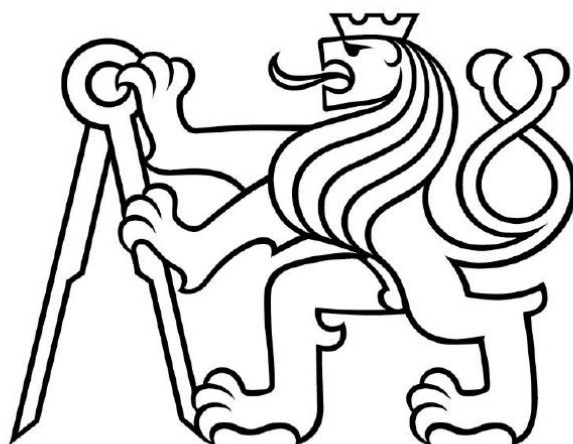


České Vysoké Učení Technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Návrh a výroba přípravků pro technologické zkoušky SPM leštění

Akademický rok 2018/2019

Autor: Dávid Mamrilla

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mamrila** Jméno: **Dávid** Osobní číslo: **466465**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a výroba přípravku pro technologické zkoušky SPM leštění

Název bakalářské práce anglicky:

Design and manufacturing of clamping fixture for technological test of SPM polishing

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše o technologii SPM Polishing
- 2) Návrh zkušebních těles a metodika experimentu
- 3) Konstrukční návrh přípravku
- 4) Výroba a montáž

Seznam doporučené literatury:

- 1) DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2000. ISBN isbn:978-0-87170-686-7.
- 2) patent PCT/US2017/033093

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

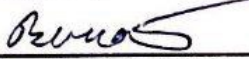
Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **19.07.2019**

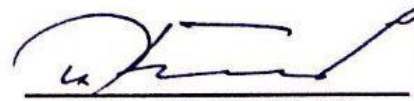
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



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



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje lopatková kola, jejich využití v letectví a jejich dokončovací metody. V první kapitole je zpracován stručný přehled jejich úlohy v leteckém motoru. Následuje popis omílacích dokončovacích metod. Na závěr teoretické části je v třetí kapitole shrnut přehled o titanu a jeho slitinách, o jejich vlastnostech, využití v letectví a výrobě. V praktické části je představen experiment na určení parametrů speciální omílací metody pro lopatková kola vyrobená z titanových slitin. Následuje konstrukční návrh zkušebních těles a dalších přípravků potřebných na provedení experimentu s kompletní výkresovou dokumentací. Na závěr je uveden detailní popis jejich výroby.

Klíčová slova

Lopatková kola, dokončovací operace lopatkových kol, omílání, slitiny titanu, titan v letectví, slitina Ti-6Al-4V

Abstract

This bachelor thesis describes impellers, their use in the aerospace industry and their finishing methods. The first chapter contains a brief overview of their role in an airplane engine. A description of tumbling as a finishing method and tumbling machines follows. At the end of the theoretical part, the third chapter presents a brief overview of titanium and its alloys, their properties, use, and manufacturing. In the practical part, an experiment to determine parameters of a special tumbling method for finishing impellers made of titanium alloys is introduced. Construction design of testing objects and other fixtures necessary for performing the experiment follows, including design documentation. The last chapter contains a detailed description of their manufacture.

Keywords

Impellers, finishing methods of impellers, tumbling, titanium alloys, titanium in aerospace industry, Ti-6Al-4V alloy

Bibliografická citace

MAMRILLA, Dávid. *Návrh a výroba přípravků pro technologické zkoušky SPM leštění*. Praha, 2019. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Pitrmuc.

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Dávid Mamrilla

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za odborné vedení a cenné rady při tvorbě této práce. Také chci poděkovat panu Ing. Pavlovi Novákovi Ph.D. za vedení při výrobě přípravků.

Obsah

Úvod.....	9
1. Popis problému a dosavadní řešení dokončování lopatek	9
1.1. Úloha lopatkových kol v proudových motorech	10
1.2. Dosavadní způsoby dokončování lopatkových kol	11
1.3. Dokončování lopatek omíláním ve stroji LPG.....	12
2. Moderní metody omílání.....	14
2.1. Omílací stroj	14
2.2. Využití omílání.....	15
2.2.1. Vyhlazování povrchu.....	15
2.2.2. Leštění.....	16
2.2.3. Odstraňování otřepů odlitků, odjehlování, zaoblování hran.....	16
2.2.4. Odmašťování omíláním	17
2.3. Výhody a nevýhody omílání	17
3. Slitiny titanu.....	18
3.1. Vlastnosti titanu a jeho slitin.....	18
3.1.1. Struktura titanu a jeho slitin	19
3.1.2. Mechanické vlastnosti titanu	21
3.1.3. Technologické vlastnosti titanu	23
3.1.4. Porovnání vlastností titanu s ocelí.....	25
3.2. Výroba titanu.....	25
3.2.1. Výroba kovového titanu.....	26
3.2.2. Tavení a prvotní výroba.....	28
3.3. Obrábění titanu	29
3.3.1. Nástroje pro obrábění titanových slitin.....	29
3.3.2. Soustružení titanových slitin	30
3.3.3. Frézování titanových slitin.....	30
3.3.4. Vrtání titanových slitin	30
3.3.5. Broušení titanových slitin	31
3.4. Titan v letectví	31
4. Experiment.....	33
4.1. Cíl.....	33
4.2. Příprava.....	33
4.3. Průběh	34

4.4.	Vyhodnocení.....	34
5.	Návrh.....	35
5.1.	Zkušební tělesa	35
5.2.	Rám.....	36
5.2.1.	Spodní část rámu	37
5.2.2.	Horní část rámu.....	38
5.2.3.	Boční části rámu	38
5.2.4.	Středová část rámu.....	38
5.3.	Spodní deska	38
5.4.	Podkladová deska pod titan.....	39
5.5.	Šrouby a matice	39
5.6.	Materiál	40
6.	Výroba	42
6.1.	Polotovary	42
6.2.	Stroje.....	42
6.3.	Rám.....	44
6.4.	Spodní deska	47
6.5.	Podkladová deska pod titan.....	47
6.6.	Zkušební tělesa	48
6.7.	Problémy a kompromisy při výrobě	49
6.8.	Výsledek výroby	50
	Závěr.....	51
	Zdroje	52

Úvod

Lopatková kola jsou důležitou součástí kompresorů v proudových motorech. Využití nalézají i napříč jinými odvětvími průmyslu, zejména v energetice, nicméně v této práci se budu zabývat hlavně jejich úlohou v letectví. Povrchové vlastnosti a geometrie lopatek mají tedy vliv na průtok vzduchu, účinnost kompresoru a tedy i celého motoru. Nicméně běžně používané leštící metody mají kromě nízké produktivity také tendenci odebírat materiál a tím měnit aerodynamické vlastnosti lopatek. Dále v nich do procesu také vstupuje lidský faktor, který není spolehlivý.

V mé práci nejdříve teoreticky rozeberu problematiku lopatkových kol v proudových motorech a jejich dokončování. Následně rozeberu také moderní metody omílání jakožto dokončovací operaci. Pak se zaměřím na materiál, ze kterého jsou vyrobeny – titanové slitiny. Popíšu a objasním jejich vlastnosti, strukturu, výrobu a využití. Nakonec pak na základě těchto znalostí předložím návrh experimentu pro určení parametrů produktivnější dokončovací operace pro titanová lopatková kola.

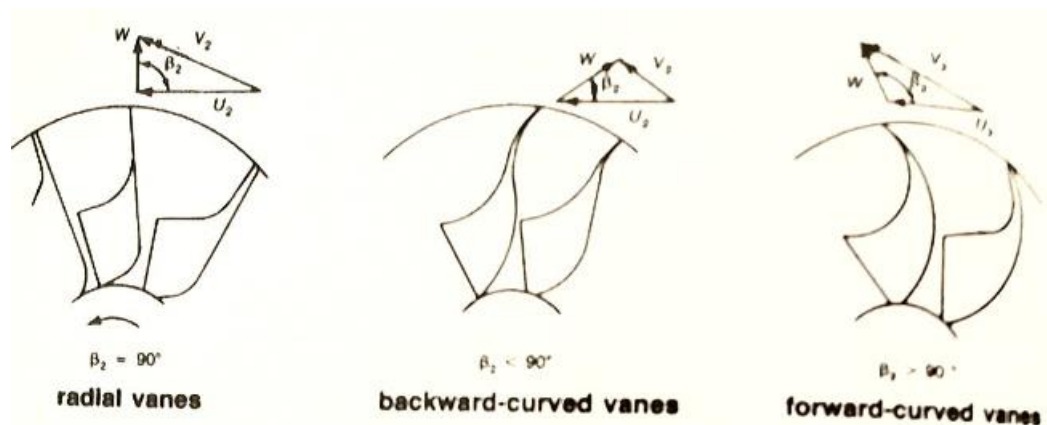
V druhé části mé práce se zase budu věnovat problematice výroby přípravků pro daný experiment. Popíšu a zdůvodním jednotlivé fáze návrhu a stejně pak i samotné výroby. Výsledkem mojí práce tedy budou:

- stručně shrnuty poznatky o titanu, jeho slitinách, lopatkových kolech a jejich dokončování formou literární rešerše
- kompletně vyrobeny přípravky pro navržený experiment na určení parametrů dokončovací operace omíláním na konkrétním stroji

1. Popis problému a dosavadní řešení dokončování lopatek

Problémy při dokončování titanových lopatkových kol, zejména nízkou produktivitou a nežádoucí úběr materiálu, řeší stroj LPG1 500/2310 leštící metodou, při které je obrobek upevněn do vibračního stroje. Následně je přivedeno leštící médium složeno z kovových tělísek, kapaliny a abraziva, které proudí přes lopatky a vyhlazuje jejich povrch. [1]

Stojí za zmínku, že leštící metoda stroje může být použita pro dokončování široké škály lopatkových kol. Zde na obrázku je vidět tři možné typy lopatek podle úhlu β , který hřbet lopatky svírá s tečnou na obvod kola:



Obrázek 1.1. - Tři různé typy lopatek. Zleva: $\beta=90^\circ$; $\beta<90^\circ$; $\beta>90^\circ$ [3]

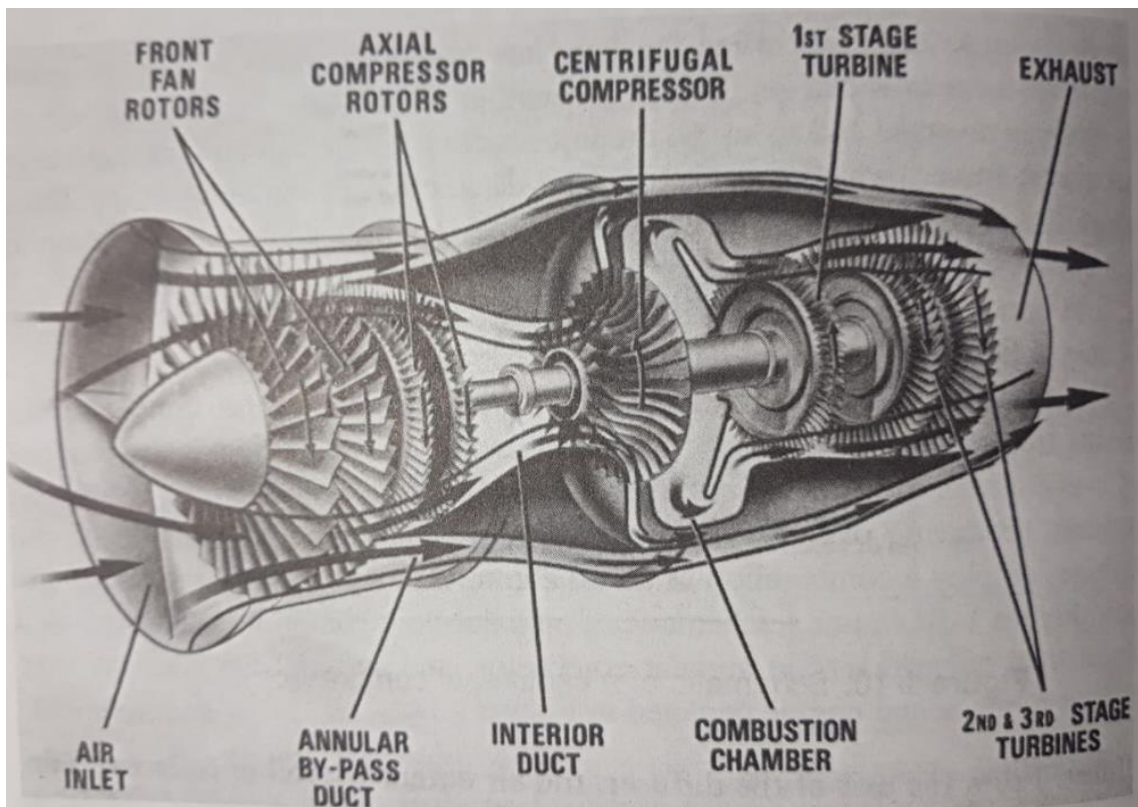
V této kapitole rozeberu úlohu lopatkových kol v proudových motorech, dosavadní způsoby jejich dokončování a jejich výhody a nedostatky.

1.1. Úloha lopatkových kol v proudových motorech

Proudový motor je stroj konvertující tepelnou energii z paliva na vysokorychlostní tah trysky. Motor je složen z plynového generátoru a sekce určené pro konverzi energie. [2] Plynový generátor pak dále obsahuje odstředivé kompresory, spalovací komoru a osově průtokové turbíny. Lopatková kola se nachází nejdříve v kompresorech, kde se nasátý vzduch stlačí předtím, než proudí do spalovací komory. Poté, co se vzduch ve spalovací komoře ohřeje hořícím palivem, proudí dál do turbín, ve kterých opět roztáčí lopatková kola a rotor [2,3].

Kompresor se skládá ze vstupních naváděcích lopatek a lopatkových kol, většinou víc různých velikostí za sebou. Vzduch vstupuje do kompresoru přes vstupní vedení a je mu dána vířivost vstupními lopatkami. Pak je jeho proudění změněno z axiálního na radiální. Následně získává od rotoru energii, zatímco proudí přes lopatková kola a stlačuje se. Kinetická energie stlačeného vzduchu je následně konvertována na statický tlak. Na závěr stlačený vzduch proudí do spalovací komory.

Je tedy vidět, že význam kvalitního provedení lopatkových kol v motoru je obrovský. V jednotlivých kompresorech se nachází mnoho kol, které vzduch postupně stlačují předtím, než vnikne do spalovací komory. Neméně důležitou úlohu plní lopatková kola i v turbíně, kde roztáčí rotor. Hladký povrch lopatek zajišťuje dobrý průtok vzduchu a minimální ztráty. Z toho důvodu je důležitá vhodná a efektivní, ale také produktivní dokončovací metoda [3].



Obrázek 1.2. - Průřez proudovým motorem a průtok vzduchu [3]

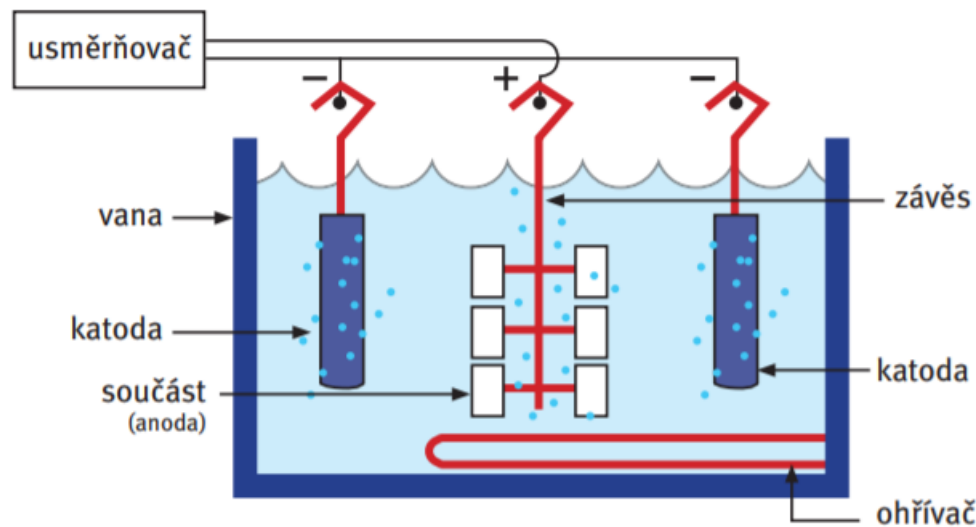
1.2. Dosavadní způsoby dokončování lopatkových kol

V praxi se momentálně na dokončování lopatkových kol většinou používají dvě metody – ruční a elektrolytické leštění.

Ruční leštění: Čela lopatek a kanály mezi nimi jsou leštěny manuálně pracovníkem pomocí ruční pneumatické brusky. Velká nevýhoda této metody je její nízká produktivita – vyleštění celého kola běžně trvá i několik dní. K tomu jí ještě může negativně ovlivnit lidský faktor – pracovník může na jednom kanálku zatlačit víc a na druhém méně, nebo může škrábnout hranu lopatky apod.

Elektrolytické leštění: U elektrolytického leštění se uplatňuje účinek stejnosměrného proudu v elektrolytu, kde je leštěné kolo zapojeno jako anoda ve vhodném leštícím elektrolytu. Katody jsou nerozpustné a většinou bývají z korozi-vzdorné oceli nebo jako katoda může sloužit vodivá vana naplněna elektrolytem. Leštících elektrolytů existuje více, jejich základem je jednak kyselina sírová a fosforečná, což jsou elektrolyty s dobrou vodivostí, a jednak kyselina chloristá a octová, což jsou elektrolyty s nízkou vodivostí. Různé elektrolyty fungují nejlépe při různých teplotách, z toho důvodu bývá součástí vany

pro elektrolytické leštění ohřivač. Výhodou elektrolytického leštění proti mechanickému je, že nevytváří vnitřní pnutí [4].



Obrázek 1.3. - Schéma elektrolytického leštění [5]

1.3. Dokončování lopatek omíláním ve stroji LPG

Stroj LPG1 500/2310 leští lopatky kola omílací metodou. Disk kola je zamaskován, zatímco lopatky a kanálky jsou odhaleny. Důležitý rozdíl tohoto pracovního procesu stroje LPG vůči běžnějším omílacím metodám je ten, že v tomto případě je vynechána brousící část procesu a přípravek se pouze leští za minimálního úběru materiálu. Kolo se upne magneticky a je k němu přivedeno leštící médium obsahující kovové plátky (98%)¹, kapalinu (méně než 2%) a abrazivum (méně než 0,05%). Následně probíhá leštící proces za účelem dosažení žádaného zlepšení povrchu.

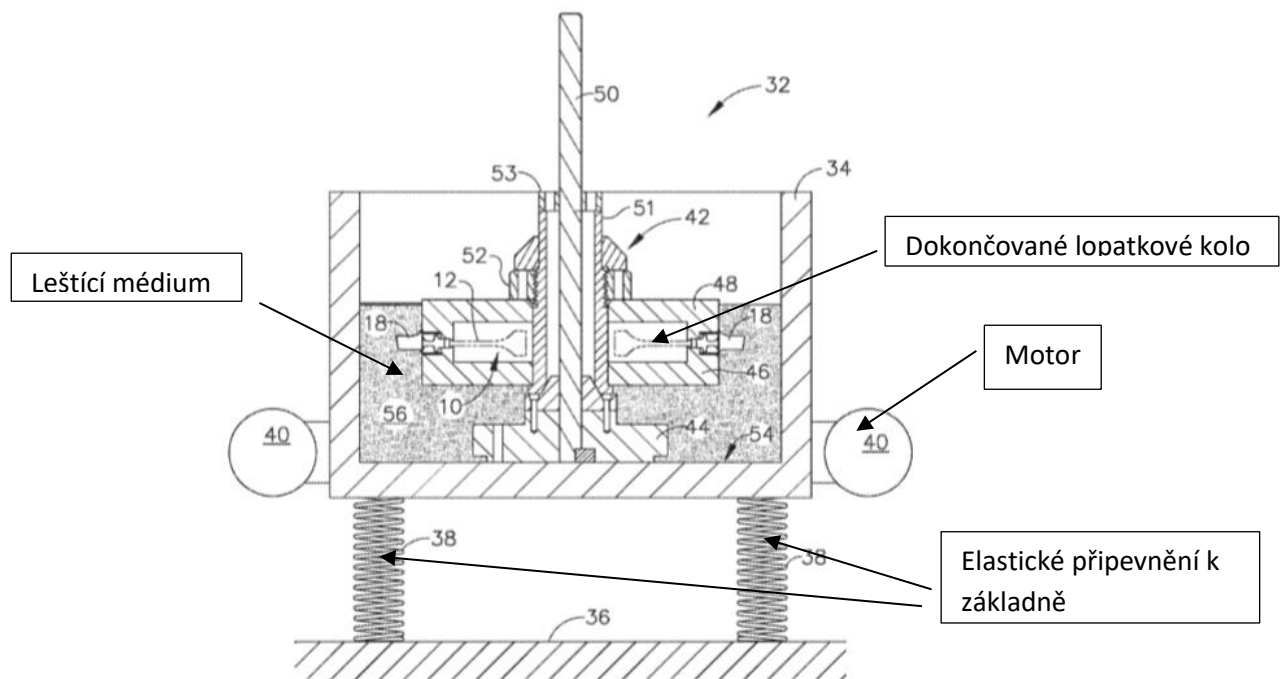
Leštící proces probíhá tak, že stroj začne vibrovat a oscilovat, čímž vytváří proud leštícího média přes lopatky kola po dobu určeného pracovního času. Tento proud vyhlazuje povrch a zlepšuje jeho integritu.

Dominantní složka leštícího média, kovové plátky, jsou ze zinku nebo mědi a jejich úlohou je rovnoměrně roznést abrazivum po obrobku. Mají tvar paralelogramu, což je tvar vhodný z toho důvodu, že nejvíc umožňuje volný tok leštícího média, kovové plátky tohoto tvaru nemají tendenci zasekávat se na obrobku. Jejich tloušťka je kolem 1 mm, ostatní rozměry se liší vzhledem na obrobek. Na větší obrobek se použijí větší plátky.

Kapalina slouží v médiu na oddělení a mazání kovových plátků. Může být použita voda nebo olej na bázi vodního roztoku.

Poslední složka lešticího média, abrazivum, které se nejvíc podílí na úpravě povrchu, je ve formě zrn. Jsou například z korundu, ale mohou být použity i zrna z jiného materiálu. Je možné začít leštění s abrazivem s většími zrny a pak pokračovat postupně k menším a menším zrnům, dokud není dosaženo požadované kvality povrchu. Efektivní metoda takového postupu může být slepení malých zrn do větších skupin speciálním lepidlem. Na začátku leštění budou tedy působit větší částice, které se postupně během pracovního cyklu budou rozpadat na menší, až na elementární zrna.

Pracovní cyklus stroje je od začátku až do konce automatický, nepotřebuje zásah člověka. Délka jeho trvání záleží na více faktorech, jako je velikost obrobku, složení použitého média a požadovaná kvalita povrchu. Obecně může proces trvat v rozmezí 1 – 2,5 hodiny [1].



Obrázek 1.4. - Schéma stroje [1]

2. Moderní metody omílání

Omílání je vysoce produktivní dokončovací metoda pro úpravy povrchů. Podstatou je úběr materiálu z povrchu součásti abrazivními částicemi při jejich vzájemném pohybu v prostoru omílacího bubnu. Buben vibruje nebo vykonává rotační pohyb, čímž vyvolává pohyb (v případě suchého omílání, tj. bez kapaliny) nebo proud (v případě omílání s kapalinou) omílacího média. To je tvořeno abrazivem, pomocnými prostředky a případně i kapalinou. Výsledný úběr a kvalitu povrchu lze ovlivnit zrnitostí brusiva a délkou procesu, většinou 1 – 4 hodiny. Nejčastější používanou omílací metodou je omílání na mokro s použitím keramických nebo plastových omílacích tělísek [6].

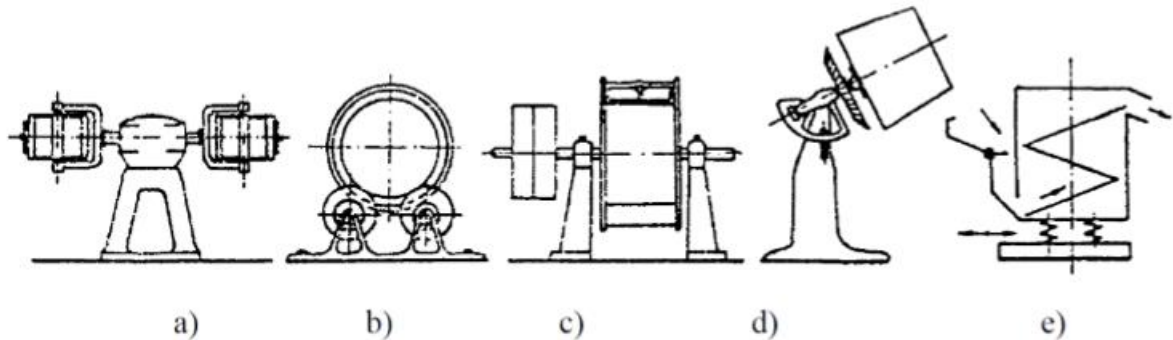
Jednou z nevýhod omílání jsou slabé výsledky při dokončování tvarově složitějších součástí. To mohou z části řešit moderní omílací metody, v kterých je pohyb pracovního média a abraziva vyvolán ne rotačním/vibračním pohybem stroje, nýbrž magnety. Magnetické omílací stroje se používají na dokončování tvarově složitých dílů vyrobených aditivními technologiemi pro letecký nebo automobilový průmysl a jedná se o poměrně novou technologii [7].

Dalším vývojovým trendem je chemické urychlování omílacího procesu. Funguje na principu přivedení speciální kapalné směsi do omílací nádoby, která způsobí oxidaci tenké vrstvy povrchu součásti. Součást je následně omílána abrazivem a na závěr se přivede další kapalná směs, která zoxidovanou vrstvičku úplně odstraní, zanechávajíc hladký povrch [8].

2.1. Omílací stroj

Hlavní částí každého omílacího stroje je nádoba, často buben, ve které probíhá omílací proces. Je vyrobena z oceli a vyložená gumovou nebo polyuretanovou vložkou. Omílací nádoby jsou dlouhé 1 – 10 m, kruhového, šestihranného nebo osmihranného průřezu. Omílání v bubnech se využívá pro dokončování většího množství menších součástí. Omílací stroje pro dokončování jednoho většího přípravku specifického tvaru, jako např. stroj a jeho metoda, které popisují v téhle práci, využívají omílací nádoby specifického tvaru se systémem upínání navrženým pro zamýšlený typ omílané součásti.

Pro vyvození rotačního pohybu využívá stroj asynchronního motoru v kombinaci se šnekovou převodovkou. Případně může asynchronní motor pohánět řemenicí s řemenem. Dále se použijí speciální vibrační motory na vyvolání vibrací nádoby nebo bubnu [6, 9].



Obrázek 2.1. - Schémata různých typů omílacích strojů – a) odstředivé; b), c) a d) rotační; e) vibrační [10]

Omílací stroj dosahující proud pracovního média pomocí magnetů pozůstává ze dvou magnetů nacházejících se vně dokončované součásti, každý na jednom konci. Další magnet se nachází uprostřed součásti. Může se jednat o elektromagnety nebo o permanentní magnety. Dodá se magnetické abrazivum, které se následně konglomeruje a pohybuje podél magnetických siločar. Abrazivum je magnetickou silou přitlačováno na povrch součásti, a tak probíhá broušení a leštění. Velikost a síla magnetů se volí podle potřeby [7].

2.2. Využití omílání

Omíláním lze řešit širokou škálu technologických požadavků, jako je vyhlazování povrchu a jeho leštění, zaoblování hran, odstraňování ořepů, čištění, odstraňování okují, moření a další. Díky tomu nachází omílání dobré uplatnění v různých odvětvích průmyslu. U řady obrobků je požadován hladký povrch. U dekorativních prvků je to lepší design, u lopatek v tryskových motorech nižší odpor vzduchu, u šnekových převodů nižší otěr a podobně. Dosahované hodnoty drsnosti se značně liší na základě hrubky použitého zrna [11].

2.2.1. Vyhlazování povrchu

Důvodů na vyhlazování povrchu může být více: nižší drsnost, nižší tření, nebo jednoduše lepší vzhled [12]. Omílací abrazivum v tomto případě vyrovnává nerovný povrch úběrem materiálu a může nahradit brousící dokončovací operace. Nicméně oproti jiným

dokončovacím metodám může omílání nabídnout výhodu v podobě metody, při které se abrazivum, na počátku pracovního procesu seskupené do hrudek, postupně rozpadá na menší a menší zrna, takže lze broušení a leštění provést během jednoho pracovního cyklu.

V praxi tato metoda funguje tak, že zrna seskupené do hrudek nejprve vyhladí drsný povrch. Přitom se samy rozmělní a přemění na jemný leštící prášek. Jakmile je dosaženo požadované hladkosti povrchu, je abrazivum odplaveno a proces pokračuje dále s leštícími tělísky za kontinuálního přívodu kapaliny. Vhodné abrazivum na takové použití se často vyrábí ve formě leštících past. [1, 11].

2.2.2. Leštění

Lesk a estetický vzhled vyžadují mnohé díly. Patří mezi ně dekorativní prvky, armatury a disky kol [12]. Do omílacích strojů se za účelem dosažení zlepšení povrchu a lesku přidávají speciální leštící pasty.

2.2.3. Odstraňování otřepů odlitků, odjehlování, zaoblování hran

Tlakové odlitky z hořčíku, hliníku, nebo zinku získají omíláním vedle hladšího čistšího povrchu i odstranění otřepů, blan zbytků mazadel. K těmto účelům se používají speciální plastová tělísky a pasivační kompaundy [12].

Odjehlováním se myslí odstranění otřepů, které zůstávají na obrobku po třískovém obrábění ve formě maličkých jehel.

Zaoblování hran se provádí v rotačních a odstředivých omílacích strojích. Zaoblení hran se provádí na obrocích, které se po sobě vzájemně pohybují, lépe pak po sobě kloužou [9].



Obrázek 2.2 - součásti se zaoblenými hranami [12]

2.2.4. Odmašťování omíláním

Při obráběcích i tvářecích procesech se užívají různá mazadla a procesní kapaliny a vyrobenou součást je pak potřebné odmastit. Ideální pro odmašťování omíláním je velké množství dílců. Proces spočívá v tom, že se do omílací nádoby přidá speciální sloučenina, která je buď velmi zásaditá nebo velmi kyselá (kompaund), závisí to na tom, jaké kapaliny a oleje byly použity při výrobě. Následně se povrch součásti musí proplachovat vodou a neutralizuje se. Po neutralizaci následuje pasivace – ocelové dílce musí být chráněny proti korozi, součásti z barevných kovů proti ztmavnutí a zašlosti.

Odmašťování se běžně provádí spolu s jinými omílacími operacemi, např. s odjehlováním a zaoblováním hran.

Silně kyselé nebo zásadité kompaundy se využívají taky na odstranění rzi a okují [11].

2.3. Výhody a nevýhody omílání

Omílání je v praxi často využívanou dokončovací metodou. Obvykle se využívá v podnicích, které vyrábějí velké množství menších, tvarově a rozměrově jednoduchých výrobků a důležitým faktorem je vysoká produktivita. Občasněji se však omílacích metod využívá i na opracování větších a složitějších výrobků.

Mezi výhody patří:

- Nízká zmetkovitost
- Vysoká produktivita proti jiným dokončovacím metodám
- Zpevnění povrchu

Nevýhody:

- Nerovnoměrný úběr materiálu
- Obtížné použití na tvarově složitých výrobcích [9, 13]



Obrázek 2.3. - Zuby šikmého ozubeného kola před a po omílání urychleném chemicky [8]

3. Slitiny titanu

Titan je lehký kov šedé až stříbrně bílé barvy, který je zastoupen v zemské kůře. Patří mezi relativně nové konstrukční materiály. Pozoruhodný je hlavně svojí nízkou hustotou a výbornou korozivzdorností [14]. Jeho mechanické a chemické vlastnosti se dále zlepšují přidáváním příměsí a vytvářením slitin [15].

Dobré mechanické vlastnosti činí titanové slitiny vhodné pro použití v různých odvětvích průmyslu. Hlavně tam, kde je kladen důraz na vysokou pevnost, korozivzdornost a lehkost. V této kapitole se budu věnovat titanu a jeho slitinám a nakonec zhodnotím i jejich roli v leteckém průmyslu. Ze slitin se zaměřím hlavně na Ti-6Al-4V, kterou jsem použil jako materiál pro zkušební tělesa v praktické části mé práce.

3.1. Vlastnosti titanu a jeho slitin

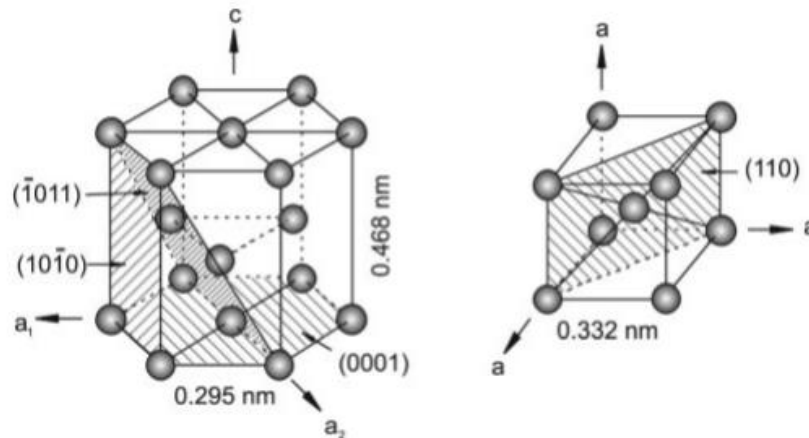
Čistý titan se podařilo připravit M.A. Hunterovi v roce 1910. I když byl tento kov známý už od konce 18. století, jeho vlastnosti šlo přesně určit až z velmi čistých vzorků. Důvod, proč trvalo víc jak století docílit potřebné čistoty je vysoká slučivost titanu s kyslíkem, dusíkem a jinými prvky. Čistý titan má následující fyzikální vlastnosti:

- Bod tání 1665 °C
- Měrné teplo 0,130 J/g°C
- Elektrický odpor 45 $\mu\Omega\text{cm}$
- Hustotu 4510 kg/m³
- Tepelnou vodivost 0,045 J/cm
- Tepelnou roztažnost $8,15 \cdot 10^{-6}$ cm/cm°C

Fyzikální vlastnosti slitin titanu se liší od čistého titanu jen málo, avšak tepelná a elektrická vodivost rychle klesají [14].

3.1.1. Struktura titanu a jeho slitin

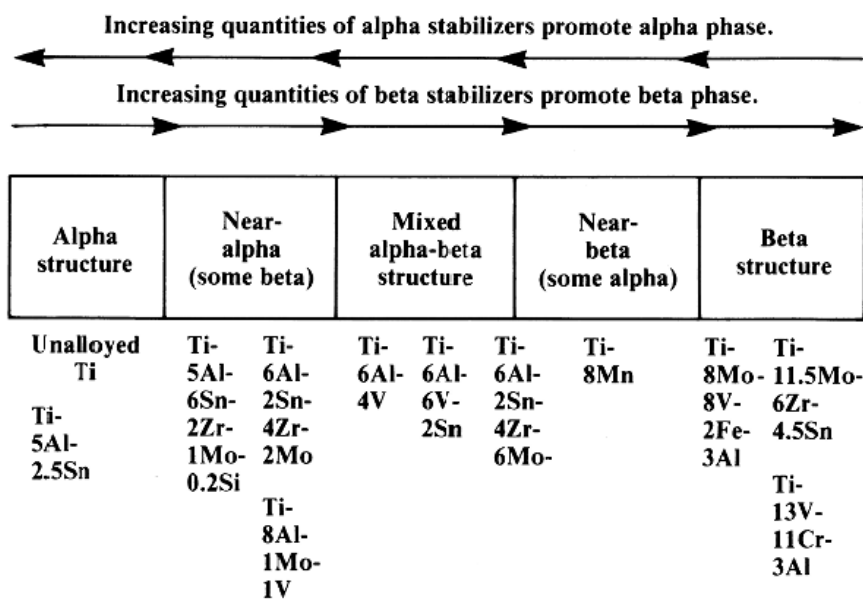
Slitiny titanu, jako slitiny jiných kovů, mají alfa a beta fázi. V alfa fázi má slitina hexagonální mřížku, v beta fázi kubickou tělesně středěnou mřížku. Čistý titan má alfa strukturu pod teplotou 882°C a beta strukturu při vyšších teplotách. Přidávání příměsí má za výsledek širokou škálu možných mikrostruktur v titanových slitinách.



Obrázek 3.1. - krystalická struktura alfa a beta fáze [15]

Alfa slitiny (spolu s čistým titanem) se obecně vyznačují vysokou korozivzdorností, odolností vůči tečení a dobrou svařitelností. Nemohou však být tepelně zpracovány zatepla, jelikož by to znamenalo vznik beta fáze. Naopak výhodou beta slitin je právě možnost tepelného zpracování zatepla pro zlepšení mechanických vlastností a dobrou tvárnost.

S přidáváním dostatečného množství beta příměsí do alfa struktury se vytvoří při zahřátí a následném ochlazení beta fáze. Výsledné struktury reprezentují dvoufázové alfa-beta slitiny. Právě alfa-beta slitiny mají, při správném výrobním postupu, skvělou kombinaci pevnosti a houževnatosti [15, 16].



Obrázek 3.2 - nejznámější slitiny a jejich fáze. Zleva doprava: alfa slitiny, smíchané slitiny až beta slitiny [15]

Titan tvoří slitiny s mnoha prvky, významné jsou hlavně prvky V. a VI. třídy periodické tabulky. Vzhledem k α a β struktuře je lze rozdělit na:

- α stabilizátory – posouvají hranice alfa fáze k vyšším teplotám. Z této skupiny je významný hlavně hliník. Plyny jako kyslík, uhlík a dusík jsou také α stabilizátory, ale jejich přítomnost zhoršuje mechanické vlastnosti a nejsou tedy žádoucí.
- β stabilizátory – posouvají hranice beta fáze k nižším teplotám. Patří mezi ně vanad, niob, molybden nebo tantal. Pokud má roztok vysoký obsah těchto prvků, zachovává si stabilní β fázi až do pokojové teploty (nebo se při nízké teplotě rozpadá eutektoidní přeměnou) [16].
- neutrální prvky – nemají výrazný vliv na teplotu přechodu mezi alfa a beta fází. Nejvýznamnější prvky této skupiny jsou cín a zirkon [16,17].

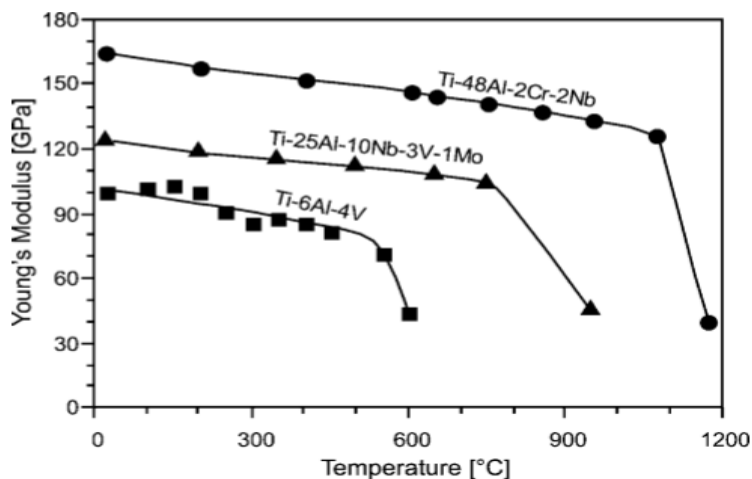
Typ slitiny	Teplota přechodu do beta fáze [°C]
Alfa slitiny	900–1050
Alfa-beta slitiny	885–1015
Beta slitiny	675–805

Tab. 3.1. – teplota přechodu do beta fáze pro různé typy slitin [15]

3.1.2. Mechanické vlastnosti titanu

Titan kromě své nízké hustoty a vysoké teploty tavení vyniká nad jinými kovy svými mechanickými vlastnostmi. Přitom čistý titan však patří mezi kovy se střední pevností, s mezí pevnosti 390 MPa (komerčně čistý titan odpovídá 99,2 % čistotě) [16]. Pevnost však tak, jak i jiné mechanické vlastnosti, lze i několikanásobně zlepšit legováním a tepelným zpracováním. Třetí způsob, jak zlepšit vlastnosti titanu, je vytvoření kompozitního materiálu, nicméně tím se v této práci nebudu zabírat. V této podkapitole rozeberu a popíšu mechanické vlastnosti jak čistého, tak legovaného titanu [14,17].

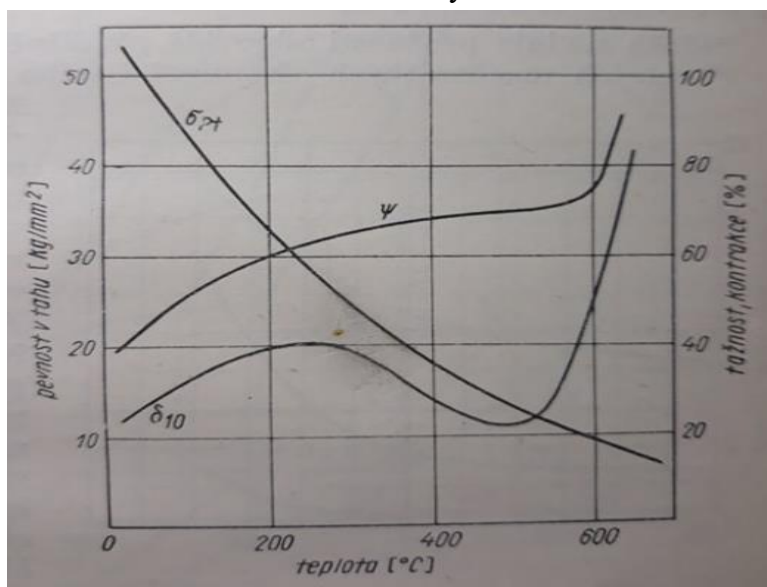
- **Pevnost** – mez kluzu a mez pevnosti čistého titanu lze srovnávat s hodnotami středně nebo málo legovaných konstrukčních ocelí. Poměr obou veličin je 0,75 až 0,9 [4]. Pevnost běžných titanových slitin pak dosahuje hodnot 800–1200 MPa (třeba pro Ti-6Al-4V to je 950-970 MPa), některé beta slitiny však po tepelném zpracování vykazují i mnohem vyšší hodnoty. Například beta slitina TIMETAL (Ti-6V-6Mo-6Fe-3Al) používána na výrobu vysokopevnostních upínek a svěráků dosahuje hodnot meze pevnosti až 1600 MPa [17].
- **Tvrdoost** – pohybuje se mezi 70–120 HRB podle čistoty titanu [13].
- **Tažnost** – závisí od obsahu nečistot, tj. kyslíku, dusíku, uhlíku apod. Čistý titan má vyšší hodnoty tažnosti než legované oceli stejných pevností. Komerčně čistý titan má tažnost 28 %, titanové slitiny pak mají nižší tažnost [16]. Hodně záleží nejen na chemickém složení, ale i na způsobu tepelného zpracování. Pro slitinu Ti-6Al-4V se hodnoty tažnosti pohybují mezi 5-10 % [18].
- **Vrubová houževnatost** – je nejvíce závislá na obsahu vodíku v titanu. Ostatní nečistoty jako kyslík a dusík mají spíš vliv na pevnost, tvrdost a tažnost, na které zas nemá významný vliv vodík. U čistého titanu dosahuje vrubová houževnatost hodnot 100 J/cm², za minimální hodnotu lze považovat 50 J/cm². Při obsahu vodíku již 0,01 % klesá vrubová houževnatost na 40 J/cm². Vodík lze odstranit žiháním ve vakuu [14,16].
- **Tuhost** – modul pružnosti v tahu čistého titanu je 120 GPa. Obecně mají alfa slitiny modul pružnosti vyšší. Lze jí také do značné míry ovlivnit legurami a tepelným zpracováním, jak je patrné z obrázku [15,17].



Obrázek 3.3.- závislost Youngova modulu pružnosti některých slitin titanu na teplotě [15]

- Mez únavy** – Titan vykazuje při cyklickém namáhání značnou odolnost. Velikost meze únavy u hladkých vzorků bývá větší než 50 % meze pevnosti v tahu. Záleží však na jakosti povrchu, nejlepší je leštěný povrch. Snížení meze únavy přináší vruby o 25 až 30 %, v závislosti na tvaru. Proto je třeba dokončovací operace s úběrem materiálu, pokud jsou při výrobě nezbytné, předem vyzkoušet. Mohou totiž snížit hodnotu meze únavy výrobku, podobně jako nasycení povrchových vrstev kyslíkem nebo dusíkem [14].

Mechanické vlastnosti titanu se pochopitelně mění v závislosti na teplotě. Ačkoliv má titan vysoký bod tání, nepoužívá se pro vyšší teploty, konkrétně do zhruba 530 °C. Důvodem je, že při vysokých teplotách výrazně ztrácí pevnost. Při teplotách vyšších než 300 °C je pevnost čistého titanu dokonce nižší než u běžných konstrukčních ocelí.



Obrázek 3.4. - závislost pevnosti v tahu, tažnosti a kontrakce čistého titanu na teplotě

Tenhle nedostatek lze samozřejmě také částečně napravit legováním a některé slitiny obsahující hliník vydrží i pracovní teploty nad 590 °C. Použití za takových podmínek však není hlavním účelem titanových slitin [15,16].

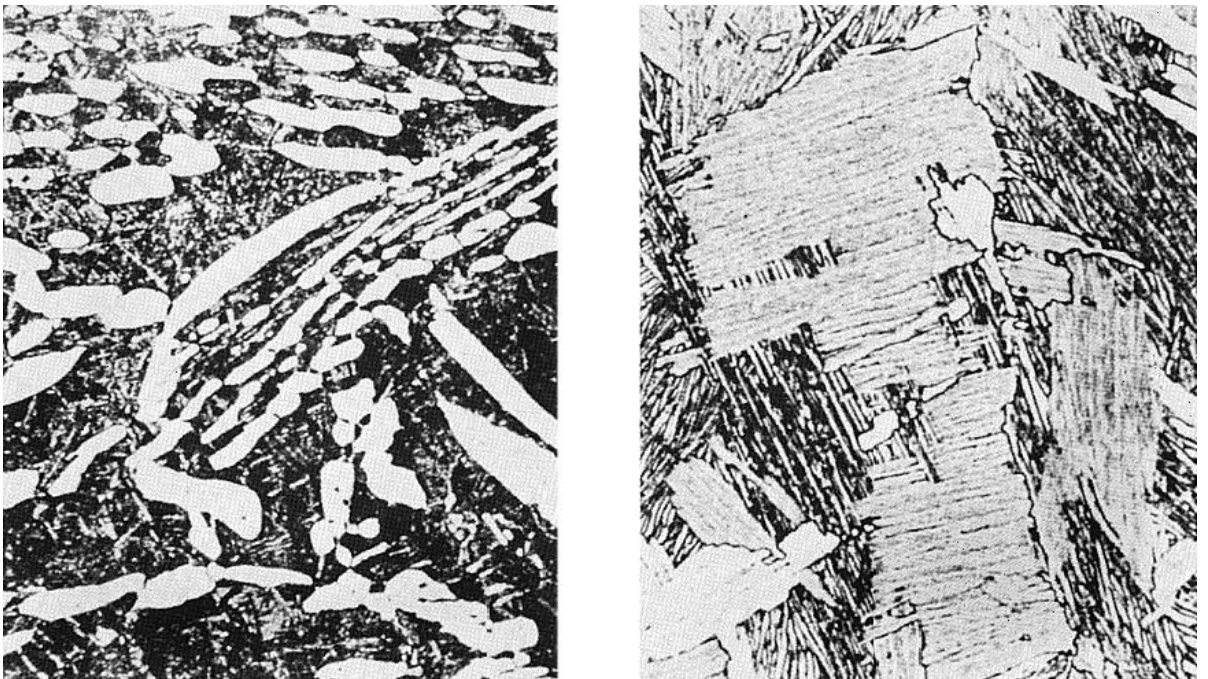
3.1.3. Technologické vlastnosti titanu

Díky fyzikálním a mechanickým vlastnostem, zmíněných v předešlých kapitolách, nachází titanové slitiny uplatnění tam, kde jsou na materiál kladeny vysoké nároky. Při výrobě jsou však důležité hlavně technologické vlastnosti.

- **Obrobitelnost** – obrobitelnost titanu je, jak lze předpokládat ze znalosti jeho mechanických vlastností, horší než obrobitelnost ocelí. Důvodem je především nízká tepelná vodivost, která způsobuje, že se třískou neodvádí ani zdaleka tak velký podíl tepla, jako u ocelí. Naopak, většina tepla zůstává v obrobku a přenáší se do nástroje, který se rychle opotřebí. Dalším důvodem špatné obrobitelnosti je vysoká pevnost a silná tendence titanu vytvářet při ohřevu v místě tvorby třísky sloučeniny s kyslíkem a dusíkem z okolní atmosféry, jak jsem zmínil už na začátku kapitoly [16]. Dále je také obráběcí nástroj vystaven vysokému abrazivnímu účinku, vzhledem k přítomnosti vysoce tvrdých karbidů titanu [19]. Nejlepší obrobitelnost mají čistý titan a alfa slitiny, zhoršuje se směrem k beta slitinám [20].
- **Otěruvzdornost** – vzhledem k ocelím má titan nízkou otěruvzdornost. Tvar třísky u titanu je takový, že styková plocha mezi nástrojem a obrobkem je malá. To spolu s nízkou tepelnou vodivostí a vysokým koeficientem tření způsobuje přehřívání povrchové vrstvy na teploty až nad 1000 °C. Částičky titanu se tak při nevhodné geometrii bříty navarují na břit nástroje. Dalším problémem je také již zmíněný abrazivní otěr [16].
- **Třecí vlastnosti** – Součinitel tření titanu je vysoký vzhledem k ocelím, pohybuje se mezi hodnotami 0,65 až 0,68. Na rozdíl od většiny ostatních kovů se titan při tření často zadírá, což je způsobeno tím, že obvyklá povrchová vrstvička kysličníku nebrání místnímu přivaření třecích ploch. Proto je dobré zlepšit podmínky při tření umělým vytvořením vrstvičky kysličníku, nebo chemickou úpravou, např. nitridací. Standardní maziva nepůsobí na titan dobře

vzhledem na jeho nedostatečnou absorpci molekul těchto maziv. Jako mazivo se tedy používá grafit, popřípadě siřník molybdeničitý [14,16]

- **Tvářitelnost a kovatelnost** – závisí na chemickém složení, struktuře a podmínkách deformace. Tvářitelnost zatepla je obecně nižší z důvodu vysokého deformačního odporu [17]. Čistý titan a alfa slitiny se většinou tváří zastudena. Často se užívá, hlavně u beta slitin, obou tvářecích procesů, zastudena i zatepla. Slitina Ti-6Al-4V se většinou tváří zastudena [15,16]. Tváření, zejména kování, jsou častým způsobem zpracování titanových slitin, jelikož zajišťují lepší mechanické vlastnosti (pevnost, odolnost vůči tečení, únavová odolnost) než obráběné díly. Kování titanu se využívá při výrobě součástí pro letecký průmysl, například i lopatková kola. Dalším důvodem pro tváření může být i tvarová složitost dílu. Po tvářecím procesu je díl často žíhán a stárnut [15].



Obrázek 3.5. - Mikrostruktura slitiny Ti-6Al-4V. Vlevo: slitina kována zatepla, ale dokončena zastudena. Vpravo: Slitina kována jenom zatepla [15]

- **Slévateľnosť** – slévateľnosť titanu je v porovnaní s ocelí náročná a málo využívaná. Vzhľadom k vysokej slúčitelnosti s plyny v atmosfére sa musí titan a jeho slitiny lít vo vakuu. Je to samozrejme možné, ale technologicky a finančne náročné, preto sa titan slévá len výjimečne.
- **Svařitelnost** – ze stejného důvodu musí také svařování probíhat v inertní atmosféře nebo vakuu. Nejlépe svařitelné jsou alfa slitiny a čistý titan, svařitelnost klesá směrem k beta slitinám. Svařuje se jenom tepelně zpracovaný materiál. Nelze svařovat plamenem ani běžnými obalovanými elektrodami,

nejčastěji se používají wolframové elektrody v argonové atmosféře. Velmi obtížná je svařitelnost titanu s jinými kovy [15].

3.1.4. Porovnání vlastností titanu s ocelí

Na závěr této podkapitoly je vhodné zopakovat fyzikální a mechanické vlastnosti titanu, tento krát v porovnání s ocelí. V tabulkách jsou porovnány vlastnosti komerčně čistého titanu (značka CP – commercially pure, obsah Ti 99,2%), slitiny Ti-6Al-4V a uhlíkové oceli.

Fyzikální vlastnosti

-	CP Titan	Ti-6Al-4V	Uhlíková ocel
Bod tání [°C]	1665	1640	1538
Měrné teplo [kJ/kg· K]	0,522	0,526	0,502
El. Odpor [$\mu\Omega\text{cm}$]	42	178	9,7
Hustota [kg/m^3]	4510	4430	7850
Tepelná vodivost [$\text{W/m} \cdot \text{K}$]	11,4	6,7	52
Tepelná roztažnost [$\text{cm/cm} \cdot \text{K}$]	$8,15 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$12,6 \cdot 10^{-6}$

Tab. 3.2. Porovnání fyzikálních vlastností materiálů [21,22,23]

Mechanické vlastnosti

-	CP Titan	Ti-6Al-4V	Uhlíková ocel
Pevnost [MPa]	390	960	380–480
Tvrдость [HRB]	72	112	95
Tažnost [%]	28	14	19
Youngův modul pružnosti [GPa]	120	114	203

Tab. 3.3. Porovnání mechanických vlastností materiálů [21,22,23]

3.2. Výroba titanu

Mnoho minerálů vyskytujících se v zemské kůře obsahuje v různém množství sloučeniny titanu. Vyskytují se v usazeninách, vyvřelinách, ale také v hlíně i uhlí. Nejvýznamnější titanové minerály jsou rutil, ilmenit, sfen a perovskit. Titan se v nich

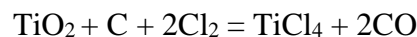
vyskytuje ve formě kysličníku TiO_2 nebo různých titaničitanů a křemičitanů. Kromě toho se titan nachází také v podložních jílech a řadě komplexních minerálů s niobem, tantalem a zirkonem. Hlavní potíž při izolaci titanu z těchto sloučenin spočívá v jeho vysoké slučivosti s kyslíkem a dusíkem [14].

Výrobní proces titanu pak ve zkratce zahrnuje následující kroky:

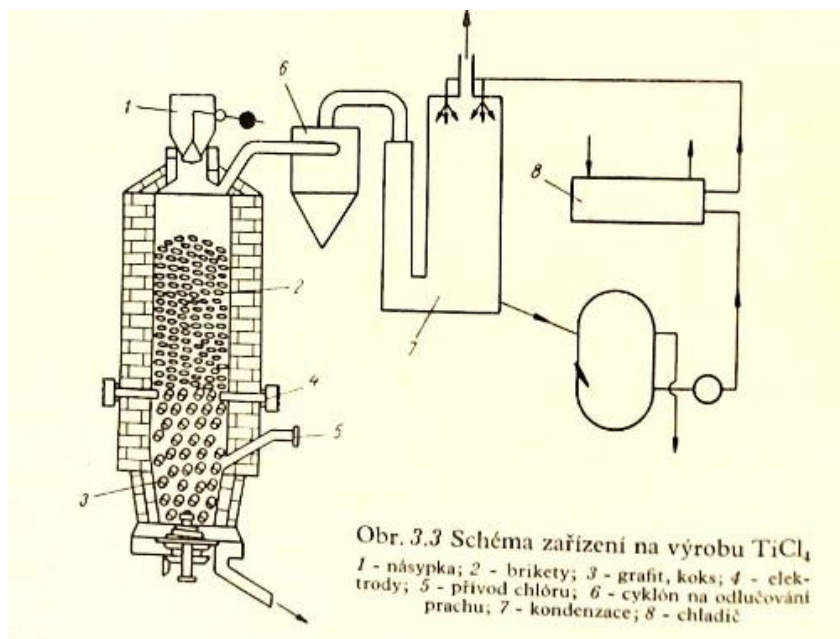
- Výroba kovového titanu, tj. redukce titanové rudy na nečistou pórovitou formu titanu a její následné očištění
- Tavení kovového titanu (a případných legujících prvků) do ingotů
- Prvotní výroba, během které jsou ingoty přetvářeny na polotovary – tyče, desky, dráty a jiné [15].

3.2.1. Výroba kovového titanu

Prvním krokem při výrobě čistého titanu je odstranění kyslíku z rudy a to tak, že se nejprve vyrobí chlorid titaničitý, bezbarvá kapalina, který se následně redukuje na čistý titan. Výrobu chloridu titaničitého lze vyjádřit rovnicí:



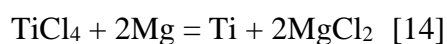
Typickou surovinou pro výrobu chloridu titaničitého jsou rutil a ilmenit. Ty se v zařízení podobném vysoké peci smíchají s práškovým uhlím, směs se pak zahřívá na teplotu kolem $700\text{ }^\circ\text{C}$. Výsledná směs se pak v elektrické peci chlórjuje plynným chlórem, vzniká chlorid titaničitý, který se odvádí jako plyn a následně se kondenzuje.



Obrázek 3.6. - schéma zařízení na výrobu TiCl_4 [14]

Způsobů získávání čistého titanu z chloridu titaničitého existuje víc, já v této práci zmíním dva nejčastější způsoby, a to Krollův redukční způsob a výrobu pomocí elektrolýzy [14,15].

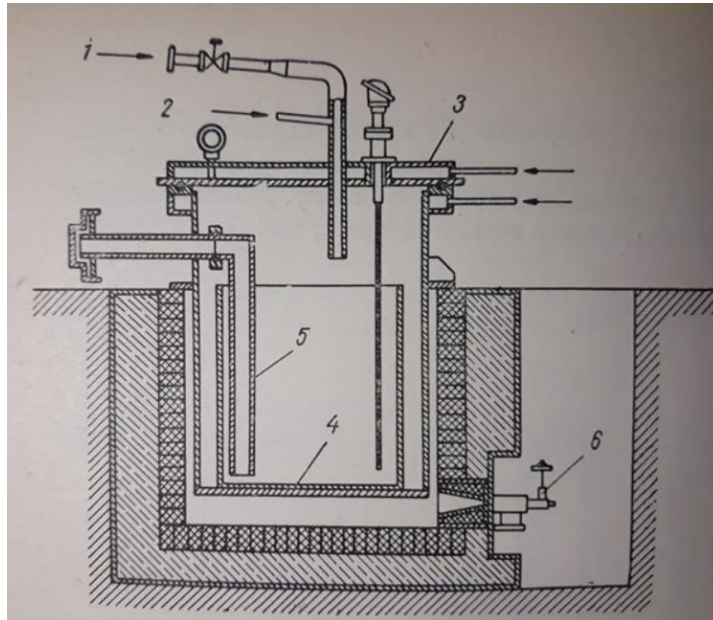
Krollův způsob spočívá v reakci chloridu titaničitého s hořčíkem ve vakuově těsné nádobě pod ochrannou atmosférou inertního plynu, obvykle argonu, aby se zabránilo reakci s kyslíkem a dusíkem. Chlorid titaničitý je pozvolna připouštěn do roztaveného hořčíku a probíhá následující reakce:



Výsledkem je, že chlor se naváže na hořčík a vytvoří se chlorid hořečnatý a jako hlavní produkt zůstane v kelímcích na stěnách izolovaný titan, se kterým můžeme dál pracovat. Tento titan je však pokryt již zmíněnou pórovitou vrstvou, kterou je nutno odstranit, dělá se tak kyselinou nebo destilací ve vakuu [15,16].

Výroba elektrolýzou spočívá ve vyloučení titanu elektrolýzou bezkyslíkatých solí. Výchozí látkou je nejčastěji opět chlorid titaničitý, ale používají se i jiné sloučeniny. Elektrolytem je roztavená lázeň chloridu strontnatého a sodného o teplotě 750–850 °C. Elektrolýzér má jednu ocelovou katodu a dvě grafitové anody. Katoda má tvar uzavřené nádoby a na jejích vnitřních stěnách se usazuje vyrobený titan [14].

Čistota vyrobeného titanu značně závisí na čistotě počátečních surovin. Jejich kontrola je při výrobě titanu a titanových slitin důležitá, jelikož rudy mohou obsahovat prvky, ze kterých i malé množství může způsobit značné nežádoucí účinky.



Obrázek 3.7. - Schéma zařízení na výrobu titanové houby Krollovým procesem. 1 - přívod $TiCl_4$; 2 - přívod argonu; 3 - víko chlazené vodou; 4 - kelímek; 5 - slivná trubka; 6 - naftový hořák [14]

3.2.2. Tavení a prvotní výroba

Kovový titan připraven výše popsanými metodami je následně nutno přetavit do ingotů. Dělá se tak více způsoby:

Obloukovým tavením ve vakuu (Vacuum arc remelting – VAR) – obloukové tavení je jednou z nejpoužívanějších metod pro výrobu titanových ingotů. Používá se hlavně pro slitiny titanu, na které jsou kladeny vysoké nároky. Proces spočívá v roztavení titanu elektrickým obloukem a jeho následné ztuhnutí ve tvar ingotu ve vodou chlazené formě. Mezi výhody obloukového tavení patří vysoká čistota výsledného produktu, dobrá kontrola tavení a možnost výrazně snížit obsah vodíku v ingotu. Naproti tomu nevýhodou je složitost obloukové pece a obtížné zapalování oblouku. Jedná se o nejrozšířenější metodu výroby ingotů [14,15].

Tavením v elektronové peci – tavení se děje pomocí svazku elektronových paprsků. Při dopadu se kinetická energie elektronů mění na teplo a kovový titan se zahřívá. Výsledné ingoty jsou vysoké kvality [16].

Mezi další, avšak méně užívané metody patří tavení v **indukční** nebo v **plasmové** peci.

Vyrobené ingoty se následně podruhé přetaví, aby bylo dosaženo vyšší kvality a homogenity.

Po vyrobení ingotů následuje proces zvaný prvotní výroba, při kterém se z ingotů vyrobí polotovary pro obrábění a další použití – desky, tyče, dráty atd. [16,17].

3.3. Obrábění titanu

O obrobiteľnosti titanu jsem se zmínil již v kapitole 3.1.3. Nyní se budu věnovat jednotlivým metodám obrábění užívanými v praxi.

Obecně lze říct, že teplo odchází spíše do nástroje než do třísky, kvůli nízké tepelné vodivosti – jenom $6\text{--}15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pro většinu slitin v porovnání s $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a víc, což je běžné pro oceli. Samotná tříska je tenká a má sklon nalepovat se na břit. Použití chladicí kapaliny je nezbytné [24]. Dalším problémem je větší minimální tloušťka řezu než u oceli, je to způsobeno nízkým modulem pružnosti.

Slitiny titanu se obrábějí po žíhání naměkko nebo po uměleém stárnutí, kdy má obrobek vyšší pevnost a je vyžíhán na snížení pnutí. Kvůli nízkému modulu pružnosti má obrobek pod tlakem, vytvářeným nástrojem při obrábění, sklony k plastické deformaci. Nejlépe se obrábějí slitiny typu alfa a čistý titan, směrem k beta slitinám se obrobiteľnost zhoršuje [15,20].

3.3.1. Nástroje pro obrábění titanových slitin

Obrábění má vysoké požadavky na nástroje – vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení, odolnost vůči plastické deformaci a difuzi, houževnatost a správnou kombinaci spolehlivosti a ostrosti ostří. Konkrétně se dobře obrábí speciálními jemnozrnnými povlakovanými slinutými karbidy [20]. Katalog firmy Sandvik Coromant doporučuje třídy karbidů S30T, S40T a GC1010, což jsou třídy s povlakem, ale i nepovlakovanou třídu H10F [25].

Aby se eliminovaly zmíněné nepříznivé podmínky při obrábění, je potřebné zredukovat teplotu na špičce nástroje. Je tedy vhodné použít ostrý břit s pozitivní geometrií a zajistit bohatý přívod chladicí kapaliny. Katalog firmy WNT doporučuje

destičky s úhlem čela 9° až 23° a s úhlem hřbetu 5° až 10° . Taky je nutno optimalizovat řezné podmínky, hlavně řeznou rychlost, která je v porovnání se soustružením běžných ocelí při obrábění titanu nižší [20,26].

3.3.2. Soustružení titanových slitin

Při soustružení titanových slitin je vysoká teplota v místě řezání umístěna blíže k břítu nástroje. Vzhledem k tomu je nutno aby si nástroj zachovával vysokou pevnost i při vysokých teplotách a měl dobrou odolnost vůči tepelným rázům. Je vhodné použít nízké řezné rychlosti (běžně 25–100 m/min) a zajistit co nejvyšší tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek.

Jak bylo zmíněno v úvodu kapitoly, na obrábění titanu se používají slinuté karbidy. Wolframkarbid vykazuje lepší trvanlivost než titankarbid. Konkrétně difuzní opotřebení je u obrábění wolframkarbidem mnohem méně intenzivní. Používají se povlakované pro odebrání tenkých vrstev. Běžně používány tvary destiček: S, C, D, T, V, W, R.

Nezbytný je samozřejmě přívod řezné kapaliny do místa řezu. Množství tepla zatěžujícího nástroj lze regulovat rovnováhou mezi řeznou rychlostí, posuvem a hloubkou řezu [19,20,24].

3.3.3. Frézování titanových slitin

Frézování je častou metodou obrábění titanových slitin v letectví, jelikož součástky z titanu jsou často tvarově složité. Problémem je opět náročný odvod tepla, vznik mikrosvarů a vysoká pevnost titanových slitin. Používají se o málo vyšší řezné rychlosti (40–110 m/min) a menší hloubky řezu. Klíčové je zvolit vhodný nástroj, stroj a řezné podmínky a prostředí. Pro frézovací nástroje se zpravidla volí slinuté karbidy s vyšším obsahem kobaltu a tedy s vyšší houževnatostí [19,24].

3.3.4. Vrtání titanových slitin

Při vrtání zůstávají stejné potíže, jaké jsou při soustružení a frézování, navíc se však přidávají potíže běžně spojené s vrtáním, a to hlavně přívod řezné kapaliny, o které jsem se už víc krát zmínil, že je při obrábění titanu nezbytná. Pro úspěšné vrtání je potřebná dobrá tuhost a dynamické vlastnosti celé soustavy: nástroj – stroj – obrobek.

Na rozdíl od soustružení a frézování se pro vrtání titanových slitin používají i nástroje z rychlořezné oceli, s vodícími fazetami. Důležité je volit vrták s malým průměrem jádra pro dobrý odvod třísky. Přívod řezné kapaliny by se měl ideálně řešit ejektorovým přívodem a kapalina by měla být do díry přiváděna pod vysokým tlakem (10–70 barů). Výška ideálního posuvu a řezné rychlosti se liší, závisí od poměru hloubky díry k jejímu průměru, od materiálu obrobku a nástroje a případného tvaru destičky [19,24].

3.3.5. Broušení titanových slitin

Dokončovací operace jsou u titanových dílů často nezbytné, jelikož jsou to často součásti, na které jsou kladeny vysoké nároky, jak z hlediska geometrické přesnosti, tak z hlediska integrity povrchu. Vzhledem k vysoké pevnosti a nízké teplotní vodivosti titanu je jeho broušení charakteristické vysokou řeznou silou a vysoké koncentrací tepla v místě řezu.

Vzhledem k vysoké reaktivitě titanu s kyslíkem zmíněné v kapitole 3.1. není vhodné používat korundové (Al_2O_3) brusné kotouče, jelikož titan se při vysoké teplotě vzniklé při broušení lehce naváže na kyslík z korundu. Výsledkem je pak nejen dramatické opotřebení nástroje, nýbrž i nebezpečné pracovní prostředí z důvodu žhavých odletujících jisker. Z tohoto důvodu se používají spíše brusné kotouče z karbidu křemíku (SiC). Zároveň se doporučuje volit nižší hodnoty řezné rychlosti a úběru [20].

V případě vysokých požadavků na kvalitu obrobků a produktivitu se aplikují kotouče na bázi kubického nitridu bóru nebo syntetického diamantu. To vede k vysoké kvalitě povrchu bez trhlin a popálenin [19].

3.4. Titan v letectví

Kombinace a interakce mechanického a tepelného namáhání a koroze mají za následek vysoké požadavky na součásti letadel. Mezi nejvýznamnější požadavky patří: odolnost vůči tečení a únavě, vrubová houževnatost, korozivzdornost, nízká teplotní roztažnost [3]. Vysoké teploty vylučují konstrukční materiály na bázi hliníkových slitin, které se používají pro konstrukci kostry letadla, zatímco ocel má příliš vysokou hustotu. Je to právě příznivý poměr mezi pevností a hustotou, spolu s ostatními mechanickými a

fyzikálními vlastnostmi popsanými v téhle kapitole, které činí titanové slitiny vhodným materiálem pro použití v letectví.

U motorů jsou ze slitin titanu hlavně různé části kompresorů – disky, rotory, prstence, skříňe kompresorů, rotační i stacionární kompresorové lopatky, dále písty, ojnice, stěrací a distanční kroužky, převodové a turbínové skříňe, šrouby, matice, pružiny, armatury a trubková vedení. Při výrobě těchto součástí se nejčastěji využívá právě slitina Ti-6Al-4V v jejich různých formách [14].

Používání titanových komponentů uvnitř motorů je rozšířeno u mnoha typů letadel, avšak u speciálních vojenských letadel, raketách, či balistických střel se titanových slitin užívá i v kostře a krytu letadla. Je to z toho důvodu, že při rychlostech nad 3,5 Mach jsou i tyto části letadla zatěžovány vysokou teplotou – až 500 °C [27]. U těchto letadel je tedy slitin titanu využíváno i na výrobu potahů, křídel, ocasní plochy, zakrytování motoru a kabiny, dále na palivové nádrže, zásobníky, ohnivzdorné přepážky, ramena, výztuhy, kryty výfukových trubek, nýty atd. U vrtulníků se zas titanové slitiny (kromě motoru) používají také na kované vrtulové listy. Korozní odolnosti titanu se využívá také v sanitních helikoptérách na podlahy a stěny kabin namáhaných dezinfekčními roztoky.

Za zmínku také stojí využívání slitin titanu na konstrukci tlakových nádob i za nízkých teplot, kde je většina i vysoce legovaných ocelí křehká. Toho je využíváno jak u komerčních a vojenských letadel, tak i u raket.

Zvýšené náklady při nahrazení ocelové nebo hliníkové součástky titanovou jsou samozřejmostí, avšak na cenu se ve vojenském průmyslu nepřihlíží tak citlivě jak v komerční sféře. Nicméně není možno v žádném letadle nahradit všechn materiál titanem. Je nutno rozlišovat způsob a velikost namáhání dané součásti a také provozní teplotu. Je třeba počítat s nižším modulem pružnosti, omezenými teplotami použití, možnostmi pájení a nežádoucím zadíráním pohybových mechanismů vyrobených z titanových slitin, není-li vyřešena vhodná povrchová úprava [14,15].

4. Experiment

Jak bylo řečeno v úvodu, cílem této práce je navrhnout a připravit experiment pro určení parametrů omílací operace titanových lopatkových kol na stroji LPG1 500/2310 od firmy SPM. Jak tento stroj funguje je popsáno v části 1.3. Nyní se tedy zaměřím na samotný experiment.

4.1. Cíl

Omílání strojem LPG se v praxi plánuje používat jako produktivní metoda s nízkou zmetkovitostí na dokončování lopatek titanových lopatkových kol. Nicméně, než se to může začít uplatňovat, je potřeba zjistit několik parametrů metody:

- 1) Dosažitelná kvalita povrchu (drsnost (R_a , R_z , R_y), vlnitost)
- 2) Nežádoucí změna geometrie lopatek a úběr materiálu omílacím procesem
- 3) Vliv polohy omílané součásti v stroji na body 1) a 2)
- 4) Vliv doby trvání pracovního procesu na body 1) a 2)

Můj experiment má tedy za cíl zjistit tyto čtyři parametry.

4.2. Příprava

Aby se zmíněné parametry mohly zjistit a odečíst, bude potřebné provést omílání na zkoušku. K tomu lze použít buď lopatkové kolo nebo speciálně připravená zkušební tělesa. Použit lopatkové kolo není vhodné ze dvou důvodů: 1) Výroba titanových lopatkových kol pro letecký průmysl je drahá a časově náročná, proto provádění technologických zkoušek na nich není vhodné. Šlo by použít starších kol, nicméně ty zas pravděpodobně mají vady z používání a bylo by nutné je rozlišovat od vad, které by mohlo způsobit samotné omílání. 2) Vyhodnocování drsnosti a změny geometrie lopatek na lopatkovém kole by bylo obtížné, znamenalo by to zdlouhavou práci při souřadnicovém měřícím stroji.

Proto jsem zvolil pro experiment vyrobit speciální zkušební tělesa z titanové slitiny Ti-6Al-4V. Spolu s nimi bylo potřebné vyrobit další přípravky na provedení

technologických zkoušek, hlavně rám na jejich upevnění. Jejich návrh a výrobu popíšu v dalších kapitolách.

4.3. Průběh

Tělesa se upevní na konstrukci rámu, který se magneticky upevní do stroje. Rám je navržen tak, že zkušební tělesa lze upevnit do různých poloh v x-ové a y-ové ose. Dále bude potřebné zvolit vhodné složení pracovního média.

Následně se spustí omílací proces, po skončení se tělíska opláchnou a připraví na vyhodnocení. Experiment proběhne několikrát po různou dobu trvání, vždy s novými tělesy. Pro každé těleso, na kterém se provede zkouška, se zapíše jeho poloha ve stroji a doba trvání procesu.

4.4. Vyhodnocení

Po skončení experimentu se nejprve vyhodnotí dosažená kvalita povrchu a ovlivnění geometrie. Drsnost bude možné díky jednoduchému tvaru těles změřit drsnoměrem. Zaoblení hrany klínu se změří digitálním mikroskopem nebo profil projektorem. Úbytek tloušťky se změří přesným mikrometrem.

Na závěr se naměřené hodnoty sestaví do tabulek a grafů a určí se, která poloha a čas trvání měli nejlepší výsledky co se týče vyhlazení povrchu a nejmenší vliv na geometrii, případně kde se dosáhla vhodná kombinaci těchto dvou faktorů.

5. Návrh

V této kapitole se zaměřím na návrh jednotlivých částí rámu a zkušebních těles. To zahrnuje jak konstrukční, tak i materiálové řešení. Popíšu, jak jsem postupoval při tvorbě výkresů a volbě jednotlivých rozměrů.

Celkový návrh byl následující: pro provedení experimentu na stroji SPM jsem navrhl malá zešíkmená zkušební tělesa upnutá do čtyřhranného rámu složeného ze čtyř na sebe kolmých tyčí. Obrobky se do stroje SPM upínají magneticky, proto je celý rám navíc připevněn k magnetické desce, která má stabilizační funkci.

Seznam všech součástí potřebných k provedení experimentu je následující:

- 1x spodní část rámu
- 1x horní část rámu
- 2x boční část rámu
- 1x prostřední část rámu
- 1x spodní deska
- Alespoň 20 zkušebních těles
- 6x M8 šroub + matice
- 2x M10 šroub + matice
- Počet šroubů a matic M4 odpovídající počtu zkušebních těles

V následujících kapitolách popíšu podrobněji jednotlivé součásti, postup a vývoj jejich návrhů. Všechny výkresy lze najít v příloze.

5.1. Zkušební tělesa

Jako první jsem navrhl samotná zkušební tělesa. Důležitý u nich byl ostrý vrcholový úhel a rovná plocha dostatečně velká na to, aby na ní bylo možné měřit drsnost. Ostrý vrcholový úhel je důležitý pro to, abych při experimentu mohl být změřen a vyhodnocen vliv omílání ve stroji SPM na geometrii tělesa. Na rovné ploše se zase budou měřit vlivy omílání na drsnost.

V původním návrhu měli tělesa tloušťku 10 mm, to by ale při zachování vrcholového úhlu 15° a délky rovné plochy alespoň 30 mm znamenalo přílišnou celkovou délku tělesa. Po zvážení vícerych návrhů a konzultacích jsem nakonec zvolil tloušťku 4 mm, co při zachování ostatních rozměrů znamenalo délku 90 mm. Při návrhu jsem bral v úvahu také to, že tělesa budou vyrobena ze slitiny titanu a že materiálem je tedy třeba pokud možno šetřit.

Šířku jsem zvolil na 10 mm, což je akorát pro změření vlivů omílání na špičku a také pro změření drsnosti na rovné ploše na vrchu a ve spod tělesa.

Už od počátku jsem tělesa konstruoval s tím, že budou k rámu připevněny šrouby. Bylo třeba zvolit šroub takového rozměru, aby se i s hlavou vešel na plochu širokou 10 mm, ale aby měl zároveň dostatečnou pevnost a byl dostupný v délce alespoň 40 mm. Vzhledem na tyto požadavky jsem se nakonec rozhodl pro šrouby M4. Do těles jsem se tedy rozhodl vyvrtat pro tyto šrouby střední díry, tedy o průměru 4,5 mm.

5.2. Rám

Rám jsem navrhl jako čtyřhrannou konstrukci osázenou dírami pro přišroubování zkušebních těles. Původní návrh obsahoval jenom čtyři tyče přišroubované k sobě na koncích šrouby M8. Po konzultaci s vedoucím práce jsem rám rozšířil ještě o prostřední tyč přišroubovanou ke spodní a horní tyči ve středu šrouby M8. Udělal jsem to tak ze dvou důvodů:

1. Z pevnostního hlediska hrozilo, že by jednotlivé části rámu nedržely dobře a ve stroji by se po čas experimentu protáčely.
2. Přidalo to možnost mít zkušební tělesa na dalším místě, uprostřed původní konstrukce, jelikož prvotní návrh tuto důležitou oblast nepokrýval.

Při určování rozměrů pro můj rám jsem vycházel jednak z rozměrů a možností stroje SPM, a jednak z možností obráběcích strojů, které jsem měl k dispozici.

Tloušťku rámu jsem pro všechny jeho součásti zvolil na 20 mm. Je to dobrý kompromis mezi pevností a váhou.

Kromě spojení šrouby jsem zvažoval také udělat konce tyčí zkosené pod úhlem 45 stupňů a svařit je. Avšak toto by bylo nejen technologicky náročnější, ale i nevhodné vzhledem k tomu, že jako materiál pro výrobu rámu jsem zvolil nerezovou ocel (o volbě materiálu později v kapitole 5.6.). Nerezová ocel je v oblasti sváru náchylná k mezikrystalické korozi [21].

Jednotlivé výkresy, tak jako i výkres sestavný, lze nalézt v příloze.

5.2.1. Spodní část rámu

Tuhle část rámu jsem navrhl jako první. Jako první otázku jsem řešil délku této části. Bral jsem ohled hlavně na rozměry pracovního prostoru v stroji, což je 500x500x600. Chtěl jsem nechat 40-50 mm volného prostoru po obou stranách, pro dobrý a volný průtok pracovního média. Nakonec jsem se rozhodl pro délku 300 mm s tím, že svislé boční tyče budou ke spodní části přišroubovány zboku, což na každé straně přidá k celkové délce 20 mm. Dále jsem věděl, že do stran budou vyčnívat tělesa o délce 35 mm. Na každé straně mi tedy zůstalo $\frac{500-(300+2\cdot 20+2\cdot 35)}{2} = 45$ mm, což bylo vyhovující.

Dále bylo třeba řešit díry, přes které se budou přišroubovávat zkušební tělesa. Zvažoval jsem dvě možnosti – udělat díry se závity, nebo nechat díry průchozí a připevnit tělesa maticí. Vzhledem k tomu, že ve výsledku byl celkový počet děr na celém rámu 101, jsem zvolil druhou možnost. Dělat závity do takového množství děr by bylo technologicky a časově extrémně náročné a nepřinášelo by to oproti řešení s maticí žádnou značnou výhodu.

Díry jsou ze všech stran tak, aby tělesa šlo upnout co nejvíce způsoby a mít tak možnost porovnat co nejvíc různých poloh. Rozteč děr jsem zvolil následovně: díra je ve středu tělesa o šířce 10 mm, tedy na jednu stranu bude koukat do prostoru mezi dírami 5 mm z jednoho a 5 mm z druhého tělesa. 10 mm bude zabírat těleso, které je upevněno kolmo, na sousední ploše. Dalších 5 milimetrů jsem nechal jednak jako vůli při montáži, jednak jako rezervu při případné nepřesnosti během výroby. Tak jsem došel k rozteči 25 mm.

Dále bylo třeba navrhnout díry pro spojení s ostatními částmi rámu a spodní deskou. Ty byly následující: Na obou koncích tyče slepá díra se závitem M8. Ve středu tyče byly díry v průměru 4,5 mm přerušeny a umístil jsem mezi ně průchozí díru bez závitu pro M8 střední třídy, tedy o průměru 9 mm. Zesodu bylo třeba navrhnout zahloubení, jelikož tyč bude dosedat na desku. Poslední dvě díry slouží právě pro přichycení spodní desky šrouby M10. Navrhl jsem pro ně průchozí díry střední třídy, na horní straně tyče jsem navrhl přichycení maticí. Jsou vzdáleny symetricky od prostřední díry o 42,5 mm. Díry pro M4 šrouby v jejich okolí, celkem 4, bylo třeba také zahloubit, jelikož budou doléhat na desku.

5.2.2. Horní část rámu

Horní část rámu je identická té dolní s tím rozdílem, že nemá navrtané díry pro M10 šrouby, které jsou na spodní části kvůli přichycení k desce. Také samozřejmě nebylo potřebné zahloubit žádnou z děr pro M4 šrouby.

5.2.3. Boční části rámu

Délku bočních tyčí, tedy celkovou výšku rámu, jsem zvolil na 310 mm. Původně jsem zamýšlel udělat můj rám větší na výšku než na šířku, jelikož by to dobře odpovídalo i rozměrům stroje SPM. Po konzultaci s vedoucím práce jsem si ale uvědomil, že omílání bude vykazovat výsledky jenom tam, kde budou tělesa ponořena a bude na ně tlačit váha brousícího média. Mít tedy tělesa výš než 300 mm není potřebné.

Rozteč děr i šířku tyčí jsem ponechal stejnou jako u předešlých částí. Na obou koncích tyčí jsem navrhl vodorovné díry pro připevnění ke spodní a vrchní části rámu šrouby M8. Díry jsou střední třídy a jsou zahloubené. Obě boční tyče jsou identické.

5.2.4. Středová část rámu

Středová tyč rámu svisle propojuje spodní a horní tyč v polovině jejich délky. Její délka je 310 (celková výška rámu) $- 2 \times 20$ (tloušťka spodní a horní tyče) $= 270$ mm. Rozteč děr po šrouby M4 je stejná, tedy 25 mm. Na obou koncích má tyč slepou díru se závitem M8 pro spojení s horní a spodní tyčí.

5.3. Spodní deska

Spodní deska slouží k upevnění celé konstrukce k magnetu ve stroji a ke stabilizaci rámu. Tady konkrétní rozměry nebyly až tak důležité, věděl jsem, že potřebuji desku s rozměry kolem $120 \times 100 \times 30$. Bylo potřebné, aby deska pokryla aspoň dva póly magnetu, které mají 50 mm. Pak jsme se spolu s vedoucím snažili najít ve školských skladech desku s přibližnými rozměry, kterou bychom mohli použít jako polotovar. Našli jsme ji a výsledný návrh desky, když jsme už měli vybraný polotovar, byly rozměry $130 \times 100 \times 22$.

Pro připevnění k rámu jsem navrhl dvě díry pro šrouby M10. Díry jsou od sebe 85 mm vzdálené, jsou střední třídy, tedy průměr mají 11 mm. Díry jsou pochopitelně zahloubené,

jelikož deska dosedá na magnet. Šrouby M10 procházejí skrz díry ve spodní části rámu a jsou zajištěny maticí.

V původním návrhu uprostřed desky je ještě třetí díra pro šroub M8, který by spojoval desku, spodní část rámu a procházel by až do závitu v prostřední části rámu. Pak jsem ale po konzultaci uvážil, že dva M10 šrouby budou při přichycení stačit a třetí díru jsem z návrhu odstranil.

5.4. Podkladová deska pod titan

Jak už jsem zmínil v kapitole 4.1., zkušební tělesa jsou zkosená pod úhlem 15 stupňů. Zkosení se provádí na brusce, kam se obrobek upíná přes magnet. Proto je potřeba titanovou desku upnout na desku z magnetického materiálu, která je zkosená o polovinu úhlu, tedy 7,5 stupně. Plného úhlu 15 stupňů se pak dosáhne tak, že se deska přeupne a obrobí i z druhé strany.

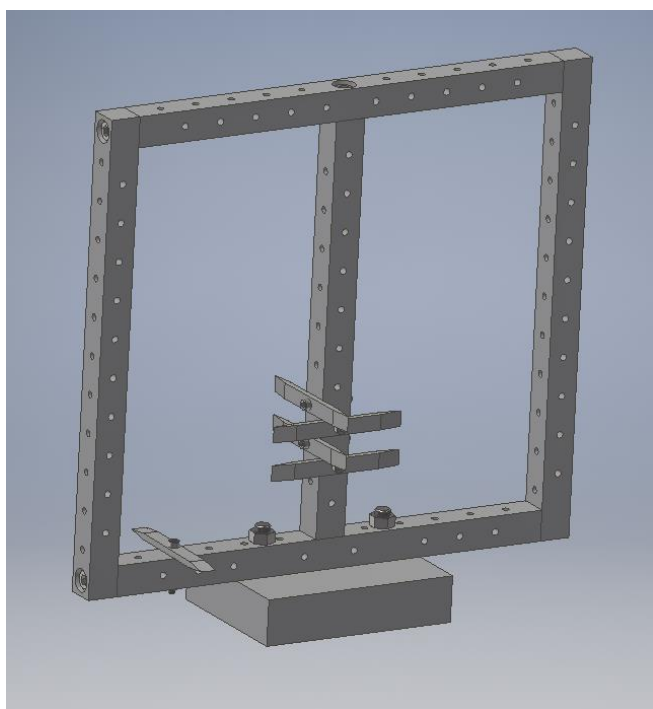
Titanová deska se na podkladovou desku upne přes šrouby M4. Jelikož titanová deska se pak nařeže na zkušební tělíska s dírou pro šroub M4, není potřeba vrtat nové díry pro podkladovou desku.

Přesné rozměry podkladové desky jsem navrhl až po tom, co jsme spolu s vedoucím práce objednali titanové desky jako polotovary pro zkušební tělesa. Desky, které jsme objednali, mají rozměry 200x90x4. Chtěl jsem, aby podkladová deska měla přibližně stejnou délku a šířku a tloušťku kolem 20-30 mm. Abychom nemuseli objednávat další polotvar, opět jsme vyrazili do školských skladů a našli magnetickou desku s vhodnými rozměry. Výsledným návrhem pak byla deska s rozměry 200x80 a s tloušťkou 22 v nejvyšším bodě a už zmíněným zkosením horní plochy o 7,5 stupně. Čtyři průchozí díry se závity M4 začínají 45 mm od kraje a jsou rozmístěny s roztečí 40 mm.

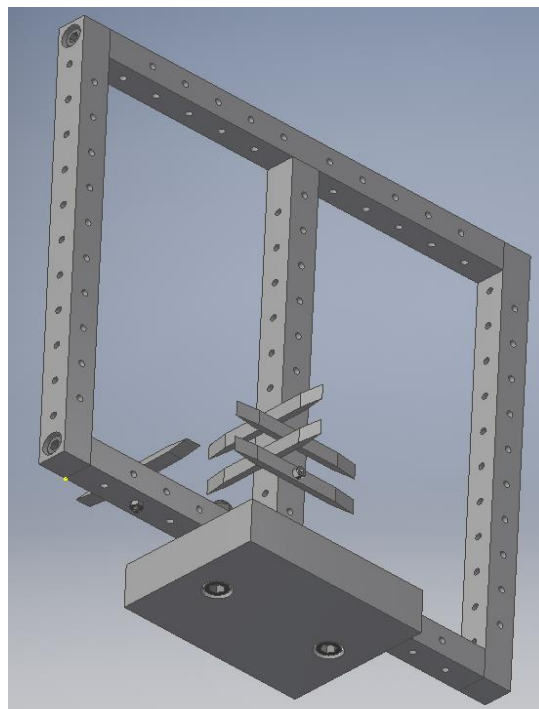
5.5. Šrouby a matice

Jako spojovací materiál jsem zvolil šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. V případech, kde mám v mé konstrukci zahloubení, by šestihránná hlava ani nepřipadala v úvahu, jelikož tam není místo pro klíč. Kvůli jednotnosti a jednoduchosti jsem pak zvolil šrouby s vnitřním šestihranem všude. Z důvodů dostupnosti jsem zvolil šrouby DIN 912.

Matice jsem zvolil šestihřanné třídy C normy ČSN EN 24032.



Obrázek 5.1. - Návrh rámu a těles v programu Autodesk Inventor (pohled zepředu)



Obrázek 5.2. - návrh rámu a těles v programu Autodesk Inventor (pohled zespodu)

5.6. Materiál

Po dokončení návrhů bylo nezbytné zvolit materiál pro jednotlivé součásti.

Zkušební tělesa: Pro co největší přesnost experimentu jsem jako materiál pro zkušební tělesa zvolil slitinu Ti-6Al-4V, neboli Titan Grade 5, což je slitina běžně užívána při výrobě lopatkových kol do proudových motorů.

Rám: Pro všechny součásti, které budou vkládaný do stroje spolu s tělesy je nezbytné, aby byly z nerezové oceli. Je to z toho důvodu, že když bude během experimentu proudit přes rám a tělesa abrazivum, může se stát, že abrazivum odebere částice oceli z rámu a dá je do titanových těles. Pokud by se tohle stalo a rám by nebyl z nerezové oceli, tyhle částice by zkorodovali, což by narušilo mechanické vlastnosti i vzhled těles. Berouc do úvahy i dostupnost a cenu jsem se nakonec rozhodl pro chrom niklovou austenitickou nemagnetickou ocel ČSN 17 240.

Šrouby a matice: Stejně jako, rám, šrouby taky musí být nerezové. Zakoupil jsem šrouby z oceli ČSN 17 240.

Spodní deska: Jelikož je také ve stroji, musí být také z nerezové oceli, ale z magnetické, jelikož se bude upínat přes magnet. Ve školním skladu jsme nakonec s vedoucím práce našli ideální desku jak rozměrově, tak materiálově. Je z precipitačně vytvrzené oceli 15-5 PH.

Podkladová deska pod titan: Jediná součást, kterou jsem vyráběl a nešla do stroje, nemusí teda být nerezová, jen magnetická. Deska, kterou jsme nakonec zvolili jako polotovar, byla z martenzitické oceli ČSN 17 021.

6. Výroba

V této kapitole popíšu průběh výroby rámu a zkušebních těles a vše podstatné kolem toho. Celá výroba proběhla ve výrobních halách strojní fakulty v Dejvicích.

6.1. Polotovary

Rám – třímetrová tyč čtvercová tažená 20x20 h11, materiál nerezová ocel austenitická ocel ČSN 17 240.

Zkušební tělesa – deska 200x80x4, titan grade 5 (Ti-6Al-4V), broušený povrch

Spodní deska – deska 140x105x34, martenzitická ocel ČSN 17 021

Podkladová deska pod titan – deska 90x210x35, martenzitická ocel ČSN 17 021

6.2. Stroje

Při výrobě jsem použil následující stroje:

- Pásová pila Optimum OPTI S 181 G



Obrázek 6.1. - pila

- Soustruh TOS SV18RA



Obrázek 6.2. - soustruh

- CNC frézka VMC 500 – MAS, řídicí systém Siemens Acramatix



Obrázek 6.3. - frézka

- Bruska Mikronex BRH 20CNC



Obrázek 6.4. - bruska

6.3. Rám

Jednalo se o časově nejnáročnější prvek na výrobu. Jak již bylo zmíněno, polotovarem byla tří metrová tyč, kterou bylo potřebné nařezat na píle. Rozměry jednotlivých částí rámu jsou zmíněny v částech 5.2.1–5.2.4. Na každou část jsem při řezání na pile nechával 5–10 mm přídavek.



Obrázek 6.5. - Nařezání tyče na 5 částí

Po dělení materiálu bylo potřebné zarovnat čela na přesný rozměr na soustruhu. Následně se do čelních ploch spodní, horní a prostřední části rámu vyvrtala díra a vyřezal závit M8. Díru jsem nejdříve navrtal navrtávkem, pak vyvrtal díru o průměr 4 mm, pak 7 mm a na závěr se vyřezal M8 závit. Při vrtání bylo potřebné pečlivě ovládat přísuv koníku a mazat nástroj.



Obrázek 6.6. – Vrtání díry do čela tyče



Obrázek 6.7. – nástroje použité při vyvrtání díry a následném vyřezání závitu

Pak bylo třeba vzít jednotlivé části konstrukce rámu na CNC frézku a vyvrtat jak 5 mm průchozí díry pro šrouby M4, tak 9 mm průchozí díry pro M8. 9 mm díry se také zahloubili (viz. příloha). Jak je vidět, po čas frézování bylo nezbytné přivádět do místa řezu dostatek rezné kapaliny.



Obrázek 6.8. – frézování děr pro M4 šrouby

Zbývalo už jen rám smontovat:



Obrázek 6.9. – Smontovaný rám

6.4. Spodní deska

Desku jsem nejdřív čelní frézou se čtvercovými vyměnitelnými destičkami ofrézoval na požadované rozměry. Pak jsem vyvrtal díry o průměru 11 mm pro šrouby M10 a zahloubení o průměru 18 mm. Na závěr bylo nutné zkosit hrany z důvodu bezpečnosti a estetiky.



Obrázek 6.10. – Třísky se namotávají na nástroj během výroby desky a musí být před pokračováním odstraněny

6.5. Podkladová deska pod titan

Výroba podkladové desky začala obdobně. Čelní frézou se zarovнала na požadované rozměry. Pak jsem sklíčidlo naklonil o 7,5 stupně a zfrézoval horní plochu. Pak se hrany zkosili. Na závěr se, také pod úhlem, vyvrtaly 3,2 mm díry a pak ručně vyřezaly 4 mm závity sadou závitníků.

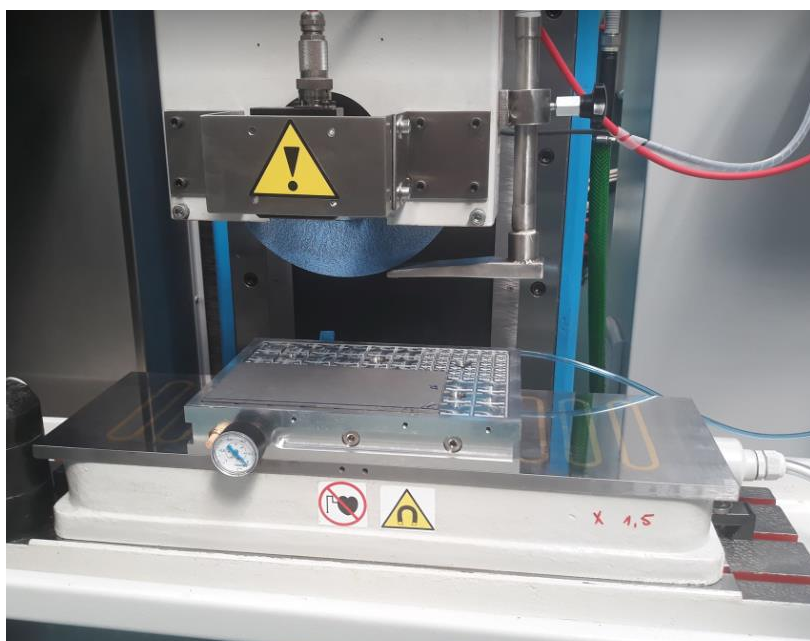


Obrázek 6.11. – Podkladová deska pod titan po dokončení výroby

6.6. Zkušební tělesa

Výroba těles začala na brusce Mikronex BRH 20 CNC. Titanová deska se vakuově upla na hliníkovou desku a následně se zbrousila na tloušťku 4 mm. Pak se deska vzala na frézku a vyvrtali se střední díry pro šrouby M4, tj. o průměru 4,5 mm. Rozteč děr je 10 mm.

Pak se deska vzala zpátky na brusku. Pomocí M4 šroubů se deska připevnila na zkosenou podkladovou desku a ta se magneticky připevnila na brusku. Následně obrousili se klíny z obou stran na požadovaný vrcholový úhel 15°. Byl použit SiC brusný kotouč se zrnitostí 80 a o tvrdosti KL. Na závěr se deska nařezala na jednotlivá tělesa o šířce 10 mm.



Obrázek 6.12. – Grade 5 titanová deska vakuově upnutá a připravená na broušení

6.7. Problémy a kompromisy při výrobě

Během výroby nastalo několik komplikací, kterým bylo nutno se přizpůsobit a upravit původní návrh.

První z komplikací nastala, když jsem na soustruhu navrtával díru pro závit do čela jedné z tyčí. Právě, když jsem plánoval navrtávání ukončit a nástroj vytáhnout, praskl a jeho část zůstala v navrtané díře. Po několika pokusech o jeho odstranění různými způsoby jsme se spolu s vedoucím práce rozhodli část součásti, ve které je část navrtáváku, oddělit pomocí pily a vyvrtat novou díru. To znamenalo, že součást (šlo o prostřední část rámu) bude o něco kratší, konkrétně jsme vzali 10 mm. Abychom to vykompenzovali, uřízli jsme z polotovaru, kterého nám zůstalo dost, kus dlouhý 10 mm, vyvrtali přes něj díru, a umístili ho navrch původní součásti.

Další nastala při výrobě spodní desky pro rám. Deska má podle návrhu dvě průchozí díry o průměru 11 mm, které mají rozteč 85 mm a jejich středy jsou vzdáleny od horního a spodního okraje desky o 50 mm (celková šířka je 100 mm). Díry jsem úspěšně vyvrtal a zahloubil, následně jsem však zjistil, že jsou posunuty k jedné hraně téměř o 10 mm, tj. na šířce 100 mm jsou středy děr vzdáleny od jedné hrany 60 mm a od druhé jenom 40 mm. Původ chyby pravděpodobně spočívá v chybném odečtu souřadnic při určování

nuly na frézce před začátkem vrtání. Nicméně funkčnost součásti ani průběh experimentu to neovlivní, konstrukce je i s rámem pořád dostatečně stabilní.

Poslední nežádoucí okolnost nastala při řezání závitu na podkladové zkosené desce pod titan. Spolu s vedoucím práce jsme se pokusili vyřezat závit strojně, nicméně závitník praskl a zůstal v díře. Nezůstávalo než vyvrtat novou díru o 10 mm dál a zkusit znova vyřezat závit, tento krát sadou ručních závitníků (nevydařenou díru je vidět na obrázku 6.11., je to ta úplně nahoře vlevo). To však opět nebude mít nežádoucí vliv na další výrobu nebo průběh experimentu.

Dále bylo potřebné změnit způsob upnutí spodní částí rámu na desku. K této úpravě však došlo až po tom, co byla spodní část rámu vyrobena. Vyvrtali se tedy dvě nové díry do kterých se vyřezali M10 závity, způsobilo to, že dvě průchozí 4,5 mm díry jsou nepoužitelné. Na spodní části rámu je však velké množství dalších děr, takže to průběh ani výsledek experimentu neovlivní.

Kromě toho nastali dvě další komplikace– zlomila se kleština a karbidový vrták. Tyto události však výslednou podobu mých přípravků nijak neovlivnily.

6.8. Výsledek výroby

Výroba proběhla hladce a bez větších problémů. Výše popsané komplikace jsem s pomocí vedoucího práce dokázal vyřešit bez ovlivnění funkčnosti přípravků. Rám, spodní deska na upevnění do stroje LPG i zkušební tělesa jsou hotové a připravené na provedení experimentu.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo formou literární rešerše shromáždit a uspořádat poznatky o lopatkových kolech, moderních omílacích metodách a o slitinách titanu. Tyto informace lze nalézt v prvních třech kapitolách. První kapitola obsahuje popis úlohy lopatkových kol v proudových motorech, dále stručný přehled dokončovací metod používaných při jejich výrobě a popis dokončovací metody využívané strojem LPG.

V druhé kapitole lze nalézt přehled omílacích metod a strojů. Pozornost je věnována oblastem, kde omílání nachází uplatnění a výhodám a nevýhodám této metody.

Třetí kapitola pak obsahuje informace o titanu a jeho slitinách, jejich struktuře, vlastnostech, výrobě a využití.

Předmětem praktické části bylo navrhnout experiment pro provedení vývojových technologických zkoušek na stroji LPG 500/2310, který leští lopatková kola omílací metodou. Ze zkoušek bude možné zjistit dosažitelnou drsnost a vlnitost povrchu, úběr materiálu a vliv omílání na geometrii leštěného tělesa. Byla navržena a vyrobena zkušební tělesa potřebná na provedení experimentu. K tělesům byl navržen a vyroben také rám na jejich uchycení během zkoušek. V příloze lze najít kompletní výkresovou dokumentaci.

Experiment prezentován v této práci pomůže určit parametry lešticí metody používané strojem LPG 500/2310. Příprava, průběh i vyhodnocení experimentu byly navrženy. Zkušební tělesa a další potřebné přípravky jsou kompletně vyrobeny a technologické zkoušky naplánovány na léto 2019 mohou proběhnout. Všechny cíle této práce byly splněny.

Zdroje

- [1] BRAND, Terrance. *Polishing method for turbine components*. Spojené státy americké. WO 2017/218131 A1. Uděleno 17.05.2017. Zapsáno 16.06.2017.
- [2] BASKHARONE, Erian A. *Principles of turbomachinery in air-breathing engines*. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 9780521858106.
- [3] BOYCE, Meherwan P. *Gas turbine engineering handbook*. 3rd ed. Boston: Gulf Professional Pub., c2006. ISBN 0750678461.
- [4] MACH, Pavel. *Možnosti povrchových úprav korozivzdorných ocelí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Martin Zmrzlý.
- [5] KOSMAČ, Alenka. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. 11. svazek. Brusel, Belgie [cit. 2019-07-16]. ISBN 978-2-87997-319-7.
- [6] MÁDL, Jan, Rudolf DVORÁK, Jindřich KAFKA a Martin VRABEC. *Technologie obrábění: 3. díl. 2. přeprac. vydání*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 9788001037522.
- [7] GUO, Jiang a Ka HING AU. Novel rotating-vibrating magnetic abrasive polishing method for doublelayered internal surface finishing. *Science Direct* [online]. Únor 2019, , 422-437 [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013618304217>
- [8] Chemicky urychlené omílání. *Tribotechnika.sk* [online]. [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32010/chemicky-urychlene-omilani.html>
- [9] COUFAL, Martin. *Návrh konstrukce omílacího stroje*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Miloš Synek.
- [10] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [11] Omílání jako univerzální metoda pro úpravu povrchů. *MMSpektrum* [online]. [cit. 2019-07-04]. DOI: 020535. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/omilani-jako-univerzalni-metoda-pro-upravu-povrchu.html>
- [12] *Walther Trowal: Aplikace* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <http://www.trowal.cz/aplikace>
- [13] Practical guide to mass finishing jewelry. *Ganoksin* [online]. [cit. 2019-07-07]. Dostupné z: <https://www.ganoksin.com/article/practical-guide-to-mass-finishing-jewelry>
- [14] SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Řada hutnické literatury.

- [15] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5.
- [16] KLAČKOVÁ, Alena. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Stanislav Věchet.
- [17] LEYENS, Ch., PETERS, M. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, 513 s. ISBN 3-527-30534-3
- [18] NIINOMI, Mitsuo. *Mechanical properties of biomedical titanium alloys* [online]. , 231-236 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150939700806X>
- [19] KINC, Jiří. *Obrábění titanových slitin*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [20] AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.: Příručka obrábění - kniha pro praxe. 1. české vyd. Překlad Miroslav Kudela. Praha: Scientia, 1997, 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6
- [21] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [22] *Mechanické vlastnosti ocelí. TProm* [online]. [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: <http://www.tprom.cz/mechanicke-vlastnosti-oceli>
- [23] *Material Property Data. Matweb* [online]. [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: <http://www.matweb.com>
- [24] Sandvik Coromant. *Titanium application guide* [online]. [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/en-gb/c-2920-35.pdf>
- [25] *Karbidové třídy pro frézování* [online]. [cit. 2019-07-10]. Dostupné z: https://katalog.mav.cz/data/upload/files/31096-karbidove_tridy_pro_frezovani.pdf
- [26] *WNT Mastertool katalog*. WNT, 2016.
- [27] *Kování titanu a jeho slitin*. Technický týdeník [online]. 1.1.2006 [cit. 2019-06-21]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/kovani-titanu-a-jeho-slitin_16624.html