

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Vibrační kuličkování axiálního kompresoru

Bakalářská práce

Autor: Jakub Petrák

Vedoucí: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Praha, 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **456383**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vibrační kuličkování axiálního kompresoru

Název bakalářské práce anglicky:

Vibrational tumbling of axial compressor

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled technologií zpevňování
2. Procesní parametry - kinematika a dynamika, média
3. Zkoušky pokrytí na axiálním kompresoru
4. Doporučení

Seznam doporučené literatury:

WAGNER, Lothar. Shot peening. Cambridge: Wiley-VCH, c2003. ISBN 3527305378.
TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park, Ohio: ASM International, c2002. ISBN 0-87170-729-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

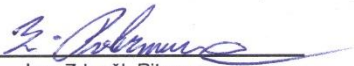
Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

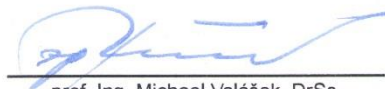
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24. 4. 2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 25.7.2018

.....

Jakub Petrák

ANOTAČNÍ KARTA

Jméno autora:	Jakub Petrák
Název bakalářské práce:	Vibrační kuličkování axiálního kompresoru
Anglický název:	Vibrational tumbling of axial compressor
Rok:	2018
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Klíčová slova:	vibrační kuličkování, mechanické zpracování povrchu, Ti-6Al-4V, lopatky
Keywords	vibrational tumbling, mechanical surface treatment, Ti-6Al-4V, blades

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá metodami mechanického zpracování a aplikací vibračního kuličkování na axiální kompresor. Cílem práce je zjištění ideálních podmínek pro dosažení maximální úrovně pokrytí.

Abstract:

This bachelor thesis deals with methods of mechanical surface treatment and use of vibrational tumbling on an axial compressor. The aim of the thesis is to find ideal conditions for reaching the maximum level of coverage.

Rozsah práce

Počet stran:	64
Počet obrázků:	77
Počet tabulek:	5

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho cenné rady a připomínky a čas, který mi věnoval. Dále chci poděkovat své rodině za trpělivost a podporu během studia.

Seznam zkratk, značek a symbolů

Symbol	Jednotka	Veličina
HBW	[-]	tvrdost podle Brinella
HRA	[-]	tvrdost podle Rockwella (kužel)
HRB	[-]	tvrdost podle Rockwella (kulička)
HRC	[-]	tvrdost podle Rockwella (kužel)
HSH	[-]	tvrdost podle Shoreho
HV	[-]	tvrdost podle Vickerse
k	[MPa]	součinitel materiálu
LSP	[-]	laser shock peening
Ra	[μm]	průměrná aritmetická úchylka
R _m	[MPa]	mez pevnosti v tahu
α	[-]	alfa
β	[-]	beta

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Titan a jeho slitiny.....	10
2.1	Slitiny titanu	11
2.2	Ti-6Al-4V.....	12
2.2.1	Chemické složení:.....	12
2.2.2	Tepelné zpracování	12
2.3	Srovnání s ocelí.....	13
3	Zpevňovací technologie	14
3.1	Úvod	14
3.2	Popis.....	15
3.3	Zbytková napětí a chování při únavě	16
4	Metody zpevňování.....	18
4.1	Tryskání	18
4.1.1	Princip.....	18
4.1.2	Použití.....	19
4.1.3	Almenův test	20
4.1.4	Stroje	21
4.2	Vyhlazování	22
4.2.1	Princip.....	22
4.2.2	Nástroje.....	22
4.2.3	Stroje	23
4.3	Válečkování	23
4.3.1	Princip.....	23
4.3.2	Použití.....	24
4.3.3	Nástroje.....	25
4.3.4	Stroje	26
4.4	Kalibrování	26
4.4.1	Princip.....	26
4.4.2	Stroje	27
4.5	Vibrační zpevňování	27
4.5.1	Mechanické vibrační zpevňování	28
4.5.2	Ultrazvukové vibrační zpevňování	28
4.5.3	Stroje	29

4.6	Laser peening	30
4.6.1	Princip.....	30
4.6.2	Použití.....	32
4.6.3	Stroje	33
5	Hodnocení integrity povrchu.....	35
5.1	Měření tvrdosti	35
5.1.1	Vnikací	35
5.1.2	Odrazové	37
5.1.3	Vrypové	37
5.2	Měření zbytkových napětí.....	37
5.2.1	Destruktivní.....	38
5.2.2	Polodestruktivní	38
5.2.3	Nedestruktivní.....	39
5.3	Měření drsnosti povrchu.....	40
5.3.1	Vzorkovnice	41
5.3.2	Dotykové přístroje.....	41
5.3.3	Bezdotykové přístroje	42
6	Aplikace vibračního kuličkování na axiální kompresor.....	44
6.1	Rozvaha	44
6.2	Cíl.....	44
6.3	Příprava	46
6.4	Postup kuličkování	48
6.5	Kontrola otlučení náběžných hran	54
6.5.1	Přímá metoda.....	55
6.5.2	Nepřímá metoda	56
7	Závěr	58
8	Použitá literatura	60

1 Úvod

Ve strojírenství je jedna z důležitých stránek ekonomika. Jedním ze způsobů, jak dosáhnout lepších vlastností kovových materiálů a jejich delší životnosti při cyklickém namáhání je mechanické zpracování povrchové vrstvy, nazývané zpevňování. Zpevňování umožňuje modifikovat lokálně mechanické vlastnosti povrchu, a tím se vyhnout nutnosti vybrat lepší a nákladnější materiál. Rovněž je možné konstruovat součást s menšími průřezy a uspořít část přímých výrobních nákladů. V současnosti jsou tyto metody jsou používány především v automobilovém a v leteckém průmyslu.

Název mé práce je vibrační kuličkování axiálního kompresoru. Úvod práce je věnován titanovým slitinám, především slitině Ti-6Al-4V. Jde o materiál, ze kterého se vyrábí kompresory leteckých motorů a který je v letectví často používán vzhledem k jeho skvělým vlastnostem. V teoretické části práce je značná pozornost věnována procesům zpevňování, používaných metodách, mezi které patří i vibrační kuličkování, a způsobům hodnocení integrity povrchu. Závěr práce je věnován technologickým zkouškám technologie vibračního kuličkování na axiální kompresor leteckého motoru. Mým cílem praktické části bude zjištění souvislostí mezi parametry vibračního kuličkování a úrovní pokrytí lopatek kompresoru a dosažení ideálních podmínek procesu.

2 Titan a jeho slitiny

Titan byl objeven v roce 1790, avšak získat jeho čistou formu se podařilo až na začátku 20. století. Používat se začal až od druhé poloviny 20. století. Dá se tedy říci, že jde o poměrně nový materiál. Díky jeho vlastnostem jako je vysoký poměr pevnosti vůči hustotě nebo odolnost proti korozi je používán v mnoha různých odvětvích, např. v leteckém, automobilovém, chemickém a námořním průmyslu, v biomedicíně, ve sportu atd. [1] [2]

Tabulka 2.1: Vlastnosti titanu [1]

Hustota	4510 kg/m ³	
Bod tání	1668 °C	
Bod varu	3260 °C	
Měrná tepelná kapacita	0,5223 kJ/kg·K	
Tepelná vodivost	11,4 W/m·K	
Tvrdost	70 - 74 HRB	
Pevnost v tahu	240 Mpa	
Modul pružnosti v tahu	120 Gpa	
Poissonovo číslo	0,361	
Koeficient tření	při 40 m/min	0,8
	při 300 m/min	0,68
Elektrický odpor při 20 °C	420 nΩ·m	

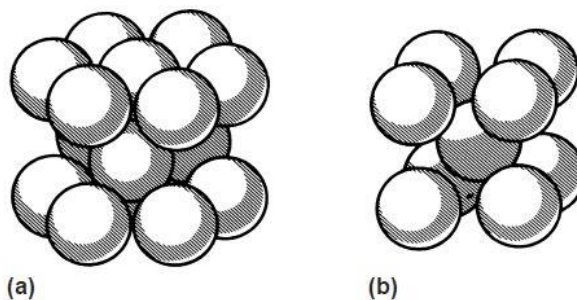
Titan je možné kovat standartními technologiemi, je možné ho odlévat, svařovat, pájet, lepit a lze ho používat i v práškové metalurgii. Vzhledem k jeho reaktivitě při teplotách nad 600 °C se musí tavit, odlévat i svařovat v ochranné atmosféře, nebo ve vakuu. [1] [5]

Titan je tvárný i obrobitelný, ale pouze za dodržení správných podmínek.

Může mít dva typy struktury, strukturu alfa a strukturu beta.

- struktura α – u nelegovaného titanu se vyskytuje do teploty 882 °C. Jedná se o šesterečnou bazálně středěnou mřížku.
- struktura β – u nelegovaného titanu se vyskytuje nad teplotou 882 °C. Pokud je titan legován jinými prvky, dokáže si udržet strukturu i při nižších teplotách. Struktura β má krychlovou prostorově středěnou mřížku.

[1]



Obrázek 2.1: Krystalové mřížky titanu [1]

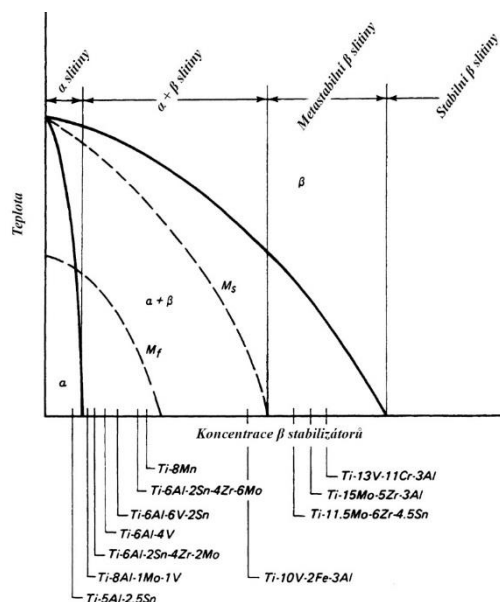
2.1 Slitiny titanu

- slitiny α a pseudo α – mají nejlepší odolnost proti korozi a jsou nejlépe svařitelné. Nelze je tepelně upravovat pro dosažení lepších mechanických vlastností a jsou preferovány pro použití za vyšších teplot.
- slitiny $\alpha + \beta$ – oproti slitinám α obsahují vyšší množství prvků stabilizujících fázi β . Dají se tepelně zpracovávat a jsou pevnější než α slitiny.
- slitiny β a pseudo β – jedná se o metastabilní soustavu. Po vytvrzení dosahují nejvyšších hodnot pevnosti ze všech titanových slitin.

[1] [5]

Stabilizátory α		Stabilizátory β				
Například: hliník kyslík dusík		Například: molybden železo vanad chrom mangan				
← Rostoucí množství stabilizátorů α podporuje fázi α		→ Rostoucí množství stabilizátorů β podporuje fázi β				
Slitiny α	Slitiny pseudo α	Slitiny $\alpha + \beta$	Slitiny pseudo β	Slitiny β		
Nelegovaný Ti	Ti-5Al-6Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.2Si	Ti-6Al-6Al-4V-6V-2Sn-4Zr-6Mo	Ti-6Al-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Ti-8Mn-8Mo-8V-2Fe-3Al	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	
Ti-5Al-2.5Sn	Ti-8Al-1Mo-1V				Ti-13V-11Cr-3Al	

Obrázek 2.3: Schématické zobrazení vlivu legujících prvků na strukturu slitiny [1]



Obrázek 2.2: Některé titanové slitiny zařazené do fázového diagramu [1]

2.2 Ti-6Al-4V

Slitina Ti-6Al-4V je nejrozšířenější slitina titanu. Ze všech titanových slitin zabírá 45 % trhu, a to především díky kombinaci atraktivních vlastností se svou zpracovatelností. Řadí se mezi slitiny $\alpha + \beta$. Použití je pro teploty do 400 °C. Využívá se v leteckém průmyslu, v medicíně, v automobilovém průmyslu, v námořním průmyslu a v chemickém průmyslu. [1] [2]

2.2.1 Chemické složení:

Tabulka 2.2: Chemické složení Ti-6Al-4V [4]

Prvek	Zastoupení v %
Titan	87,6 - 91
Hliník	5,5 – 6,75
Vanad	3,5 – 4,5
Železo	≤ 0,4
Kyslík	≤ 0,2
Uhlík	≤ 0,08
Dusík	≤ 0,05
Vodík	≤ 0,015

2.2.2 Tepelné zpracování

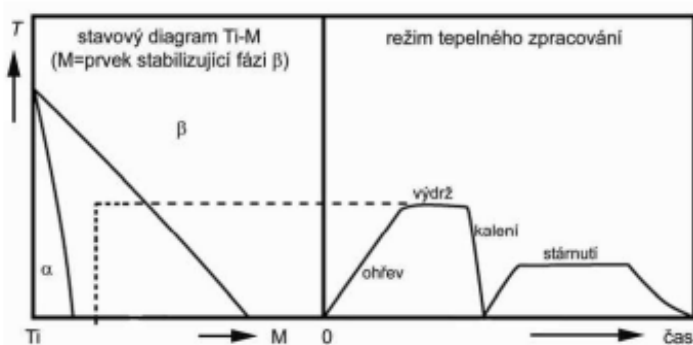
Tepelným zpracováním je možné získat lepší mikrostrukturu a mechanické vlastnosti. V případě slitiny Ti-6Al-4V lze použít žíhání, nebo vytvrzování.

Žíhání

Žíhání se provádí při teplotě kolem 730 °C po dobu od čtvrt hodiny do čtyř hodin, poté se slitina ochladí v peci na 566 °C a následuje chlazení na vzduchu. V případě výkovek a prutů není chlazení v peci zapotřebí. [4]

Vytvrzování

Vytvrzováním slitiny Ti-6Al-4V lze dosáhnout vyšší pevnosti, kdy při ohřevu na 960 °C a výdrži na této teplotě po dobu jedné hodiny, zakalením do vody a následném zahřátí na teplotu 500 °C při výdrži čtyř hodin a ochlazením na vzduchu lze dosáhnout pevnosti v tahu 1120 MPa a meze kluzu 1050 MPa. [3]



Obrázek 2.4: Vytvrzení slitiny alfa + beta [5]

2.3 Srovnání s ocelí

Nabízí se srovnání titanových slitin s korozivzdornými ocelmi. Korozivzdorné oceli se dělí na martenzitické, feritické, austenitické a austeniticko-feritické. [6] Pro porovnání s titanovou slitinou Ti-6Al-4V použijí martenzitickou korozivzdornou ocel X20Cr13 (ČSN 17 022). Je určena pro konstrukční prvky o vysoké pevnosti a součásti namáhané na otěr jako hřídele, ventily a lopatky turbín. [6] [7]

Mechanické vlastnosti

Tabulka 2.3: Srovnání mechanických vlastností [4][8]

	Ti-6Al-4V	X20Cr13
Hustota [kg/m ³]	4430	7700
Mez pevnosti v tahu [MPa]	< 895	650-950
Mez kluzu [MPa]	< 828	450-600

Korozivzdorná ocel v zušlechtěném stavu a s kovovým leskem odolává atmosférické korozi s výjimkou silně znečištěného prostředí. Nekoroduje ve vodě, která neobsahuje chlor a minerální soli. Odolává i méně agresivním organickým kyselinám při pokojové teplotě. Naproti tomu titan výborně odolává korozi ve sladké i v mořské vodě a odolává slabým i silným kyselinám a zásadám. [9] [10]

Zásadní nevýhodou titanových slitin oproti korozivzdorným ocelím je však cena, která je zhruba čtyřnásobná. [1]

3 Zpevňovací technologie

3.1 Úvod

Současná technologická praxe, obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu a ve výrobě pružin, je těžko představitelná bez mechanických povrchových úprav. Počátky těchto procesů se datují do dávné minulosti. Uvádí se, že ve městě Ur byly zlaté helmy mechanicky zpevněny již v roce 2700 př. n. l. Do helmy se kladívkem vyklepávaly důlky pro zhutnění materiálu. Rytíři křížových výprav používaly meče zpevněné stejnou technikou.



Obrázek 3.1: Helma zpevněná a vytvrzená mechanickým zpracováním povrchu [52]

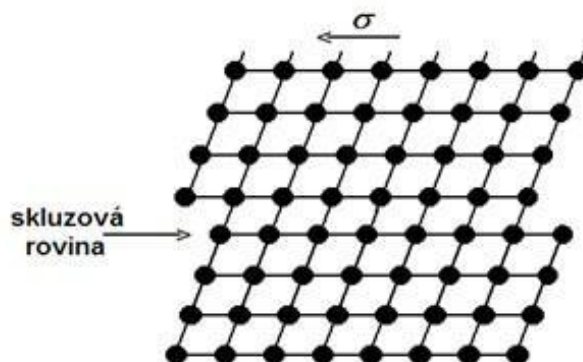
První moderní aplikace se objevují v železniční a vojenské technice. V roce 1789 byl povrch dělových hlavních upraven zpevňovacími metodami pro zlepšení pevnosti a v roce 1848 byly kolejové nápravy a ložiskové šrouby zpevněny válcováním. Až do 20. – 30. let 20. století však tyto metody byly spjaty s dovednostmi a zkušenostmi řemeslníků, kteří při předávání svých znalostí používali přísnou důvěrnost, aby si udrželi konkurenční výhodu. V těchto letech se začal zkoumat vztah mezi mechanickými povrchovými úpravami a nárůstem únavové pevnosti a tvrdosti. Ve 30. letech se rovněž zjistilo, že se zvyšuje i odolnost proti korozi. V roce 1927 byla E. G. Herbertem použita metoda, kdy velké množství ocelových kuliček „přšelo“ na povrch dílu z výšky 2 až 4 m. Tato metoda byla předchůdcem tryskání. V dalších desetiletích byla metoda tryskání zdokonalována.

V 70. letech vznikla kompletně nová metoda mechanického zpracování, a to laser peening. Pro technické účely se však začala používat až později, kdy byly k dispozici

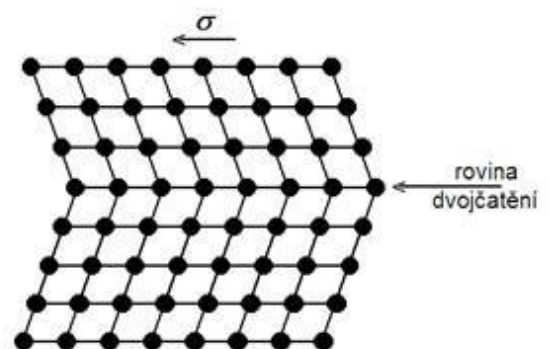
vhodné laserové technologie a proces byl přenesen z laboratorních laserů na laser průmyslově použitelný. [13]

3.2 Popis

Zpevňovací technologie jsou dokončovací operací. Konkrétně jde o metodu bez úběru materiálu probíhající za studena. Jedná se o levnou a efektivní metodu pro zlepšení únavové pevnosti, tvrdosti, odolnosti proti korozi i otěru a celkové životnosti kovových materiálů. Povrchová vrstva je ovlivněna lokálními elasticko-plastickými deformacemi. Známé mechanismy plastické deformace jsou skluz a dvojčatění. Za zvýšené teploty se vyskytují pokluzu po hranicích zrn, difúzní tečení a dislokační tečení. K plastické deformaci vedou i některé fázové přeměny. [11] [12] [15]



Obrázek 3.3: Deformace skluzem [53]



Obrázek 3.2: Deformace dvojčatěním [53]

Mechanismy plastické deformace vedou k mikrostrukturálním změnám, obvykle spojené s nárůstem tvrdosti, a ke vzniku zbytkových napětí, čímž dojde ke zpevnění povrchové oblasti. Zbytková napětí zároveň brání iniciaci a šíření únavových trhlin. V některých případech, jako např. při vyhlazování, dojde ke zlepšení drsnosti povrchu zatlačením vrcholků nerovností. [11] [12]

bez mechanického zpracování	s mechanickým zpracováním
<p>povrch rozložení tvrdosti</p>	<p>rozložení tvrdosti</p> <p>hloubka tváření za studena</p>
<p>povrch žádná zbytková napětí</p>	<p>tlaková zbytková napětí</p> <p>hloubka zbytkových napětí</p>
<p>povrch</p>	<p>převýšení zářezu</p>

Obrázek 3.4: Změny v povrchové vrstvě materiálu [13]

3.3 Zbytková napětí a chování při únavě

Součásti mohou za provozu selhat různými způsoby. Důležitými aspekty jsou:

- nástup nebo překročení povolené plastické deformace
- iniciace trhliny nebo překročení její přípustné délky
- nestabilní šíření trhlín, které má za následek prasknutí součásti
- nestabilita jako vzpěr, která může vést k elastickému nebo plastickému kolapsu, a tudíž k celkovému selhání

V praxi je selhání téměř vždy určeno interakcí několika vnějších parametrů jako neočekávané vysoké statické nebo cyklické zatížení, tření, tepelná energie, koroze apod. Součást může předčasně selhat i pokud je špatně tepelně zpracovaná.

Zbytkové napětí v součásti je jedním z nejdůležitějších údajů ovlivňujících provozní chování, zejména pokud jde o materiály s vysokou pevností. Zbytkové napětí může měnit chování součásti při cyklickém namáhání, podporovat nebo bránit a zpomalovat šíření trhlín a pro součást tak může být škodlivé i prospěšné.

V praxi neexistuje součást, která by neobsahovala zbytková napětí na mikro úrovni. Pouze malé množství dílů obsahuje zbytková napětí, která jsou zanedbatelná, např. po vhodném tepelném zpracování.

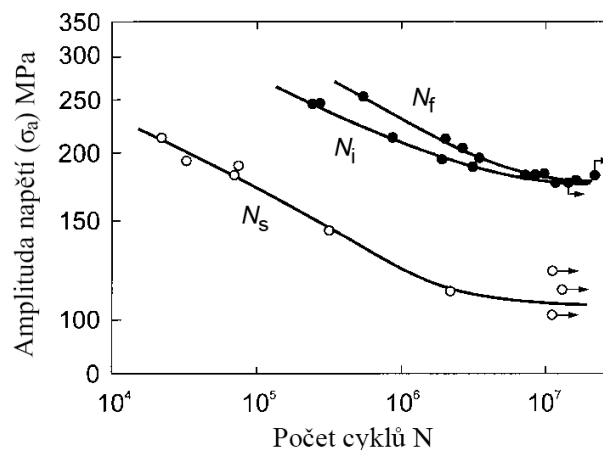
Výrobní procesy vedou nejen k vytvoření zbytkových napětí, ale také mohou ovlivnit změny stavu součásti v okolí jejího povrchu. Tyto změny jsou:

- vytvoření specifické topografie
- vytvrzení nebo změkčení (pro velmi tvrdé materiálové stavy)
- fázová transformace
- iniciace trhlin

Všechny tyto procesy mohou měnit únavové chování součásti a je téměř nemožné je od sebe oddělit. Únavové chování kovových materiálů se obecně vyznačuje čtyřmi po sobě následujícími etapami – A, B, C a D.

- Etapa A – cyklická deformace s efektem vytvrzování nebo změkčování v celé oblasti (homogenní zatížení) nebo v nejméně namáhaných oblastech (nehomogenní zatížení) a vznik skluzů na povrchu součásti
- Etapa B – vznik mikrotrhlin a jejich šíření
- Etapa C – stabilní šíření trhlin spojené s plastickou deformací materiálu v jejich okolí
- Etapa D – nestabilní šíření trhlin a selhání součásti

[14]



Obrázek 3.5: Wöhlerovy křivky pro ocel SAE 1020 [14]

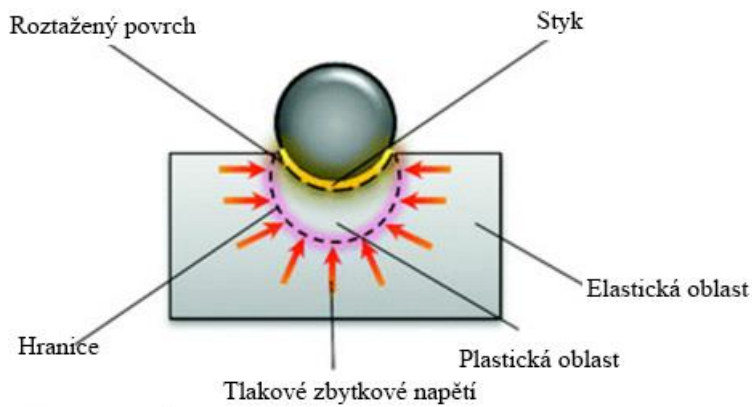
4 Metody zpevňování

4.1 Tryskání

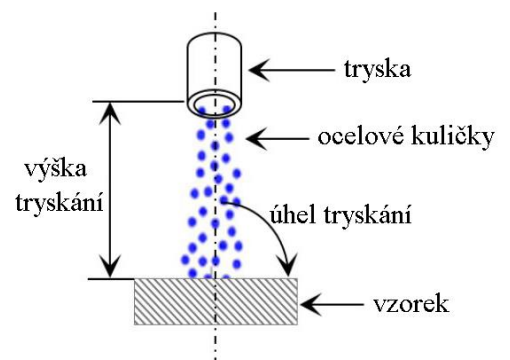
Tryskání je konvenční metodou vyvolání zbytkového napětí. Hloubka zasažené vrstvy se pohybuje do 250 μm , v závislosti na použitých parametrech procesu. Tryskání se pro letecký a kosmický průmysl používá od roku 1948. Titanové slitiny však byly tryskány pro zvýšení pevnosti až od 70. let minulého století. Primárním cílem tryskání je snaha snížení váhy mechanických dílů při dodržení míry bezpečnosti, případně při zachování hmotnosti zvýšit bezpečnost. Vedlejšími prvky tryskání je čištění povrchu a většinou nárůst jeho drsnosti. [16] [13] [18]

4.1.1 Princip

Povrch upravované části se bombarduje nepřetržitým proudem sférickým médiem. Vzniká tak oblast ovlivněná plastickou deformací, která vytváří zbytkové napětí. [17]



Obrázek 4.2: Tvorba plastické deformace tryskáním [54]



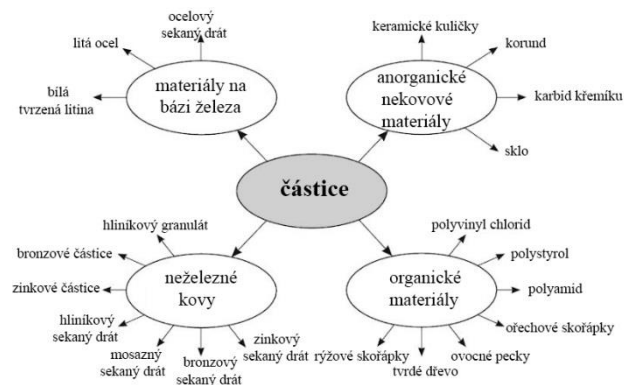
Obrázek 4.1: Schéma tryskání [68]

Parametry tryskání se dělí na tři skupiny:

- parametry částic – typ, tvar, velikost, hustota, tuhost a mez kluzu
- parametry základního materiálu – chemické složení, tvrdost, tuhost, předepjatý stav
- parametry toku částic – úhel dopadu, tlak, hmotnostní průtok, rychlost a vzdálenost [19]

Použité částice nemají abrazivní účinek. Výběr materiálu i velikostí je široký, viz. obr. Nejčastěji se používají ocelové kuličky (kuličkování) a kuličky z bílé tvrzené litiny (brokování) o průměru 0,2-3 mm, skleněné kuličky (balotínování) o průměru 0,05 - 0,85 mm případně keramické kuličky o průměru 0,15-1,5 mm. Částice narážejí na povrch součásti rychlostí až 150 ms^{-1} . [13] [21] [22]

Ocelové kuličky jsou dostupné ve dvou tvrdostech označované jako obvyklé (45 - 52 HRC) a tvrdé (55-62). Tvrdost kuliček je volena tak, aby byla alespoň taková, jako je tvrdost povrchu kuličkováného materiálu. Energie je tak vynaložena na součást, a ne na deformaci kuliček. [20] [13] [21]



Obrázek 4.3: Částice pro tryskání [13]

4.1.2 Použití

Většina kovů s výjimkou olova a rtuti může být tryskána pro zlepšení životnosti. Tryskání se používá především na cyklicky namáhané součásti. Může jít o pružiny, spojky, ozubená kola, hřídele, turbínové lopatky, písty, ventily anebo oblasti tepelně ovlivněné svařováním. [20] [13] [22]

Tryskání má i nevýhody. Většina z nich je překonatelná jednoduchými prostředky, avšak nevyhnutelně zvyšují náklady. V těchto případech je k vyvolání zbytkového napětí lepší použít např. laser, který na rozdíl od tryskání může pronikat i do obtížně přístupných oblastí součásti. U tryskání by neměl být použit větší průměr kuliček, než je polovina nejmenšího zaoblení na výrobku, aby bylo zajištěno dostatečně velké pokrytí. Pro velmi malé průměry je však limitována dosahovaná hloubka zbytkových napětí. Tryskání také

zvyšuje drsnost povrchu. Obecně platí, že čím jsou použity větší kuličky, tím je povrch hladší.

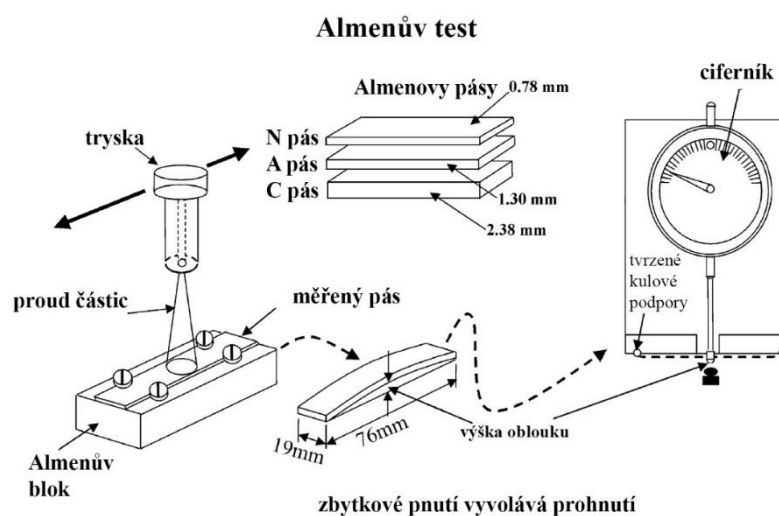
Kuličky z uhlíkové oceli zanechávají v povrchu součásti jemné částice. Pro většinu materiálů to nepředstavuje problém, ale na některých neželezných materiálech jako jsou slitiny hliníku a titanu je to nežádoucí. Existují tři možnosti:

- tryskání inertním materiálem jako je sklo nebo keramik
- odstranění železných částic chemickými prostředky
- následné otryskání jemnými skleněnými kuličkami nebo jemnozrnným brusivem jako je oxid hlinitý

Použití tryskání na radioaktivní komponenty v jaderných zařízeních vede k tomu, že použité kuličky jsou klasifikovány jako nízkoúrovňový jaderný odpad a jako takový musí být velmi opatrně a nákladně vyřazen. [20]

4.1.3 Almenův test

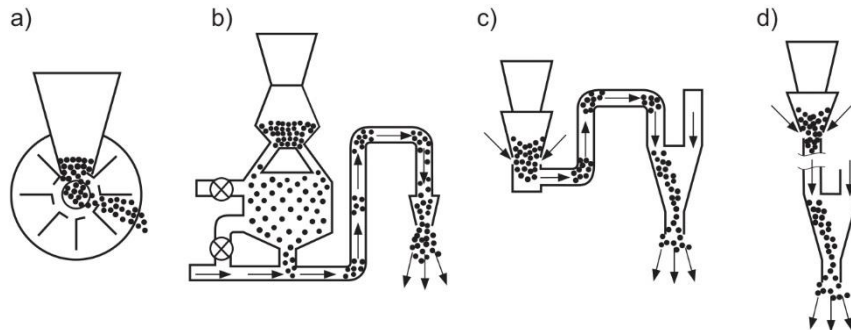
Almenův test je metoda, kterou se obvykle měří a řídí tryskání a je měřítkem intenzity. Během testu je malý kovový pás pevně uchycen k bloku a poté je vystaven procesu tryskání. Po vyjmutí z bloku bude mít kovový pásek tendenci se ohýbat. Intenzita tryskání je pak určena jeho průhybem, který je změřen Almenovým měřidlem. [19]



Obrázek 4.4: Almenův test [20]

4.1.4 Stroje

Tryskání může být provedeno pomocí metacího kola, stlačeného vzduchu nebo injektoru a injektorového gravitačního systému.



Obrázek 4.5: Typy zařízení pro trykání [13]

Metací kolo se skládá z jedné nebo z více lopatek. Kuličky jsou kontinuálně dodávány ze zásobníku. Propustnost kuliček je velmi vysoká, dochází však k širokému profilu rozložení rychlosti částic v průřezu proudu. Rychlost dopadu částic je řízena otáčkami metacího kola.

U zařízení na principu stlačeného vzduchu jsou nejprve částice dopraveny z horního zásobníku do spodní tlakové nádoby. Kuličky jsou následně přiváděny do vzduchové trysky přes dávkovač. Směs vzduchu a kuliček je urychlována proti povrchu součásti. Na rozdíl oproti metacímu kolu je rychlost i směr všech kuliček vyrovnaný. Používá se pro geometricky složitější díly díky možnosti nasměrování trysky a pro intenzivní úpravu malých oblastí součásti vzhledem k malému průměru trysky a dosahované intenzity trykání.

Injektorový systém využívá pro přenos kuliček ze zásobníku do trysky princip odsávání. Kuličky jsou dopravovány proudem vzduchu a zrychlovány tryskou na povrch součásti stejně jako u systému se stlačeným vzduchem. Výhodou je jednoduchá konstrukce, která zajišťuje vysokou míru dopravování kuliček. Oproti systému se stlačeným vzduchem je snížena flexibilita a intenzita trykání.

U gravitačních injektorových systémů je princip podobný jako u předchozího případu s tím rozdílem, že zásobník je umístěn nad pracovním prostorem a přívod kuliček je tak podpořen gravitací. [13]

Pro trykání se používají speciální komory, ve kterých celý proces probíhá. Tryska se může navádět ručně nebo automatizovaně, často s CNC řízením. [22]

4.2 Vyhlazování

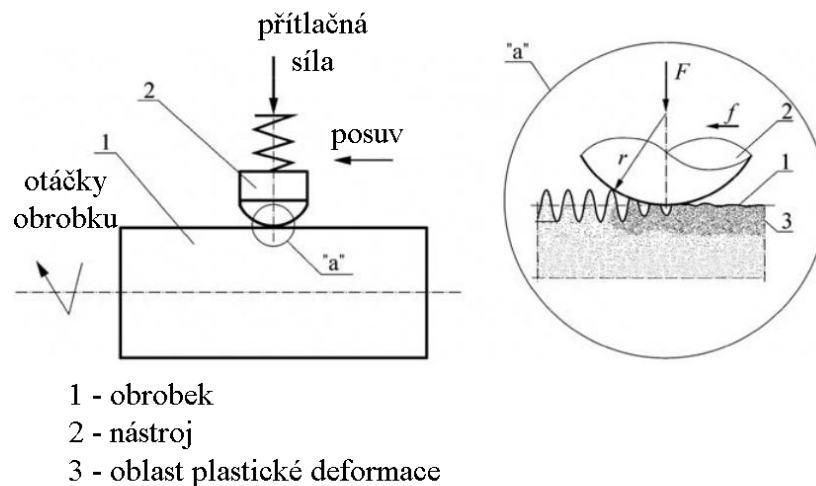
4.2.1 Princip

Princip vyhlazování je podobný jako u válečkování. Spočívá v přitlačování nástroje k povrchu obrobku za vzájemného posuvu, čímž je vyvolána plastická deformace a tok materiálu. Rozdíl oproti válečkování je však ten, že mezi tvářecím elementem a povrchem výrobku nedochází k odvalování, ale ke smýkání. [22] [23]

Výsledkem vyhlazování je:

- zpevnění materiálu do hloubky 0,1-0,5 mm
- zlepšení drsnosti na R_a 0,1-0,4 μm

[21]



Obrázek 4.6: Princip vyhlazování [69]

4.2.2 Nástroje

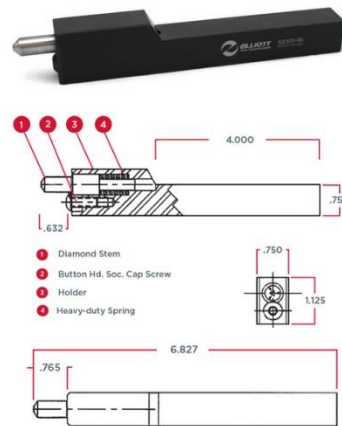
Tlaková síla mezi nástrojem a obrobkem by měla po celou dobu zůstat konstantní. Toho se dosáhne buď mechanicky, kdy je uvnitř nástroje uložena pružina, anebo hydraulicky. Přítlačná síla tak zůstává stejná bez ohledu na rozměrové a tvarové odchylky obráběné součásti. Jako materiál tvářecího tělíska se používá kalená ocel, slinuté karbidy, spékaný korund, kubický nitrid boru a diamant. [21] [23]

Jako nejideálnější materiál se jeví diamant. Vzhledem k jeho tvrdosti je možné vyhlazovat materiály do tvrdosti až 65 HRC. Hrot má poloměr zaoblení 1-4 mm. Pro tak

malý poloměr stačí přitlačná síla do 150 N, aby se dosáhlo požadovaného tlaku. Diamant má navíc velmi malý součinitel tření. [24]



Obrázek 4.7: Frézovací hlavice pro vyhlazování [55]



Obrázek 4.8: Diamantový nástroj pro vyhlazování [56]

4.2.3 Stroje

Pro vyhlazování je možné používat konvenční obráběcí stroje. Nejčastěji jde o soustruhy, ale dělají se nástroje i pro frézky.

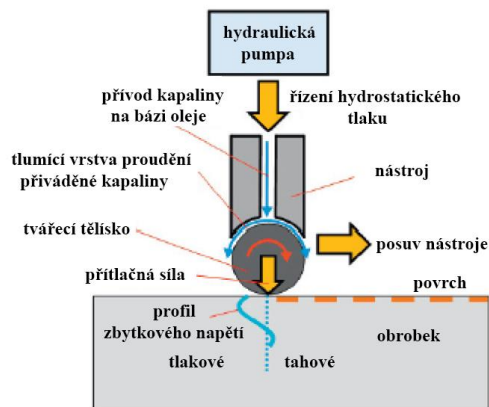
4.3 Válečkování

Cílem válečkování je snížit drsnost bez významné změny geometrického tvaru a dosažení dobrých kluzných vlastností, společně se zvýšením odolnosti proti únavě. Válečkování se používá na vnitřní i vnější rotační plochy, rovinné tvarové i přímkové plochy, drážky, závity apod. Metoda válečkování byla v USA použita už ve 20. letech minulého století jako povrchová úprava pro zvýšení pevnosti náprav Fordu T a poté ve 30. letech na vlakové nápravy. [11] [13] [26]

4.3.1 Princip

4.3.1.1 Statické

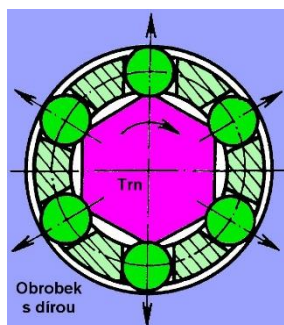
Plastická deformace je vyvozena přitlačením tvářecího tělíska a jeho odvalováním po povrchu materiálu. Tlak vyvolaný na povrch součásti musí být dostatečně velký, aby došlo k překročení meze kluzu materiálu. [24]



Obrázek 4.9: Statické válečkování [67]

4.3.1.2 Dynamické

Plastické deformace jsou vyvozeny silovými impulzy tvářecích tělísek. Silové impulzy vznikají za pomoci rotujícího trnu nebo kroužku s vačkovými plochami. V porovnání se statickým válečkováním je dosaženo vyšší jakosti zpevněné povrchové vrstvy, ale horší drsnosti povrchu. [25]



Obrázek 4.10: Rotující trn [25]

4.3.2 Použití

Válečkování se používá především v automobilovém a leteckém průmyslu. Konkrétními díly jsou klikové hřídele, ventily, šrouby, nápravy, chirurgické implantáty a lopatky turbín v elektrárnách a leteckém průmyslu. [13] [26]

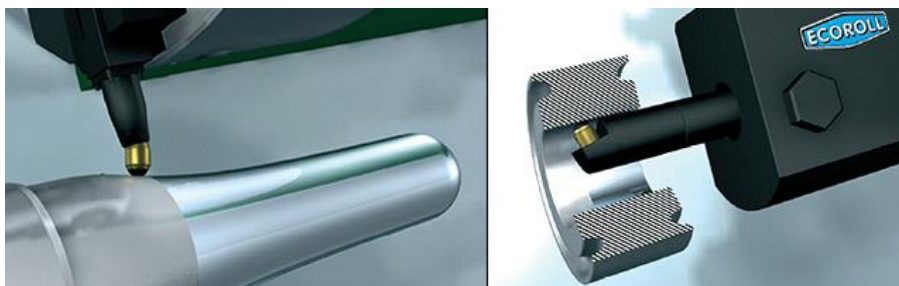
Parametry procesu

Na výsledek válečkování má vliv velikost tlaku mezi nástrojem a součástí, počáteční drsnost materiálu a jeho mechanické vlastnosti, tvar, povrch velikost a počet tvářecích tělísek válečkovacího nástroje, pracovní posuv, počet přejezdů a mazání. Jako mazivo se používají řezné a minerální oleje, případně olejové emulze. [24] [25] [11]

Válečkováním je možno dosáhnout drsnosti Ra 0,05-0,4 μm a rozměrové přesnosti IT 4 - 7. Hloubka zpevněné vrstvy se pohybuje v intervalu 0,1-10 mm. [25] [11]

4.3.3 Nástroje

Nástroj obsahuje jeden nebo více tvářecích valivých prvků. Těmito prvky mohou být válečky, kuličky a soudečky. Při použití menších rozměrů tělísek se zvyšuje hloubka zpevnění, při použití větších se zase dosáhne lepší drsnosti povrchu. Jako materiál se nejčastěji používá kalená ocel, slinuté karbidy. V zásadě platí, že minimální hodnoty drsnosti, kterých lze dosáhnout, jsou omezeny drsností nástroje. Přítlačná síla je realizována mechanicky za použití pružných prvků, nebo za působení tlakové kapaliny u hydrostatických nástrojů. [24] [25] [11] [13]



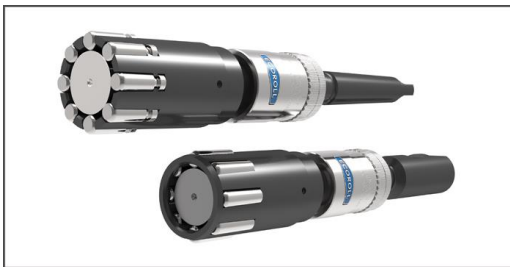
Obrázek 4.11: Hydrostatický nástroj pro vnitřní i vnější plochy [57]



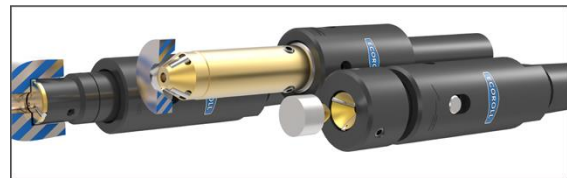
Obrázek 4.12: Nástroj s jedním tvářecím tělískem [57]



Obrázek 4.13: Nástroj s jedním tvářecím tělískem [57]



Obrázek 4.15: Nástroj s více tvářecími tělisky [57]



Obrázek 4.14: Nástroj s více tvářecími tělisky [57]

4.3.4 Stroje

Válečkování lze provést na jakémkoliv standardním vřetenové stroji. Vnější i vnitřní rotační plochy lze obrábět na soustruhu, na vyvrtávačkách a frézkách lze opracovávat rovinné i rotační plochy. [24] [25]

4.4 Kalibrování

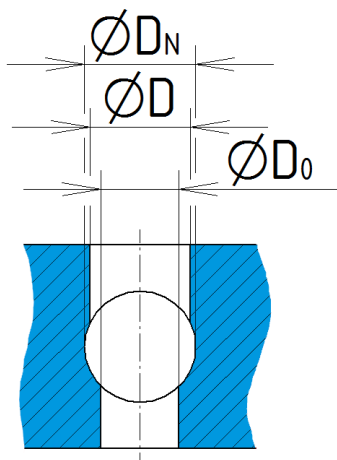
4.4.1 Princip

Kalibrování je metoda určená pro dokončování nejčastěji vnitřních, ale i vnějších ploch. Nástrojem je protlačovací kalibrovací trn nebo kulička. Používá se jeden nebo více postupně se zvětšujících nástrojů, které konají vůči součásti přímočarý pohyb. Nástroj je o několik tisícín větší než požadovaný rozměr otvoru, případně menší, pokud jde o obrábění vnější plochy. Kalibrování vyvolá v materiálu plastickou deformaci. [11] [27]

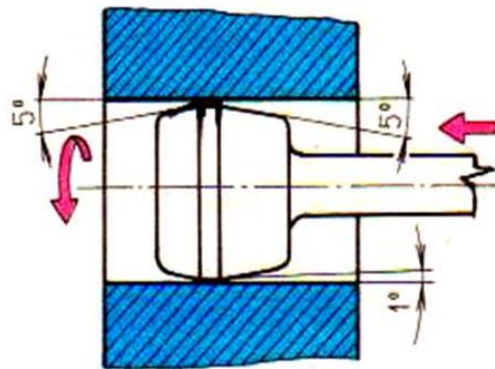
Výsledkem kalibrování je:

- zpevnění materiálu do hloubky 0,05-0,2 mm
- zlepšení drsnosti na Ra 0,005-0,4 μm
- dosažení vyšší tvarové i rozměrové přesnosti až na IT 4-6

Dosahované parametry závisí na vlastnostech materiálu, výchozí drsnosti povrchu, použitém mazivu, tvaru nástroje, rychlosti pohybu a tuhosti soustavy stroj, nástroj a obrobek.



Obrázek 4.17: Kalibrovací kulička [11]



Obrázek 4.16: Kalibrovací trn [27]

4.4.2 Stroje

Strojem může být mechanický nebo hydraulický lis, případně lze pro vnitřní plochy použít ráz tlakové kapaliny nebo výbuch. [11] [27]

4.5 Vibrační zpevňování

Plastická deformace povrchové vrstvy je způsobena nárazy částic, podobně jako u tryskání. Částice jsou však v tomto případě urychleny vibracemi. Cílem je zlepšení odolnosti proti korozi, únavové životnosti a tvrdosti. Výhodou procesu je nízká spotřeba energie.

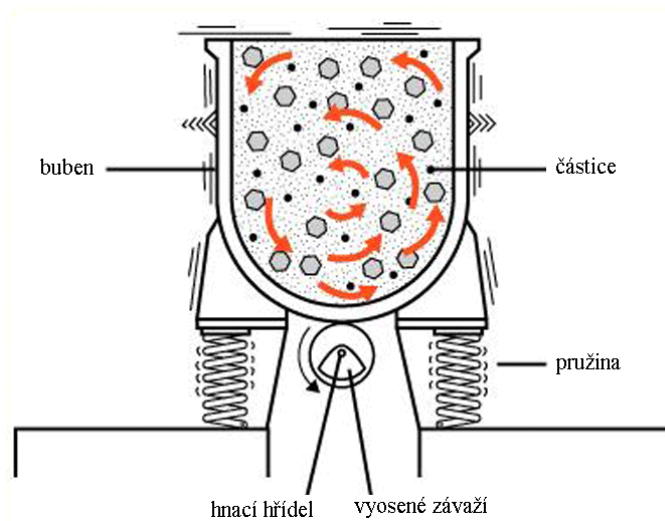
- mechanicky
- ultrazvukem

[11] [29]

Jako částice se používají ocelové, litinové, keramické a karbidové kuličky. Oproti tryskání není omezena jejich velikost. Běžně se používají kuličky o průměru 4 až 12 mm. Větší průměr kuliček zajistí vyšší intenzitu, větší hloubku zpevněné vrstvy a nižší drsnost povrchu. Dosahovaná hloubka zpevnění je 60 až 110 μm . [32] [31] [30]

4.5.1 Mechanické vibrační zpevňování

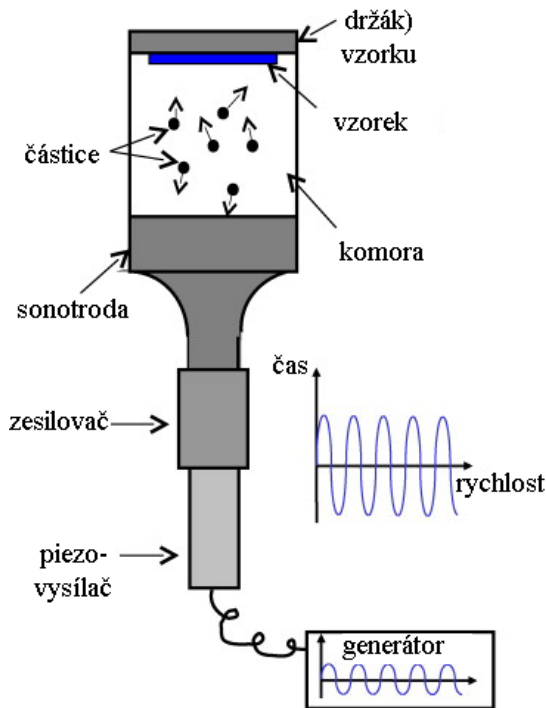
Kmitavý pohyb je vytvářen ve třech osách ve speciálním zařízení, nebo ve vibračním bubnu na omílání. Vektor výsledného zrychlení by ideálně měl směřovat kolmo k ploše součásti. [11] [32]



Obrázek 4.18: Princip vibračního mechanického zpevňování [58]

4.5.2 Ultrazvukové vibrační zpevňování

Využívá se ultrazvukových vibrací jako zdroje pro opakované urychlování částic na povrch součásti. Frekvence kmitání je přes 18 kHz. Ultrazvukové zařízení se skládá z generátoru ultrazvukových signálů, převodníku, který přeměňuje ultrazvukové signály v mechanický pohyb a kovové tyče – sonotrody, která přenáší pohyb na částice. V porovnání s mechanickým vibračním zpevňováním je dosaženo vyšší rychlosti pokrytí, kdy plného pokrytí může být dosaženo již za jednu sekundu. [31]



Obrázek 4.19: Princip ultrazvukového vibračního zpevňování [59]

Součásti upravované ultrazvukovou vibrační metodou mívají vysokou přidanou hodnotu, jde např. o díly leteckých motorů s komplexní geometrií, lopatková kola turbín, ozubená kola i tlakové nádoby jaderných elektráren. Obvykle se používají specializované komory, navržené pro danou součást. Parametry procesu jsou dány velikostí a materiálem tvářecích částic, vibrační frekvencí a amplitudou sonotrody. [28]

4.5.3 Stroje

Pro mechanické vibrační zpevňování se nejčastěji používají vibrační omílací zařízení, v podstatě jde o buben s pohonem. Podle tvaru existují válcové, kuželové a několikahránné bubny. V automobilovém průmyslu se udržuje vysoká produktivita. Hlavní výrobci využívají automatizovanou výrobní stanici pro ultrazvukové vibrační zpevňování kritických částí převodovek. Stroj je schopen počítat částice (v jednotkách nebo gramech) a sleduje opotřebení sonotrody i částic. [33] [30] [31]



Obrázek 4.20: Automatizované zařízení pro ultrazvukové vibrační zpevňování [30]

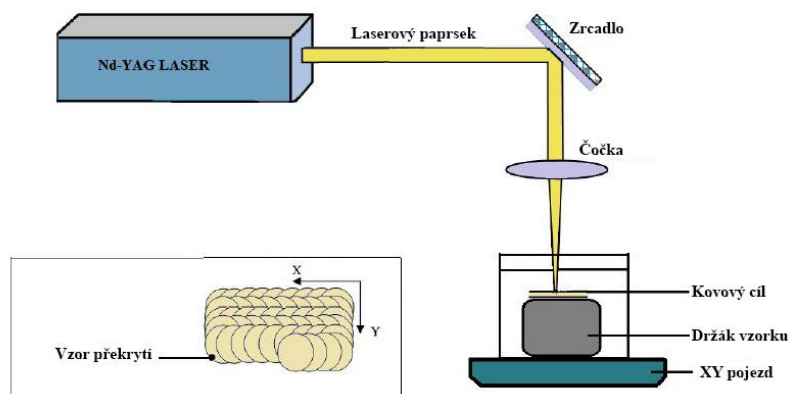


Obrázek 4.21: Vibrační buben [58]

4.6 Laser peening

4.6.1 Princip

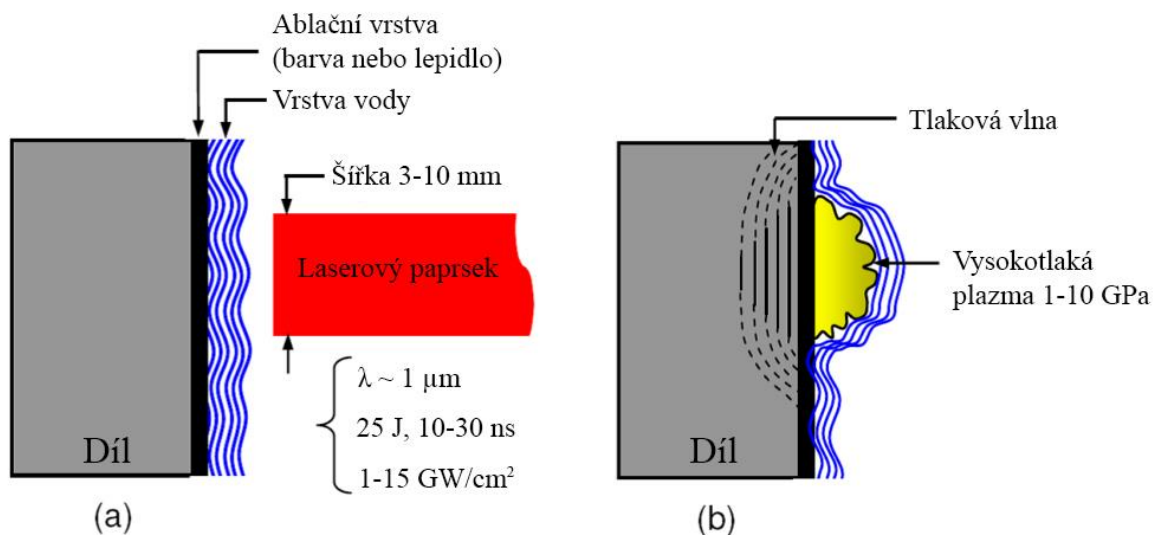
Laser peening je mechanický proces zpracování materiálů. Jako zdroj je použit vysokoenergetický impulzní laser z neodymového skla, který produkuje krátký pulz, působící obvykle 15–30 ns. Laserový paprsek má vlnovou délku kolem 1060 nm a je směřován z laseru přes optický řetězec zrcadel a čoček na povrch zpracovávané součásti. Povrch součásti je překrytý dvěma typy vrstev:



Obrázek 4.22: Schématické zobrazení systému pro laser peening [58]

- Ablační – jde o neprůhlednou vrstvu, která se nachází přímo na povrchu součásti, na kterou chceme aplikovat laser peening. Může jít o jakýkoliv materiál, který je neprůhledný pro laserový paprsek. Nejčastěji se používá černý nátěr nebo hliníková páska.
- Transparentní – tato vrstva leží na netransparentní ablační vrstvě. Obvykle se jedná o sklo nebo o vodu.

Laserový paprsek projde transparentní vrstvou a narazí na neprůhlednou ablační vrstvu. Ta se okamžitě začne odpařovat. Tato pára absorbuje energii přicházejícího paprsku a začne se velmi rychle ohřívat. Na rozhraní mezi oběma vrstvami vznikne vysokotlaký plazmový mrak. Průhledná vrstva zachytí tepelně expandující páru a plazmu proti součásti. Zajistí se tím vyšší nárůst tlaku, než kdyby transparentní vrstva chyběla. Náhlý vysoký tlak způsobí rázovou vlnu, která se šíří do materiálu. Pokud je špička napětí této rázové vlny větší než dynamická mez kluzu materiálu součásti, dojde k plastické deformaci. Jak se vlna šíří dál do materiálu, napětí klesá a deformace pokračuje, dokud napětí neklesne pod dynamickou mez kluzu.



Obrázek 4.23: Princip laser peeningu [60]

Velikost zasažené plochy závisí na materiálu, laseru a procesních parametrech. Tvar místa zasažené oblasti bývá kulatý a zbytkové napětí může dosáhnout až hloubky 1,5 mm.

Rozměry těchto oblastí se pohybují v rozmezí 2,5-25 mm, měřeno přes průměr. V případě potřeby se však mohou použít i jiné tvary tak, aby poskytovaly co nejefektivnější a nejúčinnější podmínky zpracování. [34] [35] [17]

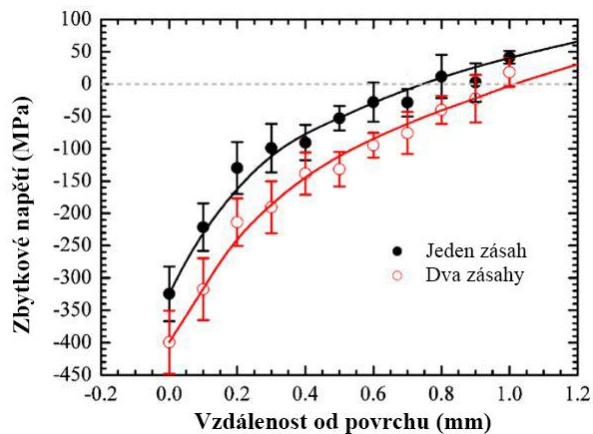
4.6.2 Použití

Laser peening lze aplikovat na dokončenou plochu součásti, nebo těsně před finálním dokončením. Na povrch materiálu působí mechanickou silou, a proto nedochází k tepelnému ovlivnění součásti.

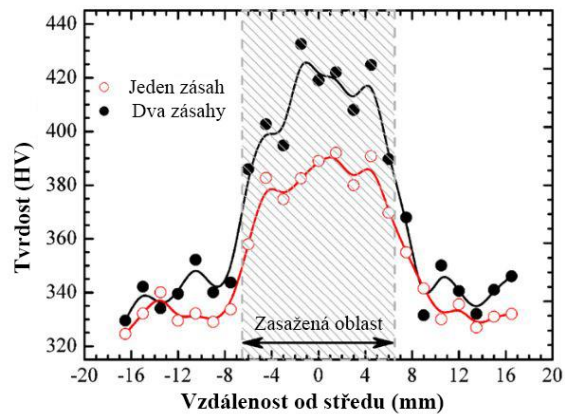
Výhodou je, že lze zvolit velikost zasažené oblasti. Laser peening můžeme použít jak na malou oblast výrobku, např. kolem malých otvorů na kolíky, šrouby nebo olej, tak na celou oblast u lopatek turbíny. V tomto případě se body zasažené laserovým paprskem překrývají, dokud není oblast zcela pokryta.

Laser peening se dá použít pro dosažení lepších mechanických vlastností na většinu kovů, jmenovitě na oceli, hliníkové slitiny, titanové slitiny nebo na superslitiny na základě niklu. [35]

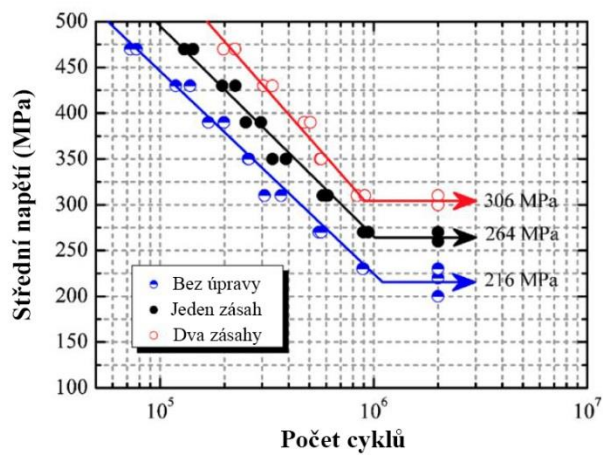
Byl proveden výzkum vlivu laser peeningu na titanovou slitinu Ti-6Al-4V. Cílem bylo zjistit velikost nárůstu zbytkového napětí a tvrdosti. U všech vzorků byla udržována stejná míra překrytí bodů, a to 40 %. Z toho důvodu byla vzdálenost mezi sousedními místy zasaženými laserovým paprskem 2 mm. Laserový paprsek měl vlnovou délku 1064 nm, hustotu výkonu 5 GW/cm^2 , impulz trval 10 ns a pracoval při frekvenci 0,5 Hz. Jako ablační vrstva se použila hliníková fólie o tloušťce 0,1 mm a transparentní vrstvu tvořila voda o výšce 2 mm. První skupina vzorků byla zasažena do každého místa jednou, kdežto vzorky tvořící druhou skupinu byly do každého místa zasaženy dvěma po sobě následujícími paprsky. Nárůst únavové pevnosti činil 22,2 % pro první skupinu vzorků, respektive 41,7 % pro druhou. Tvrdost se zvýšila o 15 %, respektive o 24 %. U zásahu jedním paprskem je maximální hodnota zbytkového napětí 340 MPa a po zásahu dvěma paprsky 420 MPa. [34]



Obrázek 4.25: Profil zbytkového napětí [34]



Obrázek 4.24: Profil mikrotvrdosti [34]



Obrázek 4.26: Wöhlerova křivka [34]

4.6.3 Stroje



Obrázek 4.27: Zařízení na laser peening od firmy LSP Technologies [37]

Parametry:

1. Laserový systém - Nd:YLF

- energie pulzu: 10 J
- vlnová délka: 1053 nm
- frekvence: 20 Hz
 - puls volitelný pro dosažení diskretních hodnot např. 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz
- doba na zahřátí laseru: < 20 minut
- ANSI Z136.1 a IEC 60825-1 vyhovující bezpečnost

2. LSP Systém – ovládací prvky

- integrované ovládací prvky pro udržení vnitřního prostředí:
 - relativní vlhkost uvnitř laserového kontejnmentu ~ 40 %
 - jmenovitá provozní teplota uvnitř kontejnmentu 21 ± 1 °C
- volitelný operátor:
 - energie pulzu
 - počet impulzů v pořadí
 - frekvence opakování impulzů

3. Systém pro získávání dat

- vlastní software pro sběr a ukládání dat

4. Konfigurace nástrojů a zařízení

- elektrické napájení: AC, 208 Y/120 V, 50/60 Hz, 60 A
- jsou k dispozici další napájecí napětí
- filtrovaný suchý vzduch: 653-722 Pa při 9,44 l/min

5. Rozměry

- vnější rozměry: Š x V x D: 1420 x 1730 x 3350 mm
- celková hmotnost < 3000 kg [37]

5 Hodnocení integrity povrchu

5.1 Měření tvrdosti

Tvrдость je schopnost materiálu klást odpor proti vnikání cizího tělesa. Mezi tvrdostí a pevností platí experimentálně potvrzený lineární vztah

$$R_m = k \cdot HBW \quad (1)$$

kde

R_m – mez pevnosti [MPa]

k – součinitel dle materiálu, pro ocel $k = 3,1$ až $4,1$ [MPa]

HBW – tvrdost podle Brinella [-]

Zkoušky tvrdosti se nejčastěji dělí na:

- vnikací
- odrazové
- vrypové

[38] [15]

5.1.1 Vnikací

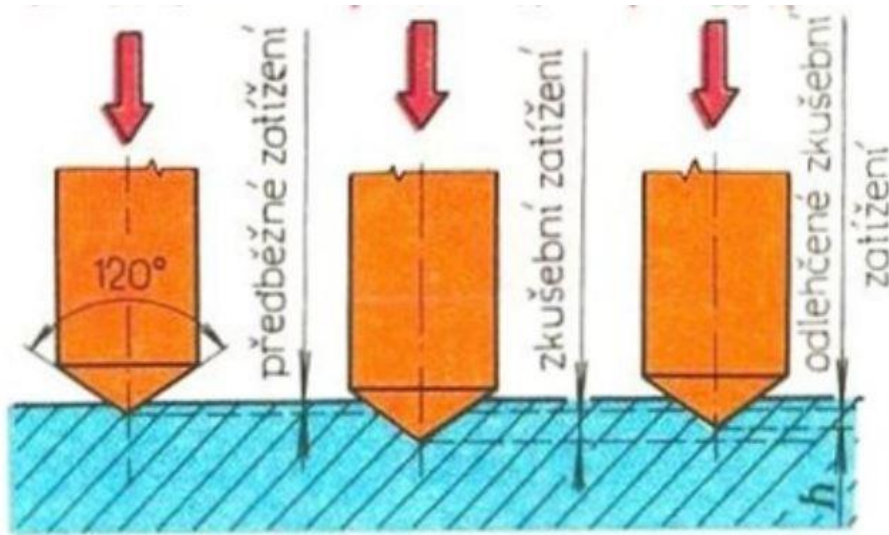
Zkouška podle Brinella

Vnikacím tělískem je kulička z tvrdokovu nebo ze spékaného karbidu. Kulička je při vnikání zatížena po dobu 10 až 15 s. Měří se průměr vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Tvrдость se značí HBW. Tato metoda je vhodná pro měkké a středně tvrdé materiály s homogenní strukturou. [15] [39]

Zkouška podle Rockwella

Indentorem je diamantový kužel o vrcholovém úhlu 120° nebo kulička z tvrdokovu. Indentor se nejprve předběžně zatíží a vnikne do určité hloubky. Poté je zatížen přídatným zkušebním zatížením a následně opět odlehčen na předběžné zatížení. Tvrдость je dána rozdílem mezi hloubkou trvalého vtisku po odlehčení na počáteční sílu a základní hloubkou. Diamantový kužel je vhodný pro tvrdé materiály a tvrdost se značí HRA

a HRC. Kulička z tvrdokovu se používá pro měkké a středně tvrdé materiály a značí se HRB. [15] [39]



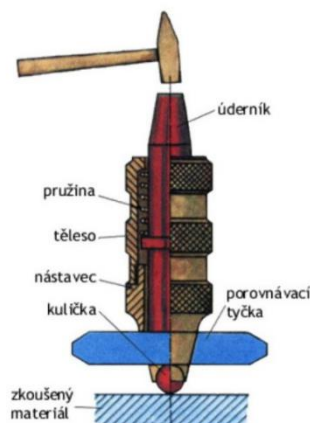
Obrázek 5.1: Zkouška podle Rockwella [70]

Zkouška podle Vickerse

Vnikacím tělískem je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Je zatížen po dobu 10 až 15 s a následně se měří délka úhlopříček. Jde o nejpřesnější metodu. Je vyžadován kvalitní povrch materiálu a není vhodná pro silně nehomogenní materiály. Značí se HV. [15] [39]

Zkouška Poldi kladívkem

Jedná s o dynamickou zkoušku, založenou na porovnávací metodě. Kladívko má v sobě vloženou porovnávací tyčku. Při úderu kladívka dojde ke vtisku kuličky do měřeného materiálu i do porovnávací tyčky. Z velikosti obou vtisků se určí tvrdost. [40]



Obrázek 5.2: Poldi kladívko [61]

5.1.2 Odrazové

Zkouška podle Shoreho

Využívá se Shoreho skleroskop. Ten se skládá z kalibrované trubky, ve které se pohybuje váleček o váze asi 2,5 g, zakončený kulovitě zabroušeným diamantem. Těleso padá volným pádem z výšky 254 mm. Tvrdost je dána výškou odrazu, která se určí na stupnici, která je volena tak, že HSH 100 odpovídá kalené oceli. [40]

5.1.3 Vrypové

Zkouška podle Martense

Indentorem je diamantový kužel o vrcholovém úhlu 90° . Indentor je zatěžován silou a pojíždí po vyhlazené ploše měřeného materiálu. Následný vryp se měří mikroskopem. Výsledná tvrdost se získá podle zatížení, které vytvoří vryp o šířce 0,01 mm nebo porovnávací metodou. Nejedná se o příliš přesnou metodu. [40]

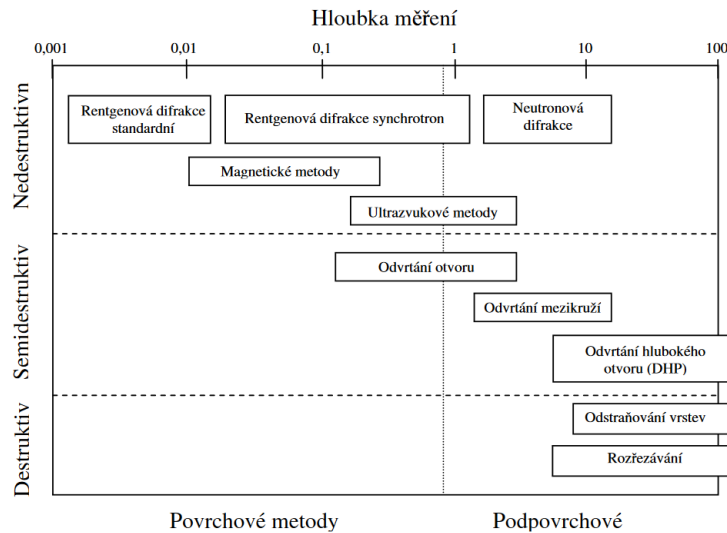
5.2 Měření zbytkových napětí

Definice

Zbytkové napětí je napětí, které je obsaženo v materiálu, aniž by na něj působily vnější síly. Zbytkové napětí je rovno rozdílu mezi skutečným napětím v elasticko-plastickém tělese a fiktivním napětím, které by vzniklo za předpokladu ideálně pružného materiálu. [41]

Metody zjišťování zbytkových napětí se dělí na:

- destruktivní
- polodestruktivní
- nedestruktivní [42]



Obrázek 5.3: Metody pro měření zbytkových napětí [44]

5.2.1 Destruktivní

U destruktivních metod dojde ke zničení součásti. Materiál se narušuje odstraňováním vrstev, rozřezáváním nebo jinou metodou. Tím se uvolní zbytková napětí obsažená v materiálu a následně se vyhodnocuje odezva, nejčastěji ve formě deformace.

Metoda odstraňování vrstev

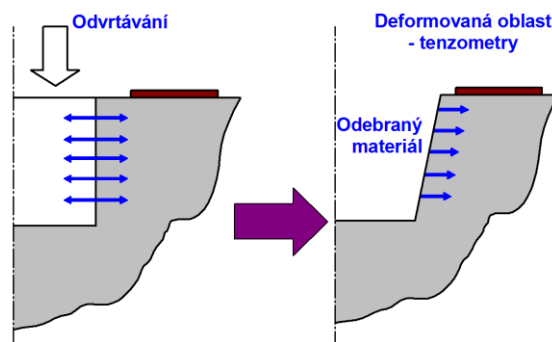
Principem je postupné odstraňování povrchových vrstev materiálu, díky čemuž dojde k deformaci součásti. Jde o metodu často používanou na prutová tělesa, případně desky. Tloušťka odebíraných vrstev musí být dostatečně malá, v řádech setin milimetru. Na to se používají chemické, případně elektrochemické metody opracování. [41] [42] [43]

5.2.2 Polodestruktivní

Polodestruktivní metody fungují na stejném principu jako destruktivní. Rozdíl je v místě měření. To se provádí v místě součásti, které nemá vliv na funkčnost součásti, nebo se měří na záměrně přidané části povrchu součásti, která se následně odstraní.

Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda je jednou z nejpoužívanějších, z důvodu jednoduchosti, možnosti použití na široký rozsah materiálů a součástí a malého poškození materiálu. Uvolnění zbytkových napětí se provede vyvrtáním otvoru nebo mezikruží. Vzniklé deformace jsou zaznamenány pomocí tenzometrů umístěných na povrchu součásti. Zbytkové napětí je zpětně získáno za použití kalibračních koeficientů. Nevýhodou metody je snížená přesnost v případě nerovnoměrných napětí nebo nehomogenních materiálových vlastností. [41]



Obrázek 5.4: Princip odvrtávací metody [41]

5.2.3 Nedestruktivní

U nedestruktivních metod nedojde ke zničení součásti. Pro měření zbytkových napětí se aplikují souvislosti mezi fyzikálními nebo krystalickými vlastnostmi materiálu a zbytkovým napětím.

Ultrazvuková metoda

Tato metoda využívá akustoelastický jev. V závislosti na namáhání kovu dochází k lineární změně rychlosti šíření zvuku. Ultrazvukové vlny se dají dělit podle směru šíření na:

- podélné
- příčné
- povrchové (Rayleighovy)

[43] [44]

5.3 Měření drsnosti povrchu

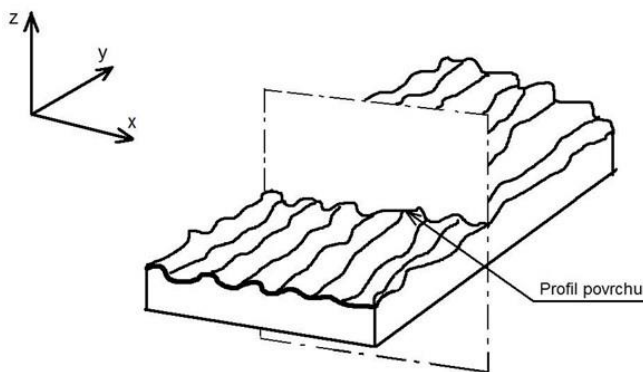
Drsnost povrchu udává kvalitu povrchu z hlediska mikronerovností. Parametry drsnosti se dělí na tři skupiny:

- výškové
- délkové
- hybridní

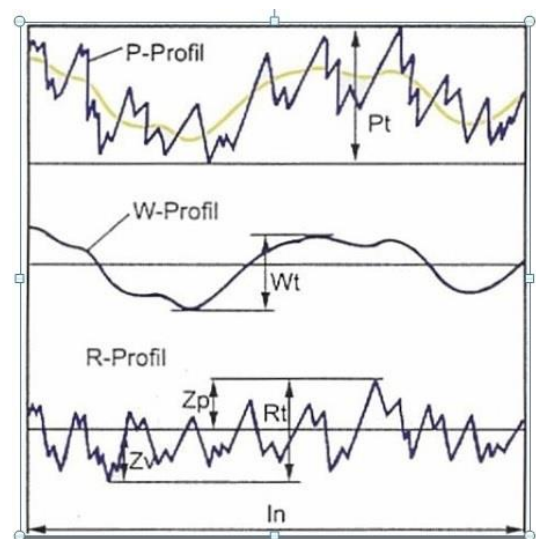
V praxi jsou nejpoužívanější výškové.

Profil povrchu je průsečnice nerovností skutečného povrchu s rovinou vedenou kolmo k tomuto povrchu. Profil povrchu se vyhodnocuje v závislosti na filtru profilu jako:

- základní profil P
- profil vlnitosti W
- profil drsnosti R [45] [48]

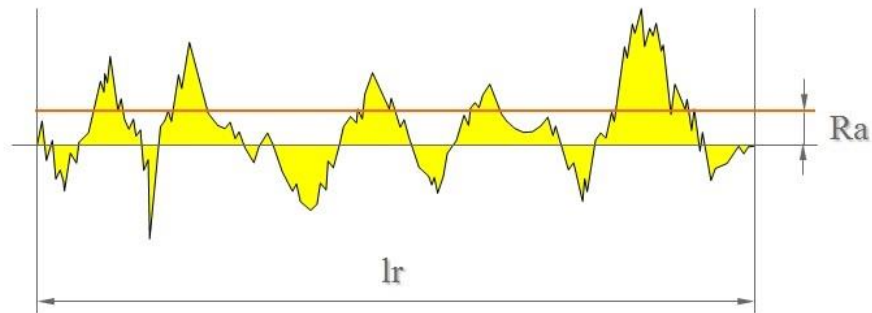


Obrázek 5.5: Profil povrchu [48]



Obrázek 5.6: Parametry P, W, R na profilu povrchu [48]

V České republice je pro měření drsnosti nejpoužívanější veličina R_a [μm], což je střední aritmetická úchylka povrchu. [46]



Obrázek 5.7: Průměrná aritmetická úchylka Ra [48]

5.3.1 Vzorkovnice

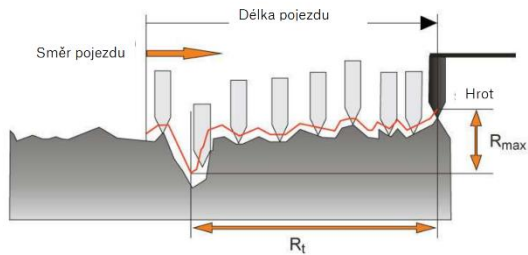
Vzorkovnice se používají nejčastěji. Vzorkovnice je kolekce vzorků, kde každý vzorek je vyrobený určitou výrobní metodou. Mají tvar destiček nebo válečků a obsahují hodnotu Ra a informaci o druhu obrábění, kterým byly vyrobeny. Kontrola probíhá za pomoci zraku a hmatu. Nejedná se o příliš přesnou metodu, jelikož závisí na subjektivním úsudku. Vyššího stupně přesnosti měření lze dosáhnout použitím lupy nebo komparačního mikroskopu. [47] [48]



Obrázek 5.8: Vzorkovnice drsnosti povrchů [62]

5.3.2 Dotykové přístroje

Principem je záznam výšky měřicího hrotu při rovnoměrném pohybu po povrchu předmětu ve zvoleném směru.



Obrázek 5.9: Princip metody [51]

Měřicí hrot může mít poloměr až 2 μm pro choulostivé laboratorní přístroje. Pro dílenské prostředí se používají hroty do poloměru 10 μm . Rozlišení profilu je až 8 nm. Dotykové přístroje je možné rozdělit na:

- přenosné
- stacionární
- CNC

[49]



Obrázek 5.10: Přenosný dotykový drsnoměr Mitutoyo Surfest SJ-210 [49]



Obrázek 5.12: Stacionární přístroj Mitutoyo Surfest SV-2100M4 90°/5 [49]

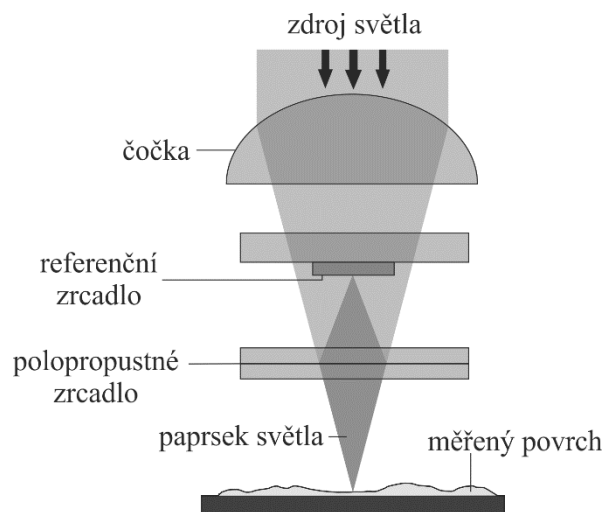


Obrázek 5.11: Přístroj Mitutoyo Surfest Extreme SV-3000CNC [49]

Přenosné drsnoměry jsou vhodné i pro měření tam, kde je testovaný vzorek příliš velký na to, aby byl přenesen do laboratoře. [51]

5.3.3 Bezdotykové přístroje

Patří sem optické drsnoměry a profilometry. Umožňují měření tvaru i drsnosti s vysokou přesností. Pracují na principu interference bílého světla.

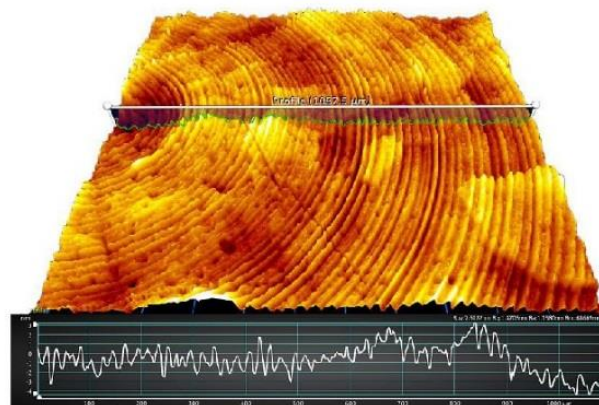


Obrázek 5.13: Schématický diagram konfigurace interference [63]

Je možné měřit transparentní i netransparentní materiály. Lze je použít na každém povrchu od super-hladkých optických povrchů po velmi drsné povrchy i schodovité struktury s vysokou opakovatelností. [50]



Obrázek 5.14: Optický profilometr Nexview™ [64]



Obrázek 5.15: Změřená plocha po obrábění [64]

6 Aplikace vibračního kuličkování na axiální kompresor

6.1 Rozvaha

Vibrační kuličkování je dokončovací metoda. Dochází během ní ke zpevnování kuličkované části výrobku. Ke zpevnění dojde do určité vzdálenosti od povrchu. Vzdálenost závisí na podmínkách kuličkování jako je doba kuličkování, použitá velikost, hmotnost, případně počet kuliček atd. Hloubka, kterou se zpevněním dosáhne však není nějak velká. Vibrační kuličkování se proto používá jako poslední operace.

V praktické části se budou kuličkovat lopatky lopatkového kola axiálního kompresoru leteckého motoru. Vlivem nárazů kuliček do lopatek dochází k určité deformaci. Tyto deformace nesmí mít žádný vliv na funkčnost součásti a neměly by být příliš velké. V tomto případě hrozí nebezpečí ohnutí lopatek, jelikož mají velmi malou tloušťku. Dále u lopatek hrozí otlučení všech ostrých hran. Tomu se však při kuličkování jen obtížně zabrání. Snahou však je, aby bylo otlučení, co možno nejmenší a nemělo vliv na pracovní funkci lopatkového kola.

6.2 Cíl

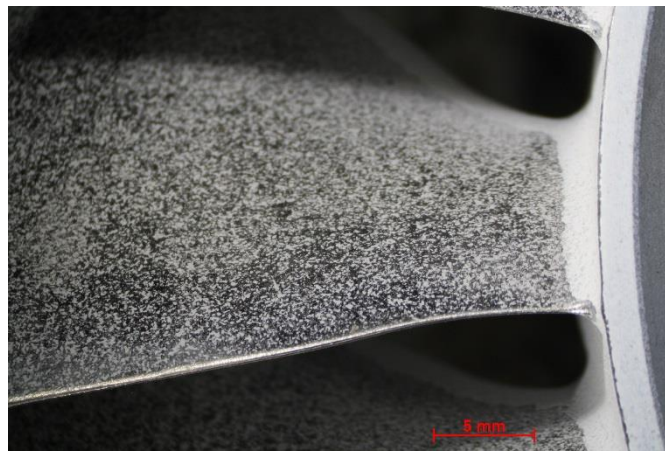
Cílem je experimentálně zjistit nejlepší podmínky kuličkování lopatek daného lopatkového kola. Zajímavé jsou především tři vlivy na výsledný stav lopatek po kuličkování. Je to:

- celková doba kuličkování
- druh použitých kuliček
- zvolený přípravek

V tomto měření nejde o velikost zpevnění a tloušťku, ve které k němu dojde, ale o úroveň pokrytí kuličkované plochy.

Doba kuličkování ovlivňuje souvislost pokrytí. Pokud se nebude kuličkovat dostatečně dlouho, zůstanou na součásti nepokrytá místa, ke kterým by nedošlo při dostatečné době kuličkování. Na druhou stranu je zbytečné kuličkovat příliš dlouho. Po určité době totiž

dojde k jedné věci. Všechna místa, kam se kuličky mohou dostat a mít dostatečnou energii, jsou již kuličkována. Jiná místa než tato, už povrch ovlivněný kuličkováním mít nebude, ať se bude kuličkovat třeba donekonečna. Nalezne se takový časový interval, aby nedošlo k nedostatečnému pokrytí kuličkování a takový, aby se nekuličkovalo zbytečně dlouho. Při příliš dlouhém kuličkování už nedojde k žádné změně povrchu, součást se bude nacházet v tzv. stavu saturace povrchu a na funkčnost součásti to nebude mít vliv. Jedná se především o ekonomickou stránku. Pokud se bude kuličkovat jen tak dlouho, jak je zapotřebí, stihne se kvalitně nakuličkovat nejvíce výrobků. Ideální doba se pozná podle množství odstraněné barvy.

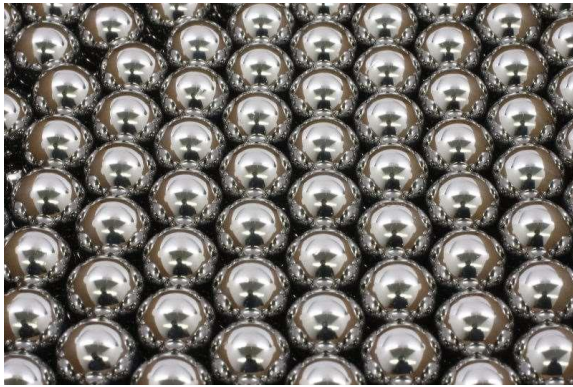


Obr. 6.1: Detail kuličkované plochy

Typ kuliček se může volit podle spousty parametrů. Nejčastěji je to podle materiálu a průměru kuliček. Materiál kuliček nás zajímá z hlediska tvrdosti a hmotnosti. Pokud by kuličky nebyly dostatečně tvrdé, neměly by na výrobek žádný vliv. Co se týče hmotnosti, tak čím těžší neboli čím budou mít vyšší hustotu, tím budou mít větší dopadovou energii. U vysoké hmotnosti kuliček však hrozí, že dopad na lopatky bude příliš velký a dojde k nežádoucímu poškození a nefunkčnosti celého lopatkového kola. Jako materiál se může použít kalená ocel, karbidy nebo keramika. Průměr kuliček se také podílí na výsledné hmotnosti. Platí, že čím větší průměr, tím je kuličkování efektivnější (pokud nedojde k přílišné deformaci lopatek). Nevýhodou velkého průměru kuliček je to, že se nedostanou do všech míst. Cílem je tedy najít vhodný kompromis. V našem případě použijeme kombinaci malých a velkých kuliček v poměru 1:1. Kromě parametrů kuliček je pro nás důležitý i jejich počet. Nedostatečný počet kuliček výrazně snižuje efektivitu

a prodlužuje dobu kuličkování. Na druhou stranu přílišný počet zamezuje jejich pohybu a jejich hybnost se vyruší vzájemnými nárazy.

Přípravek pro kuličkování je důležitý pro správné uložení lopatkového kola během procesu kuličkování. Lopatkové kolo musí být pevně uloženo, protože během kuličkování, kdy je umístěno ve vibračním stroji, dochází ke značným setrvačným silám. Je tedy důležité i to, aby přípravek byl co možno nejlehčí. Přípravek musí zajistit i vhodný přístup kuličkám ke kuličkové části. Zároveň může zamezit přístup k těm částem výrobku, které není žádoucí kuličkovat (nejsou nijak pevnostně namáhané). U daného výrobku je třeba kuličkovat pouze lopatky. U přípravku pro lopatkové kolo se bude sledovat vliv distančních podložek, které určují velikost prostoru kolem lopatek.



Obr. 6.2: Ložiskové kuličky [65]



Obr. 6.3: Přípravek

6.3 Příprava

Máme k dispozici tři kusy lopatkových kol kompresoru druhého stupně z titanové slitiny Ti-6Al-4V. Kola č.1 a č.2 byla v ostrém provozu. Vyřazeny byly kvůli mechanickému poškození s vlivem na funkčnost. Kolo č.3 je zmetek, a proto nikdy nebylo v provozu. Experimentální zjišťování nejlepších kombinací podmínek pro kuličkování lopatkového se bude zjišťovat na kolech č.1 a č.3. Zjištěné poznatky se poté aplikují na kolo č.2.

Na vyzkoušení vlivu kuliček jsou k dispozici nerezové kalené kuličky o průměru 4,762 mm, 3 mm a 2 mm a karbidové kuličky o průměru 4,762 mm. K přípravku jsou dány distanční podložky o různých tloušťkách. Kuličkování proběhne na experimentálním vibračním stroji. Přípravek je uložen do stroje přes závitovou tyč a zajištěn maticí proti uvolnění.

Experimentální vibrační stroj je vyroben pro kuličkování dvou kusů zároveň. Z důvodu působení setrvačných sil je hmotnost kuličkovaných součástí omezena na celkovou hmotnost 17 kg. Hmotnost přípravku s kuličkami a s lopatkovým kolem je 8,7 kg. Nelze tedy současně kuličkovat dvě lopatková kola. Jako protikus se tedy použilo závaží o hmotnosti 7,6 kg.

Aby byla možnost posoudit míru pokrytí kuličkování, je třeba lopatky nabarvit. Před samotným nabarvením je důležité lopatkové kolo umýt a odmastit. Toho se nejnáze dosáhne pomocí ultrazvukové čističky. Na nabarvení se použije matná bílá akrylová barva. U matné bílé barvy bude dobře vidět díky zašpinění i místa, kam se kuličky dostaly, ale už neměly dostatečnou hybnost na otryskání barvy. U každého kola se izolační páskou zamaskuje několik lopatek, aby bylo vhodné srovnání před a po kuličkování.



Obr. 6.5: Nabarvené a zamaskované lopatky



Obr. 6.4: Nabarvené a zamaskované lopatky

Na konci se kolo č.3 odbarví použitím acetylenu, ultrazvukové čističky a kartáče. Jelikož toto kolo nikdy nebylo v provozu, dá se na něm orientačně změřit drsnost povrchu po výrobě a porovnat ji s drsností po kuličkování.

6.4 Postup kuličkování

Nejprve se začalo kolem č. 1. U kola se zamaskovaly lopatky 8 až 15. Kolo se uložilo do spodní části přípravku a z každé strany bylo umístěno mezi dvě distanční podložky. Každá podložka měla shodně výšku 11,5 mm. Do volného prostoru mezi lopatky se nasypaly kuličky. Použila se kombinace ocelových kalených kuliček o průměru 4,762 mm a 3 mm. Obou druhů kuliček bylo 20 ml. Poté se přiložila horní polovina přípravku a za pomoci matic se stáhla se spodní polovinou. Celý přípravek se umístil do vibračního stroje. Stroj se nastavil na tyto parametry:

- rozkmit 82 % (z rozsahu stroje)
- amplituda 5 mm
- frekvence 27,8 Hz



Obr. 6.6: Přípravek s lopatkovým kolem

Přípravek s kolem se nejprve umístil tak, aby náběžná hrana směřovala dolů. Po půl hodině se stupeň pokrytí lopatkového kola zkontroloval a umístil se do vibračního stroje na další půl hodinu. Po následné kontrole se rozsah pokrytí vyhodnotil jako dostatečný. Rozdíl mezi půl hodinou a hodinou se určil vizuálně a činí zhruba 10 až 15 %. Poté se přípravek s kolem umístil tak, aby směřovala dolů odtoková hrana. Opět po půl hodině proběhla vizuální kontrola a pokračovalo se další půl hodinu, odtokovou hranou stále dolů. Následně se celé kolo vyjímulo z přípravku a vyhodnotil se výsledný stav. Barva zůstala na tenkém proužku odtokové hrany, dále u části spoje lopatek s průměrem kola a na náběžné hraně. U lopatek sousedících se zamaskovanými lopatkami zůstalo více barvy. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že izolační páska tlumí nárazy kuliček a ty v tomto okolí mají výrazně menší hybnost. K tomu by u kuličkování naostro díky absenci zamaskování dojít nemělo.



Obr. 6.8: Kuličkováná náběžná hrana kola č.1

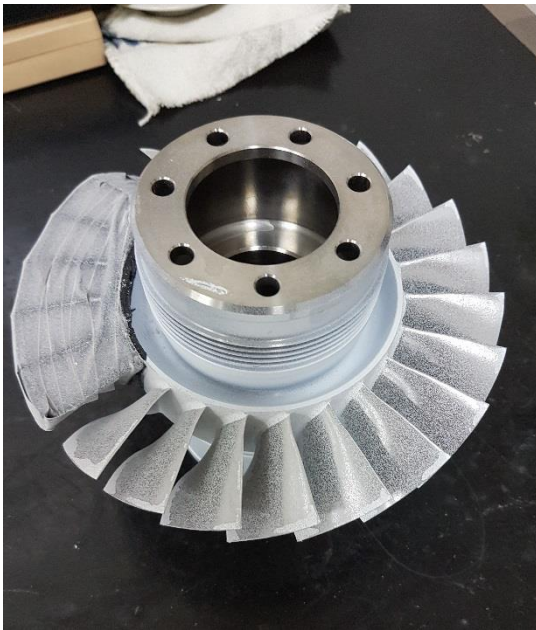


Obr. 6.7: Kuličkováná odtoková hrana kola č.1

Jako další se pro kuličkování použilo kolo č.3. U tohoto kola se zamaskovaly lopatky 3 až 8. Použily se stejné kuličky jako v předchozím případě, tedy 20 ml o průměru 4,762 mm a 20 ml o průměru 3 mm, obojí ocelové kalené. Nastavení stroje zůstalo na stejných parametrech:

- rozkmit 82 % (z rozsahu stroje)
- amplituda 5 mm
- frekvence 27,8 Hz

K náběžné straně se přidala další distanční podložka o výšce 7 mm. U odtokové strany zůstala jedna podložka o výšce 11,5 mm. Přípravek s kolem a kuličkami se zavřel, zajistil se maticí a umístil se do vibračního stroje. Začalo se opět náběžnou hranou dolů. Po jedné hodině se přípravek vyjmul a zkontroloval. Použitím přidavné distanční podložky se výsledek zlepšil. Došlo k lepšímu pokrytí kuličkované plochy lopatek na náběžné hraně. V porovnání s kuličkováním kola č.1 však zůstalo trochu barvy po obvodových hranách lopatek. Následovalo kuličkování, kdy odtoková hrana směřovala dolů. U náběžné hrany se nechala jedna distanční podložka vysoká 11,5 mm a u odtokové hrany se přidala podložka vysoká 7 mm, tudíž celková výška podložek u odtokové hrany činila 18,5 mm. Po hodině kuličkování se přípravek s kolem vyjmul. Tentokrát se použitím distanční podložky navíc rozsah pokrytím oproti kolu č.1 nezlepšil.



Obr.6.10: Kuličkováná náběžná hrana kola č.3



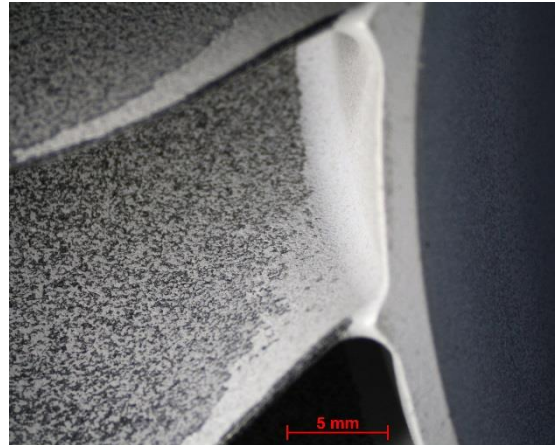
Obr. 6.9: Kuličkováná odtoková hrana kola č.3

Z důvodu lepší dostupnosti kuliček do části, kde lopatky přechází přes rádius na tělo kola, se zkusilo použít jinou velikost kuliček. Větší kuličky s průměrem 4,762 mm zůstaly, místo 20 ml kuliček o průměru 3 mm se ale použilo 20 ml kuliček o průměru 2 mm. Tento poloměr kuličky je viditelně menší než poloměr zaoblené hrany mezi lopatkou a tělesem kola. Do přípravku se vložilo kolo č.1.

Sestava kola a přípravku se připevnila do vibračního stroje náběžnou hranou dolů a nechala se půl hodiny kuličkovat. Po odejmutí sestavy ze stroje se zhodnotil výsledek kuličkování. Nedošlo k žádné změně, oproti použití kuliček o průměru 3 mm, tzn., že průměr 3 mm je dostatečně malý, jelikož čím menší se použijí kuličky, tím menší mají schopnost kuličkovat povrch i přes to, že by se měli dostat do menších míst.



Obr. 6.12: Přechod mezi lopatkami a tělem kola



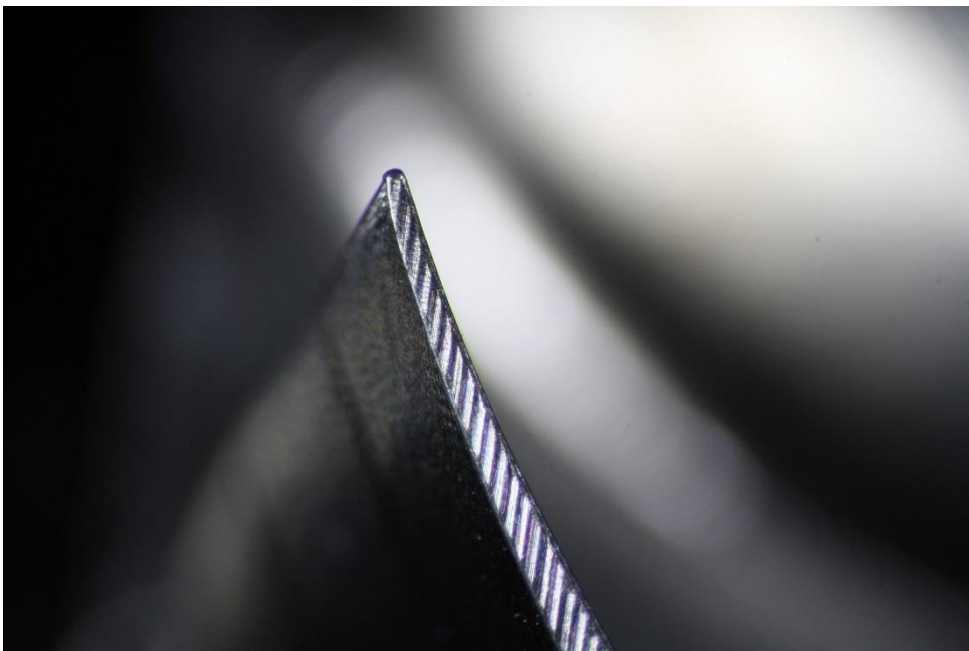
Obr. 6.11: Detail rádiusu

U kola č.3 se odmaskovaly čtyři lopatky, konkrétně lopatky 5–8. Vyzkoušelo se použití karbidových kuliček. Karbidové kuličky nahradily kalené ocelové kuličky o průměru 4,762 mm, malé kuličky zůstaly kalené ocelové o průměru 3 mm. Do přípravku se vložilo kolo, na náběžnou hranu se dala dvojice distančních podložek o tloušťce 18,5 mm a na odtokovou hranu se použila jen jedna podložka tlustá 11,5 mm. Prostor mezi lopatkami se vyplnil 40 ml směsí kuliček a celý přípravek se připravil do stroje na kuličkování. Kuličkování trvalo jednu hodinu z náběžné hrany a jednu hodinu z odtokové hrany. Po výsledné kontrole se zjistily dvě věci. Na stupeň pokrytí neměla volba materiálu kuliček žádný vliv. Karbidové kuličky však měly větší energii. Šlo to poznat hlavně na vnitřní straně přípravku. Přípravek je z nerezové oceli 1.4301 a má menší tvrdost než lopatky kola kompresoru. Zatímco na vnitřní straně kuličkování ocelovými kuličkami nezanechalo výraznější stopy, u kuličkování karbidovými kuličkami se znatelně změnil povrch. Povrch lopatek lopatkového kola se na první pohled nelišil. Pod mikroskopem bylo ale vidět, že vlivem kuličkování karbidovými kuličkami

došlo k zaoblení náběžné hrany, k čemuž při použití ocelovým kuličkami nedošlo. Je třeba posoudit, nakolik má toto zaoblení vliv na funkčnost kola v ostrém provozu.



Obr.6.15: Detail frézované náběžné hrany



Obr. 6.16: Detail kuličkované náběžné hrany

S výše získanými souvislostmi aplikujeme vhodné podmínky na kuličkování nenabarveného kola č.2. Je třeba to udělat z několika důvodů. Barva mohla tlumit dopad kuliček a zamaskované lopatky ovlivnily kuličkování lopatek v nejbližším okolí. Pouze tak bude možnost změřit, jak se kuličkováním změní drsnost povrchu. Kuličkovat se bude

jednu hodinu z každé strany. Použije se směs kuliček skládající se z 20 ml karbidových kuliček o průměru 4,762 mm a z 20 ml ocelových kalených kuliček o průměru 3 mm. Na odtokovou stranu kola se umístí jeden distanční kroužek o výšce 11,5 mm a na náběžnou stranu kola se umístí dva distanční kroužky o celkové výšce 18,5 mm. Nastavení vibračního stroje zůstane nezměněné, tedy s hodnotami:

- rozkmit 82 % (z rozsahu stroje)
- amplituda 5 mm
- frekvence 27,8 Hz



Obr. 6.17: Lopatkové kolo č.2 před kuličkováním

Po dokončení kuličkování se na kole č.3 odmaskují zamaskované lopatky. Pomocí acetylenu a kartáče se odstraní zbytek barvy na kuličkovaných i nekuličkovaných lopatkách. Jedná se o jediné kolo z těchto tří, které nebylo v provozu. Lopatky 3 a 4, které nebyly kuličkovány poslouží pro porovnání drsnosti. Tyto lopatky mají stejnou drsnost po frézování, jako mají lopatky lopatkového kola z výroby. Změřením na ručním drsnoměru se zjistila drsnost frézovaných lopatek, jejíž hodnota je $Ra = 0,95 \mu m$. Poté se změřila drsnost lopatek na kole č.2 kuličkovaných směsí karbidových a ocelových kuliček. Hodnota této změřené drsnosti je $Ra = 0,65 \mu m$. Snížení drsnosti je v tomto případě vedlejším produktem kuličkování.



Obr. 6.18: Lopatky kola č.2 po kuličkování

6.5 Kontrola otlučení náběžných hran

Pro zjištění vlivu vibračního kuličkování na náběžnou hranu lopatky se změří poloměr zaoblení a porovná se poloměrem zaoblení frézovaného kola z výroby. Zvětšení zaoblení hrany je nežádoucí, jelikož se snižuje účinnost kompresoru. Měřilo se mikroskopem Olympus DSX110 na lopatkovém kole axiálního kompresoru prvního stupně dvěma metodami, přímou a nepřímou.



Obrázek 6.20: Lopatkové kolo 1. stupně



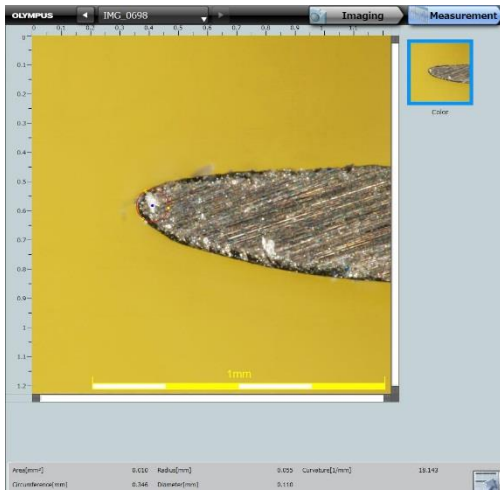
Obrázek 6.19: Mikroskop Olympus DSX110 [66]

6.5.1 Přímá metoda

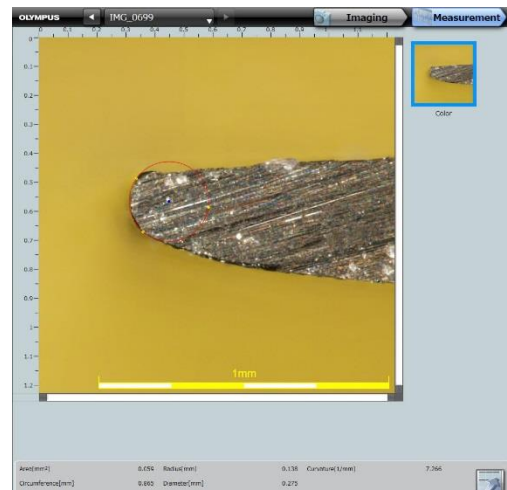
Pro měření se použily čtyři různé stavy povrchu lopatek:

- frézovaný stav (F)
- frézovaný + kuličkovaný stav (F+K)
- frézovaný + superfinišovaný stav (F+SF)
- frézovaný + kuličkovaný + superfinišovaný stav (F+K+SF)

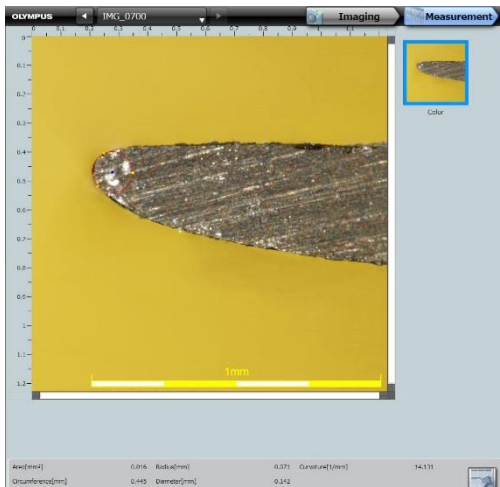
Vždy se měřil stav náběžné hrany ve dvou průřezech. První průřez je vzdálen 13 mm od konce lopatky a druhý ve vzdálenosti 36 mm. Průřez se získal příčným rozřezáním lopatky, celkem tedy bylo třeba dvě lopatky pro každý druh operace.



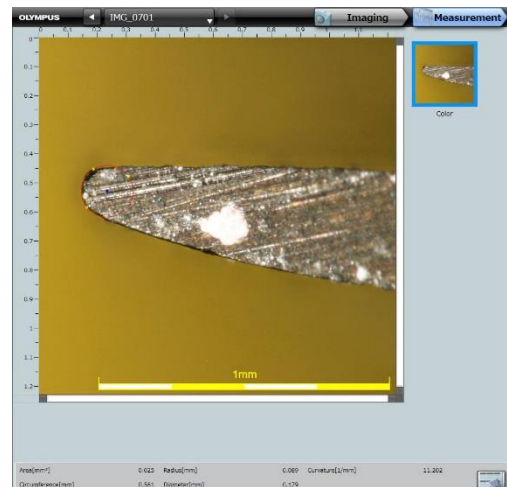
Obrázek 6.21: Náběžná hrana ve stavu F



Obrázek 6.22: Náběžná hrana ve stavu F+K



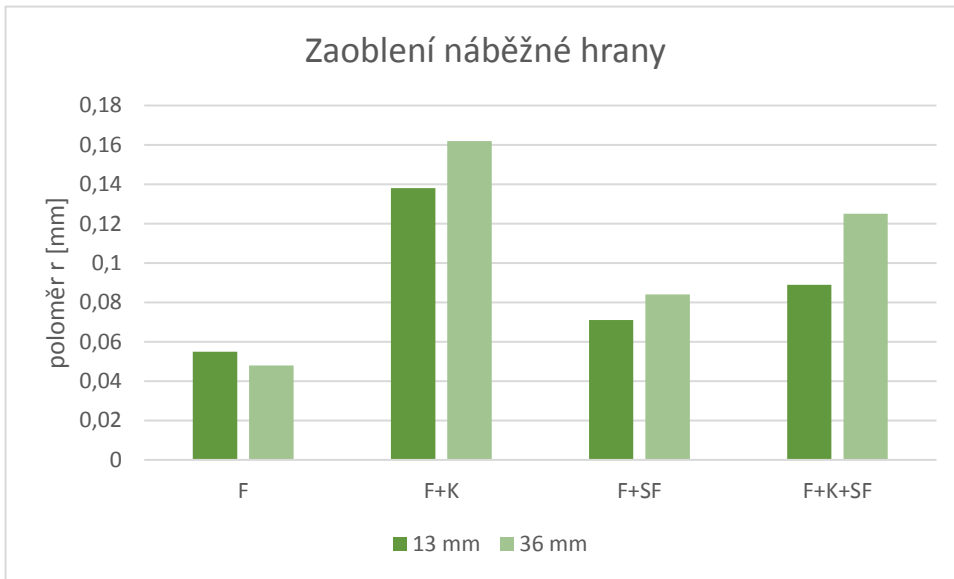
Obrázek 6.24: Náběžná hrana ve stavu F+SF



Obrázek 6.23: Náběžná hrana ve stavu F+K+SF

Tabulka 6.1: Poloměr náběžné hrany změřený přímo

		vzdálenost řezu od okraje lopatky	
		13 mm	36 mm
použitá úprava lopatek	F	0,055	0,048
	F+K	0,138	0,162
	F+SF	0,071	0,084
	F+K+SF	0,089	0,125



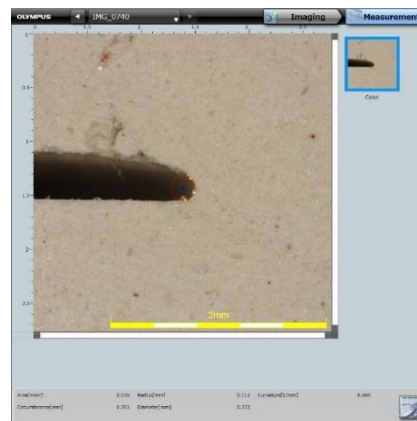
Obrázek 6.25: Graf závislosti mezi poloměrem zaoblení a metodou dokončování

6.5.2 Nepřímá metoda

Použila se modelovací hmota, do které se otiskly náběžné hrany lopatek. Modelovací hmota se vytvrdila a následně se udělal výbrus, aby se mohl změřit poloměr zaoblení na mikroskopu.



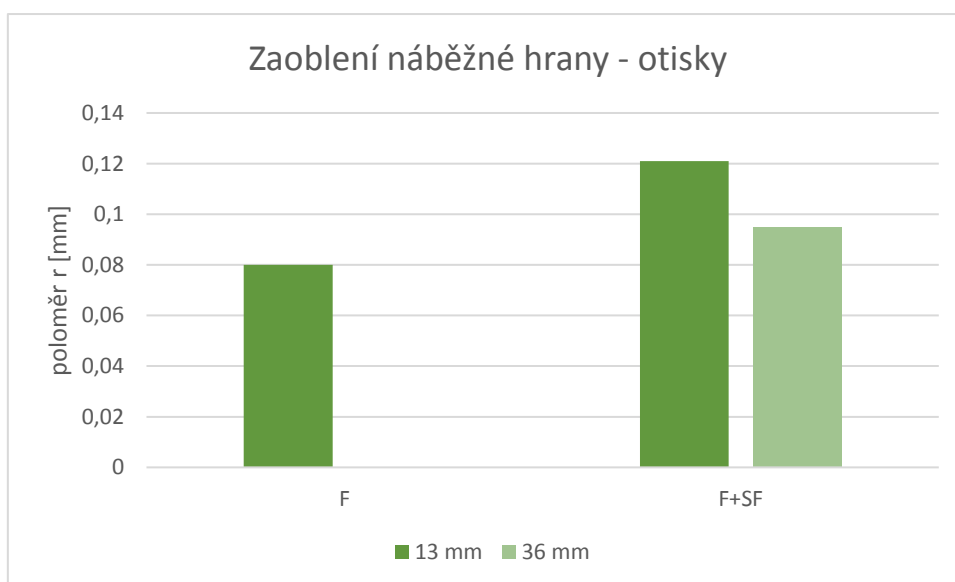
Obrázek 6.26: Příprava otisků pro měření



Obrázek 6.27: Otisk náběžné hrany v modelovací hmotě

Tabulka 6.2: Poloměr zaoblení náběžné hrany změřený nepřímou

lopatka č.	stav	Vzdálenost řezu od okraje lopatky	
		13 mm	36 mm
1	frézovaná	0,08	-
4	frézovaná + superfinišovaná	-	0,094
5	frézovaná + superfinišovaná	0,112	0,127
6	frézovaná + superfinišovaná	0,129	-
10	frézovaná + superfinišovaná	-	0,076
11	frézovaná + superfinišovaná	-	0,085
12	frézovaná + superfinišovaná	-	0,094
průměrná hodnota F + SF lopatek		0,121	0,095



Obrázek 6.28: Graf závislosti mezi poloměrem zaoblení a metodou dokončování

Srovnání

Přímá metoda je jednoznačně přesnější. Její velkou nevýhodou však je, že je destruktivní, jelikož pro měření je třeba součást rozřezat. U nepřímé metody jsou změřeny pouze poloměry náběžných hran pro lopatky frézované + superfinišované a pro lopatku frézovanou ve vzdálenosti 13 mm od okraje. Většina otisků totiž bohužel popraskala při vytvrzování a nešlo z nich naměřit relevantní výsledky.

7 Závěr

Teoretická část práce je bez úvodu rozdělena na čtyři kapitoly. První obsahuje informace o titanových slitinách, jejich vlastnostech a porovnává mechanické vlastností s korozivzdornou ocelí. Druhá kapitola se zabývá samotným procesem zpevňování, na což navazuje kapitola o jednotlivých metodách zpevňování, kterým je v teoretické části věnována největší pozornost. Teoretická část je ukončena způsoby hodnocení integrity povrchu a jejich základním rozdělením.

Praktická část zkoumá vibrační kuličkování axiálního kompresoru leteckého motoru. Vibrační kuličkování je samo o sobě jednoduchý proces. Není třeba žádných kvalifikovaných zaměstnanců. Je výhodné i co se týče ekonomické stránky. Během kuličkování dochází pouze k opotřeбенí kuliček. Výsledkem kuličkování je:

- vznik tlakových zbytkových napětí – lokálně při povrchu, dochází ke zvýšení únavové pevnosti
- snížení drsnosti – v našem případě došlo ke snížení drsnosti z $Ra = 0,95 \mu m$ na $Ra = 0,65 \mu m$, tj. o 31,6 %.
- zaoblení náběžné hrany – vlivem kuličkování došlo ke zvětšení rádiusu na cca trojnásobek původní hodnoty, což má negativní vliv na funkčnost. Řešením je použít poté ještě jednu dokončovací operaci, která rádius zmenší, použít jiný druh kuliček, nebo snížit výšku distanční podložky, aby náběžná hrana nedostávala tolik přímých rázů.

Během kuličkování lopatek lopatkového kola axiálního kompresoru se změnou různých parametrů jsem došel k těmto poznatkům:

- doba kuličkování – s rostoucí dobou kuličkování roste i míra pokrytí kuličkované plochy. Od určité doby kuličkování však platí, že pokrytí se již nezvětšuje anebo jen velmi málo. V tomto případě je plně dostačující doba kuličkování dvě hodiny, tedy jednu hodinu z každé strany.

- tloušťka distanční podložky – distanční podložka určuje velikost prostoru mezi lopatkami. Dále zamezuje přístupu kuličkám mimo tuto oblast. Zjistil jsem, že k nejlepšímu pokrytí na náběžné hraně dojde při tloušťce 18,5 mm. Oproti původní tloušťce, která je 11,5 mm, dojde k lepšímu pokrytí kuličkováného povrchu. U odtokové hrany naopak ke zlepšení pokrytí se zvýšením tloušťky nedojde. Pro dostatečné pokrytí stačí tloušťka 11,5 mm.
- materiál kuliček – porovnal jsem použití ocelových kalených a karbidových kuliček. Karbidové kuličky mají větší vliv na kuličkování. Dojde během něho k většímu zpevnění lopatek. Oproti ocelovým kuličkám však při kuličkování dojde k zaoblení náběžné hrany lopatek. Nevýhodou karbidových kuliček oproti ocelovým je jejich cena, která je několikanásobně vyšší.
- velikost kuliček – osvědčila se kombinace dvou různých průměrů kuliček. Větších o průměru 4,762 mm a menších o průměru 3 mm. Větší kuličky zajistí dostatečné kuličkování díky vyšší hybnosti, menší se zase lépe dostanou do prostoru mezi lopatky.
- počet kuliček – větší počet kuliček rychleji nakuličkuje určitou plochu, pokud jich však bude příliš, budou se obtížněji pohybovat v prostoru mezi lopatkami a nezískají potřebnou hybnost. V tomto případě jsem použil kuličky o celkovém objemu 40 ml.

Pro zvýšení celé efektivity kuličkování lopatkových kol ve vibračním stroji by bylo vhodné kuličkovat zároveň dvě kola. Kuličkování dvou kol zároveň je ale limitováno příliš vysokou hmotností přípravků, které překračují maximální přípustnou hmotnost vibračního stroje. Stačilo by zmenšit váhu přípravků, např. vhodným ztenčením stěn. Dále by ušetřilo čas vytvořit lepší mechanismus upínání přípravků do stroje. Není zanedbatelný ani čas, kdy se musí přípravek otáčet. Místo toho, že je nutné stroj pokaždé vypnout, přípravek vyjmout, otočit, zase upevnit a zapnout stroj by se vyplatilo, aby po uplynutí doby kuličkování z jedné strany došlo k samotnému přetočení a pokračování

v kuličkování. Levnější možností by bylo zajistit ruční otáčení přípravku přímo ve stroji přes kloubový mechanismus s tím, že by se před tím stroj vypnul.

8 Použitá literatura

- [1] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 0-87170-686-5.
- [2] WEI SHA AND SAVKO MALINOV. *Titanium alloys: modelling of microstructure, properties and applications*. Boca Raton: CRC, 2009. ISBN 9781845693756.
- [3] WANYING, Liu, Lin YUANHUA, Chen YUHAI, Shi TAIHE a Ambrish SINGH. Effect of Different Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V Titanium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering* [online]. 2017, **46**(3), 634-639 [cit. 2018-07-05]. DOI: 10.1016/S1875-5372(17)30109-1. ISSN 18755372. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875537217301091>
- [4] Grade 5 Ti-6Al-4V Alloy (UNS R56200). *AZOM* [online]. Manchester: AZoM, 2013 [cit. 2018-07-05]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9299>
- [5] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [6] Nerezová ocel. *MATEZEX* [online]. Hradec Králové [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://www.matezex.cz/prevodni-tabulky.html>
- [7] 17022. *XLMETAL* [online]. Praha, c2014 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.xlmetal.cz/materialy/nerezova-ocel/csn/17-022.html>
- [8] X20Cr13 (1.4021). *European Steel and Alloy Grades/Numbers* [online]. c2011-2018 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=81
- [9] X20Cr13. *Bolzano* [online]. Kladno, c2018 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x20cr13-martenziticke>
- [10] Titanium Alloys - Ti6Al4V Grade 5. *AZOM* [online]. Manchester, 2013 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547>
- [11] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [12] WAGNER, Lothar, Mansour MHAEDE, Manfred WOLLMANN, Igor ALTENBERGER a Yuji SANO. Surface layer properties and fatigue behavior in Al 7075-T73 and Ti-6Al-4V. *International Journal of Structural Integrity* [online]. 2011, **2**(2), 185-199 [cit. 2018-07-15]. DOI: 10.1108/17579861111135923. ISSN 1757-9864. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/17579861111135923>
- [13] SCHULZE, Volker a J.K. Schwing]. [TRANSLATION. *Modern Mechanical Surface Treatment States, Stability, Effects*. [Online-Ausg.]. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN 9783527607167.

- [14] TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, c2002. ISBN 9780871707291.
- [15] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01507-6.
- [16] LAINÉ, Steven J., Kevin M. KNOWLES, Phillip J. DOORBAR, Richard D. CUTTS a David RUGG. Microstructural characterisation of metallic shot peened and laser shock peened Ti–6Al–4V. *Acta Materialia* [online]. 2017, **123**, 350-361 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.10.044. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645416308114>
- [17] LIU, Kevin K. a Michael R. HILL. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti–6Al–4V coupons. *Tribology International* [online]. 2009, **42**(9), 1250-1262 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.005. ISSN 0301679X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X0900084X>
- [18] GALLITELLI, Donato, Vincent BOYER, Maxime GELINEAU, et al. Simulation of shot peening: From process parameters to residual stress fields in a structure. *Comptes Rendus Mécanique* [online]. 2016, **344**(4-5), 355-374 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.006. ISSN 16310721. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631072116000279>
- [19] MITRA, Saptarshree. *Finite element surface analysis of cosmetic finishing applications – Shot Peening* [online]. Paris, 2016 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308606997_Finite_element_surface_analysis_of_cosmetic_finishing_applications_-_Shot_Peening?_sg=DGSyhdhTqgqPZqAvUOGFT2fO1OmN72clk64RChtc3r0k_SylgYB7vVOEXJe2eSq62cZZPZE-6Q. Diplomová práce. Arts et Métiers ParisTech. Vedoucí práce Prof. Sebastien Comas Cardona.
- [20] HAMMERSLEY, Graham, Lloyd A. HACKEL a Fritz HARRIS. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. 2000, **34**(4-6), 327-337 [cit. 2018-07-14]. DOI: 10.1016/S0143-8166(00)00083-X. ISSN 01438166. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014381660000083X>
- [21] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [22] OKADA, Masato, Masayoshi SHINYA, Hiromu MATSUBARA, Hiroaki KOZUKA, Hiroshi TACHIYA, Naoki ASAKAWA a Masaaki OTSU. Development and characterization of diamond tip burnishing with a rotary tool. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2017, **244**, 106-115 [cit. 2018-07-19]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.020. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013617300201>
- [23] Diamond Burnishing Tools. *Mollart* [online]. Mollart Engineering, c2018 [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <https://mollart.com/tooling/diamond-burnishing-tools>
- [24] HAVELKA, Tomáš. Obrábění válečkováním. *MM spektrum* [online]. c2018, 2004 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-valeckovanim.html>

- [25] HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění 3. část* [online]. 2005. [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf
- [26] MUÑOZ-CUBILLOS, J., J.J. CORONADO a S.A. RODRÍGUEZ. Deep rolling effect on fatigue behavior of austenitic stainless steels. *International Journal of Fatigue* [online]. 2017, **95**, 120-131 [cit. 2018-07-23]. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.10.008. ISSN 01421123. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142112316303206>
- [27] Protlačování (kalibrovaní). *ELUC* [online]. Ostrava: Railsformers, c2014 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1392>
- [28] BADREDDINE, Jawad, Emmanuelle ROUHAUD, Matthieu MICOULAUT a Sebastien REMY. Simulation of shot dynamics for ultrasonic shot peening: Effects of process parameters. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2014, **82**, 179-190 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.03.006. ISSN 00207403. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020740314000824>
- [29] ZHU, Lihua, Yanjin GUAN, Jun LIN, Jiqiang ZHAI a Zhendong XIE. A nanocrystalline-amorphous mixed layer obtained by ultrasonic shot peening on pure titanium at room temperature. *Ultrasonics Sonochemistry* [online]. 2018, **47**, 68-74 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.04.017. ISSN 13504177. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1350417718306503>
- [30] TRICOIRE, Juliette. Ultrasonic Shot Peening: From Portable Systems to robotic Production Lines. *The Shot Peener*. Electronics, 2016, **2016**(2), 12-14. ISSN 1069-2010.
- [31] RAKITA, Milan, Meng WANG, Qingyou HAN, Yanxiong LIU a Fei YIN. Ultrasonic shot peening. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* [online]. 2013, **5**(3), 189- [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1504/IJCMSSE.2013.056948. ISSN 1753-3465. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=56948>
- [32] *C.I.M.A. kompletní řešení pro omílání*. Olomouc, 2012. Dostupné také z: http://www.cimaceramiche.it/upload/CIMA_Czech.pdf
- [33] ŘASA, Jaroslav a Vladimír GABRIEL. *Strojírenská technologie 3*. Praha: Scientia, 2000. ISBN 80-7183-207-3.
- [34] ZHANG, X.C., Y.K. ZHANG, J.Z. LU, F.Z. XUAN, Z.D. WANG a S.T. TU. Improvement of fatigue life of Ti–6Al–4V alloy by laser shock peening. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2010, **527**(15), 3411-3415 [cit. 2018-07-13]. DOI: 10.1016/j.msea.2010.01.076. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509310001085>
- [35] CLAUER, Allan. *Laser shock peening for fatigue resistance* [online]. Dublin, 1996 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: <https://www.lsptechnologies.com/wp-content/uploads/2008/05/pub10141.pdf>
- [36] PRABHAKARAN, S. a S. KALAINATHAN. Warm laser shock peening without coating induced phase transformations and pinning effect on fatigue life of low-alloy steel. *Materials & Design* [online]. 2016, **107**, 98-107 [cit. 2018-07-13]. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.06.026. ISSN 02641275. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516307778>
- [37] *LSP Technologies, Inc.* [online]. Dublin, c2018 [cit. 2018-07-13]. Dostupné z: www.lsptechnologies.com

- [38] HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie I*. Praha: SNTL, 1984. ISBN 04-225-84.
- [39] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [40] Zkoušky tvrdosti. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrdosti.pdf
- [41] Měření zbytkových napětí. *Termomechanika technologických procesů* [online]. Plzeň, c2000-2018 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/odvrtavaci-metoda>
- [42] ČEP, Robert. Zbytková povrchová napětí po obrábění. *HomeL* [online]. Ostrava, c2015-2018 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf
- [43] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika* [online]. Brno, 2003 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [44] VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA a Otakar WEINBERG. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkových napětí. In: *Defektoskopie* [online]. Brno, 2012, 2012, s. 8 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/271_p.pdf
- [45] POSPÍCHAL, Jaroslav. *Technické kreslení*. 4., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05595-3.
- [46] ŠŇUPÁREK, Petr a Martin MAREK. Drsnost povrchu. *Katedra elektroenergetiky* [online]. Ostrava, c2015-2018 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/td/01-textyVSB/005_Drsnost%20povrchu.pdf
- [47] PETR, Karel. *ISO GPS - Tolerování textury povrchu* [online]. In: . c2017, s. 22 [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: https://studium.fs.cvut.cz/studium/u12113/SK2/04P_ISO_GPS_Tolerovani_textury_povrchu.pdf
- [48] Kontrola drsnosti povrchu. *ELUC* [online]. Ostrava: Railsformers, c2014 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1102>
- [49] *Mitutoyo* [online]. Teplíce [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: http://www.mitutoyo.cz/cs_cz/
- [50] *OptiXs* [online]. Praha: greendot, c2018 [cit. 2018-07-22]. Dostupné z: <http://www.optixs.cz>
- [51] *Gamin*. Ostrava. Dostupné také z: https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/Elcometer_7062_01.pdf
- [52] BALDUR, viking helmet. In: *Replica weapons* [online]. [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://globalreplicas.com/en/kuty-i-hartowany-helm-wikingow-okularowy-baldur-hvi48.html>
- [53] DROZD, Zdeněk. *Superlehké slitiny hořčíku* [online]. In: . s. 29 [cit. 2018-07-25].
- [54] What is Shot Peening?. In: *National Peening* [online]. c2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://nationalpeening.com/what-is-shot-peening/>
- [55] *Cogsdill* [online]. Camden, c2017 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: www.cogsdill.com/
- [56] *Monaghan Tooling Group* [online]. Dayton, c2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: www.monaghantooling.com/
- [57] *Ecoroll* [online]. [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <http://www.ecoroll.de>

- [58] *Vacuum Furnace Engineering* [online]. VAC AERO, c2016 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: www.vacaero.com
- [59] CHAISE, Thibaut, Jun LI, Daniel NÉLIAS, Régis KUBLER, Said TAHERI, Gérard DOUCHET, Vincent ROBIN a Philippe GILLES. Modelling of multiple impacts for the prediction of distortions and residual stresses induced by ultrasonic shot peening (USP). *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2012, **212**(10), 2080-2090 [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.05.005. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612001513>
- [60] Choc Laser. *CWST Français* [online]. Curtiss-Wright Corporation, c2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://www.cwst.fr/nos-prestations/choc-laser/>
- [61] *Měřicí přístroje Proinex* [online]. Ostrava, c2017 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: www.proinex.cz
- [62] Vzorkovnice drsnosti povrchů. *Použité stroje, bazat nástrojů, náradí a příslušenství* [online]. MEDIA ENERGY, c2018 [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.nastrojenaradi.cz/vzorkovnice-drsnosti-povrchu-vp-1-4>
- [63] KAPLONEK, Wojciech a Czeslaw LUKIANOWICZ. Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements. PADRON, Ivan, ed. *Recent Interferometry Applications in Topography and Astronomy* [online]. InTech, 2012, 2012-03-21 [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.5772/35059. ISBN 978-953-51-0404-9. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/recent-interferometry-applications-in-topography-and-astronomy/coherence-correlation-interferometry-in-surface-topography-measurements>
- [64] Nexview™. *AMETEK Germany* [online]. Weiterstadt [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://zygo.de/?/en/met/profilers/nexview/>
- [65] Kuličky, válečky. *MIDOL* [online]. Brno [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <http://www.midol.cz/kulicky-valecky>
- [66] *Olympus* [online]. Tokyo [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: www.olympus-ims.com
- [67] BOOTHROYD, Peter. a Xuân Nam. PHAM. *Socioeconomic renovation in Viet Nam: the origin, evolution, and impact of doi moi*. Singapore: Institute of Southeast Asian Studies, 2000.
- [68] KONDI MALIWEMU, Erich Umbu, Viktor MALAU a Priyo Tri ISWANTO. Effect of Shot Peening in Different Shot Distance and Shot Angle on Surface Morphology, Surface Roughness and Surface Hardness of 316L Biomaterial. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, **299**, 012051- [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1088/1757-899X/299/1/012051. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1757-899X/299/i=1/a=012051?key=crossref.9657c0eeb95001bfaca3b2585741073f>
- [69] KORZYNSKI, M., A. PACANA a J. CWANEK. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2009, **203**(12), 1670-1676 [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.12.022. ISSN 02578972. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S025789720801102X>
- [70] Zkoušky vlastností technických materiálů. In: *SŠ-COPT Kroměříž* [online]. Kroměříž [cit. 2018-07-25]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=14603&revision=-1&instance=2>