VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

BROUŠENÍ TITANOVÉ SLITINY TI-6AL-4V ELI

GRINDING OF TITANIUM ALLOY TI-6AL-4V ELI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Adam Chalupa
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	**Adam Chalupa**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**
Akademický rok:	2020/21

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

Broušení titanové slitiny Ti–6Al–4V ELI

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá rozdělením a obráběním titanových slitin pomocí technologie broušení – analýzou geometrie brousicího nástroje, silového zatížení a kvality dosahovaného povrchu po broušení.

Cíle bakalářské práce:

Teoretický rozbor problému.
Návrh experimentálních zkoušek.
Realizace experimentů, jejich statistické vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. Praha. MM publishing s. r.o. 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

KOCMAN, K. a PROKOP, J. Technologie obrábění. 2. vyd. Brno. Akademické nakladatel-ství CERM s.r.o., 2005. ISBN 80-214-3068-0.

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatel-ství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění – Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Praha. Scientia, s. r. o. 1997. ISBN 91-97 22 99-4-6. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook.

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-1--514206-3.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1.vyd., Slovensko, Trencin, s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

BARÁNEK, I., ŠANDORA, J. Výroba vybraných súčiastok špeciálnej techniky. TnUAD, Trenčín, 2004 s. 212, ISBN 80-8075-013-0.

MARINESCU, I. D. et al. Tribology of abrasive machining processes. 1st ed. William Andrew, Norwich, 2004. pp. 724, ISBN 0-8155-1490-5.

LEYENS, Ch., PETERS, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. 2nd ed., Willet-VCH, Koln, 2005, p. 513. ISBN 3-527-30534-3.

ZOYA, Z. A., KRISHNAMURTHY, R. The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys. Journal of Materials Processing Technology. Vol. 100 (2000), pp. 80-86.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou titanových slitin. První část pojednává o vlastnostech titanových slitin a využití v praxi. Druhá část popisuje problematiku obrábění titanových slitin, konkrétně broušení. Zaměřuje se zejména pak konkrétní výhody a nevýhody broušení titanových slitin. V rámci praktické části práce byla broušena titanová slitina Ti-6Al-4V ELI, u které byly zjišťovány síly, které se u broušení vyskytují a analyzována dosažená kvalita povrchu.

Klíčová slova

broušení, titan, titanové slitiny, řezná keramika, síly při broušení, kvalita povrchu

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on titanium alloys. The first part covers the properties and practical uses of titanium alloys whilst the second part describes the issue of machining titanium alloys. In particular, the specific advantages and disadvantages of grinding titanium alloys. As part of the practical undertaking of this thesis, a titanium alloy Ti-6Al-4V ELI was ground, for which I measured the achieved surface quality and the forces occurring during grinding.

Keywords

grinding, titanium, titanium alloys, ceramic cutting tools, forces while grinding, quality of surface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHALUPA, Adam. *Broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V ELI* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132837. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V ELI** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

18.05.2020 .....

Datum Adam Chalupa

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za trpělivost, odborné vedení a cenné rady při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu během studia a pomoc při tvorbě této práce, konkrétně pak otci Martinu Chalupovi.

OBSAH

ÚVOD 9
1 TITAN A JEHO SLITINY 10
1.1 Titan a jeho vlastnosti 10
1.1.1 Fyzikální vlastnosti titanu 10
1.1.2 Mechanické vlastnosti titanu 10
1.1.3 Chemické vlastnosti titanu 11
1.2 Titanové slitiny 12
1.2.1 Slitiny α 13
1.2.2 Slitiny α+β 13
1.2.3 Slitiny β 13
1.2.4 Porovnání vlastností slitin 14
1.3 Použití titanových slitin 14
1.3.1 Použití titanových slitin v letectví 14
1.3.2 Použití titanových slitin v medicíně 15
1.3.3 Použití titanových slitin v automobilovém průmyslu 17
2 BROUŠENÍ TITANOVÝCH SLITIN 18
2.1 Současné trendy v broušení 18
2.1.1 Slitiny BuRTi 19
2.1.2 Broušení titanových slitin pomocí technologie MQL 19
2.1.3 Technologie MQL s použitím nanočástic 20
2.2 Geometrie břitu 22
2.2.1 Geometrie při broušení 23
2.3 Řezné síly při broušení 24
2.4 Materiály pro broušení titanových slitin 24
2.4.1 CBN – Kubický nitrid bóru 24
2.4.2 PCD – Polykrystalický diamant 25
2.4.3 Řezná keramika 26
2.5 Brousicí kotouče 28
2.5.1 Druh brusiva 29
2.5.2 Sloh – pórovitost 30
2.5.3 Pojivo 30
2.5.4 Zrnitost 30
2.5.5 Tvrdost kotouče 31
3 PRAKTICKÁ ČÁST 32

3.1 Materiál polotovaru 32
3.2 Nástroj 33
3.3 Řezné podmínky 34
3.4 Měření sil při broušení 35
3.5 Dosažená drsnost povrchu 45
3.6 Výsledek experimentu 48
ZÁVĚR 51
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 52
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 57

ÚVOD

Titan patří praxi mezi velmi rozšířený materiál, hlavně díky jeho širokému spektru vlastností. V začátcích používání titanu se v praxi používal pouze čistý titan. Po pár desítkách let používání čistého titanu začal výzkum titanových slitin. Tento výzkum byl zaveden za účelem zlepšení žádoucích vlastností titanu a eliminování nežádoucích vlastností. Tento výzkum probíhá dodnes.

Titanové slitiny měly v minulosti hlavní využití ve vojenském průmyslu a v letectví. V současné době nacházejí tyto materiály uplatnění např. v lékařském průmyslu nebo v různých vesmírných programech. Hlavním benefitem titanových slitin je bezesporu vysoká pevnost při nízké hmotnosti, naopak nevýhodou zůstává vyšší cena a špatná obrobitelnost. Tento důvod vyvíjí neustálý tlak na vývoj stále výkonnějších a produktivnějších nástrojů na jejich obrábění.

Toto téma jsem si vybral, protože mě tyto materiály velmi zaujaly. Jedná se o velmi specifický a zajímavý materiál, který nachází stále širší uplatnění v praxi. Z tohoto důvodu také probíhají různé studie, které se zabývají řešením ideálního způsobu obrábění titanu.

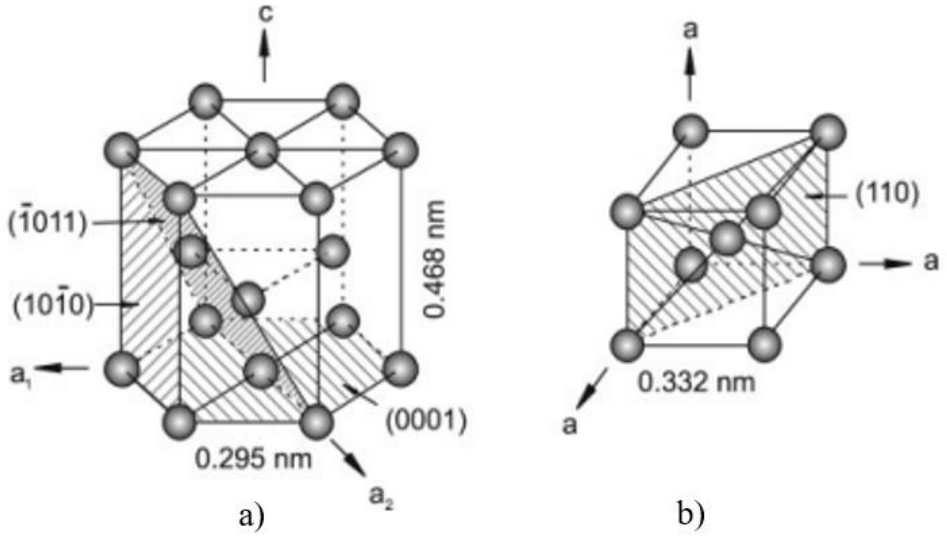
Jedním z odvětví, které využívá tyto materiály, je i medicína. Zde jsou kladeny stále vyšší nároky na kvalitu povrchu, proto se stále hledá ideální způsob broušení. Tomuto typu obrábění jsem se věnoval v této práci.

1 TITAN A JEHO SLITINY

1.1 Titan a jeho vlastnosti

1.1.1 Fyzikální vlastnosti titanu

Většina fyzikálních vlastností se odvíjí od místa v periodické tabulce prvků, atomové struktury a struktury mřížky. Titan s jeho atomovým číslem 22 patří do čtvrté periody prvků a nachází se tedy ve skupině kovů. Titan je polymorfní materiál, který se vyskytuje ve dvou alotropických modifikacích. α titan je stálý do teploty 882 °C a má hexagonální mřížku s těsně uloženými atomy. Za teplot vyšších než 882 °C máme modifikaci β titan, která má kubickou prostorově středěnou mřížku. Tyto mřížky jsou zobrazeny na obr. 1. Díky většímu množství modifikací titanu a alotropickým změnám krystalické mřížky je možné dosáhnout širokého spektra vlastností [1,2].



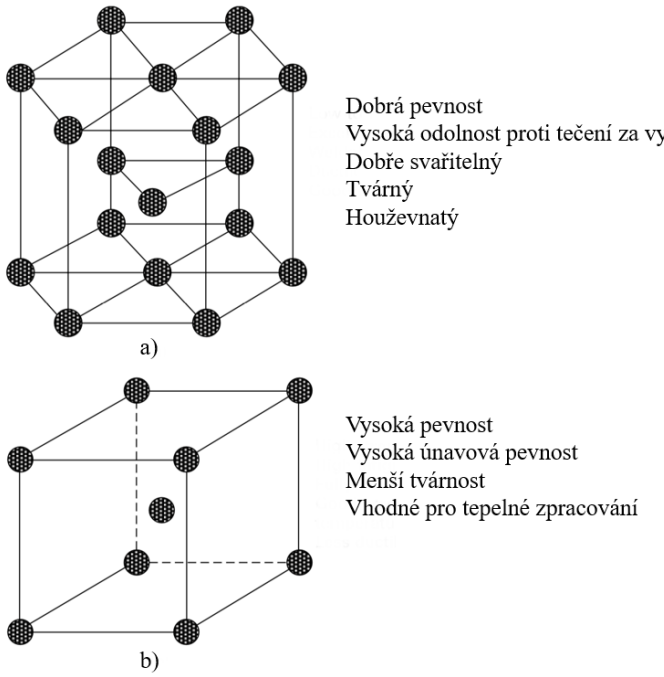
Obr. 1 Krystalická mřížka a) α-fáze titanu, b) β-fáze titanu [1].

1.1.2 Mechanické vlastnosti titanu

Mechanické vlastnosti značně závisí na obsahu a druhu nečistot v titanu. Je tedy důležité při porovnávání vlastností titanu věnovat pozornost nečistotám. Mechanické vlastnosti u titanu závisí na rychlosti zatěžování mnohem více než u ocelí a jiných technických kovů. Celkové porovnání základních vlastností je ukázáno na obr. 2.

- **Mez kluzu a mez pevnosti** – je možné dobře srovnávat s hodnotami středně legovaných ocelí, poměr meze titanu a středně legované oceli se pohybuje mezi 0,75 až 0,9 a zvětšuje se s rostoucí pevností titanu.
- **Tažnost a kontrakce** – hodnoty vysoce závisí na obsahu nečistot, při porovnání s legovanými ocelemi podobné pevnosti, má titan větší tažnost.
- **Modul pružnosti** – hodnota modulu pružnosti je v porovnání s ocelí nižší.

- **Vrubová houževnatost** – je ukazatelem jakosti titanu, změna velikosti vrubové houževnatosti se nemění společně s ostatními mechanickými vlastnostmi, je to zapříčiněno tím, že na tuto změnu působí z nečistot převážně vodík, který jinak na tažnost a pevnost nemá vliv, u titanu menší čistoty můžeme pozorovat snížení vrubové houževnatosti až na pětinu své hodnoty.
- **Mez únavy** – titan vykazuje poměrně vysokou odolnost vůči cyklickému namáhání, u hladkých vzorků je hodnota meze únavy vyšší než 50% meze pevnosti v tahu.
- **Změna vlastností při vyšších teplotách** – i přesto, že titan má vysoký bod tání, není vhodný pro použití při vyšších teplotách kvůli rychlému poklesu pevnosti. Tento pokles je prudší než u ostatních materiálů, při teplotách nad 300 °C má titan nižší pevnost než nízkouhlíkové oceli. Tažnost i kontrakce se s rostoucí teplotou zvětšují. Je výhodné pro práci ve vyšších teplotách volit titan s větším obsahem kyslíku a dusíku [2].



Obr. 2 Vlastnosti a struktury (a) - α titan, (b) - β titan [8].

1.1.3 Chemické vlastnosti titanu

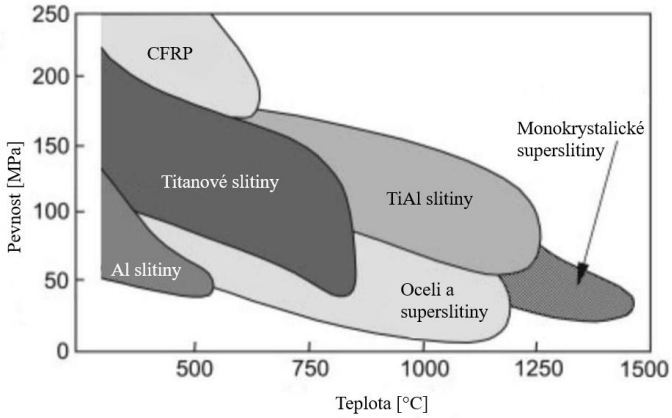
Titan je na vzduchu stálý a reaguje s fluorem při 150 °C, s chlorem reaguje až při teplotách kolem 300 °C, s ostatními nekovy se slučuje až za mnohem vyšších teplot. Za normálních teplot je titan dobrým vodičem elektřiny a tepla, při teplotách pod 0,39K se stává supravodičem [3,4].

U titanu je dobře známá jeho vysoká odolnost vůči korozi, která v některých prostředích převyšuje i speciální nerezavějící oceli a antikorozní slitiny. Odolnost titanu vůči

korozi lze ovlivnit změnou standardního potenciálu pomocí vnějších faktorů. Díky přítomnosti oxidačních látek se u titanu tvoří povrchové vrstvy, které mohou titan pasivovat, kromě kyslíku zde působí i látky jako kyselina dusičná nebo manganistan draselný [2].

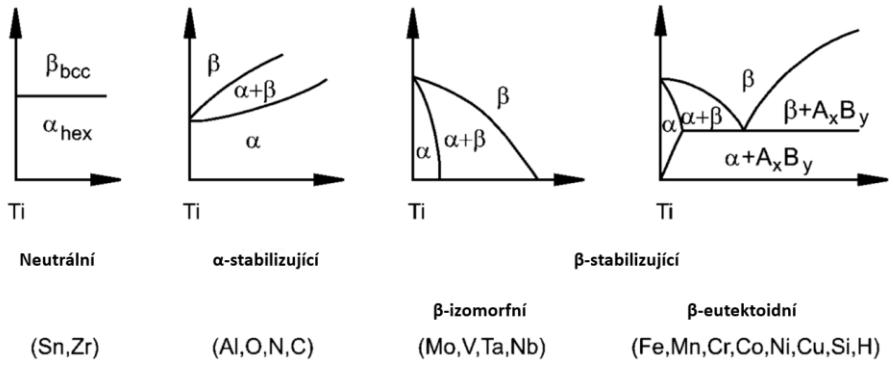
1.2 Titanové slitiny

Po zjištění vlastností čistého titanu začal výzkum titanových slitin pro zlepšení mechanických vlastností. Nedostatkem slitin titanu jsou vysoké náklady na jejich výrobu a zpracování, a to z důvodu náročného obrábění. Na obr. 3 je vidět porovnání pevnosti titanových slitin se zvyšující se teplotou s ostatními slitinami.



Obr. 3 Porovnání titanových slitin s ostatními kovy – Závislost pevnosti na teplotě [1].

Titanové slitiny jsou děleny podle obsáhlejší fáze, rozdělují se na α slitiny, α+β slitiny a β slitiny, tyto slitiny je možné podrobněji rozdělit na slitiny pseudo α a slitiny pseudo β. Slitiny vznikají přidáním přísadových prvků, tyto přísadové prvky jsou děleny podle jejich vlivu na teplotu přeměny α → β. α stabilizující prvky zvyšují teplotu přeměny, zatím co β stabilizující prvky tuto teplotu snižují (obr. 4) [1,2,5].



Obr. 4 Vliv přísadových prvků podle jejich druhu [1].

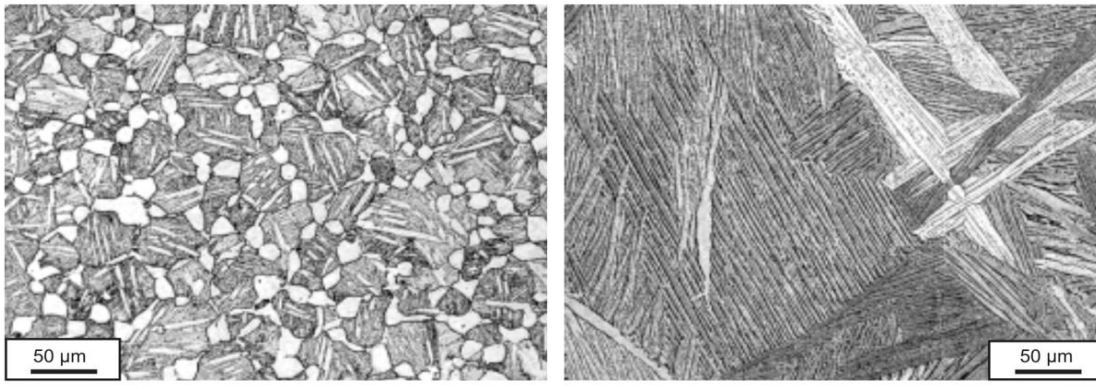
1.2.1 Slitiny α

Mezi α-stabilizující prvky patří např. uhlík, kyslík, a dusík. Z kovů sem patří např. hliník, který je zároveň jako jediný možné považovat za prvek použitelný při legování. Slitiny legované hliníkem dosahují dobrých vlastností až do teplot 550 °C. Obsah hliníku, který lze slitině přidat, je omezený. Maximální hodnota hliníku se pohybuje kolem 8 %. Do této hodnoty je hliník použit pro zvýšení pevnosti a zároveň nemá vliv na kujnost slitiny. Slitiny α se používají pro svoji dobrou korozní odolnost a dobrou svařitelnost. Není zde ale možnost stárnutí [1,5,6].

Slitiny pseudo α jsou slitiny α, do kterých je přidán prvek stabilizující a zpevňující fázi β. Dalšího zpevnění se pak dosahuje přidáním neutrálně působících prvků např. Zr a Sn. Používají se hlavně kvůli kombinaci dobrého chování při vysokých teplotách slitin α s vysokou pevností slitin α+β, zároveň mají dobrou tvářitelnost za pokojové teploty. Používají se do teplot 500–550 °C. Nad touto teplotou už ztrácí svoje pevnostní vlastnosti a schopnost odolávat tečení za vysokých teplot [1,5,6].

1.2.2 Slitiny α+β

Tyto slitiny se vyznačují širokou škálou vlastností, a to díky rozsáhlé škále mikrostruktur, ty závisí na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Struktury mohou být tvořeny buď rovnoosými zrny, nebo lamelami, případně kombinací těchto struktur. Tento typ titanové slitiny je dnes nejrozšířenější, a to z důvodu lepší tvářitelnosti v žíhaném stavu a odolnosti vůči únavovému namáhání. Mají ale sníženou lomovou houževnatost, horší svařitelnost a odolnost proti tečení oproti slitinám α a slitinám pseudo α [5].



Obr. 5 Typické mikrostruktury slitiny α+β [1].

1.2.3 Slitiny β

U β slitin jsou používané β-stabilizující prvky, aby byla potlačena martenzitická přeměna při kalení. To znamená, že při ohřátí a následném ochlazení na pokojovou teplotu se zachovává kompletní fáze β. Minimální množství β stabilizujícího prvku pro stabilizování β fáze se liší pro každý prvek, u všech se tato hodnota pohybuje kolem 10 % [1,5].

Tyto slitiny patří mezi nejuniverzálnější slitiny. Mezi jejich největší výhody patří vysoká odolnost vůči korozi a dobrá tvářitelnost za pokojové teploty, která je daná mřížkou bcc, nabízí také nejlepší poměr pevnosti na váhu a velmi dobrou kombinaci pevnosti, tvrdosti a odolnosti proti únavě při velkém průměru. Mezi nevýhody těchto slitin patří větší hustota v porovnání se slitinou α+β a vyšší cena něž u ostatních typů titanových slitin. Mezi nejpoužívanější β stabilizující prvky patří Mo, V, Fe, Cr, Nb [1,5].

Pseudo β slitiny – během pár posledních dekád význam těchto slitin prudce vzrostl. Tyto slitiny mohou být vytvrzeny až na extrémně vysoké pevnosti, hodnota meze pevnosti může překročit 1400 MPa. Široké použití těchto slitin je omezeno horší svařitelností a špatným oxidačním chováním [1].

1.2.4 Porovnání vlastností slitin

Porovnání vlastností jednotlivých druhů slitin je zobrazeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Vlastnosti jednotlivých druhů slitin [1].

	Slitina α	**Slitina α+β**	**Slitina β**
Hustota	Malá	Malá	Vysoká
Pevnost	Nízká	Vysoká	Velmi vysoká
Kujnost	Nízká	Vysoká	Dobrá
Lomová houževnatost	Vysoká	Nízká	Dobrá
Creepová pevnost	Dobrá	Nízká	Velmi nízká
Odolnost proti korozi	Velmi vysoká	Vysoká	Dobrá
Svařitelnost	Vysoká	Dobrá	Velmi nízká
Tvářitelnost za studena	Velmi nízká	Poměrně nízká	Nízká

1.3 Použití titanových slitin

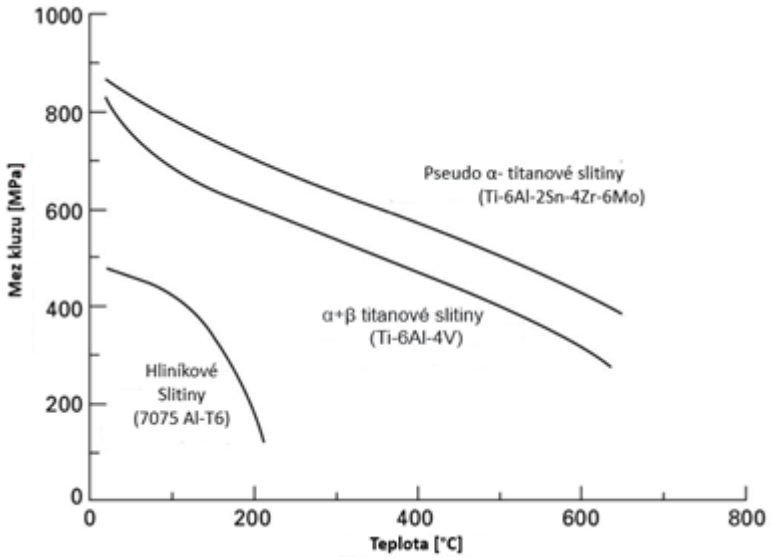
Široké spektrum vlastností titanu umožňuje široké spektrum použití. Mezi jeho výhody patří např. příznivý poměr mezi pevností a měrnou váhou, který předurčil tyto slitiny pro použití v letectví. Díky jeho vlastnostem je tento materiál rozšířený i přes to, že jeho výroba je velice náročná a drahá. V poslední době nahrazuje dříve používané materiály, jako např. hliníkové nebo niklové slitiny [1,2].

1.3.1 Použití titanových slitin v letectví

Titanové slitiny se používají v rámech letadel, částech podvozku a částech motorů, a to z důvodu jedinečné kombinace vlastností jako jsou nízká hmotnost, vysoká pevnost, vysoká únavová pevnost a odolnost proti korozi a oxidaci. Použití titanových slitin bylo důležité pro motory letadel, kde byly původně používány žáruvzdorné oceli a niklové slitiny. Problémem bylo, že tyto materiály jsou velmi těžké. Díky jejich nahrazení titanovými slitinami se váha motoru zredukovala až o 200 kg. Titanové slitiny však není možné použít ve všech částech motoru, jako např. spalovací komory, kde teploty vysoce převyšují hodnotu

600 °C. Nad touto teplotou naše slitiny rychle ztrácí pevnost a tvrdost. Je zde tedy nutné použít materiály odolnější proti vysokým teplotám, jako už dříve zmiňované niklové slitiny. Dlouhou dobu se jako hlavní materiál v podvozku letadel používala vysokopevnostní ocel, kvůli vysoké tvrdosti, pevnosti, houževnatosti a únavové životnosti. Vysokopevnostní oceli jsou však náchylné ke korozi a vodíkovému křehnutí. Tyto oceli se následně začaly nahrazovat titanovými slitinami, aby se eliminovaly hlavní nevýhody vysokopevnostních ocelí, a to i přes nižší pevnost titanových slitin, která je vynahrazována značnou úsporou hmotnosti [1,7,8].

Titanové slitiny v začátcích jejich užívání byly používány v civilních letadlech v relativně malém zastoupení, které se pohybovalo mezi 3-5 %. V dnešní době se celková hmotnost titanových slitin v letadlech pohybuje kolem 10 % celkové váhy letadla a 25-30 % motoru letadel. U vojenských letadel se hmotnost titanových slitin pohybuje v hodnotách 10-30 % celkové váhy letadla. To z důvodu vyššího zatížení trupu letadla při extrémních manévrech během bojových akcí. Titanové slitiny oproti ostatním materiálům v letectví mají výhodu vysoké pevnosti za zvýšené teploty. Titanové slitiny se často používají na místech, kde jsou teploty moc vysoké na hliníkové slitiny nebo kompozitní materiály, kterým při zvýšených teplotách rapidně klesají pevnostní vlastnosti, to můžeme vidět na obr. 6 [7].



Obr. 6 Vliv teploty na mez kluzu u titanových a hliníkových slitin [8].

Mezi nevýhody titanových slitin patří jejich vysoká cena, ale i přes jeho vysokou cenu je jeho použití v některých odvětvích stále ekonomicky přijatelné, především díky nízké hmotnosti titanových součástek. Např. v automobilovém průmyslu úspora váhy na úkor vysoké ceny nemusí být výhodná, zatímco v leteckém či vesmírném průmyslu může být úspora váhy velmi důležitá, a to i v případě vyšší ceny [7,8].

1.3.2 Použití titanových slitin v medicíně

U materiálů používaných ve zdravotnictví jsou požadovány určité vlastnosti. Mezi tyto vlastnosti patří odolnost vůči korozi, biokompatibilita, bioadheze a modul pružnosti

podobný lidské kosti. Titan jako takový je biokompatibilní železný materiál a má dobrou odolnost vůči korozi od tekutin, které se nachází v lidském těle. Titan zároveň splňuje většinu požadavků pro materiál používaný ve zdravotnictví. V případě, že mají implantáty obsahovat mechanické části, jsou titanové slitiny hojně využívány, a to kvůli jejich nízké relativní hmotnosti a dobré únavové pevnosti. Narozdíl od jiných vysokopevnostních materiálů mají titanové slitiny relativně nízký modul pružnosti, který se mnohem více podobá modulu pružnosti lidské kosti. Titanové části byly použity např. v srdečním implantátu od společnosti ABIOMED (obr. 7) [9,10,12].

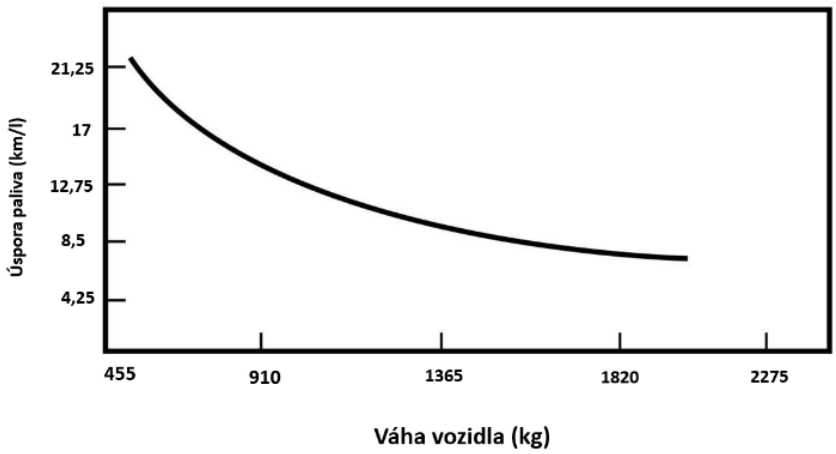
Obr. 7 Implantát lidského srdce s titanovými vnitřními částmi (ABIOMED) [11].

Použití slitin v medicíně je ale daleko širší. Používají se i na kloubní náhrady, jako jsou např. kolena, ramena, nebo kyčle. Dále se používají jako šrouby a plátky při zlomeninách a při vyztužování kostí. V poslední době se také podařilo vytvořit titanovou náhradu lidské čelisti (obr. 8). Podle průzkumu jsou nejčastěji používané materiály na implantáty a kardiovaskulární aplikace čistý titan a titanová slitina Ti-6Al-4V. Při dalším zkoumání se zjistilo, že slitina Ti-6Al-4V, je pro lidské tělo dlouhodobě škodlivá, a to kvůli uvolňování hliníku a vanadu do lidského těla, tyto látky mohou časem způsobovat různá onemocnění jako Alzheimerova choroba nebo neuropatie [12]. Z toho důvodu se začíná přecházet na slitiny β. Další výhodou titanových slitin je, že mohou být opakovaně sterilizované. Z toho důvodu jsou využívány na nástroje používané při srdečních operacích nebo operacích očí. Mezi další využití patří zubní implantáty, kde výhoda čistého titanu oproti dříve používaným slitinám zlata je, že titan je čistý prvek. Z toho vyplývá, že zde je velmi malá šance, že nastane alergické reakce na kov, a tělo náhradu lépe přijme [10,12,14].

Obr. 8 Titanová čelist [13].

1.3.3 Použití titanových slitin v automobilovém průmyslu

Díky dobrým vlastnostem jsou titanové slitiny v automobilovém průmyslu hojně využívané, a to jak pro použití na součástky motoru, tak na součásti šasi. Hlavní důvod použití titanových slitin je úspora váhy při náhradě ocelí. Úspora váhy je důležitá jak u závodních aut, tak i aut rodinných, jelikož úspora váhy dovoluje lépe pracovat např. s designem. V rodinných autech jsou významné úspory paliva při snížení hmotnosti vozidla (obr.9) a zároveň i větší bezpečnost automobilu. Slitiny mohou být použity v motoru např. na válce, spojovací tyče, ventilové pružiny. Použití mimo motor je možné na odpružení kol, výfukové systémy, hřídele, nebo šrouby. Titanové slitiny mají však v automobilovém průmyslu dvě velké nevýhody, první nevýhodou je vysoká cena a druhou nevýhodou jsou nedostatečné dodávky materiálu. S objemem materiálu, který by byl použit v automobilovém průmyslu, nejsme schopni zaopatřit stálou dodávku materiálu [15].



Obr. 9: Úspora paliva podle váhy vozidla [15].

2 BROUŠENÍ TITANOVÝCH SLITIN

Broušení materiálu je dokončovací proces, kdy je materiál odebírán náhodně rozmístěnými brusnými částicemi. Dosažené vlastnosti povrchu mohou dosahovat až 10x lepších hodnot než při frézování nebo soustružení. Kvůli použití titanových slitin v letectví a medicíně jsou na kvalitu povrchu kladeny velké nároky, a to jak na drsnost povrchu, tak i geometrii obrobku. Broušený povrch nesmí být poškozen mechanickými, fyzikálními nebo chemickými účinky broušení. Při broušení titanových slitin dochází ke zvýšenému namáhání brousícího nástroje, a to kvůli malé tepelné vodivosti, která zapříčiňuje vysoké teploty v místě řezu. Tedy i to, že většinu tepla (kolem 80 %) pohlcuje nástroj. Vzhledem k vysoké pevnosti materiálu zde narůstá i velikost řezné síly. Díky těmto vlastnostem při broušení dochází k intenzivnímu opotřebení nástroje. Zároveň vysoké teploty při broušení mohou vést ke vzniku makrotrhlin, které snižují celkovou dosaženou kvalitu povrchu. Broušení titanových slitin je tedy náročnější proces vzhledem k volbě řezných podmínek. Doporučují se menší řezné rychlosti a malé hloubky řezu. Řezné podmínky se však liší podle ideálních podmínek i podle použitého nástroje [16,17,19].

Broušený povrch se liší podle druhu obráběného materiálu. Díky intenzivnějšímu tření u titanových slitin nevzniká typická tříska jako při obrábění ocelí, na broušeném povrchu je plastická zóna a materiál spíše „teče“ po broušeném materiálu. Díky vysoké chemické aktivitě titanových slitin se částice obráběného materiálu nalepují na vrcholky brusných zrn a znemožňují samoostření kotouče. To zapříčiňuje postupnou ztrátu řezivosti, a tedy i snižuje životnost nástroje. Tento problém můžeme eliminovat vhodným použitím procesních kapalin, které vytvoří barieru mezi nástrojem a broušeným materiálem a zamezí nalepování částí obráběného materiálu na nástroj [16,17,19].

Broušení brousicím kotoučem je velmi důležitá metoda obrábění titanových slitin, avšak při použití konvenčních brousicích kotoučů dochází k velmi rychlému opotřebení kotouče a špatné kvalitě povrchu. Výhodné materiály pro broušení jsou např. různé druhy korundů, nebo řezná keramika (např. zelený karbid křemíku). V případě, kdy na broušení nestačí konvenční brusivo, je preferováno použití brousicích kotoučů s materiálem CBN, nebo PCD, kdy se dosahuje vysoké kvality broušeného povrchu a vyšší trvanlivosti než u konvenčních brusiv. Důležitým aspektem při broušení titanových slitin je použití řezných kapalin [16,17,18,19].

Během broušení titanových slitin je jejich povrch snadno poškozen. Toto poškození je způsobeno zbytkovými napětími v povrchové vrstvě, která vznikají kvůli vysokému zatížení a vysoké teplotě při broušení. Příčinou vzniku těchto napětí je plastická deformace a tepelné zatížení při broušení. Zbytková napětí způsobují snížení pevnosti a odolnosti vůči korozi. Zbytková napětí u titanových slitin dosahují větších hodnot něž při broušení ocelí, a to kvůli rozdílu gradientu teploty pod povrchem. Rozdíl teploty v povrchové vrstvě a vrstvě 0,1 mm pod povrchem je 50 °C u uhlíkové oceli a až 127 °C u titanové slitiny [19,20,21].

2.1 Současné trendy v broušení

Kvůli zvyšujícímu se podílu použití titanových slitin v letectví, medicíně a automobilovém průmyslu, je poptávka po rychlejších, výkonnějších a kvalitnějších způsobech broušení [21].

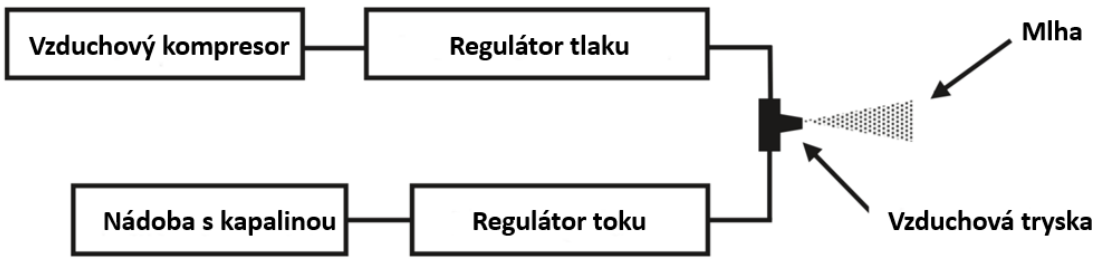
2.1.1 Slitiny BuRTi

Slitiny BuRTi neboli Burn resistant Titanium alloys (titanové slitiny odolné proti hoření) jsou titanové slitiny odolné proti vysokým teplotám. Tyto slitiny vznikly proto, aby lépe odolávaly vysokým teplotám v místě řezu. Tyto slitiny dosahují svých vlastností přidáním signifikantního podílu vanadu a chromu do povrchu. Tyto prvky mají díky tvorbě oxidů za vysokých teplot sklon ke snižování teploty. Dosahuje se i vyšší tepelné vodivosti [22].

Obrobitelnost těchto slitin je o něco horší než např. u slitiny Ti-6Al-4V. Při obrábění těchto slitin nástroje z karbidu wolframu předčily nástroje z PCD, a to z důvodu tvoření vrubů při obrábění těchto slitin. Při broušení kvůli přítomnosti křehkých karbidů titanu dochází k poškození povrchu tvorbou kráterů. I přes tento problém však nedochází k narušení mikrostruktury a tvrdosti materiálu [22].

2.1.2 Broušení titanových slitin pomocí technologie MQL

Při broušení titanových slitin je důležité použití řezných kapalin. Kvůli zvýšení životnosti nástroje a dosažení vyšší kvality povrchu. Řezné kapaliny snižují teploty při řezání, snižují řezné síly a napomáhají tak ke správnému lámání a odvodu třísek. Problém řezných kapalin však spočívá v cenové náročnosti při uchovávání a likvidaci, která není šetrná k životnímu prostředí. Se zvyšujícími se nároky na šetrnost k prostřední nastává tento problém ve všech odvětvích. Výsledná cena pro řezné kapaliny tak vychází několikanásobně vyšší než cena za nástroj. Velkoobjemové řezné kapaliny jsou však stále hojně užívané při většině obrábění. Kvůli zvyšující se ceně za likvidaci řezné kapaliny, zvyšujícím se podmínkám na šetrnost k životnímu prostředí a stále širšímu užití titanových slitin se zvyšuje poptávku po alternativních způsobech chlazení. Začala se tedy rozvíjet technologie tzv. MQL (minimum quantity lubrication – minimální množství maziva) a hledání alternativ pro klasické řezné kapaliny. Na obr. 10. můžeme vidět schéma stroje pro MQL [23,24].



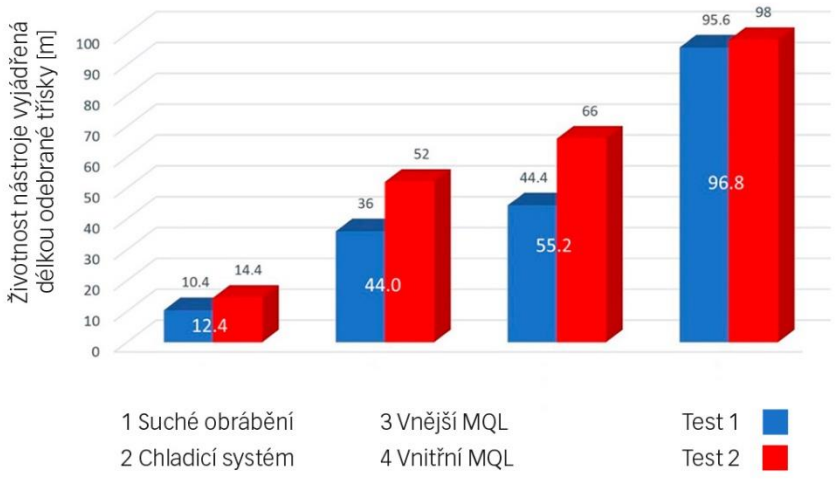
Obr. 10 Schématický diagram stroje pro MQL [26].

Omezení řezné kapaliny při broušení může způsobit značné potíže v čištění brousicího kotouče a odvodu třísek. Metoda MQL spočívá v použití malého množství maziva, které se rozprašuje na broušenou plochu pomocí stlačeného vzduchu. Jelikož chlazení a mazaní je při broušení zásadní, metoda MQL je stále používanější, a to díky dobrému chladícímu

efektu, který poskytuje stlačený vzduch a dobrým mazacím vlastnostem, které jsou zde díky rozprašovaní maziva. Výhodou je, že při rozprašování není potřeba tak velké množství maziva jak při použití klasických řezných kapalin, je zde použito většinou <100 ml/h. Při výzkumu bylo zjištěno, že za použití technologie MQL je poskytována dostatečná lubrikace, snížení řezných sil stejně, nebo lépe než při použití klasických řezných kapalin. Tato technologie má však i své nevýhody, mezi které patří dosahování horší kvality povrchu (vyšší Ra). Na obr. 11 je možné vidět porovnání životnosti nástroje při různých způsobech mazání. Hodnoty jsou průměrné hodnoty z několika měření [23,24].

Parametry měření [24]:

- $n = 2228\ min^{-1}$,
- $v_c = 70$ m/min,
- $f_{břit} = 0{,}05$ mm/břit,
- $t = 8$ mm,
- $a_p = 4$ mm.



Obr. 11 Životnost nástroje určená podle délky odebrané třísky při použití různých způsobů mazání [24].

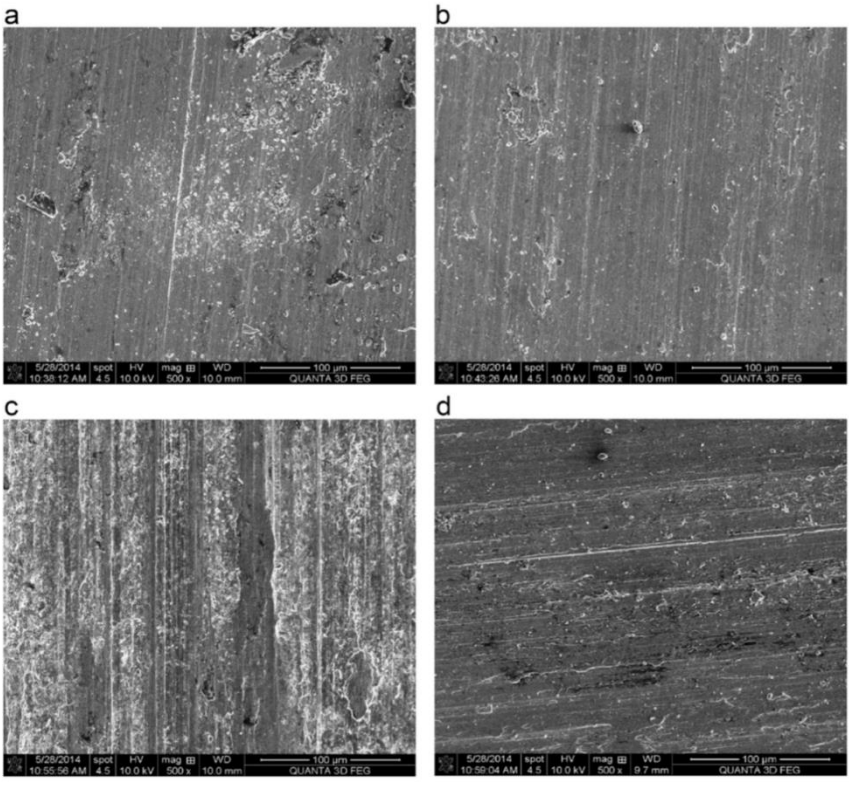
2.1.3 Technologie MQL s použitím nanočástic

K užití nanočástic se přistupuje z důvodu šetrnosti k prostřední. Technologie mazaní MWF (Metal Working Fluids) je účinná, ale všechny náklady spojené s jejím používáním jsou značně vysoké a šetrnost k životnímu prostředí je velmi nízká. Proto se postupně přechází k technologii MQL, kde je použito menší množství mazací kapaliny, ale dosahuje lepších výsledků. Technologie MQL s použitím nanočástic spočívá v nahrazení syntetické řezné kapaliny kapalinou přírodní, např. rostlinným nebo palmovým olejem, která nepoškozuje životní prostřední a zdravotně neohrožuje obsluhu stroje. Tyto oleje však mají špatné tribologické vlastnosti v porovnání se syntetickými řeznými kapalinami, proto se do těchto přírodních olejů přidávají nanočástice materiálu s lepšími tribologickými vlastnostmi.

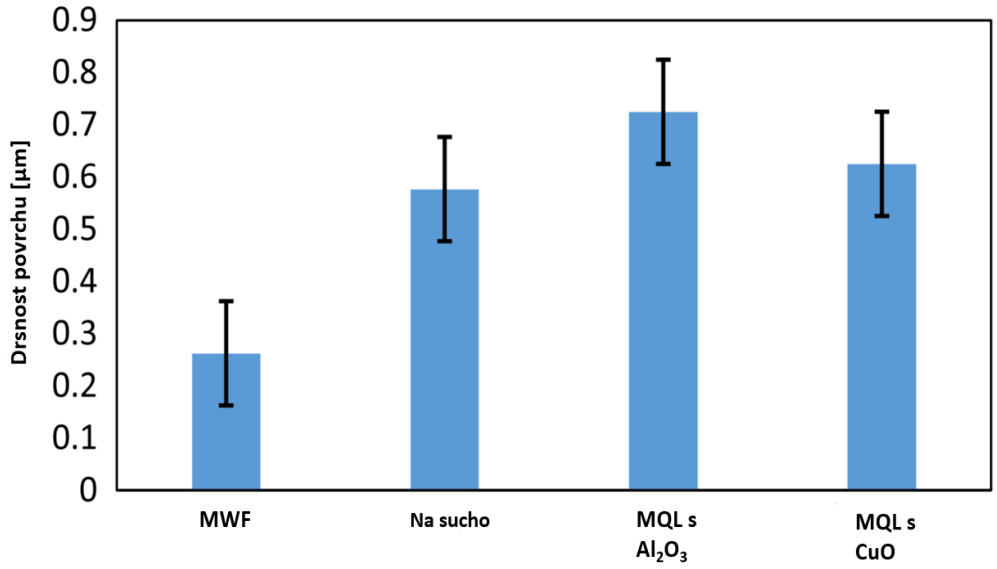
Při výzkumu těchto kapalin bylo zjištěno, že nejlepších výsledků dosahují oleje s přidáním nanočástic jednoho z materiálů [25,26]:

- MoS_2 (sulfid Molybdeničitý),
- α-Al_2O_3 (oxid hlinitý),
- SiO_2 (oxid křemičitý),
- CNTs (uhlíkové nanotrubice),
- ZrO_2 (oxidová keramika – oxid zirkoničitý).

Přidání těchto materiálů se pohybuje v rozmezí 2–5 % celkového množství přírodního oleje. Při broušení oceli 440C, kdy jako řezná kapalina byl použit palmový olej, byl při druhém pokusu použit palmový olej s přidáním 2% nanočástic z α-Al_2O_3. V rámci druhého měření bylo dosaženo o 20 % nižšího součinitele, tření a opotřebení nástroje se snížilo o 65 %. Na obr. 12 je možné vidět jednotlivé plochy po broušení podle druhu mazání. Porovnání dosažené drsnosti povrchu je zobrazeno na obr. 13. Obr. 12. a 13. byly měřeny za řezných podmínek v_c = 17 m/s, v_f = 9m/min, a_p = 0,005 mm, brousicím kotoučem s brusným materiálem ze zeleného karbidu křemíku. Počet chodů byl 15 [25,26].



Obr. 12 Mikroskopické snímky povrchu Ti-6Al-4V po broušení podle druhu mazání a) bez mazání, b) MWF mazání, c) MQL mazání s nanočásticemi z Al_2O_3, d) MQL mazání s nanočásticemi z CuO [25].



Obr. 13 Dosažená kvalita povrchu podle způsobu mazání [25].

2.2 Geometrie břitu

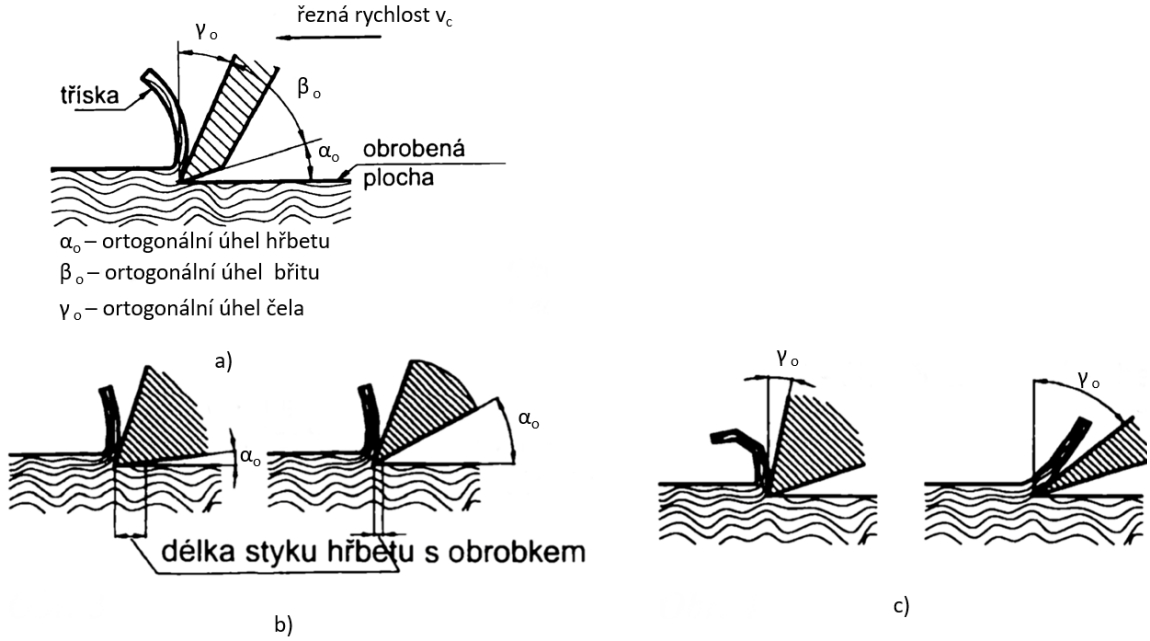
Geometrie břitu je důležitá pro to, aby nástroj vykazoval dobré vlastnosti. Má-li vytvářet kvalitní povrch a dostatečnou životnost, musí být správně přizpůsobená geometrie. Špatně zvolená geometrie břitu může mít za následek rychlejší opotřebení nástroje, zvýšení řezného odporu a vyšší teploty. Nástroj dělíme na 4 základní části:

- **břit** – klínová část nástroje, která vniká do obráběného materiálu a odděluje třísku;
- **plocha čela (čelo)** – plocha, po které odchází odebíraná tříska, na této ploše je řešena geometrie, které následně tvoří utvařeč třísky;
- **plocha hřbetu (hřbet)** – plocha, která při obrábění směřuje k ploše obrobku;
- **ostří** – prvek řezné části nástroje, který realizuje proces řezání.

Poloha plochy čela a plochy hřbetu je velice důležitá. Popisuje se podle nich celková geometrie nástroje. Základní rozdělení jednotlivých úhlů je vyobrazeno na obr. 14 a). Tyto úhly jsou:

- **Úhel břitu (β)** – úhel, který svírá čelní a hřbetní plocha břitu. Při větších úhlech β, roste odpor břitu nástroje proti vnikání do obráběného materiálu, roste pevnost a snižuje se riziko deformace. Při menších úhlech β tedy se dosahuje menších řezných odporů, ale klesá životnost nástroje, a to z důvodu většího rizika deformace a odlamování ostří.
- **Úhel hřbetu (α)** – úhel, který svírá plochu hřbetu se směrem pohybu nástroje. Velikost těchto úhlů ovlivňuje tření hřbetu nástroje o obrobenou plochu. Čím je úhel větší, tím je menší styková plocha nástroje a obrobené plochy (viz obr. 14 b), se zvyšováním úhlu, se však zároveň zeslabuje břit, stoupá jeho namáhání a snižuje se životnost.
- **Úhel čela (γ) –** úhel mezi čelem a kolmicí na směr pohybu nástroje. Ovlivňuje utváření třísky a vnikání nástroje do obrobku. Při zmenšování úhlu čela roste řezný odpor a břit hůře vniká do obrobku. Změna úhlu γ je vyobrazena na obr.14 c).

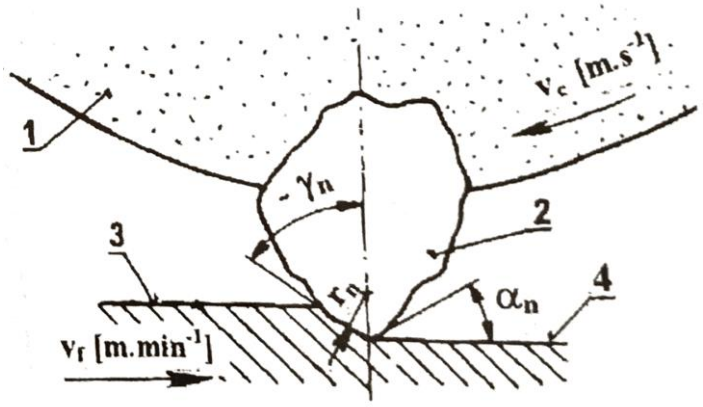
Při větších úhlech γ nástroj snáze vniká do obrobku, avšak břit se zeslabuje a klesá tedy jeho pevnost a životnost. Úhel čela může dosahovat i záporných hodnot [27,28].



Obr. 14 Geometrie nástroje [27].

2.2.1 Geometrie při broušení

Broušení jako obráběcí metoda je charakterizována specifickými podmínkami tvorby třísky a vzniku obrobeného povrchu. V důsledku velkých plastických deformací a vysokého tření se část třísky vždy ohřeje natolik, že vytvoří kapky kovu, nebo se vypaří úplně. Jednotlivá brousící zrna mají nepravidelný geometrický tvar, poloměry a zaoblení ostří. Brousící zrna mají zpravidla negativní úhel čela γ a poměrně velký úhle čela α, tyto úhly jsou vyobrazeny na obr. 15. Za řeznou rychlost při broušení je považována obvodová rychlost brousicího kotouče, která je oproti ostatním druhům obrábění poměrně vysoká [29].

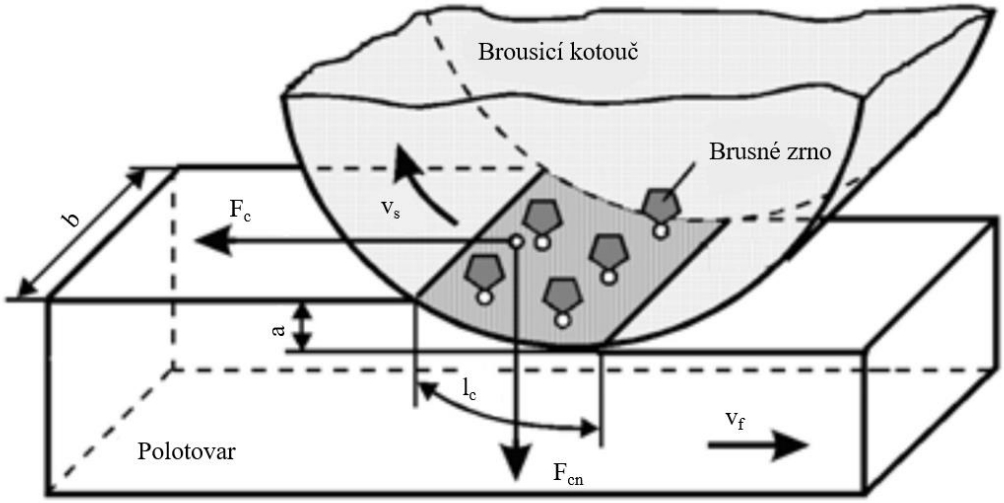


Obr. 15 Model záběru brousicího zrna [29].

2.3 Řezné síly při broušení

Síly při broušení vznikají na základě odolnosti materiálu proti vnikání brusných zrn a následku tření mezi povrchem obráběného materiálu a brousícího nástroje. Každou složku celkové síly při obrábění lze tedy rozdělit na 2 části, které jsou uvedeny v rovnici 2. Při obrábění souměrných součástí, kde není velký pohyb stolu do stran, zde máme dvě složky celkové síly při obrábění, a to proto, že síly v ose y se zanedbávají, protože její hodnota se pohybuje kolem 0. V ose x, a tedy ve směru řezné rychlosti, se nachází řezná síla F_c, v záporném směru osy z se nachází kolmá řezná síla F_{cn}. Rozložení těchto sil je zobrazeno na obr. 16. Řezná síla F_c je síla potřebná k uchování řezné rychlosti brousicího kotouče [30,31].

$$F = F_{deformace} + F_{tření} \quad (1)$$



Obr. 16 Rozložení sil při broušení [30].

2.4 Materiály pro broušení titanových slitin

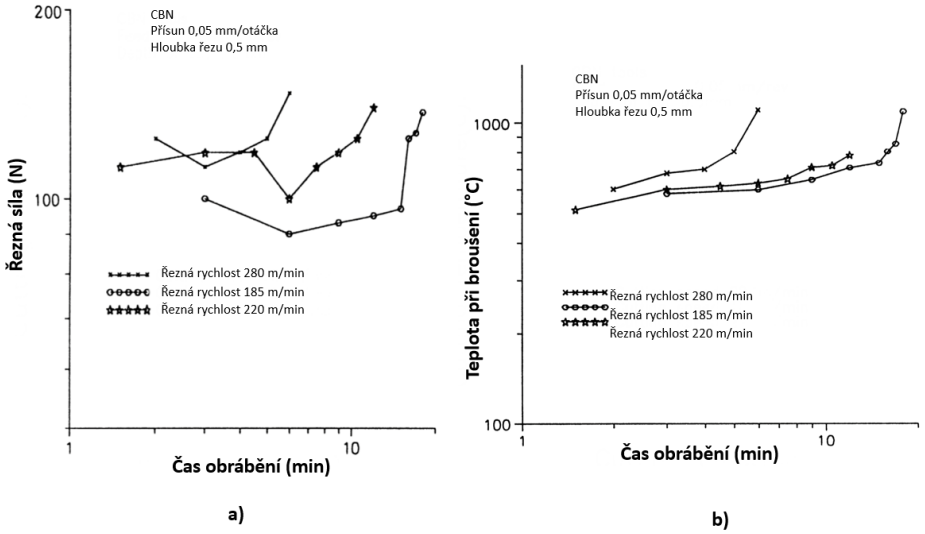
Největší vliv na výkon řezného materiálu má životnost. Životnost nástroje je udávána dle opotřebení. Kromě opotřebení lze považovat také brusnou sílu působící na nástroj a teplotu při broušení za kritéria životnosti a výkonu řezného nástroje nebo materiálu. Důležitým indikátorem je také dosažená kvalita povrchu obráběného materiálu [32].

2.4.1 CBN – Kubický nitrid bóru

I přesto, že karbidy jsou ověřené a skvěle pracují ve všech kategoriích CNC obrábění, určitá odvětví stále hledají lepší alternativy. V poslední době se ve výzkumu řezných destiček za použití CBN dosáhlo 3x větší rychlosti a trojnásobné životnosti při odebrání devítinásobku materiálu než u destičky z SK při obrábění Ti-6Al-4V. Díky dobré tvorbě

třísky a dobré životnosti ostří postupně nahrazuje ostatní řezné materiály v dokončovacích procesech [33].

Dosažená kvalita povrchu záleží na typu vyvolaných napětí a souvisejících znaků, z nichž jsou nejdůležitější teplota při obrábění a řezná síla. Řezná síla závisí primárně na velikosti třísky a řezném tlaku. Dosažitelná kvalita povrchu závisí také na stavu řezné hrany. Opotřebení ostří se mění podle velikosti řezné síly a tlaku. Na obr. 17 a) je možno vidět ilustraci řezné síly podle času obrábění. Můžeme zde vidět pokles řezné síly po určité době obrábění. S rostoucím časem pak řezná síla roste. Čas, po kterém nám začne velikost řezné síly prudce růst, se považuje za jedno z kritérií životnosti materiálu. Kromě řezné síly, je důležité kontrolovat i teplotu při řezání. Titan je materiál odolný vůči teplu, řezný nástroj je tedy při obrábění vystavován vysokým teplotám a maximální teplota musí být kontrolována. Na obr. 17 b) je možné vidět, že teplota při řezání se za určitý čas začne pomalu zvyšovat, následně přijde vysoký teplotní skok. Toto postupné zvyšování teploty značí, že při obrábění nenastaly žádné problémy. Ke zvýšení dochází ve všech případech kolem 700 °C, což je kritická hodnota omezující výkon CBN nástrojů při obrábění titanových slitin. Nad touto teplotou může docházet k tepelnému odpevnění a následné deformaci ostří [33].



Obr. 17 a) graf řezné síly a času obrábění b) graf řezné teploty a času obrábění [32].

2.4.2 PCD – Polykrystalický diamant

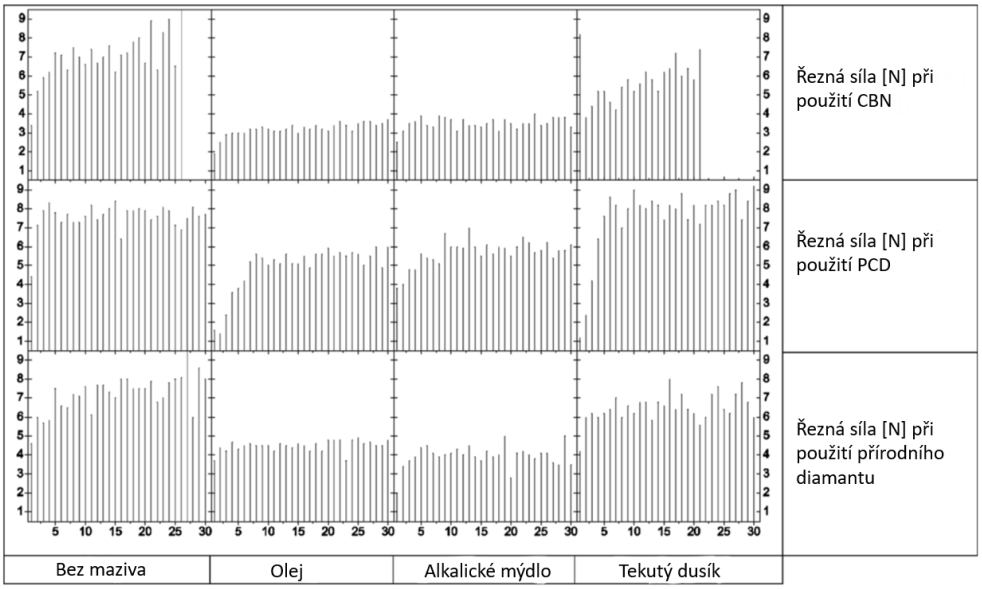
Diamant má spoustu žádoucích vlastností, mezi které patří velká tvrdost, dobrá tepelná vodivost, dobrá pevnost a vysoká odolnost proti opotřebení. Proto se hodí na použití broušení a obrábění velmi tvrdých materiálů, např. tvrdých kovů, skla nebo betonu. Při výrobě nástrojů je nejčastěji použita kovová matrice, do níž jsou vložena diamantová zrna. U těchto nástrojů může docházet k degradaci diamantu v důsledku nárůstu teploty. Při teplotách vyšších než 700 °C dochází k degradaci diamantových zrn a tvoří se oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Ve vícefázových strukturách má přítomnost kovové pojivé fáze významný vliv na grafitizaci na hranicích zrn diamant – kov. Při obsahu kobaltu, niklu nebo železa v kovové

matrici je tato degradace ještě významnější. Tato degradace výrazně zhoršuje vlastnosti diamantových zrn, což negativně ovlivňuje vlastnosti celého nástroje [34,35].

Při porovnání PCD a CBN bylo zjištěno, že při použití PCD bylo dosaženo vyšších rychlostí a delší životnosti nástroje, kdy při řezné rychlosti v_c= 350 m/min je životnost PCD až dvakrát větší. To znamená, použití PCD je oproti CBN výhodnější při delším obrábění nebo větším úběru materiálu. CBN stále dosahuje lepší kvality povrchu po obrábění. Použití při větší rychlosti má však za následek větší řezné síly, porovnání s CBN je zobrazeno na obr. 18, a větší teploty, které mohou mít za následek měkčení materiálu [34].

Parametry pro měření na obr. 18 [36]:

- d_w =15 mm,
- v_c = 16 m/s,
- v_f = 2 m/min,
- a_p = 6 mm,
- l = 50 mm,
- použitý materiál Ti-6Al-4V.



Obr. 18 Řezné síly při použití 30 vzorků podle použitého materiálu nástroje [36].

2.4.3 Řezná keramika

Moderní keramika je obecně definovaná jako krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku, ale i brousicí materiály a řadu tzv. ‚nových' keramických látek. Mezi tyto brousicí materiály patří např. oxidová keramika (Al_2O_3, ZrO_2, ThO_2, BeO, MgO, UO2),

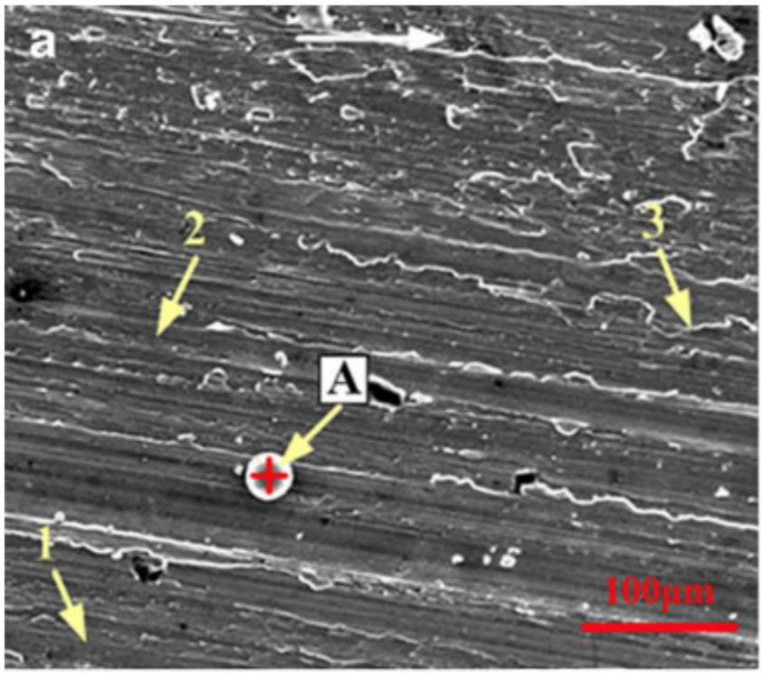
ferity, feroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B) a boridy (na bázi Ti) [35].

Jednotlivé vlastnosti keramiky lze dobře kombinovat tak, jak to vyžadují konkrétní aplikace pro různé materiály. Mezi jejich hlavní vlastnosti patří [35]:

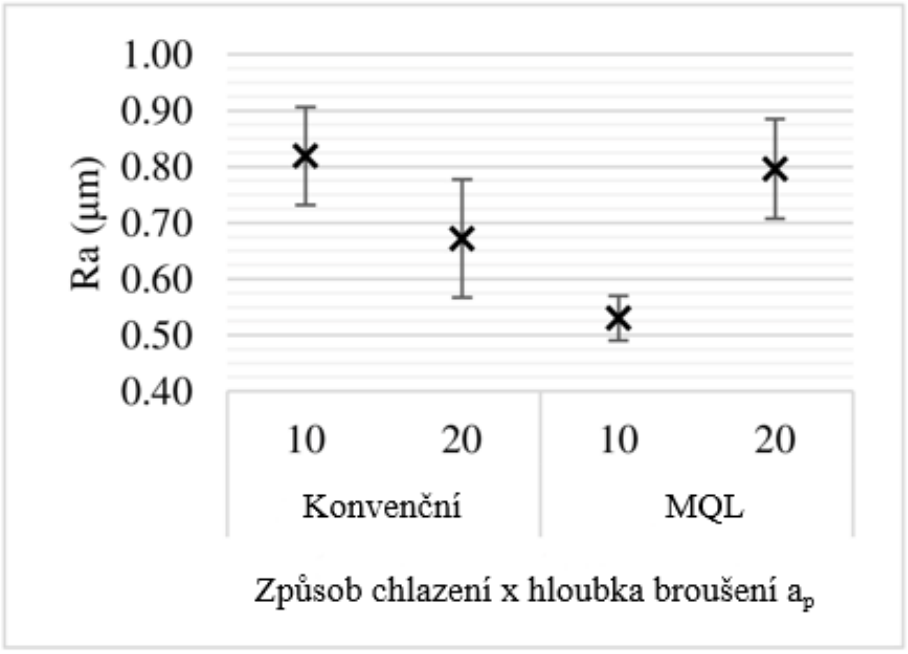
- Vysoká tvrdost a odolnost proti plastické deformaci.
- Odolnost proti mechanickému namáhání.
- Odolnost proti působení vysokých teplot.
- Vysoká chemická stabilita.
- Odolnost proti opotřebení.
- Nízká měrná hmotnost.
- Poměrně nízká cena.

Mezi nejčastěji používané keramické materiály při broušení titanových slitin patří SiC. Mezi nejdůležitější aspekty v porovnávání řezných materiálů patří řezná síla a teplota dosahovaná při broušení. Při výzkumu bylo zjištěno, že řezná síla se postupně zvyšuje s hloubkou broušení. Při zvýšení hloubky řezu však dochází k navýšení součinitele tření a vznikají větší síly. Tento problém se dá lehce vyvážit zvýšením rychlosti, protože při vyšší rychlosti nastává kontakt zrn s povrchem obrobku v menším časovém intervalu, nastává zde tedy částečné snížení součinitele tření. Při výzkumu firmy Bentley and Aspin bylo zjištěno, že je možné dosáhnout povrchu bez poškození pomocí brousicího kotouče s materiálem SiC při nastavení konvenční rychlosti a nižší hloubky řezu. Na Obr 19. je možné vidět dosažený povrch při tomto testu, je zde vidět broušená plocha, která se skládá ze tří částí. 1. část je hladká plocha bez škrábanců, 2. část je plocha se škrábanci a 3. část je plocha s rýhami. Škrábance se skládají z mikrodrážek a řezných rýh. Měření na obr. 19. byla naměřena za podmínek v_s= 26,4 m/s, a_p = 0,03 mm, v_f=3 m/min [37].

Teplota při broušení pomocí SiC díky nízké tepelné vodivosti dosahuje hodnot kolem 530 °C při hloubce broušení 0,01 mm. Se zvětšující se hloubkou broušení se teplota rapidně zvyšuje. Problém při broušení titanových slitin s vyšším obsahem hliníku, jako slitina Ti-6Al-4V, pomocí brousicího kotouče s SiC je obsah hliníku jako jednoho z hlavních prvků pojiva brousicích kotoučů. Může dojít k chemické reakci mezi těmito prvky. Tato chemická reakce má za příčinu vytvoření adhezivní vrstvy na zrnech materiálu SiC, která se postupně během broušení zvyšuje. Tento proces urychluje otupení brousicího kotouče a zvyšuje řeznou sílu a teplotu při broušení. Na obr. 20 je zobrazen dosažený povrch při broušení pomocí SiC abrasiva za řezných podmínek v_c = 32 m/s a v_f = 6,8 m/min [37,38].



Obr. 19 SEM snímek povrchu Ti-6Al-4V [37].



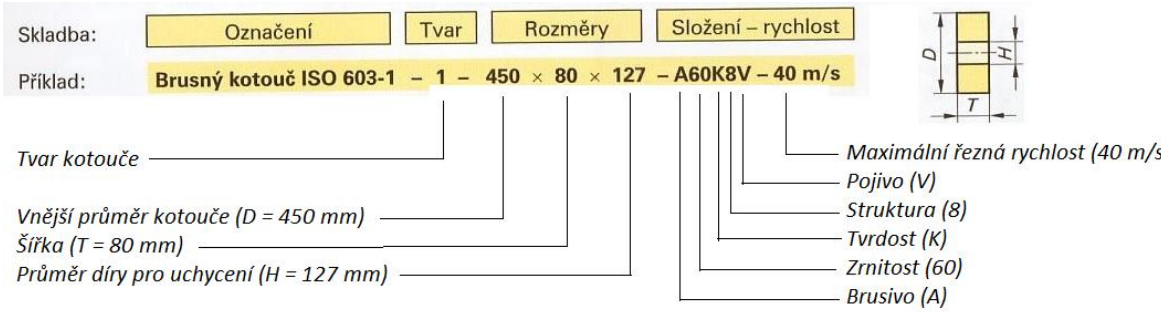
Obr. 20 Dosažená kvalita povrchu podle způsobu chlazení a hloubky broušení [38].

2.5 Brousicí kotouče

Brousicí kotouč je tvořen póry, zrny brusiva, které jsou spojeny v tuhé těleso vhodného tvaru pomocí pojiva. Brusná zrna tvoří řezné klíny, póry mají funkci zubových mezer, ve kterých se hromadí třísky a pojivo spojuje brusná zrna dohromady, ty pak tvoří pevné těleso různých velikostí. Na obr. 21 je zobrazeno značení brousicích kotoučů. Brusné nástroje rozdělujeme podle [39,43]:

- Druhu brusného materiálu.
- Zrnitosti brusiva.
- Tvrdosti nástroje.
- Struktury nástroje.

Druhu pojiva.



Obr. 21 Značení brousicích kotoučů [39].

2.5.1 Druh brusiva

Brusná zrna jsou tvrdá, houževnatá. Jejich tvar většinou odpovídá ostrohranným krystalům, jejichž šířka nepřekračuje 5 mm. Brusné materiály se podle výroby rozdělují na přírodní a syntetické. Pro výrobu brousicích kotoučů se využívají výhradně materiály syntetické. Druh materiálu se volí v závislosti na druhu broušeného materiálu. Syntetické brusné materiály a jejich rozdělení je možné vidět v tabulce 2 [41].

Tabulka 2: Syntetické brusné materiály [41].

Materiál brusiva	Barva	Označení
Umělý korund Al2O3	Bílý	99A
	Růžový	98A
	Hnědý	96A
	Černý	85A
Karbid křemíky SiC	Zelený	49C
	Černý	48C
Karbid bóru B4C		B
Kubický nitrid bóru		CBN
Polykrystalický diamant		PCD

2.5.2 Sloh – pórovitost

Struktura kotouče je vyjádřena vzdáleností mezi brusnými zrny. Pokud je kotouč hutný, je vzdálenost mezi zrny malá, pórovitý kotouč má mezery mezi zrny větší. Pórovité kotouče se používají na měkké a houževnaté materiály, naopak hutné kotouče se používají na hladké, tvrdé a křehké materiály. Struktura je určena poměrem brusných zrn, pojiva a pórů. Čím je číslo menší, tím menší je vzdálenost mezi zrny [40].

- Polohutný 5–7.
- Pórovitý 7–9.
- Velmi pórovitý 9–12.

2.5.3 Pojivo

Látka spojující zrna brusiva. Pojivo stmeluje brusná zrna tak, aby měl kotouč vhodnou mechanickou pevnost. Má značný vliv na samoostření materiálu, a to podle toho, zda uvolňuje opotřebená a otupená zrna. Různé druhy pojiv jsou zobrazeny v tabulce 3 [42].

Tabulka 3: Pojiva brousicích kotoučů [42].

Druh pojiva	**Označení**	**Poznámka**
Anorganická		
Keramické	V	Nejčastěji používané, kvůli univerzálnosti, tuhé, snášející velké opotřebení, křehké.
Silikonové	S	Méně pevné než keramické pojivo, ale pružnější.
Magnezitové	O	Vhodný pro jemný výbrus, použití pouze pro broušení za sucha.
Kovové		Použití pro výrobu diamantových brousicích kotoučů.
Organická		
Šelak	E	Přirozená pryskyřice, nemožné použití ve vysokých teplotách.
Pryžové	R	Vhodné pro tenké a leštící kotouče.
Umělá pryskyřice	B	Pevné pojivo, používáno pro řezné kotouče.
Klíh	G	

2.5.4 Zrnitost

Zrnitostí se popisuje velikost použitých brusných zrn v matrici brusného nástroje. Označení zrnitosti brusiva se stanoví podle velikosti zrn prosíváním na sítech u jemnějších zrn plavením. Zrnitost je volena podle předepsané drsnosti broušené součásti. Pro menší požadovanou drsnost broušené plochy se předepisuje jemnější zrnitost. Pro odebírání větší části materiálu, nebo měkčích materiálů se předepisuje větší číslo zrnitosti. Značení zrnitosti je zobrazeno v tabulce 4 [43].

Tabulka 4: Zrnitost [43].

Zrnitost	Slovní název
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

2.5.5 Tvrdost kotouče

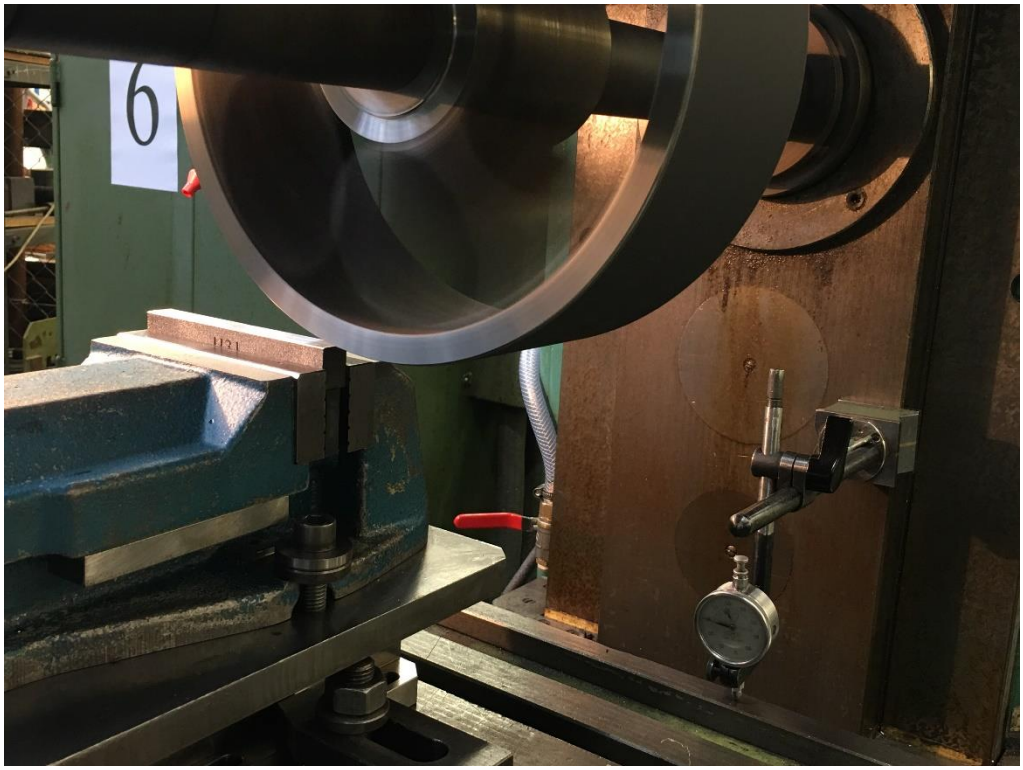
Jde o vlastnost, která charakterizuje odpor brusných zrn proti vylomení z nástroje, vyjadřuje tedy míru houževnatosti a pružnosti pojivých můstků mezi jednotlivými zrny brusiva. S tím souvisí i uvolňování otupených zrn. Tvrdost kotouče nesouvisí s tvrdostí zrn. V tabulce 5 je zobrazeno rozdělení a značení tvrdosti kotoučů. Tvrdost je správná, pokud se zrna odlamují z kotouče, jakmile se otupí. Pokud však zůstávají i po otupení, pojivo je příliš tvrdé a zrna se musí odstranit orovnáváním kotouče. Pokud se zrna odlamují dříve, než se otupí, kotouč je stále ostrý, ale je zde rychlejší opotřebení [44].

Tabulka 5: Tvrdost brousicích kotoučů [44].

Tvrdost	Označení
velmi měkký kotouč	G, H
měkký kotouč	I, J, K
střední kotouč	L-O
tvrdý kotouč	P-S
velmi tvrdý kotouč	T, U
Zvlášť tvrdý kotouč	V, Z

3 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část se zabývá broušením titanové slitiny Ti-6Al-4V pomocí brusných pásů. Byly použity brusné pásy s různou zrnitostí, s kterými broušení proběhlo za různých brousicích hloubek a různých rychlostí posuvů. Při tomto broušení byly měřeny velikosti řezné síly a následně změřena dosažená drsnost povrchu. Z velikosti sil a dosažené kvality povrchu byla následně určena ideální zrnitost a brousicí hloubka. Experiment byl prováděn na bubnu D260/96 mm za sucha. Tento buben je společně s polotovarem zobrazen na obr. 22.



Obr. 22 Broušení polotovaru [45].

3.1 Materiál polotovaru

Polotovarem je kvádr o velikosti 20x20-120 mm. Kvádr je vyroben z materiálu Ti-6Al-4V ELI, který je vyroben spékáním kovových prášků v peci Arcam Q10 plus. Tato slitina spadá do skupiny titanových slitin α+β a patří mezi nejpoužívanější titanové slitiny, a to hlavně díky svým dobrým vlastnostem, ke kterým patří např. vysoká pevnost, nízká hmotnost a dobrá odolnost vůči korozi [1]. Chemické složení této slitiny je zobrazené v tabulce 6 a její mechanické vlastnosti v tabulce 7. V tabulce 7 je zobrazeno i porovnání mechanických vlastností s konvenčně tvářenou slitinou Ti-6Al-4V ELI. Zde je vidět, že slitina vyráběná v peci Arcam Q10 plus dosahuje lepších mechanických vlastností, je zde však nevýhoda častější tvorby dutin a pórů, které mohou materiál narušit.

Tabulka 6: Chemické složení Ti-6Al-4V ELI vyrobené pomocí pece Arcam Q10 plus [45].

Prvek	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
hm [%]	6	4	0,03	0,1	0,1	0,01	<0,003	zbytek

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti Ti-6Al-4V ELI [45]

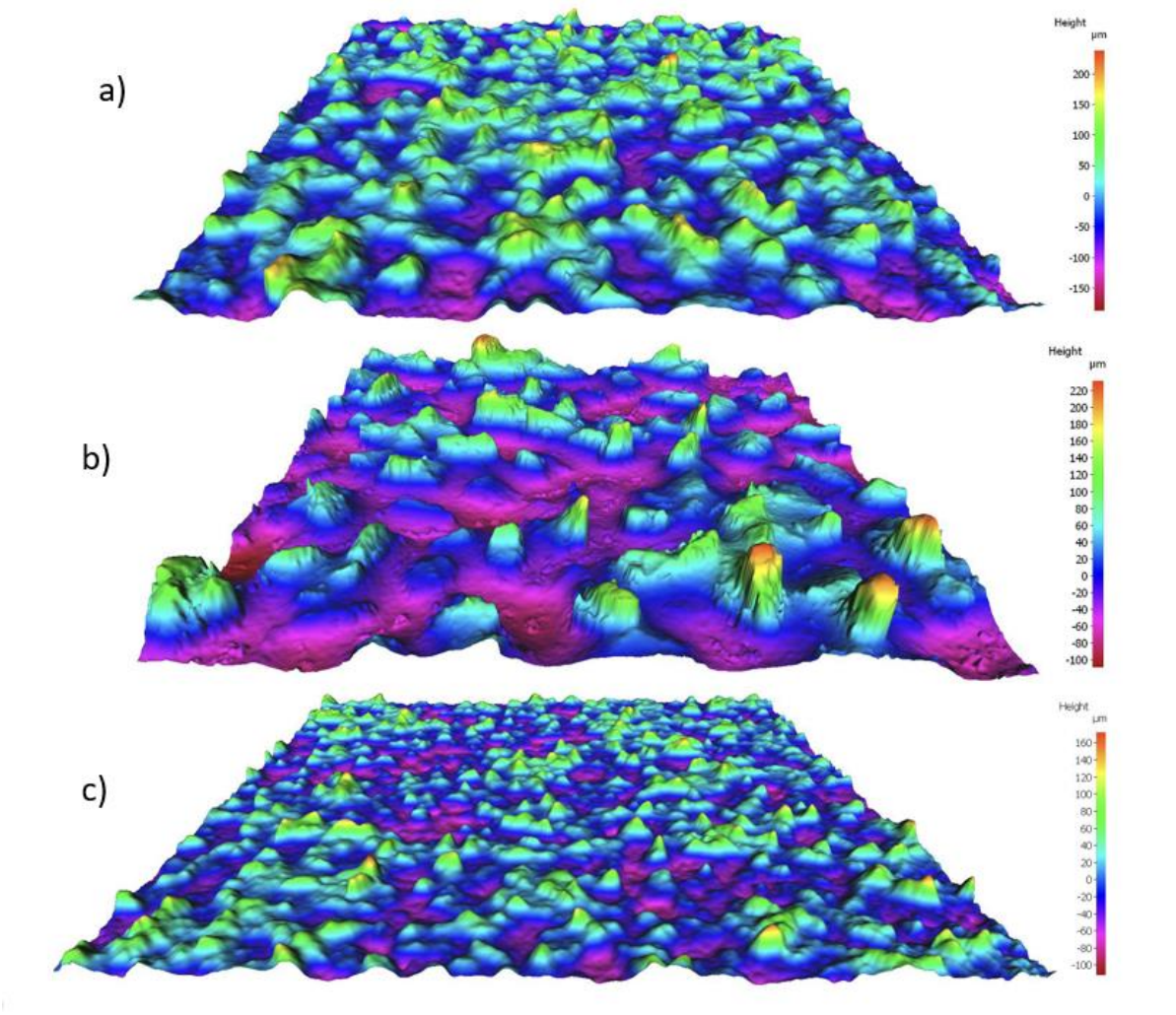
Ti-6Al-4V	**Arcam Q10 plus**	**Tvářené**
Smluvní mez kluzu [MPa]	894-914	795
Mez pevnosti [MPa]	950-963	860
Prodloužení [%]	11,4-11,5	>10
Tvrdost [HRC]	36-42	36-42
Youngův modul pružnosti [GPa]	116-118	116-118

3.2 Nástroj

Na broušení byly použity 3 brusné pásy s různou zrnitostí. Konkrétní informace o brusném pásu můžeme vidět v tabulce 8. Vybrané zrnitosti mají použití převážně na hrubovací broušení, kdy dosahují hladkého povrchu. Mikroskopické snímky povrchů námi vybraných řezných pásů jsou zobrazeny na obr. 23. Pásy byly voleny z důvodu možnosti broušení i složitějších tvarů. To je umožněno díky schopnosti pásu lehce obtékat broušený materiál.

Tabulka 8: Brusné pásy.

Abrazivní materiál	SiC
Zrnitost (FEPA P)	P80, P100, P120
Pojivo	Syntetické lepidlo
Podkladový pás	Tkanina



Obr. 23 Struktura brusných papírů a) P80, b) P100, c) P120 [44].

3.3 Řezné podmínky

Řezné podmínky byly pro experiment zvoleny tak, aby byly co nejlépe pokryty možnosti pásového broušení. Řezné podmínky broušení při měření sil a řezné podmínky broušení při měření drsností povrchu jsou zobrazeny v tabulce 9.

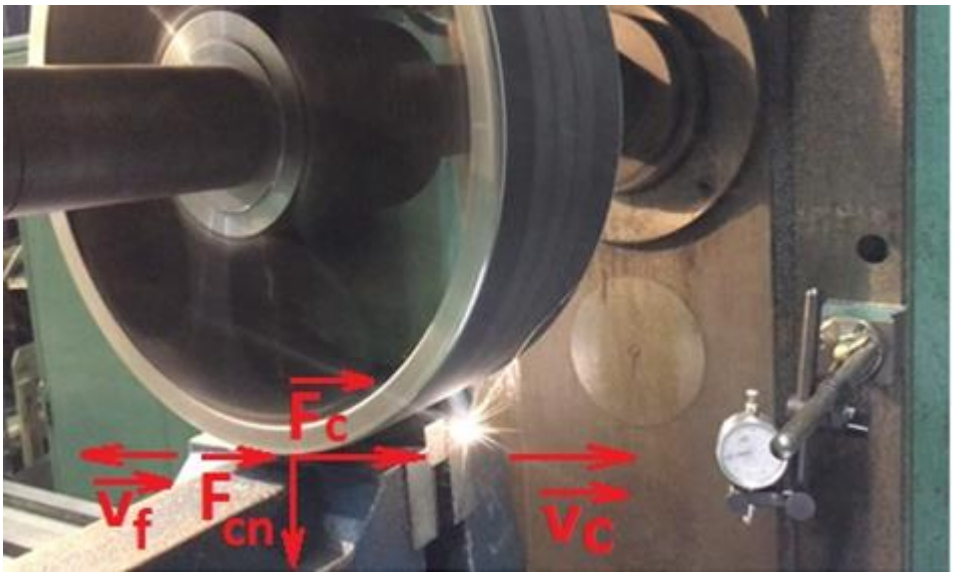
Tabulka 9: Řezné podmínky pro měření.

	Měření sil	**Měření drsnosti**
Řezná rychlost v_c [m/s]	7,62	7,62
Rychlost posuvu f [mm/min]	100	100
		125
Hloubka broušení a_p [mm]	0,1	0,1
	0,2	0,2
	0,3	0,3

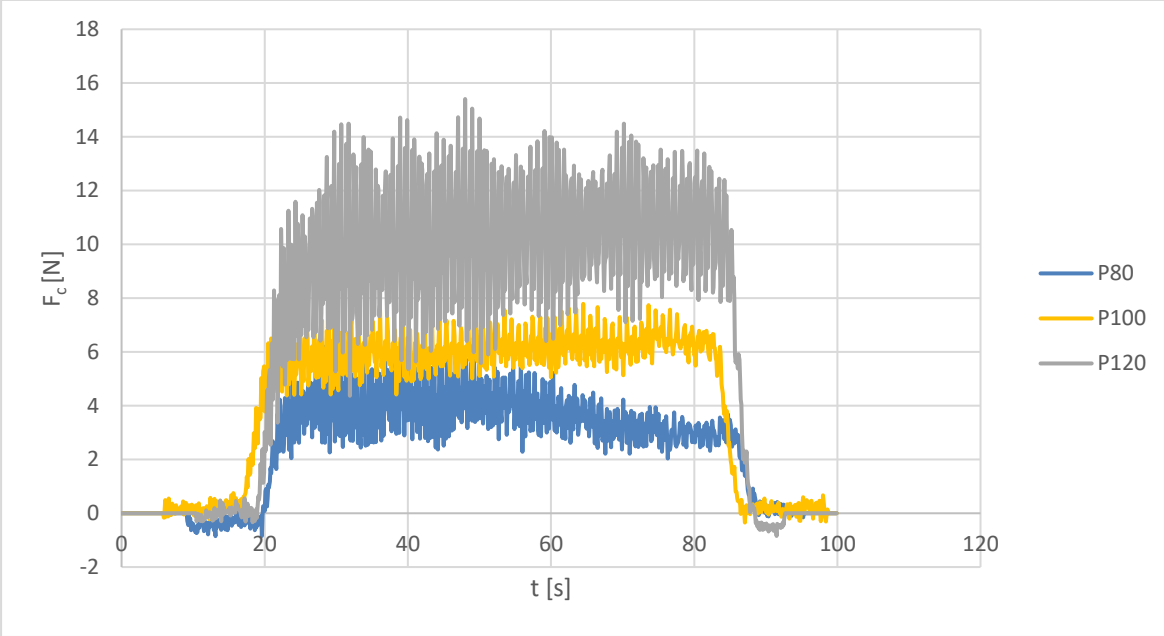
3.4 Měření sil při broušení

Při měření byly měřeny silové složky v osách x, y a z. Naznačení směru sil je možné vidět na obr. 24, kdy v ose x ve směru řezné rychlosti působí řezná síla F_c, v ose z ve směru do obrobku působí kolmá řezná síla F_{cn} a v ose y síla posuvová F_f, jejíž hodnota díky souměrnému obrobku a nulovému posuvu v ose y dosahuje hodnot kolem 0N, proto je možné ji zanedbat. Celková sílu F byla následně spočítána pomocí rovnice 2. Dále je na obr. 25–42 porovnávána řezná síla Fc, kolmá řezná síla F_{cn} a celková síla při obrábění F.

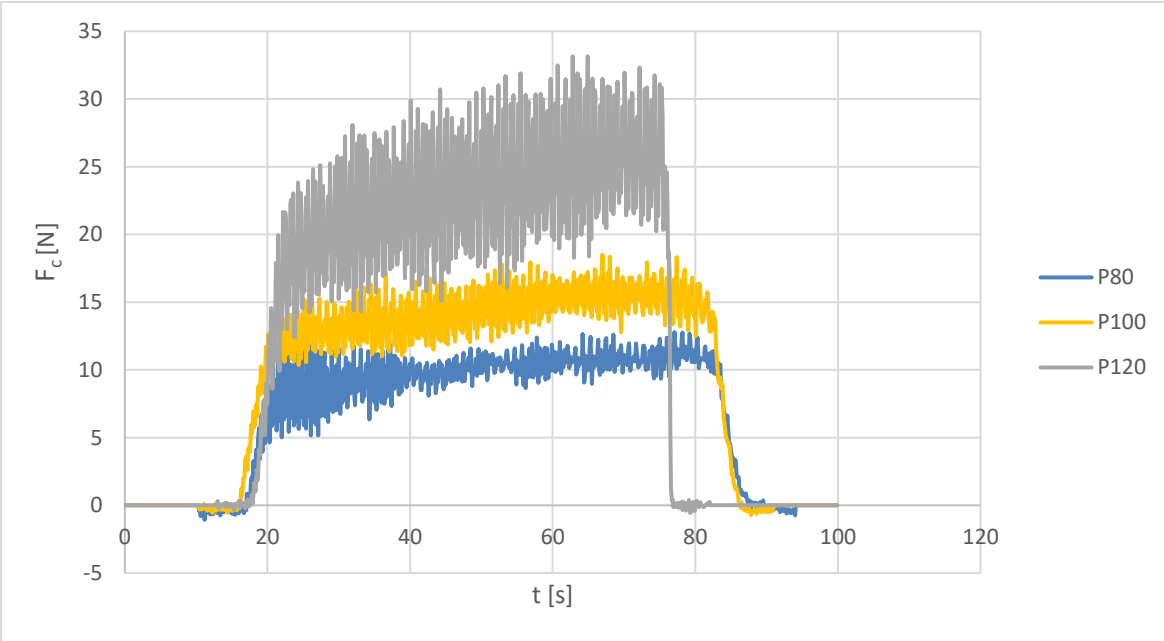
$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \tag{2}$$



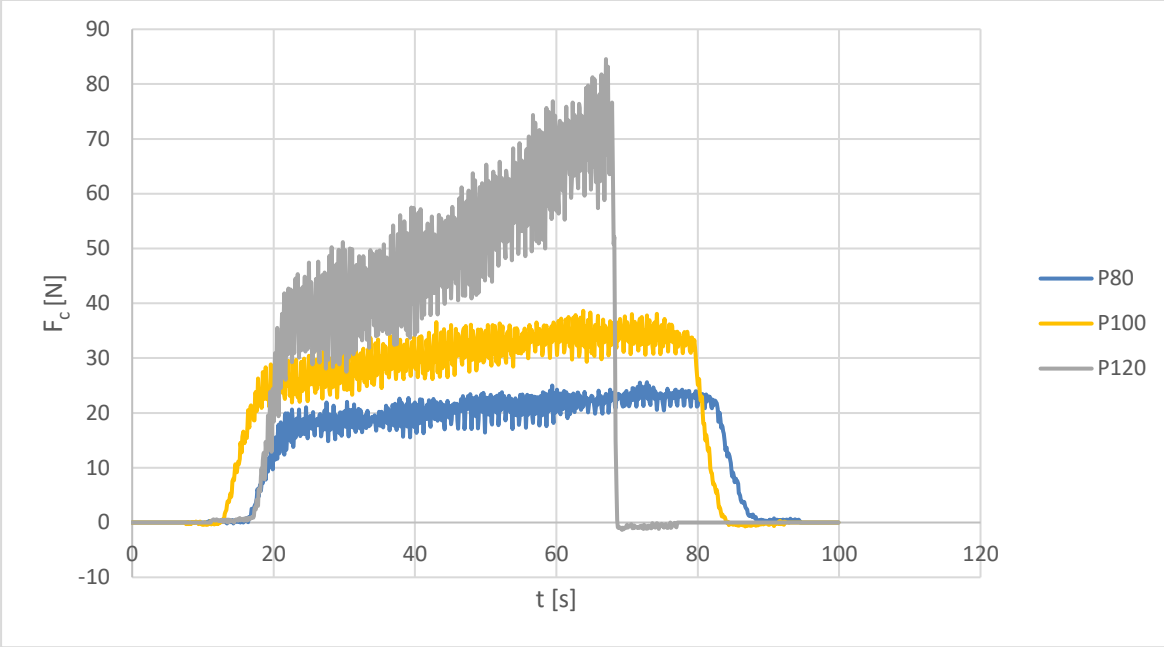
Obr. 24 Naznačení silového působení a rychlostí na stroji [45].



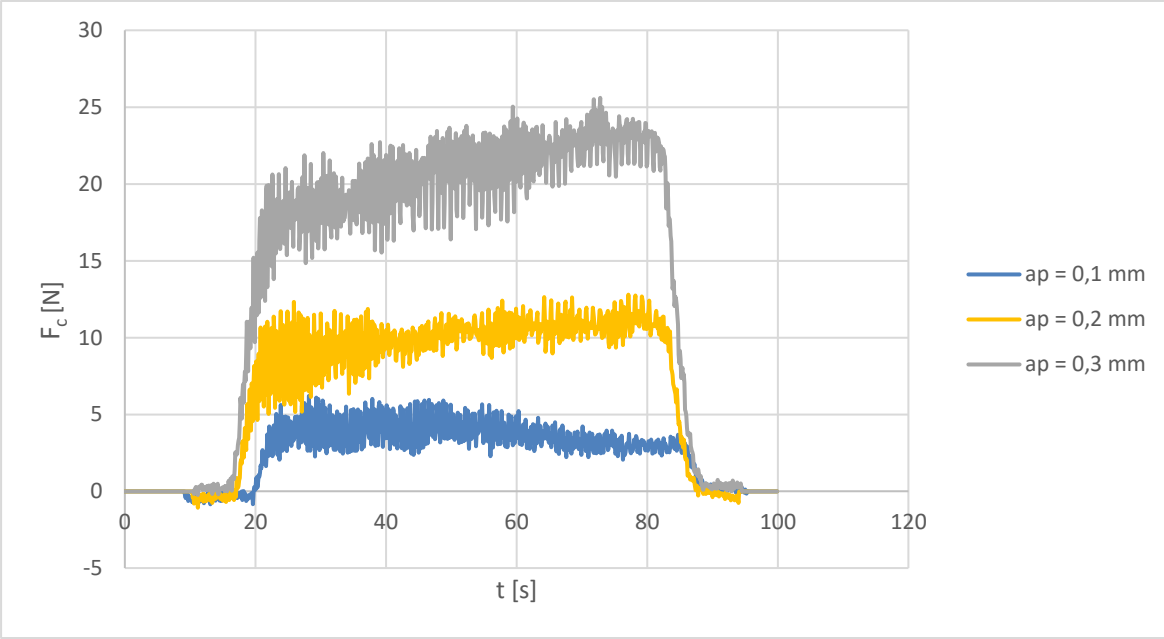
Obr. 25 Graf řezné síly při hloubce broušení a_p=0,1 mm.



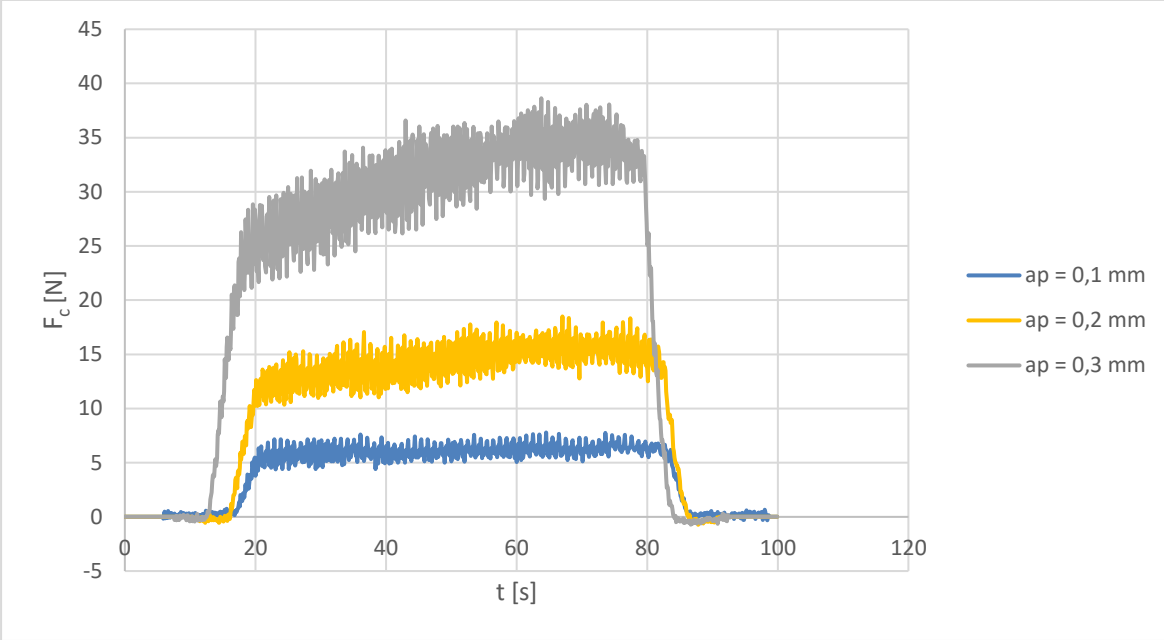
Obr. 26 Graf řezné síly při hloubce broušení a_p=0,2 mm.



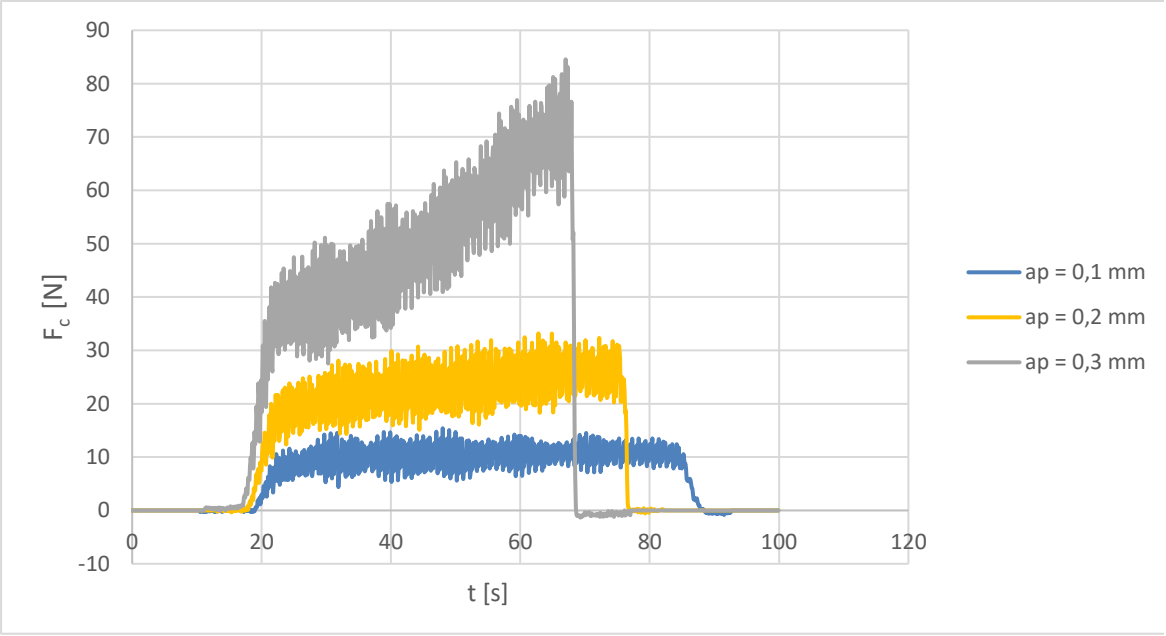
Obr. 27 Graf řezné síly při hloubce broušení ap=0,3 mm.



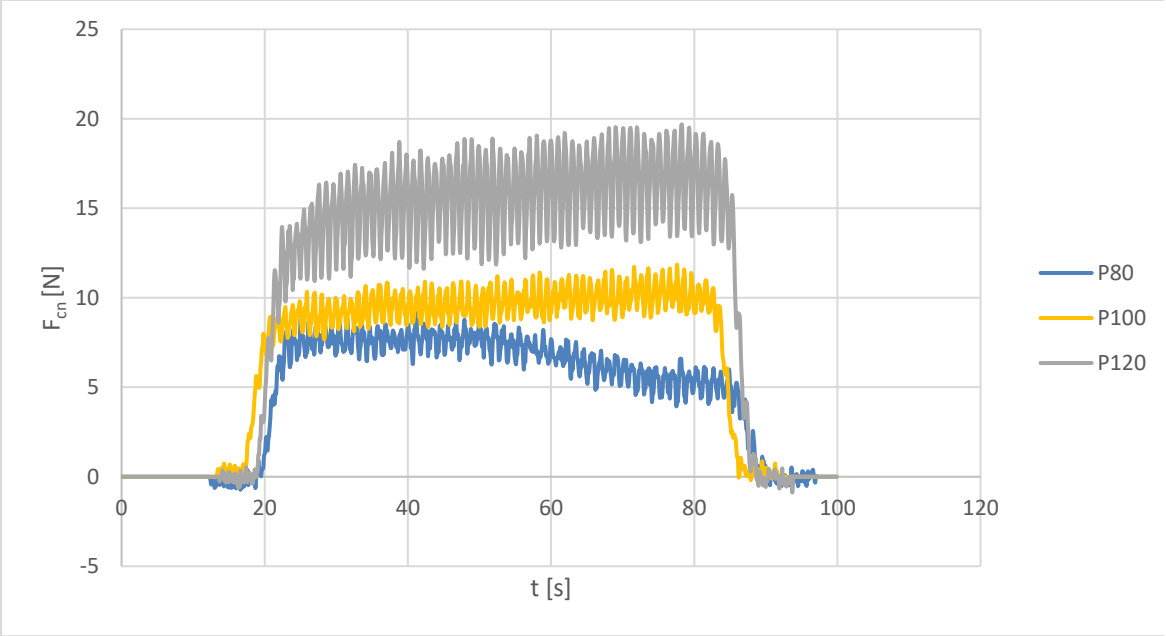
Obr. 28 Graf řezné síly při zrnitosti pásu P80.



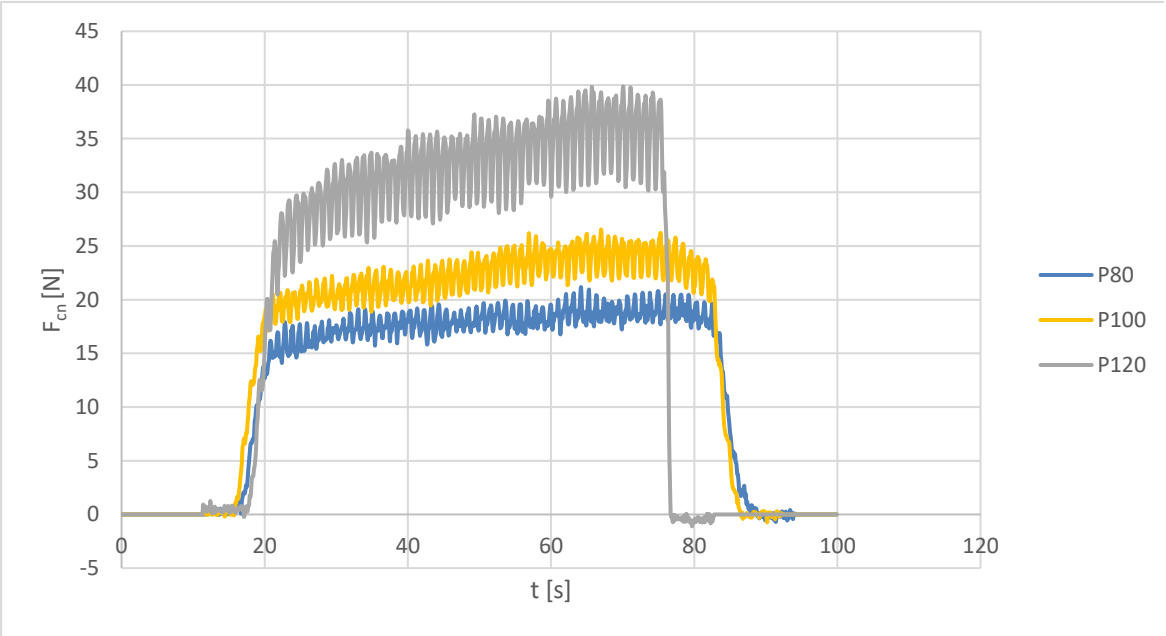
Obr. 29 Graf řezné síly při zrnitosti pásu P100.



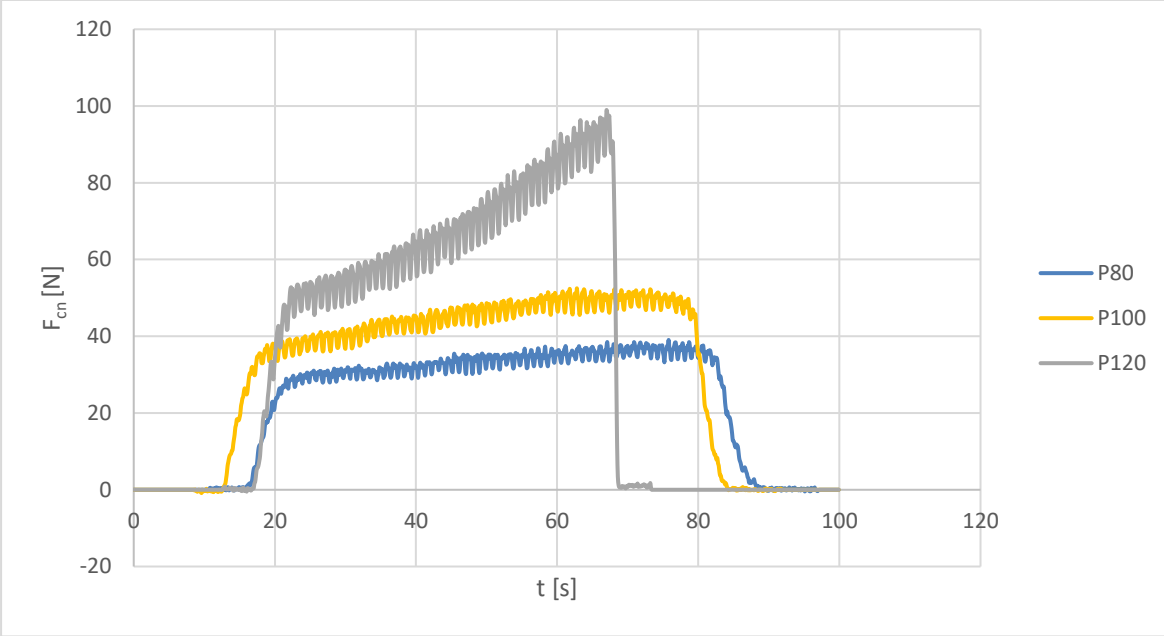
Obr. 30 Graf řezné síly při zrnitosti pásu P120.



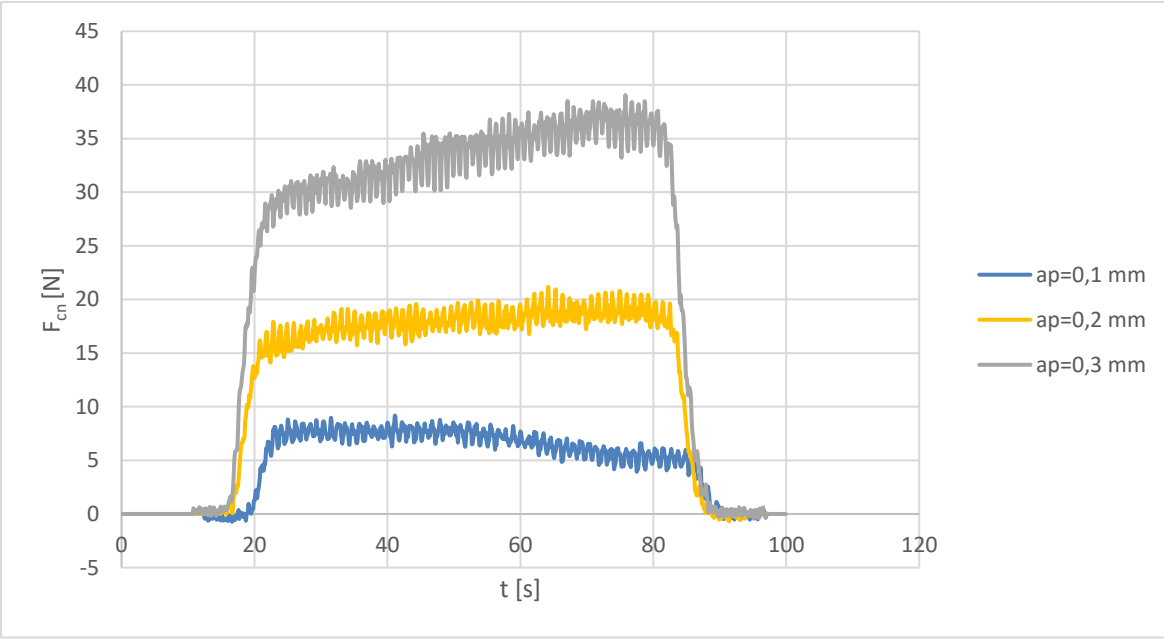
Obr. 31 Graf kolmé řezné síly při hloubce broušení ap = 0,1 mm.



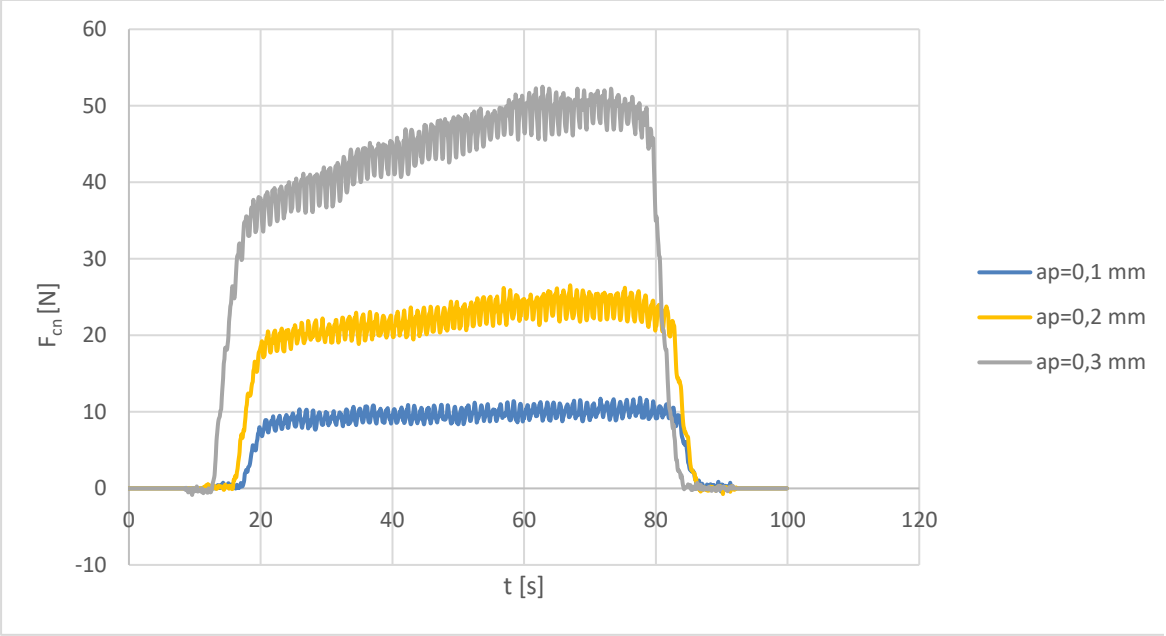
Obr. 32 Graf kolmé řezné síly při hloubce broušení ap = 0,2 mm.



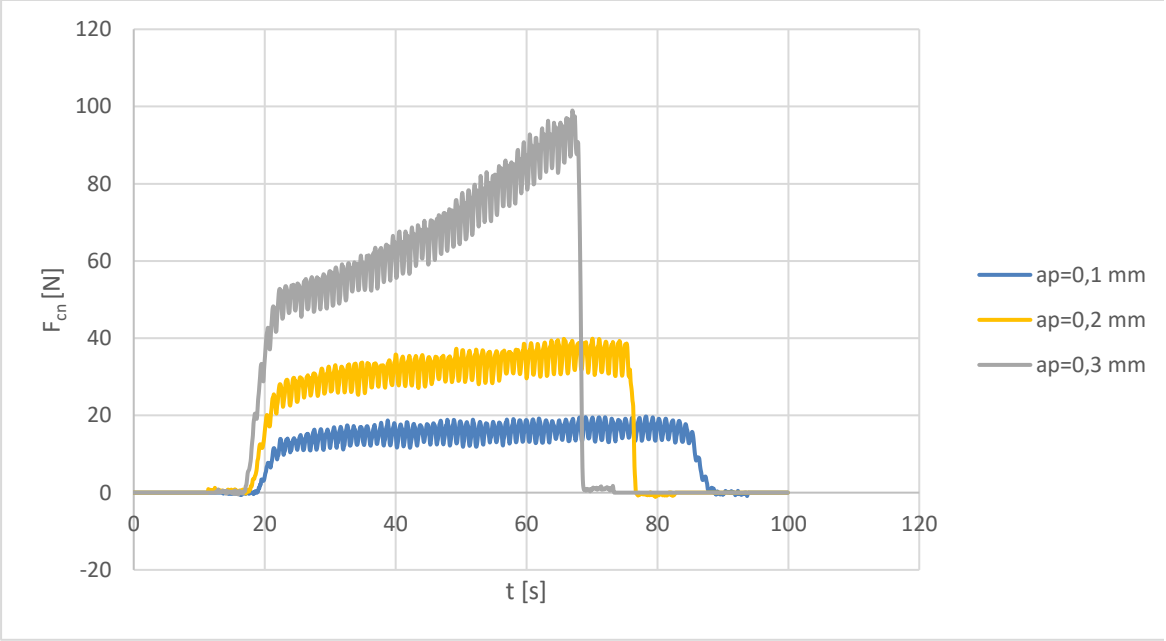
Obr. 33 Graf kolmé řezné síly při hloubce broušení ap = 0,3 mm.



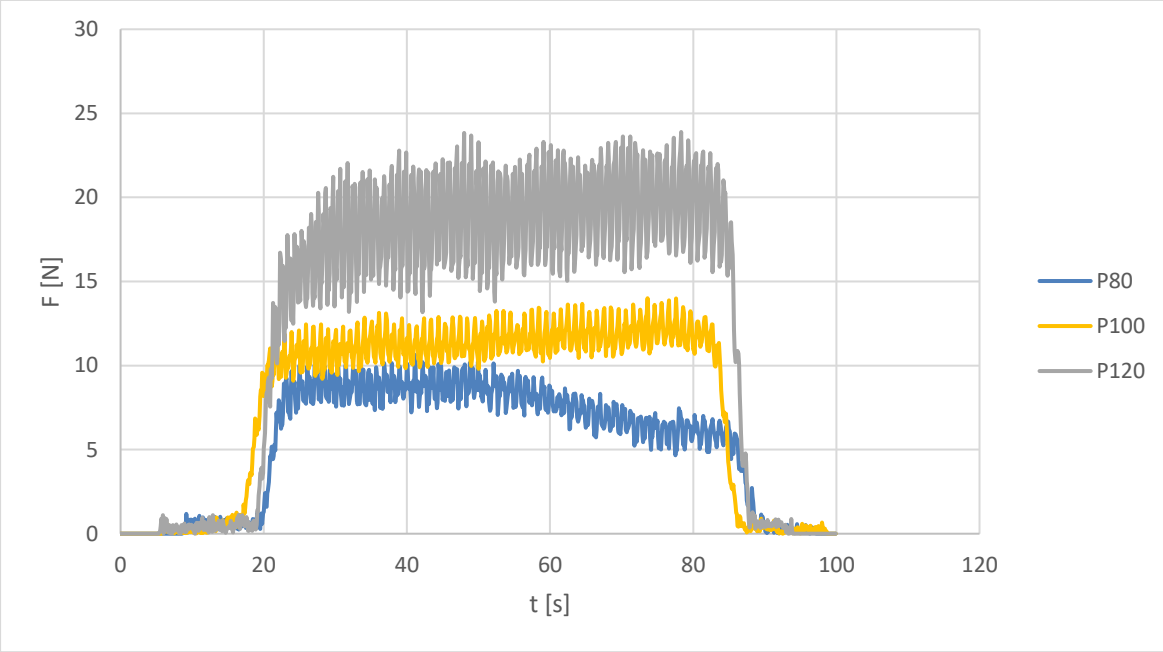
Obr. 34 Graf kolmé řezné síly při zrnitosti pásu P80.



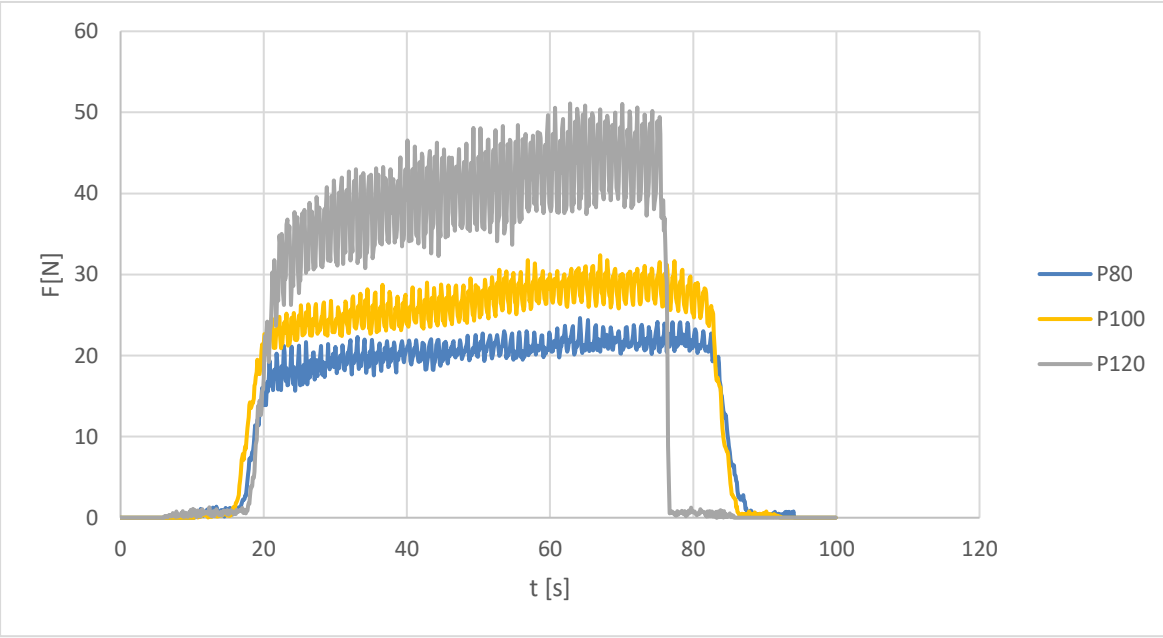
Obr. 35 Graf kolmé řezné síly při zrnitosti pásu P100.



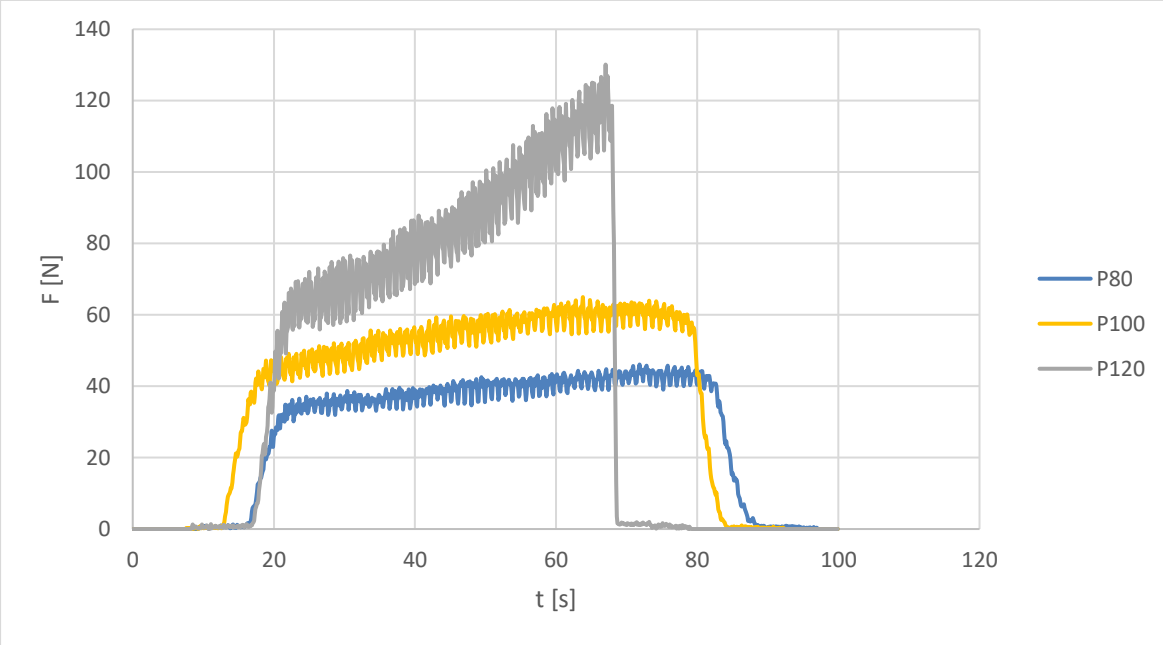
Obr. 36 Graf kolmé řezné síly při zrnitosti pásu P120.



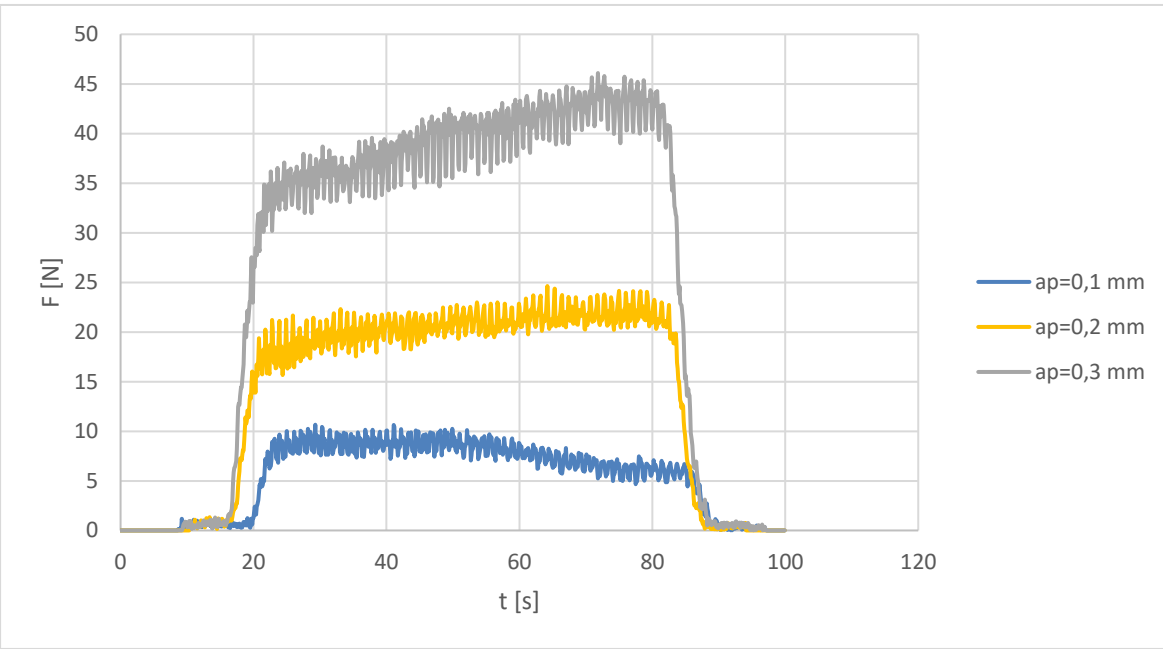
Obr. 37 Graf celkové síly při obrábění při hloubce broušení a_p=0,1 mm.



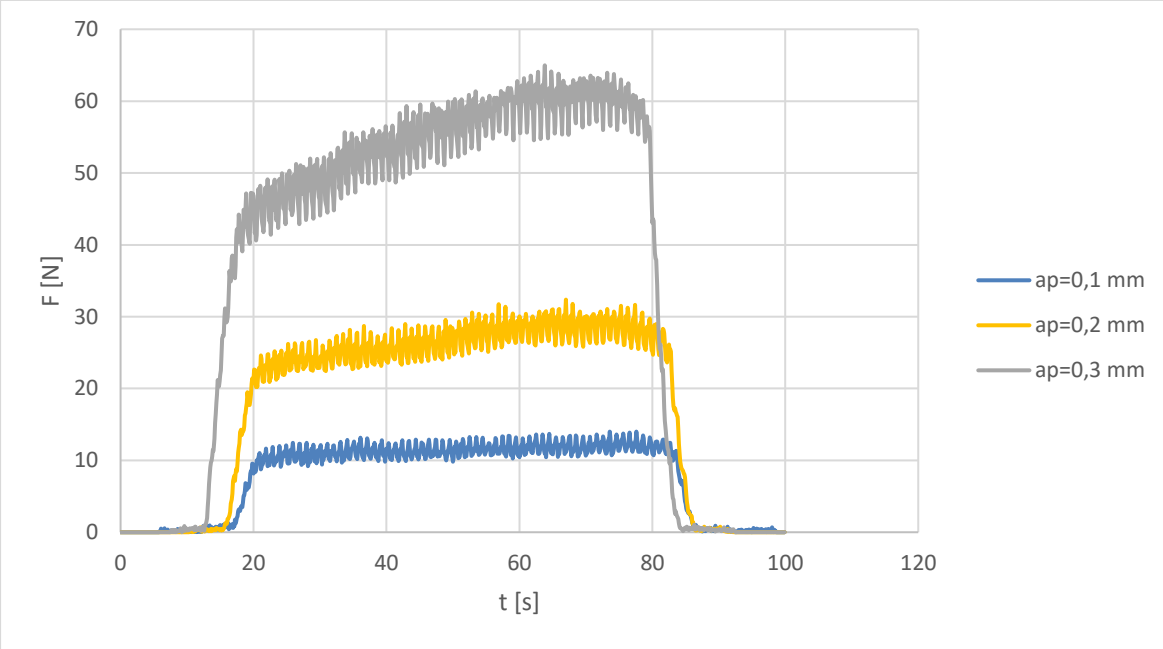
Obr. 38 Graf celkové síly při obrábění při hloubce broušení a_p=0,2 mm.



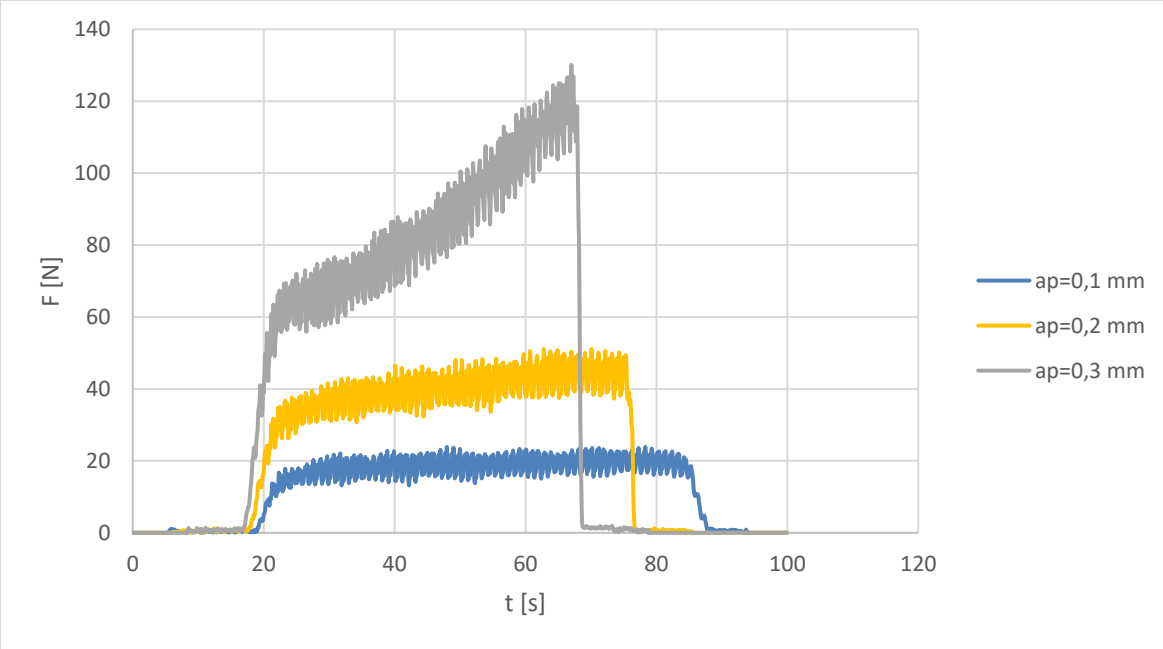
Obr. 39 Graf celkové síly při obrábění při hloubce broušení a_p=0,3 mm.



Obr. 40 Graf celkové síly při obrábění při zrnitosti pásu P80.



Obr. 41 Graf celkové síly při obrábění při zrnitosti pásu P100.



Obr. 42 Graf celkové síly při obrábění při zrnitosti pásu P120.

Při porovnání sil bylo zjištěno, že při hloubce broušení a_p = 0,3 mm a zrnitosti brusiva P120 dochází k exponenciálnímu nárůstu řezné síly Fc, kolmé pracovní síly F_{cn} i celkové řezné síly F. To znamená rychlé opotřebovávání pásu a snížení trvanlivosti. Při hloubce broušení a_p = 0,1 mm a a_p = 0,2 mm má síla spíše stabilní průběh. Při použití zrnitostí P80 a P100 u hloubek a_p = 0,1 mm a a_p = 0,2 mm se nenachází velký rozdíl ve velikosti sil. Největší síly byly zjištěny při použití velké hloubky řezu jako a_p = 0,3 mm a jemnější zrnitosti brusiva,

tedy P120. Při tomto broušení tedy dochází k rychlému opotřebení pásu a snižuje se jeho životnost. Nejmenších sil bylo dosaženo při použití pásu o zrnitosti P80 a nízké hloubce řezu a_p = 0,1 mm. Z grafů je znatelné že řezná síla F_c a kolmá řezná síla F_{cn} mají velmi podobnou charakteristiku růstu, kolmá řezná síla však vždy dosahuje větších hodnot.

3.5 Dosažená drsnost povrchu

Měření drsnosti bylo prováděno u třech hloubek broušení a dvou rychlostí posuvů. Pro každou možnost byly změřeny hodnoty Ra, Rq a Rz. Hodnoty Ra jsou zobrazeny v tabulce 10, hodnoty Rq v tabulce 11 a hodnoty Rz v tabulce 12.

Tabulka 10 Naměřené hodnoty Ra.

Ra [µm]	**P80**		**P100**		**P120**	
	v_f =100 mm/min	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**
a_p = 0,1 mm	7,446	3,791	4,414	3,512	4,414	3,512
a_p = 0,2 mm	4,223	3,284	3,468	3,846	3,468	3,846
a_p = 0,3 mm	4,174	3,142	3,731	5,427	3,731	5,427

Tabulka 11 Naměřené hodnoty Rq.

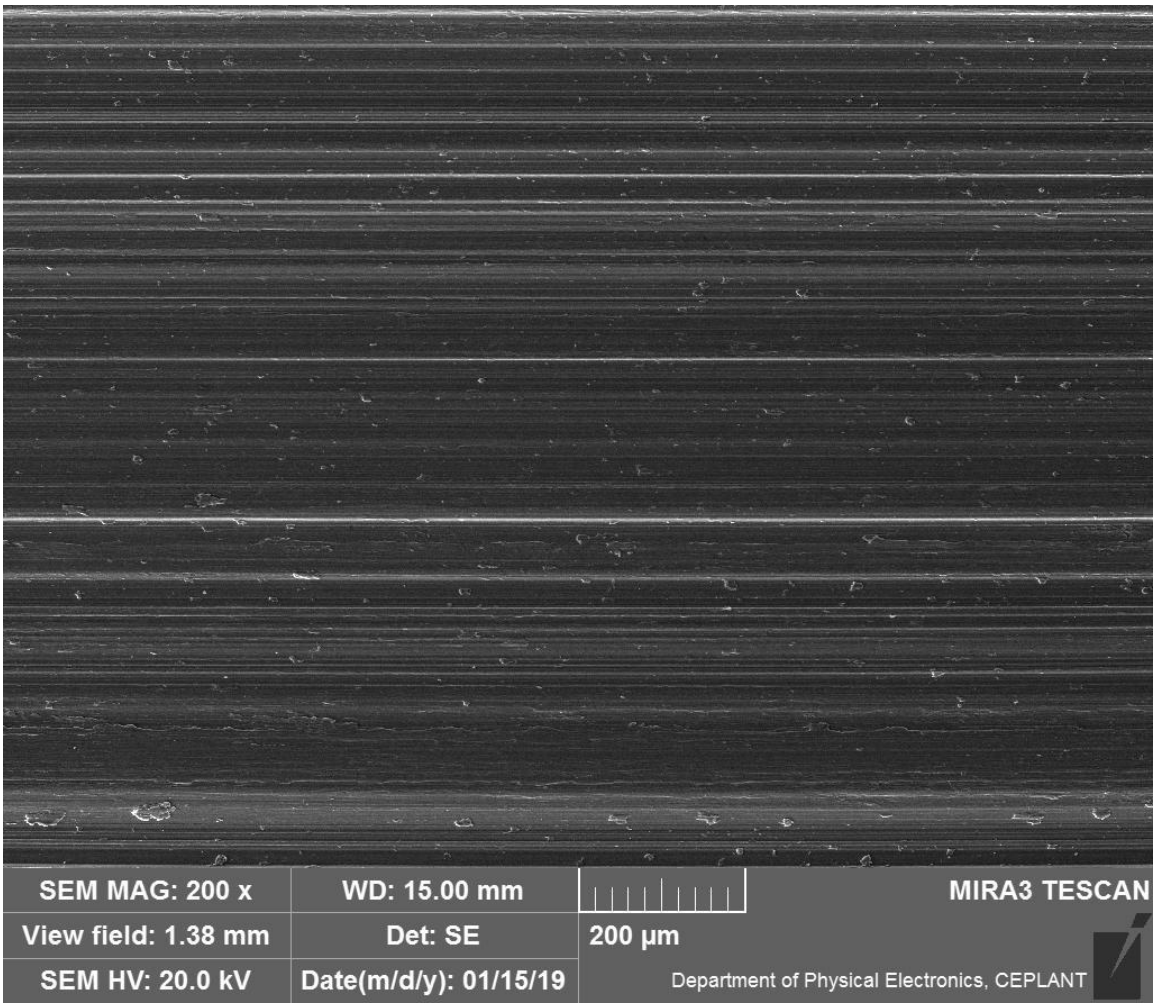
Rq [µm]	**P80**		**P100**		**P125**	
	v_f =100 mm/min	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**
a_p = 0,1 mm	9,687	4,617	5,394	4,298	5,394	4,298
a_p = 0,2 mm	5,741	4,114	4,445	4,928	4,445	4,928
a_p = 0,3 mm	5,097	4,022	4,673	6,372	4,673	6,372

Tabulka 12 Naměřené hodnoty Rz.

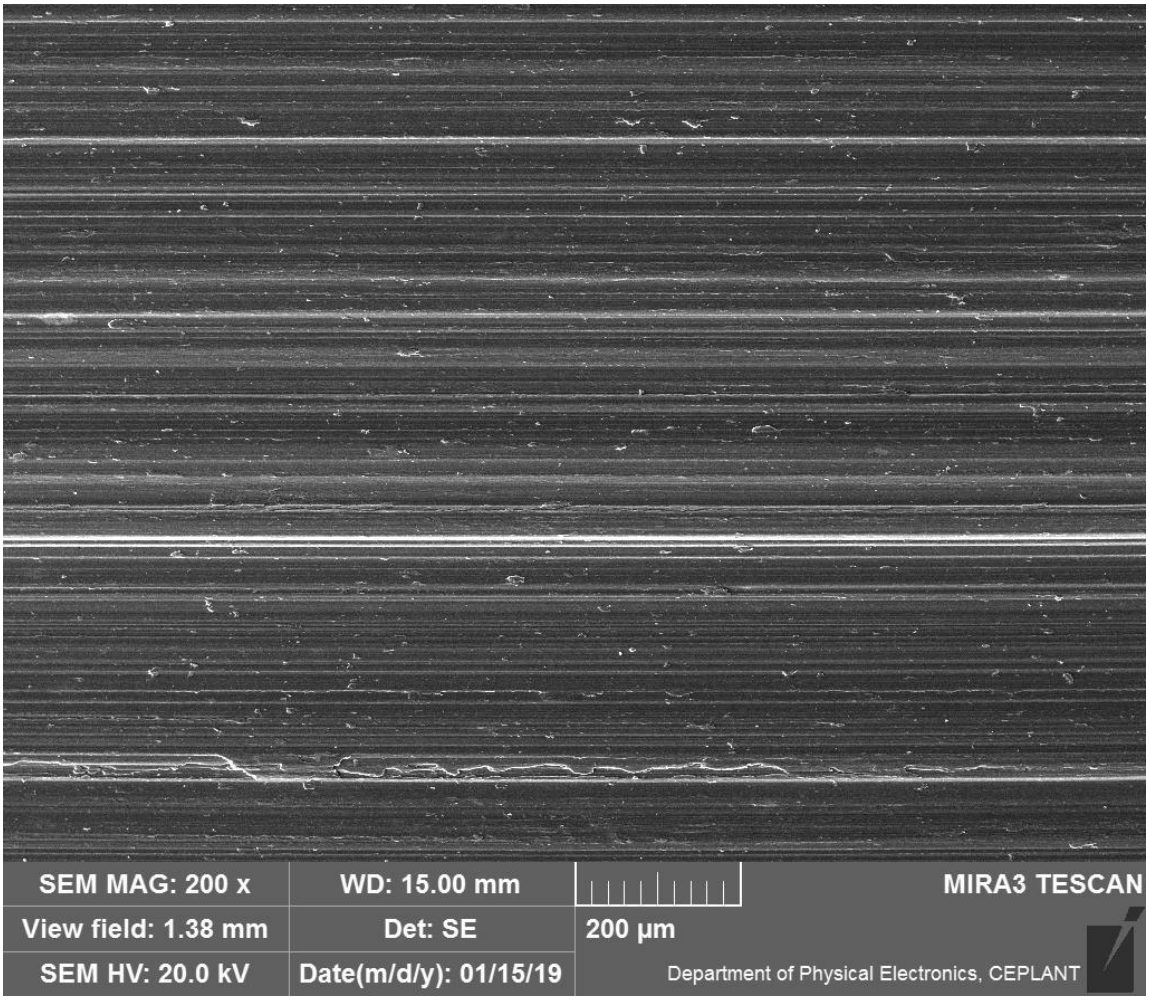
Rz [µm]	**P80**		**P100**		**P125**	
	v_f =100 mm/min	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**	**v_f =100 mm/min**	**v_f =125 mm/min**
a_p = 0,1 mm	48,492	21,503	25,388	19,971	25,388	19,971
a_p = 0,2 mm	29,836	19,146	21,657	25,939	21,657	25,939
a_p = 0,3 mm	23,395	17,452	23,18	27,638	23,18	27,638

Z naměřených kvalit povrchů je možné vidět, že nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo při použití brusného papíru se zrnitostí P80 a použití větší hodnoty rychlosti posuvu a větší hloubky broušení (a_p = 0,3 mm). Toto však platí pouze pro brusný papír s hrubou zrnitostí jako P80, pro jemnější papíry, jako jsou P100 nebo P120, pak lepšího

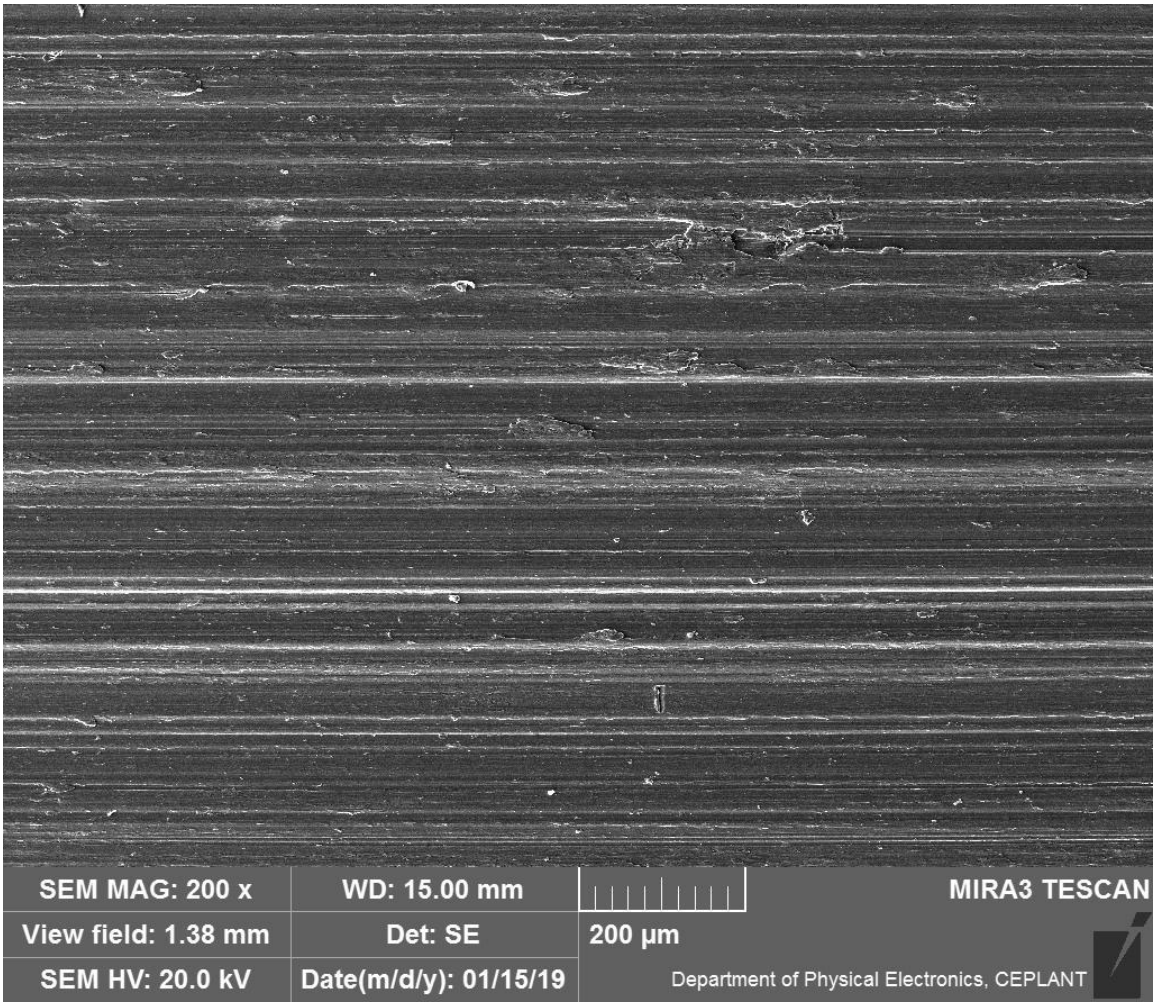
povrchu dosahujeme při použití menších hloubek broušení a menších rychlostí posuvu. Z naměřených dat lze rozpoznat, že papíry s hrubší zrnitostí (P80) dosahují lepšího povrchu při rychlejším odebírání materiálu, tedy větších hloubkách broušení a větší rychlosti posuvu, zatímco papíry s jemnější zrnitostí dosahují lepších výsledků při požití menších rychlostí posuvů a středních velikostí brousící hloubky. Na obr. 43–46 jsou vyobrazeny dosažené povrchy.



Obr. 43 Dosažený povrch Ra = 7,446 µm při použití P80 za řezných podmínek v_s=7,62 m/s, a_p = 0,1 mm, v_f = 100 mm/min [44].



Obr. 44 Dosažený povrch Ra = 4,414 µm při použití P100 za řezných podmínek v_s=7,62 m/s, a_p = 0,1 mm, v_f = 100 mm/min [44].



Obr. 45 Dosažený povrch Ra = 4,414 µm při použití P120 za řezných podmínek v_s = 7,62 m/s, a_p = 0,1 mm, v_f = 100 mm/min [44].

3.6 Výsledek experimentu

Při experimentu bylo porovnáváno broušení slitiny Ti-6Al-4V-ELI pomocí brusných papírů s řezným materiálem SiC v různých zrnitostech. Měřeny byly velikosti sil a dosažená kvalita povrchu, kdy bylo použité spektrum řezných podmínek, a nakonec bylo vyvozena nejlepší varianta.

U měření sil bylo zjištěno, že celková síla při obrábění F při použití brousicí hloubky a_p = 0,3 mm a jemné zrnitosti papíru roste s časem exponenciálně a pás se tedy při této hloubce broušení rychle opotřebovává. Nejmenších velikostí sil dosahuje papír s hrubou zrnitostí P80, u brousicí hloubky a_p = 0,2 mm se však velikosti sil pro papíry se zrnitostí P80 a P100 dostávají na podobné hodnoty, toto je možné vidět na obr. 39. U papíru se zrnitostí P100 a hloubky broušení a_p = 0,2 mm je vidět, že při začátku broušení celková síla při obrábění dosahuje hodnoty 22N, když celá pracovní plocha brousicího kotouče je v materiálu. Velikost síly v poslední moment, kdy se celá pracovní plocha brousícího kotouče nachází na obrobku, dosahuje 32N, což naznačuje, že růst této síly v čase není tak

znatelný jako u použití větší hloubky broušení (a_p = 0,3 mm), kdy velikost této síly v první moment dosahuje hodnot kolem 40 N, a v druhý moment hodnot kolem 60N, zde je nárůst již více znatelný.

Při porovnávání kvality dosaženého povrchu je možné vidět, že nejlepšího povrchu bylo dosaženo při použití hrubého papíru P80, hloubky broušení a_p = 0,3 mm a rychlosti posuvu v_f = 125 mm/min, kdy byla hodnota Ra = 3,142 μm. Pro papíry se zrnitostí P100 a P120 byl nejlepší povrch dosažen při a_p = 0,2 mm a v_f = 100 mm/min, kdy byla dosažena hodnota Ra = 3,468 μm pro obě zrnitosti.

Pokud vezmeme v potaz obě tato kritéria, nejlepší podmínky pro broušení titanové slitiny Ti-6Al-4V-ELI z námi testových možností je použití papíru se zrnitostí P80 při řezných podmínkách a_p = 0,2 mm a v_f = 125 mm/min, společně s papírem se zrnitostí P100 při řezných podmínkách a_p = 0,2 mm a v_f =100 mm/min. Při těchto podmínkách bylo dosaženo nejlepší kvality povrchu a velikostí celkové síly při obrábění. Z této síly se pak dále odvíjí životnost brusného pásu. Nejlepšího povrchu se dosáhlo při použití P80 při řezných podmínkách a_p = 0,3 mm a v_f = 125 mm/min, zde už však celková řezná síla při obrábění dosahuje vysokých hodnot a brusný pás má tedy nižší životnost.

Naměřené hodnoty je možné porovnat s hodnotami z teoretické části v kapitole 2.1.3 Technologie MQL s použitím nanočástic. V tomto experimentu byl porovnáván dosažený povrch s různými způsoby mazání za použití brousicího kotouče s brusným materiálem ze zeleného karbidu křemíku. Porovnání dosažené kvality povrchu z teoretické části a z praktické části je zobrazeno v tabulce 13, kde jsou zobrazeny řezné podmínky, při kterých bylo těchto povrchů dosaženo.

Tabulka 13 Porovnání dosažené kvality povrchu s teoretickou hodnotou.

	Hodnota z teoretické části	**Hodnota z praktické části**
v_c [m/s]	32	7,62
v_f [mm/min]	6800	100
a_p [mm]	0,01	0,3
Brusný materiál	SiC (49C)	SiC
Zrnitost	60	P80
Způsob mazání	Bez mazání	Bez mazání
Dosažená Ra [μm]	**0,6**	**3,146**

Z tabulky je znatelné, že v praktické části nebylo dosaženo tak kvalitního povrchu jako v teoretických výzkumech. V teoretické části byly zároveň zvolené řezné podmínky ideálnější pro práci keramického brusného materiálu. Dalším faktorem dosažení kvalitnějšího povrchu je použití brousicího kotouče, který je výhodnější pro použití

na rovinné plochy. V praktické části byly použity brusné pásy z důvodu plánovaného broušení tvarových ploch kloubních implantátů, kde je nutné obtékání kulových ploch. Vzhledem k broušení zdravotních implantátů, nemohlo být použito olejové mazaní. Došlo by ke kontaminaci implantátu, což by znemožnilo jeho aplikaci do lidského těla. Vyšší rychlosti nemohly být v praktické části zvoleny z důvodu, že broušení tvarových komponent bude uskutečňováno ručně. Je tedy nutné dbát na bezpečnost obsluhy.

ZÁVĚR

Titanové slitiny se v dnešní době stávají stále populárnější v mnoha odvětvích, a to především díky jejich dobrým vlastnostem, kterými disponují, a které dovolují jejich široké použití. Z toho důvodu jsou stále větší nároky na zpracování a obrábění těchto slitin. Z teoretického rozboru i praktických experimentů vyplynulo:

- Při broušení titanových slitin se stále častěji používá brousicích kotoučů s brusným materiálem, jako je CBN nebo PCD, kdy tyto nástroje při zkouškách dosahovaly dobrého povrchu i vysoké životnosti za velmi vysokou cenu.
- Velkou roli při broušení hraje chlazení a použití řezné kapaliny. Kapalina zlepšuje samoostření pásů a snižuje velikost sil při broušení. Brusné nástroje tedy dosahují vyšší životnosti a obrobený povrch vykazuje lepší kvalitu povrchu.
- V praktické části byly porovnávány tři druhy brusných pásů, každý s rozdílnou zrnitostí. Tyto pásy byly porovnávány za různých řezných podmínek. Z těchto testů vyplynulo, že při broušení titanu lze dosáhnout lepších výsledků se středně hrubým papírem (P100) za použití středních hodnot brousicí hloubky, jako a_p = 0,2 mm. Hrubší papír zároveň pracuje lépe při vyšších hodnotách rychlosti posuvu, zatímco jemnější papíry dosahují lepších výsledků při použití menších rychlostí posuvu.
- Při měření bylo zjištěno, že nebylo dosaženo tak kvalitního povrchu, jak bylo očekáváno v teoretické části. To je způsobeno neideální volbou řezných podmínek, a především absencí řezné kapaliny.

V návaznosti na tuto práci by bylo možné dále posoudit vliv řezné kapaliny na kvalitu obrobeného povrchu, případně použití brusných pásů s jiným brusným materiálem jako např. CBN a PCD. Správné použití těchto materiálů u brusných pásů by napomohlo k rozšíření broušení i u tvarově složitějších dílců z titanových slitin.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LEYENS, Christoph a M. (Manfred) PETERS. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, xix, 513 s. : il., grafy. ISBN 3-527-30534-3.
2. SEDLÁČEK, Vladimír. *Titan a jeho slitiny*. Praha: ANTL, 1963, 206 s.
3. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Titan (prvek)* [online]. c2021 [citováno 7. 02. 2021]. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Titan_(prvek)&oldid=19435788>
4. *Periodická Tabulka: Titan* [online]. [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: http://www.prvky.com/22.html
5. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
6. *Azo Materials: Titanium Alloys - Alpha, Beta and Alpha-Beta Alloys* [online]. 2001 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=915&fbclid=IwAR0PXgIFVMBJg66n1frve7eHlZ3ndrAA_ROcMIkxOxSkF44YoN97qNKhA0E
7. P. MOURITZ, Adrian. *Introduction to Aerospace Materials*. 80 High Street, Sawston, Cambridge CB22 3HJ, UK: Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85703-515-2.
8. BOYER, R.R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 1996, **213**(1), 103-114 [cit. 2021-03-04]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/0921-5093(96)10233-1
9. RATNER, Buddy D. *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine*. 2nd ed. 2004. ISBN 9780080470368.
10. WANG, Kathy. The use of titanium for medical applications in the USA. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 1996, **213**(1-2), 134-137 [cit. 2021-03-16]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/0921-5093(96)10243-4
11. *MED DEVICE ONLINE: Abiomed Receives HDE Supplement Approval For AbioCor Artificial Heart* [online]. Abiomed, 2008 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://www.meddeviceonline.com/doc/abiomed-receives-hde-supplement-approval-for-0001
12. ALIPAL, J., N.A.S. MOHD PU'AD, N.H.M. NAYAN, N. SAHARI, H.Z. ABDULLAH, M.I. IDRIS a T.C. LEE. An updated review on surface functionalisation of titanium and its alloys for implants applications. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021 [cit. 2021-03-16]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.01.499

13. Česká Televize: Belgičtí lékaři voperovali titanovou čelist na míru. *Česká televize* [online]. Praha: Česká televize, 2012, 4.3.2012 [cit. 2021-03-16]. Dostupné z: https://ct24.ceskatelevize.cz/svet/1187762-belgicti-lekari-voperovali-titanovou-celist-na-miru

14. KURUP, Alekh, Pankaj DHATRAK a Neha KHASNIS. Surface modification techniques of titanium and titanium alloys for biomedical dental applications: A review. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **39**, 84-90 [cit. 2021-03-16]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.06.163

15. FALLER, K. a F. H. (SAM) FROES. The use of titanium in family automobiles: Current trends. *JOM* [online]. 2001, **53**(4), 27-28 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-001-0143-3

16. EZUGWU, E.O. a Z.M. WANG. Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 1997, **68**(3), 262-274 [cit. 2021-03-20]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(96)00030-1

17. MAHATA, Sirsendu, Manish MUKHOPADHYAY, Arnab KUNDU, Ayan BANERJEE, Bijoy MANDAL a Santanu DAS. Grinding titanium alloys applying small quantity lubrication. *SN Applied Sciences* [online]. 2020, **2**(5) [cit. 2021-03-20]. ISSN 2523-3963. Dostupné z: doi:10.1007/s42452-020-2792-2

18. TEICHER, U., K. KÜNANZ, A. GHOSH a A. B. CHATTOPADHYAY. Performance of Diamond and CBN Single-Layered Grinding Wheels in Grinding Titanium. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2008, **23**(3), 224-227 [cit. 2021-03-20]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426910701860541

19. KARÁSEK, J. Obrábění titanových slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 80 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.

20. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Zbytková napětí* [online]. c2019 [citováno 26. 03. 2021]. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zbytkov%C3%A1_nap%C4%9Bt%C3%AD&oldid=16838172>

21. KAHLES, J. F., M. FIELD, D. EYLON a F. H. FROES. Machining of Titanium Alloys. *JOM* [online]. 1985, **37**(4), 27-35 [cit. 2021-03-26]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/BF03259441

22. HOOD, Richard. *The Machinability of a Gamma Titanium Aluminide Intermetallic*. Birmingham, 2010. A thesis for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY

23. SADEGHI, M. H., M. J. HADDAD, T. TAWAKOLI a M. EMAMI. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing*

Technology [online]. 2009, **44**(5-6), 487-500 [cit. 2021-03-26]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-008-1857-y

24. Evolution Technolgy magazine from SKF: Mazání minimálním množstvím maziva nižší náklady a vyšší životnost. *Evolution Technolgy magazine from SKF: Mazání minimálním množstvím maziva nižší náklady a vyšší životnost* [online]. Evolution Technolgy magazine from SKF, 2017, 30. Října 2017 [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: https://evolution.skf.com/cs/mazani-minimalnim-mnozstvim-maziva-nizsi-celkove-naklady-vyssi-ziskovost/

25. SETTI, Dinesh, Manoj Kumar SINHA, Sudarsan GHOSH a P. VENKATESWARA RAO. Performance evaluation of Ti–6Al–4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2015, **88**, 237-248 [cit. 2021-03-27]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.10.005

26. SINGH, Harpinder, Vishal S. SHARMA, Sarabjit SINGH a Manu DOGRA. Nanofluids assisted environmental friendly lubricating strategies for the surface grinding of titanium alloy: Ti6Al4V-ELI. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2019, **39**, 241-249 [cit. 2021-03-27]. ISSN 15266125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2019.02.004

27. ŠTAJNOCHR, Lubomír. *Broušení nástrojů*. Praha: Grada, 2000. Profi & hobby. ISBN isbn80-7169-809-1.

28. HUMÁR, Antoním. *Technologie 1: Technologie obrábění – 1. část*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003.

29. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN isbn80-214-1996-2.

30. GOSTIMIROVIC, Marin, Dragan RODIC, Pavel KOVAČ, Nenad KULONŽIC a Disan. Journal of Production Engineering: INVESTIGATION OF THE CUTTING FORCES IN CREEP-FEED SURFACE GRINDING PROCES. *: INVESTIGATION OF THE CUTTING FORCES IN CREEP-FEED SURFACE GRINDING PROCES*. Original Scientific Paper, 2015, **2015**(Vol. 18 (2), 21 – 24.

31. WHITE PAPER: UNDERSTANDING FORCES IN CREEPFEED GRINDING FOR REDUCING COSTS AND IMPROVING CONSISTENCY. *MSC Direct: MetalWorking* [online]. MSC Direct, 2020, 02. 04.2020 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://www.mscdirect.com/betterMRO/metalworking/white-paper-understanding-forces-creepfeed-grinding-reducing-costs-and-improving

32. ZOYA, Z.A a R KRISHNAMURTHY. The performance of CBN tools in the machining of titanium alloys. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2000, **100**(1-3), 80-86 [cit. 2021-03-21]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(99)00464-1

33. DANFORD, Matt. Modern Machine Shop: Why Binderless CBN Inserts Turn Titanium Faster. *Modern Machine Shop: Why Binderless CBN Inserts Turn Titanium Faster* [online]. Modern Machine Shop, 2021, 9.1.2021 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://www.mmsonline.com/articles/why-binderless-cbn-inserts-turn-titanium-faster

34. BULUT, Berrak, Oguzhan GUNDUZ, Murat BAYDOGAN a Eyup Sabri KAYALI. Determination of matrix composition for diamond cutting tools according to the hardness and abrasivity properties of rocks to be cut. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2021, **95** [cit. 2021-03-21]. ISSN 02634368. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijrmhm.2020.105466

35. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. : il. (převážně barev.) ; 26 cm. ISBN 978-80-254-2250-2.

36. TEICHER, U., K. KÜNANZ, A. GHOSH a A. B. CHATTOPADHYAY. Performance of Diamond and CBN Single-Layered Grinding Wheels in Grinding Titanium. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 2008, **23**(3), 224-227 [cit. 2021-03-21]. ISSN 1042-6914. Dostupné z: doi:10.1080/10426910701860541

37. GUO, Guoqiang, Zhiqiang LIU, Qinglong AN a Ming CHEN. Experimental investigation on conventional grinding of Ti-6Al-4V using SiC abrasive. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2011, **57**(1-4), 135-142 [cit. 2021-03-28]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-011-3272-z

38. DE MELLO, AntonioVitor, Rosemar Batista DE SILVA, Álisson Rocha MACHADO, Rogério Valentim GELAMO, Anselmo Eduardo DINIZ a Rodolfo Fischer Moreira DE OLIVEIRA. Surface Grinding of Ti-6Al-4V Alloy with SiC Abrasive Wheel at Various Cutting Conditions. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017, **10**, 590-600 [cit. 2021-5-5]. ISSN 23519789. Dostupné z: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.057

39. Brousící nástroje. *Brousící nástroje* [online]. Olomouc: Elektronická učebnice [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1250

40. Brousící nástroje: Charakteristika brousících nástrojů. *Brousící nástroje: Charakteristika brousících nástrojů* [online]. Olomouc [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1251

41. Brousící nástroje: Druhy brusiva. *Brousící nástroje: Druhy brusiva* [online]. Elektronická učebnice [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1252

42. Brousící nástroje: Pojivo. *Brousící nástroje: Pojivo* [online]. Olomouc: Elektronická učebnice [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1253

43. Sibera-kotouce.cz: CO JE ZRNITOST. *Sibera-kotouce.cz: CO JE ZRNITOST* [online]. sibera-kotouce.cz [cit. 2021-03-28]. Dostupné z:

https://www.sibera-kotouce.cz/co-je-zrnitost-a13?fbclid=IwAR0pYzHfg1QzQ-dMnyXUZMo-fXZRAJMOuyLwQQbqT7y72akWzwZ-MxlOEO0

44. Brousící nástroje: Tvrdost brusných kotoučů. *Brousící nástroje: Tvrdost brusných kotoučů* [online]. Olomouc: Elektronická učebnice [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1255

45. Vysoké Učení Technické v Brně, prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
Al	**[-]**	Hliník
B	**[-]**	Bór
B4C	**[-]**	Karbid bóru
BeO	**[-]**	Oxid berylnatý
BuRTi	**[-]**	Titanová slitina odolná proti hoření
CBN	**[-]**	Kubický nitrid bóru
CNTs	**[-]**	Uhlíkové nanotrubice
ELI	**[-]**	Snížené množství intersticiálních vad
F	**[N]**	Celková síla při obrábění
F_c	**[N]**	Řezná síla
F_{cn}	**[N]**	Kolmá řezná síla
$F_{deformace}$	**[N]**	Síla při broušení vytvořená deformací materiálu
$F_{tření}$	**[N]**	Síla při broušení vytvořená třením brousicího nástroje po obrobku
F_x	**[N]**	Měřená síla v ose x
F_y	**[N]**	Měřená síla v ose y
F_z	**[N]**	Měřená síla v ose z
MgO	**[-]**	Oxid hořečnatý
MoS_2	**[-]**	Sulfid Molybdeničitý
MQL	**[-]**	Lubrikace s minimálním množstvím kapaliny
MWF	**[-]**	Řezná kapalina
PCD	**[-]**	Polykrystalický diamant
R_a	[μm]	Střední aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μm]	Střední kvadratická hodnota drsnosti
Rz	[μm]	Největší výška profilu
Si	[-]	Křemík
SiC	[-]	Karbid křemíky
SiO_2	[-]	Oxid křemičitý

ThO_2	[-]	Oxid thoričitý
Ti	[-]	Titan
Ti-6Al-4V	[-]	Titanová slitina
UO_2	[-]	Oxid uraničitý
ZrO_2	[-]	Oxidová keramika – oxid zirkoničitý
a_p	[mm]	Hloubka broušení
d_w	[mm]	Průměr brusného kotouče
$f_{břit}$	[mm/břit]	Posuv na 1 břit
l	[mm]	Broušená délka obrobku
l_c	[mm]	Šířka záběru brusného kotouče
n	[min^{-1}]	Otáčky
t	[mm]	Tloušťka materiálu
v_c	[$m.min^{-1}$]	Řezná rychlost
v_f	[mm/min]	Rychlost posuvu
α	[°]	Úhel hřbetu
β	[°]	Úhel břitu
γ	[°]	Úhel čela
α-Al_2O_3	[-]	Oxid hlinitý
α+β slitiny	[-]	Struktura tvořená směsí tuhého roztoku α a tuhého roztoku β
α-slitiny	[-]	Struktura tvořená homogenním roztokem α
α-stabilizátory	[-]	Prvky stabilizující a rozšiřující oblast α
β-slitiny	[-]	Struktura tvořená homogenním tuhým roztokem β
β-stabilizátory	[-]	Prvky stabilizující a rozšiřující oblast β