

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



Ondřej Posnar

Broušení slitin titanu

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

2021

Prohlášení

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

V Hradci Králové dne:

Podpis:

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc., za vedení, pomoc a cenné rady při jejím vypracování.

Děkuji Ing. Zdeňku Pitrmucovi za obrovskou pomoc, čas a rady, obzvláště při samotném měření.

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

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá tématem slitin titanu a jejich broušení. V první rešeršní části se zabývá titanem, jeho slitinami a strojírenským zpracováním. Následuje rozbor problémů při obrábění slitin titanu a poté vymezuje samotný proces broušení. V druhé části je zpracováno praktické měření při rovinném broušení slitiny Ti-6Al-4V a porovnání složek působících sil. Hlavním cílem je stanovení optimálních řezných podmínek v závislosti na velikosti řezných a pasivních sil.

Klíčová slova

Titan, slitina titanu, broušení, obrábění, obrobitelnost, vlastnosti, procesní kapalina, řezná síla, pasivní síla, řezné podmínky

Annotation

This bachelor thesis deals with the topic of titanium alloys and their grinding. The first research part deals with titanium, its alloys and its engineering processing. The following is an analysis of problems in machining titanium alloys and then defines the grinding process itself. In the second part, a practical measurement of plane grinding of Ti-6Al-4V alloy and comparison of acting force components is processed.

Key words

Titanium, titanium alloy, grinding, machining, machinability, properties, cutting fluid, cutting force, passive force, cutting conditions

Obsah

1 Úvod	8
2 Titan jako prvek	9
2.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti	9
2.2 Výskyt	10
2.3 Výroba	11
2.3.1 Krollův proces	11
2.3.2 Maddexův-Eastwoodův postup	11
2.3.3 Výroba elektrolytickou redukcí.....	12
2.4 Využití titanu.....	12
3 Slitiny titanu	13
3.1 Tepelné zpracování slitin titanu	14
3.2 Rozdělení slitin titanu	14
3.2.1 Slitiny v modifikaci α	15
3.2.2 Slitiny v modifikaci β	15
3.2.3 Slitiny v modifikaci $\alpha + \beta$	15
3.3 Přehled využití slitin titanu.....	16
4 Strojírenská výroba dílců z titanových slitin	18
4.1 Plošné tváření	18
4.2 Kování.....	19
4.3 Svařování	19
4.4 Odlévání	20
5 Obrábění slitin titanu	20
5.1 Obrobitelnost a problémy při obrábění titanu.....	21
5.2 Řešení problémů při obrábění titanu.....	21
5.2.1 Nástrojové materiály.....	21
5.2.2 Procesní kapaliny	22
5.2.3 Řezné úhly a další parametry při obrábění titanu	22
6 Broušení	23
6.1 Broušení titanu	24
6.1.1 Brousící nástroje	25
6.1.2 Druhy brusiva	25
6.1.3 Pojiva	26
6.1.4 Tvrdost brusných kotoučů	28

6.1.5 Chlazení při broušení.....	29
6.2 Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi.....	30
6.3 Mechanismus opotřebení při vysokorychlostním abrazivním broušení slitiny titanu a jeho vliv na integritu povrchu	32
6.4 Vznik povrchového zbytkového napětí na slitině titanu generované pásovým broušením	35
6.5 Vliv parametrů broušení na vývoj mikrostruktury slitiny titanu TC21	36
7 Praktická část.....	37
7.1 Polotovar	37
7.2 Bruska.....	38
7.3 Brusný kotouč	39
7.4 Procesní kapalina	40
7.5 Měření	41
7.5.1 Měření bez vyjiskření	41
7.5.2 Měření s vyjiskřením	44
7.6 Výsledky měření.....	53
7.6.1 Výsledky měření bez vyjiskření.....	53
7.6.2 Výsledky měření s vyjiskřením.....	54
8 Závěr	56
9 Zdroje	58

1 Úvod

Toto téma bakalářské práce jsem si vybral proto, že jeho slitiny se stále více využívají ve všech oborech zabývajících se nejen strojní výrobou. To hlavně díky svým skvělým mechanickým vlastnostem, vysokou odolností vůči korozi a pro svoji menší hmotnost danou nižší hustotou v porovnání s ocelí. Dalším důvodem je, že výrobky ze slitin titanu se čím dál tím více objevují v každodenním životě a rozsah jejich využití neustále roste. To je dané tím, jak se objevují nové materiály a technologie, jež umožňují ekonomicky výhodnější a rychlejší výrobu dílců ze slitin titanu. [2,7]

Obrábění tohoto materiálu není ovšem vůbec snadné, protože při něm vznikají mnohem větší řezné síly, těžko se správně utváří tříska a vzniká větší tendence k vylamování břitu nástroje při jeho vnikání a výstupu ze záběru. Proto bych chtěl v této práci popsat a shrnout metody broušení slitin titanu a problémy s tím spojené. [2,7]

V praktické části budou měřeny velikosti řezné a pasivní síly v různých řezných podmínkách při rovinném broušení slitiny Ti-6Al-4V. Cílem bude najít optimální řezné podmínky při nastavených parametrech, ideální poměr mezi velikostmi sil, určit ekvivalentní hloubku třísky a intenzitu poklesu sil.

2 Titan jako prvek

Titan je šedý až stříbřitě bílý (na *Obr.1*), lehký kov, jehož hustota je 4,540 kg/m³. V přírodě je poměrně hojně zastoupený v zemské kůře. Je velmi tvrdý, obzvláště vzhledem ke své hustotě, křehký a mimořádně odolný proti korozi i ve slané vodě. Jeho výrazně většímu technologickému uplatnění brání doposud vysoká cena výroby čistého kovu. Hlavní uplatnění nalézá jako složka různých slitin a protikorozních ochranných vrstev, ve formě chemických sloučenin slouží často jako složka barevných pigmentů. [9]



Obr.1 - Tyčinka z titanového krystalu [4]

Poprvé byl objeven roku 1791 anglickým chemikem Williamem Gregorem v minerálu ilmenitu a pojmenován Martinem H. Klaprothem roku 1795. Izolován byl nicméně až v roce 1910 M. A. Hunterem pomocí zahřívání chloridu titaničitého TiCl₄ s kovovým sodíkem v ocelové tlakové nádobě. [9]

2.1 Fyzikálně-chemické vlastnosti

Titan je lehký a tvrdý kov. Je dobrým vodičem elektřiny. Vyznačuje se mimořádnou chemickou stálostí, protože je zcela netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Zvolna se rozpouští v kyselině chlorovodíkové, naopak kyselina dusičná jeho povrch pasivuje. Pro jeho rozpouštění je

nejúčinnější kyselina fluorovodíková nebo její směsi s jinými minerálními kyselinami. [3,10]

Za zvýšených teplot však titan přímo reaguje s většinou nekovů, například s vodíkem, kyslíkem, dusíkem, uhlíkem, borem, křemíkem a halogeny. [9,10]

Patří mezi neušlechtilé kovy a snadno vytěsňuje ušlechtilé kovy z jejich solí. Titan má značný sklon k tvorbě komplexních sloučenin, ve kterých vystupuje obvykle s koordinačním číslem 6, méně často 4. Ve sloučeninách se titan vyskytuje nejčastěji jako čtyřmocný. Sloučeniny trojmocného titanu jsou podstatně méně rozšířené. Sloučenin dvoumocného titanu existuje pouze několik, např. oxid titanatý (TiO) a nestabilní halogenidy. [9]

2.2 Výskyt

Průměrný obsah titanu v zemské kůře činí 0,61 %. Jedná se o desátý nejrozšířenější prvek periodické soustavy. Přírodní titan je směsí pěti stabilních izotopů. V přírodě se titan vyskytuje značně rozptýlen, bývá obsažen téměř v každé půdě. Nejdůležitější rudy titanu s jeho nejvyšším zastoupením jsou ilmenit (FeTiO_3), rutil, perovskit (CaTiO_3) a titanit (CaTiSiO_5). [9,10]

V minulosti, obzvláště v období studené války, byla výroba kovového titanu soustředěna téměř výhradně v SSSR, protože titan byl strategická surovina, jehož výroba byla přísně tajná. Díky špionáži byl zjištěn výrobní postup, který byl následně předán do USA a dál do západní Evropy. [9,10]

Nyní dochází k největší těžbě rud titanu, obzvláště ilmenitu a rutilu, celosvětově v Číně, v Austrálii a ve Vietnamu. Z evropských zemí má nejvyšší těžbu i potvrzené zásoby ilmenitu i rutilu Ukrajina. [9,10]

2.3 Výroba

Průmyslová výroba titanu se provádí poměrně složitým, značně energeticky náročným procesem z chloridu titaničitého (TiCl_4), nejčastěji redukcí roztaveným hořčíkem, sodíkem nebo aluminotermicky. [3,9,12]

2.3.1 Krollův proces

Chlorid titaničitý potřebný pro Krollův proces se připravuje chlorací rutilu nebo ilmenitu. Pokud je surovinou rutil (TiO_2), ruda se smísí s uhlím v poměru 3:1, briketuje se a poté redukuje v atmosféře při teplotě 700 °C. Vlastní chlorace se provádí v elektricky vytápěné šachtové peci při teplotě 800-1200 °C. Chlorid titaničitý vzniká v párách a poté kondenzuje jako nažloutlá kapalina. Jestliže se použije ilmenit (FeTiO_3), musí se nejprve provést jeho selektivní redukce v obloukové peci na surové železo. Titan tvoří snadno chlorovatelný karbid, který přejde do strusky. Krollův proces probíhá při teplotách 850-900 °C v železných nádobách v ochranné atmosféře helia nebo argonu. Produktem je houbovitý titan, který se usazuje na stěnách kelímku. Nezreagovaný hořčík a vzniklý chlorid hořečnatý se odstraní promýváním kyselinou chlorovodíkovou nebo vakuovou destilací. Titanová houba se slisuje do tvaru elektrody, která se přetavuje v elektrické obloukové peci na kompaktní kov. [3,9,12]

2.3.2 Maddexův-Eastwoodův postup

Ten spočívá v redukcí plynného chloridu titaničitého kapalným hořčíkem za zvýšeného tlaku. Produktem je suspenze kovového titanu v tavenině chloridu hořečnatého. Suspenze z redukční pece kontinuálně odtéká do elektrické pece, kde dojde k odpaření nezreagovaného hořčíku a chloridu hořečnatého. [3,9,12]

2.3.3 Výroba elektrolytickou redukcí

Tento postup je pojmenován po svém objeviteli jako Frayův proces výroby titanu, tzv. FFC proces. Elektrolyzují se pelety oxidu titaničitého (TiO_2), elektrolytem je tavenina chloridu vápenatého (CaCl_2), katoda i anoda jsou z grafitu. Pracuje se s napětím 2,8-3,2 V za teploty 950-1000 °C v inertní atmosféře. Redukčním činidlem je vápník vznikající na katodě. Výhodou FFC procesu je zejména rychlost a jednoduchost celého postupu. [3,9,12]

Elektrolyzér pro elektrolytickou redukcí tvoří skloněná ležatá nádoba. Grafitová anoda tvoří víko a katoda dno elektrolyzéro. Do šikmé mezery mezi elektrodami se kontinuálně dávkuje válcovité pelety TiO_2 , které se gravitačně posunují po šikmém dně. V nejnižším místě nádoby se hromadí peletky vyredukovaného titanu, které se mechanickým dopravníkem nepřetržitě odstraňují. [3,9,12]

2.4 Využití titanu

Titan nachází uplatnění zejména kvůli svému poměru mezi váhou a pevností. Dále je používán pro svoji vysokou chemickou odolnost. Hlavní využití nalézá jako přísada do speciálních slitin. Slitiny titanu nalézají rozsáhlé využití jako konstrukční materiál, zejména ve zbrojní výrobě, letectví, raketové technice, kosmonautice, bioinženýrství nebo v chemickém průmyslu. Společně s borem je důležitým legujícím prvkem hliníkových slitin, do kterých se přidává pro zjemnění jejich struktury. [8,10]

Velmi tvrdý nitrid titanu (TiN_2) a diborid titanu (TiB_2) se používají jako brusivo a k povrchové úpravě břitů obráběcích nástrojů. Chlorid titaničitého (TiCl_3) slouží jako nejdůležitější katalyzátor při výrobě polypropylenu. Karbid titanu (TiC) slouží k výrobě žáruvzdorné keramiky. Disulfid (TiS_2) se používá k výrobě

katod do některých typů lithiových baterií a také k výrobě polovodičů. Chlorid titaničitý (TiCl_4) se používá v pyrotechnice jako náplň dýmovnic. [3,8,10]

3 Slitiny titanu

Titan se používá zejména jako přísada do speciálních slitin. Přídavek titanu podstatným způsobem ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti, kdy dochází k jejich zlepšení. Slitiny titanu dosahují nejvyššího poměru mezi pevností a hustotou ze všech kovových materiálů. Mají skvělé mechanické vlastnosti a schopnost vysoké tepelné zátěže díky nízké teplotní vodivosti. Mezi jejich další přednosti patří vysoká pevnost v tahu a zároveň v porovnání s ocelí dochází k úspoře hmotnosti dané nižší hustotou slitin titanu. Další jejich výhodou je vysoká odolnost proti korozi, a to dokonce vyšší než u nerez ocelí. To umožňuje časté využití v chemickém průmyslu. Jejich vysoká biokompatibilita umožňuje používání titanových slitin v lékařství při výrobě protéz. [3,8,10]

Slitiny titanu mají ale i určité nevýhody, což v současné době znesnadňuje jejich větší používání v průmyslové výrobě. Hlavní nevýhodou je vysoká cena titanu. Ta je v porovnání s hliníkem dokonce osmkrát vyšší. Mají nižší modul pružnosti ($E=116 \text{ GPa}$) v porovnání s ocelí. Nevýhodou je i poměrně vysoká chemická reaktivita nad $500 \text{ }^\circ\text{C}$ s kyslíkem, vodíkem a dusíkem, kdy vznikají na povrchu křehké vrstvy, které se musí následně odstranit. Proto se slitiny titanu musí přetavovat ve vakuových indukčních pecích, aby nedocházelo ke styku s atmosférickými plyny, a to je po finanční stránce poměrně nákladné. Stejně tak i odlévání titanových slitin musí probíhat ve vakuu. Mezi další nežádoucí vlastnosti patří špatné tření, kdy má povrch tendenci k zadírání a také při sváření, kdy se musí zabránit styku titanu s atmosférickými plyny. Proto se musí titan a jeho slitiny svařovat v ochranné atmosféře. A mezi poslední závažný

problém patří špatná obrobitelnost v důsledku nízké teplotní vodivosti, kdy dochází k lokálnímu přehřívání. Při teplotách nad 1200 °C totiž hrozí samovznícení třísek. Při obrábění taktéž hrozí nalepování obráběného materiálu na nástroj. Těmito problémy se budu zabývat v dalších fázích mé práce. [3,8,11]

3.1 Tepelné zpracování slitin titanu

Ke zlepšení výsledných mechanických vlastností slitin titanu se používá převážně žíhání a zušlechťování. Zvláštnosti tepelného zpracování těchto slitin jsou dány hlavně složitostí přeměny modifikace beta na alfa. Zušlechťování se používá kvůli zisku většího podílu nestabilní fáze beta. Ta se dalším zpracováním, jenž je právě žíhání, převádí na stabilní fázi alfa. [3]

Žíhání je použito kvůli odstranění vnitřního pnutí vzniklých po třískovém obrábění, rovnání, svařování apod. Provádí se při teplotách 450 až 650 °C. Dalším typem žíhání použitého pro slitiny titanu je žíhání rekrystalizační, které se využívá k odstranění deformačního zpevnění slitin tvářených za studena. Běžná teplota rekrystalizačního žíhání je 800 °C. Žíhání izotermické, kdy se slitiny titanu ohřívají na 800 až 950 °C, se používá kvůli zvýšení pevnosti i při vyšších teplotách zároveň s dobrou tvárností. [3,10]

3.2 Rozdělení slitin titanu

Slitiny se rozdělují podle rozpustnosti přísad ve fázi alfa a ve fázi beta a jejich stabilizačního vlivu na tyto fáze. Mezi prvky, které se přidávají do slitin titanu úmyslně i neúmyslně, patří například kyslík, dusík, uhlík, vodík, železo a křemík. [3,8,9]

Kyslík a dusík se dobře rozpouštějí v obou krystalových modifikacích. Stabilizují výrazněji fázi alfa, kdy již při malých množstvích výrazně zvyšují pevnost a snižují plasticitu. Uhlík se rozpouští v obou modifikacích omezeně. Za

normální teploty pod 0,25 procenta obsahu, kdy do tohoto množství zvyšuje mechanické vlastnosti. Nad 0,25 procenta obsahu vzniká karbid titanu (TiC). Vodík způsobuje precipitaci hydridu titanu, což způsobuje pokles houževnatosti. Právě proto se snaží udržet obsah vodíku pod 0,01 procenta obsahu. Železo je nežádoucí nečistotou v titanových slitinách. Slučuje se s titanem při jeho výrobě redukcí. Křemík působí negativně na houževnost, proto je zapotřebí udržet obsah křemíku pod 0,1 procenta. [3,9]

3.2.1 Slitiny v modifikaci α

Jedná se o homogenní tuhý roztok, který má šesterečnou mřížku. Jako přísadový prvek se zde více používá hliník, dusík, kyslík a uhlík. Teplota fázové přeměny se zvyšuje v závislosti na koncentraci přísady. Tyto slitiny v modifikaci α dosahují do 600 °C výborných mechanických vlastností. Mají zároveň dobrou svařitelnost a jsou i poměrně dobře použitelné na tepelné zpracování. [3,8]

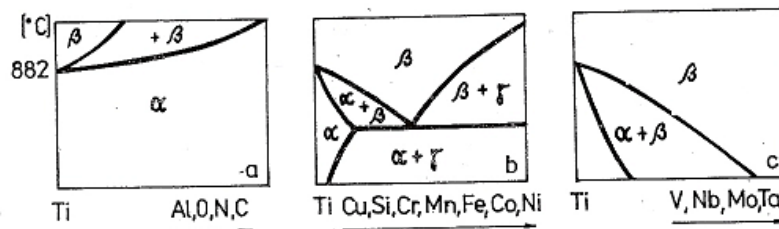
3.2.2 Slitiny v modifikaci β

Je to tuhý roztok s kubickou stereocentrickou mřížkou. Jako přísadové prvky, které mají za úkol stabilizovat roztok a snížit teplotu přeměny, se používají křemík, chrom, mangan, železo, kobalt, nikl a měď. Teplota přeměny se snižuje a beta je tak stabilní i za normální teploty. Při takto velkém počtu přísad ztrácí slitiny v modifikaci β nízkou hmotnost, protože tyto prvky ji zvyšují. Výhodou těchto slitin je velmi vysoká odolnost proti korozi a dobrá svařitelnost za běžných teplot. [3,8]

3.2.3 Slitiny v modifikaci $\alpha + \beta$

V důsledku snadných reakcí a nestability jednotlivých modifikací vzniká velmi snadno dvoufázová struktura $\alpha + \beta$. Nejčastějšími přísadami této skupiny je vanad, molybden, niob, tantal a prvky, které působí neutrálně: cín a zirkonium. Rozpustnost přísadového prvku je největší za eutektoidní teploty a s

klesající teplotou se snižuje. V této modifikaci se vyskytuje nejvíce slitin titanu, proto je zde velká škála různých struktur a potřebných vlastností pro daný úkon. Tato modifikace slitin má lepší odolnost vůči únavovému namáhání, v žíhaném stavu lepší svařitelnost než slitiny typu α a lze je vytvrdit tepelným zpracováním. Jejich nevýhodou je nízká lomová houževnatost. Oproti modifikaci α je špatná svařitelnost v nežíhaném stavu a odolnost proti tečení. Na Obr.2 vidíme závislost modifikace slitiny na teplotě a použitých přísadách. [3,8]



Obr.2 – Závislost teploty a přísad na vyskytujících se modifikacích ve slitinách titanu [8]

Využívají se nejčastěji pro silově zatížené součásti, zejména součásti letadel, jejich podvozky, v kosmonautice, pro lopatky turbín a kompresorů a pro spojovací součásti namáhaných konstrukcí. [3,8]

3.3 Přehled využití slitin titanu

První využití slitin titanu bylo ve zbrojním průmyslu na pláště stíhacích letounů, v letectví kvůli svému skvělému poměru mezi pevností a váhou, v kosmonautice, mimo výše zmíněné i kvůli své výborné teplotní odolnosti. Důvodem byla v tu dobu neobvykle složitá a drahá výroba. Později se začaly titanové slitiny používat i v širší civilní oblasti na různé kryty a rámy. Našly uplatnění v hodinářství, výrobě šperků, jako kryty elektroniky a ráků pro některé sportovní vybavení, jako například rámy závodních kol. Pro svoji vysokou chemickou odolnost se dnes používají v chemickém průmyslu a jako součást protikoročních ochranných vrstev. Korozivzdorností titan předčí i

nerezové oceli, v kyselinách je prakticky nerozpustný. Slitiny titanu se vyznačují dobrou biokompatibilitou, odolností vůči elektrochemické korozi, mají nízký modul pružnosti při zachování vysoké pevnosti. Ve strojírenství se například používají v součástech motorů pro letadla a jako lopatky leteckých turbín a kompresorů i kvůli své vysoké mezi kluzu. Jejich čím dál tím častějšímu využití dochází i v konstrukcích závodních aut a motocyklů, kde není pořizovací cena slitin titanu rozhodující. Zde jde především o snížení hmotnosti konstrukcí a zlepšení mechanických vlastností. Využití slitin titanu v leteckém průmyslu je vyvoláno rostoucí rychlostí letadel. Např. při rychlosti Mach 4 dosahují povrchové teploty trupu a křídel letadel až 500 °C. Při uvedených teplotách je využití klasických konstrukčních materiálů na bázi hliníkových slitin omezeno. Oceli s vysokou pevností mají zase velkou hustotu. Jedině titanové slitiny mají příznivý poměr pevnosti k hustotě při běžných i zvýšených teplotách. Titan a jeho slitiny se používají na součástky motorů, draků i přístrojů. U motorů jsou to především různé části kompresorů, např. disky, rotory, prstence a skříňe kompresorů, ale zejména rotační i stacionární kompresorové lopatky, dále písty, ojnice, šrouby, matice apod. [3,8,11]

V dnešní době nalézají titanové slitiny také vysoké využití v lékařství, kdy až 90 % dílů pro implantaci se vyrábí z titanových slitin. Menší procento dílů je vyráběno z nerez ocelí, ale chirurgii přeci jen svým poměrem pevnosti a hmotnosti více vyhovuje titan než nerez ocel. Slitina titanu 6AL-4V je nepoužívanější materiál pro medicínské implantáty hlavně díky své nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a vynikající biokompatibilitě. Tento materiál je výhodný i z pohledu pozdějších vyšetření jako je magnetická rezonance a počítačová tomografie, protože nevykazuje žádné magnetické interference. Je běžně používán pro kyčelní a kolenní klouby, kostní šrouby a výztuhy, dentální a

jiné chirurgické implantáty a nahrazuje tak donedávna používané chrom-kobaltové oceli. [3,8,11]

4 Strojírenská výroba dílců z titanových slitin

4.1 Plošné tváření

Plošné tváření je charakterizováno tím, že žádaného tvaru součásti se dosáhne bez podstatné změny tloušťky nebo průřezu výchozího materiálu, jímž je většinou plech. Mechanické vlastnosti materiálu se s výjimkou místního zpevnění během operace nemění. Používané operace jsou především ohýbání, děrování, lisování a tažení. Tváření titanových slitin závisí na obsahu železa (0,2–0,5 %) a kyslíku (0,18–0,40 %). Stoupaním podílu těchto příměsí stoupá pevnost v tahu, na druhou stranu však klesá jejich tvářitelnost. Tvářitelnost titanu a jeho slitin zastudena, charakterizovaná jednotkovým prodloužením, je zpravidla menší, než u běžných kovů a schopnost tažení je malá. Jako časté legující prvky pro slitiny titanu určené ke tváření je paladium pro zvýšení korozivzdornosti, hliník a vanad, jejichž slitiny jsou určené pro náročné strojírenské konstrukce. [5,7,8]

Slitina	Stav	R _m , MPa	R _{p0,2} , MPa	Tažnost, %	E, GPa
Slitiny α a pseudo α					
Ti-5Al-2,5Sn	žiháno	790 - 860	760 - 807	16	110
Ti-5,6Al	žiháno	875	750	8	-
Ti-11Sn-1Mo-2,2Al-5Zr-0,2Si	dvojitě žiháno	1000 - 1100	900 - 990	15	114
Slitiny α + β					
Ti-3Al-2,5V	žiháno	620 - 690	520 - 585	20	107
Ti-6Al-4V	vytvrzeno	1170	1100	10	114
	žiháno	900 - 990	830 - 920	14	-
Ti-6+Al-2Sn-2Zr-2Cr-2Mo-0,25Si	vytvrzeno	1275	1140	11	122
Slitiny pseudo β a β					
Ti-10V-2Fe-3Al	vytrzeno	1170 - 1275	1100 - 1200	10	112
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	stárnuto	1095 - 1335	985 - 1245	6 - 12	-

Tabulka č. 1 – Příklady slitin titanu určených ke tváření [8]

4.2 Kování

Metalurgie titanu a jeho slitin se podstatně liší od postupů při výrobě oceli nebo neželezných kovů. Pro výrobu výkovků z titanu a jeho slitin se sice využívá běžné zařízení používané i při zpracování oceli, čím se ale liší jsou deformační síly a odpor. Deformační odpor a deformační síly jsou vyšší, jako např. při kování některých legovaných ocelí nebo slitin niklu. Z čistého titanu se v zápustkách kovou i velmi složité tvary, ze slitin však jen některé. Technologický postup výroby výkovků sestává z několika základních operací: ohřev na kovací teplotu, kování, tepelné zpracování a úprava povrchu výkovků. [5,7]

Přednostně se slitiny titanu ohřívají v oxidační atmosféře, nejlépe v elektrických komorových pecích nebo v indukčních pecích. Ve spalínách nesmí být vodní pára, protože může být zdrojem nežádoucího vodíku. Při ohřevu v indukčních pecích se využívá ochranné atmosféry. [5,7]

4.3 Svařování

Pokrok svařovací techniky nám dává nové možnosti, jak svářet titan a jeho slitiny. V dnešní době se nejčastěji používá k jeho svařování metoda TIG, svařování kovovým inertním plynem, svařování laserem a vakuové svařování elektrickým svazkem. [5,7]

TIG (Tungsten inert gas) je nejlepší metoda pro svařování desky a trubky z titanové slitiny o tloušťce pod 3 mm. Jedná se o typ lokální metody svařování s ochranou plynu. Pokud mají svařované díly složitou strukturu a je obtížné dokončit ochranný kryt nebo zadní stranu, mělo by se použít svařování uvnitř svarové lázně. Titan je často svařován v plynové komoře čistým argonovým plynem, aby se zajistilo, že svarová lázeň dostane náležitou ochranu. [5,7]

MIG (Metal inert gas) pracuje kontinuálním napájením svařovacího drátu, který taví základní kov. Účinek tavení argonového obloukového svařování je

vynikající ve srovnání s jinými svařovacími metodami, které se používají hlavně pro svařování tlustých desek ze slitiny titanu. [5,7]

Svařování laserem má velké výhody oproti jiným metodám svařování. Je to stabilita a automatizace, které nejsou ovlivněny magnetickým polem, vhodné zejména pro přesné trubky z titanu a slitiny titanu. [5,7]

Svařování elektronovým svazkem je pokročilá metoda zpracování vysokoenergetického paprsku. Titan rychle absorbuje O_2 a N_2 při vysoké teplotě, čímž je svar křehký, zatímco využitím vakuového elektronového paprsku lze získat vysoce kvalitní svařovací spoj. [5,7]

4.4 Odlévání

Titanové odlitky se vyrábějí pomocí metody lití na ztracený vosk. Jedná se o relativně komplikovanou metodu výroby odlitků kvůli strukturálním a chemickým změnám, které se objevují na povlaku, jako je oxidace. Vzhledem k tomu, že titan silně oxiduje při vysokých teplotách, proces lití vyžaduje ochrannou atmosféru nebo vakuum. Tvarování musí být prováděno při teplotách nižších než $925\text{ }^\circ\text{C}$. Chemické reakce mění mikrostrukturu materiálu, zvyšují tvorbu shluků v odlitcích, což celkem negativně ovlivňuje odolnost proti korozi a biokompatibilitu. [5,7]

5 Obrábění slitin titanu

Při obrábění titanu vznikají podstatně větší řezné síly než při obrábění ocelí. Titanové slitiny se díky své mechanicko-metalurgické charakteristice obrábějí mnohem obtížněji než oceli stejné pevnosti a tvrdosti. Vykazují velkou houževnatost, těžko se správně utváří tříska a vzniká větší tendence k vylamování břitu nástroje při jeho vnikání a výstupu ze záběru. Používané karbidové nástroje není třeba povlakovat, protože titan, na rozdíl od oceli, s

karbidy chemicky nereaguje. Na nástroji je tak možno zachovat ostrou řeznou hranu, což je vlastnost při obrábění titanu velmi potřebná. Z důvodu snížení prostupu tepla do nástroje lze však použít povlakování metodou PVD, která zachovává ostřejší hranu než metoda CVD. [2,5]

5.1 Obrobitelnost a problémy při obrábění titanu

Čistý titan a slitiny titanu modifikace α se dají relativně dobře obrábět, a právě proto se používají právě ty. Slitiny modifikace β a dále kombinované slitiny modifikace $\alpha+\beta$ nemají dobrou obrobitelnost, proto se pro obrábění nepoužívají. [2,5]

Problémem vyskytujícím se při obrábění titanu je jeho vysoká chemická reaktivita při vyšších teplotách, která způsobuje, že se tříška k nástroji přivaňuje. To vede ke vzniku kráterů na obrobené ploše, což může způsobovat horší kvalitu povrchu a zároveň může dojít k poškození břitu při vstupu a výstupu do záběru. To způsobuje větší náročnost na rychlejší opotřebení nástroje. Na značné opotřebení nástroje při obrábění titanových slitin má i vliv, že dochází ke zpevnění povrchu vlivem deformačních sil. [2,3,5]

Jedním z dalších důležitých problémů je nízká teplotní vodivost titanu a jeho slitin. Ta způsobuje lokální přehřátí v místě řezu, a to také působí negativně na trvanlivost nástroje. Dalším problémem s tím souvisejícím je, že díky lokálnímu přehřátí hrozí samovznícení třísky. [2,3,5]

5.2 Řešení problémů při obrábění titanu

5.2.1 Nástrojové materiály

Použití správného nástrojového materiálu je jedním z velice důležitých faktorů pro obrábění slitin titanu a pro minimalizování problémů s tím spojených, které jsou zmíněny v předešlé kapitole. Jak bylo uvedeno, tak je

potřeba nasazení nástrojů, které mají vysokou odolnost proti opotřebení a požadovanou tvrdost. Těchto parametrů pro potřebný výkon a vlastnosti obrábění nejlépe dosahují nástroje ze slinutých karbidů. Pro jejich nižší cenu se používají i nástroje z legovaných rychlořezných ocelí a vysokým obsahem legur jako je wolfram a molybden. Tyto legury dodávají rychlořezné oceli potřebnou tvrdost a odolnost proti opotřebení. [1,3]

5.2.2 Procesní kapaliny

Jak je obecně známo, tak správné použití procesních kapalin zvyšuje jak trvanlivost nástroje, tak i lepší chlazení lokálního místa řezu, které dosahuje při obrábění slitin titanu vysokých teplot. Nejvhodnější procesní kapaliny pro obrábění titanu jsou tzv. chemicky aktivní kapaliny, které jsou na vodní bázi. To nejčastěji bývá roztok inhibitoru koroze a emulgačního oleje. Při menších rychlostech obrábění lze použít i chlorované oleje, které zmenšují sklon k zadírání a nalepování titanu na nástroj. [2,3]

5.2.3 Řezné úhly a další parametry při obrábění titanu

Pro přesné obrábění slitin titanu a pro snížení problémů s tím spojených je důležité, aby řezná část nože měla neporušené ostří, správnou geometrii řezných úhlů a správně nastavené parametry, jako je řezná rychlost a posuv. [1,6]

Úhel břitu je mezi hlavním hřbetem a čelem nože. Jeho velikost se pohybuje nejčastěji mezi 45°-90°. Velikost úhlu má vliv na odpor, který klade materiál obrobku noži při obrábění. Nůž s menším úhlem snadněji vniká do materiálu, ovšem při velmi malém úhlu je břit málo pevný a při práci se příliš zahřívá, brzy se tupí a může se snadno ulomit. Právě proto se při obrábění slitin titanu volí spíše větší úhel břitu. [1,6]

Hlavní úhel hřbetu se nachází mezi hlavním hřbetem nože a tečnou k řezné ploše obrobku. Velikost úhlu má vliv na velikost tření mezi hlavním hřbetem a řeznou plochou. Právě proto se pro obrábění titanových slitin volí tento úhel spíše větší. To z důvodu, že pro větší úhel platí menší tření a tím se nůž méně zahřívá. Většinou se volí v rozmezí 6°-10°. [1,6]

Úhel čela má vliv na směr odvodu třísky a na odpor materiálu obrobku proti vnikajícímu ostří. Čím je větší úhel, tím tříška snadněji odchází. Větší úhel ovšem zeslabuje břit nože a jeho pevnost se pak zmenšuje. Pro slitiny titanu se volí úhel několikastupňový až nulový. Tento úhel může být i záporný, mívají jej jen nože ze slinutých karbidů. [1,6]

Při soustružení slitin titanu pomocí nástrojů ze slinutých karbidů se volí řezná rychlost 30 až 50 m/min a při použití nástrojů z rychlořezné oceli pouze 10 až 20 m/min. Hodnoty posuvu pro bezproblémové obrábění slitin titanu se pohybují mezi 0,2 a 0,3 mm na otáčku. [1,6]

6 Broušení

Broušení je dokončovací operace obrábění, kdy odebíráme drobné částičky třísky mnohabřitým nástrojem, který se otáčí velkou obvodovou rychlostí. Broušení slouží k dosažení přesných rozměrů, požadovaných tvarů a drsnosti povrchu Ra 1,6 až 0,2 μm. Součásti, které jsou vyrobeny na standardních obráběcích strojích a konvenčními obráběcími metodami většinou nedosahují požadované přesnosti a drsnosti. Navíc se ještě velmi často tepelně zpracovávají. Proto se jejich výroba dokončuje broušením, přičemž součást dostane přesné rozměry, požadovaný tvar a drsnost povrchu. Při broušení se z obrobku odebírá materiál tvrdými zrny brusiva, které jsou spojeny nejčastěji do tvaru brusného kotouče. Je to většinou jediný nástroj, kterým lze hospodárně obrábět tvrdé cementované a kalené součásti, slinuté karbidy, sklo, keramiku,

umělé hmoty, dřevo a jiné kovové a nekovové tvrdé materiály. Jsou dva základní způsoby broušení. První je broušení rotačních ploch, kdy se brousící kotouč otáčí v jednom a obrobek ve stejném či opačném směru. Druhé je rovinné broušení, kdy se brusný kotouč otáčí, obrobek upevněný na stole se posouvá přímočarým vratným pohybem. [2,13,14]

Hlavními přednostmi broušení jako dokončovací operace jsou: velká přesnost (1 až 3 μm), správnost geometrických tvarů (kruhovitost i pod 0,2 μm), malá drsnost obrobené plochy (R_a 0,8 až 0,2 μm), lze obrábět i velmi tvrdý materiál a na součástech lze obrábět velké plochy najednou (při čelním rovinném broušení). [2,13,16]

6.1 Broušení titanu

Při broušení titanu je nutné dbát na to, že vzhledem k jeho specifickým materiálovým vlastnostem musí být titan broušen s nižší řeznou rychlostí. Pro optimální výsledky broušení se doporučuje řezná rychlost 12-15 m/sec a použití tvrdého kontaktního kotouče s keramickým zrnem, které jsou vhodné pro opracování titanu. [2,13,15]

Díky nízké účinnosti broušení a leštění se mění jeho mikroskopická struktura, protože nadměrný těžký proces řezání a leštění vytvoří v alfa fázi mechanické dvojče. Následně je tedy zapotřebí v beta fázi metodami přesného broušení či chemicko-mechanického leštění nežádoucí povrchové mikroskopické struktury odstranit či změnit. V současné době se metody přesného broušení brusiva a chemického mechanického leštění používají hlavně při přesném obrábění slitin titanu. Procesní kapalina je tvořena volnými brusnými materiály z karbidu křemíku nebo aluminy. Lešticí tekutina je hlavně silná kyselina, silná alkalická nebo toxická chemická činidla. [2,13,15,16]

6.1.1 Brousící nástroje

Brousící nástroj je tvořen zrny brusiva, které jsou spojeny pojivou v tuhé těleso vhodného tvaru, tvrdosti a struktury. Struktura kotouče je vyjádřena vzdáleností mezi brousícími zrny kotouče. Čím vyšší je číslo struktury, tím větší jsou póry v kotouči. Pokud je kotouč hutný, je vzdálenost mezi zrny malá. Je-li kotouč pórovitý, jsou zrna dále od sebe. Velká zubová mezera má větší prostor pro vznikající třísku u kotouče pórovitého. Naopak malá zubová mezera má menší prostor pro třísku, to je tzv. hutný kotouč. Pórovité kotouče se používají na měkké a houževnaté materiály. Hutné kotouče se používají na hladké, tvrdé a křehké materiály. Struktura určuje poměr brusných zrn, pojiva a pórů v 1 cm^3 . Čím vyšší je číslo (5-12), tím je vzdálenost mezi zrny větší. [1,14,15,16]

6.1.2 Druhy brusiva

Brusná zrna jsou tvrdé, houževnaté a ostrohranné krystaly. Ostré hrany každého zrna představují jednotlivé břity s velmi rozmanitou geometrií. Pro výrobu brousících kotoučů (na Obr.3) se výhradně používají syntetická brusiva oxid hlinitý (Al_2O_3 —umělý korund), karbid křemíku (SiC —karborundum), karbid boru (B_4C) a kubický nitrid boru (KNB). Druh materiálu se volí v závislosti na vlastnostech obráběného materiálu. [1,14,16]

Umělý korund se vyrábí přetavováním oxidu hlinitého v obloukové elektrické peci. Je to nejpoužívanější brusivo na broušení ocelí, ocelí na odlitky, temperované litiny a tvrdého bronzu. [1,14,16]

Monokorund je tvořen jednotlivými krystaly omezenými přirozenými krystalovými plochami. Povrch není poškozen trhlinami, zrna jsou bez vnitřního pnutí. Vhodné pro broušení rychlořezných ocelí a ostření nástrojů. [1,14,16]

Karbid křemíku je tvrdší, houževnatější a odolnější než korund. Používá se pro broušení litiny, velmi tvrdých a křehkých materiálů jako slinuté karbidy, měď, hliník a měkký bronz. [1,14,16]

Karbid boru vzniká sloučením boru a uhlíku v elektrické peci, kde vznikají malé lesklé krystalky vysoké tvrdosti. Je tvrdší než karbid křemíku. Bývá používán jako náhražka diamantového prášku. [1,14,16]

Kubický nitrid boru je tvrdší než všechny ostatní druhy brusiv s výjimkou diamantu. Je teplotně stálý do 1400 °C. Používá se pro houževnaté oceli, např. rychlořezné, nástrojové oceli a pro broušení nástrojů. [1,14,16]

Syntetické diamanty se používají k broušení velmi tvrdých a křehkých materiálů, jako jsou slinuté karbidy, šedá litina, sklo, keramika, a k tvarování brousících kotoučů. Diamant nesnáší nárazy a prudké změny teploty. [1,14,16]



Obr.3 – Druhy brusných kotoučů [14]

6.1.3 Pojiva

Pojivo je látka spojující zrna brusiva, která je stmeluje, aby měl brusný nástroj požadovaný tvar, rozměr a vhodnou mechanickou pevnost. Má také

velký vliv na samoostření nástroje, protože umožňuje při broušení uvolňovat opotřebená a otupená zrna. Pojivo nemá brousící účinky. Nejčastěji používaná pojiva jsou keramické, silikátové, magnezitové a pojiva z umělé pryskyřice. [1,14,16]

Keramické pojivo je nejčastěji používané pro jeho univerzálnost. Maximální obvodová rychlost se volí 35 až 50 m.s⁻¹. Obsahuje převážně keramické suroviny jako živec, kaolin a mastek. Je to nejobvyklejší pojivo používané u většiny brousících nástrojů. Největší předností je možnost odstupňování tvrdosti, velká pórovitost, netečnost vůči vodě, oleji, chemickým látkám. Nevýhodou je křehkost nástroje, kdy toto pojivo nesnáší nárazy, a proto se s ním musí manipulovat opatrně. Směs brusiva a pojiva se lisuje, lije a pěchuje do forem příslušného tvaru. Následně se kotouče vypalují při teplotách až 1380 °C. [1,14,16]

Silikátové pojivo je méně pevné než keramické, ale je pružnější. Je to směs vodního skla, živce, kaolinu a plavené křídly. Brousící kotouč se suší při normální teplotě až 30 hodin, následně se vytvrzuje při teplotě až 300 °C. Brusná zrna se z kotouče dobře uvolňují a mají studený řez. To je výhodné u velkých brousících nástrojů a při velké stykové ploše. Nástroje se používají tam, kde je potřeba jemný a chladný výbrus. Kotouče odolávají vodě. [1,14]

Magnezitové pojivo nesnáší vlhko ani velké změny teploty, proto se používá jen pro broušení za sucha. Je vhodné na jemný výbrus. Je směsí uhličitanu hořečnatého, chloridu hořečnatého a vody. Kotouče mají chladný řez, lze je vyrábět do průměru 2 m. Jsou stejnoměrně tvrdé. Toto pojivo se příliš nepoužívá. [1,14]

Pojiva z umělé pryskyřice jsou méně citlivá vůči nárazům a bočním tlakům. Jsou vhodná k hrubování, broušení vnějších i vnitřních válcových ploch.

Surovinami pro výrobu jsou fenol a formaldehyd, pro vyztužení se používají textilní vlákna. Jsou vhodné pro řezací kotouče, pro hrubé obrušování a čištění, i pro lapovací kotouče. Kotouče ztužené textilem se vyznačují velkou výkonností, bezpečností a univerzálností. Nejčastěji jsou používána na odřezávání vtoků a nálitků a při broušení svárů. [1,14]

6.1.4 Tvrdost brusných kotoučů

Jedná se o vlastnost, která charakterizuje odpor brusných zrn proti vylomení z nástroje, vyjadřuje tedy míru houževnatosti a pružnosti pojivových můstků mezi jednotlivými zrny brusiva. S tím souvisí uvolňování otupených brusných zrn, a to především u měkkých kotoučů, u kterých se uvolňují snadněji než u tvrdých. Tvrdosti kotouče označujeme schopnost udržet zrna ve vazbě, nesouvisí s tvrdostí zrn. Označuje se velkými písmeny abecedy, pro velmi měkký kotouč (G, H), pro měkký kotouč (I, J, K), pro střední kotouč (L–O), pro tvrdý kotouč (P–S), pro velmi tvrdý kotouč (T, U) a pro zvlášť tvrdý kotouč (V, Z). Tvrdost je správná, jestliže se zrna odlamují z kotouče, jakmile se otupí. Pokud se tak nestane, tak je pojivo příliš tvrdé a zrna se musí odstranit orovnáváním kotouče. Pokud se zrno uvolňuje dříve, než je otupené, tak je kotouč sice stále ostrý, ale brzy se opotřebuje. [1,14,16]

Podle druhu broušeného materiálu se zásadně používají tvrdé kotouče na měkký materiál a měkké kotouče na tvrdý materiál. Tvrdost kotouče se také volí podle druhu broušeného materiálu i podle způsobu broušení, to znamená podle polohy brusného kotouče k broušenému předmětu. Záleží také na tvaru broušené plochy. Měkčí brusné kotouče se volí tehdy, když je broušený předmět tvrdší a má větší styčnou plochu s broušeným předmětem. [1,14,16]

6.1.5 Chlazení při broušení

Chlazení při broušení provádíme za účelem odvedení tepla vznikajícího při broušení, očištění povrchu obrobku a brousícího kotouče od třísek, udržení řezivosti kotouče a zvýšení kvality obráběné plochy. Brousit hospodárně znamená brousit s větším úběrem třísek, které je možné jen za vydatného chlazení. Kdyby neprobíhalo chlazení při broušení, tak by neodváděné teplo mohlo způsobovat deformaci obrobku, popuštění zakaleného obrobku a způsobovat na povrchu barevné skvrny. Chlazení při broušení se provádí buď pomocí vzduchu, anebo kapalinou. [1,14,16]

Při **chlazení vzduchem** se brousí za sucha. Broušenou plochu ochlazuje pouze vzduch strhávaný rotujícím brusným kotoučem. Při broušení se dosahuje jen malých výkonů. Výhodou při tomto způsobu broušení je čistota obrobků a stroje. [1,14]

Chlazení kapalinou má vysoký chladicí účinek. Chlazení se provádí řeznou kapalinou, která kromě chladícího má i mazací účinek. Čistá voda má vysoký chladicí účinek, ale způsobuje rezivění strojů, proto se přidává do vody 3-6 % emulzního oleje. Olejové emulze vytvářejí na obrobku i na stroji olejový film zabraňující rezivění. Chladicí kapalina se přivádí v dostatečném množství tak, aby tryskala na stykovou plochu kotouče a na obrobek po celé šířce kotouče. Zvláštním způsobem přivádění chladicí kapaliny je přivádění kapaliny vnitřkem brousícího kotouče, kdy je řezná kapalina přiváděna k upínací díře kotouče, odkud ji odstředivá síla protlačuje až na obvod kotouče. Chladicí kapalina musí být zbavena třísek a nekovových nečistot. Třísky se oddělují magneticky nebo odstředivými filtry. Nemagnetické nečistoty zachytávají síťové filtry. Pro různé broušené materiály se používají různé chladicí kapaliny jako např. voda s olejem, samotný olej a petrolej s olejem. [1,14]

6.2 Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi

Brousící nástroje pro broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi posilují součinnost technologické soustavy stroj-obrobek-nástroj, neboť při zvýšení rychlosti brousícího nástroje se snižují řezné síly, zbytková napětí v povrchových vrstvách obrobků i opotřebení kotouče. Dochází ke zlepšení drsnosti povrchu součásti při použití konstantní zrnitosti kotouče a zvyšuje se trvanlivost brousícího nástroje. [17]

Kromě zlepšení jakosti výrobků přispívají vyšší řezné rychlosti ke zvýšení úběrů. Dle výsledků výzkumů je možno u vnějšího zapichovacího broušení dosáhnout zvýšením řezné rychlosti ze 30 na 60 m·s⁻¹ čtyřnásobného zvýšení úběru, aniž by došlo ke snížení parametrů jakosti. Zvyšuje-li se řezná rychlost až na 90 m·s⁻¹ při použití řezného oleje pod zvýšeným tlakem 1 MPa jako chladicího a mazacího prostředku, je možné dosáhnout úběru, který se vyrovná až stonásobku obvyklého v praxi. Dosažený úběr se tímto blíží k hodnotám dosud vymezeným nástrojům s definovaným břitem, jako jsou soustružnické nože nebo frézy. [17]

Při broušení vysokými řeznými rychlostmi a řezným úběrem dochází v povrchové vrstvě obrobku ke zvýšenému tepelnému namáhání. Zvyšování obvodové rychlosti kotouče způsobuje zvyšování teplot. Výkon úběru má však mnohem větší vliv na teplotu než obvodová rychlost kotouče. Z toho vyplývá, že až do obvodové rychlosti 40 m·min⁻¹ se zvýšení obvodové rychlosti obrobku projevuje prudkým poklesem teploty. Nižší tepelné namáhání při stoupající rychlosti obrobku je způsobeno zkrácením doby působení jednotlivých zdrojů tepla v oblasti styku kotouče a obrobku. Při vyšších obvodových rychlostech odvádí břity zrn značnou část tepla do třísek, čímž se vysvětluje pokles teplot při vyšších rychlostech obrobku a brousícího kotouče. Proto poměr rychlosti

řezného kotouče k obvodové rychlosti obrobku $q = \frac{v_s}{v_w}$ má značný význam a při vysokých řezných rychlostech by neměl být volen větší poměr rychlostí než $q = 60$. Použití vhodného chladicího prostředku a uvedeného optimálního poměru umožňuje nejvyšší úběr bez negativního tepelného ovlivnění obrobku. [17]

Jakost povrchu obrobku je ovlivňována nejen řeznou rychlostí, ale i řezným úběrem. Se stoupajícím úběrem se jakost povrchu obrobku zhoršuje. Vyrůstající drsnost je způsobena zvětšující se tloušťkou třísky při zvyšování řezného výkonu. Zvýšení obvodové rychlosti kotouče zmenšuje tloušťku třísky, a umožňuje tak vyrovnat zhoršení jakosti povrchu zvýšením rychlosti. Například drsnosti povrchu Ra 2 je dosahováno řeznou rychlostí $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při řezném úběru $8 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$, oproti tomu plocha obrobená obvodovou rychlostí $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při řezném úběru $90 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ má drsnost Ra pouze 1,9 (hodnoty Ra odpovídají broušení bez vyjiskření). [17]

Podle namáhání broušícího kotouče řeznými silami stoupá při všech rychlostech opotřebení s řezným úběrem. Při stejném úběru za časovou jednotku se opotřebení snižuje se zvyšující se obvodovou rychlostí kotouče. Opotřebení kotouče má přímou souvislost s jeho trvanlivostí. Při stálém řezném výkonu se zvyšuje celkový úběr odbroušeného materiálu s obvodovou rychlostí kotouče. Např. při broušení s řezným úběrem $15 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ může být zvýšením rychlosti kotouče ze 40 na $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ zvýšen celkový řezný výkon ze 2000 na $20000 \text{ mm}^3\cdot\text{mm}^{-1}$, tedy až desetinásobně. Stejně životnosti se dosahuje se stoupající obvodovou rychlostí kotouče při vyšším řezném úběru. Např. při porovnání rychlostí 20 a $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ lze zvýšit úběr až 16x. Z toho vyplývá, že při stejném opotřebení kotouče a stejném výkonu lze zkrátit čistý čas broušení o 94 %. [17]

Zvláště vysokými rychlostmi broušení je možné dosáhnout výkonů, které dosud patřily do sféry obrábění nástroji s definovaným břitem. Tím se otevírají technologii broušení zcela nové možnosti výroby součástí bez obvyklých minimálních přídavek běžných u konvenčního způsobu broušení. [17]

6.3 Mechanismus opotřebení při vysokorychlostním abrazivním broušení slitiny titanu a jeho vliv na integritu povrchu

Jednovrstvé galvanicky pokovené kotouče z kubického nitridu bóru (KNB) nabízejí několik výhod oproti běžným kotoučům při broušení obtížně brusitelných materiálů, jde-li o zlepšení problémů s integritou povrchu obrobku, jako je nižší popálení při broušení, méně povrchových vad a generování zbytkových tlakových napětí. Při používání jednovrstvých kotoučů se brusné síly, teplota a integrita povrchu mění kvůli postupnému opotřebení kotouče, protože se pro ně neprovádí orovnávaní. Proto je v průmyslu nezbytné opotřebení kotouče. Vysoké řezné rychlosti 40 až 60 m·s⁻¹ se používají v různých prostředích řezných kapalin od rozpustné olejové emulze na bázi vody v minimálním množství chladicího mazání i za použití čistého oleje. [16]

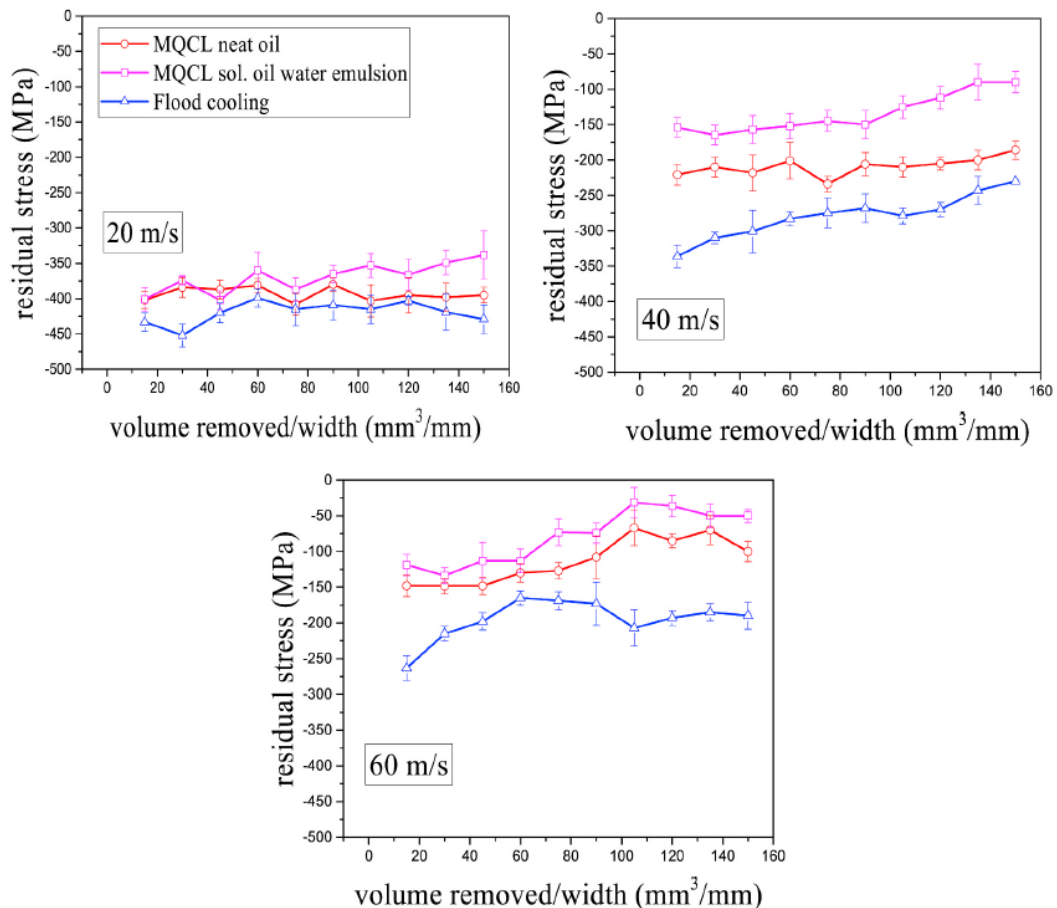
Superabrazivní kotouče poskytují oproti běžným kotoučům vynikající výkon, pokud jde o různé aspekty broušení, např. zbytková napětí obrobku, řezná síla a teplota. Superabrazivní kotouče však vyžadují kvůli vysoké tvrdosti zrnitého materiálu složité a nákladné orovnávaní. Jednovrstvý kotouč poskytuje snadné použití superabrazivních kotoučů ve stávajících obráběcích strojích bez jakéhokoliv dalšího uspořádání upínací a orovnávací jednotky, protože upichování a orovnávaní se u nich neprovádí. Jednovrstvé kotouče jsou většinou vyráběny technikami pájení na tvrdo a galvanickým pokovování. Kvůli vysoké teplotě zpracování se na úrovni vazby při pájení indukuje škodlivé zbytkové napětí. Naproti tomu při galvanickém pokovování nedochází k podobným problémům, protože se provádí při nízké teplotě. Diamant a kubický

nitrid bóru (KNB) jsou dva superabrazivní brusné materiály, které jsou v současnosti k dispozici. I přes nižší tvrdost KNB vzhledem k diamantu se používá ve většině operací broušení kovů kvůli jeho lepší chemické stabilitě. [16]

Kromě brusných kapalin závisí opotřebení galvanicky pokoveného kotouče do značné míry na různých vlastnostech pracovního materiálu. Opotřebení kotouče je obvykle kvantifikováno poměrem G , který je definován jako poměr objemu úběru pracovního materiálu k objemu opotřebení kotouče. Bylo zjištěno, že poměr G při broušení pomocí kubického nitridu bóru oceli AISI 52100 je v rozmezí 5000 až 20000, zatímco při broušení obtížně brusitelných materiálů jako jsou i slitiny titanu se pohybuje od 10 do 300. Z toho vyplývá, že opotřebení kotouče probíhá rychleji při broušení obtížně brusitelných materiálů ve srovnání s ocelí.[16]

Změny zbytkového napětí s kumulativním úběrem materiálu ve třech prostředích chlazení a mazání jsou znázorněny na *Obrázku č. 4*. Z toho vyplývá, že změna zbytkových napětí je velmi nízká (0-10 %) za podmínek čistého oleje až do řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, zatímco u emulzí na bázi vody povrchová zbytková napětí značně vzrostla (10-75 %) s nárůstem úběru materiálu. Rozdíl ve vzestupu zbytkových napětí při použití čistého oleje a emulze na bázi vody je výraznější při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zbytkové napětí je řízeno kontrastně dvěma brusnými silami. Zvýšení tangenciální síly vede ke zvýšení zbytkového napětí v důsledku vytváření vysoké teploty při broušení. Na druhou stranu vysoká normální síla snižuje zbytkové napětí kvůli většímu mechanickému působení. U čistého oleje do $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou pozorovány velmi malé změny řezných sil. Zbytkové napětí zůstává nezměněno kvůli nezměněným brousícím silám při aplikaci čistého oleje. Při vysoké rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ však u čistého oleje dochází ke zvýšení zbytkového napětí. Zvýšení tangenciální řezné síly pro čistý olej je také patrné při řezných rychlostech $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což způsobuje zhoršení

zbytkového napětí. Vliv změny napětí je výraznější než při broušení slitiny titanu, a v důsledku toho se zbytkové napětí zvyšovalo s odstraňováním objemu. Nárůst napětí při kumulativním odstraňování materiálu byl zaznamenán u emulzí na bázi vody, což lze také připsat zvýšení tangenciální síly. [16]



Obr. 4 - Změna zbytkového napětí se zvyšováním úběru materiálu [16]

Radiální opotřebení je 2–4krát vyšší při použití rozpustné olejové emulze na bázi vody ve srovnání s čistým olejem do 40 m/s. Vzhledem k nižšímu radiálnímu opotřebení poskytoval čistý olej minimální změny ve zkoumaných charakteristikách broušitelnosti, např. 1-10 % nárůst sil, 0 až 10 % nárůst zbytkového napětí a velmi malé zvýšení povrchového napětí se zvýšením kumulativního úběru materiálu až do 40 m·s⁻¹. Na druhé straně bylo u kapaliny

na bázi vody zaznamenáno 30 až 100 % zvýšení brusných sil a 10 až 75 % zhoršení zbytkového napětí. Zvýšení napětí povrchu bylo také vyšší při použití této kapaliny. Variace charakteristik broušitelnosti s postupným používáním kotouče je hlavním problémem u jednovrstvého galvanicky pokoveného KNB kotouče, což omezuje přijetí těchto kotoučů v průmyslu. Z výsledků se tedy doporučuje použít čistý olej pro broušení slitiny Ti-6Al-4V s použitím galvanicky pokoveného KNB kotouče kvůli nižšímu radiálnímu opotřebení a téměř žádné výraznější změně chování při broušení při kumulativním úběru materiálu. [16]

6.4 Vznik povrchového zbytkového napětí na slitině titanu generované pásovým broušením

Vzhledem k vlastnostem a pružnosti je pásové broušení jednou z účinných úprav titanové slitiny. Variace zbytkového napětí s parametry broušení v procesu pásového broušení však nejsou jasné, což značně omezuje další použití této metody. Při použití řezných parametrů rychlosti broušení 8-24 m/s, rychlosti posuvu 20-60 m/min vychází, že zbytkové napětí u pásového broušení ze slitiny TC17 je 169 až 254 MPa. [18]

Použitým materiálem je slitina TC17, což je modifikace alfa-beta s vynikajícími komplexními vlastnostmi. Má výhodu vysoké pevnosti, dobré lomové houževnatosti, dobré stability při kování a malé tepelné vodivosti. Má ovšem i několik nedostatků jako nízký modul pružnosti, potřeba velkých řezných sil a dochází k vážnému opotřebení nástroje.

Zbytkové napětí při pásovém broušení na povrchu titanové slitiny po broušení pásu má tendenci se zvyšovat se zvýšením rychlosti podávání. Vyšší rychlost podávání snižuje dobu kontaktu brusiva, snižuje akumulaci tepla, snižuje teplotu brousícího pásu a zvyšuje zbytkové napětí na povrchu. [18]

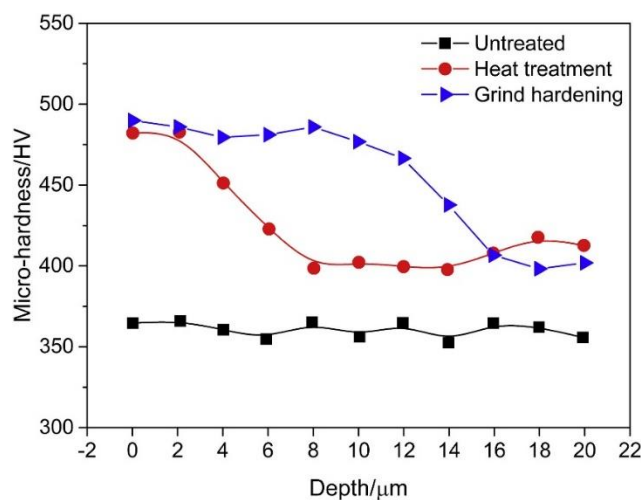
6.5 Vliv parametrů broušení na vývoj mikrostruktury slitiny titanu TC21

Optimální parametry broušení pro slitinu TC21 jsou uvedeny v *Tabulce č. 2*. Broušení má podstatnou výhodu ve srovnání s tepelným zpracováním, protože vykazuje vyšší mikrotvrdotost a nižší koeficient tření. [19]

Grinding parameters	Values
Wheel Speed (v_s)/(m · s ⁻¹)	20, 35
Cutting depth (a_p)/μm	20–120
Feed rate (v_w)/(mm · s ⁻¹)	20,30
Cooling mode	AC, WQ
Aging	590 °C, 4 h

Tabulka č. 2 – Parametry broušení slitiny TC21 [19]

Zkoušky tvrdnutí pomocí broušení byly prováděny na povrchové brusce BLOHM a poté byly ošetřeny stárnutím při 590 °C po dobu 4 hodin. Pro zvýšení spolehlivosti měření byla mikrotvrdotost v každé hloubce měřena třikrát a byla vypočítána průměrná hodnota. Jak je znázorněno na *Obrázku č. 5*, mikrotvrdotost se mění s hloubkou od povrchu vzorku. Vrstva mikrotvrdotosti po broušení je přibližně 12–14 μm, zatímco po tepelné zpracování je to jen 2–4 μm. [19]



Obr. 5 – Porovnání mikrotvrdotosti v závislosti hloubky měření [19]

7 Praktická část

Cílem praktické části bylo změřit pomocí dynamometru od firmy Kistler (typ 9257B) řeznou a pasivní sílu při rovinném broušení slitiny titanu Ti-6Al-4V. Následné vyhodnocení proběhlo v softwaru DynoWare od stejné firmy. Měření probíhalo při konstantní řezné rychlosti 25 m/s. Hodnoty rychlosti obrobku byly 5 a 10 m/min. Hloubky odřezávané vrstvy byly 0,01; 0,03; 0,05 a 0,07 mm. Měření probíhalo bez vyjiskření a s vyjiskřením. Bez vyjiskření byl měřen jeden pracovní dvojzdvih a s vyjiskřením 5 pracovních dvojzdvihů. Vyjiskření je při opakovaném posuvu obrobku, kdy odbírá brousící kotouč malé množství třísek při neměnné hodnotě pracovního záběru ostří. Cílem bylo určit optimální poměr řezné a pasivní síly při výše zmíněných výběrech parametrů broušení a určit vyjiskřovací křivky. Měření probíhalo v prostorech Fakulty strojní ČVUT na brusce BRH 20 CNC. Byl použit kotouč Cubitron™ II 99 % a procesní kapalina Rhenus XY 121 HM.

Nejenom při broušení je snaha dosáhnout poměru, kdy je co největší řezná síla a co nejmenší pasivní síla. U broušení dochází zpravidla k větší pasivní síle a menší řezné síle, než je tomu u metod s nástroji s definovaným břitem. [1,2,13]

7.1 Polotovary

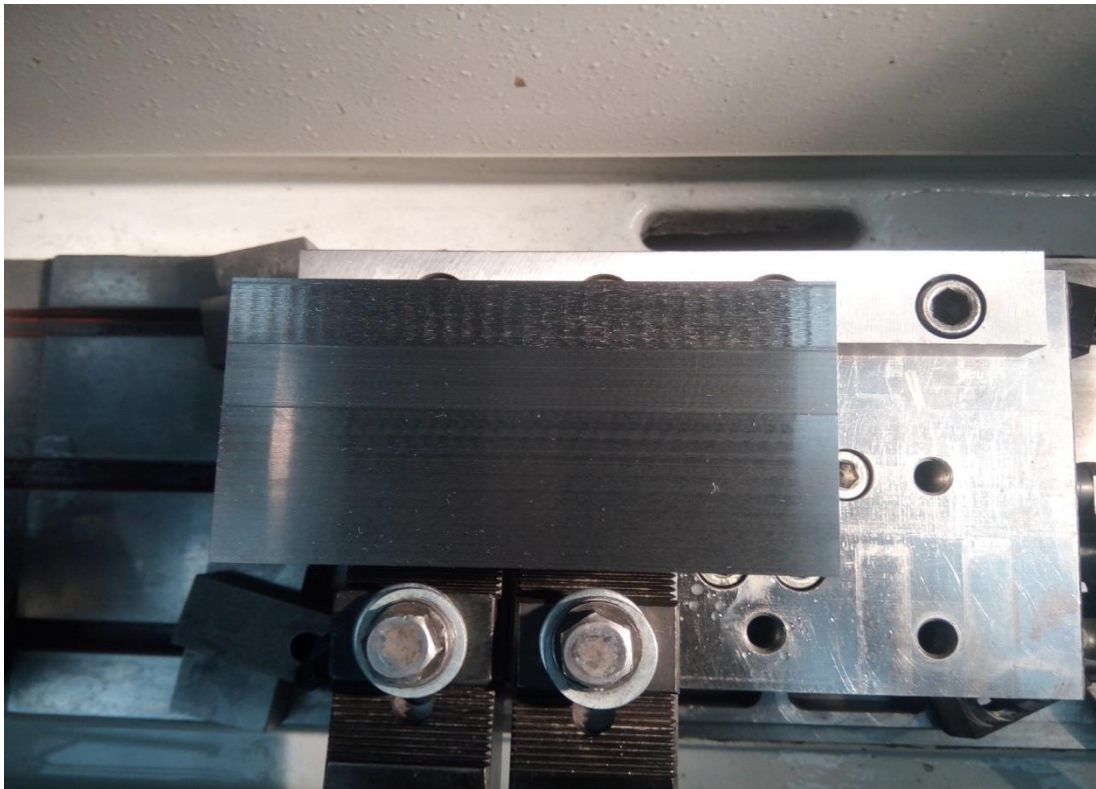
Použitým polotovarem pro měření byl kvádr o velikosti 66 x 135 x 88,5 mm ze slitiny titanu Ti-6Al-4V.

Tato slitina titanu je nejrozšířenější ze všech alfa-beta titanových slitin. Slitina byla původně vyvinuta pro letecký trh a byla široce používána v leteckých konstrukčních komponentech. Nedávno začala být tato slitina široce využívána v ropném a plynárenském průmyslu, kde je nezbytná kombinace vysoké pevnosti, odolnosti proti korozi a nízké hmotnosti. Hustota slitiny Ti 6Al-4V je 50 % ve srovnání se slitinami na bázi niklu a s nerezovými oceli. Proto

se díky vysokému poměru pevnosti k hmotnosti široce používá v různých aplikacích. [20]

Hustota:	4 429 g/cm ³
Rozsah teplot tání:	1 609-1 660 °C
β transus:	996 ± 28 °C
Korozní odolnost:	PREN (PREN = %Cr + 3,3x%Mo + 16x%N)

Obr. 6 – Vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [20]



Obr. 7 – Polotovár upnutý do manuálního upínače dynamometru

7.2 Bruska

Měření proběhlo na rovinné brusce Mikronex BRH 20 CNC v laboratořích Fakulty strojní ČVUT. Ta umožňuje jak broušení ručním řízením, tak i broušení v automatických pracovních cyklech pro broušení rovinných ploch obrobků rovinným, nebo zapichovacím způsobem. Bruska umožňuje rovněž broušení bočních ploch bokem kotouče, případně tvarových ploch pomocí zapichovacího tvarového brusného kotouče. [21]

Rozměr pracovního stolu	200 x 600 mm
Podélný posuv stolu	600 mm
Příčný posuv stolu	250 mm
Vzdálenost osy kotouče od stolu	525 mm
Nejmenší inkrement přídavku (osa Y)	0.0005 mm
Rozlišení polohování příčné osy (osa Z)	0.001 mm
Maximální rychlost pohybu stolu	25 000 mm/min
Brousicí kotouč	250x76x20 mm
Otáčky brousicího vřetena	2670, 3820 ot/min. (plynulá změna otáček - opce)
Výkon hlavního motoru	2,2 kW
Max. hmotnost obrobku včetně upínače	200 kg
Hmotnost stroje	1850 kg

Obr. 8 – Základní technické parametry brusky [21]

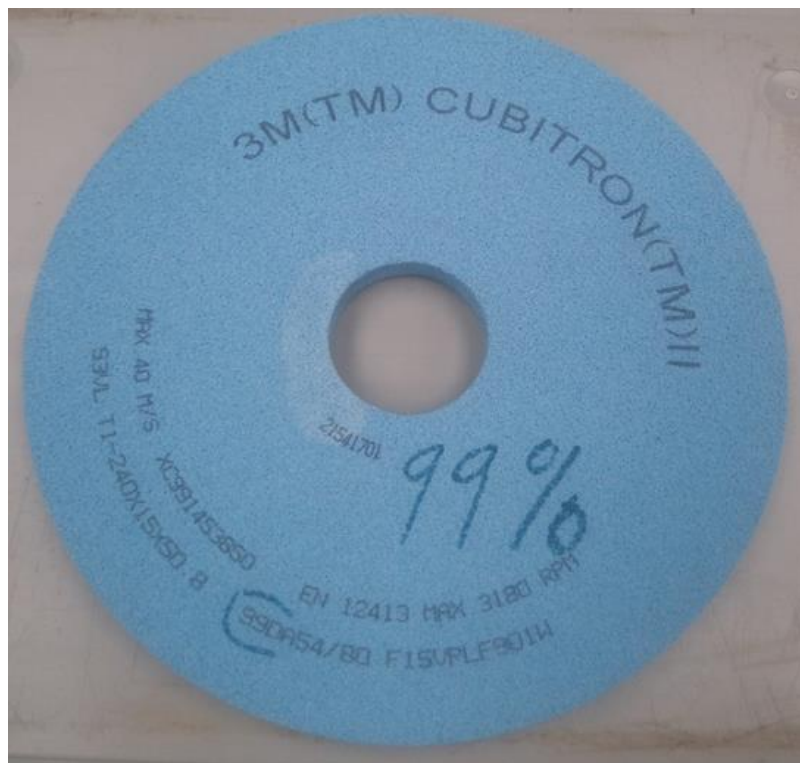


Obr. 9 – Bruska BRH 20 CNC v prostorech FS ČVUT

7.3 Brusný kotouč

Pro měření byl použit kotouč Cubitron™ II 99 % od společnosti 3M™. Tento kotouč se vyznačuje definovanou geometrií zrna, která mají trojúhelníkový tvar. U klasických zrn dojde při kontaktu k deformaci materiálu, zrno pak tlačí nahromaděný materiál před sebou a v poslední fázi dojde k odstranění

materiálu a odchází tříška. Je zapotřebí velká řezná síla, která vede k tepelnému namáhání povrchové vrstvy. U trojúhelníkových zrn společnosti 3M dochází k řezu a tvoření třísky od prvního najetí do materiálu. Velká část vzniklého tepla je ihned odváděna tříškou, dochází tedy k menšímu tepelnému namáhání. Kotouč má větší poměr zrn vůči pojivu. Zrna jsou větší (průměrná velikost zrna 0,3 mm), měkčí a kotouč má menší pórovitost. [22]



Obr. 10 – Použitý brusný kotouč Cubitron™ II 99%

7.4 Procesní kapalina

Pro broušení byla použita procesní kapalina Rhenus XY 121 HM. Je to ve vodě dobře mísitelná kapalina pro zpracování kovů bez minerálního oleje a kyseliny borité. Je to speciálně vyvinutá emulze pro broušení za pomoci karbidů. Je potřeba účinná filtrace, která je nezbytná pro zajištění řádného fungování brousícího roztoku. Vlastnosti této emulze jsou vysoká stabilita, nízké ztráty tažením, nízké pění chladičí kapaliny, dobrá ochrana proti korozi, dobrý chladičí a proplachovací efekt a je snadno biologicky odbouratelná. [23]



Obr. 11 – Použitá procesní kapalina Rhenus XY 121 HM [23]

7.5 Měření

7.5.1 Měření bez vyjiskření

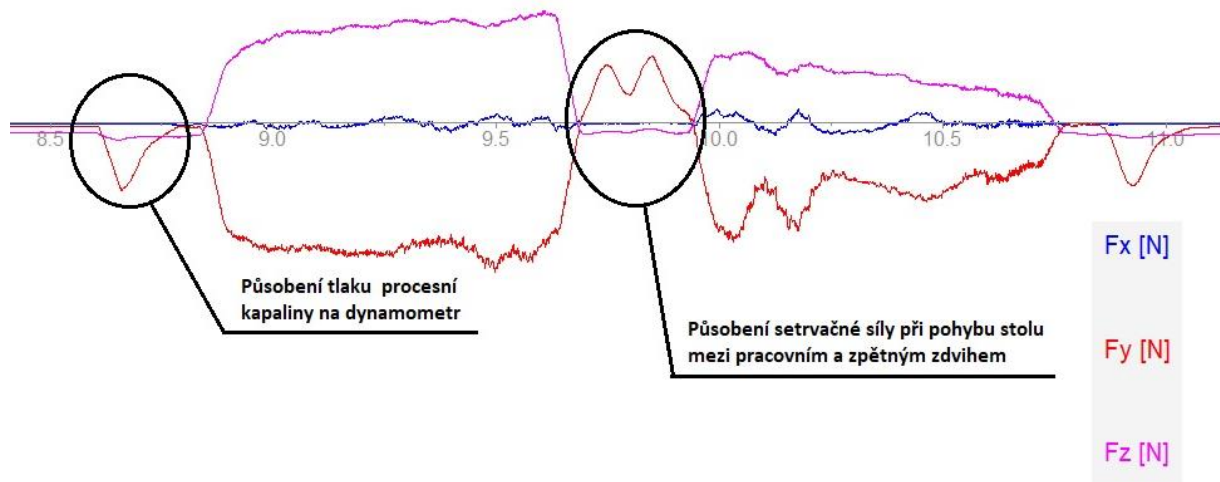
Výsledkem měření bez vyjiskření bylo porovnání pasivních a řezných sil v závislosti na ekvivalentní hloubce třísky h_{eq} při jednom pracovním průchodu. Jedná se o teoretickou hodnotu vycházející z nutné kontinuity materiálu, kdy materiál vstupující do oblasti řezání z ní musí na druhé straně také vystupovat. Materiál o tloušťce odebíraného materiálu vstupuje do řezání rychlostí posuvu a brousící prostor opouští formou třísky. Vytvořené třísky pak můžeme spojit v teoretickou vrstvu materiálu označenou jako ekvivalentní tloušťka třísky h_{eq} , která opouští prostor broušení rychlostí brusného kotouče. Tuto materiálovou bilanci vyjadřujeme rovnicí: [2, 24]

$$v_o \cdot a_e = v_k \cdot h_{eq} \quad [24]$$

Po vyjádření neznámé h_{eq} a převedení, aby výsledná hodnota h_{eq} vycházela v μm dostáváme vztah: [24]

$$h_{eq} = \frac{a_e \cdot v_o \cdot 1000}{v_c \cdot 60} \quad [24]$$

Na Obr.12 je příklad jednoho měření bez vyjiskření ze softwaru DynoWare při řezných podmínkách $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 10 \text{ m/min}$ a $a_e = 0,05 \text{ mm}$. Na obrázku je popsáno působení procesní kapaliny před najetím kotouče do záběru a působení setrvačné síly při pohybu stolu mezi pracovním a zpětným zdvihem.



Obr. 12 – Ilustrační příklad jednoho měření bez vyjiskření ze softwaru DynoWare

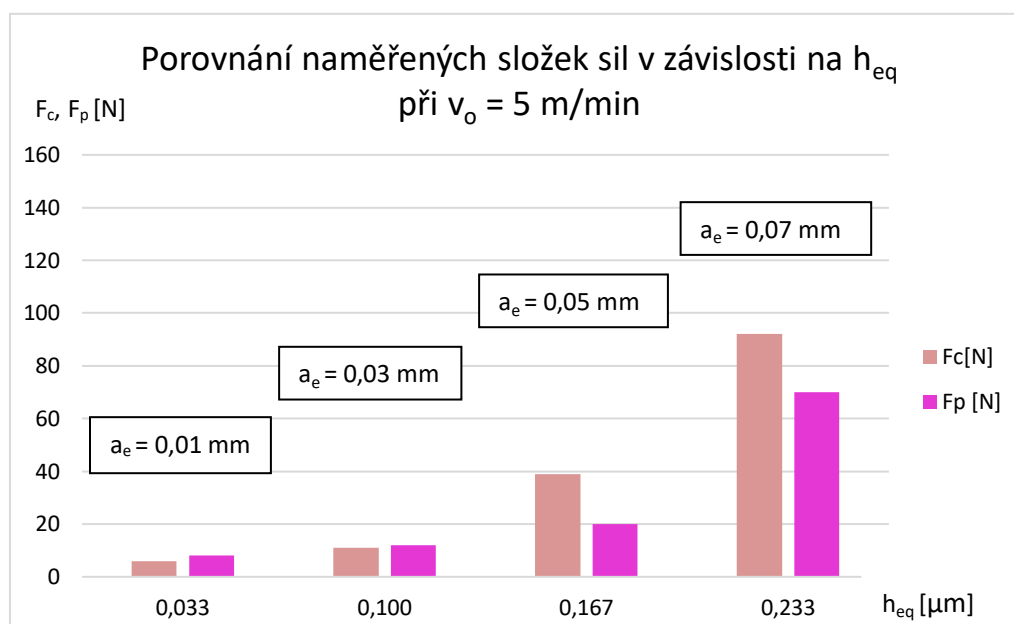
Výsledky měření řezných a pasivních sil bez vyjiskření pro různé kombinace řezných podmínek s konstantní $v_c = 25 \text{ m/s}$ a určením h_{eq} jsou v

Tab.3:

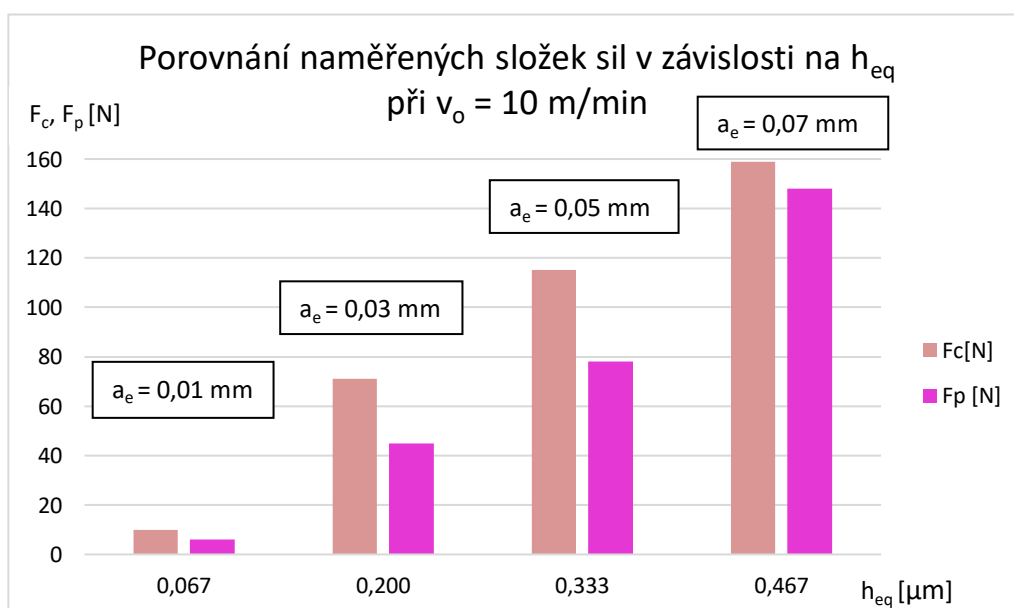
	v_o [m/min]	a_e [mm]	F_c [N]	F_p [N]	h_{eq} [μm]
1.	5	0,01	6	8	0,033
2.	5	0,03	11	12	0,100
3.	5	0,05	39	20	0,167
4.	5	0,07	92	70	0,233
5.	10	0,01	10	6	0,067
6.	10	0,03	71	45	0,200
7.	10	0,05	115	78	0,333
8.	10	0,07	159	148	0,467

Tab.3 – Výsledek změřených hodnot bez vyjiskření

Z Tab.3, Grafu 1 a Grafu 2 vyplývá, že při vyšším úběru i vyšší rychlosti obrobku se působící síly zvětšují. Řezné síly jsou ve většině měření vyšší než pasivní síly. To je mimo jiné způsobeno definovanou geometrií zrna u použitého kotouče. Při rychlosti obrobku $v_o = 5$ m/min a menších úběrech $a_e = 0,01$ mm a $a_e = 0,03$ mm jsou pasivní síly dokonce větší.



Graf 1 – Porovnání naměřených sil v závislosti na h_{eq} při $v_o = 5$ m/min

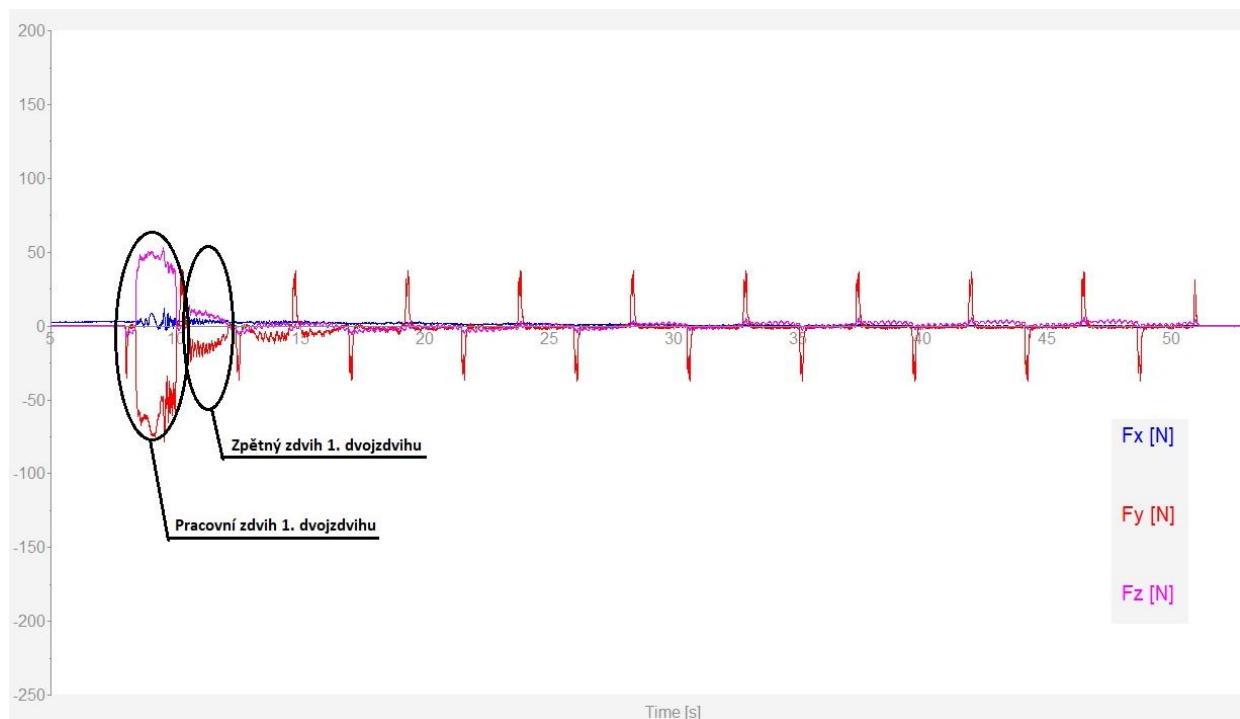


Graf 2 – Porovnání naměřených sil v závislosti na h_{eq} při $v_o = 10$ m/min

Díky ekvivalentní tloušťce třísky lze určit, které řezné podmínky jsou hrubovací nebo dokončovací. Pokud je $h_{eq} < 0,1 \mu\text{m}$, jedná se o broušení dokončovací. To v *Tab. 3* nastává v případě měření č. 1 a 5, tzn. při $a_e = 0,01 \text{ mm}$ pro obě rychlosti obrobku. Při měření č. 2 pro $a_e = 0,03 \text{ mm}$ a rychlosti obrobku $v_o = 5 \text{ m/min}$ je hodnota h_{eq} na hranici mezi broušením dokončovacím a hrubovacím. Pokud je $h_{eq} > 0,1 \mu\text{m}$, jedná se o broušení hrubovací. To nastává ve všech ostatních případech. [2]

7.5.2 Měření s vyjiskřením

Cílem u měření s vyjiskřením bylo určit 8 vyjiskřovacích křivek a z nich spočítat pokles síly. Měření probíhala při konstantní řezné rychlosti 25 m/s v kombinaci s rychlostí obrobku 5 a 10 m/min a hloubkou řezu $0,01$; $0,03$; $0,05$ nebo $0,07 \text{ mm}$. Každé měření se skládalo z 10 dvojzdvihů. Ten se skládá z pracovního a zpětného zdvihu, jenž jsou vidět na ilustraci ze softwaru DynoWare na *Obr.13*.



Obr.13 - Ilustrační příklad jednoho měření s vyjiskřením ze softwaru DynoWare

Vyjiskřovací křivky u jednotlivých kombinací parametrů měření porovnávaly závislost poklesu změřené pasivní a řezné síly na pořadí pracovních zdvihů. Z vyjiskřovacích křivek se určily poklesy sil F_C a F_P v závislosti na šířce kotouče B. Pokles síly určíme v softwaru MS Excel z rovnice spojnice trendu. Jestliže je určena rovnicí $y = a \cdot x + b$, pokles síly, který dosazujeme do vzorce, je hodnota b. [2, 24]

$$F'_{C,P} = \frac{F_{C,P}}{B} \quad [\text{N/mm}] \quad [2]$$

Pasivní síla více zohledňuje napružení soustavy nástroj-stroj-obrobek, proto je více určující než řezná síla. [2, 24]

1. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 5 \text{ m/min}$, $a_e = 0,01 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_C [N]	F_P [N]
1.	6	1
2.	5	0,8
3.	4	0,5
4.	2	0,2
5.	0	0
6.	0	0
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_C [N]	5,5
F_P [N]	0,84
B [mm]	15
F'_C [N/mm]	0,37
F'_P [N/mm]	0,06

Tab.4 - Výsledek 1. měření s vyjiskřením



Graf 3 – Vyjiskřovací křivka pro 1. měření s vyjiskřením

Výsledky 1. měření s vyjiskřením ukazují, že pokles řezné i pasivní síly je minimální. Od 5. pracovního zdvihu naměřené hodnoty působících složek sil vychází téměř nulové. Velice malé působící síly jsou dány menší rychlostí obrobku a nejmenší měřenou hloubkou řezu.

2. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 5 \text{ m/min}$, $a_e = 0,03 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	17	8
2.	4	3
3.	3	2,5
4.	2,5	1,5
5.	2	1
6.	1	0,5
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	9,77
F_p [N]	5,33
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	0,65
F_p' [N/mm]	0,36

Tab.5 - Výsledek 2. měření s vyjiskřením



Graf 4 – Vyjiskřovací křivka pro 2. měření s vyjiskřením

2. měření s vyjiskřením vykazuje u obou sil větší intenzitu poklesu než u 1. měření, hlavně mezi 1. a 2. pracovním zdvihem. Nicméně od 7. pracovního zdvihu jsou působící síly opět téměř nulové. Řezná síla vychází po celou dobu větší než síla pasivní. To je, mimo jiné dáno jako u měření bez vyjiskření, definovanou geometrií zrna použitého brusného kotouče.

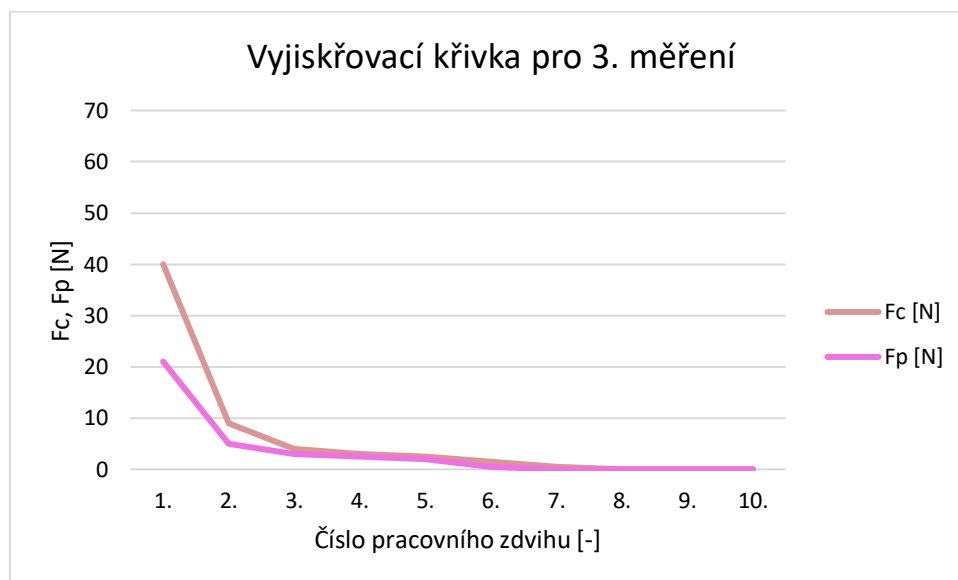
3. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 5 \text{ m/min}$, $a_e = 0,05 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	40	21
2.	9	5
3.	4	3
4.	3	2,5
5.	2,5	2
6.	1,5	0,5
7.	0,5	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	21,1
F_p [N]	11,7
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	1,41
F_p' [N/mm]	0,78

Tab.6 - Výsledek 3. měření s vyjiskřením



Graf 5 – Vyjiskřovací křivka pro 3. měření s vyjiskřením

Třetí měření s vyjiskřením ukázalo zvětšení působících sil. Hlavně u 1. a 2. pracovního zdvihu došlo k více jak dvojnásobnému zvětšení sil oproti 2. měření i přes to, že hloubka řezu se nezvětšila ani dvojnásobně. Stejně tak jako u 2. měření, byla působící řezná síla při 1. pracovním zdvihu téměř dvojnásobná oproti síle pasivní, zatímco v dalších pracovních zdvizích se poměr mezi řeznou a pasivní silou rapidně zmenšoval. Od 7. pracovního zdvihu opět naměřeny téměř nulové hodnoty působících sil.

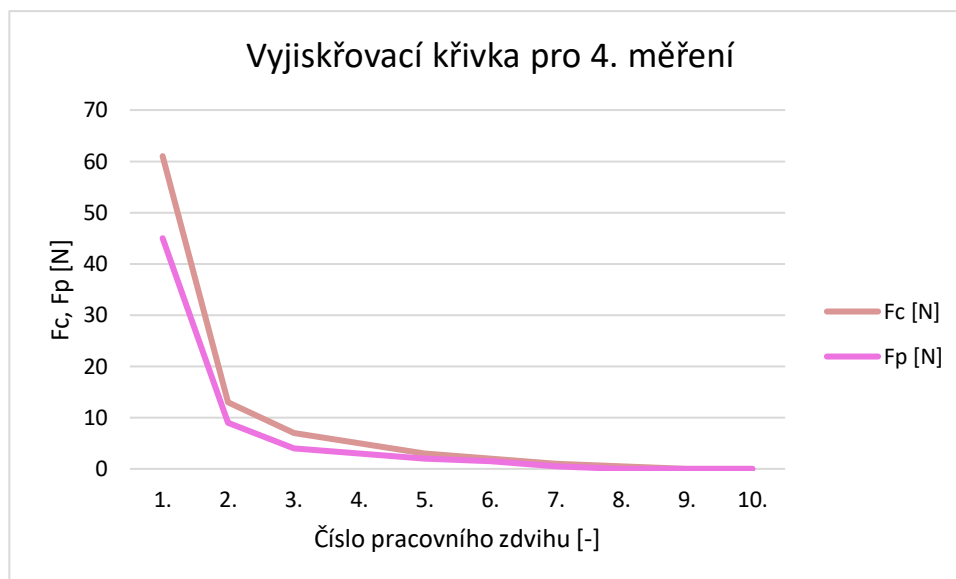
4. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 5 \text{ m/min}$, $a_e = 0,07 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	61	45
2.	13	9
3.	7	4
4.	5	3
5.	3	2
6.	2	1,5
7.	1	0,5
8.	0,5	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	32,1
F_p [N]	23
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	2,14
F_p' [N/mm]	1,53

Tab.7 - Výsledek 4. měření s vyjiskřením



Graf 6 – Vyjiskřovací křivka pro 4. měření s vyjiskřením

U měření č. 4 dochází ke zvětšení hloubky řezu na 0,07 mm. Procentuálně se objevuje u prvního pracovního zdvihu mnohem větší nárůstu pasivní než řezné síly oproti předešlým měřením, kdy řezná síla byla téměř dvakrát větší než síla pasivní. To u tohoto měření nenastává, protože řezná síla je jen zhruba o polovinu větší než pasivní. Nárůsty u dalších pracovních zdvihů jsou minimální. Od 8. pracovního zdvihu byly naměřeny opět téměř nulové hodnoty působících sil.

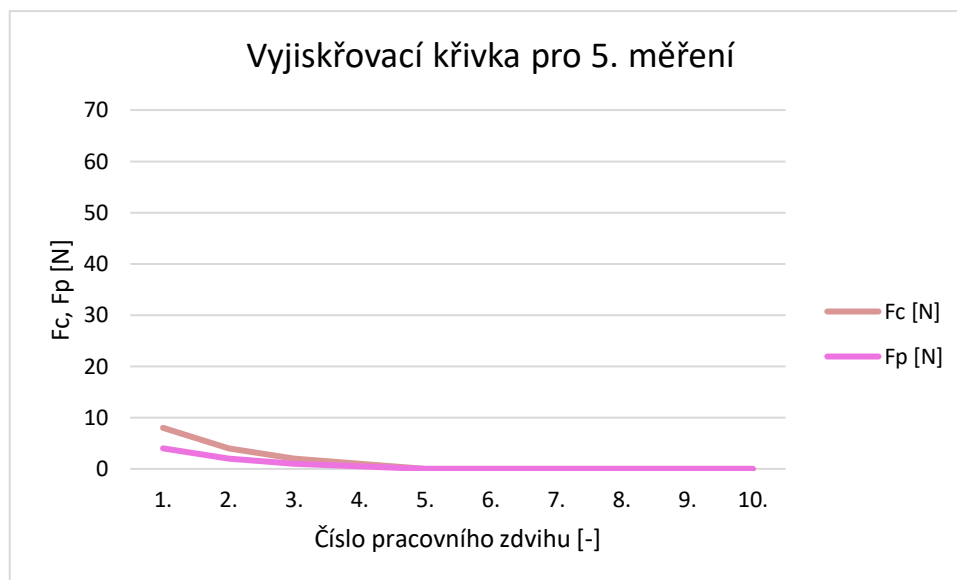
5. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 0,01 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	8	4
2.	4	2
3.	2	1
4.	1	0,5
5.	0	0
6.	0	0
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	5,26
F_p [N]	2,63
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	0,35
F_p' [N/mm]	0,18

Tab.8 - Výsledek 5. měření s vyjiskřením



Graf 7 – Vyjiskřovací křivka pro 5. měření s vyjiskřením

U 5. měření byly zjištěny malé hodnoty naměřených sil, které jsou ale větší než v případě pro $v_o = 5 \text{ m/min}$ se stejnou hloubku třísky. Na rozdíl od měření č. 1 byla naměřena v 1. pracovním zdvihu poměrově mnohem větší pasivní síla. Proto pokles F_c' je zhruba stejný, ovšem pokles F_p' v tomto případě vyšel třikrát větší než u měření č. 1. Od 5. pracovního zdvihu byly působící síly opět téměř nulové.

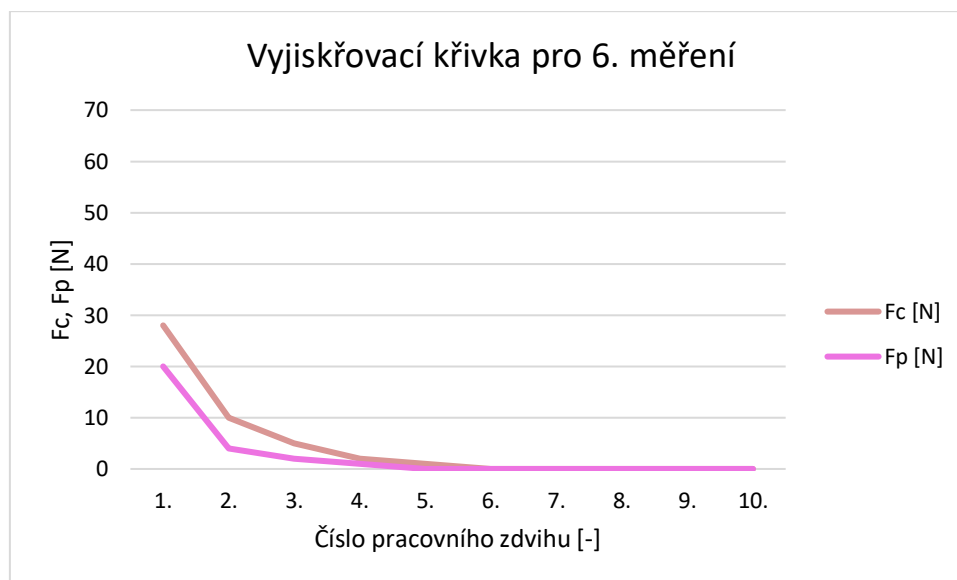
6. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 0,03 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	28	20
2.	10	4
3.	5	2
4.	2	1
5.	1	0
6.	0	0
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	16,4
F_p [N]	10,1
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	1,09
F_p' [N/mm]	0,67

Tab.9 - Výsledek 6. měření s vyjiskřením



Graf 8 – Vyjiskřovací křivka pro 6. měření s vyjiskřením

U 6. měření došlo k nárůstu působících sil. V porovnání s měřením č. 2, které probíhalo při stejné hloubce řezu, bylo zjištěno poměrově větší velikost pasivní síly oproti řezné síle. Změřené síly jsou větší než síly z měření č. 2. Nárůst intenzity poklesu na rozdíl od měření č. 2 zde není tak velký jako u měření č. 5 vůči měření č. 1. Od 6. pracovního zdvihu jsou naměřené působící síly téměř nulové.

7. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 0,05 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	47	40
2.	12	6
3.	5	2
4.	3	1
5.	1	0
6.	0	0
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	24,87
F_p [N]	18,93
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	1,66
F_p' [N/mm]	1,26

Tab.10 - Výsledek 7. měření s vyjiskřením



Graf 9 – Vyjiskřovací křivka pro 7. měření s vyjiskřením

I u měření č. 7 byl prokázán nárůst sil proti měření č. 3, kdy hloubka řezu zůstala stejná, ale byla zvýšena rychlost obrobku. Opět došlo u 1. pracovního zdvihu k poměrově mnohem většímu nárůstu pasivní síly vzhledem k řezné síle. To se rovněž projevilo v poklesu sil, kdy rozdíl F_c' a F_p' je v měření poměrově menší než u měření č. 3. U 2. pracovního zdvihu byl poměrově nárůst pasivní síly menší. Od 6. pracovního zdvihu jsou naměřené velikosti sil opět téměř nulové.

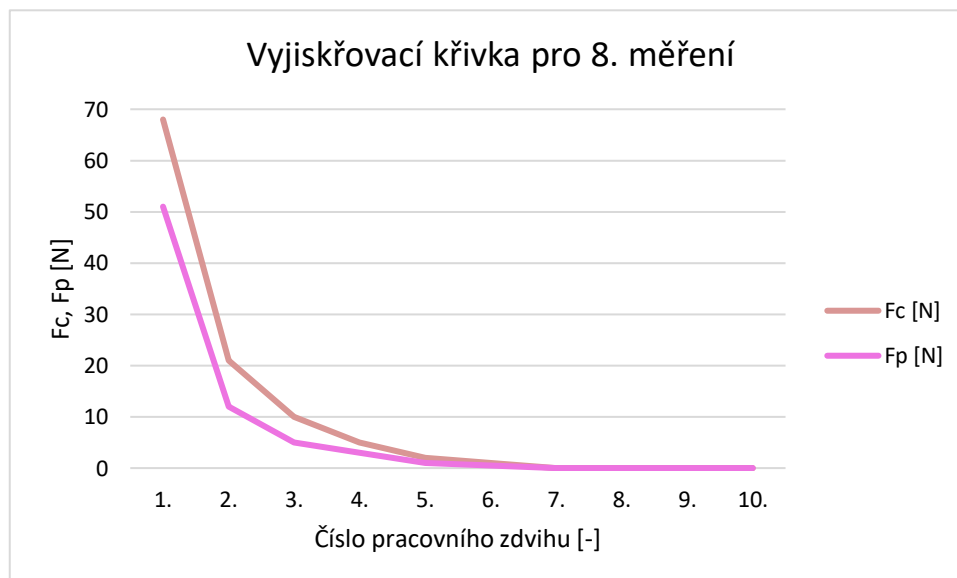
8. Měření s vyjiskřením, parametry: $v_c = 25 \text{ m/s}$, $v_o = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 0,07 \text{ mm}$

Číslo pracovního zdvihu [-]	F_c [N]	F_p [N]
1.	68	51
2.	21	12
3.	10	5
4.	5	3
5.	2	1
6.	1	0,5
7.	0	0
8.	0	0
9.	0	0
10.	0	0

Pokles:

F_c [N]	38,2
F_p [N]	26,5
B [mm]	15
F_c' [N/mm]	2,55
F_p' [N/mm]	1,77

Tab.11 - Výsledek 8. měření s vyjiskřením



Graf 10 – Vyjiskřovací křivka pro 8. měření s vyjiskřením

Měření č. 8 jsem provedl při nejvyšších měřených řezných podmínkách. Podle očekávání bylo uskutečněno rovněž i změření největších působících sil. Nárůst pasivní síly k řezné síle byl vůči předešlým měřením při rychlosti obrotu $v_o = 10 \text{ m/min}$ poměrově menší. Došlo k poměrně výraznému zvýšení sil i při 2. a 3. pracovním zdvihu. U těchto pracovních zdvihů rozdíl změřené řezné a pasivní síly byl poměrově menší než u 1. pracovního zdvihu. Od 7. pracovního zdvihu byly změřené působící síly téměř nulové.

7.6 Výsledky měření

7.6.1 Výsledky měření bez vyjiskření

Při měření bez vyjiskření vyšlo, že čím větší byla hloubka řezu, tím větší byly naměřené síly. Také při rychlosti obrobku $v_0 = 10$ m/min byly změřeny větší působící síly než u rychlosti obrobku $v_0 = 5$ m/min pro stejné hloubky řezu.

Při rychlosti obrobku $v_0 = 5$ m/min pro hloubky $a_e = 0,01$ a $0,03$ mm byly zjištěny trochu větší pasivní síly vzhledem k řezným silám. To z celého měření vyplynulo pouze u těchto zvolených parametrů. Jedná se o nežádoucí jev. Pro rychlost obrobku $v_0 = 5$ m/min a hloubky řezu $a_e = 0,05$ a $0,07$ mm vyšly řezné síly větší než pasivní, a to poměrově celkem znatelně.

Při rychlosti obrobku $v_0 = 10$ m/min byly vyhodnoceny u všech měření řezné síly větší než pasivní. U krajních hloubek řezu $a_e = 0,01$ a $0,07$ mm je ovšem tento poměr malý. Při hloubkách řezu $a_e = 0,03$ a $0,05$ mm byly prokázány poměrově velikosti řezných sil daleko větší, což je jev žádoucí.

Následně jsem dopočítal ekvivalentní hloubky třísky h_{eq} , které jsem porovnal s naměřenými silami. Stejně jako u působících sil, tak i zde platí, že čím je větší hloubka řezu a rychlost obrobku, tím větší je ekvivalentní hloubka třísky. Z ekvivalentní hloubky třísky jsem následně určil, které měřené parametry broušení jsou hrubování nebo dokončování. O dokončování se jedná v měření při hloubce řezu $a_e = 0,01$ mm pro obě rychlosti obrobku. Pro měření při hloubce řezu $a_e = 0,03$ mm a rychlosti obrobku $v_0 = 5$ m/min je hodnota ekvivalentní hloubky třísky přesně na hranici mezi dokončováním a hrubováním. U všech ostatních měřených parametrů se jedná o hrubování.

7.6.2 Výsledky měření s vyjiskřením

Cílem tohoto měření bylo zjistit pokles sil v závislosti na deseti pracovních zdvích a vynést vyjiskřovací křivky pro každé měření. Stejně jako měření bez vyjiskření, tak i u měření s vyjiskřením byly měřené síly vzrůstající v závislosti na zvětšující se hloubce řezu a rychlosti obrobku. U tohoto měření vyšly řezné síly vždy větší než síly pasivní. Největší rozdíly mezi řeznou a pasivní silou byly u 1. pracovního zdvihu. U dalších se rozdíly vždy zmenšovaly. Od 5. pracovního zdvihu byly zjištěny minimální působící síly, blížíící se téměř nule.

U rychlosti obrobku $v_o = 5$ m/min byly vyhodnoceny poměrově největší rozdíly mezi silou pasivní a řeznou u měření s hloubkou řezu $a_e = 0,01$ mm. Se zvyšující se hloubkou řezu byly stanoveny menší poměry mezi silami. Například u měření s hloubkou $a_e = 0,01$ mm byl zjištěn u 1. pracovního zdvihu rozdíl mezi řeznou a pasivní silou šestinásobný, zatímco u hloubky $a_e = 0,07$ mm pouze třetinový, což je pro hodnocení nežádoucí.

U měření s rychlostí obrobku $v_o = 10$ m/min byly opět prokázány poměrově největší rozdíly mezi silou pasivní a řeznou u měření s hloubkou řezu $a_e = 0,01$ mm. Poměr sil na rozdíl od měření s rychlostí obrobku $v_o = 5$ m/min byl ovšem daleko menší. Například největší poměr mezi silami u měření s hloubkou řezu $a_e = 0,01$ mm a u rychlosti obrobku $v_o = 5$ m/min je poměr šestinásobný, tak u rychlosti obrobku $v_o = 10$ m/min je poměr pouze dvojnásobný.

Následně bylo nutné určit poklesy sil pro jednotlivá měření s vyjiskřením. Porovnání intenzity poklesu sil je vidět v *Tab.12*. Vzhledem k nárůstu sil, které závisely na zvětšující se hloubce třísky a rychlosti obrobku, je zde pár změn. Pro měření s hloubkou řezu $a_e = 0,01$ mm neplatí, že by pokles řezné síly byl větší u rychlosti obrobku $v_o = 10$ m/min než u $v_o = 5$ m/min. Stejně tak je zajímavé, že

rozdíl poklesu intenzity pasivních sil u těchto měření byl trojnásobně větší u měření s rychlostí obrobku $v_o = 10$ m/min. Z ostatních měření vyplývá, že zvyšující se rychlost obrobku a hloubka řezu přímo souvisí se zvětšením poklesu sil.

Číslo měření	v_c [m/s]	v_o [m/min]	a_e [mm]	F_c' [N/mm]	F_p' [N/mm]
1.	25	5	0,01	0,37	0,06
2.	25	5	0,03	0,65	0,36
3.	25	5	0,05	1,41	0,78
4.	25	5	0,07	2,14	1,53
5.	25	10	0,01	0,35	0,18
6.	25	10	0,03	1,09	0,67
7.	25	10	0,05	1,66	1,26
8.	25	10	0,07	2,55	1,77

Tab.12 – Porovnání intenzity poklesů sil pro měření s vyjiskřením

8 Závěr

V první kapitole teoretické části bakalářské práce byly shrnuty základní informace o titanu jako prvku, jeho fyzikálně-chemické vlastnosti, výskyt, výroba a využití. V dalších kapitolách teoretické části práce bylo přikročeno k slitinám titanu, základním rozdělením na modifikace, jejich vlastnostmi, a výrobou. Poté bylo charakterizováno použití titanu ve strojírenské výrobě. V kapitole 4 byly popsány základní problémy spojené s obráběním titanu a navrženy možná řešení, aby se minimalizovali problémy s tím spojené, jako je použití správného řezného materiálu, procesní kapaliny a nástrojových úhlů. Konec teoretické části se zabýval samotným broušením slitin titanu. Formou literární rešerše bylo uvedeno možné použití řezných nástrojů, brusiv, pojiv a procesních kapalin pro broušení slitin titanu.

V praktické části se měřila velikost řezných a pasivních sil při rovinném broušení slitiny Ti-6Al-4V. Z různých kombinací řezných podmínek se hledaly optimální hodnoty tak, aby poměr řezné a pasivní síly byl co největší.

U měření bez vyjiskření pro rychlost obrobku $v_o = 5$ m/min vyšly ideální hloubky řezu $a_e = 0,05$ a $0,07$ mm. Pro rychlost obrobku $v_o = 10$ m/min to je hloubka řezu $a_e = 0,03$ a $0,05$ mm. Následně se vypočítala ekvivalentní hloubka třísky h_{eq} . S tou se porovnaly změřené velikosti sil a určilo se, zda jsou dané řezné podmínky hrubování nebo dokončování.

U měření s vyjiskřením bylo cílem porovnat intenzitu poklesů pasivních a řezných sil u jednotlivých měření pro 10 pracovních zdvihů a následně určit vyjiskřovací křivky. To je závislost pasivních a řezných sil na jednotlivých pracovních zdvizích. Výsledná závislost je, že se zvyšující se rychlostí obrobku a hloubkou řezu se zvětšuje intenzita poklesu sil. Výjimkou bylo pouze měření s

hloubkou řezu $a_e = 0,01$ mm, kdy menší hloubka řezu znamenala větší pokles pouze u řezné síly.

Pro zpřesnění výsledků by bylo vhodné provést další měření. To bohužel, vzhledem k velmi omezeným časovým možnostem na realizaci experimentálního měření z důvodů dodržování pokynů a opatření v souvislosti s onemocněním COVID-19, nebylo možné. Doporučuji proto provést opakování měření a rozšíření spektra řezných podmínek s porovnáním měření dalšího brusného kotouče.

9 Zdroje

- [1] HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2
- [2] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění*. 2.přeprac. vyd. Brno: CCB, 1995, 265 s. ISBN 80-858-2510-4
- [3] SEDLÁČEK, Vladimír. Titan a jeho slitiny: výroba, zpracování a použití. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 2005, 205 s.
- [4] Obr.1 - Autor: Alchemist-hp (pse-mendelejew.de) – Vlastní dílo, CC BY-SA 3.0
Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7329436>
- [5] Obrábění titanu. *Technikaatrh* [online]. Praha: technikaatrh, 2015 [cit. 2021-03-15].
Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/obrabeni-titanu>
- [6] Řezné úhly. *Osu* [online]. Brno: osu, 2011 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z:
<https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>
- [7] *Technickytydenik* [online]. Praha: technickytydenik, 2009 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z:
<https://www.technickytydenik.cz/technickytydenik.html>
- [8] Slitiny titanu. *Fs.cvut* [online]. Praha: ČVUT [cit. 2021-03-15]. Dostupné z:
http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/05_Slitiny%20Ti.ppt
- [9] HOLZBECHER, Z. a J. CHURÁČEK. *Analytická chemie*. Praha: SNTL/ALFA, 1987.
- [10] *Nikl a titan a jejich slitiny* [online]. Praha: opi.zcu, 2015 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z:
https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf
- [11] *Využití titanu a jeho slitin v protikorozní ochraně* [online]. Praha: ČVUT v Praze, 2017 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/3974-vyuziti-titanu-a-jeho-slitin-v-protikorozni-ochrane>
- [12] *Prvky* [online]. Praha: Prvky, 2009 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z:
<http://www.prvky.com/22.html>
- [13] *Znalosti o broušení titanu* [online]. Praha: klingspor, 2015 [cit. 2021-03-24]. Dostupné z:
<https://www.klingspor.cz/znalosti-o-brouseni/titan>
- [14] *Obrábění a zpracování kovů* [online]. Olomouc: eluc, 2012 [cit. 2021-03-24].
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1241>
- [15] *Titan a jeho způsoby leštění slitin* [online]. Brno: Lkalloy, 2018 [cit. 2021-03-24].
Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/titanium-and-its-alloy-polishing-methods/>
- [16] Wear mechanism in high-speed superabrasive grinding of titanium alloy and its effect on surface integrity. *ScienceDirect* [online]. 2020, **2020**(1), 16 [cit. 2021-03-24].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164820309340>

- [17] *Optimalizace procesu broušení zvláště vysokými obvodovými rychlostmi* [online]. Praha: mmspektrum, 2003 [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-procesu-brouseni-zvlaste-vysokymi-obvodovymi-rychlostmi>
- [18] *Predikce povrchového zbytkového napětí na slitině titanu generovaného pásovým broušením* [online]. Čína: sciencedirect, 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120301876>
- [19] *Vliv parametrů broušení na vývoj mikrostruktury slitiny titanu TC21* [online]. Čína: sciencedirect, 2020 [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925838820312457#fig2>
- [20] *Ti 6Al-4V* [online]. Ostrava: neonickel, 2014 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/cs/alloys/slitiny-titanu/ti-6al-4v-jakost-5/>
- [21] *BRH20CNC* [online]. Praha: mikronex, 2016 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: <http://www.mikronex.cz/BRH20CNC.pdf>
- [22] Handbook surface grinding. 3M Abrasive Systems Division, 2015.
- [23] *Rhenus XY 121 HM* [online]. Mönchengladbach: Rhenus, 2012 [cit. 2021-6-30]. Dostupné z: http://nugentek.cafe24.com/bizdemo16915/img/pdf/TD_rhenus%20XY%20121%20HM.pdf
- [24] VOŠTA, Jakub. *Energetická náročnost řezného procesu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-7-1]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84901/F2-BP-2019-Vosta-Jakub-Energeticka%20narocnost%20rezného%20procesu.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=36&zoom=100,129,736>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, FAKULTA STROJNÍ. Vedoucí práce Ing. Vítězslav RÁZEK, CSc.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Tyčinka z titanového krystalu [4]	8
Obrázek 2 - Závislost teploty a přísad na vyskytujících se modifikacích [8]	15
Obrázek 3 - Druhy brusných kotoučů [14]	25
Obrázek 4 - Změna zbytkového napětí se zvyšováním úběru materiálu [16].....	33
Obrázek 5 - Porovnání mikrotvrdości v závislosti hloubky měření [19].....	36
Obrázek 6 - Vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [20].....	38
Obrázek 7 - Polotovar upnutý do manuálního upínače dynamometru.....	38
Obrázek 8 - Základní technické parametry brusky [21].....	39
Obrázek 9 - Bruska BRH 20 CNC v prostorech FS ČVUT.....	39
Obrázek 10 - Použitý brusný kotouč Cubitron™ II 99%.....	40
Obrázek 11 - Použitá procesní kapalina Rhenus XY 121 HM [23].....	41
Obrázek 12 - Ilustrační příklad jednoho měření bez vyjiskření ze softwaru DynoWare.....	43
Obrázek 13 - Ilustrační příklad jednoho měření s vyjiskřením ze softwaru DynoWare.....	45

*Obrázky, u kterých není uveden zdroj, jsem osobně fotil v laboratořích Fakulty strojní ČVUT.

Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 - Příklady slitin titanu určených ke tváření [8].....	17
Tabulka 2 - Parametry broušení slitiny TC21 [19].....	35
Tabulka 3 - Výsledek změřených hodnot bez vyjiskření.....	43
Tabulka 4 - Výsledek 1. měření s vyjiskřením.....	46
Tabulka 5 - Výsledek 2. měření s vyjiskřením.....	47
Tabulka 6 - Výsledek 3. měření s vyjiskřením.....	48
Tabulka 7 - Výsledek 4. měření s vyjiskřením.....	49
Tabulka 8 - Výsledek 5. měření s vyjiskřením.....	50
Tabulka 9 - Výsledek 6. měření s vyjiskřením.....	51
Tabulka 10 - Výsledek 7. měření s vyjiskřením.....	52
Tabulka 11 - Výsledek 8. měření s vyjiskřením.....	53
Tabulka 12 - Porovnání intenzity poklesů sil pro měření s vyjiskřením.....	56
Graf 1 - Porovnání naměřených sil v závislosti na h_{eq} při $v_o = 5$ m/min	44
Graf 2 - Porovnání naměřených sil v závislosti na h_{eq} při $v_o = 10$ m/min.....	44
Graf 3 – Vyjiskřovací křivka pro 1. měření s vyjiskřením.....	46
Graf 4 – Vyjiskřovací křivka pro 2. měření s vyjiskřením.....	47
Graf 5 – Vyjiskřovací křivka pro 3. měření s vyjiskřením.....	48
Graf 6 – Vyjiskřovací křivka pro 4. měření s vyjiskřením.....	49
Graf 7 – Vyjiskřovací křivka pro 5. měření s vyjiskřením.....	50
Graf 8 – Vyjiskřovací křivka pro 6. měření s vyjiskřením.....	51
Graf 9 – Vyjiskřovací křivka pro 7. měření s vyjiskřením.....	52
Graf 10 – Vyjiskřovací křivka pro 8. měření s vyjiskřením.....	53

*Tabulky a grafy, u kterých není uveden zdroj, jsou výsledky mnou naměřených hodnot.