

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**



**Diplomová práce**

**Obrábění materiálů součástek letecké výroby**

**Bc. Březina Martin**

**Praha 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Březina** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **381579**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Obrábění materiálů součástek letecké výroby**

Název diplomové práce anglicky:

**Finishing components of aircraft production**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky
2. Integrita povrchu a její ovlivnění
3. Návrh zařízení pro dokončování vybraných dílů letecké výroby
4. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Vítězslav Rázek CSc., ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**


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

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.07.2017**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce


  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25. 4. 2017  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci na vybrané téma Obrábění materiálů součástek letecké výroby jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vítězslava Rázka, CSc. a Ing. Zdeňka Pitrmuce. Veškerou použitou literaturu a další prameny jsem řádně označil a uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne 30. června 2017

.....

Bc. Březina Martin

## ANOTAČNÍ KARTA

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní  
Ústav: 12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie  
Vedoucí ústavu: Ing. Libor Beránek, Ph.D.  
Téma diplomové práce: Obrábění materiálů součástek letecké výroby  
Akademický rok: 2016 / 2017  
Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství  
Autor: Bc. Březina Martin  
Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.  
Oponent: doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.

Klíčová slova: Integrita povrchu, Vibrační kuličkování, Blisk 1°, Ti-6Al-4V, Návrh přípravku

Abstrakt: Diplomová práce je zaměřena na kvalitu povrchové vrstvy po obrábění. Detailněji je zde zpracováno beztržiskové obrábění se zaměřením na vibrační kuličkování. Dále se tato práce zabývá integritou povrchu se zaměřením na zbytková napětí. Podrobně je zde popsána nejpoužívanější slitina titanu v letecké výrobě Ti-6AL-4V. Předmětem experimentální části je návrh přípravku na vibrační kuličkování blisku 1°, vyzkoušení jeho funkčnosti při praktických testech a odladění vhodných parametrů pro celý proces vibračního kuličkování. V poslední části se práce zabývá měřením deformací lopatek po kuličkování a také změnou drsnosti lopatek.

### Rozsah práce

Počet stran: 95  
Počet obrázků: 75  
Počet tabulek: 17  
Počet příloh: 13

## ANNOTATION CARD

University:	Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12 134 Department of machining, process planning and metrology
Head of the department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Diploma Thesis topic:	Finishing components of aircraft production
Academic year:	2016 / 2017
Branch of study:	Production and Materials Engineering
Author:	Bc. Březina Martin
Supervisor:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Opponent:	doc. Ing. Jindřich Kafka, CSc.
Keywords:	Surface integrity, Vibratory shot peening , Blisk 1°, Ti-6Al-4V, design of jig
Abstracts:	The thesis is focused on the surface layer quality after machining processes. The chipless machining process concerning vibratory shot peening is elaborated in more detail here. The following part deals with the surface integrity focusing on the residual stresses. Thoroughly described is the most used titanium alloy in aircraft production - Ti-6Al-4V. The experimental part consists of a design of a jig for the vibratory shot peening blisk 1°, testing its functionality in practical tests, and tuning appropriate parameters for the whole process of vibratory shot peening. The last part provides the measuring the deformation of blades after the shot peening and also the change of a blade surface roughness.
<u>Scope of work:</u>	
Number of pages:	95
Number of Picture:	75
Number of tables:	17
Number enclosures:	13

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky k vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho čas, ochotu a pomoc při práci na praktické části diplomové práce. Můj vděk patří také mé rodině, jež mě po celou dobu studia podporovala všemi dostupnými prostředky.

# Obsah

1	Úvod .....	10
2	Rešeršní část.....	11
2.1	Materiály používané v leteckém průmyslu .....	11
2.1.1	Titan .....	11
2.1.1.1	Výroba a metalurgie titanu .....	13
2.1.1.1.1	$\alpha$ – stabilizátory.....	15
2.1.1.1.2	$\beta$ – stabilizátory.....	16
2.1.1.1.3	Slitiny titanu .....	17
2.1.1.1.4	Slitiny typu $\alpha$ .....	17
2.1.1.1.5	Slitiny typu $\beta$ .....	17
2.1.1.1.6	Dvoufázové slitiny $\alpha + \beta$ .....	18
2.1.1.2	Slitina titanu Ti-6Al-4V .....	19
2.1.1.2.1	Mikrostruktura Ti-6Al-4V .....	21
2.2	Zpevnění povrchové vrstvy .....	23
2.2.1	Třískové obrábění.....	23
2.2.2	Beztrískové obrábění.....	24
2.2.2.1	Leštění povrchu diamantem .....	24
2.2.2.2	Válečkování .....	25
2.2.2.3	Kuličkování .....	26
2.2.2.3.1	Rozložení napětí po kuličkování .....	27
2.2.2.4	Řízené tryskání – shot peening .....	28
2.2.2.5	Nástroje pro řízené kuličkování.....	30
2.2.2.6	Zařízení pro řízené kuličkování.....	31
2.2.2.6.1	Vzduchová tryskáčská zařízení .....	31
2.2.2.6.2	Metací tryskáčská zařízení.....	32
2.3	Význam zbytkových napětí.....	33
2.3.1	Metody zkoumání zbytkových napětí .....	34
2.3.1.1	Dělení podle míry narušení zkoumaného tělesa.....	34
2.3.1.2	Rozdělení podle principu měření zbytkových napětí.....	34
2.3.2	Odvrtávací metoda.....	36
2.3.3	Ultrazvukové metody.....	38
2.3.4	Magnetická metoda .....	39

2.3.5	Metoda elektrolytického odleptávání.....	39
3	Praktická část .....	40
3.1	Návrh přípravku .....	41
3.1.1	První varianta přípravku.....	42
3.1.2	Druhá varianta přípravku .....	43
3.1.2.1	Konstrukční vylepšení přípravku .....	43
3.1.2.1.1	Konstrukce „domečků“ .....	44
3.1.2.1.2	Přídavek na dodatečné obrábění a přesah dílů.....	45
3.1.2.1.3	Obecné tvarové plochy v přípravku.....	46
3.1.2.2	Hmotnost přípravku .....	48
3.2	Výroba přípravku.....	48
3.3	Zpevnění povrchu kuličkováním .....	52
3.3.1	Barvení blisku 1° .....	52
3.3.2	Volba kuliček .....	54
3.3.3	Volba distančních podložek.....	54
3.3.4	Zařízení pro vibrační kuličkování .....	55
3.4	Experiment .....	56
3.4.1	Podmínky zkoušek.....	56
3.4.2	Sestavení přípravku.....	57
3.4.3	Vibrační zpevnění – volba vhodných distancí .....	60
3.4.3.1	Distance o výšce 4 a 6 mm .....	60
3.4.3.2	Nejvhodnější distanční podložky“ .....	64
3.4.4	Určení vhodné velikosti kuliček.....	66
3.4.4.1	Kuličkování s kuličkami o průměru 3 mm .....	66
3.4.4.2	Kuličkování s kuličkami o průměru 4,77 mm .....	67
3.4.4.3	Výsledky pokrytí kuličkováním .....	69
3.4.5	Kuličkování nových dílů .....	69
3.5	Měření deformací blisku 1° .....	70
3.5.1	Měření blisku 1° kuličovavaného kuličkami o průměru 3 mm.....	71
3.5.1.1	Změna tloušťky lopatek.....	72
3.5.1.2	Deformace lopatek po kuličkování kuličkami o průměru 3 mm .....	74
3.5.1.2.1	Deformace v podélném směru .....	75
3.5.1.2.2	Deformace v příčném směru .....	76
3.5.2	Měření blisku 1° kuličkovavaného kuličkami o průměru 4,77 mm.....	77



3.5.2.1	Změna tloušťky lopatek.....	78
3.5.2.2	Deformace lopatek po kuličkování kuličkami o průměru 4,77 mm .....	80
3.5.2.2.1	<i>Deformace lopatek v podélném směru</i> .....	80
3.5.2.2.2	<i>Deformace v příčném směru</i> .....	81
3.6	Měření drsnosti povrchu.....	83
3.6.1	Popis metody měření .....	83
3.6.2	Naměřená data .....	84
3.6.3	Výsledky měření .....	85
4	Závěr.....	86
5	Zdroje .....	88
6	Seznam obrázků .....	92
7	Seznam tabulek .....	94
8	Seznam příloh.....	95

## 1 Úvod

Kvalita obrobené povrchové vrstvy představuje jednu z nejvýznamnějších problematik v současné strojírenské výrobě. Zvláště velmi významnou roli hraje kvalita povrchové vrstvy u součástí využívaných v leteckém průmyslu. Letecký průmysl klade vysoké nároky na zvyšování spolehlivosti a životnosti u dynamicky namáhaných součástí. Z těchto důvodů se na součásti leteckých celků aplikují zpevňovací technologie. Pozadu nezůstává ani společnost GE Aviation. Podle informací ze stránek Svazu českého leteckého průmyslu by chtěla společnost GE Aviation investovat do vývoje leteckých motorů až 10 miliard.

Tato diplomová práce se na začátku své teoretické části zabývá materiály používanými v leteckém průmyslu. Podrobněji je v ní popsán titan se zaměřením na slitinu titanu Ti6-Al-4V. Z této slitiny je vyrobeno lopatkové kolo, s kterým je prováděn experiment. Další část je věnována zpevnění povrchové vrstvy po obrábění. Je zde naznačeno, jak dochází k zpevnění povrchové vrstvy třískovým obráběním. Hluběji se tato práce však věnuje beztřískovému obráběním. Podrobněji je zde popsána technologie kuličkování, která je využívána v praktické části diplomové práce. Poslední část se věnuje integritě povrchu se zaměřením na zbytková napětí. V kapitole zbytkových napětí jsou shrnuty příčiny vzniku a metody měření zbytkových napětí.

Experimentální část se zabývá návrhem přípravku pro vibrační kuličkování lopatkového kola, (blisk  $1^\circ$ ) které je součástí leteckého motoru. Po návrhu a vyrobení přípravku se tato práce dále věnuje praktickým zkouškám na vibračním zařízení. Hlavním účelem zkoušek je odladění vhodných parametrů tohoto zpevňovacího procesu. Další součástí praktické části diplomové práce je zjištění, zda při procesu vibračního kuličkování nedojde k tvarové a rozměrové deformaci blisku  $1^\circ$ . K rozměrovým zkouškám je využito měřové středisko firmy ZEISS na FS ČVUT. Posledním bodem praktické části je měření drsnosti povrchu blisku  $1^\circ$  před a po kuličkování. Výsledky z měření drsnosti ukazují, jaký vliv má tato technologie na drsnost povrchu.

## 2 Rešeršní část

### 2.1 Materiály používané v leteckém průmyslu

V leteckém průmyslu se využívá široké spektrum materiálů. Do tohoto spektra patří kovové materiály, kompozity, plasty a keramické materiály.

Při konstrukci letadel hrají velice důležitou roli vlastnosti použitých materiálů. Veliký důraz je kladen na co nejlepší poměr mezi mechanickými vlastnostmi, hmotností a cenou materiálu. Kombinaci těchto základních parametrů velice dobře splňuje mimo jiné titan a jeho slitiny. V dnešní době se slitiny titanu využívají pro konstrukci vysoce namáhaných částí leteckých motorů.

Práce se zabývá obráběním titanového dílu z leteckého motoru, který vyrábí společnost GE Aviation, a proto se bude práce dále zabývat pouze titanem a jeho slitinami.

#### 2.1.1 Titan

Titan a jeho slitiny se začaly využívat v padesátých letech dvacátého století. V krátké časové době se staly velice hojně využívanými v leteckém průmyslu, kosmonautice, energetice, zbrojním a chemickém průmyslu. K tomuto častému využití titan a jeho slitiny předurčily jeho dobré mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Zejména pak jeho nízká hmotnost, korozní odolnost a schopnost odolávat vysokým teplotám. Dále také vyniká svojí největší pevností ze všech kovových materiálů. V dnešní době se titan využívá pro složité konstrukce, a také pro konstrukce, které jsou vystavené extrémním podmínkám. Typickým příkladem jeho využití jsou lopatky teplotních turbín, kloubní náhrady v lékařství, různé součásti ponorek, a také tepelné výměníky. Dalším typickým příkladem pro využití titanu a jeho slitin jsou součásti proudových motorů pro letecký průmysl, dále i mechanismy využití v konstrukci letadla. [1][2][3]

Titan je nemagnetický kov s dobrými teplotními vlastnostmi. Jeho teplotní roztažnost je nižší než u železných kovů a asi o polovinu menší než u hliníku. Jeho nevýhodou oproti železu je jeho vyšší teplota tavení (1670 °C). Maximální provozní teploty titanové slitiny se pohybují v rozmezí 430 °C až 540 °C. [1][2][3]

Titan je desátý nejrozšířenější prvek v zemské kůře. Jeho zastoupení v celkové hmotnosti země je 0,071 %. Za studené války se produkce titanu soustředila výhradně na SSSR. Jeho výroba byla přísně tajná, protože se jednalo o strategickou surovinu. Díky špionážím se však výroba titanových slitin dostala do USA i do západní Evropy. [1][2][3]

Masovějšímu uplatnění titanu ve výrobním průmyslu brání jeho relativně vysoká cena na trhu, a proto se nedá počítat s tím, že by v nejbližší době výrazně ohrožoval produkci ocelových a hliníkových slitin. Relativně vysoká cena titanu je dána náročností jeho výroby, a také vysokou poptávkou na trhu. [1][2][3]

Tabulka 1: Základní fyzikální vlastnosti titanu [4]

<b>Atomové číslo</b>	22
<b>Elektronegativita</b>	1,54
<b>Relativní atomová hmotnost</b>	47,867
<b>Teplota tání</b>	1668 °C
<b>Teplota varu</b>	3287 °C
<b>Hustota</b>	4500 kg/m <sup>3</sup>
<b>Tepelná vodivost</b>	11,4 W/m.K
<b>Součinitel tepelné roztažnosti</b>	8,42 μm/m.K

Tabulka 2: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [5]

Prvek	Ti	Fe	Ni	Al
<b>Teplota tání [°C]</b>	1 670	1 538	1 455	660
<b>Alotropická přeměna</b>	882 °C (β → α)	912 °C (γ → α)	-	-
<b>Krystalová struktura</b>	bcc → hcp	fcc → bcc	fcc	fcc
<b>Modul pružnosti [GPa]</b>	115	215	200	72
<b>Hustota [kg.m<sup>-3</sup>]</b>	4 500	7 800	8 900	2 700
<b>Korozní odolnost</b>	velmi vysoká	nízká	střední	vysoká
<b>Cena</b>	velmi vysoká	nízká	vysoká	střední

### 2.1.1.1 Výroba a metalurgie titanu

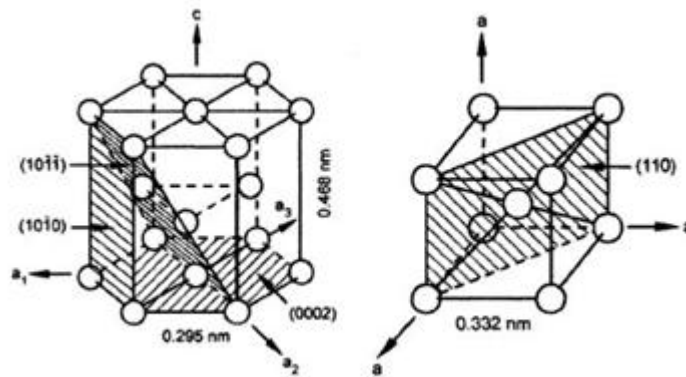
Výroba titanu je velice náročná, a to zejména díky jeho velké reaktivitě za vysokých teplot. Za nízkých teplot je titan pokryt oxidickou vrstvičkou  $\text{TiO}_2$ , která se při teplotě vyšší než  $535\text{ }^\circ\text{C}$  začne rozpadat. Titan se tak stává náchylným k reakcím s okolním prostředím. Titan silně reaguje s běžnými plyny, jako je například vodík, dusík, kyslík, uhlík. Může také reagovat s žáruvzdornými materiály. Tyto reakce se považují za nežádoucí, a proto je potřeba titan vyrábět ve vakuu nebo v ochranné atmosféře. V České republice se titan nevyrábí, a to hlavně kvůli nedostatku vstupních surovin. [1][5]

Titan se v zemské kůře vyskytuje v celé řadě minerálů. V přírodě existuje asi osmdesát základních titanových minerálů. V těchto minerálech se titan vyskytuje převážně v podobě  $\text{TiO}_2$ . Pro praktické využití mají největší význam rutil, ilmenit, perovskit a sfen. Jejich průměrné složení ukazuje tabulka 3. Pro těžbu a zpracování je nejvýhodnější rutilová ruda. Zdroje rutilové rudy jsou v dnešní době již téměř vyčerpané, a proto se 91 % produkce titanu pokrývá z těžby ilmenitu. Naleziště ilmenitu jsou pořád poměrně rozsáhlá. [1][6]

Tabulka 3: Složení hlavních titanových rud (%) [1]

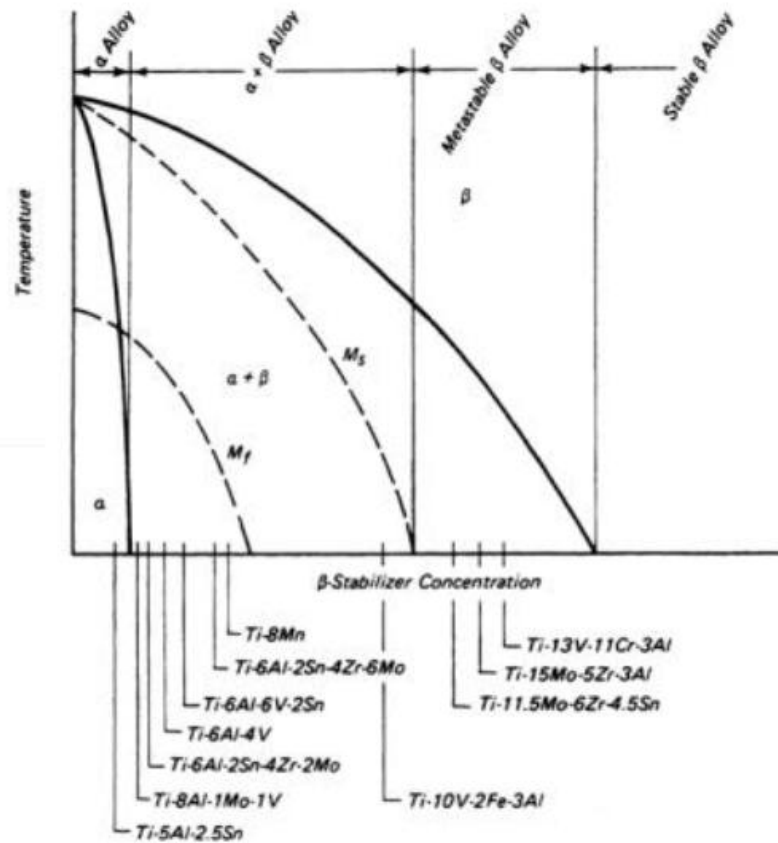
	Rutil	Ilmenit	Perovskit	Sfen
$\text{TiO}_2$	96	57,5-61	44-47	30-33
$\text{FeO}$	1,1	9-19	-	2-4
$\text{Fe}_2\text{O}_3$		20-26	4,5-6	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,9	1-2	0,9	1,5-2,5
$\text{CaO}$	1,4	0,1-0,2	34,6-36,8	27-2,5
$\text{MgO}$		0,5-1,2	2,5	27-29
$\text{SiO}_2$	0,6	0,5-2	5,7-7,8	27-29

Modifikace titanu lze rozdělit podle mnoha hledisek. Nejčastější rozdělení je však podle struktury v rovnovážném stavu. Titan má dvě alotropické modifikace. Tyto modifikace se nazývají fáze  $\alpha$  a fáze  $\beta$ . Obě tyto fáze se od sebe liší krystalickou mřížkou. Fáze  $\alpha$  má hexagonální a fáze  $\beta$  kubickou mřížku. [1]



Obrázek 1: Hexagonální mřížka fáze  $\alpha$  a bcc mřížka fáze  $\beta$  [7]

Vlastnosti těchto dvou alotropických modifikací se promítají do struktury, ale také do mechanických vlastností. Do bodu transformace (880 °C) je stálá fáze  $\alpha$ . Při vyšších teplotách fáze  $\beta$ . U čistého titanu je rychlost fázové přeměny tak vysoká, že fázovou přeměnu nelze potlačit. Přidáním legujících prvků můžeme změnit teplotu transformace a fázové podmínky. Prvky, které zvyšují teplotu přeměny z  $\alpha$  na  $\beta$ , nazýváme jako prvky  $\alpha$  – stabilizující. Prvky, které snižují teplotu přeměny z  $\alpha$  na  $\beta$ , nazýváme jako prvky  $\beta$  – stabilizující. Z toho vyplývá, že fáze titanu  $\beta$  po přidání vhodných legujících prvků může existovat v rovnovážném stavu i za pokojové teploty. Většina prvků, kterými se leguje titan, rozšiřují oblast fáze  $\beta$ . Velice obtížně se však dosahuje v rovnovážném stavu jen čisté fáze  $\beta$ . Většinou dostáváme dvoufázovou slitinu  $\alpha + \beta$ . Z tohoto důvodu dělíme slitiny titanu do třech kategorií:  $\alpha$  – slitiny,  $\alpha + \beta$  slitiny a  $\beta$  – slitiny. Na obrázku č. 2 je vidět diagram, ve kterém jsou zaneseny některé titanové slitiny. Křivky  $M_s$  s  $M_f$  jsou křivkami nerovnovážného rychlého ochlazení za vzniku fází martenzitického typu. [1] [5] [9]

Obrázek 2: Pseudobinární diagram Ti –  $\beta$  stabilizátor [9]

Podle vlivu na teplotu alotropické přeměny se prvky dělí na  $\alpha$  – stabilizátory,  $\beta$  – stabilizátory a prvky neutrální. [5]

### 2.1.1.1 $\alpha$ – stabilizátory

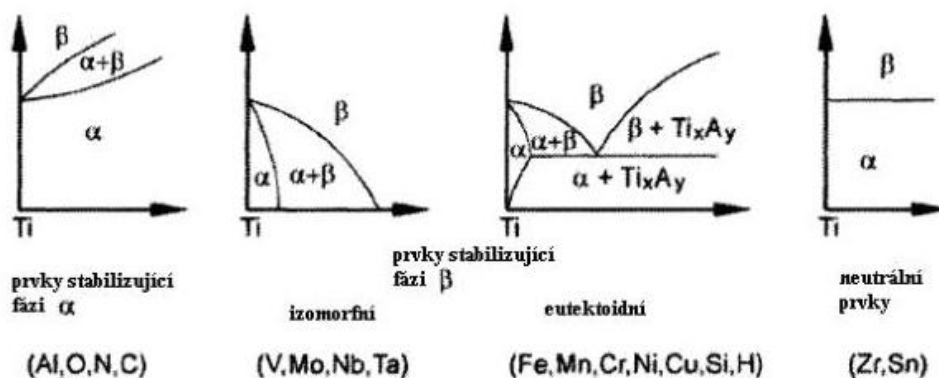
Stabilizátory posouvají teplotu alotropické přeměny směrem vzhůru. Těchto prvků není příliš mnoho. Mezi zmíněné prvky patří především uhlík, kyslík a dusík. Tyto prvky již v malém množství výrazně zvyšují pevnost a zhoršují tvárnost. Z těchto důvodů se v praxi k legování titanu nevyužívají a jsou spíše považovány za nečistoty. Z kovových prvků je nejvýznamnější hliník. Je to také jediný prvek, se kterým lze počítat pro legování. Slitiny titanu s hliníkem se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi a to až do teploty 600 °C. Tato slitina je také dobře svařitelná a není choulostivá na tepelné zpracování. Nevýhodou titanu legovaného hliníkem je však jeho omezená tvárnost za studena. [1][5] [6]

Titan tvoří s hliníkem tuhý roztok až do obsahu 26 % hliníku. Obsah hliníku ve slitinách je však omezen na 7 %. Tato horní hranice obsahu hliníku je dána hlavně tím, že při větším obsahu hliníku se slitiny stávají křehkými při tváření za tepla i za studena. Technicky nejvýznamnější slitinou je slitina s obsahem 5 % hliníku a 2,5 % cínu. Tato slitina dosahuje neoptimálnějšího poměru mezi mechanickými vlastnostmi a tvářitelností. [1] [5]

### 2.1.1.1.2 $\beta$ – stabilizátory

Posouvají teplotu alotropické přeměny směrem dolů. Zajistit, aby ve struktuře byla i při pokojové teplotě jen čistá fáze  $\beta$ , je velice obtížné. Lze toho dosáhnout tím, že do titanu přidáme velké množství legujících prvků (až 30 %) nebo jejich vhodnou kombinací.  $\beta$  – stabilizátory se obvykle dělí do dvou skupin:

- **rozpuštěné v  $\beta$ -fázi** (V, Mo, Ta, aj.)
- **eutektické** (Mn, Fe, Cr, Si, Ag, H)
  - Za nižších teplot dochází k eutektoidní reakci, kde eutektoidní směs je tvořena tuhým roztokem  $\alpha$  a intermediální fází bohatou na přísadový prvek. Rozpuštěnost přísadového prvku je největší za eutektoidní teploty. [1][5] [6]



Obrázek 3: Diagram vlivu legujících prvků [10]



### 2.1.1.1.3 *Slitiny titanu*

V současné době existuje nepřeberné množství titanových slitin. Praktické využití z nich má pouze malé množství. Nejčastěji používanou slitinou titanu v současnosti je Ti-6Al-4V. Tato slitina tvoří asi 45 % produkce titanu a jeho slitin. Dalších 30 % produkce tvoří čistý titan a zbývajících 25 % produkce tvoří ostatní slitiny. [2]

### 2.1.1.1.4 *Slitiny typu $\alpha$*

Slitiny typu  $\alpha$  se svými vlastnostmi výrazně podobají čistému titanu. Jsou velmi vhodné pro tváření za studena, a také se vyznačují svojí velkou pevností. Nemohou však být zpevňovány tvářením za tepla. Dají se využívat v rozmezí -200 až +550 °C. Tyto vlastnosti je také předurčují k lepší odolnosti proti creepu než slitiny  $\beta$  nebo  $\alpha + \beta$ . Slitiny  $\alpha$  jsou dobře svařitelné. Tyto slitiny jsou však při tváření náchylné na trhliny a praskliny. Z tohoto důvodu se musí materiál redukovat po malých krocích, a také se musí často ohřívat. Celkový obsah legur by neměl překročit 9 hmotnostních procent, aby nedošlo k nežádoucímu zkřehnutí. [2][4] [5]

$\alpha$  – slitiny se dále dají dělit na:

**CP titan (Commercially Pure)** – tyto slitiny obsahují titan o čistotě 99 až 99,5 %. Díky své ceně a dobrým mechanickým vlastnostem nachází uplatnění v širokém spektru odvětví (kosmonautika, chemický průmysl, letectví, atd.). [2] [5]

**Slitiny pseudo  $\alpha$**  – Tyto slitiny obsahují okolo dvou procent  $\beta$  stabilizátorů. Tyto slitiny mají vysokou tažnost a středně velkou pevnost. Dobře odolávají vysokým teplotám. Jejich průmyslové využití je především v leteckém průmyslu (např. výroba draků a dveří letadel společnosti Airbus). [2] [5]

### 2.1.1.1.5 *Slitiny typu $\beta$*

Slitiny typu  $\beta$  mají ve své struktuře velký obsah legujících prvků. Mají také malý podíl fáze  $\alpha$ . Jako legující prvky se nejčastěji používají Fe, Mo, Cr, V, Al. Oproti slitinám ( $\alpha+\beta$ ) mají větší odezvu na tepelné zpracování, lepší únavovou odolnost a deformační vlastnosti. Korozní odolnost těchto slitin je stejná nebo lepší než u  $\alpha$ -slitin, a také lépe

odolávají prostředí bohatému na vodík. Nevýhodou těchto slitin je jejich poměrně malá creepová odolnost a vyšší cena. [4] [5]

$\beta$  – slitiny lze podobně jako slitiny  $\alpha$  dělit do skupin:

**Metastabilní slitiny  $\beta$**  – Po zakalení z vysokých teplot zůstane ve struktuře fáze  $\beta$ , která se při stárnutí rozpadá na jemnou  $\alpha$ -fázi, a to je doprovázeno nárůstem pevnosti. [5]

**Stabilní slitiny  $\beta$**  – Tyto slitiny obsahují větší množství  $\beta$  – stabilizátorů. Slitiny nemohou být vytvrzovány stárnutím. [5]

#### 2.1.1.1.6 Dvofázové slitiny $\alpha + \beta$

U titanových slitin vzniká dvofázová struktura snadno, a proto je v této skupině velký počet slitin. Vzájemný poměr fází  $\alpha$  a  $\beta$  je dán obsahem legujících prvků a podmínkami zpracování. V závislosti na zpracování je možné dosáhnout velké škály struktur a vlastností. Množství jednotlivých fází se nejčastěji pohybuje v rozmezí 5 až 50 %. Tyto slitiny vykazují vysokou pevnost, která však s rostoucí teplotou značně klesá. Tyto dvofázové slitiny jsou v současné době nejvyužívanější. Hlavním představitelem této skupiny je Ti-6Al-4V. [1][4] [5]

Slitina Ti-6Al-4V se velice často používá na výrobu leteckých motorů.

Tabulka 4: Vybrané slitiny titanu a jejich vlastnosti [4]

Stav: ž – žíháno, dž – duplexně žíháno, kp – kaleno a popuštěno

Druhy slitin	Stav	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A [%]	Vlastnost a použití
<b>Slitiny <math>\alpha</math></b>					
Ti-Al5-Sn2,5	ž	860	800	16	Svařitelné výkovky a plechy: lopatky leteckých motorů a turbín
Ti-Al2-Mo4-Sn11	dž	1000	895	10	
<b>Slitiny pseudo <math>\alpha</math></b>					
Ti-Al8-Mo1-V1	dž	950	890	15	Dobrá svařitelnost, houževnatost, žárupevnost do 450 °C: součásti draků a turbokompresorů letadel do 550 °C
Ti-Al8-Zr11-Nb1-Mo-Si	kp	1100	1050	10	
Ti-Al6-Mo2-Zr4-Sn2-Si	dž	940	860	15	

<b>Slitiny <math>\alpha+\beta</math></b>					
Ti-Al6-V4	ž	950	880	14	Součásti leteckých motorů do 400 °C, tlakové nádoby, čerpadla na plyny a chemikálie, kryogenní součásti, zbraně, plavidla, skříně raketových motorů, děla, podvozky letadel, součásti leteckých turbín do 450 °C, součásti turbokompresorů až do 500 °C
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-V6-Sn2	ž	1050	990	14	
	kp	1170	1100	10	
Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si	kp	1450	1150	7	
Ti-Al6-Mo4-Zr2-Si	ž	1150	1050	12	
<b>Slitiny pseudo <math>\beta</math></b>					
Ti-V8-Mo8-Fe2-Al3	kp	1240	1170	8	Výkovky pro součásti letadel a raket – větší houževnatost
Ti-V5-Mo5-Al3-Cr-Fe	ž	1150	1100	13	
<b>Slitiny <math>\beta</math></b>					
Ti-V13-Cr11-Al3	kp	1220	1150	8	Dobrá svařitelnost: svorníky a panely, součásti kosmických lodí
Ti-Mo11-Zr6-Sn5	kp	1390	1320	11	Vysokopevné svorníky a součásti letadel – jen plechy

### 2.1.1.2 Slitina titanu Ti-6Al-4V

Tato slitina je vůbec nejpoužívanější slitinou titanu. Jak už bylo v této práci zmíněno, její podíl na výrobě výrobků z titanu činí téměř 50 %. Jedná se o slitinu  $\alpha + \beta$ , u které je možné dosáhnout mírného vytvrzení tepelným zpracováním. Tuto slitinu lze vystavit provozním teplotám až 470 °C. Jak je vidět z tabulky č. 5 a 6 mezi její hlavní přednosti patří vysoká pevnost, tvářitelnost, korozní odolnost, dobrá obrobitelnost a svařitelnost. Tato slitina byla vyvinuta pro výrobu lopatek plynových turbín. V současnosti se však uplatňuje ve spoustě odvětví průmyslové výroby (např. automobilový průmysl, lodní průmysl, energetika, chemický průmysl atd.). [5] [2]

Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti žíhané slitiny Ti-6Al-4V za pokojové teploty [2]

Vlastnost	Hodnota
Hustota	4,43g/cm <sup>3</sup>
Teplota přeměny $\alpha \leftrightarrow \beta$	982 – 1010 °C
Likvidus	1636 – 1674 °C
Solidus	1593 – 1616 °C
Mez pevnosti	1380 – 2070 MPa
Mez pružnosti	825 – 895 MPa
Smyková pevnost	480 – 690 MPa
Modul pružnosti	114 GPa
Poissonovo číslo	0,33

Tabulka 6: Odolnost slitiny proti vybraným korozním prostředím [2]

Látka	Odolnost
Kyselina sírová	dobrá
Hydroxid sodný	dobrá
Mořská voda	vynikající
Solná emulze	vynikající
Vlhkost	vynikající

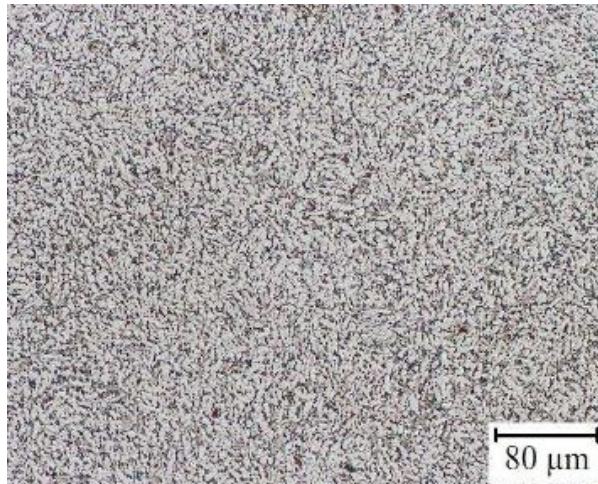
Slitina titanu Ti-6Al-4V obsahuje mimo titanu, hliníku a vanadu ještě jiné prvky. Obsahy těchto prvků z velké části závisí na konkrétní aplikaci. V tabulce č. 7 jsou uvedeny mezní hodnoty těchto prvků. Tyto hodnoty by neměly být překročeny v žádné aplikaci.

Tabulka 7: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [11]

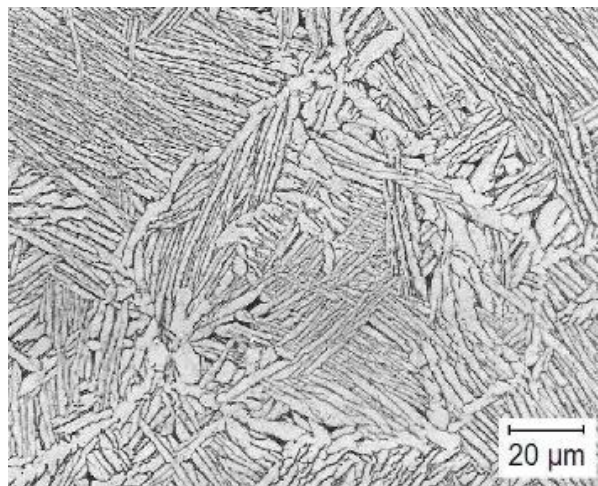
Prvek	Al	V	N	C	H	Fe	O	Ti
Obsah [hm.%]	5,5 - 6,75	3,5 – 4,5	max. 0,05	max. 0,08	max. 0,01	max. 0,3	max. 0,2	zbytek

### 2.1.1.2.1 Mikrostruktura Ti-6Al-4V

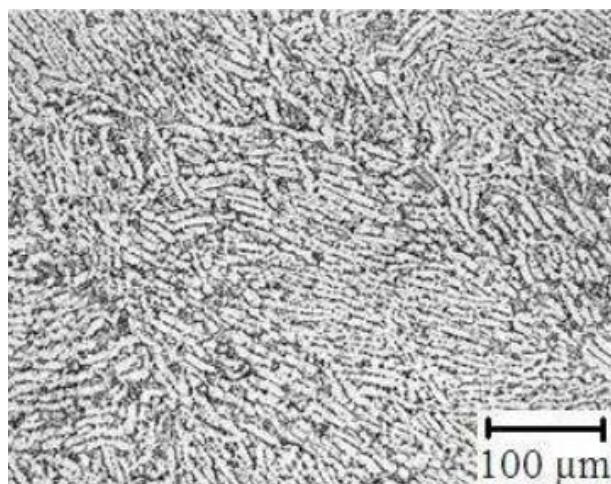
Mikrostruktura slitiny Ti-6Al-4V se skládá z fází  $\alpha$  a  $\beta$  a ve většině případů se jedná o velmi jemnou strukturu. Množství fáze  $\alpha$  a  $\beta$  je závislé na chemickém složení, tepelném zpracování a přítomnosti intersticiálních prvků (především kyslíku). Existuje několik strukturních morfologií (rovnoosá, lamelární, bimodální, jehlicovitá), jejichž vznik je ovlivněn podmínkami tváření a tepelného zpracování. Struktura tvořená rovnoosými zrny se vyznačuje dobrou tvárností a únavovou pevností. Lamelární struktura má horší mechanické vlastnosti, ale vyznačuje se vyšší žárupevností a lepší lomovou houževnatostí, což je dáno značným větvením trhlin při jejich šíření. Jehlicovitá struktura vzniká vlivem bezdifuzní martenzitické přeměny při nerovnovážných podmínkách ochlazování z kalící teploty, kdy se fáze  $\beta$  přemění na přesycený tuhý roztok  $\alpha$ . Na rozdíl od ocelí se tvrdost přesyceného tuhého roztoku  $\alpha$  výrazně neliší od fáze  $\alpha$ . Za normální teploty má tato struktura sníženou tažnost. Za vyšších teplot má pak vyšší odolnost proti tečení. Při nevhodně zvolených podmínkách může dojít ke vzniku nežádoucí fáze  $\omega$ , která se vyznačuje vysokou tvrdostí, ale činí slitinu velice křehkou. To je zapříčiněno tím, že ve skutečnosti je fázová přeměna u titanových slitin do značné míry komplikovanější ( $\beta \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$ ). Vznik fáze  $\omega$  v titanových slitinách eliminuje přísada hliníku. [5] [11] [12]



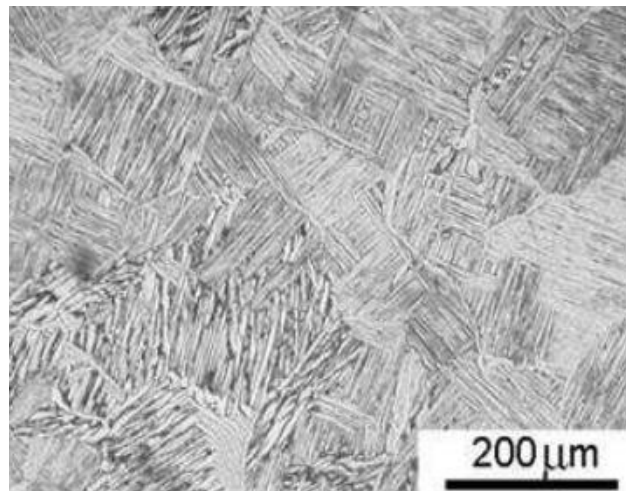
Obrázek 4: Struktura Ti-6Al-4V po tváření [12]



Obrázek 5: Jehlicovitá struktura Ti-6Al-4V jehlice  $\beta$  (světlé) ve fázi  $\alpha$  (tmavé) [12]



Obrázek 6: Rovnoosá struktura Ti-6Al-4V [12]



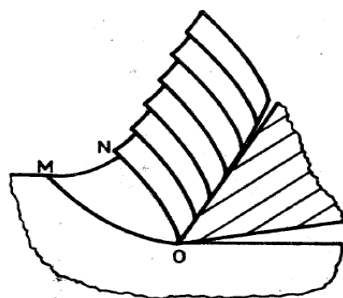
Obrázek 7: Lamelární struktura Ti-6Al-4V [12]

## 2.2 Zpevnění povrchové vrstvy

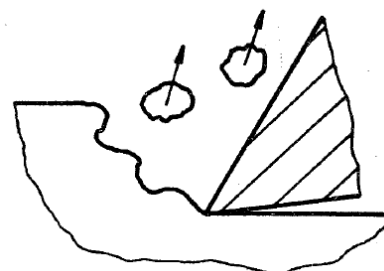
V této kapitole se budu zabývat zpevněním povrchové vrstvy po obrábění. Ke zpevnění povrchu dochází jak při třískovém, tak při beztřískovém obrábění.

### 2.2.1 Třískové obrábění

V technické praxi má největší zastoupení třískové obrábění. Při tomto způsobu obrábění dochází k vytváření třísky tvářené a netvářené. Typickým příkladem, kdy vzniká tříska tvářená, je obrábění kovů. V tomto případě vzniká plastická deformace v obráběném materiálu v těsné blízkosti břitu řezného nástroje. Tento případ můžeme vidět na obrázku č. 8. V případě, že nedochází k plastické deformaci při oddělování třísky od zbytku materiálu, vzniká tříska netvářená. Tento příklad tvorby třísky je vidět na obrázku č. 9. [13] [14]



Obrázek 8: Tříska tvářená [13]



Obrázek 9: Tříska netvářená [13]

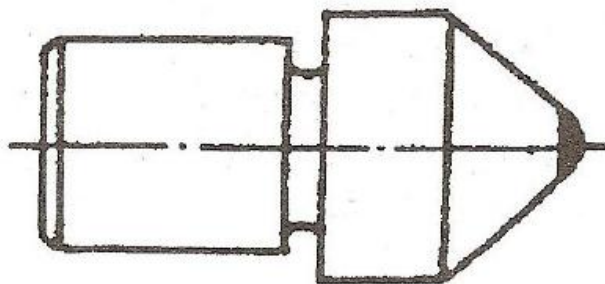
## 2.2.2 Beztržiskové obrábění

Veškeré metody beztržiskového obrábění jsou založeny na principu deformace povrchové vrstvy obrobku. Zpevnění pomocí plastické deformace dosahuje hloubky od jednotek setin až po desetiny milimetru od povrchu. Pomocí této deformace dochází k zlepšení vlastností povrchu obrobku. V povrchové vrstvě se výrazně zlepší odolnost proti opotřebení a také proti korozi. Dále se výrazně zlepší mechanické vlastnosti jako je například pevnost a tvrdost. [15]

Do beztržiskových metod obrábění řadíme válečkování, kuličkování a leštění povrchu diamantem.

### 2.2.2.1 Leštění povrchu diamantem

Vyhlazování povrchu diamantem je jedna z metod beztržiskového obrábění. Tato metoda se používá pro dokončování povrchů obrobků z tepelně zpracovaných ocelí. Vyhlazování probíhá pomocí diamantu s kuželovou špičkou, která má definovaný poloměr zaoblení a je přitlačována konstantní silou k povrchu součásti. Příklad tohoto nástroje je uveden na obrázku č. 10. Tato operace se dá provádět na konvenčních strojích, je však nutné vždy obrobek chladit olejem nebo emulzí. Na rozdíl od válečkování a kuličkování nedochází v místě styku k odvalování a tím vzniká kluzné tření. Touto metodou lze dosáhnout drsnosti povrchu  $R_a$  0,1 – 0,4  $\mu\text{m}$ , hloubky zpevnění 0,1 – 0,5 mm. [15]



Obrázek 10: Diamantový vyhlazovací nástroj [17]



Výslednou drsnost povrchu a hloubku jeho zpevnění ovlivňují především:

- tvar tělíška
- materiál tělíška
- přítláčná síla (80 až 1000 N)
- rychlost pohybu (40 až 100 m.min<sup>-1</sup>)
- posuv (0,02 až 0,1 mm.ot<sup>-1</sup>)
- počet přejezdů
- mazání a chlazení [16]

### 2.2.2.2 Válečkování

Válečkování se využívá pro dokončování vnitřních i vnějších ploch, především rotačních součástí. Působením tvrdého válečkovacího prostředku na povrch obrobku dochází k plastické deformaci obrobku. Tato plastická deformace uhlazuje nerovnosti a zpevňuje povrch po předchozím obrábění. Samotné válečkování se provádí nástroji, které jsou buďto soudečkového nebo válečkového tvaru. Výsledný povrch obrobku po válečkování je velice závislý na zvoleném nástroji. Obecně se dá říci, že menší průměry válečku zvyšují hloubku zpevnění a větší průměry snižují drsnost. Válečkovací operací se dá dosáhnout přesnosti IT 4 – IT 7 a hodnota Ra 0,4 – 0,005 μm. Tato operace má ale také nežádoucí vliv na obráběný materiál. Tímto nežádoucím vlivem je především pokles tažnosti a vrubové houževnatosti. [15][16] [18]



Obrázek 11: Schéma objemových a geometrických změn materiálu při válečkování [16]

Válečkování lze rozdělit do dvou základních kategorií podle použité technologie. Jedná se o rozdělení na válečkování statické a dynamické.

- **Statické válečkování:** Čím menší průměr válečku použijeme, tím dosáhneme vyššího zpevnění a zároveň i vyšší drsnosti povrchu.
- **Dynamické válečkování:** Nástroj není v neustálém kontaktu s povrchem součásti. Dosahujeme velké hloubky zpevnění. [16]

### 2.2.2.3 Kuličkování

Kuličkování je další z řady metod beztrískového obrábění, která se používá ke zlepšení vlastností povrchu součásti. Kuličkování se využívá k úpravě povrchu válcových, rovinných i tvarově složitých součástí. [15]

Tato technologie se dá rozdělit do tří základních skupin podle tvaru obrobku a využitého způsobu kuličkování.

- statické kuličkování – využívá se především pro úpravu rotačních a rovinných ploch
- dynamické kuličkování – využívá se pro kuličkování součástí složitějších tvarů
- vibrační kuličkování – využívá se pro kuličkování složitých tvarů (př. lopatky turbín). Na obrázku č. 12 můžeme vidět přípravek, do kterého se vloží kuličky a na ustavovací trny se potom přichytí kuličkováná součást. Na dalším obrázku je pak vidět vibrační zařízení, které je využíváno v GE Aviation.



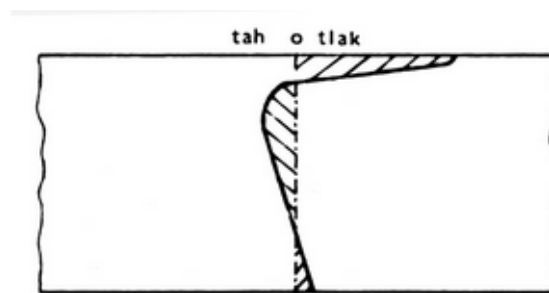
Obrázek 12: Přípravek vyplněný kuličkami.



Obrázek 13: Vibrační rám se sezdola umístěným vibračním motorem

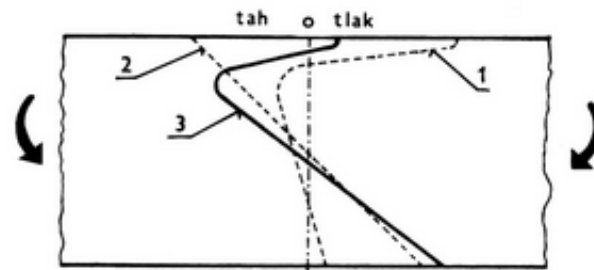
### 2.2.2.3.1 Rozložení napětí po kuličkování

Vnitřní vlákna, která nejsou napínána nad mez kluzu, si uchovávají původní pružnost a brání v dilataci povrchovým vláknům. Dochází k vytvoření rovnováhy, při které relativně tlustá vrstva vnitřního materiálu drží nízkým tahovým napětím tenkou povrchovou vrstvu ve stavu vysokého tlakového napětí. Viz obrázek č. 14. [22]



Obrázek 14: Rozložení zbytkového napětí v průřezu součásti po jednostranném kuličkování [22]

Dojde-li k zatížení součástí vnější silou, bude výsledné napětí rovno algebraickému součtu zbytkového pnutí po SP a napětí způsobeného zatížením. Výsledné rozložení napětí je znázorněno na obrázku č. 15. [22]



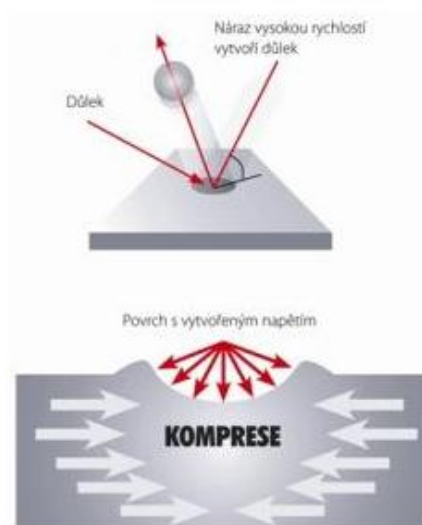
- 1 – zbytkové pnutí po kuličkování
- 2 – napětí od vnějšího zatížení
- 3 – výsledné napětí

Obrázek 15: Výsledné rozložení napětí [22]

#### 2.2.2.4 Řízené tryskání – shot peening

Hlavním účelem řízeného kuličkování je zpevnění povrchové vrstvy. Tato metoda má široké uplatnění v průmyslu. Jednu z nejdůležitějších rolí však zaujímá v letecké výrobě.

Princip řízeného kuličkování tkví v plastické deformaci za studena. Tato deformace je způsobena částicemi, které jsou metány předem určenou rychlostí proti povrchu tryskaného tělesa. Každá kulička vytvoří díky své vysoké kinetické energii při dopadu v povrchu malý důlek. Překrývající se důlky vytvoří souvislou zpevněnou vrstvu. Pod povrchem tak vznikají příznivá tlaková napětí v důsledku snahy materiálu vrátit se do původního stavu, jak je znázorněno na obrázku č. 16. [19][20]



Obrázek 16: Princip řízeného kuličkování [19]

Tato napětí jsou po řízeném kuličkování hodně vysoká. Díky tomu nedochází v materiálu k šíření trhlin a vzniku nových trhlin. V důsledku toho dochází k maximálnímu zvýšení únavové životnosti. Řízené otryskávání má i další příznivé vlivy na povrch. Dokáže velice účinně eliminovat koncentrátoři napětí, jako jsou například vruby. Významně snižuje riziko korozního praskání, a také mezikrystalické koroze. [19][20]

Po řízeném kuličkování se nemusí provádět žádné další operace, které by vedly k odstranění vnitřního pnutí po kuličkování. Pro volbu správných parametrů této technologie je třeba důkladně znát součást, kterou budeme kuličkovat. Důležitá je především znalost mechanických vlastností základního materiálu, jeho předchozí způsoby zpracování, a také budoucí využití tohoto dílu. Volbou vhodných podmínek pro tryskání lze dosáhnout velice dobrých výsledků, které budou vhodné pro náš díl. [19][20]

Mezi nejvýznamnější parametry řízeného kuličkování patří zejména úhel, pod kterým budou dopadat částice na základní materiál. V praxi se nejčastěji využívá úhel dopadu v rozmezí padesáti až osmdesáti stupňů. Dalším neméně významným parametrem je rychlost dopadu částice. Částice mohou na materiál dopadat rychlostí až  $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dalšími parametry, které je potřeba správně nastavit, je doba tryskání a hlavně také tvar a rozměr dopadajících částic. [19][20]



Obrázek 17: Ocelový štěrk pro tryskání [21]



Obrázek 18: Ocelové kuličky pro tryskání [21]

U různých výrobků může být požadována jiná hloubka zpevnění. Tuto hloubku lze ovlivnit správnou volbou tryskacího média. Hloubku zpevnění lze ovlivnit především snižováním a zvyšováním kinetické energie tryskacích částic. Kinetická energie se dá

velice jednoduše upravovat volbou velikostí částic anebo jejich dopadovou rychlostí. Při zvětšování zpevněné tloušťky musíme však dávat pozor na celkovou tloušťku tryskaného výrobku. Obecně můžeme říci, že čím větší bude zpevněná tloušťka materiálu, tím větší bude odolnost proti šíření trhlin. [19][20] [21]

Řízené kuličkování je ve své podstatě poměrně jednoduchou a levnou technologií. Nevýhodou však může být, že použitím této technologie se dá jen velice obtížně dosáhnout lepší drsnosti povrchu než je  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ . [19][20] [21]

### *2.2.2.5 Nástroje pro řízené kuličkování*

Nástroj je u tohoto druhu technologie chápán jako velké množství tvářecích tělísek, která dopadají na povrch součásti. Tato tvářecí tělíška se v drtivé většině vyrábějí ze tří základních materiálů.

- skleněné perly (balotina)
- ocelový granulát (steelshot)
- keramické médium (zirshot)

Nejčastěji se pro tryskání využívá ocelový granulát ať už ve formě kuliček, anebo štěrků. Ocelové kuličky mají průměr od 0,3 do 3 mm. Jejich tvrdost je cca 50 HRC. Ocelová tryskáčská tělíška mají však jednu velkou nevýhodu. Při dopadu na základní materiál na něm nechávají stopu otěru. Tato kontaminace základního materiálu má za následek vznik koroze, a to výrazně snižuje životnost celé součásti. V případech, kdy nemůžeme použít ocelová tělíška musíme zvolit jinou alternativu. [20] [22]

Tam, kde nelze využít ocelová tělíška, se uplatňují tryskáčská kuličky keramické nebo skleněné. Tělíška z těchto materiálů jsou inertní, a proto nekontaminují základní materiál. Kuličky pro balotinování se používají v průměrech 0,3 až 0,8 mm. Nevýhodou těchto kuliček oproti ocelovým je jejich křehkost. Při dopadu na zpevňovaný povrch dochází velmi často k jejich poškození. Poškozené částice je nutné odstranit z pracovního procesu. Odstranění poškozených částic se provádí pomocí recyklačního zařízení, které rozpoznává dobré a vadné částice podle hmotnosti. Balotinování se používá nejčastěji na zpevňování povrchu neželezných kovů. [20] [22]

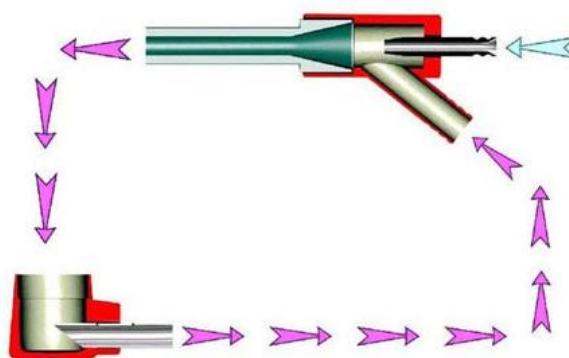
### 2.2.2.6 Zařízení pro řízené kuličkování

Tryskací stroje se ve většině případů dají využít jak pro abrazivní účely, (odstraňování rzi, staré barvy atd.) tak pro účely zpevnění povrchu. Tryskací zařízení můžeme rozdělit do dvou základních skupin. Do první skupiny můžeme zařadit zařízení, která pracují na základě tryskání pomocí stlačeného vzduchu a tryskacího média. Samotná vzduchová zařízení lze ještě rozdělit na injektorová a tlaková. Do druhé skupiny řadíme zařízení, která tryskací médium vrhají mechanicky na základní materiál pomocí metacích kol. [20]

#### 2.2.2.6.1 Vzduchová tryskací zařízení

Vzduchová tryskací zařízení se vyznačují vysokou variabilitou, neboť se mohou přizpůsobit nejrůznějším požadavkům při praktických aplikacích. Jejich velká výhoda spočívá zejména v schopnosti tryskat i těžko dostupná místa, předměty velkých rozměrů nebo konstrukce umístěné v terénu. Tyto stroje se vyskytují v různých provedeních od jednoduchých tryskacích pistolí, až po speciální tryskací komory s automatickým naváděním trysky.

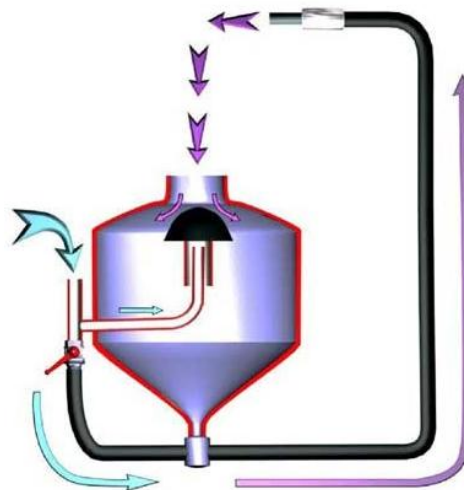
Na obrázku č. 19 je zobrazeno zjednodušené schéma injektorového tryskacího zařízení. Ze zásobníku zobrazeného dole vlevo na obrázku je přiváděno tryskací médium do tryskací pistole. V tryskací pistoli se tryskací médium urychlí proudem vzduchu na námi požadovanou rychlost. Touto pistolí je následně tryskací médium nasměrováno na povrch materiálu, který chceme upravovat. Po dopadu na základní materiál se médium dostává zpátky do zásobníku a je znovu vráceno do tryskací pistole.



Obrázek 19: Injektorový systém [23]

Obrázek č. 20 schematicky zobrazuje další princip vzduchového tryskacího zařízení. Jedná se o tlakový způsob tryskání. Tlakové tryskání je účinnější než tryskání pomocí injektorového systému. Má však jednu nevýhodu. Doba tryskání je omezena velikostí tlakové nádoby, ve které máme uzavřené tryskací médium. Po vyprázdnění této nádoby je potřeba ji otevřít, doplnit tryskací médium, a poté znovu natlakovat.

System této metody spočívá v tom, že do tlakové nádoby nasypeme tryskací médium, uzavřeme ji a natlakujeme pomocí vzduchu. Poté je tryskací médium tlačeno přes přepouštěcí trysku ve směšovací hlavě do hadice, kde je promíšeno se vzduchem a následně vystupuje ven pracovní tryskou. Kulovým ventilem se reguluje poměr mezi tlakovou nádobou a unášecím vzduchem v hadici. [23] [20]



Obrázek 20: Tlakový systém [23]

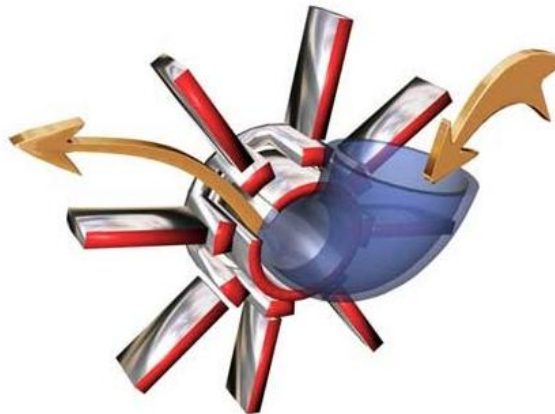
#### 2.2.2.6.2 Metací tryskací zařízení

Metací tryskací zařízení mají oproti vzduchovým zařízením výhodu v tom, že se dají velice dobře automatizovat. Tuto možnost automatizace oceníme hlavně v kvalitě otryskávaného výrobku. Díky automatizaci je zde také omezen vliv lidského faktoru, a proto dostáváme vždy stejný výsledek. Jako další pozitivum se dá uvést i hospodárnější provoz oproti vzduchové technologii. Dobře opakovatelných výsledků se využívá především u výrobků produkovaných ve velkých sériích. Tryskání metacímí koly je však omezeno složitostí a rozměry výrobku. Další nevýhodou této metody tryskání může být



i malý výběr tryskacího média. Většinou jsou tato zařízení stavěná pro ocelový granulát.

Na obrázku č. 21 je ukázán základní princip fungování takového stroje. Z něj je patrné, že tryskací prostředek se přivádí k metacímu kolu, které se otáčí vysokou rychlostí. Odstředivá síla má za následek metání tvářecích prvků vysokou rychlostí až  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  proti povrchu tryskané součásti. Výsledek procesu je ovlivněn především tvarem lopatek, množstvím použitého prostředku a rychlostí rotace kola. [20]



Obrázek 21: Stroj s metacími koly [23]

### 2.3 Význam zbytkových napětí

Zbytková napětí jsou taková napětí, která nám v materiálu zůstávají, i když přestaneme na obrobek působit vnější silou. Tato napětí se v dnešní době dají měřit celou řadou nepřímých metod. Zbytková napětí mají velký vliv na mechanické vlastnosti materiálu. Zvyšují pevnost materiálu, korozní odolnost, a také, pokud se jedná o tlaková napětí, (v našem případě po úpravě povrchu kuličkování se jedná o tlaková napětí) zlepšují odolnost proti vzniku trhlin. Obecně se dá říci, že tlaková napětí jsou pro obrobek prospěšná a tahová napětí jsou nežádoucí. Toto obecné tvrzení však platí pouze do určité velikosti tlakového napětí. Při překročení určité meze vnitřních pnutí dojde k degradaci mechanických vlastností materiálu a tento stav je nežádoucí. [27] [14]

Zbytková napětí do obrobku vneseme plastickou deformací při obrábění. Jak již bylo zmíněno, zbytková napětí se měří pouze nepřímými metodami. To znamená, že neměříme velikost zbytkových napětí, ale veličiny, které se k nim přímo vztahují. Měříme buďto velikost deformace anebo fyzikální veličiny. [14]

### 2.3.1 Metody zkoumání zbytkových napětí

Metody zkoumání zbytkových napětí se nejčastěji dělí podle dvou základních kritérií.

#### 2.3.1.1 Dělení podle míry narušení zkoumaného tělesa

Tato skupina měření se dá dále rozdělit na tři základní kategorie, a to na metody destruktivní, polodestruktivní a nedestruktivní.

- **destruktivní metody měření zbytkových napětí**

U těchto měřicích metod, jak už je z názvu patrné, dochází k úplnému poškození vzorku nebo měřené součásti. Do této kategorie spadá valná většina mechanických zkoušek, které zkoumají deformaci při odstranění jednotlivých vrstev ze zkoumaného vzorku. Typickým zástupcem destruktivní metody měření zbytkových napětí je měření mikrotvrdosti. [24]

- **polodestruktivní metody měření zbytkových napětí**

Polodestruktivní metody měření se používají tam, kde je možné na funkční celek záměrně přidat materiál, na kterém tuto zkoušku provedeme. Tento přidaný materiál ani použitá zkouška měření nesmí ovlivnit funkčnost měřené součásti. Ne vždycky je možné tento přídavek na materiál přidat. Typickým zástupcem této kategorie zkoušek je zkouška odvrtáváním otvoru. [24]

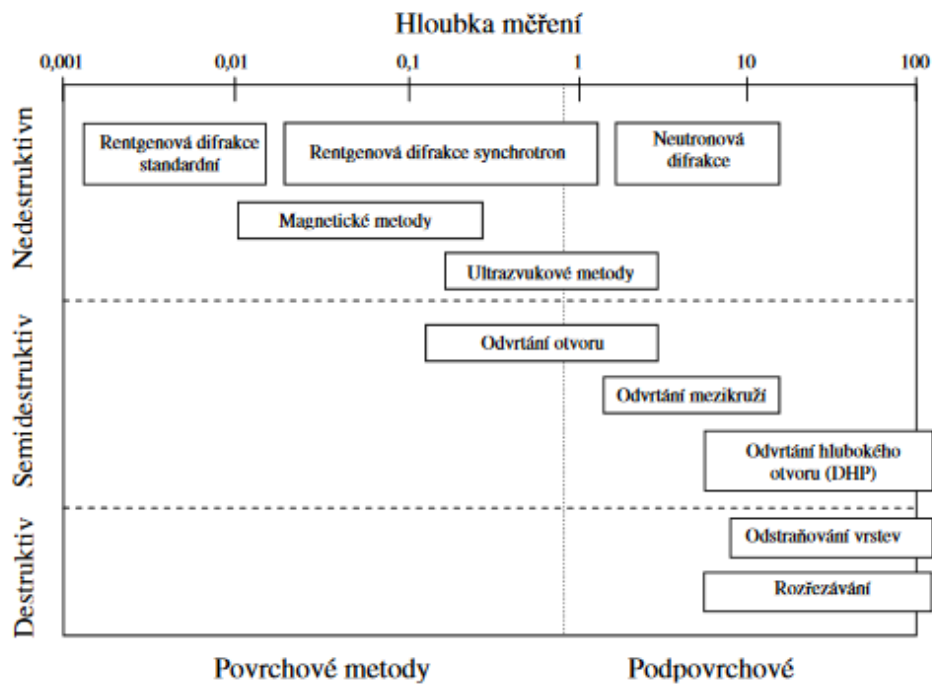
- **nedestruktivní metody měření zbytkových napětí**

U nedestruktivních metod nedochází k poškození zkoumané součásti anebo vzorku. Do této skupiny patří většina metod měření, které fungují na principu měření fyzikálních veličin. Z této skupiny se prakticky využívá celá řada metod. Jako příklad je zde uvedena akustická zkouška, RTG, ultrazvuk a další. [24]

#### 2.3.1.2 Rozdělení podle principu měření zbytkových napětí

Pro určení zbytkových napětí existuje celá řada nepřímých metod. Každá z těchto metod je v praxi využitelná pro jiné tvary a rozměry obrobku. Dalším rozhodujícím kritériem pro měření je hloubka zpevněné vrstvy, která má být měřena. Na obrázku č.

22 jsou znázorněny jednotlivé metody, které se využívají pro měření a rozsahy hloubek, ve kterých jsou tyto metody schopné měřit zbytková napětí. [14][27]



Obrázek 22: Metody měření zbytkových napětí a hloubky pro jejich použití [14]

Princip jednotlivých metod měření je založen na různých základech měření. Pro názornost jsou v tabulce č. 8 uvedeny metody pro zjišťování zbytkových napětí, a také případy jejich využití v praxi. Tato tabulka je velice názorná a dodává obecný přehled o jednotlivých metodách. V práci budou dále popisovány pouze některé tyto metody, které se nejčastěji využívají v praxi. [14][28]

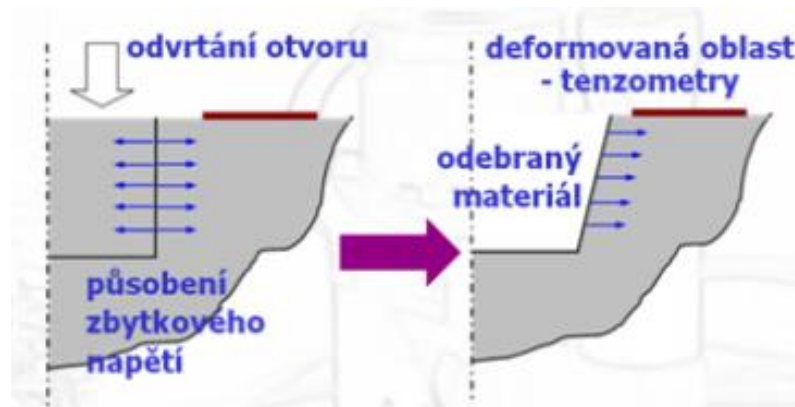
Tabulka 8: Metody zjišťování zbytkových napětí [28]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	Plochý tvar	Deformace pásků	Změna délky
			Změna zakřivení
		Vrtání děr	Válcová díra
			Mezikruží
	Rotační tvar	Změna rozměru válce	Odstranění povrchové vrstvy
		Trubka	Rozříznutí trubky
			Odstranění povrchové vrstvy
			Odstranění vnitřní vrstvy
		Kroužek	Rozříznutí
			Změna křivosti
	Podélné pásy z kroužků		
	Obecný tvar	Metoda sítí	Deformace sítě
Křehké laky		Vznik trhlin	
Křehké modely		Vznik trhlin	
Fyzikální RTG	Obecný tvar	Difrakce	Vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		Šíření vln	Změna rychlosti
			Odraz vln
			Vnitřní tlumení
Elektrické	Obecný tvar	Změna proudu	Změna potenciálu procházejícího proudu
			Změna velikosti vířivých proudů
			Změna indukčního toku
Magnetické	Obecný tvar	Změny magnetismu	Magnetická indukce
			Zbytkový magnetismus
Akustické	Obecný tvar	Prozvučitelnost	Četnost akustických emisí
Chemické	Obecný tvar	Difúze vodíku	Trhliny na povrchu
		Změna chemické aktivity	Změna struktury

### 2.3.2 Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda je jednou z nejpoužívanějších polodestruktivních, mechanických metod pro zjišťování velikosti zbytkového napětí. Tato metoda se těší velké oblibě především z důvodu rychlosti, levnosti a univerzálnosti. Metoda se dá aplikovat na širokou škálu materiálů i strojních součástí. Zařízení pro tuto zkoušku mohou být jak „pevná“ pro laboratorní měření, tak přenosná. [25] [30] [31]

Princip odvrtávací metody spočívá ve vyvrtání malého otvoru do povrchu zkoumané součásti nebo materiálu, ve kterém jsou přítomna zbytková napětí. Vyvrtaný otvor způsobí uvolnění zbytkových napětí. V důsledku uvolnění zbytkových napětí dojde k deformaci vyvrtaného otvoru v oblasti, kde jsou přítomna zbytková napětí. Napětí se měří pomocí tenzometrů, které jsou umístěny v okolí odvrtané díry a měří uvolněné napětí ve třech osách. Tento princip je schematicky znázorněn na obrázku č. 23. K analýze získaných dat se využívá například metoda konečných prvků. [25] [31]



Obrázek 23: Schéma principu odvrtávací metody [31]

Odvrtávací metoda je velice náročná na přípravu vzorků. Veliký vliv na získané výsledky má drsnost povrchu, házení při vrtání, hloubka díry a rovinnost připravené plochy vzorku. Povrch vzorku je potřeba upravit hlavně z důvodu dobrého spojení tenzometrů v povrchem měřené součásti.[25]

Metoda vyvrtávání otvorů se využívá v mnoha průmyslových oblastech výroby a zpracování materiálu. K významným z nich patří především tepelné zpracování materiálu (žihání, kalení, popouštění), mechanická a tepelná úprava povrchu materiálu (kuličkování, ultrazvukové zpevnění povrchu, laserové kalení), obrábění, svařování, povlaky nebo výroba kompozitních materiálů. I přes relativní univerzálnost však musí pro aplikaci metody být splněny základní podmínky jejího použití. Mezi tyto podmínky patří možnost odvrtat materiál a možnost aplikovat tenzometrické růžice. [31]

Kromě metody odvrtávání otvoru se k měření zbytkových napětí využívá také metoda odvrtávání mezikruží anebo metoda hluboké díry. [25]

- **výhody:**
  - polodestruktivní metoda umožňující opakovaná měření
  - umožňuje měření dvouosého napětí
  - malé poškození analyzované součásti
  - široká škála využitelnosti jak pro materiály, tak pro výrobky
  - rychlé, relativně jednoduché a levné
  - jednoznačné určení tahových a tlakových napětí
  - dá se provádět jak v laboratořích, tak přímo v terénu
  - vhodné pro analýzu vnitřních pnutí od 0,1 mm [31]
- **nevýhody**
  - nevhodné pro malé součásti složitých tvarů
  - vysoké nároky na vrtanou díru a kvalitu povrchu
  - nutná úprava součásti po navrtání a měření [25]

### 2.3.3 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody využívají citlivost rychlosti ultrazvuku šířícího se materiálem na vnitřní napjatosti. Rychlost ultrazvukových vln je přímo ovlivněna velikostí a směrem zbytkových napětí. Protože změny rychlosti jsou malé a závislé na struktuře materiálu, měří se často spíše čas signálu. Z důvodu závislosti změn rychlosti na celé dráze ultrazvuku není prostorové rozlišení příliš kvalitní, nicméně metoda měří v celém objemu a hodí se pro rutinní kontroly. [25]

- **výhody**
  - nedestruktivní metoda
  - rychlý proces měření
  - dá se provádět jak v laboratořích, tak přímo v terénu
  - nezávislé na rozměrech výrobku
- **nevýhody**
  - nízké rozlišení
  - vysoká závislost na složení a homogenitě materiálu
  - vysoké nároky na proškolenost obsluhy

### 2.3.4 Magnetická metoda

Tato metoda se dá využít pouze pro feromagnetické materiály. Metoda funguje na principu zachycení Barkhausenova šumu, který vzniká díky působení magnetického pole a jeho úroveň je funkcí napětí v materiálu, mikrostruktury a tvrdosti. [25]

- **výhody**
  - nedestruktivní metoda
  - vysoká přesnost
- **nevýhody**
  - dá se použít pouze na feromagnetické materiály

### 2.3.5 Metoda elektrolytického odleptávání

Tuto metodu řadíme mezi mechanické destruktivní zkoušky. Odleptáním povrchové vrstvy vzorku, ve které jsou obsažena povrchová napětí, dojde k vytvoření rovnováhy v materiálu. [25] [32]

Tento proces spočívá v kontinuálním měření deformace vzorku při postupném odleptávání povrchových vrstev materiálu z analyzované plochy. Smysl a velikost této deformace jsou úměrné rozložení zbytkových napětí v odleptané vrstvě. Deformace vzorku lze vyhodnotit různými metodami. Např. pomocí optického mikroskopu, laserovým skenováním, profilovým měřením. [25] [32]

- **výhody**
  - rychlá metoda
  - přesná metoda – nevnáší se další napětí do zkoumaného vzorku
  - kontinuální měření napětí
- **nevýhody**
  - dá se aplikovat pouze v laboratořích
  - omezená velikost zkoušeného výrobku
  - destruktivní metoda
  - měří pouze jednoosou napjatost
  - nutnost volby správného elektrolytu pro daný materiál

### 3 Praktická část

V experimentální části se práce bude zabývat návrhem přípravku na kuličkování lopatkové součásti turbovrtulového motoru (blisk 1°). Tato součást turbovrtulového motoru je vyráběna společností GE Aviation. V současné době na blisk 1° není aplikovaná žádná dokončovací technologie. Konečnou operací je v současnosti obrábění na pětiosém obráběcím centru. Blisk 1° se vyrábí ze slitiny titanu Ti-6Al-4V. Kvůli vysoké ceně této součásti se společnost GE Aviation rozhodla navrhnout způsob dokončovací operace pro zvýšení životnosti tohoto dílu.



Obrázek 24: Součást rotoru turbovrtulového motoru (blisk 1°)

Jako dokončovací operace pro zpevnění povrchu a tedy i zvýšení životnosti bylo vybráno vibrační kuličkování. Pro tuto operaci bylo autorem práce navrženo několik variant přípravků. Poté, co byla vybrána nejvhodnější varianta, byl tento přípravek vyroben v počtu dvou kusů a využit v praktických zkouškách pokrytí při vibračním kuličkování. Po určení vhodných podmínek pro vibrační zpevnění na blisku 1° bude provedena rozměrová zkouška a vyhodnocení drsnosti povrchu.



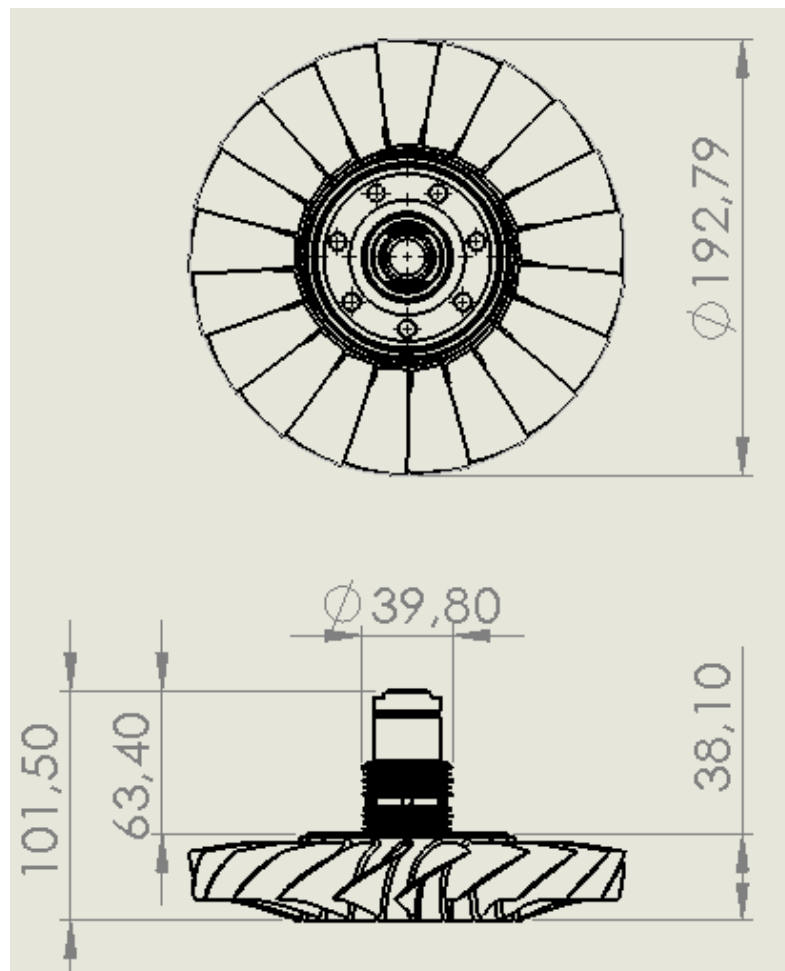
### 3.1 Návrh přípravku

První fází návrhu přípravku byla konzultace s Ing. Zdeňkem Pitrmucem. Na této konzultaci bylo dohodnuto, jaké základní parametry by měl tento přípravek splňovat.

Tyto základní parametry byly:

- jednoduchá montáž
- jednoduchá výroba
- cena
- univerzálnost
- kompatibilita se zařízením pro vibrační kuličkování MA-01-549

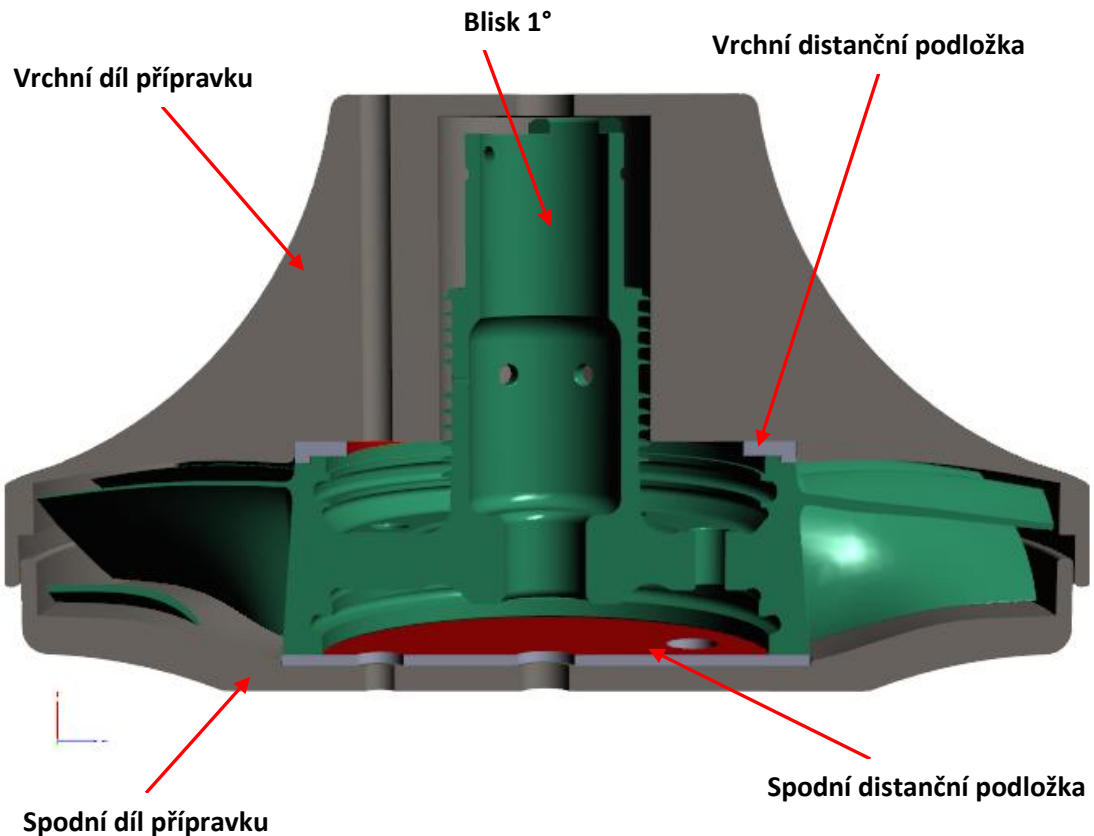
V další fázi bylo důležité analyzovat rozměry blisku 1° a s ohledem na jeho rozměry a tvar kuličkových lopatek zvolit vhodné konstrukční řešení. Jak je z obrázku č. 25 patrné, jedná se o rotační součást o menších rozměrech. Hmotnost blisku 1° je 0,97 kg.



Obrázek 25: Blisk 1° - základní parametry

### 3.1.1 První varianta přípravku

Při návrhu první varianty přípravku bylo přihlédnuto ke všem parametrům, které byly v úvodu stanoveny. Jak je vidět na obrázku č. 26, přípravek je zhotoven ze dvou hlavních rozebíratelných částí a dvou distančních podložek. Jako materiál pro vrchní i spodní díl přípravku byla zvolena libovolná nerezová ocel. Distanční kroužky budou vyrobeny ze silonu.



Obrázek 26: První varianta přípravku

Tato první varianta přípravku se snaží vyřešit co nejvíce konstrukčních problémů a zatím není kladen důraz na vnější konstrukci přípravku.

Přípravek je konstruován tak, že by se měl spodní a vrchní díl přípravku vyrábět z kruhové nerezové tyče o průměru 205 mm. Distanční kroužky by měly být vyrobené z kruhové tyče silonu o průměru 105 mm. Přípravky by se měly vyrobit ve dvou kusech, a proto potřebná délka nerezové tyče je 300 mm. Distanční kroužky se budou vyrábět v různých výškách, aby bylo zajištěno, že kuličky umístěné v lopatkovém prostoru nebudou moct probíhat pod hranami lopatek nebo naopak se zvětšující se distancí se

zaručí jejich bezproblémový průchod. Jelikož optimální velikost těchto distancí bude zjištěna až experimentálně, zvolena tedy byla délka silonového polotovaru 500 mm.

Upevnění přípravku k vibračnímu stroji bude zajištěno pomocí závitové tyče, která se protáhne středem přípravku. Spojení vrchního a spodního dílu přípravku bude realizováno pomocí šroubů M6.

Tento návrh nakonec nebyl vybrán kvůli ceně polotovaru a složitosti obrábění takto velkých dílů. Z toho důvodu byl návrh dále upravován a změněn ve variantu návrhu č. 2.

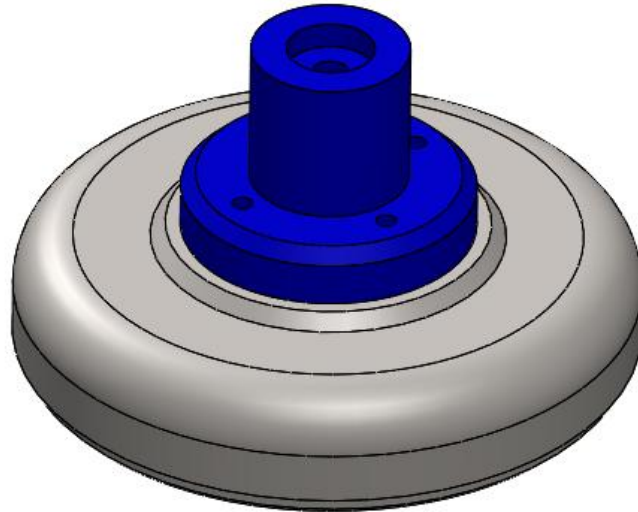
Vzhledem k tomu, že tento návrh nebyl vybrán jako finální, nebude se dále tato práce věnovat jeho popisu. Veškeré konstrukční řešení bude popsáno až u finální varianty návrhu.

### **3.1.2 Druhá varianta přípravku**

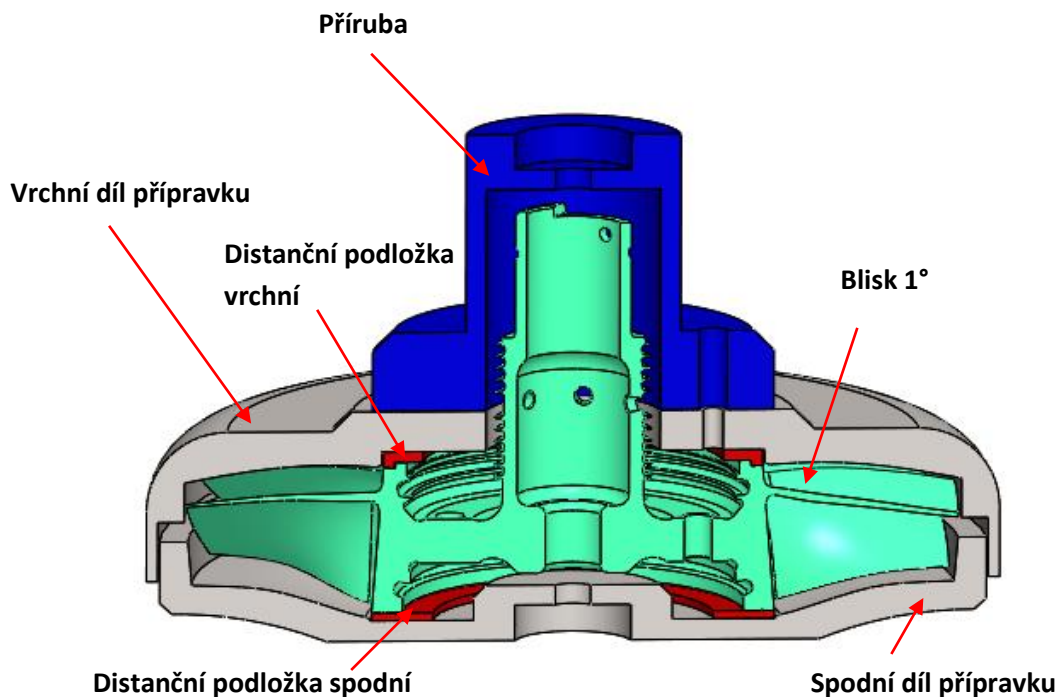
Při návrhu této varianty byly odstraněny veškeré nedostatky z předchozího návrhu a byla vymyšlena další vylepšení, která zvyšují univerzálnost tohoto přípravku. Na univerzálnost byl přitom kladen velký důraz a to především z toho důvodu, že nebylo před zahájením experimentu jasné, jak se budou v tomto přípravku kuličky při vibračním zpevňování chovat. Bylo tedy zapotřebí navrhnout takový přípravek, který bude možné v průběhu experimentu operativně přizpůsobovat podle zjištěných skutečností.

#### **3.1.2.1 Konstrukční vylepšení přípravku**

Jeden z největších nedostatků předchozí varianty přípravku se nacházel v horní části. Tato část byla navržena z jednoho kusu oceli, a tak by muselo dojít k velkému úběru materiálu. Jak je patrné z obrázku č. 27, byla tato horní část přípravku rozdělena na dvě části. Na přírubu a vrchní díl přípravku. Tato příruba je připevněná k vrchnímu dílu přípravku pomocí čtyř šroubů M6X25.



Obrázek 27: Příruba s vrchním dílem přípravku



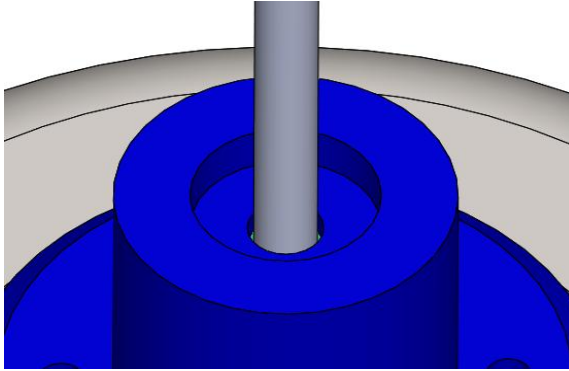
Obrázek 28: Druhá varianta přípravku

Další výrazné zjednodušení zaznamenal přípravek v oblasti upínání k vibračnímu zařízení horní a spodní části k sobě poté, co se do přípravku vloží blisk 1° a uzavře se.

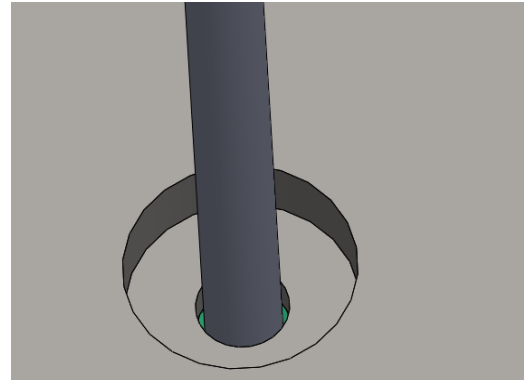
### 3.1.2.1.1 Konstrukce „domečků“

Předchozí varianta přípravku počítala s tím, že pro přichycení přípravku k vibračnímu zařízení bude sloužit závitová tyč protažená osou celého přípravku a stažení přípravku se bude realizovat pomocí samostatných šroubů. V této variantě však zůstala pouze

závitová tyč. Toto bylo umožněno tím, že byly přidány do příruby a do spodní části přípravku „domečky“ na matice. Výhoda těchto „domečků“ spočívá v tom, že se do nich schová matice, která stáhne celý přípravek a zároveň nepřekáží v tom, aby mohl být přípravek upnutý do kuličkovacího zařízení. Tyto „domečky“ jsou vidět v detailu na obrázku č. 29 a č. 30.



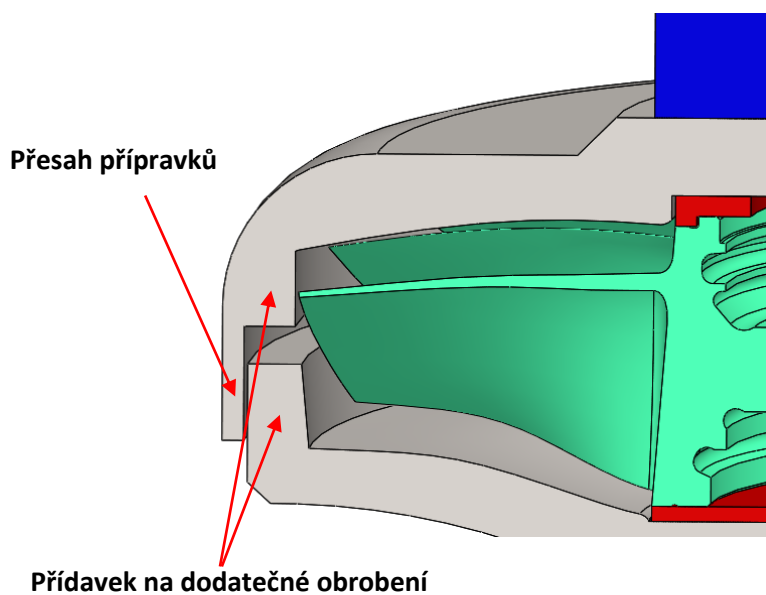
Obrázek 29: Detail horního „domečku“



Obrázek 30: Detail spodního „domečku“

### 3.1.2.1.2 *Přídavek na dodatečné obrábění a přesah dílů*

Mezi další konstrukční vylepšení této varianty přípravku patří ponechání přídavku na dodatečné obrábění na vnitřní straně přípravku a prodloužení přesahu horní části přípravku přes spodní část. Tato vylepšení jsou zvýrazněná na obrázku č. 31.



Obrázek 31: Detail přídavku na obrábění a přesahu přípravků

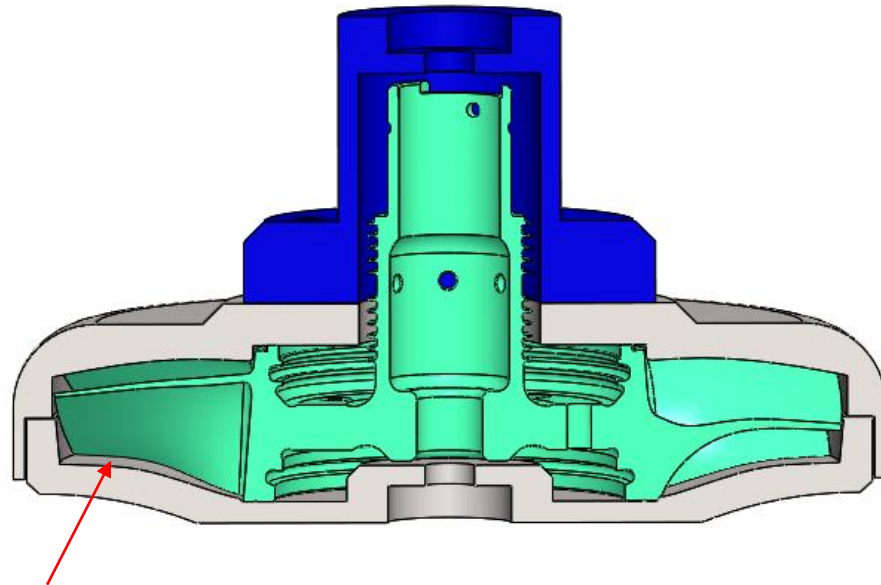
Přídavek pro dodatečné obrábění přípravku byl ponechán jak na spodním díle přípravku, tak na vrchním. Velikost přídavku je 8 mm na průměru. Význam tohoto přídavku spočívá v tom, že před zahájením testovací části nebylo zcela jisté, zda se v průběhu zkoušek neukáže potřeba volného pohybu kuliček po celém obvodu blisku 1°. V průběhu testování se tento přídavek ukázal jako velice dobrý konstrukční nápad.

Další a neméně důležitým konstrukčním vylepšením je zvětšení přesahu horní části přípravku přes spodní část. Tento přesah byl zvětšen hlavně z toho důvodu, aby bylo možné otestovat různé velikosti distančních podložek.

Všechny tyto přídavky mají poměrně dost velký vliv na hmotnost celého přípravku. Avšak s ohledem na hlavní parametr, (univerzálnost) který byl určen, je zvýšení váhy přijatelné.

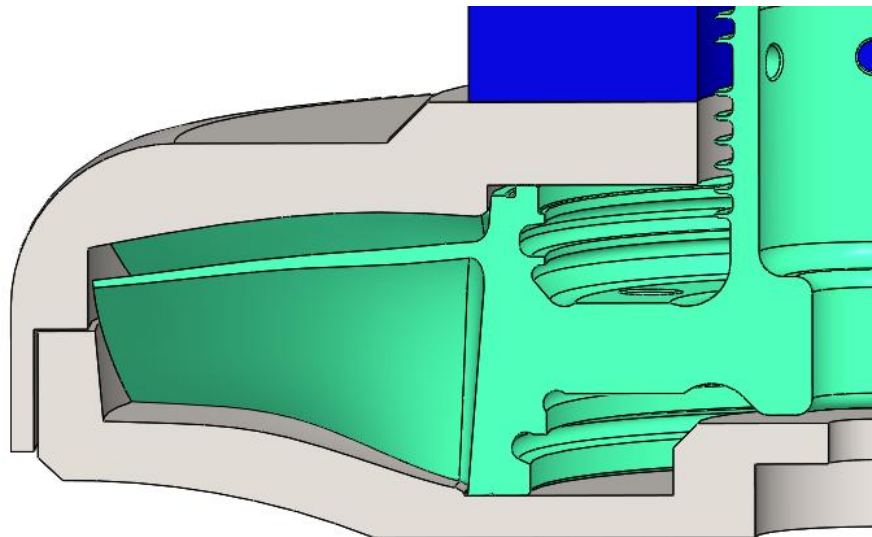
### ***3.1.2.1.3 Obecné tvarové plochy v přípravku***

Konstrukční řešení spodního i vrchního dílu si také vyžádalo využití obecných tvarových ploch pod lopatkami blisku 1°. Jak je z obrázku č. 32 a č. 33 vidět, pokud se nepoužijí v přípravku distanční podložky, tak lopatky blisku 1° přiléhají k těmto plochám. Mezi tvarovou plochou přípravku a lopatky byla ponechána mezera 0,2 mm. Další význam této tvarové plochy je v tom, že při vkládání horních i spodních distančních podložek bude zajištěné to, že mezera ve všech místech mezi přípravkem a lopatkami bude vždy stejná. Toto je důležité hlavně z toho důvodu, že při zvětšování distancí budou kuličky procházet nebo neprocházet vždy po celé ploše, a tak nemůže dojít k různým nerovnoměrným výsledkům zpevnění povrchu na obvodu.



**Obecná tvarová plocha**

**Obrázek 32: Sestava přípravku a blisku 1° bez distančních podložek**



**Obrázek 33: Detail obecné tvarové plochy**

Tvarové plochy na obou dílech přípravku však poměrně dost komplikují obrábění. Pro obrobení těchto ploch je zapotřebí využití CAM softwaru anebo obrobení pomocí kontury. Pokud by se v průběhu testování ukázalo, že nejlepší výsledky přinese kuličkování s velkými distancemi, doporučily by se pro výrobu dalších přípravků tyto obecné tvarové plochy aproximovat geometrickými tvary. Díky aproximaci dojde k zjednodušení výroby.

### 3.1.2.2 Hmotnost přípravku

Při řešení konstrukčního návrhu přípravku pro vibrační kuličkování bylo velice důležité dodržet optimální hmotnost přípravku. Tato hmotnost byla dána parametry vibračního zařízení, kterým disponuje firma GE Aviation. Zařízení je určeno ke kuličkování dvou součástí najednou a celkové zatížení rámu vibračního zařízení by nemělo přesáhnout 17,5 kg.

Z tohoto důvodu byl přípravek navržen tak, aby hmotnost jednoho přípravku s vloženým bliskem 1 ° a 100 ml kuliček byla 8,45 kg. Jak je patrné z tabulky č. 9, tak se tuto hmotnost podařilo s drobnou odchylkou dodržet.

Tabulka 9: Hmotnosti jednotlivých dílů přípravku

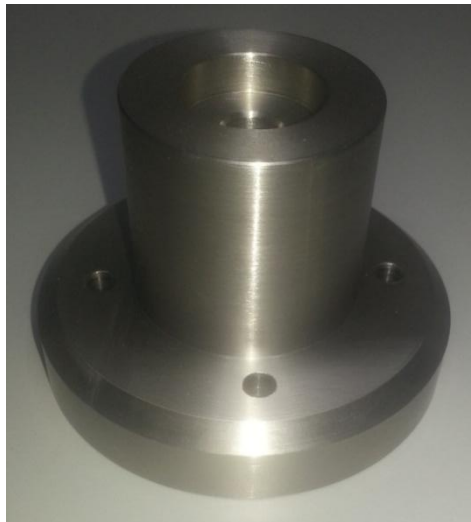
Název dílu	Hmotnost dílu [kg]
Příruba	1,12
Vrchní díl přípravku	3,62
Spodní díl přípravku	2,4
Blisk 1°	0,97
Součet hmotností	8,11

## 3.2 Výroba přípravku

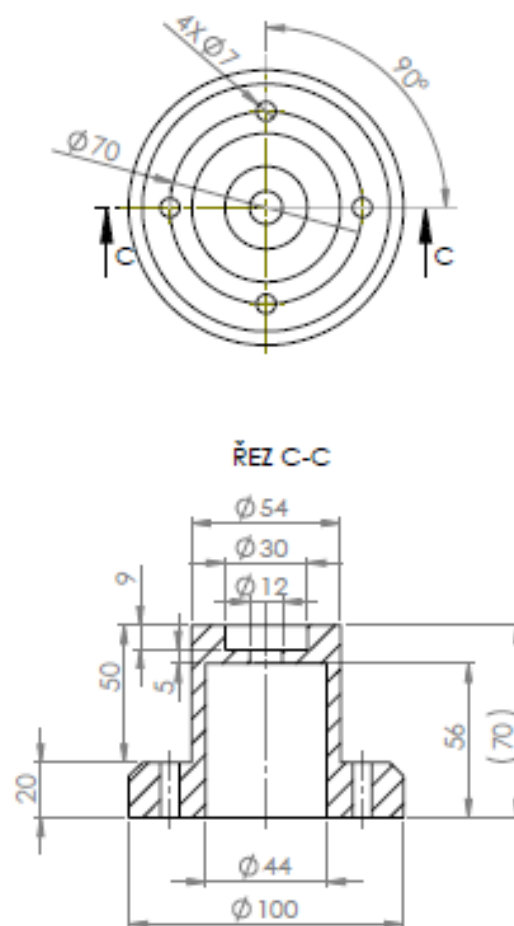
Před zahájením výroby přípravku byly zvažovány dvě možnosti, a to zda výrobu zadat externí společnosti anebo výrobu ponechat na autorovi této práce, který měl k dispozici školní dílny.

V první fázi autor poptal několik firem, zda by byly ochotné tento přípravek vyrobit. Rozhodujícím kritériem pro autora práce byl především čas dodání přípravku, a také cena. Z odpovědi několika firem bylo jasné, že není reálné získat hotový přípravek z kooperace dříve jak za 7 týdnů. Z tohoto důvodu bylo nutné tento přípravek vyrobit v dílnách FS ČVUT. K výrobě byl využit NC soustruh a konvenční soustruh. Na NC soustruhu byly obrobena nerezové díly a na konvenčním soustruhu byly vyrobeny distanční podložky ze silonu. Jednotlivé obrobené části přípravku je možné vidět na obrázcích č. 34 až 39.





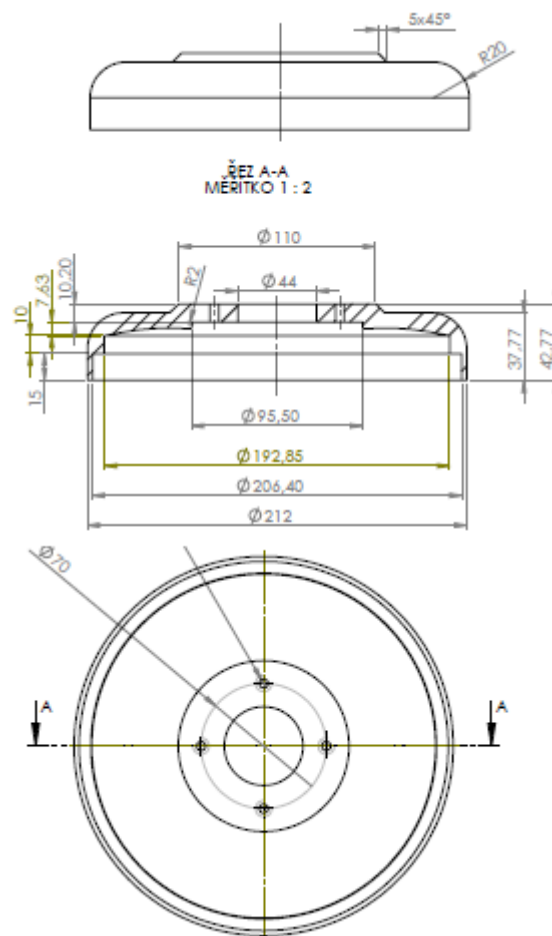
Obrázek 34: Obrobek – příruba



Obrázek 35: Základní rozměry příruby



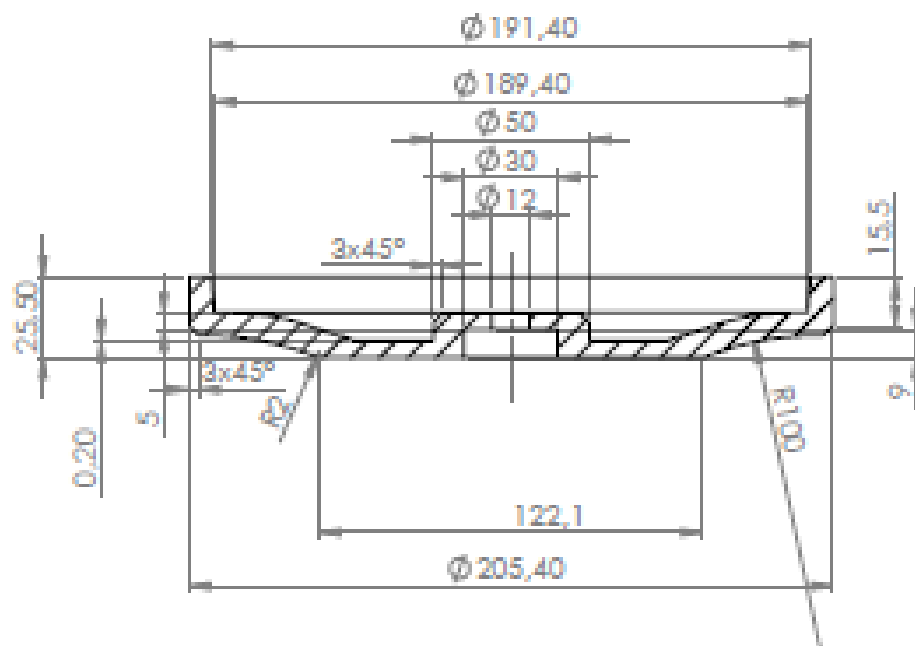
Obrázek 36: Obrobek – vrchní díl přípravku



Obrázek 37: Základní rozměry vrchního dílu přípravku

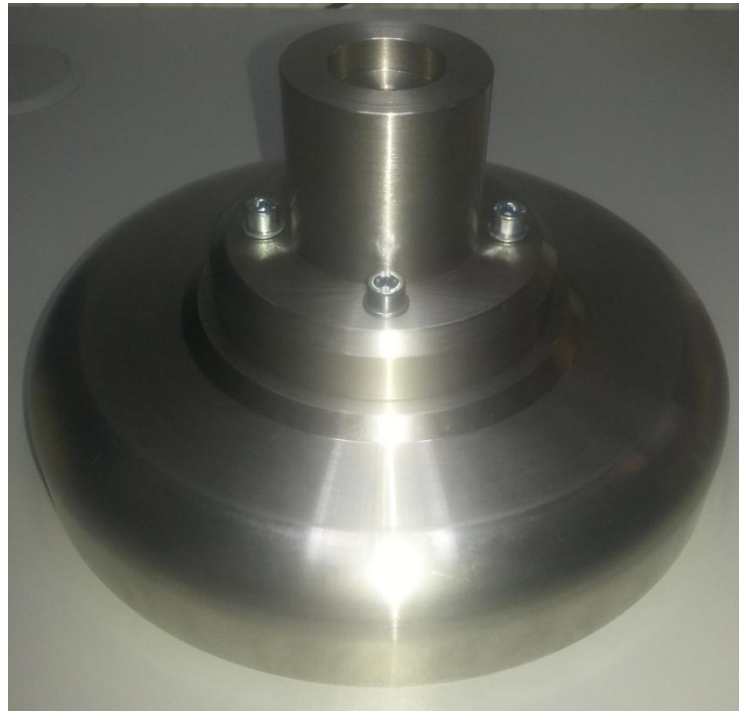


Obrázek 38: Obrobek – spodní díl přípravku



Obrázek 39: Základní rozměry spodního dílu přípravku

Po obrobení jednotlivých částí přípravku bylo zapotřebí spojit horní část přípravku s přírubou. Toto spojení je realizováno pomocí čtyř šroubů M6x25. Spojení je vidět na obrázku č. 40. Celý tento přípravek byl vyroben v počtu dvou kusů.



Obrázek 40: Spojení příruby a horní části přípravku

### 3.3 Zpevnění povrchu kuličkováním

Po navržení vhodného přípravku na kuličkování se začala realizovat praktická zkouška. K této zkoušce bylo zapotřebí nejprve nabarvit blisk 1°. Barva se na blisk 1° aplikuje z toho důvodu, aby bylo možné pozorovat, kam dopadají kuličky. Dalším krokem je usazení blisku 1° do přípravku a experimentální zjištění:

- nejvhodnější velikosti kuliček
- velikosti distančních podložek
- potřebné délky kuličkování

#### 3.3.1 Barvení blisku 1°

Před zahájením experimentu nebylo zřejmé, zda se barva z blisku 1° odstraní nebo bude pouze vykazovat stopy po dopadu kuliček. Z toho důvodu byla vybrána bílá barva. Při dopadání kuliček na blisk 1° došlo k jejich zašpinění od barvy a také k jejich deformaci. S ohledem na dobrou soudržnost barvy s bliskem 1° byla pro experiment vybrána matná bílá akrylová barva ve spreji. Tato barva k blisku 1° velice dobře přilnula ve větší vrstvě. Vzhledem k její pružnosti také vydržela větší intenzitu zpevňování.



Obrázek 41: Barvení blisku 1°

K testování byly k dispozici od firmy GE Aviation tři blisky 1°. Tyto blisky 1° byly vyřazeny z již používaných motorů, a to z důvodu jejich mechanického poškození. Před aplikací barvy bylo nejprve nutné tyto díly zbavit nečistot a důkladně je odmastit. K odmaštění byl použit toluen. Po odmaštění byly blisky 1° očištěny ještě stlačeným vzduchem. Když byla příprava na stříkání hotová, přistoupilo se k samotnému barvení. Tento proces je vidět na obrázku č. 41.

Po nanesení barvy bylo zapotřebí nechat zaschnout barvu. Doporučení výrobce barvy bylo, aby se nechala nanesená barva schnout nejméně 24 hodin. Tento postup byl aplikován na všech třech bliscích 1°. Nabarvený blisk 1° je vidět na obrázku č. 42.



Obrázek 42: Nabarvený blisk 1°

### 3.3.2 Volba kuliček

Pro experiment byly zvoleny ložiskové kuličky o průměru 2,99 mm a 4,77 mm. Tyto kuličky jsou vyrobeny z nerezové oceli. Kuličky se rovnoměrně rozprostřou v přípravku a budou se moci volně pohybovat mezi jednotlivými kanály blisku 1°. V průběhu experimentu bude zapotřebí zjistit, zda jsou pro zpevnění povrchu výhodnější kuličky o větším, či menším průměru. Dále je také nutné stanovit potřebné množství těchto kuliček. Z praktických důvodů byly kuličky odměřovány v odměrném válci, proto bude jejich množství uváděno v ml. Pro první experiment kuličky o průměru 2,99 mm a objemu 100 ml.

### 3.3.3 Volba distančních podložek

Distanční podložky jsou v přípravku umístěné proto, aby se dala regulovat vzdálenost kuličkových lopatek od přípravku. To je důležité hlavně z toho důvodu, aby se zajistilo, že rozkmitané kuličky budou na přípravek dopadat s dostatečnou kinetickou energií. Další důvod je ten, že pokud by lopatka přiléhala k přípravku, kulička o jakémkoliv průměru by nebyla schopna dostat se až k hraně lopatky a to díky svému kulatému tvaru. Lopatky by tedy zůstaly v těchto místech nezpevněné.

Dalším úkolem těchto podložek je vystředit blisk  $1^\circ$  v přípravku. Za tímto účelem byla ve všech podložkách vysoustružena osazení.

Na začátku bylo na soustruhu připraveno šest distančních podložek. Jednalo se o podložky spodní a horní. Obě tyto distanční podložky byly vyrobeny ve třech výškách.

Tabulka 10: Velikosti distančních podložek

	Výška distanční podložky [mm]
1	2
2	4
3	6

### 3.3.4 Zařízení pro vibrační kuličkování

Kuličkování bylo provedeno na jednoúčelovém vibračním zařízení, které je využíváno ve společnosti GE Aviation. V současné době je toto zařízení využíváno pro vibrační kuličkování jiných částí leteckého motoru. Na obrázku č. 43 je vibrační zařízení MA-01-549 s lineárním vibračním pohonem typu AOLP-B-10. Na tomto zařízení je možné kuličkovat kola v tandemu (dvě na jednom rámu). Tento způsob montáže se využívá k tomu, aby byl celý rám vyvážený.



Obrázek 43: Vibrační zařízení MA-01-549



Obrázek 44: Montáž přípravků na rám v tandemu

## 3.4 Experiment

Samotný experiment probíhal v laboratoři společnosti GE Aviation v Praze Letňanech. GE Aviation nám poskytlo svou laboratoř v odpoledních hodinách, kdy vibrační zařízení není využíváno ve výrobním programu. Toto zařízení se v současné době využívá na kuličkování pro zpevnění povrchu radiálního kola turbokompresoru.

### 3.4.1 Podmínky zkoušek

Na vibračním zařízení je nastavena frekvence kmitání 27,8 Hz. Regulačním prvkem je rozkmit rámu. Regulace kmitání se provádí v procentuální regulaci motoru tak, aby se dosáhlo amplitudy výkmitu 5,1 mm. K dosažení výkmitu je využívána klínová stupnice, která se v různých režimech výkonu motoru potkává v bodech představujících aktuální výkmit. Využito bylo 80 až 82 % rozkmitu.

Součástí vibračního zařízení je i software, který je propojený s tiskárnou, která poskytuje grafický výstup jednotlivých parametrů v průběhu testů. Příklad tohoto výstupu je zobrazen v tabulce č. 11.



Tabulka 11: Grafický výstup jednotlivých parametrů při vibračním kuličkování

Zhutňovací proces					
Čas [min]	Rozkmit [%]	Frekvence [Hz]	Čas [min]	Rozkmit [%]	Frekvence [Hz]
001	080	27,83	002	081	27,84
003	081	27,82	004	082	27,83
005	080	27,82	006	082	27,82
007	081	27,84	008	083	27,83
009	083	27,85	010	082	27,84

### 3.4.2 Sestavení přípravku

Sestavení přípravku pro vibrační zpevnění povrchu blisku 1° je velice jednoduché. Jak je vidět na obrázku č. 45, nejprve si připravíme spodní díl přípravku.



Obrázek 45: Spodní díl přípravku

Do spodního dílu přípravku dále vložíme distanční podložku, jak je vidět na obrázku č. 46.



Obrázek 46: Spodní díl přípravku se spodní distanční podložkou

Když je připravená celá spodní část, umístí se do ní blisk 1°. Blisk 1° zapadne do středící drážky v silonovém distančním kroužku. Musí se také dbát na opatrné vložení, aby nedošlo k mechanickému poškození blisku 1°. Vložený blisk 1° je vidět na obrázku č. 47.



Obrázek 47: Vložení blisku 1° do sestavy

Na blisk 1° se navlékne destička, která zabrání tomu, že se kuličky nedostanou do střední části přípravku, zatímco jsou kuličky sypány do prostoru přípravku. V této části přípravku je přítomnost kuliček nežádoucí. Dále se v odměrném válci odměří potřebný objem kuliček, který je následně nasypán mezi lopatky blisku 1°. Umístění destičky a nasypání kuliček do sestavy je vidět na obrázku č. 48.



Obrázek 48: Nasypání kuliček do sestavy

Po nasypání předem určeného množství kuliček do přípravku je odebrána podložka, která bránila v tom, aby se kuličky dostaly do nežádoucích prostor. Celá tato sestava se přikryje vrchní částí přípravku. Celou touto sestavou je pak provlíknuta závitová tyč. Na oba konce závitové tyče byly vloženy podložky a našroubovány matice. K dotažení matic byly použity dva trubkové klíče. Tím se celá sestava stáhne a je připravena na připevnění do kuličkovacího zařízení. Celý tento popsaný postup je znázorněn na obrázku č. 49.



Obrázek 49: Sestavený a stažený přípravek

### 3.4.3 Vibrační zpevnění – volba vhodných distancí

Jako první se testovala vhodná výška distančních podložek. Do jednoho přípravku se umístila spodní distanční podložka o výšce 6 mm a do druhého přípravku podložka o velikosti 4 mm. Přípravky byly umístěny do zařízení pro vibrační kuličkování a zde se ponechaly oba nabarvené blisky  $1^\circ$  kuličkovat 30 minut. Po uplynutí 30 minut se oba blisky  $1^\circ$  z přípravku vyndaly a vizuálně se porovnaly. Zkoumalo se, zda je pokrytí dopadajícími kuličkami lepší u vyšší nebo nižší distanční podložky. Do obou přípravků bylo nasypáno 80 ml kuliček s průměrem 3 mm.

Pro potřeby této práce budou dále zmiňovány přední a zadní strany lopatek. Přední strana lopatky je brána ve směru proudění a zadní strana proti směru proudění.

#### 3.4.3.1 *Distance o výšce 4 a 6 mm*

Po vyndání blisků  $1^\circ$  z přípravků je vidět na první pohled rozdíl v plochách, z kterých byla odstraněna nastříkaná barva. U distancí o výšce 4 mm je plocha, kde je odstraněná barva na náběžných hranách lopatek průměrně 40 %. U blisku  $1^\circ$ , kde byla

použita distanční podložka s výškou 6 mm, je průměrně z lopatek na předních stranách odstraněno 50 % barvy.

Barva se z obou blisků  $1^\circ$  začíná okuličkovávat od krajů lopatek směrem k patám lopatek. U pat lopatek je výsledek kuličkování po třiceti minutách u obou distancí nedostatečný. Tyto dva blisky  $1^\circ$  jsou vidět k porovnání na obrázcích č. 50 a 51.

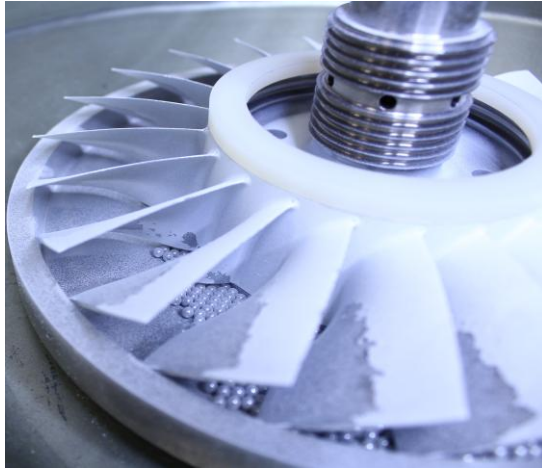


Obrázek 50: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, přední strana

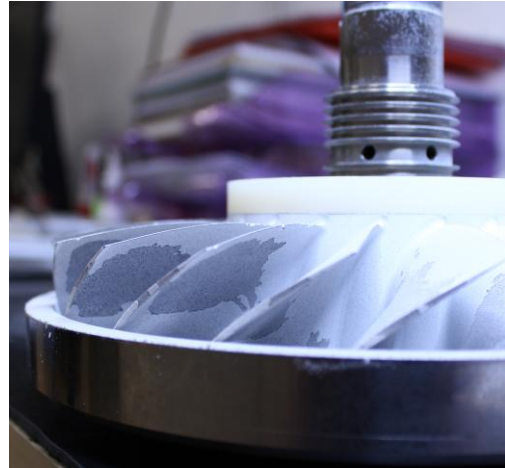


Obrázek 51: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, přední strana

Rozdíl v odstranění barvy z blisků  $1^\circ$  s různými distancemi je ještě patrnější na zadních stranách lopatek. Zadní strany lopatek jsou vidět na obrázcích č. 52 a 53. Zatímco v sestavě s nižší distancí je průměrné okuličkování plochy lopatky méně než 10 %, tak u sestavy s větší distancí je okuličkována plocha ze 40 % lopatky. U obou distancí se i u odtokové hrany výsledek kuličkování zhoršuje směrem k patám lopatek.



Obrázek 52: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, zadní strana



Obrázek 53: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, zadní strana

Z těchto výsledků je na první pohled patrné, že vyšší distanční podložky budou v tomto případě vhodnější pro vibrační zpevnění blisku  $1^\circ$ .

Pro další pokračování experimentu byly přípravky ve vibračním zařízení otočeny o  $180^\circ$ . Toto otočení je důležité proto, že doskok kuliček není natolik velký, aby kuličky zvládly okuličkovat celý blisk  $1^\circ$  z jedné polohy.

Postup sestavování celé sestavy je stejný, jako již bylo popsáno v předchozí kapitole. Doba kuličkování po otočení byla také 30 minut a množství kuliček bylo též stejné. Z obrázků č. 54 a 55 je vidět, že po otočení přípravku o  $180^\circ$  došlo k okuličkování lopatek blisku  $1^\circ$  z druhé strany. Po proměření okuličkovaných ploch se zjistilo, že průměr odbarvené plochy přední strany s využitím nižší distance je 60 %, s tím že odbarvené plochy směrem k patám lopatek stále ubývá. Lépe je na tom blisk  $1^\circ$ , u kterého byla použita vyšší distance. Zde je průměrně odbarveno 70 % povrchu předních stran lopatek.

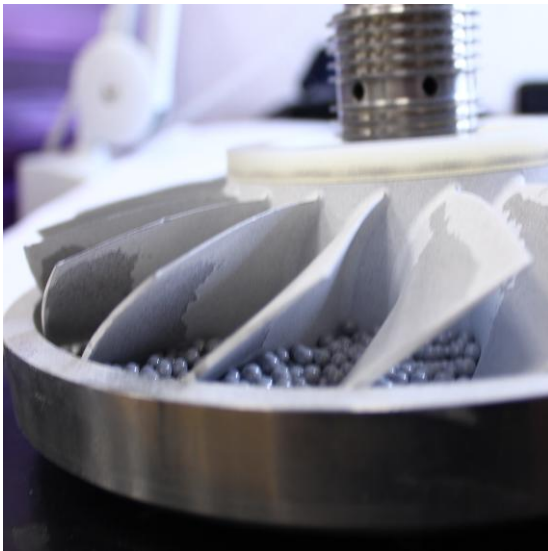


Obrázek 54: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, přední strana, otočení o 180°



Obrázek 55: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, přední strana, otočení o 180°

Poměrně velký posun v odbarvení lopatek je pozorovatelný na zadních stranách lopatek. Zatímco u nižší distance je průměrné odbarvení lopatky 20 %, tak u vyšší distance toto odbarvení činí průměrně 50 %. Tyto výsledky jsou vidět na obrázcích č. 56 a 57.



Obrázek 56: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, zadní strana, otočení o 180°



Obrázek 57: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, zadní strana, otočení o 180°

Celý tento proces byl ještě jednou zopakován. Procentuální odbarvení se u obou sestav ještě zvětšilo, avšak jejich poměr byl zachován. Z toho důvodu je usuzováno, že lepší bude zabývat se v dalších experimentech vyššími distančními podložkami.

Další poznatek, který přinesl tento první experiment je, že množství kuliček nasypaných v přípravku je příliš velké, a tak dochází k mnoha srážkám mezi nimi a tím i k utlumení jejich kmitání. Z toho důvodu bude při dalším měření používáno v jedné dávce méně kuliček. Objem kuliček pro další experiment byl stanoven na 40 ml.

Dále bylo pozorováno, že barva, která byla v procesu kuličkování odstraněna z povrchu blisku 1°, ulpívá na kuličkách, povrchu přípravku a také na blisku 1°. Tato barva má tlumící účinky na proces kuličkování, a proto bylo doporučeno pro další testy po každém cyklu umýt přípravek acetonem, vyprat kuličky v acetonu a stlačeným vzduchem odstranit prach z barvy z blisku 1°.

#### **3.4.3.2 Nejvhodnější distanční podložky**

Při dalším určování nejvhodnější výšky distančních podložek byla zvolena výška podložky 12 mm. Do přípravku bylo nasypáno 40 ml kuliček o průměru 3 mm. Blisk 1° byl kuličkován z každé strany 60 minut, přičemž byl proces každých 10 minut přerušen, aby mohlo dojít k odstranění prachu z barvy, který tlumí doskok kuliček.

Po 120 minutách byl blisk 1° vyjmut z přípravku. Ukázalo se, že 12mm podložky vykazují zlepšení pokrytí povrchu blisku 1° při kuličkování. Z obrázku č. 58 je vidět zlepšení oproti předchozím zkouškám s nižšími distancemi. Po proměření bylo zjištěno, že pokrytí na předních stranách lopatek je téměř 80 %. Tento výsledek je velice příznivý a je vidět, že zvětšení distancí mělo příznivý účinek na celý proces.





Obrázek 58: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, přední strana

Při vyhodnocování pokrytí je potřeba se také podívat na zadní stranu lopatek. Na zadní straně došlo k určitému zlepšení pokrytí. Avšak z obrázku č. 59 je vidět, že pokrytí není tak velké jako na náběžné straně lopatky. Po změření byla zjištěna hodnota procentuálního pokrytí 70 %.



Obrázek 59: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, zadní strana

Další důležitou částí pokrytí při kuličkování je rádius u paty lopatky. Z obrázku č. 60 je vidět, že rádius je stále obarven. Z toho vyplývá, že kuličky na tento rádius nedopadají s takovou energií a četností jako na samotné lopatky. Navzdory tomu, že rádius je stále pokryt barvou, tak jsou na něm také patrné stopy po dopadu kuliček.



Obrázek 60: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius u paty lopatek

V průběhu dalších testů byly distanční podložky zvětšeny až na 15 mm. Při tomto zvětšení distancí se však ukázalo, že kuličky už nemají dostatečně velký rozkmit na to, aby byly schopné blisk  $1^\circ$  okuličkovat. Procentuální pokrytí se tedy u všech vyšších distancí už jen zmenšovalo, a tak bylo vyhodnoceno, že pro další testy bude nejlepší použít distanční podložky o výšce 12 mm. S těmito distancemi blisk  $1^\circ$  vykazoval největší procentuální pokrytí.

### 3.4.4 Určení vhodné velikosti kuliček

Po určení dvou základních parametrů důležitých pro návrh technologie vibračního kuličkování blisku  $1^\circ$  zbývá určit ještě poslední parametr. Parametrem je velikost kuliček, které budou použity v tomto procesu. K dispozici pro testy jsou ocelové ložiskové kuličky o průměru 3 a 4,77 mm.

#### 3.4.4.1 Kuličkování s kuličkami o průměru 3 mm

Pro toto měření byly použity kuličky o průměru 3 mm a jejich objem nasypáný do sestavy byl 40 ml. Sestavení přípravku zůstává stejné, jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách. Cyklus vibračního zpevnění byl spuštěn na 60 minut z každé strany s tím, že každých 10 minut je cyklus přerušen a je odstraněna okuličkováná barva.

#### 3.4.4.2 Kuličkování s kuličkami o průměru 4,77 mm

Při tomto měření jsou nahrazeny třímilimetrové ložiskové kuličky kuličkami o průměru 4,77 mm. Ostatní parametry zkoušky se nemění. Před zahájením testování těchto kuliček už je však jasné, že nebude okuličkován rádius u paty lopatek. Tento rádius má menší poloměr než je poloměr testovaných kuliček. Autor této diplomové práce se přesto domnívá, že pokrytí těmito kuličkami by mohlo být větší než u menších kuliček. Tato domněnka je založená na tom, že větší kuličky budou mít větší kinetickou energii.

Z obrázku č. 61 je vidět, že při použití kuliček o průměru 4,77 mm došlo k pokrytí úplně celé přední strany lopatky. Toto měření vykazuje nejlepší pokrytí ze všech měření, která byla provedena. Pokrytí je o 20 % lepší, než bylo dosaženo v nejlepším doposud provedeném testu.

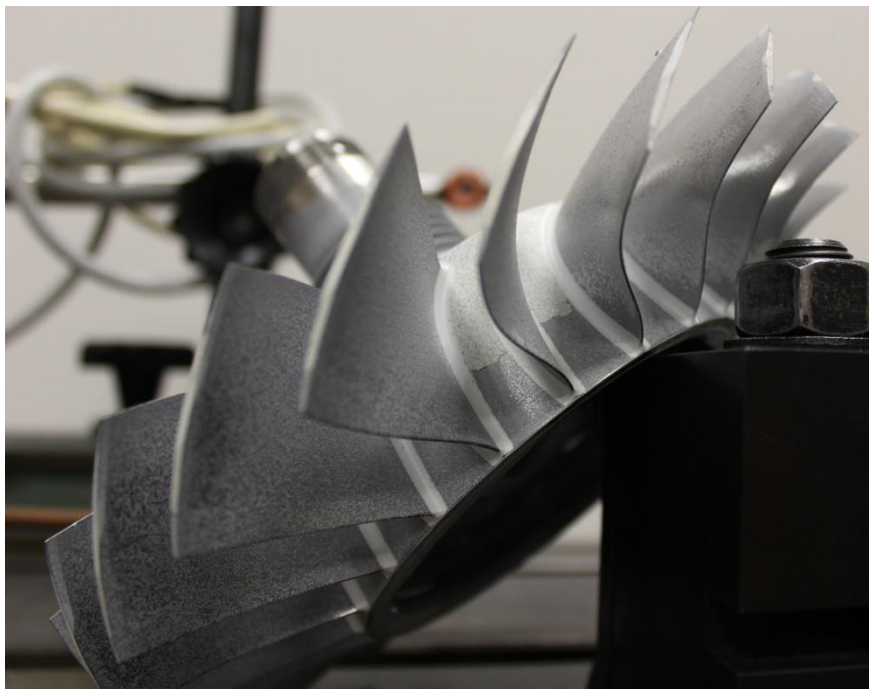


Obrázek 61: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius přední strana

Stejně dobrých výsledků jako z přední strany lopatek bylo dosaženo i na straně zadní. S tím, že při předchozích testech dosahovala tato strana pokrytí maximálně 70 %. Z obrázku č. 62 je zřejmé, že i na této straně došlo k 100% pokrytí. Domněnka, že po kuličkování s většími kuličkami se dosáhne lepších výsledků, se potvrdila.



Obrázek 62: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius zadní strana



Obrázek 63: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius u paty lopatek

#### 3.4.4.3 Výsledky pokrytí kuličkováním

Výsledky z experimentu potvrdily předpoklad, že při použití kuliček o větším průměru dojde k lepšímu pokrytí povrchu lopatek dopadajícími kuličkami. Při použití kuliček o průměru 6,77 mm je toto pokrytí 100 % jak z náběžné, tak z odtokové strany lopatek. Pokrytí je nulové u patního rádiusu. Na tento rádius se kuličky nedostanou díky svému většímu poloměru, než je poloměr patního rádiusu. Při použití menších kuliček došlo k podstatně menšímu pokrytí lopatek dopadajícími kuličkami. Zvláště neuspokojivého pokrytí bylo dosaženo při použití kuliček o průměru 3 mm na odtokové straně lopatky.

Pro praktické využití by autor práce doporučil použít kuličky s průměrem 6,77 mm i přes nedostatky v pokrytí rádiusu. Dále se z experimentu podařilo získat nejvhodnější dobu, po kterou je dobré nechat blisk 1° vibračně kuličkovat. Tato doba byla stanovena na 60 minut. Po uplynutí 60 minut blisk 1° již nejví zlepšení v pokrytí povrchu.

#### 3.4.5 Kuličkování nových dílů

Po určení všech parametrů pro technologii zpevnění povrchu vibračním kuličkováním bylo přistoupeno ke kuličkování dílů, které už nebudou barvené a nebude se jednat o vyřazené poškozené díly, ale o díly, které byly autorovi práce poskytnuty rovnou z výroby. Jedná se o dva nové blisky 1°. Jeden z těchto blisků 1° bude kuličkován menšími a druhý většími kuličkami. Pro tento postup se autor rozhodl z toho důvodu, že blisky 1° budou po vibračním kuličkování proměřeny na souřadnicovém měřicím stroji od firmy ZEISS. Ten bude mít za úkol zjistit, jestli vlivem kuličkování nedošlo k deformaci lopatek. Předpoklad je takový, že u větších kuliček by tato deformace měla být větší.

V tabulce č. 12 jsou shrnuty veškeré hlavní parametry použité pro vibrační kuličkování nových blisků 1°.

Tabulka 12: Hlavní parametry vibračního kuličkování

	<b>Blisk 1° č. 1</b>	<b>Blisk 1° č. 2</b>
<b>Průměr použitých kuliček</b>	3 mm	4,77 mm
<b>Výška distanční podložky</b>	12 mm	12mm
<b>Objem kuliček</b>	40 ml	40 ml
<b>Doba kuličkování z jedné strany</b>	60 min	60 min
<b>Doba kuličkování z druhé strany</b>	60 min	60 min

Po skončení procesu kuličkování a vyndání blisků 1° z přípravku není ani na jednom blisku 1° vidět žádná deformace pozorovatelná pouhým okem. Díly tedy byly proto z firmy GE převezeny do laboratoří FS ČVUT, kde se podrobily měření na souřadnicovém stroji Prismo od firmy ZEISS.

### 3.5 Měření deformací blisku 1°

Měření blisků 1° bylo provedeno v měrovém středisku firmy ZEISS na FS ČVUT. Toto měrové středisko je vybaveno třemi souřadnicovými stroji. Proměření dílů bylo provedeno na stroji Prismo. Toto zařízení je vidět na obrázku č. 64. Souřadnicové měřící zařízení od firmy ZEISS používá k vyhodnocení naměřených hodnot software Calypso. Změřeny budou oba dva blisky 1°, které byly kuličkovány podle nejlepších parametrů, které vyšly z testování. Blisky 1° byly proměřeny před vibračním kuličkováním a po kuličkování. Hodnoty naměřené před a po kuličkování ukážou, zda při procesu kuličkování dochází k deformaci lopatek blisků 1°.

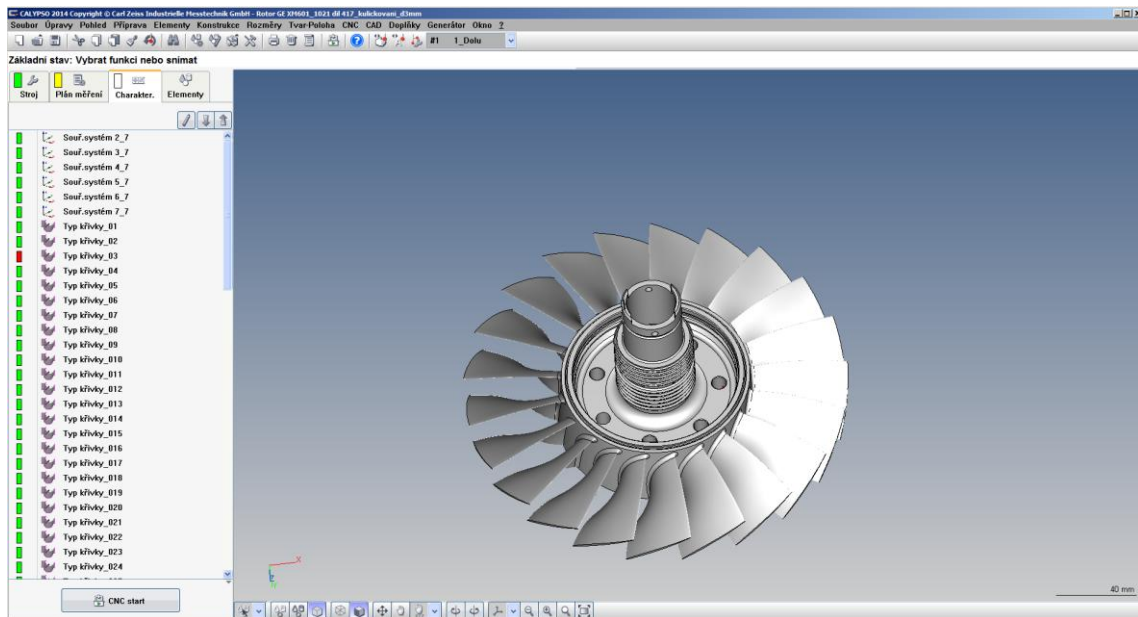


Obrázek 64: ZEISS PRISMO [33]

Toto měření má veliký význam pro to, zda bude tato technologie zpevnění povrchu doporučena pro sériovou výrobu, nebo bude nutné dále upravovat parametry kuličkovacího procesu.

### 3.5.1 Měření blisku 1° kuličovaného kuličkami o průměru 3 mm

V prvním kroku bylo nejprve nutné změřit blisk 1° před kuličkováním. Data z tohoto měření byla zaznamenána a blisk 1° byl poté nakuličkován. Totéž měření bylo provedeno na kuličkováném dílu. Důležitým výsledkem z těchto měření je porovnání hodnot před a po kuličkování. Mezi sledované parametry patří to, zda se lopatky po kuličkování nějakým způsobem nezdeformovaly a zda došlo ke změně tloušťky lopatek.



Obrázek 65: Ukázka grafického rozhraní softwaru Calypso a měřných charakteristik

### 3.5.1.1 Změna tloušťky lopatek

Na blisku  $1^\circ$  je celkem 21 lopatek. Při měření byla proměřována každá třetí lopatka. Na jedné lopatce bylo změřeno sedm tlouštěk. Tato data byla naměřena na blisku  $1^\circ$  před a po kuličkování.

Po provedení měření došlo k jeho vyhodnocení. Celý grafický výstup z měření byl zpracován v softwaru Calypso a přiložen k diplomové práci jako příloha P6 a P7. V tabulce č. 13 jsou zpracována důležitá data k vyhodnocení změny tlouštěk lopatek po kuličkování.

Z této tabulky je velice dobře vidět, že lopatky blisku  $1^\circ$  byly vyrobeny tlustší oproti hodnotě, která byla zjištěna z 3D modelu. Tloušťka lopatek je tedy v průměru o 0,046 mm větší. Dále se z naměřených hodnot může vyhodnotit, jak se změnila tloušťka lopatek po kuličkování. Veškeré kuličkované lopatky vykazují zmenšení svého průřezu. Toto zmenšení průřezu se pohybuje v rozmezí hodnot 0,001 až 0,004 mm. Průměrná hodnota zmenšení průřezu je 0,002 mm.

Zmenšení průřezu lopatek je očekávané. Z naměřených hodnot se však nedá říci, že by v nějaké části lopatky došlo k většímu zmenšení průřezu. Zdá se, že změna průřezu lopatek je zcela náhodná. K zmenšení průřezu lopatek mohlo také dojít v důsledku



zarovnání mikronerovností na jejich povrchu, nebo také mohlo dojít k dotyku měřicí sondy v nižším bodě.

Tabulka 13: Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 3 mm

Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 3 mm						
Číslo lopatky	Výkresová tloušťka lopatek	Blisk 1° před kuličkováním		Blisk 1° po kuličkování		Rozdíl tloušťky lopatek před a po kuličkování
		Skutečná tloušťka lopatek	Rozdíl skutečné a výkresové tloušťky	Skutečná tloušťka lopatek	Rozdíl skutečné a výkresové tloušťky	
1	0,724	0,803	0,079	0,802	0,079	0,001
2	0,724	0,772	0,049	0,771	0,048	0,001
3	0,724	0,778	0,054	0,776	0,053	0,001
4	0,724	0,758	0,034	0,755	0,031	0,003
5	0,724	0,761	0,038	0,758	0,035	0,003
6	0,724	0,766	0,042	0,762	0,039	0,003
7	0,724	0,792	0,068	0,791	0,068	0,001
1	0,700	0,792	0,092	0,792	0,091	0,001
2	0,700	0,759	0,059	0,758	0,058	0,001
3	0,700	0,768	0,068	0,766	0,066	0,002
4	0,700	0,742	0,042	0,740	0,040	0,002
5	0,700	0,742	0,042	0,741	0,041	0,002
6	0,700	0,749	0,049	0,748	0,047	0,002
7	0,700	0,786	0,086	0,784	0,084	0,002
1	0,679	0,769	0,090	0,767	0,088	0,002
2	0,679	0,734	0,055	0,731	0,052	0,002
3	0,679	0,739	0,060	0,738	0,059	0,002
4	0,679	0,720	0,041	0,717	0,037	0,004
5	0,679	0,719	0,040	0,715	0,036	0,004
6	0,679	0,726	0,047	0,723	0,044	0,003
7	0,679	0,757	0,078	0,755	0,076	0,002
1	0,649	0,729	0,080	0,727	0,079	0,001
2	0,649	0,704	0,056	0,701	0,052	0,003
3	0,649	0,712	0,063	0,710	0,061	0,003
4	0,649	0,678	0,030	0,676	0,027	0,002
5	0,649	0,682	0,033	0,679	0,030	0,003
6	0,649	0,691	0,042	0,689	0,040	0,003
7	0,649	0,719	0,070	0,717	0,068	0,002
1	0,578	0,649	0,071	0,647	0,069	0,001
2	0,578	0,622	0,044	0,620	0,043	0,002
3	0,578	0,634	0,056	0,632	0,054	0,002
4	0,578	0,593	0,015	0,592	0,014	0,001
5	0,578	0,601	0,023	0,600	0,022	0,001
6	0,578	0,611	0,033	0,610	0,032	0,001
7	0,578	0,640	0,062	0,638	0,060	0,001
1	1,161	1,229	0,068	1,227	0,067	0,002
2	1,161	1,205	0,045	1,201	0,041	0,004

3	1,161	1,213	0,053	1,210	0,050	0,003
4	1,161	1,186	0,025	1,181	0,020	0,005
5	1,161	1,189	0,029	1,185	0,025	0,004
6	1,161	1,196	0,035	1,192	0,031	0,004
7	1,161	1,223	0,062	1,221	0,061	0,001
1	1,491	1,559	0,067	1,557	0,066	0,002
2	1,491	1,531	0,040	1,529	0,037	0,002
3	1,491	1,543	0,052	1,540	0,049	0,003
4	1,491	1,512	0,021	1,508	0,017	0,004
5	1,491	1,516	0,025	1,511	0,020	0,005
6	1,491	1,525	0,033	1,522	0,030	0,003
7	1,491	1,553	0,062	1,552	0,060	0,002
1	1,031	1,089	0,058	1,086	0,055	0,003
2	1,031	1,070	0,039	1,067	0,036	0,003
3	1,031	1,078	0,047	1,077	0,046	0,001
4	1,031	1,047	0,016	1,043	0,012	0,004
5	1,031	1,049	0,019	1,046	0,015	0,003
6	1,031	1,061	0,030	1,058	0,028	0,003
7	1,031	1,085	0,054	1,083	0,052	0,002
1	1,070	1,093	0,024	1,092	0,022	0,001
2	1,070	1,089	0,019	1,087	0,018	0,002
3	1,070	1,087	0,017	1,086	0,016	0,001
4	1,070	1,051	-0,019	1,049	-0,020	0,001
5	1,070	1,060	-0,009	1,059	-0,011	0,001
6	1,070	1,059	-0,011	1,057	-0,013	0,002
7	1,070	1,087	0,017	1,086	0,016	0,002
1	1,643	1,716	0,073	1,714	0,071	0,002
2	1,643	1,695	0,052	1,692	0,049	0,003
3	1,643	1,701	0,058	1,697	0,054	0,004
4	1,643	1,673	0,030	1,669	0,026	0,004
5	1,643	1,672	0,029	1,668	0,025	0,004
6	1,643	1,678	0,035	1,675	0,032	0,003
7	1,643	1,711	0,068	1,709	0,066	0,002
1	2,016	2,085	0,069	2,083	0,066	0,002
2	2,016	2,074	0,058	2,072	0,055	0,003
3	2,016	2,078	0,061	2,074	0,058	0,003
4	2,016	2,044	0,028	2,042	0,026	0,003
5	2,016	2,047	0,031	2,044	0,028	0,003
6	2,016	2,053	0,037	2,050	0,034	0,003
7	2,016	2,083	0,067	2,081	0,065	0,002
<b>Průměrná odchylka</b>			<b>0,046</b>		<b>0,043</b>	<b>0,002</b>

### 3.5.1.2 Deformace lopatek po kuličkování kuličkami o průměru 3 mm

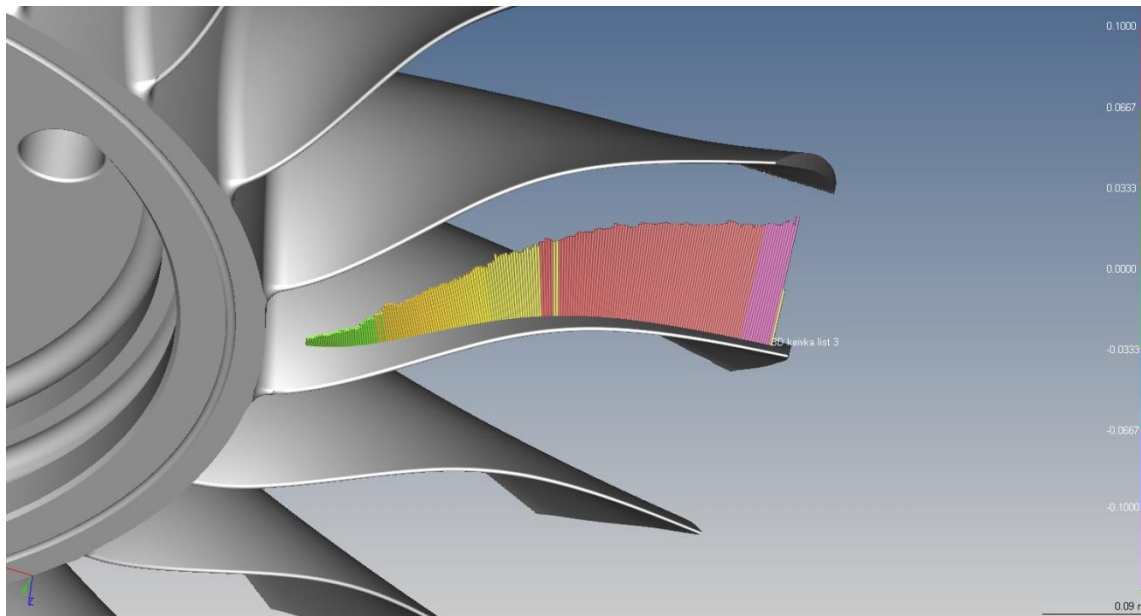
Při zjišťování deformací lopatek byla proměřena každá třetí lopatka. Na souřadnicovém měřícím stroji byla naměřena deformace lopatek ve dvou směrech. Nejdříve byla změřena geometrie lopatek blisku 1° v nekuličkováném stavu a geometrie lopatky po

kuličkování. Rozdíly hodnot po těchto dvou měřeních by nám měly ukázat, jaký vliv má kuličkování na změnu geometrie lopatky.

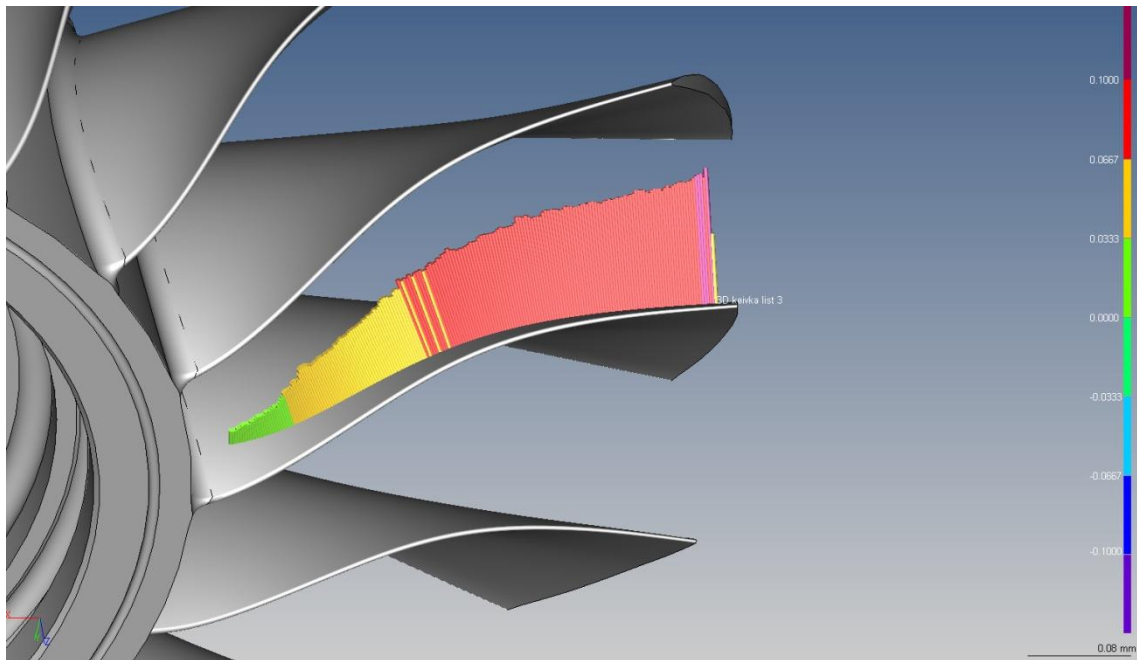
K vyhodnocení těchto výsledků byl použit software Calypso. Kompletní protokol z měření je přiložen v příloze P6 a P7. Do této práce byla pro názornost zvolena vyhodnocení pomocí grafického zobrazení.

### 3.5.1.2.1 *Deformace v podélném směru*

Jako zástupce pro názornou ukázkou vyhodnocení deformace byla vybrána lopatka č. 1. Na obrázku č. 66 a č. 67 je vidět porovnání průběhu deformace na lopatce v podélném směru před a po kuličkování. Z těchto obrázků je patrné, že tvar lopatky se liší od modelu tím víc, čím je větší vzdálenost od kořene lopatky. Stejně tak je vidět při porovnání obrázků před a po kuličkování, že změna tvaru lopatky se zvětšuje směrem od osy blisku  $1^\circ$ . Deformace u paty blisku  $1^\circ$  je takřka nulová, zatímco na okraji lopatky je tato deformace u lopatky 0,03 mm. Tento trend je pozorovatelný na všech lopatkách. Maximální deformace lopatek na jejich koncích se pohybuje v rozmezí 0,02 až 0,04 mm.



Obrázek 66: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná, podélná deformace

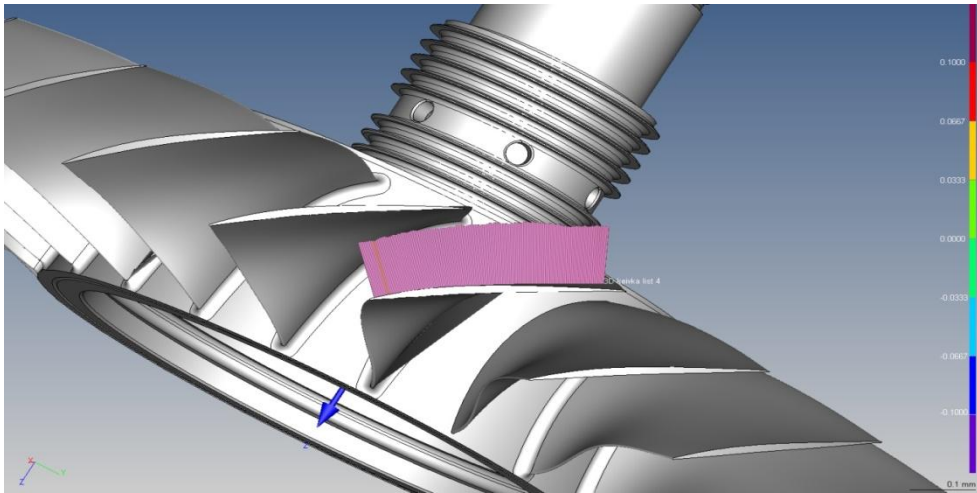


Obrázek 67: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná podélná deformace

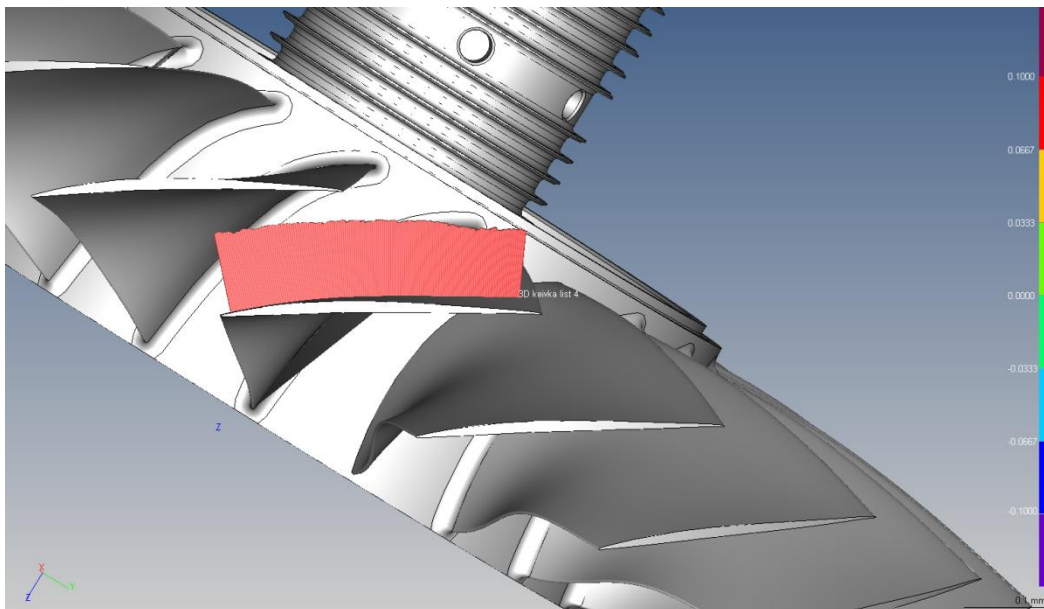
#### 3.5.1.2.2 Deformace v příčném směru

Pro lopatku č. 1 bylo také provedeno grafické vyhodnocení příčné deformace. Na obrázcích č. 68 a 69 je graficky znázorněná deformace lopatky oproti ideálnímu tvaru lopatky z modelu. Z těchto obrázků je patrné, že lopatka se po kuličkování zdeformovala v celém příčném průřezu konstantně. Hodnota této deformace je 0,03 mm u této lopatky.

Konstantní deformace je pozorovatelná u všech měřených lopatek. Hodnoty těchto deformací se pohybují v rozmezí 0,03 až 0,05 mm.



Obrázek 68: Deformace lopatky č. 1, nekuličovaná příčná deformace



Obrázek 69: Deformace lopatky č. 1, kuličovaná příčná deformace

### 3.5.2 Měření blisku 1° kuličovaného kuličkami o průměru 4,77 mm

Stejně měření jaké bylo provedeno pro blisk 1° kuličovaný kuličkami o průměru 3 mm, bylo provedeno i s bliskem 1° kuličovaném kuličkami s průměrem 4,77 mm. Postup měření a sledované parametry jsou stejné, jak již byly popsány v kapitole 3.5.1.

### 3.5.2.1 Změna tloušťky lopatek

Způsob vyhodnocení tloušťky lopatek tohoto blisku 1° je identický s vyhodnocení u předchozího blisku 1°. Tento postup je již podrobně popsán v kapitole 3.5.1.1.

Z této tabulky je velice dobře vidět, že lopatky blisku 1° byly vyrobeny tlustší oproti hodnotě, která byla zjištěna z 3D modelu. Tloušťka lopatek je tedy v průměru o 0,051 mm větší. Dále lze z naměřených hodnot vyhodnotit, jak se změnila tloušťka lopatek po kuličkování. Veškeré kuličkováné lopatky vykazují zmenšení svého průřezu. Toto zmenšení průřezu se pohybuje v rozmezí hodnot 0,001 až 0,006 mm. Průměrná hodnota zmenšení průřezu je 0,003 mm.

Tabulka 14: Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 4,77 mm

Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 4,77 mm						
Číslo lopatky	Výkresová tloušťka lopatek	Blisk 1° před kuličkováním		Blisk 1° po kuličkování		Rozdíl tloušťky lopatek před a po kuličkování
		Skutečná tloušťka lopatek	Rozdíl skutečné a výkresové tloušťky	Skutečná tloušťka lopatek	Rozdíl skutečné a výkresové tloušťky	
1	0,724	0,791	0,068	0,790	0,066	0,002
2	0,724	0,768	0,044	0,767	0,043	0,001
3	0,724	0,775	0,051	0,774	0,050	0,001
4	0,724	0,764	0,040	0,762	0,039	0,002
5	0,724	0,775	0,051	0,774	0,050	0,001
6	0,724	0,781	0,057	0,779	0,056	0,002
7	0,724	0,781	0,057	0,779	0,056	0,002
1	0,700	0,775	0,075	0,774	0,074	0,001
2	0,700	0,751	0,051	0,748	0,048	0,002
3	0,700	0,764	0,064	0,762	0,062	0,002
4	0,700	0,750	0,050	0,747	0,047	0,002
5	0,700	0,759	0,058	0,757	0,056	0,002
6	0,700	0,768	0,068	0,765	0,065	0,004
7	0,700	0,766	0,066	0,765	0,065	0,001
1	0,679	0,747	0,068	0,746	0,067	0,001
2	0,679	0,730	0,050	0,727	0,048	0,003
3	0,679	0,737	0,058	0,734	0,055	0,003

4	0,679	0,725	0,045	0,722	0,043	0,003
5	0,679	0,735	0,056	0,732	0,053	0,003
6	0,679	0,739	0,060	0,737	0,058	0,002
7	0,679	0,738	0,059	0,737	0,058	0,002
1	0,649	0,713	0,064	0,711	0,062	0,002
2	0,649	0,698	0,049	0,696	0,047	0,003
3	0,649	0,705	0,056	0,702	0,053	0,003
4	0,649	0,693	0,044	0,690	0,041	0,003
5	0,649	0,705	0,056	0,702	0,053	0,003
6	0,649	0,712	0,063	0,709	0,060	0,002
7	0,649	0,705	0,056	0,702	0,054	0,002
1	0,578	0,641	0,063	0,641	0,063	0,001
2	0,578	0,617	0,039	0,634	0,056	-0,017
3	0,578	0,629	0,051	0,627	0,049	0,002
4	0,578	0,617	0,039	0,614	0,036	0,002
5	0,578	0,627	0,049	0,624	0,046	0,003
6	0,578	0,634	0,056	0,631	0,053	0,003
7	0,578	0,631	0,053	0,629	0,051	0,002
1	1,161	1,221	0,060	1,218	0,058	0,003
2	1,161	1,203	0,042	1,200	0,039	0,003
3	1,161	1,210	0,049	1,207	0,046	0,003
4	1,161	1,198	0,037	1,194	0,034	0,003
5	1,161	1,205	0,045	1,202	0,041	0,004
6	1,161	1,213	0,052	1,209	0,049	0,004
7	1,161	1,215	0,055	1,211	0,051	0,004
1	1,491	1,550	0,059	1,546	0,055	0,004
2	1,491	1,532	0,041	1,529	0,038	0,003
3	1,491	1,545	0,054	1,541	0,050	0,004
4	1,491	1,528	0,037	1,524	0,033	0,004
5	1,491	1,533	0,042	1,530	0,039	0,003
6	1,491	1,544	0,052	1,540	0,049	0,003
7	1,491	1,542	0,050	1,539	0,047	0,003
1	1,031	1,087	0,056	1,083	0,053	0,004
2	1,031	1,074	0,043	1,070	0,039	0,004
3	1,031	1,083	0,053	1,079	0,049	0,004
4	1,031	1,066	0,035	1,064	0,033	0,002
5	1,031	1,072	0,041	1,070	0,039	0,002
6	1,031	1,086	0,055	1,082	0,051	0,003
7	1,031	1,081	0,051	1,077	0,047	0,004
1	1,070	1,102	0,032	1,099	0,029	0,003
2	1,070	1,078	0,009	1,075	0,006	0,003
3	1,070	1,085	0,015	1,082	0,012	0,003
4	1,070	1,088	0,018	1,084	0,015	0,003
5	1,070	1,094	0,024	1,091	0,021	0,003
6	1,070	1,103	0,033	1,099	0,029	0,004

7	1,070	1,093	0,023	1,089	0,019	0,004
1	1,643	1,712	0,069	1,707	0,064	0,005
2	1,643	1,692	0,049	1,688	0,044	0,005
3	1,643	1,703	0,060	1,699	0,056	0,004
4	1,643	1,689	0,046	1,683	0,040	0,005
5	1,643	1,695	0,052	1,691	0,048	0,004
6	1,643	1,701	0,058	1,698	0,055	0,003
7	1,643	1,703	0,060	1,699	0,056	0,004
1	2,016	2,083	0,067	2,078	0,062	0,005
2	2,016	2,070	0,054	2,064	0,048	0,006
3	2,016	2,078	0,062	2,073	0,057	0,005
4	2,016	2,063	0,047	2,058	0,042	0,006
5	2,016	2,073	0,057	2,069	0,053	0,004
6	2,016	2,079	0,063	2,074	0,058	0,005
7	2,016	2,079	0,063	2,073	0,057	0,006
<b>Průměrná odchylka</b>			<b>0,051</b>		<b>0,048</b>	<b>0,003</b>

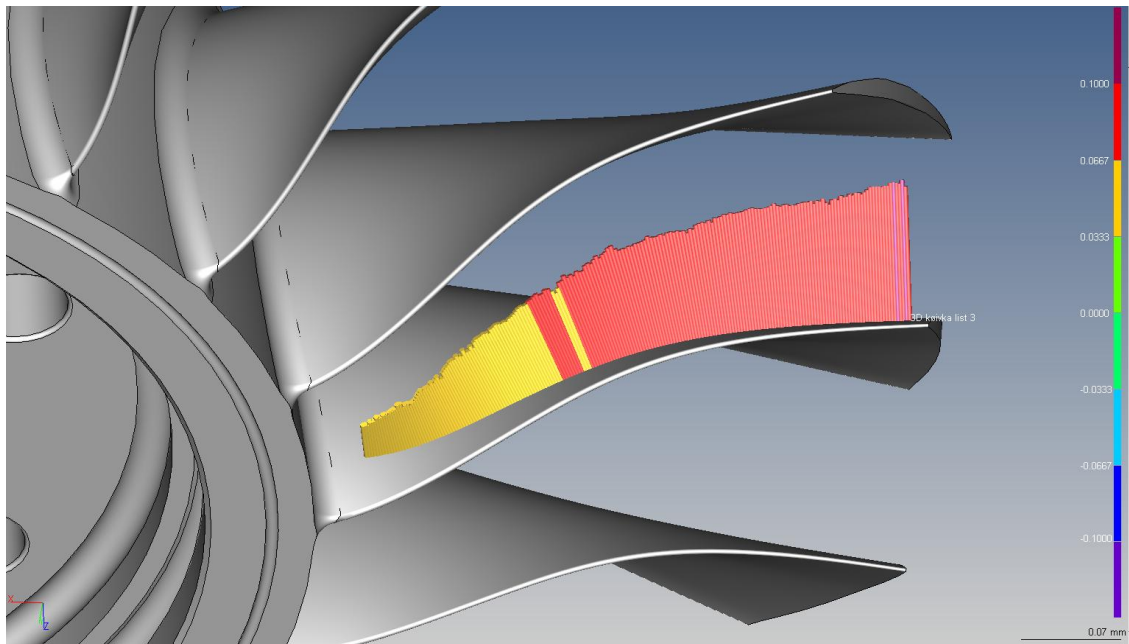
### 3.5.2.2 Deformace lopatek po kuličkování kuličkami o průměru 4,77 mm

Při zjišťování deformací lopatek byla stejně jako u blisku 1° kuličkováního menšími kuličkami proměřena každá třetí lopatka. Na souřadnicovém měřicím stroji byla naměřena deformace lopatek ve dvou směrech. Nejdříve byla změřena geometrie lopatek blisku 1° v nekuličkováném stavu a geometrie lopatky po kuličkování. Rozdíly hodnot po těchto dvou měřeních by měly ukázat, jaký má vliv kuličkování na změnu geometrie lopatky. Kompletní záznam z měření je přiložen v příloze P8 a P9.

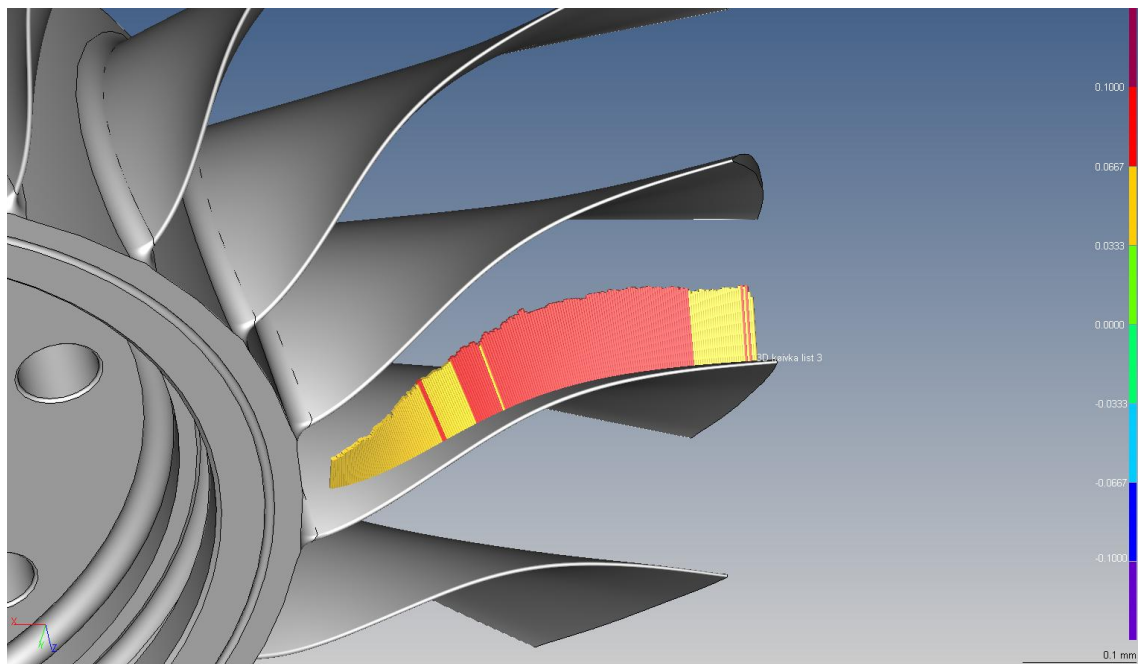
#### 3.5.2.2.1 Deformace lopatek v podélném směru

Jako zástupce pro názornou ukázkou vyhodnocení deformace byla vybrána lopatka č. 1. Na obrázku č. 70 a č. 71 je vidět porovnání průběhu deformace na lopatce v podélném směru před a po kuličkování. Z těchto obrázků je patrné, že tvar lopatky se liší od modelu tím víc, čím víc je lopatka vzdálena od svého kořene. Stejně tak je vidět při porovnání obrázků před a po kuličkování, že změna tvaru lopatky před a po kuličkování se zvětšuje směrem od osy blisku 1°. Deformace u paty blisku 1° je takřka nulová, zatímco na okraji lopatky je tato deformace 0,04 mm. Tento trend je pozorovatelný na všech lopatkách. Maximální deformace lopatek na jejich koncích se pohybuje v rozmezí 0,03 až 0,05 mm.





Obrázek 70: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná podélná deformace

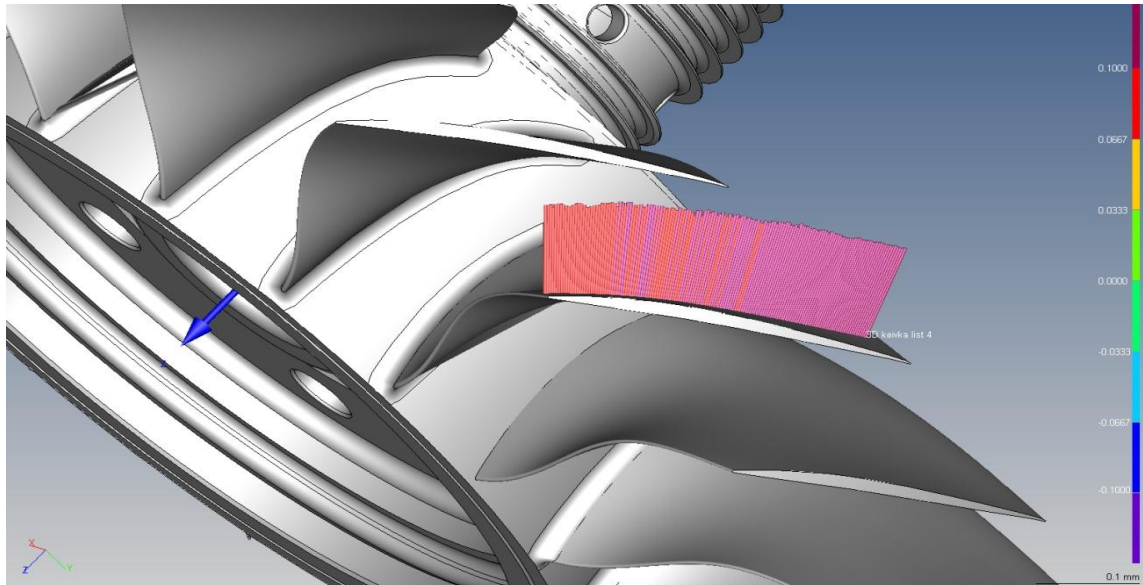


Obrázek 71: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná podélná deformace

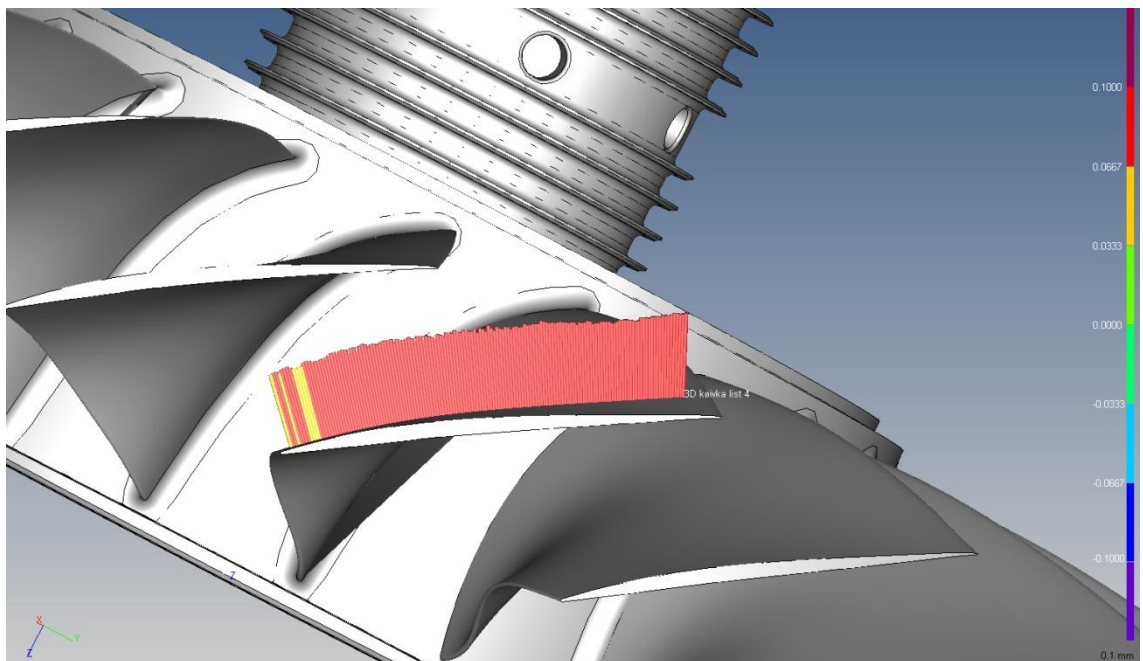
### 3.5.2.2.2 Deformace v příčném směru

Pro lopatku č. 1 bylo provedeno grafické vyhodnocení příčné deformace. Na obrázcích č. 72 a 73 je graficky znázorněná deformace lopatky oproti ideálnímu tvaru lopatky z modelu. Z těchto obrázků je patrné, že lopatka se po kuličkování zdeformovala v celém příčném průřezu konstantně. Hodnota této deformace je 0,04 mm u lopatky.

Konstantní deformace je pozorovatelná u všech měřených lopatek. Hodnoty těchto deformací se pohybují v rozmezí 0,03 až 0,05 mm.



Obrázek 72: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná příčná deformace



Obrázek 73: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná příčná deformace

Při porovnání deformací lopatek blisků 1° kuličkováných dvěma velikostmi kuliček je patrné, že menší deformace lopatky nastanou při kuličkování kuličkami o průměru

3mm. Rozdíl těchto hodnot je však tak malý a rozdíl v pokrytí kuličkami tak velký, že autor doporučuje i přes větší deformaci lopatek po kuličkování použít kuličky o průměru 4,77 mm.

### 3.6 Měření drsnosti povrchu

Měření bylo provedeno v měrovém a školicím středisku ČVUT Praha, fakulta strojní, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, vybudovaném ve spolupráci s firmou Carl Zeiss.

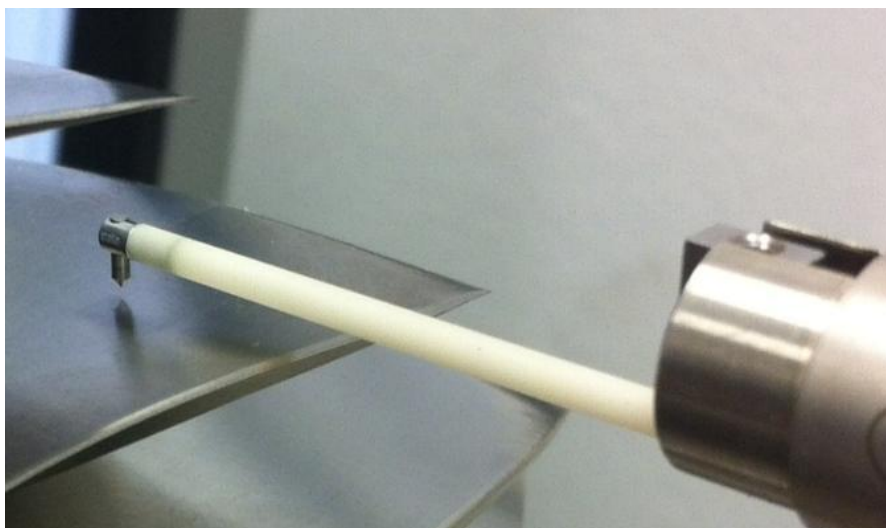
#### 3.6.1 Popis metody měření

Pro měření bylo použito zařízení od společnosti Mahr, pro měření drsnosti MarSurf XCR20 s jednotkou PCV pro měření kontury povrchu.



Obrázek 74: Zařízení pro měření drsnosti povrchu

Blisky  $1^\circ$  byly měřeny v naklápěcím svěráku pro správné napolohování měřených listů lopatkových kol do vodorovné polohy. Následné měření bylo provedeno buď diamantovým hrotem v případě měření drsnosti, případně kaleným ocelovým hrotem při měření kontury povrchu.



Obrázek 75: Měření diamantovým hrotem

Parametry filtru profilu pro měření drsnosti se nastavují dle norem ISO 4288:1998 a ISO 3274:1998. Cut-off se vybírá podle vlnové rozteče nebo předpokládané hodnoty Ra. Tomu současně odpovídá vyhodnocovaná délka podle norem. Odchytky jsou povoleny v případě, že dílec nedovoluje nastavení podle norem. Konkrétní nastavení jsou v protokolech z měření v příloze P10 až P13.

Na listech blisku  $1^\circ$  byla měřena drsnost, která by měla být dle specifikací Ra 1,6. Měření probíhalo přibližně na středu lopatky cca 10 mm od kraje na čtyřech lopatkách pro zmapování blisku  $1^\circ$ .

### 3.6.2 Naměřená data

Měřené parametry drsnosti byly kromě předepsané Ra také Rz a Rmax.

Tabulka 15: Naměřená data z blisku kuličkováného kuličkami s průměrem 3 mm

Operace	Lopatka	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
před kuličkováním	1	0,641	3,314	3,678
	6	0,750	4,212	4,877
	12	1,432	7,283	7,754
	18	0,511	2,977	3,633
<b>průměr</b>		<b>0,833</b>	<b>4,446</b>	<b>4,985</b>
po kuličkování	1	0,329	1,646	2,077
	6	0,438	3,100	3,543
	12	0,822	4,021	4,375
	18	0,302	1,797	2,232
<b>průměr</b>		<b>0,473</b>	<b>2,641</b>	<b>3,057</b>

Tabulka 16: Naměřená data z blisku kuličkování kuličkami s průměrem 4,77 mm

Operace	List	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rz [ $\mu\text{m}$ ]	Rmax [ $\mu\text{m}$ ]
před kuličkováním	1	0,602	3,32	3,754
	6	0,691	4,017	4,827
	12	0,602	3,620	4,159
	18	0,586	3,274	3,884
průměr		<b>0,621</b>	<b>3,559</b>	<b>4,156</b>
po kuličkování	1	0,421	2,080	2,397
	6	0,466	2,431	3,796
	12	0,466	2,431	3,796
	18	0,378	2,366	3,349
průměr		<b>0,433</b>	<b>2,327</b>	<b>3,335</b>

### 3.6.3 Výsledky měření

Výsledky shrnuté v následující tabulce potvrzují předpokládané zlepšování povrchu po dokončovacích operacích u každého blisku  $1^\circ$ . Už po obrobení dosahovaly blisky  $1^\circ$  lepšího povrchu, než byl požadován, takže dodatečnými operacemi bylo spíše ukázáno, kam až lze posunout kvalitu povrchu dílů.

Tabulka 17: Shrnutí naměřených drsností na jednotlivých dílech

	Blisk $1^\circ$ , kuličky 3mm			Blisk $1^\circ$ kuličky 4,77 mm		
	Ra	Rz	Rmax	Ra	Rz	Rmax
Před kuličkováním	0,833	4,446	4,985	0,621	3,559	4,156
Po kuličkování	0,473	2,641	3,057	0,433	2,327	3,335

## 4 Závěr

V teoretické části je popsána problematika obrábění součástí letecké výroby a vliv obrábění na povrchovou vrstvu součástí. Důležitou součástí práce je i popis vibračního kuličkování. Dále je zde popsána nejpoužívanější slitina titanu Ti-6AL-4V. Z této slitiny je vyroben i blisk 1°, který byl podroben řadě zkoušek v experimentální části. Také je v práci popsána integrita povrchu se zaměřením na zbytková napětí.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo navržení vhodného přípravku na vibrační kuličkování blisku 1°, určení vhodných parametrů pro tento technologický proces, zjištění, zda se lopatky blisku 1° po kuličkování nezdeformovaly a nezměnily svoji tloušťku. V poslední řadě byl zjištěn vliv kuličkování na výslednou drsnost lopatek.

Návrh přípravku pro vibrační kuličkování blisku 1° byl rozpracován v několika variantách. Nakonec byla schválena pro výrobu varianta č. 2, která byla navržena tak, aby byla co nejuniverzálnější a dala se v průběhu experimentů upravovat dle aktuálních potřeb. Tento přípravek byl vyroben v počtu dvou kusů.

Při určení vhodných parametrů vibračního kuličkování bylo vyzkoušeno mnoho kombinací různých parametrů. Jako nejvhodnější se ukázalo využití těchto základních parametrů:

- velikost distanční podložky vrchní 12 mm
- velikost distanční podložky spodní 12 mm
- objem kuliček 40 ml
- průměr kuliček 4,77 mm
- čas vibračního kuličkování 2 x 60 min

Při využití těchto parametrů dosahuje pokrytí povrchu lopatek kuličkami takřka 100 %. Výjimku představuje patní rádius lopatek. Do tohoto rádiusu se kuličky nedostanou kvůli své velikosti.

Z měření změny tloušťky lopatek po kuličkování bylo zjištěno, že průměrná změna tloušťky lopatek při použití kuliček s průměrem 3 mm je 0,002 mm. Při použití kuliček s průměrem 4,77 mm je změna průřezu lopatky 0,003 mm. Z těchto výsledků je patrné, že

při použití větších kuliček došlo k většímu zmenšení průřezu lopatky. Tento rozdíl je však velice malý.

Při měření deformací lopatek bylo zjištěno, že deformace lopatek se zvětšuje tím víc, čím je větší vzdálenost od kořene lopatky. Deformace byla naměřena jak v příčném, tak v podélném směru lopatky. Hodnoty těchto deformací jsou nevýrazné a jsou porovnatelné s nepřesnostmi pětiosého frézování při výrobě.

Z měření drsnosti povrchu lopatek po vibračním kuličkování lze konstatovat, že po aplikaci této operace dojde k výraznému zlepšení drsnosti povrchu. Průměrná drsnost lopatek před kuličkováním byla  $R_a = 0,62 \mu\text{m}$  a po kuličkování  $R_a = 0,43 \mu\text{m}$ .

S ohledem na zvýšení životnosti blisku 1° autor doporučuje využít technologii vibračního kuličkování jakožto dokončovací technologii po obrábění pro tento díl. Pro tuto technologii je vhodné využít výše zmíněných podmínek procesu. Dále by autor doporučil zkoumání povrchové vrstvy po aplikaci této technologie a to především zbytková napětí v povrchové vrstvě.

V průběhu řešení této diplomové práce byla kompletně vyvinuta technologie vibračního kuličkování. Byla provedena prototypová výroba, optimalizační fáze parametrů procesu a ověření výsledků. Cíle diplomové práce byly splněny.

## 5 Zdroje

- [1] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.
- [2] ŠLAIS, Miroslav. *Studium vlivů rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnost Ti slitin* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=46688](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=46688). Dizertační práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Forejt, CSc.
- [3] *Titan a jeho slitiny, Nikl a jeho slitiny: 2. přednáška* [online]. In: . [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Nikl\\_titan.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf)
- [4] KLAPKOVÁ, Alena. *Mechanické vlastnosti titanových slitin* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=52258](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52258). Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [5] BÁRTKOVÁ, Denisa. *Vysokocyklová únava titanové slitiny Ti6Al4V* [online]. Brno, 2013 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65907](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65907). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [6] *Slitiny titanu* [online]. In: [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [www.users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05\\_Slitiny%20Ti.ppt](http://www.users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt)
- [7] ZHAO, Yixiang. *Effects of Laser Shock Peening on Residual Stress, Texture and Deformation Microstructure of Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy* [online]. 2012 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.techlib.cz/docview/1316886055?pq-origsite=summon>. University of Cincinnati.
- [8] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.



- [9] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 08-717-0686-5.
- [10] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1
- [11] VALÁŠEK, Antonín. *Aplikace metod využívajících iontové svazky k modifikaci slitiny Ti6Al4V* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: [http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik\\_2015/0340.pdf](http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik_2015/0340.pdf)
- [12] TOLKNER, Josef. *Analýza vlivu obráběného materiálu na opotřebení a trvanlivost nástroje* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=52653](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52653). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [13] MÁDL, CSC., doc. Ing. Jan. *Teorie Obrábění*. Dotisk. Praha: ČVUT v Praze, 1990.
- [14] VÍTOVEC, David. *Kvalita povrchové vrstvy po obrábění těžkoobrobitelných a titanových slitin* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63572/F2-DP-2015-Vitovec-David-Kvalita%20povrchove%20vrstvy%20po%20obrabeni%20tezkoobrobitelnych%20a%20titanovych%20slitin.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
- [15] KRPAL, Jaroslav. *Konstrukce přípravku pro leštění rotačních ploch* [online]. Zlín, 2015 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33627/krpal\\_2015\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/33627/krpal_2015_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Maloch, CSc.

- [16] ŠÁNEK, Petr. *Vliv struktury povrchu na mikrobiální prostředí* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24506/%c5%a1%c3%a1nek\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24506/%c5%a1%c3%a1nek_2013_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. František Bílek.
- [17] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [18] Obrábění válečkováním. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2004, (4), 28 [cit. 2017-04-22]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-valeckovanim.html>
- [19] BENEŠOVÁ, Dana. Řízené kuličkování. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2011, (4), 40 [cit. 2017-04-23]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [20] LIPKA, Ondřej. *Dokončovací technologie využívající plastickou deformaci povrchu* [online]. Brna, 2013 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64667](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64667). Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [21] Steel shot ,steel grit , strengthening. *Linked in* [online]. 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [https://www.linkedin.com/pulse/steel-shot-grit-strengtheninggood-peening-lane-lau?articleId=9015754859514572986#comments-9015754859514572986&trk=sushi\\_topic\\_posts\\_guest](https://www.linkedin.com/pulse/steel-shot-grit-strengtheninggood-peening-lane-lau?articleId=9015754859514572986#comments-9015754859514572986&trk=sushi_topic_posts_guest)
- [22] Technologie tryskání jako konečná úprava povrchu (kuličkování). *Tech Park* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [http://www.techpark.sk/technika-9102014/Prvni\\_tousenska\\_povrchove\\_upravy\\_tryskani\\_casopis\\_Technika.html](http://www.techpark.sk/technika-9102014/Prvni_tousenska_povrchove_upravy_tryskani_casopis_Technika.html)
- [23] 1. Toušeňská s.r.o.: Tryskací zařízení [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.1tousenska.cz/vyroba.php>
- [24] *Zbytková povrchová napětí po obrábění* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_12.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf)

- [25] CIVÍN, Ing. Adam. *Komplexní teoretická analýza metody sloupku pro zjišťování zbytkových napětí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59574](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59574). Dizertační práce. VUT. Vedoucí práce Doc. Ing Miloš Vlk, CSc.
- [26] *Poznání nehmotného světa zbytkových napětí* [online]. In: GANEV, Nikolaj. Praha, 2013 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: [www.opi.zcu.cz/download/1\\_Ganev.pptx](http://www.opi.zcu.cz/download/1_Ganev.pptx)
- [27] *Nové technologie výzkumné centrum: Zbytková napětí* [online]. [cit.2017-04-30]. Dostupné z: <http://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/zbytkova-napeti>
- [28] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-802-4825-335.
- [29] *Aplikace vybraných metod pro měření zbytkových napětí* [online]. In: VÁCLAVÍK, Jaroslav, Zbyněk BUNDA a Petr BOHDAN. Plzeň [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271\\_p.pdf](http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf)
- [30] Kolařík, K., Ganev, N. Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology -Bulletin of the Czech and Slovak Crystallographic Association. *Difrakční a tenzometrická analýza povrchů ocelí po nekonvenčních metodách obrábění*. [Online] 2006. [Cit. 2017-04-30] Dostupné na World Wide Web: <http://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>. ISSN 1211-5894 (Print), ISSN 1805-4382 (Online).
- [31] *Odvrtávací metoda (metoda otvoru)* [online]. In: . Plzeň [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detailed-metody>
- [32] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materiálu*. První. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991.
- [33] ZEISS: *ZEISS PRISMO* [online]. [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <https://www.zeiss.cz/metrologie/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html>

## 6 Seznam obrázků

Obrázek 1: Hexagonální mřížka fáze $\alpha$ a bcc mřížka fáze $\beta$ [7] .....	14
Obrázek 2: Pseudobinární diagram Ti – $\beta$ stabilizátor [9] .....	15
Obrázek 3: Diagram vlivu legujících prvků [10] .....	16
Obrázek 4: Struktura Ti-6Al-4V po tváření [12] .....	22
Obrázek 5: Jehlicovitá struktura Ti-6Al-4V jehlice $\beta$ (světlé) ve fázi $\alpha$ (tmavé) [12] .....	22
Obrázek 6: Rovnoosá struktura Ti-6Al-4V [12] .....	22
Obrázek 7: Lamelární struktura Ti-6Al-4V [12] .....	23
Obrázek 8: Tříška tvářená [13] .....	23
Obrázek 9: Tříška netvářená [13] .....	23
Obrázek 10: Diamantový vyhlazovací nástroj [17] .....	24
Obrázek 11: Schéma objemových a geometrických změn materiálu při válečkování [16] .....	25
Obrázek 12: Přípravek vyplněný kuličkami .....	26
Obrázek 13: Vibrační rám se zezdola umístěným vibračním motorem .....	27
Obrázek 14: Rozložení zbytkového napětí v průřezu součásti po jednostranném kuličkování [22] .....	27
Obrázek 15: Výsledné rozložení napětí [22] .....	28
Obrázek 16: Princip řízeného kuličkování [19] .....	28
Obrázek 17: Ocelový štěrk pro tryskání [21] .....	29
Obrázek 18: Ocelové kuličky pro tryskání [21] .....	29
Obrázek 19: Injektorový systém [23] .....	31
Obrázek 20: Tlakový systém [23] .....	32
Obrázek 21: Stroj s metacími koly [23] .....	33
Obrázek 22: Metody měření zbytkových napětí a hloubky pro jejich použití [14] .....	35
Obrázek 23: Schéma principu odvrtávací metody [31] .....	37
Obrázek 24: Součást rotoru turbovrtulového motoru (blisk $1^\circ$ ) .....	40
Obrázek 25: Blisk $1^\circ$ - základní parametry .....	41
Obrázek 26: První varianta přípravku .....	42
Obrázek 27: Příruba s vrchním dílem přípravku .....	44
Obrázek 28: Druhá varianta přípravku .....	44
Obrázek 29: Detail horního „domečku“ .....	45
Obrázek 30: Detail spodního „domečku“ .....	45
Obrázek 31: Detail přídatku na obrábění a přesahu přípravků .....	45
Obrázek 32: Sestava přípravku a blisku $1^\circ$ bez distančních podložek .....	47
Obrázek 33: Detail obecné tvarové plochy .....	47
Obrázek 34: Obrobek – příruba .....	49
Obrázek 35: Základní rozměry příruby .....	49
Obrázek 36: Obrobek – vrchní díl přípravku .....	50
Obrázek 37: Základní rozměry vrchního dílu přípravku .....	50
Obrázek 38: Obrobek – spodní díl přípravku .....	51
Obrázek 39: Základní rozměry spodního dílu přípravku .....	51
Obrázek 40: Spojení příruby a horní části přípravku .....	52
Obrázek 41: Barvení blisku $1^\circ$ .....	53
Obrázek 42: Nabarvený blisk $1^\circ$ .....	54

Obrázek 43: Vibrační zařízení MA-01-549.....	55
Obrázek 44: Montáž přípravků na rám v tandemu.....	56
Obrázek 45: Spodní díl přípravku.....	57
Obrázek 46: Spodní díl přípravku se spodní distanční podložkou.....	58
Obrázek 47: Vložení blisku 1° do sestavy.....	58
Obrázek 48: Nasypání kuliček do sestavy.....	59
Obrázek 49: Sestavený a stažený přípravek.....	60
Obrázek 50: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, přední strana.....	61
Obrázek 51: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, přední strana.....	61
Obrázek 52: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, zadní strana.....	62
Obrázek 53: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, zadní strana.....	62
Obrázek 54: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, přední strana, otočení o 180°.....	63
Obrázek 55: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, přední strana, otočení o 180°.....	63
Obrázek 56: Kuličkování – distance 4 mm, čas 30 minut, zadní strana, otočení o 180°.....	63
Obrázek 57: Kuličkování – distance 6 mm, čas 30 minut, zadní strana, otočení o 180°.....	63
Obrázek 58: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, přední strana.....	65
Obrázek 59: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, zadní strana.....	65
Obrázek 60: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius u paty lopatek.....	66
Obrázek 61: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius přední strana.....	67
Obrázek 62: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius zadní strana.....	68
Obrázek 63: Kuličkování – 12mm distanční podložka, čas 60 minut z každé strany, rádius u paty lopatek.....	68
Obrázek 64: ZEISS PRISMO [33].....	71
Obrázek 65: Ukázka grafického rozhraní softwaru Calypso a měřených charakteristik.....	72
Obrázek 66: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná, podélná deformace.....	75
Obrázek 67: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná podélná deformace.....	76
Obrázek 68: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná příčná deformace.....	77
Obrázek 69: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná příčná deformace.....	77
Obrázek 70: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná podélná deformace.....	81
Obrázek 71: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná podélná deformace.....	81
Obrázek 72: Deformace lopatky č. 1, nekuličkováná příčná deformace.....	82
Obrázek 73: Deformace lopatky č. 1, kuličkováná příčná deformace.....	82
Obrázek 74: Zařízení pro měření drsnosti povrchu.....	83
Obrázek 75: Měření diamantovým hrotem.....	84

## 7 Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní fyzikální vlastnosti titanu [4] .....	12
Tabulka 2: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [5] .....	12
Tabulka 3: Složení hlavních titanových rud (%) [1] .....	13
Tabulka 4: Vybrané slitiny titanu a jejich vlastnosti [4] .....	18
Tabulka 5: Fyzikální a mechanické vlastnosti žíhané slitiny Ti-6Al-4V za pokojové teploty [2] ..	20
Tabulka 6: Odolnost slitiny proti vybraným korozním prostředím [2].....	20
Tabulka 7: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [11].....	21
Tabulka 8: Metody zjišťování zbytkových napětí [28].....	36
Tabulka 9: Hmotnosti jednotlivých dílů přípravku .....	48
Tabulka 10: Velikosti distančních podložek .....	55
Tabulka 11: Grafický výstup jednotlivých parametrů při vibračním kuličkování .....	57
Tabulka 12: Hlavní parametry vibračního kuličkování .....	70
Tabulka 13: Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 3 mm.....	73
Tabulka 14: Tloušťky lopatek před a po kuličkování kuličkami o průměru 4,77 mm .....	78
Tabulka 15: Naměřená data z blisku kuličkovaného kuličkami s průměrem 3 mm.....	84
Tabulka 16: Naměřená data z blisku kuličkovaného kuličkami s průměrem 4,77 mm.....	85
Tabulka 17: Shrnutí naměřených drsností na jednotlivých dílech .....	85

## 8 Seznam příloh

- P1. Výkres příruby
- P2. Výkres spodního dílu přípravku
- P3. Výkres horního dílu přípravku
- P4. Výkres horní distanční podložky
- P5. Výkres spodní distanční podložky
- P6. Protokol z rozměrového měření blisku  $1^\circ$  před kuličkováním (3mm)
- P7. Protokol z rozměrového měření blisku  $1^\circ$  po kuličkování (3mm)
- P8. Protokol z rozměrového měření blisku  $1^\circ$  před kuličkováním (4,77mm)
- P9. Protokol z rozměrového měření blisku  $1^\circ$  po kuličkování (4,77mm)
- P10. Protokol měření drsnosti povrchu blisku  $1^\circ$  před kuličkováním (3mm)
- P11. Protokol měření drsnosti povrchu blisku  $1^\circ$  po kuličkování (3mm)
- P12. Protokol měření drsnosti povrchu blisku  $1^\circ$  před kuličkováním (4,77mm)
- P13. Protokol měření drsnosti povrchu blisku  $1^\circ$  po kuličkování (4,77mm)