

ČESKÉ VYSOKÉ ÚČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bachelor's thesis

TECHNOLOGIE BROUŠENÍ TITANOVÝCH

SUPERSLITIN

Grinding technology of titanium superalloys

Autor práce:
Vedoucí práce:
Rok:

Vojtěch Smola
Ing. Zdeněk Pitrmuc
2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smola** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **437738**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie broušení titanových superslitin

Název bakalářské práce anglicky:

Grinding technology of titanium superalloys

Pokyny pro vypracování:

1. Technologie broušení - princip, způsoby
2. Technologické vlastnosti titanových slitin
3. Brusiva, procesní kapaliny
4. Současné trendy
5. Možnosti hloubkového broušení

Seznam doporučené literatury:

Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition - M.J. Donachie; ISBN: 978-0-87170-686-7
Teorie broušení kovů - Maslov J.N., 1979
Creep Feed Grinding - Colin Andrew, Trevor D. Howes; 1996

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

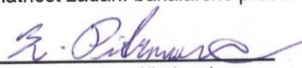
Ing. Zdeněk Pitrmuc, ústav technologie obrábění, projektování a metrologie FS

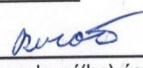
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

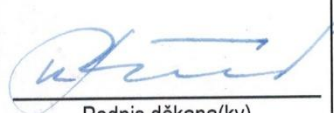
Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce


Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28. 4. 2017
Datum převzetí zadání

Smola
Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch Smola
Název bakalářské práce:	Technologie broušení titanových superslitin
Anglický název:	Grinding technology of titanium superalloys
Rok:	2017
Obor studia:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Bibliografické údaje:	počet stran: 48 počet obrázků: 23 počet tabulek: 11
Klíčová slova:	Broušení, titanové superslitiny, nanokapaliny, hloubkové broušení
Keywords:	Grinding, titanium superalloys, nanofluids, creep feed grinding

Anotace:

Tato bakalářská práce byla vytvořena formou literární rešerše. Z počátku se věnuje všeobecně známým informacím týkajících se technologie broušení, titanu a jeho slitin, brusiv a procesních kapalin. Následně byla provedena rešerše výzkumů zabývajících se nanokapalinami, které byly použity jako procesní kapaliny při broušení titanových slitin a výzkumu hloubkového broušení titanové slitiny Ti-45Al-8Nb-0,2C, u kterého byly porovnávány výsledné drsnosti povrchů obrobků za použití SiC a superabrazivních kotoučů.

Abstract:

This bachelor thesis was made in a form of a literature research. The beginning is devoted to general information related to the technology of grinding, titanium and titanium alloys, abrasives and cutting fluids. Afterward a research concerning nanofluids which were used as cutting fluids for grinding titanium alloys was executed. Another survey was done on the creep feed grinding of titanium alloy Ti-45Al-8Nb-0.2C, particularly the surface roughness obtained by using a SiC grinding wheel was compared to that obtained by using a superabrasive grinding wheel.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Technologie broušení titanových superslitin* vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Zdeňka Pitrmuce a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu zdrojů.

Nemám závažný důvod proti užití této práce ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. 7. 2017

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a také mé rodině, která mě vždy podporovala.

Obsah

1	Úvod	3
2	Technologie broušení	4
2.1	Základní metody broušení	4
2.1.1	Rovinné broušení	4
2.1.2	Obvodové broušení vnějších ploch do kulata	6
2.1.3	Broušení vnitřních válcových ploch	8
2.1.4	Pásové broušení	10
2.1.5	Hloubkové broušení	11
2.2	Dokončovací obrábění	12
2.2.1	Honování	12
2.2.2	Superfinišování	13
2.2.3	Lapování	14
3	Titan a jeho slitiny	15
3.1	Technicky čistý titan	15
3.2	Slitiny titanu	17
3.2.1	Slitiny α	18
3.2.2	Slitiny pseudo α ($p\alpha$)	18
3.2.3	Slitiny $\alpha + \beta$	18
3.2.4	Slitiny β	18
3.2.5	Slitiny pseudo β ($p\beta$)	19
3.3	Technologické vlastnosti slitin titanu	20
3.3.1	Obrobitelnost titanových slitin	20
3.3.2	Tvorba třísky titanu	21
3.3.3	Teplota v místě řezu	23
3.4	Slitina Ti-6Al-4V	24

4	Brusiva, procesní kapaliny.....	26
4.1	Brusiva a jejich parametry.....	26
4.1.1	Materiály brusiva.....	26
4.1.2	Zrnitost brusiva (velikost brusiva).....	27
4.1.3	Tvrdost kotouče.....	27
4.1.4	Struktura kotouče.....	27
4.1.5	Pojivo.....	27
4.2	Brusiva pro broušení titanu.....	28
4.3	Procesní kapaliny.....	29
4.3.1	Řezné oleje.....	29
4.3.2	Řezné kapaliny mísitelné s vodou.....	29
5	Současné trendy.....	30
5.1	Slitiny BuRTi.....	30
5.2	Broušení titanových slitin s použitím MQL.....	30
5.2.1	Přesné broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V s použitím nanolubrikace.....	31
5.2.2	Hodnocení výkonnosti broušení slitiny Ti-6Al-4V pomocí tvorby třísky a koeficientu tření vlivem nanokapalin.....	32
6	Možnosti hloubkového broušení.....	35
6.1	Výzkum Univerzity v Birminghamu.....	35
6.1.1	Hloubkové broušení titanové slitiny za použití SiC brusiva.....	36
6.1.2	Hloubkové broušení titanové slitiny za použití superabrazivního brusiva.....	36
6.1.3	Slitina Ti-45Al-8Nb-0.2C v porovnání se slitinou BuRTi.....	37
7	Závěr.....	38
8	Použitá literatura.....	39
9	Seznam tabulek.....	41
10	Seznam obrázků.....	42
11	Seznam použitých zkratk.....	43

1 Úvod

Technologie se ve strojírenství každým rokem rozvíjí a zdokonalují, což zároveň zvyšuje požadavky na dostatečnou kvalitu konstrukčních materiálů, především na jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. Typickým příkladem takového konstrukčního materiálu jsou titanové slitiny díky své nízké hustotě, vysoké pevnosti, odolnosti proti korozi a výborné biokompatibilitě s lidskou tkání.

Na druhou stranu charakteristické vlastnosti těchto slitin vytvářejí často složité podmínky pro jejich obrábění. Zejména nízká teplotní vodivost způsobuje vznik vysokých teplot, a proto dochází k výrazně rychlejšímu opotřebení řezných nástrojů.

Moderní myšlenka rozvoje technologií klade důraz na větší kvalitu obráběných materiálů s ohledem na životní prostředí a současně snahy dosáhnout co nejnižších ekonomických nákladů. Tato rešeršní bakalářská práce se zabývá touto problematikou a hledá v odborných článcích důvody a možnosti řešení těchto problémů.

Jedním z možných řešení je broušení s použitím MQL, nebo-li s minimálním množstvím procesních kapalin. V této rešeršní bakalářské práci se zabývám především použitím nanokapalin jako procesních kapalin.

Závěrečná část je věnována hloubkovému broušení titanových slitin, kde popisují vyzkoušené různé typy brusných kotoučů využívajících se při broušení titanu. Výsledkem této části je porovnání drsností obrobených povrchů.

2 Technologie broušení

Broušení je velmi starý způsob obrábění, z počátku sloužil lidem především k opracování svých pomůcek. V dnešní době tento technologický proces je nedílnou součástí výroby, kde se dosahuje vysokých přesností obráběním.

Principem je broušení obráběné plochy broušicím kotoučem, který je tvořen nepravidelně rozmístěnými zrny brusiva po jeho obvodu. Broušicí nástroj může být pevné formy nebo může docházet k broušení volným brusivem (např. lapování) [1,2].

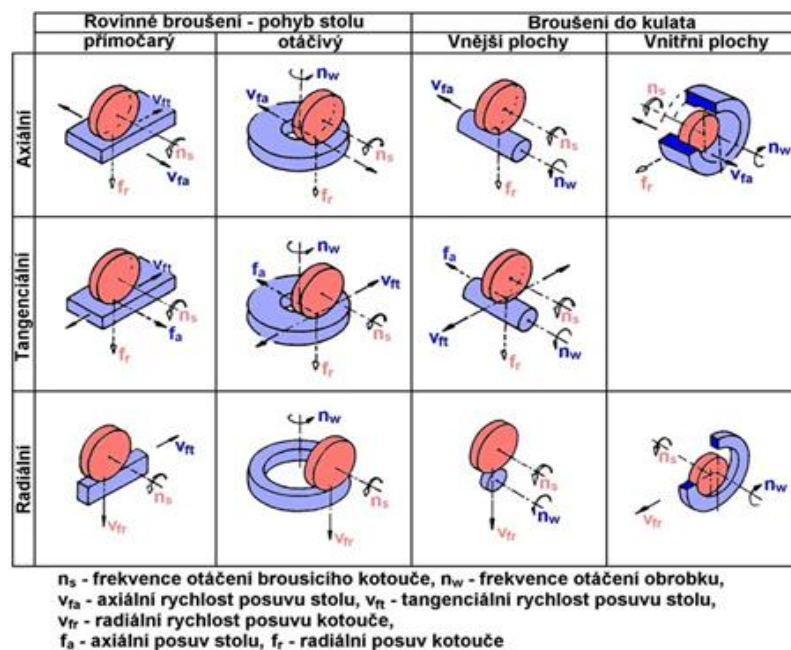
2.1 Základní metody broušení

2.1.1 Rovinné broušení

Rovinné broušení slouží jako operace na čisto po frézování nebo hoblování. V některých případech, zvláště při velmi tvrdém materiálu nebo jeho tvrdé kůře, nahrazuje frézování. Skládá se z dvou typů broušení:

- Rovinné broušení obvodem kotouče

Jedná se o velmi přesný způsob broušení ploch, různé způsoby obvodového broušení jsou uvedené na obr. 2.1. Broušicí kotouč je poměrně úzký, tím pádem při broušení na obrobku dochází ke vzniku tepla, které jej deformuje jen nepatrně [3].

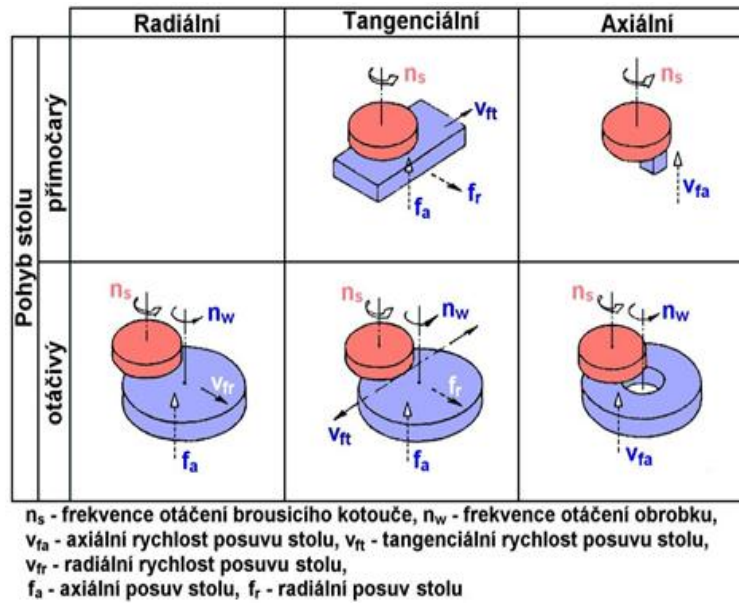


Obr. 2.1 Obvodové broušení [4].

- Rovinné broušení čelem kotouče

Uplatňuje se u širších ploch, jelikož k jejich styku dochází s větší plochou brusného kotouče, z čehož plyne i větší výkonnost. Velká plocha záběru špatně odvádí třísky a komplikuje se přívod řezné kapaliny, to je důvodem, proč čelní broušení není tak přesné [3].

Čelní broušení je znázorněno na obr. 2.2.

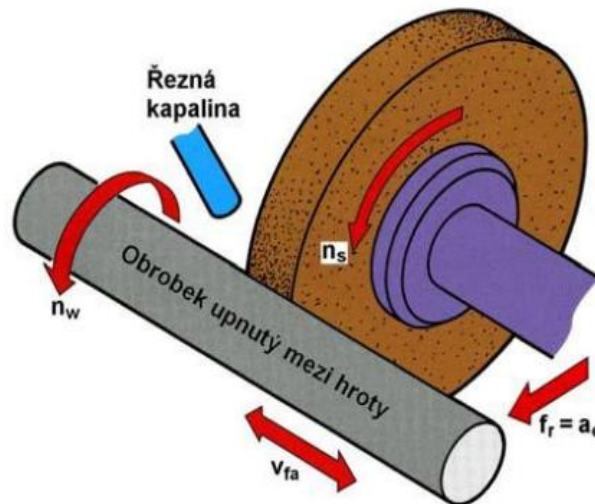


Obr. 2.2 Čelní broušení [4].

2.1.2 Obvodové broušení vnějších ploch do kulata

- Broušení s axiálním posuvem

Tento typ broušení se používá zejména při broušení dlouhých součástek. Obrobek upnutý mezi hroty se otáčí a koná současně posuvový pohyb rovnoběžný s osou obrobku. V odlišném případě obrobek koná pouze pohyb otáčivý a nástroj posuvový podél osy obrobku – obr. 2.3 [3].



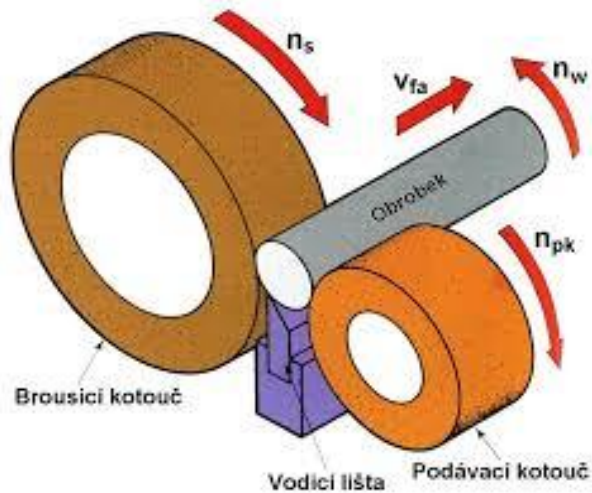
Obr. 2.3 Broušení s podélným posuvem [5].

- Bezhraté broušení

Bezhraté broušení se používá především při přesném broušení v hromadné a velkosériové výrobě, jelikož umožňuje vysokou produktivitu práce při průběžném i zapichovacím způsobu broušení.

Bezhraté průběžné broušení (obr. 2.4) se používá pro broušení hladkých válcových součástí, které se vkládají mezi brousící a podávací kotouče. Průměr brousícího kotouče bývá až dvojnásobně větší než průměr kotouče podávacího [3].

Bezhraté zapichovací broušení se převážně používá u součástí s nákrůžkem, kuželové nebo tvarové plochy, které nemají středící důlky. Při bezhratém zapichovacím broušení se brousí na dva úběry s přídavkem pro druhý úběr (0,03 ÷ 0,05) mm [3].



Obr. 2.4 Bezroté průběžné broušení [6].

Řezné podmínky těchto typů broušení jsou uvedeny v tab. 2.1 a tab. 2.2.

Tab. 2.1 Volba řezných podmínek – bezroté průběžné broušení [3].

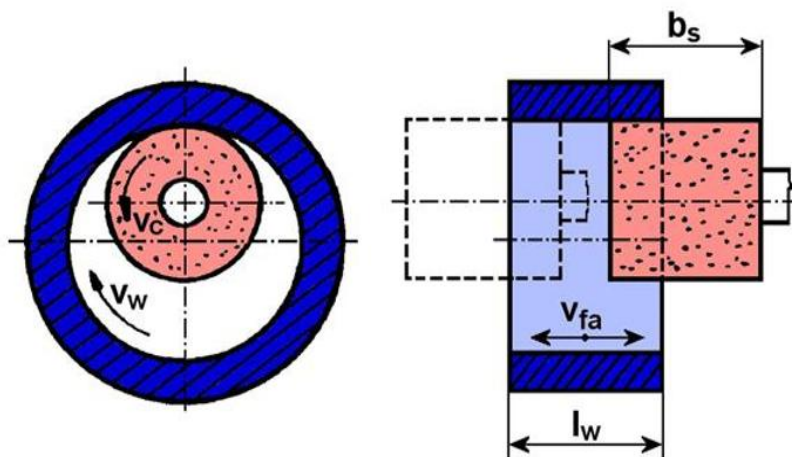
Druh práce	Průměr broušené součásti d_w [mm]	Přídavek na průměr $2a_e$ [mm]	Úhel nastavení α	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m. min ⁻¹]
Hrubování	do 10	0,04 ÷ 0,06	3 ÷ 4	150 ÷ 80
	10 až 25	0,06 ÷ 0,1	2,5 ÷ 3,5	120 ÷ 50
	25 až 75	0,1 ÷ 0,3	2 ÷ 3,5	50 ÷ 10
	75 až 150	0,2 ÷ 0,4	1 ÷ 2,5	25 ÷ 8
Broušení na čisto	-	0,005 ÷ 0,02	1,5 ÷ 2	120 ÷ 50

Tab. 2.2 Volba řezných podmínek – bezroté zapichovací broušení [3].

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku f_r [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m. min ⁻¹]
Hrubování	0,005 ÷ 0,02	10 ÷ 25
Broušení na čisto	0,03 ÷ 0,01	10 ÷ 35

2.1.3 Broušení vnitřních válcových ploch

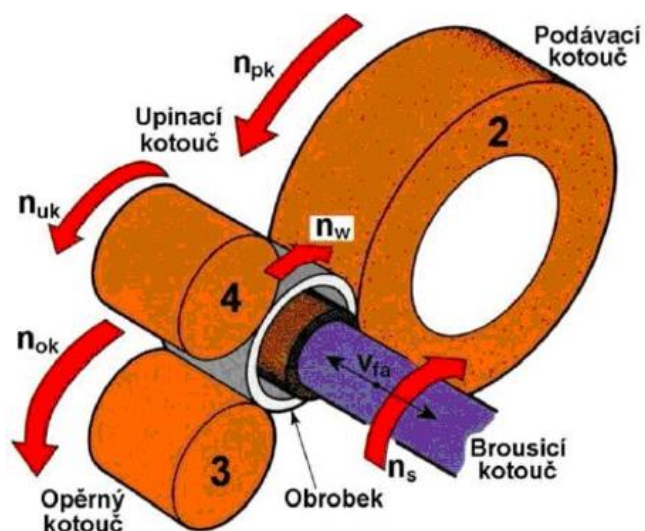
Proces vnitřního broušení bývá nejvíce ovlivňován geometrickými rozměry součásti, především broušeného otvoru, proto se volí průměr brousicího kotouče d_s maximálně 0,7 až 0,9 průměru broušeného otvoru d_w (obr. 2.5) [3].



Obr. 2.5 Broušení vnitřních válcových ploch [7].

- Bezhraté broušení

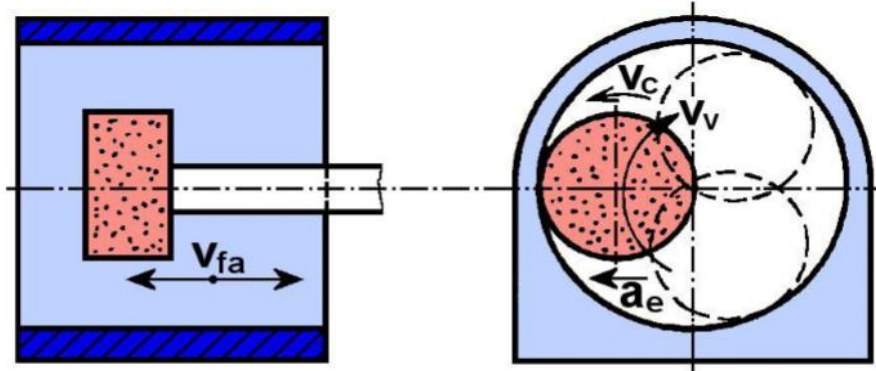
U bezhratého broušení vnitřních válcových ploch (děr) je obrobek opíráno o opěrný, upínací a podávací kotouč, aby mohlo dojít k broušení vnitřního povrchu, jak je znázorněno na obr. 2.6 [6].



Obr. 2.6 Bezhraté broušení vnitřní [6].

- Planetové broušení

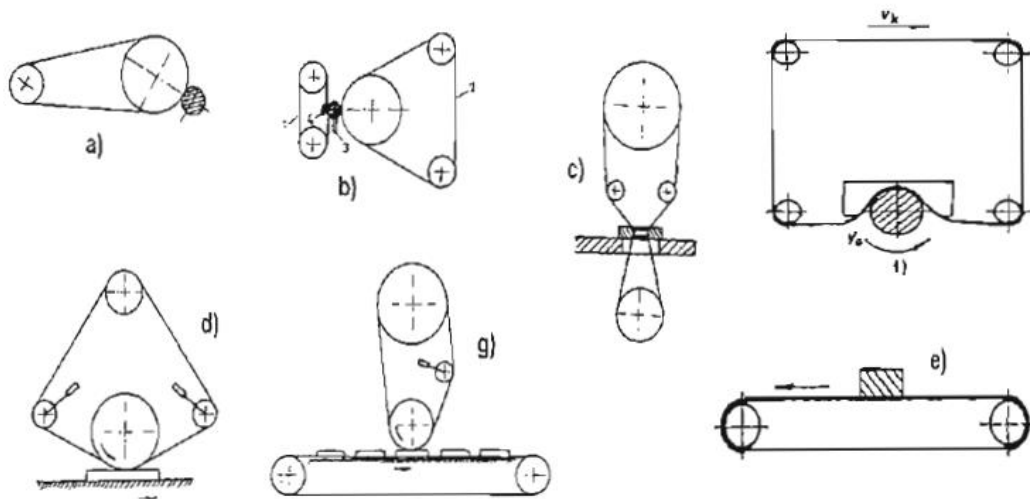
Planetové broušení na planetových bruskách se používá především u součástí, které nelze upnout na brusce na díry do sklíčidla nebo čelistí. Obrobek je pevně upnut na stole brusky a vřeteno s broušicím kotoučem se otáčí kolem vlastní osy obvodovou rychlostí v_c a obíhá kolem osy broušené díry rychlostí v_v a současně se pohybuje ve směru osy díry axiální rychlostí v_{fa} (obr. 2.7) [3].



Obr. 2.7 Planetové broušení [7].

2.1.4 Pásové broušení

K broušení rotačních i rovinných ploch se využívá nekonečných broušicích pásů. Na papírovém či textilním pásu je nanášena vrstva orientovaných brusných zrn. Délka pásu bývá v rozmezí 2 až 5 m, šířka 250 mm, výjimečně až 2000mm. Brusná zrna jsou totožná jako u brusných kotoučů, buď SiC nebo Al_2O_3 [8].



Obr. 2.8 Schéma broušení pásem [2].

a) broušení vnějších rotačních ploch v hrotech, b) nahrazením podávacího kotouče pásem a opěrnou deskou, c) volným úzkým pásem při otáčení obrobku, d) na kontaktním kotouči, e) na volném pásu, f) pás je přitlačován k obrobku tvarovou podpěrou, g) kontinuální broušení.

Brusný pás bývá opatřen dvěma kotouči, z nichž jeden je hnací. Druhý kotouč má pouze funkci vést nekonečný pás nebo jeho zajištění styku s obrobkem. Kotouče jsou z oceli, gumy, apod., jejich povrch bývá rýhovaný [8].

Lze rozlišit tři způsoby broušení:

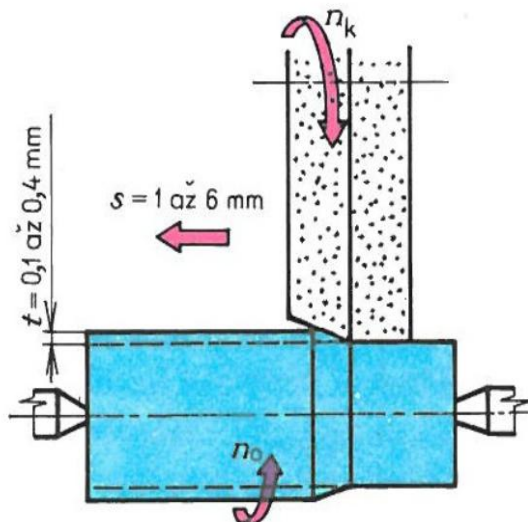
- na kontaktním kotouči,
- na volném pásu,
- na profilové podpoře.

Pásové broušení je produktivnější než klasické broušení, díky lepší orientaci brusných zrn v brusném pásu než je u brusných kotoučů. Brusná zrna převyšují více hmotu pojiva a lépe se chladí styková místa s obrobkem.

Stroje pásového broušení jsou jednodušší než brusky. Brusnými pásy můžeme brousit všechny tvary ploch a získat lepší kvalitu povrchu obrobku [2].

2.1.5 Hlubkové broušení

Jedná se o způsob broušení kotoučem nastaveným na rozměr, kdy se celý přídavek obrousí za jeden podélný zdvih stolu s malou axiální rychlostí posuvu, jak je uvedeno na obr. 2.9.



Obr. 2.9 Hlubkové broušení [9].

Patří mezi nejproduktivnější metody broušení. Používá se při malých přídavcích na broušení. Důležitým faktorem hlubkového broušení je, že větší část odebraného materiálu odřeže malé množství brousících zrn a ostatní zrna brousí na čisto vyjiskřováním [3].

Hodnota pracovního (radiálního) záběru se rovná $a_e = (0,1 \div 0,4) \text{ mm}$. Hodnota řezné rychlosti v_c a obvodová rychlost otáčení obrobku v_o jsou totožné jako při broušení s podélným posuvem [3].

Na brousícím kotouči se vytváří kuželové zkosení, které slouží ke zlepšení podmínek hrubovacích brousících zrn [3].

2.2 Dokončovací obrábění

U dokončovacích procesů je hlavním cílem dosažení:

- konečné přesnosti rozměrů, tvarů a polohy,
- mikrogeometrie povrchu (různé parametry drsnosti a vlnitosti povrchu),
- mechanických a fyzikálních vlastností povrchových vrstev,
- konečnou kvalitu povrchové vrstvy (struktura, vady, poruchy, atd.) [2].

2.2.1 Honování

Honování je dokončovací metoda obrábění, jedná se v podstatě o broušení malou rychlostí jemným brusivem, vázaným v honovacích kamenech upevněných v honovací hlavě, při intenzivním použití řezných kapalin. Při této operaci se jakost obrobených povrchů zvyšuje řezným účinkem jemného brusiva [3].

Nejčastějším způsobem honování je *vnitřní honování*, při kterém se honují vnitřní válcové plochy. Rotační pohyb honovací hlavy s rychlostí v_c a posuvný vratný pohyb ve směru osy honování s rychlostí v_f tvoří složený šroubovitý pohyb, který v díře vykonávají honovací kameny. Dráhy zrn brusiva se překrývají a na honovaném povrchu se utvářejí charakteristické křížové stopy, které svírají úhel 2α . V tab. 2.3 jsou uvedeny doporučené řezné podmínky pro honování [3].

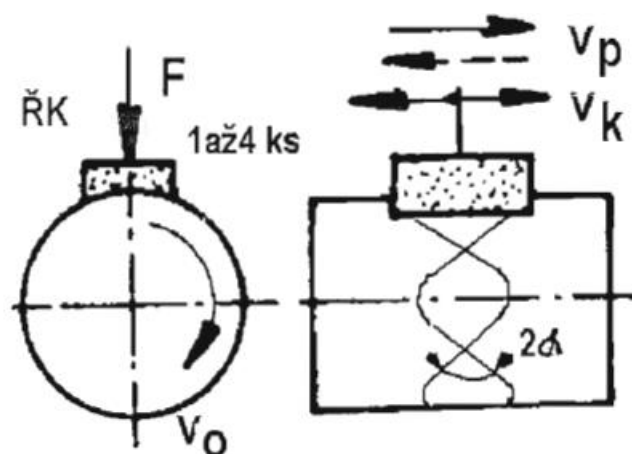
Tab. 2.3 Doporučené řezné podmínky pro honování [3].

Materiál	Operace	Brusivo					
		diamant, KNB			umělý korund, karbid křemíku		
		v_c [m. min ⁻¹]	v_f [m. min ⁻¹]	p_k [MPa]	v_c [m. min ⁻¹]	v_f [m. min ⁻¹]	p_s [MPa]
Nekalená ocel	hrubování dokončování	25 ÷ 35	6 ÷ 12	0,4÷0,6	15 ÷ 30	8 ÷ 12	0,4÷0,8
Kalená ocel	hrubování dokončování	40 ÷ 50 40 ÷ 55	5 ÷ 8 4 ÷ 6	0,8÷1,4 0,4÷0,8	20 ÷ 40 20 ÷ 30	5 ÷ 8 4 ÷ 7	1,0÷1,5 0,6÷1,0
Litina	hrubování dokončování	50 ÷ 80 40 ÷ 70	15 ÷ 18 8 ÷ 16	0,8÷1,5 0,4÷0,9	40 ÷ 80 30 ÷ 50	12 ÷ 22 8 ÷ 15	0,8÷1,4 0,3÷0,8
Bronz	dokončování				40 ÷ 70	4 ÷ 8	0,3÷0,5
Tvrdé povlaky	dokončování	20 ÷ 25	10 ÷ 12	0,3÷0,4			

2.2.2 Superfinašování

Superfinašování je vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění vnějších a vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch přehlazováním brousicími (superfinašovacími) kameny [2].

Průběh superfinašování je nejvíce ovlivněn rychlostí kmitavého pohybu v_k , obvodovou rychlostí obrobku v_o , velikostí tlaku a viskozitou řezné kapaliny (jako řezná kapalina se nejčastěji používá petrolej). Proces superfinašování lze provádět ve dvou fázích (hrubovací a lešticí fáze), pro které je důležitý poměr rychlosti kmitavého pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku, který určuje úhel křížení drah zrn brusiva 2α , přičemž platí $\text{tg } \alpha = v_k/v_o$. Před superfinašováním se nejčastěji volí broušení, případně jemné soustružení nebo vyvrtání. Řezné podmínky se určují na základě výchozích parametrů superfinašované plochy (tab. 2.4) [3].



Obr. 2.10 Schéma superfinašování [2].

Úhel křížení drah α určuje řezivost kamene, tím pádem i velikost úběru materiálu. Největšího úběru se dosáhne při $\alpha = 40$ až 60° , což má za následek, že obrobený povrch je matný. Snížením úhlu α pod 40° dochází ke snížení řezivosti kamene a povrch získá vysoký lesk [3].

Tab. 2.4 Řezné podmínky a přídavky pro superfinašování [3].

Drsnost povrchu Ra [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [$^\circ$]	Poměr v_w/v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 ÷ 12	1	80 ÷ 110	0,8 ÷ 1,2
0,08	0,8	5 ÷ 8	2	40 ÷ 70	1,5 ÷ 2,5
0,04	0,4	4 ÷ 5	3	20 ÷ 40	3 ÷ 12
0,02	0,2	2 ÷ 3	4	méně než 20	12 ÷ 28

2.2.3 Lapování

Lapování je dokončovací metoda obrábění, při které se dosahuje nejvyšší přesnosti rozměrů (0,1 až 0,5 μm) a nejmenší drsnosti povrchů ($R_a = 0,01$ až 0,15 μm). Je vhodné pro dokončování rovinných, válcových a tvarových vnějších i vnitřních ploch [2,3].



Obr. 2.11 Lapování tvarových ploch [2].

Při procesu lapování dochází k úběru materiálu pomocí volného brusiva, které se přivádí mezi vzájemně se pohybující lapovací nástroj a obrobek. Podle charakteru úběru materiálu se rozlišuje hrubovací, jemné a velmi jemné lapování. Při hrubovacím lapování se odřezávají mikronerovnosti velkým počtem zrn. Při velmi jemném lapování se povrch leští (dochází k plastické deformaci povrchové vrstvy lapované plochy) [2,3].

Příklad řezných podmínek pro lapování je uveden v tab. 2.5.

Tab. 2.5 Řezné podmínky pro lapování [3].

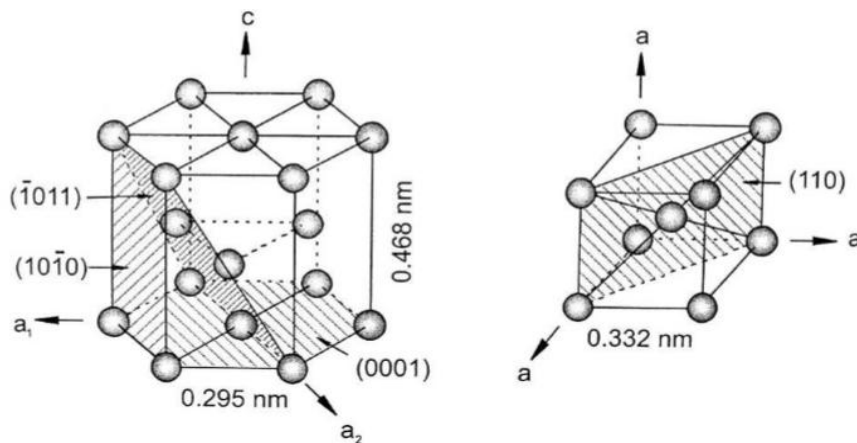
Typ plochy a lapovaný materiál	Operace	Brusivo, zrnitost	Řezné podmínky		
			přídavek [μm]	tlak p_k [MPa]	rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Rovinné plochy, kalená ocel	1	Al_2O_3 , 60	30 ÷ 60	0,13 ÷ 0,15	30 ÷ 60
	2	Al_2O_3 , 220	10 ÷ 15	0,12 ÷ 0,15	15 ÷ 30
	3	Al_2O_3 , 500	5 ÷ 7	0,10 ÷ 0,12	10 ÷ 15
	4	Al_2O_3 , 1200	1 ÷ 3	0,08 ÷ 0,10	7 ÷ 10
Vnější válcové plochy, bronz	1	Cr_2O_3 , 36	20 ÷ 30	0,02 ÷ 0,03	20 ÷ 30
	2	Cr_2O_3 , 220	10 ÷ 15	0,01 ÷ 0,015	10 ÷ 15
	3	Cr_2O_3 , 1200	3 ÷ 5	0,01 ÷ 0,015	10 ÷ 15

3 Titan a jeho slitiny

Titan je považován jako jeden z moderních kovů naší doby. Intenzivní rozvoj v letectví a raketové technice měl za následek i rozsáhlý výzkum jeho vlastností i nejrůznějších slitin [10].

3.1 Technicky čistý titan

Titan je polymorfní kov, který má dvě alotropické modifikace, titan α s mřížkou HCP – hexagonální, stabilní do teploty 882 °C, po překročení této teploty se mění titan α na titan β s mřížkou BCC – kubická prostorově středěná, stabilní do teploty tání 1668 °C. Krystalické struktury mřížek jsou uvedeny na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Krystalické mřížky fází alfa a beta [11].

Pro čistý titan je charakteristická nízká hustota ($4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), střední pevnost (400 MPa) a vynikající odolnost proti určitým prostředím (chlor a jeho sloučeniny), vůči kterým ostatní kovy a slitiny nemají dostačující odolnost. Tyto aspekty jsou základem k využití v chemii. V letectví i ve strojírenství hlavním důvodem využívání této slitiny je především poměr pevnosti titanových slitin k hustotě [10,12].

Technicky čistý titan má více druhů (Ti 99,5; Ti 99,2; Ti 99,1; Ti 99,0), které díky svým vlastnostem mají různá uplatnění v mnohých odvětvích, jak je uvedeno v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Druhy, vlastnosti a použití technicky čistého titanu [10].

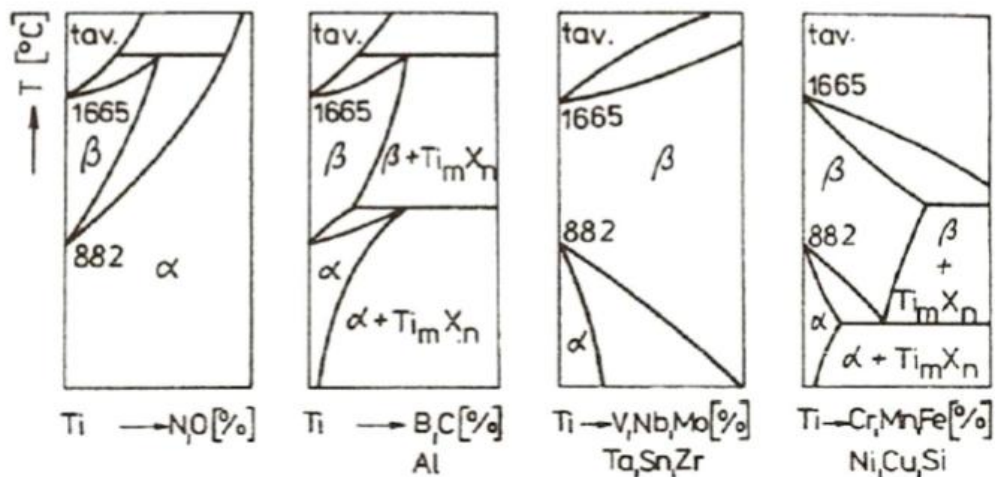
Druh titanu	Označení podle			RM	A	HB	Vlastnosti a použití
	ČSN EN	UNS	GOST	[MPa]	[%]		
Ti 99,5	-	R50250 (Gr.1)	VT 1-00	290	30	120	Vysoká tvařitelnost a odolnost proti korozi; draky letadel, součásti námořních plavidel a chemických zařízení, výměníky tepla
Ti 99,2	-	R50400 (Gr. 2)	VT 1-0	390	28	200	
Ti 99,1	-	R50500 (Gr. 3)	VT 1-1	490	25	225	Součásti draků a motorů letadel, plavidel a chemických zařízení vyžadující tvařitelnost, pevnost a odolnost korozi
Ti 99,0	-	R50700 (Gr. 4)		VT 2-2	610	20	

3.2 Slitiny titanu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, titan má dvě alotropické modifikace, u kterých se přísadové prvky rozpouštějí úplně nebo částečně a tvoří roztoky α a β , které mají zachovanou krystalickou mřížku dané modifikace titanu [13].

Legující prvky mají vysoký vliv na teplotu alotropické přeměny. Dle snižování/zvyšování transformační teploty můžeme prvky dělit na α a β stabilizátory.

- **α stabilizátory** (Al, O, N, C) – zvyšují transformační teplotu a tím také rozšiřují oblast α . Prakticky významný je pouze hliník, ostatní prvky jsou nečistoty zhoršující mechanické vlastnosti.
- **β stabilizátory** (V, Nb, Mo, Ta) – snižují transformační teplotu a tím rozšiřují oblast β [13].



Obr. 3.2 Základní druhy binárních rovnovážných diagramů [10].

Dělení slitin titanu závisí na konečné struktuře (základních fázích) v rovnovážném stavu, vytvořené při pomalém ochlazení z teploty žhání, tyto slitiny se dělí do následujících skupin [13]:

- slitiny α ,
- slitiny pseudo α ($p\alpha$),
- slitiny $\alpha + \beta$,
- slitiny pseudo β ($p\beta$),
- slitiny β .

3.2.1 Slitiny α

Slitiny α jsou strukturně stabilní a odolné proti vysokoteplotní oxidaci do 600 °C. Vlastnosti těchto slitin se podobají čistému titanu, ale pevnost a z ní odvozené vlastnosti jsou téměř dvojnásobné. Zpravidla se jen žíhají a jsou dobře svařitelné. Mají výhodné kryogenní vlastnosti (až do -200 °C), zejména při sníženém obsahu nečistot, což je označováno zkratkou ELI (*Extra Low Interstitials* – velmi malé nečistoty). Nevýhodou je citlivost na vodíkovou křehkost. Mezi základní představitelé těchto slitin patří Ti-6Al-2Sn [10,12].

3.2.2 Slitiny pseudo α (α')

Slitiny pseudo α vznikly přidáním malého množství prvků stabilizující fázi β (obsahující 2 až 8 % β – fáze v rovnovážném stavu), tím získávají i lepší plasticitu a menší citlivost ke škodlivému vlivu vodíku. Hodnota pevnosti je závislá na obsahu hliníku, pohybuje se od 500 MPa (při 1% Al) do 1200 MPa (při 7% Al) [10,12].

3.2.3 Slitiny $\alpha + \beta$

Dvoufázové slitiny $\alpha + \beta$ patří mezi nejrozsáhlejší slitiny titanu, jejichž mechanické vlastnosti jsou především ovlivňovány podmínkami tepelného zpracování. Množství β – fáze se pohybuje od 5 do 50%, což závisí především na obsahu a typu přísadových prvků. Slitiny s obsahem β – fáze do 25% řadíme mezi martenzitické slitiny, jelikož při rychlém ochlazení z β – fáze vzniká martenzitická fáze α' nebo α'' . Základním představitelem této skupiny je Ti-6Al-4V, což je zároveň nejpoužívanější slitina titanu, na jejíž výrobu se spotřebuje kolem 50% celkové produkce titanu. Více informací ohledně této slitiny je uvedeno v kapitole 3.4 [10,12].

3.2.4 Slitiny β

Slitiny β obsahují více než 20% legujících prvků (V, Mo, Cr). Jsou dobře tvařitelné za studena a mají vysokou pevnost (nad 350 °C klesá). Výhodou těchto slitin je i vysoká odolnost proti korozi a dobrá svařitelnost, avšak na straně druhé velkou nevýhodou je nadprůměrná hmotnost. Výroba těchto slitin je náročná a drahá, což má za následek vyšší cenu slitiny. Mezi představitele slitin β patří slitina TiMo15, nebo slitina TiV10Fe2Al3 [10,11].

3.2.5 Slitiny pseudo β ($p\beta$)

Obsah legujících prvků je nižší než 20%, přibližně se odhaduje 18% β stabilizátorů, z čehož asi 2% činí Fe a Cr, které tvoří intermetalické fáze, obsah hliníku bývá okolo 3%. Základním představitelem slitin pseudo β je Ti882, která má velmi dobrou tvařitelnost a využívá se při kování tvarově komplikovaných nebo rozměrově velkých výrobků [10].

Tab. 3.2 Vybrané tvářené slitiny titanu [10].

Druhy slitin	Stav	Rm [Mpa]	Rp0,2 [Mpa]	A [%]	Vlastnosti a použití
Slitiny α					svařitelné výkovky a plechy;
Ti-Al5- Sn2,5	ž	860	800	16	lopatky leteckých motorů a parních
Ti-Al2-Mo4-Sn11	dž	1000	895	10	turbin
Slitiny $p\alpha$					dobrá svařitelnost, houževnatost,
Ti-Al8-Mo1-V1	dž	950	890	15	žárupevnost do 450°C; součásti
Ti-Al8-Zr11-Nb1-Mo-Si	kp	1100	1050	10	draků a turbokompresorů letadel
Ti-Al6-Mo2-Zr4-Sn2-Si	dž	940	860	15	do 550 °C
Slitiny $\alpha+\beta$					součásti leteckých motorů
Ti-Al6-V4	ž	950	880	14	do 400 °C; tlakové nádoby,
	kp	1170	1100	10	čerpadla na plyny a chemikálie,
Ti-Al6-V6-Sn2	ž	1050	990	14	kryogenní součásti; zbraně,
	kp	1170	1100	10	plavidla, skříně raketových motorů,
Ti-Al6-Mo2-Cr2-Fe-Si	kp	1450	1150	7	děla; podvozky letadel, součásti
Ti-Al6-Mo4-Zr2-Si	ž	1150	1050	12	leteckých turbín do 450 °C, součásti
					turbokompresorů do 500 °C
Slitiny $p\beta$					výkovky pro součásti letadel a
Ti-V8-Mo8-Fe2-Al3	kp	1240	1170	8	raket; větší houževnatost
Ti-V5-Mo5-Al3-Cr-Fe	ž	1150	1100	13	
Slitiny β					dobrá tvařitelnost; svorníky a
Ti-V13-Cr11-Al3	kp	1220	1150	8	panely součástí kosmických lodí
Ti-Mo11-Zr6-Sn5	kp	1390	1320	11	vysokopevné svorníky a součásti
					letadel, jen plechy

Pozn. :

Jsou uvedeny střední hodnoty mechanických vlastností při 20 °C,

stav : ž – žiháno, dž – duplexně žiháno, kp – kaleno a popouštěno.

3.3 Technologické vlastnosti slitin titanu

3.3.1 Obrobitelnost titanových slitin

Titanové slitiny kvůli svým specifickým vlastnostem se řadí mezi těžkoobrobitelné materiály. Titan má vysokou chemickou reaktivitu se všemi známými řeznými materiály. Zároveň s nízkou tepelnou vodivostí, malou měrnou tepelnou kapacitou a vysokou teplotou tavení má za důsledek vznik vysokých teplot v místě řezu a tím se zvyšuje nebezpečí plastické deformace břitu a jeho okamžité porušení. Pro představu je uvedeno srovnání těchto vlastností titanu s ocelí v tab. 3.3. Při obrábění slitin titanu je na rozdíl od jiných materiálů plocha mezi třískou a nástrojem malá, to znamená, že řezná hrana je vysoce mechanicky a tepelně namáhaná. V porovnání s ocelí má titan poloviční modul pružnosti, proto může docházet k velkým deformacím obrobku. Charakteristickými znaky obrábění titanových slitin jsou také nebezpečné zpevňování v oblasti primární deformace při procesu řezání a tvorba nárůstků [14].

Již zmíněné charakteristické vlastnosti tvořící překážky v obrábění titanových slitin, lze zmírnit (zefektivnit obrábění slitin titanu) vhodnou volbou některých zásad [15]:

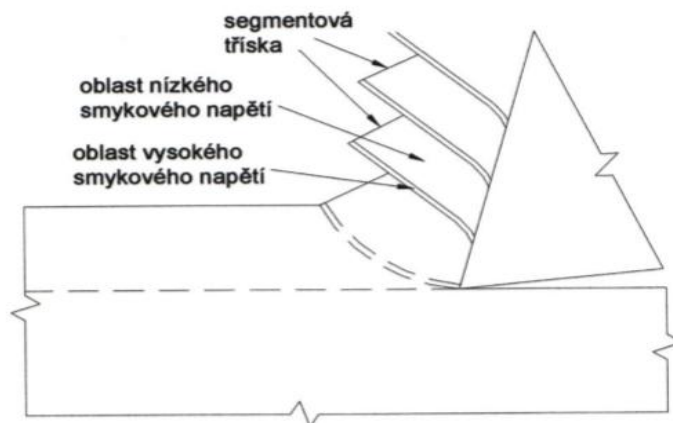
- tuhost soustavy stroj – nástroj – obrobek musí být co nejvyšší (vyloučení vynucených a samobuzených kmitů při obrábění),
- vyšší hodnoty posuvů a hloubky řezů (kvůli vzniku nebezpečného zpevňování),
- pravidelný, stálý záběr,
- ostré nástroje (k získání správné jakosti povrchu),
- nepracovat s již opotřebovanými nástroji,
- používat procesní kapaliny – mají chladicí funkci, čistí povrch od třísek, zlepšuje třecí vlastnosti materiálu, snižuje velikost řezných sil a prodlužuje trvanlivost nástrojů [16].

Tab. 3.3 Srovnání vlastností titanu s ocelí.

Materiál	Hustota ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	Tepelná vodivost λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	Měrná tepelná kapacita c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	Teplota tavení t [$^{\circ}C$]
Titan	4506	21,9	523	1667,85
Ocel	7850	47	461	1350 ÷ 1450

3.3.2 Tvorba třísky titanu

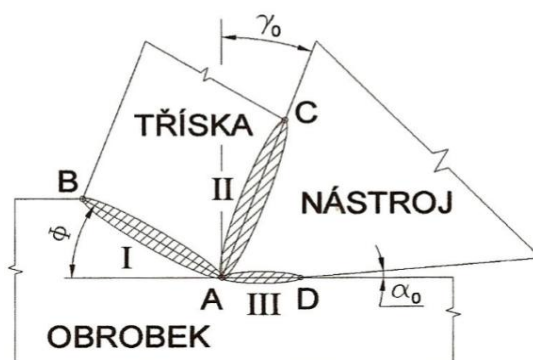
Při obrábění titanových slitin tepelnou nestabilitou vznikají segmentové třísky. Jednotlivé segmenty třísky mají vůči svému objemu poměrně malé plastické deformace, výrazně vyšší plastické deformace smykem se nachází v úzkých oblastech mezi segmenty (smykový pás) – projev smykové nestability deformace, vzniká v důsledku odpevnění při koncentraci tepla a špatné tepelné vodivosti deformovaného materiálu [16].



Obr. 3.3 Segmentová tříska při soustružení titanové slitiny [15].

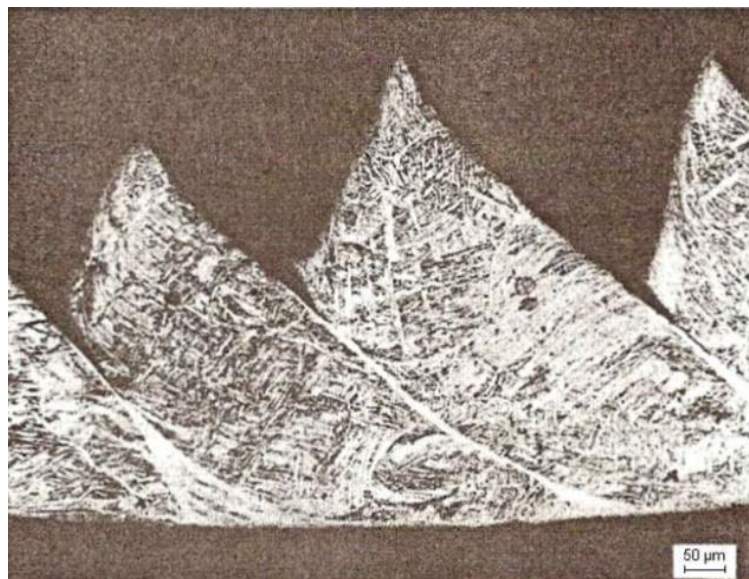
Při tvorbě třísky vlivem řezného nástroje vzniká deformovaná oblast nazývána kořenem třísky obsahující tři oblasti výrazné plastické deformace:

- oblast primární plastické deformace materiálu I,
- oblast sekundární plastické deformace materiálu II – obsahuje tření třísky po čele nástroje mezi body A a C,
- oblast terciární plastické deformace materiálu III – obsahuje tření nástroje o obrobek (mezi body A a D) [16].

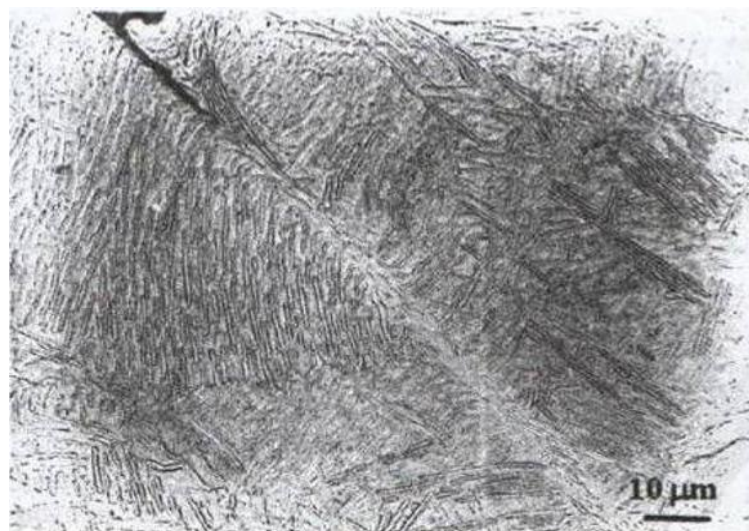


Obr. 3.4 Schematické znázornění oblastí plastických deformací v kořenu třísky [17].

Největší vliv na tvorbu smykových pásů má řezná rychlost a posuv. Čím vyšší je řezná rychlost, tím klesá vzdálenost mezi smykovými pásy, naopak s vyšší hodnotou posuvu tato vzdálenost roste. Nízké hodnoty řezné rychlosti i posuvu umožňují vznik plynulé třísky (nedochází ke vzniku smykových pásů) [16].



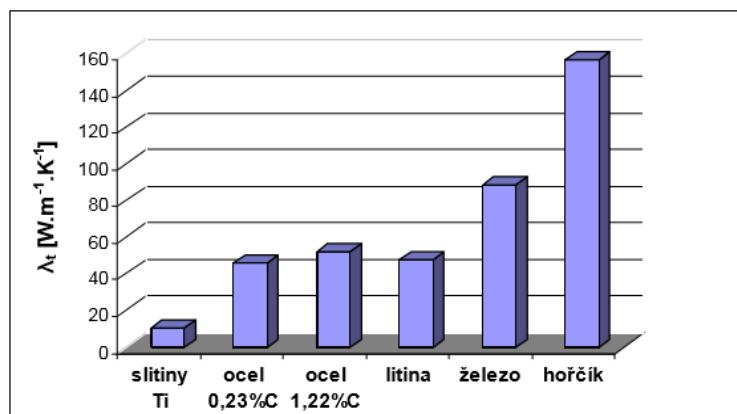
Obr. 3.5 Tříška vzniklá při soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V [15].



Obr. 3.6 Nerovnoměrný rozvoj plastické deformace ve střížné rovině, procházející transformovanou β – fází i acikulární α – fází slitiny Ti-6Al-4V. ($v_c = 35 \text{ m. min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,5 \text{ mm}$) [17].

3.3.3 Teplota v místě řezu

Při obrábění v místě řezu vzniká teplo, jehož množství je ovlivňováno fyzikálními vlastnostmi obráběného materiálu, především tepelnou vodivostí a měrným teplem. Na obr. 3.7 lze vidět porovnání tepelných vodivostí slitin titanu (tepelná vodivost titanu je $21,9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) s jinými kovy a spolu se špatnými třecími vlastnostmi umožňují vzniku velmi vysokých teplot v místě řezu.



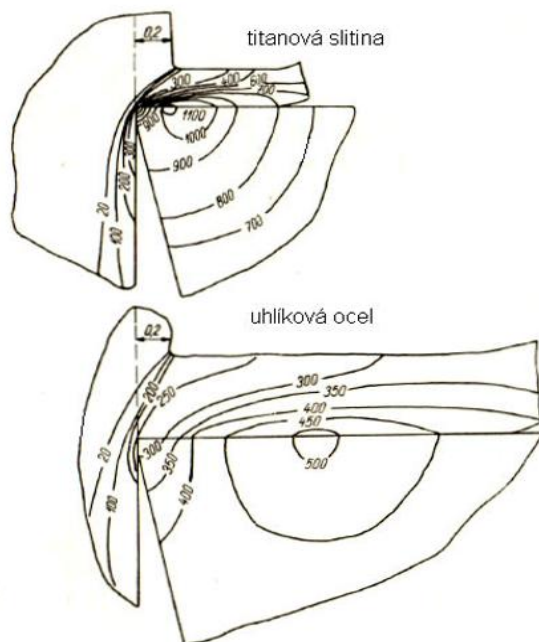
Obr. 3.7 Tepelné vodivosti kovů [16].

Maximální teplota bývá velmi blízko řezné hrany (obr. 3.8), což má za následek rychlé zahřívání řezného nástroje a současně v něm dochází ke vzniku velmi vysokého napětí. Důsledkem je intenzivní opotřebení nástroje [16].

Velikost teploty v místě řezu bývá ovlivněna mnoha faktory:

- řeznými podmínkami,
- geometrií nástroje,
- procesními kapalinami.

Značný vliv na zvýšení teploty má řezná rychlost. Pro představu při soustružení uhlíkové oceli je teplota v místě řezu $380 \text{ }^\circ\text{C}$, pokud bychom tuto teplotu chtěli zvýšit na $1350 \text{ }^\circ\text{C}$, bylo by zapotřebí zvýšit řeznou rychlost ze 100 na $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Slitina titanu má rozsah změny řezné rychlosti podstatně nižší, dejme tomu změna řezné rychlosti z 10 na $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ představuje nárůst teploty z $680 \text{ }^\circ\text{C}$ na $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ [16].



Obr. 3.8 Znárodnění teplot při soustružení titanové slitiny a uhlíkové oceli [18].

Teplotní problematika v místě řezu titanových slitin kvůli špatným tepelným vlastnostem vyžaduje důkladnou volbu řezných nástrojů a procesních kapalin, které jsou využívány nejen kvůli své chladicí funkci, ale zároveň i mazné funkci [16].

3.4 Slitina Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V je nejpoužívanější slitinou titanu, jedná se o vysoce pevnou slitinu, má velmi dobrý poměr hustoty k pevnosti. Svou důležitost určuje i fakt, že na výrobu této slitiny se spotřebuje až 50% celkové produkce titanu.

Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou vysoká specifická pevnost, vysoká odolnost proti korozi a vysoká odolnost proti prasklinám, kvůli kterým nachází podstatné uplatnění v leteckém průmyslu a proto je běžně nazýván leteckým materiálem.

Slitina Ti-6Al-4V udržuje vysokou pevnost i při zvýšených teplotách, což je hlavní příčinou pro uplatnění u spalovacích komor plynových turbín nebo u turbínových lopatek.

Důležitou vlastností je výborná biokompatibilita s lidskou tkání a kostmi, což je hlavním důvodem pro použití v lékařství. Současně s nízkou hmotností a vysokou pevností jsou důvodem, že slitina Ti-6Al-4V je nejpoužívanějším materiálem pro výrobu medicínských implantátů [19].

Pevnostní vlastnosti lze zvýšit tepelným zpracováním (tab. 3.4). Překročením teploty 450 °C dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Z důvodů vysoké pevnosti a nízkému modulu pružnosti se nedoporučuje tváření za studena. Tepelné zpracování se provádí v elektrické peci a pracuje se v inertní atmosféře či vakuu [17,19].

Tab. 3.4 Tepelné zpracování slitiny Ti-6Al-4V [16].

Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Prostředí
Žíhání ke snížení zbytkového napětí	480 ÷ 650	1 až 4h. / vzduch či pec
Žíhání na měkko	705 ÷ 790	1 až 4h. / pec
Kalení	955 ÷ 970	1 h. / voda
Zpevňující popouštění	480 ÷ 595	4 až 8 h. / vzduch

Chemické složení slitin Ti-6Al-4V a Ti-6Al-4V ELI jsou uvedeny v tab. 3.5. Zmíněné slitiny mají vynikající únavové vlastnosti, odolnost vůči vzniku trhlin i jejich šíření. Kvůli ochranné oxidické vrstvě výborně odolávají korozi a to i v agresivních prostředích, při porušení této oxidické vrstvy v prostředí obsahující kyslík dochází k jejímu rychlému obnovení [19].

Tab. 3.5 Obsah chemických prvků v jednotlivých typech slitiny Ti-6Al-4V [19].

	Fe	C	N	O	H
Ti-6Al-4V	≤ 0,40	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,20	≤ 0,015
Ti-6Al-4V ELI	≤ 0,25	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,13	≤ 0,012
	Al	V	Ti		
Ti-6Al-4V	5,50 ÷ 6,75	3,50 ÷ 4,50	Bal.		
Ti-6Al-4V ELI	5,50 ÷ 6,50	3,50 ÷ 4,50	Bal.		

4.1.2 Zrnitost brusiva (velikost brusiva)

Uvádí se číslem, které odpovídá počtu ok síta na délku jednoho anglického palce (25,4mm), kde zrno musí propadnout (ČSN ISO 525). Čím větší je údaj zrnitosti, tím je kontrolní síto a zároveň zrno jemnější, což má za následek získání menší požadované drsnosti [20].

hrubá	4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24
střední	30, 36, 40, 46, 54, 60
jemná	70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
velmi jemná	220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200

4.1.3 Tvrdost kotouče

Jedná se o odolnost proti vylomení (vydrolení) zrn při broušení, tvrdost kotouče je dána druhem pojiva. Stupně tvrdosti se udávají od A do Z [20].

měkké	I, J, K
střední	L, M, N, O, P, Q
tvrdé	R, S, T

4.1.4 Struktura kotouče

Struktura kotouče je označována číslem. Čím vyšší číslo, tím je vzdálenost mezi zrny větší, což znamená větší pórovitost kotouče [20].

hutná	3, 4	objem pórů kolem 15% (tvrdý a křehký materiál)
polohutná	5, 6	objem pórů 25%
pórovitá	7, 8	objem pórů 35% (pro houževnatý materiál)

4.1.5 Pojivo

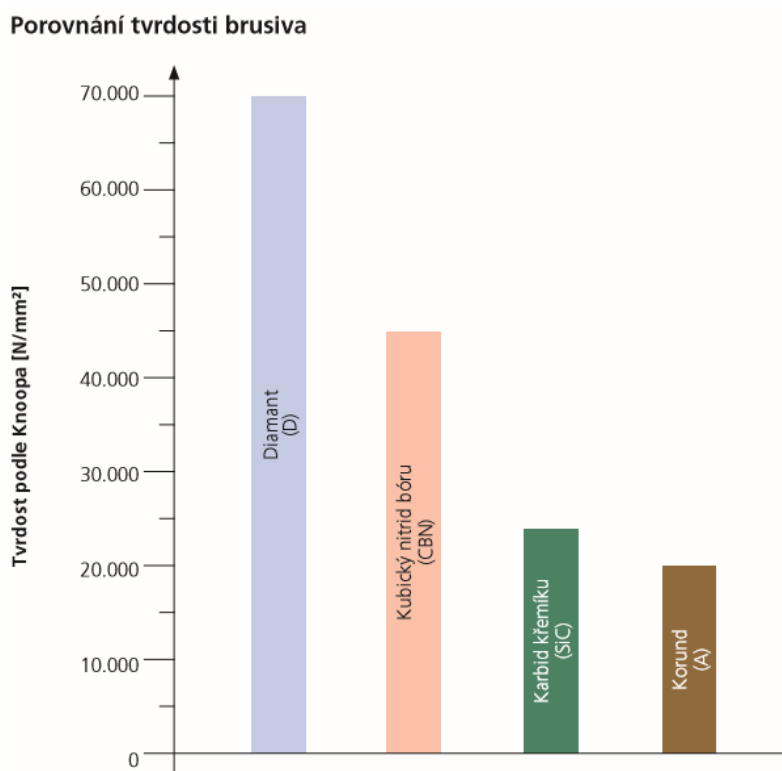
Pojivo spojuje zrna brusiva, tím také určuje tvrdost kotouče [20].

brusivo A, C	pojivo	keramické	V
		pryžové	R
		z umělé pryskyřice	B
		šelakové	E
		magnezitové	Mg
brusivo BN, D	pojivo	kovové (bronz)	
		keramické	
		z umělé pryskyřice	

4.2 Brusiva pro broušení titanu

Při broušení titanových slitin způsobuje malá tepelná vodivost nárůst teploty v místě řezu, což má za následek podstatné zvýšení namáhání brousícího nástroje. Vzhledem k vysokým pevnostem titanových slitin je jejich broušení spojeno s nárůstem složek řezné síly. Ty společně s vysokými teplotami v místě řezu způsobují intenzivní opotřebování brousících kotoučů.

Hlavním brusivem používající se k broušení titanu je karbid křemíku. Pokud je požadována vyšší kvalita povrchu a výkon konvenčních brousících kotoučů je nedostatečný, využívají se brousící kotouče na bázi KNB a diamantu. Diamant a kubický nitrid bóru patří mezi supertvrdá brusiva, svou tvrdostí předčí konvenční brusiva, korund i karbid křemíku. Porovnání tvrdostí je znázorněno na obr. 4.2 [21].



Obr. 4.2 Porovnání tvrdosti brusiva [21].

V kapitole 6 je popsán výzkum hloubkového broušení titanové slitiny, kde byla použita brusiva SiC, diamantu a kubického nitridu bóru.

4.3 Procesní kapaliny

Procesní kapaliny pro obrábění se dělí na dva základní typy:

- řezné oleje,
- řezné kapaliny mísitelné s vodou.

Jako procesní kapaliny se také používají roztavené kovy (cín, zinek, atd.).

Hlavním účelem procesních kapalin je zvýšení výkonnosti obrábění, toho dosahuje procesní kapalina především zlepšením třecích vlastností mezi obrobkem a brusným kotoučem, odvodem tepla a odstraňováním nečistot z místa řezu. Použitím vhodné procesní kapaliny je možné dosáhnout až čtyřnásobného zvýšení trvanlivosti nástroje a zvýšení produktivity obrábění o 10 až 50 % [22].

4.3.1 Řezné oleje

Řezné oleje obsahují základní složku a aditiva. Mezi základní složky řezných olejů patří většinou zušlechtěné minerální oleje, v menším měřítku se také uplatňují syntetické oleje nebo jejich směsi s minerálními oleji. Mezi aditiva patří mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva.

Oproti řezným kapalinám mísitelných s vodou přináší větší trvanlivost nástroje nebo lepší kvalitu povrchu při nízkých řezných rychlostech.

Zásadní nevýhodou je špatná chladicí vlastnost řezných olejů. Další nevýhodou je jejich hořlavost a riziko exploze olejových mlh a par [22].

4.3.2 Řezné kapaliny mísitelné s vodou

Hlavní výhoda oproti řezným olejům je vyšší chladicí vlastnost. Nevýhodou pak bývá horší mazná schopnost.

Dělí se do čtyř skupin:

- emulze (jsou roztoky dvou vzájemně nerozpustných kapalin),
- polysyntetické roztoky,
- syntetické roztoky,
- vodné roztoky.

Nejpoužívanější z uvedených kapalin jsou emulze, které tvoří až 80 % všech používaných kapalin [22].

5 Současné trendy

Titanové slitiny kvůli svému důležitému uplatnění v letectví, medicínském, vojenském a automobilním průmyslu nutí ke zlepšování podmínek pro jejich obrábění. Tato kapitola obsahuje jednotlivé výňatky z vědeckých článků a jejím cílem je poukázat na současný směr vývoje v broušení titanových slitin.

5.1 Slitiny BuRTi

Titan a jeho slitiny kvůli své teplotní problematice dali důvod pro vývoj nových typů slitin, které lépe odolávají vysokým teplotám vznikajícím v místě řezu. Vývoj slitin založených na Ti-V-Cr systému začal v USA, kde byla použita Pratt a Whitneyho slitina Ti-35V-15Cr (*Pratt a Whitney* je americká firma zabývající se vývojem a výrobou leteckých motorů). Její alternativou byla BuRTi (burn resistant titanium = žáruvzdorný titan) slitina Ti-25V-15Cr-2Al-0.2C, jedná se o slitinu titanu vyvinutou univerzitou v Birminghamu a společností Rolls Royce [23].

Žáruvzdornost slitin BuRTi byla způsobena přidáním určitého množství vanadu (V) a chromu (Cr) do složení slitiny. Tendence obou elementů vytvářet oxidy při spalování pomáhá uhasit plameny. Jako hlavní složka se používá hliník k omezení množství a nákladů na suroviny, současně pomáhá při tavení během výroby. Přidáním relativně vysoké hladiny uhlíku (0,2%) se kyslík odstraňuje ze slitinové matrice a váže se na karbidové sraženiny, které také omezují velikost zrna během zpracování [23].

5.2 Broušení titanových slitin s použitím MQL

Nepříznivé účinky způsobené vysokou teplotou a třením mezi obrobkem a brusným kotoučem lze zmírnit pomocí aplikace vhodné procesní kapaliny v dostatečném množství. V důsledku používání procesních kapalin, kvůli kterým dochází k znečišťování životního prostředí a roste počet pracovníků se zdravotními problémy, současně i s ekonomickými nevýhodami běžných procesních kapalin, začal se výzkum zabírat možnostmi minimálního a efektivního použití procesních kapalin. Tím vzniklo MQL (=minimum quantity lubricant) grinding, nebo-li broušení s minimálním množstvím maziv.

Procesní kapalina musí dobře odvádět teplo. Nižší tepelná vodivost procesní kapaliny vede ke zvýšenému chladicímu efektu. Smícháním kovových částic se zvyšuje tepelná vodivost kapaliny, což vedlo vědecké pracovníky k zaměření se na nanokapaliny, které umožňují lepší tepelnou vodivost [23].

Nanokapaliny jsou nano-metrické koloidní suspenze v základní kapalině jako je voda, olej, glykol, atd. Nanometrické prvky jsou známy jako nanočástice o velikosti 1 – 100nm. Nanočástice nejčastěji obsahují oxid, karbid, nitrid kovů a nekovů a uhlíkové nanotrubičky. Nejdůležitějším parametrem nanokapalin je koncentrace nanočástic [24].

5.2.1 Přesné broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V s použitím nanolubrikace

Tento výzkum byl podrobně popsán v *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering* v roce 2016. Výzkum byl především zaměřen na studium přijatelného řešení problému při broušení titanové slitiny (Ti-6Al-4V) za použití nanolubrikace, jako alternativy pro běžné mazivo.

Cílem tohoto výzkumu bylo vyhodnotit optimální stav síly broušení a drsnosti povrchu pomocí mazacího systému MQL pro dodávání nano-oleje s různou úrovní hmotnostní koncentrace smíšeného minerálního oleje oxidu křemičitého.

Celý experiment byl prováděn na přesné brusce NAGA ICHI na modelu NI 450AV2 s brusným kotoučem kubického nitridu bóru. Pro jednotlivý pokus se upravily různé podmínky, jak je uvedeno v tab. 5.1. Při nastavení experimentu je obrobek umístěn přímo pod brusný kotouč, přičemž bruska je naprogramovaná tak, aby brousila hloubku 75 μm při průchodu po 5 μm . Délka experimentu činila 20 minut [24].

Tab. 5.1 Hodnoty procesních parametrů [25].

Procesní parametry		Sady procesních parametrů (i)			
		i = 1	i = 2	i = 3	i = 4
A	Koncentrace nanočástic [%]	0	0,2	0,3	0,4
B	Tlak vzduchu [bar]	2	3	4	5
C	Orientace trysek [°]	15	30	45	60

Nejvyšší koncentrace nanočástic SiO₂ 0,4% získala nejlepší výsledek drsnosti povrchu a sil broušení. Možným vysvětlením je to, že nanočástice působí jako nespočetná drobná malá ložiska, která mají leštící efekt, když kloužou podél povrchu obrobku a rozhraní brusného kotouče [25].

V závěru je uvedeno, že nejvýznamnějším faktorem je koncentrace nanoprášku SiO₂, následně tlak postřiku MQL olejové mlhy a nakonec orientace trysky. Celý výzkum dokázal, že metoda MQL za použití nanolubrikace má lepší výsledky než provedení experimentu za běžných podmínek [25].

5.2.2 Hodnocení výkonnosti broušení slitiny Ti-6Al-4V pomocí tvorby třísky a koeficientu tření vlivem nanokapalin

Na začátku roku 2015 vyšla odborná studie v mezinárodním časopise *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, která se zabývala vlivem nanokapalin na tvorbu třísky a koeficientu tření.

Experimenty byly prováděny na povrchové brusce Chevalier Smart H1224II CNC s konvenčním brusným kotoučem z karbidu křemíku (SiC) a s obrobkem tvořeným slitinou Ti-6Al-4V.

Rozměry obrobku a brusného kotouče jsou 60 mm x 60 mm x 10 mm a 340 mm x 50 mm x 127 mm. Kinematické podmínky pro odhad koeficientu tření byly rychlost broušení 17 m/s, rychlost stolu 9 m/min, hloubka řezu 5 μm s počtem průchodů 15. Každý experiment byl opakován pětkrát a následně průměr těchto hodnot byl zaznamenán.

Experimenty byly prováděny s použitím Al₂O₃ a CuO nanokapalin s vodou jako základní kapalinou. Nanočástice Al₂O₃ a CuO používané pro disperzi byly vyrobeny ve sférickém tvaru a průměrná velikost částic byla 40nm.

Aplikace MQL vyžaduje vysoký tlak, přičemž tryskou proudí kapalina do oblasti broušení. Během experimentů byl použit maximální tlak 8 barů [24].

Po každém experimentu byl vypočten koeficient tření s použitím naměřených hodnot normálových a tangenciálních složek sil broušení pomocí následného vztahu:

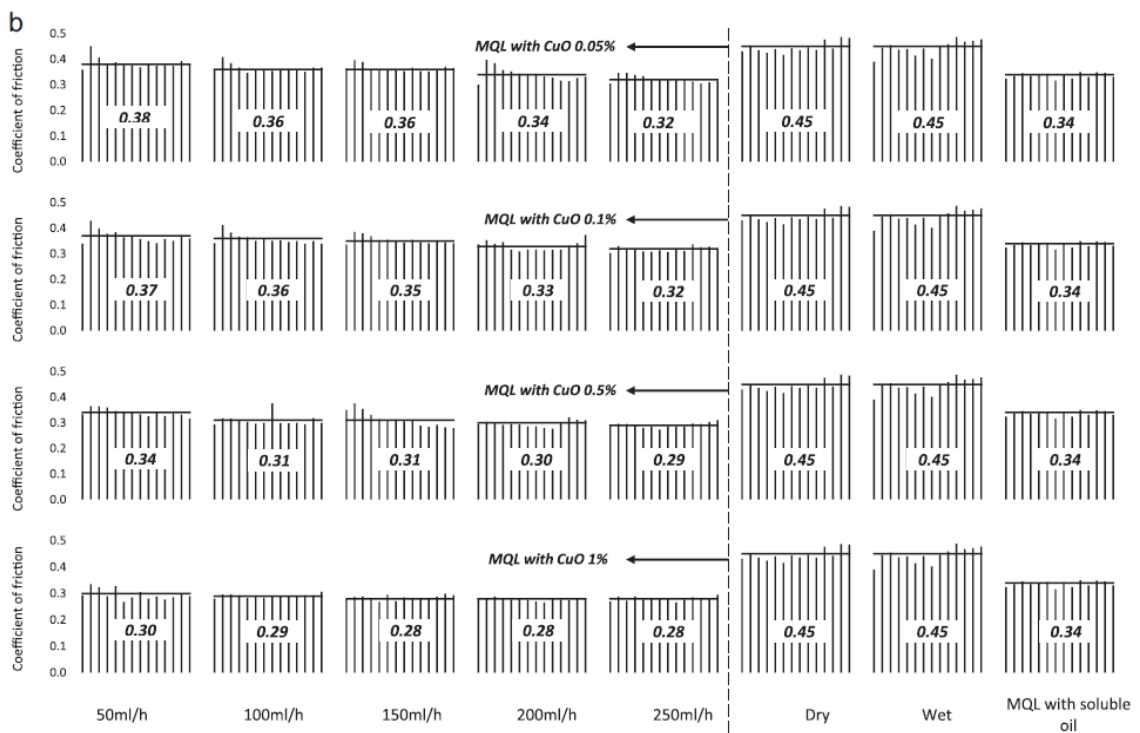
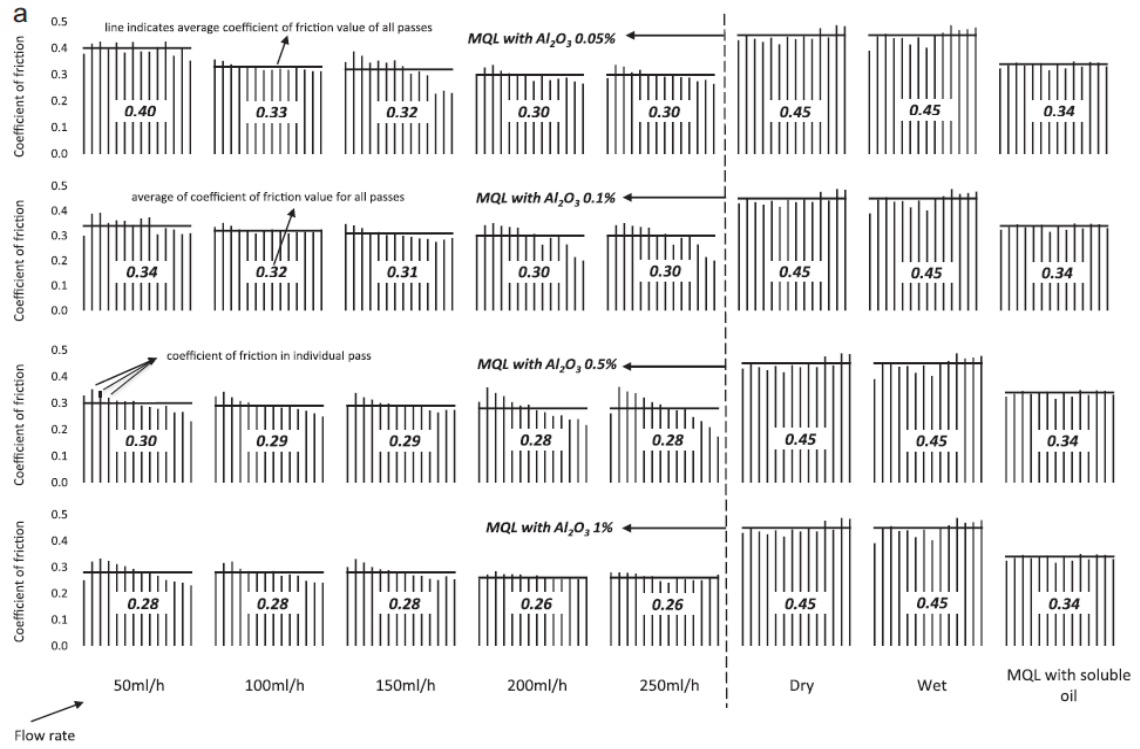
$$\text{Koeficient tření } (\mu) = \text{Tangenciální síla (Ft)} / \text{Normálová síla (Fn)}$$

Koncentrace Al_2O_3 a CuO se měnila od 0,05; 0,1; 0,5 a 1% objemu. Pro všechny koncentrace se měnil průtok od 50ml/h, 100ml/h, 150ml/h, 200ml/h a 250ml/h.

Pro srovnávací účely byly provedeny pokusy broušení za sucha, mokra (s rozpustným olejem), MQL s rozpustným olejem a MQL s různými koncentracemi Al_2O_3 a CuO na bázi vody [24].

Výsledky koeficientu tření nanokapalin pro různé koncentrace Al_2O_3 a CuO jsou uvedeny na obr. 5.1. Bylo zjištěno, že mokré a suché prostředí dosáhlo nejvyšší průměrné hodnoty koeficientu tření $\mu = 0,45$. MQL s rozpustným olejem dosáhlo nižšího koeficientu tření $\mu = 0,34$. Přidáním CuO a Al_2O_3 nanočástic do základní kapaliny ukázalo významné zlepšení kluzkosti snížením koeficientu tření [24].

Studie tvorby třísek naznačuje účinné chlazení nanokapalin, což snižuje opotřebení brusných kotoučů. Aplikací nanokapalin vzniká na povrchu tenký tribofilm, který má za následek snížení koeficientu tření [24].



Obr. 5.1 - Výsledné koeficienty tření,
 (a) MQL s Al₂O₃ nanokapalinou,
 (b) MQL s CuO nanokapalinou [24].

6 Možnosti hloubkového broušení

Hloubkové broušení patří mezi nejproduktivnější způsoby úběru materiálu z těžkoobrobitelných slitin. Důležitost této technologie byla umocněna nástupem niklových a titanových superslitin v leteckém a kosmickém průmyslu. Mezi typické aplikace patří broušení zámků lopatek a broušení drážek do obráběcích nástrojů.



Obr. 6.1 Zámek lopatky.

6.1 Výzkum Univerzity v Birminghamu

Univerzita v Birminghamu patří mezi nejvýznamnější výzkumné průkopníky v oblasti obrábění titanových slitin. Právě z této univerzity pochází obsáhlá práce zabývající se hloubkovým broušením.

Broušení bylo prováděno na flexibilním brousícím centru Bridgeport FGC 1000, které má maximální otáčky vřetena až 6000 ot/min a maximální kontinuální výkon 28 kW. Obrobky byly ve tvaru obdélníků o rozměrech 80 mm x 80 mm x 20 mm [23].

Kotouče označené A, B a C byly tvořeny materiálem SiC, měly jmenovitý průměr 220 mm a šířku kotouče 20 mm. Kotouče označené D, E a F obsahující superabraziva (diamant, kubický nitrid bóru) měly rozměry 175 mm x 20 mm. Nejdříve byl dodán kotouč A, který měl poměrně vysoké procento zastoupení brusných zrn a spojovacího materiálu s nízkou porézností, což není typický brusný kotouč pro hloubkové broušení, který bývá většinou spíše měkký s otevřenou strukturou,

kteřá udržuje nízké teploty a zlepšuje povrchovou úpravu. Naopak kotouče B a C již splňovaly základní podmínky [23].

Zvýšením pórovitosti kola se očekává nárůst užitečného průtoku chladicí kapaliny, což vede k nižším teplotám a menšímu poškození obrobku [23].

Parametry operace:

- rychlost v rozmezí 15 m/s až 60 m/s,
- hloubka řezu v rozmezí 0,01 mm až 10 mm,
- posuv v rozmezí 10 mm/min až 1000 mm/min [23].

K experimentům hloubkového broušení titanové slitiny za použití SiC a superabrazivního brusiva byla vybrána titanová slitina Ti-45Al-8Nb-0.2C.

6.1.1 Hloubkové broušení titanové slitiny za použití SiC brusiva

Při tomto experimentu byl dosažen maximální poměr broušení 30 s použitím kotouče označeného A (SiC brusivo) při nízké rychlosti kotouče 15 m/s, hloubky řezu 1,25 mm a rychlosti posuvu 150 mm/min. Pomocí těchto podmínek bylo dosaženo drsnosti povrchu Ra 1,1 μ m. Zvýšením rychlosti na 25 m/s a 35 m/s snížilo hodnotu drsnosti Ra, ale povrch obrobku byl popálen [23].

6.1.2 Hloubkové broušení titanové slitiny za použití superabrazivního brusiva

Poměr broušení byl zhruba desetkrát vyšší než za použití SiC brusiva při totožných podmínkách, a to díky odlišné tvrdosti a tepelné vodivosti (2000W / m.K pro diamant a \sim 1300W / m.K pro KBN ve srovnání s SiC zrnitým materiálem \sim 40W / m.K). Tyto vlastnosti umožňují broušení i při rychlostech 50 m/s, aniž by došlo k povrchovému popálení nebo popraskání. Ve srovnání s výsledky brusných materiálů SiC byla drsnost povrchu při použití srovnatelných provozních parametrů a podmínek o 25% nižší u kola D (diamant) a o 70% nižší u kola E (KBN). Předpokládá se, že je to způsobeno vlivem menší velikosti zrna a nižší pórovitosti superabrazivních brusiv [23].

6.1.3 Slitina Ti-45Al-8Nb-0.2C v porovnání se slitinou BuRTi

Porovnání proběhlo pro hloubkové broušení. Slitina Ti-45Al-8Nb-0.2C byla snadněji broušena než slitina BuRTi (za použití SiC brusiva) a bylo dosaženo průměrně o 15% nižší drsnosti povrchu Ra. Při použití superabrazivních brusiv byla hodnota drsnosti nižší dokonce až o 40%. Klíčovými faktory ovlivňujícími tuto skutečnost jsou 30% vyšší pevnost v tahu, zvýšená tvárnost při teplotě místnosti a přítomnost karbidových částic pro slitinu BuRTi. Často povrch vykazoval praskliny jak paralelní, tak kolmé ke směru posuvu, které byly pravděpodobně důsledkem vysokých teplot broušení způsobených vysokou úrovní opotřebení a nízkou tepelnou vodivostí obrobku (10 Wm / K). Hloubkové profily pro BuRTi ukázaly, že v obrobené části v hloubce 5-15 μm dochází k mírnému změkčení obrobku [23].

7 Závěr

Úvod je věnován metodám broušení, v další kapitole pojednávám o titanu a jeho slitinách. Zde lze získat zásadní informace o technologických a fyzikálních vlastnostech, které ztěžují proces broušení. Mezi tyto vlastnosti patří především nízká tepelná vodivost, nízký modul pružnosti, měrná tepelná kapacita a afinita vůči vzdušnému kyslíku. Tepelná vodivost a špatné třecí schopnosti titanu umožňují vznik velmi vysokých teplot, které mají za následek zvýšené opotřebení brusných kotoučů. Z těchto důvodů se používají procesní kapaliny, které jsou popsány společně s brusivem v kapitole 4. Z rešerše tradičních literárních zdrojů je pro obvyklé aplikace v největší míře využíváno brusivo typu SiC s tlakovým přívodem řezné emulze na vodní bázi.

Závěrečné dvě kapitoly obsahují články zabývající se současnými trendy a možnostmi hloubkového broušení. Vzhledem k aplikacím hloubkového broušení v leteckém a kosmickém průmyslu je počet publikací na toto téma velmi omezený. Tato technologie patří k strategickému know how průmyslových podniků. Z výzkumných institucí se tomuto vývojovému směru věnují především Univerzita v Birminghamu, technologický institut v Dillí a Rolls Royce Derby.

Ve své práci jsem se zaměřil na výzkum založený na nanokapalinách, které jsou použity jako procesní kapaliny. Z těchto výzkumů je patrné, že kvalita funkce nanokapalin závisí především na koncentraci nanočástic. Nejlepší výsledky jsou dosaženy u nanokapalin s nejvyšším obsahem nanočástic, zřejmě kvůli lepšímu přenosu tepla, který zvýšená koncentrace vyvolává. Ukazuje se, že zvýšená koncentrace nanočástic vede ke snížení koeficientu tření, což má za následek nižší drsnost obrobeneho povrchu.

Závěrečná část pojednává o možnostech hloubkového broušení, při kterém byla broušena slitina Ti-45Al-8Nb-0,2C za použití superabrazivního (diamant a kubický nitrid bóru) a SiC brusiva. Při použití SiC brusiva při nízkých rychlostech (15 m/s) bylo dosaženo drsnosti povrchu Ra 1,1 μm . Zvýšením rychlosti broušení byla drsnost povrchu snížena, ale povrch obrobku byl popálen. Při použití superabrazivních brusiv bylo dosaženo výrazně nižší drsnosti. Vzhledem k vyšší pevnosti a tepelné vodivosti superabrazivního brusiva bylo možné provádět broušení i při rychlosti 50 m/s, aniž by došlo k povrchovému popálení nebo popraskání.

8 Použitá literatura

- [1] MASLOV, Je. N. *Teorie broušení kovů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [2] MÁDL, Jan a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Technologie obrábění*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 8001020916;9788001020913;.
- [3] KOČMAN, Karel a Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Ústav výrobního inženýrství. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2011. ISBN 8072047221;9788072047222;.
- [4] Výkon při broušení. In: *ELUC* [online]. [cit. 2017-05-14].
Dostupné z:
<<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1278> >.
- [5] LIPTÁK, Ondrej. *Technológia výroby: Obrábanie*. 1. vyd. Bratislava:Alfa,1979.
- [6] Bezhraté broušení. In: *Coptkm* [online]. [cit. 2017-05-24].
Dostupné z:
<<https://coptkm.cz/portal//reposit.php?action=0&id=39354&revision=-1&instance=2>>.
- [7] *Technologie I: Technologie obrábění - 3.díl* [online]. 2005 [cit. 2017-05-16].
Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/Dokoncovaci_a_nekonvencni_metody_obrabeni/TI_TO-3.cast.pdf>.
- [8] SOVA, František a Západočeská univerzita. Katedra technologie obrábění. *Technologie obrábění a montáže*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. ISBN 9788070828236;8070828234;.
- [9] Způsoby broušení. In: *ZOZEI* [online]. [cit. 2017-05-24].
Dostupné z: <<http://zoei.sssebrno.cz/brouseni---zpusoby>>.
- [10] MACEK, Karel a České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 9788001035139;8001035131;.
- [11] LEYENS, CH., PETERS, M. *Titanium and titanium alloys*. 2. vyd. DLR – German Aerospace Center., Köln, Germany, 2005, 513 s. ISBN 3-52730534-3.
- [12] SEDLÁČEK, Vladimír. *Únava hliníkových a titanových slitin*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 9788003001804;8003001803;. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 80720424832.

- [13] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno : CERM, 2002. 392 s. ISBN 80720424832.
- [14] ŽÁK, J., SAMEK, R., BUMBÁLEK, B. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. Brno: tisk MTZ, provoz 34 Kyjov, 1990, 219 s. ISBN 80-214-0128-1.
- [15] NESLUŠAN, M., CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. 1. vyd. Žilina: EDIS, 2001, 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [16] KARÁSEK, J. *Obrábění titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 80 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [17] FOREJT, M., PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 220 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [18] POPELKA, Z. *Řezné kapaliny a jejich využívání při broušení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. XY s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Bohumil Bumbálek, CSc.
- [19] MIKOVEC, M. a kolektiv: *Obrábění těžkoobrobitelných materiálů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1963, 316 s
- [20] *Broušení* [online]. [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Brou%C5%A1en%C3%AD.pdf>
- [21] *Diamantové a CB nástroje* [online]. [cit. 2017-07-09]. Dostupné z: http://www.pkrealizace.cz/content/files/PFERD-kat_205_cz.pdf
- [22] MANG, T. a W. DRESEL. *Lubricants and Lubrication*. 2. vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [23] HOOD, Richard. *The Machinability of a Gamma Titanium Aluminide Intermetallic* [online]. School of Mechanical Engineering, The University of Birmingham, 2010 [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <http://etheses.bham.ac.uk/1380/1/Hood_10_PhD.pdf>.
- [24] SETTI, Dinesh, Manoj Kumar SINHA, Sudarsan GHOSH a P. VENKATESWARA RAO. Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, **88**, 237-248 [cit. 2017-07-07]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.005. ISSN 08906955. Dostupné z: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695514400105>>.
- [25] SARHAN, Ahmed AD; PING, Hong Wan; SAYUTI, M. Precision Grinding of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy Using Nanolubrication. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2016, 10.3: 345-351.

9 Seznam tabulek

<i>Tab. 2.1 Volba řezných podmínek – bezhroté průběžné broušení [3].</i>	7
<i>Tab. 2.2 Volba řezných podmínek – bezhroté zapichovací broušení [3].</i>	7
<i>Tab. 2.3 Doporučené řezné podmínky pro honování [3].</i>	12
<i>Tab. 2.4 Řezné podmínky a přídavky pro superfinišování [3].</i>	13
<i>Tab. 2.5 Řezné podmínky pro lapování [3].</i>	14
<i>Tab. 3.1 Druhy, vlastnosti a použití technicky čistého titanu [10].</i>	16
<i>Tab. 3.2 Vybrané tvářené slitiny titanu [10].</i>	19
<i>Tab. 3.3 Srovnání vlastností titanu s ocelí.</i>	20
<i>Tab. 3.4 Tepelné zpracování slitiny Ti-6Al-4V [16].</i>	25
<i>Tab. 3.5 Obsah chemických prvků v jednotlivých typech slitiny Ti-6Al-4V [19].</i>	25
<i>Tab. 5.1 Hodnoty procesních parametrů [24].</i>	31

10 Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1</i> Obvodové broušení [4].	4
<i>Obr. 2.2</i> Čelní broušení [4].	5
<i>Obr. 2.3</i> Broušení s podélným posuvem [5].	6
<i>Obr. 2.4</i> Bezhruté průběžné broušení [6].	7
<i>Obr. 2.5</i> Broušení vnitřních válcových ploch [7].	8
<i>Obr. 2.6</i> Bezhruté broušení vnitřní [6].	8
<i>Obr. 2.7</i> Planetové broušení [7].	9
<i>Obr. 2.8</i> Schéma broušení pásem [2].	10
<i>Obr. 2.9</i> Hloubkové broušení [9].	11
<i>Obr. 2.10</i> Schéma superfinišování [2].	13
<i>Obr. 2.11</i> Lapování tvarových ploch [2].	14
<i>Obr. 3.1</i> Krystalické mřížky fází alfa a beta [11].	15
<i>Obr. 3.2</i> Základní druhy binárních rovnovážných diagramů [10].	17
<i>Obr. 3.3</i> Segmentová tříška při soustružení titanové slitiny [15].	21
<i>Obr. 3.4</i> Schematické znázornění oblastí plastických deformací v kořenu třísky [17].	21
<i>Obr. 3.5</i> Tříška vzniklá při soustružení titanové slitiny Ti-6Al-4V [15].	22
<i>Obr. 3.6</i> Nerovnoměrný rozvoj plastické deformace ve střižné rovině [17].	22
<i>Obr. 3.7</i> Tepelné vodivosti kovů [16].	23
<i>Obr. 3.8</i> Znázornění teplot při soustružení titanové slitiny a uhlíkové oceli [18].	24
<i>Obr. 4.1</i> Označení brousícího kotouče [20].	26
<i>Obr. 4.2</i> Porovnání tvrdosti brusiva [21].	28
<i>Obr. 5.1</i> Výsledné koeficienty tření [23].	33
<i>Obr. 6.1</i> Zámek lopatky.	35

11 Seznam použitých zkratek

BCC	<i>Body-Centered Cubic</i>	<i>mřížka kubická prostorově středěná</i>
BurTi	<i>Burn Resistant Titanium</i>	<i>žáruvzdorný titan</i>
ELI	<i>Extra Low Interstitials</i>	<i>velmi malé nečistoty</i>
HCP	<i>Hexagonal Close-Packed</i>	<i>mřížka hexagonální</i>
KNB		<i>kubický nitrid bóru</i>
MQL	<i>Minimum Quantity Lubricant</i>	<i>minimální množství maziv</i>