

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Ústav technologie projektování, obrábění a  
metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

NÁVRH TECHNOLOGIE ZPEVŇOVÁNÍ  
KOLA KOMPRESORU

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Procházka** Jméno: **František** Osobní číslo: **424665**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací 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:

**Návrh technologie zpevňování kola kompresoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Compressor wheel surface strenghtening technology development**

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled technologií zpevňování dynamicky namáhaných dílů
2. Specifika titanových slitin
3. Rozbor technologie vibračního kuličkování
4. Návrh přípravků pro kolo radiálního kompresoru
5. Tvorba výrobní dokumentace
6. Testování v provozu

Seznam doporučené literatury:

DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004, vii, 381 s. ISBN 08-717-0686-5.  
TOTTEN, George E., Maurice A. H. HOWES a Tatsuo INOUE. Handbook of residual stress and deformation of steel. Materials Park, Ohio: ASM International, c2002. ISBN 0-87170-729-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Pítrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS**

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

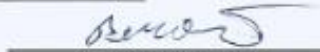
Datum zadání diplomové práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2019**

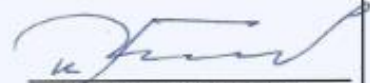
Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_



Ing. Zdeněk Pítrmuc  
podpis vedoucí(ho) práce



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



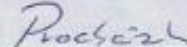
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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.

26.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Návrh technologie zpevnování kola kompresoru vypracoval samostatně a použil jsem podklady a literaturu uvedenou v příloženém seznamu.

V Praze dne 29. července 2019

Podpis autora: .....

Bc. František Procházka

**Anotace:**

Tato diplomová práce je věnována konstrukci nového přípravku pro vibrační zpevnování oběžného kola radiálního kompresoru turbovrtulového motoru. Teoretická část pojednává o technologiích zpevnování dynamicky namáhaných dílů. Zabývá se specifickými vlastnostmi titanových slitin a jejich popisem. Hlavní část práce je věnována postupnému návrhu přípravku a jeho optimalizaci pro využití nových typů médií. V poslední části práce je popsáno testování přípravku v reálných podmínkách.

**Klíčová slova:**

Přípravek, zpevnování, radiální kolo, kuličkování, vibrační zpevnování.

**Annotation:**

This diploma thesis is dedicated to the construction of a new fixture for vibration reinforcement of the turbine propeller radial compressor impeller. The theoretical part deals with technologies of strengthening of dynamically stressed parts. It deals with specific properties of titanium alloys and their description. The main part of the thesis is devoted to gradual design of the fixture and its optimization for the use of new types of media. The last part of the thesis describes the testing of the product in real conditions.

**Key words:**

Fixture, strengthening, radial wheel, shot peening, vibrating strengthening.

## **Poděkování:**

Chtěl bych velice poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi za jeho čas, cenné rady a připomínky na konzultacích a také za pomoc při výrobě a testování přípravků. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Sommerovi a Ing. Michalu Slanému za jejich pomoc při výrobě přípravků.

# Obsah

1. Úvod	8
2. Přehled technologií zpevňování dynamicky namáhaných dílů	9
2.1. Tryskání	9
2.1.1. Kuličkování	11
2.1.2. Řízené kuličkování – shot peening	12
2.1.3. Tryskací média	14
2.1.4. Tryskací zařízení	15
2.1.4.1. Pneumatická tryskací zařízení	16
2.1.4.2. Zařízení s metacími koly	19
2.2. Laser peening	19
2.3. Válečkování	21
2.4. Vyhlazování	23
2.4.1. Vyhlazování diamantem	24
2.5. Kalibrování	25
3. Integrita povrchu	26
3.1. Zbytkové pnutí a jeho měření	27
3.1.1. Odvrtávací metoda	28
3.1.2. Ultrazvukové metody	29
3.1.3. Magnetická metoda	29
3.1.4. Metoda elektrolytického odleptávání	30
4. Specifika titanových slitin	30
4.1. Titan	30
4.2. Výroba titanu	31
4.3. Slitina titanu Ti-Al6-4V	32
4.4. Obrobitelnost titanu	33
4.5. Zásady obrábění titanu	34
5. Vibrační zpevňování	35
6. Návrh přípravků pro kolo radiálního kompresoru	37
6.1. Návrh přípravku	37

<b>6.1.1.</b>	Analýza radiálního kola	38
<b>6.1.2.</b>	První varianta přípravku	42
<b>6.1.3.</b>	Druhá varianta přípravku	42
<b>6.1.4.</b>	Třetí varianta přípravku	43
<b>6.1.5.</b>	Čtvrtá varianta přípravku	45
<b>7.</b>	Výrobní dokumentace a výroba	50
<b>7.1.</b>	Výrobní výkresy	51
<b>7.2.</b>	Výkres sestavení	51
<b>7.3.</b>	Výrobní dokumentace a výroba jednotlivých součástí	52
<b>7.3.1.</b>	Víko	52
<b>7.3.2.</b>	Vana	53
<b>7.3.3.</b>	Víko horní	54
<b>7.3.4.</b>	Kryty centrází	55
<b>7.3.5.</b>	Distanční podložka	57
<b>7.3.6.</b>	Podložka	57
<b>7.3.7.</b>	Sestava a postup montáže	58
<b>8.</b>	Testování v provozu – testy pokrytí	61
<b>8.1.</b>	Zařízení pro vibrační zpevňování	62
<b>8.2.</b>	Podmínky testu	63
<b>8.2.1.</b>	Nastavení stroje	63
<b>8.2.2.</b>	Volba média	63
<b>8.2.3.</b>	Lakování vzorků	65
<b>8.3.</b>	Testování	65
<b>8.3.1.</b>	Test – nerezové kuličky	66
<b>8.3.2.</b>	Test – karbidové kuličky	67
<b>8.4.</b>	Vyhodnocení testů	69
<b>9.</b>	Závěr	70
<b>10.</b>	Zdroje	71
<b>11.</b>	Seznam obrázků	75
<b>12.</b>	Seznam tabulek	78
<b>13.</b>	Seznam příloh	79

# 1. Úvod

Při konstrukci strojních součástí je nezbytně nutné mít vždy na paměti pomyslný trojúhelník materiál-design-technologie a interakci mezi těmito třemi subjekty. Kde jinde přichází tyto prvky do užšího kontaktu nežli v povrchové vrstvě. Zvyšování provozní spolehlivosti a životnosti zejména dynamicky namáhaných součástí klade vysoké nároky na konstrukci i technologii výroby. Velký potenciál ke zvyšování životnosti má zlepšování mechanických vlastností v nejexponovanější povrchové vrstvě. Kvalitu povrchové vrstvy (neboli integritu povrchu) určuje volný soubor charakteristik. Jednou z nich je zbytkové napětí v povrchové vrstvě, a právě této charakteristice je věnována tato diplomová práce.

Vnesení tlakového zbytkového pnutí do vrchních vrstev součástí bylo motivací k návrhu nového přípravku pro vibrační zpevňování povrchové vrstvy radiálního kola. Moderní přípravek by měl následovat nenovější trendy v oblasti zpevňování a umožnit tak svou tuhostí použití médií s vyšší hustotou. Použitím těchto médií lze dosáhnout výrazně vyšších parametrů zpevnění a tím značně zvýšit životnost exponovaných dílů.

Titanové součásti kladou na technologii obrábění velké nároky. Při obrábění titanových slitin dochází k uvolňování velkého množství tepla, což vede k rychlému snižování životnosti nástroje. V důsledku toho pak může docházet k mikrotrhlinám v materiálu a nerovnoměrnému rozložení drsnosti povrchu. Právě díky technologii vibračního zpevnění se však většina těchto neduhů spolehlivě odstraní, dojde k vyrovnaní nerovností, vyhlazení drah po nástrojích a velkému snížení parametrů drsnosti, což může vést ke zlepšení účinnosti součástí.



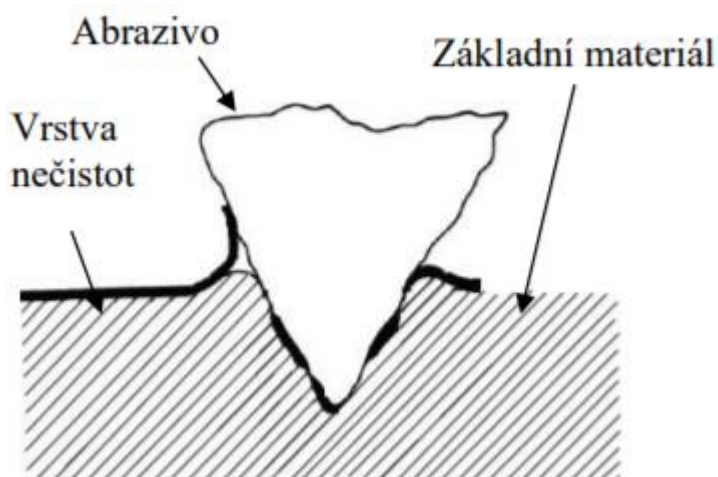
## 2. Přehled technologií zpevňování dynamicky namáhaných dílů

### 2.1. Tryskání

Tato technologie má mnoho různých použití vzhledem k aplikovanému médiu. To můžeme rozdělit do dvou skupin, a to ostrohranná abraziva a sférická média. [11] [1]

#### Ostrohranná abraziva:

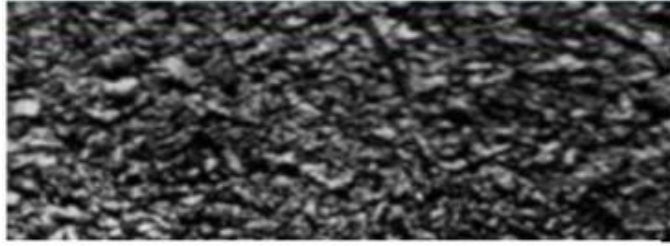
Ostrohranné abrazivo zmíním pouze okrajově, protože při jeho ke zpevnění povrchu spíše nedochází a je primárně určeno pro přípravu povrchové vrstvy před nanesením ochranného povlaku nebo k čištění povrchu před svařováním atd. Často dochází k malému úběru, vlivem proseknutí tryskaného povrchu a následnému vytržení částeczek základního materiálu. Vzniklý povrch je pak velmi drsný a vytvořené důlky jsou ostrohranné.



Obrázek 1: Vryp po dopadu ostrohranného abraziva [3]



Obrázek 2: Litinový granulát [3]

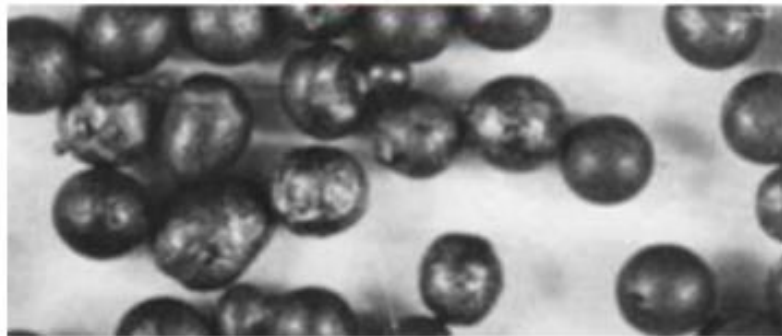


Obrázek 3: Povrch po otryskání litinovým granulátem [3]

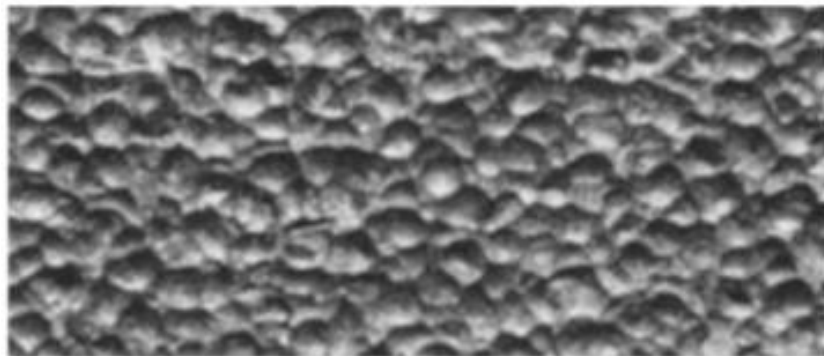
Jako ostrohranné abrazivo se nejčastěji používá ocelová či litinová drť, korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) nebo písek. [11] [1]

### Sférické médium:

U sférického tryskacího média je výsledkem primárně zpevnění povrchové vrstvy materiálu. Částečně také dochází k vyčištění povrchu a vzniká struktura tvořená důlky kulového profilu. Povrch má mnohem menší drsnost než při užití ostrohranného abraziva. Hloubku a tvar jednotlivých vtisků ovlivňuje dopadová rychlost a úhel. Lze tedy říci, že vyšší rychlost dopadu znamená větší vtisk do materiálu, a tedy vyšší drsnost povrchu. [1] [11]

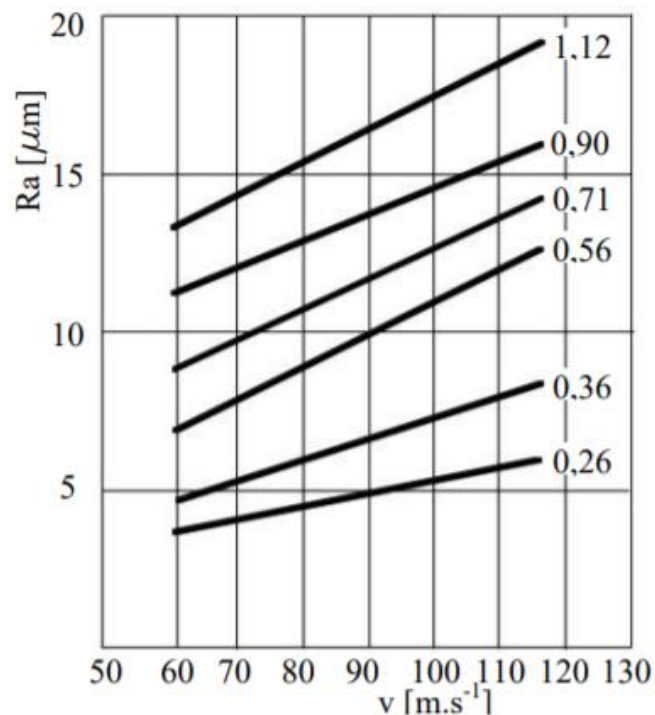


Obrázek 4: Příklad sférického média - ocelový granulát [3]



Obrázek 5: Trysaný povrch po použití sférického média [3]

Vyšší rychlostí také dosahujeme vyššího zpevnění materiálu. Důležitý je také úhel dopadu částic na povrch. Nejlepších výsledků zpevnění dosáhneme při úhlu tryskání 90°. Používají se různá pracovní tělíska, od kterých se často odvozují názvy operací. Nejpoužívanější jsou ocelové kuličky ( $\varnothing=0,3-5$  mm) – „kuličkování“; litinové broky – „brokování“; sekaný ocelový drát se zaoblenými hranami – „patentování“; skleněné kuličky ( $\varnothing=0,05-0,8$  mm) – „balotinování“. [11] [1]

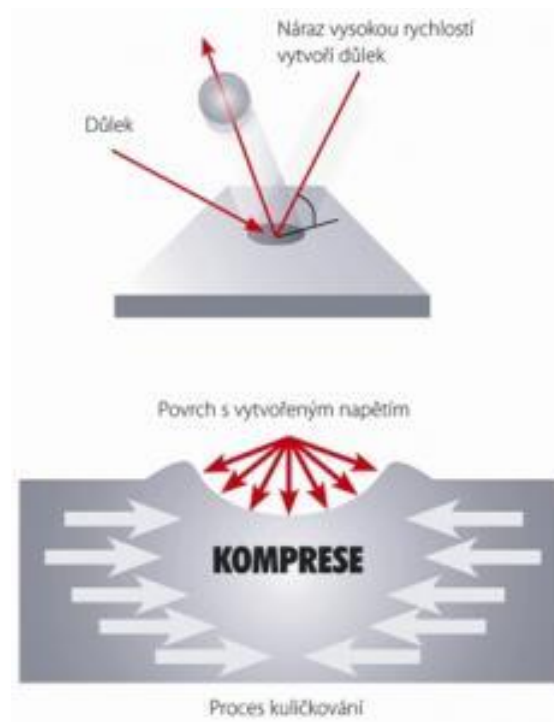


Obrázek 6: Závislost jakosti povrchu na rychlosti abraziva [3]

### 2.1.1. Kuličkování

Nejčastěji používanou metodou pro zpevnění povrchu dynamicky namáhaných součástí je kuličkování. Ke zpevnění dochází dopadem sférické částice na upravovaný povrch. Použité částice nemají téměř žádný abrazivní účinek a prakticky neodebírají materiál. Jedná se nejčastěji o dokončovací operaci pro úpravy povrchu válcových rovinných a tvarově složitějších součástí. Jako pracovní tělíska jsou nejčastěji používány ocelové kuličky nebo kuličky z nerezové oceli. Velikost kuliček se pohybuje

od  $\varnothing 0,5-5$  mm. Důvodem použití těchto materiálů je dlouhá životnost a chemická stálost. Lze také použít kuličky ze slinutých karbidů pro dosažení vyšší kinetické energie. [1] [24]



Obrázek 7: Proces kuličkování [4]

### 2.1.2. Řízené kuličkování – shot peening

Řízené kuličkování je také primárně určeno ke zpevnění povrchu tryskané součásti. Je to opakovatelný proces s přesně definovatelnými parametry, který zajišťuje stejné pokrytí směr tryskání a intenzitu média. Jako médium používáme sférické částice z kvalitních materiálů. Používají se kuličky z oceli, nerezové ocel, skleněné nebo keramické.

Řízeným kuličkováním můžeme působit na přesně definované místo a kuličkovat tak jen ty části součásti, které je třeba zpevnit. Na rozdíl od kuličkování jsou zde média řádově menší (0,1 - 1 mm). Energie je zde dosažena hlavně vysokou rychlostí média. [6] [4]



Obrázek 8: Zpevňování povrchové vrstvy zubů frézy pomocí řízeného kuličkování [5]

Princip zpevnění povrchové vrstvy je v plastické deformaci za studena, ke které dochází při nárazu částice předem definovanou rychlostí. Částice vytvoří v povrchu materiálu důlek. Velkým počtem nárazů vytvoříme na povrchu součásti souvislou zpevněnou vrstvu a pod ní tlaková napětí, která mají tendenci uzavírat potenciální trhliny v materiálu. Použití technologie má rovněž významný vliv na snížení rizika korozního praskání a mezikrystalické koroze. Je to dokončovací technologie, po které se většinou nenásledují další operace. [6] [4]



Obrázek 9: Princip pevnění povrchu kuličkováním [4]

Volba pracovních parametrů procesu závisí na mnoha podmínkách. Především na znalosti aplikace kuličkování dílu, jeho geometrii, předchozí výrobní metodě, mechanických vlastnostech základního materiálu, citlivosti základního materiálu na napětí, prostředí, provozních podmínkách apod. K nejvýznamnějším parametrům ovlivňujících konečný výsledek patří zejména úhel (50 až 80°) a rychlost dopadu částic až ( $150 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), doba tryskání, a v neposlední řadě také rozměr, tvar, hmotnost a materiál

částic. Uplatnění najde tato metoda především v kosmickém a leteckém průmyslu a tam, kde jsou kladeny vysoké požadavky na souvislost povrchové vrstvy a na odchylky parametrů jakosti povrchu. Dosahované parametry této technologie jsou stejné jako u klasického kuličkování, ovšem lze dosáhnout daleko menších odchylek v jakosti povrchové vrstvy. [6] [4]

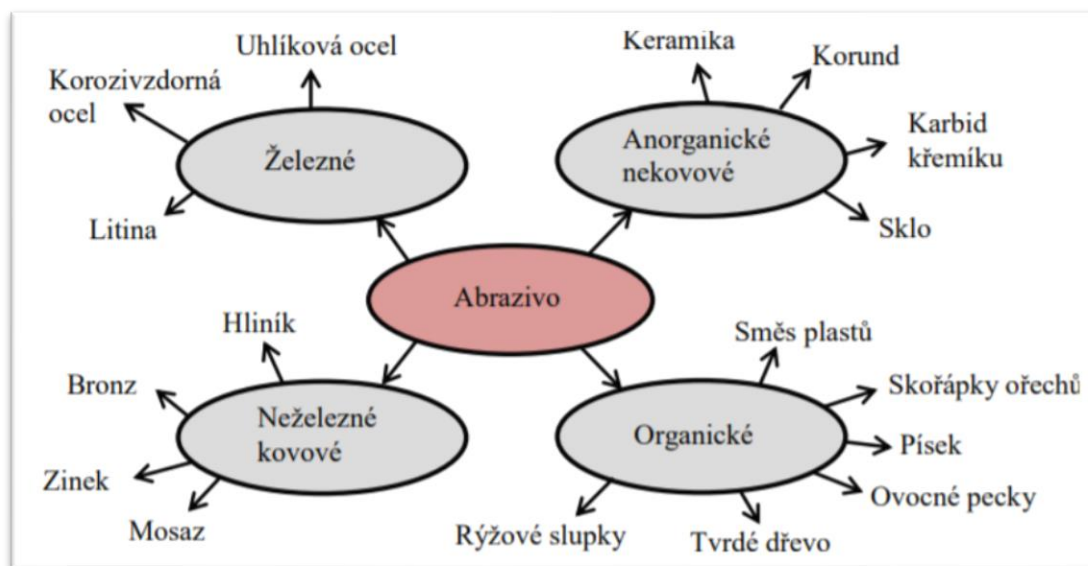


Obrázek 10: Shoot peening v praxi [6]

### 2.1.3. Tryskací média

Na trhu existuje velké množství různých druhů tryskacích medií. Jeho volba závisí na použitém tryskacím zařízení, typu materiálu a aplikaci neboli účelu tryskání. Rozdělují se dle materiálu a tvaru. Nejčastěji se vyrábějí ze tří základních druhů materiálů. [23] [22]

- ocelové kuličky/granulát (steelshot)
- keramické médium (zirshot)
- skleněné kuličky (balotina)



Obrázek 11: Schéma používaných abraziv [9]

Obecně lze říci, že ostrohranná media se používají k odstraňování nežádoucích nečistot z povrchů a sférická najdou největší využití ke zpevňování povrchové vrstvy. Během tryskání se tvar média vtiskává do materiálu a tím tvoří charakteristický vzhled povrchu součásti. Houževnaté materiály mají při tryskání tendenci k zakulacování, křehké materiály se odštipují nebo lámou na malé kusy. Tím může dojít k takovému úbytku materiálu média, že již nevyhovuje požadavkům na tryskání. K tomuto jevu často dochází například při balotínování, kde se skleněné kuličky opotřebovávají velice rychle. Proto pak při tryskání dochází k takzvanému sekundárnímu znečištění, které je tvořeno úlomky tryskacího média. V případě kovových médií mohou zbytkové nečistoty iniciovat tzv. bleskovou korozi.

Sekundární znečištění může mít také pozitivní vliv, kdy během procesu dojde k zachycení úlomků abraziva na povrch součásti a ta je tím dočasně chráněna proti korozi (platí pouze pro média z neželezných kovů). [23] [22]

## 2.1.4. Tryskací zařízení

Ke zvolení vhodného tryskacího zařízení je třeba vyhodnotit základní zadávací parametry. Mezi ty například patří vlastnosti otryskávaného materiálu, dle kterého se volí typ a tvrdost abraziva. Dále také počet vyráběných kusů, rozměry, přístupnost a tvar

ploch součástí. Samozřejmě je třeba znát i hlavní účel procesu, tedy zda je třeba povrch zpevňovat, čistit nebo jinak připravit k následným operacím. Tyto aspekty pak vedou ke správnému výběru tryskacího zařízení.

Tryskací stroje se na základě urychlování abraziva dělí do dvou skupin. V první skupině najdeme zařízení, jež urychlují médium pomocí stlačeného vzduchu. Do druhé zařadíme zařízení, která urychlují abrazivo mechanicky, pomocí odstředivé síly. [22] [2] [1]

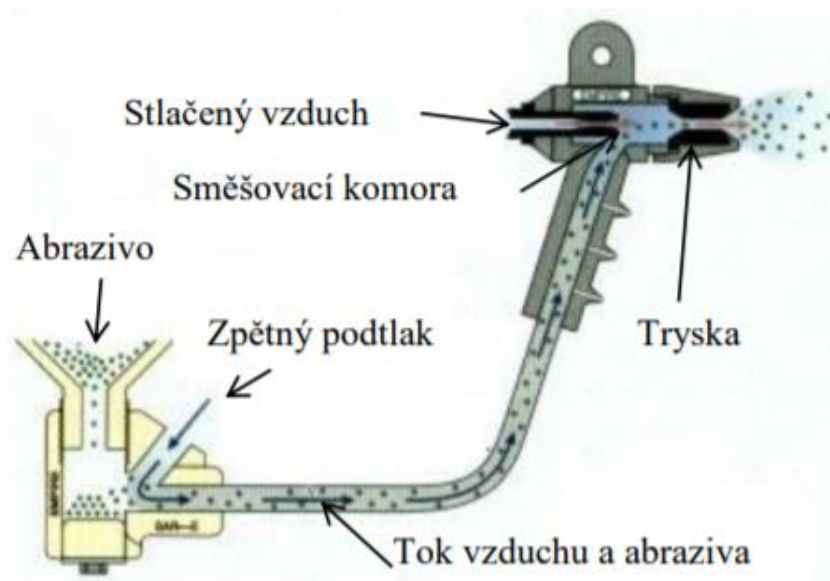
### **2.1.4.1. Pneumatická zařízení**

Zařízení poháněná stlačeným vzduchem se vyznačují vysokou mobilitou a variabilitou použití. Jejich největší výhodou je navedení tryskacího média přímo na plochu, kterou je třeba tryskat. Proto je toto zařízení často používané jako zdroj pro řízené kuličkování. Při procesu lze aplikovat různé stupně automatizace a používat zařízení jak staticky, tak pro aplikace v terénu, např. u stavebních konstrukcí. Tato zařízení se hodí nejvíce pro jemnější práce a tryskání menších dílu. Spotřeba tlakového vzduchu je velká, tudíž je provoz těchto strojů energeticky a ekonomicky náročný. Zařízení na stlačený vzduch můžeme dále dělit na tlaková a injektorová. [22] [2]

#### **Injektorová zařízení:**

Hodí se pro lehké typy tryskacích médií, jako je například balotina, plastová média nebo písek. Největší využití najdou při čištění méně soudržných nečistot, čištění skla nebo měkčích materiálů. Princip zařízení můžeme vidět na Obr. 12. Do směšovací komory je pod tlakem proudu stlačeného vzduchu přiváděno tryskací médium, které je následně spolu se vzduchem vymeteno z ústí trysky. Rychlost abraziva je možné regulovat úpravou průměru trysky a tlakem stlačeného vzduchu.. [22] [2]

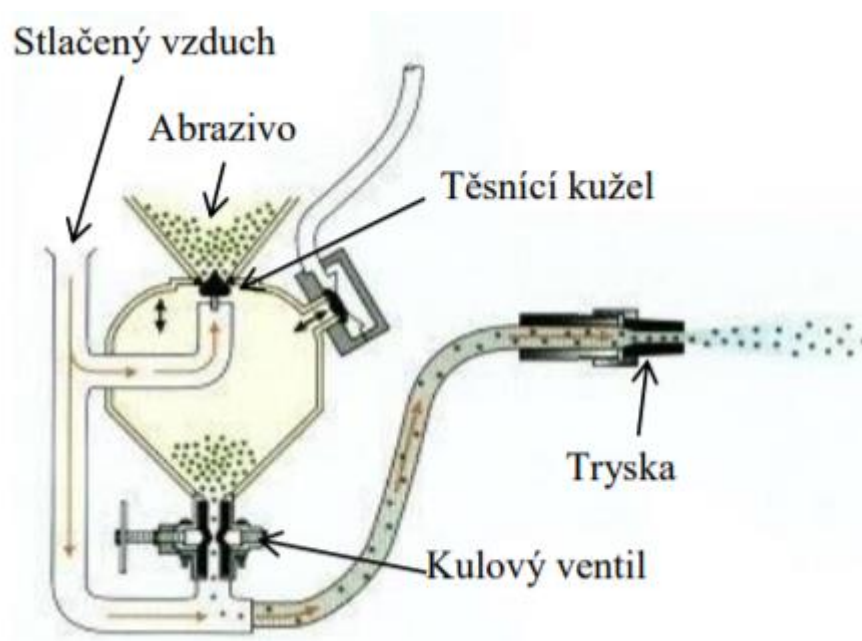




Obrázek 12: Injektorové tryskací zařízení [10]

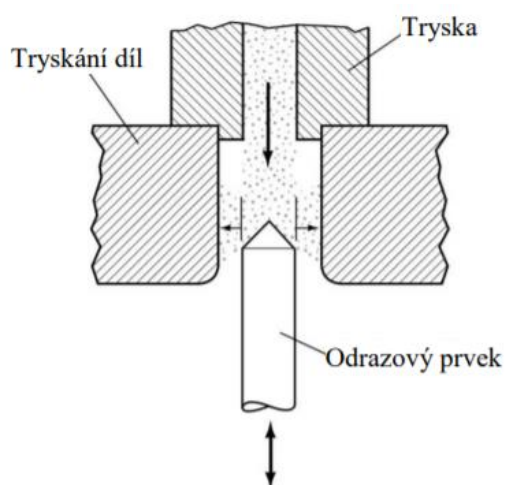
### Tlaková tryskací zařízení:

Použitím tlakového tryskacího zařízení dosáhneme až třikrát větší intenzity než v případě injektorového zařízení. Je možno použít i těžká tryskací média, jako je ocel litina, keramika nebo slinuté karbidy. Užití najde při čistění odlitků, okují, rzi, odstraňování starých nátěrů a zpevňování povrchových vrstev. [22] [2]

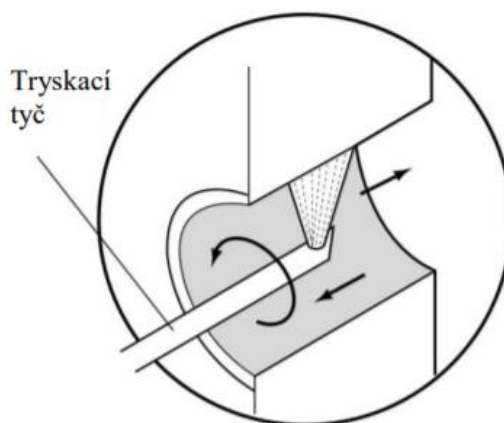


Obrázek 13: Tlakové tryskací zařízení [10]

Zařízení je tvořeno násypkou na abrazivo, tlakovou nádobou a tryskací hadicí nebo potrubím s tryskou. Při tryskání se tlaková nádoba natlakuje, tím dojde k uzavření těsnícího kužele násypky a následnému vymetení vzduchu a abraziva tryskou. Tento proces je třeba k doplnění abraziva do tlakové nádoby přerušovat. Konstrukce těchto zařízení umožňuje použití „tvarových trysek“, čímž je možné přivést médium k těžko dostupným plochám, například k hlubokým otvorům. Pro příklad je možné uvést tryskání děr s pomocí odrazového prvku a tryskání děr pomocí tryskací tyče. To lze využít i u tryskání neprůchozích děr. [22] [2]



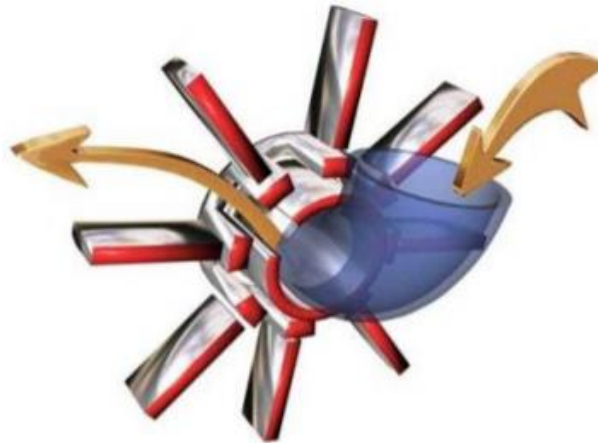
Obrázek 14: Tryskání děr s odrazovým prvkem [11]



Obrázek 15: Využití tryskací tyče [11]

## 2.1.4.2. Zařízení s metacími koly

V tomto případě se jedná o zařízení používaná v sériové výrobě a také pro tryskání malých i velice rozměrných součástí. Typickým příkladem je využití těchto zařízení ve slévárnách nebo hutích pro čištění okují nebo nečistot na odlitcích. Hodí se spíše pro tvarově jednoduché součásti. Při tryskání složitějších součástí je třeba použít více metacích kol zaměřených na různá místa součástí. Velkou výhodou těchto zařízení je jejich automatizovatelnost a možnost vysoké opakovatelnosti procesu, který je hospodárnější a účinnější než pneumatický způsob obrábění. Není však moc modulární, takovýto tryskač je totiž často navržen na jeden druh výrobků, nebo typologicky podobné výrobky. Zařízení jsou většinou koncipována na tryskání kovovými médii. [12]



Obrázek 16: Schéma metacího kola [2]

## 2.2. Laser peening

Princip této technologie spočívá v nanesení žáruvzdorné vrstvy, absorbující energii laserového paprsku, na povrch součásti. Následně je potřeba na jejím povrchu vytvořit izolační vrstvu, např. z vody nebo skla. Poté jsou na povrch vystřelovány elektrické pulzy Nd:YAG laseru. Vznikne tak vysokotlaká plasma, která vyvolává v povrchu součásti šokové vlny (v řádech GPa). Díky ochranné vrstvě nedojde k nežádoucímu poškození povrchu (neboť nedochází k tepelnému ovlivnění). Naopak v podpovrchové vrstvě vznikne tlakové napětí, které je až 4x silnější, než jakého je možné dosáhnout kuličkováním. [7] [8]



Obrázek 17: Princip technologie laser peening [7]

#### Hlavní přínosy technologie:

- zvýšení únavové odolnosti
- zvýšení odolnosti proti korozi
- zvýšení odolnosti proti opotřebení
- zvýšení pevnosti [8]



Obrázek 18: Ukázka procesu laser peening [7]

## 2.3. Válečkování

Válečkování, coby beztržisková dokončovací metoda, je založeno na principu regulovatelného tlaku, který v místě styku obrobku a nástroje způsobuje plastickou deformaci. Toto plynulé přetváření povrchu vede k objemovým i geometrickým změnám. Kromě snižování mikronerovností dochází také k velmi podstatným změnám metalurgické struktury a ke zpevnění, které je nejpatrnější u tvárných kovů. Z diagramu závislosti hloubky zpevněné vrstvy na tvrdosti válečkové plochy (Obr.3) vyplývá, že tvrdost při vyšších hodnotách hloubky zpevněné vrstvy klesá. Vnější síly způsobují deformaci krystalické mřížky v materiálu a přemísťování vrstev atomů. [12] [1]

**U takto zpevněných součástí dochází ke změnám mechanických vlastností: [12]**

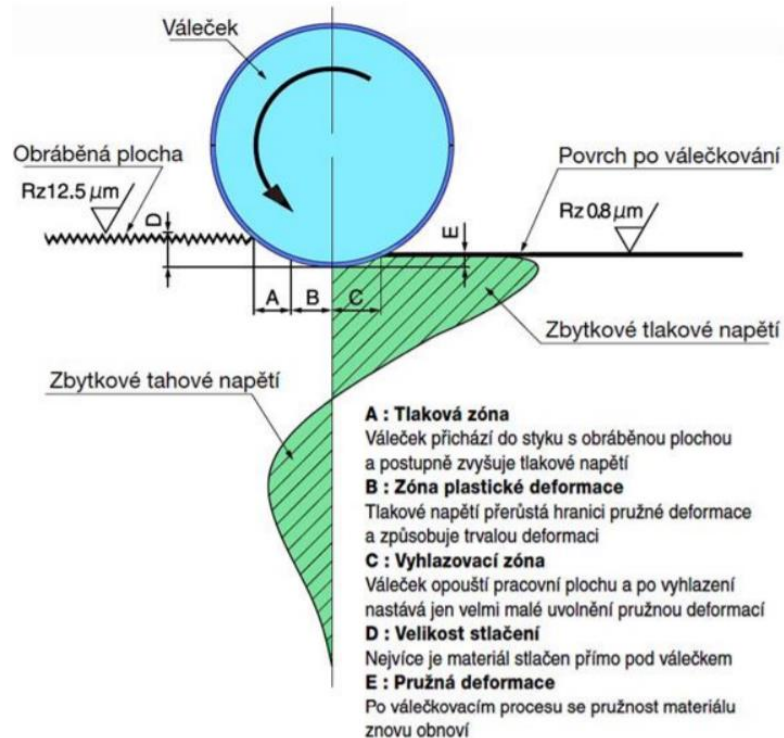
- + růst meze kluzu
- + nárůst pevnosti
- + nárůst tvrdost
- + nárůst odolnosti proti korozi
- snížení tažnosti
- snížení vrubové houževnatosti



Obrázek 19: Závislost hloubky zpevněné vrstvy na tvrdosti [12]

Zpevňování povrchové vrstvy materiálu strojních součástí je z hlediska

zlepšení mechanických vlastností jakousi prevencí proti vzniku únavového lomu (v provozu velmi častý jev). Pro lepší představu celé technologie jsou na Obr. 4 zobrazeny zbytkové deformace při válečkování a jednotlivé zóny, kterými dokončovaná plocha během děje prochází. [12] [1]



Obrázek 20: Zbytková napětí vzniklá válečkováním [13]

Válečkování se realizuje pomocí jednoho nebo více tvrdých, tvářecích prvků (válečky, kužele, kotouče apod.) proti povrchu obrobku téměř kolmou silou. Při této metodě zahlazuje plastická deformace nerovnosti po předchozím obrábění a vyvolává zpevnění povrchových vrstev (zvyšuje tvrdost, pevnost, mez únavy a mění nepříznivá tahová zbytková napětí z předchozího obrábění na tlaková). To vše má příznivý vliv na funkční vlastnosti součásti při dynamickém namáhání. Vlastní výsledný efekt válečkování závisí především na průměru aktivního povrchu válečku (menší průměr zvyšuje hloubku zpevnění, většími průměry se dosahuje nižší drsnosti). [14] [15]



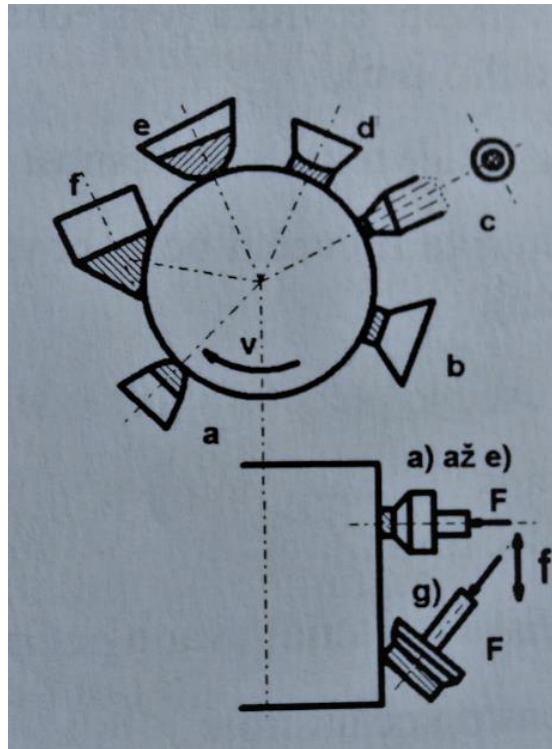
Obrázek 21: Válečkovací hlavy a) hlava pro vnitřní válečkování; b) hlava pro vnější válečkování [21]

#### Dosahované parametry: [1]

- vyhlazení povrchu (výsledná drsnost Ra 0,4-0,005)
- výchozí drsnost Ra 0,4 – 12,5
- kalibrace rozměrů (přesnost IT 7-4)
- hloubka zpevnění povrchové vrstvy (0,1-10mm)
- lze dosáhnout tvrdost až 60 HRC

## 2.4. Vyhlazování

Nejjednodušší způsob vyvolání plastické deformace za studena v povrchové vrstvě součásti je přitlačování pevného tvářecího elementu při vzájemném pohybu. Nástroj tvoří pracovní tělíska různých tvarů připevněná k tělesu z konstrukční oceli coby upínači. Vyhlazování se používá z pravidla na rotačních součástech na soustruhu. [1]

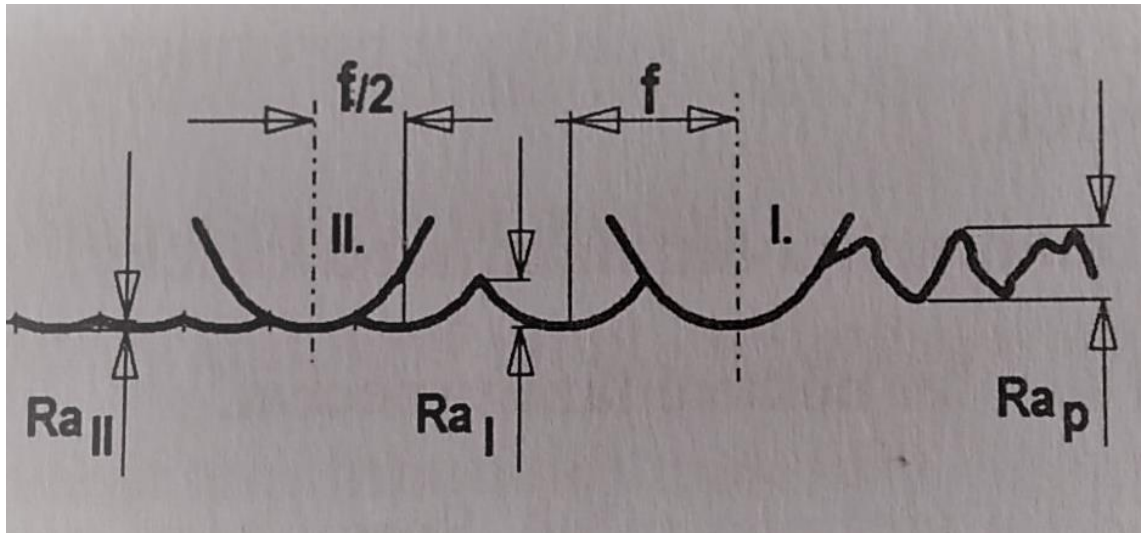


Obrázek 22: Vyhlazování [1]

### 2.4.1. Vyhlazování diamantem

Nástroj s kuželovou špičkou, která má definovaný poloměr zaoblení, je při tomto typu obrábění konstantní silou přitlačován k povrchu součásti. Na rozdíl od válečkování nedochází v místě styku k odvalování, čímž jsou vytvořeny podmínky pro kluzné tření. Zároveň však nástroj vzhledem k malé ploše kuželu kopíruje všechny nerovnosti. Nejvyššího účinku se dosahuje u tepelně zpracovaných ocelí s tvrdostí 50 až 55 HRC. Drsnost vyhlazené plochy závisí na materiálu součásti a pracovních podmínkách a může po jednom až třech průchodech nástroje dosáhnout hodnot kolem  $R_a$  0,1 až 0,4  $\mu\text{m}$ . Diamantové nástroje umožňují při intenzivním chlazení obrábění ocelí s tvrdostí až 60 HRC.[1]





Obrázek 23: Schéma vyhlazování [1]

#### Výhody vyhlazení povrchu diamantem: [1]

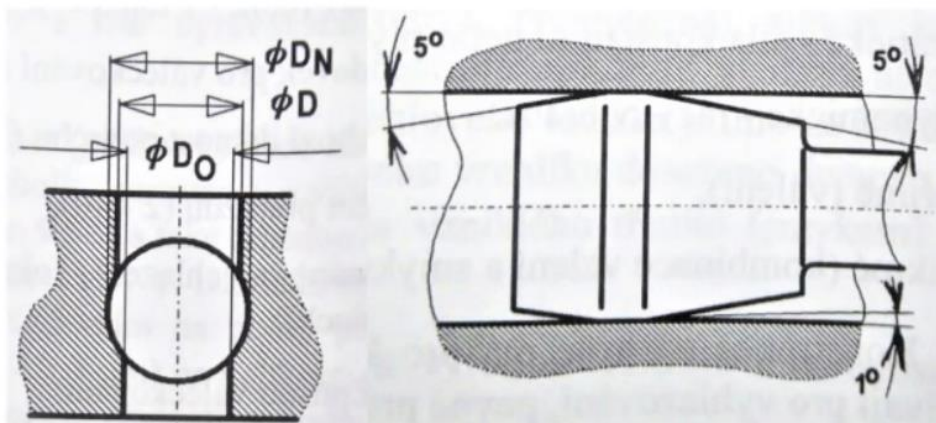
- zvýšení meze únavy a únosnosti
- větší odolnost součástí proti opotřebení a korozi
- nevzniká prach

#### Dosahované parametry: [1]

- nejvyššího účinku dosahujeme u ocelí s tvrdostí 50-55 HRC
- diamantem lze vyhlazovat i oceli s tvrdostí až 65 HRC
- drsnost povrchu Ra 0,1-0,4
- hloubka zpevnění 0,1-0,5 mm

## 2.5. Kalibrování

Plastická deformace je v tomto případě vyvolána přímočarým pohybem tvářecích elementů (smyk), jejichž rozměr je menší než vnější obráběné plochy nebo větší než vnitřní obráběné plochy. Nástrojem je protlačovací nástroj, například kulička nebo kalibrovací trn. Pohyb nástroje je vyvozován mechanicky nebo hydraulicky, někdy i rázem tlakové kapaliny nebo výbuchem. [1]



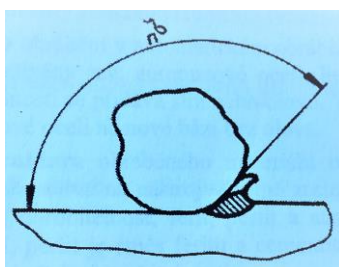
Obrázek 24: Kalibrování kuličkou a kalibrovacím trnem [1]

#### Dosahované parametry: [1]

- zkalibrování rozměrů IT 6-4;
- vyhlazení povrchu Ra 0,4-0,005;
- zpevnění povrchu do hloubky 0,05-0,2 mm.

### 3. Integrita povrchu

Základními charakteristikami pro hodnocení obrobené plochy je drsnost a přesnost. Existují však i další charakteristiky, kterými je možno hodnotit kvalitu povrchové vrstvy součásti. Patří sem topografické charakteristiky povrchu, strukturní změny, vady v povrchové vrstvě, průběh zpevnění, průběh zbytkových pnutí a další. Souhrn všech těchto charakteristik nazýváme integritou povrchu. [1]



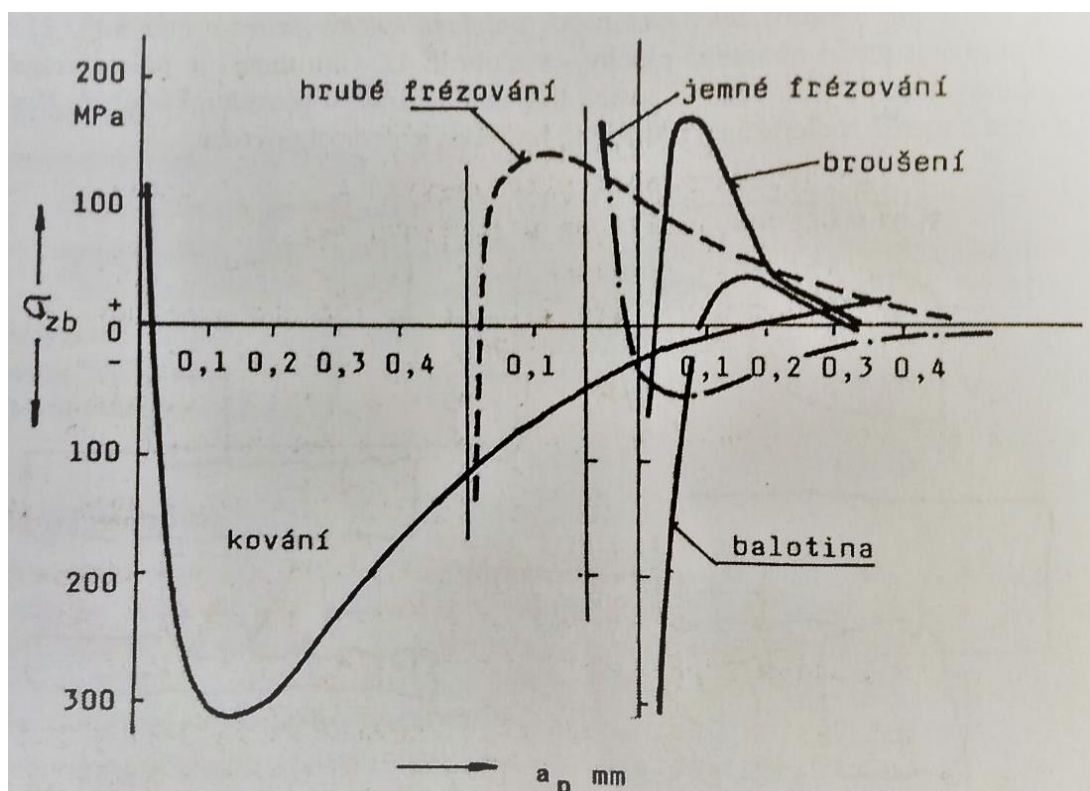
Obrázek 25: Oblast primární plastické deformace při broušení [1]

Oblast primární plastické deformace, například, při obrábění většinou zasahuje pod úroveň budoucího povrchu. Tento efekt vzniká při velkých úhlech řezu, konkrétně třeba při broušení. Vysoká teplota v povrchové vrstvě zase způsobuje strukturní změny

a významně ovlivňuje průběhy zbytkových pnutí. Nárůstek, zejména nestabilní, ovlivňuje drsnost a přesnost obráběné plochy. [1]

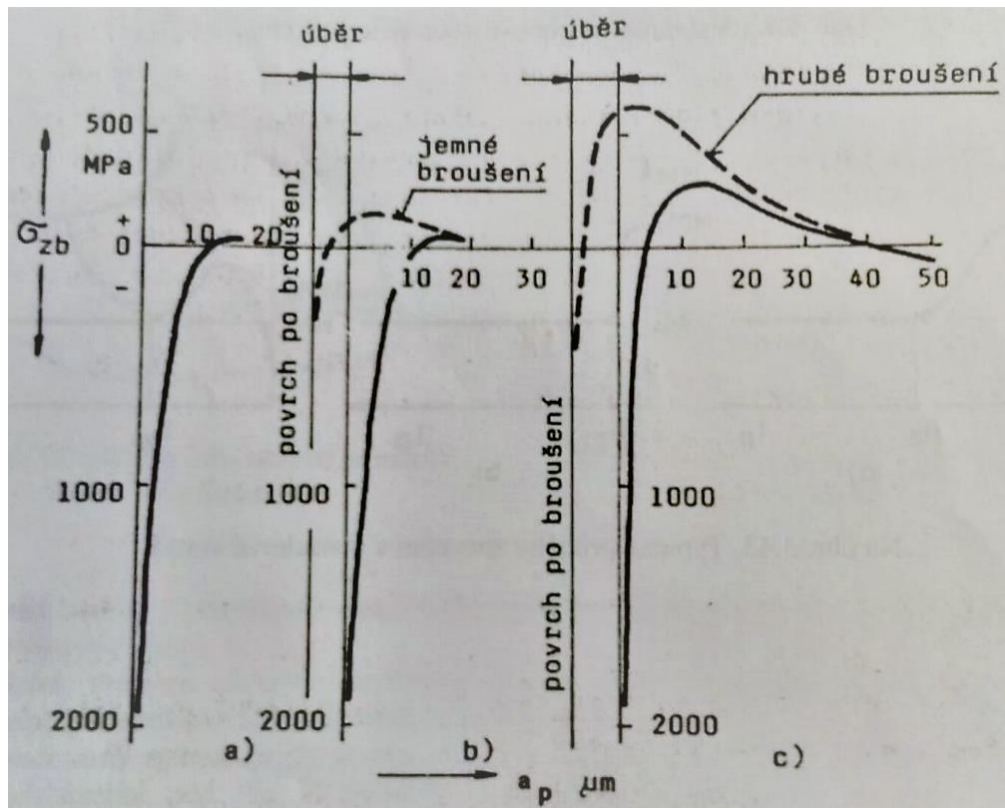
### 3.1. Zbytkové vnitřní pnutí a jeho měření

Zbytkové vnitřní pnutí je napětí v součástech, které je přítomno, i když na něj nepůsobíme vnějším zatížením. Vnitřní pnutí může nabývat jak tlakového, tak tahového charakteru. Zbytková napětí mohou mít příznivý i negativní dopad na mechanické vlastnosti materiálu. [1]



Obrázek 26: Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru z oceli 10Ch17N2 po různých technologických operacích [1]

Tlaková pnutí zvyšují korozní odolnost materiálu, zvyšují pevnost materiálu, jeho vrubovou houževnatost a odolnost proti vzniku trhlin obecně. To ovšem platí pouze do určité míry tlakového napětí, není po překročení určité meze již dochází k degradaci mechanických vlastností. Tahová napětí jsou pak v materiálu naopak většinou nežádoucí, nejvíce vznikají při třískovém obrábění v hrubovacích operacích. [1] [20]

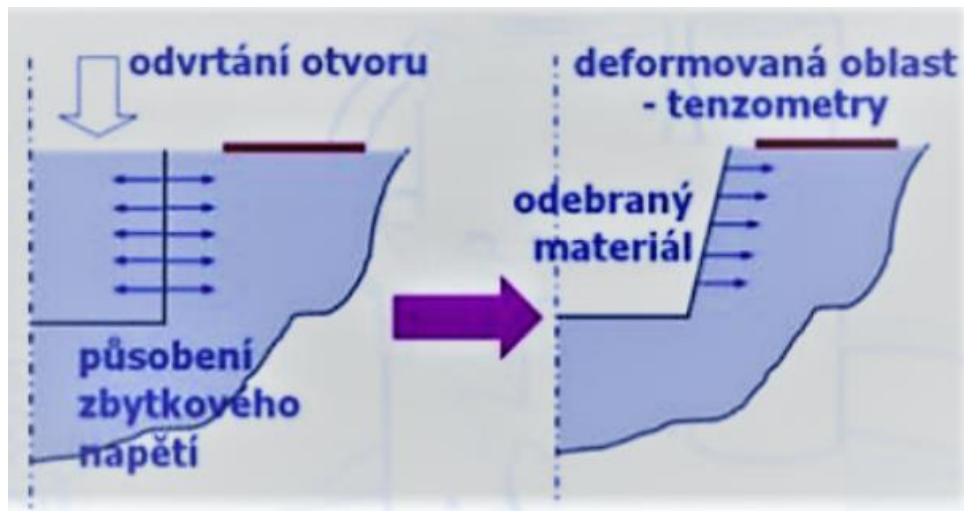


Obrázek 27: Vliv broušení a superfinišování na stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek [1]

Tahová napětí se dnes dají sledovat a měřit velkou škálou nepřímých metod. Nelze tedy měřit velikost zbytkových napětí, ale veličiny k nim přímo vztažené, jako je velikost deformace nebo jiné fyzikální veličiny. Dále si popíšeme některé z možných způsobů měření zbytkových napětí v součástech. [20]

### 3.1.1. Odvrtávací metoda

Často používaná polodestruktivní metoda, která spadá do mechanických metod zjišťování povrchového napětí (viz. Tab. 1) se nazývá odvrtávací metoda. Je to rychlá, levná a univerzální metoda, kterou je možné aplikovat na širokou škálu materiálů a součástí. Princip spočívá ve vyvrtání otvoru do zkoumané součásti. Tento otvor způsobí uvolnění zbytkových pnutí a v důsledku toho dojde k deformaci vyvrtaného otvoru. Výsledná deformace je pak měřena pomocí tenzometrů umístěných v okolí odvrtané díry. [17] [19]



Obrázek 28: Princip odvrtávací metody [1]

Výhodami této metody je poměrně malé poškození součásti a fakt, že se dá provádět v laboratořích i v terénu. Metoda se ovšem nehodí pro menší, tvarově složitě součásti a je náročná na přesnost a kvalitu povrchu vrtané díry. [17]

### 3.1.2. Ultrazvukové metody

Tyto metody jsou založené na principu zachycení rychlosti ultrazvukových vln šířících se materiálem. Jejich rychlost je přímo ovlivněna velikostí a směrem zbytkových napětí. Metoda se hodí spíše pro měření napětí v celém objemu součásti. Nelze se pomocí ní zaměřit na konkrétní místa a hodí se spíše pro rutinní kontrolu. Její největší výhoda tkví v nepoškození měřeného dílu a v rychlosti měření. Nevýhodou je nízké rozlišení a závislost na homogenitě materiálu. [17]

### 3.1.3. Magnetická metoda

Nedestruktivní metoda s vysokou přesností, založená na principu zachycení Berkhausenova šumu. Ten vzniká při působení magnetického pole na součást a jeho velikost je funkcí napětí v materiálu, tvrdost a mikrostruktury. Metoda je použitelná jen na feromagnetické materiály. [17]

### 3.1.4. Metoda elektrolytického odleptávání

Měření touto metodou spočívá v odleptávání povrchových vrstev materiálů z konkrétní analyzované plochy. Odleptáním napjaté vrstvy dojde k vytvoření rovnováhy v povrchu součásti. Velikost deformace a její smysl je úměrný rozložení zbytkových napětí v naleptané vrstvě. Deformaci vyhodnotíme například za pomoci optického mikroskopu nebo laserovým skenováním. Jedná se o velice přesnou metodu, zvláště proto, že do zkoumaného vzorku nevneseme žádné další napětí. Nevýhodou je aplikovatelnost pouze v laboratořích a destrukce měřeného dílu. [17] [18]

## 4. Specifika titanových slitin

### 4.1. Titan

Titan je desátý nejvíce rozšířený prvek v zemské kůře. Jeho zastoupení na hmotnosti země je cca 0,070 %. Přestože byl jako prvek znám již na konci 18. století, titan a jeho slitiny se začaly využívat až v padesátých letech minulého století. V té době se však jeho produkce soustředila převážně na v SSSR. Jednalo se o strategickou surovinu a jeho výroba a zpracovávání byly utajovány. Začátek rozmachu výroby titanu a technologií jeho zpracování na Západě nastartoval projekt přísně tajného letounu SR-71 Blackbird, jehož drak je vyroben převážně z titanu. Spojené státy nakupovali titan z SSSR lstí a know-how technologie výroby získávaly díky špionáži. V krátké době se pak titanové slitiny začaly používat v kosmonautice, leteckém, zbrojním a chemickém průmyslu a v energetice. K tomuto hojnému využití byl titan předurčen díky svým dobrým mechanickým, fyzikálním a chemickým vlastnostem. V letectví a kosmonautice je nejvíce ceněn pro svojí nízkou hmotnost a schopnost odolat vysokým teplotám. Titan vyniká nejvyšší pevností ze všech kovových materiálů. Typickým příkladem jeho využití jsou součásti proudových motorů, lopatky teplotních turbín nebo kloubní náhrady v lékařství. [26] [28] [27] [33]



Obrázek 29: Titan v přírodní formě [25]

Titan je nemagnetický kov s vynikajícími teplo-chemickými vlastnostmi. Jeho teplotní roztažnost je v porovnání s železnými kovy velice nízká, je to asi polovina tepelné roztažnosti hliníku. Má o něco vyšší teplotu tavení než železo (1670°) a maximální provozní teploty jeho slitin se pohybují v rozmezí od 420 až 550 °C. Širšímu uplatnění v průmyslu brání jeho vysoká cena, která je dána jeho složitým a nákladným získáváním a vysokou poptávkou. [26] [28] [27]

Tabulka 1: Základní fyzikální vlastnosti titanu [37]

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

## 4.2. Výroba titanu

Titan se v přírodě nevyskytuje v čisté formě, v malém či větším množství je obsažen ve většině minerálů. Nejčastěji se titan vyskytuje v podobě TiO<sub>2</sub>. Nejvýznamnější minerál pro jeho získávání je v současnosti Ilmenit. Dříve byl titan získáván z rutilové rudy, avšak její zásoby jsou dnes již téměř vyčerpány a 91 % produkce titanu pokrývá právě Ilmenit. [26] [29] [30]

Tabulka 2: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [37]

Prvek	Ti	Fe	Ni	Al
Teplota tání [°C]	1 670	1 538	1 455	660
Alotropická přeměna	882 °C ( $\beta \rightarrow \alpha$ )	912 °C ( $\gamma \rightarrow \alpha$ )	-	-
Krystalová struktura	bcc $\rightarrow$ hcp	fcc $\rightarrow$ bcc	fcc	fcc
Modul pružnosti [GPa]	115	215	200	72
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	4 500	7 800	8 900	2 700
Korozní odolnost	velmi vysoká	nízká	střední	vysoká
Cena	velmi vysoká	nízká	vysoká	střední

Samotná výroba je složitá kvůli velké reaktivitě titanu za vysokých teplot. Při nízkých teplotách do 535 °C je pokryt oxidickou vrstvou  $\text{TiO}_2$ , ta se při vyšších teplotách se začne rozpadat. Tím se titan stává náchylným k reakcím s prvky z okolního prostředí. Díky vysoké afinitě (ochota atomu nebo sloučeniny reagovat s jiným atomem nebo sloučeninou) titan silně reaguje s běžnými atmosférickými plyny ( $\text{H}, \text{N}, \text{O}_2$ ) nebo s uhlíkem. Tyto reakce jsou při jeho výrobě samozřejmě nežádoucí a je tak vyráběn ve vakuu nebo v inertní atmosféře. [26] [29] [30]

### 4.3. Slitina titanu Ti-Al6-4V

Nejvíce nás bude zajímat právě materiál Ti-Al6-4V, protože je to nejpoužívanější slitina titanu vůbec, a hlavně kolo kompresoru, které budeme zpevňovat je vyrobeno právě z této slitiny. Podíl této slitiny je téměř 50% z celkové výroby titanu ve světě. Tato slitina zvládne vystavení provozním teplotám až do 470°C a vyznačuje se dobrou tvářitelností, obrobitelností, korozní odolností a svařitelností. Byla vyvinuta speciálně pro výrobu lopatek plynových turbín. Uplatnění, ale najde ve spoustě odvětvích průmyslu. Kromě hliníku a vanadu v něm najdeme i další prvky. [27] [29]



Tabulka 3: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [37]

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

Tabulka 4: Fyzikální a mechanické vlastnosti žíhané slitiny Ti-6Al-4V za pokojové teploty [37]

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

## 4.4. Obrobitelnost Titanu

Titan má oproti jiným běžně obráběným kovům několik jedinečných vlastností, které je třeba brát při návrhu technologie obrábění v patrnost.

První z nich je malá tepelná vodivost titanu ( $11,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), v porovnání například s uhlíkovou ocelí ( $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Tato malá tepelná vodivost má za následek velkou akumulaci tepla při tření mezi nástrojem a obrobkem, která se velmi špatně odvádí. To má nepříznivý vliv na trvanlivost nástroje, jelikož většina energie se soustředí do malé plochy. Titan také disponuje vysokým součinitelem tření a afinitou. To způsobuje zvýšenou možnost vytrhávání materiálu nástrojem a zadírání. Nízký modul pružnosti pak zapříčiňuje odpružení při obrábění, což vyvolává tendenci obrobku se od nástroje odklánět. [31] [32]

## 4.5. Zásady obrábění titanu

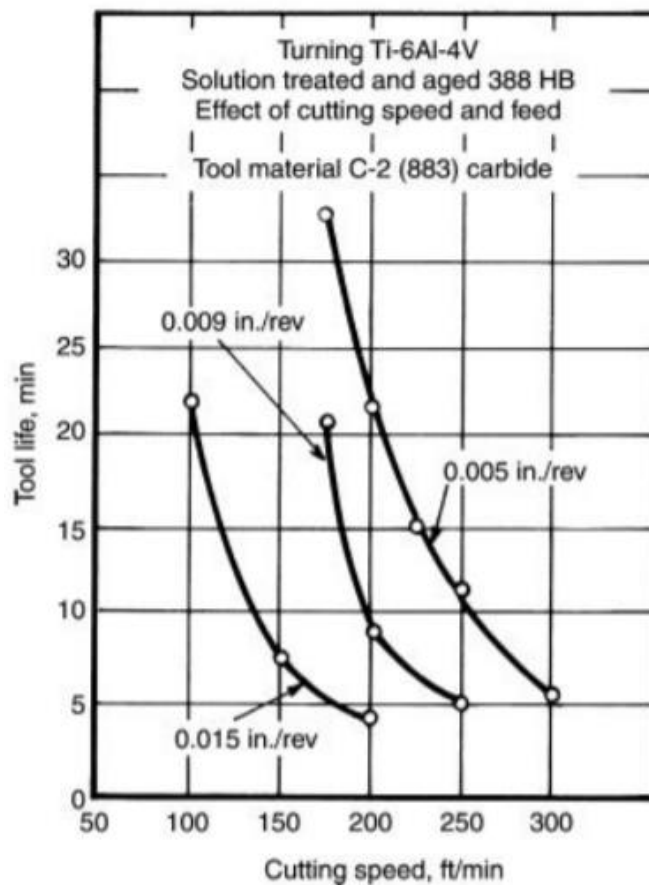
Abychom mohli titan efektivně obrábět a maximalizovat životnost nástroje je třeba dodržet několik zásad.:

**Nízká řezná rychlost:** Řezná rychlost je přímo úměrná teplotě nástroje a je třeba ji držet na nízké úrovni. Snížením teploty břitu nástroje se rapidně zvyšuje jeho životnost.

**Nezastavovat obráběcí proces v kontaktu:** Pokud necháme v řezném procesu nástroj a obrobek v kontaktu s absencí posuvu, vystavujeme se tím riziku zadírání, které může mít za následek zničení nástroje.

**Vysoké hodnoty posuvu:** Jelikož má velikost posuv nejmenší vliv na teplotu procesu v místě řezu, doporučuje se obrábět s co nejvyšší hodnotou posuvu.

**Chladící kapalina:** Užití správného typu chladící emulze pomůže snížit teplotu, řezné síly a zlepšit odvod třísek. Doporučuje se použití řezné emulze, před minerálními oleji nebo vodním roztokem. [32]



Obrázek 30: Závislost životnosti nástroje na řezné rychlosti a posuvu při soustružení slitiny Ti-6Al-4V [31]

## 5. Vibrační zpevňování

Plastická deformace povrchové vrstvy vyvolaná dopadem částic urychlených vibracemi. Částice můžeme při vibračním kuličkováním urychlovat dvěma způsoby, a to mechanicky nebo ultrazvukem. [1]

### **Mechanicky:**

Speciálnímu zařízení je udělován kmitavý pohyb ve třech osách (popř. za současné rotace s proměnnou rychlostí a smyslem). Dokončování se realizuje dopady částic, přičemž podmínky jsou voleny tak, aby vektor jejich výsledného zrychlení směřoval kolmo k obráběné ploše. Částice (litinové, ocelové kuličky) by měly mít co nejvyšší hmotnost, jejich průměr je limitován poloměrem přechodů mezi obráběnými plochami. [1]

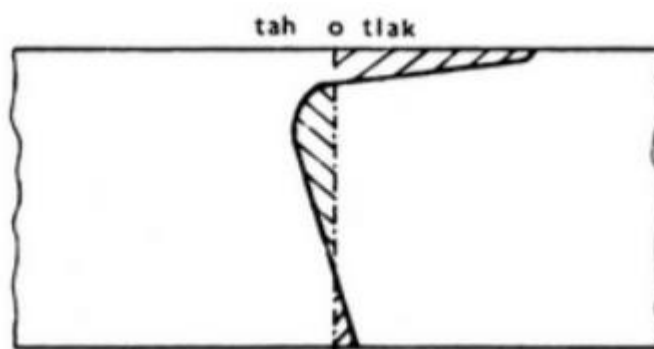
### **Ultrazvukem:** (vibrace o frekvenci až 30 kHz):

Obrobek je pevně upnut v zásypu ocelových kuliček, které přenášejí vibrace z nástavců uložených na stěnách zařízení. [1] V našem případě jsou kmity přenášeny na přípravek s kolem kompresoru přes konstrukci z ocelových profilů, jak je vidět na Obr. 31.



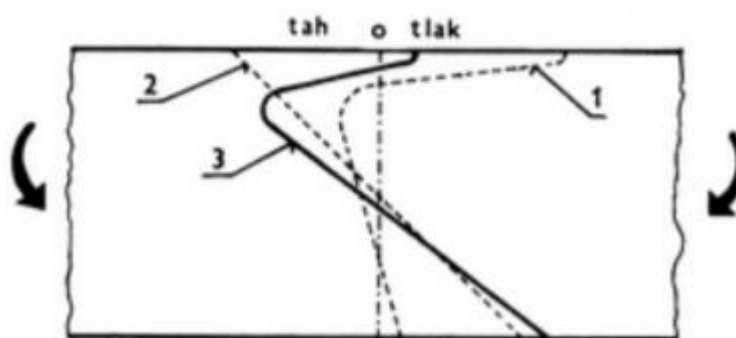
Obrázek 31: Vibrační rám s přípravky, vibrační motor je umístěn pod rámem

Po vibračním kuličkováním dochází k vytvoření rovnováhy, při které tlustší spodní vrstva vnitřního materiálu drží nízkým tahovým napětím tenkou vrstvu povrchu ve stavu vysokého tlakového napětí (Obr. 32. [23])



Obrázek 32: Rozložení zbytkového napětí v součásti po jednostranném kuličkování [23]

V případě, že je součást zatížena vnější silou, bude se výsledné napětí rovnat algebraickému součtu zbytkového pnutí a napětí způsobeném zatížením (Obr. 33) [23]



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

Obrázek 33: Výsledné rozložení napětí [23]

## 6. Návrh přípravků pro kolo radiálního kompresoru

V této části práce se budeme zabývat návrhem a konstrukcí přípravku pro kuličkování radiálního kola kompresoru turbovrtulového motoru. Později i jeho reálným odzkoušením. Na Obr. 34 vidíme radiální kolo namontované na hřídeli motoru společně s dalšími koly kompresoru. Jedná se o největší kolo umístěné vlevo.



Obrázek 34: Radiální kolo, blisk 1 a blisk 2 [34]

Dosavadní dokončovací operace na radiálním kole se projeví jako nedostatečné a je proto třeba navrhnout dokončovací operaci (vibrační zpevňování) tak aby byla zvýšena životnost dílu. Autorem práce byl tedy navržen a zkonstruován přípravek, který by měl vyhovět požadavkům na větší zpevnění povrchu radiálního kola. Déle byli zhotoveny dva kusy tohoto přípravku a testovány ve zkušebním provozu, zkouškou pokrytí.

### 6.1. Návrh přípravku

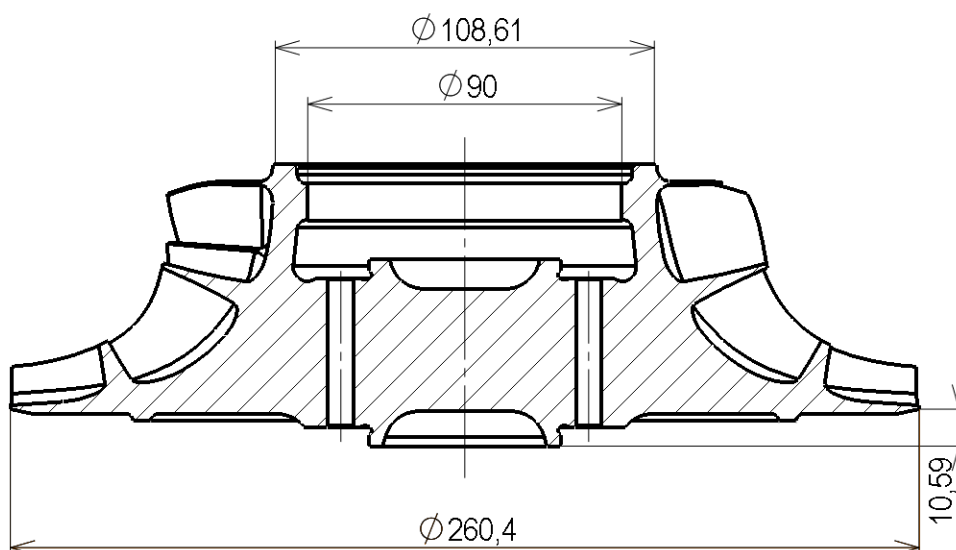
Na základě konzultace s Ing. Zdeňkem Pitrmucem byli dohodnuty základní parametry, které by měl přípravek splňovat a omezující podmínky pro přípravek.

### Základní parametry:

- kompatibilita se zařízením pro vibrační zpevňování MA-01-549 z toho vyplývající způsob upnutí
- jednoduchá a ergonomická montáž
- jednoduchá výroba
- stejná hmotnost jako současné přípravky, případné dovážení rámu
- materiál přípravku nesmí kontaminovat radiální kolo
- stejná odrazová mezera v celém přípravku
- možnost nastavení odrazové mezery
- ochrana dosedacích ploch dílu.

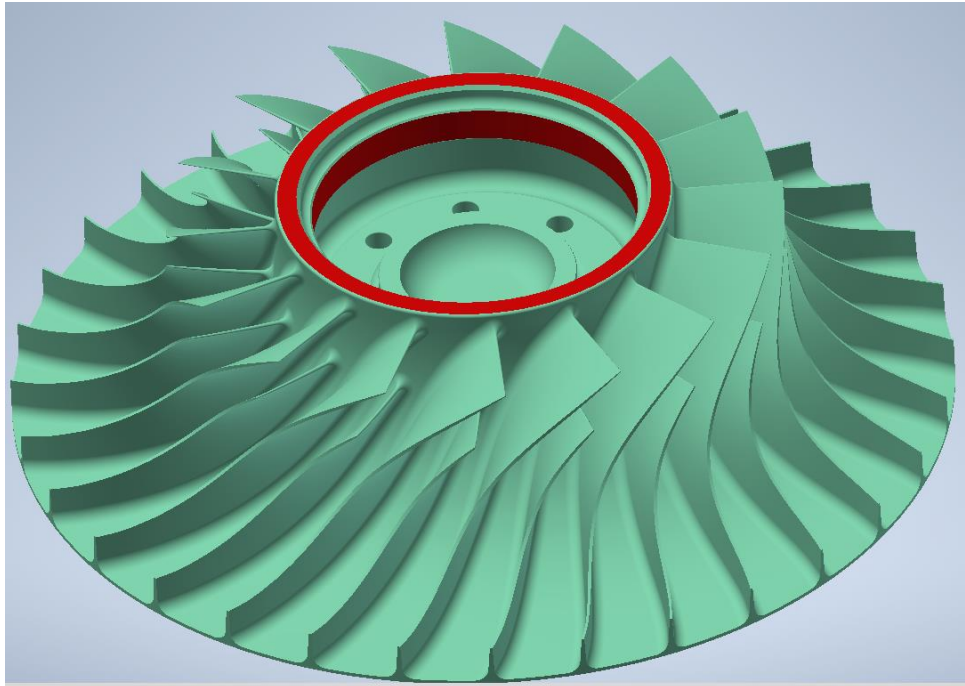
## 6.1.1. Analýza radiálního kola

V této fázi návrhu se zaměříme na analýzu rozměrů radiálního kola a určíme dosedací plochy. Dále je třeba určit které části kompresorového kola mají být zpevňovány a kde je naopak třeba prostupu média zabránit.



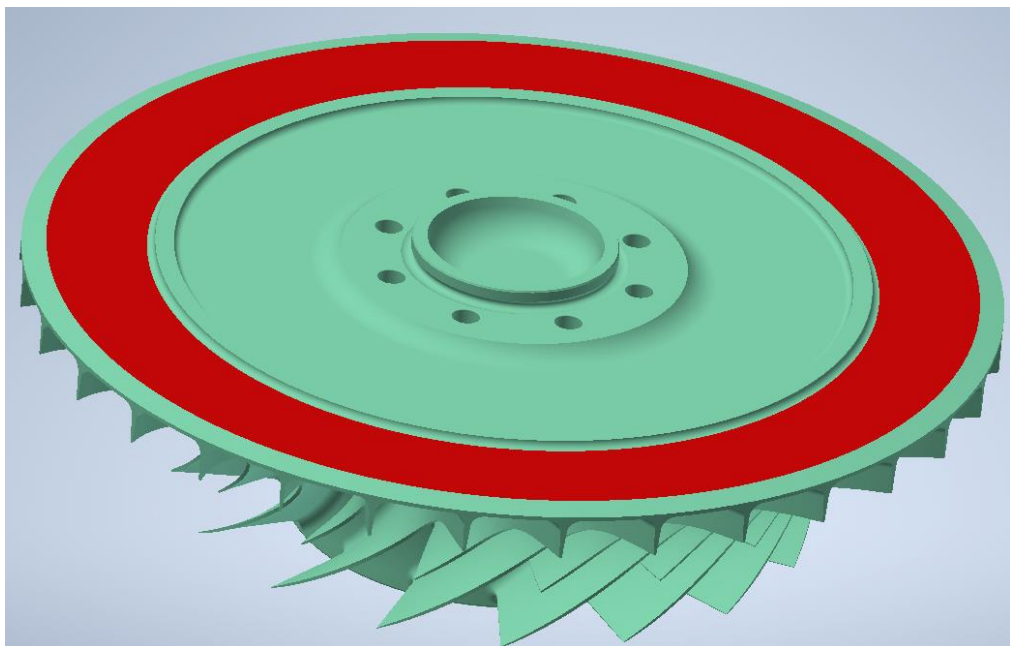
Obrázek 35: Základní rozměry radiálního kola v řezu

Na obrázku Obr. 36 je jsou červeně označeny dosedací plochy pro upnutí přípravku z jeho horní strany.



Obrázek 36: Červeně označené dosedací plochy v horní části radiálního kola

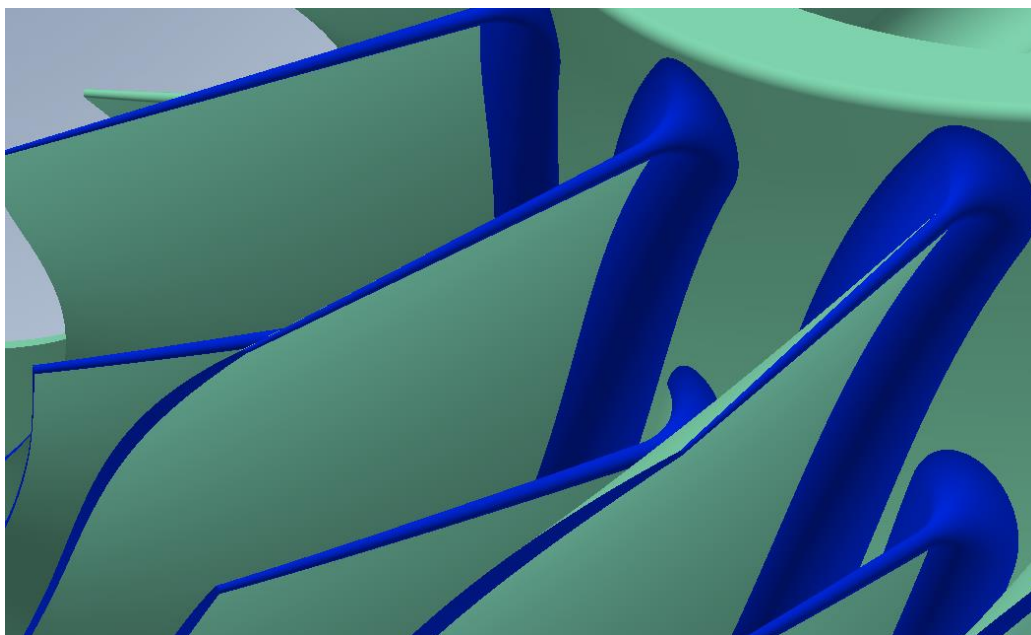
Na dalším obrázku: Obr. 37 jsou naznačené dosedací plochy, které jsme zvolili pro upnutí spodní části radiálního kola.



Obrázek 37: Červeně označené dosedací plochy v dolní části radiálního kola

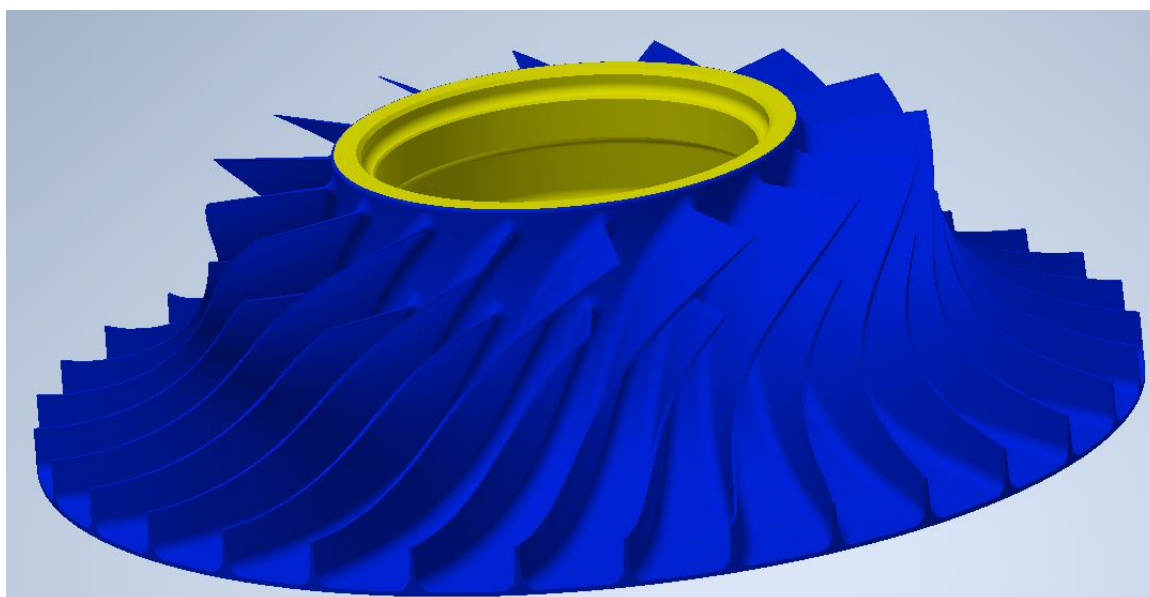
Radiální kolo bude tedy centrováno za jeden průměr a upnuto za dvě plochy umístěné proti sobě rovnoběžně.

Nejkritičtější místa z hlediska pevnosti radiálního kola a jeho nejvíce namáhané části jsou lopatky, konkrétně nejvyšší zatížení pak musí snášet náběžné hrany lopatek a kořeny lopatek. Ty jsou na obrázku Obr. 38 značeny modře.



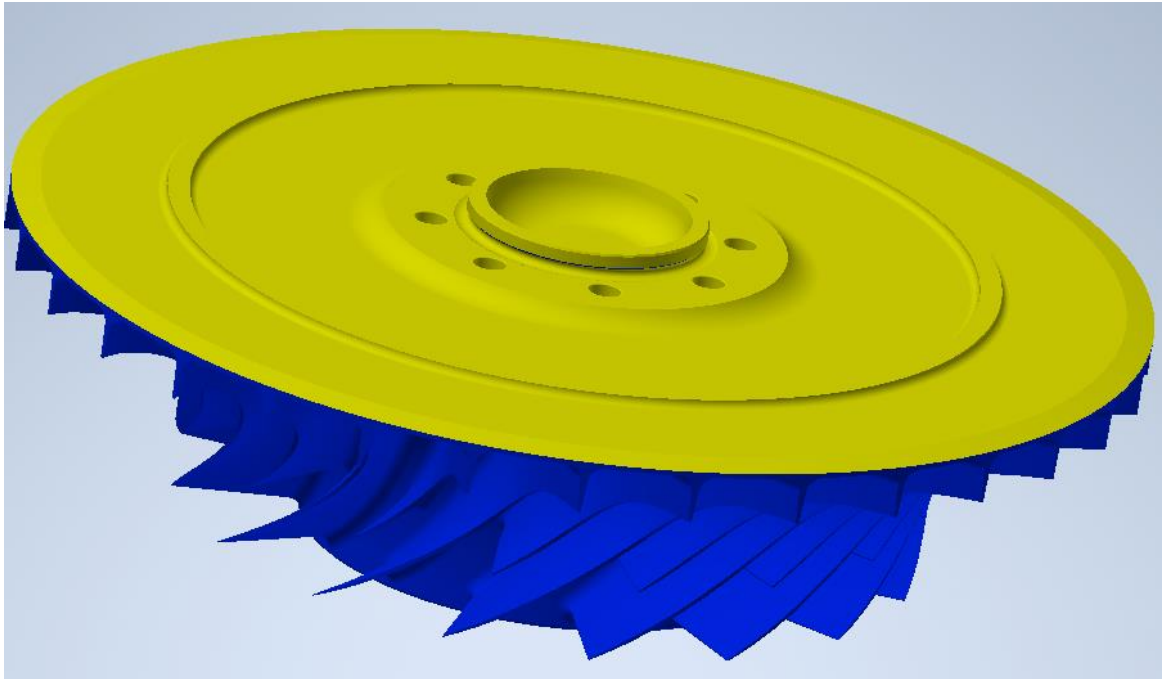
Obrázek 38: Modře označená nejvíce namáhaná místa radiálního kola

Přípravek by měl být tedy navržen tak, abychom dokázali co nejlépe zpevnovat právě tato místa. Zpevnována by měla být jen část s lopatkami. Do zbytku radiálního kola se nesmí kuličky dostat. Oblast, kam nesmí kuličky proniknout je na Obr. 39 a 40 značena žlutě, oblast určená k vibračnímu zpevnění pak má barvu modrou.



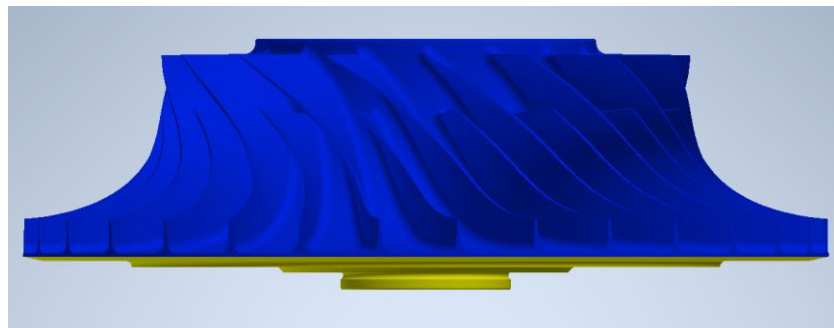
Obrázek 39: Pohled na radiální kolo z horní části, modrá oblast je určena ke zpevnování



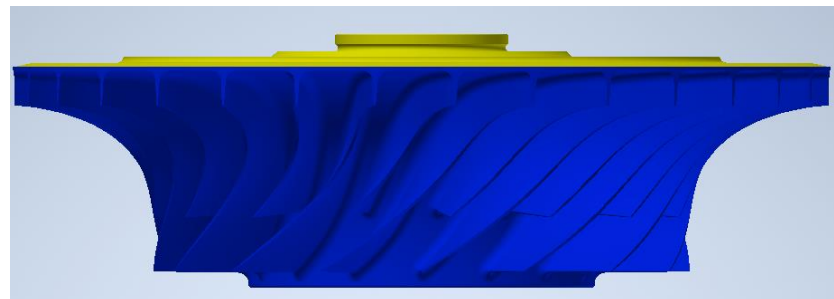


Obrázek 40: Pohled na radiální kolo z dolní části, modrá oblast je určena ke zpevňování

Vzhledem k velkým rozměrům a tvarové složitosti kola se bude muset provádět kuličkování v přípravku na dvakrát. A to záborníkem nahoru a záborníkem dolů.



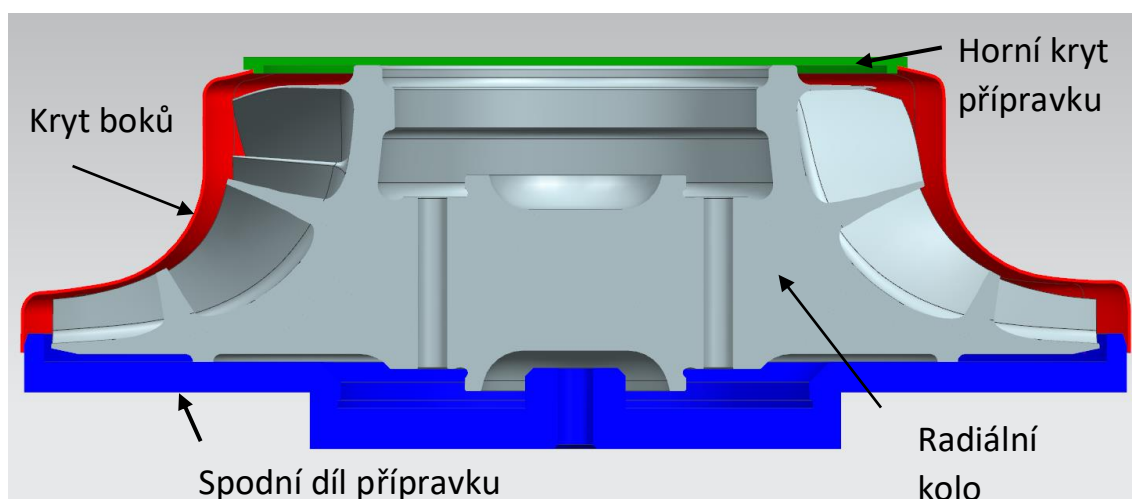
Obrázek 41: Poloha záborníkem nahoru



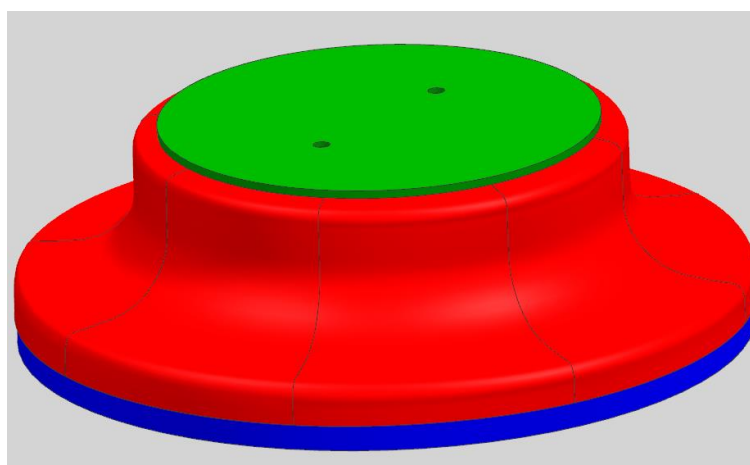
Obrázek 42: Poloha záborníkem dolů

## 6.1.2. První varianta přípravku

V první variantě návrhu není přihlédnuto ke všem podmínkám návrhu. Tento návrh slouží k základní představě, jak bude přípravek vypadat. Bude složen ze tří hlavních částí. Krytu boků, horního a spodního dílu.



Obrázek 43: První varianta návrhu

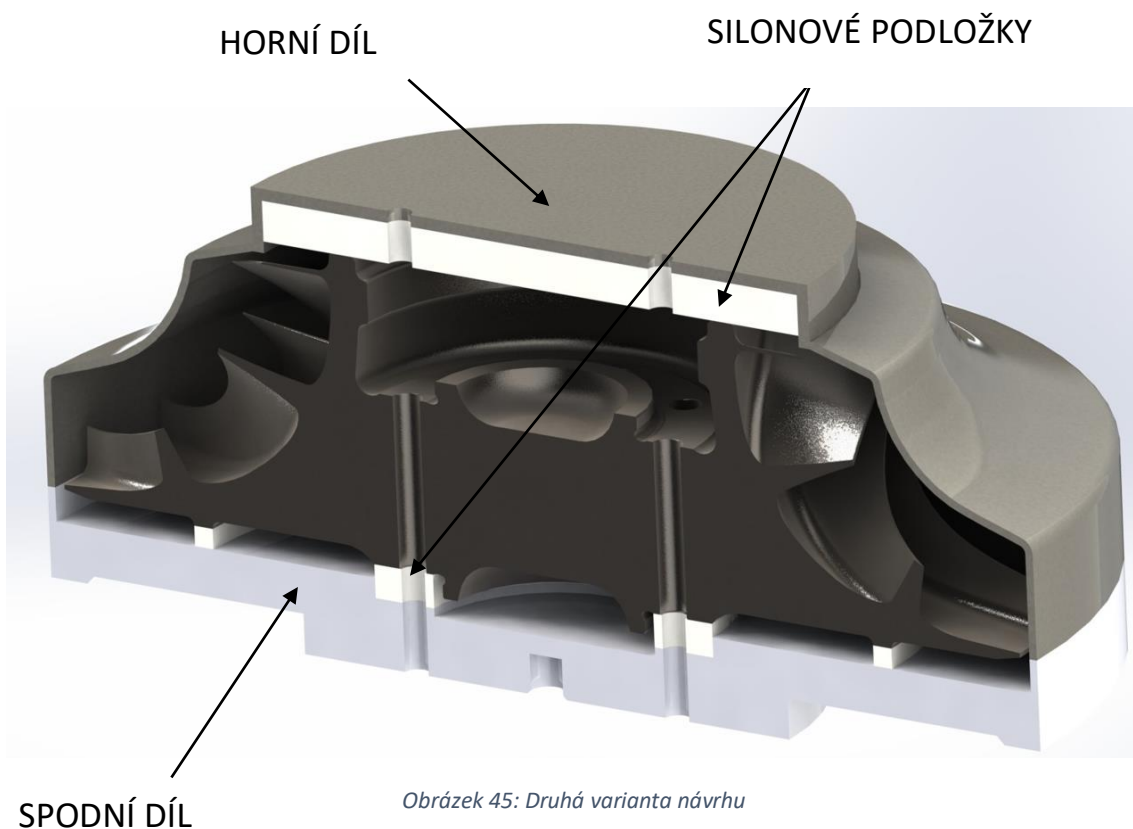


Obrázek 44: První varianta návrhu – pohled na uzavřený přípravek

## 6.1.3. Druhá varianta přípravku

V této variantě jsem se zaměřil na ochranu radiálního kola přidáním silonových podložek jako dosedacích ploch. Horní díl přípravku je oproti první variantě vyroben z jednoho kusu. Vrchní část bude vyrobena z nerezové oceli a spodní část, která nepřijde do styku s kuličkovacím médiem bude kvůli úspoře hmotnosti vyrobena z duralu. Také je přípravek vybaven dírami pro šrouby, pomocí kterých se bude horní a spodní část

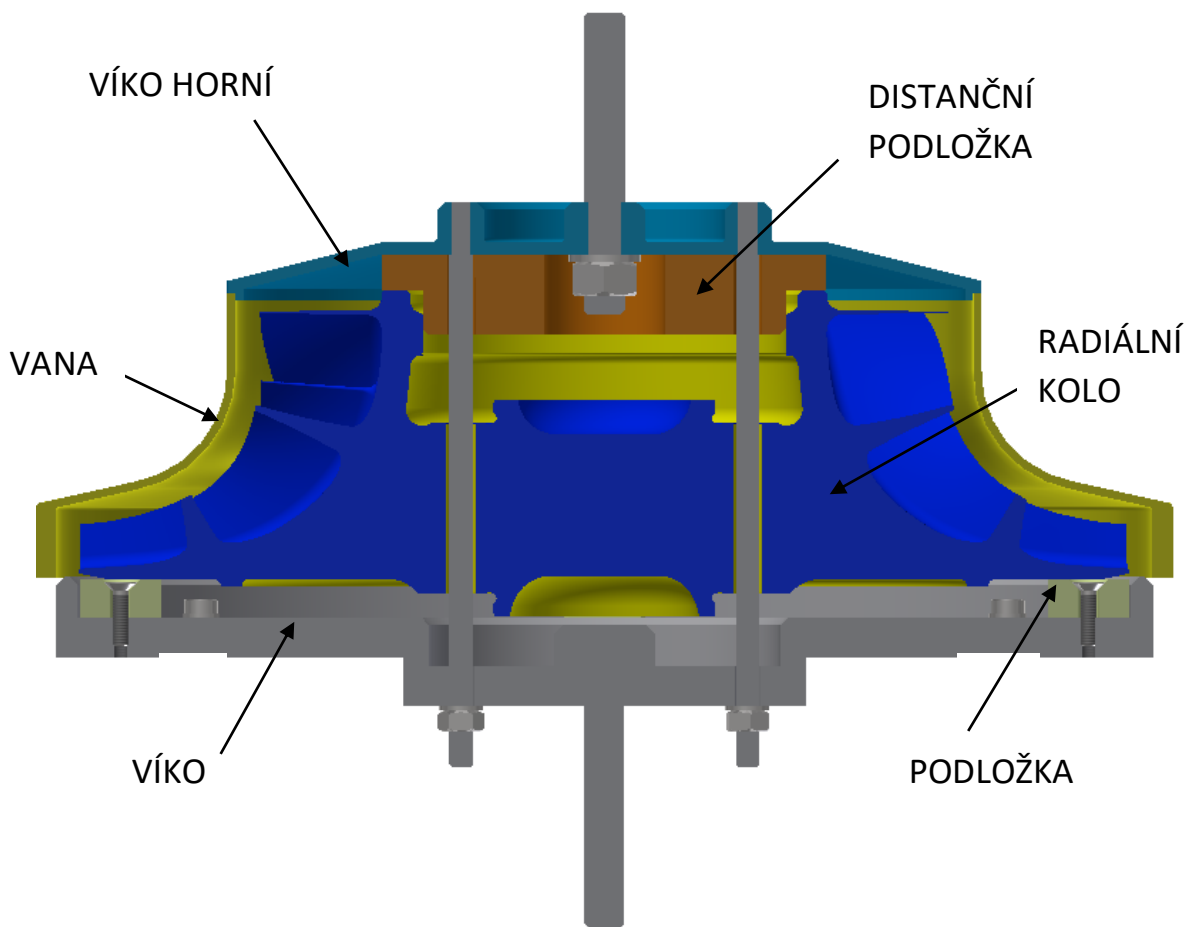
přípravku sešroubována. Tato konstrukce neřeší všechny zadané parametry a slouží jen jako postupový návrh.



Obrázek 45: Druhá varianta návrhu

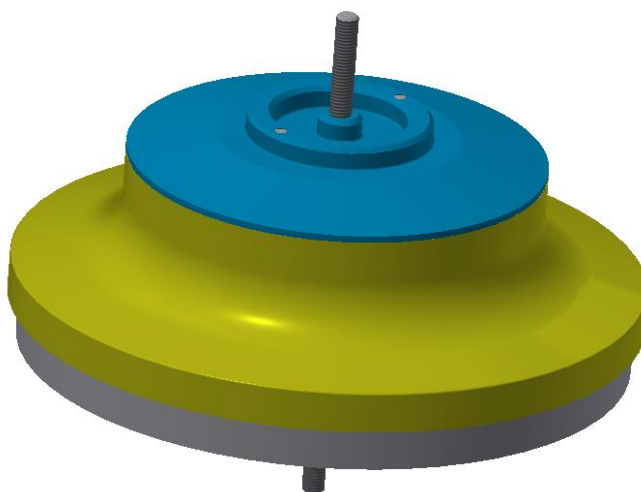
#### 6.1.4. Třetí varianta přípravku

Ve třetí variantě jsme se již snažili přihlédnout ke všem parametrům, které by měl přípravek splňovat. Je složen ze tří základních částí, které jsem pracovně nazval: vana, víko a víko horní. To jsou hlavní části, které uzavírají radiální kolo v přípravku. V předchozím návrhu byla zvažována varianta, kde jsou vana a víko horní vyrobeny z jednoho kusu. Ovšem výroba takové součásti by byla zbytečně náročná a docházelo by k velkému úběru materiálu. Bylo tedy rozhodnuto vyrobit tyto součásti zvláště a poté svažit. Vana a víko horní jsou z nerezové oceli, z důvodu tuhosti přípravku a živostnosti. Víko je pak z duralu kvůli snížení hmotnosti přípravku. Jak je vidět na obrázku, vana byla navržena tak, aby kopírovala profil lopatek v celé jejich délce. Tím bylo dosaženo stejné odrazové mezery. Dále jsem umístil do přípravku distanční podložku ze silonu, jejímž případným obrobením lze zmenšit velikost odrazové mezery. Souží také k centrování radiálního kola a jako dosedací plocha.



Obrázek 46: Třetí varianta přípravku

Jako dosedací plochy pro spodní část radiálního kola slouží silonové podložky ze silonu. Přípravek je smontován pomocí dvou šroubů M6x140 a na upnutí přípravku do stroje slouží dvojice šroubů M10.

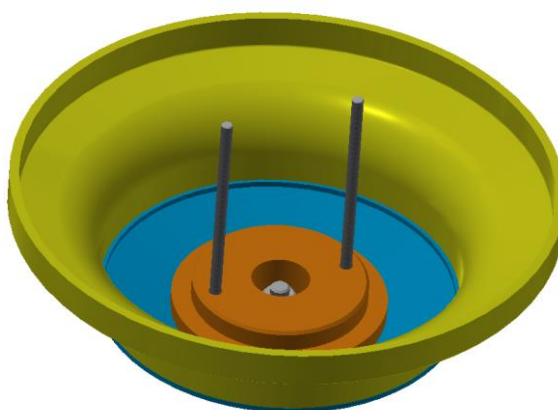


Obrázek 47: Třetí varianta přípravku – pohled na uzavřený přípravek

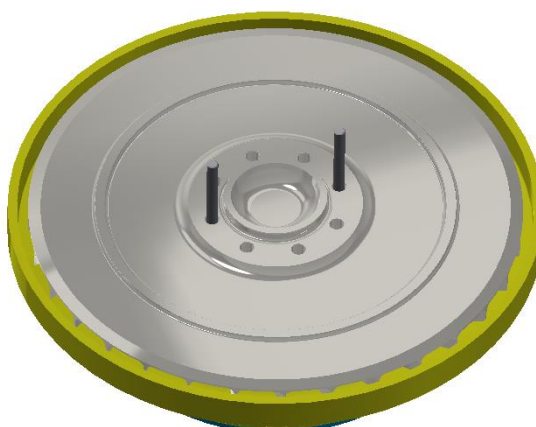
## 6.1.5. Čtvrtá varianta přípravku

Předchozí varianta přípravku se již jeví jako použitelná pro výrobu. V této variantě jsem se zaměřil na montáž přípravku a vkládání radiálního kola do přípravku. Dále bylo cílem dodržet všechny požadované parametry a dosáhnout varianty použitelné k výrobě a následnému testování. Proto bylo důležité projít si postup vkládání radiálního kola do přípravku, abychom si byli jisti, že budou splněna všechna kritéria.

Do přípravku bylo radiální kolo vkládáno v poloze, jaká je znázorněna na Obr. 48, 49. Radiální kolo se muselo nasazovat na šrouby, kterými se následně přípravek stahoval. Je tedy třeba se trefit na šrouby do děr v radiálním kole.

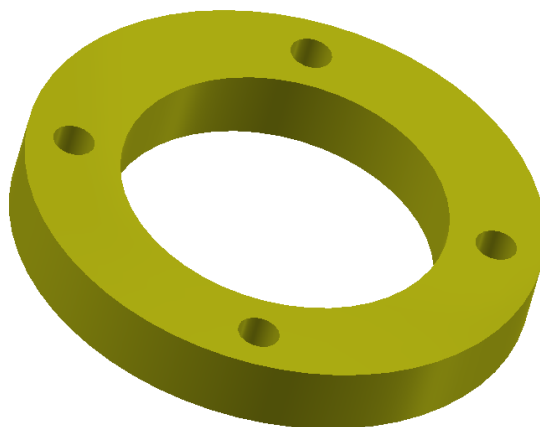


Obrázek 48: Přípravek bez vloženého radiálního kola

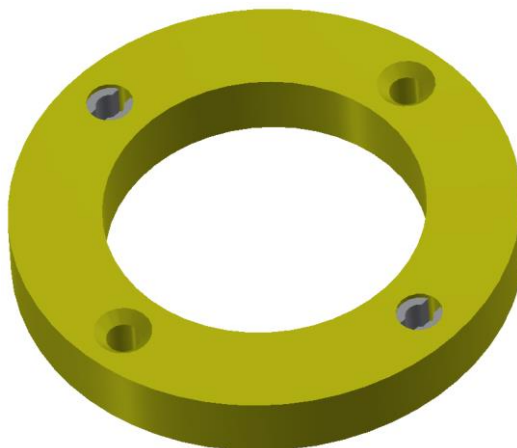


Obrázek 49: Radiální kolo vložené v přípravku

Při tomto úkonu by mohlo dojít k poškození nebo poškrábání radiálního kola o šrouby. Kvůli této skutečnosti, jsem byl nucen opatřit radiální kolo silonovými kryty, které se na kolo montují ještě před vložením do přípravku a zabrání poškození součásti.

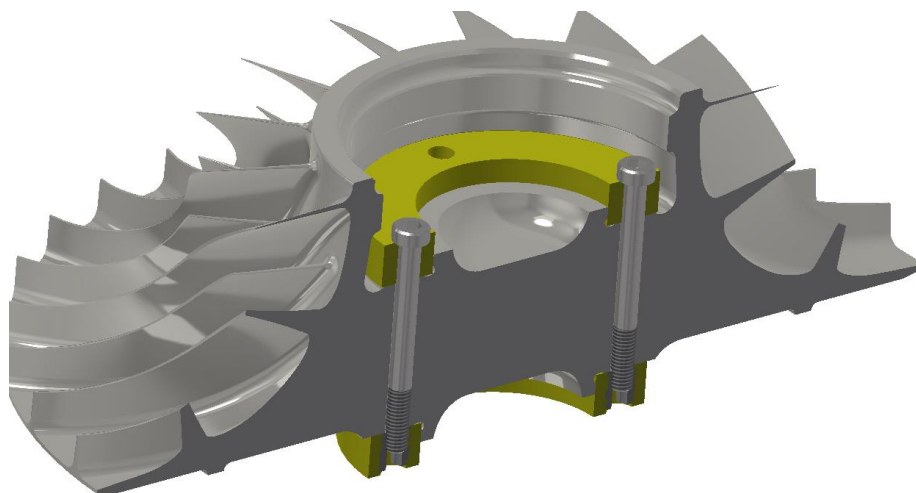


Obrázek 50: Kryt centráže - výstup



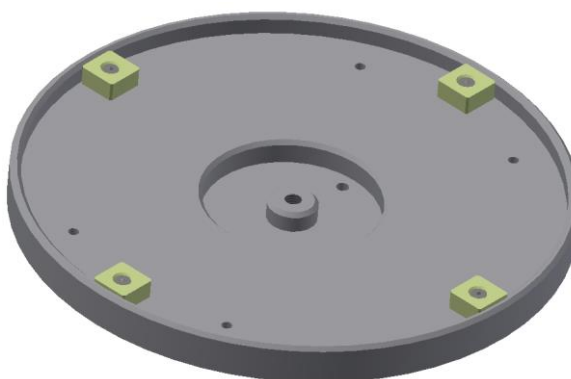
Obrázek 51: Kryt centráže - vstup

Kryty znázorněné na Obr. 50 a 51 tedy mají sloužit jako ochrana před poškrábáním šrouby, ale zároveň i jako ochrana centráží radiálního kola. Na následujícím obrázku (Obr. 52) je zobrazeno kolo s namontovanými kryty. Kryty drží na radiálním kole pomocí dvou šroubů M6x66. Do spodního krytu (kryt centráže – vstup) byly k tomuto účelu namontovány závitové vložky. Takto chráněné kolo již můžeme do přípravku vkládat bez obav z jeho poškození. V této variantě jsme tedy přípravek upravili tak, aby nedocházelo ke styku „kov na kov“. Kolo dosedá výhradně na plochy ze silonu, který jej chrání před poškozením.

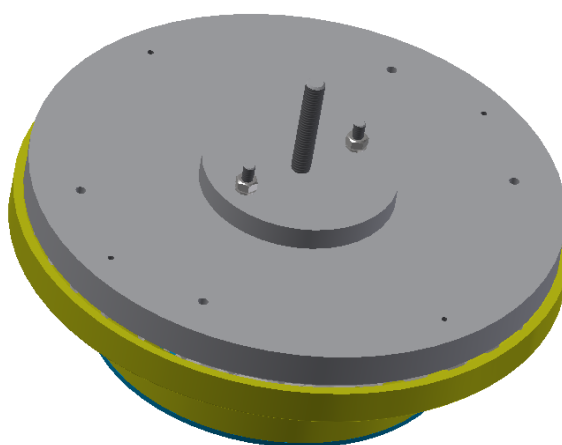


Obrázek 52: Radiální kolo s namontovanými kryty

Po vložení radiálního kola do přípravku následuje nasazení víka. Tím se celý přípravek utěsní. Víko se ke zbytku přitáhne pomocí matic M6 a radiální kolo se ustálí v požadované pozici pro kuličkování.

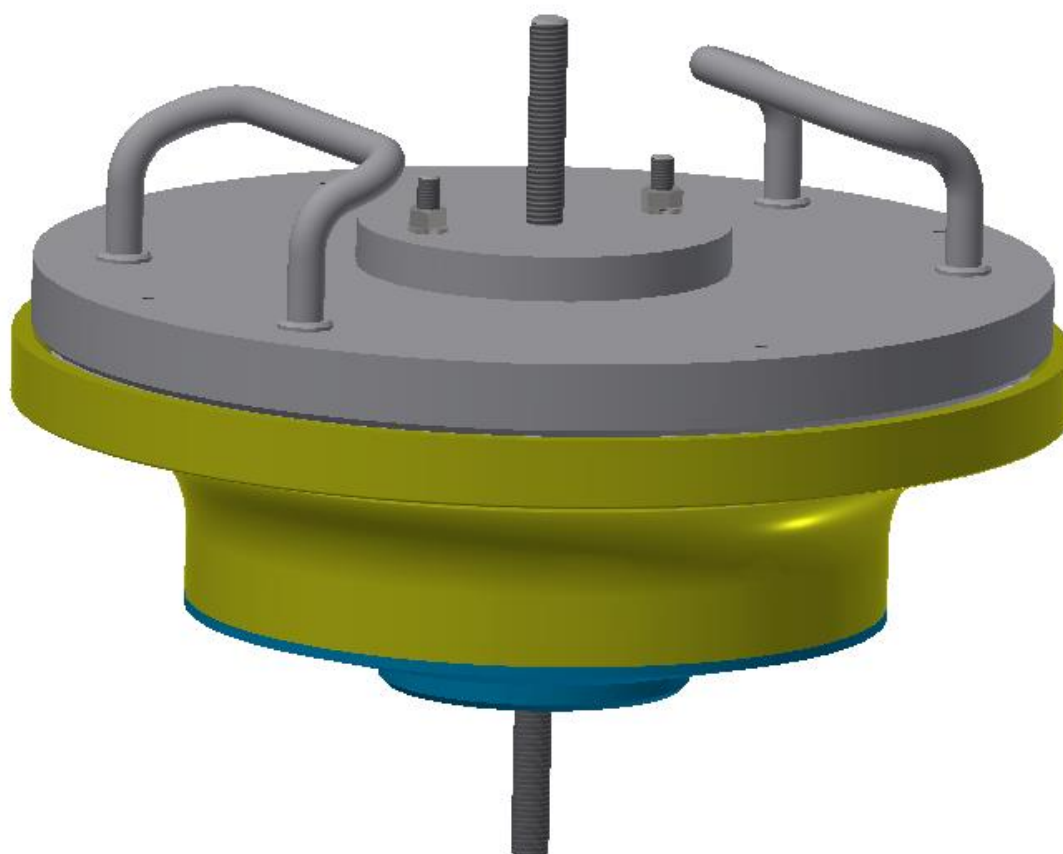


Obrázek 53: Víko přípravku s namontovanými silonovými dosedacími plochami



Obrázek 54: Uzavřený přípravek s víkem

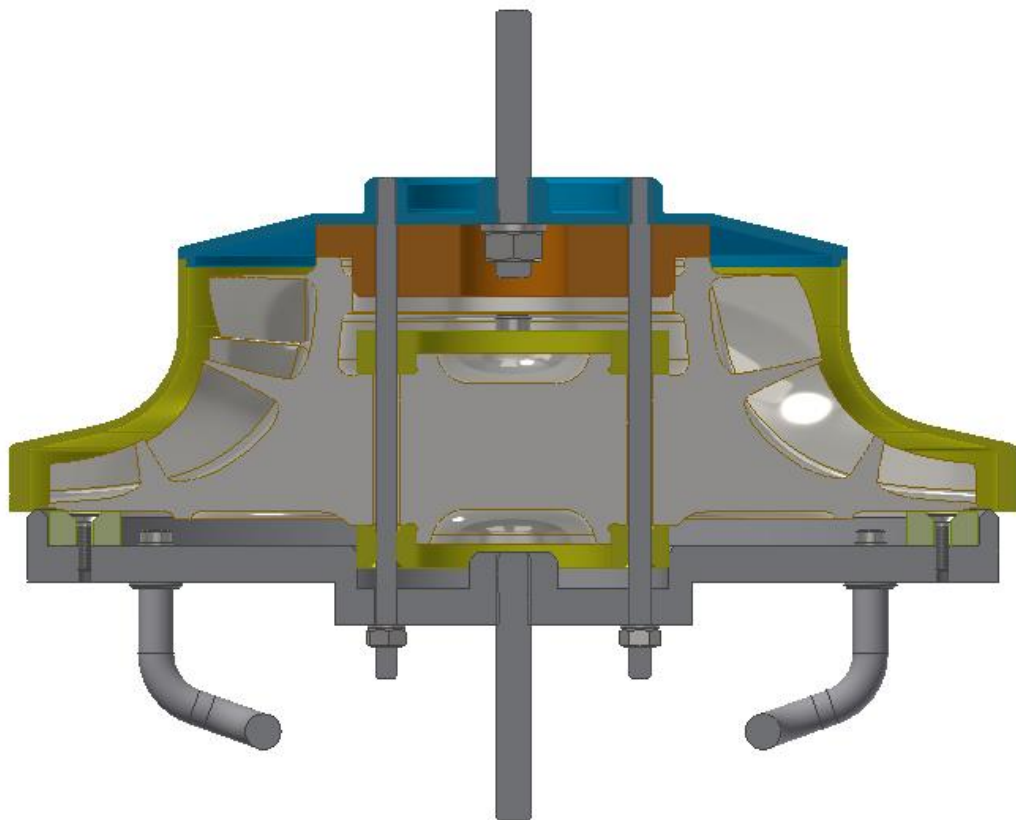
V dalším kroku dojde k vložení přípravku do stroje, vibračnímu zpevnění a poté jeho rozebrání. Z Obr. 54 je ovšem patrné, že při rozebírání bychom neměli víko přípravku za co uchopit. Museli bychom víko vyndávat chycením za jeho průměr což by mohlo být komplikované. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl víko vybavit madly, které tuto činnost usnadní. Madla musela být umístěna tak, aby se po upnutí do zpevňovacího zařízení vyhnula rámu stroje (viz Obr. 55).



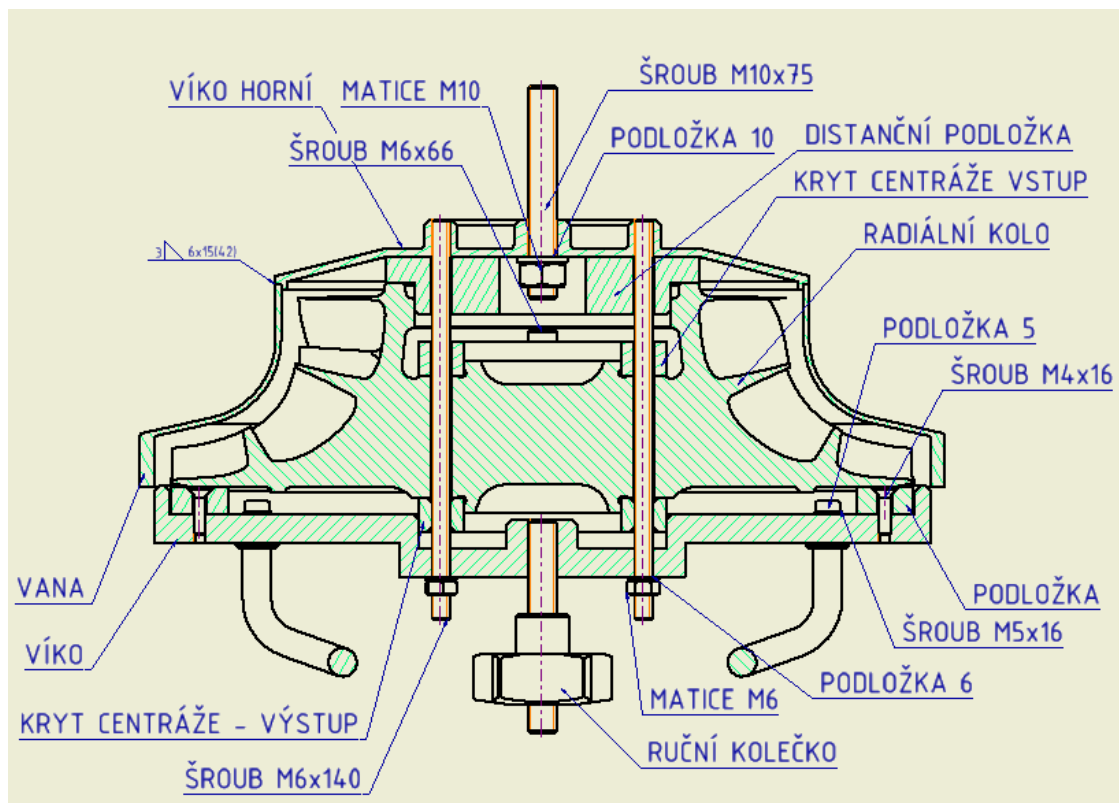
*Obrázek 55: Přípravek vybavený ergonomickými rukojeťmi*

Oproti variantě předchozí má tato varianta lepší ochranu radiálního kola před poškozením. Radiální kolo lze do přípravku snáze vkládat a přípravek jde po dokončení operace za pomoci madel lépe rozebrat. Na následujících obrázcích (Obr. 56) tedy můžeme vidět kompletně smontovaný přípravek, který splňuje všechny zadané parametry. Na Obr.57 je pak zobrazen přípravek s popisky všech obsažených součástí. Pro snadnější upínání do stroje jsem v této variantě přípravek ještě doplnil o ruční kolečko.





Obrázek 56: Přípravek v řezu



Obrázek 57: Přípravek v řezu - výkres

Aby tato varianta vyhověla všem požadavkům, je ještě třeba vyhodnotit, zda splňuje hmotnostní kritéria. Toto omezení hmotnosti je dáno parametrem zařízení MA-01-549, pro nějž je přípravek určen. Maximální přípustné zatížení stroje je 23,1 kg a stroj je určen ke kuličkování se dvěma přípravky. Z následující tabulky vyplývá, že kritérium je splněno, jelikož hmotnost přípravků s radiálním kolem a náplní kuliček nepřesahuje přípustnou hmotnost.

*Tabulka 5: Hmotnosti částí přípravku*

Díl:	Hmotnost:
Přípravek bez radiálního kola	4,8 kg
Radiální kolo	4,75 kg
100 ml karbidových kuliček	950 g
100 ml nerezových kuliček	465 g
Přípravek s kolem a karbidovými kuličkami	10,5kg
Přípravek s kolem a nerezovými kuličkami	10,05 kg
Dvojice přípravků ve stroji (s karbidovými kuličkami)	21 kg
Dvojice přípravků ve stroji (s nerezovými kuličkami)	20,1 kg

## 7. Výrobní dokumentace a výroba

Jako finální varianta pro výrobu byl tedy vybrán návrh číslo 4. K němu jsem vypracoval 3D modely všech vyráběných součástí. Dalším bodem zadání této práce je tvorba úplné výkresové dokumentace pro výrobu přípravku. Ta se bude skládat ze 7 výrobních výkresů a jednoho výkresu sestavení. Všechny výkresy jsou obsažené v příloze této práce.

### Seznam vyráběných součástí:

- VÍKO,
- VANA,
- VÍKO HORNÍ,

- KRYT CENTRÁŽE – VSTUP,
- KRYT CENTRÁŽE – VÝSTUP,
- DISTANČNÍ PODLOŽKA,
- PODLOŽKA.

## 7.1. Výrobní výkresy

Výrobní výkresy obsahují zobrazení pohledů a kótování, dále technické požadavky a popisové pole. Popisové pole musí obsahovat všechny náležitosti, především číslo výkresu, název součásti a materiál. [35]

Z důvodu výroby přípravků v dílnách na fakultě strojní polotovary nebudou specifikovány. Výroba bude probíhat z dostupných polotovarů, které nebudou nakupovány.

MATERIAL:									
POLOTOVAR:									
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015									
PŘESNOST ISO 2768 -									
VŠEOB. TOL. ISO 8062 -									
						INDEX		ZMĚNA	
						DATUM		PODPIS	
NAVRHL	Autor	Datum		Podpis	Datum	HMOTNOST	MĚŘÍTKO		
KRESLIL			PŘEZK.			SESTAVA			
			SCHVÁLIL			KUSOVNÍK	PROMÍTÁNÍ: $\left[ \begin{array}{c} \ominus \\ \oplus \end{array} \right] \text{ (ISO E)}$		
				FAKULTA STROJNÍ		NAZEV: <b>RAZÍTKO PRO VÝROBNÍ VÝKRES</b>		TYP:	
						ČÍSLO VÝKRESU			
								LIST: /	

Obrázek 58: Ukázka popisového pole FS ČVUT [35]

## 7.2. Výkres sestavení

Výkres sestavení musí obsahovat:

- zobrazení montážní jednotky, která dávají představu o vzájemné poloze;
- údaje o svarech, pájených, lepených a jiných spojích;
- údaje o druhu uložení;
- požadavky a údaje (rozměry, tolerance, drsnost, apod.) o prvcích, které se mají zpracovat nebo kontrolovat podle výkresu sestavení při nebo po montáži;
- připojovací rozměry a hlavní rozměry;
- odkazy na části výrobku (pozice).

## 7.3. Výrobní dokumentace a výroba jednotlivých součástí

### 7.3.1. Víko

**Materiál:** DURAL

**Hmotnost:** 1,8 kg

**Polotovar:** TYČ KRUHOVÁ  $\varnothing 300 \times 40$  mm

**Stroje použité při výrobě:**

Soustruh SV 18 RA

Max. soustružená délka: 750 mm

Max. obráběný průměr: 350 mm

Max. hmotnost obrobku: 300 kg

Výkon elektromotoru: 7,5 kW

Max. otáčky: 2800 /min

[36]

CNC frézka VMC 500

Výkon: 3,7 kW

Max. nosnost stolu: 350 kg

Max. otáčky vřetene: 6000 ot/min

Počet nástrojů: 21

Upínací délka stolu: 800 x 500 mm

Pojezdy X, Y, Z: 500 x 500 x 500 mm

Řídící software: Acramatic 2100

[36]

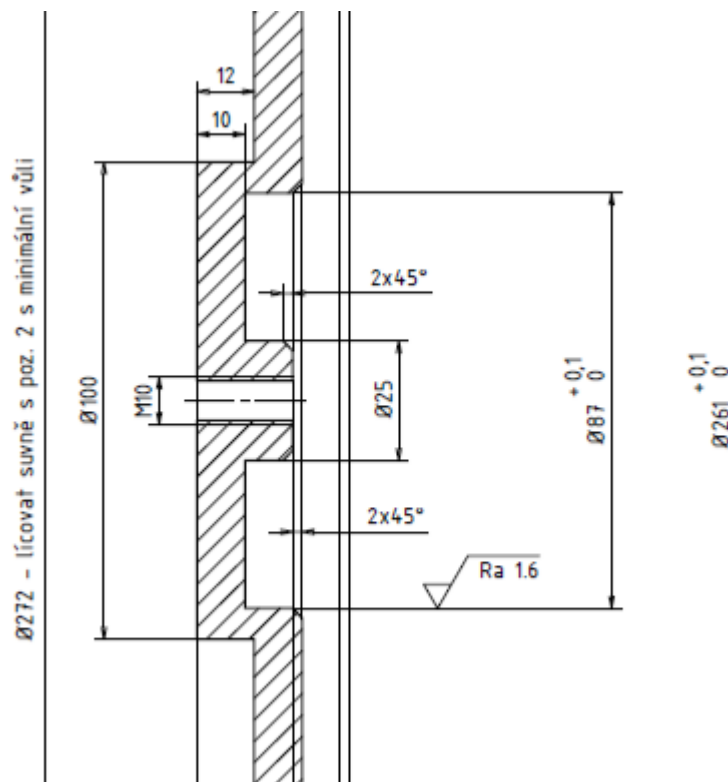


Obrázek 59: Soustruh SV 18 RA s upnutým víkem



Obrázek 60: CNC frézka VMC 500 [36]

Na soustruhu SV 18 RA byly soustruženy všechny průměry součásti a vrtána díra pro závit M10. Vrtání ostatních děr bylo provedeno na CNC frézce VMC 500. Výrobu závitů jsme provedli ručně pomocí sadových závitníků.



Obrázek 61: Ukázka výkresu víka

## 7.3.2. Vana

**Materiál:** Nerezová ocel

**Hmotnost:** 1,6 kg

**Polotovar:** TYČ KRUHOVÁ Ø285x100 mm

**Stroje použité při výrobě:**

Soustruh SV 18 RA

Max. soustružená délka: 750 mm

Max. obráběný průměr: 350 mm

Max. hmotnost obrobku: 300 kg

Výkon elektromotoru: 7,5 kW

Max. otáčky: 2800 /min

[36]



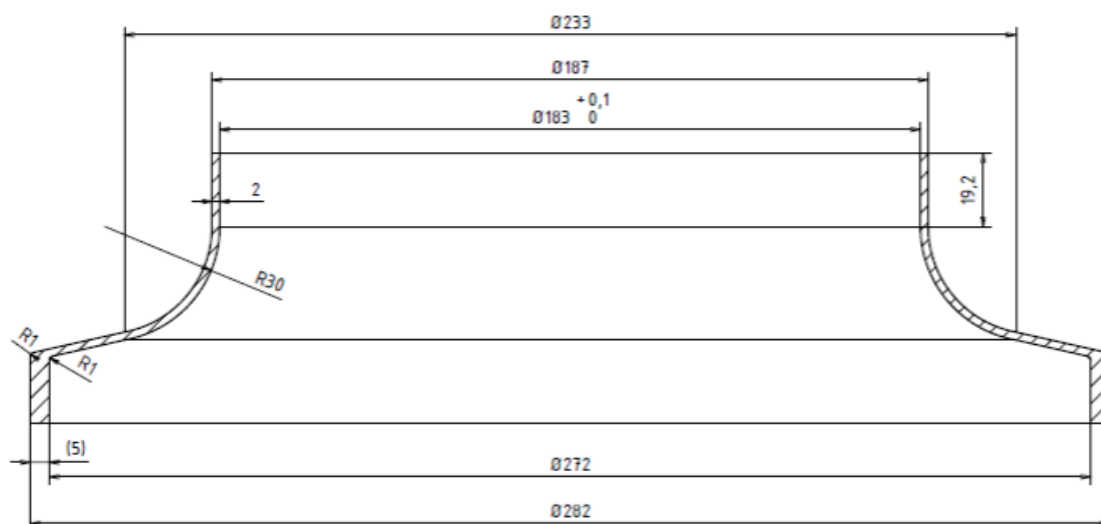
Obrázek 62: Soustruh SV 18 RA s upnutou vanou

### OKUMA GENOS L200E-MY

Max. otáčky vřetene:	4500 ot/min
Max. obráběný průměr:	205 mm
Pojezdy X, Y, Z:	165 x 80 x 400 mm
Počet nástrojů:	12
Max. otáčky hnaného nástroje:	6000 ot/min
Výkon vřetene:	11 kW
Výkon revolverové hlavy:	4 kW



Obrázek 63: CNC soustruh Okuma [36]



Obrázek 64: Výkres vany

Součást jsme soustružili na CNC soustruhu Okuma. Konvenční soustruh SV 18 RA byl k následnému soustružení průměru  $\varnothing 272$  a jeho lícování s víkem. Víko totiž při výrobě na CNC centru nebylo ještě k dispozici.

### 7.3.3. Víko horní

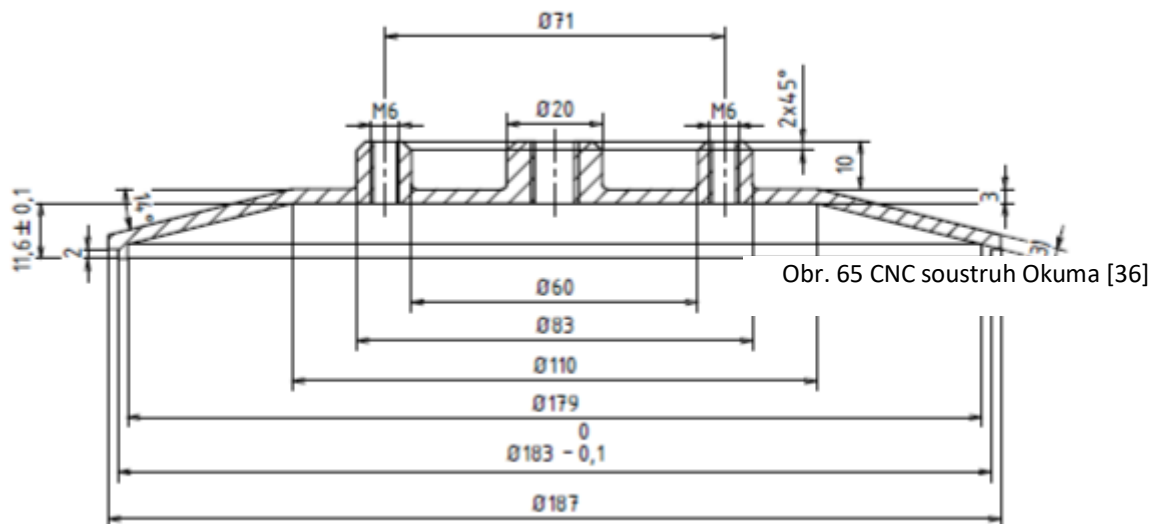
**Materiál:** Nerezová ocel

**Hmotnost:** 0,7 kg

**Polotovar:** TYČ KRUHOVÁ  $\varnothing 187 \times 40$  mm

**Stroje použité při výrobě:** OKUMA GENOS L200E-MY

Na CNC soustružnickém centru Okuma Genos, jsme vyrobili celou součást. Nejprve byly vyvrtány díry a pomocí maticových závitníků vyřezány závity. Poté se soustružila kontura z každé strany, součást byla vyrobena na dvě upnutí.



Obrázek 65: Výkres horního víka

### 7.3.4. Kryty centrží

**Materiál:** Silon

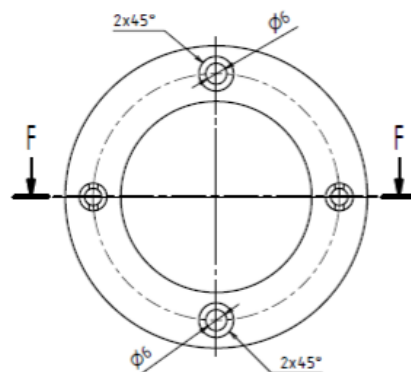
**Hmotnost:** 0,05 kg

**Polotovar:** TYČ KRUHOVÁ Ø90x20 mm

**Stroje použité při výrobě:**

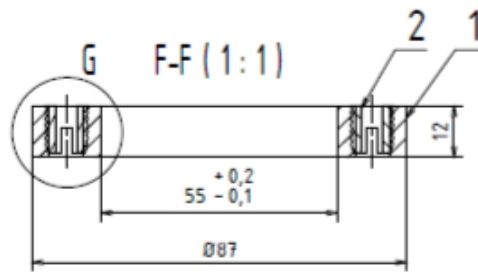
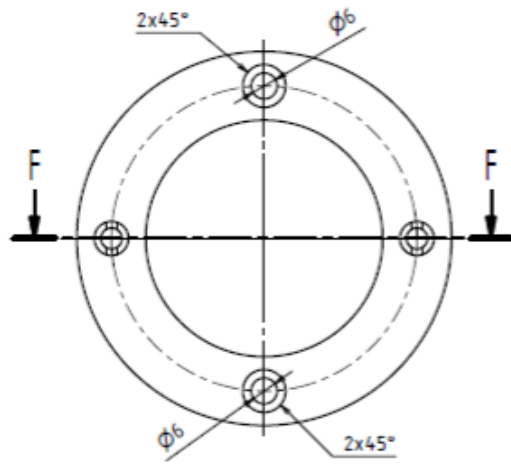
Soustruh SV 18 RA

CNC frézka VMC 500

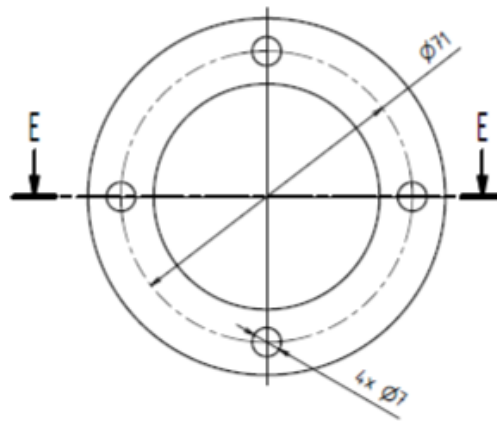


Obrázek 66: Ukázka z výkresu krytu

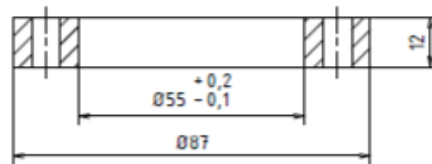
Na soustruhu SV 18 jsme začali zarovnáním čela polotovaru, poté jsme osoustružili vnější průměr součásti. Poté jsme vyvrtali do tyče díru a vysoustružili vnitřní průměr. Následně jsme na CNC frézce VMC 500 vyvrtali díry pro šrouby a pro závitové vložky. Závitové vložky byly montovány ručně.



Obrázek 67: Výkres: kryt centráže – vstup



E-E (1:1)



Obrázek 68: Výkres: kryt centráže – výstup



### 7.3.5. Distanční podložka

**Materiál:** Silon

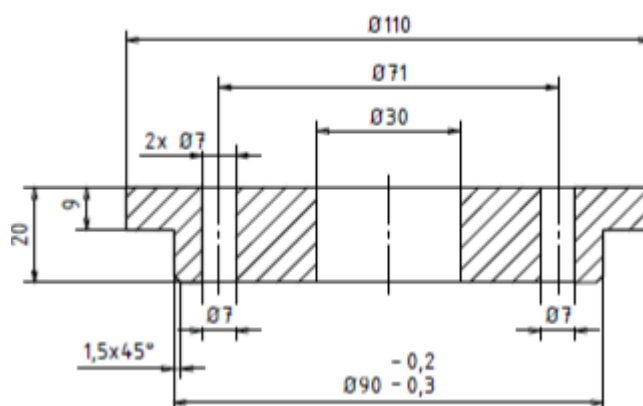
**Hmotnost:** 0,16 kg

**Polotovar:** TYČ KRUHOVÁ  $\varnothing 120 \times 30$  mm

**Stroje použité při výrobě:**

Soustruh SV 18 RA

CNC frézka VMC 500



Obrázek 69: Výkresy distanční podložky

Pomocí soustruhu SV 18 RA jsme zarovnali čelo a soustružili vnější průměr  $\varnothing 90$  mm v délce 11 mm. Poté jsme součást otočili a soustružili vnější průměr  $\varnothing 110$  mm. Následně byla vyvrtána díra  $\varnothing 30$  a ručním srážečem byly sraženy hrany. Dále jsme na CNC frézce vyvrtali díry pro šrouby.

### 7.3.6. Podložka

**Materiál:** Silon

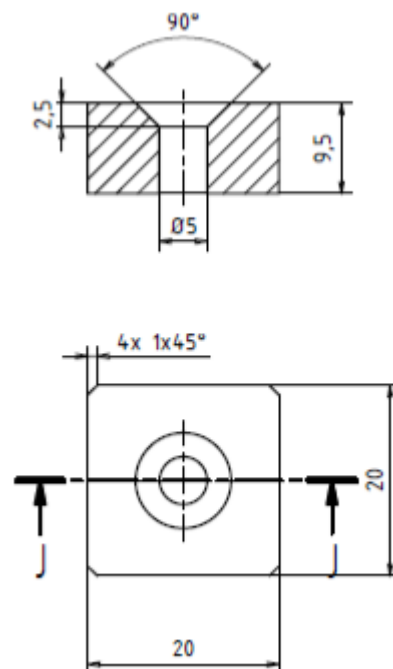
**Hmotnost:** 0,015 kg

**Polotovar:** TYČ ČTVERCOVÁ 20x20x100 mm

**Stroje použité při výrobě:**

Soustruh SV 18 RA

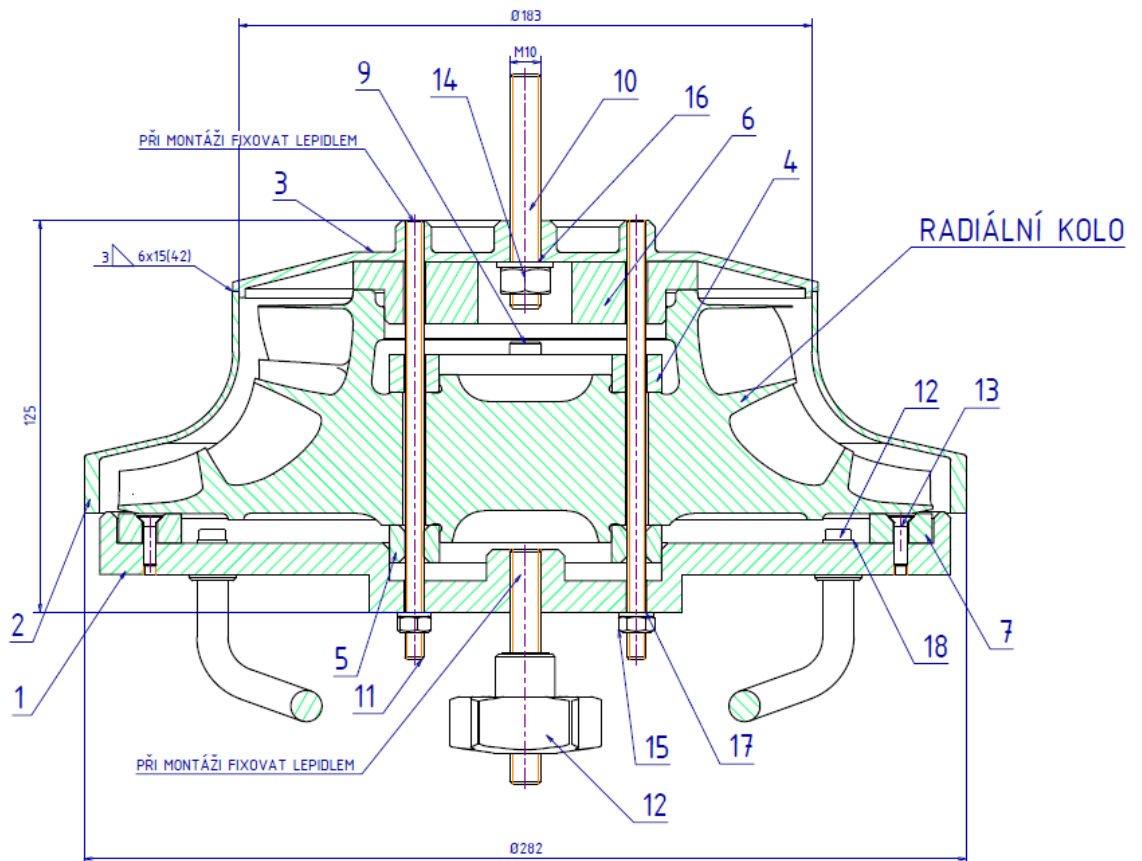
Nejprve jsme na soustruhu vrtali díru pro šroub  $\varnothing 5$  mm, poté jsme vysoustružili zahlobení pro šroub a součást následně upíchlí upichovacím nožem. Hrany jsme srazili pomocí ručního srážedla.



Obrázek 70: Výkresy podložky

### 7.3.7. Sestava a postup montáže

Pro montáž přípravku jsme vytvořili výkres sestavení, který je obsažen v příloze k práci. Jeho část můžete vidět na Obr. 71, na Obr. 72 je pak zobrazen náhled kusovníku, který je také součástí přílohy.



Obrázek 71: Část výkresu sestavení

Položka	Název		Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství		
	Polotovary					Materiál výchozí	Jednotka
1	VÍKO		DURAL	1,800	1		
2	VANA		AISI 304	1,600	1		
3	VÍKO HORNÍ		AISI 304	0,700	1		
4	KRYT CENTRÁŽE - VSTUP		TECHNICKÝ SILON	0,050	1		
5	KRYT CENTRÁŽE - VÝSTUP		TECHNICKÝ SILON	0,050	1		
6	DISTANČNÍ PODLOŽKA		TECHNICKÝ SILON	0,160	1		
7	PODLOŽKA		TECHNICKÝ SILON	0,015	4		
8							
9	ŠROUB S VNITŘNÍM ŠESTIHRANEM M6x66		DIN 912/A2		2		
10	ZÁVITOVÁ TYČ M10x75 - 12.9		DIN 978/A2		2		
11	ZÁVITOVÁ TYČ M6x140 - 12.9		DIN 978/A2		2		
12	ŠROUB M5x16		DIN 7984		4		
13	ŠROUB M4x16		DIN 7991		4		
14	MATICE M10		DIN 934/A2		4		
15	MATICE M6		DIN 934/A2		1		
16	PODLOŽKA 10		DIN125A/A2		4		
17	PODLOŽKA 6		DIN 9021/A2		4		
18	MATICE M10 - ESSENTRA		obj. č.: 493948		1		
19	MADLO ELESA GANTER		GN425.1NI-10-100-EP		2		
20							
Index		Změna		Datum		Podpisy	
		Podpis	Datum	Podpis	Datum	C. svitku:	
Výroby	Procházka					Mikrofilm	
Skupina		Norm. ref.				Sestava	
Technol.		Přezk.				Hmotn. [kg]	
		Schválil				9.615	
<b>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</b>  <b>FAKULTA STROJNÍ</b>				<b>NÁZEV:</b> <b>PŘÍPRAVEK PRO KULIČKOVÁNÍ - KRK</b> <b>ČÍSLO KUSOVNIKU:</b>  LIST:			

Obrázek 72: Kusovník

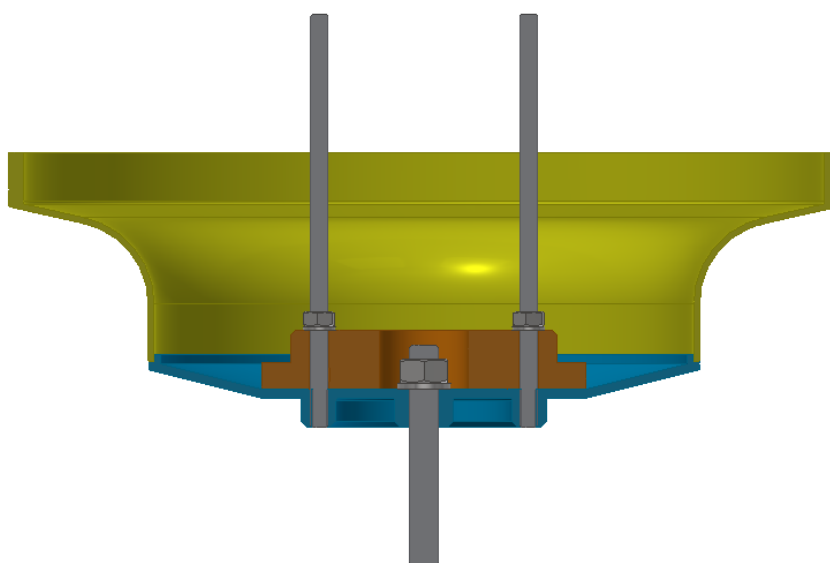
### Postup montáže:

Nejdříve bylo třeba svařit vanu a víko horní v jeden celek (Obr. 73). Svaření bylo provedeno na fakultě strojní metodou MIG. Poté jsme do horního víka našroubovali závitovou tyč M6x140 a závit zalepili.



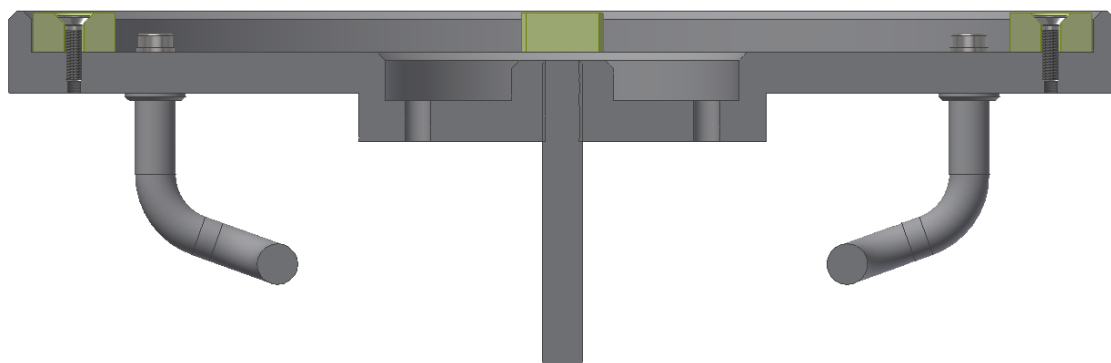
Obrázek 73: Svaření vany a horního víka

Následovalo nasazení distančního kroužku, a jeho upevnění pomocí matic M6. Nakonec bylo třeba našroubovat závitovou tyč M10 a zajistit jí maticí. Tím byla hotova první část přípravku.

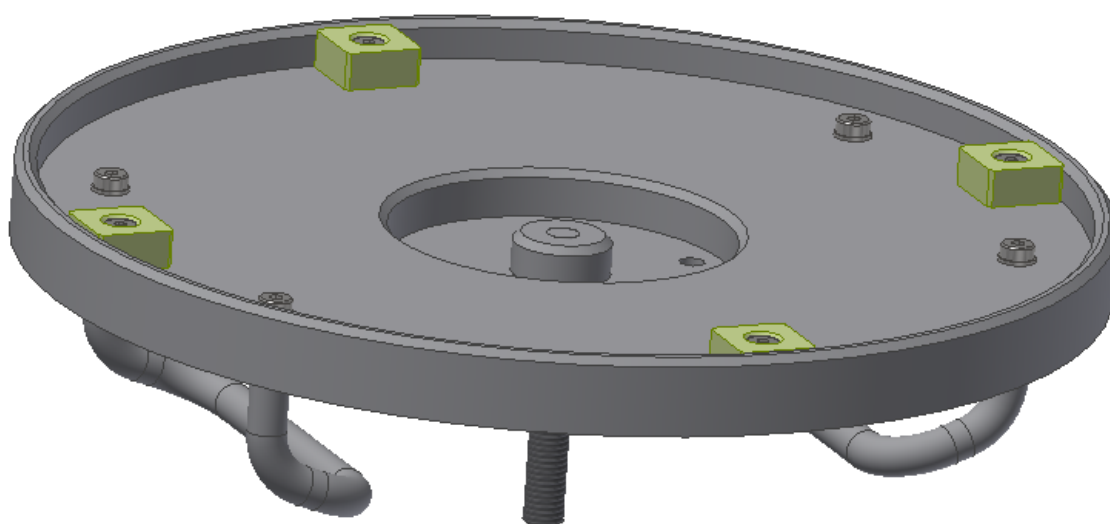


Obrázek 74: Sestavená první část přípravku

Druhá část přípravku se skládá z víka, podložek a madel. Nejdříve jsme pomocí šroubů M4x16 připevnili k víku podložky. Následovalo uchycení madel šrouby M5x16. Na Obr. 75, 76 můžeme vidět druhou část sestaveného přípravku



Obrázek 75: Řez druhou částí sestaveného přípravku



Obrázek 76: Sestavená druhá část přípravku

Přípravek se tedy v provozu bude skládat pouze ze dvou částí, mezi něž se umístí radiální kolo, na které je ještě třeba namontovat kryty centráží.

## 8. Testování v provozu – testy pokrytí

Abychom dokázali vyhodnotit funkčnost přípravku, zvolili jsme test pokrytím, ve kterém budeme kuličkovat radiální kola nabarvená bílou barvou. Tak bude možné sledovat doskok kuliček v přípravku.

## 8.1. Zařízení pro vibrační zpevňování

Testování přípravku bylo provedeno na jednoúčelovém zpevňovacím zařízení MA-01-549 s lineárním vibračním pohonem, typ: AOLP-B10. Na tomto zařízení je možné kuličkovat dvě radiální kola naráz. Pokud chceme kuličkovat jen jedno kolo, je třeba do zařízení umístit i druhý přípravek bez náplně kuliček, aby bylo zařízení vyváжено.



Obrázek 77: Ovládací panel zpevňovacího zařízení AOLP-B10



Obrázek 78: Zařízení pro vibrační zpevňování AOLP-B10

## 8.2. Podmínky testu

### 8.2.1. Nastavení stroje

Na vibračním zařízení je nastavena pevná frekvence kmitání 28,6 Hz. Regulace kmitání se provádí pomocí rozkmitu rámu, který se nastavuje tak, aby bylo dosaženo výkmitu 5,1 mm. K nastavování se používá klínová stupnice umístěná na rámu a regulace rozkmitu potenciometrem udávaná v procentech. Přípravek jsme testovali při rozkmitu 80-82%.



Obrázek 79: Display pro sledování nastavení rozkmitu a frekvence

Součástí stroje je také software s tiskárnou, který poskytuje kontrolní grafický výstup k testu. V našem případě však budeme vyhodnocovat výsledky na základě testů pokrytí a tak nám tento výstup nijak neposlouží.

### 8.2.2. Volba média

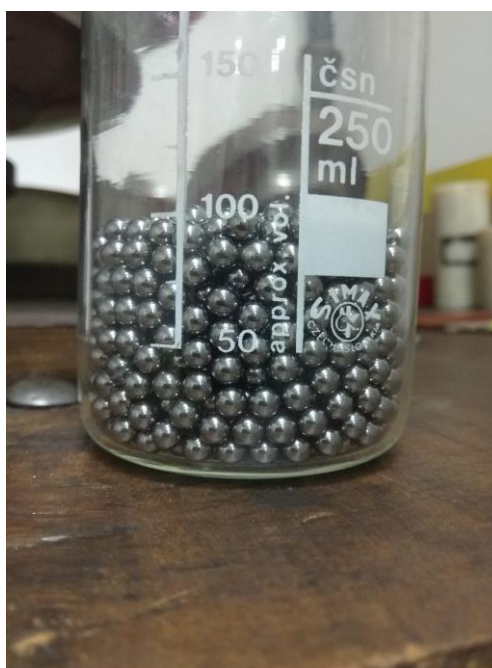
Pro test byly zvoleny dva typy kuliček. Prvním jsou kuličky z nerezové oceli o průměru 4,762 mm, druhým kuličky ze slinutého karbidu o stejném průměru. Nejprve jsme kuličky zvážili na přesné váze. Pro každý test se bude používat stejné množství kuliček a to sice 100 ml, naměřené pomocí odměrného válce. Kuličky v odměrném válci jsme také zvážili a výsledky zapsali do tabulky (Tab. 6)

Tabulka 6: Hmotnosti kuliček

Hmotnost:	
Karbidová kulička	0,82 kg
Nerezová kulička	0,43
100 ml karbidových kuliček	950 g
100 ml nerezových kuliček	380g



Obrázek 80: Vážení kuliček na přesné váze



Obrázek 81: Odměřování 100 ml kuliček



### **8.2.3. Lakování vzorů**

Jako vzorky pro testování přípravků jsme měli k dispozici tři radiální kola. Aby bylo možné vyhodnocovat test pokrytí, je třeba kola nalakovat. Na začátku experimentu nebylo známo, zda se barva z kola odstraní či bude pouze vykazovat stopy po dopadu kuliček. Z tohoto důvodu byla volena bílá barva laku, kuličky se totiž časem špiní o jemný brusný prach a mikrotřísky. Zároveň dochází k jejich tvarovým defektům. Kuličky a přípravky je tedy třeba po každém cyklu důkladně očistit. Jako lak byla vybrána barva Motip 1000 – bílá lesklá.

### **8.3. Testování**

Pro experiment jsou tedy k dispozici dva typy média. Nerezové kuličky se běžně používají v procesu vibračního zpevnování, proto bylo vhodné začít právě s tímto médiem. Karbidové kuličky mají více než dvojnásobnou hustotu, měly by tedy mít výrazně vyšší kinetickou energii a tím otestovat přípravek na jeho tuhost. Současně by také měly vykazovat větší hodnoty zpevnění povrchu. Budeme tedy mít možnost vyhodnocovat dva typy experimentu a lépe si tak ověřit funkčnost přípravku.

Před samotným testem je ještě třeba přípravek zpevnit a otestovat. Vložili jsme do něj tedy dávku karbidových kuliček a nenalakované kolo. Zpevnování probíhalo 60 min záborníkem dolů a stejnou dobu záborníkem nahoru. Na obrázku můžete vidět stopy kuliček po zpevnování přípravku.



Obrázek 82: Stopy kuliček patrné po zpevnění přípravku

### 8.3.1. Test – nerezové kuličky

Pro experiment byly zvoleny nerezové kuličky o  $\varnothing 4,762$  mm. Tyto kuličky byly rovnoměrně rozmístěny do jednotlivých kanálů kola. Každý cyklus bude probíhat 45 min. Poté bude přípravek a kuličky řádně vyprány v acetonu a bude se pokračovat druhým cyklem.

Pro vlastní test pokrytí bylo zvoleno:

- 100 ml – pro cyklus 45 min „záborníkem dolů“ (viz obr. 83)
- 100 ml – pro cyklus 45 min „záborníkem nahoru“



Obrázek 83: Výsledek testu pokrytí po obou cyklech



Obrázek 84: Detail testu pokrytí nerezovými kuličkami

Z testu bylo patrné, že přípravek v kombinaci s nerezovými kuličkami funguje záborníkem nahoru téměř ideálně. Při tomto procesu bylo dosaženo odstranění barvy z kořenů lopatek, což by mohlo značit kvalitní zpevnění těchto částí. Naopak při kuličkování záborníkem dolů, nedošlo k úplnému odstranění barvy z kořenů lopatek, plochy lopatek byly ale okuličkovány dostatečně.

### 8.3.2. Test – karbidové kuličky

Pro další experiment byly zvoleny karbidové kuličky o  $\varnothing 4,762$  mm. Tyto kuličky byly rovnoměrně rozmístěny do jednotlivých kanálů kola. Každý cyklus probíhá 45 min. Poté bude přípravek a kuličky řádně vyprány v acetonu a bude se pokračovat druhým cyklem.

Pro vlastní test pokrytí bylo zvoleno:

- 100 ml – pro cyklus 45 min „záborníkem dolů“ (viz obr. 82)
- 100 ml – pro cyklus 45 min „záborníkem nahoru“



Obrázek 85: Test pokrytí karbidovými kuličkami



Obrázek 86: Detail testu pokrytí karbidovými kuličkami

Oproti testu s nerezovými kuličkami je vidět rozdíl na první pohled. Test pokrytí záborníkem dolů je téměř ideální. Došlo k odstranění barvy ze všech ploch lopatek

v dolní části, z kořenů i náběžných hran. Míra zpevnění bude pravděpodobně ještě větší, než v předchozím případě. V horní části lopatek, které jsou kuličkovány převážně v poloze záborníkem dolů, nedošlo k odstranění veškeré barvy. Avšak plochy lopatek náběžné hrany a kořeny jsou okuličkovány dobře. Barva zbyla pouze v místech, kde se nenachází místa s největším zatížením.

## **8.4. Vyhodnocení testů**

Zkoušky pokrytí pro přípravek dopadly nad očekávání. V obou případech došlo k odstranění značného množství barvy. Téměř ideálně pak dopadla zkouška pokrytí za pomoci karbidových kuliček. Ty vykazaly lepší okuličkování kořenů lopatek a náběžných hran. Je třeba si také uvědomit, že zpevňovací operace mají malý abrazivní účinek. Přesto došlo k oklepání většiny barvy. Na kuličky se také po chvíli v procesu nalepí barva, která částečně tlumí dopad. Je tedy pravděpodobné, že místa, ze kterých byla barva oklepána, budou zpevněna velice dobře.

## 9. Závěr

V teoretické části práce je popsána problematika a používané technologie zpevňování povrchové vrstvy součástí. Nejdůležitější částí ze zpevňovacích technologií je kuličkování, konkrétně vibrační kuličkování. Je také popsána integrita povrchu, ve které se zaměřujeme na zbytková napětí. Déle jsou v práci popsána specifika titanových slitin a z nich vypovídající opatření při výrobě. Blíže je specifikována slitina titanu Ti-6Al-4V. Právě z této slitiny se vyrábí radiální kolo, pro které je navrhován přípravek.

Cílem praktické části byl návrh a konstrukce přípravku pro kuličkování radiálního kola kompresoru. Přípravek byl navržen tak, aby splňovat všechna zadaná kritéria, mezi která spadalo například hmotnostní omezení, možnost nastavení odrazové mezery, a z nichž nejdůležitější byla tuhost pro použití médií s vysokou hustotou.

Návrh přípravku byl rozpracován v několika variantách a postupně vylepšován do takové míry, aby vyhovoval všem zadaným parametrům a byl bez dalších úprav použitelný v plánované výrobě. Pro výrobu byla vybrána čtvrtá varianta návrhu a byla vyrobena v počtu dvou kusů.

Přípravek byl podroben reálným testům, ukázal se vyhovujícím po všech stránkách a je připraven pro zařazení do výroby. Tím byl beze sporu naplněn hlavní cíl práce.

## 10. Zdroje

- [1] MÁDL, Jan, Martin VRABEC, Jindřich KAFKA a Rudolf DVOŘÁK. Technologie obrábění 3. díl. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [2] 1. Toušeňská s.r.o.: Tryskací zařízení [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <http://www.1tousenska.cz/vyroba.php>
- [3] PREDÚPRAVA POVRCHU. Univerzita Pardubice [online]. Pardubice [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <http://www.upce.cz/fcht/uchtml/12-onhop/studijni-materialy/mater-vstrojarvyrobe.pdf>
- [4] BENEŠOVÁ, Dana. Řízené kuličkování: Povrchové úpravy. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha, 2011, 13.04.2011, 2011(4) [cit. 2019-07-22]. DOI: 110458. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rizene-kulickovani.html>
- [5] What is Shot Peening?: The Mechanics Of Shot Peening. In: Wheelabrator [online]. [cit. 2019-7-20]. Dostupné z: <https://www.wheelabratorgroup.com/en-gb/my-application/application-by-process/what-is-shot-peening>
- [6] CURTISS - WRIGHT: Shot Peening [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://cwst.com/shot-peening/overview/>
- [7] CURTISS-WRIGHT: Laser Peening [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <http://cwst.com/laser-peening/overview/>
- [8] SubsTech: Laser peening [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=laser\\_peening](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=laser_peening)
- [9] LÁNC, Kryštof. Problematika tryskání. Brno, 2017. 36s, 1 příloha, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.
- [10] PÍSKOVAČKA.CZ. Piskovacka [online]. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <http://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje>
- [11] INOUE, Tatsuo, Maurice A. H. HOWES a George E. TOTTEN. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002. ISBN 9781615032273.
- [12] VAJSKEBR J.; ŠPETA Z. Dokončování a zpevňování povrchu strojních součástí válečkováním. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984. 184 s. ISBN

- [13] Sugino Machine Limited [online]. [cit. 2019-7-20]. Dostupné z: <http://www.sugino.cz/pdf/Sugino%20SUPEROLL%20L2215CZ.pdf>
- [14] HUMÁR, A. Technologie I, Technologie obrábění – 3. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia. 2005. 57 s.
- [15] KOČMAN, K.; PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [16] Alba precision, spol s.r.o. [online]. [cit. 2019-07-05]. Dostupné z: <http://www.albaprecision.cz/baublies.php>
- [17] CIVÍN, Ing. Adam. Komplexní teoretická analýza metody sloupku pro zjišťování zbytkových napětí [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-07-22]. 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 Vlček, CSc.
- [18] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. Vybrané statě z úběru materiálu. První. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1991.
- [19] Kolařík, K., Ganey, 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. 2019-07-20] Dostupné z: <http://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>.  
ISSN 1211-5894 (Print), ISSN 1805-4382 (Online).
- [20] VÍTOVEC, David. Kvalita povrchové vrstvy po obrábění těžkoobrobitelných a titanových slitin [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63572/F2-DP-2015-Vitovec-DavidKvalita%20povrchove%20vrstvy%20po%20obrabeni%20tezkoobrobitelnych%20a%20ti%20tanovych%20slitin.pdf?sequence=-1>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
- [21] Yamasaltd [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z: <http://yamasaltd.en.ecplaza.net/>
- [22] LIPKA, Ondřej. Dokončovací technologie využívající plastickou deformaci povrchu [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-07-20]. 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.
- [23] Technologie tryskání jako konečná úprava povrchu (kuličkování). Tech Park [online]. [cit. 2019-07-22]. Dostupné z:



[http://www.techpark.sk/technika9102014/Prvni\\_tousenska\\_povrchove\\_upravy\\_tryskani\\_casopis\\_Technika.html](http://www.techpark.sk/technika9102014/Prvni_tousenska_povrchove_upravy_tryskani_casopis_Technika.html)

[24] KRPAL, Jaroslav. Konstrukce přípravku pro leštění rotačních ploch [online]. Zlín, 2015 [cit.2019-07-21]. 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.

[25] Periodická tabulka: Titan. Prvky.com [online], 2016[cit. 2019-07-20]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>

[26] SEDLÁČEK, Vladimír. Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.

[27] ŠLAIS, Miroslav. Studium vlivů rychlostních a teplotních parametrů na tvařitelnosti slitin [online]. Brno, 2012 [cit. 2019-07-16]. 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

[28] Titan a jeho slitiny, Nikl a jeho slitiny: 2. přednáška [online].[cit. 2019-07-22]  
Dostupné z: [http://www.ateam.zcu.cz/Nikl\\_titan.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Nikl_titan.pdf)

[29] BÁRTKOVÁ, Denisa. Vysokocyklová únava titanové slitiny Ti6Al4V [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-07-22]. 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.

[30] Slitiny titanu [online]. [cit. 2019-07-20]. 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)

[31] DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN 978-0-87170-686-7

[32] LEYENS, C. a M. PETERS. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications. [Chichester: John Wiley] (distributor), c2003. ISBN 3527305343

[33] WAGNER, Jiří a Václav NOVOTNÝ. Lockheed SR-71 Blackbird. *Militari.cz* [online]. [cit. 2019-07-20]. Dostupné z: [http://www.military.cz/usa/air/in\\_service/aircraft/sr71/sr71.htm](http://www.military.cz/usa/air/in_service/aircraft/sr71/sr71.htm)

[34] GE Aviation: Výroba turbopropového motoru v 6 krocích. Geturboprops.com [online]. Praha, 2015, 16. 12. 2015 [cit. 2019-07-20]. Dostupné z:

[https://www.geturboprops.com/cz/clanky/detail/35\\_95-vyroba-turbovrtuloveho-motoru-v-6-krocich](https://www.geturboprops.com/cz/clanky/detail/35_95-vyroba-turbovrtuloveho-motoru-v-6-krocich)

[35] POSPÍČHAL, Jaroslav. Technické kreslení. Třetí přepracované vydání. Praha: nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-03214-5.

[36] Technologie obrábění: Používané CNC stroje. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie [online]. [cit. 2019-06-29]. Dostupné z: <http://technologie.fs.cvut.cz/provide/obrabeni>

[37] BŘEZINA, Martin. Obrábění materiálů součástek letecké výroby. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

## 11. Seznam obrázků

Obrázek 1: Vryp po dopadu ostrohranného abraziva [3] .....	9
Obrázek 2: Litinový granulát [3] .....	9
Obrázek 3: Povrch po otryskání litinovým granulátem [3] .....	10
Obrázek 4: Příklad sférického média - ocelový granulát [3] .....	10
Obrázek 5: Trysaný povrch po použití sférického média [3] .....	10
Obrázek 6: Závislost jakosti povrchu na rychlosti abraziva [3] .....	11
Obrázek 7: Proces kuličkování [4].....	12
Obrázek 8: Zpevňování povrchové vrstvy zubů frézy pomocí řízeného kuličkování [5].	13
Obrázek 9: Princip pevnění povrchu kuličkováním [4] .....	13
Obrázek 10: Shoot peening v praxi [6].....	14
Obrázek 11: Schéma používaných abraziv [9] .....	15
Obrázek 12: Injektorové tryskací zařízení [10] .....	17
Obrázek 13: Tlakové tryskací zařízení [10].....	17
Obrázek 14: Tryskání děr s odrazovým prvkem [11] .....	18
Obrázek 15: Využití tryskací tyče [11].....	18
Obrázek 16: Schéma metacího kola [2] .....	19
Obrázek 17: Princip technologie laser peening [7].....	20
Obrázek 18: Ukázka procesu laser peening [7] .....	20
Obrázek 19: Závislost hloubky zpevněné vrstvy na tvrdosti [12].....	21
Obrázek 20: Zbytková napětí vzniklá válečkováním [13].....	22
Obrázek 21: Válečkovací hlavy a) hlava pro vnitřní válečkování; b) hlava pro vnější válečkování [21].....	23
Obrázek 22: Vyhlazování [1].....	24
Obrázek 23: Schéma vyhlazování [1] .....	25
Obrázek 24: Kalibrování kuličkou a kalibrovacím trnem [1] .....	26
Obrázek 25: Oblast primární plastické deformace při broušení [1] .....	26
Obrázek 26: Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru z oceli 10Ch17N2 po různých technologických operacích [1] .....	27
Obrázek 27: Vliv broušení a superfinišování na stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek [1] .....	28
Obrázek 28: Princip odvrtávací metody [1].....	29
Obrázek 29: Titan v přírodní formě [25] .....	31
Obrázek 30: Závislost životnosti nástroje na řezné rychlosti a posuvu při soustružení slitiny Ti-6Al-4V [31].....	34
Obrázek 31: Vibrační rám s přípravky, vibrační motor je umístěn pod rámem.....	35
Obrázek 32: Rozložení zbytkového napětí v součásti po jednostranném kuličkování [23] .....	36
Obrázek 33: Výsledné rozložení napětí [23] .....	36
Obrázek 34: Radiální kolo, blisk 1 a blisk 2 [34] .....	37
Obrázek 35: Základní rozměry radiálního kola v řezu.....	38
Obrázek 36: Červeně označené dosedací plochy v horní části radiálního kola .....	39

Obrázek 37: Červeně označené dosedací plochy v dolní části radiálního kola .....	39
Obrázek 38: Modře označená nejvíce namáhaná místa radiálního kola .....	40
Obrázek 39: Pohled na radiální kolo z horní části, modrá oblast je určena ke zpevnování .....	40
Obrázek 40: Pohled na radiální kolo z dolní části, modrá oblast je určena ke zpevnování .....	41
Obrázek 41: Poloha záborníkem nahoru .....	41
Obrázek 42: Poloha záborníkem dolů .....	41
Obrázek 43: První varianta návrhu .....	42
Obrázek 44: První varianta návrhu – pohled na uzavřený přípravek .....	42
Obrázek 45: Druhá varianta návrhu .....	43
Obrázek 46: Třetí varianta přípravku .....	44
Obrázek 47: Třetí varianta přípravku – pohled na uzavřený přípravek .....	44
Obrázek 48: Přípravek bez vloženého radiálního kola .....	45
Obrázek 49: Radiální kolo vložené v přípravku .....	45
Obrázek 50: Kryt centráže - výstup .....	46
Obrázek 51: Kryt centráže - vstup .....	46
Obrázek 52: Radiální kolo s namontovanými kryty .....	47
Obrázek 53: Víko přípravku s namontovanými silonovými dosedacími plochami .....	47
Obrázek 54: Uzavřený přípravek s víkem .....	47
Obrázek 55: Přípravek vybavený ergonomickými rukojetmi .....	48
Obrázek 56: Přípravek v řezu .....	49
Obrázek 57: Přípravek v řezu - výkres .....	49
Obrázek 58: Ukázka popisového pole FS ČVUT [35] .....	51
Obrázek 59: Soustruh SV 18 RA s upnutým víkem .....	52
Obrázek 60: CNC frézka VMC 500 [36] .....	52
Obrázek 61: Ukázka výkresu víka .....	53
Obrázek 62: Soustruh SV 18 RA s upnutou vanou .....	53
Obrázek 63: CNC soustruh Okuma [36] .....	54
Obrázek 64: Výkres vany .....	54
Obrázek 65: Výkres horního víka .....	55
Obrázek 66: Ukázka z výkresu krytu .....	55
Obrázek 67: Výkres: kryt centráže – vstup .....	56
Obrázek 68: Výkres: kryt centráže – výstup .....	56
Obrázek 69: Výkresy distanční podložky .....	57
Obrázek 70: Výkresy podložky .....	57
Obrázek 71: Část výkresu sestavení .....	58
Obrázek 72: Kusovník .....	59
Obrázek 73: Svaření vany a horního víka .....	60
Obrázek 74: Sestavená první část přípravku .....	60
Obrázek 75: Řez druhou částí sestaveného přípravku .....	61
Obrázek 76: Sestavená druhá část přípravku .....	61
Obrázek 77: Ovládací panel zpevňovacího zařízení AOLP-B10 .....	62

Obrázek 78: Zařízení pro vibrační zpevňování AOLP-B10 .....	62
Obrázek 79: Display pro sledování nastavení rozkmitu a frekvence .....	63
Obrázek 80: Vážení kuliček na přesné váze .....	64
Obrázek 81: Odměřování 100 ml kuliček .....	64
Obrázek 82: Stopy kuliček patrné po zpevnění přípravku .....	66
Obrázek 83: Výsledek testu pokrytí po obou cyklech.....	66
Obrázek 84: Detail testu pokrytí nerezovými kuličkami .....	67
Obrázek 85: Test pokrytí karbidovými kuličkami .....	68
Obrázek 86: Detail testu pokrytí karbidovými kuličkami .....	68

## 12. Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní fyzikální vlastnosti titanu [37].....	31
Tabulka 2: Srovnání některých vlastností titanu s jinými prvky [37].....	32
Tabulka 3: Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V [37].....	33
Tabulka 4: Fyzikální a mechanické vlastnosti žíhané slitiny Ti-6Al-4V za pokojové teploty [37].....	33
Tabulka 5: Hmotnosti částí přípravku.....	50
Tabulka 6: Hmotnosti kuliček.....	64

## 13. Seznam příloh

- P1. Kusovník - Přípravek pro kuličkování – KRK
- P2. Výkres sestavení – Přípravek pro kuličkování – KRK
- P3. Výrobní výkres – Víko
- P4. Výrobní výkres – Vana
- P5. Výrobní výkres – Víko horní
- P6. Výrobní výkres – Kryt centráže - vstup
- P7. Výrobní výkres – Kryt centráže – výstup
- P8. Výrobní výkres – Distanční podložka
- P9. Výrobní výkres – Podložka