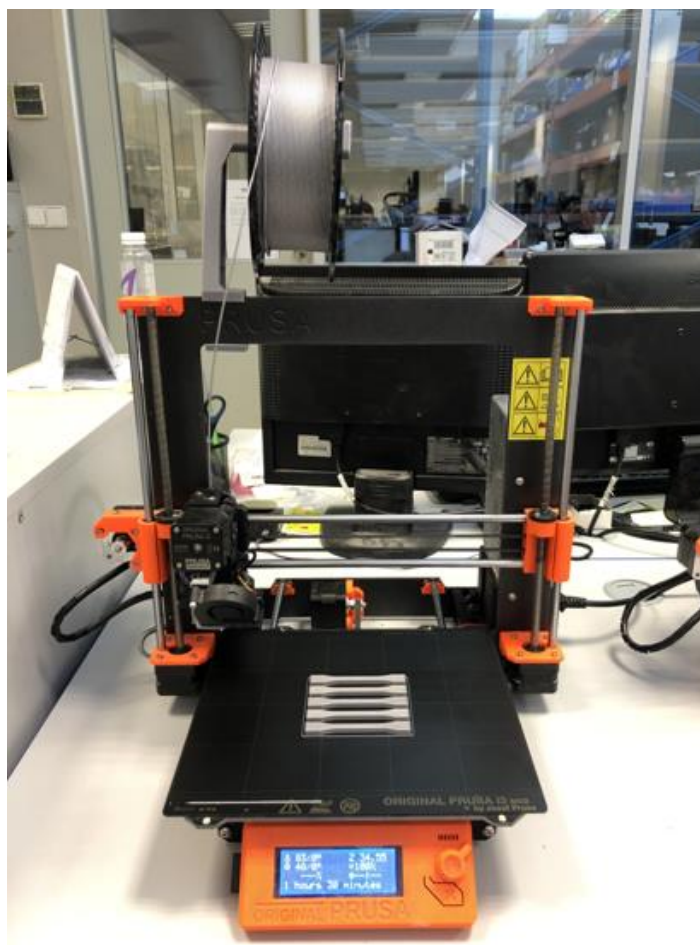
2.3.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Druhý krok tvorby tisknuté komponenty je *processing*. V tomto kroku již probíhá výroba vytvořeného trojrozměrného modelu 3D tiskárnou. 3D tiskárna s vyhotovenými zkušebními tyčemi je vyobrazena na obr. 21 a obr. 22.

Pro lepší statistické vyhodnocení tahových zkoušek bylo vyhotoveno od každého typu materiálu a dodavatelů 5 ks zkušebních tyčí. Celková tisková série tedy činila 65 ks.

Posledním krokem tisku je příležitostný *post-processing*. U námi tisknutých zkušebních vzorků se jedná pouze o odstranění límce, který zvětšoval plochu první vrstvy, a tím i přilnavost materiálu k tiskové podložce.

Na závěr bylo nutné zkušební tyče označit. Bylo tak učiněno pro lepší orientaci mezi jednotlivými materiály, výrobcí a v neposlední řadě lepší přiřazení tyčí po trhací zkoušce.



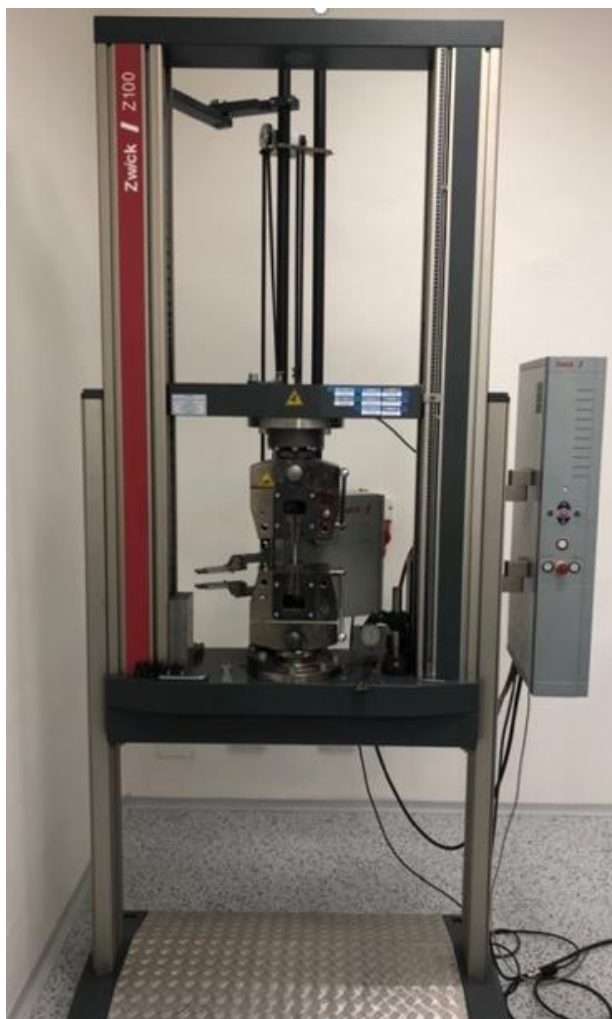
Obr. 21 3D tiskárna s vyhotovenými zkušebními tyčemi.



Obr. 22 Vyhotovené zkušební tyče z materiálu PLA.

2.3.4 Provedení tahové zkoušky

Tahová zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick Z100, viz obr. 23. Zkušební zařízení je pomocí kabelu připojeno k počítačové jednotce, ve které se nachází společnost Zwick dodávaný počítačový program testXpert. Program slouží k vložení vstupních parametrů trhacích zkoušek, jako předzatížení, vstupní rozměry vzorků a počáteční vzdálenost mezi upínacími čelistmi. Program zároveň slouží k vyhodnocení průběhu tahových zkoušek a výsledných parametrů (mez pevnosti, mez kluzu, modul pružnosti a vykreslení průběhu tahových zkoušek).



Obr. 23 Zkušební zařízení Zwick Z100.

Na začátku měření byly zapotřebí nastavit vstupní údaje. Jednalo se o vzdálenost mezi upínacími čelistmi, která činila 60 mm, a vstupní rozměry zúžené části zkušebních tyčí. Jelikož FDM tiskárna pracuje s omezenou přesností a polymerní materiály jsou náchylné na rozměrovou stálost, bylo zapotřebí zkušební tyče v zúžené části přeměřit pomocí digitálního posuvného měřidla. Z naměřených hodnot byla vypočtena průměrná hodnota rozměrů, pro jednotlivé materiály a výrobce. Vstupní rozměry zkušebních tyčí vložené do počítačového softwaru testXpert se nacházejí v tab. 3.

Tab. 3 Vstupní rozměry zúžené části zkušebních vzorků.

Materiál	Výrobce	h [mm]	b₁ [mm]
ABS	Prusa	5,07	3,90
ABS+	Devil Design	5,14	3,89
PC/ABS	Filament Plasty Mladeč	5,10	4,00
ASA	Devil Design	5,18	3,96
	Filament Plasty Mladeč	5,19	4,15
	Fillamentum	5,18	3,92
PETG	Filament Plasty Mladeč	5,17	3,98
	Prusament	5,1	3,92
	Spectrum	5,04	3,93
PLA	Filament Plasty Mladeč	5,01	3,8
	Fillamentum	5,13	3,8
	Prusament	4,94	3,86
PLA ESD	3DXSTAT	4,96	3,88

Jakmile byly vloženy vstupní parametry zkušebních tyčí tahové zkoušky a nastavena vzdálenost upínacích čelistí, mohlo započít samotné měření.

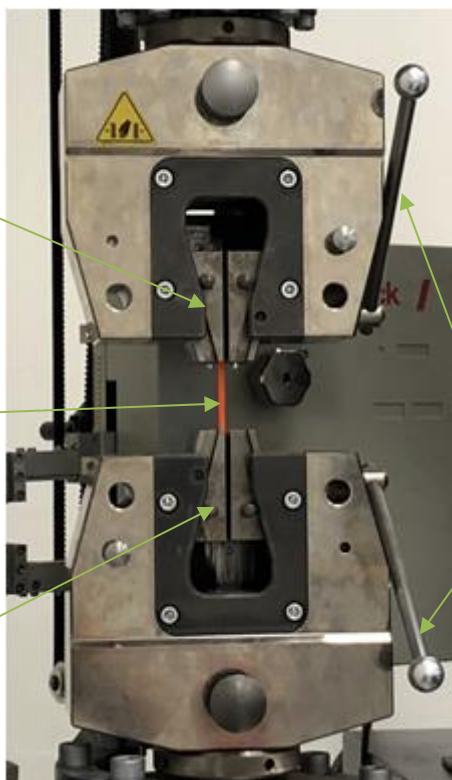
Zkušební tyč byla nejprve vložena do spodní čelisti trhačického zařízení a následně pomocí pákového mechanismu sevřena. Následně musí proběhnout vizuální kontrola, zda se zkušební tyč nachází v ose zatěžování a je s ní rovnoběžná. Poté je uzavřena i horní čelist. Při uzavírání musí být brán zřetel na dostatečnou sílu sevření. Ta nemůže být příliš velká (došlo by k poškození zkušební tyče) ani příliš malá (došlo by k vyklouznutí tyče z čelisti). Aby bylo zabráněno vyklouznutí zkušební tyče, je povrch čelistí zdrsňen. Tím je zvýšena hodnota tření mezi zkušební tyčí a čelistmi trhačického zařízení. Upínací pákový mechanismus s vloženou zkušební tyčí se nachází na obr. 24.

Horní upínací čelist

Zkušební tyč

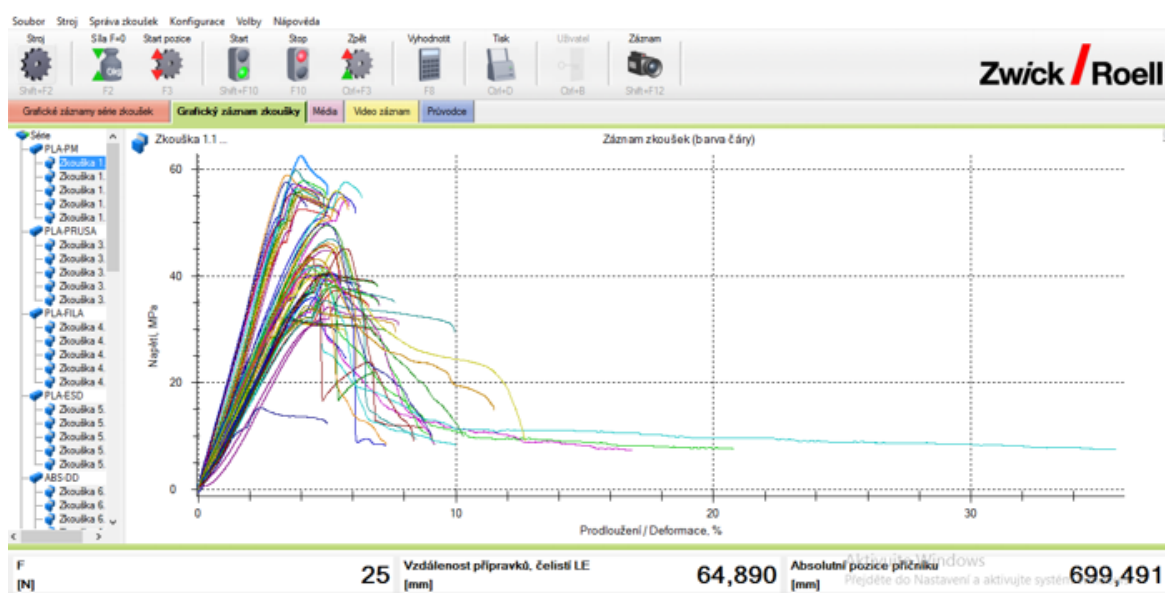
Dolní upínací čelist

Pákový mechanismus



Obr. 24 Upínací část zkušebního zařízení.

Jakmile je zkušební tyč správně uchycena mezi čelistmi, je možné pomocí počítačového programu testXpert zahájit zkušební měření. V průběhu měření je v programu graficky zobrazována závislost napětí na prodloužení, viz obr. 25. Zkouška je automaticky ukončena po přetržení zkušební tyče. Program zaznamenává a následně vyhodnotí jednotlivé tahové vlastnosti materiálu, které jsou exportovány do programu Excel pro další statistické vyhodnocení.



Obr. 25 Zobrazení průběhu tahových zkoušek.

2.4 Stanovení textury povrchu

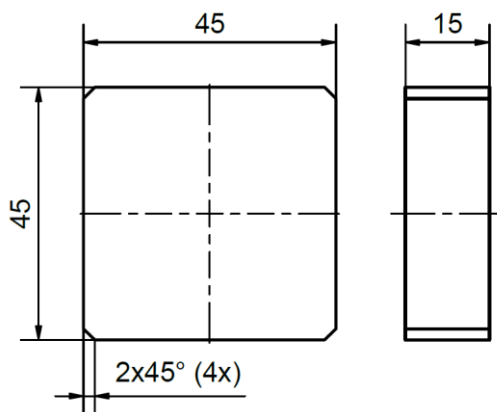
V této kapitole bude nejdříve zvolen vhodný zkušební vzorek pro měření textury povrchu plastového dílce vyrobeného pomocí technologie 3D tisku s následným detailním popisem a provedením měření drsnosti.

2.4.1 Výběr zkušebního vzorku pro měření textury povrchu

Pro měření textury povrchu plastového dílce vyrobeného 3D tiskem neexistuje norma, která by předepisovala tvar a rozměry zkušebního vzorku. Z toho důvodu byla tato skutečnost konzultována s kpt. Ing. Davidem Dobrockým, Ph.D. a následně zvolen vhodný tvar a rozměry zkušebního vzorku.

2.4.2 Vyhotovení modelu zkušebního vzorku

Model zkušebního vzorku pro měření drsnosti byl vyhotoven ve 3D modelovacím programu Autodesk Inventor Professional o rozměrech dle obr. 26. Postup *pre-processingu* je totožný, jako v kap. 2.3.2.



Obr. 26 Zkušební vzorek pro měření drsnosti povrchu.

2.4.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Zkušební vzorky mají stejné tiskové parametry, jako jsou definovány v kap. 2.3.3. Pro měření drsnosti povrchu byl vyhotoven 1 ks zkušebního vzorku od jednotlivých druhů materiálů i dodavatelů.

2.4.4 Provedení měření drsnosti povrchu

Měření textury povrchu bylo provedeno pomocí přístroje Talysurf CLI 1000 vyobrazeného na obr. 27. Výsledky byly následně vyhodnocovány v počítačovém softwaru TalyMap 4. Měření probíhalo na jedné (neoznačené) straně zkušebního vzorku. Pro analyzované povrchy byl zvolen dotykový způsob měření s parametry uvedenými v tab. 4 [53]. Tab. 4 Parametry měření textury povrchu



Obr. 27 Měřicí zařízení textury povrchu [53].

Tab. 4 Parametry měření textury povrchu [53].

Metoda	Poloměr snímacího hrotu [μm]	Síla na hrot	Snímaná plocha [mm^2]	Vyhodnocená délka [mm]	Filtrace
Indukční	2	700 μN – 1 mN	2	12	Gaussův filtr

I přes malou hodnotu zatěžující síly působící na měřicí hrot dotyku (700 μN až 1 mN) a malý poloměr snímacího hrotu je na povrchu patrná změna vzhledu. Snímací hrot přejížděním při měření zanechával na povrchu vrypů rovnající se vzdálenosti měřené oblasti (délka vrypů přibližně 2,2 mm a rozteči 0,2 μm). Z toho lze vyvodit závěr, že povrch zkušební vzorku má vzhledem ke zvolené měřicí metodě malou tvrdost [53].

Po měření drsnosti povrchu vzorků vyrobených 3D tiskem byla získaná data vyhodnocena pomocí software TalyMap 4 v následujících krocích [53]:

1. **Measured area** – získání dat měřeného povrchu,
2. **Levelling** – vyrovnaní povrchu podle zvolené oblasti,
3. **Form removal** – odstranění tvarových úchylek – polynomem 5. řádu,
4. **Thresholding** – zahrnutí odpovídajícího spektra dat do analýzy,
5. **3D area** – zobrazení analyzované 3D plochy,
6. **Parameter List** – zobrazení parametrů plochy,
7. **Profile extraction** – výběr vhodného profilu pro hodnocení, $l = 12$ mm,
8. **Zoom** – zoom profilu drsnosti na 5 mm,
9. **Roughness and Waviness filtration** – filtrace pro získání profilu drsnosti a vlnitosti, použit Gaussův filtr, cut-off 0,8 mm,
10. **Parameter list** – zobrazení parametrů, pro základní profil, 2D drsnost a vlnitost povrchu.

2.5 Zkouška tvrdosti

V této kapitole budou nejdříve zvoleny vhodné zkušební vzorky pro jednotlivé zkoušky tvrdosti plastových součástí s provedením zkoušek tvrdosti.

2.5.1 Výběr zkušební vzorku pro zkoušky tvrdosti

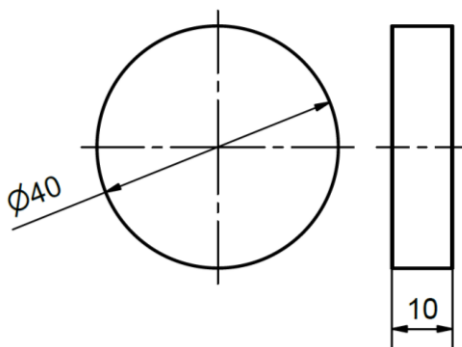
Tvar a rozměry zkušební vzorku pro měření tvrdosti metodou Shore byly zvoleny dle normy EN ISO 7619. V této normě jsou stanoveny podmínky pro zkoušky vzorků z pryže, vulkanizovaného nebo termoplastického elastomeru.

Tvar ani rozměry zkušební vzorku pro měření tvrdosti metodou vtlačování kuličky nejsou předepsány v žádné existující normě. Pro zkušební vzorky je důležité mít dostatečnou výšku, aby měřená tvrdost zkušební vzorku nebyla nikterak ovlivněna tvrdostí podložky měřicího zařízení.

Pro úsporu tiskového času a materiálu byly pro zkoušku tvrdosti vtlačováním kuličkou použity zkušební vzorky vyhotovené pro měření textury povrchu, viz kap. 2.4. Pomohl tomu i fakt, že zkušební vzorky pro měření textury povrchu byly dostatečně velké a stále na nich bylo dostatek místa i pro provedení zkoušky tvrdosti.

2.5.2 Vyhotovení modelu zkušební vzorku

Model zkušební vzorku pro zkoušku tvrdosti metodou Shore, zvolený dle normy EN ISO 7619, byl vyhotoven ve 3D modelovacím programu Autodesk Inventor Professional o rozměrech dle obr. 28. Postup *pre-processingu* je totožný, jako v kap. 2.3.2.



Obr. 28 Zkušební vzorek pro měření tvrdosti metodou Shore.

2.5.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Zkušební vzorky mají stejné tiskové parametry, jako jsou definovány v kap. 2.3.3. Pro měření tvrdosti metodou Shore byly vyhotoveny 2 ks zkušebních vzorků od jednotlivých druhů materiálů i výrobce z toho důvodu, aby byla dodržena minimální vzdálenost mezi jednotlivými měřicími body a vzdáleností měřicího bodu od okraje zkušební vzorku.

2.5.4 Provedení zkoušek tvrdosti metodou Shore D

Pro měření tvrdosti byla použita metoda Shore D, která umožňuje měřit plastové materiály v rozsahu tvrdosti 10 až 90 HShD.

Tvrdost zkušebních těles byla změřena na tvrdoměru Digi Tech, viz obr. 29. Na podložku zkušební zařízení je položen zkušební vzorek. Po zahájení měření je indentor vtlačován do zkušební tělesa po dobu 15 s. Po uplynutí je výsledná změřená tvrdost zobrazena na výstupním zařízení.

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do programu Excel pro další statistické vyhodnocení.



Obr. 29 Zkušební zařízení pro měření tvrdosti metodou Shore D.

Jelikož je měření tvrdosti vtlačováním kuličkou velmi ojedinělé a je požadováno speciální měřicí zařízení, bylo zapotřebí provést zkoušku externě. Po zajištění spolupráce s Ing. Hrnčiarovou proběhlo měření v Institutu pro testování a certifikaci (ITC) se sídlem ve Zlíně.

Měření tvrdosti vtlačováním kuličkou bylo provedeno na 1ks zkušebního tělesa o pěti opakováních. Dle vzorce v kap. 1.4.2 Metoda vtlačování kuličkou již byla poskytnuta data výsledných naměřených hodnot tvrdosti jednotlivých materiálů a výrobců.

2.6 Stanovení rozměrové přesnosti

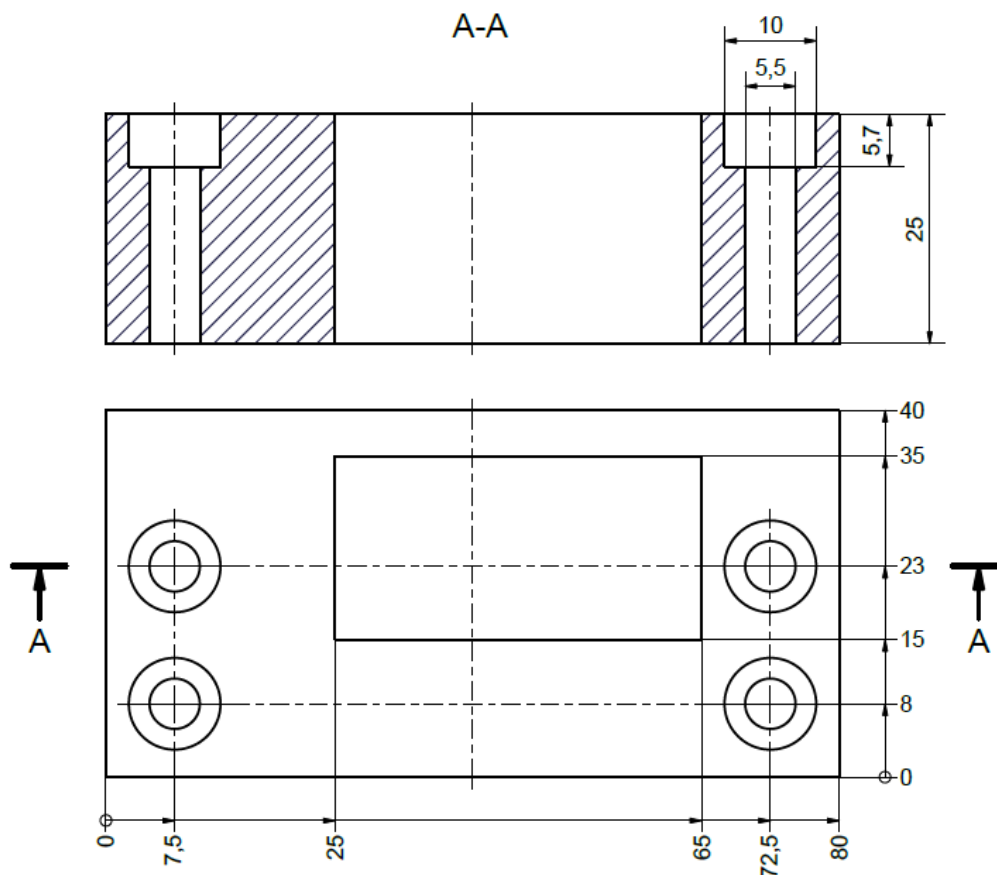
V této kapitole bude nejdříve zvolen vhodný zkušební vzorek zhotovený 3D tiskem pro měření rozměrové přesnosti s následným detailním popisem a provedením měření.

2.6.1 Výběr zkušebního vzorku pro určení rozměrové přesnosti

Tvar ani rozměry zkušebního vzorku pro měření rozměrové přesnosti nejsou předepsány v žádné normě. Po konzultaci s Ing. Ivem Gorecki byl stanoven zkušební vzorek tak, aby byla zjištěna rozměrová přesnost na mnohotvarém tělesu.

2.6.2 Vyhotovení modelu zkušební vzorku

Model zkušební vzorku pro měření rozměrové přesnosti byl vyhotoven ve 3D modelovacím programu Autodesk Inventor Professional o rozměrech dle obr. 30. Postup *pre-processingu* je totožný, jako v kap. 2.3.2. Aby bylo možné získaná data rozměrové přesnosti využít i dále, bylo zkušební vzorkům upraveno několik tiskových parametrů dle používaných tiskových nastavení potřebných funkčních komponentů firmy (byla snížena procentuální výplň vzorku na 20 %, počet spodních a horních vrstev byl nastaven na pět).



Obr. 30 Zkušební vzorek pro měření rozměrové přesnosti.

2.6.3 Zhotovení zkušebních vzorků

Zkušební vzorky mají stejné tiskové parametry, jako jsou definovány v kap. 2.3.3. Pro měření rozměrové přesnosti byl vyhotoven 1 ks zkušební vzorku od jednotlivých druhů materiálů i výrobců.

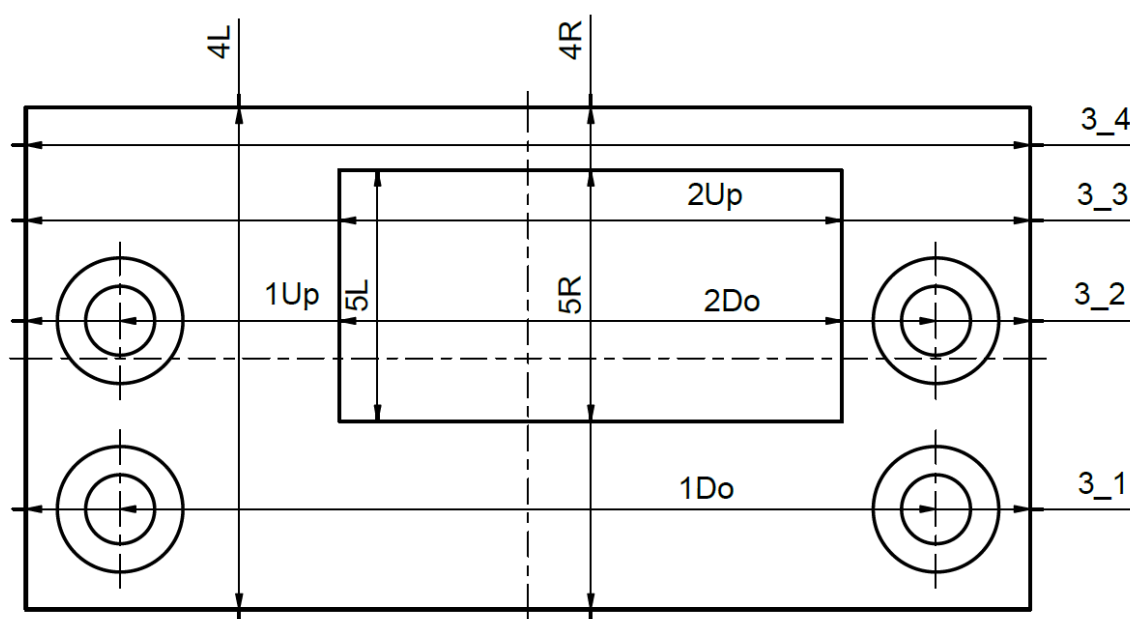
2.6.4 Měření vzorků

Měření rozměrové přesnosti bylo provedeno pomocí měřicího zařízení STIEFELMAYER Quantura S 8106 vyobrazeného na obr. 31. Měření je automaticky provedeno pomocí počítačového softwaru Polyworks, který se se nachází na připojené počítačové jednotce. Pomocí softwaru Polyworks jsou získaná data vyhodnocována.



Obr. 31 Měřicí zařízení STIEFELMAYER Quantura S 8106.

Měření rozměrové přesnosti zkušebního vzorku bylo provedeno na námi zvolených pozicích dle obr. 32 ve výšce 23 mm od spodní hrany. Vysvětlující parametry z měření přesnosti jsou v tab. 5.

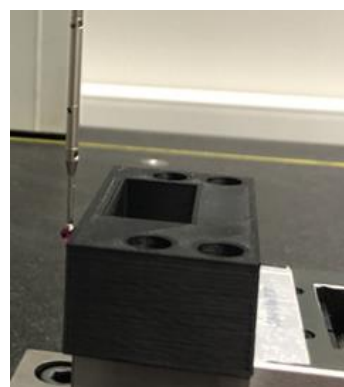
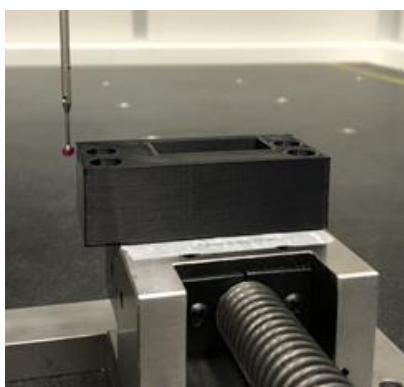


Obr. 32 Pozice měření zkušebního vzorku rozměrové přesnosti.

Tab. 5 Pozice měření rozměrové přesnosti.

Parametry	Název	Rozměr [mm]
1Up	Vzdálenost mezi horními děrami	65
1Do	Vzdálenost mezi dolními děrami	65
2Up	Šířka drážky horní pozice	40
2Do	Šířka drážky dolní pozice	40
3_1	Šířka zkušební vzorku mezi dolními děrami, bez drážky	80
3_2	Šířka zkušební vzorku mezi horními děrami, s drážkou	80
3_3	Šířka zkušební vzorku bez děr, s drážkou	80
3_4	Šířka zkušební vzorku bez děr, bez drážky	80
4L	Hloubka zkušební tělesa bez drážky	40
4R	Hloubka zkušební tělesa s drážkou	40
5L	Hloubka drážky v rohu	20
5P	Hloubka drážky uprostřed	20
6	Rovinnost plochy	0

Zkušební vzorek je uchycen pomocí oboustranné lepicí pásky k upínacímu mechanismu měřicího zařízení. Následně je definován nulový bod vzorku a podle zadaných požadavků změřena požadovaná místa, viz obr. 33. Data z kartouzského systému jsou následně převedena a pomocí počítačového softwaru jsou definovány skutečné změřené hodnoty a jejich odchylka od 3D modelu zkušební vzorku.



Obr. 33 Měření zkušební vzorku rozměrové přesnosti.

3 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Tato část práce se bude zabývat vyhodnocením získaných dat z provedených zkoušek a měření. Experimentálně získaná data budou vyhodnocena pro jednotlivá zkušební měření zvlášť, včetně porovnání hodnot udávaných dodavatelem v materiálových listech. Mezi vyhodnocované parametry se řadí mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost, drsnost povrchu, tvrdost Shore, tvrdost vtlačování kuličkou a rozměrová přesnost.

Postup a systém vyhodnocování získaných dat jednotlivých druhů měření byl určen na základě konzultace s Ing. Josefem Bednářem, Ph.D. zabývajícím se statistikou, který následně provedl kontrolu vyhodnocených dat.

Získaná data byla jednotlivě vyhodnocena za pomoci statistického softwaru Minitab.

Nejprve byl použit Anderson-Darlingův Test Normality, který umožňuje zjistit, zda mají nebo nemají data normální rozdělení. Předpoklad normálně rozdělených dat je vyžadován při výpočtech statistických parametrů a testu Anova. Obecně platí: jestliže je P-hodnota menší než 0,05, nemají data se spolehlivostí větší než 95 % normální rozdělení. V tom případě je důležité některá data upravit. V opačném případě lze s daty dále pracovat a stanovit pomocí Jednovýběrového T-testu střední hodnotu, chybu střední hodnoty, směrodatnou odchylku, medián, minimum, maximum a interval spolehlivosti.

3.1 Vyhodnocení výsledků materiálu ABS

Za pomoci počítačového softwaru Minitab a Microsoft Excel byly určeny základní statistické parametry pro jednotlivá měření.

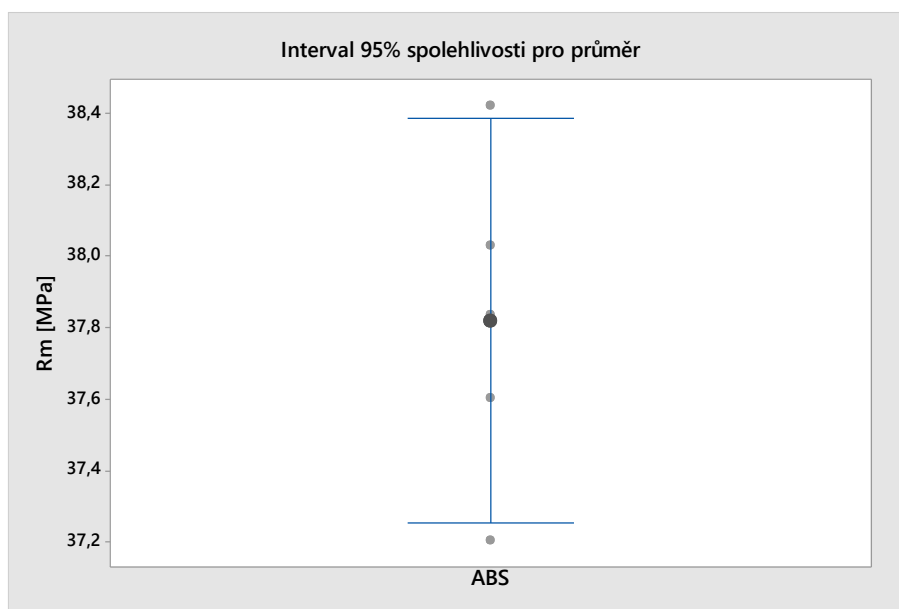
Mez pevnosti v tahu

Materiálový list aditivního materiálu ABS od dodavatele Prusa neobsahuje žádné námi měřené vlastnosti, jako je tomu i jiných materiálů. Z výsledků provedené tahové zkoušky, byly stanoveny hodnoty jednotlivých parametrů, viz tab. 6.

Tab. 6 Základní statistické parametry meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS.

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	37,818 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,2041	
Směrodatná odchylka	0,4563	
Medián	37,8355 MPa	
Minimum	37,2027 MPa	
Maximum	38,4206 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,9340	
Interval spolehlivosti	37,25 MPa	38,39 MPa

Na obr. 34 je graficky znázorněn interval spolehlivosti **[37,25 MPa; 38,39 MPa]**, včetně výsledných hodnot naměřených pro jednotlivé zkušební tyče. Z obr. 34 je patrná nesymetrie hodnot a některé hodnoty se nacházejí i mimo interval spolehlivosti. To může být způsobeno skrytými vadami uvnitř zkušební tyče, chybou přenosu dat nebo nahodilou chybou.



Obr. 34 Intervalové body meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS.

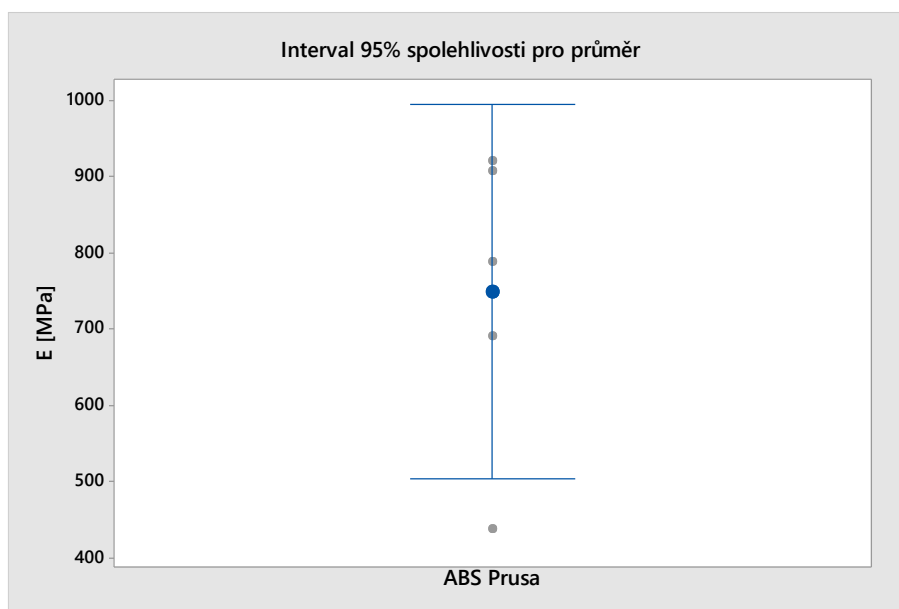
Modul pružnosti v tahu

Postup statistického vyhodnocení dat je totožný jako u meze pevnosti v tahu. V tab. 7 jsou obsaženy základní statistické parametry. Kvůli chybějícím údajům v materiálovém listu nemohlo být měření porovnáno s hodnotami udanými dodavatelem.

Tab. 7 Základní statistické parametry modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS.

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	748,9209 MPa	
Chyba střední hodnoty	88,3078	
Směrodatná odchylka	197,4622	
Medián	787,5540 MPa	
Minimum	438,1145 MPa	
Maximum	920,1508 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3640	
Interval spolehlivosti	503,70 MPa	994,10 MPa

Na obr. 35 je graficky znázorněn interval spolehlivosti **[503,70 MPa; 994,10 MPa]**, včetně výsledných hodnot naměřených pro jednotlivé zkušební tyče. Z obr. 35 je patrná nesymetrie hodnot a některé hodnoty se nacházejí i mimo interval spolehlivosti. To může být způsobeno skrytými vadami uvnitř zkušební tyče, chybou přenosu dat nebo nahodilou chybou.



Obr. 35 Intervalové body modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS.

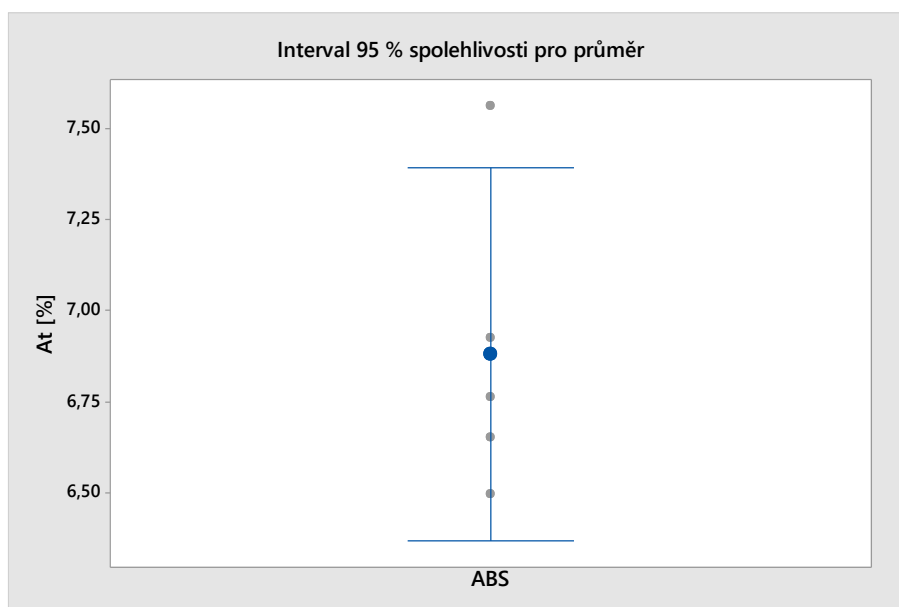
Tažnost

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Základní statistické parametry tažnosti At [%] aditivního materiálu ABS.

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	6,8794 %	
Chyba střední hodnoty	0,1843	
Směrodatná odchylka	0,4121	
Medián	6,7636 %	
Minimum	6,4965 %	
Maximum	7,5617 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2550	
Interval spolehlivosti	6,37 %	7,39 %

Na obr. 36 je graficky znázorněn interval spolehlivosti [6,37 %; 7,39 %], včetně výsledných hodnot naměřených pro jednotlivé zkušební tyče. Z obr. 36 je patrná nesymetrie hodnot a některé hodnoty se nacházejí i mimo interval spolehlivosti. To může být způsobeno skrytými vadami uvnitř zkušební tyče, chybou přenosu dat nebo nahodilou chybou.



Obr. 36 Intervalové body tažnosti At [%] aditivního materiálu ABS.

Drsnost

Drsnost povrchu zkušební vzorku byla měřena na horní ploše (plocha kolmá na tiskovou trysku) a odvíjí se od několika tiskových parametrů: průměr trysky, výška vrstvy a tiskové teploty.

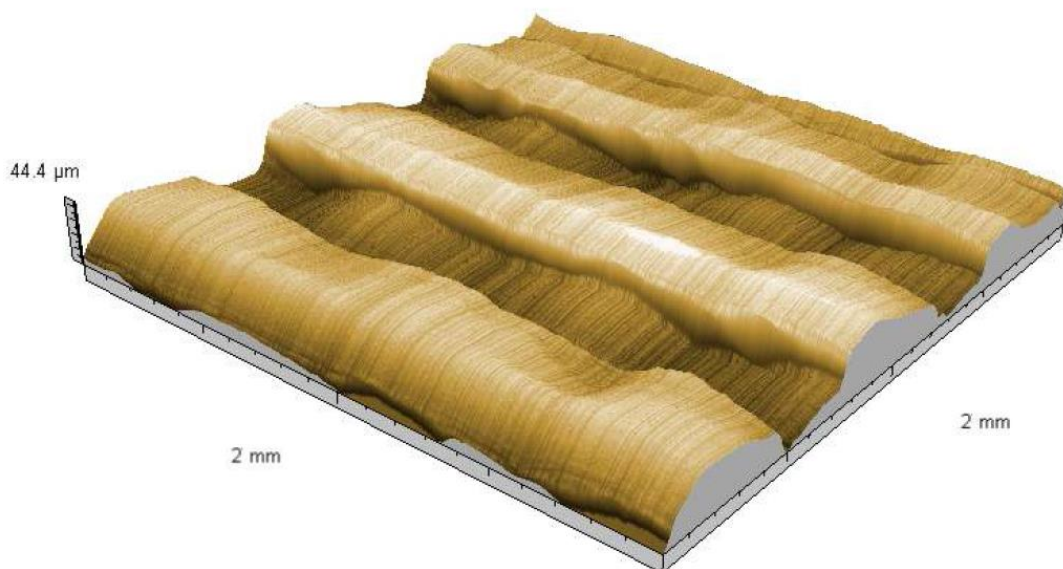
3D parametry textury povrchu

V rámci měření 3D parametrů plochy (prostorové parametry textury povrchu) byly k hodnocení vybrány základní amplitudové parametry Sa, Sq, St a Sz. Tyto parametry představují skupinu parametrů prostorového hodnocení, která vychází z rozložení výšek souřadnic profilu povrchu. Amplitudové parametry, včetně naměřených hodnot, jsou popsány v tab. 9.

Tab. 9 Parametry 3D textury povrchu aditivního materiálu ABS.

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	9,39
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	11,1
St	Celková výška povrchu	44,4
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	43

Na obr. 37 je znázorněna 3D textura povrchu horní plochy zkušební vzorku. Je patrná určitá periodicitita naneseného aditivního materiálu vedle sebe.



Obr. 37 3D znázorněných povrch horní plochy aditivního materiálu ABS.

2D parametry textury povrchu

Z 2D parametrů drsnosti byly vybrány amplitudové (výškové) parametry R_a , R_q , R_t a R_z . Vlnitost byla hodnocena amplitudovými parametry W_a , W_q , W_t a W_z . V tab. 10 se nacházejí změřené 2D parametry drsnosti a vlnitosti povrchu.

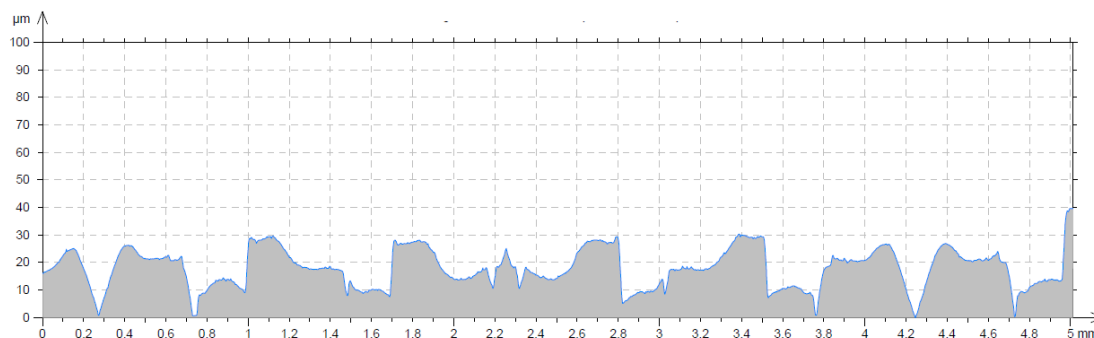
Tab. 10 2D parametry drsnosti a vlnitosti povrchu aditivního materiálu ABS.

Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	R_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	4,68
	R_q	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	5,66
	R_t	Celková výška profilu drsnosti	38,4
	R_z	Největší výška profilu drsnosti	22,6
Vlnitost	W_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,72
	W_q	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	2
	W_t	Celková výška profilu vlnitosti	7,43
	W_z	Největší výška profilu vlnitosti	5,96

Na obr. 38 je znázorněn 2D profil povrchu horní plochy zkušební vzorku. Velmi patrné jsou prohlubně mezi jednotlivě nanesenými vrstvami aditivního materiálu. Prohlubně při detailnějším pohledu na obr. 38 odpovídají přednastavené výšce vrstvy 0,2 mm a vykazují také určitou periodicitu.

Výslednou drsnost povrchu výrazně ovlivňují tiskové parametry, především teplota, výška vrstvy, velikost trysky a rychlost kladení jednotlivých vrstev.

Pokud to materiál dovoluje je možné drsnost povrchu tisknutých komponentů zlepšit dokončovacími metodami (např. broušení, leštění).



Obr. 38 Profil povrchu měřené oblasti horní plochy aditivního materiálu ABS.

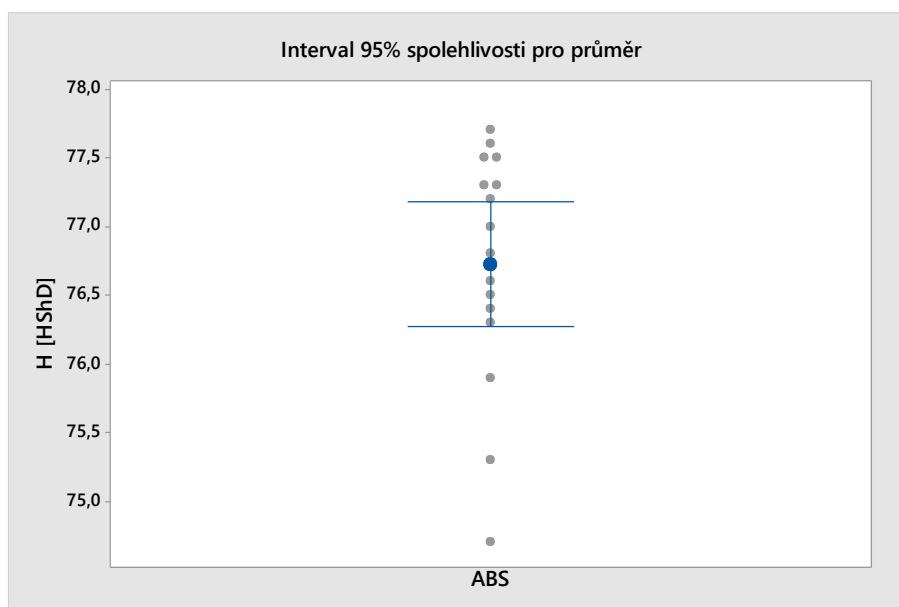
Tvrdość Shore

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tab. 11.

Tab. 11 Základní statistické parametry tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ABS.

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	76,725 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,2146	
Směrodatná odchylka	0,8683	
Medián	76,90 HShD	
Minimum	74,70 HShD	
Maximum	77,70 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1510	
Interval spolehlivosti	76,27 HShD	77,18 HShD

Na obr. 39 je graficky znázorněn interval spolehlivosti [76,27 HShD; 77,18 HShD], včetně výsledných hodnot naměřených pro jednotlivé zkušební vzorky. Z obr. 39 je patrná nesymetrie hodnot a některé hodnoty se nacházejí i mimo interval spolehlivosti. To může být způsobeno skrytými vadami uvnitř zkušební tyče, chybou přenosu dat nebo nahodilou chybou.



Obr. 39 Intervalové body tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ABS.

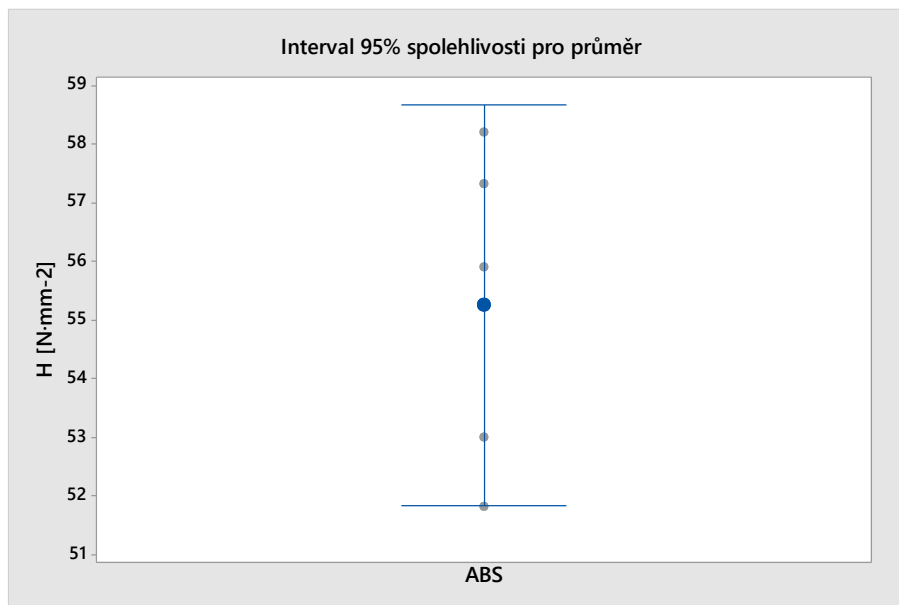
Tvrdość vtlačování kuličkou

Základní statistické parametry jsou uvedeny v tab. 12.

Tab. 12 Základní statistické parametry tvrdosti vtlačování kuličkou H [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$] aditivního materiálu ABS.

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	55,24 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	
Chyba střední hodnoty	1,2307	
Směrodatná odchylka	2,7519	
Medián	55,90 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	
Minimum	51,80 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	
Maximum	58,20 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,534	
Interval spolehlivosti	51,82 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	58,66 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$

Na obr. 40 je graficky znázorněn interval spolehlivosti $[51,82 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}; 58,66 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}]$, včetně výsledných hodnot naměřených pro jednotlivé zkušební vzorky. Z obr. 40 je patrná nesymetrie hodnot.



Obr. 40 Intervalové body tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu ABS.

Rozměrová přesnost

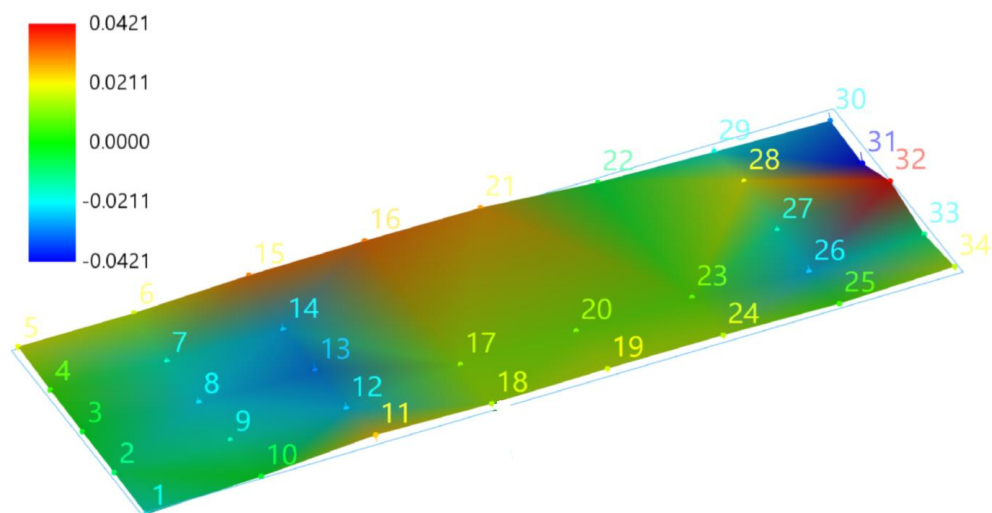
Naměřené rozměry zkušebního vzorku jsou uvedeny v tab. 13. Jsou stanoveny délkové i procentuální odchylky od 3D modelu. Tyto odchylky jsou následně barevně označeny dle rozdílu od původního 3D modelu. Zelená označuje rozměr nacházející se ve stanoveném tolerančním poli. Fialová značí rozměr na hranici tolerančního pole a červená rozměr mimo toleranční pole základního modelu.

U materiálu ABS jsou všechny rozměry zkušebního vzorku (viz obr. 33) mimo toleranční pole. To je způsobeno materiálovým srážením při ochlazování nebo příliš nízkou přesností tisku samotné tiskárny.

Tab. 13 Naměřené rozměry zkušebního vzorku aditivního materiálu ABS

Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměr [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,573	-0,427	-427
1Up	65,0	±0,1	64,573	-0,427	-427
2Do	40,0	±0,1	39,873	-0,127	-127
2Up	40,0	±0,1	39,854	-0,146	-146
3_1	80,0	±0,1	79,525	-0,475	-475
3_2	80,0	±0,1	79,491	-0,509	-509
3_3	80,0	±0,1	79,461	-0,539	-539
3_4	80,0	±0,1	79,476	-0,524	-524
4L	40,0	±0,1	39,722	-0,278	-278
4R	40,0	±0,1	39,712	-0,288	-288
5L	20,0	±0,1	19,773	-0,227	-227
5R	20,0	±0,1	19,796	-0,204	-204
6	0,1	±0,1	0,077	0,077	77

Na obr. 41 je znázorněna vlnitost horní plochy zkušebního tělesa.



Obr. 41 Vlnitost horní plochy zkušebního vzorku aditivního materiálu ABS.

Vyhodnocení ostatních materiálů

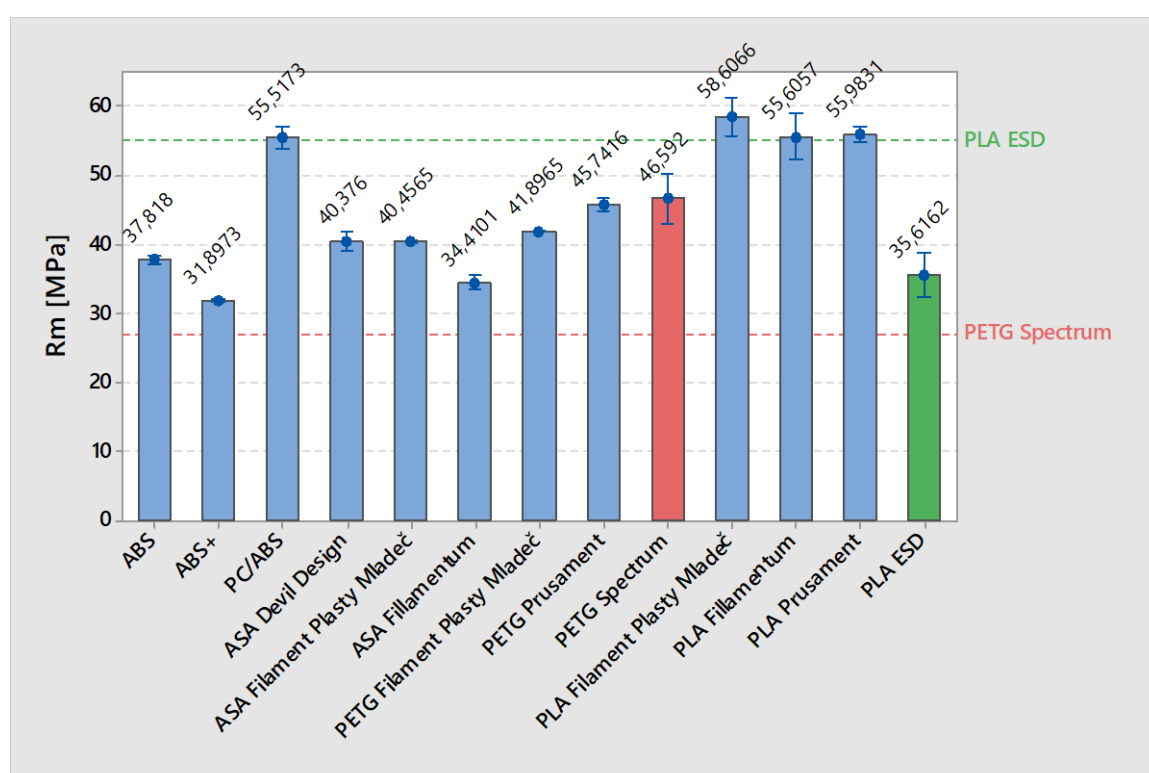
Vyhodnocení všech aditivních materiálů bylo provedeno stejným způsobem (viz Příloha 14 až Příloha 25) jako u aditivního materiálu ABS. Až na výjimky neobsahují materiálové listy žádné mechanické vlastnosti stanovené dodavatelem. Můžeme o nich tedy soudit, že jsou považovány pouze pro hobby tiskárny, nikoliv pro komerční použití.

4 TECHNICKO EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Tato kapitola práce se bude zabývat srovnáním jednotlivých materiálů mezi sebou z dosažených výsledků v kap. 3.

V grafické závislosti na obr. 42 jsou znázorněny střední hodnoty parametru R_m pro jednotlivé druhy materiálů včetně jejich intervalu spolehlivosti.

Z grafu je patrné, že R_m několika materiálů převyšuje ostatní. Je tomu tak u materiálů PC/ABS a PLA bez závislosti na dodavateli. Ostatní materiály nedosahují takové hodnoty R_m , a jak jsme mohli vypočítat u rozboru jednotlivých materiálů, u většiny jejich R_m nedosahuje předepsované hodnoty z materiálového listu.

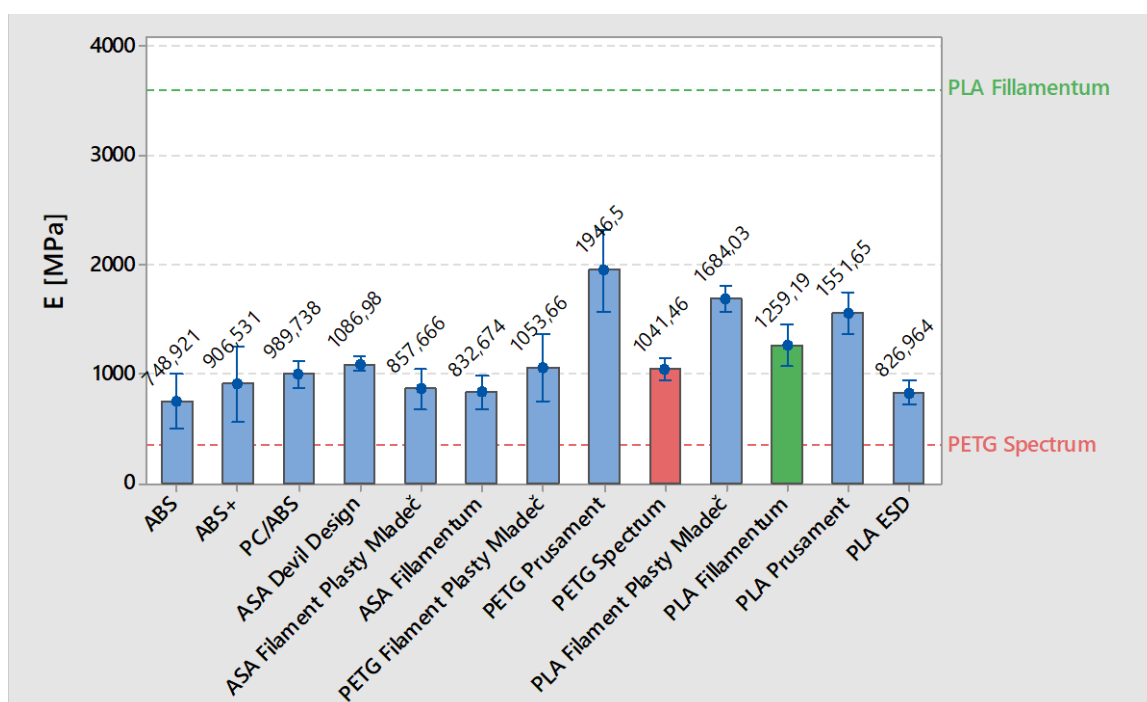


Obr. 42 Srovnání meze pevnosti R_m [MPa] v tahu.

V grafické závislosti na obr. 43 jsou znázorněny střední hodnoty parametru E pro jednotlivé druhy materiálů včetně jejich intervalu spolehlivosti.

Z grafu je patrné, že několik materiálů převyšuje ostatní. Je tomu tak u materiálů PETG Prusament, PLA Filament Plasty Mladeč a PLA Prusament. Střední hodnota Materiálu PETG Prusament převyšuje dva materiály PLA, jeho interval spolehlivosti je ovšem mnohem širší, než je tomu u PLA. I během tahové zkoušky vykazoval materiál PETG určité problémy.

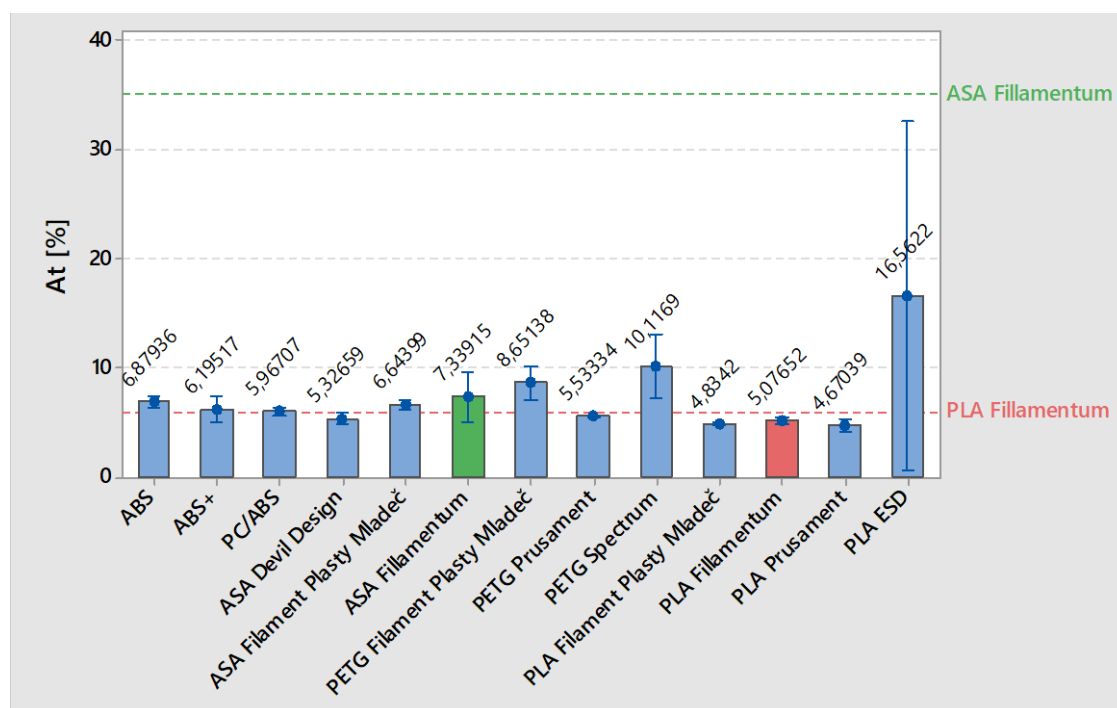
Pokud byla v materiálovém listu hodnota E dodavatelem předepsána, nedosahovala její velikosti (vyjma Aditivního materiálu PETG Spectrum).



Obr. 43 Srovnání modulu pružnosti E [MPa] v tahu.

V grafické závislosti na obr. 44 jsou znázorněny střední hodnoty parametru At pro jednotlivé druhy materiálů včetně jejich intervalu spolehlivosti.

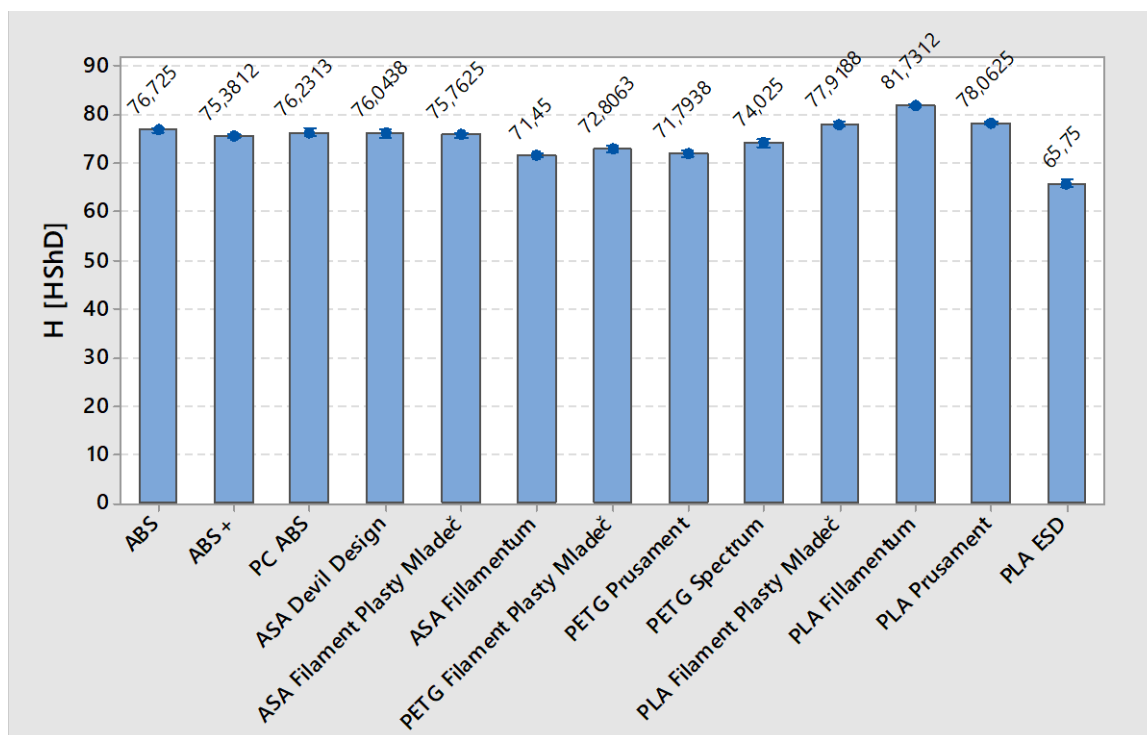
Z grafu je patrné, že nejvyšší střední hodnotu dosahuje materiál PLA ESD. Jeho interval spolehlivosti je ovšem velmi široký, a proto není dobré považovat tento materiál z pohledu tažnosti za nejlepší. V tom případě dosahují nejlepších elastických vlastností aditivní materiály PETG Filament Plasty Mladeč a PETG Spectrum.



Obr. 44 Srovnání tažnosti At [%].

V grafické závislosti na obr. 45 jsou znázorněny střední hodnoty tvrdosti Shore pro jednotlivé druhy materiálů včetně jejich intervalu spolehlivosti.

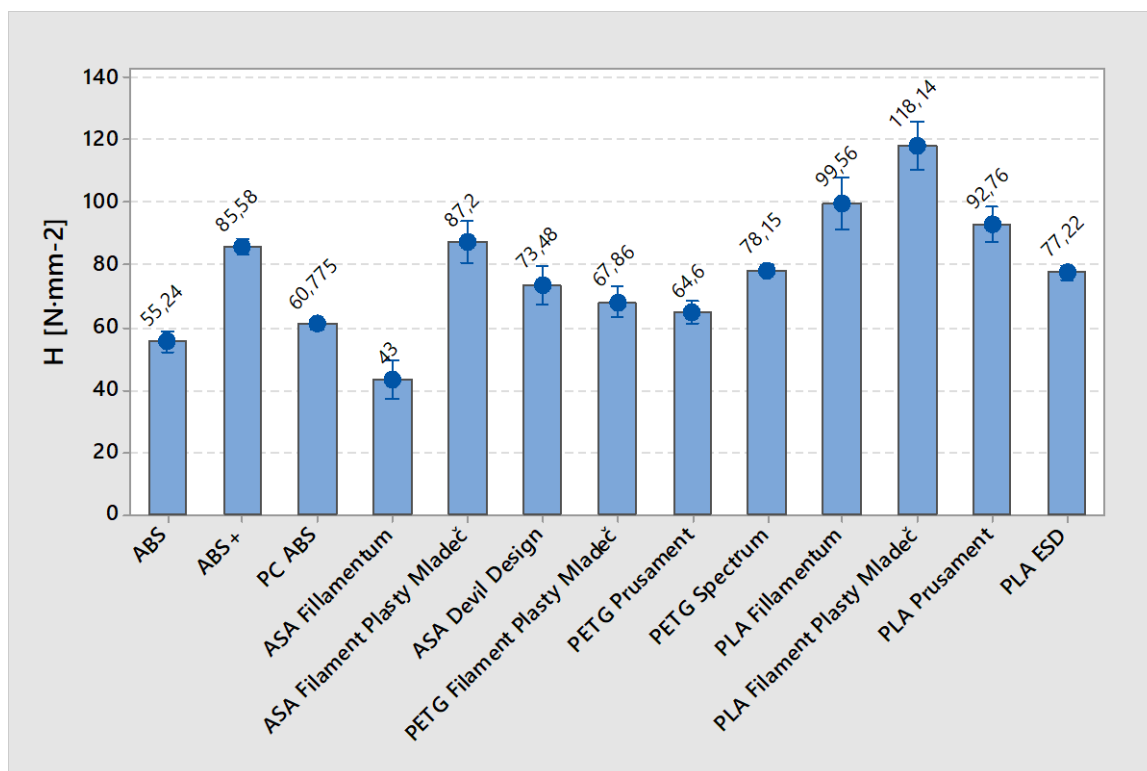
Všechny materiály vykazují téměř stejnou tvrdost. Nejvyšší hodnotu tvrdosti dosahuje materiál PLA Filamentum. Naopak nejnižší tvrdosti dosahuje materiál PLA ESD.



Obr. 45 Srovnání tvrdosti Shore [HShD].

V grafické závislosti na obr. 46 jsou znázorněny střední hodnoty tvrdosti vtláčování kuličkou pro jednotlivé druhy materiálů včetně jejich intervalu spolehlivosti.

Jak je z grafu patrné, nejvyšší tvrdosti dosahuje materiál PLA Filament Plasty Mladeč. Naopak nejnižší tvrdosti dosahuje materiál ASA Fillamentum.



Obr. 46 Srovnání tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²].

Pro celkové zhodnocení a možnost výběru materiálu s nejlepšími mechanickými vlastnostmi byla vyhotovena hodnotící stupnice, kdy každý materiál dostal určitý počet bodů podle pozice, na které se po vyhodnocení měřených parametrů umístil. První pozice čítala třináct hodnotících bodů a poslední jeden hodnotící bod.

Mimo mechanické vlastnosti materiálu bylo provedeno ekonomické hodnocení. Byla vybrána referenční tisková komponenta, pro kterou byla vypočtena cena materiálu za její tisk. Ne všechny materiály mají stejnou hmotnost balení, a proto bylo zapotřebí přepočítat cenu materiálu na jeden gram.

Pořadí materiálů dle hodnocení a náklady na materiál jsou v tab. 14.

Tab. 14 Bodové hodnocení materiálů a cenových nákladů.

Materiál	Výrobce	Počet hodnotících bodů	Náklady za materiál [Kč]
ABS	Prusa	27	58,97
ABS+	Devil Design	30	52,73
PC/ABS	Filament Plasty Mladeč	35	80,89
ASA	Devil Design	33	58,31
	Filament Plasty Mladeč	35	75,26
	Fillamentum	19	62,51
PETG	Filament Plasty Mladeč	36	66,99
	Prusament	34	77,40
	Spectrum	42	59,69
PLA	Filament Plasty Mladeč	52	58,92
	Fillamentum	50	82,89
	Prusament	48	64,76
PLA ESD	3DXSTAT	13	385,76

Nejlepšího bodového hodnocení mechanických vlastností dosáhl materiál PLA Filament Plasty Mladeč, jehož cena za materiál je zároveň druhá nejnižší ze všech použitých aditivních materiálů. PLA Fillamentum a PLA Prusament vykazují také výborné mechanické vlastnosti, ovšem oproti předešlému PLA je jejich cena vyšší (viz tab. 14).

Materiál PETG jakožto konstrukční materiál prokázal své potenciální vlastnosti a dosahuje také dobrých mechanických vlastností. Mezi jednotlivými materiály PETG je i znatelný finanční rozdíl (viz tab. 14).

Velmi dobře se během zkoušek jevily nově zahrnuté aditivní materiály PC/ABS a ASA Filament Plasty Mladeč, jejichž cena je poněkud vyšší, ale přinese nové možnosti zapojení tisknutých komponentů (viz tab. 14).

Jako zcela nepřijatelný, jak vyplývá z mechanických vlastností, tak i nákladů na materiál, se jeví PLA ESD, který během všech zkušebních měření vykazoval nejnižší hodnoty, a je ho zapotřebí použít pouze v nutných případech (viz tab. 14).

ZÁVĚR

V této práci byla řešena problematika mechanických vlastností a rozměrové přesnosti používaných a nově zvolených aditivních materiálů společností ALPS ELECTRIC CZECH, s.r.o. První část práce obsahuje teoretický rozbor mechanických zkoušek, popis aditivních materiálů použitých v praktické části a vybrané tiskové metody včetně jejich výhod a nevýhod. Druhá část práce popisuje výrobu zkušebních vzorků včetně detailního popisu provedení zkušebních měření. Zkušební vzorky byly podrobeny tahové zkoušce, vyhodnocení textury povrchu, zkoušce tvrdosti Shore, zkoušce tvrdosti vtlačování kuličkou a měření rozměrové přesnosti. Čtvrtá část se zabývá statistickým vyhodnocením naměřených dat aditivního materiálu ABS. Statistické vyhodnocení bylo provedeno pro parametry získané během provedených zkoušek (mez pevnosti v tahu, modul pružnosti v tahu, tažnost, dvě metody měření tvrdosti). Vyhodnocení ostatních aditivních materiálů bylo provedeno stejným způsobem, jako tomu bylo u aditivního materiálu ABS a je obsaženo v přílohách. Stanovené parametry jsou názorně zobrazeny ve srovnávacích grafech všech aditivních materiálů, včetně slovního hodnocení dosažených výsledků. Na závěr práce bylo provedeno technicko-ekonomické zhodnocení dosažených výsledků.

Shrnutí dosažených výsledků:

- byly stanoveny parametry naměřených dat pro jednotlivé materiály,
- naměřená data byla porovnána s hodnotami udávanými dodavatelem (bylo-li to možné) a následně mezi sebou,
- byly stanoveny intervaly spolehlivosti,
- bylo provedeno hodnocení dosažených výsledků z technicko-ekonomického hlediska,
- byly stanoveny hodnoty struktury povrchu zkušebních vzorků,
- bylo provedeno měření rozměrové přesnosti zkušební vzorku jednotlivých aditivních materiálů.

Závěrem lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle diplomové práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 4. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-802-1440-258.
- [2] GE Additive. *What is Additive Manufacturing?* [online]. [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>
- [3] Technický týdeník. *Aditivní technologie na vlně všeobecného zájmu* [online]. 2018 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/aditivni-technologie-na-vlne-vseobecneho-zajmu_43045.html
- [4] SCULPTEO. *What is 3D Printing or Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-printing/>
- [5] The Free Beginner's Guide. *3D Printing Industry-The Authority on 3D Printing & Additive Manufacturing* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide>
- [6] 3Dnatives. *3D Printing vs CNC Machining: Which is best for prototyping?* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/>
- [7] Redshift | Exploring the Future of Making. *History of 3D Printing: It's Older Than You Think* [online]. 2014 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/redshift/history-of-3d-printing/>
- [8] SLOTA, J., M. MANTIČ a I. GAJDOŠ. *Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve*. Vyd. 1. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0548-6.
- [9] Mmspektrum. *Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
- [10] 14220.cz. *3D tisk-metody* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/3d-tisk-metody/>
- [11] 3D HUBS. *Introduction to SLA 3D Printing* [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing/#what>
- [12] CHUA, C., K. LEONG a C. LIM. *Rapid prototyping: principles and applications*. 3rd ed. New Jersey: World Scientific, 2010. ISBN 978-981-2778-970.
- [13] Formlabs. *Stereolithography 3D Printing: From the 1980s to Now* [online]. [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/>
- [14] 3D-tisk.cz. *Selective Laser Sintering* [online]. 2013 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/selective-laser-sintering/>
- [15] In. Dk metal prominent. *Přehled technologií 3D tisku: SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)*. [online]. Nový Jičín, 2018 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [16] 3D tisk v kostce. *Materialpro3d.cz* [online]. b.r. [cit. 2020-01-19]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/?gclid=Cj0KCQiAmZDxBRDIARIsABnkbYQXqkCqyexroUZION1deRGrUKRBONg_JlmKggYJRGEfEmLzrVYs9FcaAvweEALw_wcB
- [17] Manufacturing Guide. *Fused Deposition Modeling, FDM* [online]. [cit. 2020-01-19].

- Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>
- [18] BĚHÁNEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016 [cit. 2020-03-20]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [19] NDT Resource Center. *Polymers* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Introduction/polymers.htm>
- [20] LENFELD, Petr. *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/obsah_plasty.htm
- [21] Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity. *Fyzikální základy vědy o materiálu* [online]. 2013 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/fmkomplet3.htm>
- [22] PASCAULT, Jean-Pierre. *Thermosetting polymers*. New York: Dekker, 2002. ISBN 08-247-0670-6.
- [23] Modor Plastics. *Thermoset vs. Thermoplastics* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.modorplastics.com/plastics-learning-center/thermoset-vs-thermoplastics/>
- [24] BALCAROVÁ, K. MIROLUK. *Co je to filament?* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.mioluk.cz/clanky-jake-je-zakladni-rozdeleni-materialu-filamentu-pro-3d-tiskarny-a-jake-jsou-v-nich-rozdily.html>
- [25] LKE. *Mechanické vlastnosti materiálů pro 3D tisk* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.lke.cz/cz/mechanicke-vlastnosti-materialu-pro-3d-tisk/>
- [26] MAZZANTI, V., L. MALAGUTTI a F. MOLLICA. MDPI. *FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties* [online]. Italy, 2019 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2073-4360/11/7/1094/htm?fbclid=IwAR2MG1IAT9nEKaiREQaRFTQdFAk0skmSd-bqbCmFNNTpjuD25sfxI7F_OJU
- [27] Trider. *ABS plus* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://trider.cz/material/abs-plus>
- [28] Resinex. *PC/ABS - POLYKARBONÁT/AKRYLONITRIL-BUTADIÉN-STYRÉN* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html>
- [29] Materiál pro 3D. *Materiálový slovník - ASA* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/asa/>
- [30] Svět 3D tisku. *ESD PLA 3D printing filament* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://eshop.svet-3d-tisku.cz/esd/3dxstat--esd-pla-3d-printing-filament-1-75mm-1kg/>
- [31] NUTMA, Marinus. 3D Printing Media Network. *A quick guide to dimensional accuracy for 3D printing* [online]. 2019 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.3dprintingmedia.network/quick-guide-dimensional-accuracy-3d-printing/>
- [32] SCULPTEO. *3D printing tolerances: All you need to know about the Accuracy of*

- Additive Manufacturing* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/design-guidelines/3d-printing-tolerances/>
- [33] REDWOOD, Ben. 3D HUBS. *Dimensional accuracy of 3D printed parts* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/dimensional-accuracy-3d-printed-parts/#introduction>
- [34] Formlabs. *FDM vs. SLA: 2020 3D Printer Comparison Guide* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/fdm-vs-sla-compare-types-of-3d-printers/>
- [35] Formlabs. *Understanding Accuracy, Precision, and Tolerance in 3D Printing* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/understanding-accuracy-precision-tolerance-in-3d-printing/>
- [36] MACEK, K. a P. ZUNA. *Nauka o materiálu*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-010-1507-6.
- [37] WARD, I. a J. SWEENEY. *Mechanical Properties of Solid Polymers*. 3rd edition. India: Wiley, 2013. ISBN 9781444319507.
- [38] KRATOCHVÍL, B., V. ŠVORČÍK a D. VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [39] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. 1st edition. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3.
- [40] Ústav fyziky a materiálového inženýrství. *Statické zkoušky krátkodobé* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [41] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1.
- [42] POSPÍCHAL, M., V. HRUBÝ, I. DVOŘÁK, J. OULEHLA, J. KADLEC a L. BÁRTÍK. *Základy nauky o materiálu IV: Experimentální metody*. 2. vyd. rozšířené S-355/4 A. Brno: Vojenská akademie, 2002.
- [43] SOBOTOVÁ, Jana. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [44] MORAVČÍK, R., R. ČÍČKA, M. HAZLINGER, P. HVIŽDOŠ a J. JANOVEC. *Úvod do materiálového inženýrství I*. Bratislava: STU, 2015, 374 s. ISBN 978-80-227-4405-8.
- [45] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. Praha: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
- [46] SKÁLOVÁ, J., R. KOVAŘÍK a V. BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-704-3417-1.
- [47] JANČÁŘ, J. a E. NEZBEDOVÁ. *Zkoušení plastů*. První. Brno: Vysoké učení technické, 2007. ISBN 978-80-214-3452-3.
- [48] Ústav fyziky a materiálového inženýrství. *Identifikační zkoušky polymerů* [online]. b.r. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_05.pdf
- [49] ČSN EN ISO 2039-1: *Plasty - Stanovení tvrdosti - Část 1: Metoda vtlačení kuličky*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [50] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: Teorie a praxe*. Praha: Grada, 2018. ISBN

978-802-4728-186.

- [51] ČSN EN ISO 527-1: *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 1: Obecné principy*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.
- [52] ČSN EN ISO 527-2: *Plasty - Stanovení tahových vlastností: Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty*. 1. Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2012.
- [53] DOBROCKÝ, David. *ANALÝZA TEXTURY POVRCHU VZORKŮ VYROBENÝCH 3D TISKEM*. Brno: Univerzita obrany v Brně, 2019.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
2D	Dvojměrný
3D	Trojměrný
ABS	Akrylonitril-Butadien-Styren
ABS+	Akrylonitril-Butadien-Styren+
ASA	Akrylonitril – Styren – Akryl
CAD	Computer Aided Design
CO₂	Oxid uhličitý
ČSN EN ISO	Česká technická norma, zavádějící do soustavy českých norem normu evropskou, identickou s mezinárodní normou ISO
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
FDM	Fused Deposition Modeling
HRC	Tvrdost dle Rockwella
Kap.	Kapitola
Ks	Počet kusů
LOM	Laminated Object Manufacturing
MJM	Multi Jet Modeling
Obr.	Obrázek
PC/ABS	Polykarbonát/Akrylonitril-Butadien-Styren
PET-G	Polyethylentereftalát
PLA	Polylactic Acid
PLA ESD	Polylactic Acid Electrostatic Discharge
RP	Rapid Prototyping
SGC	Solid Ground Cutting
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
Tab.	Tabulka
UV	Ultrafialové záření

Symbol	Jednotka	Popis
6	[-]	Rovinnost plochy
1Do	[mm]	Vzdálenost mezi dolními děrami
1UP	[mm]	Vzdálenost mezi horními děrami
2Do	[mm]	Šířka drážky dolní pozice
2Up	[mm]	Šířka drážky horní pozice
3_1	[mm]	Šířka zkušební vzorku mezi dolními děrami, bez drážky
3_2	[mm]	Šířka zkušební vzorku mezi horními děrami, s drážkou
3_3	[mm]	Šířka zkušební vzorku bez děr, s drážkou
3_4	[mm]	Šířka zkušební vzorku bez děr, bez drážky
4L	[mm]	Hloubka zkušební tělesa bez drážky
4R	[mm]	Hloubka zkušební tělesa s drážkou
5L	[mm]	Hloubka drážky v rohu
5P	[mm]	Hloubka drážky uprostřed
At	[%]	Tažnost při přetržení
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
F	[N]	Zátěžná síla
F_{0,2}	[N]	Síla na mezi kluzu
F_c	[N]	Celkové zatížení (tvrdost kuličkou)
F_E	[N]	Síla na mezi úměrnosti (Síla na mezi kluzu)
F_m	[N]	Síla na mezi pevnosti
H	[N·mm ⁻²]	Tvrdost vtlačování kuličkou
H	[HShD]	Tvrdost Shore D
L	[mm]	Konečná délka zkušební vzorku
L₀	[mm]	Výchozí délka zkušební tyče
L_c	[mm]	Zkušební délka tyče
L_t	[mm]	Celková délka tyče
R	[MPa]	Smluvní tahové napětí
Ra	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti
R_e	[MPa]	Mez kluzu

R_{eD}	[MPa]	Dolní mez kluzu
R_{eH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní napětí na mezi kluzu
R_q	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti
R_t	[μm]	Celková výška profilu drsnosti
R_z	[μm]	Největší výška profilu drsnosti
S	[mm ²]	Aktuální průřez vzorku
S₀	[mm ²]	Průřez zkušební tyče
S_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka
S_q	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu
S_t	[μm]	Celková výška povrchu
S_u	[mm ²]	Skutečný průřez
S_z	[μm]	Výška z deseti bodů povrchu
W_a	[μm]	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
W_q	[μm]	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti
W_t	[μm]	Celková výška profilu vlnitosti
W_z	[μm]	Největší výška profilu vlnitosti
Z	[%]	Kontrakce
ΔL	[mm]	Změna délky zkušební vzorku
ΔS	[mm ²]	Rozdíl počátečního a konečného průřezu
a	[mm]	Tloušťka zkušební tyče
b	[mm]	Šířka zkušební tyče
b₁	[mm]	Šířka zúžené části
b₂	[mm]	Šířka konců
h	[mm]	Tloušťka zkušební tyče
h	[mm]	Hloubka vniknutí kuličky do materiálu
l₁	[mm]	Délka zúžené části s rovnoběžnými hranami
l₂	[mm]	Vzdálenost mezi rozšířenými částmi s rovnoběžnými hranami
l₃	[mm]	Celková délka tyče

r	[mm]	Poloměr
α	[°]	Úhel přímky s vodorovnou osou
α	[mm ⁻¹]	Alfa faktor tvrdosti
ϵ	[-]	Relativní prodloužení
σ	[MPa]	Napětí v tahu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Materiálový list pro materiál ABS
Příloha 2	Materiálový list pro materiál ABS+
Příloha 3	Materiálový list pro materiál PC/ABS
Příloha 4	Materiálový list pro materiál ASA Devil Design
Příloha 5	Materiálový list pro materiál ASA Filament Plasty Mladeč
Příloha 6	Materiálový list pro materiál ASA Fillamentum
Příloha 7	Materiálový list pro materiál PETG Filament Plasty Mladeč
Příloha 8	Materiálový list pro materiál PETG Prusament
Příloha 9	Materiálový list pro materiál PETG Spectrum
Příloha 10	Materiálový list pro materiál PLA Filament Plasty Mladeč
Příloha 11	Materiálový list pro materiál PLA Fillamentum
Příloha 12	Materiálový list pro materiál PLA Prusament
Příloha 13	Materiálový list pro materiál PLA ESD
Příloha 14	Zhodnocení materiálu ABS+
Příloha 15	Zhodnocení materiálu PC/ABS
Příloha 16	Zhodnocení materiálu ASA Devil Design
Příloha 17	Zhodnocení materiálu ASA Filament Plasty Mladeč
Příloha 18	Zhodnocení materiálu ASA Fillamentum
Příloha 19	Zhodnocení materiálu PETG Filament Plasty Mladeč
Příloha 20	Zhodnocení materiálu PETG Prusament
Příloha 21	Zhodnocení materiálu PETG Spectrum
Příloha 22	Zhodnocení materiálu PLA Filament Plasty Mladeč
Příloha 23	Zhodnocení materiálu PLA Fillamentum
Příloha 24	Zhodnocení materiálu PLA Prusament
Příloha 25	Zhodnocení materiálu PLA ESD



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:
ABS FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/abs-not-dead		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø1,75: 230 – 250 °C		Ø 2,90: 230 – 250°C
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	94 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	89 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	20 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,04 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	40 g/10 min

PŘÍLOHA 2



Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 65
43-190 Mikolow
Poland

Product card: ABS+ filament for 3D printing.

Product description: Filament ABS+ - thermoplastic product in the form of fiber, used for 3D printing using the FFF method. Filament wound on a spool, vacuum packed with a moisture absorber. The spool contains 1 kg of net material. It can be used in all FFF printers that are not protected from external suppliers and open source structures before using. ABS+ is easily machined such as grinding, drilling or smoothing, the material is soluble in acetone.

Physical properties of the product:

Diameter of filament	1.75 mm / 2.85 mm
Dimensional tolerance of filament	+/- 0.05 mm
Roundness of filament	+/- 0.02 mm
Surface of the material	Gloss
Shrinkage of the material	Large
Product weight	1.0 kg net, 1.4 kg gross
Spool - material	Transparent polycarbonate
Weight of the empty spool	~257 g
The diameter of the spool	200 mm
Width of spool	~70 mm
Diameter of mounting hole	52 mm
Packaging	Printed cardboard
Package size	~230x210x80 mm
Vacuum packing	Yes
Moisture absorber	Yes



Suggested printing parameters:

Hotend	230-240°C
Heated bed	90-100°C
Cooling the printout	Not recommended

Due to the structural differences of printers, the above figures should be considered as guidelines and the corresponding values must be determined experimentally.



Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 65
43-190 Mikołów
Poland

Physical properties of the material:

Specific Gravity	1.04 g/cm ³	ASTM D792
Vicat Softening Temperature	94°C	ASTM D1525
Flammability	HB	UL 94
Rockwell Hardness (R-Scale)	105	ASTM D785
Tensile Strength - Yield	430 kg/cm ²	ASTM D638
Tensile Elongation - Break	30%	ASTM D638

Availability of colors and diameters:

Color	Kolor	1.75	2.85
Natural	Naturalny	✓	
White	Biały	✓	✓
Vanilla	Waniliowy	✓	
Bright Yellow	Jasnożółty	✓	✓
Yellow	Żółty	✓	
Orange	Pomarańczowy	✓	
Pink	Różowy	✓	
Lilac	Włoszowy	✓	
Hot Red	Czerwien	✓	
Red	Czerwony	✓	✓
Raspberry Red	Malinowy	✓	
Pc Gray	Jasnoszary	✓	
Gray	Szary	✓	
Blue	Błękitny	✓	
Super Blue	Niebieski	✓	✓
Navy Blue	Granatowy	✓	
Violet	Fioletowy	✓	
Mint	Seledynowy	✓	
Bright Green	Jasnozielony	✓	✓
Green	Zielony	✓	
Gold	Żółty	✓	
Aluminum	Aluminiowy	✓	
Beige	Beżowy	✓	
Brown	Brązowy	✓	
Black	Czarny	✓	✓



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

PC/ABS FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polycarbonate/Acrylonitrilbutadienstyrene, petroleum product		
Diameters	1,75 mm		
Tolerance	± 0,1 mm		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pc-abs		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	240 – 260 °C		
Temperature HB	110 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PCABS Juice (blend Acetone)		
Cooling print object	NO		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	115 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	98 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	40 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	2650 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,19 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min
Flammability	Fire resistance	UL94	V0 Class

Filament-PM by Plasty Mladec, Hanovice 18, 78321, VAT: CZ00147346

Tel. +420 585 100 308, email: info@plastymladec.cz <http://www.filament-pm.com>



Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 65
43-190 Mikolow
Poland

Product card: ASA filament for 3D printing.

Product description: Filament ASA - thermoplastic plastic in the form of fiber, used for 3D printing using the FFF method. Filament wound on a spool, vacuum packed with a moisture absorber. The spool contains 1 kg of net material. It can be used in all FFF printers that are not protected from external suppliers and open source structures before using. ASA is a material with increased resistance to weather conditions and UV radiation (relative to ABS), easily subjected to mechanical treatment such as grinding or drilling, the material is soluble in acetone.

Physical properties of the product:

Diameter of filament	1.75 mm
Dimensional tolerance of filament	+/- 0.05 mm
Roundness of filament	+/- 0.02 mm
Surface of the material	Light Gloss
Shrinkage of the material	Large
Product weight	1.0 kg net, 1.36 kg gross
Spool - material	Transparent polycarbonate
Weight of the empty spool	~250 g
The diameter of the spool	200 mm
Width of spool	~70 mm
Diameter of mounting hole	52 mm
Packaging	Printed cardboard
Package size	~205x205x80 mm
Vacuum packing	Yes
Moisture absorber	Yes



Suggested printing parameters:

Hotend	230-240°C
Heated bed	90-100°C
Cooling the printout	Not recommended

Due to the structural differences of printers, the above figures should be considered as guidelines and the corresponding values must be determined experimentally.



Devil Design Sp. J.
Zwirki i Wigury 65
43-190 Mikołów
Poland

Physical properties of the material:

Specific Gravity	1.07 g/cm ³	ASTM D792
Vicat Softening Temperature	96°C	ASTM D1525
Rockwell Hardness (R-Scale)	107	ASTM D785
Tensile Strength - Yield	500 kg/cm ²	ASTM D638
Tensile Elongation - Break	20%	ASTM D638
Flammability	HB	UL 94

Availability of colors and diameters:

Color	Kolor	1.75
Natural	Naturalny	✓
Bright Orange	Jasnopomarańczowy	✓
Red	Czerwony	✓
Navy Blue	Granatowy	✓
Green	Zielony	✓
Aluminum	Aluminiowy	✓
Brown	Brązowy	✓
Black	Czarny	✓



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:

ASA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Acrylonitril styren acrylate, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,85 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,75 kg netto ± 5% / 0,9 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/asa-1-75		
Solvents	Acetone		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø1,75: 240 – 260 °C		Ø 2,90: 250 – 270°C
Temperature HB	100 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	MAX 30%		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	96 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	87 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	12 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1800 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,07 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	20 g/10 min

Datasheet



ASA Extrafill

Description:

Thanks to mechanical properties is ASA filament ideal for the production of the first samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday usage including outdoor applications.

The advantage of this material is its excellent weather resistance, high retention of physical features and low level of yellowing.

ASA has a higher rigidity than ABS and thus it is suitable for demanding applications. Another advantage is its good dimensional stability.

This material can be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances. The use of the material in the food or medical industry is not recommended.

Fillamentum guarantees precision of filament dimensions within the tolerance of $\pm 0,05$ mm, which is strictly controlled throughout the production.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,07 g/cm ³	ASTM D932	
Melt flow index	5 g/10 min		220 °C, 10 kg
Diameter tolerance	$\pm 0,05$ mm		
Weight	750 g of filament ($\approx$ 250 g spool)		
Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	40 MPa	ASTM D638	50 mm/min
Elongation at break	35 %	ASTM D638	50 mm/min
Tensile modulus	1725 MPa	ASTM D638	1 mm/min
Flexural strength	62 MPa	ASTM D790	at yield, 15 mm/min
Flexural modulus	1814 MPa	ASTM D790	15 mm/min
Izod impact strength	441 J/m	ASTM D256	23 °C, 1/8"
Rockwell hardness	92	ASTM D785	R-Scale
Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Heat distortion temperature	86 °C	ASTM D648	1,8 MPa
	96 °C	ASTM D648	0,45 MPa
Vicat softening temperature	94 °C	ASTM D1525	50 °C/h, 5 kg
Printing properties	Recommended	Notes	
Print temperature	240-255 °C	Recommended settings! it may differ according to the printer and the object.	
Hot pad	90-105 °C	Try your own settings before printing.	
Bed adhesive	3Dlac, glue stick		

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Minu 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:
PETG FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	Polyetylentefthalat - polyester, petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/petg		
Solvents	Acetaldehyde, benzene		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø 1,75: 220 – 250 °C		Ø 2,90: 230 – 260°C
Temperature HB	60 - 80 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	85 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	70 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	11 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	1880 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,27 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	11 g/10 min

TECHNICKÝ LIST

Prusament PETG od Prusa Polymers



PETG je jedním z nejčastěji používaných vláken. Je to skvělá volba pro tisk mechanicky namáhaných dílů. Oproti PLA je odolnější vůči teplu, je pružnější a méně křehký.

UŽITÍ: Typickým použitím PETG je tisk funkčních a mechanických částí. Díky dobré přilnavosti vrstev je vhodný i pro vodotěsné tisky.

NEVHODNÉ PRO: Nevhodné pro malé součásti

OPRACOVÁNÍ: Pro opracování výtisků z PETG je možné použít suché i mokré broušení.

IDENTIFIKACE:

Jméno výrobku	Prusament PETG
Chemický název	kopolyester
Použití	FDM 3D tisk
Průměr	1,75 ± 0,02 mm
Výrobce	Prusa Polymers, Praha, Česká republika

DOPORUČENÉ NASTAVENÍ TISKU:

Teplota trysky [°C]	250 ± 10
Teplota vyhřívané podložky [°C]	80 ± 10
Rychlost tisku [mm / s]	až 200

TYPICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU:

Fyzikální vlastnosti	Typická hodnota	Metoda
Hustota [g / cm ³]	1,27	ISO 1183
Absorpce vlhkosti 24 hodin [%] (1)	0,2	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 7 dní [%] (1)	0,3	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 4 týdny [%] (1)	0,3	Prusa Polymers
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPa) [° C]	68	ISO 75
Napětí na mezi kluzu pro filament [MPa]	46 ± 1	ISO 527

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYTÍŠTĚNÝCH TESTOVACÍCH VZORKŮ (2):

Vlastnosti / směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Napětí na mezi kluzu [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	ISO 527-1
Modul pružnosti v tahu [GPa]	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (3) [kJ / m ²]	NB. (C) (4)	NB. (4)	5 ± 1	ISO 179-1

(1) 30 ° C; vlhkost 30%

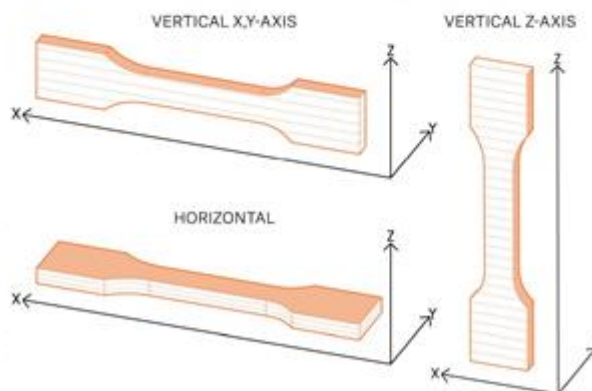
(2) K výrobě zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 byl použit k vytvoření G-codů s následujícím nastavením: Prusa PETG Filament; Nastavení tisku 0,20 mm SPEED (vrstvy 0,2 mm); plně vrstvy Horní: 0 Spodní: 0; Výplň 100% přímočará, rychlost výplně 100 mm / s; extruzní multiplikátor 1,07; teplota extruderu 260 °C na všechny vrstvy; teplota vyhřívané podložky 90 °C na všechny vrstvy; ostatní parametry nastaveny jako výchozí

(3) Charpy bezvrubový - směr úderu ve směru hrany podle ISO 179-1

(4) NB. (No Break - Bez přerušení); C (complete break - úplné přerušení) v závorkách druhý nejčastější typ selhání > 1/3

Vyloučení odpovědnosti

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je potřeba individuálně zvážit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers nemůže nést žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers.





Technical Data Sheet

Spectrum Filaments Basic PET-G

Identification	
Trade name	Basic PET-G
Chemical name	Polyethylene terephthalate glycol-modified
Use	Additive Manufacturing
Origin	Spectrum Group Sp. z o.o.

Filament Specification	
Diameter 1.75	1.75 ± 0.05 mm
Diameter 2.85	2.85 ± 0.05 mm
"Verify your spool" option	YES

Material properties		
Melt Flow Index	11 g/10 min	ISO 1133
Melting point	> 220°C	-
Density	1.27 g/cm ³	ASTM D792
Vicat softening temperature	85°C	ISO 306
Heat deflection temperature	70°C	ISO 75
Water solubility	insoluble	-
Odor	odorless	-

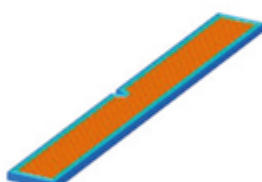
Guideline for print settings*	
Nozzle temperature	230-255°C
Bed temperature	60-80°C
Active cooling fan	YES (up to 100%)
Layer height**	0.08 - 0.30 mm
Shell thickness**	0.40 – 2.4 mm
Print speed**	40 – 120 mm/s

*Settings are based on a 0,4 mm nozzle.

** The range depends on the geometrical complexity



Mechanical properties	Tensile test		Test Method ASTM D638	
	Printed vertical (Z-axis)		Printed horizontal (X, Y-axis)	
Infill	50 %	100 %	50 %	100 %
Tensile strength (MPa)	11,5	15,9	18,7	27,1
Force at break (MPa)	11,5	15,9	17,2	25,2
Elongation at max force (%)	0,04	4,7	10,5	11,0
Elongation at break (%)	0,04	4,7	9,6	9,5
Emodulus (MPa)	283,9	341,7	266,5	360,4
All specimens were printed using the BLIXET B100 Multi 3D printer using following parameters: Nozzle temperature: 240°C Bed temperature: 80°C Printing speed: 45mm/s Number of shells: 4 Infill type: lattice Infill under: 45°				
				

Mechanical properties	Impact test		Test Method ISO 179	
	Charpy - Printed vertical (Z-axis)		Charpy - Printed horizontal (X, Y-axis)	
Infill	50%	100%	50%	100%
Impact strength (J/cm ²)	1,13	1,25	1,43	1,94
Impact energy (mJ)	500	566	566	766
All specimens were printed using the BLIXET B100 Multi 3D printer using following parameters: Nozzle temperature: 240°C Bed temperature: 80°C Printing speed: 45mm/s Number of shells: 4 Infill type: lattice Infill under: 45°				
				



TECHNICAL DATA SHEET FOR PRODUCT:
PLA FILAMENT

Use	is a material for the FDM (FFF) 3D printing additive technology		
Material	polylactid acid by NatureWork, biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 or 2,90 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	0,5 kg netto ± 5% / 0,7 kg brutto ± 5%		
	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
	2,0 kg netto ± 5% / 2,4 kg brutto ± 5%		
Packing	spool in Vacuum ZIP bag, inserting to paper box, all in LDPE foil		
Colours	views on web https://www.filament-pm.com/pla		
Solvents	1,2 Dichloroethane, Toluene, Tetrahydrofuran,		
Printing Properties:			
Temperature HE	Ø 1,75: 200 – 220 °C		Ø 2,90: 210 – 230°C
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Cooling print object	YES		
Nozzle	All diameters / for glitter using nozzle min 0,5 mm and more		
Printer space	Open / Close		
Material Properties:			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	16 kJ/m²
	flexural modulus	ISO 178	3500 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,24 g/cm³
	Melt Flow Index	ISO 1133	6 g/10 min

Datasheet



PLA Extrafill

Description:

Fillamentum PLA Extrafill is a material for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.

The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.

PLA filament is made of natural ingredients and is easily biodegradable by composting. It complies with the requirements for food contact.

The material may be used for production of electrical and electronic equipment. It doesn't contain the restricted substances.

Fillamentum guarantees high precision of filament dimensions within the tolerance of $\pm 0,05$ mm, which is strictly controlled throughout the production.

Printing filaments reported on the marked under the trademark Fillamentum are produced in a wide variety of colours in accordance with the colour charts RAL and Pantone, and also in own unique colour ranges.



Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,24 g/cm ³	ASTM D792	
Melt flow index	6 g/10 min	ASTM D1238	210 °C, 2,16 kg
Diameter tolerance	$\pm 0,05$ mm		
Weight	750 g of filament (≈ 250 g spool)		
Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	60 MPa	ASTM D882	at yield
	62 MPa	ASTM D882	at break
Elongation at break	6 %	ASTM D882	
Tensile modulus	3500 MPa	ASTM D882	
Flexural strength	63 MPa	ASTM D790	
Flexural modulus	3800 MPa	ASTM D790	
Izod impact strength	16 J/m	ASTM D256	23 °C, notched
Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Glass transition temperature	55-60 °C	ASTM D3418	
Heat distortion temperature	55 °C	ASTM E2092	0,45 MPa
Printing properties	Recommended	Notes	
Print temperature	190-210 °C	Recommended settings!	
Hot bed	60-60 °C	it may differ according to the printer and the object, try your own settings before printing.	
Bed adhesive	Magigoo		

Workability of 3D printing filament is at least 12 months from delivery.

The information was processed with the best knowledge of the manufacturer and it is for information only.

Fillamentum Manufacturing Czech s.r.o.
nam. Míru 1217, 768 24 Hulín
Czech Republic

(+420) 720 060 947
helpdesk@fillamentum.com
www.fillamentum.com

Verze: 1.0

Poslední aktualizace: 20-09-2018

TECHNICKÝ LIST

Prusament PLA od Prusa Polymers



PLA je nejčastěji používaný filament. Je biologicky rozložitelný, snadno se tiskne a je velmi silný. Skvělá volba pro tisk velkých objektů díky nízké tepelné roztažnosti (malá až žádná deformace) a pro tisk drobných součástí díky nízké teplotě tání.

UŽITÍ Koncepty, funkční prototypy, hračky s nízkým opotřebením atd.

NENÍ VHODNÝ PRO: Dlouhodobé venkovní použití kvůli nízké teplotní odolnosti (do 60 °C).

OPRACOVÁNÍ: Mokrý broušení. Bez vody budete rychle zahřívát plast třením, lokálně se roztaví a bude obtížné pokračovat v broušení.

IDENTIFIKACE:

Jméno výrobku	Prusament PLA
Chemický název	Kyselina polymléčná
Použití	FDM 3D tisk
Výrobce	Prusa Polymers, Praha, Česká republika

DOPORUČENÉ NASTAVENÍ TISKU:

Teplota trysek [°C]	210 ± 10
Teplota vyhřívání podložky [°C]	40-60
Rychlost tisku [mm / s]	až 200

TYPICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLU:

Fyzikální vlastnosti	Typická hodnota	Metoda
Teplota tání [°C]	145-160	ISO 11357
Teplota skelného přechodu [°C]	55-60	ISO 11357
MFR [g / 10 min] (1)	10,4	ISO 1133
MVR [cm ³ /10 min] (1)	9,4	ISO 1133
Hustota [g / cm ³]	1,24	ISO 1183
Absorpce vlhkosti 24 hodin [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 7 dní [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Absorpce vlhkosti 4 týdny [%] (2)	0,3	Prusa Polymers
Teplota tvarové stálosti (0,45 MPa) [°C]	55	ISO 75
Napětí na mezi kluzu pro filament [MPa]	57,4 ± 0,4	ISO 527-1

MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYTÍŠTĚNÝCH TESTOVACÍCH VZORKŮ (3):

Vlastnosti / směr tisku	Horizontální	Vertikální X, osa Y	Vertikální osa Z	Metoda
Modul pružnosti v tahu [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	ISO 527-1
Napětí na mezi kluzu [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	ISO 527-1
Prodloužení na mezi kluzu [%]	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	ISO 527-1
Rázová houževnatost Charpy (4) [kJ / m ²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	ISO 179-1

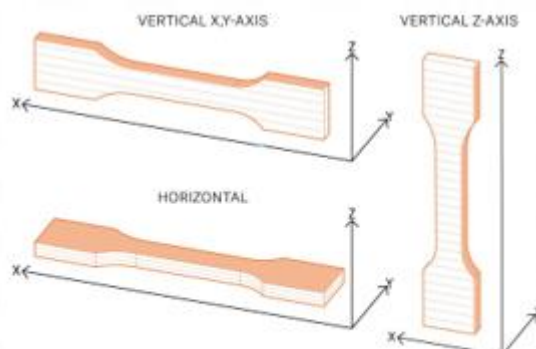
(1) 2,16 kg; 210 ° C |

(2) 28 ° C; vlhkost 37%

(3) K tisku zkušebních vzorků byla použita 3D tiskárna Original Prusa i3 MK3. Slic3r Prusa Edition 1.40.0 byl použit k vytvoření G-kódů s následujícím nastavením: Prusa PLA Filament; Nastavení tisku 0,20 mm SPEED (vrstvy 0,2 mm); plně vrstvy Horní: 0 Spodní: 0; Výplň 100% přímočará, rychlost výplně 200 mm / s; teplota extruderu 215 ° C všechny vrstvy; teplota podložky 60 ° C pro všechny vrstvy; ostatní parametry nastavené na výchozí | (4) Charpy bezvroubkový, směr úderu po hraně podle ISO 179-1

Vyloučení odpovědnosti

Výsledky uvedené v tomto datovém listu jsou pouze pro vaši informaci a srovnání. Hodnoty výrazně závisí na nastavení tisku, zkušenostech obsluhy a okolních podmínkách. Je potřeba individuálně zvážit vhodnost a možné důsledky použití tištěných dílů. Prusa Polymers nemůže nést žádnou odpovědnost za zranění nebo ztráty způsobené použitím materiálu Prusa Polymers.





TDS Rev 3.0

Technical Data Sheet: 3DXSTAT™ ESD-PLA 3D Printing Filament

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.26

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	55
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	2560
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	10
Flexural Strength	ISO 178	MPa	95
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	2980

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC	°C	60
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	55

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	$>10^7 - 10^9 <$

Printed Specimen Conditions
Printer: Open Source FDM/FFF
Nozzle: 0.4mm
Layer Height: 0.25mm
Infill: 100%, +/- 45°
Extrusion Temp: 210°C
Bed Temp: 23°C
Specimen Orientation: XY Flat

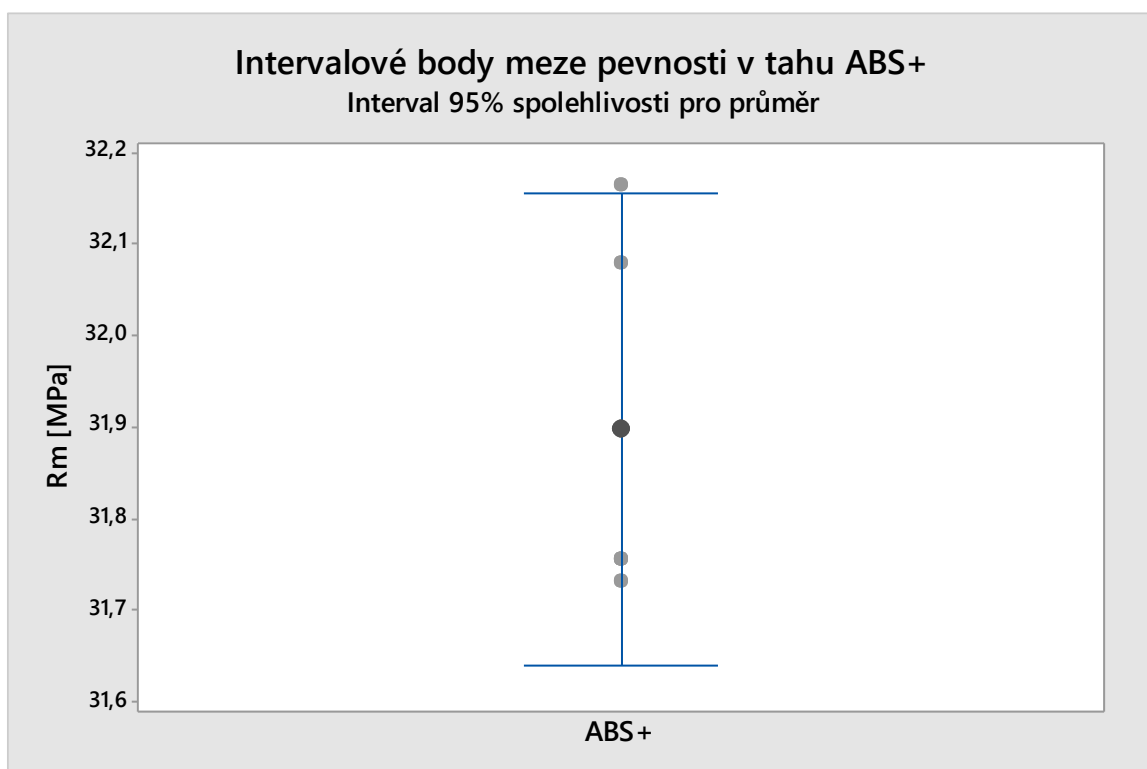
www.3dxttech.com

Disclaimer: The technical data contained on this data sheet is furnished without charge or obligation and accepted at the recipient's sole risk. This data should not be used to establish specifications limits or used alone as the basis of design. The data provided is not intended to substitute any testing that may be required to determine fitness for any specific use.

PŘÍLOHA 14

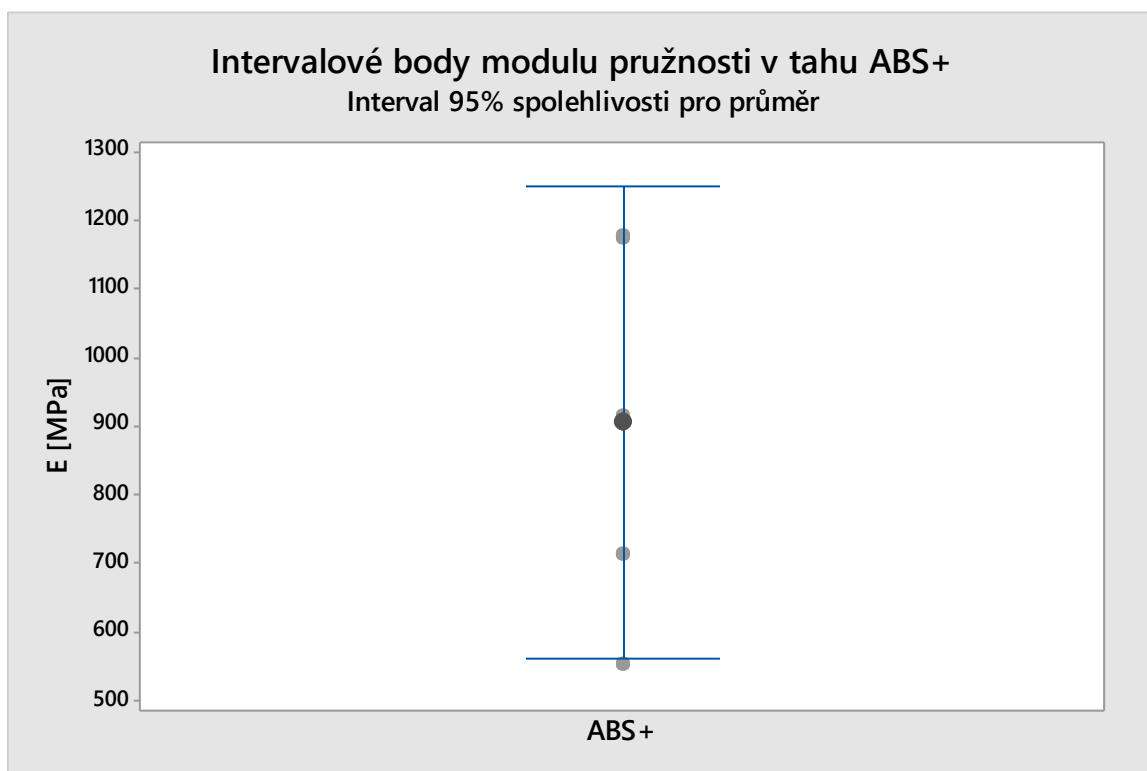
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS+

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	31,8973 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,0928	
Směrodatná odchylka	0,2074	
Medián	31,7562 MPa	
Minimum	31,7322 MPa	
Maximum	32,1653 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,0540	
Interval spolehlivosti	31,64 MPa	32,15 MPa



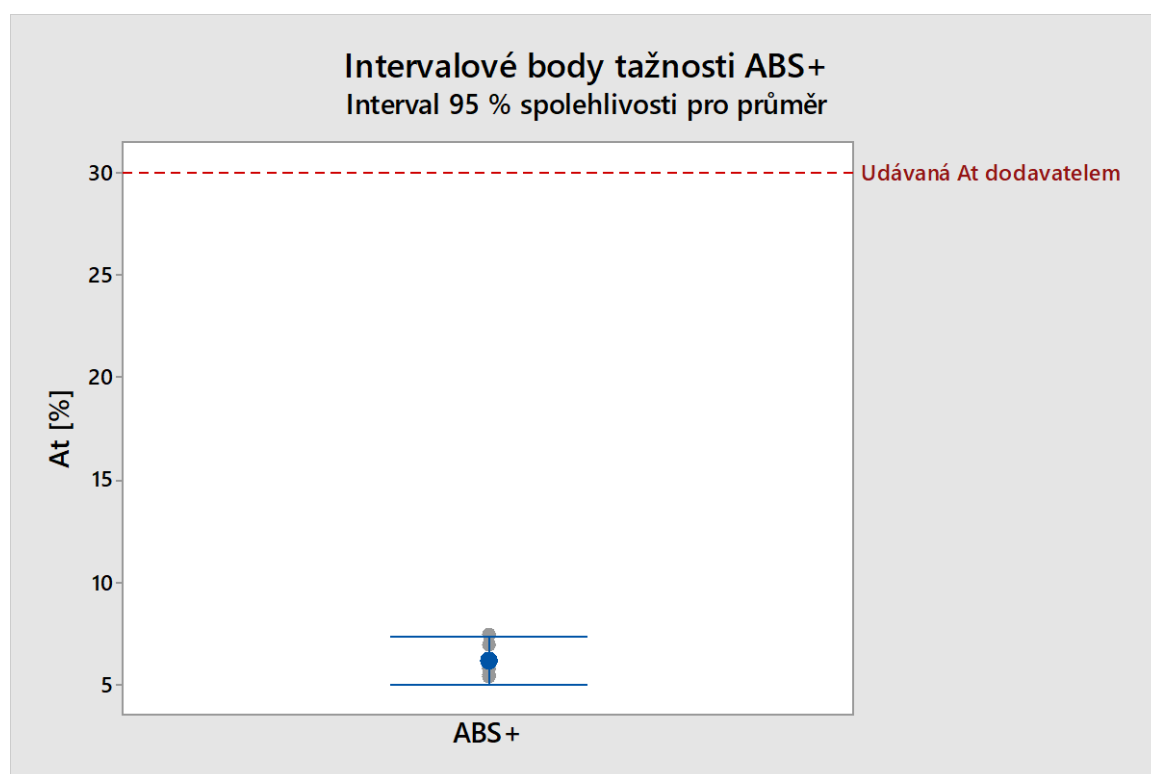
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ABS+

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	906,5311 MPa	
Chyba střední hodnoty	124,0243	
Směrodatná odchylka	277,3268	
Medián	913,4996 MPa	
Minimum	553,6233 MPa	
Maximum	1177,6034 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4480	
Interval spolehlivosti	562,00 MPa	1251,00 MPa



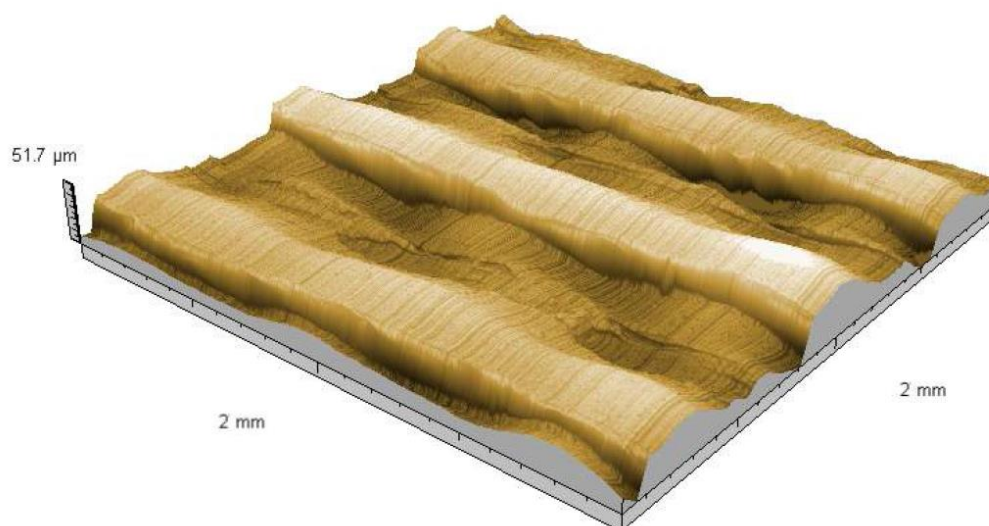
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu ABS+

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	6,1952 %	
Chyba střední hodnoty	0,4162	
Směrodatná odchylka	0,9306	
Medián	5,7888 %	
Minimum	5,3668 %	
Maximum	7,4426 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2390	
Interval spolehlivosti	5,04 %	7,35 %

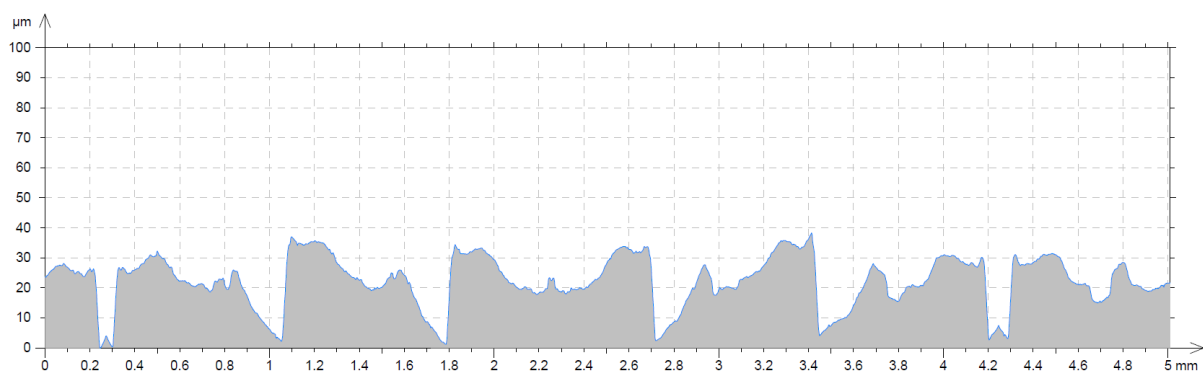


Parametry textury povrchu aditivního materiálu ABS+

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	10,3
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	11,9
St	Celková výška povrchu	51,8
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	49,1

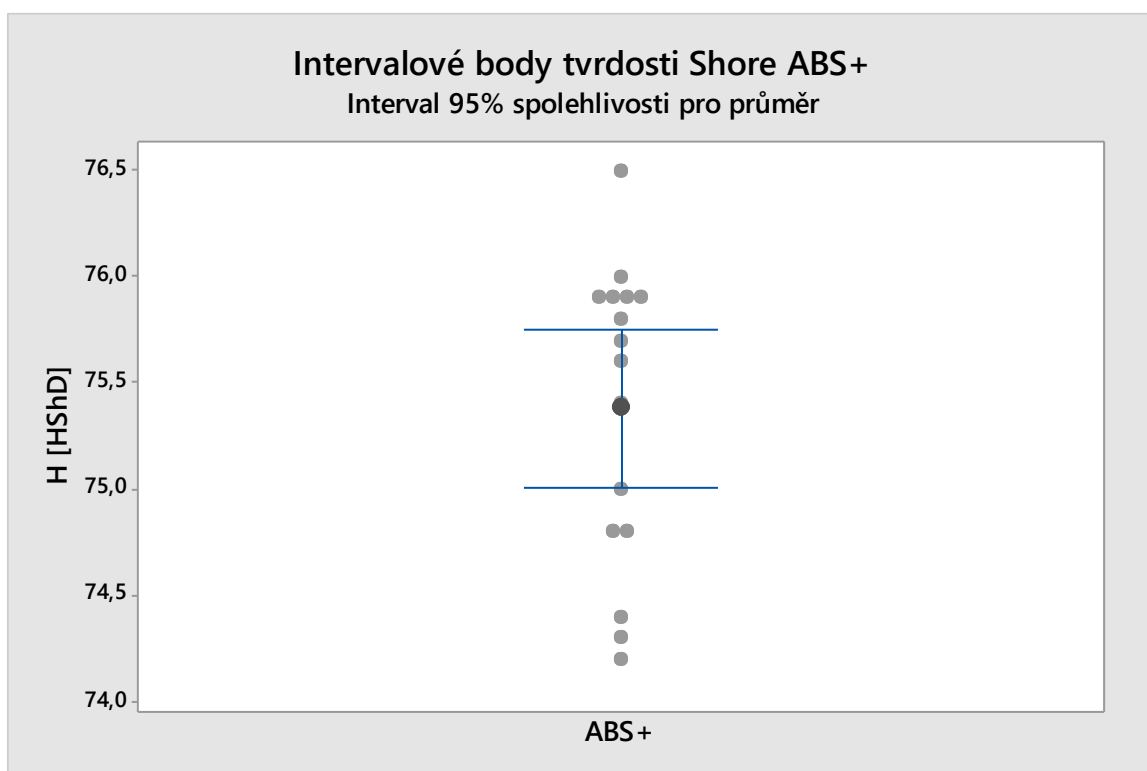


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	5,81
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	7,38
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	36,1
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	30,7
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,95
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	22,26
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	8,61
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	7,3



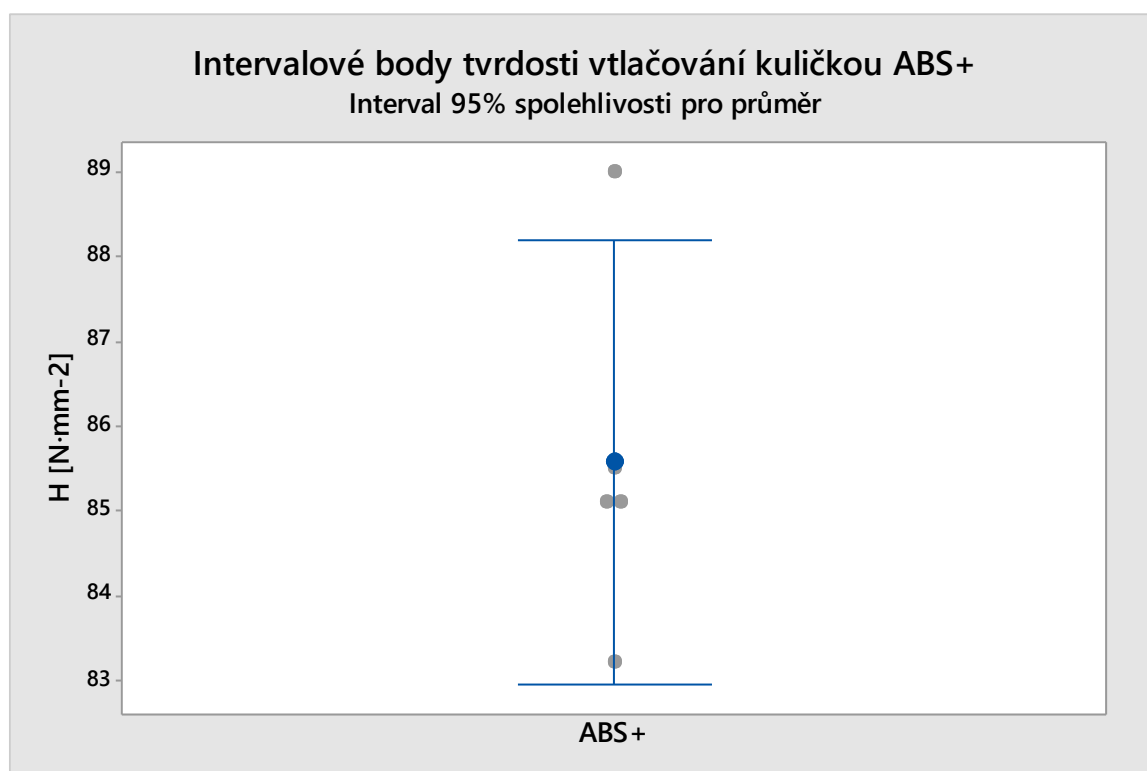
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ABS+

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	75,3813 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,1754	
Směrodatná odchylka	0,7016	
Medián	75,6500 HShD	
Minimum	74,2000 HShD	
Maximum	76,5000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,0580	
Interval spolehlivosti	75,01 HShD	75,76 HShD



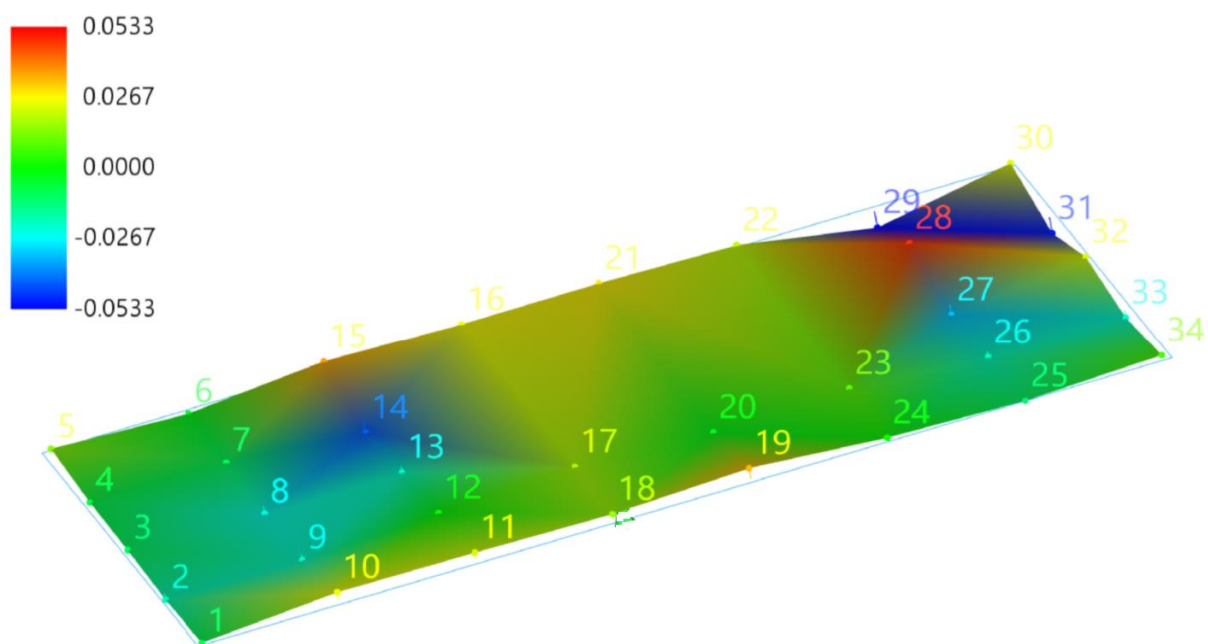
Statistické zhodnocení tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu ABS+

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	85,5800 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	0,9441	
Směrodatná odchylka	2,1112	
Medián	85,1000 N·mm ⁻²	
Minimum	83,2000 N·mm ⁻²	
Maximum	89,0000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1510	
Interval spolehlivosti	82,96 N·mm ⁻²	88,20 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu ABS+

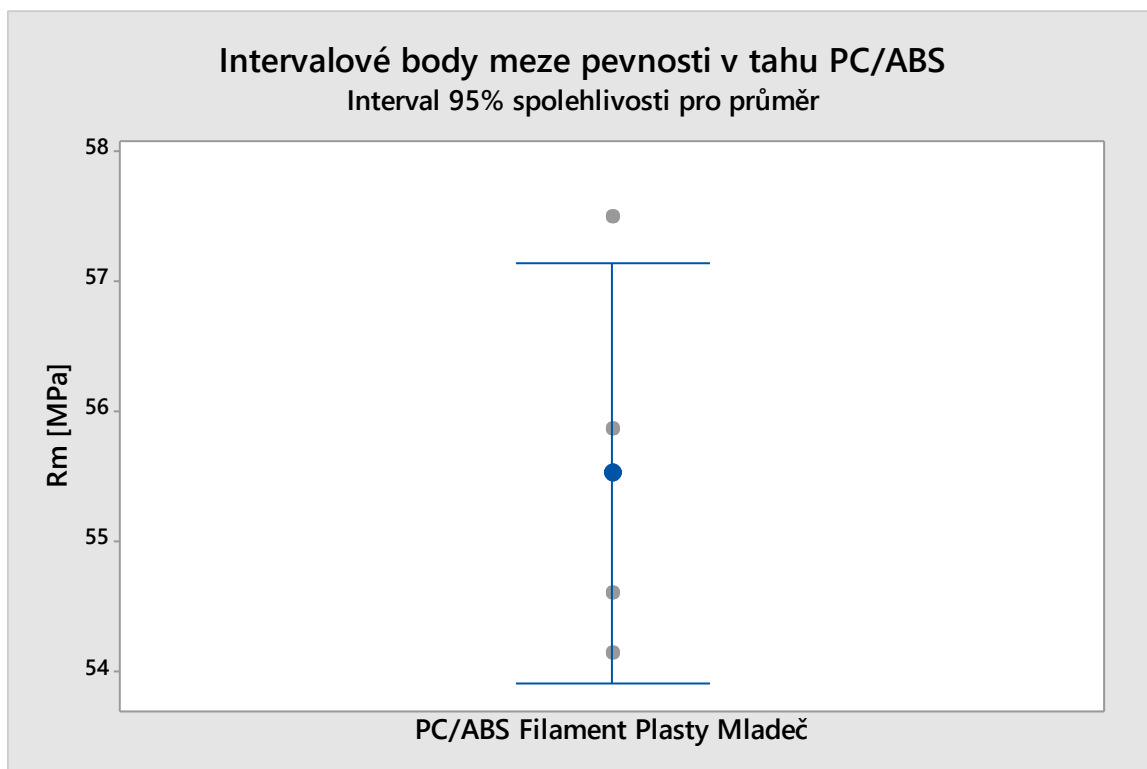
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměr [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,548	-0,452	-452
1Up	65,0	±0,1	64,519	-0,481	-481
2Do	40,0	±0,1	39,817	-0,183	-183
2Up	40,0	±0,1	39,819	-0,181	-181
3_1	80,0	±0,1	79,558	-0,442	-442
3_2	80,0	±0,1	79,541	-0,459	-459
3_3	80,0	±0,1	79,521	-0,479	-479
3_4	80,0	±0,1	79,514	-0,486	-486
4L	40,0	±0,1	39,853	-0,147	-147
4R	40,0	±0,1	39,838	-0,162	-162
5L	20,0	±0,1	19,870	-0,130	-130
5R	20,0	±0,1	19,871	-0,129	-129
6	0,1	±0,1	0,097	0,097	97



PŘÍLOHA 15

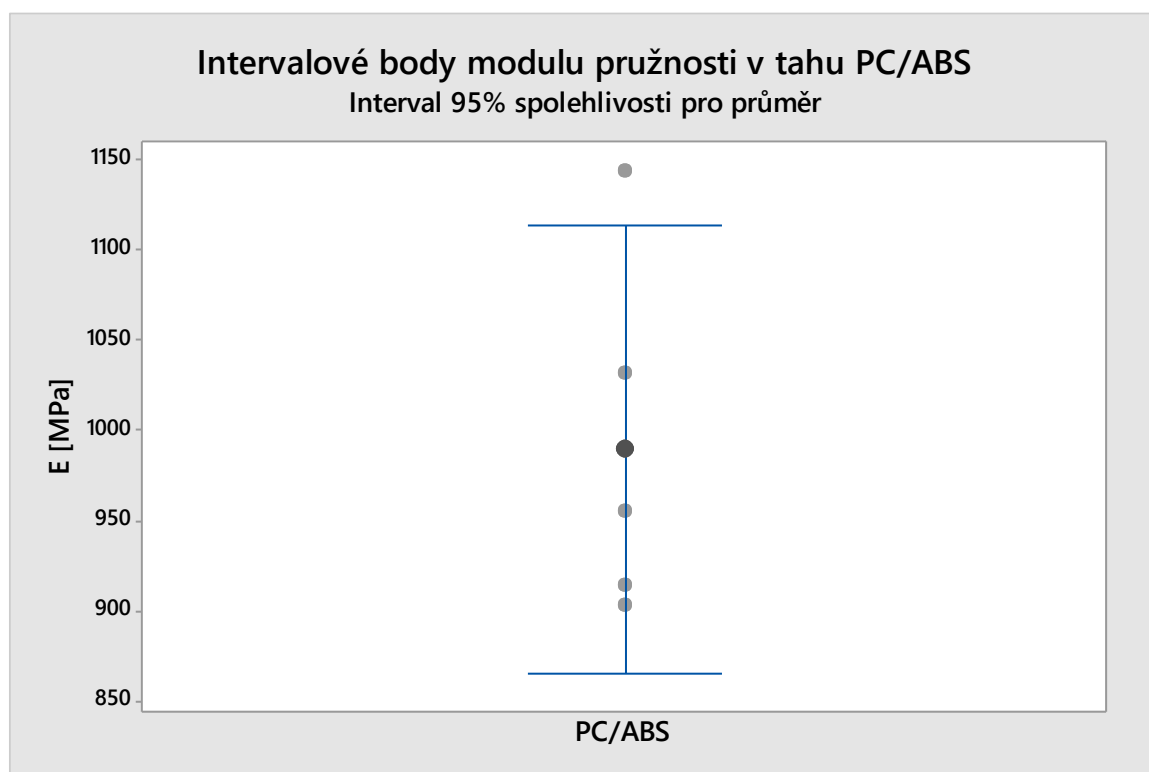
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PC/ABS

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	55,5173 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,5823	
Směrodatná odchylka	1,3020	
Medián	55,5087 MPa	
Minimum	54,1331 MPa	
Maximum	57,4931 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,6460	
Interval spolehlivosti	53,90 MPa	57,13 MPa



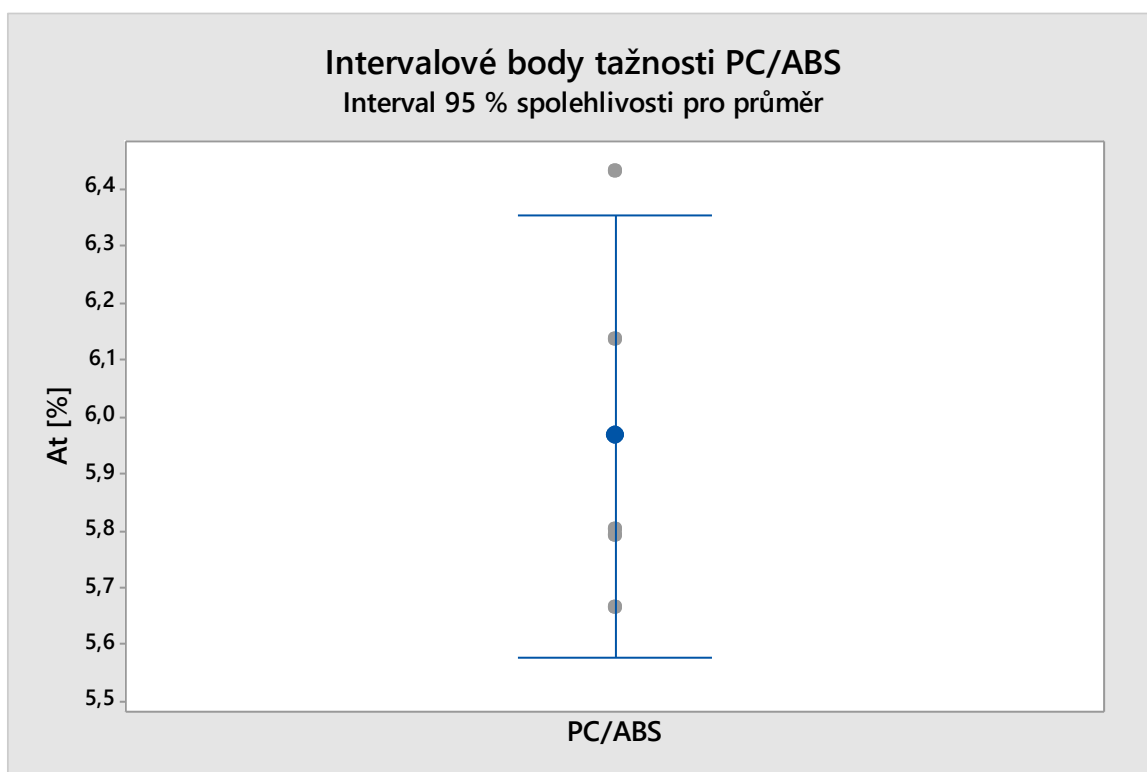
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PC/ABS

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	989,7384 MPa	
Chyba střední hodnoty	44,6815	
Směrodatná odchylka	99,9109	
Medián	955,0373 MPa	
Minimum	903,0957 MPa	
Maximum	1143,8642 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3480	
Interval spolehlivosti	865,70 MPa	1113,8 MPa



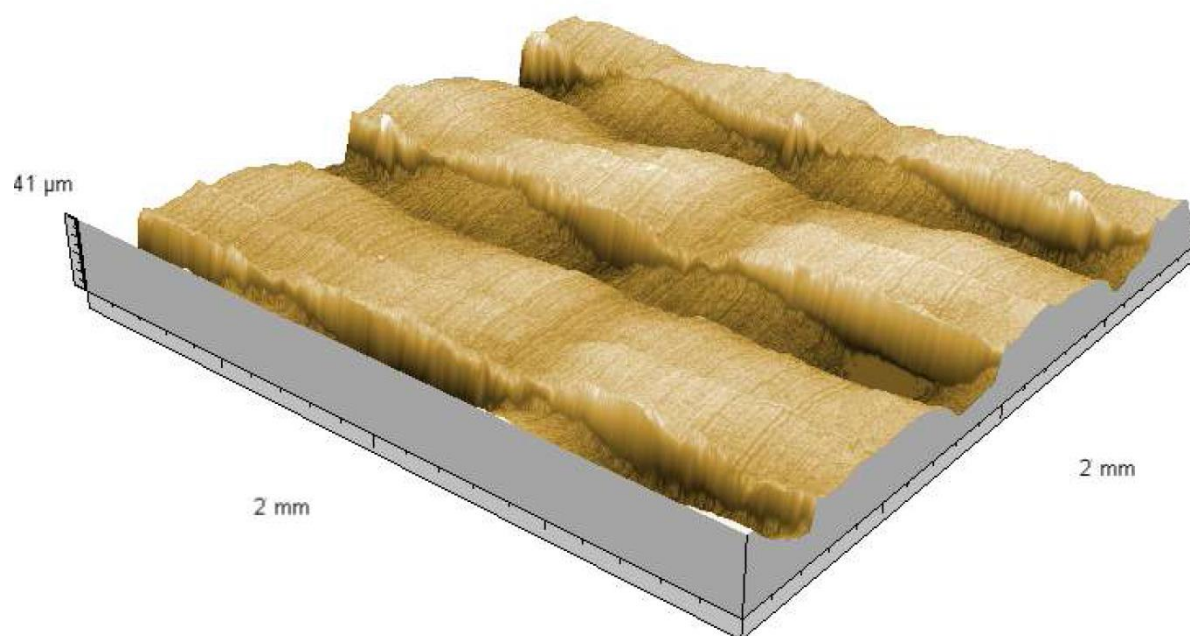
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PC/ABS

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	5,9671 %	
Chyba střední hodnoty	0,1403	
Směrodatná odchylka	0,3136	
Medián	5,8039 %	
Minimum	5,6671 %	
Maximum	6,4338 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2910	
Interval spolehlivosti	5,58 %	6,36 %

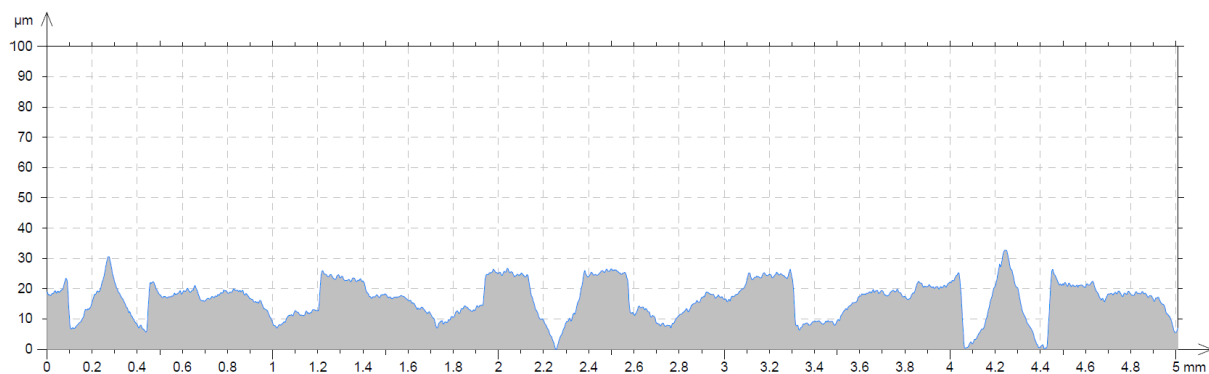


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PC/ABS

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	10,3
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	11,9
St	Celková výška povrchu	51,8
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	49,1

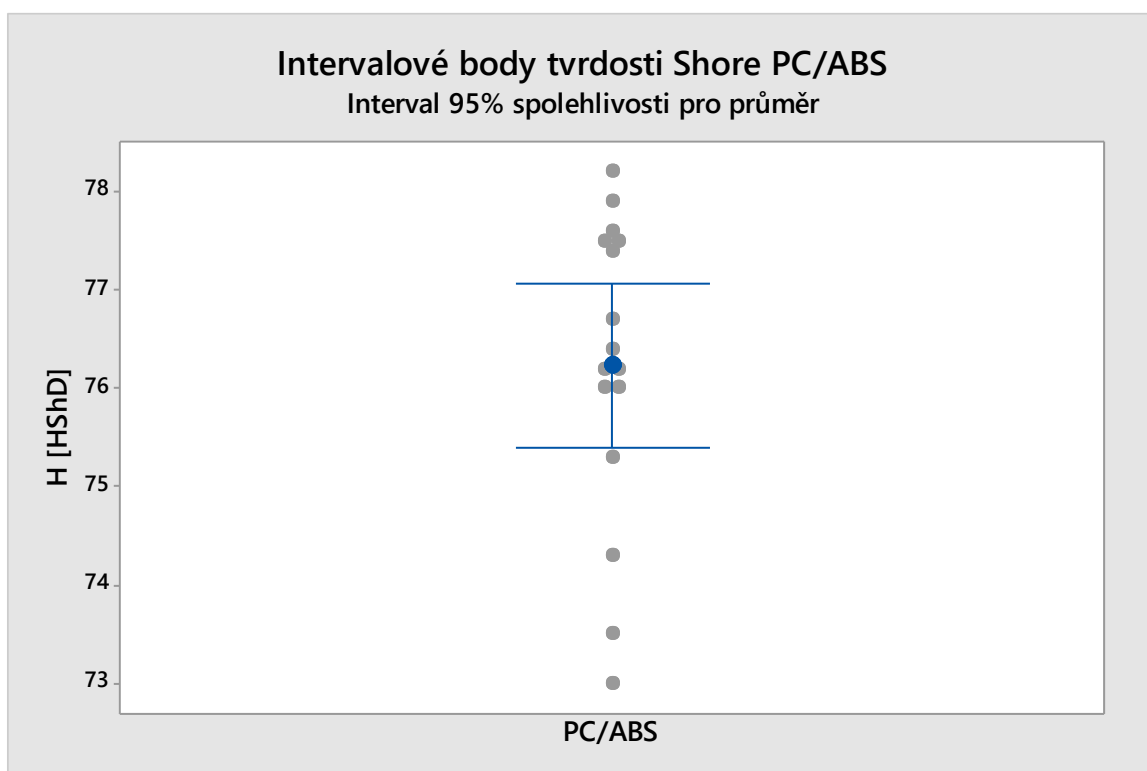


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	4,32
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	5,32
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	33
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	21,9
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,28
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1,46
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	5,72
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	4,23



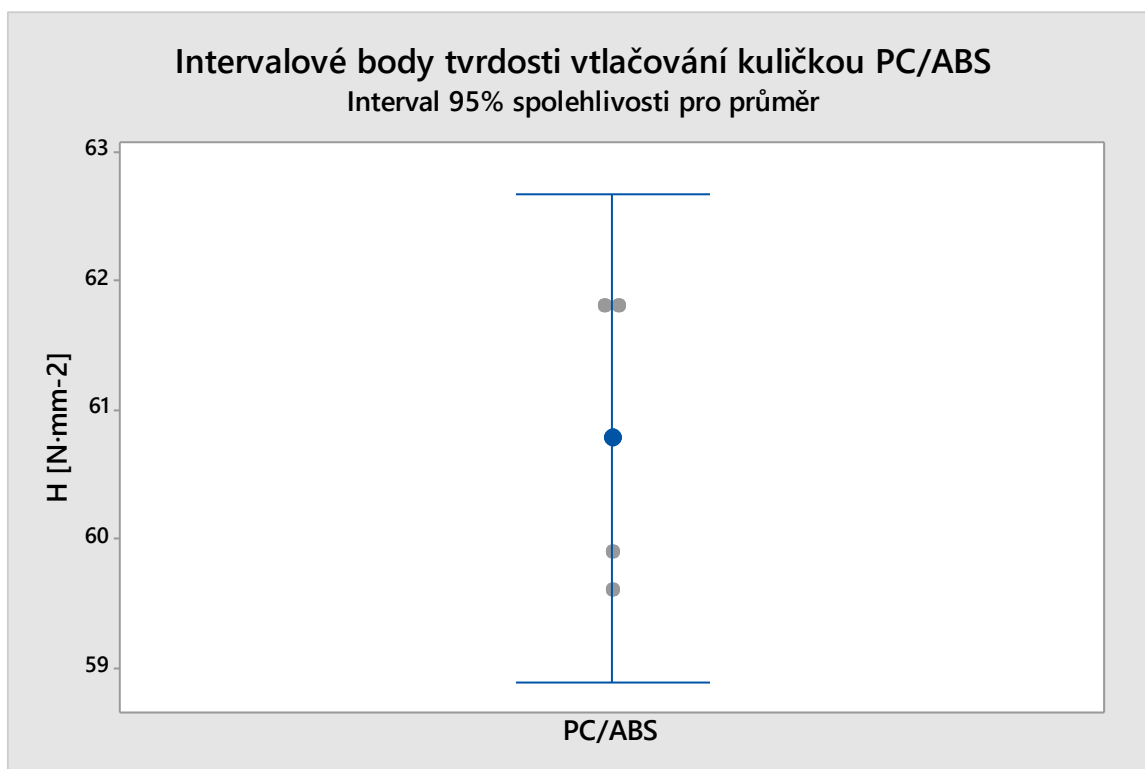
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu materiálu PC/ABS

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	76,2313 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,3872	
Směrodatná odchylka	1,5486	
Medián	76,3000 HShD	
Minimum	73,0000 HShD	
Maximum	78,2000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1350	
Interval spolehlivosti	75,41 HShD	77,06 HShD



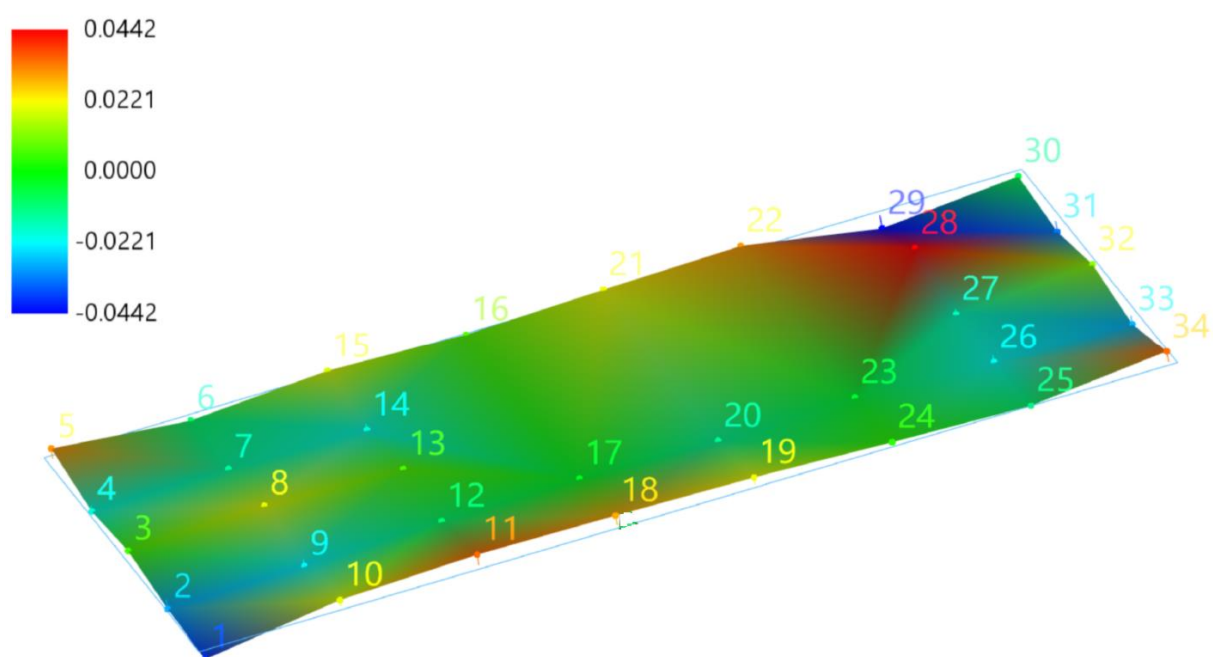
Statistické zhodnocení tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PC/ABS

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	60,7750 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	0,5949	
Směrodatná odchylka	1,1899	
Medián	60,8500 N·mm ⁻²	
Minimum	59,6000 N·mm ⁻²	
Maximum	61,8000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,0980	
Interval spolehlivosti	58,88 N·mm ⁻²	62,67 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PC/ABS

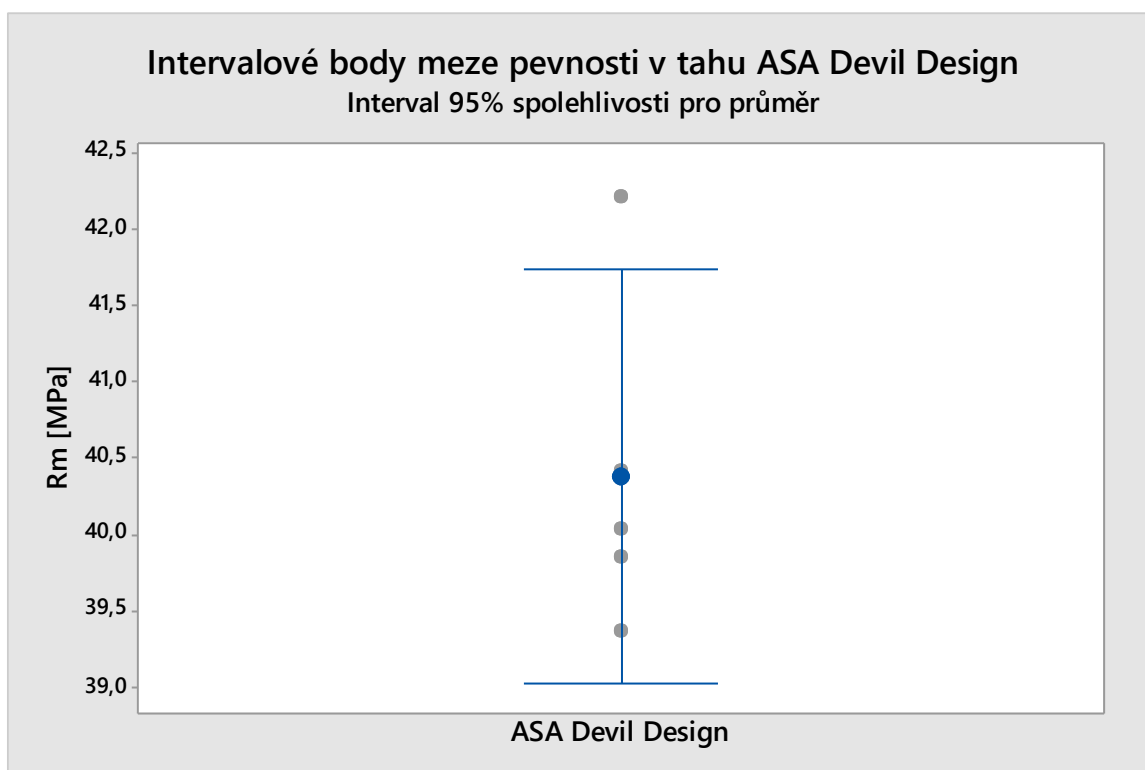
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměr [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,537	-0,463	-463
1Up	65,0	±0,1	64,551	-0,449	-449
2Do	40,0	±0,1	39,826	-0,174	-174
2Up	40,0	±0,1	39,804	-0,196	-196
3_1	80,0	±0,1	79,585	-0,415	-415
3_2	80,0	±0,1	79,573	-0,427	-427
3_3	80,0	±0,1	79,551	-0,449	-449
3_4	80,0	±0,1	79,560	-0,440	-440
4L	40,0	±0,1	39,825	-0,175	-175
4R	40,0	±0,1	39,818	-0,182	-182
5L	20,0	±0,1	19,931	-0,069	-69
5R	20,0	±0,1	19,924	-0,076	-76
6	0,1	±0,1	0,084	0,084	84



PŘÍLOHA 16

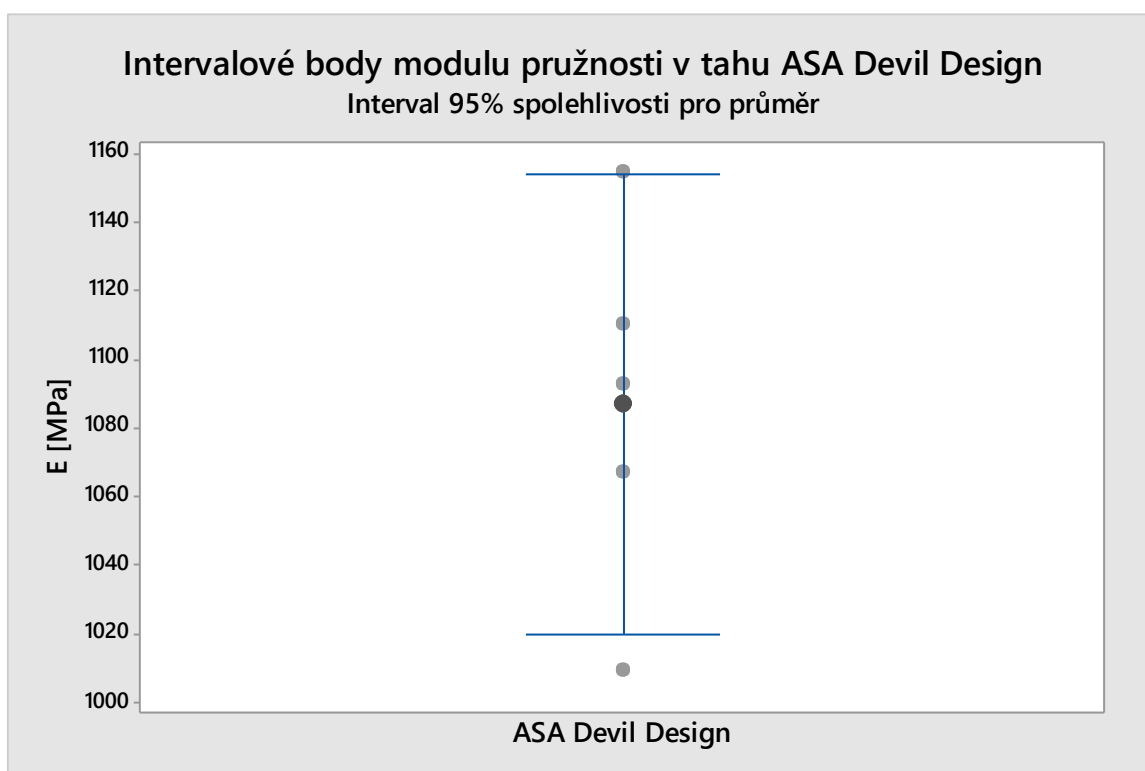
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	40,3760 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,4890	
Směrodatná odchylka	1,0935	
Medián	40,0381 MPa	
Minimum	39,3697 MPa	
Maximum	42,2126 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,170	
Interval spolehlivosti	39,02 MPa	41,73 MPa



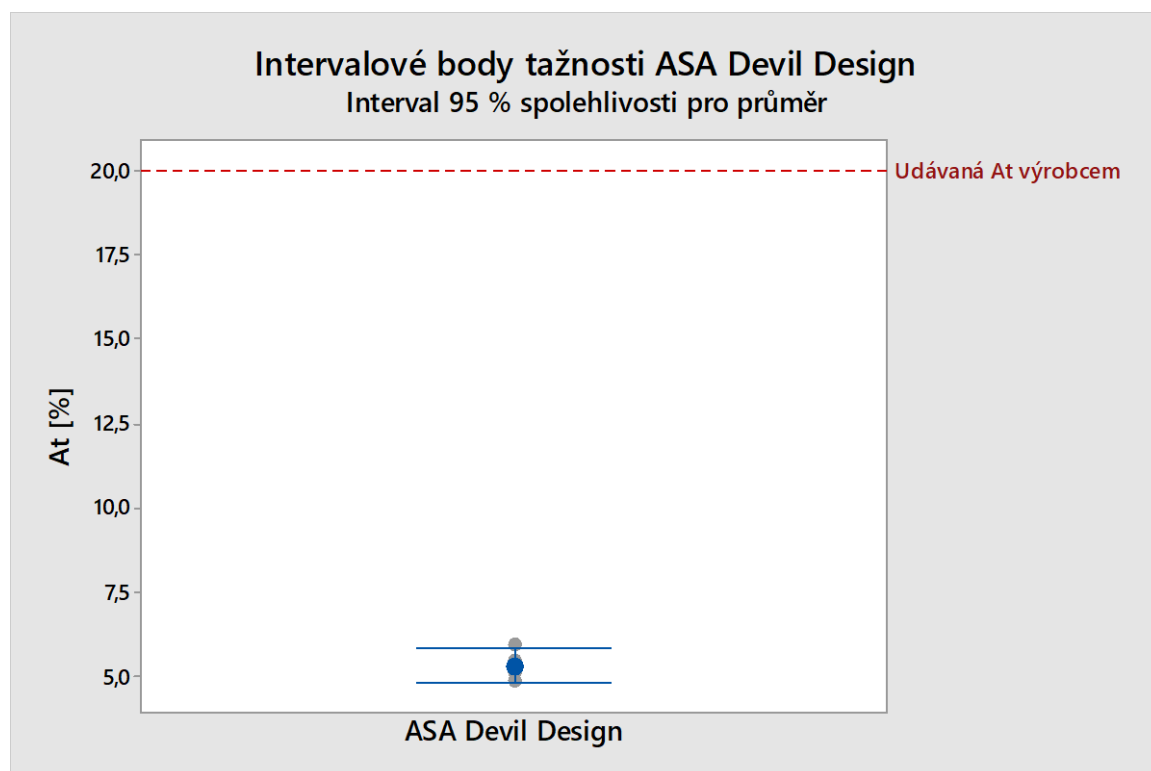
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1086,9808 MPa	
Chyba střední hodnoty	24,1364	
Směrodatná odchylka	53,9705	
Medián	1093,0693 MPa	
Minimum	1009,0620 MPa	
Maximum	1154,8694 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8680	
Interval spolehlivosti	1020,00 MPa	1154,00 MPa



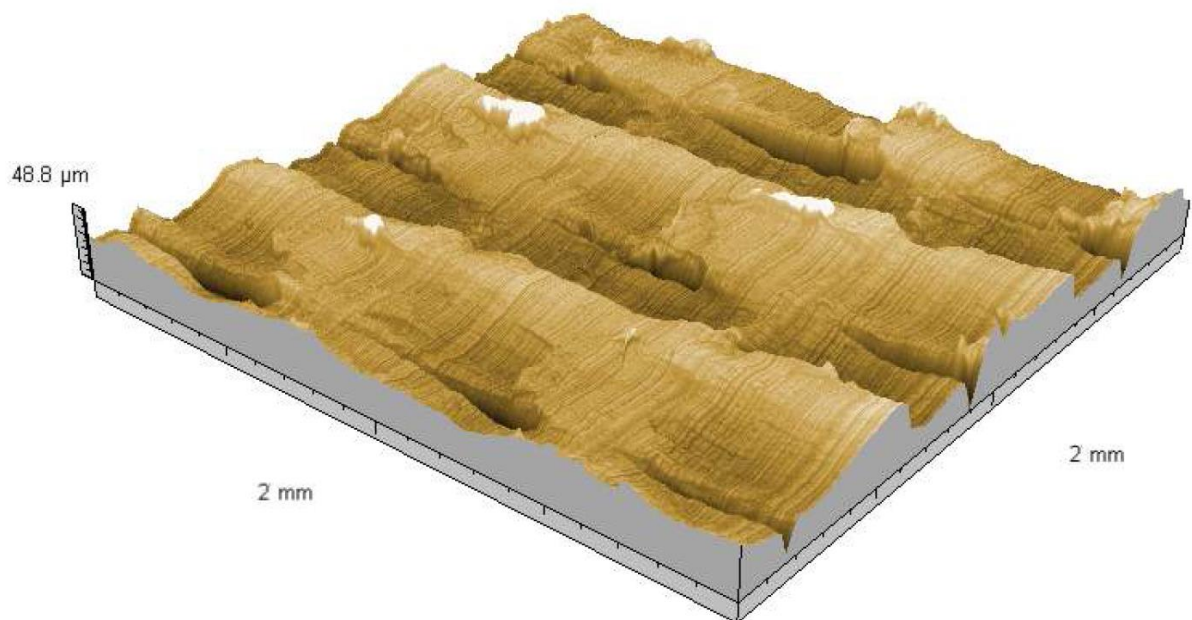
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	5,3266 %	
Chyba střední hodnoty	0,1748	
Směrodatná odchylka	0,3909	
Medián	5,2241 %	
Minimum	4,9064 %	
Maximum	5,9317 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,6000	
Interval spolehlivosti	4,84 %	5,81 %

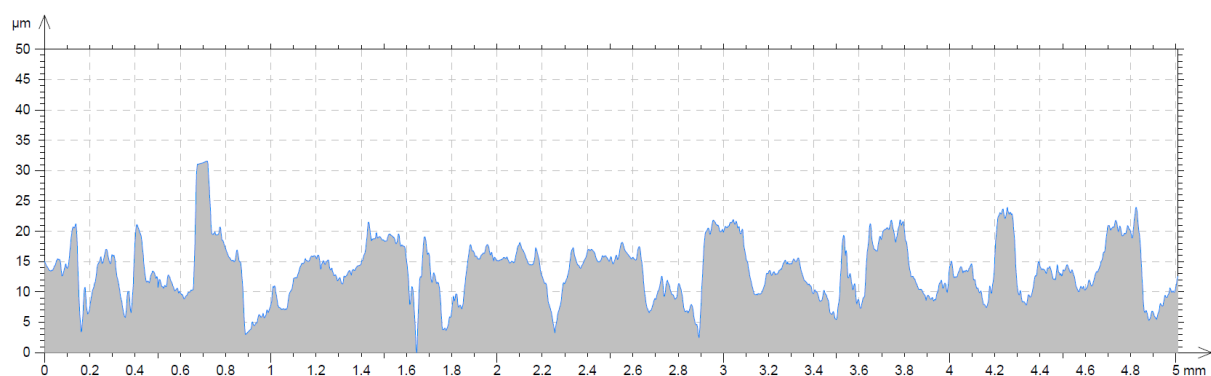


Parametry textury povrchu aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	7,33
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	8,86
St	Celková výška povrchu	48,8
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	46,6

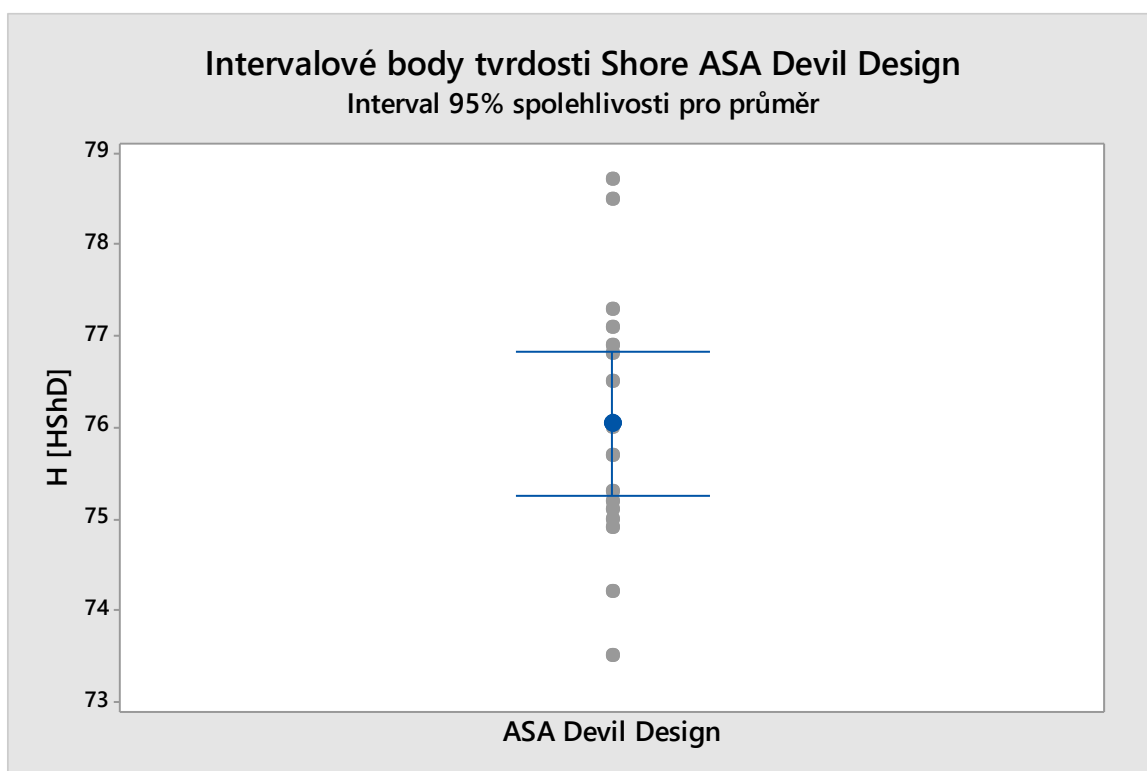


Parametr	Název		Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	3,42
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	4,25
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	29,1
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	18,2
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,852
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	4,87
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	2,99



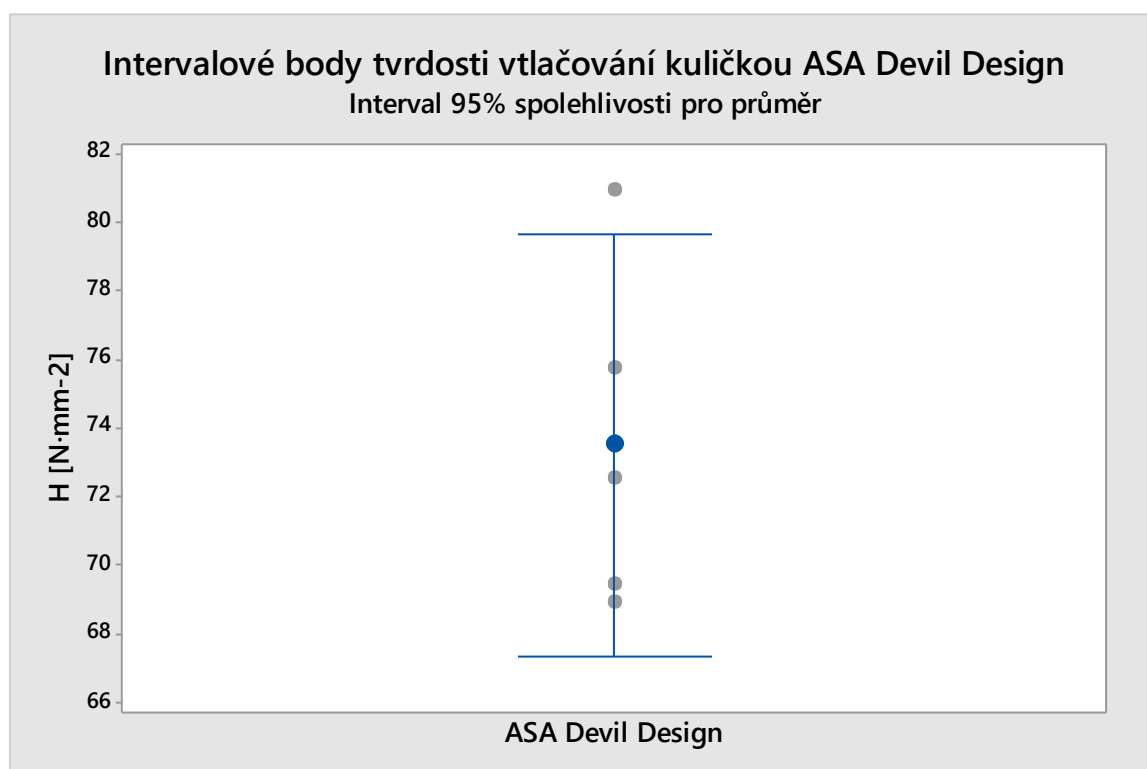
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	76,0438 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,3642	
Směrodatná odchylka	1,4569	
Medián	75,8500 HShD	
Minimum	73,5000 HShD	
Maximum	78,7000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,7510	
Interval spolehlivosti	75,27 HShD	76,82 HShD



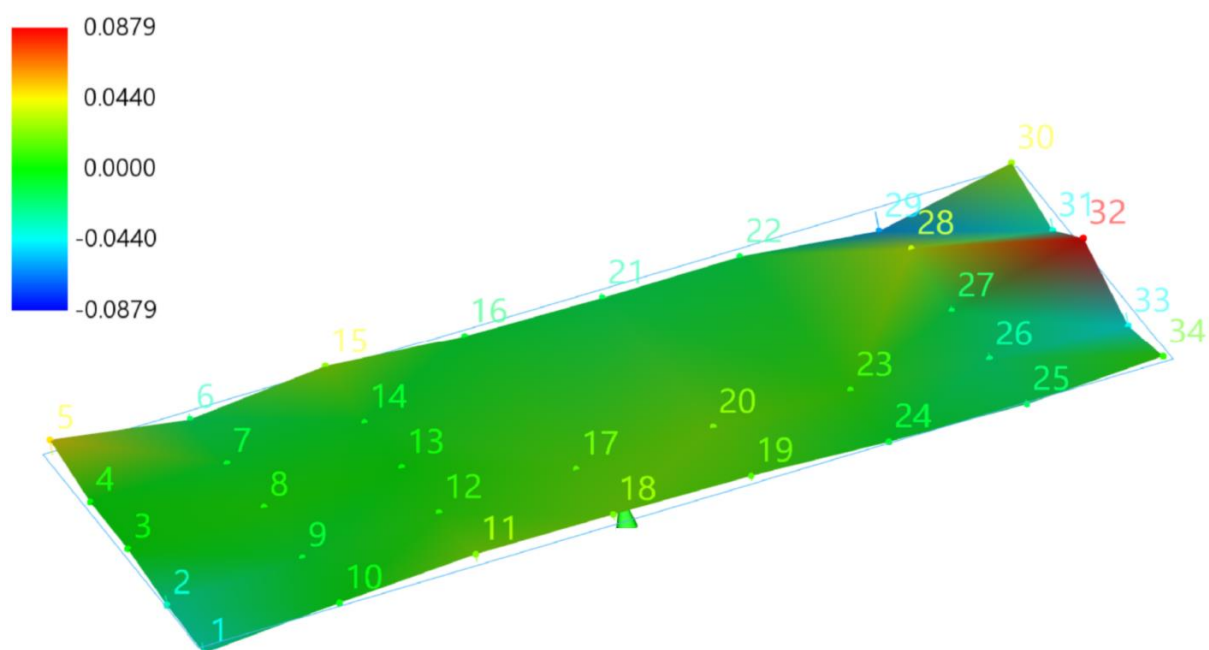
Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu ASA (Devil Design)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	73,4800 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,2200	
Směrodatná odchylka	4,9641	
Medián	72,5000 N·mm ⁻²	
Minimum	68,9000 N·mm ⁻²	
Maximum	80,9000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5060	
Interval spolehlivosti	67,32 N·mm ⁻²	79,64 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu ASA (Devil Design)

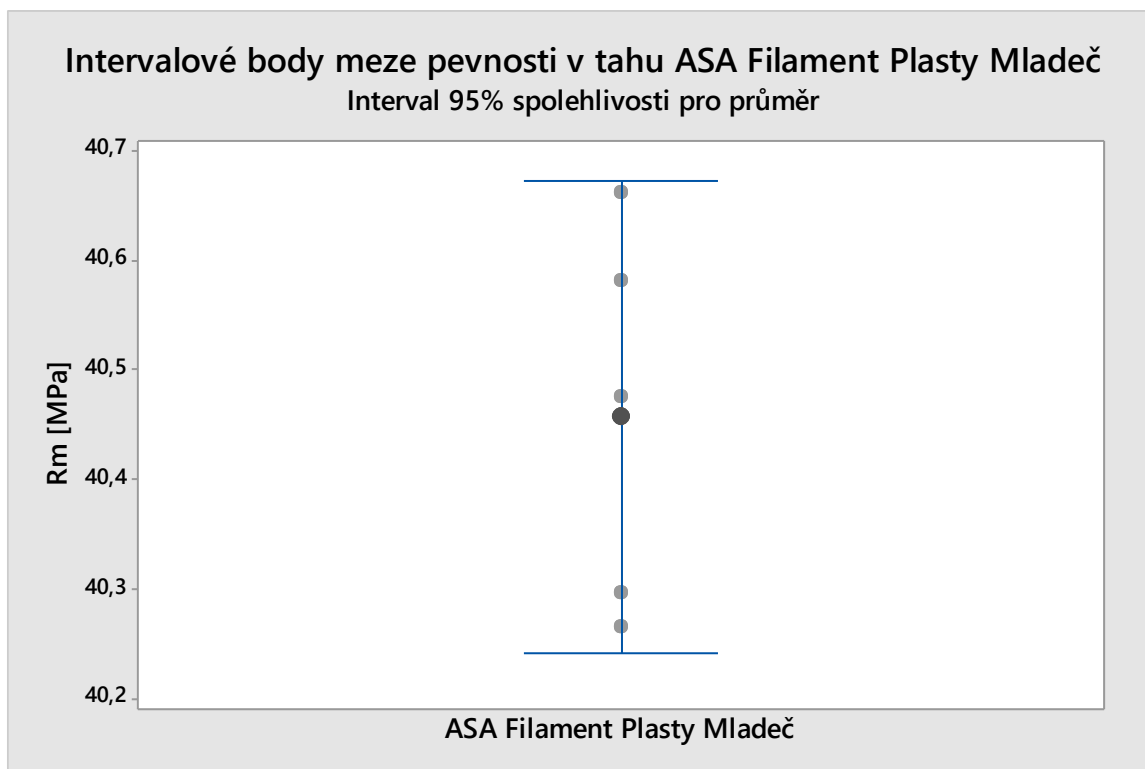
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,627	-0,373	-373
1Up	65,0	±0,1	64,622	-0,378	-378
2Do	40,0	±0,1	39,908	-0,092	-92
2Up	40,0	±0,1	39,896	-0,104	-104
3_1	80,0	±0,1	79,601	-0,399	-399
3_2	80,0	±0,1	79,593	-0,407	-407
3_3	80,0	±0,1	79,583	-0,417	-417
3_4	80,0	±0,1	79,562	-0,438	-438
4L	40,0	±0,1	39,966	-0,034	-34
4R	40,0	±0,1	39,953	-0,047	-47
5L	20,0	±0,1	19,951	-0,049	-49
5R	20,0	±0,1	19,966	-0,034	-34
6	0,1	±0,1	0,136	0,136	136



PŘÍLOHA 17

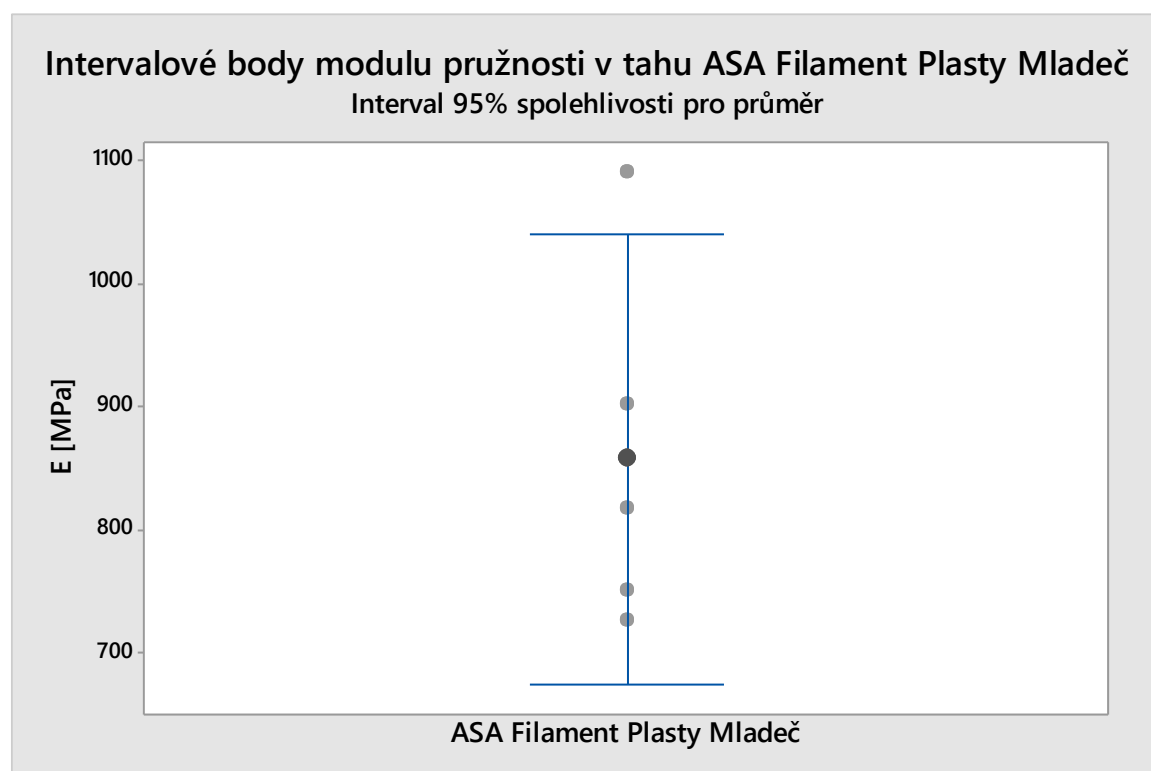
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA
(Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	40,4565 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,0774	
Směrodatná odchylka	0,1730	
Medián	40,4752 MPa	
Minimum	40,2668 MPa	
Maximum	40,6619 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5190	
Interval spolehlivosti	40,24 MPa	40,67 MPa



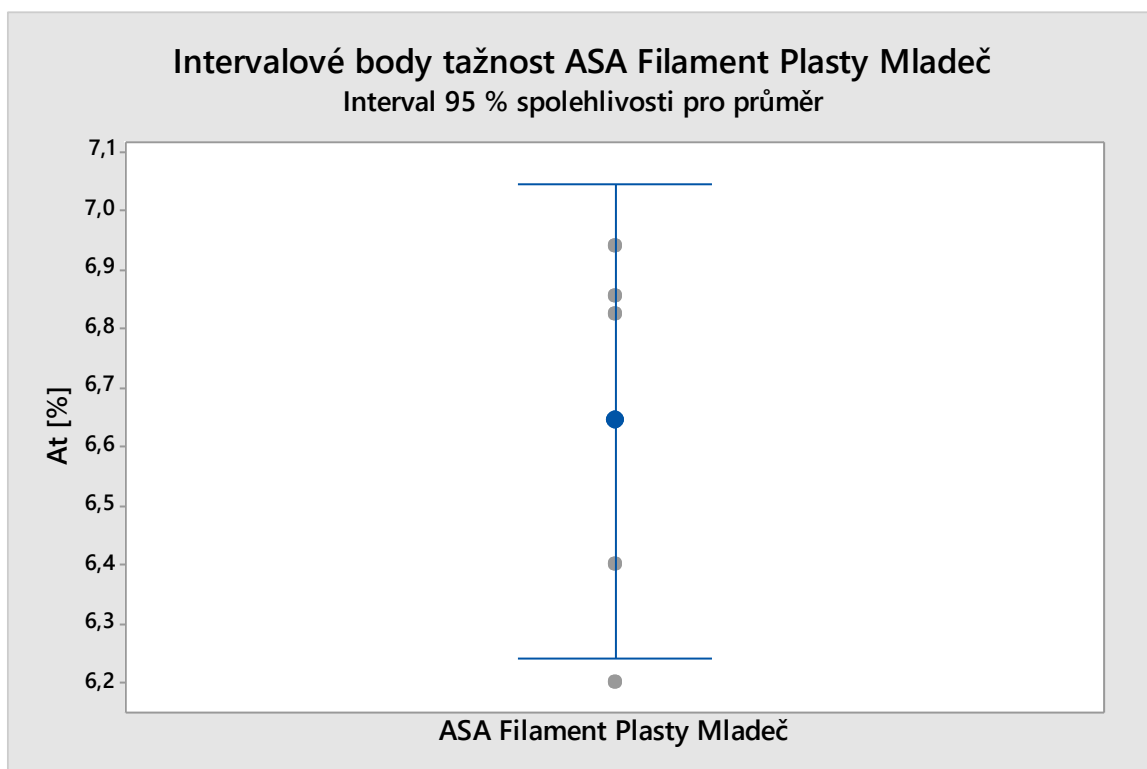
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	857,6660 MPa	
Chyba střední hodnoty	65,8219	
Směrodatná odchylka	147,1822	
Medián	817,1528 MPa	
Minimum	726,0266 MPa	
Maximum	1090,8872 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3850	
Interval spolehlivosti	674,90 MPa	1040,40 MPa



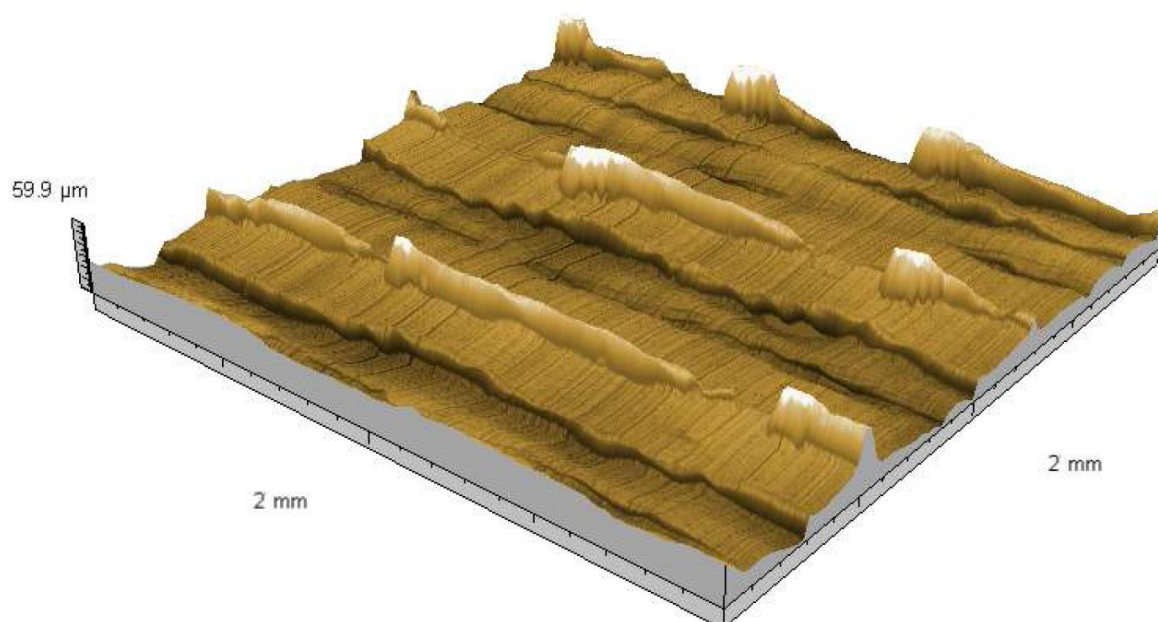
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	6,6440 %	
Chyba střední hodnoty	0,1451	
Směrodatná odchylka	0,3244	
Medián	6,8236 %	
Minimum	6,2001 %	
Maximum	6,9387 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1880	
Interval spolehlivosti	6,24 %	7,05 %

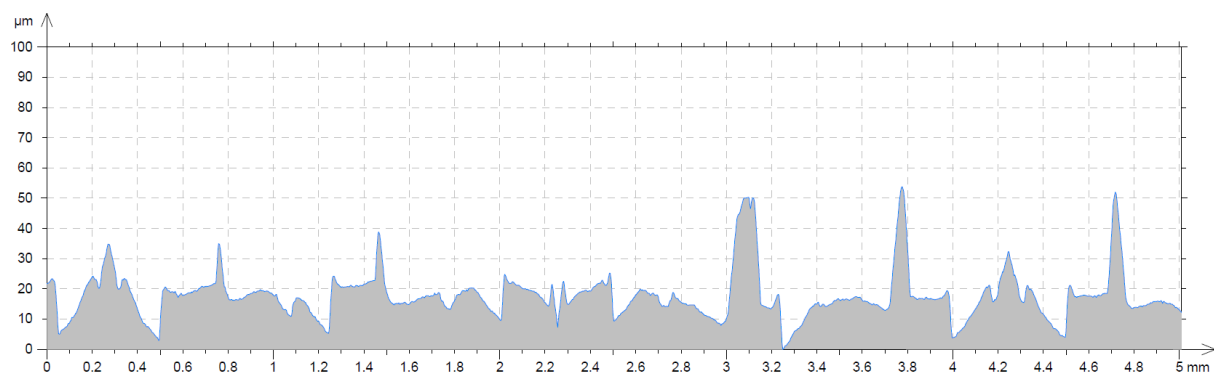


Parametry textury povrchu aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	5,49
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	8,73
St	Celková výška povrchu	60
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	59,3

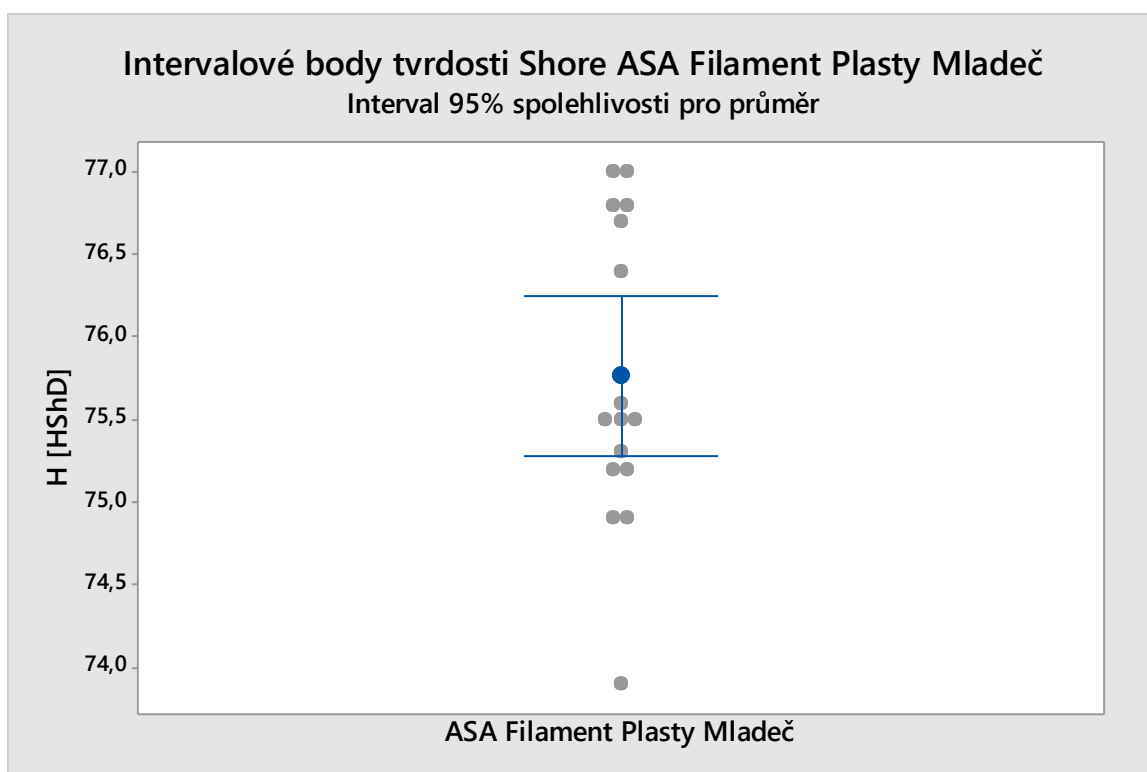


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	4,82
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	6,98
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	50,2
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	35,6
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,14
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1,36
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	7,62
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	4,06



Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

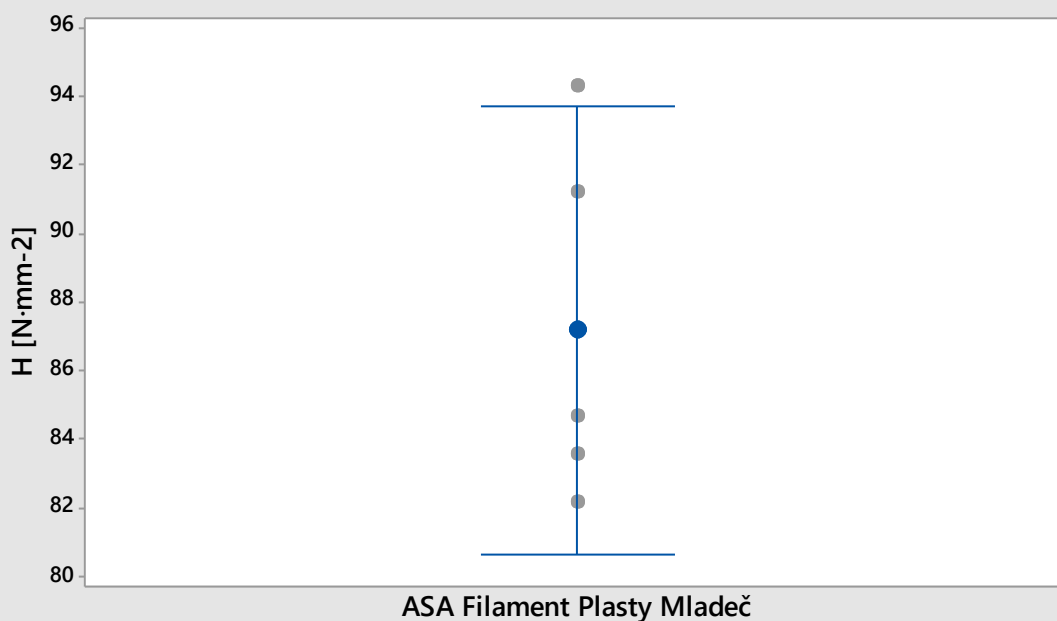
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	75,7625 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,2286	
Směrodatná odchylka	0,9142	
Medián	75,5000 HShD	
Minimum	73,9000 HShD	
Maximum	77,0000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,0810	
Interval spolehlivosti	75,28 HShD	76,25 HShD



Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

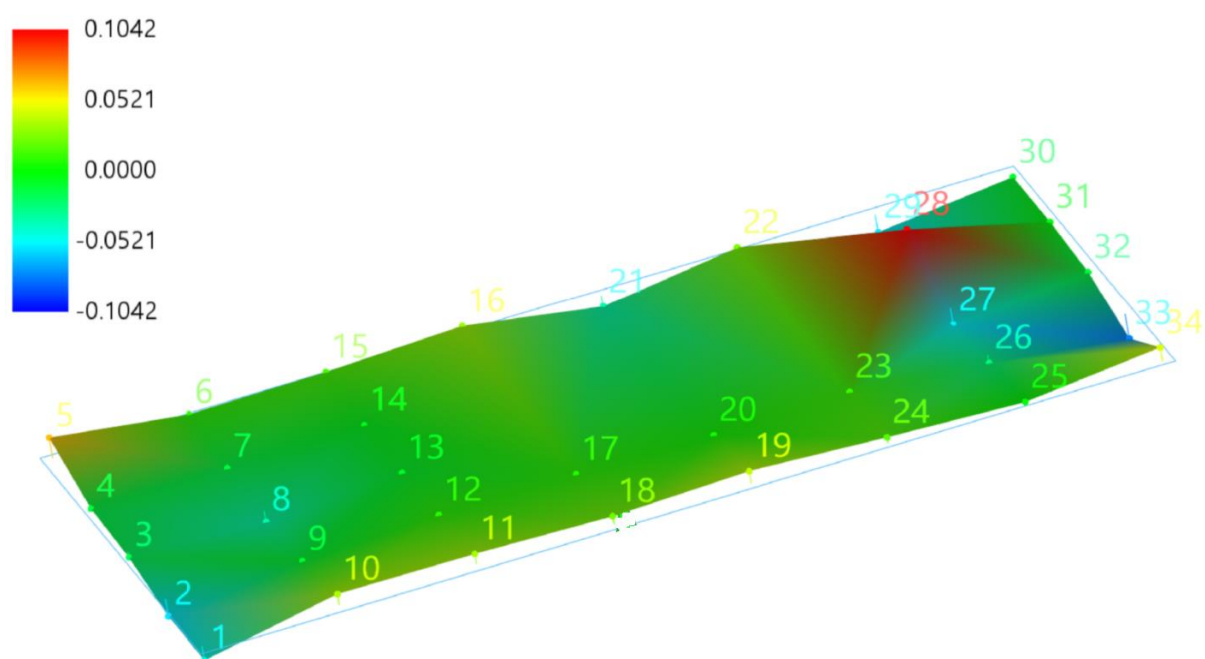
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	87,2000 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,3518	
Směrodatná odchylka	5,2588	
Medián	84,7000 N·mm ⁻²	
Minimum	82,2000 N·mm ⁻²	
Maximum	94,3000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2790	
Interval spolehlivosti	80,67 N·mm ⁻²	93,73 N·mm ⁻²

Intervalové body tvrdosti vtlačování kuličkou ASA Filament Plasty Mladeč
Interval 95% spolehlivosti pro průměr



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu ASA (Filament Plasty Mladeč)

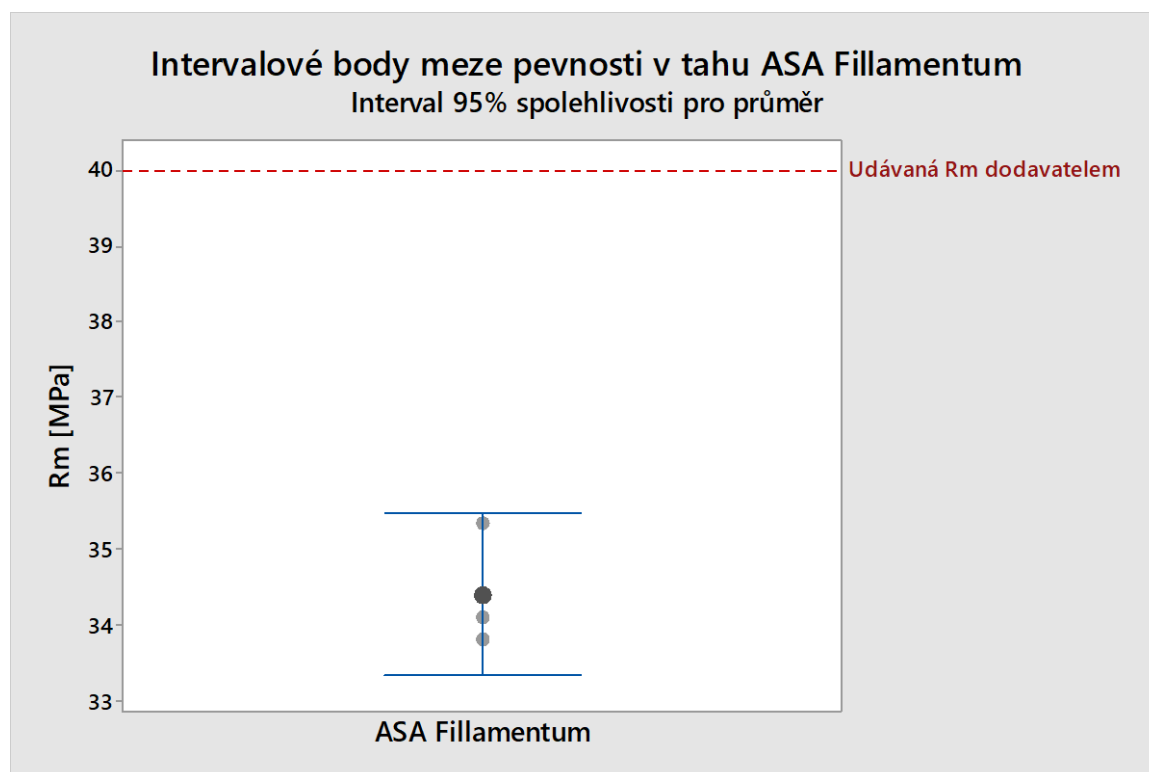
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,625	-0,375	-375
1Up	65,0	±0,1	64,626	-0,374	-374
2Do	40,0	±0,1	39,783	-0,217	-217
2Up	40,0	±0,1	39,796	-0,204	-204
3_1	80,0	±0,1	79,681	-0,319	-319
3_2	80,0	±0,1	79,694	-0,306	-306
3_3	80,0	±0,1	79,687	-0,313	-313
3_4	80,0	±0,1	79,676	-0,324	-324
4L	40,0	±0,1	40,079	0,079	79
4R	40,0	±0,1	40,043	0,043	43
5L	20,0	±0,1	19,879	-0,121	-121
5R	20,0	±0,1	19,858	-0,142	-142
6	0,1	±0,1	0,166	0,166	166



PŘÍLOHA 18

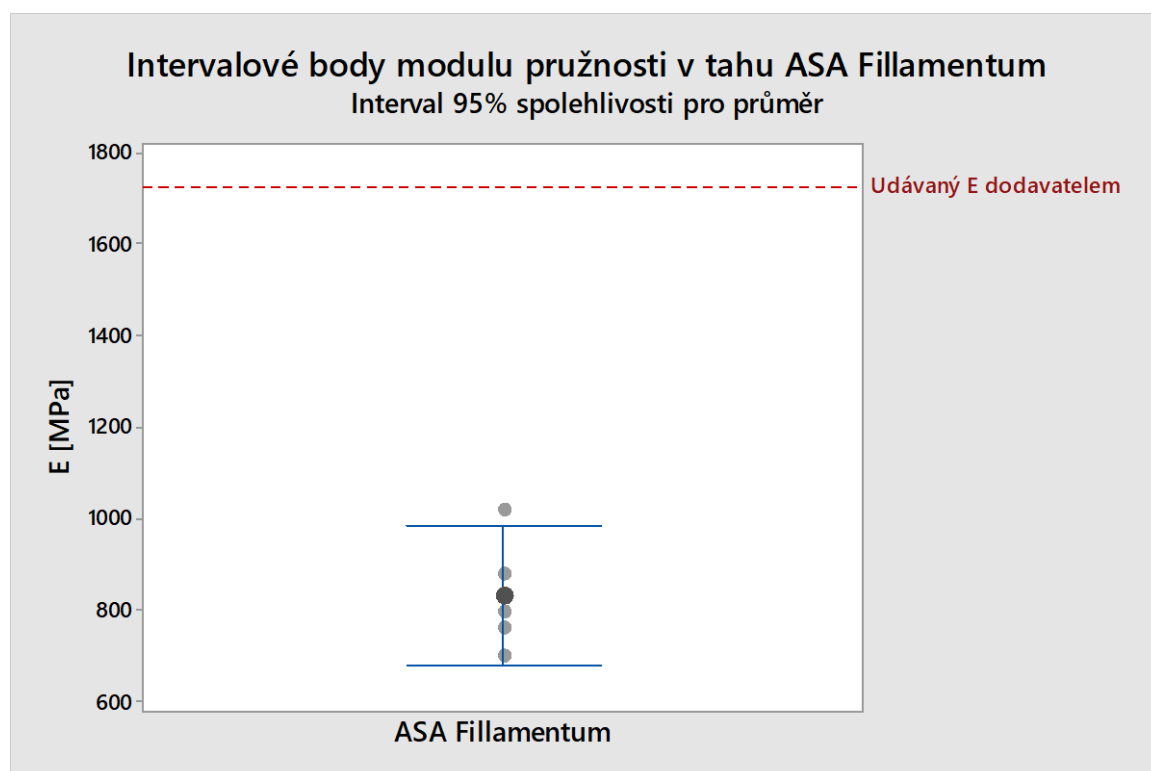
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	34,4101 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,3335	
Směrodatná odchylka	0,6670	
Medián	34,2433 MPa	
Minimum	33,8053 MPa	
Maximum	35,3483 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,368	
Interval spolehlivosti	33,35 MPa	35,47 MPa



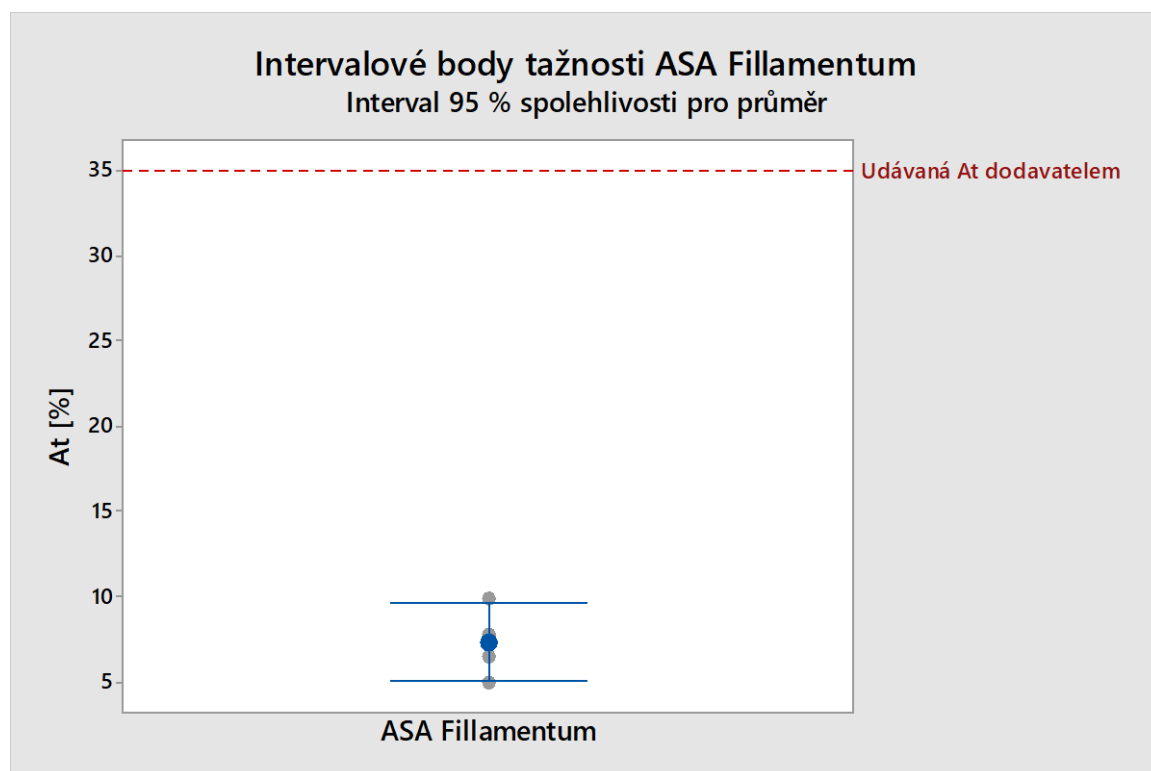
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	832,6739 MPa	
Chyba střední hodnoty	54,8407	
Směrodatná odchylka	122,6276	
Medián	797,0496 MPa	
Minimum	703,0155 MPa	
Maximum	1019,7392 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,6160	
Interval spolehlivosti	680,40 MPa	984,90 MPa



Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	7,3392 %	
Chyba střední hodnoty	0,8210	
Směrodatná odchylka	1,8359	
Medián	7,6064 %	
Minimum	4,9665 %	
Maximum	9,9252 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,7780	
Interval spolehlivosti	5,06 %	9,62 %

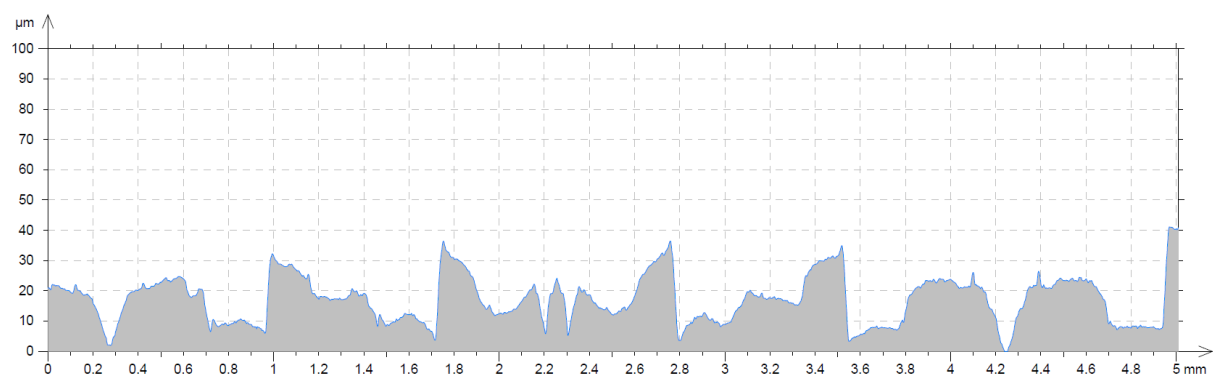


Parametry textury povrchu aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	10,3
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	11,9
St	Celková výška povrchu	51,8
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	49,1

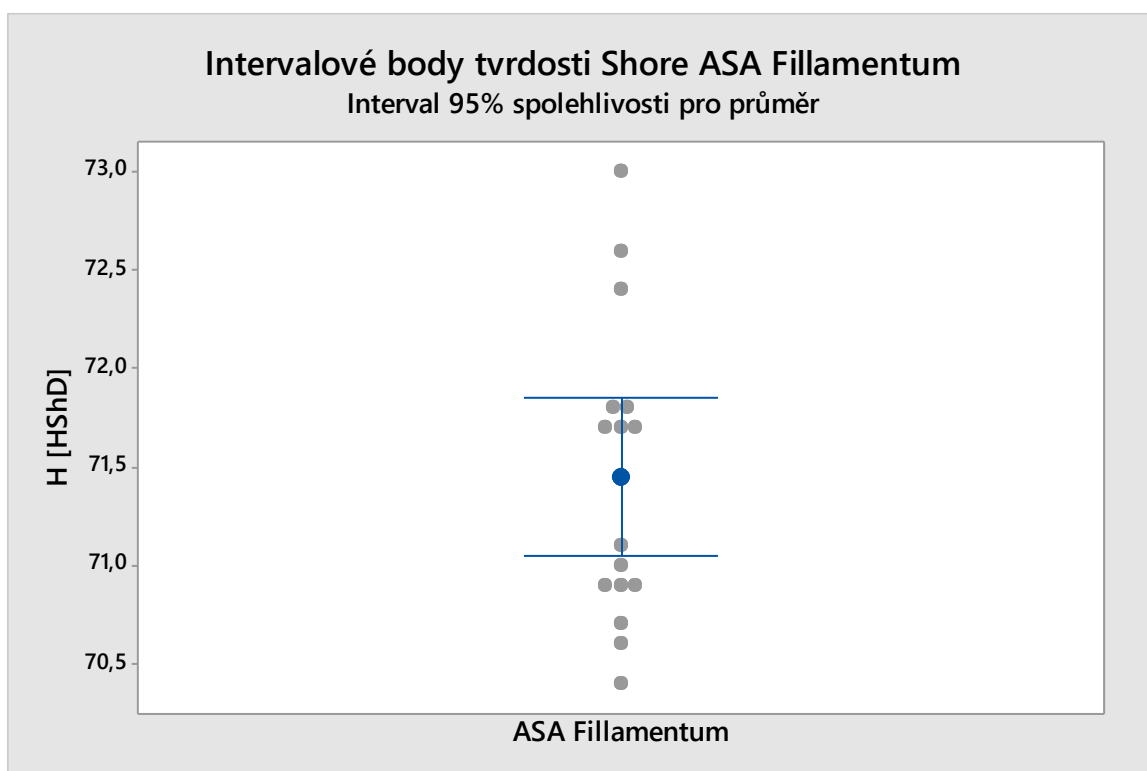


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	5,16
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	6,2
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	39
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	32,3
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,6
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1,84
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	6,9
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	5,5



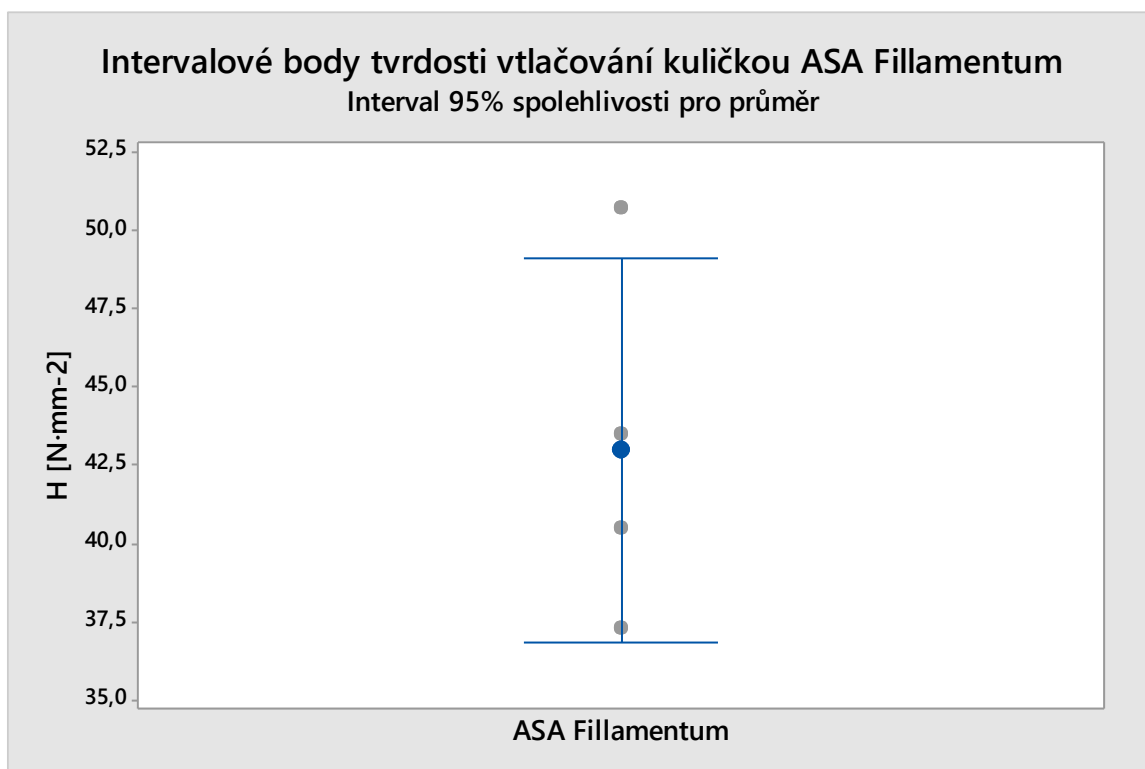
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	71,4500 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,1902	
Směrodatná odchylka	0,7607	
Medián	71,4000 HShD	
Minimum	70,4000 HShD	
Maximum	73,0000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1730	
Interval spolehlivosti	71,05 HShD	71,86 HShD



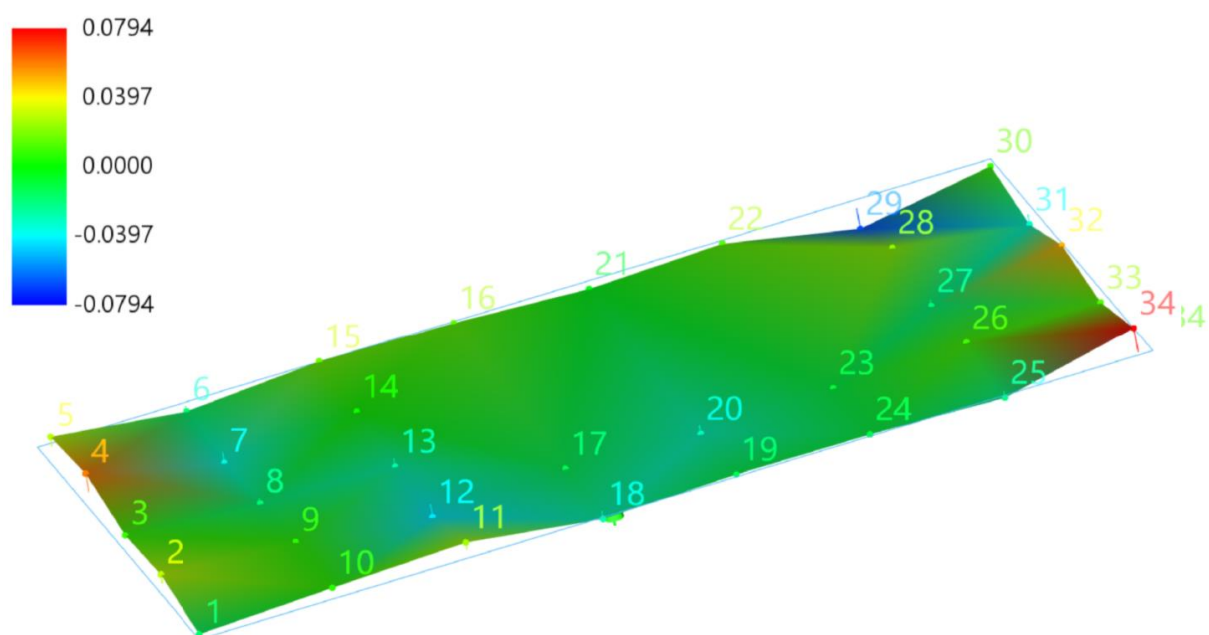
Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	43,0000 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,2168	
Směrodatná odchylka	4,9568	
Medián	43,0000 N·mm ⁻²	
Minimum	37,3000 N·mm ⁻²	
Maximum	50,7000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5130	
Interval spolehlivosti	36,85 N·mm ⁻²	49,15 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu ASA (Fillamentum)

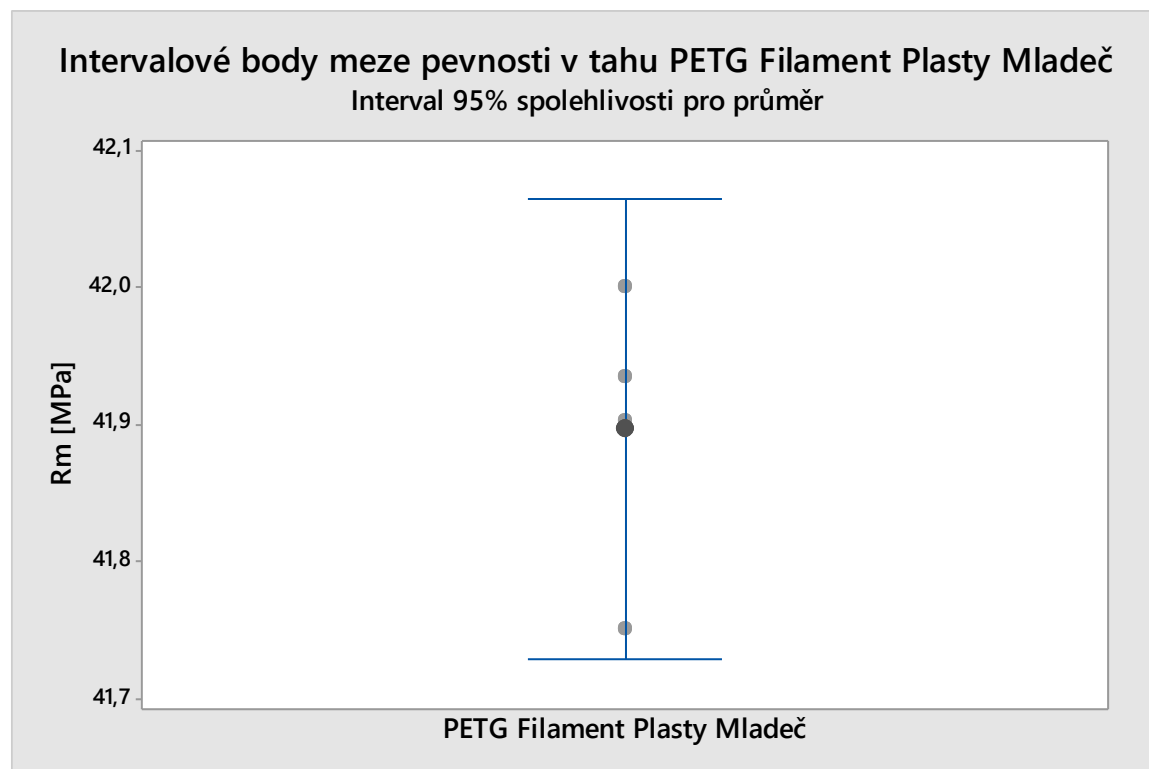
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměr [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,593	-0,407	-407
1Up	65,0	±0,1	64,626	-0,374	-374
2Do	40,0	±0,1	39,871	-0,129	-129
2Up	40,0	±0,1	39,852	-0,148	-148
3_1	80,0	±0,1	79,597	-0,403	-403
3_2	80,0	±0,1	79,582	-0,418	-418
3_3	80,0	±0,1	79,573	-0,427	-427
3_4	80,0	±0,1	79,572	-0,428	-428
4L	40,0	±0,1	39,970	-0,030	-30
4R	40,0	±0,1	39,949	-0,051	-51
5L	20,0	±0,1	19,950	-0,050	-50
5R	20,0	±0,1	19,958	-0,042	-42
6	0,1	±0,1	0,116	0,116	116



PŘÍLOHA 19

Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

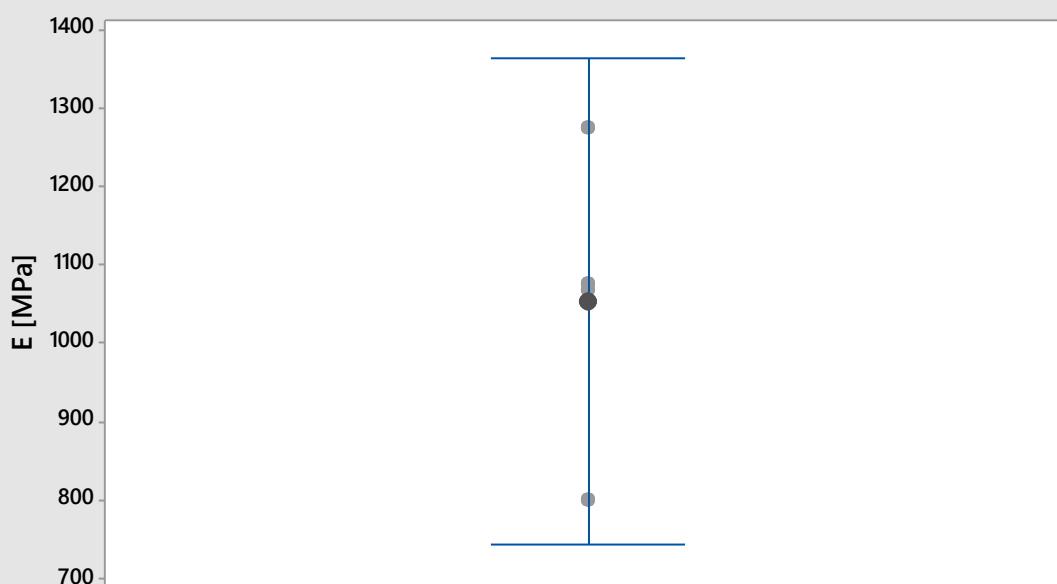
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	41,8965 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,0529	
Směrodatná odchylka	0,1059	
Medián	41,9179 MPa	
Minimum	41,7500 MPa	
Maximum	42,0001 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,447	
Interval spolehlivosti	41,73 MPa	42,06 MPa



Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1053,6562 MPa	
Chyba střední hodnoty	97,1701	
Směrodatná odchylka	194,3401	
Medián	1070,6401 MPa	
Minimum	799,8985 MPa	
Maximum	1273,4459 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4100	
Interval spolehlivosti	744,40 MPa	1362,90 MPa

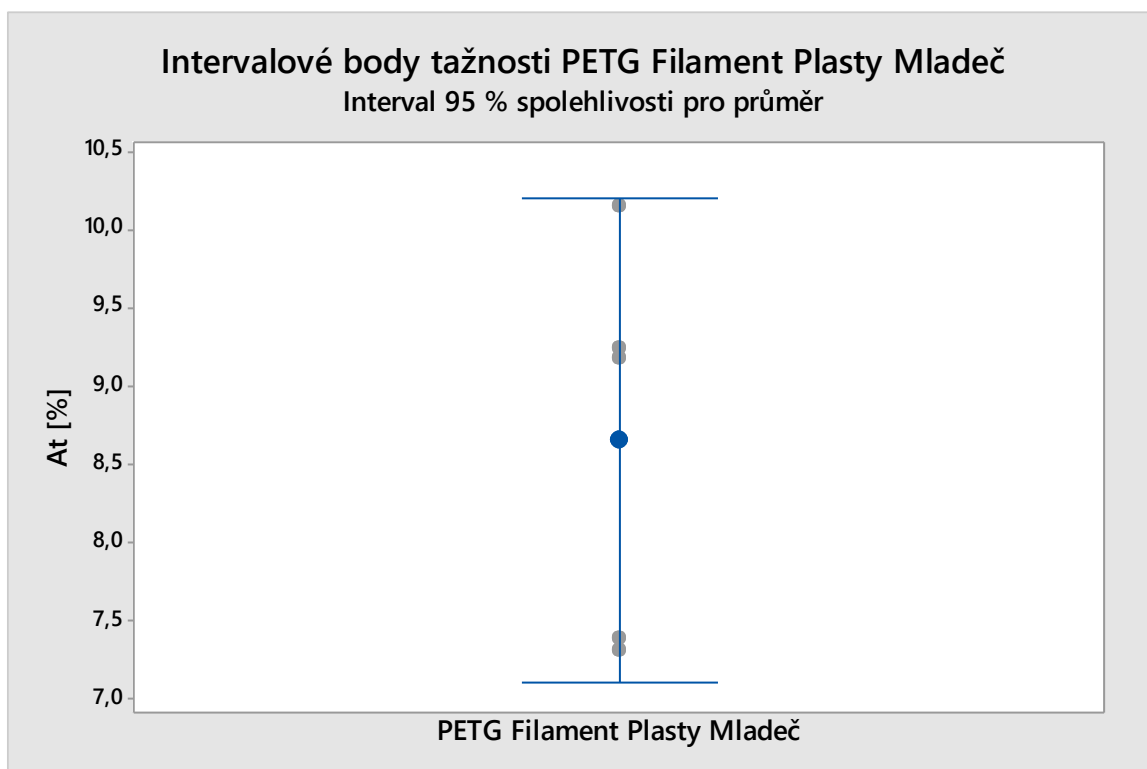
Intervalové body modulu pružnosti v tahu PETG Filament Plasty Mladeč
Interval 95% spolehlivosti pro průměr



PETG Filament Plasty Mladeč

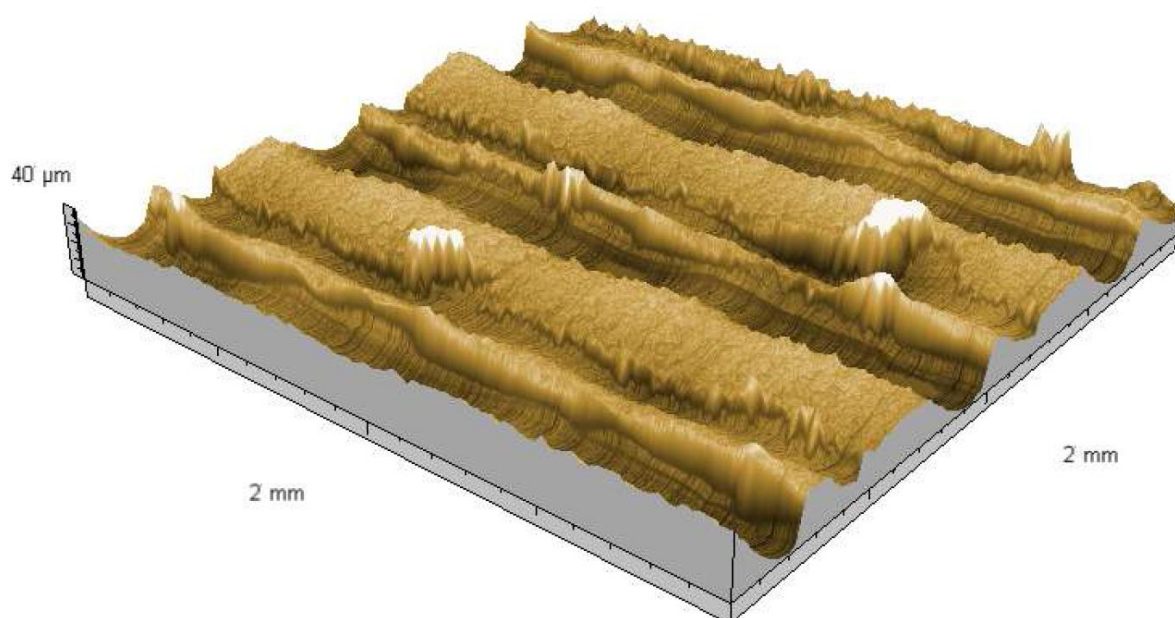
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	8,6514 %	
Chyba střední hodnoty	0,5604 %	
Směrodatná odchylka	1,2531	
Medián	9,1798 %	
Minimum	7,3045 %	
Maximum	10,1487 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2250	
Interval spolehlivosti	7,10 %	10,21 %

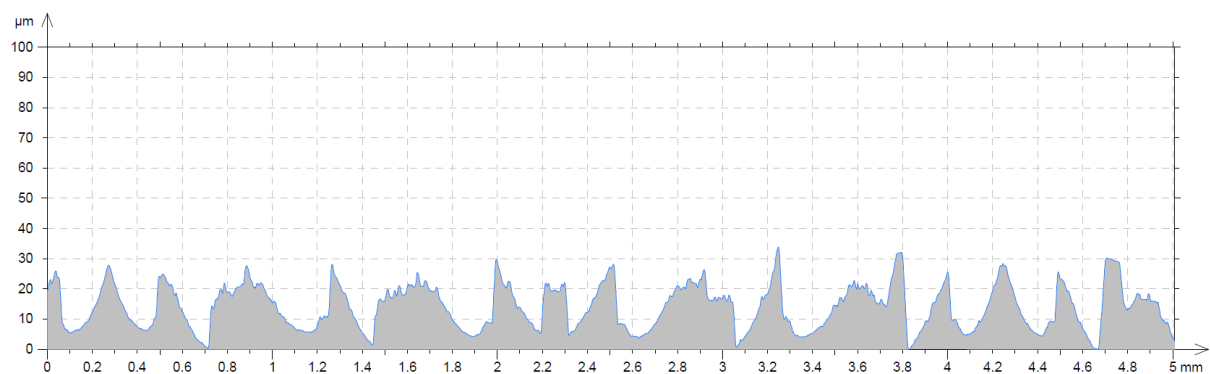


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	7,43
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	8,62
St	Celková výška povrchu	40,1
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	39,1

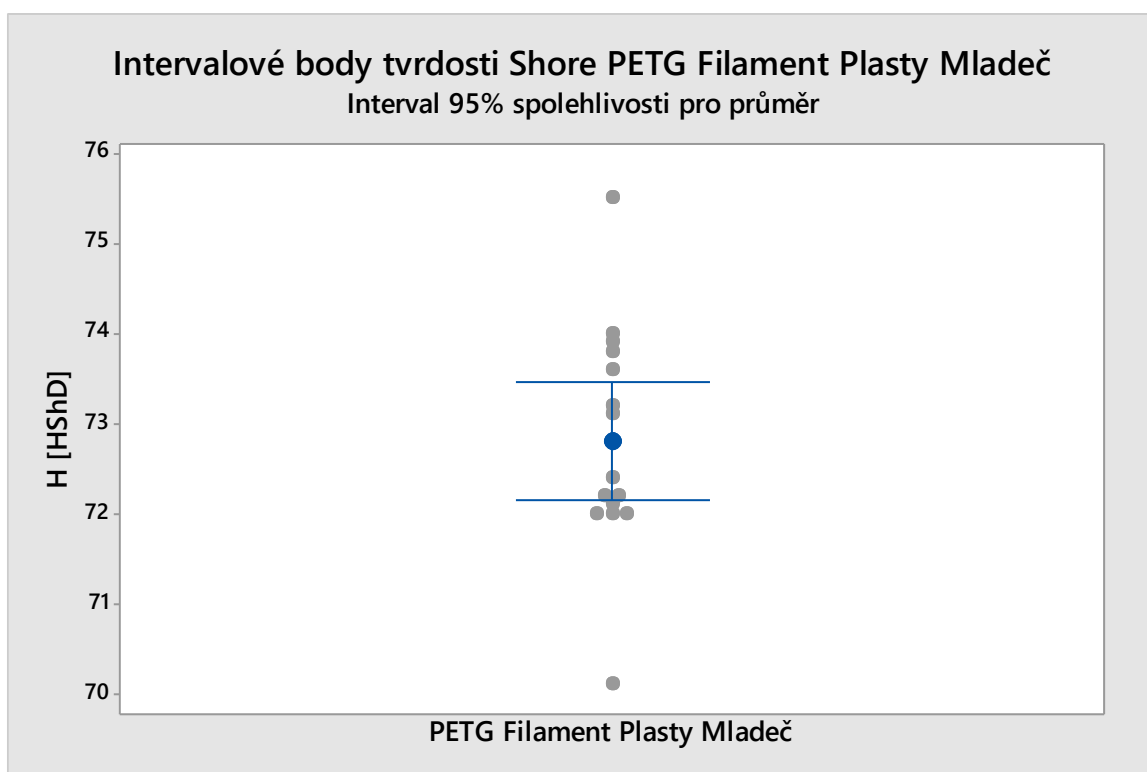


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	6
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	7,04
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	36,2
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	29,4
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,963
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1,13
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	4,51
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	3,55



Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

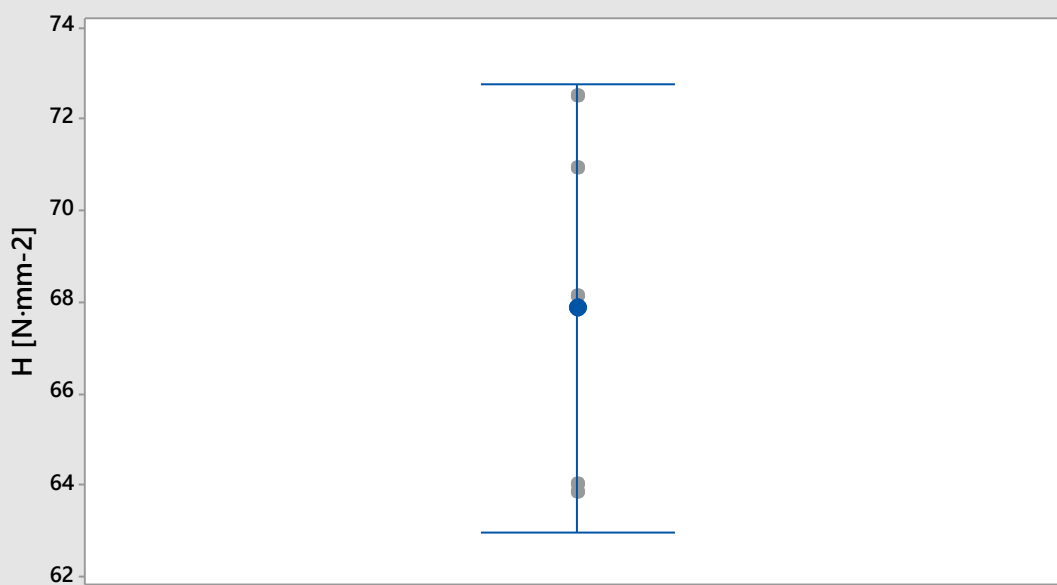
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	72,8063 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,3056	
Směrodatná odchylka	1,2223	
Medián	72,6000 HShD	
Minimum	70,1000 HShD	
Maximum	75,5000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2200	
Interval spolehlivosti	72,16 HShD	73,46 HShD



Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

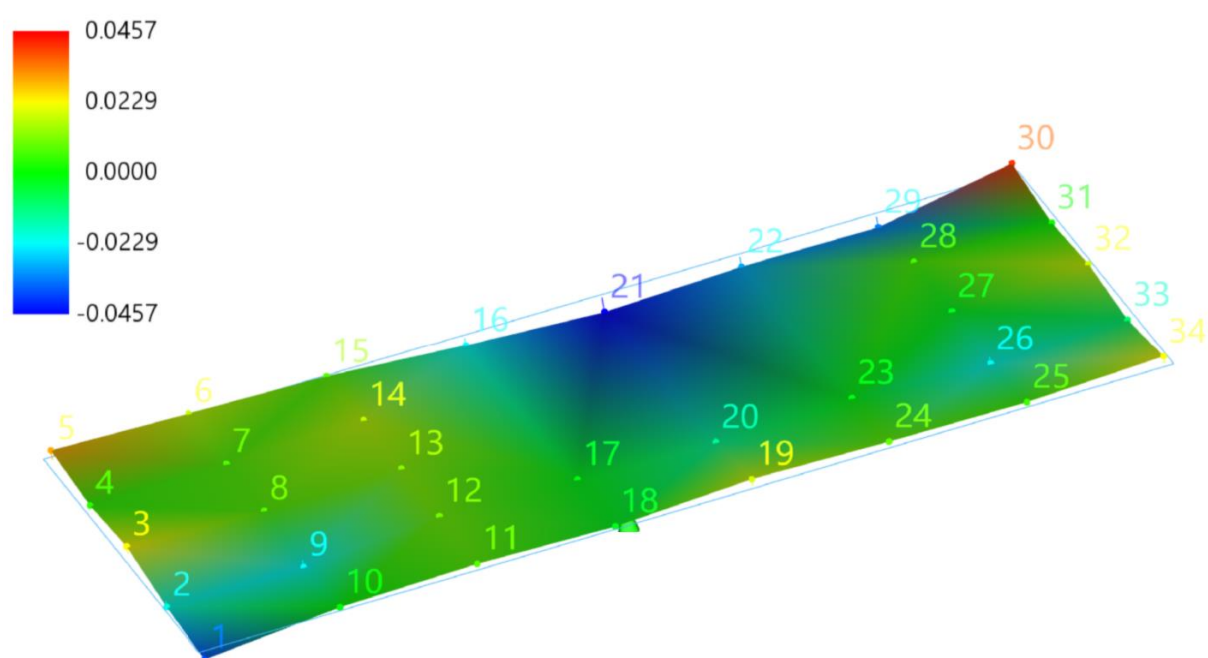
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	67,8600 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	1,7637	
Směrodatná odchylka	3,9437	
Medián	68,1000 N·mm ⁻²	
Minimum	63,8000 N·mm ⁻²	
Maximum	72,5000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4000	
Interval spolehlivosti	62,96 N·mm ⁻²	72,76 N·mm ⁻²

Intervalové body tvrdosti vtlačování kuličkou PETG Filament Plasty Mladeč
Interval 95% spolehlivosti pro průměr



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PETG (Filament Plasty Mladeč)

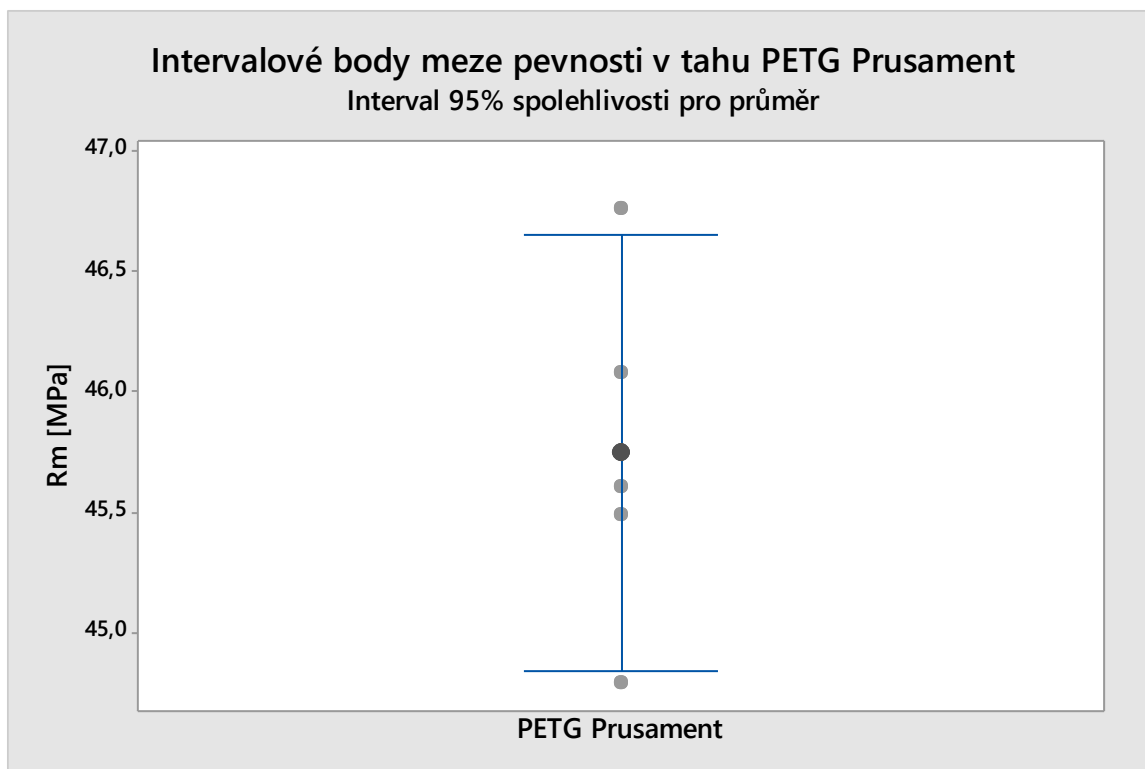
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,792	-0,208	-208
1Up	65,0	±0,1	64,819	-0,181	-181
2Do	40,0	±0,1	39,918	-0,082	-82
2Up	40,0	±0,1	39,893	-0,107	-107
3_1	80,0	±0,1	79,849	-0,151	-151
3_2	80,0	±0,1	79,850	-0,150	-150
3_3	80,0	±0,1	79,844	-0,156	-156
3_4	80,0	±0,1	79,859	-0,141	-141
4L	40,0	±0,1	40,082	0,082	82
4R	40,0	±0,1	40,077	0,077	77
5L	20,0	±0,1	19,843	-0,157	-157
5R	20,0	±0,1	19,856	-0,144	-144
6	0,1	±0,1	0,082	0,082	82



PŘÍLOHA 20

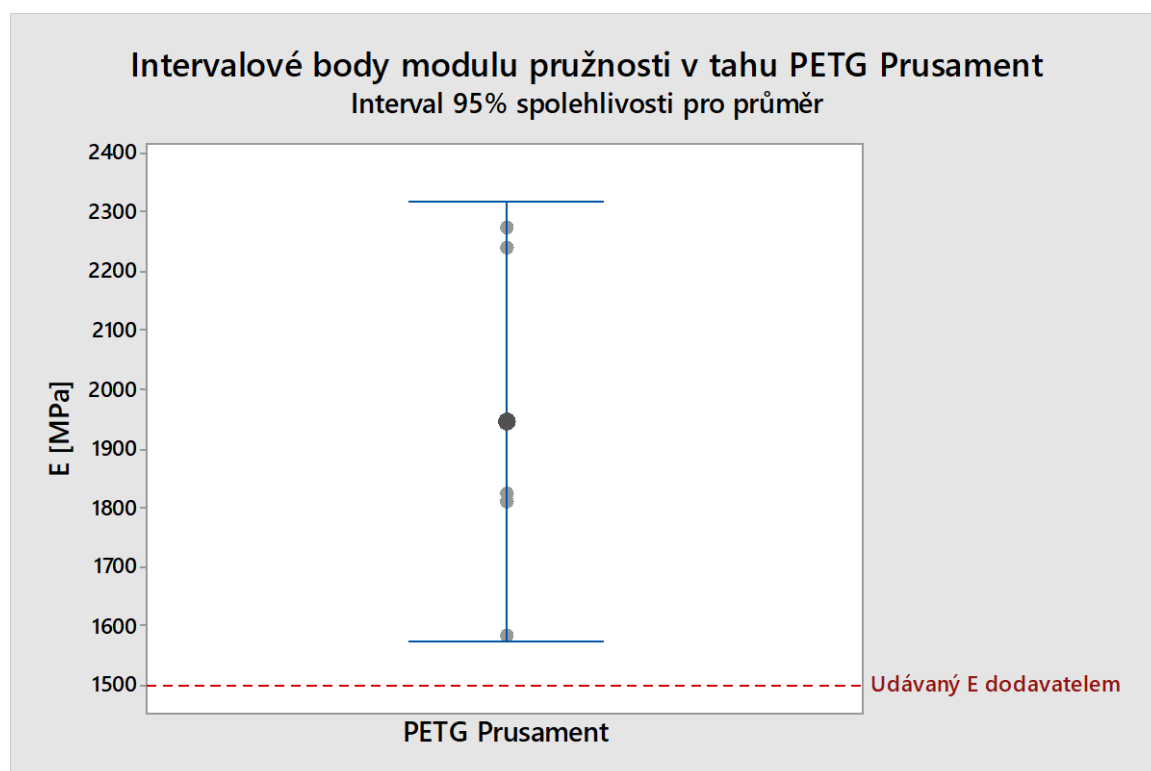
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	45,7416 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,3261	
Směrodatná odchylka	0,7292	
Medián	45,6006 MPa	
Minimum	44,7904 MPa	
Maximum	46,7533 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8340	
Interval spolehlivosti	44,84 MPa	46,65 MPa



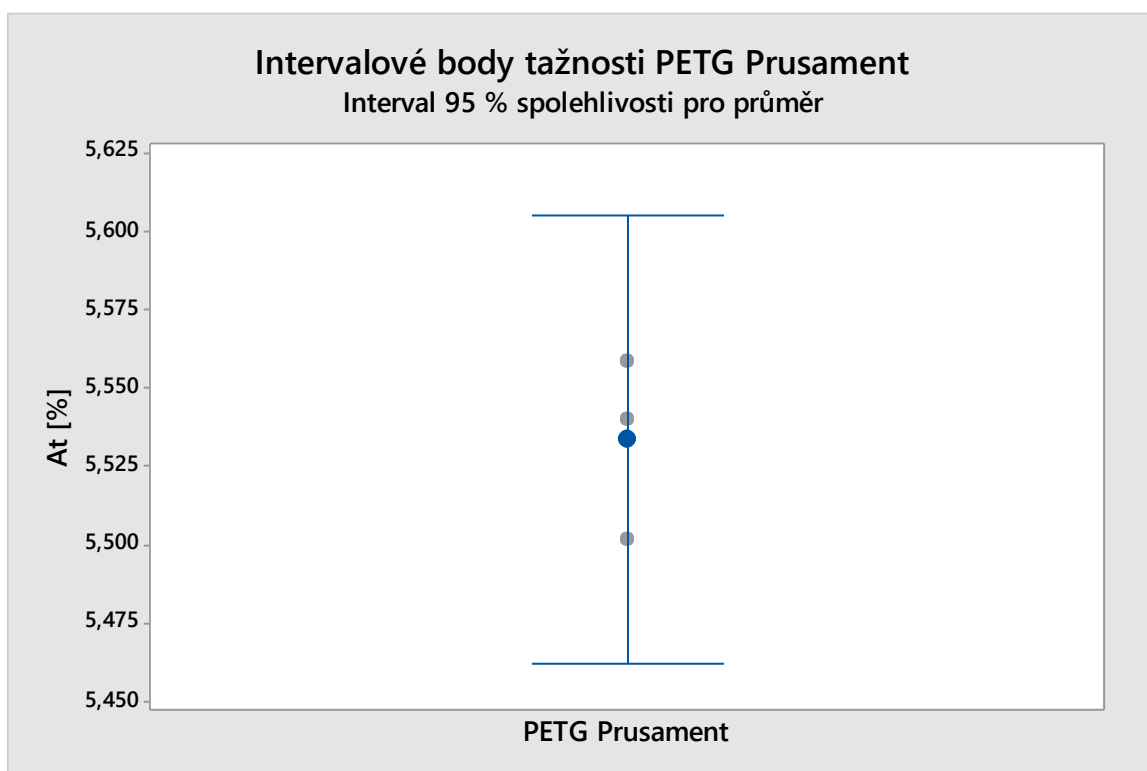
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1946,5000 MPa	
Chyba střední hodnoty	134,0104	
Směrodatná odchylka	299,6563	
Medián	1824,5381 MPa	
Minimum	1584,4176 MPa	
Maximum	2275,4533 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2700	
Interval spolehlivosti	1574,00 MPa	2319,00 MPa



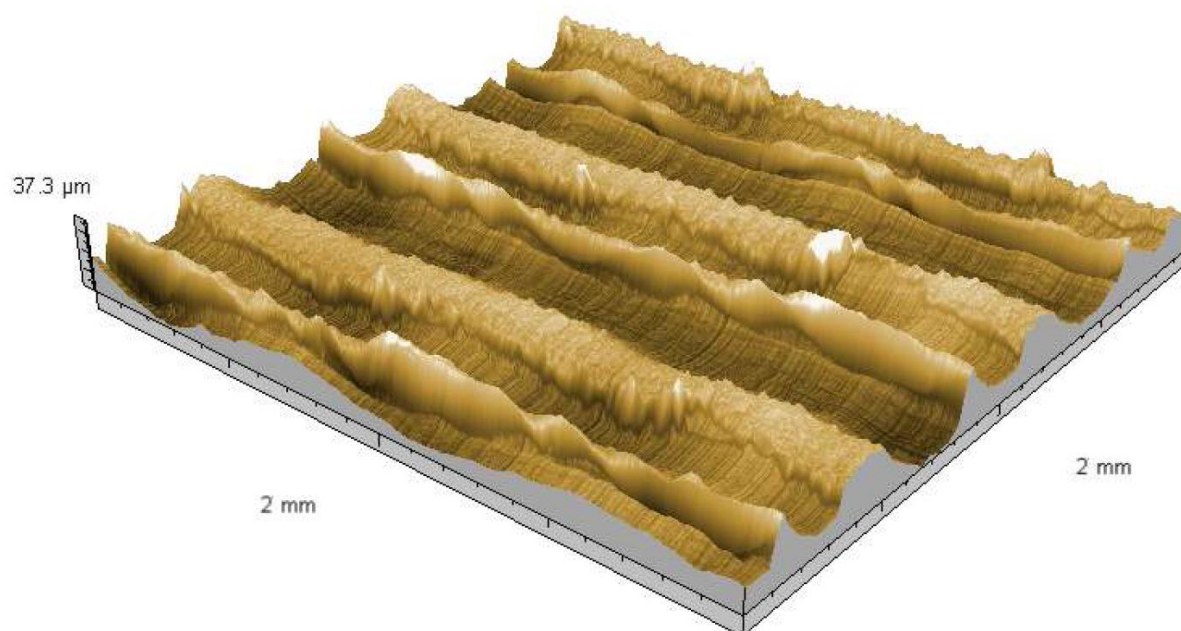
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	5,5333 %	
Chyba střední hodnoty	0,0167 %	
Směrodatná odchylka	0,0289	
Medián	5,5399 %	
Minimum	5,5017 %	
Maximum	5,5584 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4740	
Interval spolehlivosti	5,46 %	5,61 %

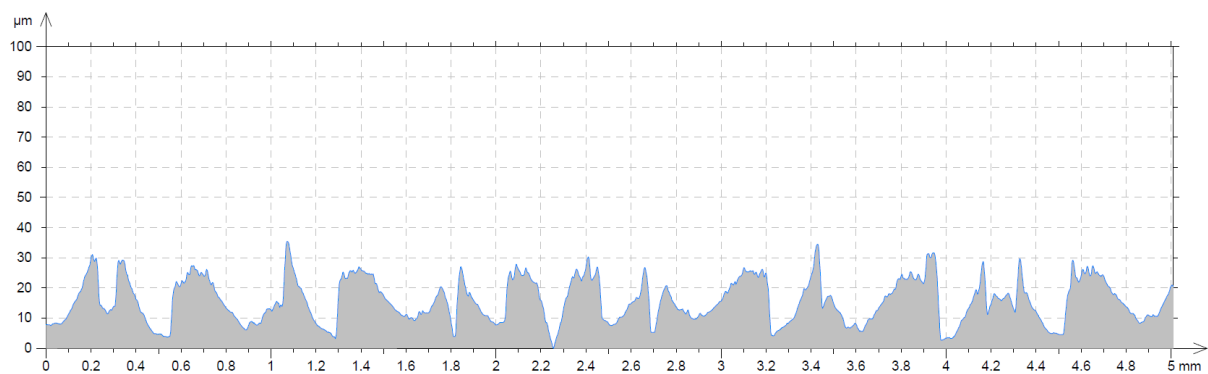


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	7,04
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	8,3
St	Celková výška povrchu	37,3
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	36,9

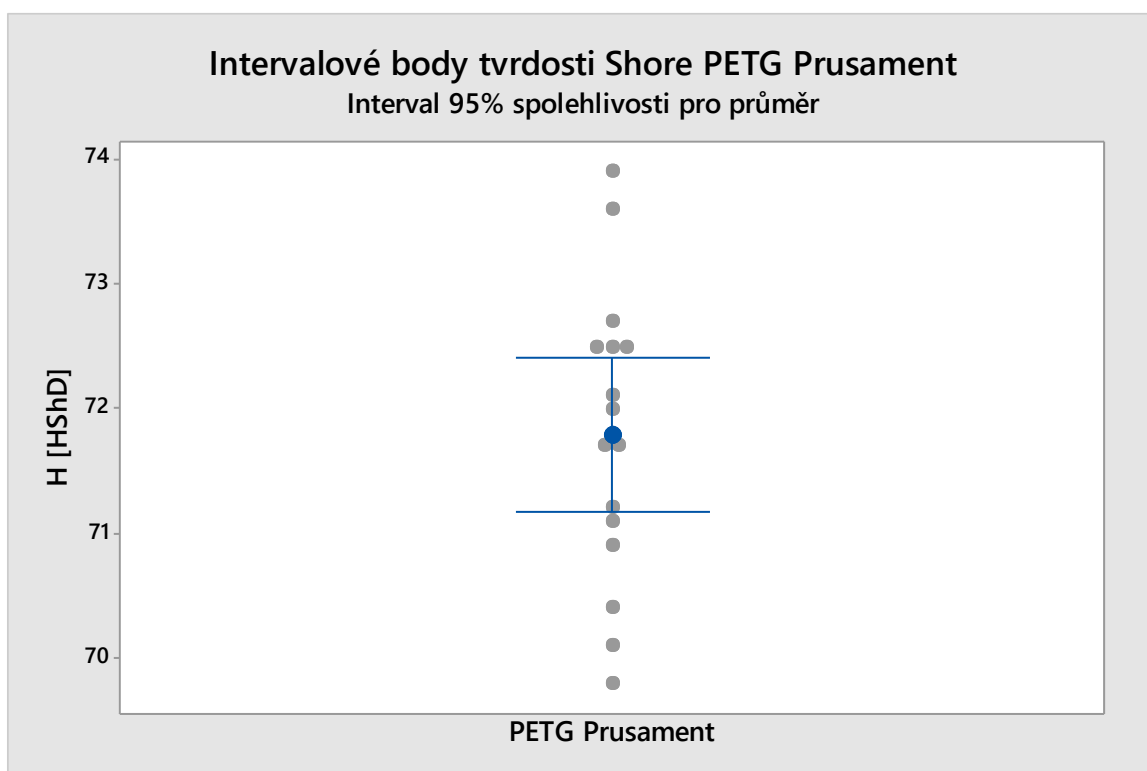


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	5,85
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	6,94
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	36,8
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	28,7
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,831
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	0,957
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	3,54
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	2,96



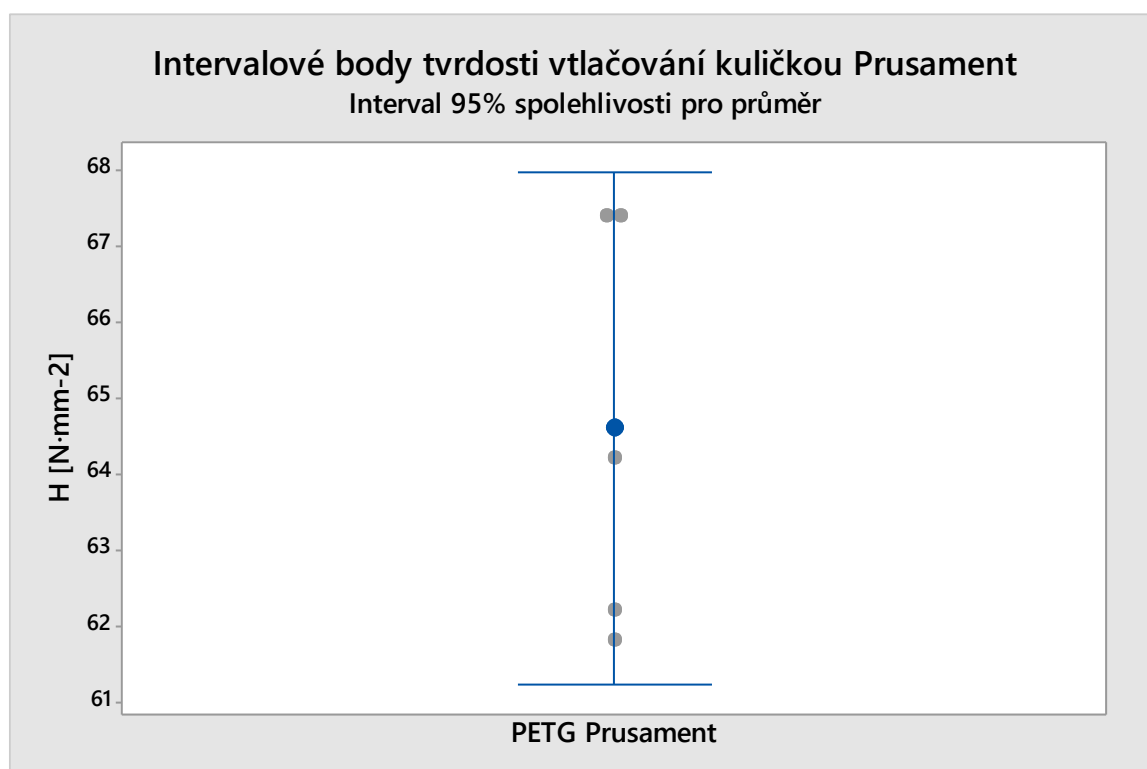
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	71,7938 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,2929	
Směrodatná odchylka	1,1716	
Medián	71,8500 HShD	
Minimum	69,8000 HShD	
Maximum	73,9000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8890	
Interval spolehlivosti	71,17 HShD	72,42 HShD



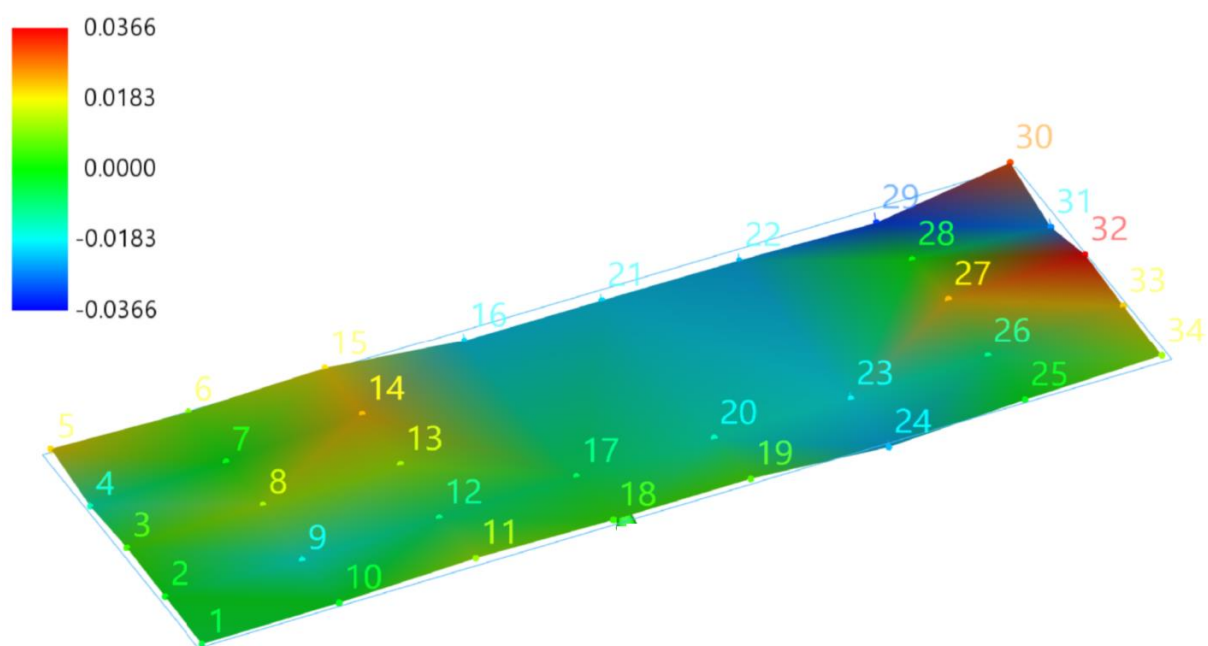
Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PETG (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	64,6000 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	1,2133	
Směrodatná odchylka	2,7129	
Medián	64,2000 N·mm ⁻²	
Minimum	61,8000 N·mm ⁻²	
Maximum	67,4000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2090	
Interval spolehlivosti	61,23 N·mm ⁻²	67,97 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PETG (Prusament)

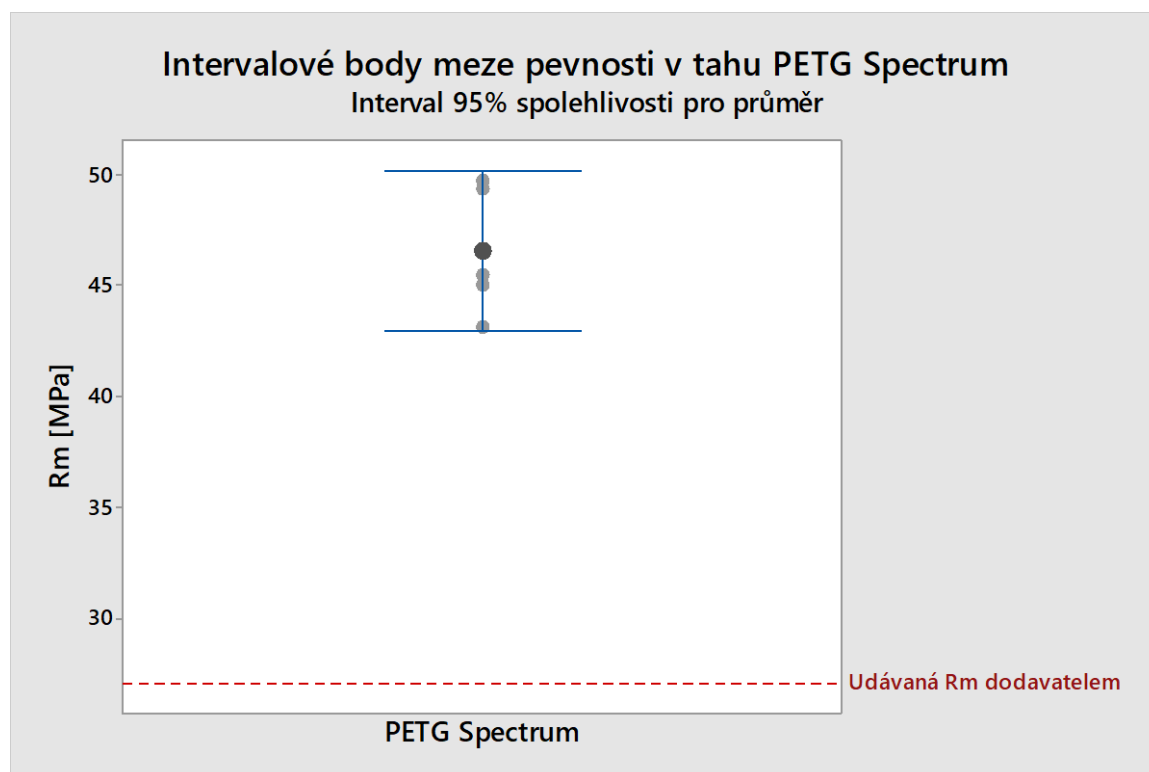
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,804	-0,196	-196
1Up	65,0	±0,1	64,846	-0,154	-154
2Do	40,0	±0,1	39,960	-0,040	-40
2Up	40,0	±0,1	39,956	-0,044	-44
3_1	80,0	±0,1	79,741	-0,259	-259
3_2	80,0	±0,1	79,739	-0,261	-261
3_3	80,0	±0,1	79,726	-0,274	-274
3_4	80,0	±0,1	79,739	-0,261	-261
4L	40,0	±0,1	40,015	0,015	15
4R	40,0	±0,1	40,020	0,020	20
5L	20,0	±0,1	19,983	-0,017	-17
5R	20,0	±0,1	19,969	-0,031	-31
6	0,1	±0,1	0,062	0,062	62



PŘÍLOHA 21

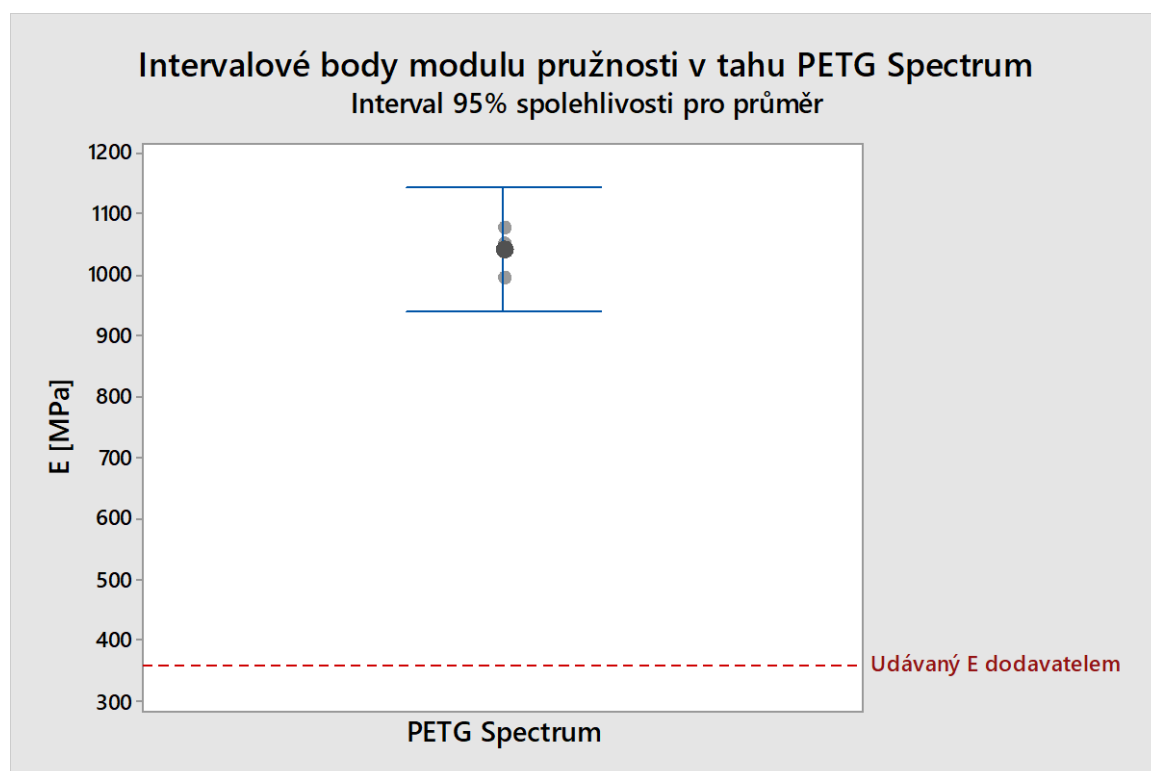
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	46,5920 MPa	
Chyba střední hodnoty	1,2975	
Směrodatná odchylka	2,9012	
Medián	45,4775 MPa	
Minimum	43,1593 MPa	
Maximum	49,8096 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3000	
Interval spolehlivosti	42,99 MPa	50,19 MPa



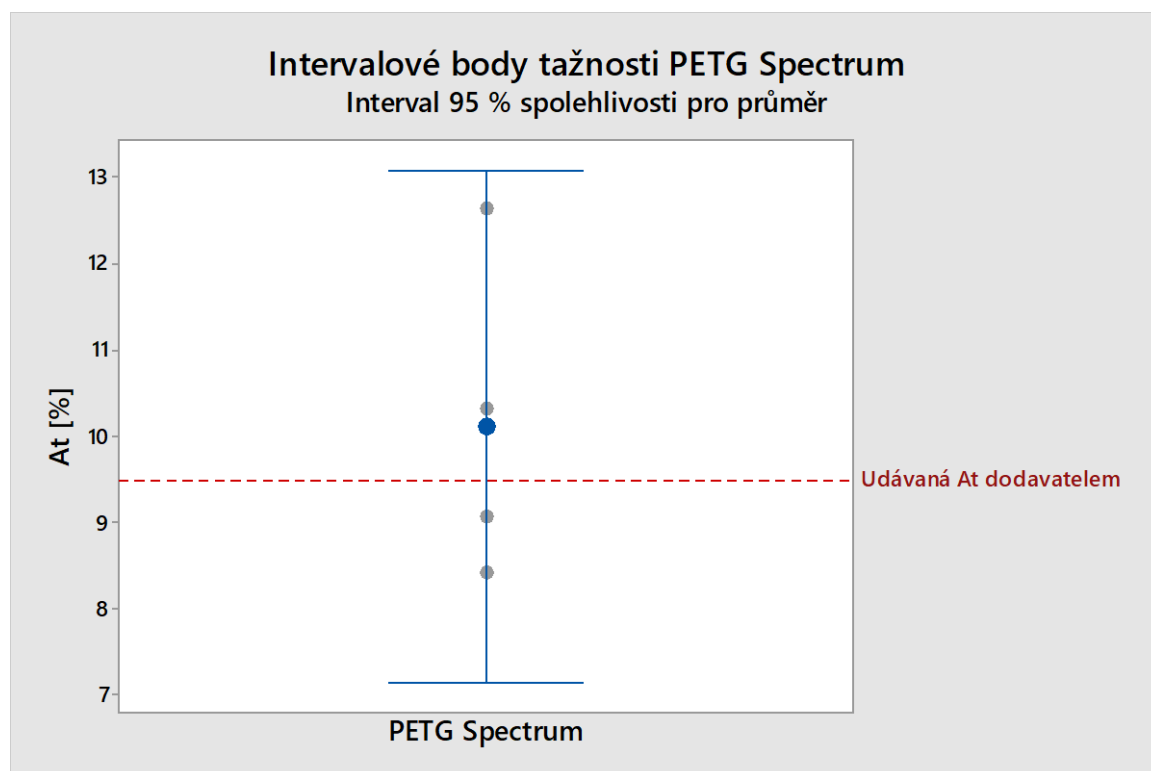
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1041,4559 MPa	
Chyba střední hodnoty	23,8476	
Směrodatná odchylka	41,3052	
Medián	1050,6222 MPa	
Minimum	996,3375 MPa	
Maximum	1077,4079 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4810	
Interval spolehlivosti	938,80 MPa	1144,10 MPa



Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	10,1169 %	
Chyba střední hodnoty	0,9310	
Směrodatná odchylka	1,8619	
Medián	9,7005 %	
Minimum	8,4202 %	
Maximum	12,6464 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5040	
Interval spolehlivosti	7,15 %	13,08 %

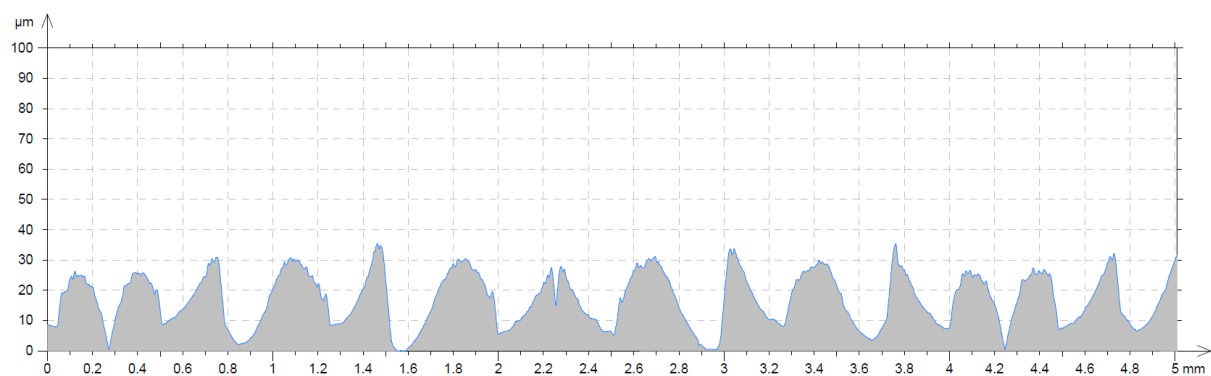


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	8,71
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	10,1
St	Celková výška povrchu	40,7
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	39,9

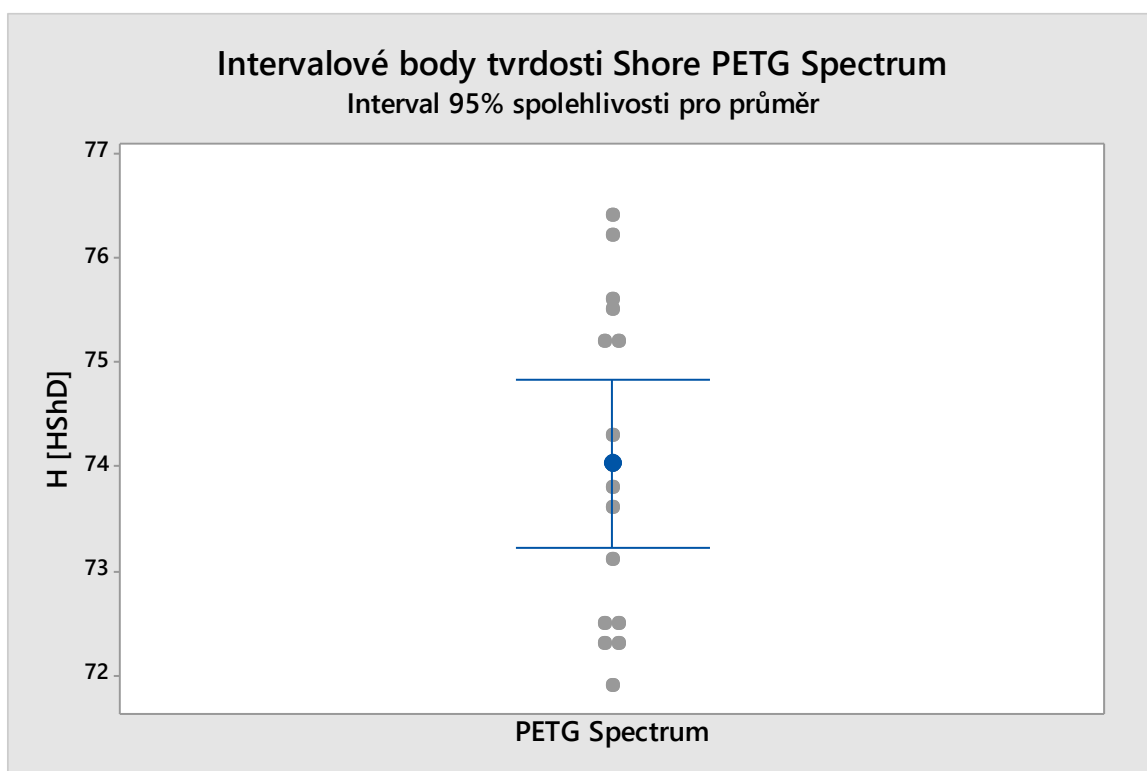


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	7,21
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	8,2
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	37,1
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	21,2
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	1,11
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1,32
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	5,55
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	4,03



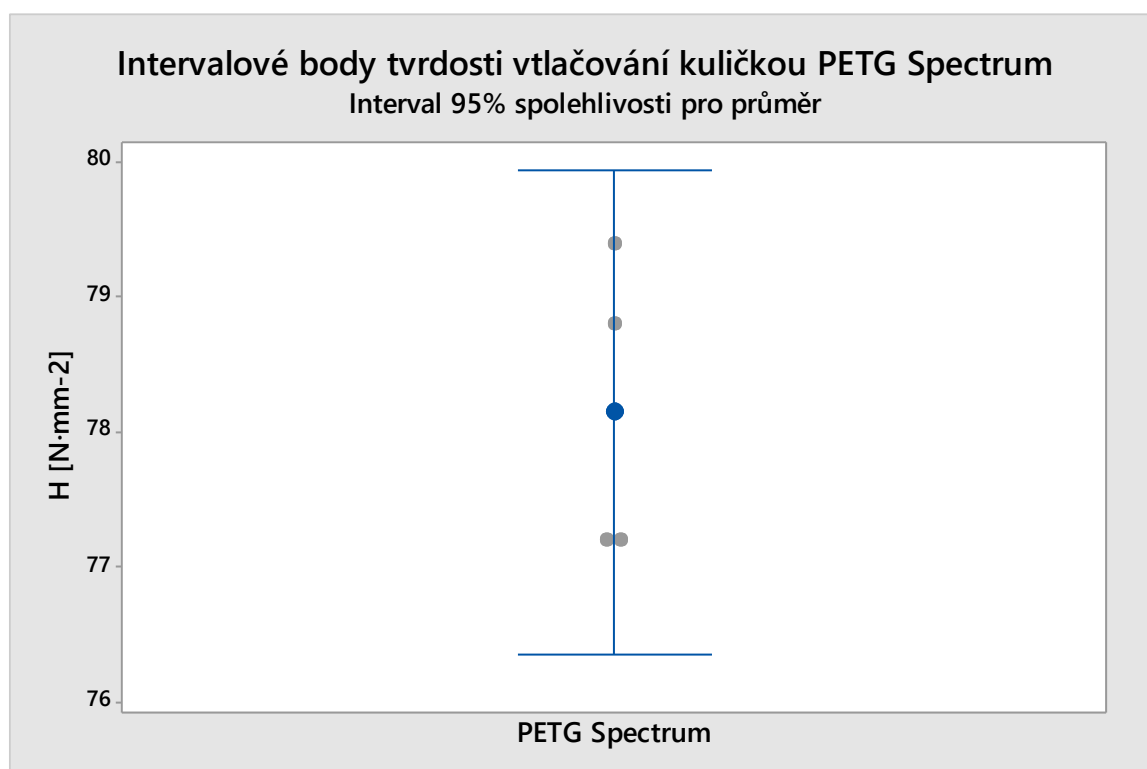
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	74,0250 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,3768	
Směrodatná odchylka	1,5071	
Medián	73,9000 HShD	
Minimum	71,9000 HShD	
Maximum	76,4000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2790	
Interval spolehlivosti	73,22 HShD	74,83 HShD



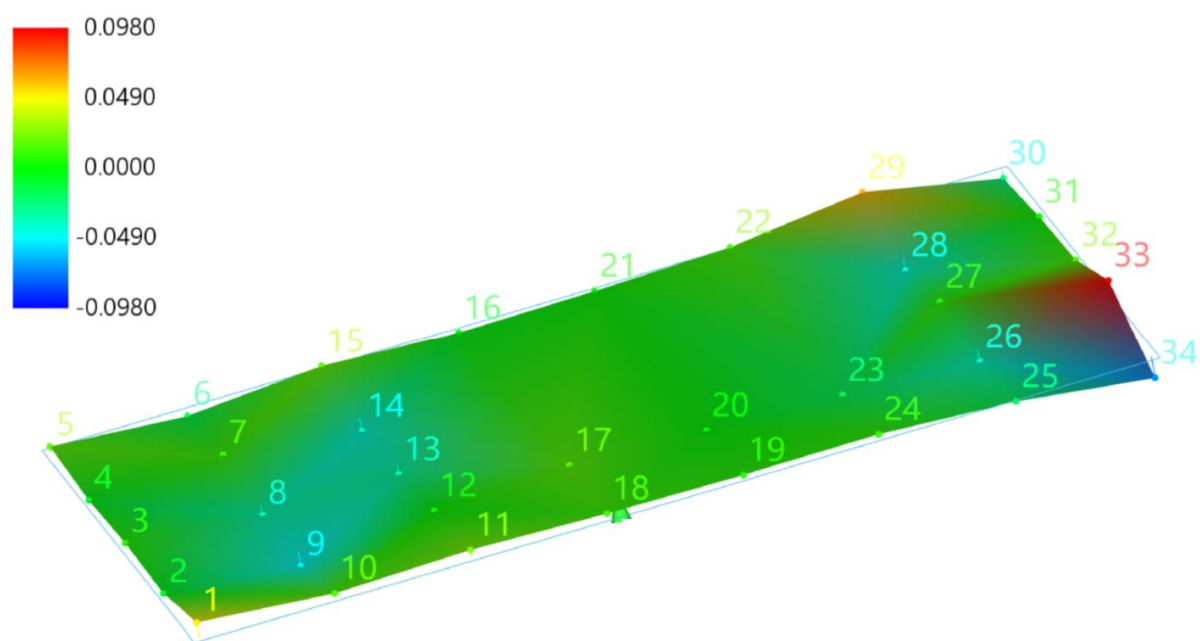
Statistické zhodnocení tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PETG (Spectrum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	78,1500 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	0,5620	
Směrodatná odchylka	1,1240	
Medián	78,0000 N·mm ⁻²	
Minimum	77,2000 N·mm ⁻²	
Maximum	79,4000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1770	
Interval spolehlivosti	76,36 N·mm ⁻²	79,94 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PETG (Spectrum)

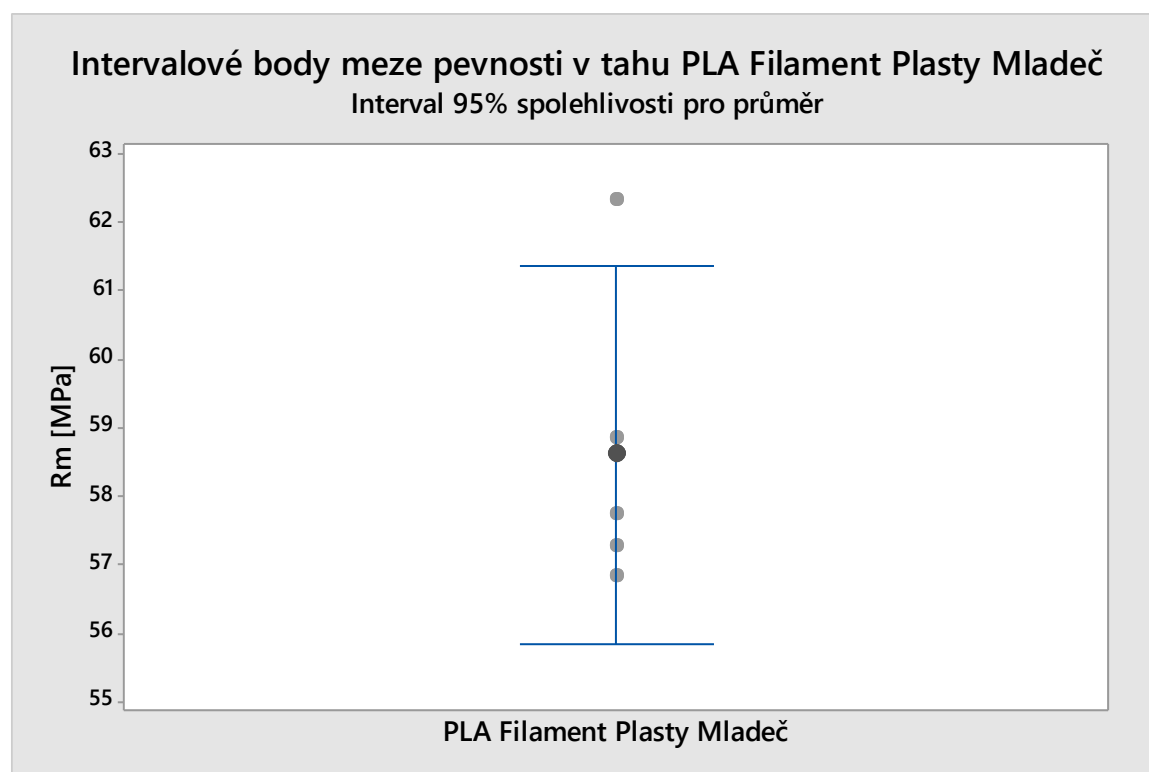
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,734	-0,266	-266
1Up	65,0	±0,1	64,741	-0,259	-259
2Do	40,0	±0,1	39,756	-0,244	-244
2Up	40,0	±0,1	39,752	-0,248	-248
3_1	80,0	±0,1	79,906	-0,094	-94
3_2	80,0	±0,1	79,930	-0,070	-70
3_3	80,0	±0,1	79,929	-0,071	-71
3_4	80,0	±0,1	79,947	-0,053	-53
4L	40,0	±0,1	40,000	0,000	0
4R	40,0	±0,1	39,998	-0,002	-2
5L	20,0	±0,1	19,789	-0,211	-211
5R	20,0	±0,1	19,820	-0,180	-180
6	0,1	±0,1	0,157	0,157	157



PŘÍLOHA 22

Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

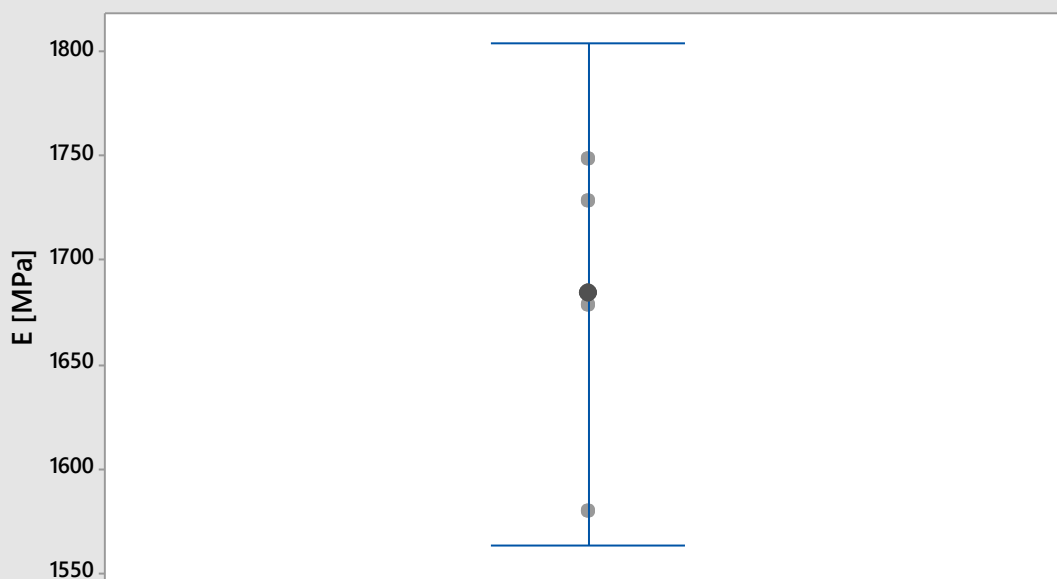
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	58,6066 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,9944	
Směrodatná odchylka	2,2235	
Medián	57,7352 MPa	
Minimum	56,8216 MPa	
Maximum	62,3461 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,1310	
Interval spolehlivosti	55,85 MPa	61,37 MPa



Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1684,0303 MPa	
Chyba střední hodnoty	37,7885	
Směrodatná odchylka	75,5769	
Medián	1703,8269 MPa	
Minimum	1579,5924 MPa	
Maximum	1748,8752 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3860	
Interval spolehlivosti	1563,80 MPa	1804,30 MPa

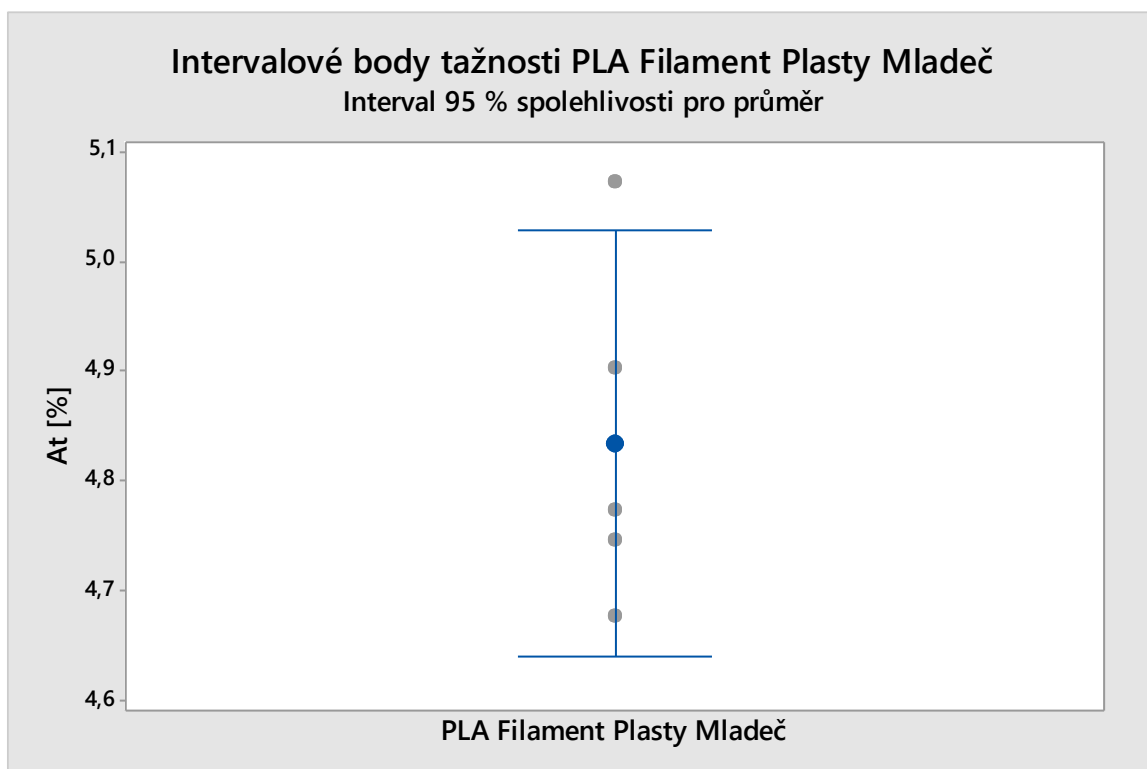
Intervalové body modulu pružnosti v tahu PLA Filament Plasty Mladeč
Interval 95% spolehlivosti pro průměr



PLA Filament Plasty Mladeč

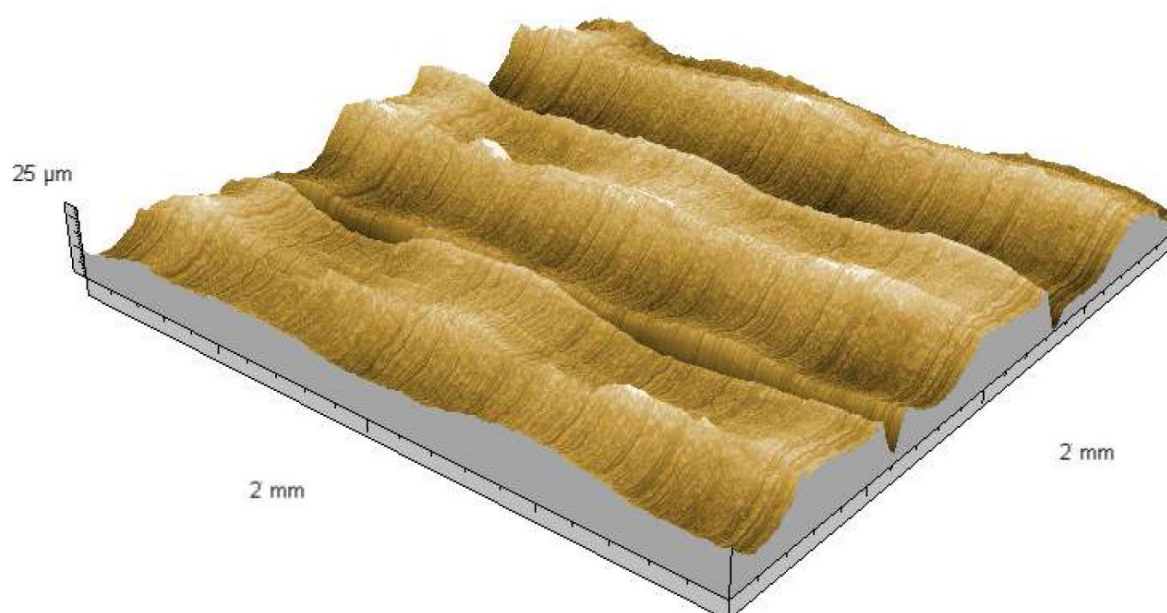
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	4,8342 %	
Chyba střední hodnoty	0,0699	
Směrodatná odchylka	0,1562	
Medián	4,7739 %	
Minimum	4,6770 %	
Maximum	5,0723 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4890	
Interval spolehlivosti	4,64 %	5,03 %

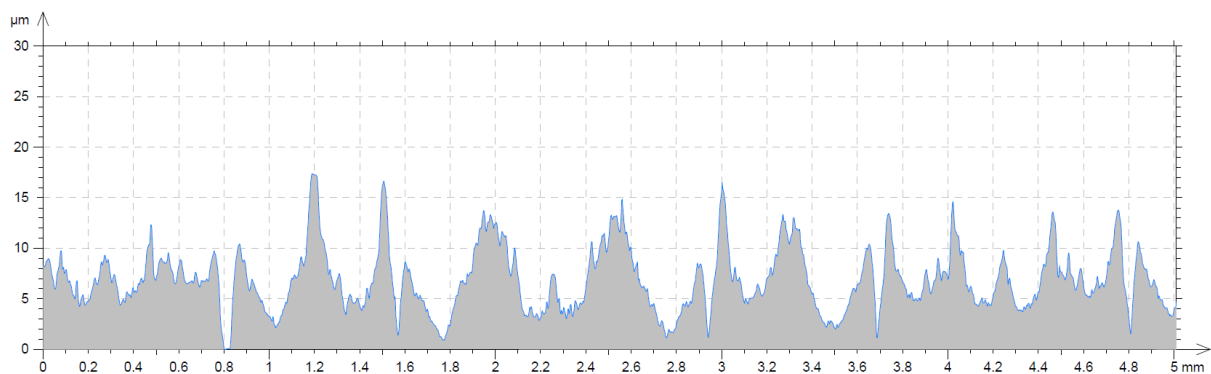


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	4,4
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	5,3
St	Celková výška povrchu	25
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	24,4

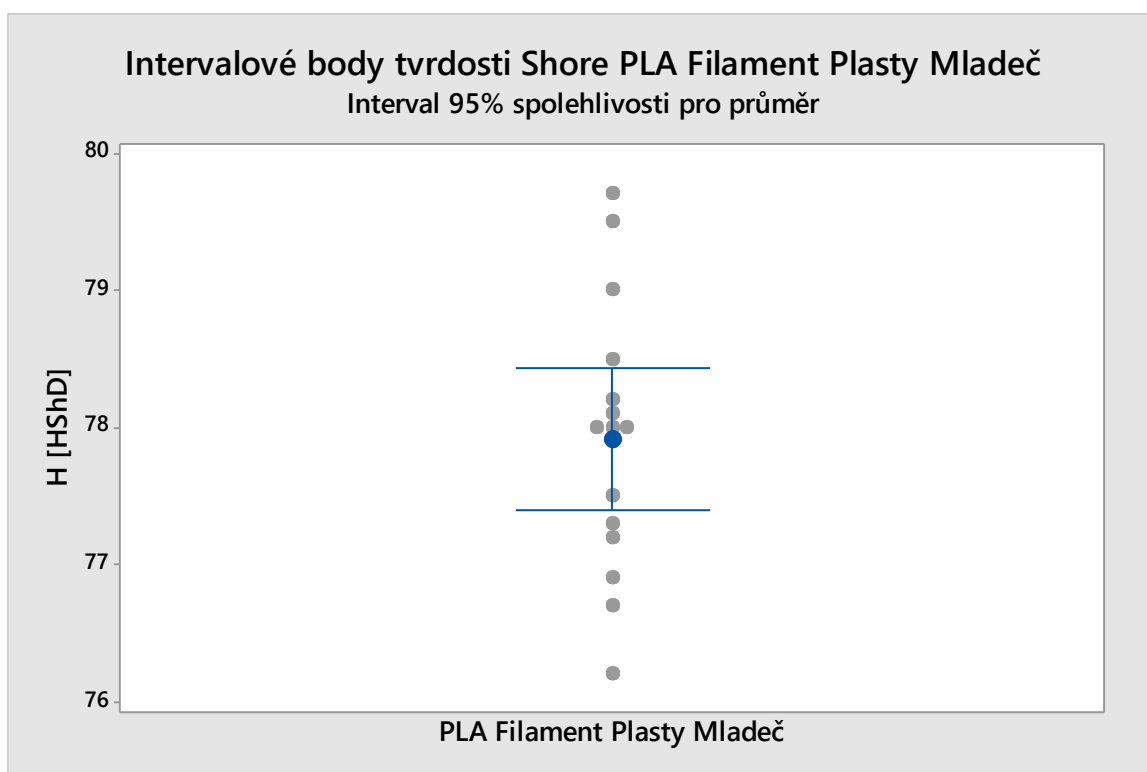


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	2,24
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	2,79
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	15,9
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	12,9
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,533
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	0,6
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	2,25
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	1,9



Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

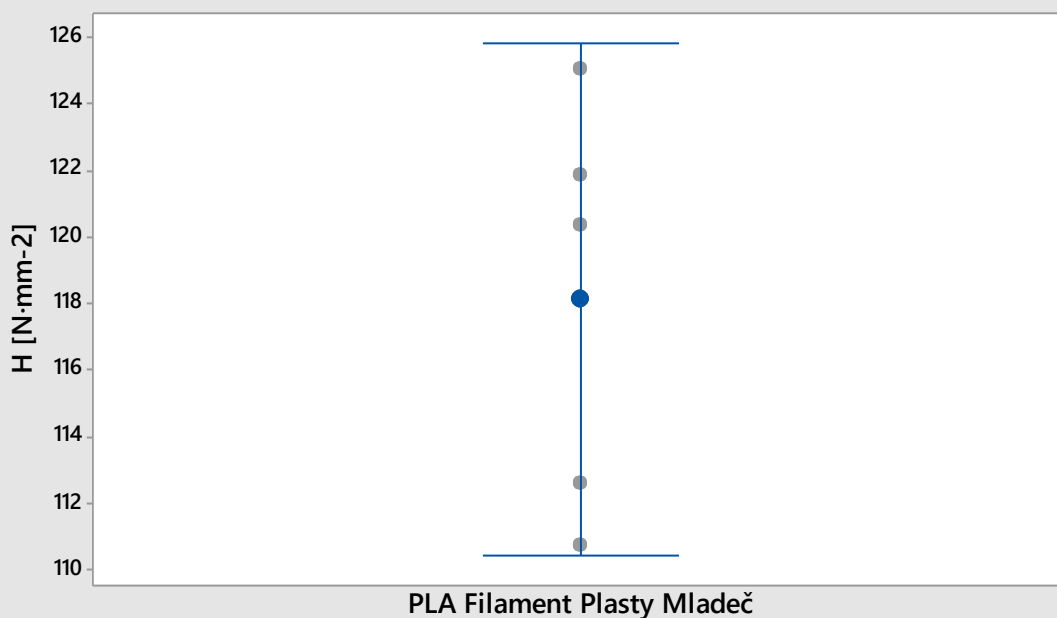
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	77,9188 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,2404	
Směrodatná odchylka	0,9614	
Medián	78,0000 HShD	
Minimum	76,2000 HShD	
Maximum	79,7000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,7020	
Interval spolehlivosti	77,41 HShD	78,43 HShD



Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

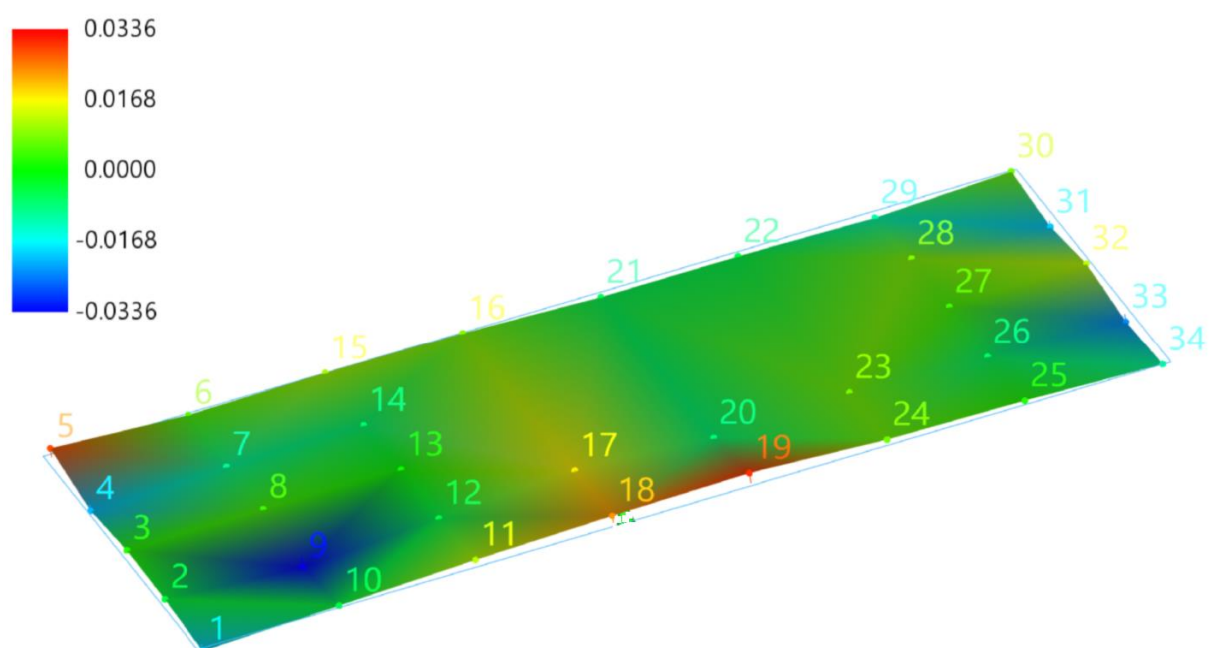
Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	118,1400 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,7725	
Směrodatná odchylka	6,1994	
Medián	120,4000 N·mm ⁻²	
Minimum	110,7000 N·mm ⁻²	
Maximum	125,1000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4060	
Interval spolehlivosti	110,44 N·mm ⁻²	125,84 N·mm ⁻²

Intervalové body tvrdosti vtlačování kuličkou PLA Filament Plasty Mladeč
Interval 95% spolehlivosti pro průměr



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PLA (Filament Plasty Mladeč)

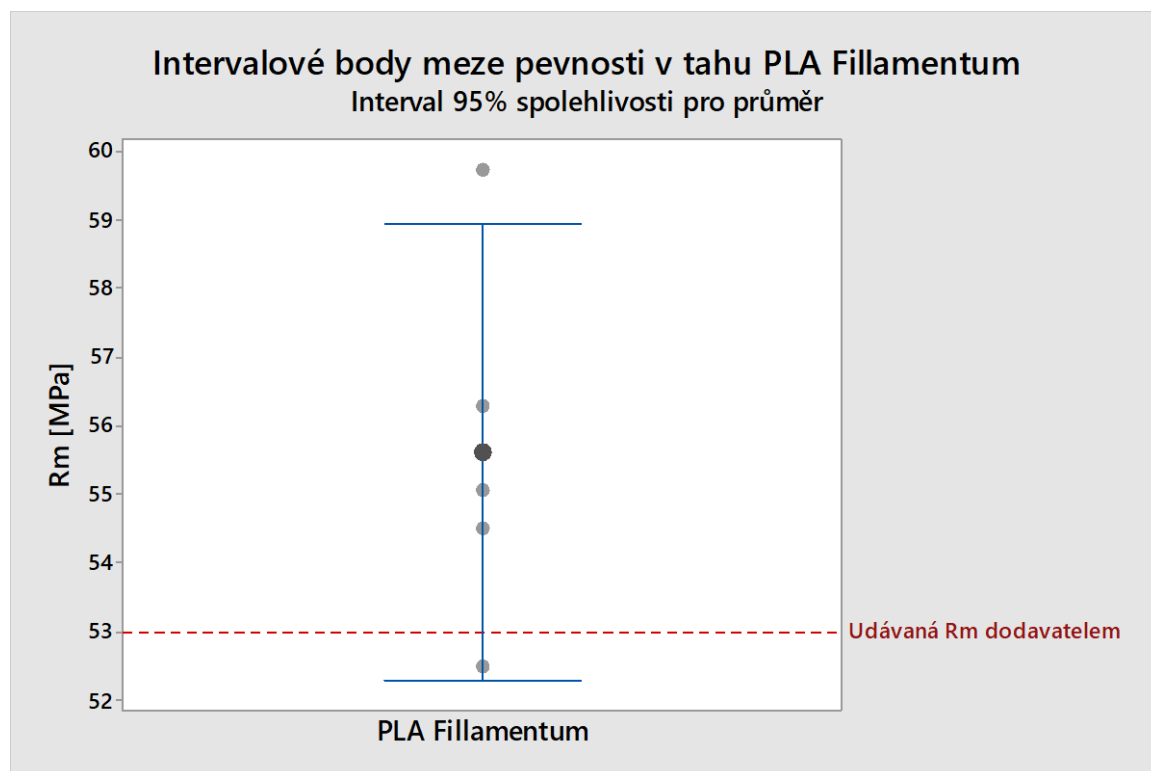
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,882	-0,118	-118
1Up	65,0	±0,1	64,883	-0,117	-117
2Do	40,0	±0,1	39,962	-0,038	-38
2Up	40,0	±0,1	39,939	-0,061	-61
3_1	80,0	±0,1	79,796	-0,204	-204
3_2	80,0	±0,1	79,789	-0,211	-211
3_3	80,0	±0,1	79,778	-0,222	-222
3_4	80,0	±0,1	79,759	-0,241	-241
4L	40,0	±0,1	40,005	0,005	5
4R	40,0	±0,1	40,013	0,013	13
5L	20,0	±0,1	19,945	-0,055	-55
5R	20,0	±0,1	19,954	-0,046	-46
6	0,1	±0,1	0,060	0,060	60



PŘÍLOHA 23

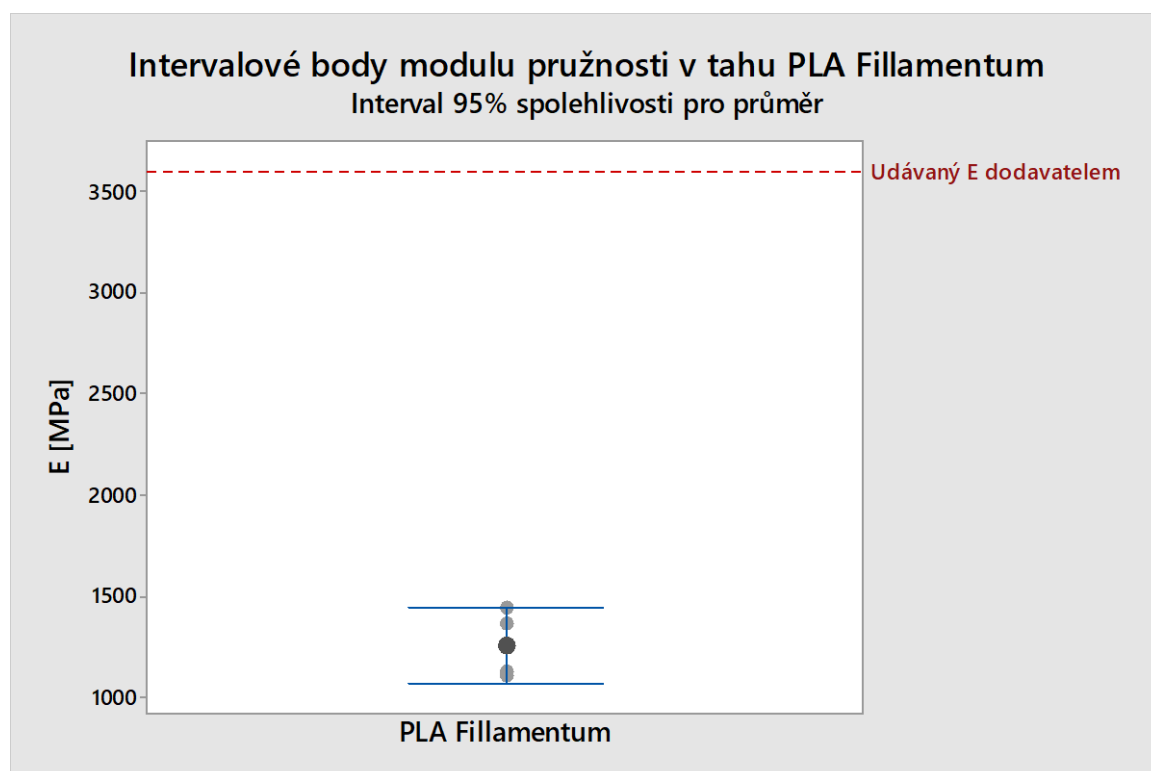
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	55,6057 MPa	
Chyba střední hodnoty	1,1955	
Směrodatná odchylka	2,6732	
Medián	55,0525 MPa	
Minimum	52,4942 MPa	
Maximum	59,7160 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,6130	
Interval spolehlivosti	52,29 MPa	58,92 MPa



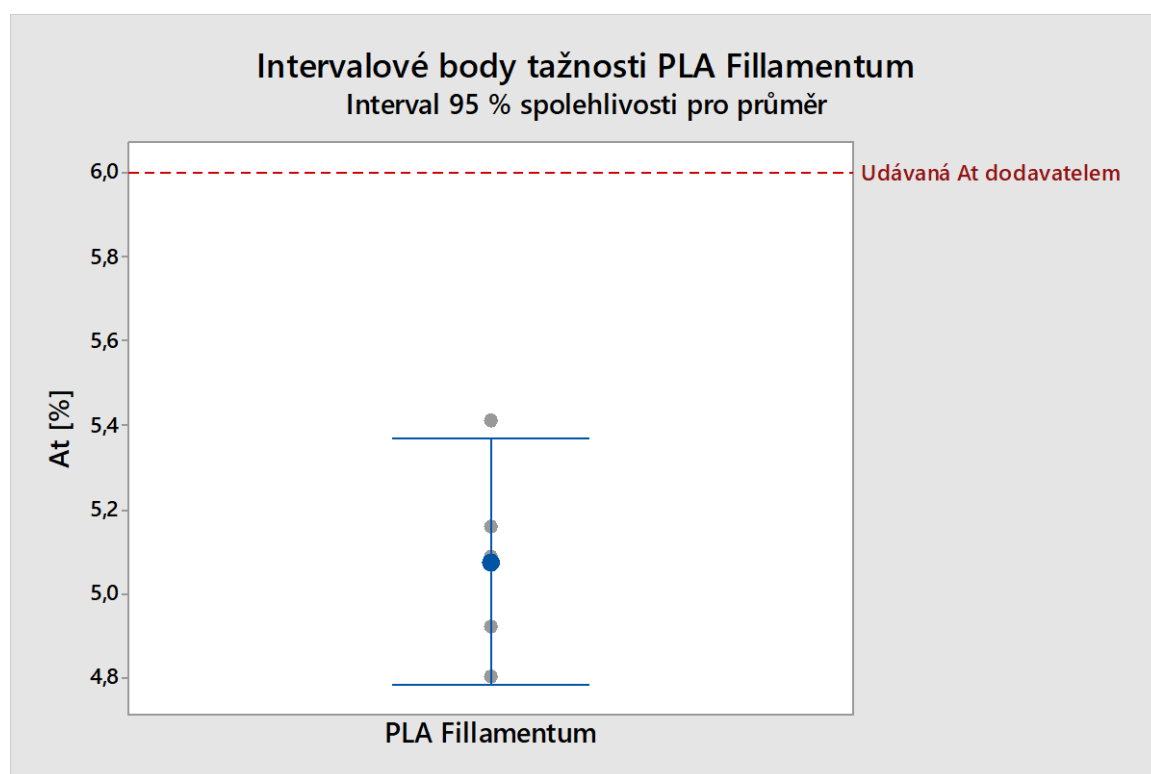
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1259,1855 MPa	
Chyba střední hodnoty	66,5556	
Směrodatná odchylka	148,8229	
Medián	1246,7929 MPa	
Minimum	1107,4523 MPa	
Maximum	1450,3554 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5410	
Interval spolehlivosti	1074,40 MPa	1444,00 MPa



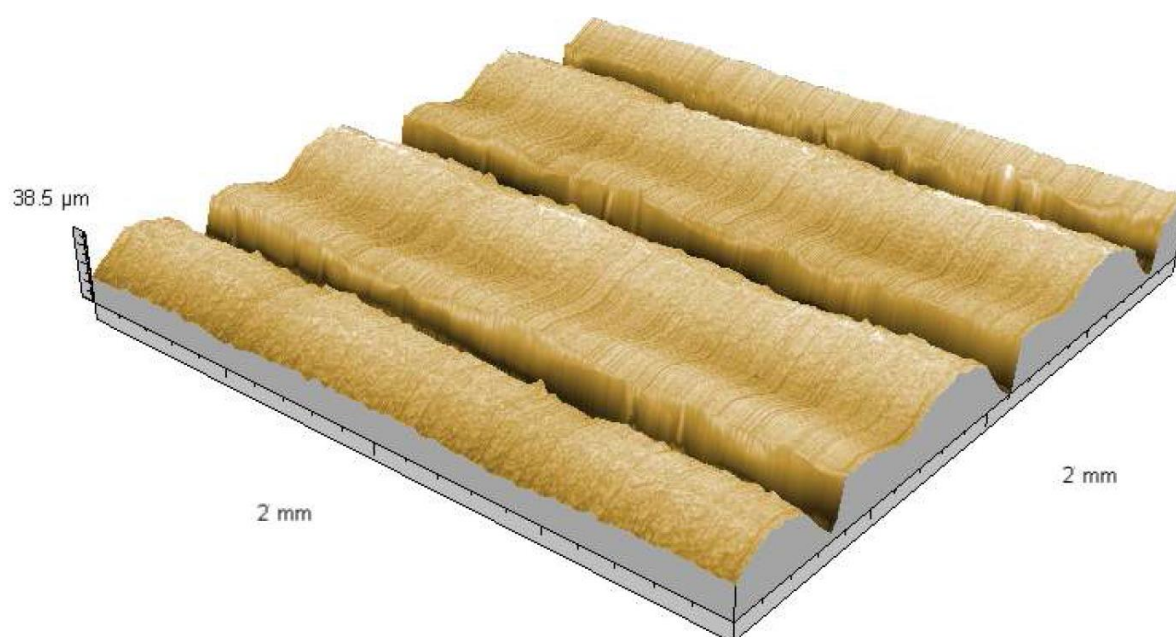
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	5,0765 %	
Chyba střední hodnoty	0,1047	
Směrodatná odchylka	0,2341	
Medián	5,0905 %	
Minimum	4,8021 %	
Maximum	5,4122 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8450	
Interval spolehlivosti	4,79 %	5,37 %

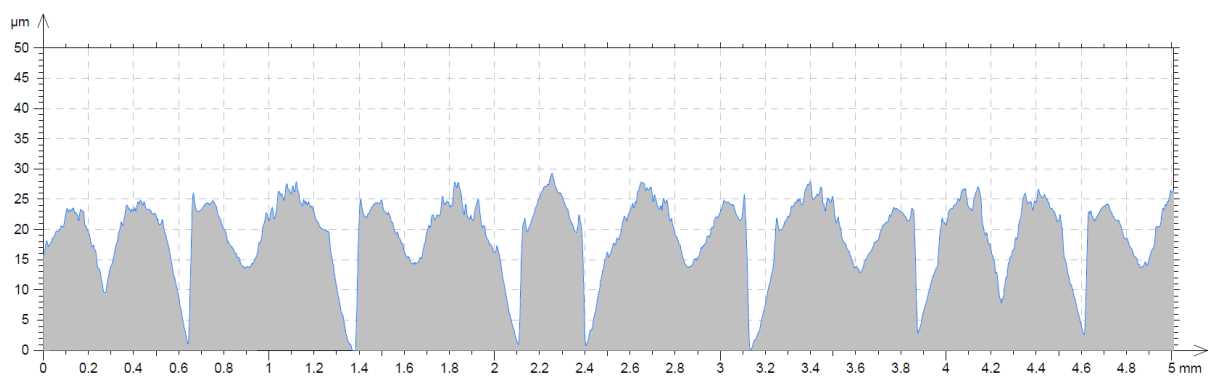


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	6,31
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	8,4
St	Celková výška povrchu	38,5
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	38,2

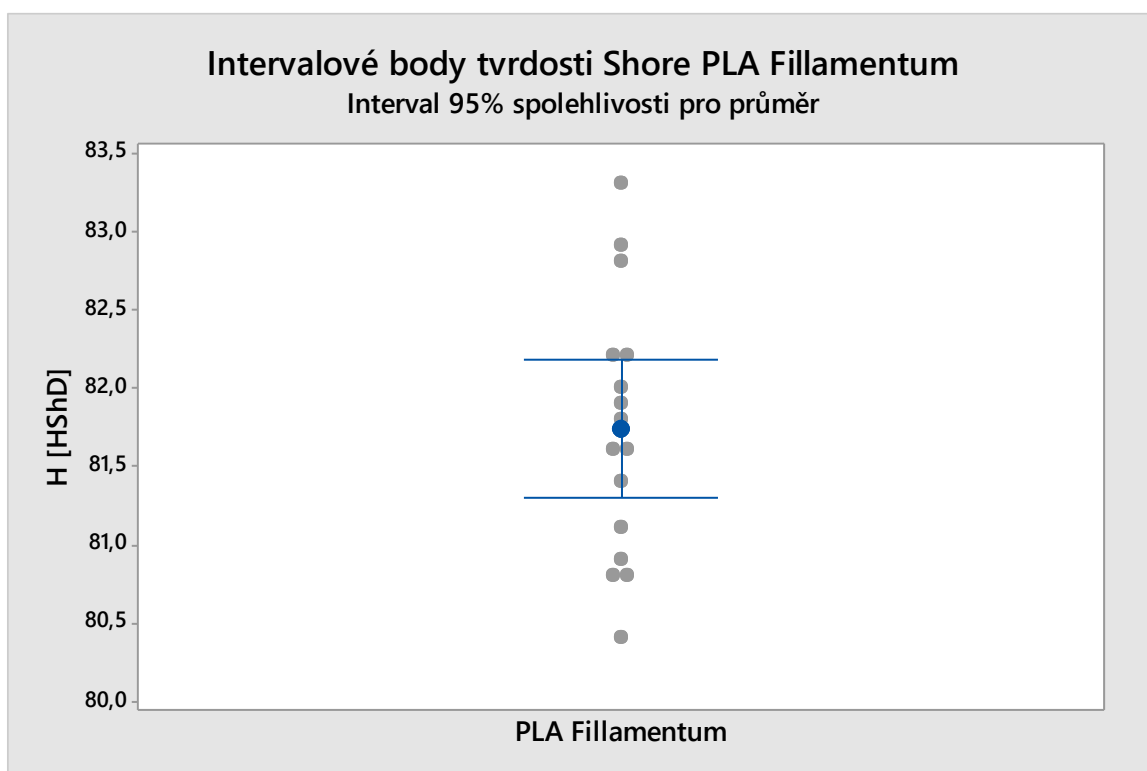


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	4,86
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	5,97
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	27,5
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	24,7
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,864
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	1
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	3,85
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	2,93



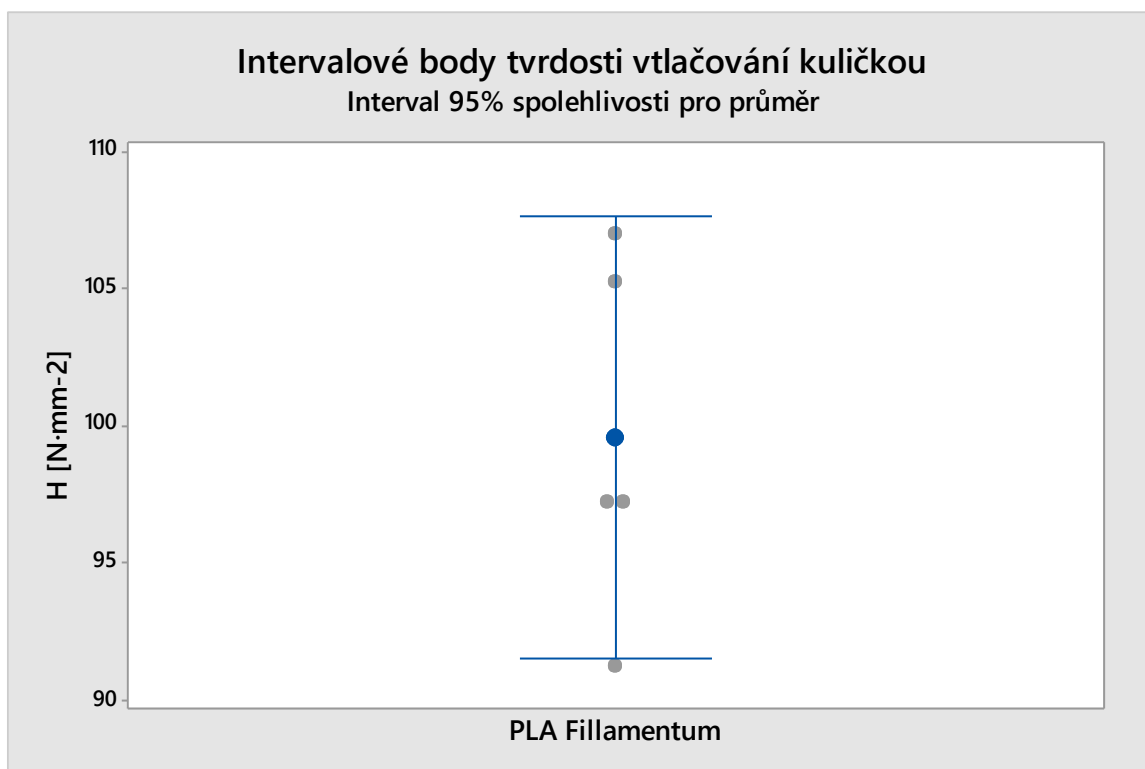
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	81,7313 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,2067	
Směrodatná odchylka	0,8268	
Medián	81,7000 HShD	
Minimum	80,4000 HShD	
Maximum	83,3000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8610	
Interval spolehlivosti	81,29 HShD	82,17 HShD



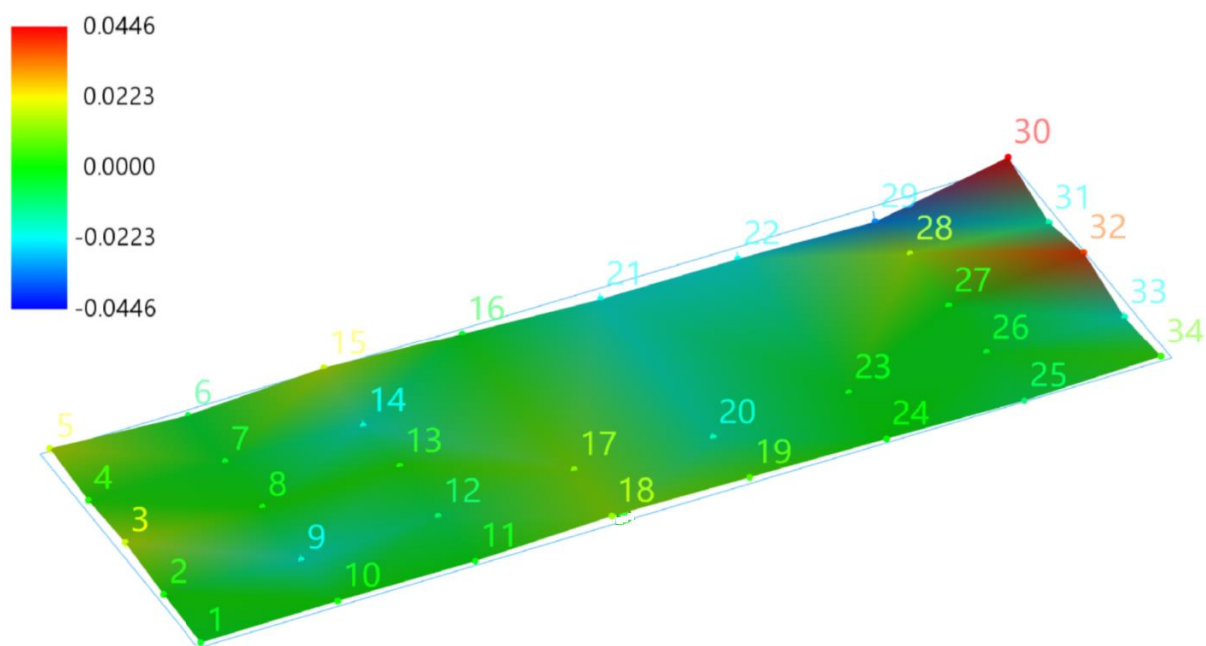
Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	99,5600 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,8999	
Směrodatná odchylka	6,4844	
Medián	97,2000 N·mm ⁻²	
Minimum	91,2000 N·mm ⁻²	
Maximum	107,0000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,3020	
Interval spolehlivosti	91,51 N·mm ⁻²	107,61 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PLA (Fillamentum)

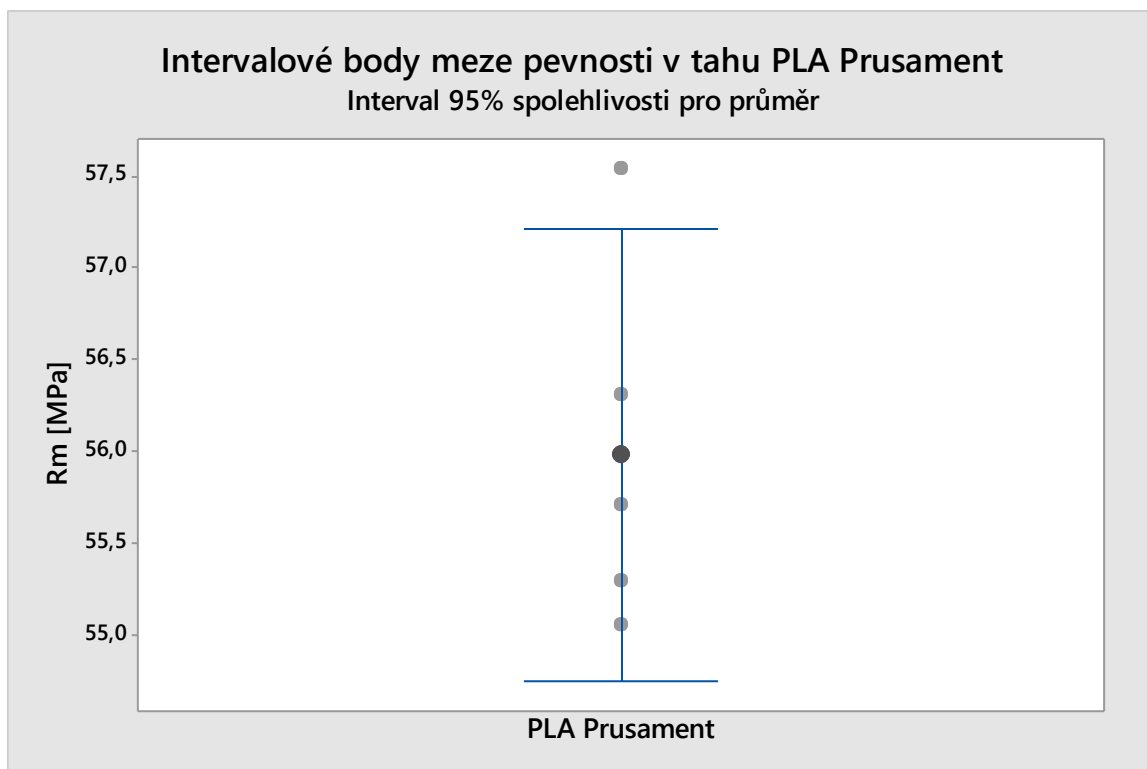
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,905	-0,095	-95
1Up	65,0	±0,1	64,909	-0,091	-91
2Do	40,0	±0,1	40,004	0,004	4
2Up	40,0	±0,1	39,980	-0,020	-20
3_1	80,0	±0,1	79,815	-0,185	-185
3_2	80,0	±0,1	79,817	-0,183	-183
3_3	80,0	±0,1	79,815	-0,185	-185
3_4	80,0	±0,1	79,809	-0,191	-191
4L	40,0	±0,1	39,992	-0,008	-8
4R	40,0	±0,1	40,023	0,023	23
5L	20,0	±0,1	19,963	-0,037	-37
5R	20,0	±0,1	19,957	-0,043	-43
6	0,1	±0,1	0,074	0,074	74



PŘÍLOHA 24

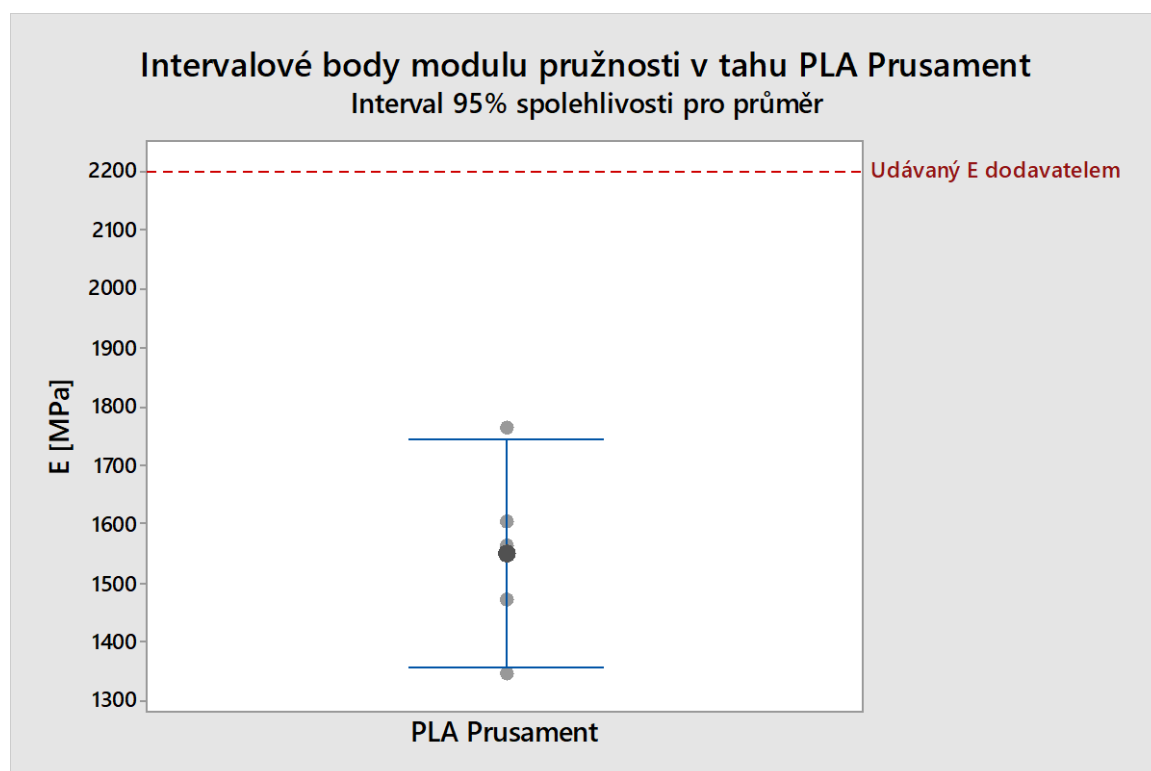
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	55,9831 MPa	
Chyba střední hodnoty	0,4436	
Směrodatná odchylka	0,9918	
Medián	55,7114 MPa	
Minimum	55,0564 MPa	
Maximum	57,5398 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,4590	
Interval spolehlivosti	54,75 MPa	57,22 MPa



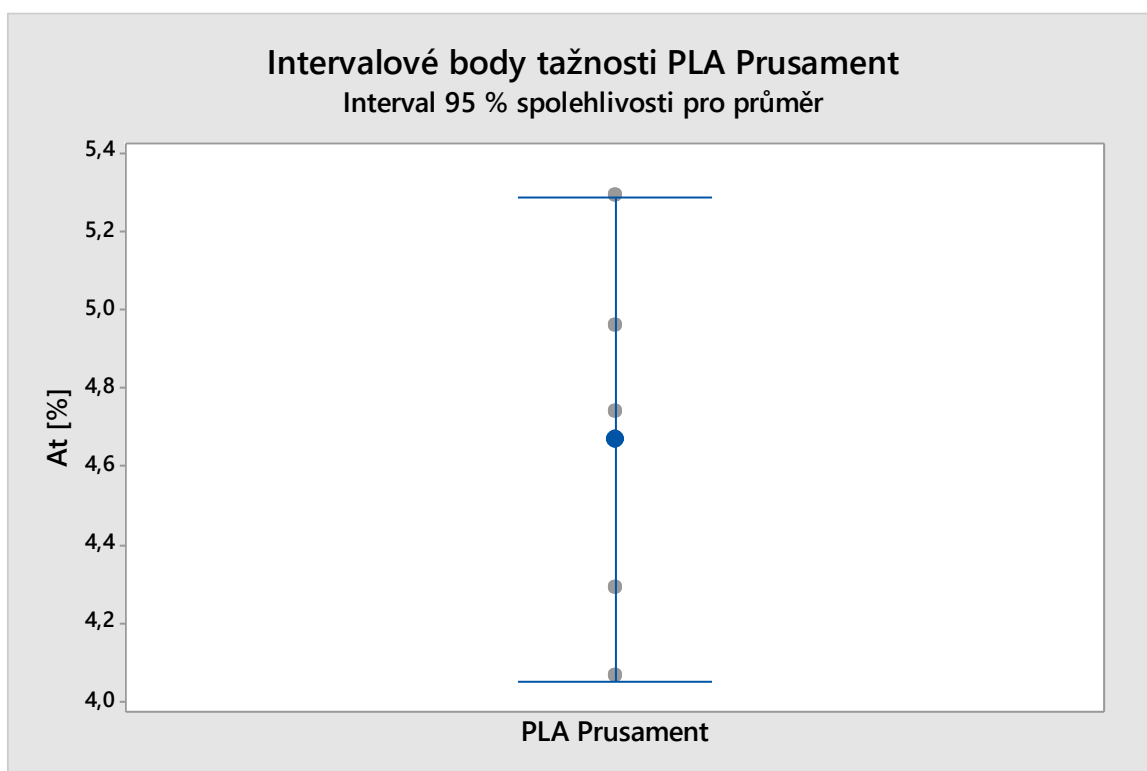
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	1551,6518 MPa	
Chyba střední hodnoty	69,5531	
Směrodatná odchylka	155,5255	
Medián	1566,2204 MPa	
Minimum	1347,3515 MPa	
Maximum	1765,4035 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8920	
Interval spolehlivosti	1358,50 MPa	1744,80 MPa



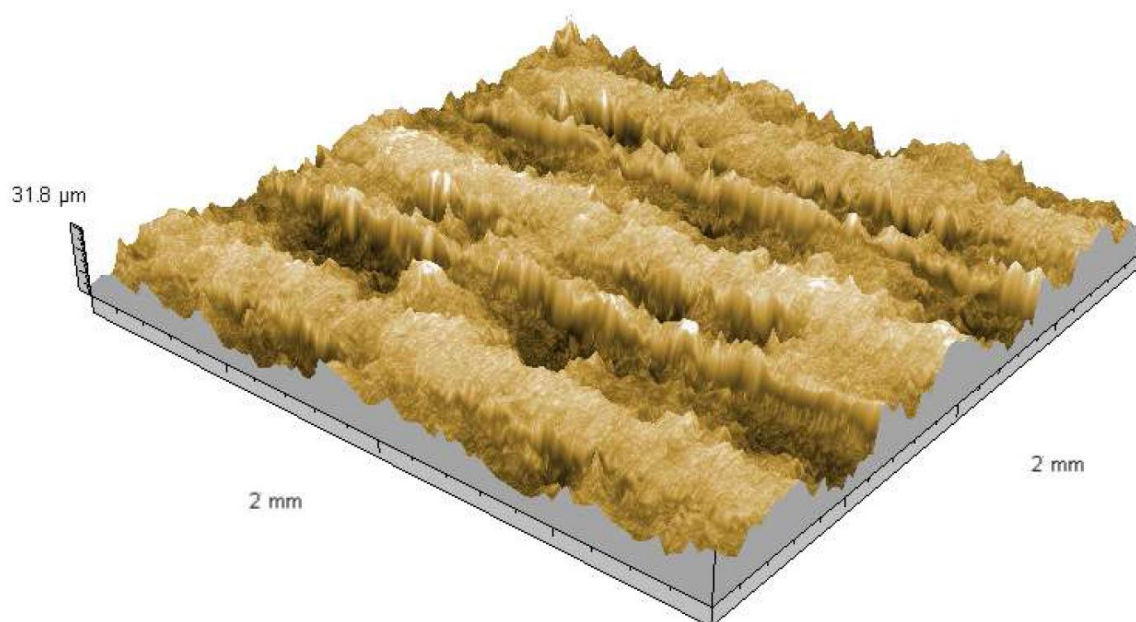
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	4,6704%	
Chyba střední hodnoty	0,2224	
Směrodatná odchylka	0,4973	
Medián	4,7428%	
Minimum	4,0649%	
Maximum	5,2928%	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,8260	
Interval spolehlivosti	4,05%	5,29%

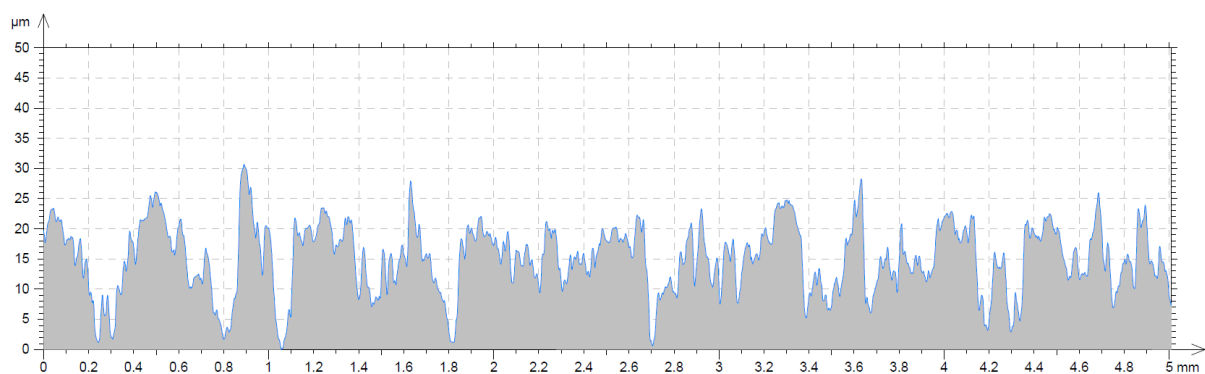


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	5,86
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	7,06
St	Celková výška povrchu	31,8
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	31,4

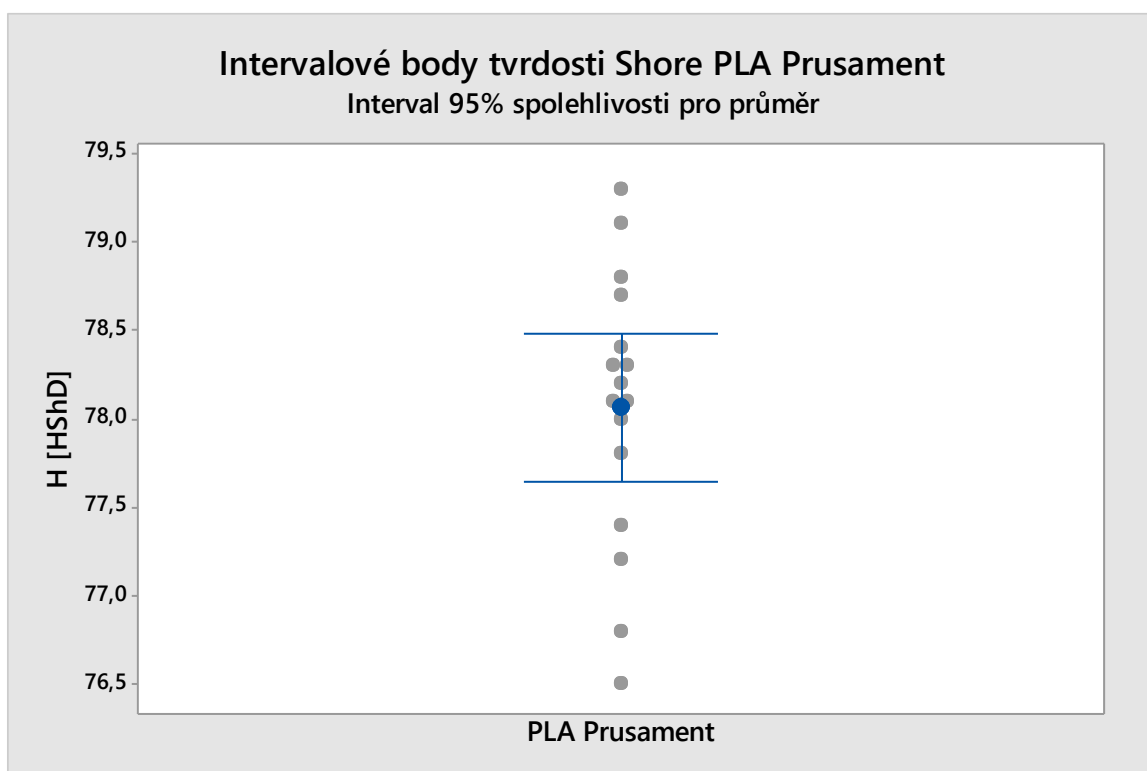


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	4,36
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	5,37
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	31,6
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	24,7
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	0,746
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	0,844
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	3,14
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	2,53



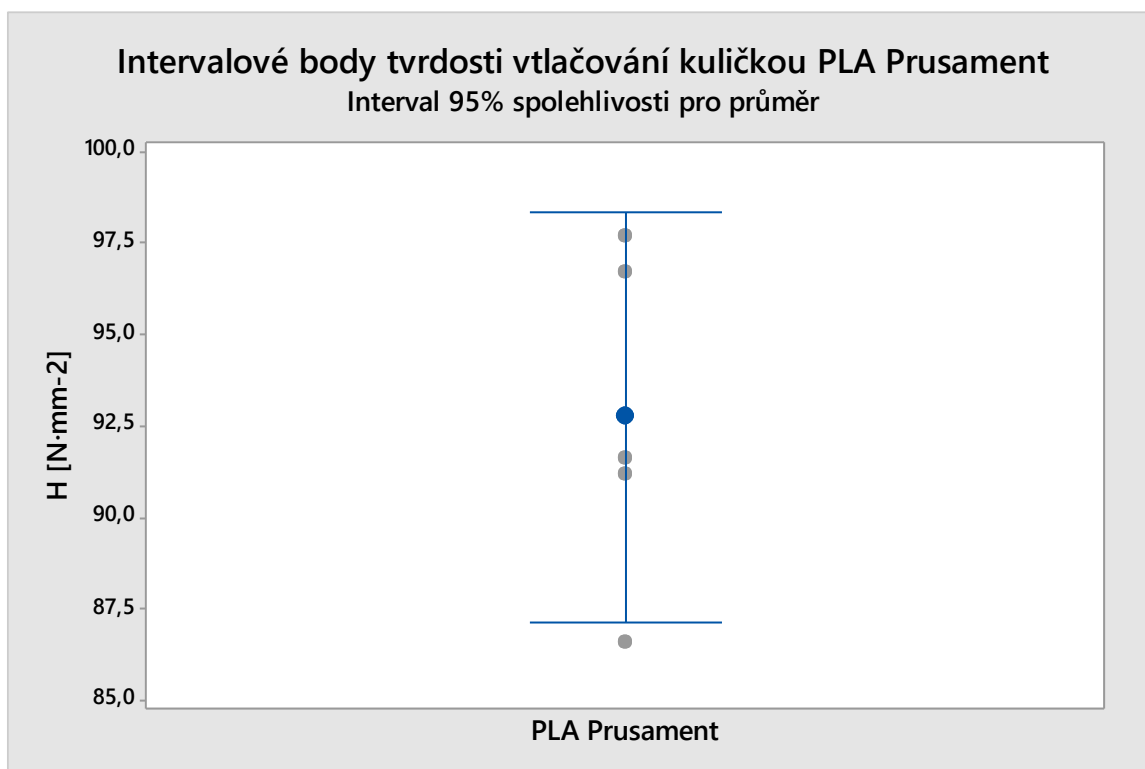
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	78,0625 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,1947	
Směrodatná odchylka	0,7788	
Medián	78,1500 HShD	
Minimum	76,5000 HShD	
Maximum	79,3000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5590	
Interval spolehlivosti	77,65 HShD	78,48 HShD



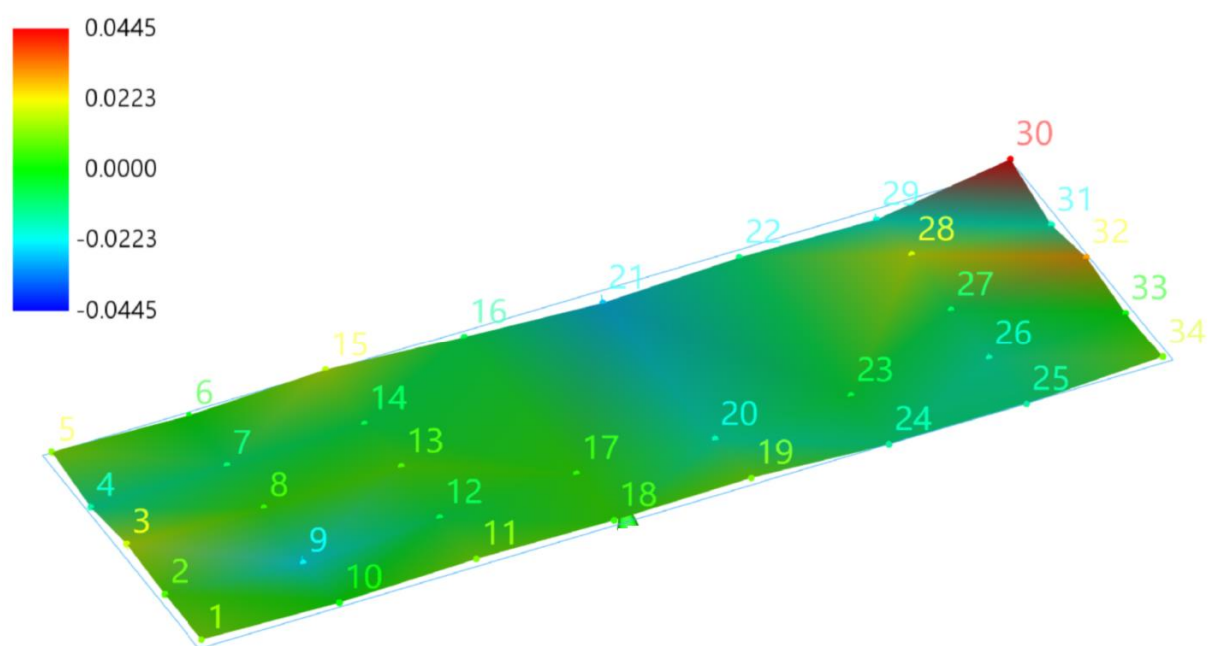
Statistické zhodnocení tvrdosti vtlačování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PLA (Prusament)

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	92,7600 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	2,0205	
Směrodatná odchylka	4,5181	
Medián	91,6000 N·mm ⁻²	
Minimum	86,6000 N·mm ⁻²	
Maximum	97,7000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5030	
Interval spolehlivosti	87,15 N·mm ⁻²	98,37 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PLA (Prusament)

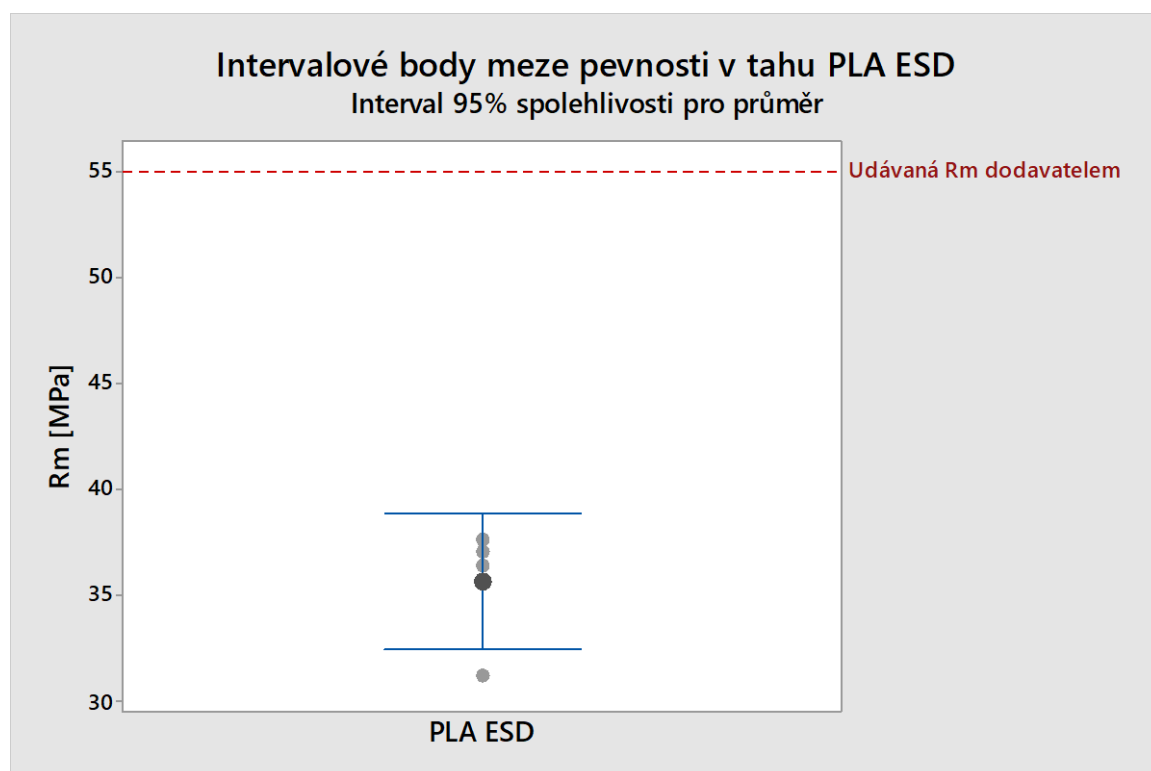
Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,912	-0,088	-88
1Up	65,0	±0,1	64,915	-0,085	-85
2Do	40,0	±0,1	40,002	0,002	2
2Up	40,0	±0,1	39,982	-0,018	-18
3_1	80,0	±0,1	79,814	-0,186	-186
3_2	80,0	±0,1	79,822	-0,178	-178
3_3	80,0	±0,1	79,819	-0,181	-181
3_4	80,0	±0,1	79,813	-0,187	-187
4L	40,0	±0,1	40,008	0,008	8
4R	40,0	±0,1	40,018	0,018	18
5L	20,0	±0,1	19,984	-0,016	-16
5R	20,0	±0,1	19,961	-0,039	-39
6	0,1	±0,1	0,061	0,061	61



PŘÍLOHA 25

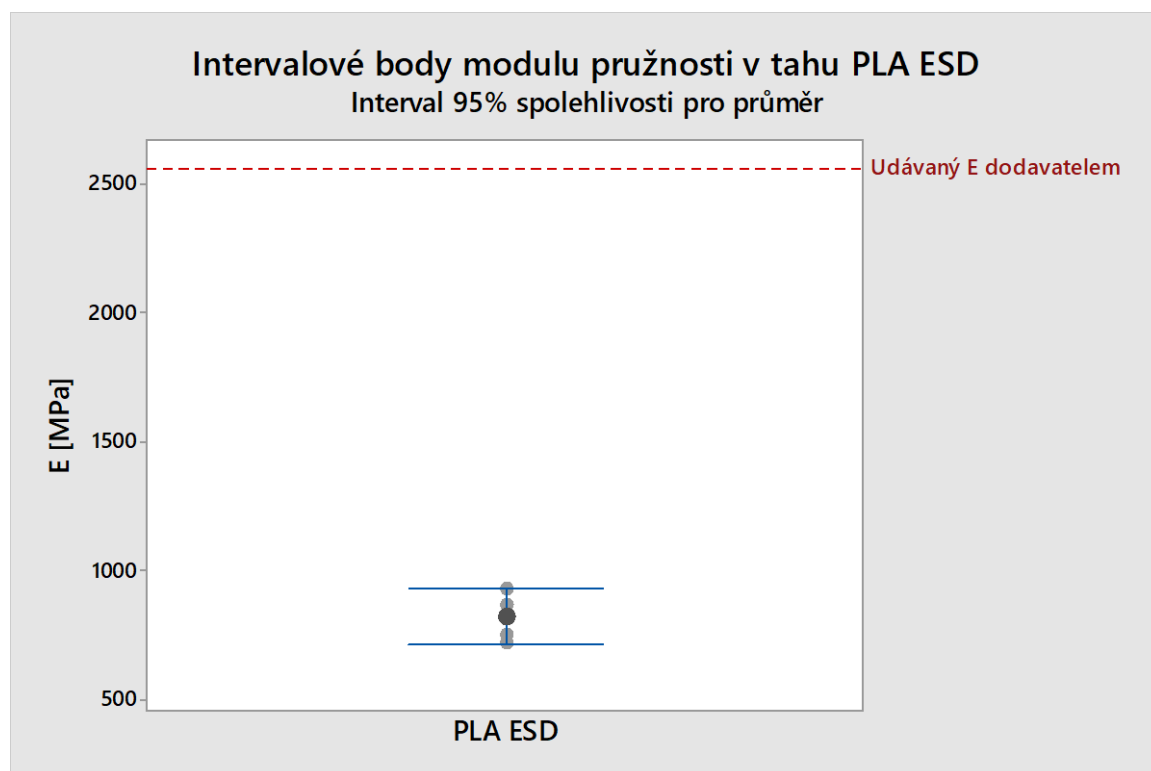
Statistické zhodnocení meze pevnosti R_m [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA ESD

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	35,6162 MPa	
Chyba střední hodnoty	1,1564	
Směrodatná odchylka	2,5857	
Medián	36,4071 MPa	
Minimum	31,1827 MPa	
Maximum	37,6743 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,0870	
Interval spolehlivosti	32,41 MPa	38,83 MPa



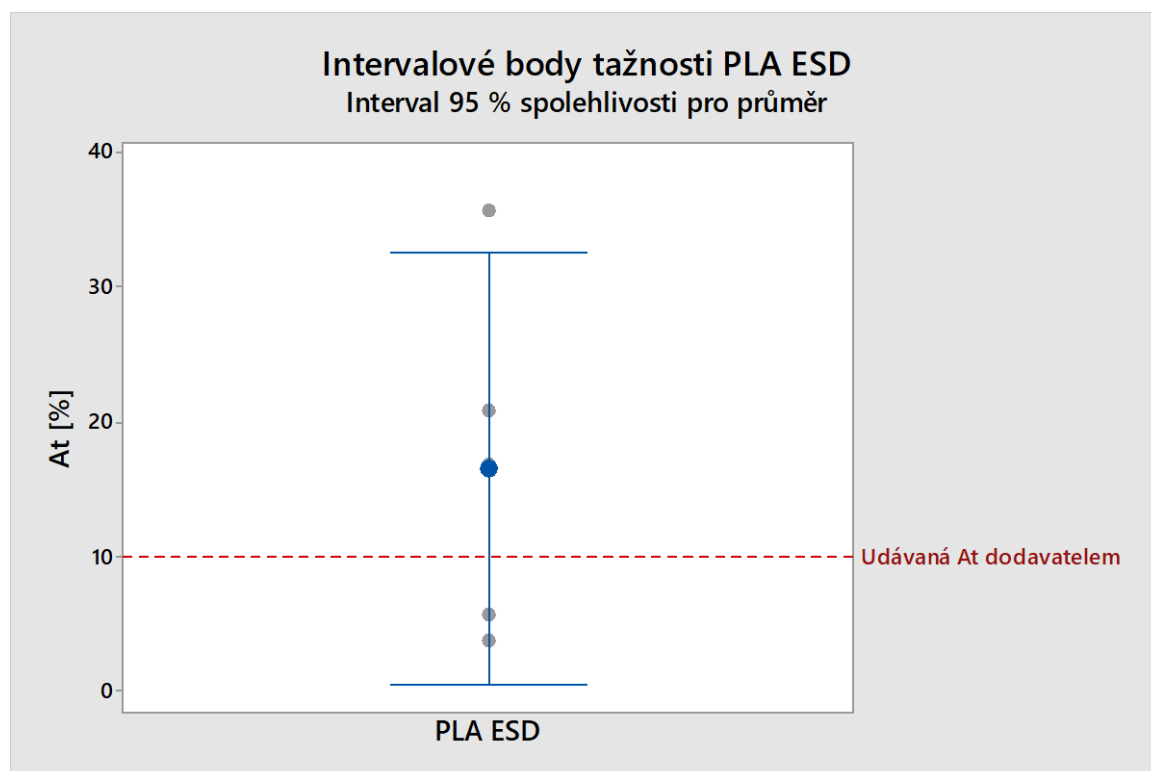
Statistické zhodnocení modulu pružnosti E [MPa] v tahu aditivního materiálu PLA ESD

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	826,9636 MPa	
Chyba střední hodnoty	37,8023	
Směrodatná odchylka	24,5284	
Medián	838,7457 MPa	
Minimum	730,1062 MPa	
Maximum	933,4772 MPa	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,7030	
Interval spolehlivosti	722,00 MPa	931,90 MPa



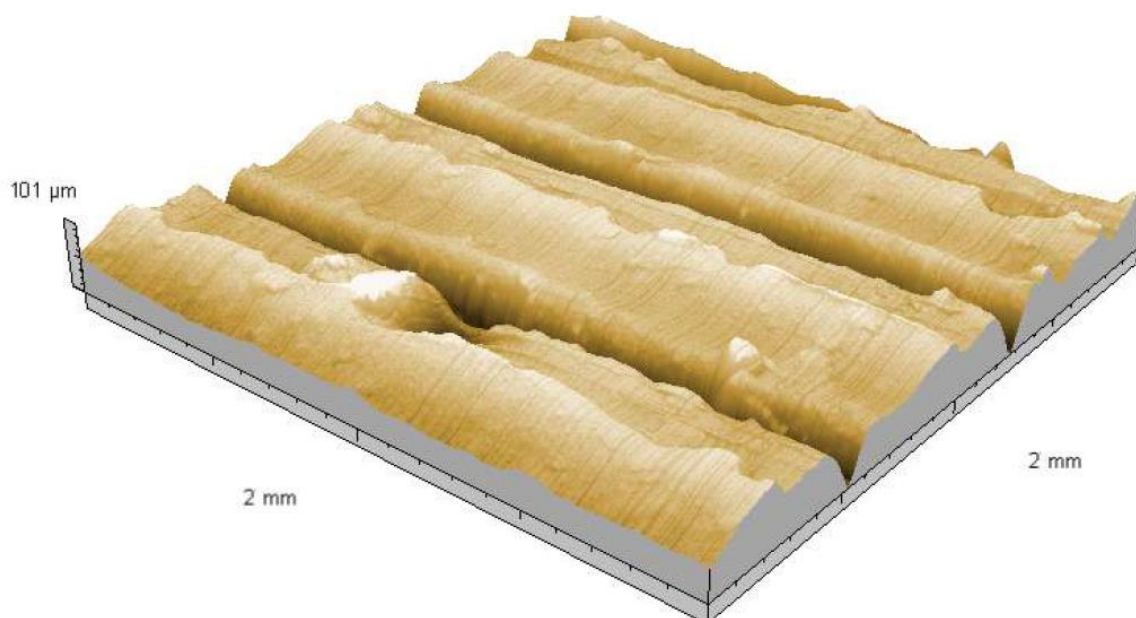
Statistické zhodnocení tažnosti At [%] aditivního materiálu PLA ESD

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	16,5622 %	
Chyba střední hodnoty	5,7785	
Směrodatná odchylka	12,9210	
Medián	16,8771 %	
Minimum	3,7013 %	
Maximum	35,7080 %	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,5510	
Interval spolehlivosti	0,52 %	32,61 %

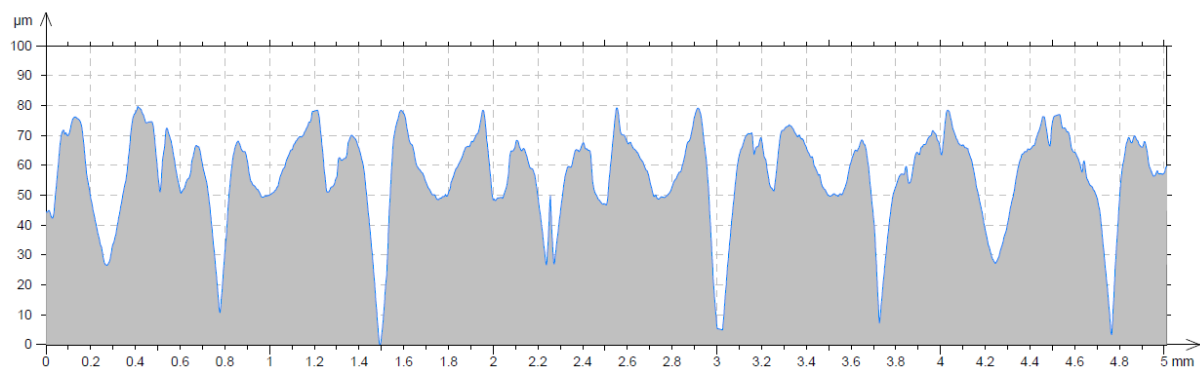


Parametry textury povrchu aditivního materiálu PLA ESD

Parametr	Název	Hodnota [μm]
Sa	Průměrná aritmetická úchylka povrchu	12,6
Sq	Průměrná kvadratická úchylka (RMS) povrchu	17,6
St	Celková výška povrchu	101
Sz	Výška z deseti bodů povrchu	100

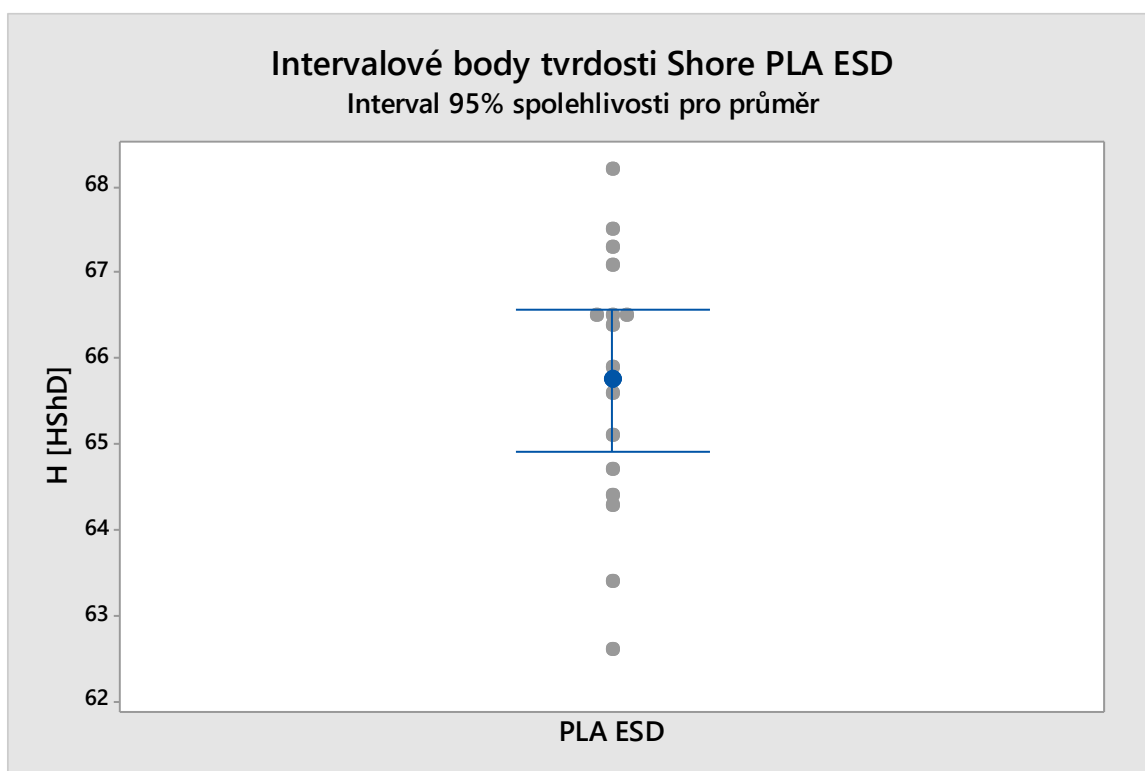


Parametr		Název	Hodnota [μm]
Drsnost	Ra	Průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti	11
	Rq	Průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti	14
	Rt	Celková výška profilu drsnosti	78,6
	Rz	Největší výška profilu drsnosti	65,3
Vlnitost	Wa	Průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti	2,45
	Wq	Průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti	2,75
	Wt	Celková výška profilu vlnitosti	9,82
	Wz	Největší výška profilu vlnitosti	8,38



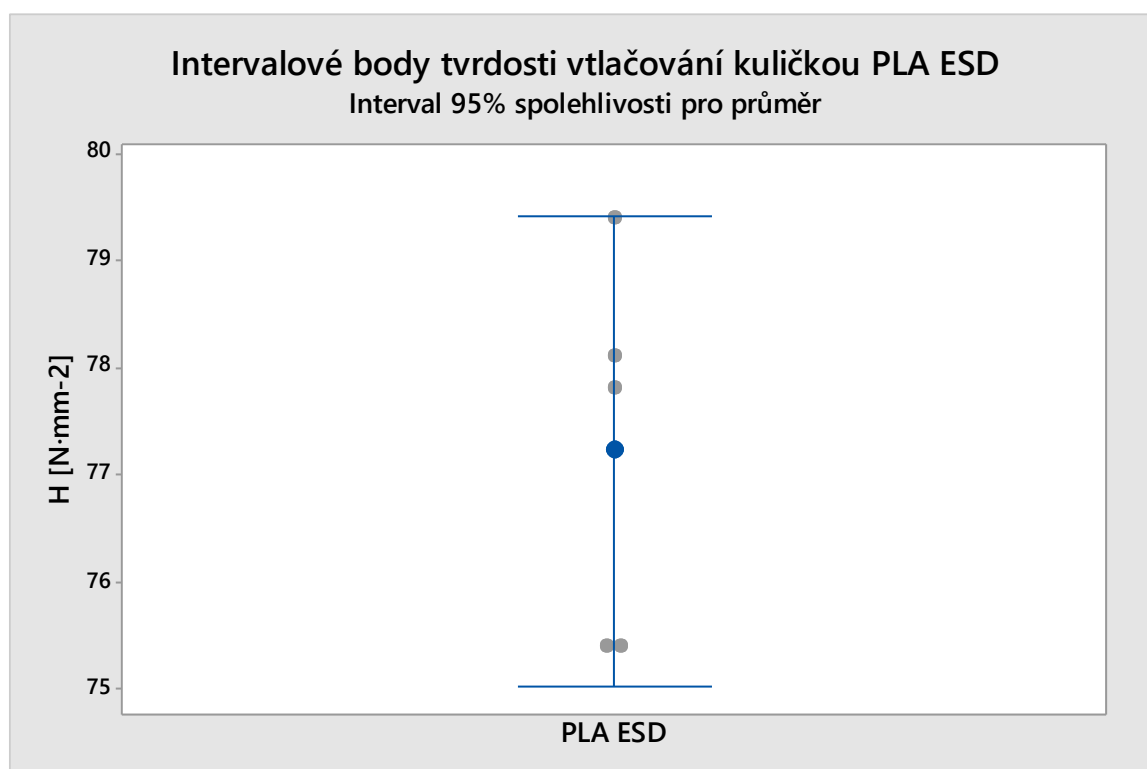
Statistické zhodnocení tvrdosti Shore [HShD] aditivního materiálu PLA ESD

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	65,7500 HShD	
Chyba střední hodnoty	0,3891	
Směrodatná odchylka	1,5565	
Medián	66,1500 HShD	
Minimum	62,6000 HShD	
Maximum	68,2000 HShD	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,6500	
Interval spolehlivosti	64,92 HShD	66,58 HShD



Statistické zhodnocení tvrdosti vtláčování kuličkou H [N·mm⁻²] aditivního materiálu PLA ESD

Parametry	Hodnoty	
Střední hodnota	77,2200 N·mm ⁻²	
Chyba střední hodnoty	0,7902	
Směrodatná odchylka	1,7669	
Medián	77,8000 N·mm ⁻²	
Minimum	75,4000 N·mm ⁻²	
Maximum	79,4000 N·mm ⁻²	
Hladina spolehlivosti (95,0 %)	0,2750	
Interval spolehlivosti	75,03 N·mm ⁻²	79,41 N·mm ⁻²



Zhodnocení rozměrové přesnosti aditivního materiálu PLA ESD

Měřený parametr	Základní rozměr [mm]	Tolerance rozměru [mm]	Změřený rozměry [mm]	Odchylka rozměru [mm]	Odchylka rozměru [%]
1Do	65,0	±0,1	64,792	-0,208	-208
1Up	65,0	±0,1	64,854	-0,146	-146
2Do	40,0	±0,1	39,979	-0,021	-21
2Up	40,0	±0,1	39,962	-0,038	-38
3_1	80,0	±0,1	79,732	-0,268	-268
3_2	80,0	±0,1	79,724	-0,276	-276
3_3	80,0	±0,1	79,707	-0,293	-293
3_4	80,0	±0,1	79,733	-0,267	-267
4L	40,0	±0,1	39,919	-0,081	-81
4R	40,0	±0,1	39,910	-0,090	-90
5L	20,0	±0,1	20,004	0,004	4
5R	20,0	±0,1	19,991	-0,009	-9
6	0,1	±0,1	0,066	0,066	66

