

Vliv integrity povrchu součásti vyrobené 3D tiskem na mechanické vlastnosti

Uliana Finaeva¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojí, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Práce se zabývá vlivem integrity povrchu součástí vyrobených 3D tiskem na mechanické vlastnosti. Experimentální část byla uskutečněna na vzorcích ze slitiny Ti6Al4V s a bez povrchového a tepelného opracování. Vzorky byly vyrobené metodou DMLS na tiskárně M2 cusing, Concept Laser GmbH. V rámci této práce bylo provedeno měření drsnosti dotykovým a bezdotykovým způsobem a měření mezi únavy. Větší pozornost byla věnována zpracování a analýze dat získaných bezdotykovým snímaním. Z výsledků měření byly zjištěné základní závislosti mezi drsností, přítomností tepelného opracování a únavovou pevností.

Klíčová slova: drsnost; mez únavy; 3D tisk; titan.

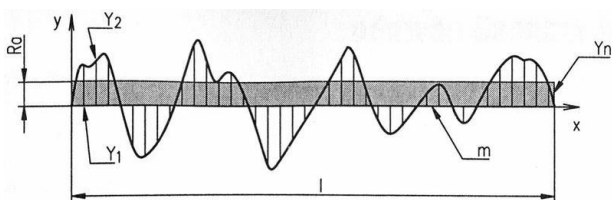
1. Teoretický úvod

Integrita povrchu je jedním z faktorů významně působících na spolehlivost, přesnost a životnost součástí. Nerovnosti povrchu jsou koncentrátory napětí a až v 80 % případů vedou ke snížení únavové pevnosti, a to zvláště pro dynamicky namáhané součásti [1]. Základní závislost mezi drsností a únavovou pevností bude odvedena v této práci dále.

1.1. Drsnost.

Drsnost je soubor nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě. Do definice drsnosti nespádají vady povrchu (tj. náhodné nepravidelné nerovnosti, které se vyskytují jen ojediněle – rýsky, trhlinky, důlky apod.) nebo vady materiálu způsobené poškozením nebo jiným způsobem a také vlnitost povrchu [2]. Vlnitost povrchu jsou periodicky se vyskytující makronerovnosti povrchu, způsobené vibracemi stroje, nehomogenitou materiálu atd. Pro eliminaci vlivu vlnitosti na měření hodnoty drsnosti je používán filtr profilu λ_c , definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti. Pro charakteristiku drsnosti povrchu je v této práci použit parametr R_a a to ve směru příčném (obvodovém) a ve směru podélném. Parametr R_a je průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu, aritmetický průměr absolutních hodnot všech pořadic $Y(x)$ v rozsahu základní délky l_r :

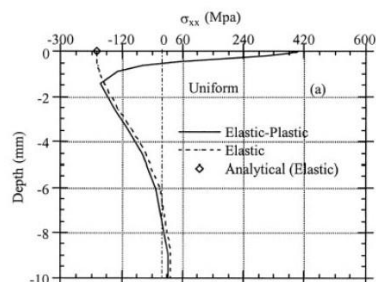
$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Y(x)| dx \quad (1)$$



Obr. 1. Parametr drsnosti R_a [3]

1.2. Zbytková napětí

Zbytková napětí vznikají v materiálu při mechanických, tepelných, chemických nebo mechanicko-tepelných úpravách a zůstávají v materiálu. Mohou vznikat i kvůli vrstevnatosti materiálu. Zbytková napětí jsou v materiálu vždy, i když na něj nepůsobí vnější síly. Nejsou stále stejná a mohou se přemísťovat, uvolňovat a přerozdělovat. Zbytková napětí mají velký vliv na únavovou životnost materiálu, jeho korozeodolnost a pevnostní charakteristiky. Rovnají se rozdílu skutečných napětí v pružné – plastickém tělese a fiktivních napětí stejného, ale ideálně pružného tělesa. Při jejich větším množství může docházet ke zhoršení mechanických vlastností a deformacím vlivem jejich uvolnění [1]. Jsou koncentrována hned pod povrchem a často nerovnoměrně rozložena na povrchu součástí. Nerovnoměrnost rozložení napětí hned pod povrchem způsobují makroskopické koncentrátory napětí neboli makroskopické koncentrátory cyklické plastické deformace, kterými jsou vruby a povrchové nerovnosti. Pro hladký povrch při cyklickém namáhání existuje gradient napětí, který na povrchu dosahuje maximálních hodnot. V ideálním případě symetrického zatěžování v ose součásti zůstává nulové namáhání, ale čím blíže k povrchu tím více narůstá napětí, a to jak pro hladké, tak i pro drsné povrchy (Obr. 2.). Proto má kvalita povrchu velký vliv na životnost a funkčnost součástí.



Obr. 2. Hloubkové rozložení zbytkových napětí. [4]

* Kontakt na autora: Uliana.Finaeva@fs.cvut.cz

1.3. Únava

Únava materiálu je pomalu postupující akumulující se poškození materiálu, které vzniká opakovaným zatěžováním a z toho plynoucími, plastickými deformacemi v místech koncentrace napětí. Proces může vést až k únavaovému lomu. Průběh je závislý na počtu zatěžovacích cyklů. Únavové poruchy závažně ovlivňují životnost konstrukcí [1]. Mez únavy je definována jako maximální zatížení, které snese materiál při určitém počtu zatěžovacích cyklů, aniž by došlo k jeho porušení [5]. Mez únavy materiálu není definována pro konkrétní materiál, ale závisí na několika faktorech, a to například na velikosti tělesa, asymetrii zatěžovacího cyklu, jakosti povrchu aj. Jakost povrchu zahrnuje pnutí v povrchu součásti, mikrostrukturu, geometrické charakteristiky povrchu. Ve výpočtech se vliv jakosti na mez únavy uvádí jako součinitel η_p (2) [6], který je definován jako poměr meze únavy součásti s daným povrchem k mezi únavy stejné součásti s leštěným povrchem.

$$\sigma_c^* = \frac{\vartheta \cdot \eta_p}{\beta} \sigma_c \quad (2)$$

Kde

σ_c^* - mez únavy součástky při symetrickém harmonickém zatěžování

σ_c - mez únavy leštěné součástky při symetrickém harmonickém zatěžování

η_p – součinitel povrchu

ϑ – součinitel velikosti součástky

β – součinitel vrubu

2. Experimentální část

K dispozici pro experimentální část prací byly 4 skupiny vzorku (15 vzorků ve skupině) ze slitiny Ti6Al4V (6% hliník, 4% vanad, 90% titan) (Obr. 3). S povrchovým a tepelným opracováním nebo bez něj. Tepelné opracování spočívalo v ohřátí vzorků po dobu 4 hodin na teplotu 820 °C v ochranné atmosféře argonu (Ar) a následném zchlazení v peci na teplotu 500 °C. Vzorky byly vyrobené metodou DMLS na tiskárně M2 cusing, Concept Laser GmbH. Popis skupin vzorků je uveden v Tab. 1.



Obr. 3. Vzorové tyčky, zprava doleva: skupiny A, B, C, D

Tabulka 1. Popis skupin vzorků.

Skupina	Broušení	Tepelné opracování
A	Ne	Ne
B	Ano	Ne
C	Ne	Ano
D	Ano	Ano

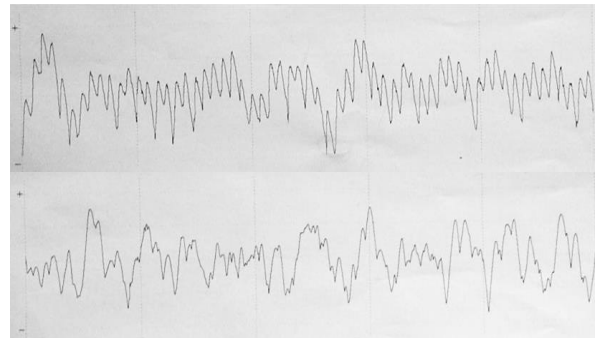
2.1. Měření drsnosti

Pro hodnocení mikrogeometrie povrchu ploch součástí a jednotlivých charakteristik drsností bylo využito dvou metod: dotykového a bezdotykového snímání.

2.1.1. Měření dotykovým snímačem

Pro dotykové měření drsnosti byl použit dotykový drsnoměr MARSURF C. Principem měření je „projíždění“ hrotu po povrchu a zaznamenávání profilu. Měření se řídí normou ČSN EN ISO 4288. Technické možnosti dotykového profiloměru dovolují měření jen na rovinné ploše (vždy se změří profil po přímkové trajektorii pohybu hrotu). Pro obvodový směr není možné měření uskutečnit.

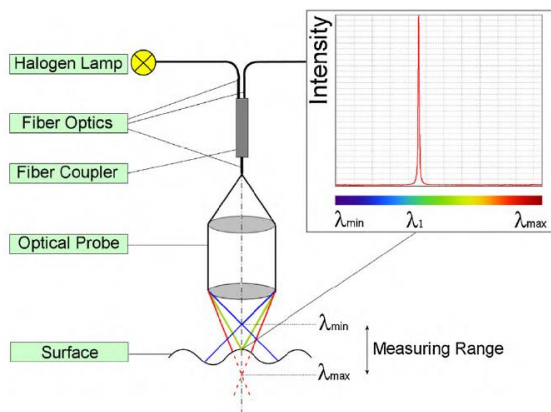
Výsledkem z měření dotykovým profiloměrem byl profil nerovnosti (Obr. 4), automaticky vypočtená hodnota drsnosti a hodnota standardní směrodatné odchylky STD. Měření se provádělo s cílem ověření a porovnání výsledků s měřením na optickém profilometru.



Obr. 4. Profil povrchu, změřeny dotykovým profiloměrem. Nahoře broušený vzorek ($R_a=0,478 \mu\text{m}$, $STD = 0,0239 \mu\text{m}$). Dole nebroušený vzorek ($R_a=12,22 \mu\text{m}$, $STD = 0,9776 \mu\text{m}$).

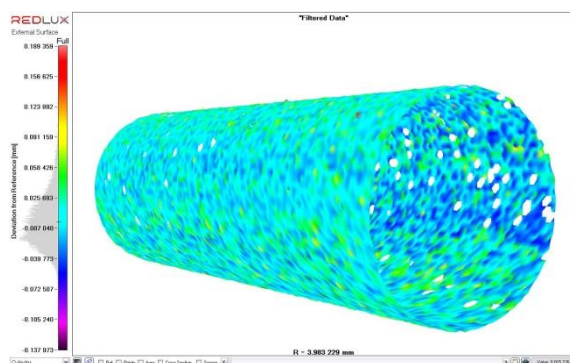
2.1.2. Měření bezdotykovým snímačem

Principem bezdotykových metod je odrazení světelného paprsku od povrchu zpět do měřicí sondy. Výhodami jsou lepší přesnost a rychlost, ale při složitých nebo velkých změnách tvaru povrchu se paprsek může odrazit mimo snímač a výsledky tak mohou být zkreslené [7]. Pro dané měření byl využit optický profilometr RedLux. tento profiloměr umožňuje měření celého povrchu součásti během jednoho měření. Výsledkem je mrak diskretních bodů v prostoru. Před měřením se celý systém musí nakalibrovat pomocí snímání ideálně hladké koule. Kalibraci se vlastně vytvoří transformační matice, která dovoluje transformaci 4 měřených souřadnic (2 rotace a 2 posuvy) do kartézského souřadného systému. Chromatická aberace (též chromatická vada nebo barevná vada) je barevná vada čočky způsobená závislostí ohniskové vzdálenosti čoček na vlnové délce světla. Čočky pak lámou světlo každé barvy jinak. Podle intenzity světla odraženého do detekční oblasti systém vyhodnotí vlnové délky a ty se přepočtou na polohu bodů (Obr. 5).



Obr. 5. Princip bezdotykového měření [8]

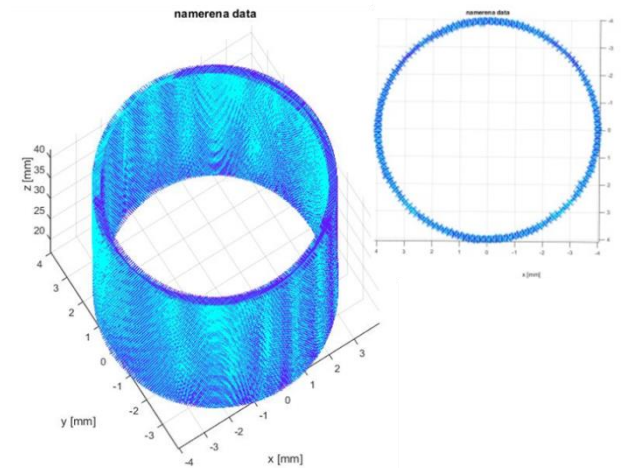
Všechny vzorky byly měřeny s roztečí 0,2 mm v podélném směru a 2,88° po obvodu. Tím bylo získáno pro každý vzorek přibližně 15000 naměřených bodů. Měřena byla pouze střední část vzorků v délce 25 mm. Na Obr. 6 je vidět mrak bodů ve 3D pro vzorek A14. Stejně “mraky” bodů každého vzorku bylo nutné následně zpracovat.



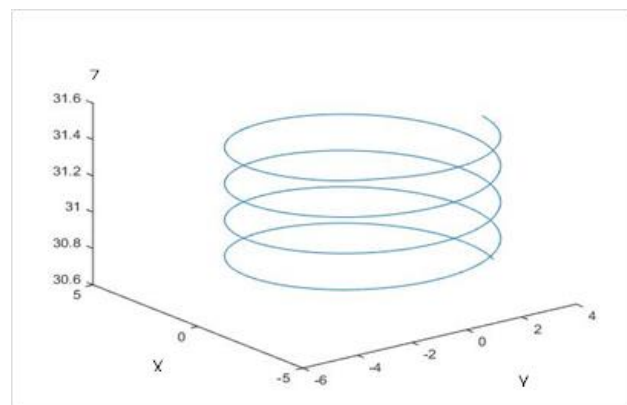
Obr. 6. Povrch, změřený bezdotykovým způsobem

Dále bylo nutné z naměřených dat získat hodnoty drsnosti daného povrchu. K těmto účelům byl napsán skript v prostředí Matlab (MathWorks, Inc.). Prvním problémem zpracování dat byla eliminace vyosení válce, která byla způsobena, pravděpodobně, nepřesně vyrobeným závitem, kterým se vzorová tyčka upevní v měřicím prostoru. Z tohoto důvodu docházelo k mírnému házení při otáčení vzorku. Samotné házení neovlivní přesnost naměřených dat, ale při transformaci do kartézského souřadnicového systému dojde k tomu, že v tomto systému není osa Z přesně v ose válce (Obr. 7). Proto bylo nutné naměřená data proložit plochou, která se limitně blíží ploše měřeného válce a transformovat do souřadnicového systému tohoto ideálního válce. Vstupem do MATLABU byla matice bodů (souřadnice XYZ krát počet měřených bodů) – mrak bodů (Obr. 6, 7). Naměřené body vzhledem k sestavě měření tvoří šroubovici (Obr. 8). Tato šroubovice byla rozdělena na jednotlivé otáčky a promítla se do plochy X-Y. Nevýhodou tohoto postupu je, že výsledná kružnice může být díky původní rotaci osy Z válce zkreslená. V tomhle případě jsou ale rotace velmi malé (<1°), proto lze tuto nepřesnost zanedbat, ale v případech větší rotace by to mohlo vést k nepřesným výsledkům. Získané kružnice pak byly aproximovány

metodou nejmenších čtverců a byly určeny 2D souřadnice středu jednotlivých kružnic. Takto získanými body byla metodou nejmenších čtverců proložena přímka – osa měřeného válce. Porovnáním získané a původní osy byly získány potřebné transformační vztahy. Z postupných řezů šroubovici byl zjištěn také referenční poloměr každého vzorku jako střední poloměr všech kružnic. Takto získané hodnoty poloměrů byly srovnatelné s hodnotami, které udává přímo software dodávaný RedLuxem, což potvrzuje správnost tohoto postupu.



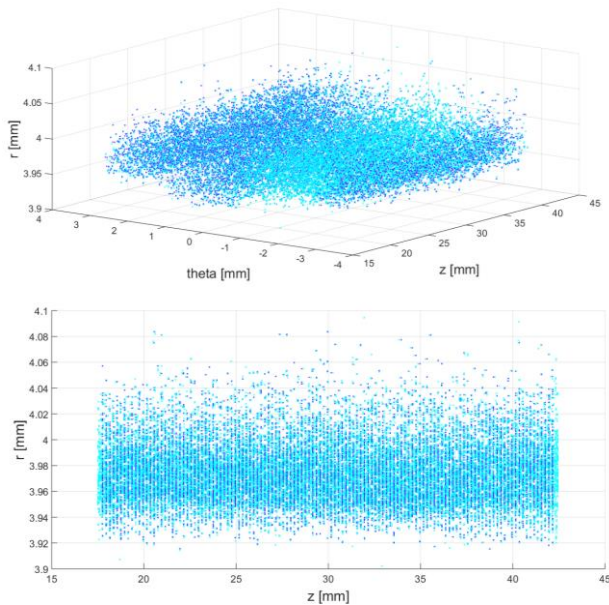
Obr. 7. Grafické znázornění matice získaných bodů v prostoru kartézských souřadnic.



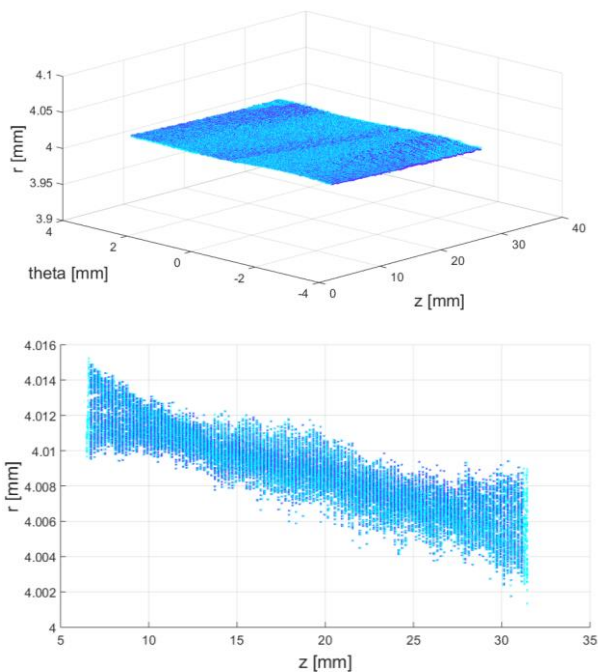
Obr. 8. Element šroubovici, proložené nejbližšími body.

Dalším krokem, zejména pro vyhodnocení drsnosti, bylo nutné naměřené body transformovat z kartézského souřadnicového systému XYZ do válcových souřadnic RθZ. Na Obr. 9 a, b je vidět získaná plocha po této transformaci. V rovině R-Z nebo R-θ je vidět určitý rozptyl bodů, který reprezentuje nepravidelnost povrchu, která je způsobena nejen drsností vzorku, ale také většími změnami tvaru, tzv. vlnitostí. Aby byla vyhodnocena pouze drsnost povrchu dle normy ČSN EN ISO 4288, bylo nutné oddělit profil vlnitosti od profilu drsnosti. K tomuto účelu byl do skriptu zaimplementován filtr profilu λ_c definovaný normou ČSN EN ISO 4288 (viz. 1.1. Drsnost). Pro samotné filtrování byla tato část skriptu převzata z [9]. Hodnota filtru profilu λ_c byla pro účely hodnocení drsnosti zvolena 0,8 mm, jako univerzální pro všechny vzorky [10]. Filtrování probíhalo po jednotlivých řádcích, respektive, sloupcích, aby bylo možné získat hodnoty

drsnosti jak v podélném, tak v obvodovém směru. Porovnání filtrovaných (tmavé) a nefiltrovaných (světlé) dat je vidět na Obr. 9 a, b. Porovnáním příslušných bodů pak byly získány hodnoty drsnosti pro celý vzorek. Výsledná hodnota podélné, resp. obvodové drsnosti je vždy průměrnou hodnotou z jednotlivých řádků, resp. sloupců dane matice bodů. Z ploch, které vznikly transformací do válcových souřadnic je jasně vidět rozdíl mezi broušenými a nebroušenými vzorky. U broušených vzorků (Skupina B, D) (Obr.9. b) je zřejmá menší hodnota drsnosti (rozptýl bodů). Naopak u vzorků nebroušených (Skupina A, C) (Obr.9 a) je vidět vyšší hodnota drsnosti.



Obr. 9. a) Mrak bodů ve válcových souřadnicích, nebroušeno



Obr. 9 b) Mrak bodů ve válcových souřadnicích, broušeno

2.2. Analýza naměřených hodnot

Pro porovnání jednotlivých skupin vzorků byly hodnoceny parametry drsnosti R_a . Výsledné průměrné hodnoty spolu se směrodatnými odchylkami pro všechny skupiny vzorků jsou uvedeny v Tab. 2.

Tabulka 2.

Sk.	Podélný směr		Obvodový směr	
	R_a	$STDR_a$	R_a	$STDR_a$
A	9,61	1,7	9,35	0,9
B	0,23	0,1	0,22	0,1
C	9,22	1,8	8,98	0,9
D	0,23	0,1	0,19	0,1

Z Tab. 2 je zřejmá řádově vyšší hodnota drsnosti u nebroušených povrchů (skupina A, C) a větší střední odchylky, a to v obou směrech, což odpovídá počátečním předpokladům a svědčí o správnosti zvolených metod a postupů. Obvodová drsnost vychází pro všechny skupiny vzorků menší. Pro skupiny broušených vzorků to může být dáno způsobem obrábění. U nebroušených může být důvodem použitá technologie výroby součástí, kdy povrch vzniká po vrstvách. Vzhledem ke směrodatným odchylkám je ale tento rozdíl zanedbatelný.

Výsledné hodnoty drsnosti, získané optickým profilometrem vychází ve srovnání s měřením na dotykovém drsnoměru menší. U broušených vzorků (skupina B) v podélném směru je to přibližně o 51 %, u nebroušených vzorků (skupina A) o 21 %. Tento rozdíl je způsoben několika důvody. Prvním důvodem je, že podmínky měření zejména velikost měřené oblasti, nebyly u obou měření stejné. V případě optického profilometru RedLux získáme průměrnou hodnotu z celé proměřené plochy, u dotykového měření se jedná o několik měření na náhodně vybraných místech.

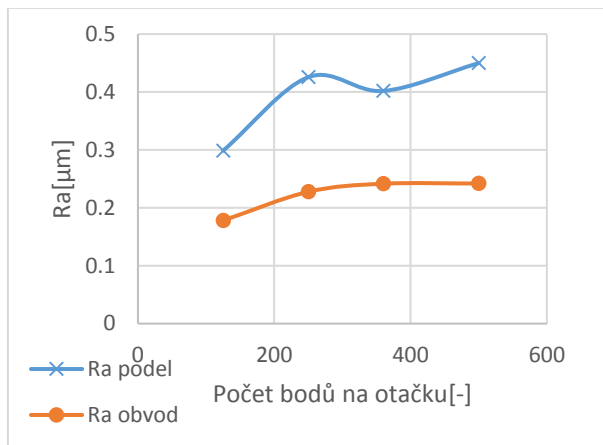
Dalším důvodem, který pravděpodobně způsobuje větší rozdíly je vliv počtu měřených bodů, resp. rozteč měřených bodů na optickém profilometru. Proto bylo uděláno kontrolní měření na jednom ze vzorků (skupina B, vzorek č. 14). Byla zvolena menší měřená oblast cca 10 mm a zvyšoval se počet měřených bodů, resp. rozteč měřených bodů, a to jak v podélném, tak v obvodovém směru. Z výsledků (Tab.3.) je vidět, že při nižší rozteči hodnota drsnosti začíná konvergovat k určité hodnotě (Obr. 10). Hodnoty drsnosti při nejmenší hodnotě rozteče odpovídají hodnotám naměřeným na dotykovém drsnoměru. Z tohoto důvodu je pro získání absolutních hodnot drsnosti potřeba snížit rozteč bodů. Takové měření je ale časově náročnější zejména pro nebroušené povrchy, kde je třeba výsledná data skládat z několika měření. Je třeba také zmínit, že při měření povrchů s velkou drsností na optickém profilometru RedLux nelze některé dílčí oblasti změřit díky odražení paprsku mimo sondu.

Je třeba poznamenat, že cílem této práce nebylo získat absolutní hodnoty drsnosti, ale kvalitativní porovnání jednotlivých skupin vzorků navzájem a zhodnotit vliv drsnosti na mechanické vlastnosti. Výhodou měření na

optickém profilometru RedLux přesto zůstává rychlost (lze vyhodnotit jak podélnou, tak obvodovou drsnost z velké plochy v průběhu jednoho měření) a přesnost měření (pro povrchy s menší drsností).

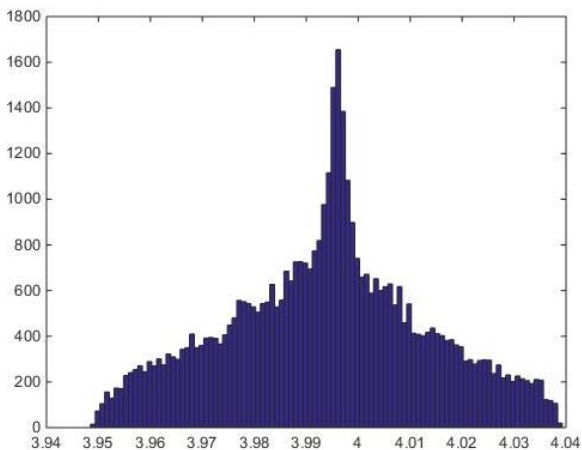
Tabulka 3. Závislost hodnoty drsnosti na obvodové rozteči.

Rozteč podélná [mm]	Rozteč obvodová [°]	Ra podél [μm]	Ra obvod [μm]
0,2	2,88	0,2986	0,1781
0,1	1,44	0,4256	0,2276
0,07	1	0,4018	0,2416
0,05	0,72	0,4499	0,2419

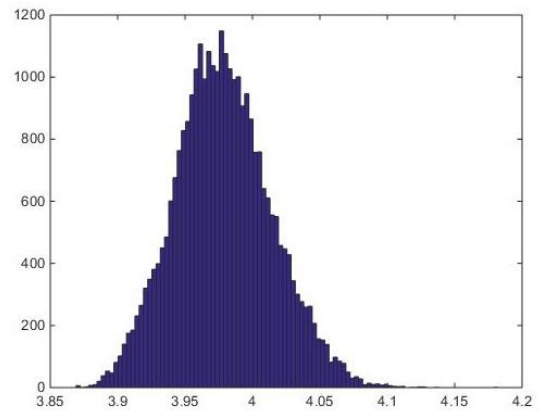


Obr. 10. Závislost hodnoty drsnosti na obvodové rozteči

Dále uvedené histogramy (Obr. 11 a, b) sledují odchylky od nominální hodnoty poloměru $R = 4$ mm, pro kontrolu kvality výroby tištěných součástí. Svislá osa reprezentuje absolutní četnost jednotlivých poloměřů. V tomto případě je vztažena na soubor bodů ve válcových souřadnicích, kde každému bodu přísluší určitá hodnota poloměru R . Horizontální osa reprezentuje konkrétní hodnoty naměřených poloměřů. Tyto histogramy nesou informaci o přesnosti výroby vzorků, která se může posoudit podle šířky daného histogramu neboli jaké množství příslušných hodnot poloměřů se odchyluje od referenční hodnoty a jaká je velikost této odchylky.



Obr. 11.a) Histogram absolutní četnosti poloměru, nebroušeno

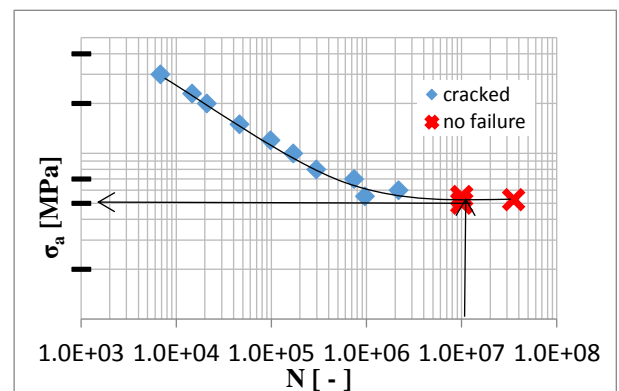


Obr. 11.b) Histogram absolutní četnosti poloměru, broušeno

Z histogramů je vidět, že nebroušené vzorky vykazují výrazně větší odchylky, což odpovídá předpokladům. Velikost odchylek u nebroušených vzorků je také způsobena materiálem, konkrétně velikostí použitých zrn při tisku.

2.3. Měření meze únavy

Experimentální část dále pokračovala porovnáním získaných hodnot drsnosti s výsledky únavových zkoušek. Data z únavových zkoušek byla poskytnuta ve formě Woehlerových křivek Ústavem pružnosti a pevnosti na fakultě strojní ČVUT v Praze. Vzorky byly zkoušeny na zkušebním stroji s elektromagnetickým pulsátorem Amsler s počítačovým řízením od Zwick Roell. Vzorky byly zatěžovány symetricky střídavým cyklem ($R = -1$, tj. s nulovým středním napětím). Počet cyklů byl zaznamenáván do lomu, případně do hodnoty 10^7 cyklů nebo vyšší, pokud vzorek neprasknul. Ukázka výsledků zkoušek je na Obr. 12 pro skupinu vzorků A. Z důvodu autorských práv jsou hodnoty napětí bez konkrétních hodnot a porovnání mezi jednotlivými vzorky je poměrové. Výsledky pro ostatní skupiny jsou k dispozici na Ústavu pružnosti a pevnosti na fakultě strojní ČVUT v Praze. Mez únavy byla z Wohlerových křivek odhadnuta pro $N = 10^6-10^7$ [11]. Způsob odečítání je naznačen na Obr. 12. Výsledky měření jsou uvedené v Tab.4.



Obr. 12. Woehleová křivka, Skupina A

2.4. Výsledky a diskuze

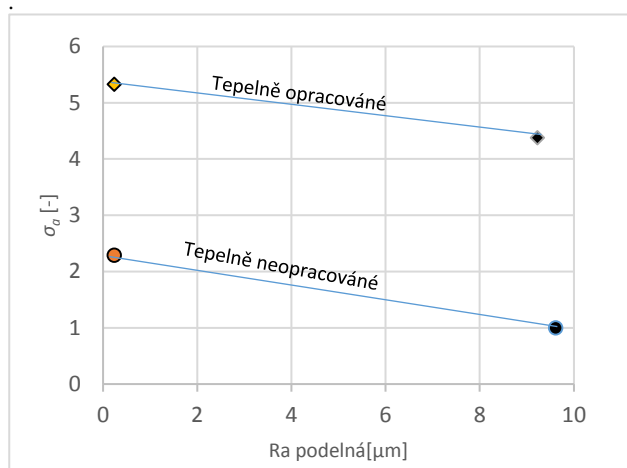
Z tabulky 4 a vyplývá velký vliv tepelného opracování, které zvyšuje mez únavy přibližně 2 až 5krát oproti tepelně neopracovaným vzorkům. Je také vidět, že povrchové úpravy zvyšují mez únavy (Obr.13). V případě tepelně neopracovaných přibližně o 44 %, v případě tepelně opracovaných o 18 %. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u skupiny vzorků D – tepelně opracované a povrchově upravené. Závislost poměrné meze únavy na drsnosti je uvedena v Tab. 5 a následujících grafech (Obr. 13).

Tabulka 4. Poměrné meze únavy

Skupina	Broušení	Tepelné opracování	Poměrná mez únavy σ_a [-]
A	Ne	Ne	1
B	Ano	Ne	2,29
C	Ne	Ano	4,38
D	Ano	Ano	5,33

Tabulka 5. Hodnoty drsnosti a poměrné meze únavy pro jednotlivé skupiny

Skupina	Poměrná mez únavy σ_a [-]	R_a podél	R_a obvod
A	1	9,61	9,35
B	2,29	0,23	0,22
C	4,38	9,22	8,98
D	5,33	0,23	0,19



Obr. 13. Závislost meze únavy na drsnosti

Z uvedeného grafu (Obr. 13) je zřejmá závislost mezi mezí únavy a drsností součástí. Při vyšší drsnosti se významně snižuje mez únavy materiálu. Tepelné opracování mez únavy zvyšuje, ale i přesto drsnost zanechává svůj vliv, i když v menším měřítku (sklony přímek: asi 8° pro tepelně neopracované vzorky a 6° pro tepelně opracované). Nejdelší životnosti se dosahuje za pomoci tepelného opracování a nejmenší drsnosti, nejhorší výsledky ukazuje skupina bez opracování povrchového a tepelného. Hodnoty mezi únavy

broušených vzorků přibližně odpovídají klasicky vyrobeným součástem z čistého titanu [12].

3. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo experimentálně získat a vyhodnotit drsnosti povrchu na titanových součástech vyrobených 3D tiskem (Prospan, spol. s.r.o.). Pro tento účel se zjišťovala drsnost a únavová pevnost pro každý vzorek. Byla provedena analýza získaných dat, z ní byl charakterizován vliv drsnosti povrchu na mez únavy. Nejlepších výsledků únavových zkoušek (poměrná mez únavy $\sigma_a = 5,33$) ukázala skupina D (tepelně opracované a broušené vzorky) s nejmenší drsností ($R_a = 0,23$ μm ve směru podélném a $R_a = 0,19$ μm ve směru obvodovém). Nejhorší výsledky – nejnížší mez únavy (poměrná mez únavy $\sigma_a = 1$) ukázala skupina A (neopracované) s největší drsností ($R_a = 9,61$ μm ve směru podélném a $R_a = 12,12$ μm ve směru obvodovém). Jak bylo zmíněno v teoretické části, únavový lom vychází z povrchových trhlin, tedy z míst zvýšené koncentrace napětí. Ty jsou reprezentovány nerovnostmi povrchu, což bylo potvrzeno únavovými zkouškami a analýzou výsledků těchto testů. Optimální drsností vzhledem k životnosti je nejmenší hodnota.

Pro měření drsnosti byla použita poměrně nová metoda optického snímání profilu povrchu, která se vyznačuje vysokou přesností a časovou nenáročností oproti klasickým metodám měření drsnosti. V průběhu měření byly zjištěné optimálnější podmínky měření: obvodová rozteč pro měření rotačních tvarů by měla být co nejmenší, pro nejpřesnější absolutní hodnoty drsnosti. Metoda 3D tisku DMLS se ukázala jako dost přesná metoda výroby v porovnání s klasickými metodami výroby. Povrchové opracování stejně jako u klasických metod zlepšuje přesnost požadovaného tvaru součástky, navíc zvyšuje mez únavy.

Poděkování

Děkuji Ing. Vlastimilu Králíkovi, Ph.D. za vedení této práce, za cenné rady a pokyny k vypracování. Děkuji také doc. Čertíkové Martě RNDr., Ph.D. za pomoc a konzultaci při napsání skriptu v prostředí Matlab, a Ing. Martinu Nesládkovi za poskytnutá data z únavových zkoušek.

Seznam symbolů

R_a	drsnost (μm)
l_r	základní délka (mm)
$Y(x)$	poradice (mm)
σ_{xx}	napětí (MPa)
σ_c	mez únavy (MPa)
σ_a	poměrná mez únavy (-)
η_p	součinitel povrchu (-)
\mathcal{G}	součinitel velikosti součástky (-)
β	součinitel vrubu (-)
λ_c	filtr profilu (mm)
λ	vlnová délka (m)
N	počet cyklu (-)

Literatura

- [1] – Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci. Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [Internetový časopis]. Listopad 2005. Dostupné z WWW: <<http://gps.fme.vutbr.cz/2ARCH.htm>>
- [2] – ČSN ISO 468. *Drsnost povrchu. Parametry, ich hodnoty a všeobecné pravidlá stanovenia špecifikácií*. Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- [3] – *ELUC* [Webová stránka] dostupné z WWW:<<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1571>>
- [4] - Antonín Kříž. *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*. [Přednáška] dostupné z WWW: <https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf>
- [5] - Václav Auterský, Doc. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ. *Vliv integrity povrchu na mechanické vlastnosti*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita v Plzni, Fakulta Strojní.
- [6] – Vladimír Netopil, Ing. Kamil Novák. *Porovnání různých přístupů k odhadu meze únavy reálného tělesa. Comparative study of different approaches to assessment of endurance limit of a real body*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [7] - Vojtěch Prax. *Hodnocení kvality povrchu QSB desek*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta.
- [8] - Mike Tuke, Andy Taylor, Anne Roques, Christian Maul. *3D linear and volumetric wear measurement on artificial hip joints – Validation of a new methodology*. *Journal Precision Engineering*. [Internetový časopis]. Dostupné z WWW: <<http://www.elsevier.com/locate/precision>>
- [9] - J. Vít, J. Šípál. *Implementace Gaussova a spline filtru povrchových profile strojirenských součástí v Matlabu*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem. Ústí nad Labem. In: *Humusoft* [Webová stránka]. Humusoft s.r.o.
- [10] - ČSN EN ISO 4288:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [11] - Michalec a kol.: *Pružnost a pevnost II*. [Skriptum]. Vydavatelství ČVUT v Praze 2006
- [12] - Андреева В.В., Казарин В.И.. *Новые конструкционные химически стойкие металлические материалы*. Госхимиздат, Москва, 1961.