



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

Jan Stulhofer

BROUŠENÍ TITANOVÝCH SLITIN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Broušení titanových slitin vypracoval samostatně a využil jsem pouze uvedenou literaturu.

Ve Znojmě dne:

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, za trpělivé vedení a předávání cenných rad při jejím vypracování.

Děkuji také všem svým blízkým, kteří mě ve studiu a tvorbě bakalářské práce podporovali a byli mi pevnou oporou.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stulhofer** Jméno: Jan Osobní číslo: **473724**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Broušení titanových slitin

Název bakalářské práce anglicky:

Grinding of titanium alloys

Pokyny pro vypracování:

- 1) Technologická specifika titanových slitin
- 2) Stroje pro rovinné broušení
- 3) Nástroje pro broušení
- 4) Specifika broušení titanových slitin - nástroje, podmínky, doporučení

Seznam doporučené literatury:

- 1) DONACHIE, Matthew J. Titanium: a technical guide. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5.
- 2) DAVIM, J. P., ed. Modern machining technology: a practical guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-0-85709-099-7.
- 3) Handbook of Modern Grinding Technology- Robert King, ISBN13 (EAN): 9781461291671

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:

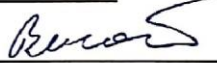
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

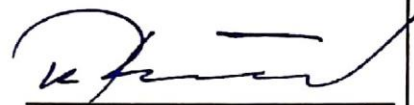
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Zdeněk Pitrmuc
podpis vedoucí(ho) práce



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



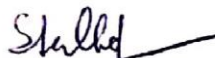
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na rovinné broušení titanových slitin. V první části jsou uvedeny vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V, protože následující části práce jsou pro ni specifikovány. Hlavním cílem je stanovení parametrů a doporučení pro volbu brusného kotouče a řezných podmínek pro broušení této slitiny. V poslední části práce je uveden konkrétní případ broušení součásti z Ti-6Al-4V a jsou zde popsána všechna podstatná specifika tohoto výrobního procesu.

Klíčová slova

Titan, slitina Ti-6Al-4V, těžkoobrobitelné materiály, rovinné broušení, brusný kotouč

Annotation

This bachelor thesis focuses on surface grinding of titanium alloys. In the first part, the properties of Ti-6Al-4V alloy are given, as the following parts of the thesis specified for it. The main target is establishing the parameters and giving recommendations for the choice of the grinding wheel and cutting conditions for grinding of this alloy. In the last part, specific case of grinding a part made from Ti-6Al-4V and the essential specifics of this operation are described.

Key words

Titanium, Ti-6Al-4V alloy, difficult-to-cut materials, surface grinding, grinding wheel

Obsah

Úvod.....	8
1 Titan a jeho slitiny	9
1.1 Názvosloví titanových slitin	9
1.2 Rozdělení titanových slitin podle fázi.....	10
1.2.1 Slitiny titanu α	10
1.2.2 Slitiny titanu β	10
1.2.3 Slitiny titanu $\alpha + \beta$	10
1.3 Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V.....	11
1.4 Mechanické vlastnosti titanu	12
1.5 Fyzikální vlastnosti titanu	13
2 Broušení	14
2.1 Stroje pro broušení rovinných ploch.....	14
2.1.1 Oscilační rovinné brusky.....	14
2.1.2 Brusky s rotačním stolem	16
2.1.3 Svislé rovinné brusky	17
2.2 Způsoby broušení rovinných ploch	18
2.2.1 Běžné (dokončovací) broušení	18
2.2.2 Hlubkové broušení (creep-feed grinding)	18
3 Brusné kotouče.....	19
3.1 Opotřebení brusných kotoučů	19
3.2 Tvrdost kotouče.....	20
3.3 Struktura kotouče.....	20
3.4 Broušící materiály.....	22
3.4.1 Přírodní brusné materiály.....	22
3.4.2 Syntetické brusné materiály.....	23
3.5 Zrnitost	25
3.6 Pojivo	26
4 Upnutí obrobku	27
4.1 Druhy upínacích systémů	27
4.1.1 Magnetický upínač s permanentními magnety.....	27
4.1.2 Elektromagnetický upínač	28

4.1.3	Manuální upínací technika	29
4.1.4	Vakuová upínací technika.....	30
5	Řezné prostředí	31
5.1	Plynné řezné prostředky a aerosoly	31
5.2	Řezné kapaliny.....	32
5.2.1	Oleje	32
5.2.2	Vodné roztoky	32
5.2.3	Emulze	33
6	Konkretizace procesu broušení.....	34
6.1	Popis obráběné součásti	34
6.2	Popis použité brusky	35
6.3	Problematika upnutí obrobku	36
6.4	Konkretizace výběru brusného kotouče	37
6.5	Řezné podmínky	39
	Závěr	40
	Použitá literatura.....	41
	Seznam obrázků	44
	Seznam tabulek	45

Úvod

Bakalářskou práci na téma broušení titanových slitin jsem si zvolil především pro můj zájem o praktickou a experimentální činnost. Ačkoliv se nakonec tato práce musela kvůli zpřísněným karanténním opatřením obejít bez podstatné části této praktické činnosti, studium dané problematiky z velkého množství zdrojů mi přineslo spoustu znalostí, které jsem se pokusil do své práce smysluplně uspořádat.

Titan a jemu podobné materiály mají své místo především v aplikacích, kdy jsou zapotřebí velmi odolné a pevné, ale přitom lehké materiály. Proto jsou stále častěji využívány v letectví, kosmonautice, automobilovém průmyslu, ale i například v lékařství.

Broušení, jakožto operace mající své místo ve většině výrobních procesů, je u těžkoobrobitelných materiálů zvláště významným tématem, neboť zde často nahrazuje jiné druhy obrábění. Broušení takových materiálů ale má svá specifika a výrazné odlišnosti oproti broušení běžných materiálů, například konstrukčních ocelí.

Hlavním cílem této práce je stanovení požadavků a doporučení pro volbu brusného nástroje a řezných podmínek pro broušení slitiny Ti-6Al-4V v závislosti na jejích vlastnostech. Vysoká pevnost a špatná tepelná vodivost materiálu dělají tuto operaci velmi náročnou. Při nedostatečném odvodu tepla a zahřátí na vysokou teplotu totiž dochází ke znehodnocení obrobku chemicko-tepelnými změnami.

1 Titan a jeho slitiny

Tato první kapitola bakalářské práce se věnuje poznání titanu jako materiálu z různých úhlů pohledu. Pro názornost jsou přiloženy k jednotlivým podkapitolám tabulky srovnání parametrů s jinými materiály, konkrétně s konstrukční ocelí 11 600 a nerezovou ocelí AISI 304.

1.1 Názvosloví titanových slitin

Titan je majoritním prvkem mnoha slitin. K němu se pak přidávají další prvky, tzv. legury, zejména za účelem změny mechanických vlastností. Tyto slitiny mají různé způsoby označování. Jedním ze způsobů je číselné označení hlavních legujících prvků, které jsou tyto:

1-Cu (měď)

2-Sn (cín)

3-Mo (molybden)

4-V (vanad)

5-Zr (zirkonium)

6-Al (hliník)

7-Ni (nikl)

8-Cr (chrom)

9-ostatní

Například pro označení slitiny, která je legována hliníkem a vanadem použijeme označení Ti64.

Dalším způsobem označování je napsání chemické značky legujícího prvku společně s jeho středním procentuálním obsahem. Takové označení tudíž v sobě nese nejen informaci o druhu legur, ale i o jejich množstevním zastoupení ve slitině. Budeme-li se držet předchozího příkladu slitiny obsahující hliník a vanad, a doplníme-li informaci, že obsah hliníku ve slitině je 6 % a obsah vanadu ve slitině je 4 %, pak můžeme tuto slitinu označit jako Ti-6Al-4V. [7]

1.2 Rozdělení titanových slitin podle fázi

Slitiny titanu se rozdělují podle fázových přeměn do 3 kategorií:

1.2.1 Slitiny titanu α

Tyto slitiny jsou tuhým roztokem hliníku a titanu (Ti + Al), přičemž obsah hliníku nepřesahuje 7 %. Využívají se pro méně náročné aplikace. [1]

1.2.2 Slitiny titanu β

Legujícími prvky jsou zde hlavně Fe, Mo, V, Cr a Mn. Tyto slitiny se vyznačují výrazně vyšší pevností než slitiny fáze α . [1]

1.2.3 Slitiny titanu $\alpha + \beta$

Jak již název napovídá, v této fázi jsou přítomny legury jak z fáze α (Al), tak i z fáze β (V, Mo, Mn, Cr, Fe). Pevnost těchto slitin se pohybuje někde na pomezí mezi oběma fázemi, což odpovídá přibližně 1000 Mpa, přičemž přesná hodnota je závislá na konkrétním složení dané slitiny.

Nejběžnějším a nejhojněji využívaným zástupcem této skupiny je slitina titanu Ti-6Al-4V, jejíž pevnost je 990 Mpa. [1]

1.3 Chemické složení slitiny Ti-6Al-4V

Tato slitina se využívá v různých modifikacích. Jednou z nich je například Ti-6Al-4V ELI (*Extra Low Interstitials*), která má díky nižšímu obsahu příměsí, zejména kyslíku, dusíku a uhlíku, vyšší odolnost proti lomům při velmi nízkých teplotách. Dále může být tato slitina označena P38 nebo P58, což vyjadřuje čistotu slitiny (množství příměsí). Ve strojírenství se nejběžněji využívá standardní slitina Ti-6Al-4V s depozitem příměsí podle standartu P58, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce, která zachycuje množství jednotlivých prvků ve slitině (v procentech). Některé zdroje však uvádějí několikanásobně větší obsahy vedlejších legujících prvků (příměsí) včetně tolerancí jejich obsahu, což vyplývá z tabulky 1. [2, 3]

Tabulka 1 - Chemické složení Ti-6Al-4V [2, 3]

	Al	V	C	H	O	N	Fe
Ti-6Al-4V P58 [%]	5,97	3,95	0,005	0,002	0,064	0,02	0,004
Standartní odchylka podle P58 [%]	±2	±2	±14	±11	±14	±7	±4
Ti-6Al-4V [%]	5,5-6,5	3,5-4,5	0,1	0,015	0,2	0,05	0,3

Titan je z pohledu chemie velmi reaktivní prvek, což velmi komplikuje a zužuje možnosti jeho opracování (obrobení) a použití. Vysoká reaktivita se projevuje například mezi titanem a kyslíkem (O), dusíkem (N), uhlíkem (C) a vodíkem (H). [4]

1.4 Mechanické vlastnosti titanu

Titan je navzdory své poměrně nízké hustotě velmi mechanicky odolný. To je důvod, proč je tak hojně využíván pro aplikace, kde vyžadujeme výborné mechanické vlastnosti dané součásti a zároveň její nízkou hmotností. Titan a jeho slitiny mají nevýraznou mez kluzu, proto pro ně používáme tzv. smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$), což je hodnota stanovená při zkoušce tahem jako napětí při prodloužení zkušebního vzorku o 0,2 %. [5, 6, 7]

Číselné hodnoty mechanických vlastností slitiny Ti-6Al-4V ve vyžáhaném stavu jsou uvedeny ve srovnávací tabulce společně s mechanickými vlastnostmi oceli 11 600 a nerezové oceli AISI 304.

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V, E355 a AISI 304 [1, 7, 8, 9]

	Slitina Ti-6Al-4V	Ocel 11 600 (E355)	Nerezová ocel AISI 304
Mez pevnosti v tahu R_p [Mpa]	900	570	505
Mez kluzu $R_k / R_{p0,2}$ [Mpa]	830	400	215
Tažnost [%]	12	32	70

1.5 Fyzikální vlastnosti titanu

Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V vychází z vlastností titanu, který je výjimečný zejména pro své výborné mechanické vlastnosti ve spojení s nízkou hustotou (4500 kg/m^3), což je ve srovnání s ostatními kovy jedna z nižších hodnot. Titan je dále charakteristický svou nízkou tepelnou vodivostí, což způsobuje značné komplikace při jeho obrábění. Pro některé aplikace však tento fakt může být naopak výhodou.

Tvrdoost titanu podle Vickerse činí $HV_{0,5} = 327 \text{ MPa}$, což je poměrně vysoká hodnota. Pro lepší představu lze uvést, že titan je řazen do 9 skupiny v Mohsově srovnávací stupnici tvrdosti, kam spadá i korund nebo chrom. Z hlediska magnetismu je titan paramagnetický, což pro praxi mimo jiné znamená znemožnění použití magnetických upínačů na obráběcích strojích. Naopak při aplikacích v lékařství je tato jeho vlastnost velmi podstatná, neboť se titanové součásti často implantují do těla jako například kloubní náhrady a podobně, a magnetické vlastnosti materiálu by zde byly nežádoucí. [2, 10, 11]

Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V jsou uvedeny v tabulce. Pro srovnání uvádím i fyzikální vlastnosti oceli 11 600 a nerezové oceli AISI 304.

Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti Ti-6Al-4V, E355 a AISI 304 [2, 10, 11, 12]

	Slitina Ti-6Al-4V	Ocel 11 500	Nerezová ocel AISI 304
Modul pružnosti v tahu E [GPa]	111	210	195
Tepelná vodivost T [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	5,44	47	Přibližně 15
Magnetismus [-]	paramagnetikum	feromagnetikum	feromagnetikum
Součinitel tření (dynamický) f [-]	Ti64 – Ti64 0,3	11 600 – 11 600 0,4	AISI 304 – Cu 0,21

2 Broušení

Vysoké přesnosti a kvality povrchu se dosahuje především použitím technologie broušení, lapování, honování nebo superfinišování, což jsou technologie obrábění využívající nástroje s nedefinovanou geometrií břitu. Při broušení tvoří třísku v jednom okamžiku i několik set brusných zrn. [13]

Při broušení dochází vlivem velkých plastických deformací a tření k výraznému nárůstu teploty (až 1500 °C). Proto je potřeba broušený povrch chránit vhodným řezným prostředím, abychom zabránili nežádoucím chemicko-tepelným změnám. Měrné řezné síly při broušení mohou dosahovat až několika desítek tisíc MPa. [13]

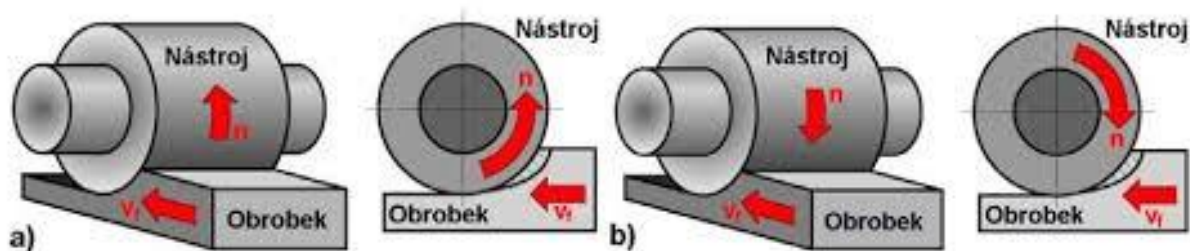
Broušení se často používá jako dokončovací operace, při níž se odebírá jen velmi tenká vrstva materiálu. Díky moderním strojům, které disponují vysokým výkonem, lze dnes technologii broušení použít i pro hrubování. Toho se využívá zvláště u těžkoobrobitelných a tvrdých materiálů. Zde broušení může nahradit například frézování, které je kvůli vlastnostem obrobku prakticky neproveditelné. [13]

2.1 Stroje pro broušení rovinných ploch

2.1.1 Oscilační rovinné brusky

Pro rovinné broušení jsou v praxi nejhojněji využívané oscilační brusky. Jsou založeny na principu staticky umístěného vřeteníku s brusným kotoučem, jehož uložení se liší podle konstrukčního uspořádání brusky, a rovinného stolu, který koná oscilační pohyb.

Hlavní pohyb stolu probíhá v ose X. Tímto pohybem je posuv materiálu kolmo na osu rotace kotouče, a to buď v sousledném, nebo nesousledném směru. Rozdíl mezi sousledným a nesousledným broušením rovinných ploch je patrný z obrázku 1. Stůl se tedy pohybuje ve směru posuvu a po vyběhnutí z materiálu se vrací na svoji výchozí pozici. Následuje příčný posuv ve směru osy Y a celý pohyb se opakuje. Od tohoto periodicky se opakujícího pohybu získaly oscilační brusky svůj název.



Obrázek 1 - rovinné broušení a) nesousledné, b) sousledné [27]

Příčný posuv materiálu na jedno přejetí je veličina, která je kritická zejména pro opotřebení kotouče. Pokud by byla hodnota příčného posuvu příliš nízká, kotouč by se opotřebovával nerovnoměrně a bylo by tak potřeba časté orovnávání kotouče. K tomu slouží tzv. orovnávač, který na kotouči vytvoří opět přesnou válcovou plochu. Orovnávání kotoučů je však velmi ekonomicky nevýhodné, neboť při něm dochází k opotřebení orovnávače, zmenšení průměru kotouče, což vede k jeho nízké životnosti. Navíc tato činnost zdržuje výrobní proces. Příčný posuv musí být vždy menší, než je šířka brusného kotouče, jinak by nebyla broušena celá plocha, ale vznikaly by na ní jen vybroušené pruhy.

Důležitým pohybem stroje je také výškový přísuv v ose Z, který umožňuje nastavení hloubky řezu a kompenzaci poloměrového úbytku kotouče. Tento pohyb je konán buď stolem, nebo vřeteníkem, což záleží na konstrukčním uspořádání stroje.

Dnes se již i při broušení hojně využívá technologie CNC řízení, která zdatelně zvyšuje stupeň automatizace výrobních procesů, ale díky opakovatelnosti i přesnost a časovou úsporu.

Oscilační brusky je možno rozdělit podle konstrukčního uspořádání na několik typů (sloupové, konzolové, portálové). Vzhledem k požadavku vysoké tuhosti konstrukce pro hloubkové broušení těžkoobrobitelných materiálů se jeví jako nejvhodnější sloupová bruska

2.1.2 Brusky s rotačním stolem

Další v praxi hojně využívanou alternativou pro broušení rovinných ploch je rovinná bruska s rotačním stolem, často nazývaná karuselová bruska, což je odvozeno od rotačního pohybu stolu.

V tomto případě je osa rotace kotouče vodorovná a osa rotace stolu svislá. Kotouč zároveň koná translační pohyb ve směru osy jeho rotace. Důsledkem složitější kinematiky této brusky může být nižší tuhost konstrukce a tím i nižší dosažitelná přesnost broušení.

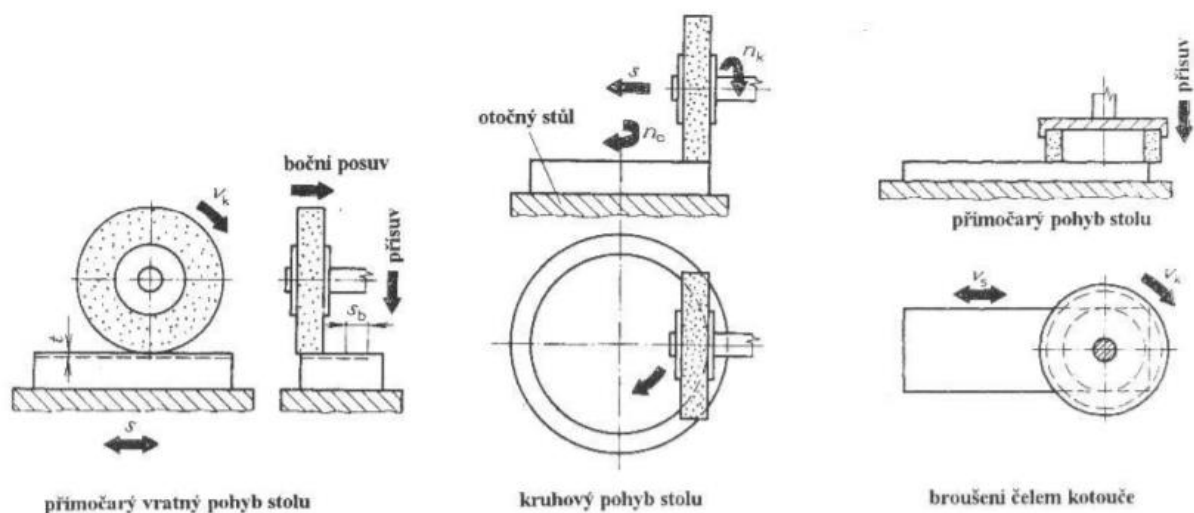
Broušením na tomto typu rovinné brusky vzniká reliéf ve tvaru soustředných kružnic. Proto je vhodné využít tuto variantu zejména při broušení rotačních obrobků, jako jsou například brzdové kotouče automobilů, kde není tvar reliéfu pouze otázkou estetiky, ale zajišťuje stálý součinitel smykového tření mezi brzdovou destičkou a kotoučem, kterého by se podélným broušením dosáhnout nepodařilo. Běžné rozměry obrobků jsou do 700 mm průměru a v řádech desítek milimetrů výšky.

2.1.3 Svislé rovinné brusky

Broušení rovinných ploch můžeme realizovat i na rovinné brusce se svislou osou rotace kotouče. V technických provozech bývá tato bruska často nazývána přezdívkou „Žralok.“

Tyto brusky jsou vyráběny v různých modifikacích. Základem každé z nich je ale vřeteník se svislou osou rotace, na kterém je upnut brusný kotouč. Podle konkrétní aplikace můžeme volit stroje s různou kinematikou. Běžně jsou tyto brusky vybaveny posuvným stolem nebo posuvným vřeteníkem. Druhá varianta ale většinou ubírá na tuhosti stroje a tím i dosahované přesnosti, nebo potřebou masivnější konstrukce zvětšuje rozměry stroje. Někdy se používají i svislé rovinné brusky s posuvným vřeteníkem a rotačním stolem. Kombinací translačního nebo rotačního pohybu stolu s rotací kotouče vzniká na povrchu obrobku po broušení reliéf tvořený navzájem se překrývajícími kružnicemi.

Tvar kotouče pro svislou rovinnou brusku je oproti předchozím dvěma typům brusek jiný. Je tomu tak proto, aby se upínací mechanismus při obrábění nedotýkal obráběné plochy. Kotouč je uprostřed zúžený a na jeho okraji tak vzniká rozšířené mezikružší, které při broušení přichází do kontaktu s materiálem. Upínací matice se tak vejde do vytvořeného zúžení a nevyčnívá přes čelo kotouče.



Obrázek 2 - způsoby rovinného broušení [16]

2.2 Způsoby broušení rovinných ploch

2.2.1 Běžné (dokončovací) broušení

Broušení je ve výrobě běžnou dokončovací operací, pokud je třeba dosáhnout vysokého stupně přesnosti nebo drsnosti povrchu obrobku. Postupně se po malých hodnotách hloubky řezu odebere celý přídavek na broušení. V tabulce 4 umístěné pod podkapitolou „*hloubkové broušení*,” je uvedena dosahovaná drsnost povrchu (R_a) a používané řezné podmínky v_c (řezná rychlost) a a_p (hloubka řezu) pro srovnání technologií hloubkového a konvenčního broušení.

2.2.2 Hloubkové broušení (creep-feed grinding)

Hloubkové broušení je taková operace broušení, při které se volí velká hloubka řezu (řádově v jednotkách milimetrů) a nízká hodnota posuvu ve srovnání s běžným broušením. Oproti konvenčnímu broušení se celý přídavek na broušení odebere během jednoho přejezdu kotouče.

Výhodou hloubkového broušení s pomalým posuvem jsou malé síly působící na brusná zrna v kotouči. To je způsobeno tím, že díky pomalému posunu je tloušťka třísky odebíraná jedním brusným zrnem velmi malá. Benefitem této vlastnosti je pomalejší opotřebení brusného kotouče a tím pádem i nižší náklady na nákup kotoučů a jejich zarovnávání během používání. [14]

Naopak je tomu se silou, která je vyvíjena na vřeteno brusky. Následkem vyšší hloubky řezu je každé brusné zrno v kontaktu s materiálem delší dobu, než při běžném broušení. To zapříčiňuje vyšší celkovou řeznou sílu a tím i vyšší potřebný výkon brusky a tuhost její konstrukce. [14]

Tabulka 4 - Srovnání hloubkového a konvenčního broušení [15]

	Konvenční broušení	Hloubkové broušení
Řezná rychlost [m/s]	40 - 60	30 - 40
Hloubka řezu [mm]	do 0,1	0,1 - 10
Drsnost R_a [μm]	1,6 – 0,2	1,6 – 0,2

3 Brusné kotouče

Brousicí nástroj charakterizují: geometrický tvar a velikost, druh brusiva, pojivo, zrnitost, tvrdost, struktura a koncentrace brusiva. O těchto vlastnostech je pojednáno v této kapitole.

Na konci této kapitoly jsou uvedena specifika a doporučení pro volbu brousicích kotoučů pro broušení slitiny Ti-6Al-4V. Tyto parametry jsou dále využity pro vyhledání konkrétních brusných kotoučů v katalozích výrobců brusiv.

3.1 Opotřebení brusných kotoučů

Opotřebení brusných kotoučů je následkem vylamování zrn z kotouče. Během broušení dochází k postupnému otupení zrna, díky čemuž značně naroste řezná síla působící na zrno a v důsledku toho dojde až k jeho vylomení z pojiva.

K opotřebení dochází na obvodu kotouče (resp. na čele kotouče u čelních brusek) nerovnoměrně. Proto je zapotřebí nejen zajistit přísun kotouče k broušenému materiálu, kvůli zmenšování průměru (resp. šířky) kotouče, ale také válcovitost (resp. rovinnost) styčné plochy kotouče s obrobkem. Toho se dosahuje zařazením orovnávacího procesu do obráběcího procesu. Pro orovnávací se používají orovnávače, které jsou ve většině případů diamantové a dělí se na dva základní typy. Těmi jsou monokrystalové diamantové orovnávače, které jsou tvořeny stopkou a jedním krystalem diamantu v kovové vazbě, a prachové diamantové orovnávače, které mají také stopku, ale k orovnávací kotouče využívají diamantový prach v kovovém pojivu. Pro orovnávací nebo výrobu tvarových kotoučů se používají orovnávače tavrové s přesně definovanou geometrií, nebo monokrystalové s ostrým vrcholovým úhlem, na kterých se dosahuje požadovaného tvaru kotouče za pomoci CNC řízení.

3.2 Tvrdost kotouče

Pod pojmem tvrdost kotouče rozumíme odpor, který klade pojivo proti vylomení zrna z kotouče. Čím tvrdší a křehčí je materiál, tím měkčí kotouč je potřeba zvolit, neboť se se budou otupená zrna rychleji vylamovat a uvolňovat místo novým, ostrým zrnům v hlubších vrstvách kotouče. Tvrdost se označuje velkými písmeny G (nejměkčí) až Z (nejtvrdší). [3]

Tabulka 5 - Tvrdost brusných kotoučů [3]

Stupeň tvrdosti	označení
Velmi měkký	G H
Měkký	I J K
Střední	L M N O
Tvrký	P Q R S
Velmi tvrdý	T U
Zvlášť tvrdý	V Z

Tvrdost brusného kotouče má tedy zásadní vliv na samoostření. To je pro broušení titanových slitin zásadní. Vzhledem k tomu, že titanová slitina Ti6Al4V je velmi tvrdá, tvrdost kotouče budu volit nízkou, a to v rozmezí I, J, K, L.

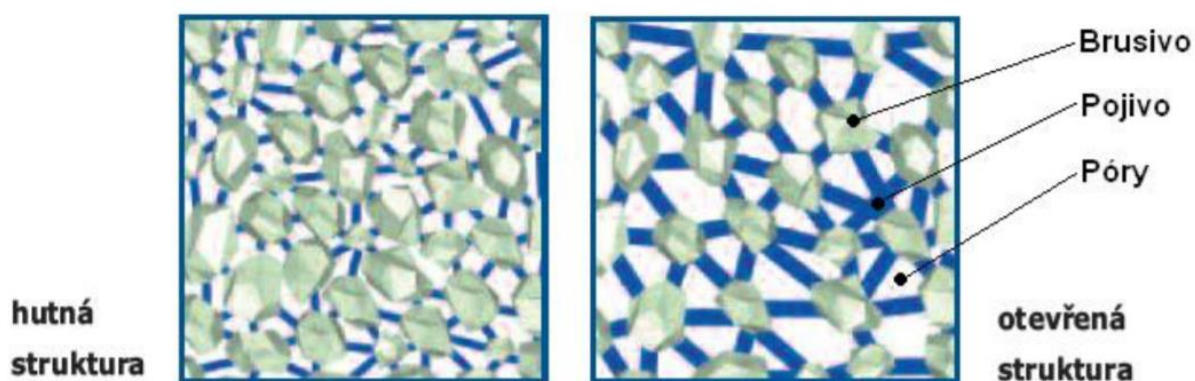
3.3 Struktura kotouče

Brusný kotouč je tvořen dvěma základními složkami, kterými jsou brusivo, plnicí funkci broušení, a pojivo, zajišťující kompaktnost kotouče. Struktura a složení kotouče jsou klíčové vlastnosti pro jeho správnou funkci.

Struktura kotouče je definována jako objem pórů v % celkového objemu. Je označována číslem od 1 (pro nejhutnější kotouče) do 18 (pro velmi pórovité kotouče). Pórovité kotouče mají velké prostory mezi zrny (póry), méně se zanášejí a lépe se chladí, neboť chladicí kapaliny mohou ulpívat v pórech a dostat se tak až do místa řezu. [3]

Tabulka 6 - Struktura brusného kotouče [3]

Označení	Struktura	Objem pórů [%] (± 4 %)
1	Velmi hutná	3
2		8
3	Hutná	13
4		18
5	Polohutná	23
6		28
7	Pórovitá	33
8		38
9	Velmi pórovitá	43
10		48
11	Zvlášť pórovitá	53
12		58
13		63



Obrázek 3 - Struktura brusného kotouče [16]

Struktura brousícího kotouče má zásadní vliv na čištění a chlazení kotouče a místa řezu. Pro náročné operace (zejména z hlediska vzrůstající teploty), ke kterým hloubkové broušení titanových slitin bezesporu patří, je vhodný kotouč s velmi pórovitou až zvlášť pórovitou strukturou.

3.4 Broušící materiály

Brusivo je ve struktuře kotouče zastoupeno ve formě brusných zrn, které jsou rozptýleny v matici kotouče tvořené pojivem. Tyto zrna mají z hlediska tvaru neurčitou nástrojovou geometrii. Během broušení dochází k postupnému otupení zrna, díky čemuž značně naroste řezná síla působící na zrno a v důsledku toho dojde až k jeho vylomení z pojiva. Brusivo, neboli ostřívo, bývá často rozdělováno do dvou skupin podle původu, a to na přírodní a syntetické brusné materiály. [13]

3.4.1 Přírodní brusné materiály

Dříve byly přírodní brusné materiály jedinou možností pro broušení. Dnes najdou tyto materiály uplatnění jen pokud je jejich využití výhodné z hlediska ekonomického (pokud je jejich získání levnější, než výroba syntetických brusných materiálů podobných vlastností), nebo pokud nelze umělým brusivem dosáhnout stejných výsledků. Dnes jsou přírodní brusiva na ústupu a na jejich místa se dostávají brusiva umělá. [13]

Přírodní korund

Obsahuje oxid hlinitý (Al_2O_3) v koncentraci asi 80 až 90 %. Zbytek tvoří další minerály. Má vysokou tvrdost a není příliš křehký. [13]

Smírek

Podobné složení jako korund, ale obsahuje více příměsných minerálů a koncentrace Al_2O_3 je jen kolem 60 %, což nepříznivě ovlivňuje jeho tvrdost a tím i brusné vlastnosti. [13]

Křemen

Ve složení je zastoupen oxid křemičitý (SiO_2) v koncentraci až 97 % a příměs dalších minerálů. [13]

Přírodní diamant

Vyniká svou tvrdostí, dobrou tepelnou vodivostí, vysokým modulem pružnosti. Je však v poměru k ostatním brusným materiálům využíván méně pro svoji vysokou cenu. [13]

3.4.2 Syntetické brusné materiály

Syntetické brousící materiály v dnešní době úspěšně nahrazují ty přírodní. Hlavním důvodem upřednostňování syntetických materiálů jsou stále rostoucí požadavky na mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti brousících materiálů. Dalším argumentem pro nahrazení přírodního materiálu jeho syntetickým ekvivalentem může být také cena, například u diamantu. [13]

Umělý diamant

Svémi vlastnostmi se umělé diamanty velice podobají diamantům přírodním. Kvůli nižší ceně jsou však mnohem více využívány.

Získávají se pomocí katalyzátoru z materiálu obsahujícího uhlík. Tím je ve valné většině případů grafit. Katalyzátorem mohou být kovy (např. chrom, železo, nikl, kobalt). Katalyzátor se za vysokého tlaku (cca. 10-20 GPa) a teploty (cca. 1500-2500 °C) taví a uhlík mění svou strukturu z hexagonální (grafit) na krychlovou (diamant). Získané krystaly nabývají příčného rozměru do jednoho milimetru.

Syntetické diamanty lze aplikovat v širokém spektru případů. Pro jejich vysokou tvrdost lze pomocí nich obrábět i velmi tvrdé materiály používané jako brusiva, například korund (orovnávání brusných kotoučů). Dále můžeme diamanty využít při obrábění velmi tvrdých kovových materiálů. Nelze je však využít při obrábění ocelí, neboť při zvýšené teplotě a tlaku ocel uhlík z nástroje naváže. [13]

Kubický nitrid boru (CBN)

Syntéza CBN se poprvé uskutečnila v roce 1957. Jeho krystalová mřížka je krychlová, stejně jako u diamantu, ale obsahuje atomy dusíku a boru, s většími intervaly mezi atomy. Proto nevykazuje tak vysokou tvrdost jako diamant, avšak mezi ostatními brusnými materiály svou tvrdostí vyniká. Je však díky svému chemickému složení inertní vůči železu, a proto se využívá zejména pro obrábění železných slitin (např. legované oceli). Nástroje z CBN nejsou tolik náchylné na adhezní a difúzní opotřebení jako nástroje diamantové. [13]

Karbid boru (BC)

Karbid boru se vyrábí z kyseliny borité a uhličitého materiálu v elektrických pecích. V porovnání například s umělým korundem má karbid boru při stejné zrnitosti menší poloměry

zaoblení vrcholů zrn (zrna jsou ostřejší). Dochází tak ale k rychlejšímu opotřebení zrn a vznikají na nich plošky opotřebení. [13]

Karbid křemíku (SiC)

Vyrábí se v elektrické peci při vysoké teplotě (2100-2200 °C) z křemenného písku a antracitu. Při výrobě dochází ke křemíkování uhlíkových částic parami kyseliny křemičité. Karbid křemíku je podle složení zelený nebo černý. Zelený obsahuje alespoň 97 % SiC, je tvrdší, ale méně houževnatý. Používá se zejména pro broušení nástrojů ze slinutých karbidů. Černý karbid křemíku má obsah SiC o něco nižší (cca. 95 %). Využití nachází při broušení kovů s malou pevností v tahu, jako je šedá a bílá litina, měď, mosaz, hliník, křehké druhy bronzů atd. [13]

Umělý korund

Je krystalický oxid hlinitý (Al_2O_3) s příměsí nečistot, který se získává vytavením bauxitu v elektrické peci. Používá se pro broušení materiálů s vysokou pevností v tahu, jako jsou oceli, temperovaná litina, bronz atd. Tento brusný materiál se dělí do několika skupin. [13, 17]

- 96A -hnědý korund
- 98A -světle růžový korund
- 99A -bílý korund barevný červeně
- 99BA -bílý korund
- 98RA -rubínový korund
- 99SA -mikrokrystalický korund
- 90MA - monokrystalický korund
- 97PA - polokřehký korund
- 97EA -zirkonový korund

Monokorund

Oproti normálnímu umělému korundu obsahuje méně nečistot a až 99% krystalického oxidu hlinitého. Vyniká dobrými řeznými vlastnostmi. Používá se pro broušení legovaných kalených ocelí. [13]

Při vypracovávání této části jsem se dopodrobna seznámil s brusnými materiály a jejich doporučenými aplikacemi. Pro broušení titanových slitin budu vybírat kotouče ze zeleného SiC. Ve správnosti mé volby jsem se utvrdil také v katalozích brusných kotoučů, kde pro broušení titanových slitin doporučují jako brusivo právě zelený karbid křemíku.

3.5 Zrnitost

Zrnitost je dalším parametrem brusiva či brousicího nástroje. Udává se číslem (4 - 1200). Toto číslo udává počet ok síta na palec (25,4 cm), kterým zrno propadne. Z tohoto principu vycházejí dnes platné normy FEPA (Federation of European Producers of Abrasives) Platí tedy, že čím větší je číslo zrnitosti, tím jemnější je brusivo a naopak. Tabulka s orientačním rozdělením zrnitostí brousicích nástrojů. [3]

Tabulka 7 - Zrnitost brusiva [3]

Zrnitost dle FEPA	Zařazení
7, 8, 10, 12	Velmi hrubá
14, 16, 20, 22, 24, 30	hrubá
36, 40, 46, 54, 60	střední
70, 80, 90, 100, 120	jemná
150, 180, 220, 240	Velmi jemná
280, 320, 400, 500, 600	Zvlášť jemná
800, 1000, 1200	extrajemná

Hrubost brusiva je důležitá kvůli řezným silám působícím na jednotlivá zrna. Zrna nesmí být příliš velká, aby řezné síly nevylamovaly zrna okamžitě. Při velmi jemné zrnitosti zase není možné dosáhnout vyšších úběrů materiálu. Z těchto důvodů budu volit střední až jemnou hrubost zrn (60-80).

3.6 Pojivo

Pojivo je jednou ze dvou hlavních složek brusného nástroje. Jeho funkcí je držet pohromadě jednotlivá brusná zrna. Pro různé aplikace se používají různá pojiva.

Tabulka 8 - Pojiva pro brusné kotouče [3]

Druh pojiva	Označení podle ČSN 22 4010	Složení	Použití
Keramické	V	Směsi různých křemičitanů	Základní pojivo normálních kotoučků s výjimkou prořezávacích
Silikátové	S	Alkalické křemičitany	Omezené použití, např. pro měkké tvarové kotouče nebo drobné nástroje
Magnezitové	O	Cementové pojivo z magnezitu	Omezené použití pro méně přesné broušení
Přírodní šelak	E	Organická látka	Menší pevnost než bakelit. Nástroje na ozubení apod.
Pryž	R	Vulkanizovaná s přídavkem síry	Pro velké rychlosti, hladký povrch obráběný
Umělé pryskyřice	B	Např. Bakelit	Po keramickém nejdůležitější pojivo. Vhodné pro broušení závitů a pro nárazové broušení
Kovové	-	Slitiny mědi, lehké kovy, aj.	Pro diamantové kotouče

Ve spojení s vybraným brusným materiálem, kterým je zelený SiC, se používá téměř výhradně keramické pojivo. To je pro broušení těžkoobrobitelných materiálů také jediné vhodné. Proto budu hledat kotouče s keramickým pojivem.

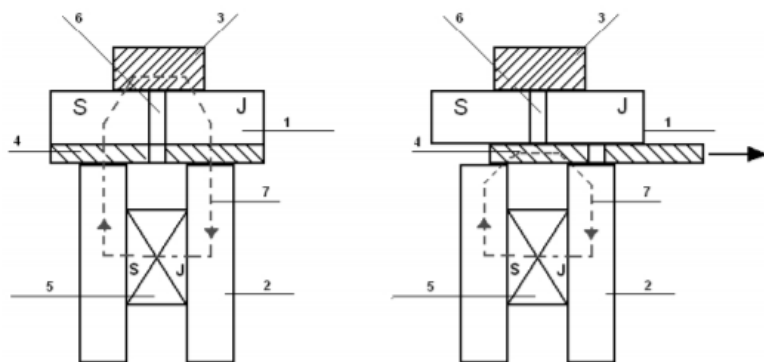
4 Upnutí obrobku

Obrobek je nutné při broušení vždy důkladně zafixovat, aby se nemohl pohybovat. Správnost upnutí obrobku se promítá na výsledné přesnosti. Pro upínání obrobků se používají specializované přípravky, které jsou zkonstruovány pro upínání jedné konkrétní součásti, případně skupiny podobných součástí. Další možností je použití upínačů, které se vyznačují velkou variabilitou, avšak pro některé obrobky (např. tvarově složité) nemusí být vhodné.

4.1 Druhy upínacích systémů

4.1.1 Magnetický upínač s permanentními magnety

Tento druh upínače využívá pro vytvoření upínací síly permanentní magnety. V dnešní době se jedná téměř výhradně o magnety neodymové. Upínání je tedy nezávislé na vnějším zdroji elektrického proudu. Výhodou je, že se tento upínač nezahřívá a jeho použití je v porovnání s elektromagnetickými upínači bezpečnější. Vyvstává zde však složitý problém s aktivací a deaktivací upínače, který je vyřešen mechanickým směřováním magnetického pole pomocí posuvné zkratovací planžety.



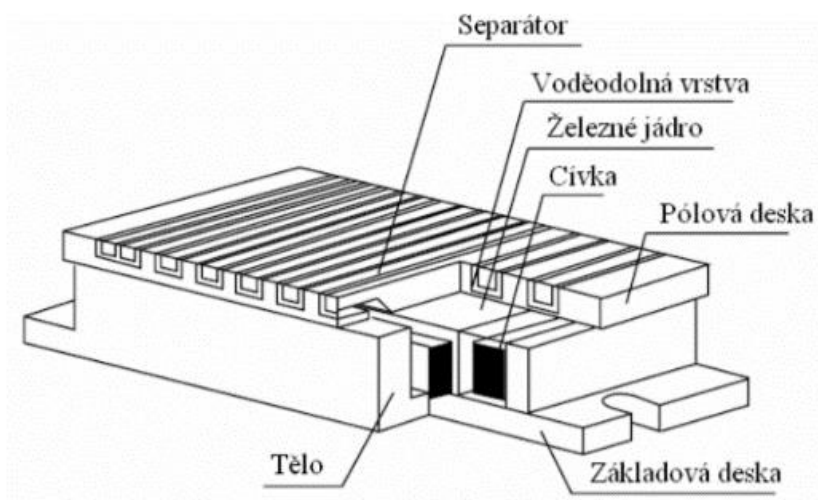
Popis obrázku 4:

- 1 - pólová deska
- 2 - pólové nástavce
- 3 - obrobek
- 4 - zkratovací planžeta
- 5 – magnet
- 6 - nemagnetická spára
- 7 - tok magnetických indukčních čar

Obrázek 4 - Magnetický upínač s permanentními magnety [18]

4.1.2 Elektromagnetický upínač

Elektromagnetický upínač je nejstarším typem magnetických upínačů. Jeho funkce zajišťují cívky uložené uvnitř pod pólovou deskou, kterými protéká stejnosměrný proud. Je tedy zapotřebí vnějšího zdroje elektrického proudu. Z cívek se stává elektromagnet, který působí magnetickou silou na obrobek z feromagnetického materiálu. Tím je obrobek zafixován proti vertikálnímu i horizontálnímu pohybu. Tento typ upínání je vhodný pro obrobky s rovnou plochou, která dosedne na desku upínače a zajistí kvalitní upnutí.



Obrázek 5 - Elektromagnetický upínač [18]

4.1.3 Manuální upínací technika

Manuální upínky jsou nezákladnějším prostředkem pro upínání obrobků. Upínací síla je vyvozována pákovým mechanismem, který se zaaretuje v žádané poloze. Vyrábí se v mnoha provedeních podle funkce (horizontální, vertikální, hákové, ojnicní atd.). Jejich výhodami jsou zejména nižší pořizovací náklady, variabilita a stabilita upnutí. Největší nevýhodou upínek je fakt, že mohou zasahovat do dráhy nástroje, což při spoustě operací znemožňuje jejich použití (upínku je například nutno upnout na plochu, kterou chceme obrábět).



Obrázek 6 - Strojní svěrák [19]

Dalším typem manuální upínací techniky jsou strojní svěráky (Obrázek 6). Ty se většinou montují na stůl stroje (například u rovinných brusek) a do nich se upíná obrobek. Upínací síla je zde vyvozena pohybovým šroubem, hydraulickým nebo pneumatickým pístem, nebo jiným způsobem. Strojní svěráky zajišťují stabilní a přesné upnutí (přesnost závisí na přesnosti svěráku). Vystává zde ale často podobný problém jako u upínek, a to že část svěráku zasahuje do dráhy nástroje. Jsou vhodné jen pro některé obrobky (nejlépe paralelní protějšší stěny, malé rozměry). Strojní svěráky mohou být úhlově nastavitelné v jedné nebo ve více osách.

4.1.4 Vakuová upínací technika

Další možností upínání obrobků na stolech obráběcích strojů jsou vakuové upínací desky. Principem tohoto způsobu upínání je vytvoření vakua mezi rovinnou plochou obrobku a upínací vakuovou deskou. Upínací síla je tudíž vyvozena atmosferickým tlakem působícím shora na obrobek.

Upínací desky jsou opatřeny drážkami, nejčastěji ve tvaru čtvercového rastru (Obrázek 7). Do těch se v závislosti na tvaru obrobku vkládá gumové těsnění, které zajišťuje hermetické uzavření prostoru mezi plochou obrobku a vakuovou deskou, odkud je možno následně odsávat vzduch a vytvořit tak podtlak. Vakuum je generováno buď externím vakuovým čerpadlem nebo pomocí Venturiho trubice a stlačeného vzduchu, což je využíváno častěji, neboť rozvody stlačeného vzduchu či kompresor bývají běžným vybavením obráběcích pracovišť.

Velikost posuvné síly obrobku je přímo závislá na drsnosti povrchu obrobku, tlakovém rozdílu mezi uzavřeným prostorem pod obrobkem a okolním prostředím, a na odsávané ploše. Většina upínacích desek využívá pracovního tlaku stlačeného vzduchu 3-8 bar (0,3 - 0,8 MPa), pomocí něhož jsou schopny generovat pod obrobkem maximální vakuum až 93 %, což odpovídá absolutnímu tlaku 0,07 bar (0,007 MPa). Přítlačná síla F_p vychází přímo z definice tlaku:

$$F_p = (P_E - P_I) \cdot S$$

Kde P_E je vnější tlak, P_I je tlak pod obrobkem a S je plocha, ohraničená těsněním.

Posuvná síla obrobku se stanoví jako třecí síla mezi obrobkem a upínací deskou. [20]



Obrázek 7 - Vakuová upínací deska se čtvercovým rastrem [20]

5 Řezné prostředí

Volba řezného prostředí je z hlediska technologie velmi zásadní. Správně zvolené technologické podmínky totiž mohou přinést mnohem více benefitů, než je chlazení, o kterém se ve spojitosti s řezným prostředím mluví nejčastěji. Mohou znatelně zvýšit výslednou kvalitu povrchu, zabránit tepelnému poškození obrobku, zpomalit opotřebení nástroje a mnoho dalších. Základní rozdělení řezných prostředí vychází ze skupenství. Dělí se na plynné řezné prostředky, aerosoly a řezné kapaliny.

5.1 Plynné řezné prostředky a aerosoly

Plynným řezným prostředím je nejčastěji vzduch při tzv. broušení za sucha. Vzduch má zejména chladicí funkci, avšak není možné ho použít tam, kde je potřeba intenzivní chlazení, neboť není schopen odvádět velké množství tepla. Proto se tento způsob využívá pro broušení při nižších výkonech. Výhodou vzduchu jako řezného prostředí je bezesporu čistota obrobku a stroje, jednoduchost procesu a ekologičnost. [13,21]

Aerosoly jsou řezné kapaliny rozprášené v malých kapičkách v plynu (nejčastěji opět ve vzduchu). Vlastnosti tohoto řezného prostředí jsou podobné jako při chlazení vzduchem, avšak s přidanými vlastnostmi rozprášené řezné kapaliny, kterými jsou například mazání, lepší odvod tepla, antikorozní účinek na obrobek atd. [13]

5.2 Řezné kapaliny

Řezné kapaliny jsou nejpoužívanějšími řeznými prostředími. Oproti plynným prostředím mají řadu předností. Hlavními požadavky na řezné kapaliny jsou [13]:

- Chladicí účinek
- Mazací účinek
- Odvod třísek z místa řezu
- Čištění kotouče
- Antikorozní účinek na obrobek a stroj
- Chemická a fyzikální stálost
- Netoxicity, baktericidita, hygieničnost
- Bezpečnost před požárem a explozí
- Příznivý vliv na sedimentaci odpadu broušení

Řezné kapaliny se dělí podle jejich chemického složení a fyzikálních vlastností na následující hlavní skupiny:

5.2.1 Oleje

Zjišťují mazání stykových ploch obrobku a nástroje. Tím snižují tření mezi nimi a omezují vznik tepla. Zároveň vedou ke zmenšení řezných sil. Nevykazují dobré chladicí vlastnosti, tudíž jsou používány při malých řezných rychlostech, kdy nevzniká tolik tepla. Vlivem použití olejové chladicí kapaliny může docházet k zanášení kotouče třískou a tím k narušení jeho správné činnosti. Oleje se dále dělí na mastné oleje a tuky, minerální oleje a řezné oleje. [13, 22, 23]

5.2.2 Vodné roztoky

Jedná se v podstatě o vodu, která obsahuje příměsi látek s požadovanými vlastnostmi. Jde zejména o látky, které zajišťují antikorozní ochranu a látky zvyšující smáčivost vodného roztoku (řezná kapalina se tak snadněji dostane mezi kotouč a obrobek nebo do pórů v kotouči. [23]

5.2.3 Emulze

Emulze je disperzní soustava dvou nemísitelných kapalin, z nichž jedna je ve formě mikroskopických kapiček rozptýlena v kapalině druhé. Požadovaná emulzní struktura vzniká přidáním tzv. emulgátorů.

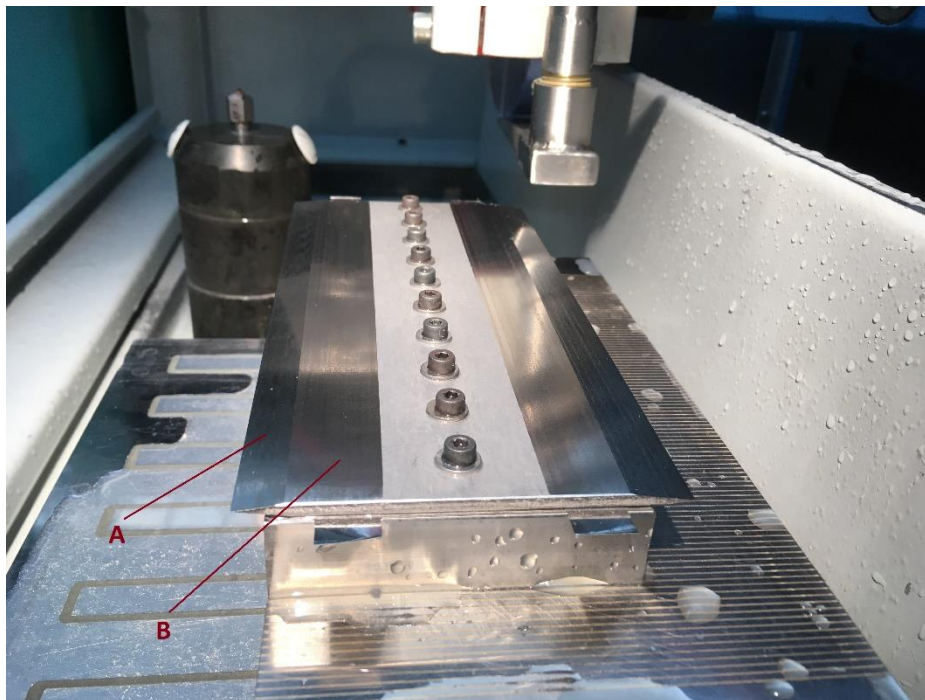
Emulzní chladicí kapaliny většinou tvoří mikroskopické kapičky minerálního oleje rozptýlené ve vodě nebo vodném roztoku přídatných látek (např. antikoročních nebo emulgátorů). Tyto řezné kapaliny do určité míry spojují výhody použití vodných roztoků a olejů. Vynikají dobrým chladicím a mazacím účinkem. Vlastnosti konkrétních emulzních řezných kapalin jsou závislé na jejich složení. Hlavním kritériem je množství oleje ve vodě, které se udává v procentech a pohybuje se nejčastěji mezi 2 % a 10 %, přičemž u broušení se tato procentuální koncentrace pohybuje mezi 2 % a 3 %. [22, 23]

Pro broušení titanových slitin je z mého pohledu nejvhodnějším řezným prostředím olejová emulze, která zajistí jak chladicí, tak i mazací funkci.

6 Konkretizace procesu broušení

6.1 Popis obráběné součásti

Součást, která je určena pro zkoušení intenzity omílání na omílacích strojích, je vyrobena ze slitiny Ti-6Al-4V. Její geometrie je patrná z Obrázku 9.



Obrázek 9 - Obrobek upnutý na přípravku ve stroji



Obrázek 8 - Zkušební těleso

Polotovarem pro výrobu zkušebních těles je titanový plech. Ten je nejprve po celé délce broušen na obou krajích pod definovaným úhlem do tvaru ostří (plocha A na Obrázku 8). Následně jsou na obou stranách plechu vybroušeny plochy, které definují přesnou tloušťku zkušebního tělesa (plocha B na Obrázku 8). Po těchto operacích je titanový plech nařezán na jednotlivá zkušební tělesa o šířce 25 mm.

6.2 Popis použité brusky

Pro provedení obou broušících operací byla použita bruska Mikronex BRH 20 CNC (Obrázek 10), jejíž základní parametry jsou uvedeny v Tabulce 9.



Obrázek 10 - Bruska Mikronex BRH 20 CNC [24]

Tabulka 9 - Parametry brusky Mikronex BRH 20 CNC [24]

Rozměr pracovního stolu	200 x 600 mm
Podélný posuv stolu	600 mm
Příčný posuv stolu	250 mm
Vzdálenost osy kotouče od stolu	525 mm
Broušící kotouč	250x76x20 mm
Otáčky broušícího vřetena	2670, 3820 ot/min
Výkon hlavního motoru	2,2 kW
Max. hmotnost obrobku včetně upínače	200 kg
Hmotnost stroje	1850 kg

6.3 Problematika upnutí obrobku

Použití magnetického upínače bylo vyloučeno kvůli fyzikálním vlastnostem materiálu (titan je paramagnetický). Další možností mohl být vakuový upínač, ovšem jeho použití by bylo značně nebezpečné kvůli jednostrannému ohřívání materiálu. Materiál se při broušení ohřívá více na horní straně. V důsledku toho by mohlo dojít k prohnutí titanového plechu, ztrátě těsnosti prostoru mezi upínačem a obrobkem, a následnému uvolnění obrobku. Proto byla tato možnost taktéž vyloučena.

K broušení byly tedy nakonec použity jednoúčelové upínací přípravky zhotovené z oceli. Do titanového plechu byly vyvrtány díry tak, aby mohl být pomocí šroubů připevněn k přípravkům. Ty byly upnuty na stůl brusky pomocí magnetického upínače a byly důsledně vyrovnány s osou X pomocí úchylkoměru. Pro broušení ostří byl použit přípravek tvaru kvádra s podstavou tvaru pravoúhlého lichoběžníku (na Obrázku 11). Pro broušení paralelních ploch byl použit kvádrový přípravek s obdélníkovou podstavou (na Obrázku 12). Pro zajištění podpory v místě broušení byl obrobek při broušení paralelních ploch podkládán tenkými kovovými planžetami. V přípravcích byly vyvrtány díry a vyřezány závitové upnutí obrobku.



Obrázek 11 - Zkosený upínací přípravek pro broušení ostří



Obrázek 12 - Rovný upínací přípravek s podkládacími planžetami

6.4 Konkretizace výběru brusného kotouče

Brusný kotouč pro brusku Mikronex BRH 20 CNC má mít podle rešerše v oblasti brusných kotoučů následující parametry:

Tabulka 10 - Doporučené parametry brusného kotouče

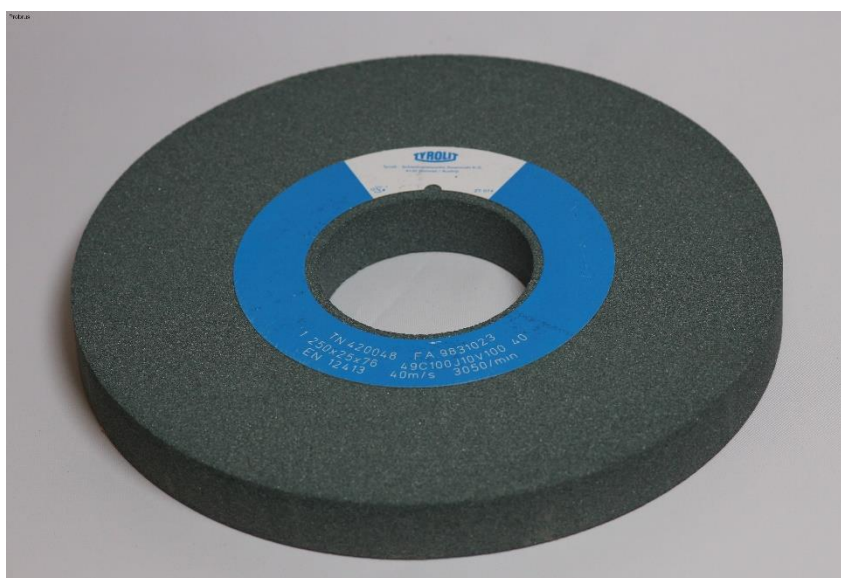
Brusivo	Zelený SiC
Pojivo	Keramické
Zrnitost	Střední (60 – 80)
Tvrдость	Nízká (I, J, K, L)
Struktura	Pórovitá (9 – 12)
Průměr kotouče	200 – 250 mm
Šířka kotouče	20 – 25 mm
Průměr díry	51 mm

Konkrétní kotouče byly vybírány z katalogů výrobců brusných nástrojů. Jmenovitě jde o firmy Tyrolit, Norton, 3M, Elbe, Commet. Dále jsou uvedeny dva kotouče, které svými vlastnostmi nejlépe odpovídají stanoveným požadavkům a doporučením.

Kotouč z katalogu Tyrolit

Broušený materiál	ocel (řada 11)	ocel (<55HRC)	ocel (<67HRC)	nerez	tvrdkov, SiC	litina	kámen	barevné kovy	slitiny titanu	plast, sklolaminát
Použití				☐	■	☐	☐	■	■	☐
D × T × H						karbid křemíku zelený , pojivo keramické				
420041	414 36 - 2254.00	1	250×25×76				49C 60 K 9 V 40			1

Obrázek 14 - Vybraný kotouč z katalogu Tyrolit [17]



Obrázek 13 - Brusný kotouč ze zeleného SiC [25]

Kotouč z katalogu Norton abrasives

ROZMÉR DxTxH (mm)	TVAR	P	FA	FB	Odhrotování & Ostření	Broušení	Materiály	SPECIFIKACE	Maximální pracovní rychlost (m/s)	ART. NO.	BALENÍ MNOŽSTVÍ	KVALITA ŘADA
250x25x76	01							20C 40 K VC	25	4002442041	1	AAA

TVAR 01 TVAR 05 TVAR 07 TVAR 20 TVAR 01C

Vybrání/Vnitřní konkávní průměr
 Vybrání/Konkávní tloušťka A
 Vybrání/Konkávní tloušťka B
 Nástroje
 Ostření pil
 Kotouče do stolních brusek
 Vnitřní průměr
 Vnější průměr
 Povrch
 Vysoce legované oceli & rychlořezné oceli
 Měkké oceli
 Nerez oceli
 Neželezné oceli & Karbidy
 Litina

BARVA BRUSNÉHO ZRNA

NQ	NQ Vit ³	A
38A	38A Vit ³	19A
32A	GF	SG
86A	25A	
37C	39C	

Obrázek 15 - Brusný kotouč z katalogu Norton [26]

6.5 Řezné podmínky

Vzhledem k povaze materiálu a tvaru obrobku je creep feed broušení vyloučeno. Obrobky jsou tenké, takže se velmi rychle zahřívají. Pro optimální výsledek bez tepelného ovlivnění materiálu je tedy potřeba volit velmi malé úběry materiálu (v řádech mikrometrů) a intenzivně chladit obrobek i nástroj. Pro zkrácení strojního času a tím i zefektivnění výroby bude nastavena vysoká rychlost posuvu. Boční posuv kotouče po jednom pracovním zdvihu stroje by podle doporučení neměl přesáhnout desetinu šířky kotouče, což v našem případě odpovídá 2,5 mm.

Použité řezné podmínky:

Tabulka 11 - Řezné podmínky

Řezná rychlost	25 m/s
Hloubka řezu při hrubování	5 μm
Hloubka řezu na čisto (posledních 5 μm)	2 μm
Stranový posuv mezi zdvihy	1,5 mm
Rychlost obrobku	15 m/min
Počet vyjiskřovacích cyklů	7



Obrázek 16 - Nastavení brusky (hloubka řezu)



Obrázek 17 - Nastavení brusky (meze polohy)

Pro chlazení a částečně i mazání obrobku a nástroje byl použit emulzní olej rhenus xy 100 rs o koncentraci oleje 4 %. Broušení proběhlo za popsanych podmínek uspokojivě. Ani na zvlášť citlivých místech, jako jsou konce ostří, nebyly obrobky znehodnoceny chemicko-tepelnými změnami.

Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo zpracovat rešerši věnující se různým aspektům broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V, a to zejména výběru vhodného brusného nástroje (kotouče) a následně doporučení optimálních řezných podmínek.

V první části práce jsem se věnoval popisu rozdělení titanových slitin, jejich názvosloví, složení a vlastnostem, a to se značným důrazem na konkrétní titanovou slitinu Ti-6Al-4V. Vyhledal jsem v několika zdrojích její chemické složení a vlastnosti, které jsem pro názornost porovnal s vlastnostmi běžné konstrukční oceli E355 (dle staršího značení 11 600) a nerezovou ocelí AISI 304. Z porovnání je dobře zřejmý velký rozdíl mezi vlastnostmi těchto materiálů a lze díky němu předpokládat značné obtíže při obrábění titanových slitin.

Druhá část práce je zaměřena na popis technologie broušení a přináší přehled strojů pro rovinné broušení s popisem jejich kinematiky a vhodných aplikací. Závěrem jsou vysvětleny rozdíly mezi moderním hloubkovým broušením (creep feed grinding), které se zařazuje jako hrubovací operace, a konvenčním broušením, které je operací dokončovací.

Ve třetí části jsou zevrubně popsány vlastnosti brusných kotoučů vždy společně s úvahou o tom, jakých parametrů by měl v daném ohledu kotouč nabývat, chceme-li s ním brousit titanové slitiny.

Dále jsou v práci popsány možnosti upínání obrobků na rovinných bruskách a druhy řezných prostředí, používané ke chlazení a mazání kotouče a obrobku.

Poslední část práce je věnována konkrétnímu výrobnímu procesu. Polotovarem je titanový plech, ze kterého rovinným broušením a následným nařezáním vzniknou zkušební tělesa pro omílací stroje. Jsou zde popsány všechny důležité parametry tohoto výrobního procesu, jako jsou specifika kotouče, řezné prostředí, řezné podmínky, způsob upnutí. Výroba proběhla uspokojivě. Vyrobená tělesa nebyla nijak tepelně ani mechanicky poškozena. To je důkazem, že úvahy z rešeršní části o parametrech kotouče a řezném prostředí byly správné.

Použitá literatura

- [1] MACEK, Karel a Petr ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01507-6.
- [2] BRANDL, Erhard, Achim SCHOBERTH a Christoph LEYENS. Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM). *Materials Science & Engineering A* [online]. 2012, 532 [cit. 2020-07-22]
- [3] *Základní rozdělení brusných kotoučů*. TumliKOVO [online]. b.r. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
- [4] Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. 2011, 2011, 57(1-4) [cit. 2020-07-22].
- [5] *Periodická tabulka: Titan* [online]. 2017 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/22.html>
- [6] YANG, Tao, Yilu ZHAO a Weihong LIU. L12-strengthened high-entropy alloys for advanced structural applications. *Journal of materials research* [online]. 10/2018, 33(19) [cit. 2020-07-22].
- [7] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 0-87170-686-5
- [8] Aerospace specification metals Inc. *ASM* [online]. [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>
- [9] AMZALLANG, Claude. *Low cycle fatigue and life prediction* [online]. ASTM International, 1982

[10] *Periodická tabulka: Titan [online]. 2017 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z:*

<http://www.prvky.com/22.html>

[11] *E-konstruktér [online]. [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>*

[12] *Základní rozdělení brusných kotoučů. TumliKOVO [online]. b.r. [cit. 2017-05-10].*

Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>

[13] *J. Maslov, Teorie broušení kovů. PRAHA: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1979.*

[14] *10 Things to Know About Creep-Feed Grinding [online]. Peter Zelinski, 2018 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.mmsonline.com/articles/10-things-to-know-about-creep-feed-grinding>*

[15] *ORTEGA, N., H. BRAVO a I. POMBO. Thermal Analysis of Creep Feed Grinding. *Procedia Engineering* [online]. 2015, 132 [cit. 2020-07-22].*

[16] *Broušení RAJ [online]. Ostrava: Střední průmyslová škola Ostrava- Vítkovice, příspěvková organizace [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT2-12_Brouseni_RAJ.pdf*

[17] *Katalog skladových výrobků: pro univerzální broušení [online]. Tyrolit CEE [cit. 2020-07-17]. Dostupné z:*

https://www.tyrolit.cz/fileadmin/Documents/Trade/Catalogues/TYROLIT_2019_A5_CZ_1_7_OB.pdf

[18] *VOLNÝ, Pavel. Vývojové trendy magnetických upínačů pro upínání feromagnetických předmětů [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z:*

<https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/14-volny.pdf>

[19] Kitagawa: Europe [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z:
<https://www.kitagawa.global/cz/products/sveraky/nizkoprofilove-sveraky-s-dlouhym-zdvihem/ve160ln>

[20] Bo-import: nářadí a nástroje [online]. 2015 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z:
<https://www.bo-import.cz/upinaci-naradi/vakuove-upinani/vakuova-upinaci-deska-200x300-mm-7800bx-amf-375733-21274.html>

[21] Obrábění a zpracování kovů: chlazení [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z:
<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1281>

[22] PETŘÍK, Václav. Využití různých systémů chlazení pro obrábění materiálů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, 107 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/18283>.
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bílek, Ondřej.

[23] KOČMAN, Karel. Speciální technologie : Obrábění. 3.,peprac. a dopl. vyd. Brno : CERM, 2004. 227 s

[24] Universální bruska na plocho: Mikronex BRH 20 CNC [online]. Na Úlehli 1286/16, 141 00, Praha 4: MIKRONEX [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>

[25] Probrus [online]. 2018 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z:
<https://www.probrus.com//produkt/41436-227400-t1-250%c3%9725%c3%9776-49c-100-j-10-v%c2%a0c40/?produktId=9>

[26] Průmyslové aplikace [online]. Norton, 2018 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z:
[https://www.brusivo-nastroje.cz/katalogy/norton/Norton Industrial MRO Czech 2018 v05 1.pdf#page=25](https://www.brusivo-nastroje.cz/katalogy/norton/Norton%20Industrial%20MRO%20Czech%202018%20v05%201.pdf#page=25)

[27] BRYCHTA, J. a R. ČEP. Nové směry v progresivním obrábění [online]. Ostrava: VŠB, 2007 [cit. 2020-07-20]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z:
<http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - rovinné broušení a) nesousledné, b) sousledné [27]	15
Obrázek 2 - způsoby rovinného broušení [16]	17
Obrázek 3 - Struktura brusného kotouče [16]	21
Obrázek 4 - Magnetický upínač s permanentními magnety [18].....	27
Obrázek 5 - Elektromagnetický upínač [18]	28
Obrázek 6 - Strojní svěrák [19]	29
Obrázek 7 - Vakuová upínací deska se čtvercovým rastrem [20]	30
Obrázek 9 - Zkušební těleso	34
Obrázek 8 - Obrobek upnutý na přípravku ve stroji.....	34
Obrázek 10 - Bruska Mikronex BRH 20 CNC [24]	35
Obrázek 11 - Zkosený upínací přípravek pro broušení ostří	36
Obrázek 12 - Rovný upínací přípravek s podkládacími planžetami.....	37
Obrázek 13 - Brusný kotouč ze zeleného SiC [25]	38
Obrázek 14 - Vybraný kotouč z katalogu Tyrolit [17]	38
Obrázek 15 - Brusný kotouč z katalogu Norton [26]	38
Obrázek 16 - Nastavení brusky (hloubka řezu)	39
Obrázek 17 - Nastavení brusky (meze polohy)	39

Obrázky, u kterých není v hranaté závorce uveden zdroj, byly vyfoceny mnou, nebo panem inženýrem Zdeňkem Pitrmucem v halových laboratořích fakulty strojní ČVUT.

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení Ti-6Al-4V [2, 3]	11
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V, E355 a AISI 304 [1, 7, 8, 9]	12
Tabulka 3 - Fyzikální vlastnosti Ti-6Al-4V, E355 a AISI 304 [2, 10, 11, 12]	13
Tabulka 4 - Srovnání hloubkového a konvenčního broušení [15].....	18
Tabulka 5 - Tvrdost brusných kotoučů [3].....	20
Tabulka 6 - Struktura brusného kotouče [3]	21
Tabulka 7 - Zrnitost brusiva [3]	25
Tabulka 8 - Pojiva pro brusné kotouče [3]	26
Tabulka 9 - Parametry brusky Mikronex BRH 20 CNC [24]	35
Tabulka 10 - Doporučené parametry brusného kotouče.....	37
Tabulka 11 - Řezné podmínky	39