



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ TENKOSTĚNNÉ SOUČÁSTI Z TITANOVÉ SLITINY

MACHINING TECHNOLOGY OF A THINWALL PART FROM TITANIUM ALLOY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Vojtěch Rajm**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**

**BRNO 2023**

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Vojtěch Rajm**  
Studijní program: Strojírenská technologie  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Chladil, CSc.**  
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Technologie obrábění tenkostěnné součásti z titanové slitiny**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Titanové slitiny a deformační procesy v oblasti utváření třísky. Řezné materiály a podmínky pro obrábění titanových slitin. Vliv řezných procesů na vlastnosti povrchových vrstev Ti slitin.

#### **Cíle diplomové práce:**

Studium vlastností titanových slití z hlediska procesů obrábění.  
Napětí a deformace vznikající v řezném procesu.  
Současný stav technologie frézování vyráběné součásti na CNC.  
Řešení deformací po řezném procesu.  
Výsledky experimentální měření a jejich zhodnocení.  
Konečný návrh řešení technologie.

#### **Seznam doporučené literatury:**

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

PTÁČEK, Luděk et al. Nauka o materiálu I. 2. vyd. Brno: CERM, s. r. o., 2003. 516 s. ISBN 80-720-4283-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

V první části této práce byly popsány základní znalosti z obrábění potřebné v dalších částech. Poté byly popsány titanové slitiny, jejich vlastnosti a tepelné zpracování. V další části byla rozebrána problematika obrábění titanových slitin se zaměřením na technologie soustružení a frézování. Na začátku praktické části byla uvedena problematika výroby tenkostěnné součásti z titanové slitiny v praxi, která byla inspirací pro vznik této práce. V experimentální části práce byl zkoumán vliv jednotlivých výrobních operací a parametrů frézování na výslednou rovinnost tenkostěnných plochých vzorků z titanové slitiny Ti6Al4V. Z výsledků byly vyhodnoceny parametry, které měly nejvýraznější vliv na rovinnost a deformaci plochých dílů po frézování a byly uvedeny doporučení týkající se minimalizace deformací při frézování tenkostěnných součástí z titanových slitin.

### Klíčová slova

Frézování titanových slitin, tenkostěnné součásti, deformace při obrábění.

## ABSTRACT

In the first part of this thesis, the basic knowledge of machining required for the subsequent sections was described. Then, titanium alloys, their properties, and heat treatment were described. The next part addressed the issues of machining titanium alloys with a focus on turning and milling technologies. The practical part began with an introduction to the production issues of thin-walled components made of titanium alloy in practice, which served as inspiration for this thesis. In the experimental section of thesis was explored influence of individual manufacturing operations and milling parameters on the surface flatness of thin-walled flat samples made of Ti6Al4V titanium alloy. The results were evaluated to identify the parameters that had the most significant impact on the flatness and deformation of the machined parts, and recommendations were provided regarding the minimization of deformations during milling of thin-walled components from titanium alloys.

### Key words

Milling of titanium alloys, thin-walled components, deformation during machining.

---

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RAJM, Vojtěch. *Technologie obrábění tenkostěnné součásti z titanové slitiny* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145820>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Josef Chladil.

---

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologie obrábění tenkostěnné součásti z titanové slitiny vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

---

V Brně dne 26.5.2023

---

Vojtěch Rajm

---

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu doc. Ing. Josefu Chladilovi, CSc za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále chci poděkovat také společnosti Frentech Aerospace s.r.o. a zejména panu Ing. Petru Osičkovi za vlídný přístup a možnost zpracování diplomové práce na základě problematiky z praxe. Dík patří také panu Jiřímu Čechovi a panu Ing. Radku Kasanovi za pomoc při experimentální části práce. V neposlední řadě chci také velmi poděkovat svojí rodině za podporu během celého studia.

---

**OBSAH**

ÚVOD .....	9
1 DOPROVODNÉ JEVY PŘI TVORBĚ TŘÍSKY A NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY .....	10
1.1 Nástrojové materiály .....	10
1.2 Opotřebení nástrojů .....	13
1.3 Vlastnosti povrchových vrstev .....	15
1.3.1 Vnitřní napětí a jejich měření .....	16
1.4 Řezné prostředí .....	18
2 TITAN A JEHO SLITINY .....	20
2.1 Výroba titanu .....	20
2.2 Slitiny titanu .....	22
2.3 Tepelné zpracování titanových slitin .....	24
3 OBRÁBĚNÍ A OBROBITELNOST TITANOVÝCH SLITIN .....	27
3.1 Soustružení titanových slitin .....	27
3.1.1 Tvorba třísky při soustružení .....	28
3.1.2 Tepelné zatížení nástrojů při soustružení .....	29
3.1.3 Opotřebení nástrojů při soustružení .....	31
3.1.4 Silové zatížení nástrojů při soustružení .....	32
3.1.5 Vnitřní napětí při soustružení .....	34
3.2 Frézování titanových slitin .....	34
3.2.1 Teploty při frézování .....	35
3.2.2 Silové zatížení nástrojů při frézování .....	36
3.2.3 Opotřebení nástrojů při frézování .....	38
3.2.4 Vnitřní napětí při frézování .....	40
3.2.5 Strategie frézování tenkostěnných součástí .....	42
4 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE .....	45
4.1 Postup výroby ve firmě .....	46
4.2 Příprava experimentu .....	49
4.3 Hrubovací operace .....	53
4.4 Tepelné zpracování vzorků .....	57
4.5 Dokončovací operace .....	58
ZÁVĚR .....	62
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	67



## ÚVOD

Vysoké mechanické zatížení, působení agresivního prostředí, nebo nutnost lehké konstrukce, to všechno mohou být důvody, proč se konstruktéři rozhodnou pro volbu titanových slitin. Pod pojmem titan si většina lidí představí velmi pevný a zároveň lehký materiál s celou řadou dalších pozitivních vlastností. Mezi kovy se sice najdou materiály s vyšší pevností, nižší měrnou hmotností, nebo materiály překonávající titanové slitiny jinými vlastnostmi, ale téměř žádný z nich se titanovým slitinám nevyrovná právě neobvyklou kombinací pozitivních konstrukčních vlastností. Mohlo by se proto zdát až s podivem, že takto univerzální materiály nejsou více rozšířeny. Hlavní příčinou, proč se konstruktéři uchylují k výběru titanových slitin pouze v krajních případech, kdy situace v provozu nedovolí výběr jiného materiálu, je bezesporu vysoká cena titanu.

Zatímco z konstrukčního pohledu jsou materiály na bázi titanu vyzdvihovány díky své univerzálnosti, z technologického pohledu se naopak jedná o velmi problematickou skupinu materiálů, a to jak z hlediska výroby, tak i dalšího zpracování. Potíže spojené s obráběním součástí z titanových slitin mohou u některých výrobců vzbuzovat až přílišný respekt a obavy z komplikací v průběhu výroby. Titan má přitom svoje specifické vlastnosti stejně jako jakýkoliv jiný materiál a je nutné k němu přistupovat individuálně. Pokud se ale dostatečně seznámíme s dosavadními poznatky a problematikou obrábění titanových slitin a pochopíme jejich působení během výrobního procesu, není se v běžné praxi čeho obávat.

Technický pokrok byl v celé historii lidstva z velké části založen na překonávání výzev v podobě vývoje a zpracování nových materiálů, zefektivňování a zpřesňování výroby. Právě titanové slitiny představovaly a nadále stále představují velkou výzvu i do budoucna. Pokud se této výzvy nezalekneme a nadále budeme zdokonalovat stávající výrobní procesy a vyvíjet nové, mohli bychom efektivněji využít potenciál slitin titanu a díky tomu posouvat technický pokrok opět dál.

Co se týče problematiky obrábění titanových slitin, nejčastěji zmiňovaným tématem je intenzivní opotřebení nástrojů. Tato práce ale vznikla na základě jiného reálného problému z praxe, a tím je deformace tvaru při obrábění tenkostěnné součásti, viz obr. 1.



Obr. 1 Problematická součást z titanové slitiny.

# 1 DOPROVODNÉ JEVY PŘI TVORBĚ TŘÍSKY A NÁSTROJOVÉ MATERIÁLY

Technologie obrábění v sobě zahrnuje výrobní metody, při kterých dochází k vytváření nových povrchů na obrobku odebráním částic materiálů obvykle mechanickým, elektrickým nebo chemickým působením na materiál. Tato práce se bude detailněji zabývat technologiemi soustružení a frézování, při kterých dochází k odebrání částic materiálu obrobku ve tvaru třísky pomocí bříty rezného nástroje. [1]

Při rezném procesu dochází vlivem působící síly k vnikání bříty nástroje do materiálu obrobku. Při tom se před a pod břitem koncentrují mechanická napětí, která z počátku obráběný materiál elasticky a plasticky deformují. Míra plastické deformace postupně narůstá a před břitem nástroje dochází k pěchování a k posuvu vrstev materiálu v rovinách kluzu. Při dalším postupném pohybu bříty dochází k nárůstu napětí až do té míry, že dojde k překročení meze pevnosti ve smyku obráběného materiálu a v rovině stříhu se oddělí tříška od obrobku, viz obr. 2. Takovýto průběh rezného procesu je typický pro krystalické materiály, mezi které patří především kovy. U nekrystalických materiálů (dřevo, plasty, sklo) je ale tříška oddělována křehkým lomem nebo štěpením a není plasticky deformována. [1; 2; 3]



Obr. 2 Proces řezání [1].

## 1.1 Nástrojové materiály

V dnešní době existuje pestrá škála různých typů nástrojových materiálů a další vývoj stále pokračuje. Hlavní snahou při vývoji je zvyšování produktivity a životnosti nástrojů. Stěžejními charakteristikami u materiálů používaných pro výrobu rezných nástrojů je tvrdost, která ovlivňuje zejména dosažitelnou reznou rychlost a houževnatost, která se obvykle vyjadřuje mezi pevností v ohybu. V ideálním případě by měl být rezný materiál velmi tvrdý a zároveň velmi houževnatý. Toho ale není v praxi snadné dosáhnout a obecně se ukazuje, že s rostoucí tvrdostí klesá houževnatost a analogicky s rostoucí houževnatostí klesá tvrdost. Do určité míry může být řešením nanášení tvrdých, velmi tenkých povlaků na houževnatější nástroje. Tím docílíme houževnatého jádra a současně tvrdého povrchu, který zajistí možnost zvýšení rezných rychlostí, případně trvanlivosti nástroje a tím i zvýšení produktivity výroby. Žádný nástrojový materiál není univerzální a musí se volit s ohledem na obráběný materiál, produktivitu výroby a cenu. U některých kombinací obráběného a rezného materiálu může být negativním faktorem také vysoká chemická afinita mezi nimi, kdy dochází k intenzivnímu opotřebení nástroje i přes jinak mechanicky vhodné vlastnosti. [1, 2]

Nejvíce používanou skupinou nástrojových materiálů jsou v dnešní době slinuté karbidy (SK). Jejich vznik a vývoj byl historicky vázán na zjištění, že nejvyšší vliv na řezivost rychlorezných ocelí má přítomnost malých, velmi tvrdých karbidických částic legujících prvků v matici,

a nikoliv matrice sama o sobě. Proto byla snaha vyvinout materiál tvořený z větší části malými částicemi tvrdých karbidů pospojovaných pouze malým množstvím pojícího kovového materiálu. Tohoto cíle však nešlo dosáhnout klasickou metalurgií a k výraznému postupu došlo až s vývojem práškové metalurgie. Princip této technologie spočívá v lisování směsi prášků rozemletých karbidů (nejčastěji WC, TiC, TaC) a pojícího kovu (většinou Co) ve formě při teplotách dosahujících bodu tavení pojiva. Výsledným produktem je kompaktní materiál buď ve formě vyměnitelných břitových destiček (VBD), nebo monolitních nástrojů s velmi vysokou tvrdostí blízkou tvrdosti karbidických částic a poměrně dobrou houževnatostí zabezpečenou kovovým pojivem. V tab.1 jsou uvedeny orientační hodnoty tvrdosti běžně užívaných karbidů a jejich teploty tavení. [1; 2; 4]

Tab. 1 Vlastnosti karbidů [1].

Typ karbidu	Teplota tavení [°C]	Tvrdost [HV]
TiC	3200	3000
TaC	3900	1800
WC	2750	2100

Slinuté karbidy se dělí do skupin a podskupin označovaných písmenem, číslem a barvou podle množství obsažených karbidů, množství pojícího kovu a vhodného typu obráběných materiálů, viz tab. 2. Číslo v označení vyjadřuje množství pojícího kovu ve slinutém karbidu – s rostoucím číselným označením roste množství pojiva, zvyšuje se houževnatost a mez pevnosti v ohybu, což umožňuje použití vyšších posuvových rychlostí. Na druhou stranu se ale snižuje tvrdost a otěruvzdornost a je nutné tomuto faktu přizpůsobit a volit nižší řezné rychlosti. [1; 2; 4]

Tab. 2 Skupiny slinutých karbidů podle normy ČSN ISO 513.

Skupiny použití			Podskupiny použití	
Identifikační písmeno	Identifikační barva	Obráběný materiál	Tvrdé řezné materiály	
<b>P</b>	<b>modrá</b>	Ocel: všechny druhy oceli a lité oceli, vyjma korozivzdorné oceli s austenitickou strukturou	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45
<b>M</b>	<b>žlutá</b>	Korozivzdorné oceli: korozivzdorná austenitická a austenitiko/feritická ocel a litá ocel	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35
<b>K</b>	<b>červená</b>	Litina: šedá litina, tvárná litina, temperovaná litina	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35
<b>N</b>	<b>zelená</b>	Neželezné kovy: hliník a ostatní neželezné kovy, nekovové materiály	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25
<b>S</b>	<b>hnědá</b>	Superslitiny a titan: žáruvzdorné speciální slitiny na základě železa, niklu a kobaltu, titanu a titanové slitiny	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25
<b>H</b>	<b>šedá</b>	Tvrdé materiály: kalená ocel, kalené litinové materiály, tvrzená litina	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25

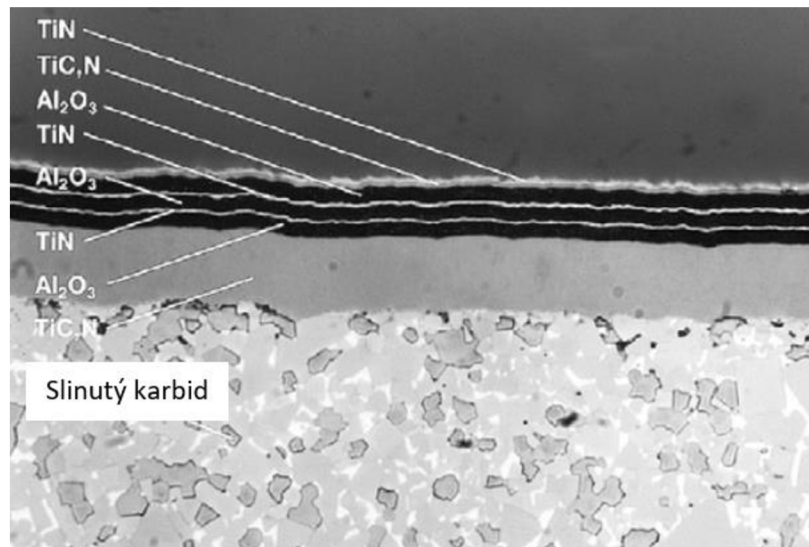
Cermety se zakládají na podobném principu jako slinuté karbidy. Základem jsou tvrdé karbidické nebo nitridické částice pospojované pojivovým kovem. Hlavní rozdíl je v chemickém složení, kdy u cermetů je WC nahrazen především částicemi TiC, TiN a jako pojivo nejčastěji slouží nikl. Cermety se oproti slinutým karbidům vyznačují mírně nižší houževnatostí a vyšší tvrdostí a trvanlivostí nástrojů, což je předurčuje k obrábění vyššími reznými rychlostmi. [1; 2; 4]

Řezná keramika je obecně polykrystalický materiál složený z anorganických sloučenin nekovového charakteru. Podle chemického složení se řezná keramika rozděluje do dvou hlavních skupin, a to jako keramika oxidická a keramika nitridová (neoxidická). Oxidická keramika se dále dělí do skupin: a) čistá keramika – složená z krystalů  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , b) polosměsná keramika – kromě oxidu hlinitého obsahuje další oxidické částice jako např.  $\text{ZrO}_2$  a  $\text{CoO}$ , c) směsná keramika – kromě oxidických částic obsahuje také částice karbidů a nitridů (TiC, TiN). Nitridová keramika ve struktuře obsahuje převážně nitridické částice jako např.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , TiN. Hlavními výhodami řezné keramiky jsou její vysoká tvrdost, vysoká teplotní stabilita (vyšší než u slinutých karbidů) a odolnost proti opotřebením. Díky tomu je možné při soustružení používat nástroje s VBD z řezné keramiky pro výrazně vyšší rezné rychlosti než v případě slinutých karbidů. Keramické materiály jsou ale velice křehké, a proto je snazší zvyšovat jejich houževnatost vyztužováním vláknou (tzv. whiskery) z SiC nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . [1; 2; 4]

Skupina supertvrdých nástrojových materiálů v sobě zahrnuje uměle polykrystalický diamant (PD) a polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). Tyto materiály se vyznačují velkou pevností v tlaku a především extrémně velkou tvrdostí (orientačně PD okolo 7000–10000 HV a PKNB 5000–8000 HV). PD se vyrábí synteticky zahřátím čistého grafitu na teploty nad 1500 °C a působením vysokého tlaku okolo 5–8 GPa a výrobci ho dodávají ve formě malých břitů, které se připevní na VBD ze slinutého karbidu, případně se dá polykrystalický diamant použít pro povlakování VBD. Hlavní nevýhodou PD je malá nízká teplotní stabilita. Při teplotách nad 800 °C se diamant mění na grafit a teplota v řezu by neměla přesahovat ani hranici 600 °C kvůli intenzivní difuzi a opotřebením nástroje. Z těchto důvodů je polykrystalický diamant prakticky nepoužitelný pro produktivní obrábění ocelí a litin. Svoje uplatnění však najde zejména při obrábění mosazí, bronzů, kompozitních materiálů a hliníkových slitin velmi vysokými reznými rychlostmi. [1; 2; 4]

PKNB se vyrábí obdobným způsobem, při kterém za vysokých teplot stlačuje nitrid boru pod vysokým tlakem. Pro obrábění se většinou používá buď ve formě velmi tvrdého a tenkého povlaku na destičkách ze slinutých karbidů, případně ve formě špičky, která se připájí na destičku ze slinutého karbidu. PKNB sice nemá tak vysokou tvrdost jako diamant, ale má mnohem vyšší teplotní stabilitu (až do teplot okolo 1500 °C). Typickou oblastí uplatnění tohoto řezného materiálu je obrábění tvrdých kovových materiálů, speciálně kalených ocelí. [1; 2; 4]

Pro zvýšení produktivity obrábění a prodloužení trvanlivosti nástrojů se často na nástroje nanáší velmi tenká a tvrdá vrstva materiálu, která neobsahuje žádné pojivo. Povlakovat se dají jak monolitní nástroje ze SK, tak VBD z různých materiálů. V dnešní době se na nástroje nanáší povlaky z různých materiálů v několika vrstvách, viz obr. 3. Nejčastěji se pro povlakování používají karbidy, nitridy a karbonitridy titanu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo TiAlN. Základními metodami povlakování jsou: CVD (Chemical Vapour Deposition – chemické napařování z plynné fáze) a PVD (Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování). Tyto technologie se dále vyvíjejí a nové trendy jsou zejména ve snižování pracovních teplot CVD povlakování, které se u obvykle pohybují okolo 900–1200 °C v závislosti na nanášeném materiálu. [1; 2; 4]

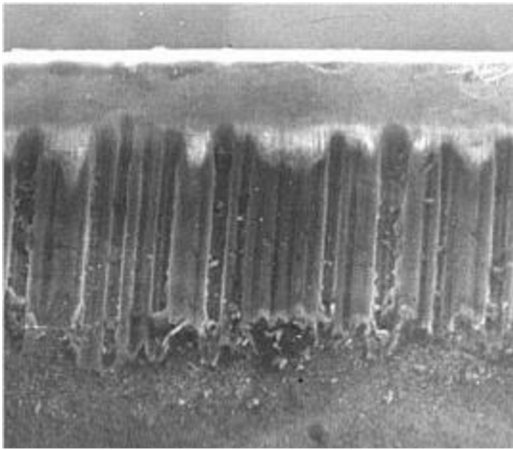


Obr. 3 Vícevrstvý povlak nástroje Kennametal [1].

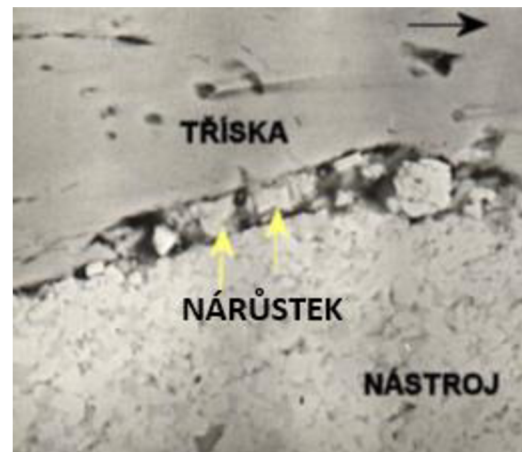
## 1.2 Opatření nástrojů

Během procesu obrábění vlivem vzájemného pohybu a kontaktu mezi nástrojem, obrobkem a třískou dochází k postupným změnám tvaru a kvality pracovních ploch řezného nástroje. Zhoršuje se drsnost stykových oblastí břitu s třískou a obráběnou plochou, mění se geometrie břitu a dochází ke zvyšování poloměru ostří – tedy k otupování břitu. Tyto pochody jsou souhrnně označovány jako opotřebení nástroje. Změny geometrie a kvality povrchu břitu způsobují horší kvalitu obrobených ploch, nepřesnosti rozměrů a také větší silové zatížení nástroje a tím i zvýšenou energetickou náročnost obrábění. Proto je nutné v čase sledovat opotřebení nástroje podle určitých kritérií a při dosažení hraničního stavu jeho únosnosti je nutné nástroj vyměnit. Na opotřebení má vliv mnoho faktorů, zejména se jedná o mechanické a chemické vlastnosti řezného i obráběného materiálu, metodu obrábění, geometrii nástroje, řezné podmínky a prostředí. K opotřebení nástroje nejčastěji dochází otěrem, plastickou deformací, nebo lomem nástrojového materiálu. Podle základních mechanismů se opotřebení otěrem dále dělí do skupin: [1; 2; 3; 4]

- Abrazivní opotřebení – při obrábění dochází vlivem působení tvrdých mikročástic materiálu obrobku, třísky i částic uvolněných z nástroje k postupnému obroušování částic nástroje s menší tvrdostí. Obecně platí, že tomuto typu opotřebení lépe odolávají nástrojové materiály s vyšší tvrdostí za zvýšených teplot. Nástroj opotřebovaný abrazivním mechanismem jde vidět na obr. 4.
- Adhezní opotřebení – při obrábění dochází vlivem tření třísky po čele nástroje k zahřívání a k působení vysokých měrných tlaků, což má za následek vznik lokálních spojů (mikrosvarů) v oblastech nerovností styčných ploch třísky a čela nástroje. Částice obou materiálů jsou spolu spojeny do doby, než smykové napětí vznikající tokem třísky dosáhne meze pevnosti ve smyku jednoho z materiálů. Častější variantou je případ, kdy má řezný materiál vyšší mez pevnosti ve smyku a v tom případě dojde k ulpívání částí třísky na čele nástroje. Takto přivařený materiál třísky na nástroji se nazývá nárůstek, viz obr. 5. Ten sice určitou chvíli chrání malou oblast nástroje před působením třísky, ale vlivem velkého silového i tepelného zatížení po čase zpravidla dojde k jeho odlomení z nástroje společně s částí břitu, čímž opět dochází k vydrolování nástrojového materiálu. Dalším negativním faktorem nárůstku je lokální změna geometrie nástroje pojící se s horší kvalitou obrobeného povrchu. K adheznímu opotřebení většinou dochází, pokud jsou si materiál obrobku a nástroje chemicky podobné. Částečně se dá eliminovat zvýšenou řeznou rychlostí, volbou pozitivní geometrie nástroje a vhodným řezným prostředím.



Obr. 4 Abrasivní opotřebení [1].



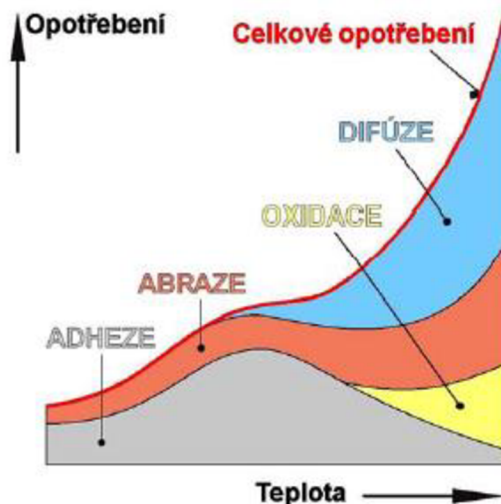
Obr. 5 Nárůstek a působení třísky [1].

- Difuzní opotřebení – vlivem vysokých teplot a měrných tlaků při obrábění dochází k intenzivnímu přenosu (difuzi) atomů mezi nástrojem a obráběným materiálem v obou směrech. Intenzita difuze závisí zejména na chemických vlastnostech obou materiálů. Rychlost difuze a objem difundovaného materiálu se umocňuje se zvyšující se schopnosti prvků obou materiálů vzájemně spolu tvořit tuhé roztoky a chemické sloučeniny (tzv. chemická afinita). Postupnou difuzí atomů z nástrojového materiálu do obrobku a do třísky dochází k narušování krystalické mřížky povrchové vrstvy nástroje. V takto poškozené oblasti má nástroj horší mechanické vlastnosti a je náchylnější k dalšímu otěru. Fyzikální vlastnosti obrobku ani nástroje v případě tohoto mechanismu opotřebení nehrají téměř žádnou roli.
- Oxidační opotřebení – obráběním dochází při vysokých teplotách a v přítomnosti vzdušné atmosféry k oxidaci povrchové vrstvy materiálu nástroje. V případě vzniku křehké oxidické vrstvy, která má malou přilnavost ke zbytku materiálu, dochází k jejímu narušování a k vylamování částic povrchu nástroje. Vylomené částice navíc bývají tvrdé a dále napomáhají k abrasivnímu otěru.

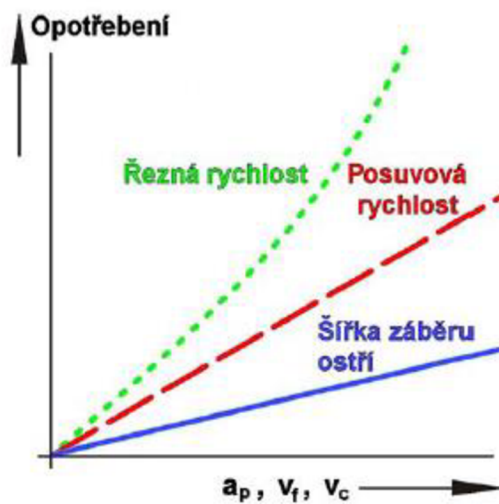
Obvykle nedochází k uplatnění pouze jednotlivých mechanismů opotřebení, ale k jejich současnému působení. Orientační vliv jednotlivých mechanismů na míru celkového opotřebení nástroje v závislosti na teplotě v oblasti řezu je znázorněn na obr. 6. Vliv řezných podmínek na opotřebení nástroje je znázorněn na obr. 7. Je patrné, že nejvýrazněji je opotřebení ovlivněno řeznou rychlostí, což souvisí s tím, že tento parametr má oproti ostatním řezným podmínkám větší vliv také na teplotu v oblasti řezu. [1; 2]

Opotřebení plastickou deformací nastává při příliš vysokém tepelném a silovém zatížení nástroje, kdy dochází k výraznému zhoršení jeho mechanických vlastností a překročení meze kluzu materiálu. Pro eliminaci tohoto typu opotřebení je vhodné snížit řeznou nebo posuvovou rychlost, zvýšit intenzitu chlazení, nebo použít řezný materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi. [1; 2; 3]

Opotřebení křehkým lomem obvykle vzniká vlivem působení proměnlivého mechanického a tepelného zatížení nástroje při přerušovaném řezu. Tento typ opotřebení podporují také tvrdé vměstky v obrobku a nehomogenity v nástroji. Porušení nástroje křehkým lomem se dá přecházet volbou nižších řezných podmínek, použitím nástroje z houževnatějšího materiálu, nebo změnou geometrie nástroje. [1; 2; 3]

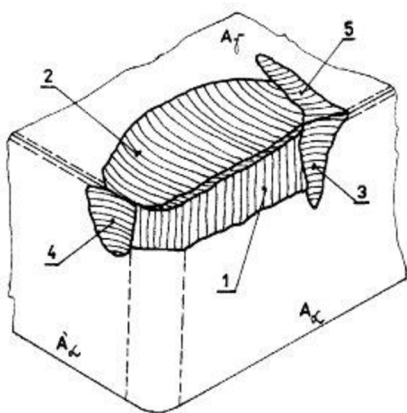


Obr. 6 Vliv teploty na opotřebení [1].

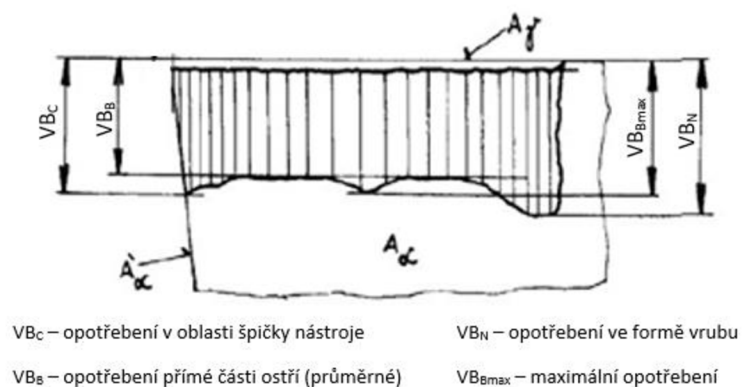


Obr. 7 Vliv řezných podmínek na opotřebení [1].

Formy opotřebení nástroje ze slinutého karbidu jsou znázorněny na obr. 8, kde  $A_\gamma$  je čelo nástroje,  $A_\alpha$  je hlavní hřbet a  $A'_\alpha$  je hřbet vedlejší. Jednotlivé formy opotřebení jsou označeny čísly: 1 – opotřebení na hřbetě, 2 – výmol na čele, 3 – primární hřbetní rýha, 4 – sekundární (oxidační) hřbetní rýha, 5 – rýha na čele. Míra opotřebení nástroje je posuzována pomocí kritérií, která jsou předepsána normou ČSN ISO 3685. Jedním z nejběžněji užívaných kritérií je šířka opotřebení na hřbetě, označována jako VB. Její měřené parametry jsou znázorněny na obr. 9. [1; 4]



Obr. 8 Formy opotřebení [9].



Obr. 9 Parametry opotřebení na hřbetu nástroje [9].

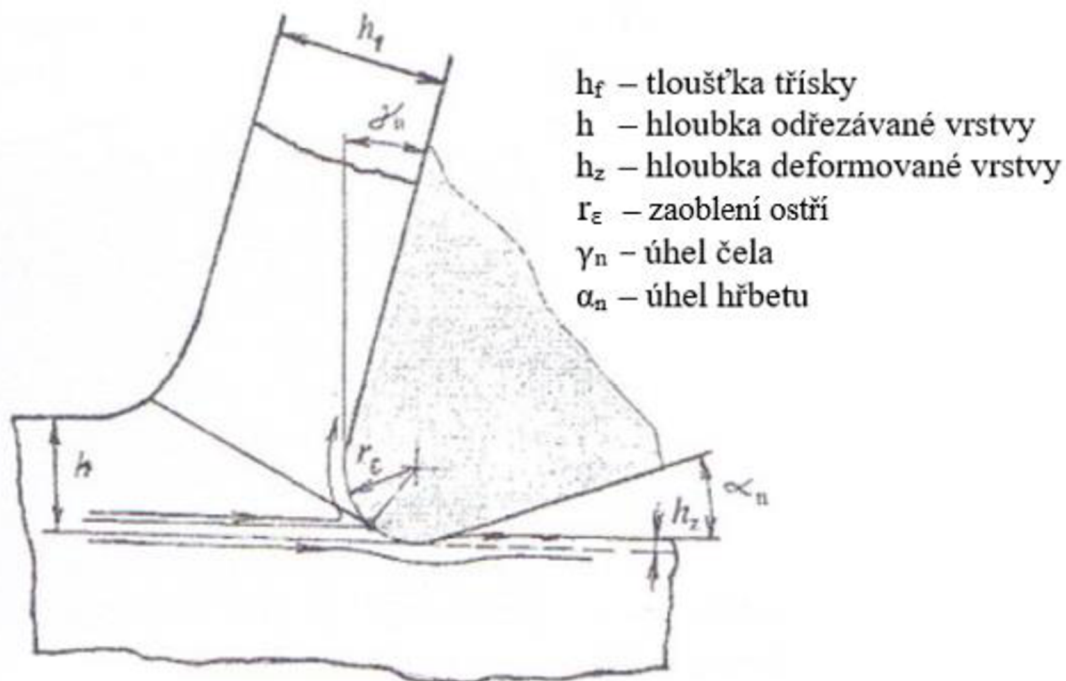
Výběr konkrétního kritéria opotřebení a jeho maximální přípustné hodnoty (pro VB orientačně 0,2-0,8 mm) je volen s ohledem na požadované rozměry a kvalitu povrchu obrobku. S tím souvisí pojem trvanlivost nástroje, který vyjadřuje čistý čas řezání od začátku obrábění až po opotřebení břitu do míry maximálního přípustného opotřebení. Po uplynutí trvanlivosti je nutné nástroj buď vyměnit, nebo přeastřit. [1; 4]

### 1.3 Vlastnosti povrchových vrstev

V důsledku působení řezného nástroje na obráběný materiál je povrchová vrstva obrobku ovlivněna řadou fyzikálních a chemických procesů, které způsobují změny mechanických vlastností, vznik zbytkových napětí, strukturní transformace a další procesy. Takovéto změny v povrchových vrstvách materiálu vyvolané obráběním mohou vést

k deformacím obrobků a mohou ovlivnit jejich funkčnost a životnost. To může být problém obzvláště u součástí z titanových slitin, které jsou běžně využívány při náročných zatěžovacích podmínkách. Nežádoucí jsou zejména vysoká tahová napětí v povrchové vrstvě, která výrazně snižují odolnost proti únavě. Pro omezení snižování kvality povrchu je velmi důležité určit vhodné kritériální opotřebení nástroje, při jehož dosažení je nutné nástroj vyměnit. Pokud by se tak nestalo, docházelo by k intenzivnějšímu zpevňování materiálu v povrchových vrstvách obrobených ploch, současně by se navyšovaly řezné síly a teplota v oblasti řezu, čímž by docházelo k intenzivnějšímu ovlivňování kvality povrchu. [1; 5; 6; 7]

Při obrábění je kromě odřezávané vrstvy materiálu deformována také povrchová vrstva obrobené plochy. Tento jev je způsoben zejména geometrií nástroje. V praxi totiž není ostří nástroje nikdy tvořeno přímkou, ale částí válcové plochy s obvyklým poloměrem zaoblení 5-20  $\mu\text{m}$ , viz obr. 10. Hřbet nástroje proto silově působí na obrobenou plochu, čímž v ní vyvolává mechanické napětí a dochází tak i k plastickým deformacím. Jelikož tyto deformace vznikají zpravidla při teplotách nižších, než je teplota rekystalizace, dochází tak k deformačnímu zpevnění povrchové vrstvy obrobené plochy. [1; 3; 5]



Obr. 10 Deformace povrchové vrstvy vzniklá zaoblením ostří nástroje [5].

### 1.3.1 Vnitřní napětí a jejich měření

Vnitřní nebo také zbytková napětí zůstávají v materiálu i po odstranění příčiny jejich vzniku. Hlavní příčinou jejich vzniku při obrábění je nerovnoměrná plastická deformace a teplotní roztažnost obráběného materiálu. Kromě toho ale ke vzniku zbytkových napětí při výrobním procesu vedou také strukturní změny vyvolané tepelným zpracováním a vysokými teplotami při obrábění, nebo chemické procesy, při kterých dochází ke vzniku chemických sloučenin s rozdílnými vlastnostmi oproti původnímu materiálu. Podle podmínek během obrábění můžeme podstatu vzniku vnitřních napětí a jejich charakter v povrchových vrstvách obrobené plochy rozdělit do dvou základních skupin, viz obr. 11: [1; 3; 5]

- V prvním případě je během obrábění obrobená plocha vystavena vysokému mechanickému zatížení při nízkých teplotách, tenká povrchová vrstva se plasticky deformuje a vrstvy pod ní jsou deformovány pouze elasticky. Po obrobení přestane působit zatížení a pružně



deformované vrstvy mají tendenci vrátit se do původního stavu, čímž působí tlakem na vrchní, plasticky deformovanou vrstvu. Ve výsledku tedy v povrchové vrstvě vzniká tlakové vnitřní napětí a ve spodních vrstvách tahové napětí. Tento stav je typický pro obrábění materiálů s vysokou pevností, při nižších řezných podmínkách, během kterých je obráběný povrch vystaven vysokému silovému zatížení a relativně nízkým teplotám.

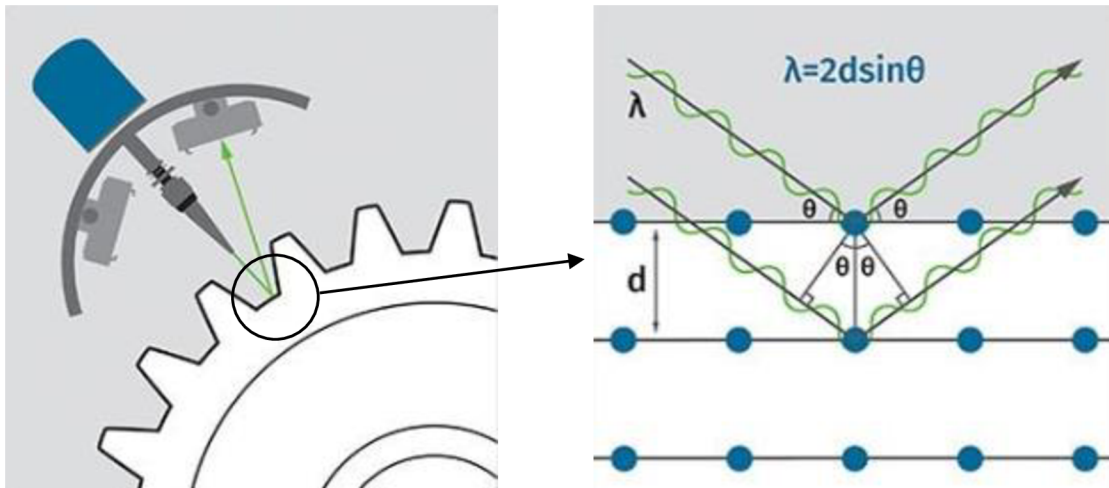
- Ve druhém případě kromě vysokého mechanického zatížení povrchové vrstvy, způsobujícího její plastickou deformaci, dochází také k vysokému tepelnému zatížení obrobenej plochy. Po obrobení má povrchová, plasticky deformovaná vrstva během ochlazování tendenci zmenšovat svůj objem, čemuž zabraňují spodní chladnější vrstvy materiálu. V povrchové vrstvě proto vznikne negativní tahové vnitřní napětí a ve spodních vrstvách tlakové napětí. Takovéto rozložení zbytkových napětí je typické pro obrábění vysokou řeznou rychlostí.



Obr. 11 Působení vnitřních napětí.

Měření zbytkových napětí se provádí nepřímými metodami, tedy takovými při kterých jsou měřeny jiné parametry (např. změna elastické deformace), ze kterých jsou hodnoty vnitřního napětí vypočteny. Metody měření zbytkových napětí se dělí podle různých kritérií, nejobecnější je ale dělení podle vlivu na měřenou součást do skupin: [5; 8]

- Destruktivní – při měření dochází ke zničení součásti. Do této skupiny patří většina mechanických metod, které jsou založeny na principu měření deformací během odstraňování vrstev materiálu. Mezi tyto zkoušky se dá zahrnout také měření mikrotvrdosti, pomocí kterého je možné zjistit hloubku a míru zpevnění materiálu.
- Polodestruktivní – zkoušky se provádí v oblasti materiálu, který byl na součást záměrně přidán pro měření a po ukončení zkoušky dojde k jeho odstranění. Do této skupiny zkoušek se řadí například vyvrtávací metoda, při které je na povrchu součásti vyvrtán malý otvor, čímž dojde k uvolnění části vnitřního napětí a tím také ke změně deformace. Ta se měří pomocí tenzometrické růžice, která je složena obvykle ze tří tenzometrů a otvor je vyvrtán do průsečíku jejich os. Vrtání otvoru je prováděno postupně po krocích a při každém kroku se měří deformace. Tímto způsobem je možné zjistit velikost vnitřních napětí v různých vzdálenostech pod povrchem materiálu.
- Nedestruktivní – u této skupiny nedochází k žádnému poškození měřené součásti a nejsou nutné ani žádné úpravy pro měření. Většina těchto metod je založena na fyzikálních jevech, jako je například rentgenová difrakce. Při využití tohoto jevu se určuje deformace krystalové mřížky materiálu vlivem působícího vnitřního napětí na základě úhlu odraženého rentgenového paprsku, viz obr. 12. Z naměřené deformace se poté určí velikosti napětí přepočtem podle vztahů elasticity. Protože se tímto způsobem dají měřit pouze velmi tenké vrstvy materiálu (1-10 $\mu$ m), je nutné pro zjišťování napětí v hlubších vrstvách odstranit velmi malé množství materiálu z horních vrstev. K této operaci se ideálně používají elektrochemické metody úběru materiálu, které neovlivňují vnitřní napětí. Mezi nedestruktivní zkoušky se řadí také například metody zakládající se na magnetické indukci, které se ale dají použít pouze pro feromagnetické materiály. [5; 8]



Obr. 12 Měření zbytkových napětí s využitím rentgenové difrakce [8].

## 1.4 Řezné prostředí

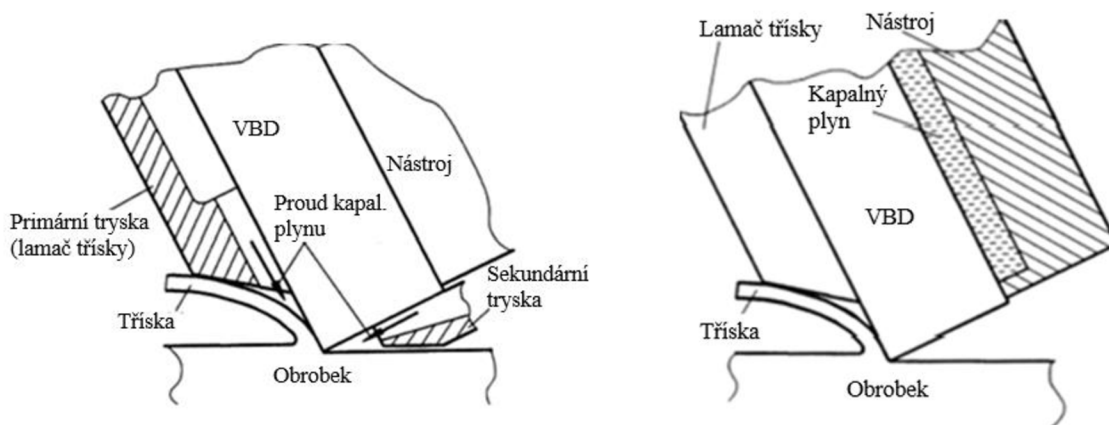
Jednou z možností, jak při procesu obrábění eliminovat negativní jevy, je vytvoření vhodného řezného prostředí. Toho se docílí aplikací řezného (procesního) média do oblasti řezu. Jako procesní médium nejčastěji slouží kapaliny, ale používají se také plyny, mlhy a pasty. Mezi hlavní funkce těchto látek patří intenzivní odvod tepla, mazání pro snížení tření mezi materiálem obrobku a nástrojem a často také odstraňování třísek z oblasti řezu. Zároveň by řezná média měla být provozně stálá (vlastnosti média by měly vydržet dlouho beze změny), zdravotně nezávadná a neměla by agresivně působit na materiál obrobku. [1; 7]

V běžné praxi jsou nejčastěji užívaným médiem řezné kapaliny. Podle složení se dělí na vodné roztoky, emulzní kapaliny, řezné oleje (masné, zušlechtěné, rostlinné), syntetické a polosyntetické kapaliny. Jednotlivé typy kapalných médií se kromě složení liší také svým chladícím a mazacím účinkem. Nejvíce rozšířeným typem procesních kapalin jsou řezné emulze. Emulzní kapaliny tvoří disperzní směs dvou vzájemně nerozpustných kapalin (obvykle olej ve vodě) a k nim je přidáván tzv. emulgátor, což je látka, která snižuje povrchové napětí mezi hlavními složkami emulze a zabraňuje koagulaci, čímž dochází k zachování rozptýlení velkého množství malých částic oleje ve vodě. Chladící a mazací účinek závisí na koncentraci emulze – s rostoucí koncentrací klesá její chladící účinek. Pro frézování je nutné používat řezné kapaliny s dostatečně dobrým chladícím i mazacím účinkem. Doporučuje se použití emulzních kapalin s koncentrací 5-10%, polosyntetických řezných kapalin s koncentrací 8-12% a syntetických kapalin s koncentrací 3-4%. Pro dosažení intenzivnějšího odvodu tepla při obrábění titanových slitin se ve snaze zvýšení životnosti nástrojů často přivádí řezná kapalina pod vysokým tlakem okolo 3-10 MPa tryskou přímo na rozhraní mezi čelem nástroje a třískou. [1; 7; 9]

Kromě klasického zaplavovacího chlazení, při kterém se procesní kapalina přivádí proudem do oblasti řezu, se v některých případech používá metoda minimálního množství maziva označovaná jako MQL (minimum quantity lubrication). Tento způsob chlazení spočívá v přívodu proudu stlačeného vzduchu, ve kterém jsou rozprášeny kapky řezné emulze, nebo čistého oleje do místa řezu. Mazivo se v tomto případě lépe dostane do rozhraní mezi nástrojem a odcházející třískou i mezi nástrojem a materiálem obrobku, čímž dochází ke snížení tření a tím i ke snížení teplot. Hlavní chladící účinek má proud vzduchu, ale určité množství tepla je odváděno také procesem odpařování kapek maziva. Hlavní výhodou této metody spočívá zejména ve výrazném snížení průtoku procesních kapalin, díky čemuž dojde k značnému snížení nákladů spojených jak s nižším množstvím kapalin, tak s nižší energetickou náročností

čerpání a filtrace kapalin. Navíc je tento způsob chlazení také šetrnější k životnímu prostředí, což je v dnešní době velmi důležité. Pro běžné obrábění titanových slitin se tato metoda příliš nepoužívá kvůli méně intenzivnímu odvodu tepla. Využití najde zejména při obrábění vysokými řeznými rychlostmi, kde se v některých případech od klasických procesních kapalin upouští. [7; 10]

Vhodným řezným prostředím pro obrábění titanových slitin mohou být také silně stlačené, zkapalněné plyny (nejčastěji dusík, nebo  $\text{CO}_2$ ), které dosahují velmi nízkých teplot a mají intenzivní chladicí účinek. Zkapalněné plyny po přivedení do oblasti řezu expandují, přijímají teplo od okolí a vypařují se do okolní atmosféry. Dále tedy necirkulují v oběhu jako běžné řezné kapaliny a díky tomu odpadají náklady na jejich likvidaci. Zejména v případě dusíku se proto jedná o vhodnou volbu z pohledu ekologie. Na druhou stranu je ale v tomto případě nutné pro snížení nákladů minimalizovat průtok řezného média a zefektivnit jeho přívod do oblasti řezu. Z tohoto důvodu se konstruuje řezné nástroje speciálně pro přívod zkapalněných plynů, které mají malé trysky umístěné v minimální vzdálenosti od břitu nástroje, viz obr 13. Trysky mohou být směřovány jak na čelo, tak na hřbet nástroje, ale nejefektivnějšího chladicího účinku je dosahováno přívodem řezného média na čelo i hřbet současně. V tomto případě je chladicí efekt výrazně vyšší v porovnání s přívodem běžných procesních kapalin. Další konstrukční variantou jsou nástroje, ve kterých je médium použito pouze k ochlazení zadní strany VBD a do oblasti řezu se nedostane, viz obr 14. Pro tento způsob chlazení je nutné použít VBD s dobrou tepelnou vodivostí, aby bylo možné efektivně odvádět teplo z oblasti řezu. Obvykle však bývá intenzita chlazení u tohoto konstrukčního typu nástrojů horší než v případě přívodu běžných řezných kapalin přímo do oblasti řezu. Může se ale jednat o vhodný kompromis mezi suchým a intenzivně chlazeným obráběním jak z pohledu nákladů, tak z pohledu ekologie. Kromě přímého chlazení nástrojů se dá kapalným dusíkem (případně  $\text{CO}_2$ ) použít také na předchlazení polotovaru. V tomto případě chladicí médium ochlazuje určitou oblast obráběného materiálu v malé vzdálenosti před břitem nástroje, díky čemuž dochází ke snížení teplot v místě řezu a tím i ke zvyšování trvanlivosti nástroje. [10; 11]



Obr. 13 Chlazení řezné oblasti kapalným plynem [19]. Obr. 14 Chlazení VBD kapalným plynem [19].

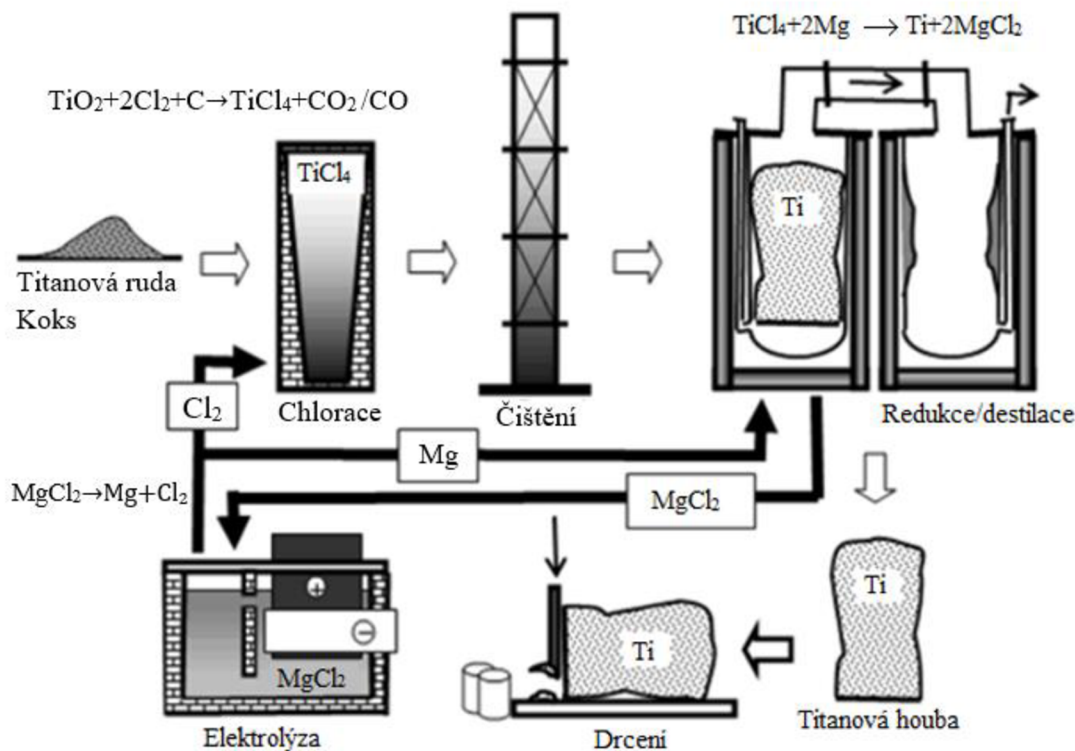
## 2 TITAN A JEHO SLITINY

Titan je lehký, polymorfní kov s hustotou  $4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a teplotou tavení  $1665 \text{ }^\circ\text{C}$ . Čistý titan se vyskytuje ve dvou alotropických modifikacích označovaných jako  $\alpha$  a  $\beta$ . Nízkoteplotní modifikace  $\alpha$  má hexagonální krystalovou mřížku stabilní do teploty  $883 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při vyšších teplotách titan překrystalizuje na modifikace  $\beta$  s kubickou prostorově středěnou mřížkou. Velkou výhodou titanu kromě malé hustoty je také schopnost pasivace, tzn. že se povrch pokryje tenkou vrstvou  $\text{TiO}_2$  a díky tomu je odolný proti korozi ve vlhkých i ve většině kyselých prostředích, a to i za zvýšených teplot. Tato odolnost proti korozi je dokonce vyšší než v případě většiny korozivzdorných ocelí. Další výhodnou vlastností titanu, díky které má velký význam v oblasti lékařství, je jeho dobrá biokompatibilita s tkáněmi lidského těla. [12; 13]

Titan má ale samozřejmě také nežádoucí vlastnosti a ty se projevují zejména při jeho výrobě a dále pak při zpracování. Negativní vlastností ovlivňující náročnost výroby čistého titanu je vysoká afinita ke kyslíku a dusíku. Proces výroby je kvůli tomu poměrně nákladný, což se projeví v ceně polotovarů. V případě jeho dalšího zpracování jsou velkými nevýhodami zejména vysoký koeficient tření, který negativně ovlivňuje procesy při obrábění a tváření a nízká tepelná vodivost, která opět negativně ovlivňuje zejména proces obrábění. [12]

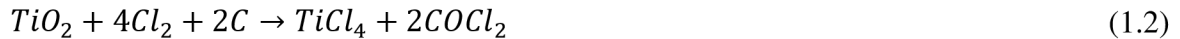
### 2.1 Výroba titanu

V přírodě se titan vyskytuje ve velkém množství minerálů, nejčastěji se však získává z titanových rud ilmenitu ( $\text{FeTiO}_3$ ) a rutilu ( $\text{TiO}_2$ ). Za objevitele titanu se považují William Gregor a M.H. Klaproth, kteří ho objevili nezávisle na sobě koncem 18. století v podobě oxidů. Titan jako čistý kov se ovšem poprvé podařilo připravit až o více než 100 let později M.A. Hunterovi v roce 1910. Skutečně produktivní proces získávání titanu z jeho rud se ale podařilo objevit až ve 40. letech 20. století W. Krollovi. Po něm byl pojmenován jako Krollův proces a dodnes se jedná o jednu z nejpoužívanějších metod výroby čistého titanu. Schéma Krollova procesu je znázorněno na obr. 15. [12; 13; 14]



Obr. 15 Krollův proces [15].

V první fázi Krollova procesu je nutné z titanové rudy vytvořit chlorid titaničitý. V případě zpracování rutilu ( $\text{TiO}_2$ ) je proces jednoduchý – ruda se smísí s uhlím, tato směs se poté briketuje a kalcinuje v redukční atmosféře za zvýšených teplot okolo  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . Následuje samotná chlorace, která je popsána chemickými rovnicemi [14]:



V případě zpracování ilmenitu ( $\text{FeTiO}_3$ ) je proces přípravy chloridu titaničitého složitější. V první řadě se musí provést redukce rudy v obloukové peci na surové železo za vzniku karbidu titanu ve formě strusky, případně nitridu titanu za předpokladu přístupu vzduchu. Chemické rovnice popisující průběh redukce ilmenitu [14]:



Poté následuje proces chlorace karbidu/nitridu titanu popsáný chemickými rovnicemi [14]:



V další fázi výroby dochází k redukci chloridu titaničitého hořčíkem při teplotách okolo  $900\text{ }^\circ\text{C}$  za přítomnosti ochranných atmosfér argonu nebo helia podle rovnice [14]:



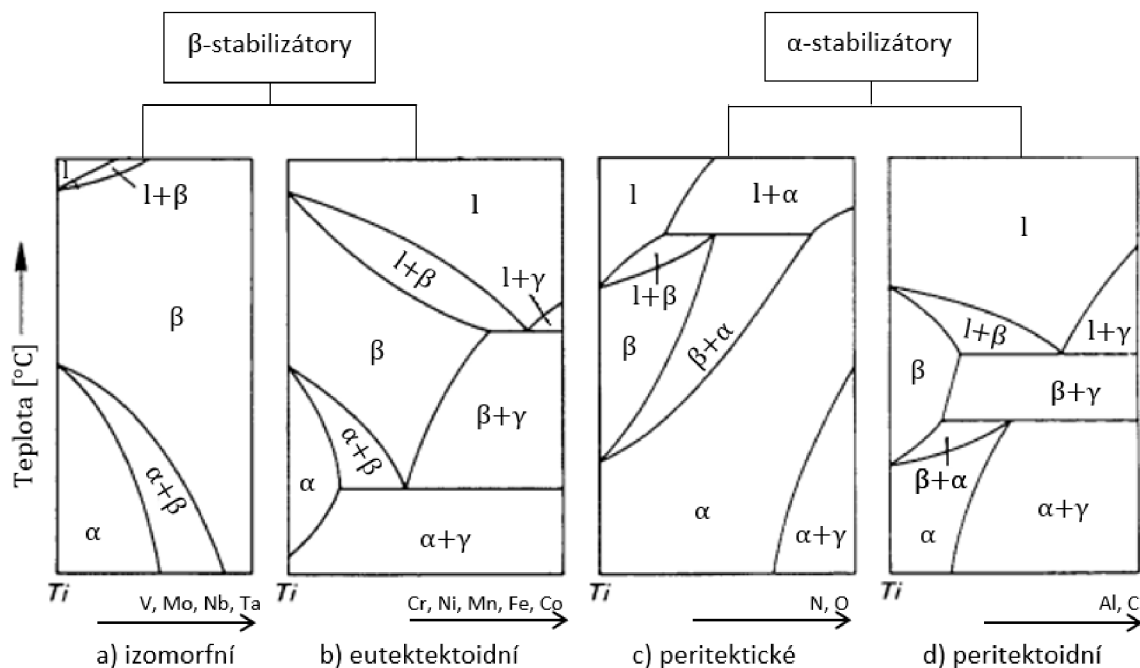
Vzniklým produktem je pórovitá hmota tvořená titanem tzv. titanová houba, která se dále čistí loužením, nebo vakuovou destilací. Vyčištěná titanová houba se dále slisuje do formy elektrod a v elektrických obloukových pecích se přetaví do formy kompaktního kovu [3]. Další alternativní způsoby výroby titanu jako je například elektrolýza, redukce chloridu titaničitého vodíkem, nebo termický rozklad chloridu titanitého se uplatňují spíše v laboratorních nebo poloprovozních podmínkách a do běžného provozu se příliš nerozšířily [12].

Ve strojírenství nemá čistý titan velké využití, mnohem častěji se používají titanové slitiny, které mají lepší mechanické vlastnosti. Titanové slitiny mají nezastupitelné místo zejména v leteckém a vesmírném průmyslu, kde díky své unikátní kombinaci nízké hustoty a vysoké pevnosti v některých oblastech nahradily dříve používané lehké slitiny hliníku a hořčíku. [12; 13]

Kromě lepšího poměru hmotnosti a pevnosti oproti lehkým slitinám hořčíku a hliníku mají slitiny titanu další velkou výhodu a tou je zachování vysoké pevnosti i při vysokých teplotách. Toho se opět využívá v letectví, kde je povrch stíhaček při letu nadzvukovými rychlostmi značně zahříván vlivem tření vzduchu. Odolnost proti vysokým teplotám předurčuje titanové slitiny také pro výrobu tepelně namáhaných součástí leteckých motorů a parních turbín. Díky dobré korozní odolnosti zejména v prostředích oxidačních kyselin a velkého množství solí, se titan používá také v chemickém průmyslu. V této oblasti ale dochází k využití spíše čistého titanu než jeho slitin kvůli lepším chemickým vlastnostem. Další významnou oblastí využití titanu je také lékařství, a to zejména díky jeho dobré chemické stálosti a biokompatibilitě. Vyrábí se z něj například různé spojovací části zlomených kostí, části protézy, nebo chirurgické nástroje. [12; 13; 14; 16]

## 2.2 Slitiny titanu

Titan může tvořit slitiny s velkým množstvím prvků. U prvků, které mají výrazně menší atomový poloměr než titan (C, N, O, H), dochází ke vzniku intersticiálních tuhých roztoků. Výrazně větší množství prvků pak spadá do skupiny, která má atomový poloměr blízký titanu. Mezi ně se řadí většina kovů a s titanem tvoří substituční tuhé roztoky. Ne všechny prvky, které mohou s titanem efektivně tvořit slitiny, jsou ale v technické praxi vhodné k legování. U některých prvků dochází k negativnímu ovlivnění zejména mechanických vlastností, a proto se k legování buď nepoužívají, nebo jsou považovány přímo za nežádoucí nečistoty, jejichž maximální obsah je limitovaný normou. Titanové slitiny můžeme dělit do skupin podle různých faktorů, nejčastěji se však rozdělují do skupin podle struktury v rovnovážném stavu. Jak již bylo zmíněno v kap. 1, čistý titan se při nízkých teplotách vyskytuje v alotropické modifikaci  $\alpha$  a při teplotách vyšších než 883 °C překrystalizuje na modifikaci  $\beta$ . U slitin titanu ale může být v rovnovážném stavu za pokojových teplot jak fáze tuhého roztoku  $\alpha$ , tak fáze tuhého roztoku  $\beta$ . Výsledná struktura slitiny je závislá na množství legujících prvků a na jejich ovlivnění teploty fázové přeměny  $\alpha \rightarrow \beta$ . Obecně se legující prvky dělí do skupin tzv.  $\alpha$ -stabilizátorů,  $\beta$ -stabilizátorů a prvků neutrálních. Schématické znázornění vlivu jednotlivých legur na průběh rovnovážného fázového diagramu můžete vidět na obr. 16. [12; 13; 16]

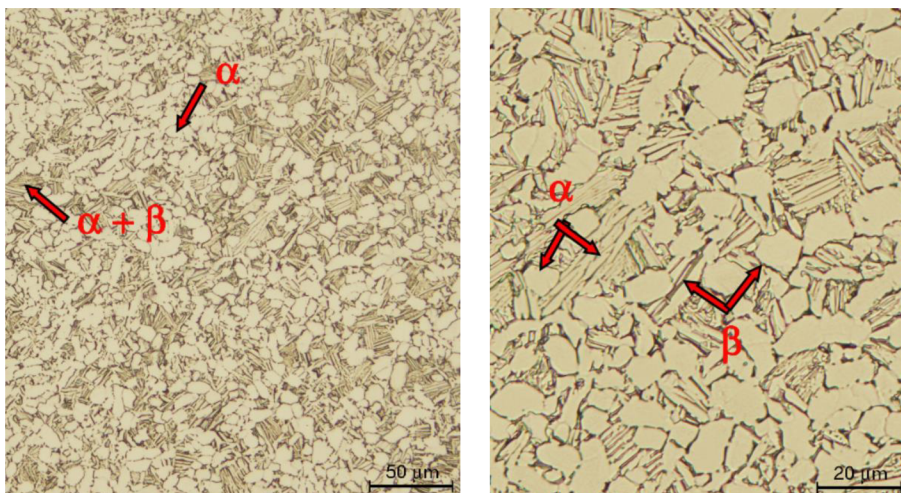


Obr. 16 Základní typy fázových diagramů slitin titanu [16].

Slitiny titanu jsou podle mikrostruktury v rovnovážném stavu děleny do 5 základních skupin:

- Slitiny  $\alpha$  jsou legovány zejména  $\alpha$  stabilizátory. Mezi ně se řadí například kyslík, uhlík, dusík a hliník. V technické praxi se ale kyslík, uhlík, a dusík k legování titanu nepoužívají, protože již při jejich malém množství dochází k významnému zvýšení pevnosti a k negativnímu ovlivnění tvařitelnosti. Naopak hliník je v praxi nejvíce rozšířeným  $\alpha$  stabilizátorem. S jeho rostoucím množstvím ve slitině dochází k nárůstu pevnosti, ale současně dochází ke zkřehnutí materiálu, a proto je jeho maximální obsah většinou limitován hodnotou 8 %. Slitiny  $\alpha$  se obecně vyznačují nižší pevností, vysokou korozní odolností (avšak nižší než u čistého titanu), dobrou svařitelností, vysokou houževnatostí za nízkých teplot a současně mají dobrou odolnost proti creepu. Typickým zástupcem těchto  $\alpha$  slitin je např. materiál Ti-5Al-2,5Sn (Grade 6). [1; 2; 5]

- Slitiny pseudo  $\alpha$  jsou legovány převážně  $\alpha$ -stabilizujícími prvky a pouze v malé míře také  $\beta$  stabilizátory. Struktura tohoto typu materiálů je proto tvořena z většiny fází  $\alpha$ , zatímco  $\beta$  fáze se zde vyskytuje pouze v malém množství, v literatuře se uvádí max 6 hm. % fáze  $\beta$  [13]. Tyto materiály si zachovávají pozitivní vlastnosti slitin  $\alpha$  jako je například dobrá svařitelnost, zároveň dosahují lepších mechanických vlastností oproti čistým  $\alpha$  slitinám a zachovávají si dobrou plasticitu. Mezi zástupce pseudo  $\alpha$  slitin se řadí např. materiál Ti-8Al-1Mo-1V. [12; 13; 16]
- Slitiny  $\beta$  jsou legovány téměř výhradně  $\beta$  stabilizátory – v technické praxi se nejčastěji jedná o Mo, Fe, Mn, Cr, Nb. Pro dosažení struktury obsahující pouze fázi  $\beta$  je nutné legovat materiál velkým množstvím  $\beta$ -stabilizujících prvků, a protože se většinou jedná o těžké kovy, dochází ke značnému navýšení hustoty materiálu, což je ve většině případů nežádoucí. Tento typ slitin se vyznačuje především vysokou pevností, dobrou tvařitelností za studena a schopností vytvrzovat. Na druhou stranu jsou tyto slitiny špatně svařitelné, což omezuje jejich použití. Do této skupiny materiálů patří např. slitina Ti-13V-11Cr-3Al [12; 16]
- Slitiny pseudo  $\beta$  mohou obsahovat také malé množství fáze  $\alpha$  nejsou tak náročné na výrobu. Svými vlastnostmi se velmi podobají čistým  $\beta$  slitinám. Do této skupiny materiálů patří např. slitina s označením Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Cr-4Mo. [12; 13; 16]
- Slitiny  $\alpha + \beta$  – jak již z názvu vyplývá, jedná se o typ slitin současně legovaný jak  $\alpha$ , tak i  $\beta$  stabilizátory se smíšenou strukturou tvořenou fází  $\alpha$  i  $\beta$  v různém poměru a v různé formě, viz obr. 17. Poměr těchto fází se odvíjí od množství jednotlivých typů stabilizátorů a výrazně ovlivňuje vlastnosti materiálu. Výslednou mikrostrukturu slitiny také silně ovlivňuje rozpustnost  $\beta$  stabilizátorů zejména ve fázi  $\beta$ . U prvků s úplnou rozpustností v  $\beta$  fázi (Mo, V, Nb) dochází ke vzniku dvoufázových slitin  $\alpha+\beta$  bez výskytu intermediárních fází. Naproti tomu u  $\beta$ -stabilizujících prvků s omezenou rozpustností v  $\alpha$  i  $\beta$  fázi (Fe, Mn, Cr) dochází při obsahu vyšším, než je maximální rozpustnost, ke vzniku intermediárních fází. Na mikrostrukturu a vlastnosti materiálu má velký vliv také různé provedení tepelného zpracování. Vzhledem k nenáročnosti výroby dvoufázových  $\alpha+\beta$  slitin titanu je tato skupina materiálů nejpočetnější a v praxi také nejpoužívanější. K velkému rozšíření těchto slitin přispívají také jejich dobré mechanické vlastnosti, a to jak za běžných, tak i zvýšených teplot do cca 300 °C. Jako typického zástupce této skupiny jmenujme globálně nejrozšířenější titanovou slitinu Ti-6Al-4V, označovanou také jako Grade 5. Právě tento materiál bude použit v experimentální části práce. Pro speciální případy se některé slitiny vyrábí také ve formě ELI (Extra Low Interstitial) slitin, které obsahují mimořádně nízké množství intersticiálních prvků, díky čemuž si zachovávají vysokou houževnatost i za velmi nízkých teplot. Kvůli náročnějšímu způsobu výroby jsou tyto slitiny, ale dražší. [12; 13; 16; 17]

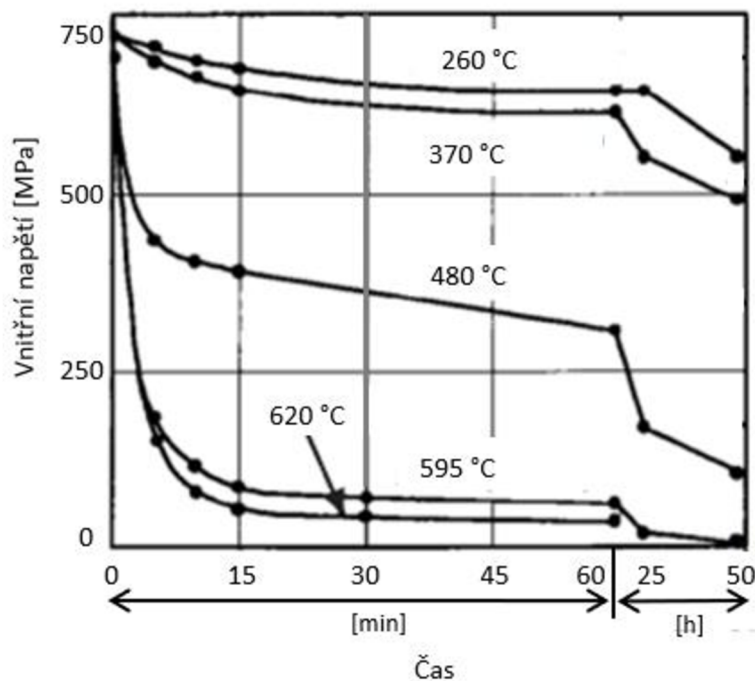


Obr. 17 Rozdílné struktury slitiny Ti6Al4V [18].

### 2.3 Tepelné zpracování titanových slitin

Velmi podstatnou částí výrobního procesu součástí z titanových slitin je tepelné zpracování, které má výrazný vliv na výslednou strukturu a mechanické vlastnosti materiálu. Teplota a způsob tepelného zpracování se odvíjí od požadovaných mechanických vlastností a struktury materiálu pro dané využití a také chemického složení dané slitiny. Z důvodu vysoké chemické reaktivity titanových slitin je vhodné při jejich tepelném zpracování nad teploty cca 427 °C použít ochrannou inertní atmosféru, která zabrání kontaktu kyslíku a dusíku s povrchem materiálu. Pokud se ochranná atmosféra nepoužije, na povrchu materiálu vznikne tzv. alfa povlak, což je tenká vrstva materiálu obohacená o velké množství kyslíku a dusíku, která je tvrdá a křehká, což je nežádoucí. [17]

K nejčastějšímu typu tepelného zpracování patří žihání na snížení vnitřního pnutí, které je aplikovatelné jak pro čistý titan, tak pro většinu titanových slitin. Výhodou je, že při něm nedochází k negativnímu ovlivnění pevnosti, nebo tažnosti, jak tomu bývá u jiných způsobů tepelného zpracování. Při tomto způsobu žihání dochází do určité míry k odbourání nežádoucího vnitřního napětí (nedojde však k jeho úplnému odstranění) vneseného do materiálu v předchozích operacích výroby. Velikost výsledného vnitřního napětí závisí na teplotě a čase žihání, pro titanovou slitinu Ti6Al4V je tato závislost zobrazena na obr. 18. Při bližším pohledu na graf je patrné, že k nejvýraznějšímu poklesu vnitřního napětí dochází přibližně během počátečních 5-10 minut tepelného zpracování a dále s rostoucím časem napětí klesá výrazně pomaleji. Vidíme také, že s rostoucí teplotou žihání vnitřní napětí nelineárně klesá. Při teplotách pod 370 °C dochází pouze k nepatrnému snížení vnitřního napětí, zatímco při zvýšení žihací teploty o více než 100 resp. 200 °C už dochází k výrazně větším poklesům. Pro slitinu Ti6Al4V je doporučena teplota žihání v rozmezí 480-650 °C po dobu 0,5-4 hod. Konkrétní hodnoty se volí podle míry deformace součásti a velikosti zbytkových napětí vnesených do materiálu. Při žihání bez použití ochranné atmosféry by měl být čas i teplota co nejnižší, aby se minimalizovala nežádoucí oxidace povrchu materiálu. Při žihání na snížení vnitřních pnutí je nutné dbát na rovnoměrné ochlazování materiálu z žihací teploty, čehož se dosáhne buď ochlazováním na vzduchu, nebo řízeným ochlazováním v peci. [12; 16; 17; 19]



Obr. 18 Žihání ke snížení pnutí slitiny Ti6Al4V [19].



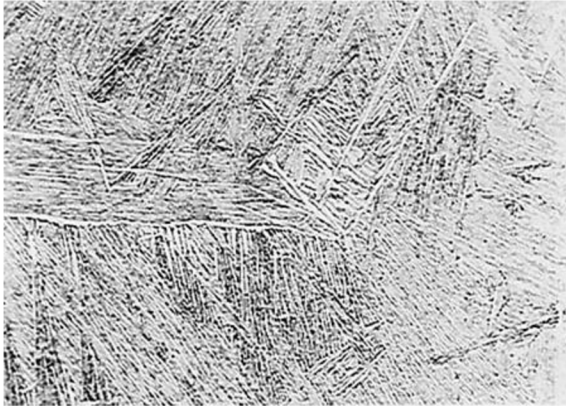
U tenkostěnných plochých součástí z titanových slitin může být problémem dosažení předepsaných malých tolerancí tvaru během žihání. Následné vyrovnávání takových součástí za studena není příliš efektivní, protože titanové slitiny při tváření za studena vykazují velkou míru odpružení. Za zvýšených teplot je tváření efektivnější. Při teplotách nad 500 °C, běžných u žihacích procesů, dochází u velkého množství titanových slitin ke snížení odolnosti proti creepu a současně ke zvýšení tažnosti. Této vlastnosti se dá při žihání s výhodou využít a součásti je možné vyrovnávat přímo při tepelném zpracování a může se tak eliminovat přidání další výrobní operace v podobě tváření za tepla. Jednou z možností je díl upnout mezi dvě rovné ocelové desky a takto vložit do pece k tepelnému zpracování. Druhou možností je tepelné zpracování pomocí speciálního vakuového zařízení, které zahřeje součást na žihací teplotu a současně pod ní vytvoří podtlak. Díky tomu je díl atmosférickým tlakem přitíštěn k rovné keramické desce. Po výdrži na žihací teplotě je opět nutné dodržet rovnoměrné ochlazování součásti pro dosažení minimalizace vnitřních napětí a lepší rovinnosti [17]. Kromě žihání ke snížení prnutí se pro titanové slitiny používají také další typy žihání, mezi které patří:

- Rekrystalizační žihání – používá se k obnovení struktury materiálu a odstranění deformačního zpevnění po výraznějších deformacích vzniklých při tváření za studena. Pro slitiny, které při tváření za tepla nestačí rekrystalizovat, se tento typ tepelného zpracování doporučuje také. Obvykle se žihá při teplotách 650-800 °C v závislosti na chemickém složení. Dochází ke snížení pevnosti materiálu, ale také ke zlepšení houževnatosti. [12; 13]
- Stabilizační žihání – aplikuje se u slitin se smíšenou strukturou  $\alpha+\beta$  za účelem získání stabilní  $\beta$  fáze, která při zvýšených teplotách v provozu dále nepodléhá přeměnám. Slitiny bez hliníku se žihají při teplotách 600-700 °C a slitiny s hliníkem při 700-900 °C. V obou případech poté následuje rovnoměrné ochlazování na vzduchu. Výsledná struktura obsahuje relativně malé množství fáze  $\beta$ , která je ale bohatá na legující prvky a díky tomu jsou slitiny tepelně stabilnější. [12; 13]
- Izotermické žihání – umožní dosažení vyšší pevnosti, žarupevnosti za současného zachování tvařitelnosti materiálu. Proces spočívá v zahřátí na teploty ve dvoufázové oblasti  $\alpha+\beta$  (obvykle okolo 800-950 °C), následného ochlazení v peci na teplotu cca 500-650 °C s výdrží na teplotě a následném ochlazení na vzduchu. [12; 13]
- Duplexní (dvojité) žihání – je podobné izotermickému, a to včetně žihacích teplot. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že po prvním stupni žihání je materiál ochlazen na vzduchu na pokojovou teplotu. Až poté následuje opětovný ohřev na již zmiňovaných 500-600 °C. Oproti izotermickému žihání dochází k dosažení vyšší pevnosti, ale nižší tvařitelnosti materiálu. [12; 13]

Je opravdu nutné dbát na správně zvolenou žihací teplotu, protože už při malé odchylce a při jinak stejném způsobu tepelného zpracování mohou vzniknout výrazně odlišné struktury materiálu. Pro porovnání můžete vidět titanovou slitinu  $\text{Ti6Al2Sn4Zr2Mo0,2Si}$  se strukturou tvořenou acikulární (jehlicovitou)  $\alpha$  fází na obr. 19a a stejný materiál s duplexní  $\alpha+\beta$  strukturou na obr. 19b. Jediný rozdíl při tepelném zpracování v těchto případech byl pouze v žihací teplotě. [17]

Kromě žihání se  $\alpha+\beta$  slitiny také vytvrzují. První fází tohoto procesu je rozpouštěcí ohřev na teplotu těsně pod teplotu  $\beta$  transu dané slitiny, ve snaze dosáhnout co nejvyššího množství  $\beta$  fáze. Po krátké výdrži na teplotě (řádově v minutách) následuje kalení do vody. U málo  $\beta$ -stabilizovaných slitin dochází při kalení k přeměně fáze  $\beta$  na přesycený tuhý roztok  $\alpha$  a při dalším zpracování dochází k relativně malému nárůstu tvrdosti. U více  $\beta$ -stabilizovaných slitin ale dojde při kalení ke vzniku metastabilní  $\beta$  fáze, která po dalším zpracování umožní výraznější nárůst tvrdosti i pevnosti. Druhou fází vytvrzování je stárnutí – po zakalení se materiál ohřeje na teplotu obvykle okolo 500-600 °C s výdrží v řádech hodin a poté následuje pomalé ochlazování na vzduchu. Během stárnutí dochází k postupné přeměně metastabilní  $\beta$  fáze v závislosti na

chemickém složení buď na rovnovážnou směs  $\alpha+\beta$ , nebo dojde k eutektoidnímu rozpadu na směs fází  $\alpha$  + intermetalická sloučenina. [12; 13; 17; 19]



a) teplota žíhání 1024 °C, ochlazení na vzduchu



b) teplota žíhání 968 °C, ochlazení na vzduchu

Obr. 19 Struktury při rozdílném tepelném zpracování [17].

### 3 OBRÁBĚNÍ A OBROBITLNOST TITANOVÝCH SLITIN

Slitiny titanu se společně s materiály jako jsou například superslitiny niklu a kobaltu, vysokopevné, korozivzdorné a žárupevné oceli, kompozitní a keramické materiály řadí do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. Ty se, jak už z názvu vyplývá, vyznačují horší obrobitelností způsobenou zejména jejich fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. V praxi se to většinou projevuje vysokým opotřebením řezných nástrojů, nízkou produktivitou výroby, případně zhoršenou kvalitou povrchu a nepřesnými rozměry součástí. [6; 7]

Obrobitelnost materiálu je komplexní pojem vyjadřující schopnost materiálu být efektivně a hospodárně zpracován určitou metodou obrábění. Obrobitelnost závisí na jedné straně na mechanických a chemických vlastnostech obráběného materiálu, na jeho chemickém složení, způsobu výroby polotovaru, tepelném zpracování a mikrostruktuře. Na straně druhé mají na obrobitelnost vliv také faktory jako jsou materiál řezného nástroje, řezné podmínky, geometrie nástroje, řezné prostředí a metoda obrábění. Obrobitelnost je vlastnost relativní a pro daný materiál se určuje porovnáním buď s konkrétním vztažným, nebo etalonovým materiálem obráběným stejným řezným nástrojem za daných pracovních podmínek. V praxi se obrobitelnost nejčastěji vyhodnocuje z pohledu opotřebení nástroje, kdy se jako porovnávací kritérium určuje řezná rychlost, při které během obrábění dojde k dosažení určité trvanlivosti nástroje (obvykle trvanlivost 15, 30 nebo 45 minut). Z určených hodnot řezných rychlostí se stanoví tzv. index kinetické obrobitelnosti jako poměr řezné rychlosti sledovaného materiálu k řezné rychlosti etalonového materiálu. Podle tohoto indexu jsou materiály děleny do jednotlivých skupin obrobitelnosti. Jako další porovnávací kritéria sloužící pro vyhodnocení obrobitelnosti mohou být použity například velikosti sil při obrábění, kvalita zhotoveného povrchu, teplota v místě řezu nebo tvar třísky a způsob jejího utváření. [1; 2; 4]

V případě titanových slitin je obtížná obrobitelnost způsobená zejména těmito faktory:

- vysoká pevnost materiálu, a to i za zvýšených teplot při obrábění
- vysoká afinita titanu k řezným materiálům způsobuje za zvýšených teplot intenzivní difuzi a podněcuje tak vznik intenzivního difuzního opotřebení na čele nástroje
- náchylnost ke zpevňování materiálu
- vysoký součinitel tření mezi materiálem a nástrojem v kombinaci s nízkou tepelnou vodivostí titanových slitin způsobuje vysoké tepelné zatížení nástroje, což negativně ovlivňuje jeho trvanlivost
- tvorba segmentové třísky vyvolává dynamické zatížení nástroje a způsobuje tak únavové opotřebení
- nízký modul pružnosti zapříčiňuje malou tuhost obrobku, z toho důvodu dochází při obrábění v případě malé tuhosti stroj-nástroj-obrobek ke kmitání a k horší kvalitě obrobených ploch

Z materiálů na bázi titanu má nejlepší obrobitelnost obecně čistý titan a slitiny  $\alpha$ . S narůstajícím množstvím fáze  $\beta$  ve slitinách se obrobitelnost zhoršuje a nejhorší je u čistých  $\beta$  slitin. [6; 7]

#### 3.1 Soustružení titanových slitin

Kvůli výše popsaným problematickým vlastnostem titanu je nutné volit specifické řezné podmínky, a to zejména výrazně nižší řezné rychlosti oproti obrábění ocelí. Tím se docílí nižších teplot v místě řezu a vyšší trvanlivosti nástrojů. Ze stejného důvodu je také důležitý dostatečný přívod procesních kapalin do řezu. Dále platí zásada, že by se neměly používat příliš malé posuvy kvůli nebezpečí zpevňování materiálu. Orientační řezné parametry pro soustružení titanových slitin do pevnosti 1000 MPa nástroji ze slitutých karbidů a rychlořezných ocelí (RO) za použití emulzního oleje jsou vypsány v tab. 3.

Z uvedených hodnot je na první pohled patrný výrazný rozdíl mezi řeznými rychlostmi u RO a SK. Z důvodu nutnosti použití velmi malých řezných rychlostí, a s tím související nízké produktivity obrábění titanových slitin nástroji z RO, se tento typ řezných materiálů v dnešní době při soustružení nepoužívá. Jinak tomu ale je u frézování, řezání závitů a vrtání titanových slitin, kdy i přes nižší produktivitu obrábění může mít díky určitým vlastnostem jejich použití opodstatnění. [7]

Tab. 3 Řezné podmínky pro soustružení titanových slitin [7].

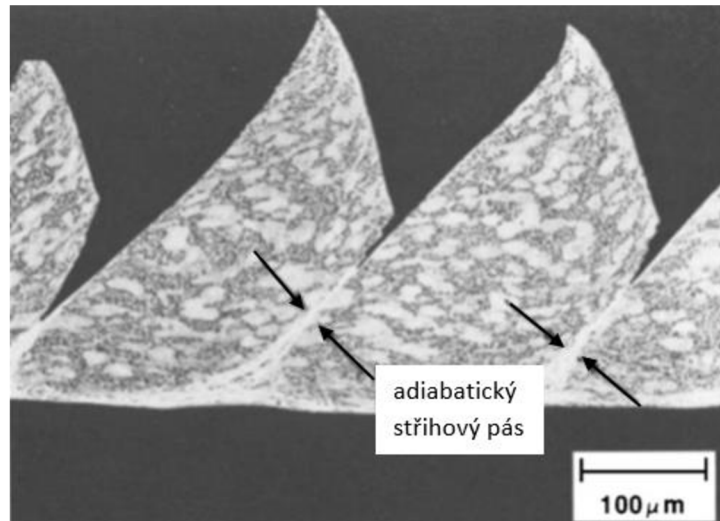
Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]	Nástrojový materiál	Poloměr zaoblení špičky $r_\varepsilon$ [mm]				
		0,5		1,0		
		Posuv na zub $f_z$ [mm]				
		0,08	0,125	0,18	0,25	0,40
		Řezná rychlost $v_c$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]				
0,5	SK	66	59	54	50	44
	RO	17	14	12	11	
1	SK	58	52	47	43	39
	RO	15	13	11	10	
2	SK	51	46	42	39	34
	RO	13	11	10	9	
3	SK	46	42	39	36	
	RO	12	10	9	8	
5	SK	43	39	35	33	
	RO	11	9	8	7	

### 3.1.1 Tvorba třísky při soustružení

Typickým znakem pro soustružení titanových slitin je vznik segmentové třísky. Tříška v tomto případě není zcela plynulá, ale na mikroskopické úrovni vytváří malé úseky oddělené úzkými oblastmi, označovanými jako adiabatické stříhové pásy, viz obr. 20. [20]

Plastická deformace v objemu segmentů třísky je poměrně malá, a naopak ve stříhových pásách, oddělujících od sebe jednotlivé segmenty, dochází k lokalizaci extrémně vysokých plastických deformací. Vznik stříhových pásů je projevem plastické nestability při tvorbě třísky v oblasti primární plastické deformace. Hlavní příčinou tohoto stavu je vysoká koncentrace tepla v úzké oblasti skluzových pásů zapříčiněná nízkou tepelnou vodivostí materiálu a s tím souvisejícím výrazným tepelným odpevněním materiálu. V kombinaci s působením vysokých smykových napětí v úzkých oblastech nestability dochází ke skluzu materiálu a vzniku výrazně deformovaných stříhových pásů typických pro segmentovou třísku. Tyto pásy jsou náhodně iniciovány z oblasti styku třísky s čelem nástroje a rychle se materiálem třísky šíří dál. Vlivem

působení vysokých teplot a tlaků na třísku a následného ochlazení dochází v oblastech vysoké plastické deformace k transformaci  $\beta$  fáze na charakteristické útvary  $\alpha$  fáze s protáhlým čočkovitým tvarem. [2; 7; 20; 21]



Obr. 20 Segmentová tříška při soustružení slitiny Ti6Al4V [20].

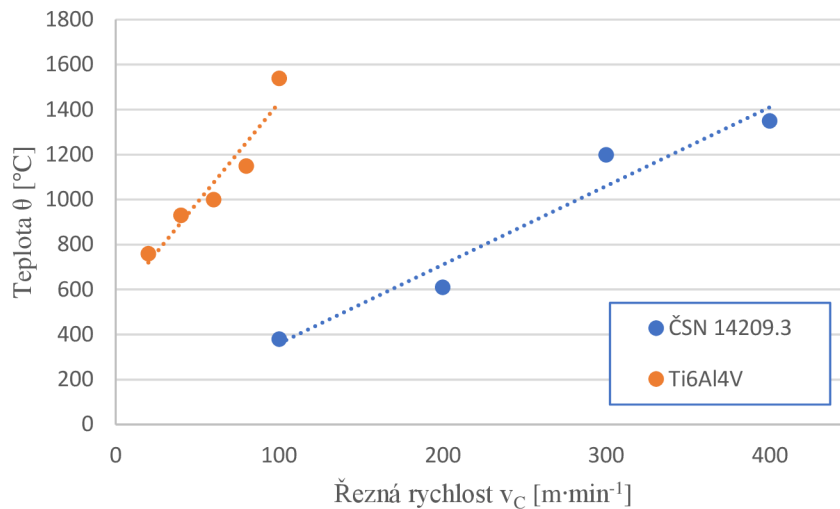
Tvorba segmentové třísky a frekvence vzniku stříhových pásů je podmíněna zejména řeznými podmínkami. U titanových slitin se s tímto typem třísky můžeme setkat již při poměrně malých řezných rychlostech okolo  $30 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , ale objevuje se například i při obrábění ocelí vysokými řeznými rychlostmi. Obecně platí, že s rostoucím posuvem na otáčku klesá frekvence vzniku skluzových pásů, a naopak s rostoucí řeznou rychlostí se frekvence zvyšuje. Při dostatečně nízkých řezných a posuvových rychlostech může i u titanových slitin docházet ke tvorbě kompaktní třísky bez skluzových pásů. Kritické řezné podmínky nutné pro vznik segmentové třísky závisí na mnoha faktorech, mezi které patří zejména materiál obrobku včetně jeho struktury a materiál řezného nástroje. [7; 20; 21]

Materiál třísky je při procesu obrábění plasticky deformován, čímž dochází ke snižování tloušťky třísky. Pro titanové slitiny a jejich segmentové třísky, které jsou intenzivně přetvářeny pouze v malých objemech stříhových pásů, je typické relativně malé stlačení oproti většině ostatních kovů. Úhel střížné roviny dosahuje hodnot blízkých  $45^\circ$  v závislosti zejména na řezné rychlosti a materiálu řezného nástroje. S malým stlačením třísky souvisí vysoká rychlost odchodu třísky po čele nástroje, což má vliv na generování vysokých teplot v místě řezu. [7; 20; 21]

### 3.1.2 Tepelné zatížení nástrojů při soustružení

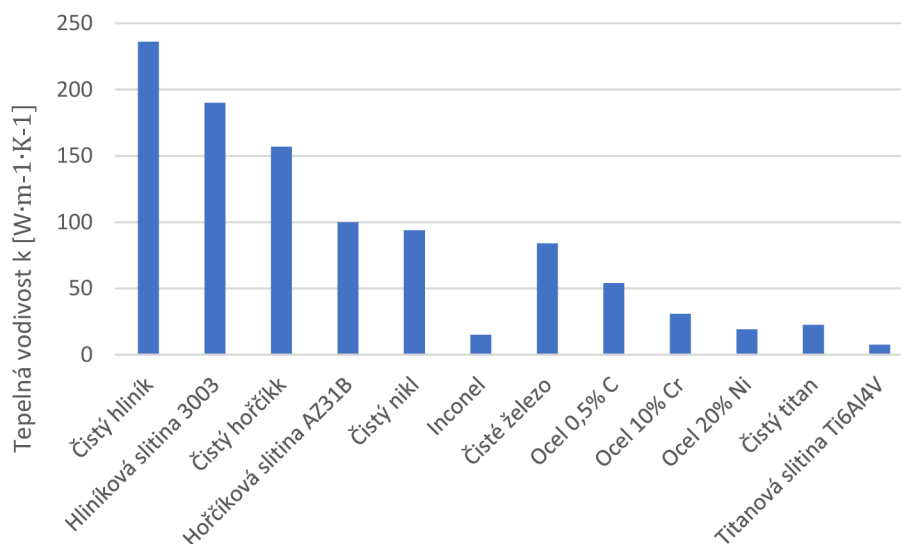
Tvorba třísky při obrábění titanových slitin probíhá za poměrně malých smykových deformací oproti deformacím vzniklými při obrábění ocelí. Z toho důvodu je také pohyb třísky po čele nástroje u titanových slitin výrazně vyšší než u ocelí. Tento fakt v kombinaci s působením vysokých měrných tlaků na čelo nástroje zapříčiněných vysokou pevností obráběného materiálu, má za následek značný nárůst teploty na břitu nástroje. [21] Vysoké teploty v místě řezu dále podporuje intenzivní tření odcházející třísky po čele nástroje, typické pro titanové slitiny. Nejvýraznější vliv na velikost teplot generovaných při obrábění mají především řezné podmínky (zejména řezná rychlost a v menší míře také posuvová rychlost), použití procesních kapalin a v neposlední řadě také geometrie a materiál řezného nástroje. Na obr. 21 můžeme vidět grafickou závislost teploty v oblasti kontaktu čela nástroje a odcházející třísky pro titanovou slitinu Ti6Al4V a ocel ČSN 14209.3. Z grafu je patrné, že nárůst teploty u titanové

slitiny je výrazně intenzivnější oproti oceli, a to již při několikanásobně nižších řezných rychlostech. [7]



Obr. 21 Vliv řezné rychlosti na teplotu v oblasti kontaktu čela nástroje s třískou [7].

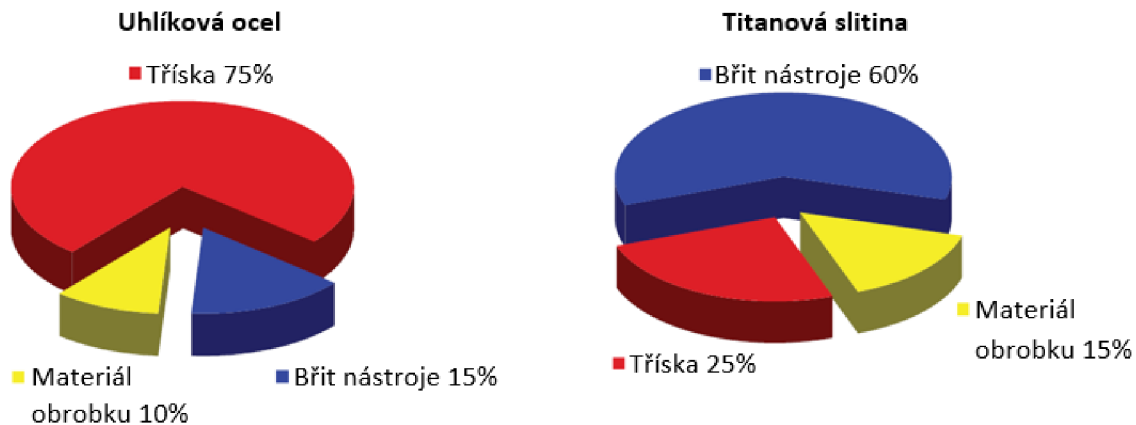
Běžně se v literatuře uvádí, že se veškerá mechanická energie využitá na tvorbu třísky z 90–95 % přemění na tepelnou energii [10; 15]. Toto teplo je při obrábění pohlcováno třískou, nástrojem, obrobkem a vnějším prostředím v různém poměru v závislosti zejména na použité technologii obrábění, řezných podmínkách a obráběném materiálu. Titan a jeho slitiny mají oproti většině ostatních kovů poměrně malou tepelnou vodivost, což způsobuje neefektivní odvod tepla z místa řezu třískou a dochází tak k intenzivnímu zahřívání břitu nástroje. Hodnoty tepelných vodivostí vybraných čistých kovů a jejich slitin jsou zobrazeny na obr. 22.



Obr. 22 Tepelná vodivost kovů při pokojových teplotách [22].

Rozdíl v přenosu tepelné energie při obrábění titanové slitiny a uhlíkové oceli je orientačně znázorněn na obr. 23. Ze zaznamenaných hodnot je patrný výrazně vyšší podíl odvedeného tepla třískou při obrábění oceli, než je tomu v případě titanové slitiny. A naopak poměrné množství tepla pohlceného břitem nástroje je u titanových slitin 4x vyšší oproti ocelím. V kombinaci s generováním vysokých teplot v místě řezu při obrábění titanových slitin, je tento

fakt zásadní a způsobuje, že dochází k intenzivnímu zahřívání břitu nástroje. V praxi je toto jeden z největších problémů při obrábění titanových slitin, který negativně ovlivňuje produktivitu výrobního procesu. [7; 23]



Obr. 23 Odvod tepla z oblasti řezu [23].

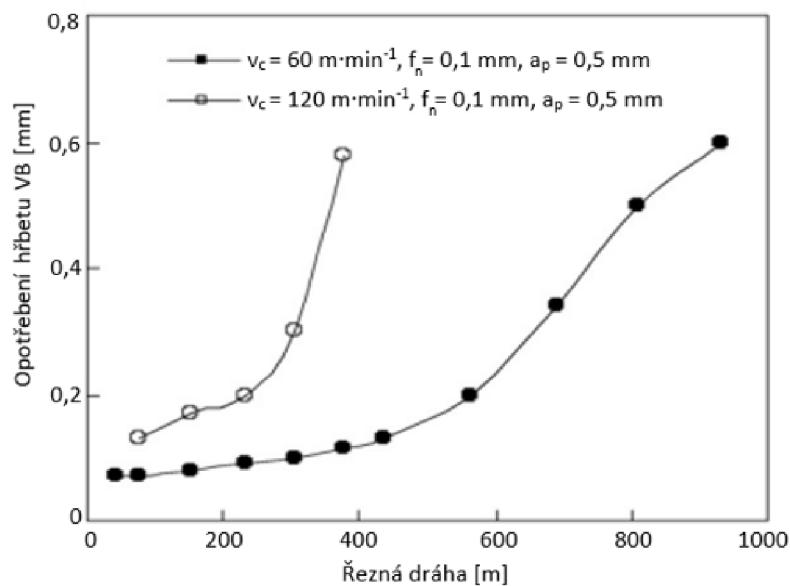
### 3.1.3 Opotřebenění nástrojů při soustružení

Titan i jeho slitiny jsou za vysokých teplot velmi reaktivní a při teplotách nad 500 °C dochází k intenzivní difuzi mezi materiálem nástroje a obrobku a s rostoucí teplotou intenzita difuze dále roste. Vysokou chemickou afinitu má titan zejména k uhlíku, karbidu a nitridu titanu (TiC, TiN), ale i k dalším prvkům, které jsou v řezných materiálech běžně obsaženy jako např. W a Co. Právě tyto složky řezných materiálů mají při obrábění vysokou tendenci reagovat s materiálem obrobku. Dochází tak ke značnému difuznímu opotřebenění nástrojů, které se vyznačuje vznikem výmolu na čele nástroje a opotřebením na hřbetu. [7; 24]

Při obrábění titanových slitin slinutými karbidy se pro dosažení vyšší trvanlivosti nástrojů doporučuje použití řezných materiálů na bázi karbidu wolframu s minimálním obsahem TiC. Podle [24] vykazují nástroje ze SK s větší velikostí zrna (1 μm) nižší opotřebenění hřbetu oproti nástrojům s menší velikostí zrna (0,68 μm). Tento jev je způsobený nižší rozpustností větších částic WC ve slitinách titanu. Z důvodu dosažení vyšší trvanlivosti se rovněž doporučuje omezit použití cermetů s přídavkem TiN. Kvůli značnému opotřebenění nejsou pro soustružení slitin titanu příliš vhodné ani nástroje z kubického nitridu boru (CBN) [7; 24]. Porovnání vývoje opotřebenění nástroje ze slinutého karbidu typu WC–Co v závislosti na řezné dráze pro dvě rozdílné řezné rychlosti podle [25] je zobrazeno na obr. 24.

Při obrábění titanových slitin v inertních atmosférách (např. dusík, argon) dochází k intenzivnějšímu opotřebenění řezných nástrojů oproti běžnému obrábění v prostředí vzdušné atmosféry. Tento jev je způsoben tím, že na vzduchu má titan silnou tendenci k oxidaci povrchových vrstev materiálu. Oxidy titanu jsou sice tvrdé a působí na břit nástroje negativně, ale už nejsou tak reaktivní, jako čistý titan a díky tomu dochází ke snížení intenzity reakcí mezi materiálem nástroje a obrobku a ke zvýšení trvanlivosti nástroje. [7]

Pro obrábění titanových slitin je také typické, že může docházet ke tvorbě nárůstku. Ten na jednu stranu chrání nástroj před vnějším prostředím, ale vlivem dynamického zatěžování dochází k jeho odlamování a opětovnému vzniku. S nárůstkem se odlupují také částice řezného nástroje a dochází tak k jeho dalšímu opotřebenění. Při vysokých teplotách obvyklých při obrábění titanu také může docházet k měknutí kobaltové matrice nástrojů ze slinutých karbidů a při silném mechanickém zatížení nástroje může lokálně docházet k plastické deformaci břitu. [7; 24]



Obr. 24 Grafická závislost opotřebení na řezné dráze [25].

Podle studií [7; 26] povlakování nástrojů pro soustružení titanových slitin nemá téměř žádný vliv na prodloužení jejich trvanlivosti, protože již po krátkém časovém úseku obvykle dojde k odstranění povlaku z ostří nástroje. Avšak podle studie [24] dochází v konkrétním případě při povlakování nástrojů ze SK materiálem AlSiTiN k dosažení téměř dvojnásobné životnosti oproti identickému nepovlakovanému SK v rozmezí řezných rychlostí  $50\text{--}130 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  s přívodem procesní kapaliny.

Hlavní zásady prodloužení životnosti řezných nástrojů při konvenčních podmínkách obrábění titanových slitin jsou zejména snížení řezné rychlosti a dostatečný přívod procesní kapaliny s chladícím účinkem. Snižování řezných rychlostí má ale negativní dopad na produktivitu obrábění a přívod velkého množství řezné kapaliny je finančně nákladný a procesní kapaliny mají rovněž negativní vliv na životní prostředí, což je zejména v dnešní době velmi palčivé téma. [7]

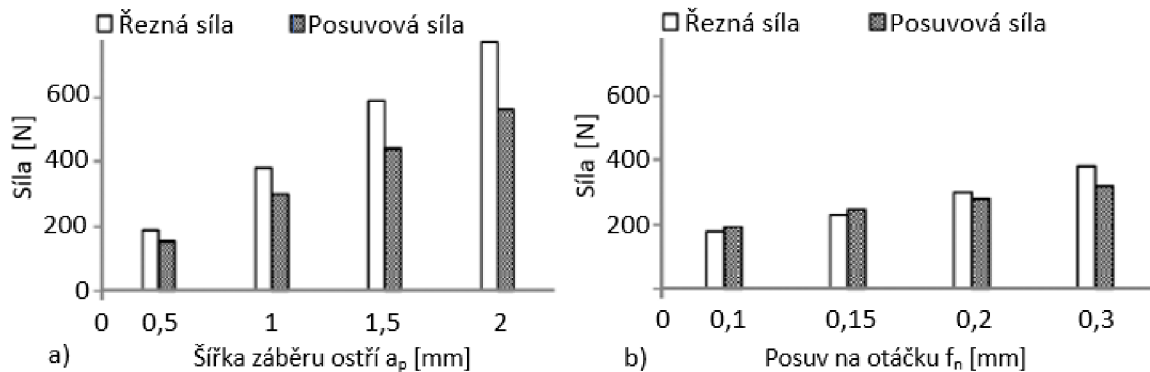
### 3.1.4 Silové zatížení nástrojů při soustružení

Pro soustružení titanu a jeho slitin je typické, že i přes jejich horší obrobitelnost dosahují řezné síly při obrábění poměrně nízkých hodnot, a to i v porovnání s běžnými uhlíkovými oceli. Titan má při obrábění tendenci zpevňovat, což vede k vysokým hodnotám úhlu střížné roviny, odcházející tříska má malou tloušťku a styčná plocha mezi třískou a čelem nástroje je výrazně menší než v případě většiny ostatních kovů včetně ocelí. Řezné síly jsou tedy poměrně malé, ale působí na výrazně menší plochu nástroje, což způsobuje jeho větší měrné zatížení. [7; 21]

Soustružení slitin titanu je často doprovázeno vznikem segmentové třísky a při tomto jevu dochází k oscilaci silového zatížení. Při vzniku segmentu v tříске dochází k nárůstu řezné i posuvové síly a poté v momentě počátku smyku vznikne trhlinka a síly výrazně poklesnou, následně se tento jev opakuje. Kvůli malé tuhosti materiálu proto dochází ke zvýšenému chvění technologické soustavy S–N–O–P. Dynamická složka řezné síly v případě titanových slitin může dosahovat hodnot okolo 20–30% velikosti statické složky řezné síly. Tento poměr i velikost dynamické složky řezné síly je u titanových slitin výrazně vyšší než v případě většiny ostatních kovů. [6; 7]

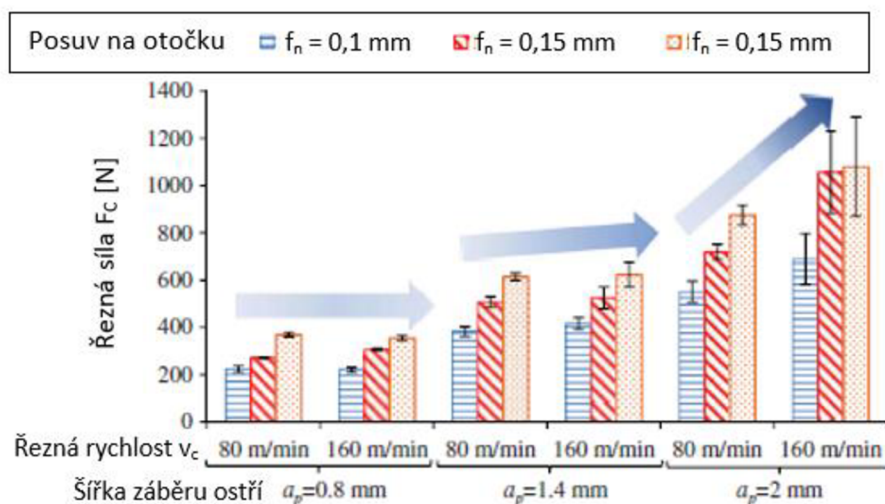


Na velikost řezných sil při soustružení titanových slitin má vliv mnoho faktorů, zejména se jedná o řezné parametry, geometrii nástroje a řezné prostředí. Pozorování silového zatížení nástrojů je v praxi důležité, protože úzce souvisí s jejich opotřebením, s vývojem teplot v místě řezu, a proto budou dále popsány zásadní parametry ovlivňující silové zatížení. Obecně platí, že s rostoucí posuvovou rychlostí a šířkou záběru řezná síla roste. Z obr. 25 je patrné, že při nižších hodnotách posuvů a šířky záběru ostří je růst sil přibližně lineární a velikost posuvu ovlivňuje hodnoty sil méně výrazně než parametr  $a_p$ . [7; 27]



Obr. 25 Závislost silového zatížení nástroje na řezných parametrech [27].

Závislosti řezné síly na řezné rychlosti jsou komplexnější a jsou výrazně ovlivňovány dalšími řeznými parametry. Při nižších posuvových rychlostech a nižších šířkách záběru ostří ( $f_n$  přibližně do 0,1 mm a  $a_p$  přibližně do 0,8 mm) má řezná síla s rostoucí řeznou rychlostí tendenci obvykle více či méně intenzivně klesat. [27; 28] Při vyšších hodnotách  $f_n$  a  $a_p$  však podle studií [28; 29] dochází s rostoucí řeznou rychlostí k nárůstu řezné síly. Tento jev je patrný na obr. 26.



Obr. 26 Závislost řezné síly na řezných parametrech [29].

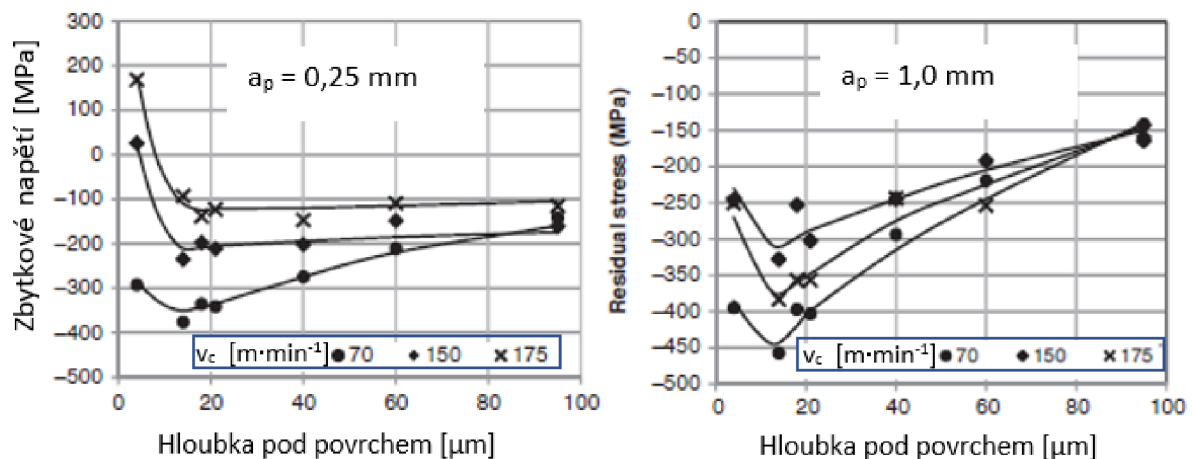
Z hlediska geometrie nástrojů má na velikost řezných sil velký vliv úhel čela. Pro soustružení titanových slitin se v literatuře běžně doporučuje používání nástrojů s pozitivní geometrií. Podle studií [27, 30] běžně dochází ke snižování řezných i posuvových sil s rostoucím úhlem čela. Kromě geometrie nástroje má na silové zatížení mírný vliv i řezný materiál a jeho struktura. Povlakování nástrojů může vést k mírnému snížení řezné síly, ale na druhou stranu vede k intenzivnějšímu chvění nástroje. [17]

### 3.1.5 Vnitřní napětí při soustružení

Ve studii [31] byl skoumán vliv řezné rychlosti a šířky záběru ostří na velikost vnitřních napětí v povrchových vrstvách obrobené plochy po soustružení titanové slitiny Ti6Al4V. Měření napětí v tenké povrchové vrstvě bylo realizováno rentgenovou difrakční metodou a ve větších hloubkách pod povrchem byly hodnoty měřeny synchrotronní energetickou disperzní difrakcí, což je metoda využívající záření s vyšší energií.

Z obr. 27 je patrné, že s klesající řeznou rychlostí se průběhy vnitřních napětí posouvají více do tlakových hodnot. Zatímco při řezné rychlosti  $70 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  mají napětí ve všech měřených hloubkách výhradně tlakový charakter, při vyšších řezných rychlostech mají napětí v malé hloubce pod povrchem tahový charakter a až poté s narůstající hloubkou přecházejí do tlakových hodnot.

V případě větší šířky záběru dosahují vnitřní napětí vyšších absolutních hodnot oproti předešlému stavu, viz obr. 27 a jejich průběhy jsou posunuty více do oblasti tlaku. Zbytková napětí v tomto případě mají v malých hloubkách pod povrchem výhradně tlakový charakter a nedosahují tahových hodnot ani při vysokých řezných rychlostech. V hloubce okolo  $20 \mu\text{m}$  pod povrchem dosahují průběhy napětí při všech řezných rychlostech maximálních tlakových hodnot a dále s rostoucí hloubkou pod povrchem přecházejí směrem k tahové oblasti.



Obr. 27 Závislost řezné síly na na řezných parametrech [31].

### 3.2 Frézování titanových slitin

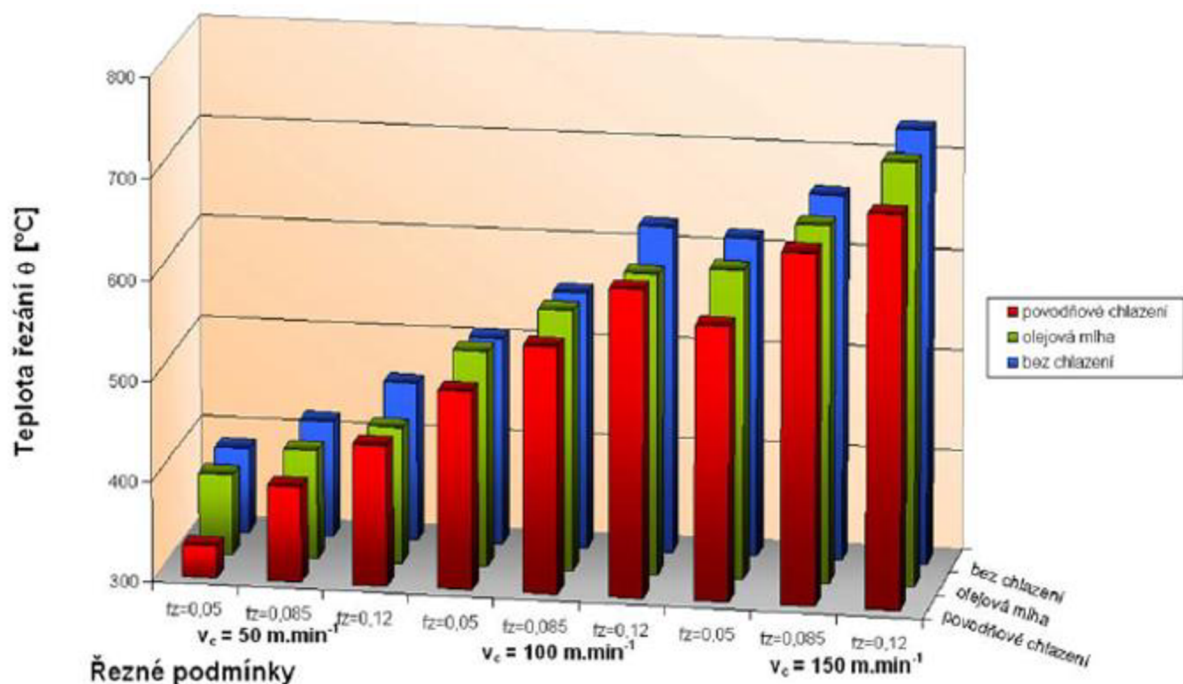
Specifické vlastnosti titanových slitin a jejich negativní dopady, které byly výše popsány u technologie soustružení, negativně ovlivňují také frézování. Jedním z největších problémů při konvenčním frézování titanových slitin je intenzivní opotřebení nástrojů a nízká produktivita obráběcího procesu. Řešením je do určité míry frézování vysokými řeznými rychlostmi a posuvy při hrubovacích operacích, kdy je snahou vhodně optimalizovat proces obrábění a nalézt nejvhodnější kompromis mezi dostatečnou trvanlivostí řezných nástrojů a vysokým výkonem obrábění. Také se dále vyvíjejí vhodné postupy frézování, při kterých se snižuje míra opotřebení nástrojů a zvyšuje se množství odebraného materiálu. [6; 7]

Oproti soustružení nastává v případě frézování další problém a tím je proměnné silové zatížení břitů nástroje způsobené vlivem proměnlivého průřezu třísky. Při nedostatečné tuhosti soustavy S–N–O–P tak může docházet k nepřesnostem ve výrobě kvůli chvění a za určitých podmínek může dojít k rezonanci soustavy a následné destrukci nástroje. [7]

### 3.2.1 Teploty při frézování

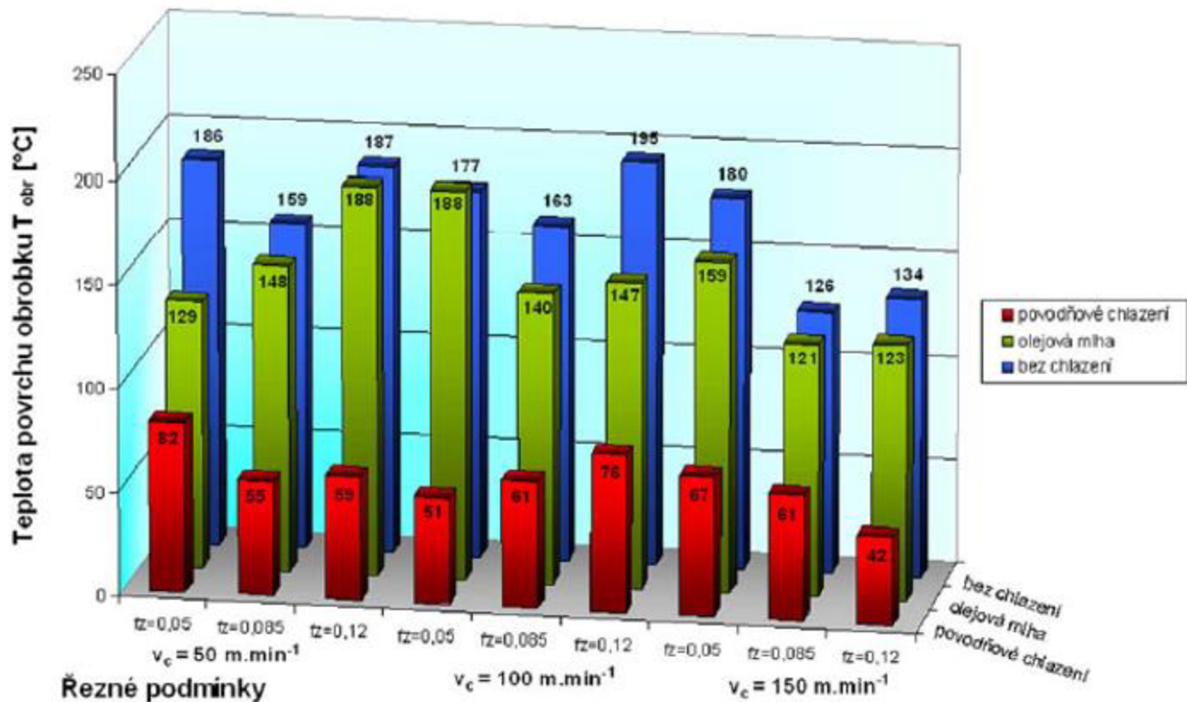
Generování vysokých teplot při frézování titanových slitin má negativní vliv jak na opotřebení nástrojů, tak na kvalitu povrchu a životnost součástí. Jak již bylo zmíněno, při obrábění slitin titanu je odvod tepla třískou výrazně menší než je tomu u běžných uhlíkových ocelí a více tepla pohltí nástroj a obrobek. Během výrobního procesu je proto snahou teploty při frézování minimalizovat volbou vhodných řezných podmínek a řezného prostředí.

Vlivem řezných podmínek a řezného prostředí na teplotu v oblasti řezu se zabývá studie [32]. Testy byly provedeny pomocí frézy s VBD a byly při nich kombinovány 3 řezné rychlosti a 3 hodnoty posuvu na zub ve 3 řezných prostředích, výsledky můžete vidět na obr. 28. Z naměřených hodnot je patrné, že při růstu obou řezných parametrů roste i teplota při obrábění. Nárůst teploty je ale intenzivnější při rostoucí řezné rychlosti než při zvyšujícím se posuvu na zub. Z hlediska nežádoucího nárůstu teplot v řezné oblasti je podle naměřených dat tedy výhodnější pro zvýšení produktivity frézování volit vyšší posuvy na zub při zachování řezné rychlosti. Řezné prostředí nemá podle výsledků tak výrazný vliv na teplotu při frézování jako řezné podmínky. Podle očekávání byly ve většině případů nejvyšší teploty naměřeny při frézování za sucha a nejnižší při přívodu procesní kapaliny. Rozdíly ale většinou byly pouze v řádu nižších desítek °C. Poměrně malý chladicí účinek procesní kapaliny byl nejspíše způsoben neefektivním přívodem média do oblasti řezu. Výrazně lepších výsledků by pravděpodobně bylo dosaženo v případě vysokotlakého chlazení.



Obr. 28 Závislost teploty v oblasti řezu na řezných podmínkách při frézování slitiny Ti6Al4V [32].

Při měření teploty obrobenej plochy byly zjištěny výrazně odlišné výsledky, viz obr. 29. Ukázalo se že řezné podmínky prakticky nemají v tomto případě na teplotu vliv. Při rozdílných řezných parametrech sice byly teploty mírně odlišné, ale nevykazovaly žádný přímý trend. Naopak u řezného prostředí je vliv na teplotu obrobenej plochy výrazný. Při použití olejové mlhy jsou teploty mírně nižší než při suchém frézování, ale při frézování s přívodem emulzní kapaliny dochází ke zdatnému ochlazení povrchu. [32]

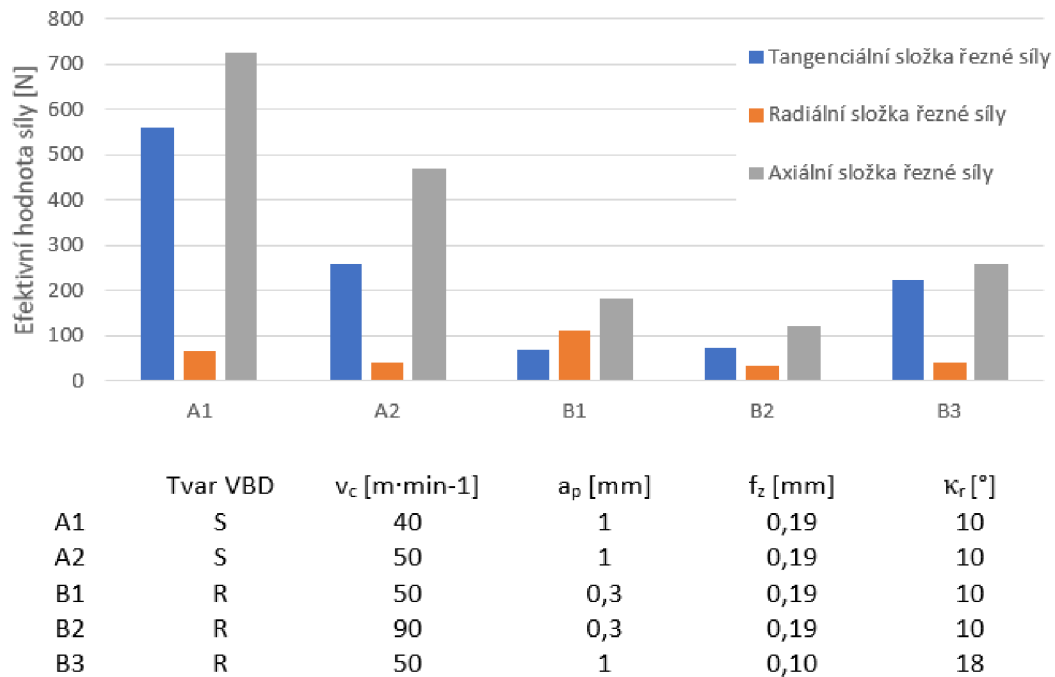


Obr. 29 Závislost teploty obrobené plochy na rezných podmínkách při frézování slitiny Ti6Al4V [32].

### 3.2.2 Silové zatížení nástrojů při frézování

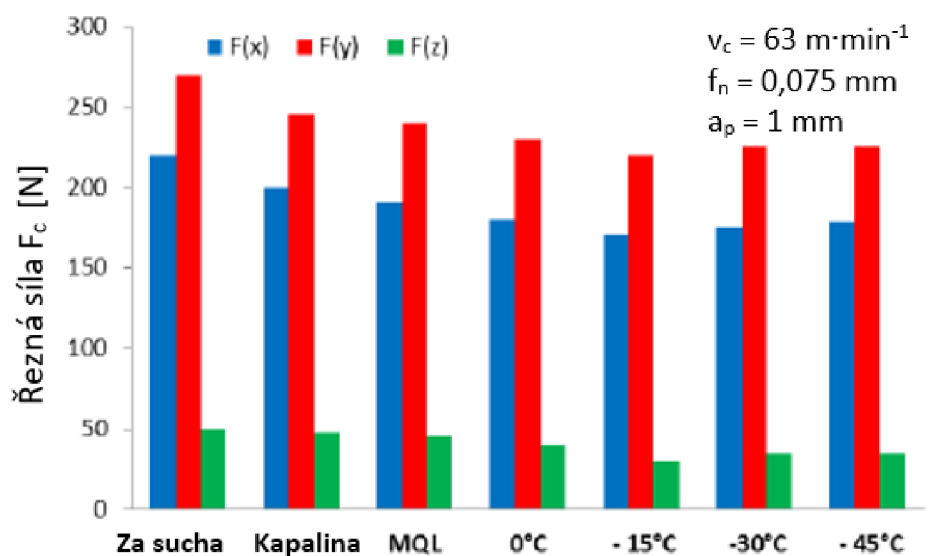
Na rozdíl od soustružení jsou rezné síly působící na břit nástroje při frézování titanových slitin vyšší než je tomu u běžných uhlíkových ocelí. Hlavním důvodem je vysoká pevnost a houževnatost materiálu, a to i za zvýšených teplot. Velikost rezné síly a jejich složek je výrazně ovlivňována zejména reznými parametry, geometrií a materiálem nástroje. Obecně platí, že největší vliv na silové zatížení břitu nástroje má posuv na zub. S rostoucím posuvem, stejně jako se šířkou záběru, mají složky rezné síly tendenci růst. Naopak tomu bývá v případě rezné rychlosti, kdy se s jejími zvyšujícími hodnotami snižuje deformační odpor materiálu vlivem vysokých teplot v místě řezu a velikost rezné síly se proto snižuje. Zatímco u ocelí a litin bývá tangenciální složka rezné síly vyšší než axiální, pro frézování titanových slitin je naopak typické, že axiální složka převyšuje tangenciální. [7]

Tento poznatek potvrzují také naměřená data ze studie [33]. Při experimentu byly měřeny průběhy složek rezných sil při frézování titanové slitiny Ti6Al4V za použití dvou nástrojů s VBD ve tvaru S a R dle ISO 11529-2 s různými reznými podmínkami a do místa řezu byla přiváděna rezná emulze na bázi rostlinného oleje. Výsledky efektivních hodnot složek rezných sil a rezné parametry můžete vidět na obr. 30. Je patrné, že ve všech případech je axiální složka rezné síly vyšší než tangenciální. Radiální složka díky nízkým hodnotám úhlu nastavení  $\kappa_r$  dosahovala poměrně malých hodnot, což je dobré z toho důvodu, že při zatížení v radiálním směru má fréza malou tuhost a vlivem proměnlivého silového zatížení by mohlo docházet k značným vibracím nástroje, což by negativně ovlivňovalo přesnost a kvalitu obrobených ploch. Výsledky tohoto experimentu také dobře ilustrují, jak důležitá je správná volba rezných parametrů a geometrie nástroje pro udržení produktivity obrábění a současného snížení rezných sil. U vzorků A1, B2 a B3 je objem odebraného materiálu za jednotku času stejný, ale rozdíly ve velikostech rezných sil jsou značné.



Obr. 30 Vliv řezných parametrů a geometrie VBD na silové zatížení nástroje [33].

Dalším faktorem ovlivňujícím silové zatížení břitu nástroje je řezné prostředí. Právě v této oblasti probíhá neustálý vývoj, při kterém je snahou dosáhnout snižování řezných sil a prodloužení trvanlivosti nástrojů bez nutnosti snižování hodnot řezných parametrů kvůli zachování výkonu obrábění. Ve větší míře má použité řezné prostředí vliv spíše na opotřebení nástrojů, než na silové zatížení. Ve studii [34] byly porovnány velikosti složek řezných sil při frézování titanové slitiny Ti6Al4V v různých řezných prostředích, viz obr. 31. Jak je z grafu patrné, nejvyšší řezné síly byly naměřeny u suchého frézování z důvodu vysokého koeficientu tření mezi nástrojem a odcházející třískou. Přívodem řezných médií obsahujících mazivo došlo k poklesu velikosti složek řezných sil díky snížení koeficientu tření oproti suchému frézování. Důležitý je také poznatek, že při aplikaci MQL s přívodem ochlazeného vzduchu na teploty pod bodem mrazu dojde k dalšímu snížení složek řezných sil.

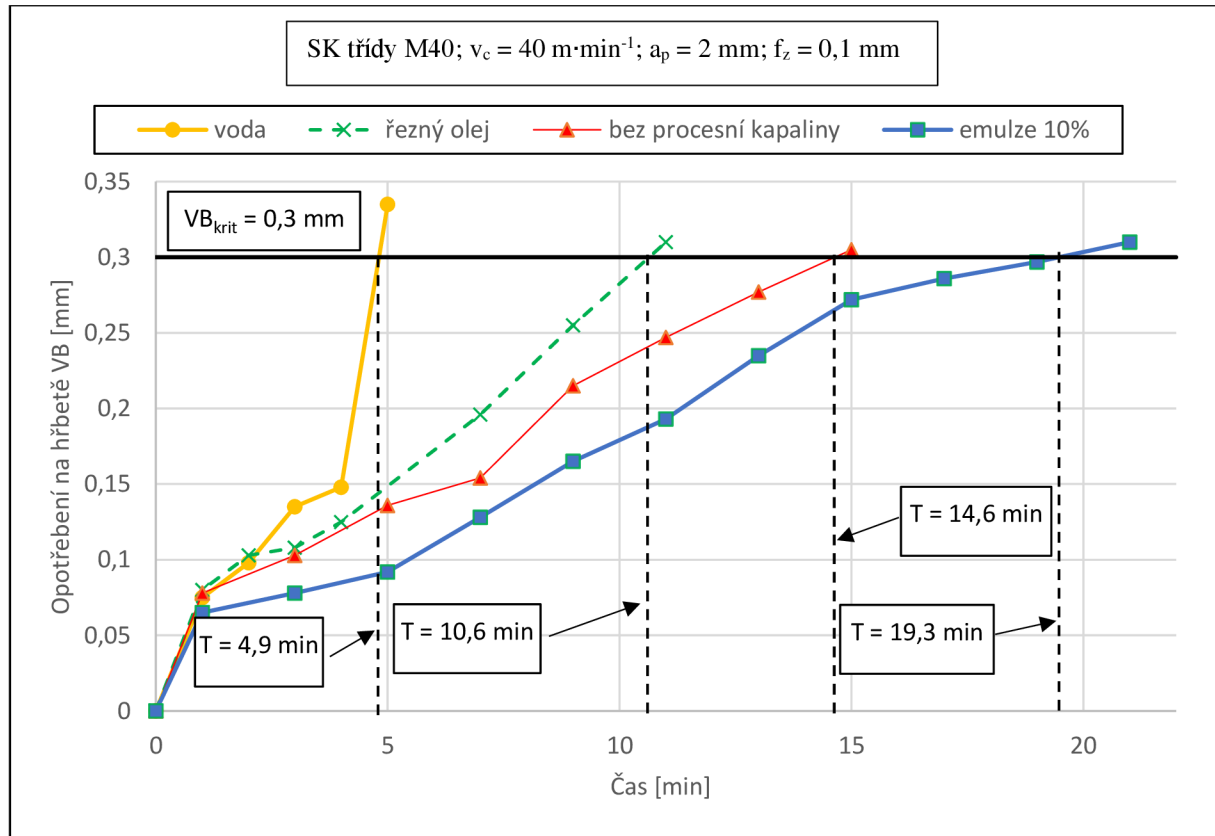


Obr. 31 Vliv řezného prostředí na silové zatížení nástroje [34].

Studie [35] se zabývala porovnáním řezných sil při frézování titanové slitiny Ti6Al4V-ELI (Grade 23) za podmínek suchého frézování, frézování s použitím řezného oleje a řezného oleje s přídavkem nanočástic TiO<sub>2</sub>. Právě díky přídavku nano aditiva do řezného oleje bylo dosaženo snížení řezných sil okolo 19 % oproti použití samotného oleje a v porovnání se suchým frézováním bylo snížení řezných sil ještě výraznější. Nano částice TiO<sub>2</sub> v oleji měly pozitivní vliv také na snížení opotřebení nástroje a vibrační.

### 3.2.3 Opotřebení nástrojů při frézování

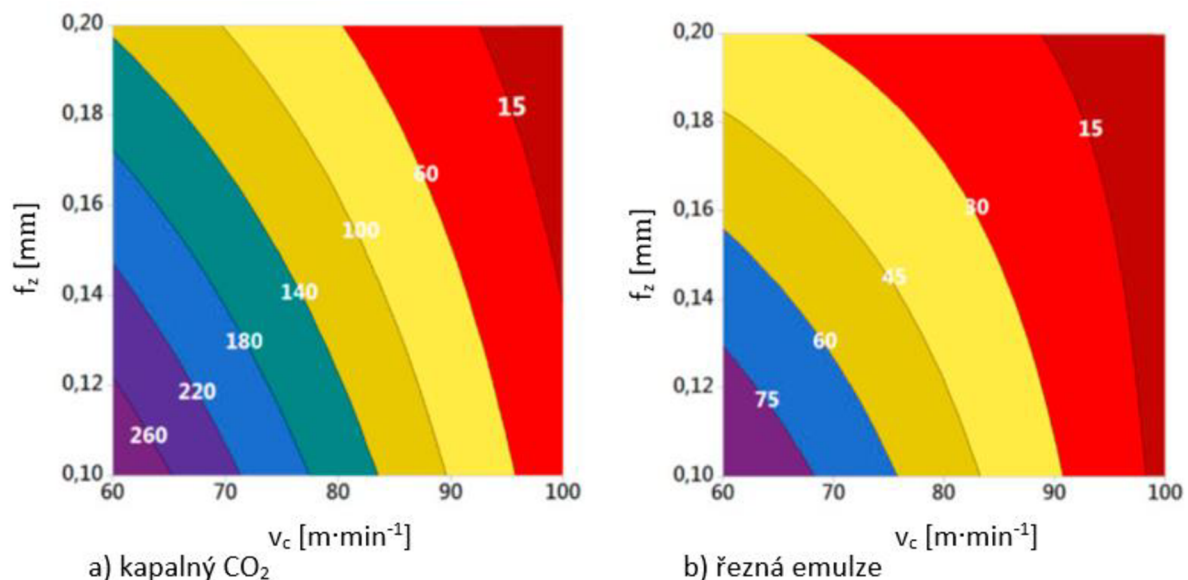
Pro frézování je typický proměnlivý průřez třísky, což má za následek nestálé silové a tepelné zatěžování nástroje. Zejména pro frézování titanových slitin je tedy nutné používat řezné materiály, které jsou odolné proti dynamickému zatěžování a prudkým změnám teplot. Titanové slitiny jsou kvůli své vysoké pevnosti charakteristické vysokou deformační prací při frézování, spojenou s tvorbou třísky ve střížné rovině. To má za následek generování velkého množství tepla, které je kvůli nízké tepelné vodivosti titanových slitin špatně odváděno z oblasti řezu. Z tohoto důvodu je pro titanové slitiny typické, že teplota v oblasti řezu dosahuje mnohem vyšších hodnot než při frézování běžných konstrukčních ocelí. V důsledku vysokých teplot podléhají nástroje intenzivnímu opotřebení již při poměrně malých řezných rychlostech. Zásadní vliv na snížení teploty a s tím souvisejícího opotřebení při frézování mají zejména vhodné řezné podmínky a aplikace procesní kapaliny. Aby došlo k prodloužení trvanlivosti nástroje, je nutné použít řeznou kapalinu s dostatečným chladicím i mazacím účinkem. Při použití řezné kapaliny pouze s chladicím účinkem (samotná voda), nebo mazacím účinkem (olej) může docházet dokonce ke snížení trvanlivosti nástroje oproti frézování bez přívodu kapaliny. Vzhledem k opotřebení nástroje ze SK je nejhorší možností použít čistou vodu. Díky přívodu řezného oleje je opotřebení nástroje méně intenzivní, ale stále je intenzivnější oproti podmínkám při suchém frézování, viz obr. 32. [7]



Obr. 32 Vliv řezného prostředí na opotřebení nástroje při frézování titanové slitiny [7].

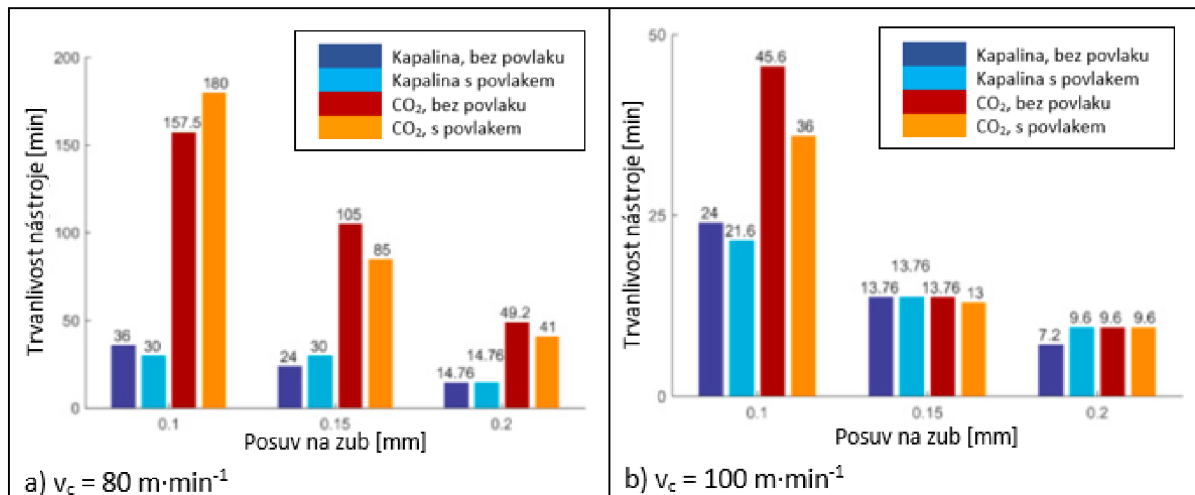
Vlivem řezného prostředí a řezných podmínek na trvanlivost povlakovaných (PVD) i nepovlakovaných nástrojů se zabývá také studie [36]. V této práci byl proveden experiment, při kterém se frézovala titanová slitina Ti6Al4V nástrojem s kruhovými VBD ze slinutého karbidu za různých řezných podmínek. V jednom případě byla do oblasti řezu přiváděna řezná emulze, ve druhém případě kapalný CO<sub>2</sub> a v obou případech byla kapalina přiváděna pod tlakem 50 barů. Během experimentu byly nástroje po určitém čase obrábění podrobeny pozorování pod optickým a elektronovým mikroskopem.

Výsledky experimentů ukazují, že řezné parametry jsou klíčovým faktorem ovlivňujícím trvanlivost nástroje. Řezné prostředí má na trvanlivost nástrojů rovněž značný vliv, ale PVD povlak TiAlN neměl na intenzitu opotřebení nástrojů téměř žádný vliv, což platilo u obou řezných médií. Na obr. 33 jsou zobrazeny vrstevnicové grafy závislosti trvanlivosti povlakovaného nástroje na řezné rychlosti a posuvu na zub, které porovnávají rozdíly mezi použitými řeznými médii. Z obou grafů je patrný pokles trvanlivosti nástroje s rostoucími řeznými parametry a také jde dobře vidět výrazné prodloužení trvanlivosti nástrojů v oblasti nižších řezných rychlostí při použití kapalného CO<sub>2</sub> oproti řezné emulzi. V oblasti vysokých řezných rychlostí je ale trvanlivost podobná pro obě řezná média.



Obr. 33 Vliv řezných podmínek a prostředí na trvanlivost nástroje při frézování slitiny Ti6Al4V [36].

Pro lepší názornost rozdílného vlivu řezného prostředí na trvanlivost nástroje při různých řezných parametrech jsou na obr. 34 vyneseny grafické závislosti trvanlivosti na posuvu na zub pro řezné rychlosti 80 a 100 m·min<sup>-1</sup>. Je patrné, že výhoda chlazení kapalným CO<sub>2</sub> oproti řezné emulzi s rostoucí řeznou rychlostí i posuvem rychle klesá. Už pro řeznou rychlost 100 m·min<sup>-1</sup> a posuv na zub 0,15 a 0,20 mm je trvanlivost prakticky identická pro obě použité řezné prostředí. V praxi je tedy pro dosažení optimální trvanlivosti nástrojů nutné nalézt vhodnou kombinaci řezného prostředí i řezných podmínek současně. Rovněž je na grafech vidět nejednoznačný vliv PVD povlaku na trvanlivost nástroje. V některých případech sice došlo k určitému prodloužení trvanlivosti použitím povlakovaných nástrojů, ale při jiných řezných podmínkách nebyl rozdíl v trvanlivosti téměř žádný, nebo dokonce nepovlakované nástroje vykazovaly mírně vyšší trvanlivost.



Obr. 34 Vliv řezných podmínek, prostředí a povlaku na trvanlivost nástroje při frézování slitiny Ti6Al4V [36].

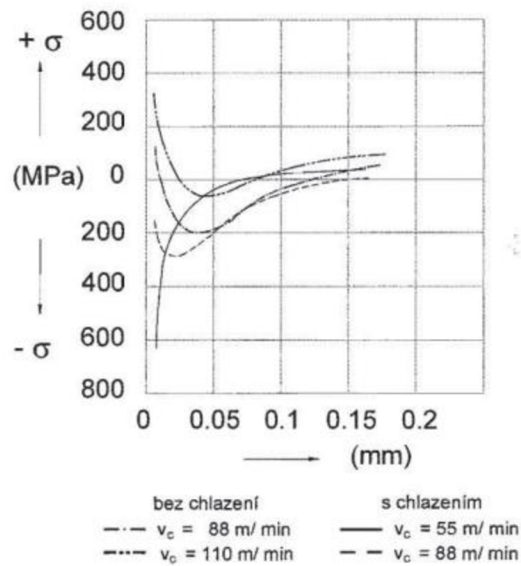
Ukazuje se, že řezné prostředí nemá zásadní vliv pouze na intenzitu opotřebení, ale také na jeho charakter. Naopak posuvová rychlost, ani povlak nástroje tak velký vliv na určení převažujícího typu opotřebení nemají. Při použití klasické řezné emulze je nejvýraznějším typem opotřebení vydrolování ostří a při intenzivnějším chlazení pomocí kapalného CO<sub>2</sub> převažuje opotřebení hřbetu a vznik hřebenových trhlin, které po delší době práce nástroje mohou způsobovat vylamování ostří. Hlavní příčinou obou typů opotřebení je cyklické tepelné i mechanické zatížení břitů nástroje způsobené cyklickou podstatou frézování. Kombinované cyklické zatěžování způsobuje vznik hřebenových trhlin, které jsou pravidelně rozmístěné a kolmé na ostří. Hřebenové trhliny vznikají jak při frézování s přívodem kapalného CO<sub>2</sub>, tak s přívodem řezné emulze. Hlavní rozdíl je ale v tom, že použité řezné médium má vliv na směr šíření trhlin. Při použití řezné emulze dochází kromě vzniku hřebenových trhlin ke vzniku a rychlému šíření bočních trhlin. V momentě, kdy se boční trhliny díky svému šíření setkají, dojde k odlomení materiálu z oblasti ostří. Příčinou vzniku a rychlého šíření bočních trhlin je pravděpodobně nerovnoměrné ochlazením nástroje při použití řezné emulze. Při frézování s přívodem kapalného CO<sub>2</sub> ale nejspíš dochází k rovnoměrnějšímu ochlazení nástroje, díky čemuž se šíření bočních trhlin a s tím související vydrolování ostří zabrání, nebo alespoň výrazně zpomalí. [36]

### 3.2.4 Vnitřní napětí při frézování

Titanové slitiny jsou kvůli své špatné tepelné vodivosti v kombinaci s působením vysokých teplot při jejich obrábění velmi náchylné ke vzniku zbytkových napětí. Jak již bylo uvedeno, na velikost a charakter vnitřních napětí má vliv zejména tepelné a silové zatížení obrobené plochy. Z tohoto pohledu jsou klíčovými parametry především řezné podmínky, prostředí a geometrie nástroje.

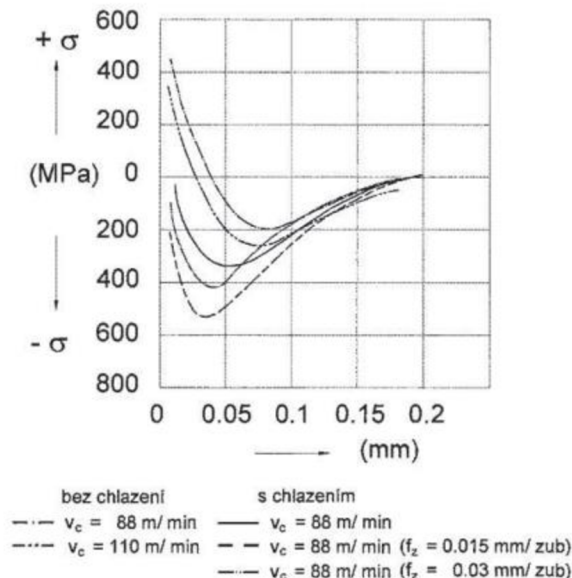
Z testů provedených při čelním frézování titanové slitiny s použitím frézy osazené břitovými destičkami s pozitivním úhlem čela bez použití procesní kapaliny, nebo jakéhokoliv způsobu chlazení, je patrné, že vnitřní napětí bylo v malé hloubce povrchové vrstvy tahové. Ve větších hloubkách přecházelo do tlakového charakteru a zpět k nule se napětí přiblížilo v hloubkách cca od 0,1-0,15 mm, viz obr. 32. Naproti tomu při frézování stejným nástrojem za menších řezných rychlostí a s použitím procesní kapaliny, vzniká v povrchové vrstvě vnitřní napětí tlakového charakteru a směrem do hloubky přechází do tahu. Malá ochylka je pouze ve tvarech jejich průběhu při rozdílných řezných rychlostech, viz obr. 35. [14]





Obr. 35 Vnitřní napětí při frézování titanové slitiny nástrojem s pozitivním úhlem čela [6].

Při frézování nástrojem osazeným břitovými destičkami s negativním úhlem čela jsou výsledky podobné jako v případě předešlého nástroje, viz obr. 36. V případě obrábění bez přívodu procesní kapaliny vznikají v povrchové vrstvě tahová vnitřní napětí, která jsou ale při stejných řezných podmínkách vyšší než v případě nástroje s pozitivním úhlem VBD. Opět již v hloubce okolo 0,03 mm ale napětí přechází do tlakového charakteru a v hloubkách okolo 0,2 mm dosahují hodnot okolo nuly. Při použití procesní kapaliny jsou napětí v povrchové vrstvě tlaková a dále do hloubky jejich absolutní hodnota roste a extrému dosahují v hloubkách okolo 0,03 mm. Dále do hloubky se napětí opět blíží k nule. [6]



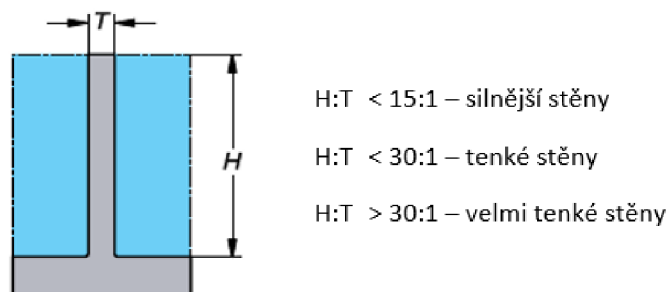
Obr. 36 Vnitřní napětí při frézování titanové slitiny nástrojem s negativním úhlem čela [6].

Podobný vliv na průběh a velikost vnitřních napětí jako u zaplavovacího chlazení procesní kapalinou má také použití olejové mlhy, a to i přestože teplota povrchu obrobku v tomto případě je výrazně vyšší než při chlazení kapalinou a blíží se spíše frézování bez chlazení. Nižší hodnoty a tlakový charakter vnitřních napětí při frézování v olejové mlze pravděpodobně souvisejí

s mírným snížením teploty obrobeného povrchu a se snížením tření mezi nástrojem a obrobkem, což má za následek menší ovlivnění obrobené plochy. Z hlediska vnitřních napětí při frézování titanových slitin se ve výsledku nejvýhodněji jeví kombinace nižších řezných rychlostí v rozsahu  $50-100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  s posuvy na zub (okolo  $0,05 \text{ mm}$ ) a s použitím procesní kapaliny. [32]

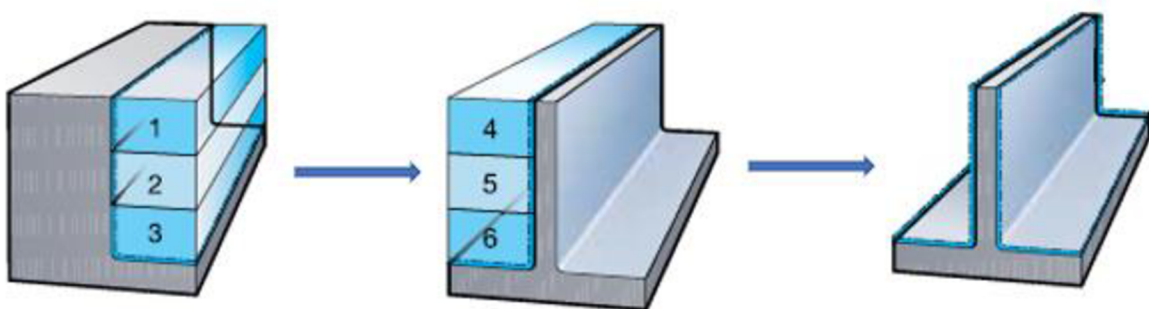
### 3.2.5 Strategie frézování tenkostěnných součástí

Součásti z titanových slitin se často používají v leteckém a kosmickém průmyslu, kde je kladen vysoký důraz na snižování hmotnosti konstrukcí. Z toho důvodu je snahou konstruktérů kromě výběru vhodného materiálu s malou měrnou hmotností také návrh tenkostěnných a žebrovitých součástí a jejich další odlehčování formou různých děr a kapes. Takovéto součásti jsou ale při obrábění náchylné ke kmitání a k deformacím. V případě titanových slitin je tento problém obzvláště závažný kvůli malému modulu pružnosti materiálu. Pokud je součást nutné vyrobit technologií frézování, je potřeba zvolit správný postup výroby. Při frézování tenkostěnných žeber je potřeba přihlídnout k jejich relativní tloušťce, tedy k poměru výšky a tloušťky žebra, viz obr. 37 a podle toho zvolit správnou strategii. [37]



Obr. 37 Skupiny žebrovitých tenkostěnných součástí [37].

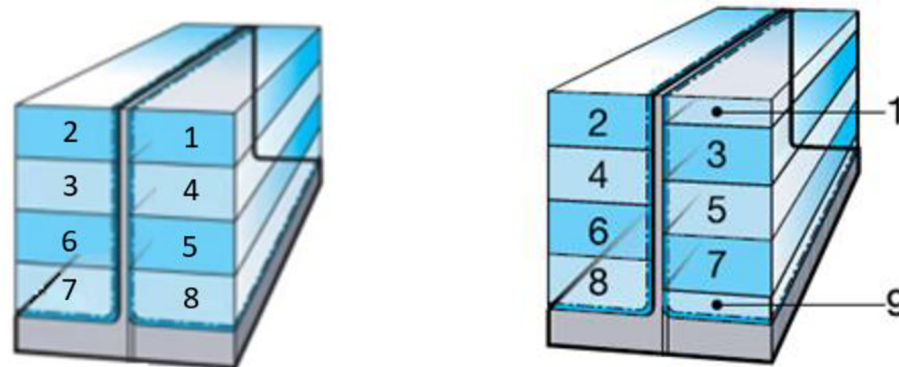
Stěny s poměrem  $H:T < 15:1$  jsou poměrně stabilní, proto se pro jejich obrobení nejčastěji využívá strategie, při které se frézuje každá strana stěny zvlášť v několika vrstvách a průchody na obou stranách se nepřekrývají, viz obr. 38. Dále je také vhodné nechat na všech plochách malé přídávky na dokončování.



Obr. 38 Postup při frézování silnějších stěn [37].

Při obrábění stěn s poměrem  $H:T < 30$  jsou problémy s vibracemi a deformacemi výraznější, proto jsou pro tento případ vhodné strategie, při kterých se po každém průchodu frézy střídá obráběná strana. Díky tomu dochází k lepší podpoře tenké stěny. Podle konkrétních podmínek a náchylnosti stěn k vibracím se strategie dále upravuje. V příznivějších podmínkách stačí použít frézování bez překryvu, kdy mají všechny průchody na obou stranách stěny stejnou hloubku a vzájemně se nepřekrývají, viz obr. 39 a. Pokud jsou ale podmínky horší a hrozí vyšší riziko deformací stěny, je lepší zvolit strategii frézování s překryvem, při které jsou vůči sobě průchody na obou stranách posunuty o určitou hloubku (většinou  $a_p/2$ ) a dochází tak k lepší

podpoře stěny v oblasti řezu, viz obr. 39 b. Po hrubování se doporučuje nechat na všech plochách přídavek na dokončení 0,2-1 mm. [37; 38]

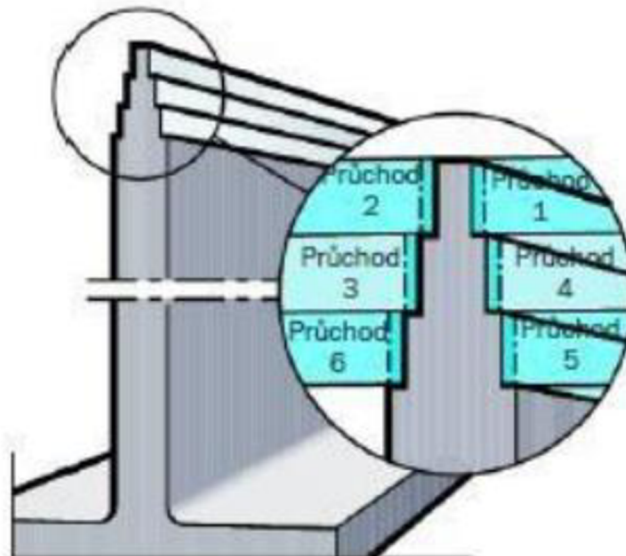


a) frézování bez překryvu

b) frézování s překryvem

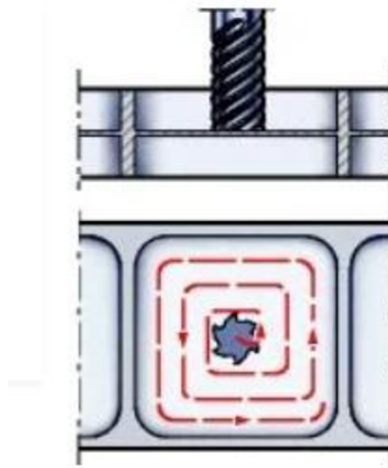
Obr. 39 Postup při frézování tenkých stěn [37].

Při obrábění velmi tenkých stěn s poměrem  $H:T > 30$  se pro zamezení nežádoucích jevů opět využívá střídavého frézování stran a pro zajištění vyšší stability navíc obrábění probíhá schodovitě, viz obr. 40. Díky tomu dochází k podpoře vyšších částí stěn s menší tloušťkou od spodních masivnějších částí. Uvedeným schématem se postupuje až do obrobení finální tloušťky celé stěny.



Obr. 40 Postup při frézování velmi tenkých stěn [38].

S problematikou tenkých stěn se můžeme setkat také v případě frézování součástí s velkými kapsami a malou tloušťkou dna. Obecně se uvádí, že dno kapsy se považuje za tenkostěnné, pokud je poměr tloušťky dna a délky nebo šířky kapsy menší než 1:30. V takovém případě může při frézování opět docházet k vibracím a deformacím tenké stěny. Pro lepší výsledky se doporučuje použít nástroj s VBD, nebo v případě monolitních fréz s prudším stoupáním šroubovice pro minimalizování axiální složky řezné síly, která má největší vliv na průhyb dna. Dráhu nástroje je vhodné volit kruhovou inrerpolací ze středu kapsy k jejím okrajům, viz obr. 41. Tím dosáhneme lepší stability obrábění. Pro dokončovací operaci je vhodné nechat vyšší přídavek kvůli eliminaci průhybu obráběného dna. [37; 39]



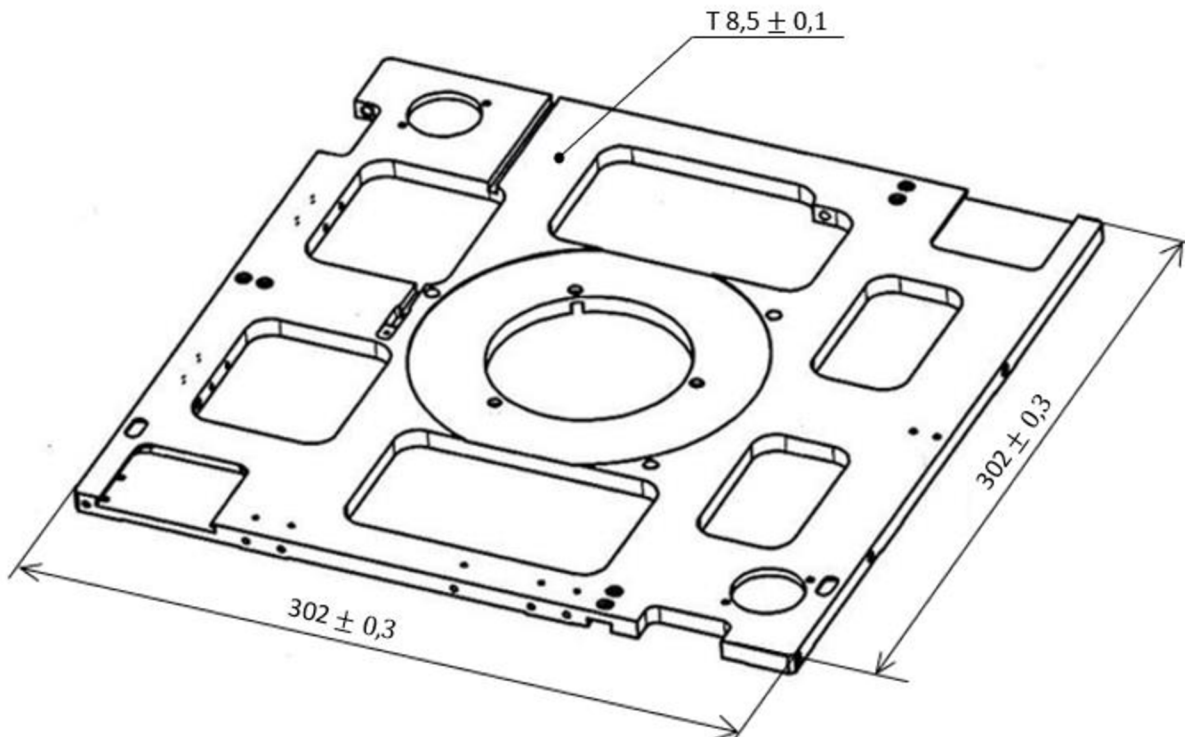
Obr. 41 Postup při frézování kapes s tenkým dnem [37].

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE

Téma této práce bylo inspirováno reálným problémem, který byl řešen ve firmě Frentech Aerospace s.r.o., což je česká výrobní společnost sídlící v Brně, zaměřená především na technologii obrábění. Frentech Aerospace je významným dodavatelem zejména v oblastech leteckého a vesmírného průmyslu, mikroelektroniky, lékařské techniky, vakuové a přístrojové techniky, mikrovlnných radarových a rádiových systémů. Vyrábí se zde díly z širokého spektra materiálů od běžných a korozivzdorných ocelí, přes hliníkové, titanové a niklové slitiny až po plasty. Tato firma se řadí mezi členy Svazu průmyslu a dopravy ČR, je také členem České vesmírné aliance a podílí se na dodávkách při realizaci projektů ESO (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere) a ESA (European Space Agency). Díky modernímu vybavení a technologiím je Frentech Aerospace také držitelem řady certifikátů. [40]

Problematika ve výrobě spočívala v tvarových deformacích tenkostěnných a velmi členitých obrobků z titanové slitiny Ti6Al4V, viz obr. 42. Kvůli tomu nebylo možné po obrobení dosáhnout požadované přísné tolerance rovinnosti dané zákazníkem a díly musely být po obrobení přerovnávány, což je poměrně komplikované kvůli obtížné tvařitelnosti titanových slitin za studena z důvodu velkého odpružení materiálu.

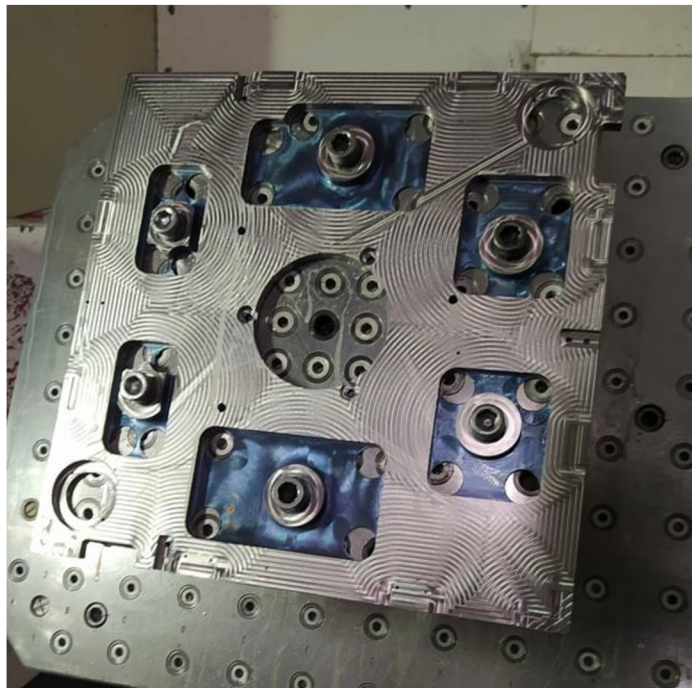
Deformace obrobků byly pravděpodobně z velké části způsobeny nerovnoměrným zbytkovým napětím v materiálu po částečně nesymetrickém postupu obrábění, který souvisel s lehkou nesymetrií tvaru součástí. Právě kombinace působícího napětí s nízkou tuhostí součásti zapříčiněnou nízkým modulem pružnosti titanové slitiny a velmi malou tloušťkou v porovnání s ostatními rozměry, je z pohledu deformace takového dílu značně nepříznivá. Při výrobě ve firmě byly zkoušeny různé postupy výroby, ale vzhledem k velmi malým výrobním sériím (obvykle po jednom až dvou kusech) nebyl velký prostor k experimentování a výsledky kvůli malému počtu vyrobených dílů nebyly vždy jednoznačně průkazné.



Obr. 42 Model součásti a její hlavní rozměry.

## 4.1 Postup výroby ve firmě

Při prvním výrobním postupu byla polotovarem pro výrobu deska z titanové slitiny Ti6Al4V v žíhaném stavu o tloušťce 12,7 mm a rozměrech 340x310 mm. V první fázi byl polotovár hrubován s přídavkem 0,5 mm na čelech a 0,2 mm na bocích. Během hrubování byl polotovár upínán na 4 polohy. V první poloze byl polotovár upnut mezi svírací čelisti a byly do něj vyvrtány díry pro pozdější upnutí pomocí šroubů a díry do rohů všech oken, které později odlehčovaly nástroj a usnadňovaly tak frézování v oblasti rohů. V dalších třech polohách už byl polotovár upínán šrouby přímo ke stolu frézky, viz obr. 43. Jak je patrné, všechna okna byla pouze předhrubována tak, aby zbytkový materiál na dně kapes poskytoval dostatečnou oporu pro šrouby. Po hrubovací operaci následovalo tepelné zpracování v podobě žíhání ke snížení pnutí při teplotě 593 °C po dobu 4 hodin s následným ochlazením na vzduchu. Další fází bylo frézování na hotovo včetně vrtání a řezání závitů. Poté ještě následovaly zámečnické práce v podobě odjehlení a sražení některých hran a dořiznutí závitů.



Obr. 43 Upnutí obrobku v poslední fázi hrubování.

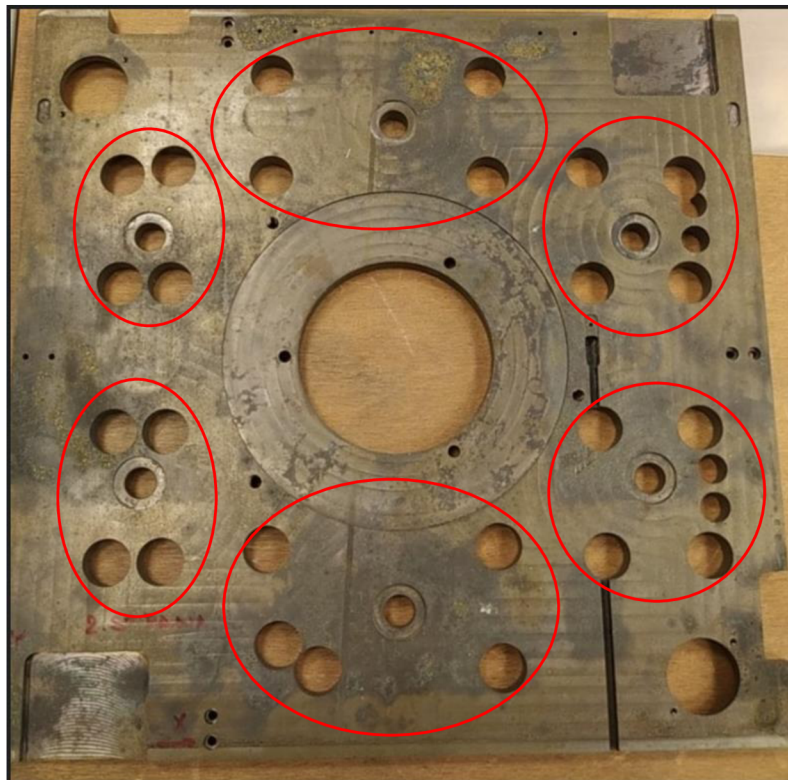
V průběhu výroby byla měřena rovinnost dílu a podle očekávání bylo dosaženo nejhorších výsledků po hrubování. Po žíhání na snížení pnutí ale součást také ani zdaleka nedosahovala z výkresu předepsané rovinnosti čelních ploch 0,05 mm. Pokud by příčina deformací dílů spočívala pouze ve zbytkových napětích po obrábění, mělo by při správně provedeném žíhání teoreticky dojít jejich minimalizaci a tím i k vyrovnání dílů. Protože ale byl obrobek stále významně deformován, přichází v úvahu několik příčin.

Jednou z nich je nedostatečné snížení vnitřních napětí způsobené nesprávně provedeným žíháním. Vzhledem k informacím popsaným v kap. 1.3 by měly vnitřní napětí výrazně klesnout již při teplotách okolo 590 °C a při krátkých časech žíhání pod 1 hodinu. V parametrech žíhání by tedy problém nejspíš být neměl. Nevhodné by ale teoreticky mohlo být ochlazování na vzduchu, které by pro takovouto součást mohlo být příliš rychlé, nebo může být problém v jiných procesech probíhajících v materiálu, které způsobují deformaci součásti při žíhání.

Problém by také mohl být v nevhodném upnutí pomocí šroubů. V tomto případě se spodní plocha polotovaru silou upne k rovnému stolu frézky, čímž dojde k jeho určité elastické deformaci. Při frézování jsme potom sice schopni obrobek rovinný, ale po odepnutí obrobku by

mělo docházet k vymizení elastické deformace vzniklé upnutím obrobku, a tedy i k deformaci obrobene původní roviny. Pokud se takto obrobek neupne z obou stran rovnoměrně, mohlo by pak teoreticky docházet ke vzniku nerovných čelních ploch, které budou mít vyšší odchylky také od rovnoběžnosti. V extrémních případech by mohlo docházet k superpozici elastických napětí vzniklých při upnutí a napětí vzniklých při obrábění až do míry kdy v určitých oblastech dojde k překročení meze kluzu materiálu, a tedy ke vzniku nevratných plastických deformací.

Na další součásti byla vyzkoušena změna tepelného zpracování a změny v postupu frézování. Před hrubovací operací byl přidán krok tepelného zpracování polotovaru stávající se z ohřevu na teplotu 760 °C rychlostí 200 °C/h, následovala výdrž na teplotě po dobu jedné hodiny a poté byla pec vypnuta a polotovar chladnul pomalu v peci. Po tepelném zpracování následovala hrubovací operace, která ale byla upravena tím způsobem, že bylo vynecháno předfrézování oken a v těchto oblastech byly pouze vyvrtány otvory pro šrouby a v rozích, viz obr. 44.

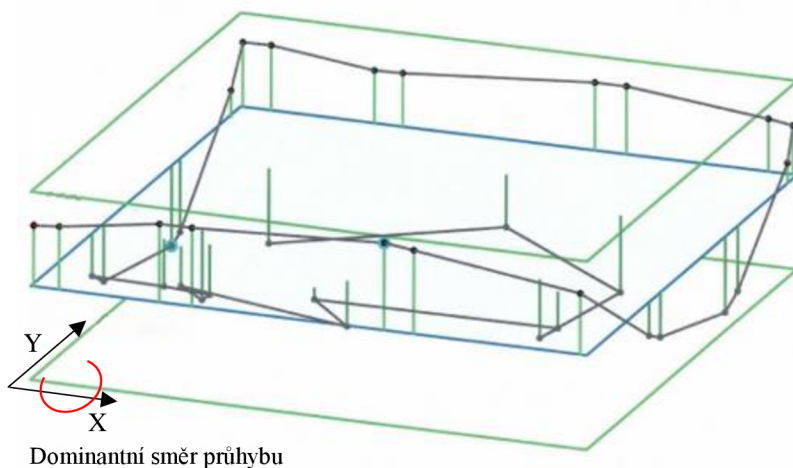


Obr. 44 Obrobek po hrubování a žihání na snížení pnutí s vyznačenými oblastmi oken.

Po hrubování následovalo opět žihání na snížení pnutí, které bylo také upraveno. Teplota žihání byla zvýšena na 660 °C s výdrží na teplotě byla prodloužena na dobu 6 hodin ve snaze dosáhnout maximálního poklesu zbytkových napětí. Po žihání byla měřena rovinnost obou čelních ploch, viz obr. 45. Jak vidíme, tak i po upraveném postupu žihání byla součást deformována do té míry, že toleranční pole rovinnosti na obou plochách několikanásobně převyšovala předepsanou toleranci 0,05 mm. Vidíme také, že v šířkách tolerančních polí obou ploch je rozdíl 0,062 mm, z čehož vyplývá to, že plochy vůči sobě nejsou ideálně rovnoběžné. Z toho se dá usuzovat, že deformace dílu nejsou způsobeny pouze čistým průhybem desky, ale pravděpodobně také určitými nepřesnostmi v obrobenech plochách. Ještě zajímavější je ale pohled na grafické znázornění naměřených bodů při vyhodnocování rovinnosti obou ploch. Vypadá to totiž, že průhyby ploch jsou vůči sobě otočeny. 1. strana je prohnutá spíše kolem osy x a 2. strana naopak podléhá ohybu výrazněji kolem osy y. Nicméně naměřená rovinnost byla lepší než v případě předešlé součásti vyrobené předchozím postupem. Na druhou stranu se ale výrazně nelišila od hodnot naměřených u kusů vyrobených v předchozích zakázkách rovněž předchozím postupem. Vzhledem k tomu, že i při stejném postupu výroby u předešlých kusů

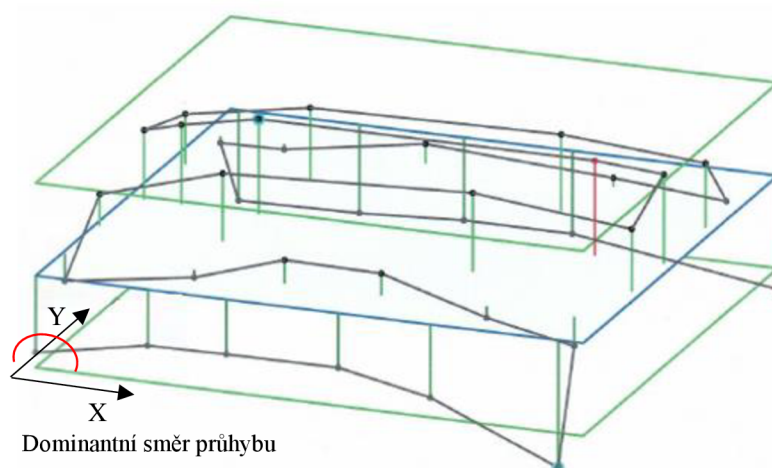
byly naměřené hodnoty rovinnosti rozdílné, nedá se z výsledků i vzhledem k velmi malému počtu kusů vyvodit jasný závěr. V tomto případě byl navíc dosavadní postup ve výrobě změněn ve všech třech krocích, takže nejde jasně pozorovat, jaké měly jednotlivé změny výroby vliv na výslednou rovinnost.

El. No.	Line No	Element	Pkt. Ref.	X-Coord. Nominal	Y-Coord. Up/Lo	Z-Coord. Z-Angle Actual	Diameter Dist./Ang. Dev./Error	Variance
1	4	Rovina Gauss	36	-0.010	-0.082	277.867		0.177
1	44	Rovina Rovinnost		90.002	90.017	0.017	0.177	0.127
2	46	Rovina Gauss	35	0.013	-0.007	277.839		0.239
2	83	Rovina Rovinnost		89.997	90.001	0.003	0.239	0.189



Horní tol.	0.100
Dołní tol.	-0.100
Počet bodů	36
Min./max. bod	23 / 5
Std. odch. * 4	0.266
Rovinnost	0.177
Max. vzdál	0.093
X	423.970
Y	256.859
Z	278.051

- Rovina  
- Zóna tolerance  
• Bod mimo tol.  
o Min./max. bod



Horní tol.	0.100
Dołní tol.	-0.100
Počet bodů	35
Min./max. bod	6 / 19
Std. odch. * 4	0.297
Rovinnost	0.239
Max. vzdál	0.101
X	304.426
Y	377.112
Z	277.936

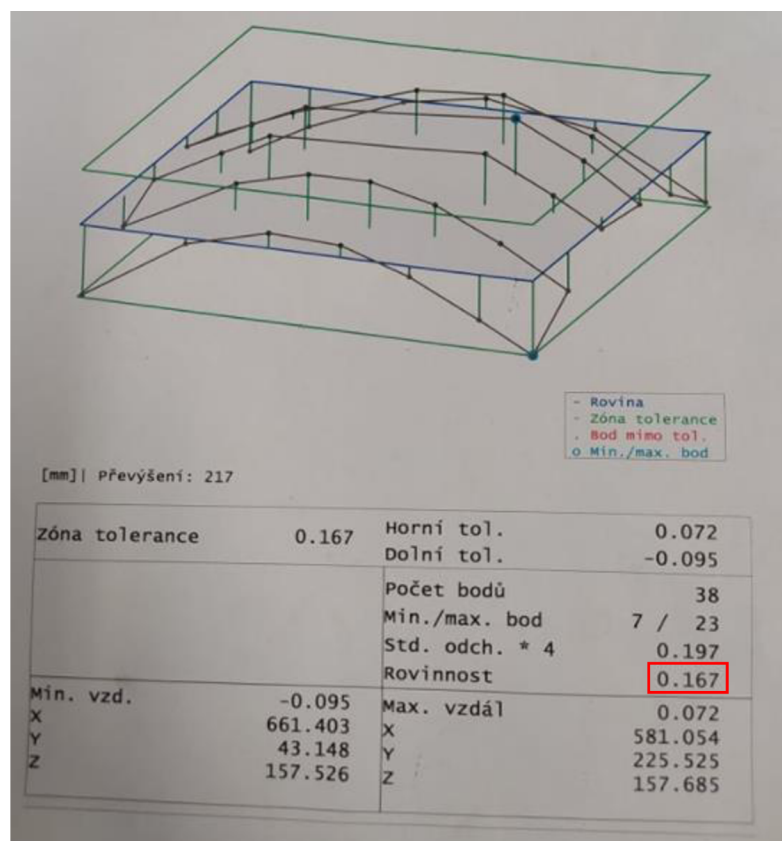
- Rovina  
- Zóna tolerance  
• Bod mimo tol.  
o Min./max. bod

Obr. 45 Protokol z měření rovinnosti obou stran po žihání.



Upravena byla také dokončovací operace. V první fázi dokončování nebyl obrobek ke stolu frézky přišroubován, ale přilepen. Hlavní myšlenka lepení spočívala v upnutí obrobku v nedeformovaném stavu díky čemuž mělo být dosaženo obrobení přesnější roviny. Mělo by teoreticky také dojít k lepší podpoře materiálu v rozích a v obvodových částech dílu, které nemusely být při upnutí pomocí šroubů v přímém kontaktu s deskou stolu. Během obrábění tak mohlo v těchto kritických oblastech vlivem působících sil od nástroje docházet k dalším deformacím, kterým by se mělo pomocí lepení zamezit. Upnutí lepením probíhalo tak, že se napřed obrobek ustavil do polohy pomocí čepů a následně byl po svém obvodu přilepen lepidlem Loctite 415. Jedná se o vteřinové lepidlo na bázi metylkyanokrylátu, které je vhodné zejména k lepení kovů [41]. Bylo zjištěno, že toto lepidlo se v kontaktu s řeznou emulzí rozpouští, což na jednu stranu usnadňovalo odepnutí dílu po obrobení, ale na druhou stranu tento fakt komplikoval frézování, protože nebylo možné do řezu přivádět tento typ procesní kapaliny. Frézování proto probíhalo za sucha a pro eliminaci vyšších teplot v oblasti řezu a intenzivnějšího opotřebení nástroje byla snížena řezná rychlost ze  $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$  na  $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Po obrobení jedné strany byla přeměřena rovinnost, viz obr. 46. Je patrné, že rovinnost se oproti stavu po žihání mírně zlepšila, ale odchylka od předepsané tolerance byla stále výrazná. Po měření byl obrobek ustaven na obrobenou plochu a opět přišroubován ke stolu frézky. Po finálním obrobení a přeměření byl hotový kus přerovnáván, aby bylo dosaženo předepsané tolerance rovinnosti 0,05 mm.

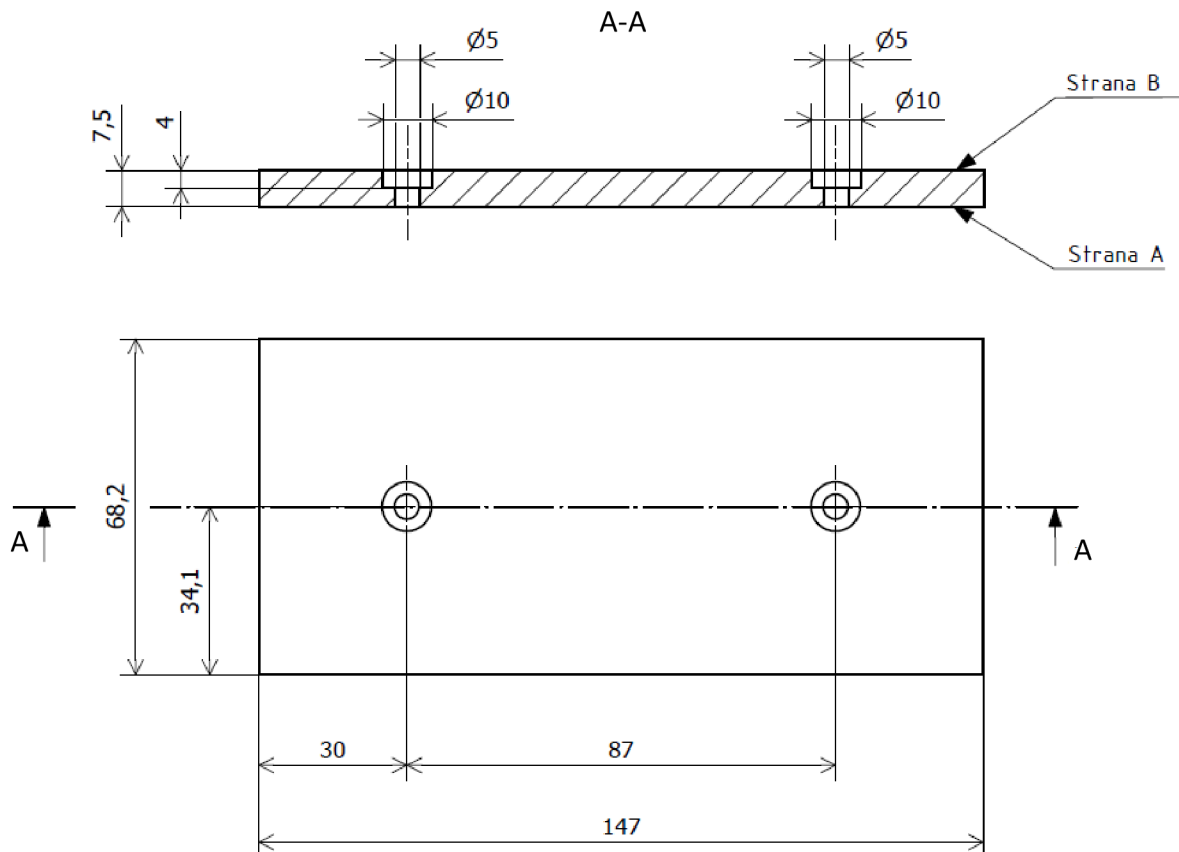


Obr. 46 Protokol z měření rovinnosti po obrobení jedné strany při upnutí lepidlem.

## 4.2 Příprava experimentu

Protože pouze odhadujeme, co mohlo být hlavní příčinou výroby nevyhovujících dílů a nevíme přesně, které parametry a které operace na výslednou rovinnost čelních ploch obrobků měly největší vliv, byl navržen experiment, který by mohl umožňovat pozorování vlivu jednotlivých parametrů a operací výroby na rovinnost tenkostěnných součástí z titanových slitin.

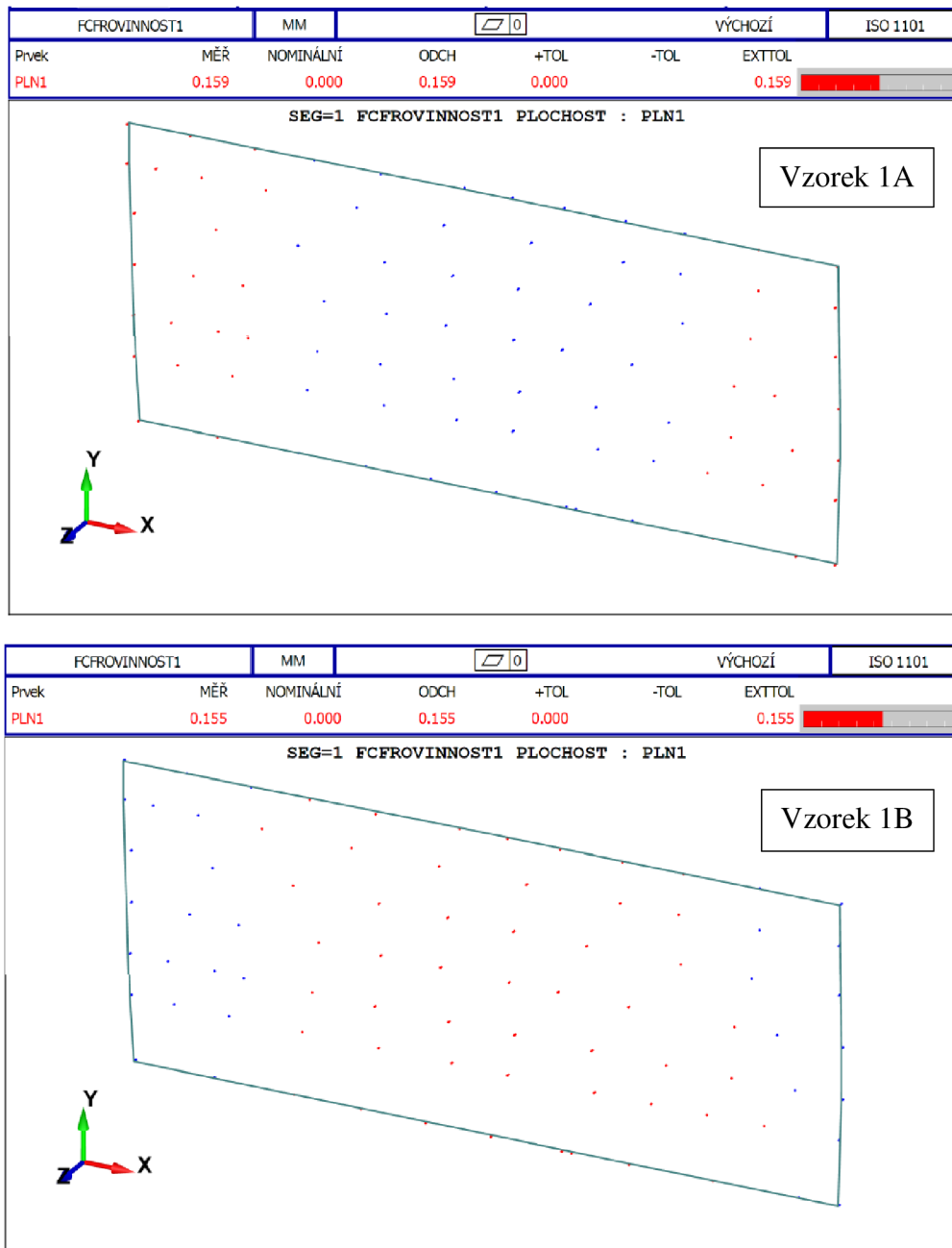
Jako základní polotovar byla vybrána válcovaná deska z titanové slitiny Ti6Al4V o tloušťce 7,5 mm a rozměrech 420 x 150 mm, která byla následně nařezána na 6 rovnoměrných vzorků o rozměrech 147 x 68,2 mm, které byly označeny čísly 1-6. Protože titanové slitiny jsou náchylné na tepelné zatížení, které do materiálu vnáší vnitřní napětí, byla pro řezání vzorků zvolena technologie vodního paprsku, při které se neuvolňuje tepelná energie. Do každého vzorku byly vyvrtány dvě průchozí díry pro pozdější upnutí pomocí šroubů M5. Zhloubení pro hlavy šroubů byly vyfrézovány pouze z jedné strany každého vzorku, aby bylo možné simulovat negativní vliv nerovnoměrného obrábění obou stran. Strany se zhloubením byly označeny písmenem B a protilehlé strany měly označení A. Rozměry vzorků jsou znázorněny na obr. 47.



Obr. 47 Rozměry vzorků.

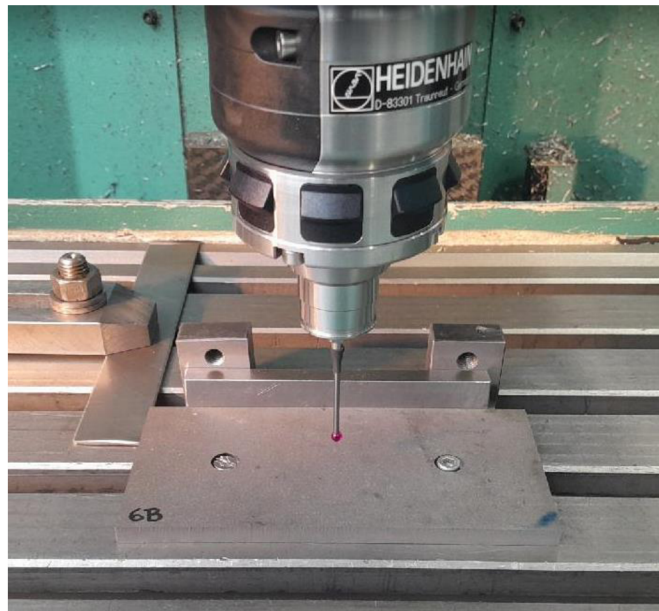
Před obráběním byla měřena rovinnost obou stran všech vzorků, aby později bylo možné vyhodnotit vliv původních odchylek od rovinnosti, způsobených výrobou a dělením polotovaru, na výsledky po obrábění. Pro ukázkou můžete vidět měřicí protokoly pro obě strany vzorku č. 1 na obr. 48. Je patrné, že velikosti tolerančního pole rovinnosti jsou pro obě strany až na malou odchylku (tisíciny milimetru) prakticky stejné. V kombinaci s rozložením měřicích bodů vůči nulové rovině (modré body leží pod nulovou rovinou a červené nad ní) na obou stranách se zdá, že odchylky od rovinnosti jsou způsobeny pouze rovnoměrným průhybem vzorku. Stejný závěr lze vyvodit i z naměřených hodnot ostatních vzorků, viz tab. 4. Je zajímavé, že v rovinnostech jednotlivých vzorků jsou výrazné rozdíly i přestože byly všechny vyrobeny stejným způsobem a pocházejí ze stejného polotovaru. Jednou z možných příčin je i to, že původní polotovar byl prohnutý a po nařezání nebyly strany vzorků označeny (označeny byly až po vytvoření zhloubení). Zhloubení tedy byla vyfrézována náhodně a jejich výroba mohla způsobit další drobné deformace buď ve směru původního průhybu válcovaného polotovaru (zvětšení průhybu), nebo proti němu (zmenšení průhybu) v závislosti na tom, jestli bylo zhloubení

vytvořeno na vnější nebo vnitřní straně ohybu. Je ale otázka, jak velké tyto deformace mohly být. V praxi by ale pro stabilnější výsledky při nerovnoměrném obrábění obou stran bylo lepší frézovat danou stranu vždy buď na vnější, nebo na vnitřní straně ohybu.

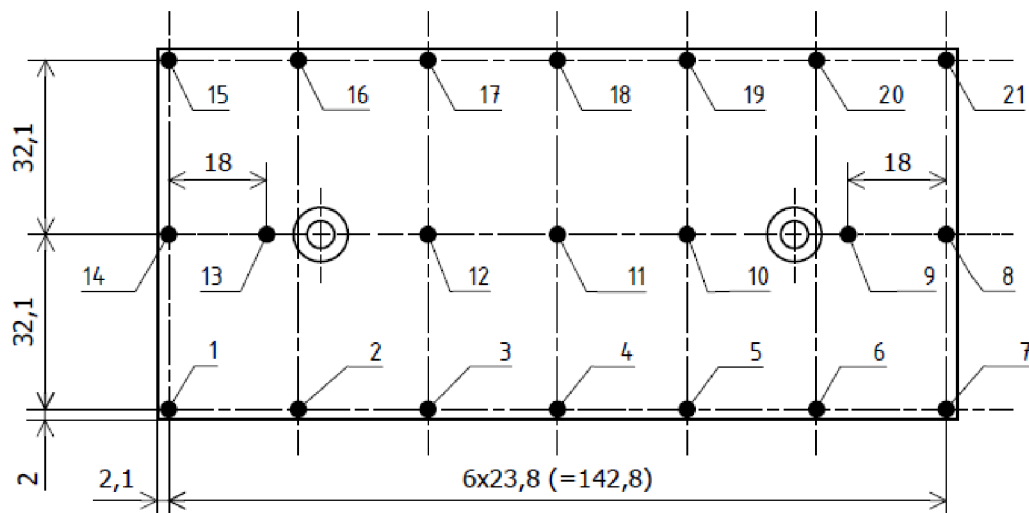


Or. 48 Protokoly z měření rovinnosti vzorku č. 1.

Protože jednou z možných příčin vzniku odchylek od rovinnosti mohou být deformace polotovarů vzniklé při šroubování vzorků ke stolu frézky, bylo před frézováním provedeno měření rovinnosti vzorků na straně B v upnutém stavu pomocí dotykové měřicí sondy, viz obr. 49, aby bylo možné zjistit do jaké míry se vzorky při šroubování zdeformují, naměřené hodnoty můžete vidět v tab. 4. Měřené body bylo potřeba rozložit tak, aby byly zachyceny všechny oblasti, kde by teoreticky mělo při ohybu docházet k maximálním odchylkám od nulové roviny a aby bylo zároveň možné pozorovat průhyb v obou osách. Měřené body proto byly rozloženy rovnoměrně po celém obvodu a také ve středové oblasti v podélném směru, viz obr. 50.



Obr. 49 Měření rovinnosti vzorku pomocí dotykové sondy v upnutém stavu.



Obr. 50 Rozložení měřených bodů na vzorku.

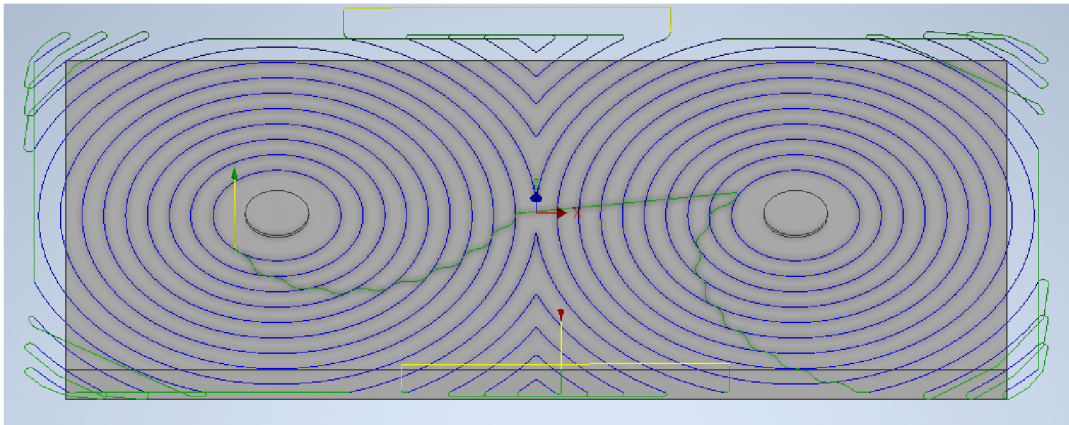
Při porovnání výsledků z měření rovinnosti v neupnutém a v upnutém stavu v tab. 4, si můžeme všimnout, že u všech vzorků došlo deformací způsobenou upnutím ke zlepšení rovinnosti. Rozdíly se výrazněji projeví spíše u více deformovaných vzorků.

Tab. 4 Rovinnosti vzorků [mm] před upnutím a po upnutí.

Stav vzorku	Strana vzorku	Číslo vzorku					
		1	2	3	4	5	6
Před upnutím	A	0,159	0,068	0,063	0,129	0,112	0,086
	B	0,155	0,056	0,070	0,127	0,112	0,073
Po upnutí	B	0,063	0,051	0,044	0,078	0,061	0,030
Změna rovinnosti [%]		59,4	8,9	37,1	38,6	45,5	58,9

### 4.3 Hrubovací operace

Jak již bylo uvedeno, všech 6 vzorků bylo před frézováním upnuto dvěma šrouby M5 ke stolu frézky a jejich poloha byla vymezena pevnými dorazy. Vzorky byly sousledně frézovány na konzolové frézce FV 25 CNC A s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Čelně byly obráběny obě strany vzorků do hloubky 0,6 mm totožným programem s tím, že na stranu B byla na každém vzorku po obrobení čela dodatečně vyfrézována drážka do hloubky 0,6 mm kvůli simulaci nepříznivých podmínek při nesouměrném obrábění obou stran. Dráhy nástroje byly vygenerovány pomocí programu Inventor CAM 2022, viz obr. 51 a následně byly pomocí vestavěného postprocesoru převedeny do NC kódu pro Heidenhain.



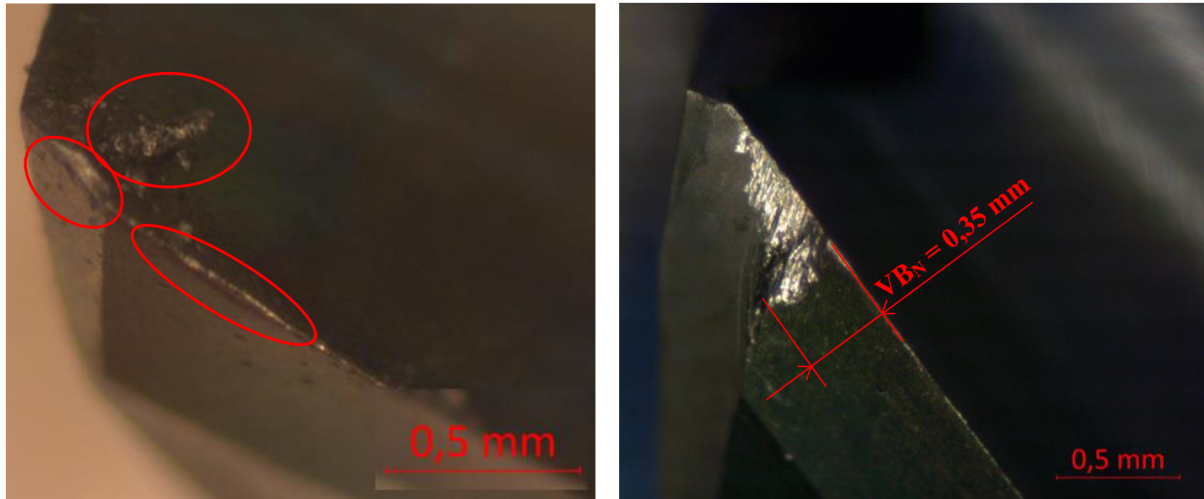
Obr. 51 Vygenerované dráhy nástroje v programu Inventor CAM 2022.

Pro začátek byla vybrána monolitní karbidová fréza E4S N SUMA o průměru 10 mm od firmy Pramet. Jedná se o válcovou čtyřbřitou frézu s úhlem čela  $10^\circ$  a úhlem stoupání  $40^\circ$ . Tento nástroj je vyroben ze slinutého karbidu tvořeného 90% WC a 10% Co o velikosti zrn  $0,8 \mu\text{m}$  a s původním povlakem z AlCrN. Výrobce je tato skupina nástrojů doporučován pro frézování měkkých a korozivzdorných ocelí, superslitin, neželezných kovů a jejich slitin (včetně slitin titanu) [42]. Tato fréza byla ale přestřována a poté byla povlakována třívrstevným povlakem TiN + AlTiN + CrAlSiN. Řezné podmínky doporučené výrobcem pro tento nástroj můžete vidět na obr. 52. Protože řezné podmínky uvedené v katalogu platí pro velké hloubky záběru  $a_p$  a v našem případě byla hloubka záběru pouze 0,6 mm, byl zvýšen posuv na zub  $f_z$  z 0,03 na 0,05 mm a aby byl alespoň mírně eliminován nárůst průřezu třísky, byla snížena radiální hloubka záběru  $a_e$  z 3,2 na 3 mm. Řezná rychlost byla zvolena přímo z katalogu, tedy  $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

S TITANIUM > 32 HRC									
D	Z	$v_c$	$f_z$	n	$v_f$	$a_e$	$a_p$	$a_e$	$a_p$
3,0	4	50	0,009	5308	191	4,5	1,00	1,5	3,00
4,0	4	50	0,012	3981	191	6,0	1,30	2,0	4,00
5,0	4	50	0,015	3185	191	7,5	1,60	2,5	5,00
6,0	4	50	0,018	2654	191	9,0	2,00	3,0	6,00
8,0	4	50	0,025	1990	199	12,0	2,50	4,0	8,00
10,0	4	50	0,030	1592	191	15,0	3,20	5,0	10,00
12,0	4	50	0,035	1327	186	18,0	3,60	6,0	12,00
16,0	4	50	0,035	995	139	24,0	5,10	8,0	16,00
20,0	4	50	0,040	796	127	30,0	6,40	10,0	20,00

Obr. 52 Řezné podmínky z katalogu k nástrojům skupiny E4S N SUMA pro titanové slitiny [42].

Obrábění každého vzorku začínalo vždy stranou B a během frézování byla externím přívodem do oblastí řezu vedena procesní kapalina. Abychom měli představu o opotřebení nástroje v průběhu experimentu, byly po 3 obrobených plochách (celý vzorek č. 6 a strana B vzorku č. 5) pořízeny fotografie opotřebení všech břitů a následně znovu po obrobení další tři ploch (strana A vzorku č. 5 a vzorek č. 4), viz obr. 53. Vidíme, že po obrobení 3 stran bylo patrné mírné opotřebení na hřbetě, dále stopy po nárůstku na čele a také otupení břitu. Po obrobení 6 stran bylo dominantní opotřebení ve formě vrubu na hřbetě. Tento vrub se tvořil v oblasti kontaktu nástroje s povrchovou vrstvou materiálu, která byla po výrobě polotovaru válcováním za tepla pravděpodobně nasycena intersticiálními prvky ze vzduchu a měla proto výrazně vyšší pevnost a tvrdost, než materiál v hlubších vrstvách pod povrchem a nástroj proto byl pravděpodobně v této oblasti výrazněji opotřeben.



a) Opotřebení po obrobení 3 stran

b) Opotřebení po obrobení 6 stran

Obr. 53 Opotřebení nástroje značky Pramet v průběhu obrábění.

Po obrobení 3. vzorku bylo vyhodnoceno opotřebení na hřbetě jako hraniční. Během obrábění bylo vyšší opotřebení v závěrečné fázi zřetelné i po zvukové stránce a projevil se také tvorbou větších otřepů na hranách frézované drážky. Zdálo se také, že poslední vzorek byl výrazněji deformovaný. Během obrábění pravděpodobně došlo k mírnému prohnutí obrobku ve směru upínací síly, čímž došlo ke snížení předpětí upínacích šroubů, které byly po obrobení lehce povoleno. Deformace vzorku během obrábění mohla souviset s intenzivnější plastickou deformací obrobené plochy jako důsledek vyššího opotřebení nástroje. S tím se pojí vznik vyšších vnitřních napětí v obrobku, které mají velmi negativní vliv právě na deformaci tenkostěnných součástí z titanových slitin s malou tuhostí. Průhyb obrobku během výroby by měl mít velký vliv na rovinnost plochy, protože pokud se bude obrobek v průběhu frézování deformovat a body, které by měly ležet v teoretické rovině obrábění, vůči sobě změní během procesu polohu, nebude možné dosáhnout obrobení přesné roviny. Aby došlo alespoň k mírné eliminaci tohoto negativního jevu, byly při dalším obrábění mezi hlavy šroubů a vzorek přidány pružné podložky, které by při mírné deformaci vzorku ve směru upínací síly měly alespoň částečně pomoci k udržení předpětí ve šroubech.

Po opotřebení byl první nástroj nahrazen frézou GÜHRING RF 100 F a s ní byly obrobeny další tři vzorky v pořadí 3–1 a použity byly stejné řezné podmínky jako u nástroje Pramet. Opět se jednalo o přebrušovanou a znovu povlakovanou frézu. Po obrobení posledního kusu bylo opět zdokumentováno opotřebení na hřbetě, viz obr. 54. Můžeme vidět, že opotřebení na hřbetě je výrazně menší než u frézy Pramet a zároveň vidíme, že nejintenzivnější opotřebení vzniklo v oblasti, která byla ve styku s povrchovou zpevněnou vrstvou materiálu po válcování.

Pro kvalitní výrobu, minimalizaci vnitřních napětí a možnost dodržení rozměrových a geometrických tolerancí je tedy opravdu nutné používat ostré nástroje, pokud možno s minimálním opotřebením. Zejména při dokončovacích operacích je tato zásada velmi důležitá a bylo by proto vhodné používat nové nástroje. Aby ale nedocházelo ke zbytečně vysokým nákladům za nástroje, daly by se mírně opotřebené nástroje již nevhodné pro dokončování použít pro hrubování příštích součástí. Po překročení kritériálního opotřebení by se po přestřeni opět daly při hrubovacích operacích bez problémů použít.



Obr. 54 Opotřebení na hřbetě u frézy GÜHRING.

Jak bylo zmíněno výše, při vyšším opotřebení se opět tvořili výraznější otřepy na hranách frézované drážky. Porovnání otřepů vytvořených téměř neopotřebenou frézou značky Pramet po obrobení prvního vzorku a vysoce opotřebenou frézou GÜHRING po obrobení posledního vzorku můžete vidět na obr. 55.



a) Drážka po průchodu neopotřebeného nástroje



b) Drážka po průchodu opotřebeného nástroje

Obr. 55 Porovnání otřepů při různých stádiích opotřebení nástrojů.

Po obrobení byly vzorky skenovány na 3D skeneru a nasnímaná data byla zpracována v programu GOM Inspect 2018. Z naskenovaných bodů byly vytvořeny povrchové sítě čelních ploch, které byly následně proloženy nulovou rovinou. Rovinnost ploch poté byla vyhodnocována jako rozdíl mezi maximální a minimální odchylkou od nulové roviny. Výsledky z analýzy rovinnosti jsou uvedeny v tab. 5. Jak můžete vidět, v hodnotách rovinnosti jsou výrazné rozdíly, mezi 1. a 3. vzorkem frézovaným nástrojem Guhring je rozdíl v rovinnosti vyšší než 100 %, a to i přestože byla při experimentu snaha zachovat všechny vnější vlivy v průběhu neměnné. Podle výsledků se zdá, že velký vliv na výslednou rovinnost povrchu má především původní rovinnost vzorku v kombinaci s opotřebením nástroje. Vidíme, že vzorky obrobené v nejopotřebenějších fázích nástrojů, měly výrazně nejhorší rovinnost. Tyto vzorky navíc také měly ve stavu před obrobením nejhorší rovinnost. Je tedy otázkou, zda má výraznější vliv opotřebením nástroje, nebo původní rovinnost. Současně si můžeme všimnout, že první dva vzorky obrobené frézou Guhring dosahují po obrobení výrazně lepší rovinnosti oproti prvním dvěma vzorkům obrobeným frézou Pramet. Jednou z možných příčin je právě rozdíl v rovinnostech neobrobených vzorků. Svůj vliv na rozdíly ale také mohlo mít stabilnější upnutí díky využití pružných podložek při frézování nástrojem Guhring.

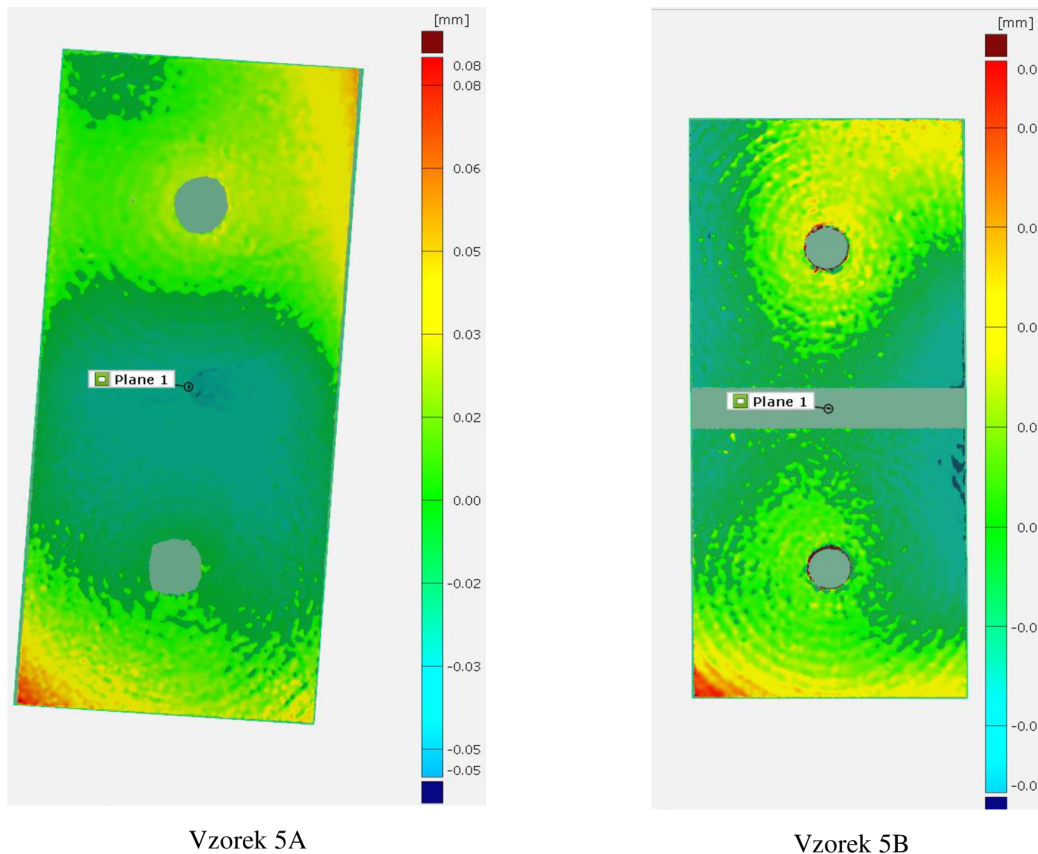
Tab. 5 Porovnání rovinnosti vzorků [mm] po obrobení a před obrobením.

Strana vzorku po obrobení	Číslo vzorku					
	1	2	3	4	5	6
	Pořadí obrábění frézou Guhring			Pořadí obrábění frézou Pramet		
X před obrobením	3.	2.	1.	3.	2.	1.
A po obrobení	0,20	0,08	0,08	0,19	0,13	0,13
B po obrobení	0,17	0,07	0,08	0,12	0,12	0,08
A před obrobením	0,159	0,068	0,063	0,129	0,112	0,086
B před obrobením	0,155	0,056	0,070	0,127	0,112	0,073

Díky skenování povrchu navíc můžeme kromě absolutní hodnoty rovinnosti poznat také detailní tvar průhybu ploch, což nám může pomoci pochopit pochody vedoucí k odchylkám od rovinnosti. Pokud by obě plochy byly obrobeny do přesné roviny, obě plochy by byly dokonale rovnoběžné a součást by byla rovnoměrně prohlá vlivem vnitřních napětí, měly by být rovinnosti na obou stranách teoreticky téměř stejné – malé rozdíly by byly způsobeny pouze rozdílem poloměrů vnitřní a vnější strany ohybu. Tento případ by teoreticky nastal, pokud bychom dokázali vzorek šroubováním dokonale přitisknout k rovné desce stolu frézky. V reálném případě ale pravděpodobně nastává problém v tom, že se při upínání šrouby vzorek deformuje jen do určité míry, jak bylo uvedeno v tab. 4. Dojde tedy k tomu, že spodní plocha, která je ve styku se stolem, má i po přišroubování stále poměrně značnou odchylku od rovinnosti a naproti ní obrobíme rovinu. Po odepnutí se vzorek vlivem vnitřních napětí ohne a poté se celý proces opakuje při obrobení druhé strany. Obrobíme tedy rovinnou plochu naproti ploše, která má od rovinnosti určitou odchylku. Tento proces by mohl tedy být hlavní příčinou rozdílných rovinností na protilehlých plochách vzorků.

Z tvarů skenovaných ploch vyplývá, že 4 vzorky byly deformovány čistým průhybem, ovšem u vzorků č. 4 a 5 měly obě plochy na obou vzorcích v podélném směru charakter vnitřní strany ohybu, tedy ve středních oblastech ležely body pod úrovní nulové roviny a na okrajích nad ní. Analýzu tvaru obou ploch na vzorku č. 5 můžete vidět na obr. 56. Tento neočekávaný jev by pravděpodobně mohl mít příčinu ve výše popisované problematice deformace obrobku při obrábění a s tím souvisejícím povolováním upínacích šroubů.





Obr. 56 Analýza tvaru čelních ploch vzorku č. 5 v programu GOM Inspect 2018.

#### 4.4 Tepelné zpracování vzorků

Protože vnitřní napětí negativně ovlivňují nejen námi zkoumané deformace obrobků, ale také životnost součástí, je v praxi zařazení žhání ke snížení pnutí do výrobního postupu zvláště u slitin titanu velmi důležité, a proto nechybělo ani v této práci. Tepelné zpracování v našem případě spočívalo v rovnoměrném ohřevu rychlostí 200 °C/h na teplotu 650 °C s následnou výdrží na teplotě po dobu 4 h. Pro maximální požadovaný efekt žhání byly vzorky ochlazeny pomalu v peci. Toto tepelné zpracování bylo do postupu zařazeno i s nadějí, že snížení vnitřních napětí dopomůže k částečnému vymizení elastických deformací, čímž by mohlo dojít ke zlepšení rovinnosti. Po žhání proto byla na všech vzorcích opět přeměřena rovinnost a hodnoty byly zaneseny do tab. 6, kde jsou porovnány s naměřenými hodnotami po obrobení. Vidíme, že po žhání skutečně došlo ke zlepšení rovinnosti čelních ploch oproti stavu po obrobení.

Tab. 6 Porovnání rovinnosti vzorků [mm] po obrobení a po žhání.

Fáze výroby	Strana vzorku	Číslo vzorku					
		1	2	3	4	5	6
Po 1. obrobení	A	0,20	0,08	0,08	0,19	0,13	0,13
	B	0,17	0,07	0,08	0,12	0,12	0,08
Po žhání	A	0,15	0,06	0,05	0,16	0,09	0,06
	B	0,14	0,05	0,05	0,11	0,08	0,05

Kdyby byl stejnému tepelnému zpracování podroben i polotovár před obráběním, došlo by pravděpodobně ke zlepšení rovinnosti polotovarů, což by se mělo promítnout také do lepších výsledků po obrobení. Otázkou je, do jaké míry by se poté projevilo další žíhání po obrobení. Vzhledem k tomu, že se po žíhání deformace snížily pouze z menší části, je možné, že nedošlo k dostatečnému snížení vnitřních napětí.

Možné také je, že během procesu žíhání nedojde k výraznému vymizení průhybu součástí, způsobeného vnitřním napětím, ale spíše k zplastizování materiálu v původní deformované poloze. Během žíhání ke snížení pnutí totiž dochází k tomu, že vnitřní napětí díky snížené mezi kluzu za zvýšené teploty způsobí plastickou deformaci materiálu. Součást by tak z větší části mohla teoreticky zůstat ve stejném stavu i po výrazném snížení zbytkových napětí.

V každém případě by ale pro získání lepší rovinnosti po žíhání mohlo pomoci fixování součásti během tepelného zpracování. Vhodné by proto bylo upevnění dílu mezi dvě rovinné desky, tak jak bylo popsáno v kap. 2.3. Díky tomu by došlo k vyrovnání součásti a po vyžhání by v této podobě měla setrvat i v nezátíženém stavu.

#### 4.5 Dokončovací operace

V tomto kroku byly součásti frézovány pouze čelně, drážka už znovu obráběná nebyla. Protože při předešlé frézovací operaci byly během obrábění nástroje intenzivně opotřebovávány a zároveň aby byly vytvořeny podmínky pro minimální ovlivnění povrchové vrstvy materiálu, což je pro dokončovací operace nezbytné, byla snížena řezná rychlost z 50 na 45  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$  a hloubka záběru byla snížena na 0,4 mm. Jako nástroje tentokrát byly vybrány dvě frézy značky Iscar s označením EC-HS 10-10C10CF-E66 900 a každá byla použita pro obrobení 3 vzorků. Aby tentokrát byl rozdíl v opotřebení nástroje u jednotlivých vzorků menší, byla u všech vzorků napřed obrobena strana B a potom u všech strana A.

Protože se z předešlé frézovací operace zdá, že jednou z hlavních příčin nevyhovující rovinnosti je deformování nerovného polotovaru při upínání pomocí šroubů, byly v tomto kroku 3 vzorky (1-3) upnuty opět šrouby a další 3 vzorky (4-6) do svěráku, viz obr. 57. Při upínání do svěráku by teoreticky nemělo tolik záležet na deformaci polotovaru jako v případě upínání šrouby. Hlavní rozdíl v těchto dvou způsobech upnutí by měl být v tom, že po přišroubování a zdeformování vzorku závislého na jeho předešlém průhybu, obrobíme rovinnou plochu, ale po odepnutí má díl tendenci vrátit se do původního stavu a opět se prohnut. Při upnutí do svěráku sice pravděpodobně také dojde k určité deformaci, ale obrobek by měl být upnut stabilněji a nezávisle na své předešlé deformaci.



Obr. 57 Vzorek upnutý ve svěráku.

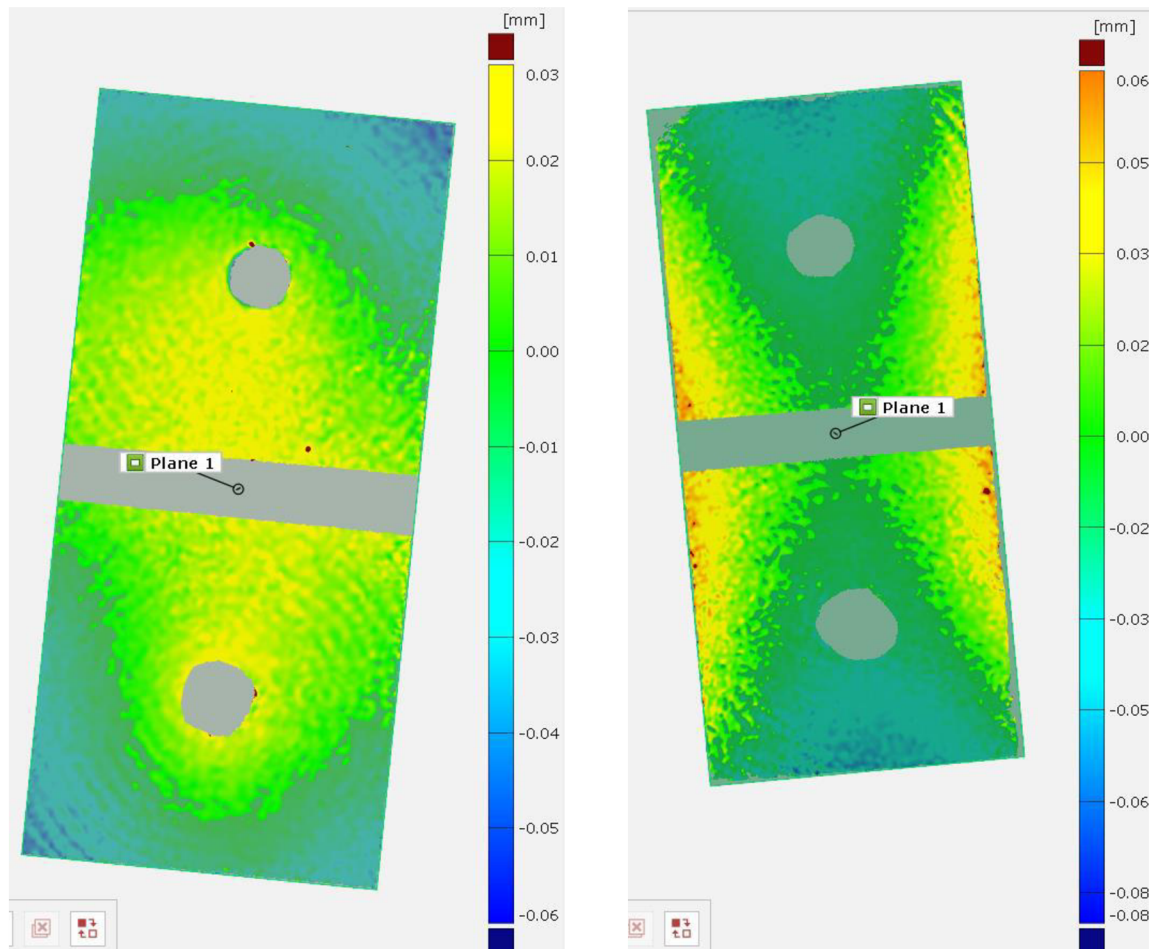
Po obrobení opět došlo k měření rovinnosti na obou čelních plochách vzorků. Jejich hodnoty v porovnání s hodnotami z předešlých operací jsou uvedeny v tab. 7. Aby bylo možné zjistit, zda je upnutí stabilní a je možné dosáhnout obrobení rovinného povrchu v upnutém stavu, byla navíc pomocí měřicí sondy měřena rovinnost strany B u všech vzorků po obrobení ještě v upnutém stavu, viz tab. 7. Vidíme, že při obou způsobech upnutí a u všech vzorků byla dosažená rovinnost prakticky stejná (všechny hodnoty v rozmezí 0,004 mm) a můžeme tedy říct, že upnutí bylo v obou případech stabilní a nedocházelo během procesu k výraznějším deformacím obrobků. Vzhledem k tomu, že se ve všech případech rovinnost před odepnutím dosahovala hodnot  $0,01 \pm 0,002$  mm, dá se říct, že odchylky od rovinnosti vzorků nebyly způsobeny nerovností obrobene plochy.

Tab. 7 Porovnání rovinnosti vzorků [mm] po všech výrobních krocích.

Fáze výroby	Strana vzorku	Číslo vzorku					
		1	2	3	4	5	6
Po 1. obrobení	A	0,20	0,08	0,08	0,19	0,13	0,13
	B	0,17	0,07	0,08	0,12	0,12	0,08
Po žihání	A	0,15	0,06	0,05	0,16	0,09	0,06
	B	0,14	0,05	0,06	0,11	0,08	0,05
		Upnutí šrouby			Upnutí do svěráku		
Po 2. obrobení	A	0,14	0,09	0,07	0,14	0,12	0,12
	B	0,17	0,09	0,08	0,14	0,14	0,13
Po 2. obrobení v upnutém stavu	B	0,012	0,009	0,009	0,010	0,008	0,008

U kusů upnutých šrouby (1-3) můžeme vidět, že výsledná rovinnost po obrobení do velké míry souvisí s rovinností před obrobením. Z výsledků rovněž vyplývá, že strany průhybu před obrobením a po obrobení byly totožné. Tedy v případech, kdy měla strana charakter vnějšího ohybu (body uprostřed ležely nad nulovou rovinou a body po okrajích pod ní) před obrobením, měla ho i po obrobení. Dá se tedy usuzovat, že odchylky od rovinnosti v tomto případě byly způsobeny převážně tím, že se prohnutý díl silou upnul k rovině desce stolu, poté byla obrobena rovina a po odepnutí se vzorek opět prohnul do své původní polohy, čímž došlo také k ohybu dobře obrobene plochy.

U kusů upnutých do svěráku vidíme výrazně odlišné výsledky od předchozího způsobu upnutí. Výsledná rovinnost u všech vzorků byla až na malé odchylky stejná a nezávisela na deformaci vzorku před obrobením. Rovněž průhyb vzorků měl rozdílný charakter oproti kusům upnutým šrouby, viz obr. 58. Zatímco šroubované vzorky měly nejvýraznější průhyb v podélném směru, vzorky upnuté do svěráku měly mnohem výraznější průhyb v příčném směru, tedy ve směru sil působících od čelistí svěráku a na obou stranách všech vzorků měl průhyb stejný charakter – oblasti vzorků které byly v kontaktu s čelistmi svěráku vykazovaly kladnou odchylku od nulové roviny a ve vnitřní oblasti zápornou.



a) Vzorek 2 strana B při upnutí šrouby

b) Vzorek 5 strana B při upnutí do svěráku

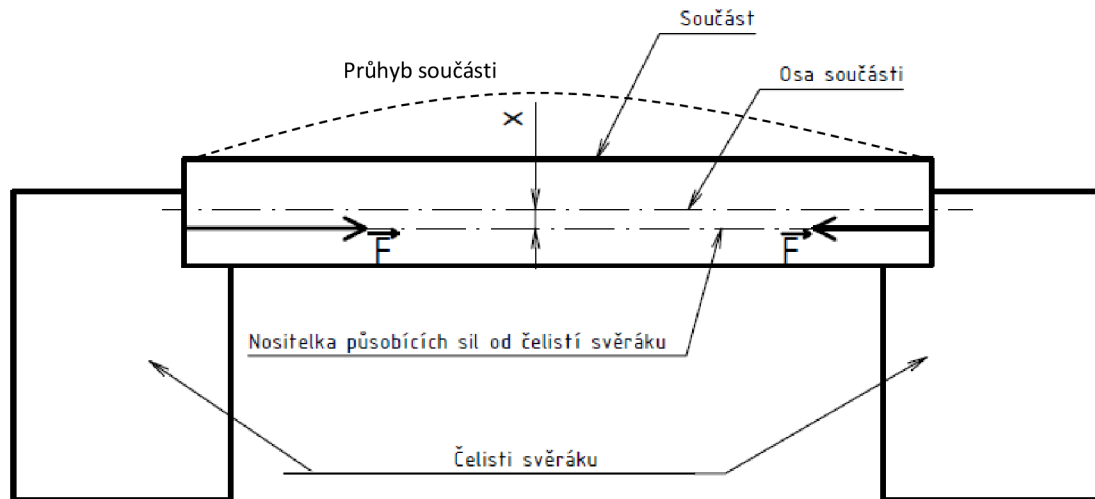
Obr. 58 porovnání průhybů vzorků při rozdílných způsobech upínání.

Odchytky od rovinnosti při upínání svěrákem tedy byly vzhledem k prakticky stejným rovinnostem na obou stranách vzorků, pravidelným tvarům průhybu a výrazně lepší rovinnosti obroběných ploch v ještě upnutém stavu, opět s největší pravděpodobností způsobeny převážně elastickým deformováním vzorků upínáním a následným zpětným odpružením po odepnutí.

Deformace dílů při upínání do svěráku vzniká kvůli působení nerovnoměrného ohybového momentu v celém průřezu zapříčiněného posunutou nositelkou upínacích sil vůči ose součásti, viz obr. 59. Tento jev vzniká v důsledku toho, že čelisti svěráku nejsou v kontaktu s celými bočními plochami, ale jenom s jejich částmi. Vůči ose dílu tak vzniká ohybový moment upínacích sil na rameni  $x$ . Prakticky tak dojde ke ztrátě vzpěrné stability a vzorek se prohne. Čím větší je nepoměr mezi výškou bočních stěn a délkou jejich kontaktu s čelistmi svěráku, tím bude efekt ztráty vzpěrné stability výraznější. Vliv na průhyb v tomto případě má také rozměr součásti ve směru upínacích sil. S její rostoucí délkou bude průhyb výraznější. Vzhledem k tomu, že je v našem případě šířka vzorku poměrně malá, a i přesto byly deformace poměrně velké, nebyl by tento způsob upnutí pro součásti větších rozměrů vhodný. Průhyb by se dal eliminovat buď zvýšením styčné plochy mezi součásti a čelistmi svěráku, a to ideálně na celou boční plochu, nebo snížením upínací síly. Sílu upnutí ale nemůžeme libovolně snížit a jsme nuceni ji dimenzovat vzhledem k velikosti řezných sil. Proto by zejména při hrubovacích operacích bylo upnutí rozměrných součástí nevýhodné. Pomoci by také mohlo upravení čelistí tak, aby měl ohybový moment při upnutí tendenci ohýbat součást v opačném směru, za

současného doplnění svěráku o přípravek, který by plnil podpůrnou funkci prohýbajícího se dílu.

Nevýhodou při upnutí do svěráku je také to, že i v případě, kdybychom měli dokonale rovinný díl, došlo by při jeho upínání k určité deformaci. Při upnutí šrouby by ale při upnutí rovinného dílu na rovinný stůl k deformacím nedocházelo. Přišroubováním dílu k rovné ploše dojde na rozdíl od upnutí do svěráku k jeho vyrovnání.



Obr. 59 Znáornění stavu součásti při upínání do svěráku.

---

## ZÁVĚR

V teoretické části byly popsány titanové slitiny a jejich vlastnosti a poté byla popsána problematika. V experimentální části poté byla provedena řada experimentů, které měly za úkol sledovat procesy probíhající během frézování tenkostěnných součástí z titanových slitin a měly pomoci vyhodnotit vliv jednotlivých operací a různých parametrů obrábění na deformaci obrobků. Základní poznatky vyplývající z experimentů můžeme shrnout do těchto bodů:

- Na rovinnost plochých tenkostěnných součástí z titanových slitin mají nejvýraznější vliv především původní rovinnost polotovaru, způsob upnutí obrobku a deformace, které přitom vzniknou a v neposlední řadě také zbytková napětí vnesená do materiálu během frézování.
- Vzhledem k nízké tuhosti plochých součástí z titanových slitin je velmi důležité dbát na to, aby během celého výrobního procesu byly všechny vnější podmínky zachovány v neměnném stavu, protože i drobné odchylky v procesu u tohoto typu součástí mohou způsobit značné rozdíly ve výsledné deformaci.
- Pro minimalizaci vnitřních napětí a pro dosažení rovnoměrných výsledků je kromě správně zvolených řezných podmínek nutné používat málo opotřebené a ostré nástroje.
- Při žíhání ke snížení vnitřních napětí po obrábění skutečně dojde k mírnému poklesu průhybu plochých součástí a tím ke zlepšení rovinnosti, nicméně výhodnější by nejspíš bylo žíhat součásti ve fixovaném stavu v přípravku, ve kterém by došlo k vymezení průhybu.
- Protože výsledná rovinnost při upínání pomocí šroubů, závisí zejména na rovinnosti polotovaru, je vhodné provést žíhání na snížení pnutí i u polotovaru před obrobením. Opět by ale bylo vhodné toto tepelné zpracování provést ve fixovaném stavu obrobku upnutím do přípravku.
- Upínání tenkostěnných obrobků z titanových slitin do svěráku je vzhledem k jejich nízké tuhosti velmi problematické, a dokonce i u poměrně malých součástí došlo k horší rovinnosti v porovnání s upínáním obrobků šroubováním ke stolu frézky. Při frézování rozměrnějších součástí tedy není upnutí do svěráku vhodné.

---

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. HUMÁR, Anton. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2022-10-02]. Dostupné z: [https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf)
2. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
3. PŘIKRYL, Zdeněk a Rosa MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění*. 3. oprav. vyd. Praha: SNTL, 1982, 235 s.
4. Příručka obrábění: Kniha pro praktiky. Sandvik Coromant, 1997. ISBN 91-97 22 99-4- 6.
5. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění* [online]. Ostrava: VŠB - TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2011 [cit. 2022-11-23]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: [https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni\\_metody\\_%20v\\_obrabeni.pdf](https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf)
6. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
7. NESLUŠAN, Miroslav a Andrej CZÁN. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. Vysokoškolské učebnice. ISBN 80-7100-933-4.
8. *Stresstech.com: X-ray Diffraction* [online]. [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/knowledge/non-destructive-testing-methods/x-ray-diffraction/>
9. ZEMAN, Pavel. *MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM: Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi* [online]. [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi>
10. E.O Ezugwu, J Bonney, Y Yamane. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. [online]. [cit. 2023-01-13]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013602010427>
11. Shane Y Hong, Yucheng Ding. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*. [online]. [cit. 2023-01-24]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695501000268>
12. SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny*. Praha: ANTL, 1963, 206 s.
13. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
14. *Prvky.com: Titan* [online]. [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
15. *TITANIUM EXPOSED: Titanium industries - one metal, a thousand possibilities* [online]. [cit. 2023-01-27]. Dostupné z: <https://www.titaniumexposed.com/titanium-industries.html>
16. Boyer, Rodney Welsch, Gerhard Collings, E.W. (1994). *Materials Properties Handbook - Titanium Alloys*. ASM International. Retrieved from: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMPHTA002/materials-properties/materials-properties>

- 
17. Donachie, Jr., Matthew J. (2000). *Titanium - A Technical Guide (2nd Edition)*. ASM International. Retrieved from:  
<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTATGE013/titanium-technical-guide/titanium-technical-guide>
  18. *Multimediální atlas mikrostruktur kovových materiálů* [online]. [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/index.php/en/study/ke-stazeni>
  19. SCHMIDT, F.F. a R.A. WOOD. *HEAT TREATMENT OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS* [online]. NASA Technical memorandum, 1966 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19660015720/downloads/19660015720.pdf>
  20. Pramanik, A. Problems and solutions in machining of titanium alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. [online]. [cit. 2023-02-12]. ISSN 1433-3015. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-013-5326-x>
  21. ŽÁK, Jan, Bohumil BUMBÁLEK a Radko SAMEK. *Speciální letecké technologie. Část 1*. Brno: Československá redakce VN MON, 1990. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0128-1
  22. Engineering ToolBox, (2005). *Metals, Metallic Elements and Alloys - Thermal Conductivities*. [online]. [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d\\_858.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-metals-d_858.html)
  23. BRUHIS, Y., D. NOLAND a W. SERBRING. *HIGH PERFORMANCE MILLING IN AEROSPACE MATERIALS: Meeting the Continuous Challenges of Machining New Innovative Materials*. NIAGARA CUTTER. [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <http://www.floodsupply.com/wp-content/uploads/2011/03/High-Performance-Milling-in-Aerospace-Materials.pdf>
  24. Alokesh Pramanik, M.N. Islam, Animesh Basak and Guy Littlefair. Machining and Tool Wear Mechanisms during Machining Titanium Alloys. Department of Mechanical Engineering, Curtin University, Bentley, WA, Australia. [online]. [cit. 2023-02-24]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/261951685\\_Machining\\_and\\_Tool\\_Wear\\_Mechanisms\\_during\\_Machining\\_Titanium\\_Alloys](https://www.researchgate.net/publication/261951685_Machining_and_Tool_Wear_Mechanisms_during_Machining_Titanium_Alloys)
  25. Deng Jianxin, Li Yousheng, Song Wenlong. Diffusion wear in dry cutting of Ti-6Al-4V with WC/Co carbide tools. [online]. [cit. 2023-02-27]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164808002342>
  26. PATIL, Amit S., Sushil INGLE a Yogesh MORE. *Machining Challenges in Ti-6Al-4V.-A Review* [online]. [cit. 2023-03-01]. ISSN:2319-1058. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/283290011\\_Machining\\_Challenges\\_in\\_Ti-6Al-4V-A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/283290011_Machining_Challenges_in_Ti-6Al-4V-A_Review)
  27. VEIGA, Calestino, J. DAVIM a A. LOUREIRO. Review on machinability of titanium alloys: The process perspective. *Reviews on Advanced Materials Science* [online]. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/279899709\\_Review\\_on\\_machinability\\_of\\_titanium\\_alloys\\_The\\_process\\_perspective](https://www.researchgate.net/publication/279899709_Review_on_machinability_of_titanium_alloys_The_process_perspective)
-



- 
28. POLISHETTY, Ashwin, Manikanda SHUNMUGAVEL, Moshe GOLDBERG a R. Kumar SINGH. Cutting Force and Surface Finish Analysis of Machining Additive Manufactured Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing* [online]. [cit. 2023-03-04]. ISSN 2351-9789. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978916302347>
  29. YUSUF, Kaynak a Gharibi ARMIN. *The effects of cutting parameters on machining performance of titanium alloy Ti-5553* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/2374068X.2019.1585071>
  30. Khanna N, Sangwan KS. Interrupted machining analysis for Ti6Al4V and Ti5553 titanium alloys using physical vapor deposition (PVD)–coated carbide inserts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2013. [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405412472888?journalCode=pibb>
  31. Madyira D, Laubscher R, van Rensburg NJ, Henning P. High speed machining induced residual stresses in Grade 5 titanium alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2013. [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1464420712462319?journalCode=pila>
  32. MALÝ, Jan, Pavel ZEMAN a Jan MÁDL. *Vliv řezného prostředí a řezných podmínek na velikost teplot a zbytkového napětí v obrobeném povrchu při frézování slitiny titanu Ti6Al4V.: III. Mezinárodní konference STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE – PLZEŇ 2009* [online]. [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16437/1/Maly.pdf>
  33. Armando Ítalo Sette Antonialli, Anselmo Eduardo Diniz, Robson Pederiva. Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. [online]. [cit. 2023-03-13]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0890695509001783>
  34. WSTAWSKA, Iwona a Krzysztof ŚLIMAK. *The influence of cooling techniques on cutting forces and surface roughness during cryogenic machining of titanium alloys*. *Archives of Mechanical Technology and Materials* [online]. [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/303800372\\_The\\_influence\\_of\\_cooling\\_techniques\\_on\\_cutting\\_forces\\_and\\_surface\\_roughness\\_during\\_cryogenic\\_machining\\_of\\_titanium\\_alloys](https://www.researchgate.net/publication/303800372_The_influence_of_cooling_techniques_on_cutting_forces_and_surface_roughness_during_cryogenic_machining_of_titanium_alloys)
  35. I. P. Okokpujie, L. K. Tartibu. Experimental analysis of cutting force during machining difficult to cut materials under dry, mineral oil and TiO<sub>2</sub> nano-lubricant. *Journal of Measurements in Engineering*, vol. 9, no. 4, p. 13, 2021. [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.extrica.com/article/22186>
  36. SADIK, M. Ibrahim a Simon ISAKSON. *The role of PVD coating and coolant nature in wear development and tool performance in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V* [online]. [cit. 2023-03-21]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043164817304337>
  37. SANDVIK Coromant, Application Guide, Titanium. [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Jean\\_Francois\\_Antoine2/post/What\\_is\\_the\\_effect\\_of\\_high\\_depth\\_of\\_cut\\_on\\_surface\\_roughness\\_value/attachment/59d63ed679197b807799b63e/AS:425668392558592@1478498662140/download/C-2920-35-1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jean_Francois_Antoine2/post/What_is_the_effect_of_high_depth_of_cut_on_surface_roughness_value/attachment/59d63ed679197b807799b63e/AS:425668392558592@1478498662140/download/C-2920-35-1.pdf)
-

- 
38. *SANDVIK Corromant: Rohové frézování* [online]. [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/shoulder-milling?Country=cz>
  39. *Canadian Metalworking: Machining Thin Walls and Floors* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianmetalworking/blog/cuttingtools/machining-thin-walls-and-floors>
  40. *Frentech Aerospace s.r.o.* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://frentech.cz/>
  41. *Henkel: LOCTITE 415* [online]. [cit. 2023-04-2060]. Dostupné z: [https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/instant-adhesives/loctite\\_4150.html](https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/instant-adhesives/loctite_4150.html)
  42. *MONOLITNÍ FRÉZY SOLID END MILLS: PRAMET* [online]. [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: [http://www.ilkametal.cz/sortiment/pramet/katalogy/monolitni\\_frezy.pdf](http://www.ilkametal.cz/sortiment/pramet/katalogy/monolitni_frezy.pdf)

---

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK****Symboly**

Označení	Legenda	Jednotka
$a_e$	radiální hloubka záběru	[mm]
$a_p$	šířka záběru ostří	[mm]
$a_\alpha$	hřbet nástroje	[-]
$a_\gamma$	čelo nástroje	[-]
$f_z$	posuv na zub	[mm]
VB	opotřebení na hřbetě	[mm]
$v_c$	řezná rychlost	[m·min <sup>-1</sup> ]

**Zkratky**

Označení	Legenda
SK	Slinutý karbid
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
PD	Polykrystalický diamant
RO	Rychlořezná ocel
WC	Karbid wolframu
PKNB	Polykrystalický kubický nitrid boru