



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

PRODUKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH SLITIN

PRODUCTIVE MACHINING OF TITANIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LIBOR ČEJKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV PÍŠKA, CSc.

BRNO 2013

Místo tohoto listu bude vloženo zadání (oboustranně). Zadání musí být vevázáno v obou vyhotoveních práce. Do druhého výtisku bude vložena kopie.

Tento list není třeba tisknut!

ABSTRAKT

Cílem této práce je analyzovat výrobní náklady a optimalizovat řezné podmínky pro vysokoposuvové čelní frézování titanové slitiny Ti6Al4V. V průběhu experimentu byly měněny řezné podmínky, a to konkrétně řezná rychlost v_c a posuvová rychlost v_f . Pro snímání řezných sil během obrábění byl použit dynamometr. Dále pak byla sledována drsnost obrobeneého povrchu a opotřebení nástroje.

Klíčová slova

slitiny titanu, produktivní obrábění, řezná síla, opotřebení, drsnost povrchu.

ABSTRACT

The aim of the thesis is to analyze the production costs and optimize cutting conditions for high-feed face milling of titanium alloy Ti6Al4V. In the experiment were changed cutting conditions, such as cutting speed v_c and feed speed v_f . During the experiment were checked cutting forces by dynamometr. Furthermore, surface roughness and tool wear is observed.

Key words

titanium alloys, productive machining, cutting force, tool wear, surface roughness.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČEJKA, L. *Produktivní obrábění titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 79 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Produktivní obrábění titanových slitin vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

24.5.2013

.....
Datum

.....
Bc. Libor Čejka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc., a pánům Jiřímu Čechovi a Milanu Rusíňákovi za cenné rady a pomoc při provádění experimentů, které jsou nedílnou součástí této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	10
1 VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN.....	11
1.1 Historie titanu	11
1.2 Krystalografická struktura titanu	11
1.3 Plastická deformace titanových slitin	12
1.3 Titanové slitiny	13
1.3.1 Základní fakta	13
1.3.2 Rozdělení titanových slitin	13
2 OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH SLITIN	15
2.1 Mechanismus tvorby třísky a jeho vliv na řezný proces.....	15
2.2 Distribuce tepla při řezném procesu	16
2.2.1 Tepelná bilance řezného procesu	17
2.2.2 Tepelná vodivost titanových slitin.....	17
2.3 Kvalita obrobené plochy	19
2.3.1 Nízký modul pružnosti titanových slitin.....	19
2.3.2 Zpevněná povrchová vrstva	19
2.3.3 Zbytkové povrchové napětí	21
2.3.3.1 Závislost velikosti povrchového napětí na řezných podmínkách	23
2.4 Opatření nástroje.....	26
2.4.1 Mechanismy opotřebení bříty nástroje	26
2.4.1.1 Abrazivní otěr	26
2.4.1.2 Difuzní otěr	27
2.4.1.3 Oxidační otěr.....	27
2.4.1.4 Adhezivní otěr.....	27
2.4.3 Formy opotřebení nástroje	28
2.4.3.1 Otěr na hřbetu nástroje.....	28
2.4.3.2 Plastická deformace bříty.....	29
2.4.3.3 Tvorba nárůstku	30
2.4.3.4 Výmol na čele nástroje	30
2.4.3.5 Vruby na ostří	31

2.4.3.6	Tepelné hřebenové trhliny	32
2.4.3.7	Vylamování ostří.....	32
2.4.4	Kvantifikace opotřebení břitu nástroje	33
2.4.4.1	Přímé metody zjišťování opotřebení.....	33
2.4.4.2	Nepřímé metody zjišťování opotřebení	34
2.4.5	Časový průběh opotřebení hřbetu nástroje	34
3	PRODUKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ TITANOVÝ SLITIN	36
3.1	Vysokorychlostní obrábění HSC (High Speed Cutting).....	36
3.1.1	Řezné podmínky	37
3.1.2	Výhody a nevýhody technologie HSC.....	37
3.2	Vysokoposuvové obrábění HFC (High Feed Cutting)	38
3.2.1	Výhody a nevýhody technologie HFC.....	39
3.2.2	Axiální frézování	40
3.3	Obrábění s asistencí laseru (LAM – Laser Assisted Machining)	41
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
4.1	Popis experimentu.....	44
4.2	Obráběcí stroj.....	45
4.3	Nástroj.....	45
4.4	Obráběný vzorek.....	46
4.5	Měřidla použita při experimentu.....	46
4.6	Řezné podmínky použité při experimentu	48
4.7	Výsledky experimentu	48
4.7.1	Silové působení a drsnost povrchu	49
4.7.2	Opotřebení vyměnitelné břitové destičky	57
4.8	Rozbor výsledků experimentu	59
4.8.1	Dosažená drsnost povrchu	59
4.8.2	Opotřebení nástroje.....	61
4.8.3	Silové působení.....	61
5	ANALÝZA VÝROBNÍCH NÁKLADŮ.....	65
5.1	Náklady na elektrickou energii	65
5.2	Náklady na nástroj	67
6	OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK.....	69
6.1	Optimalizace řezných podmínek v závislosti na silovém zatížení a opotřebení nástroje.....	69
6.2	Optimalizace řezných podmínek v závislosti na energetické náročnosti výroby	70

6.3 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na množství obrobeneho materiálu....	71
ZÁVĚR	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	77
SEZNAM PŘÍLOH.....	79

ÚVOD

Trendem dnešní doby je rozvoj pokročilých technologií. S tímto rozvojem se zvyšují i požadavky na mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti materiálu, které splňují například titanové slitiny. Tyto slitiny jsou hojně využívány například v leteckém průmyslu či automobilním průmyslu, medicíně a kosmonautice.

Vysoká pevnost, špatná tepelná vodivost a vysoká chemická afinita komplikují jejich obrábění. Nízká tepelná vodivost způsobuje abnormální přehřívání nástroje, což má negativní vliv na jeho opotřebení. Vlivem vysoké chemické afinity má obráběný materiál snahu navařovat se na nástroj. Průběžným navařováním dochází k tvorbě mikrosvarů mezi odcházející třískou a čelem břitu nástroje. Dalším problémem je odtlačování obráběného materiálu od místa řezu, které je způsobeno nízkým modulem pružnosti. Díky tomuto odtlačování je povrch obráběné součásti zpevňován, což působí potíže při dalším obrábění. Působení těchto vlivů způsobuje zvýšené opotřebení nástroje, které se projeví na výrobních nákladech. Díky houževnatosti titanu a jeho slitin jsou při obrábění kladeny zvýšené nároky na upnutí nástroje a tuhost stroje. A to z důvodu eliminace vznikajícího samobuzeného chvění, které ovlivňuje trvanlivost nástroje a kvalitu obrobeného povrchu. Díky těmto faktům jsou tyto slitiny řazeny do kategorie těžkoobrobitelných materiálů. I přes tyto negativní průvodní jevy je v současné době stále více součástí konstruováno z titanových slitin, které se svou unikátní kombinací vlastností stávají v podstatě nenahraditelné.

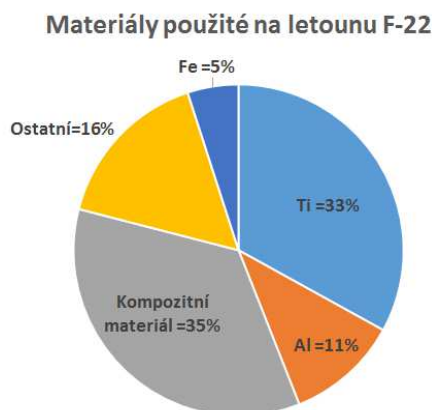
Jelikož je požadována maximální produktivita výroby, je nutné optimalizovat obráběcí proces. Tato práce se zabývá vlastnostmi titanových slitin, mechanikou tvorby třísky a kvalitou obrobené plochy. Pozornost je také věnována přehledu soudobých produktivních metod obrábění těchto slitin. V experimentální části této práce jsou rozebírány výsledky získaných dat, která byla získána v průběhu čelního frézování slitiny Ti-6Al-4V za vysokých posuvových rychlostí.

1 VLASTNOSTI TITANU A JEHO SLITIN

Titan a jeho slitiny jsou velmi zajímavými kovy, a to díky své unikátní kombinaci fyzikálních, chemických a materiálových vlastností. Čistý titan je velmi houževnatý a odolný vůči korozi. Nepatrné množství příměsí však může zásadně ovlivnit tyto vlastnosti. Hliník je hlavním legujícím prvkem těchto slitin, dalšími legující prvky jsou například: vanad, molybden, chrom, mangan a uhlík. Vanad a molybden zvyšují pevnost, ale snižují plasticitu slitiny. Molybden navíc zvyšuje teplotní limit provozu slitiny. Mangan zvyšuje tvrdost a pevnost, uhlík zvyšuje pevnost, ale nesnižuje plasticitu (obsah C pouze do 0,2 hmotnostních %). Lze tedy říci, že vhodnou kombinací legujících prvků je možno získat titanovou slitinu s vysokou pevností a přijatelnou plasticitou [20, 43].

1.1 Historie titanu

Titan je sedmým nejrozšířenějším kovem na Zemi. Bohužel se nevyskytuje ve 100% čistém stavu a následná úprava tento materiál značně prodraží. Mnoho let byly prováděny pokusy o získání titanu z hornin chemickou cestou, ale teprve až v roce 1948 se výroba čistého titanu začala využívat komerčně. Původně se pro přetavování používaly pece indukční a obloukové, poté byly nahrazeny elektronovými či plazmovými, které zvyšují metalurgickou čistotu kovu. Nejvyšší čistoty je dosaženo při kombinaci elektronového tavení pomocí svazku elektronů a vakua. I když se oblast využití titanových slitin stále zvětšuje, největšími zpracovateli zůstává letecký a kosmický průmysl. Na obrázku 1.1 je znázorněno procentuální zastoupení titanu při stavbě letounu F-22 [20].



Obr. 1.1 Materiály využitě při stavbě letounu F-22 [44].

1.2 Krystalografická struktura titanu

Titan je polymorfním kovem, tudíž se může vyskytovat v několika krystalických strukturách. Při nižší teplotě krystalizace utváří slitiny titanu hexagonální mřížku (HCP), slitina je nazývána α – titan. Při teplotě nad 800 °C dochází k transformaci α – titanu na β – titan, který má prostorově středěnou mřížku (BCC). Slitina α je dobře svařitelná a obrobitelná, ale slitina

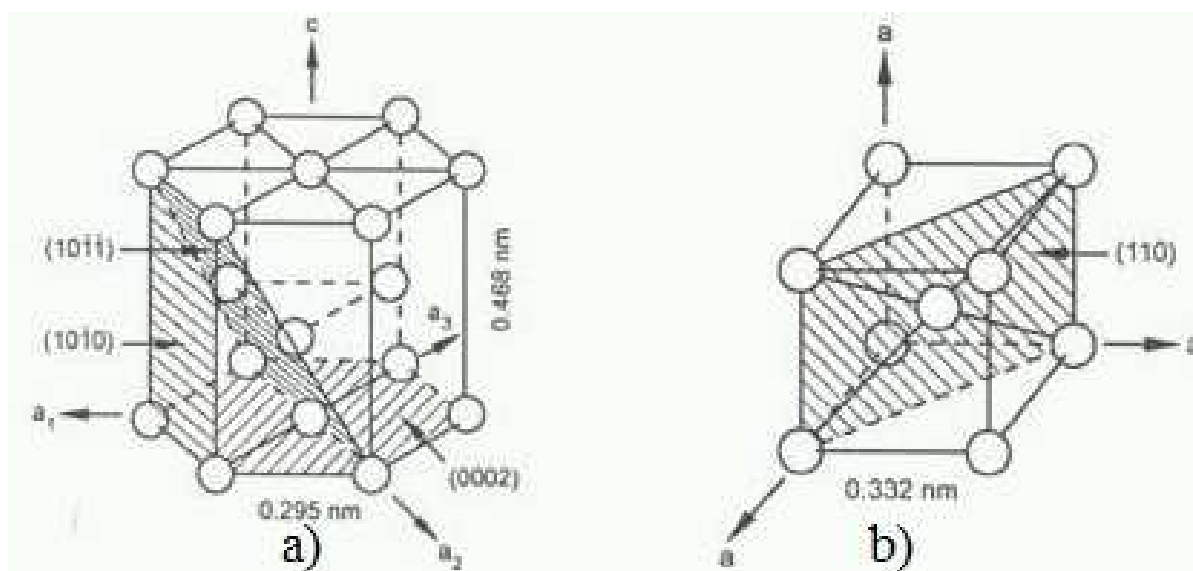
β je pevnější. Při kombinaci těchto slitin dosáhneme pevnou a zároveň tvárnou slitinu (α - β) [20]. Vlastnosti slitin jsou znázorněny v tab. 1.2.

Tab. 1.1 Porovnání vlastností jednotlivých slitin [20].

Vlastnosti	Slitina α	Slitina α - β	Slitina β
Mez pevnosti	-	+	++
Lomová houževnatost	+	-/+	+/-
Tvárnost za studena	--	-	-/+
Tvárnost	-/+	+	+/-
Odolnost proti korozi	++	+/-	-
Odolnost proti oxidaci	++	+/-	-

1.3 Plastická deformace titanových slitin

Po překročení meze kluzu (R_e), dochází v materiálu k trvalým deformacím a vzniku trhlin. Zároveň dochází ke skluzu krystalografických rovin podél skluzové roviny (roviny s nejvíce atomy), viz. obr. 1.2 [20].



Obr. 1.2 Skluzové roviny a) mřížka HCP - slitina α , b) mřížka BCC - slitina β [20].

Pozn. [20]:

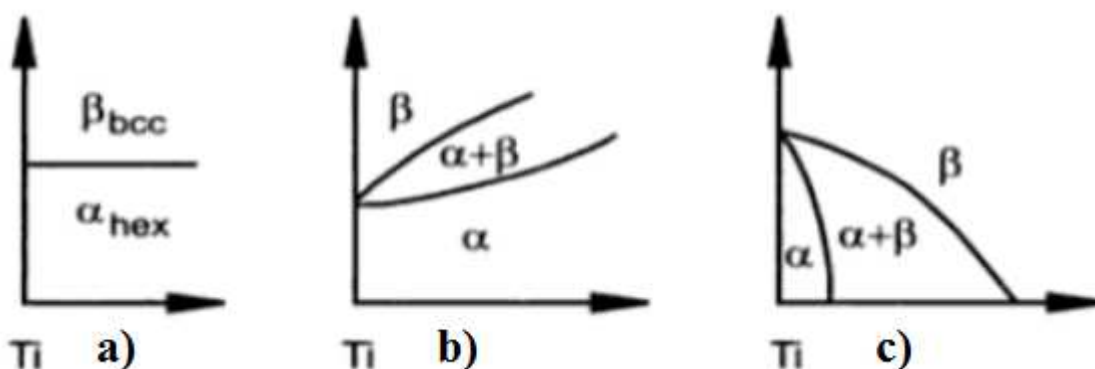
HCP - tvrdost/křehkost, hustota atomu ve skluzové rovině 91%, hustota uspořádání atomů v mřížce 74%, 3 skluzových systémů v 1 mřížce

BCC - větší pevnost, hustota atomu ve skluzové rovině 83%, hustota uspořádání atomů v mřížce 68%, 12 skluzových systémů v 1 mřížce

1.3 Titanové slitiny

1.3.1 Základní fakta

Výsledná struktura titanových slitin je nejvíce ovlivněna tepelným zpracováním a legujícími prvky, které slouží jako stabilizátory (kromě neutrálních prvků – Sn a Zr). Stabilizátory ovlivňují termodynamickou stabilitu titanových slitin. Některé prvky zvyšují teplotu transformace a tím zvětšují oblast α (nazývají se stabilizátory α), jiné zase snižují teplotu transformace a zvětšují oblast β (stabilizátory β). Mezi α stabilizátory patří Al, O, N, C. Pouze prvek Al je významným stabilizátorem, ostatní prvky jsou nečistoty, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti. Stabilizátory β jsou například V, Mo, Nb, Ta. Vliv stabilizátorů je znázorněn na obr. 1.3 [20, 45].



Obr. 1.3 Vliv stabilizátorů – a) neutrální , b) zvětšení oblasti α , c) zvětšení oblasti β [20].

1.3.2 Rozdělení titanových slitin

Následně po zjištění vlastností čistého titanu, započal výzkum, zda by bylo možné tyto vlastnosti ještě vylepšit. Vývoj titanových slitin se ze začátku odehrával hlavně v USA a SSSR. Výzkum byl velice rychlý a úspěšný. Výsledkem byl vznik nových slitin, které se dále zdokonalovaly. Pro praktické využití bylo nutno zvládnout nejen řadu technologických problémů. Vývoj nových slitin titanu stále probíhá, jedná se především o slitiny pro zvláštní aplikace. V dnešní době je známo přes 100 druhů titanových slitin. Z toho je 20 – 30 slitin běžně používáno. Nejběžnější slitinou je dvoufázová slitina α - β Ti6Al4V, která tvoří cca 50% z celkové výroby titanových slitin. V literatuře se vyskytují již zmíněné slitiny α , β , α - β , ale také slitiny pseudo α a pseudo β [20, 45].

Popis slitin [45]:

- **Slitiny α :**

Slitiny s velkou tepelnou stabilitou, dobrou pevností a odolností proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Dobrá svařitelnost a žárupevnost do 300 °C. Hlavní nevýhodou je omezená tvárnost za studena. Při více než 7 hm. % Al roste křehkost. Nejvýznamnější α slitinou je TiAl5Sn2,5.

- **Slitiny β :**

Slitiny s vysokým obsahem legujících prvků (až 20 %). Obvykle jsou legovány Fe, Cr, Mo, V. Jejich předností je velmi dobrá tvařitelnost za studena, vysoká odolnost

proti korozi, dobrá svařitelnost a vysoká pevnost (až 1200 MPa ovšem jen do 350 °C). Popouštěním se dosáhne částečného rozpadu β fáze, čímž se zvýší mez kluzu (až na 1300 MPa). Nejvýznamnější β slitinou je TiV10Fe2Al3.

- **Slitiny α - β :**

Patří k nejpoužívanějším titanovým slitinám, a to ve stavu žíhaném či zušlechtěném. Obsah β fáze je až 50%. Hlavní výhody jsou výborné mechanické vlastnosti, svařitelnost a nejlepší obrobitelnost ze všech titanových slitin. Pevnost je závislá na složení a tepelném zpracování, díky kterému lze tyto slitiny vytvrdit. Při teplotách nad 450 °C se pevnost klesá. Nejvýznamnější α - β slitinou je již zmiňovaná slitina Ti6Al4V.

- **Slitiny pseudo α :**

Jsou slitiny α s přídatkem β stabilizátorů. Obsah fáze β bývá 2 až 6 hm. %. Pevnost je o 10 až 20 % větší než u slitin α , dále je lepší tvařitelnost za pokojové teploty. Jedná se o novější typy žárupevných slitin používané do cca 500 °C.

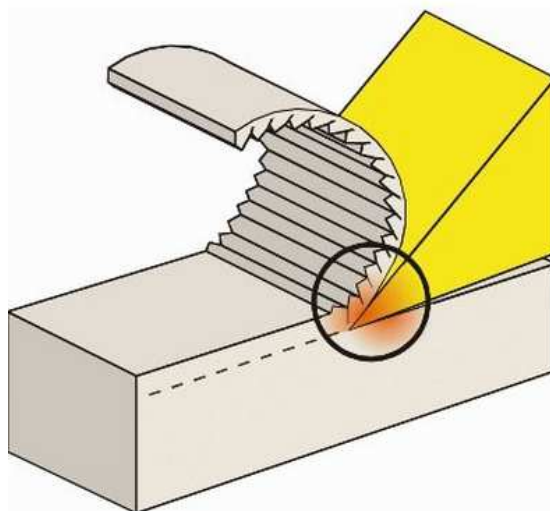
- **Slitiny pseudo β :**

Obsah β stabilizátorů se pohybuje kolem 18 %. Obsah Al se udržuje na 3 %. Tyto slitiny se vyznačují dobrou tvařitelností, která je zejména využívána při technologii kování. Slitina má též výhodnou kombinaci pevnosti s houževnatostí a lze ji použít též v žíhaném stavu.

2 OBRÁBĚNÍ TITANOVÝCH SLITIN

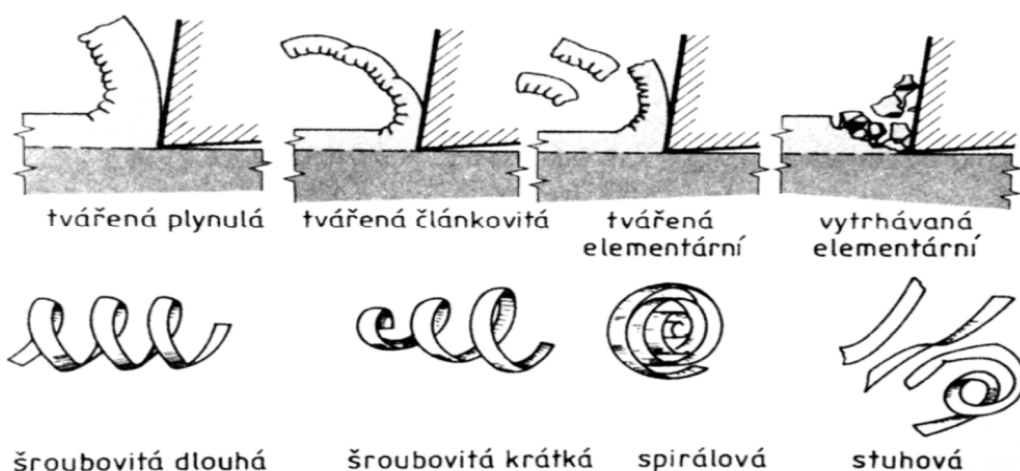
2.1 Mechanismus tvorby třísky a jeho vliv na řezný proces

Třísku lze popsat jako materiál, který je při procesu obrábění odebrán z obrobku. Při vnikání řezného klínu do materiálu (viz. obr. 2.1), dochází k intenzivní plastické deformaci podél roviny maximálních smykových napětí. Obráběný materiál prochází velmi rychle mezními stavy pružné napjatosti, plastické deformace a nakonec dochází k lomovému porušení (oddělení třísky od obrobku). Oblast v materiálu, kde dochází pomocí řezného nástroje k jeho přetvoření, se nazývá kořen třísky. Pomocí analýzy třísky (tvar, barva atd.) lze odhadnout, jak probíhal proces obrábění, charakter zpevňování či odpevňování [7, 16].



Obr. 2.1 Vnikání řezného klínu [18].

Trvanlivost nástrojů při třískovém obrábění titanu je menší, než při obrábění oceli. Na druhou stranu však bylo během experimentů vyzorováno, že řezné síly a spotřebovaný výkon stroje je rapidně menší, než při obrábění ocelí, nebo niklu. Na základě zkoumání závislosti síly na řezné rychlosti byl vyvozen závěr, že naměřené hodnoty sil nabývají malých hodnot díky velmi malé ploše styku mezi třískou a čelem nástroje. Tříška je velmi tenká (o málo širší, než průřez řezu). Z počátku zkoumání mechanismu třísky titanových slitin byl brán v úvahu předpoklad, že součinitel pěchování třísky je roven 1. Skutečnost je však taková, že při počátku vzniku třísky dochází k jejím drobením na elementy. Tyto elementy vznikají vlivem tření mezi čelem nástroje a třískou, ale také díky vibracím nástroje, které jsou vyvolány nerovnoměrnými plastickými deformacemi. Tvorba segmentů začíná vyrovnáváním elementům klínovitého tvaru před nástrojem. Prvotní styk čela nástroje s vytvářeným segmentem je velmi krátký. Jeho délka roste s pohybem nástroje. Tento děj je doprovázen zvýšením teploty v kontaktní zóně. Stlačováním segmentu třísky dochází k jejímu přemísťování vzhůru. Rychlost pohybu třísky vůči nástroji je rovna rychlosti jejího stlačování. Smyková (stříhová) deformace se šíří a dochází k posuvu tvořeného segmentu ve směru rovnoběžném s plochou smyku, což urychluje přesun segmentu třísky. Druhy třísek jsou znázorněny na obrázku 2. 2 [14, 15].



Obr. 2. 2 Druhy a tvary třísek [17].

2.2 Distribuce tepla při řzném procesu

Pro obrábění titanových slitin je typická vysoká koncentrace tepla v oblasti břitu nástroje, která je následkem špatné tepelné vodivosti těchto slitin. Při jejich obrábění je až o 45% více tepla akumulováno na břitu nástroje než při obrábění ocelí (viz. obr. 2.3) [19].

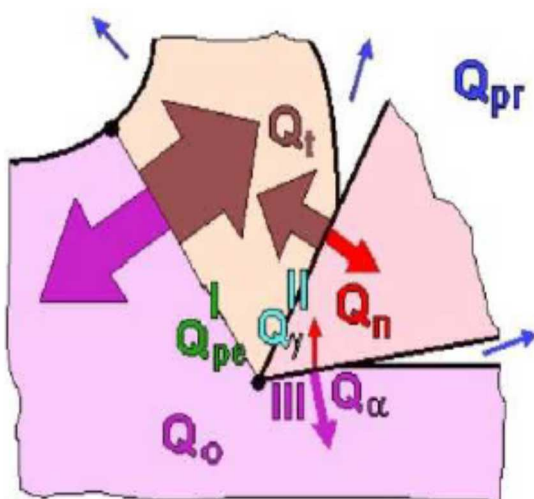


Obr. 2.3 Rozložení teploty při obrábění oceli (vlevo) a titanové slitiny (vpravo) [20].

Vlivem zvýšené teploty vzroste i koeficient vnějšího tření μ . Tato změna je znatelná již při teplotě 400 °C. Tříska se po čele nástroje pohybuje minimálně a odchází ve formě elementů. Tyto elementy jsou vytvářeny periodickými skluzy v třísce kolmo k čelu nástroje. Skluzy usnadňují generování trhlin, při kterém dochází k pulzujícímu zatížení břitu nástroje [20].

2.2.1 Tepelná bilance řezného procesu

Při obrábění je všechna mechanická práce E_e přeměněna v teplo Q_e , které podstatně ovlivňuje řezný proces. Toto vzniklé teplo musí být v rovnováze s teplem odvedeným ze soustavy (viz. obr. 2.4). Za tohoto předpokladu lze sestavit tzv. „rovnici tepelné bilance procesu řezání“ (viz. rovnice 2.1) [20].



- Q_{pe} – teplo generované v oblasti primární plastické deformace (tj. oblast I)
- Q_γ – teplo vzniklé třením třísky o čelo nástroje v oblasti sekundární plastické deformace (tj. oblast II)
- Q_α – teplo vzniklé třením hřbetu nástroje o přechodovou plochu (oblast terciální plastické deformace III)
- Q_t – teplo odvedené třískou
- Q_n – teplo odvedené nástrojem
- Q_o – teplo odvedené do obrobku
- Q_{pr} – teplo odvedené do prostředí

Obr. 2.4 Schéma distribuce tepla řezného procesu [20].

$$Q_{pe} + Q_\gamma + Q_\alpha = Q_t + Q_n + Q_o + Q_{pr} = Q_e \text{ [K]} \quad (2.1)$$

$$Q_e \approx E_e \text{ [J]}$$

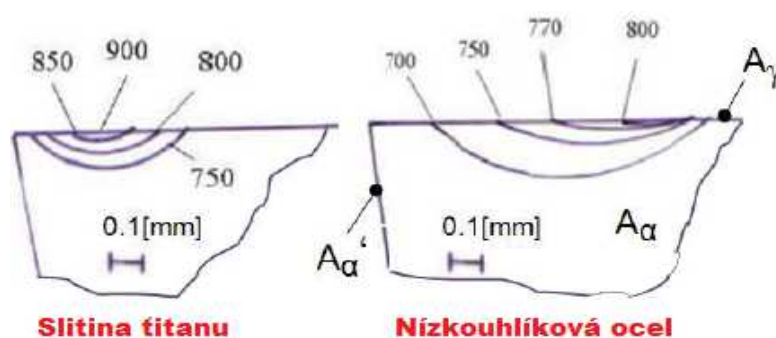
Množství transformovaného tepla lze redukovat snížením řezné rychlosti, změnou povlaku nástroje nebo chlazením kapalinami na bázi vody a minerálních olejů (chladicí a mazací účinek). Použití chlazení je velmi výhodné díky zlepšení odvodu třísek z místa řezu. Třísky, které prošly plastickým přetvořením a značně vysokými teplotami jsou tvrdší než obráběný materiál. Následným přeřezáním těchto třísek by výrazně ovlivnilo životnost nástroje (viz. kapitola 2.4.3.7) [20].

2.2.2 Tepelná vodivost titanových slitin

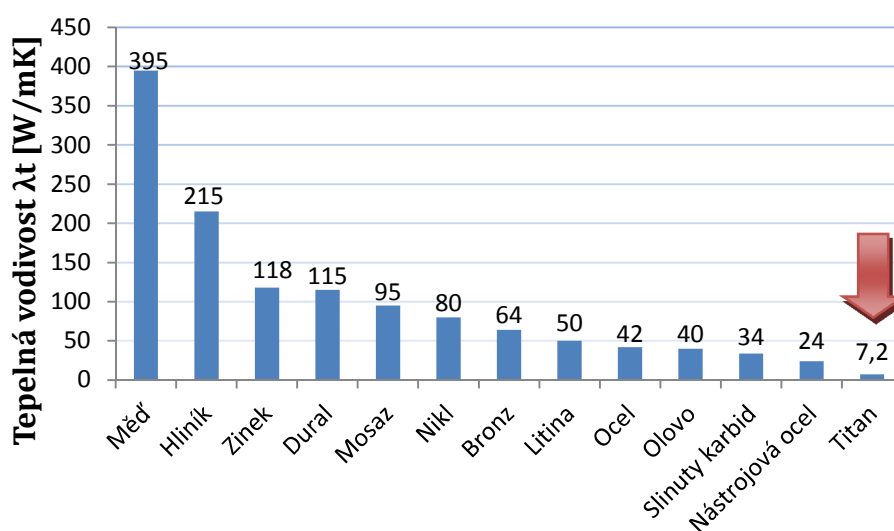
Ve fyzice je tepelná vodivost popisována jako schopnost materiálu vést teplo. Představuje rychlost šíření tepla z teplejší části kovu do chladnější. Tepelná vodivost kovu je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti λ_t . Tento součinitel je materiálovou konstantou a je definován jako množství tepla, které projde jednotkovou délkou za jednotku času [21].

Součinitel tepelné vodivosti λ_t titanových slitin je až 50x menší než u mědi (viz. obr. 2.6), což má za následek zvýšení teploty Q_e v okolí břítu nástroje.

Na obrázku 2.5 lze pozorovat rozdíl teploty na břítu nástroje při obrábění titanové slitiny ($v_c=61\text{m/min}$) a nízkouhlíkové oceli ($v_c=150\text{m/min}$). Odlišná je i poloha teplotního pole, které je u titanové slitiny mnohem blíže k řezné hraně nástroje [20].



Obr. 2.5 Teploty na břitu nástroje při obrábění titanové slitiny a nízkouhlíkové oceli [20].



Obr. 2.6 Porovnání součinitele tepelné vodivosti λ_t pro $T=20-25^\circ\text{C}$ [20].

Vysokou pevností titanu v kombinaci s vysokým třením s ostatními kovy dochází k minimálnímu stlačení třísky, což má vliv na dynamiku řezného procesu, kdy dochází k cyklickým změnám řezné síly. Řezná síla při tvorbě segmentů třísky roste a při následném skluzu v trhlině třísky klesá (na obr. 2.7 jsou vyznačeny oblasti vysokého a nízkého smykového napětí, které ovlivňují tyto síly). Tyto změny velikosti řezné síly vedou k samobuzeným vibracím a chvěním během řezného procesu. Spojením těchto vibrací a posunu teplotního pole blíže k břitu nástroje, dochází k upálení špičky břitu nástroje, které je možné eliminovat volbou nižší řezné rychlosti [20].



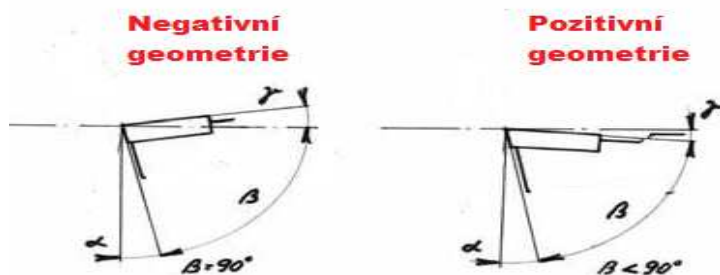
Obr. 2.7 Řezy titanovými třískami [20].

2.3 Kvalita obrobené plochy

Kvalitu obrobené plochy ovlivňují například mechanické vlastnosti materiálu, opotřebení nástroje a zvolené řezné podmínky.

2.3.1 Nízký modul pružnosti titanových slitin

Modul pružnosti titanových slitin je poměrně nízký $E_{\text{titan}} = 114 \text{ GPa}$ (pro srovnání $E_{\text{ocel 12 050}} = 211 \text{ GPa}$). Vlivem nízkého modulu pružnosti v tahu dochází při obrábění k tzv. „odtlačování obráběného materiálu“ od nástroje, které nejčastěji nastává při malých hodnotách záběru (například obrábění žebor nebo tenkostěnných dílců). Po dokončení obrábění, kdy na obrobek již nepůsobí žádné řezné síly a odpory, se odtlačený (odpružený) materiál vrací zpět. Tato změna negativně ovlivňuje rozměrovou i geometrickou přesnost obrobené plochy. Volbou vhodné geometrie břitu lze „odtlačování“ eliminovat. Literaturou je doporučován ostrý nástroj s pozitivní geometrií břitu ($\gamma \approx 15^\circ$), která redukuje řezné síly a tím i odtlačení obrobku od místa řezu (na obr. 2.7 je znázorněn rozdíl mezi pozitivní a negativní geometrií). Dále je doporučováno u frézování tenkostěnných žebor vynechat polohrubovací operace a nahradit je obráběním na čisto s většími přídávky, než při běžných dokončovacích operacích [20].



Obr. 2.7 Porovnání geometrie břitu [25].

Společnost Boeing problém s odtlačováním vyřešila zavedením pravidla 8:1. Pro dokončení tenkých stěn a žebor využívají mnohábřité nástroje, které odtlačení obráběného materiálu v kombinaci s určitou hodnotou a_p eliminuje. Maximální axiální hloubka řezu a_p však nesmí být větší, než $1/8$ z budoucího rozměru obrobené tloušťky žebra. Při dodržení tohoto pravidla je experimentálně zjištěno, že lze dosáhnout vysoké produktivity bez zmiňovaných negativních důsledků (vibrace, odpružení, rozměrová a geometrická přesnost), které ovlivňují životnost nástroje [20].

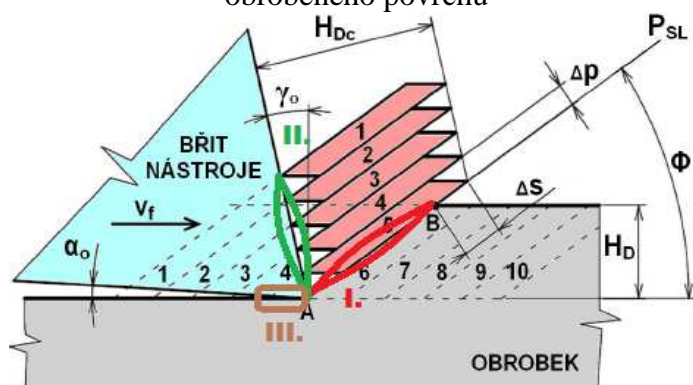
2.3.2 Zpevněná povrchová vrstva

Při obrábění titanových slitin dochází k tvorbě tzv. „zpevněné povrchové vrstvy“ (viz. obrázek 2.9). Tato vrstva se vyznačuje zvýšenou tvrdostí a pevností. K těmto změnám dochází díky působení tepla a tribologie při řezném procesu. Stupeň zpevnění lze určit mikrotvrdostí a hloubkou (tloušťkou) zpevněné vrstvy. Na povrchu je mikrotvrdost největší, s přibývajícím hloubkou tvrdost klesá, a to až na hodnotu odpovídající materiálu obrobku. Velikost zpevnění povrchové vrstvy a jeho hloubka závisí na řezných podmínkách, geometrii nástroje a vlastnostech obráběného materiálu. S rostoucí hloubkou řezu (a_p) roste i intenzita zpevnění této vrstvy. Z hlediska geometrie je ovlivňujícím faktorem úhel čela nástroje γ , při jeho zmenšení je ovlivněn úhel primární plastické deformace ϕ . Zmenšováním

úhlu ϕ plastická deformace prostupuje hlouběji do obrobku. Při větším úhlu ϕ vzniká štíhlejší tříška, která je pro řezný proces energeticky výhodnější. Tvárnější materiály jsou více náchylné ke zpevnění povrchové vrstvy a to z důvodu snadnější pohyblivosti dislokací v krystalové mřížce [20].

Deformace v kořenu třísky lze rozdělit do třech oblastí (viz obr. 2.8) [20]:

- oblast **primární plastické deformace**, kde vznikají největší smyková napětí ve smykové rovině pod úhlem ϕ
- oblast **sekundární plastické deformace**, kde probíhá deformace vlivem tření tvořící třísky po čele nástroje
- Oblast **terciální plastické deformace**, kde dochází k tření mezi hřbetem nástroje a obrobeným povrchem. Velikostí úhlu hřbetu α lze ovlivnit drsnost obrobeného povrchu



Φ - úhel roviny stříhu
 P_{SL} - rovina stříhu
 H_D - hloubka odřezávané vrstvy
 H_{DC} - tloušťka odebírané třísky
 γ_0 - úhel čela nástroje v ortogonální rovině
 α_0 - úhel hřbetu nástroje v ortogonální rovině
 Δp - tloušťka elementu třísky
 Δs - posun elementu

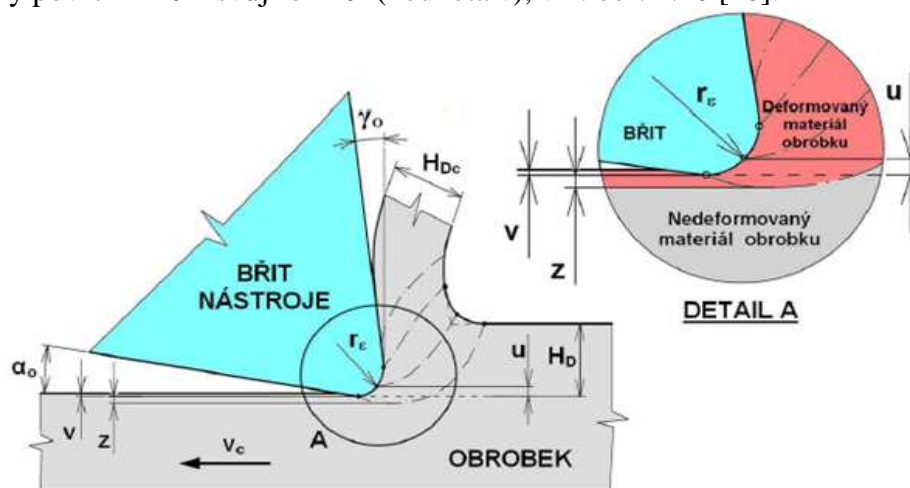
Obr. 2.8 Piispänenův model tvorby element třísky s vyznačenými oblastmi plastických deformací ortogonální rovině [20].



Obr. 2.9 Zpevněná povrchová vrstva, která vznikl při předchozím obrábění [20].

Na tvorbu povrchového zpevnění má velký vliv i poloměr zaoblení ostří r_e . Vlivem tohoto zaoblení neodchází část odebíraného materiálu pryč z řezu ve formě třísky. Oblast, ve které dochází k určení, zda je materiál odebírán či nikoliv se nazývá „tečný bod střižné (smykové) roviny k poloměru zaoblení ostří r_e “. Poloměr zaoblení r_e stlačí neodebíraný materiál (součet hodnot $u+z$). Vrstva (z), která je hlouběji, je při obrábění namáhána až na hodnotu

meze kluzu (nebo více) a je plasticky deformována (trvalý stav). Po obrábění a pominutí napětí, které vzniká vnikáním břitu do obrobku, se vrstva stlačeného materiálu (u) vrátí do původního stavu. Tato část prošla při obrábění pouze elastickou deformací, která není trvalá a obrobený povrch změní svůj rozměr (hodnota v), viz. obr. 2.10 [20].



Obr. 2.10 Detail tvorby zpevněné povrchové vrstvy [20].

Materiály, jako jsou například titanové slitiny, které mají velmi vysoký koeficient tření, vyvolávají prudké zbrzdění kovu na nástroji a vytváří se vysoký gradient rychlosti obtékání těchto vrstev. V důsledku zbrzdění, se částečná vrstva materiálu dostává vlivem zatékání na tvořící se obráběnou plochu a vytváří tak tlustou zpevněnou povrchovou vrstvu. Naopak u materiálů s malým koeficientem tření, roste rychlost pohybu mezi třískou a nástrojem, čímž snižuje gradient rychlosti obtékání vrstev a zpevnění neproniká tak hluboko, jako u titanových slitin. Proto lze říci, že se zvyšujícím se koeficientem tření a afinitou materiálů, se zvyšuje i teplota v oblasti řezu, hloubka i intenzita povrchové vrstvy [20].

2.3.3 Zbytkové povrchové napětí

Zbytková napětí se v materiálu vyskytují bez vnějšího působení. Jejich vznik je ovlivněn zvolenou technologií výroby a úpravou materiálu. Tato napětí mohou být prospěšná (tlaková napětí) či škodlivá (tahová napětí). Tlaková napětí zlepšují únavové vlastnosti materiálu a do určité míry zamezují vzniku povrchových trhlin [26].

Teplota při obrábění značně ovlivňuje druh vznikajícího povrchového napětí (viz. obr. 2.11). Při vzniku zbytkových napětí se v povrchové vrstvě vyskytuje nerovnoměrná plastická deformace, dále se pak projevují teplotní rozdíly jednotlivých vrstev v kombinaci s vysokými tlaky při obrábění. Horní vrstvy, které mají vyšší teplotu než spodní, mají snahu tepelně dilatovat o hodnotu Δl_0 (viz rovnice 2.1) [20].

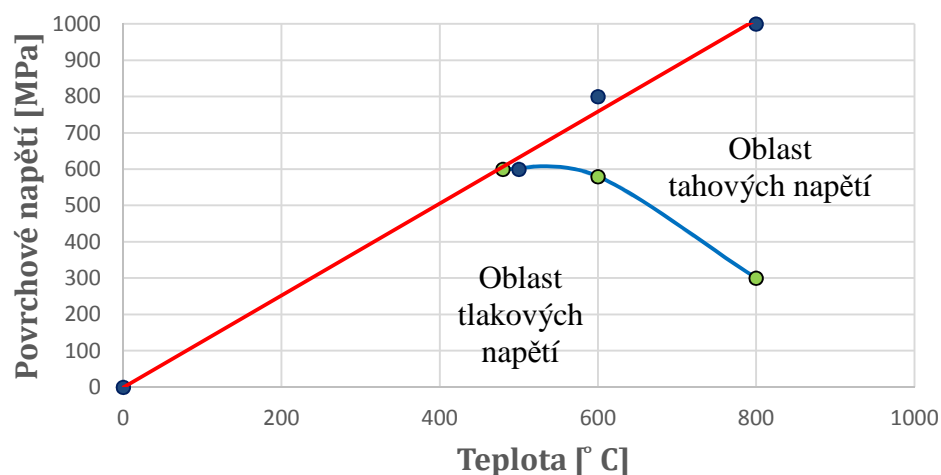
$$\Delta l_0 = l \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \alpha \quad (2.2)$$

Kde : l [mm] – délka ohřívání vrstvy

φ_1 [°C] – původní teplota

φ_2 [°C] – teplota ohřevu horní vrstvy

α [mm/°C] – koeficient lineární teplotní roztažnosti



Obr. 2.11 Závislost druhu povrchového napětí na teplotě [20].

Horní vrstva (teplejší) je v kontaktu se spodní, která nemá tendenci k tepelné dilataci. I přes tento fakt dochází k prodloužení spodní vrstvy, protože tyto dvě vrstvy tvoří jeden celek. Lze říci, že prodloužení Δl_0 bude sníženo vlivem deformačního odporu podpovrchové vrstvy a výsledné prodloužení bude Δl_{skut} . Vzniká tak vnitřní tlakové napětí, které způsobuje plastickou deformaci. Po vychladnutí vrstva změní svou délku, a to skoro až na původní hodnotu. Tento rozdíl je důsledkem nevratných plastických deformací. Díky těmto deformacím vzniká zbytkové tahové napětí v povrchové vrstvě obrobku. Lze předpokládat, že odpor tahové deformace podpovrchové vrstvy je roven odporu tlakové deformace povrchové vrstvy. Pak $\Delta l_{skut} = 0,5 \cdot \Delta l$. Změnou podpovrchové vrstvy o Δl_{skut} je vyvoláno vnitřní napětí, které lze určit Hookovým zákonem (viz. rovnice 2.3). [20]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad \text{Kde } \varepsilon = \frac{\Delta l_{skut}}{l} \quad (2.3)$$

Kde: E [MPa] – modul pružnosti v tahu [$114 \cdot 10^3$ MPa]
 ε [-] – poměrné prodloužení

Po dosazení :

$$\sigma = \frac{\Delta l_{skut}}{l} \cdot E = \frac{0,5 \cdot \Delta l_0}{l} = \frac{0,5l \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \alpha}{l} \cdot E$$

Po úpravě :

$$\sigma = 0,5 \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \alpha \cdot E$$

Vlivem vysokých teplot, které vznikají při obrábění titanových slitin, se intenzivně zahřívá povrchová vrstva obrobku, což má za následek vznik vnitřního tahového napětí σ . Plastická deformace v povrchové vrstvě vzniká pouze tehdy, když je zmíněné napětí σ vyšší než mez kluzu obráběného materiálu. Za předpokladu, že původní teplota je vůči teplotě ohřevu bezvýznamná, lze říci, že kritická teplota ohřevu povrchové vrstvy φ , při níž vzniká zvýšené povrchové napětí, je rovna (viz. rovnice 2.4). Tato teplota φ je orientační, při jejím

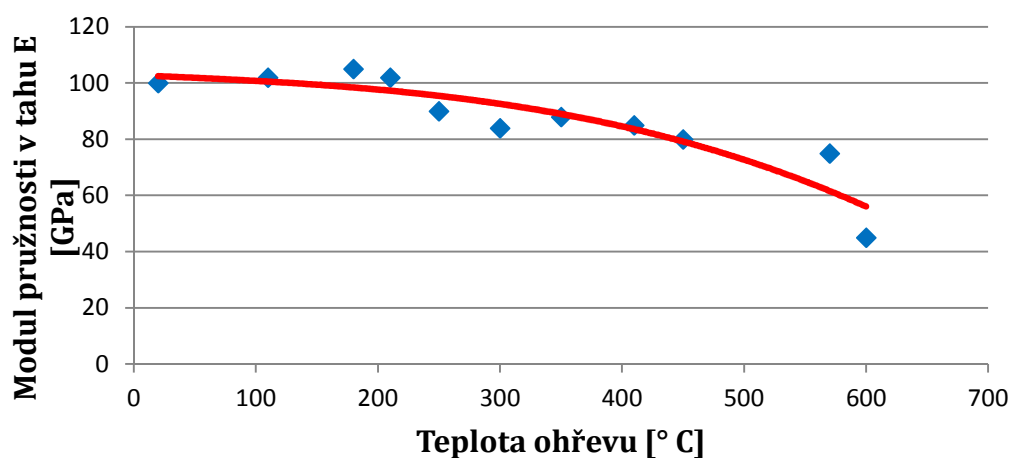
překročení vzniká nadměrná povrchová vrstva (setiny až desetiny milimetru) se zbytkovým napětím. Pro přesnější výpočet φ , je nutno brát v úvahu závislost modulu pružnosti v tahu (E) na teplotě ohřevu povrchové vrstvy. Vzhledem k této závislosti se vnitřní napětí vlivem teploty nezvětšuje lineárně. V tabulce 2.1 je srovnání kritických teplot φ , při kterých vzniká teplotní zbytkové napětí. Na obr. 2.12 je zobrazena závislost modulu pružnosti na teplotě [20].

$$\varphi = \frac{Re}{\alpha \cdot E} \quad (2.4)$$

Kde: Re [MPa] – mez kluzu

Tab. 2.3.3 Porovnání kritických teplot jednotlivých materiálů [20].

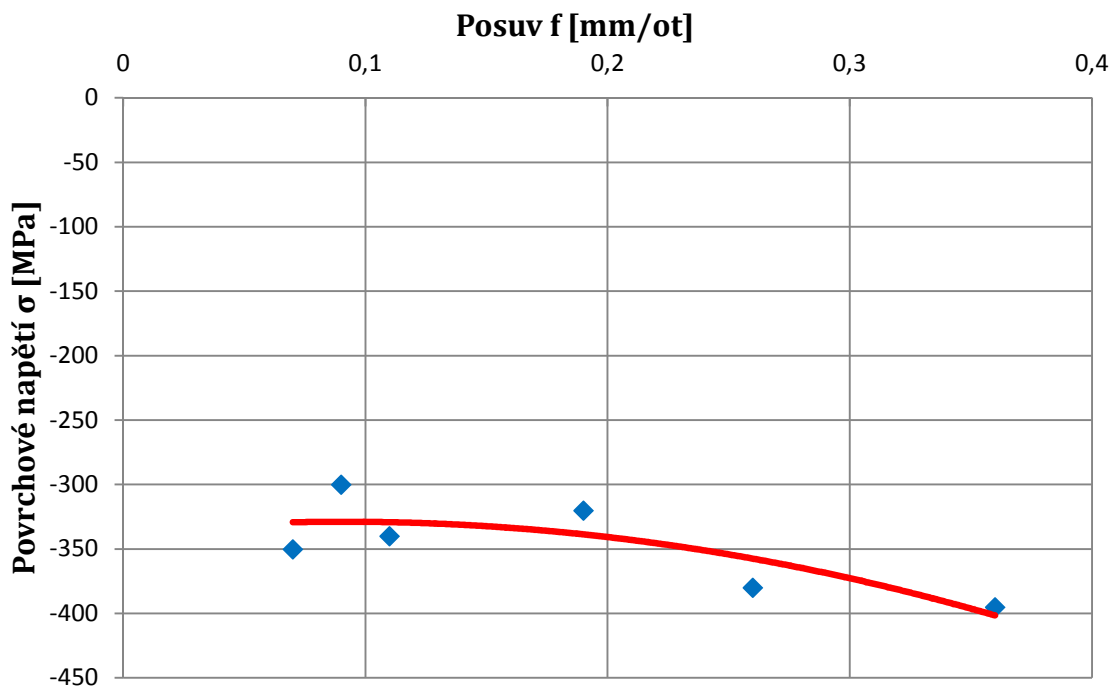
Materiál	Kritická teplota φ
Ocel 11 600	260 °C
Ocel 14 209	240 °C
Titanová slitina	910 °C



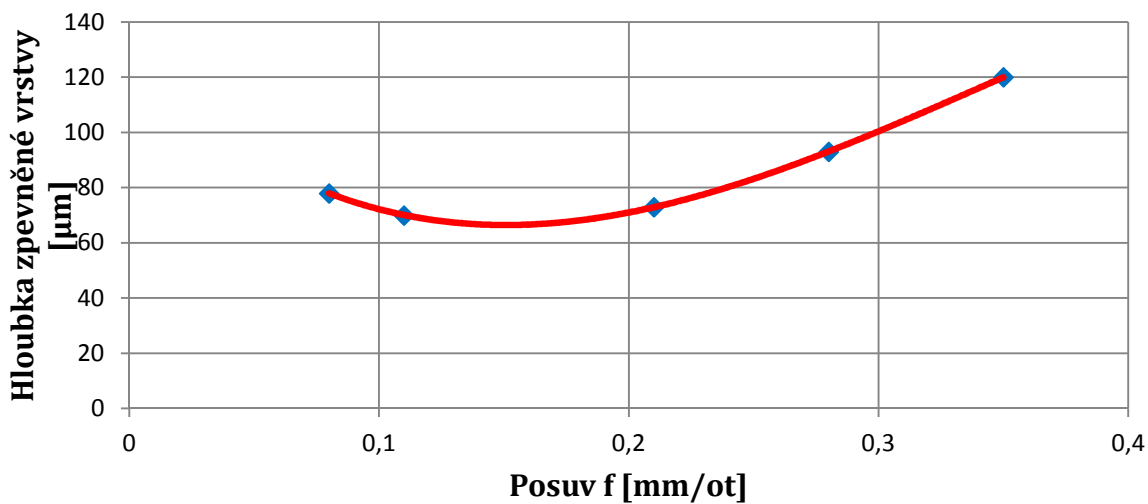
Obr. 2.12 Závislost modulu pružnosti v tahu na teplotě ohřevu [20].

2.3.3.1 Závislost velikosti povrchového napětí na řezných podmínkách

Řezné podmínky zásadně ovlivňují plastickou deformaci, distribuci tepla a drsnost povrchu. Velikost vzniklého tepla ovlivňuje intenzitu zpevnění povrchu a zbytkového napětí. Proto lze očekávat určitou závislost zpevnění povrchu či velikosti zbytkového napětí na řezných podmínkách. S řeznou rychlostí v_c roste teplota v místě řezu. Se zvětšujícím se posuvem rostou i plastické deformace a zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Při obrábění titanových slitin jsou vlivem zvýšení posuvové rychlosti vyvolány větší plastické deformace. Zároveň se zvýší intenzita tlakových napětí a hloubka zpevněné povrchové vrstvy (viz. obr. 2.13 a 2.14) [20].

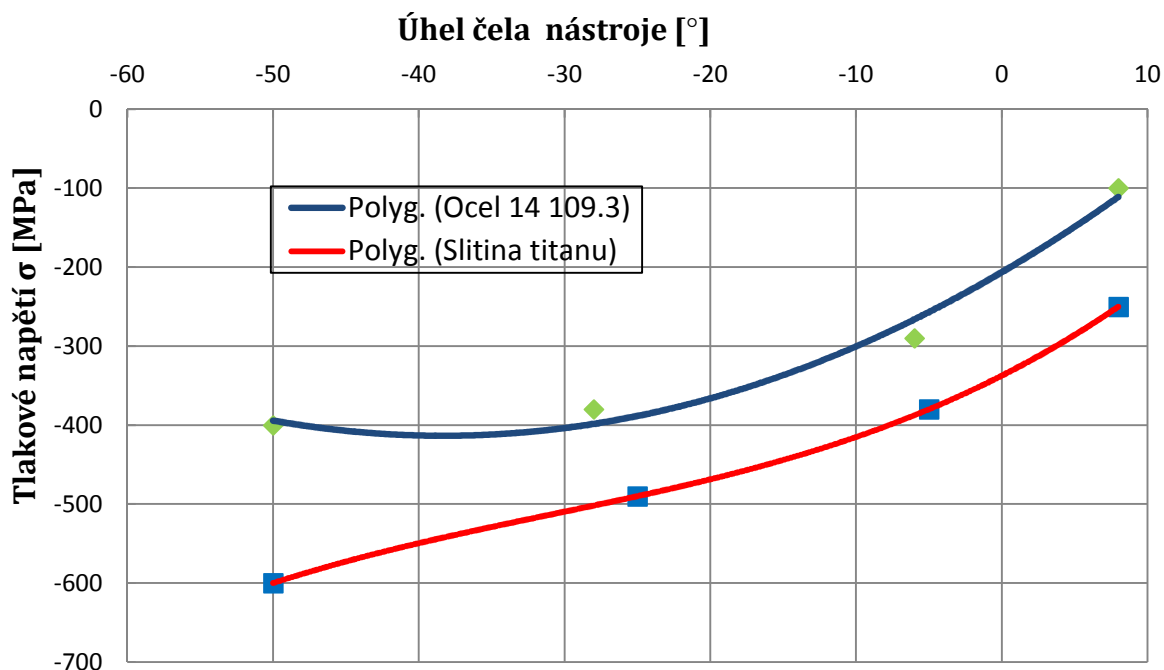


Obr. 2.13 Závislost tlakového napětí na posuvu [20].



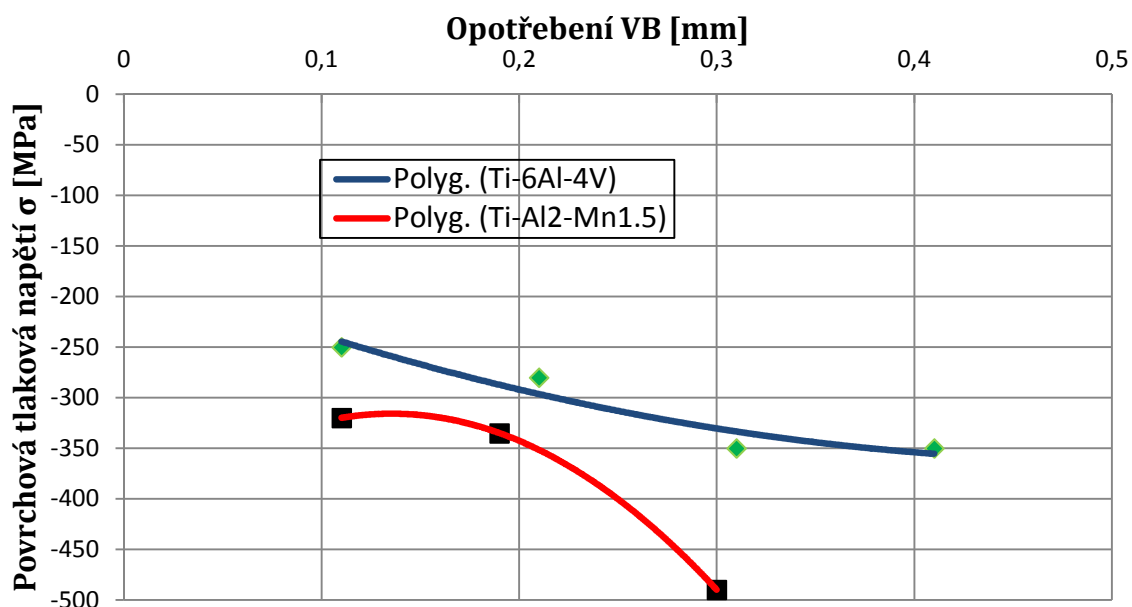
Obr. 2.14 Závislost hloubky zpevněné vrstvy na posuvu [20].

Rovněž geometrie břitu nástroje ovlivňuje intenzitu povrchového napětí σ . Při změně geometrie břitu na negativní, se zvýší intenzita a hustota plastických deformací (a to nejen u titanových slitin). V závislosti na těchto změnách se zvýší povrchové napětí v obrobeném povrchu (viz. obr. 2.15) [20].



Obr. 2.15 Závislost velikosti tlakového napětí na úhlu čela nástroje [20].

Vlivem zvětšujícího se opotřebení nástroje, se zvětšuje i třecí plocha mezi hřbetem nástroje a obrobkem. Následkem zvětšujícího se rádiusu zaoblení ostří se materiál spíše pěchuje, než obrábí. Tímto pěčováním rostou plastické deformace, zvětšuje se oblast zpevněné povrchové vrstvy a zbytkových napětí obrobené plochy (viz. obr. 2.16) [20].



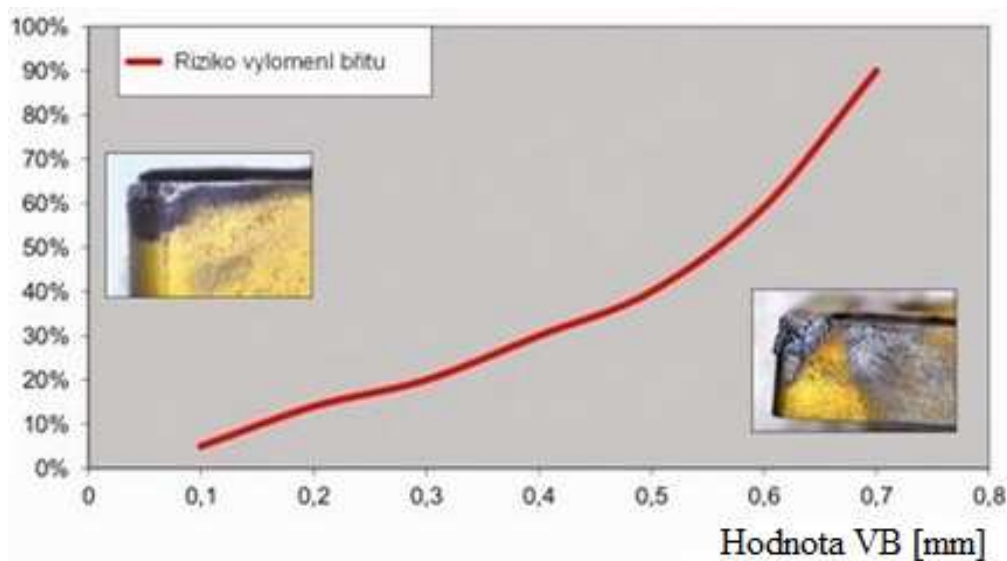
Obr. 2.16 Závislost velikosti povrchového napětí na opotřebení nástroje [20].

2.4 Opotřebení nástroje

Utváření třísky se vytváří za vysokých teplot a tlaků čistý kovový povrch, který má sklon k chemickým reakcím či difuzním procesům. Vlivem mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází k zatížení břitu nástroje. Toto zatížení se projevuje jako opotřebení nástroje. Opotřebení je signalizováno především viditelnými a měřitelnými kritérii, která je možno sledovat na břitu nástroje. Většinou se jedná o úbytek řezného materiálu na čele či hřbetě břitu. Na obrázku 2.17 je znázorněna pravděpodobnost vylomení nástroje při daném opotřebení břitu [30, 31].

Opotřebení se projevuje [30, 31]:

- nárůstem řezných sil a následně i nárůstem výkonu potřebného k obrábění,
- zhoršením kvality obrobeného povrchu a nedodržením rozměrových tolerancí,
- zvýšením tvorby otřepů vlivem neostrého břitu,
- nárůstem tepla v místě řezu (větší tření),
- změnou tvaru, teploty a zabarvení třísky,
- nadměrným hlukem vyvolaným nárůstem řezných sil a vibrací



Obr. 2.17 Pravděpodobnost vylomení břitu při daném opotřebení [23].

2.4.1 Mechanismy opotřebení břitu nástroje

2.4.1.1 Abrazivní otěr

Tento mechanismus opotřebení je velmi častý. Vzniká hlavně vlivem působení tvrdých částic v materiálu obrobku. Princip je podobný broušení, kdy se tvrdé částice dostávají mezi povrch obrobku a povrch nástroje. Schopnost břitu nástroje odolávat abrazivnímu otěru je závislá převážně na jeho tvrdosti. Břit s hustou strukturou tvrdých částic snadněji odolává abrazivnímu opotřebení, avšak nemusí být odolný vůči jiným mechanismům opotřebení. Abrazivní otěr je nejvýznamnější při nízkých řezných rychlostech, kdy se obráběný a řezný

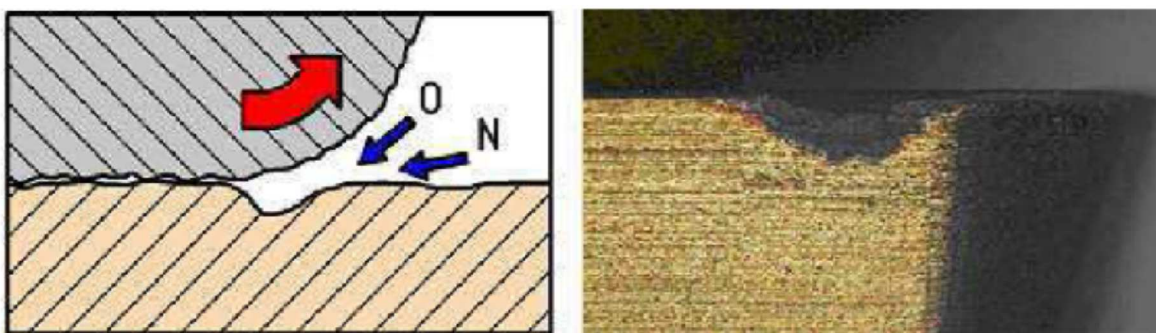
materiál dotýkají na vrcholcích mikronerovností. Brusný otěr je významný především při obrábění nástroji z nástrojových a rychlořezných ocelí [30].

2.4.1.2 Difuzní otěr

K tomuto mechanismu dochází při působení chemických vlivů v průběhu obrábění. Chemické vlastnosti řezného materiálu a jeho afinita vůči obráběnému materiálu jsou rozhodujícími faktory pro vznik a průběh difuzního opotřebení. Tvrdost materiálu má v tomto případě jen nepatrný vliv. Některé řezné materiály vůbec nereagují s materiálem obrobku, naopak jiné mají k materiálu obrobku vysoký stupeň afinity. Vysoká afinita mezi oběma materiály má vliv na rozvoj difuzního opotřebení, které se projevuje vznikem žlábků na čele břitu nástroje. Vysoký tlak a teplota v místě řezu podporují vznik chemických reakcí mezi oběma materiály. Toto opotřebení lze redukovat snížením teploty v místě řezu, která je ovlivňována velikostí řezné rychlosti [30, 31].

2.4.1.3 Oxidační otěr

Podobně jako u difuzního mechanismu i tady dochází ke vzniku opotřebení za vysokých teplot. Vysoké teploty v kombinaci s okolním vzduchem mají za následek oxidaci nástrojového materiálu. Vzniklé oxidy mají odlišné vlastnosti. Například wolfram a kobalt tvoří porézní oxidy, které jsou odnášeny třískou. Oxid hlinitý je zase naopak mnohem pevnější a tvrdší. Lze tedy konstatovat, že některé řezné materiály jsou náchylnější k oxidačnímu opotřebení. Speciálně v místě konce kontaktu třísky a nástroje má vzduch přístup do řezného procesu (viz. obr.2.18). V tomto místě dochází při volbě nevhodných parametrů (velikost řezné rychlosti či volba typu karbidu) ke vzniku hlubokých drážek (oxidačních rýh), které jsou jedním z významných kritérií ovlivňující životnost nástroje. Tyto rýhy postupně vedou k tvorbě výmolu na čele nástroje [30, 31].



Obr. 2.18 Přísun vzduchu v místě konce kontaktu třísky a nástroje [40].

2.4.1.4 Adhezivní otěr

K adhezivnímu otěru dochází při obrábění s malou řeznou rychlostí, kdy je teplota na čele břitu nízká. Adhezivní otěr je způsoben vytrháváním částic břitu v důsledku adhezivních spojů mezi materiálem obrobku a nástroje. Otěr je nejvýraznější při nižších řezných rychlostech, kdy dochází k tvorbě nárůstků, které mění geometrii břitu nástroje. Sklon k vytváření nárůstků je specifický pro daný materiál. Nejčastěji se nárůstky tvoří u nástrojů

z NO (nástrojové oceli) a HSS (rychlořezné oceli). Rovněž materiál obrobku ovlivňuje tvorbu nárůstku. Zvláště náchylné jsou slitiny hliníku či korozivzdorné oceli [30, 31].

2.4.3 Formy opotřebení nástroje

2.4.3.1 Otěr na hřbetu nástroje

Otěr hřbetu patří k opotřebení, která jsou předvídatelná a kontrolovatelná. Hlavní příčinou otěru je abraze. Kobalt opouští základní strukturu, karbidová zrna ztrácejí původní adhezi a vylamují se. Opotřebení se projevuje jako odbroušení po celé funkční ploše. Toto opotřebení nastává vždy a u všech materiálů. Pokud se nějaký jiný mechanismus opotřebení neprojeví dříve, použitelnost každé destičky skončí právě na otěru hřbetu nástroje (viz. obrázek 2.19). Tomuto opotřebení nelze předcházet, lze pouze kontrolovat rychlost jeho vzniku [23].

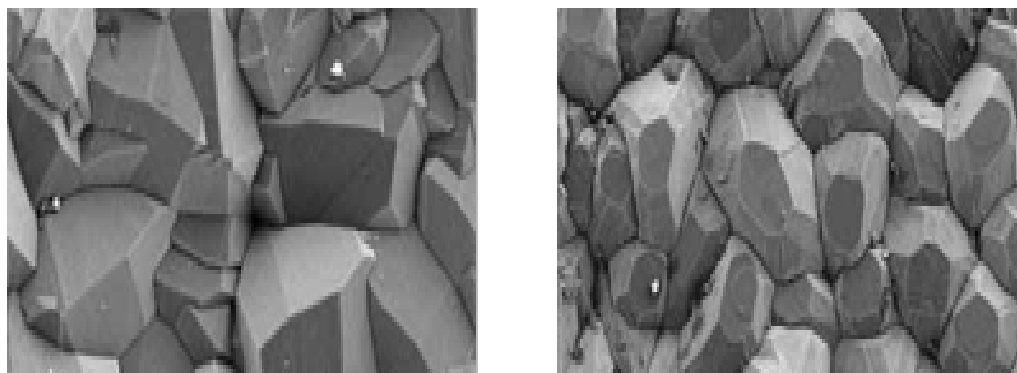


Obr. 2.19 Otěr na hřbetu nástroje [23].

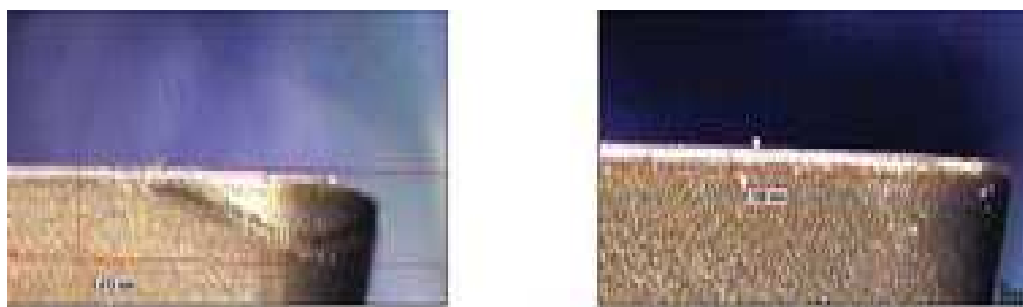
Pokud se opotřebení hřbetu projeví příliš rychle, lze tuto rychlost ovlivnit [23, 29]:

- snížením řezné rychlosti v_c ,
- zvýšením posuvu,
- zvolit otěruvzodrnější povlak – například Duratomic (firma SECO),
- použít účinnější chlazení.

Povlak Duratomic, který vyvinula firma SECO TOOLS, je odolný PVD povlak s houževnatou atomovou strukturou. Tyto vlastnosti se získají unikátním uspořádáním atomů hliníku a kyslíku. Manipulací s atomovou strukturou je získán hladší povrch na břitu nástroje, což snižuje tření a teplo v řezu. Tyto změny vedou k redukci tvorby nárůstků na břitu, zlepšení kvality obrobeneho povrchu, menší opotřebení nástroje, vyšší životnost nástroje a schopnost vyšších řezných podmínek. Porovnání povlaků Duratomic a běžného povlaku je znázorněno na obr. 2.20 a 2.21 [29].



Obr. 2.20 Porovnání povrchu povlaku – vlevo klasický povlak (Al_2O_3), vpravo povlak Duratomic [29].



Obr. 2.21 Opotřebení na hřbetě nástroje – vlevo běžný povlak, vpravo povlak Duratomic [29].

2.4.3.2 Plastická deformace břítu

Hlavní příčinou vzniku plastické deformace břítu je tepelné a mechanické přetížení, které způsobí měknutí pojiva slinutého karbidu (kobalt). Při obrábění je na břit nástroje vyvíjen tlak, který deformuje ostří. Tato deformace ostří může výrazně ovlivnit rozměr obrobku. K plastické deformaci dochází při obrábění vysokými řeznými rychlostmi v_c či v kombinaci vysoké řezné rychlosti a vysokého posuvu (viz. obr. 2.22) [23].



Obr. 2.22 Plastická deformace břítu nástroje [23].

Možná opatření [23,29]:

- snížení posuvu a změnou hloubky řezu,
- zvýšení řezné rychlosti (může se zvětšit otěr na hřbetu nástroje),
- změna geometrie břitu,
- volba odolnějšího povlaku – například Duratomic.

2.4.3.3 Tvorba nárůstku

Nárůstek vzniká především díky adhezi materiálu. Nárůstek se nejvíce tvoří tam, kde je vysoká chemická afinita, vysoký tlak a teplota. Po tvorbě nárůstku následuje jeho odlomení, při kterém se neodstraní pouze nárůstek, ale i částice břitové destičky. Při opakování tohoto procesu dochází k vyštipování ostří a rychlejšímu opotřebení hřbetu nástroje. Nárůstek ovlivňuje kvalitu a rozměrovou přesnost obrobené plochy. Tvorbu nárůstku ovlivňuje velikost řezné rychlosti v_c . Při vyšších rychlostech tvorba nárůstku ustupuje [23].



Obr. 2.23 Nárůstek [23].

Možná opatření [23, 29]:

- tvorbu nárůstku lze eliminovat povlakem břitové destičky,
- zvýšit řeznou rychlost nebo posuv,
- použít ostřejší geometrii břitu a hladší plochu čela,
- volba odolnějšího povlaku - například Duratomic.

2.4.3.4 Výmol na čele nástroje

K tvorbě výmolů přispívá difuze v kombinaci s abrazivním opotřebením a porušením struktury. Vlivem vysokých teplot, které doprovázejí proces obrábění, se uvolňují zrna karbidu wolframu a uhlík ze základní struktury destičky a pojí se na materiál třísky (difuze). Při uvolňování těchto prvků se na čele destičky vytváří výmoly, které mohou být i tak velké, že způsobí vydrolování ostří. Výmol se projevuje jako jamka na čele břitu nástroje (viz. obr. 2.24), která v počáteční fázi může paradoxně napomáhat v utváření třísek [23].



Obr. 2.24 Výmol na čele nástroje [23].

Možná opatření [23, 29]:

- intenzivně chladit,
- snížit řeznou rychlost a posuv,
- volba odolnějšího povlaku - například Duratomic.

2.4.3.5 Vrubu na ostří

Pokud je povrch obrobku tvrdší a abrazivnější než v jádře materiálu, dochází k rychlému opotřebení ostří nástroje (viz. obr. 2.25). Tento rozdíl tvrdostí je výsledkem zpevnění povrchové vrstvy z předchozího obrábění, nebo technologií výroby dílců (výkovky, odlitky). Vznik vrubu je podporován místním zatížením. Při tlakovém zatížení břitu a zároveň odlehčení na čelní ploše ostří je největší namáhání v místě, které odpovídá hloubce řezu a_p . Vrub na ostří může vzniknout také díky drobným nepravidlostem v průběhu řezu nebo tvrdými mikročásticemi na povrchu obrobku [23].

Možná opatření [23]:

- snížit posuv a změnit hloubku řezu,
- zvýšit řeznou rychlost, což do jisté míry sníží intenzitu tvorby vrubu, ale zvýší otěr na hřbetu nástroje,
- zvolit řeznou geometrii pro vysokoposuvové obrábění,
- zabránit tvorbě nárůstků.



Obr. 2.25 Vrub na ostří nástroje [23].

2.4.3.6 Tepelné hřebenové trhliny

Toto opotřebení vzniká vlivem rychlých změn teploty ostří, tepelného a mechanického zatížení. Trhliny se tvoří kolmo k ostří a to po celé délce břitu nástroje (viz. obr. 2.26). Po vytvoření trhlinek velmi často následuje vylomení částic karbidu a vyštipování břitu. Tepelné trhliny se nejčastěji tvoří při frézování, soustružení s přerušovaným řezem či u operací s nepravidelným přívodem chlazení [23].



Obr. 2.26 Trhliny na ostří nástroje [23].

Možná opatření [23]:

- snížit posuv a řeznou rychlost,
- intenzivně chladit,
- zvolit lehce řezající geometrii břitu nebo povlak pro snížení teploty.

2.4.3.7 Vylamování ostří

Toto opotřebení není příliš časté, je snadno zaměnitelné s vrubem na ostří nástroje. Příčinou vzniku je tříška, která díky svému tvaru a směru odvodu z místa řezu, zasáhne nevyužívanou část ostří. Opotřebení se projevuje vylomením části ostří, která není v řezu (viz. obr. 2.27). Tato situace nastává nejčastěji při kombinaci vysokých posuvů a velkých hloubek řezu [23].

Možná opatření [23]:

- změna posuvu či hloubky řezu,
- zvolit jinou geometrii utvařeče třísek,
- použití houževnatější řezný materiál.



Obr. 2.27 Vylomení ostří vlivem příliš krátkých třísek [23].

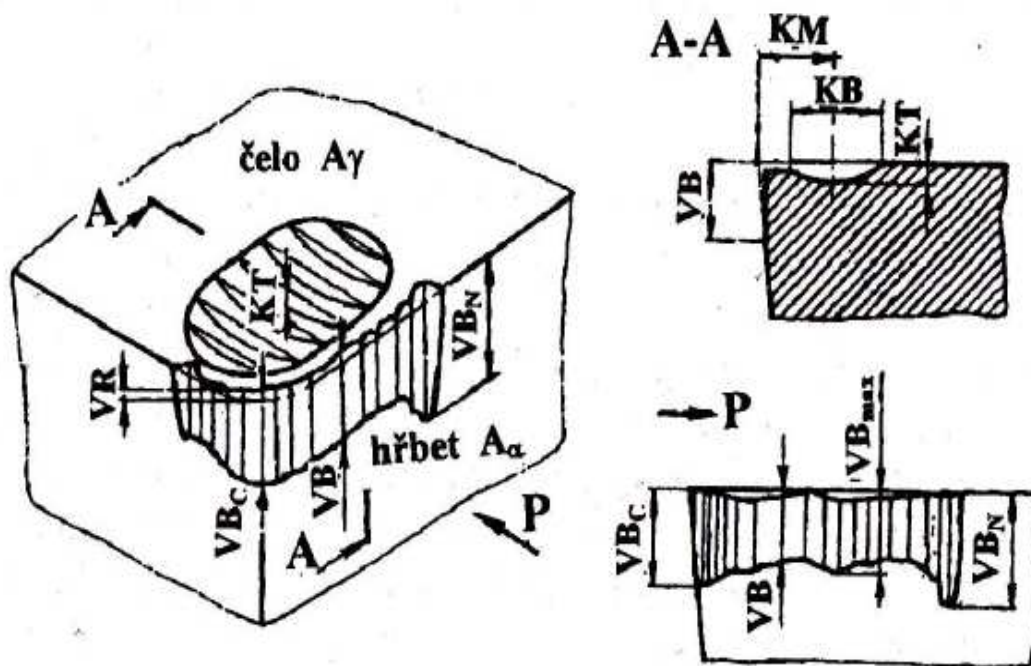
2.4.4 Kvantifikace opotřebení břitu nástroje

Opotřebení břitu nástroje lze kvantifikovat přímou či nepřímou metodou. Přímá metoda se zabývá studiem stavu břitu nástroje, nepřímá metoda spočívá v pozorování změn v průběhu obrábění [30].

2.4.4.1 Přímé metody zjišťování opotřebení

Mezi přímé metody zjišťování opotřebení nástroje patří [33]:

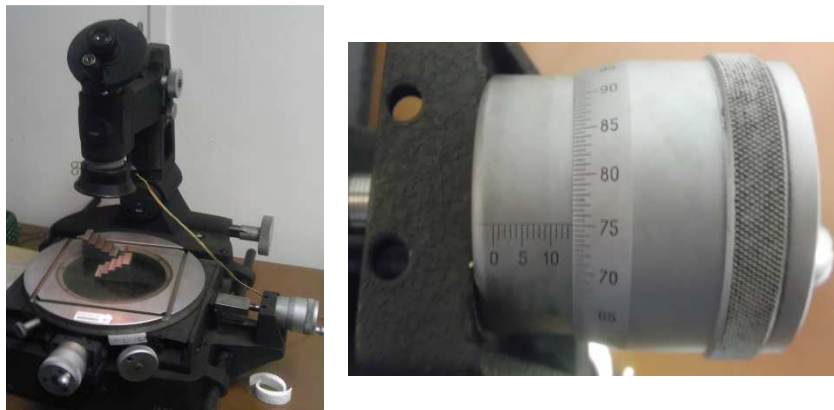
- měření vybraného kritéria
 - VB – měření pomocí dílenského mikroskopu (viz. obr 2.28),
 - KT – měření číselníkovým úchylkoměrem (dělení po 0,01 mm) s ostrým hrotem,
 - VR – měření délkoměrem.
- vážení VBD
- optické sledování funkční plochy
- metody elektrické
 - Indukční metoda,
 - Ultrazvuková metoda.



Obr. 2.28 Kritéria opotřebení břitu nástroje [30].

Kde: VB [mm] - průměrné opotřebení hřbetu
 KT [mm]- hloubka žlábků na čele
 VB_c [mm] - opotřebení hřbetu v oblasti špičky
 KB [mm] - šířka žlábků na čele nástroje
 VB_N [mm]- opotřebení hřbetu vrubové
 KM [mm]- poloha středu žlábků
 VR [mm]- radiální opotřebení špičky nástroje

V praxi se nejčastěji používá měření opotřebení VB a KT, které jsou vyobrazeny na obr. 2.28.

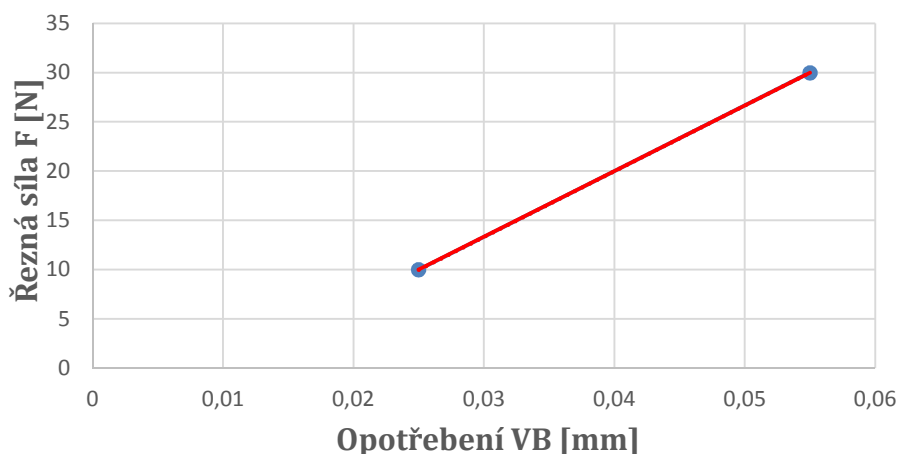


Obr. 2.29 Dílenský mikroskop na VUT-FSI, vpravo detail noniusu zmiňovaného zařízení.

2.4.4.2 Nepřímé metody zjišťování opotřebení

Do této skupiny patří metody, které nevyžadují žádné speciální vybavení, ale je zapotřebí obsluhy stroje, která některé z následujících změn zaznamená [33]:

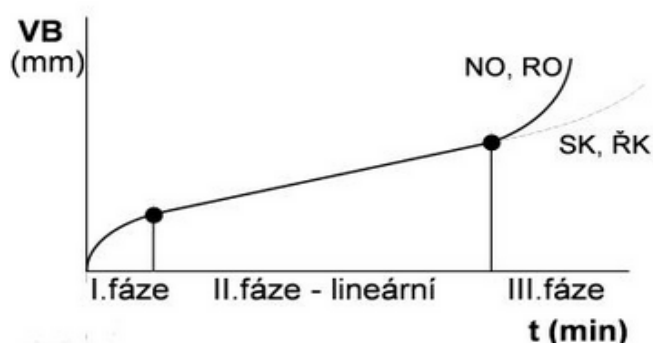
- nedodržení požadovaných rozměrů a drsnosti povrchu obrobku,
- nárůst řezných sil a příkonu stroje (viz. obr. 2.30),
- zvýšená teplota v místě řezu,
- výskyt druhotných projevů opotřebení, jako jsou například vibrace, hluchost atd...



Obr. 2.30 Příklad závislosti řezné síly na opotřebení nástroje [32].

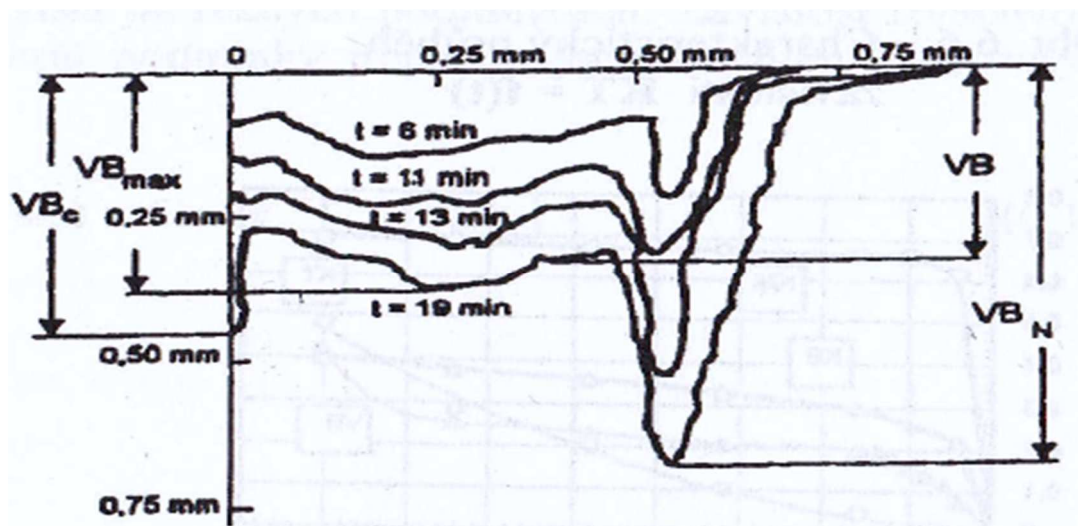
2.4.5 Časový průběh opotřebení hřbetu nástroje

Ihned po započetí obrábění s novým či nově naostřeným nástrojem se postupně začíná opotřebovat jeho břit. Rychlost opotřebení není konstantní, a tak je pro snadnější popis průběhu závislosti $VB=f(t)$ použito několika intervalů, které odpovídají určitým oblastem (viz. obr. 2.31). Na obrázku 2.32 je znázorněn časový průběh opotřebení [30].



Obr. 2.32 Průběh závislost $VB=f(t)$ [34].

- I.fáze – oblast, kde je rychlost opotřebení ovlivněna „záběhem“ nástroje. Nový nebo nově naostřený nástroj je zatěžován vysokým měrným tlakem na hřbetu, na jehož povrchu se nacházejí vrcholky mikronerovností. Dalším významným faktorem je defektnost povrchové vrstvy břitu, která je důsledkem ostření nástroje (mikrotrhliny) nebo jejich výrobou (slinování SK) [30].
- II.fáze – opotřebení je lineárně závislé na čase obrábění (intenzita opotřebení je konstantní) [30].
- III.fáze – v počátečním bodě této oblasti dosahuje teplota v místě řezu takových hodnot při nichž klesá tvrdost rezného materiálu. Důsledkem této změny je zrychlené opotřebení břitu nástroje [30].



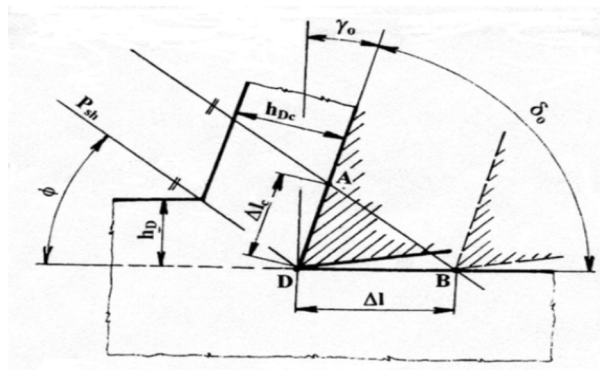
Obr. 2.33 Časový průběh opotřebení hřbetu nástroje [30].

3 PRODUKTIVNÍ OBRÁBĚNÍ TITANOVÝ SLITIN

Trendem dnešní doby je zvyšování produktivity výroby. Pro splnění těchto požadavků bylo nutné vyvinout technologie, které svými výrobními parametry dosáhnou snížení výrobních časů a výrobních nákladů. V této kapitole jsou popsány soudobé technologie pro produktivní obrábění titanových slitin. Jsou to například technologie vysokorychlostního obrábění (HSC), vysokoposuvového obrábění (HFC), vysokoproduktivního obrábění (HPC) a obrábění s asistencí laserového paprsku (LAM).

3.1 Vysokorychlostní obrábění HSC (High Speed Cutting)

Obecně lze HSC definovat jako technologie, při kterých řezná rychlost dosahuje 5–10 x vyšších hodnot než při konvenčním obrábění. Při vysokorychlostním obrábění se teplota třísky blíží k teplotě tavení daného materiálu (např. přibližně 600 °C pro hliník, 1000 °C pro bronz, 1300 °C pro šedou litinu, 1600 °C pro titan a 1500 °C pro ocel). Na proces obrábění má nejvýraznější vliv řezná rychlost v_c , která má ovlivňuje množství vyvinutého tepla. Rostoucí řezná rychlost vede ke zvýšení množství práce, potřebné k řezání, která se skoro celá transformuje na teplo (cca 98%). Zbývající práce jsou potřebné na pružné deformace, práce na deformaci krystalové mřížky kovu a tvorbu nových povrchů. Při určité hodnotě řezné rychlosti náhle dochází ke změně řady chemických, metalurgických a mechanických vlastností třísky. Tříska při průchodu střížnou rovinou náhle zvýší teplotu v celém svém průřezu, což má za následek změknutí a snížení přítláčné síly na čelo nástroje. Zároveň klesne třecí síla i celkový řezný odpor, zvětší se úhel smykové roviny a zmenší se průřez třísky. Současně se zvýší rychlost odvodu třísky z kontaktní zóny. Vlivem vysoké odchozí rychlosti nestačí tříska předat teplo nástroji ani obrobku, proto většina produkovaného tepla odchází třískou (cca 98%). I přes nárůst tepla se sníží opotřebení nástroje. Díky poklesu řezných sil a snížení tepelného namáhání obrobku se zvýší přesnost obrábění. Řezná rychlost má velký vliv na primární plastické deformace třísky a na řezné síly. Při zvýšení řezné rychlosti se zvětší i úhel střížné roviny ϕ . Současně se zmenšuje primární plastická deformace, tudíž i součinitel pěchování třísky k . Se zmenšováním součinitele pěchování třísky se zmenšuje délka kontaktní plochy tříska-čelo ΔL a vzrůstá rychlost odchodu třísky po čele. V porovnání s konvenčním obráběním dochází s rostoucí řeznou rychlostí k poklesu normální síly N i třecí síly T . Současně vzrůstá rychlost odchodu třísky po čele, což vede k růstu tepla Q vzniklého za jednotku času v oblasti sekundární plastické deformace v důsledku tření. Na obr. 3.1-2 je načrtnuta geometrie tvorby třísky [5, 6].



Obr. 3.1 Tvorba třísky [2].

Při HSC obrábění vznikají dva druhy třísek, a to tříska soudržná a elementární. Soudržná tříska se podle rozložení plastické deformace dělí na plynulou a článkovitou. Plynulá tříska se vytváří u kovů a slitin s BCC a FCC krystalovou mřížkou s vysokou tepelnou vodivostí a malou tvrdostí (jsou to např. slitiny hliníku nebo oceli s nízkým obsahem uhlíku). Článkovitá souvislá tříska je znakem kovů s HCP krystalovou mřížkou. Tyto kovy se vyznačují nízkou tepelnou vodivostí a vysokou tvrdostí. Do této skupiny patří například titanové a niklové slitiny. Na typ třísky má velký vliv řezná rychlost. Při nízkých řezných rychlostech se může pro jeden obráběný materiál vytvářet plynulá soudržná tříska, při zvyšování řezné rychlosti se začne tvořit soudržná článkovitá tříska. S dalším nárůstem řezné rychlosti se změní soudržná článkovitá tříska na třísku elementární [13].

3.1.1 Řezné podmínky

Aplikace obrábění vysokou řeznou rychlostí, zejména frézování malými průměry nástroje a soustružení, přinášejí významné snížení výrobních časů a výrobních nákladů. Snížení výrobních nákladů a časů je způsobeno nárůstem otáček, které se projeví nejvíce právě u nástrojů s malým průměrem. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi je snaha docílit zvýšení výkonu, kvality obráběného povrchu a životnosti nástroje vyššími otáčkami a posuvy při menší tloušťce třísky, nižších řezných silách a sníženém tepelném ovlivnění obrobku. Nejvhodnější je pracovat v oblasti nejvyšších možných otáček stroje, kdy je výkon a kroutící moment stroje maximální. Toho se hlavně využívá při hrubovacích operacích, kdy je zapotřebí velký výkon vřetene. V tab. 3.1 jsou uvedeny orientační řezné rychlosti a používané řezné materiály [5, 6].

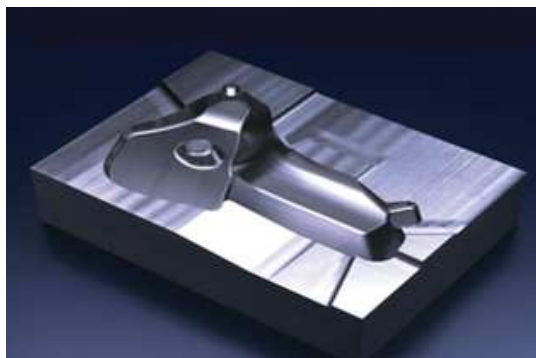
Tab. 3.1 Orientační oblasti HSC obrábění pro vybrané druhy materiálů obrobků [6].

Materiál	Řezná rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	Řezný materiál
Ocel	800-1100	Povlakované SK, ŘK, KNB
Slitiny Ti	150-1000	Povlakované SK
Slitiny Ni	160-280	Povlakované SK, ŘK, KNB
Šedá litina	900-1600	ŘK
Slitiny Al	3000-6000	Polykrystalický diamant
Plasty zpevněné vlákny	2800-8000	Povlakované cermety
Bronzy, mosazi	1100-3000	Povlakované SK, PKD

3.1.2 Výhody a nevýhody technologie HSC

Pomocí vysokých otáček je možné využití vyšší rychlosti posuvu při stejné tloušťce třísky jako při konvenčním obrábění. Vzhledem k tomuto faktu je možno snížit strojní časy. Jako důsledek zvýšené intenzity úběru získáme větší objem odstraněného materiálu (zhruba o 30 % větší než při konvenčním obrábění). Při porovnání technologií HSC a konvenčního obrábění, za dodržení shodných hodnot posuvu a množství odebíraného materiálu, bude tloušťka třísky u metody HSC menší a proto budou i řezné síly nižší. Vzhledem k omezenému času záběru řezného břitu (frézování) je vytvářená tříska obvykle ve formě segmentů. Velká rychlost odvodu třísky zamezí přestupu tepla do nástroje a obrobku, čímž se sníží tepelné deformace a zvýší se přesnost obrobku. Použitím technologií HSC lze získat velmi kvalitní povrch obrobku, a tak lze v určitých případech vynechat následující

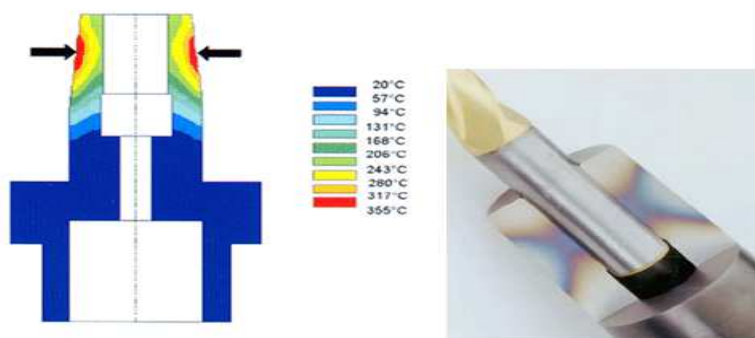
dokončovací operace. Příklad součásti obrobeneé metodou HSC a vynechání dokončovací metody je vyobrazen na obr. 3.2 [5]



Obr. 3.2 Obrobený povrch po HSC frézování [8].

Hlavní nevýhody této metody jsou [6]:

- vyšší investiční a provozní náklady,
- vysoké požadavky na výkon stroje (15-60 kW),
- nutnost použití vyvážených nástrojů,
- vysoké nároky na upnutí nástroje,
- vysoké nároky na házivost vřetene,
- nedostatek technických dat pro HSC obrábění jednotlivých druhů materiálů,
- pro správný a bezpečný provoz technologií HSC je nutno kvalifikované obsluhy stroje.



Obr. 3.3 Příklad ohřevu upínače a upnutí nástroje [12].

3.2 Vysokoposuvové obrábění HFC (High Feed Cutting)

Technologie vysokoposuvového frézování (HFC) spočívá v odebrání obráběného materiálu za poměrně nízkých hodnot a_p (cca 0,4 – 2,0 mm), což má pozitivní vliv na životnost nástroje a umožňuje volit větší rychlosti posuvu. Díky velké rychlosti posuvu je tato metoda v porovnání s klasickým frézováním až třikrát produktivnější (až 1000 cm³ odebraného materiálu za minutu). Zmiňovaná

rychlost posuvu v_f dosahuje až 10 x vyšších hodnot než při konvenčním frézování [37].

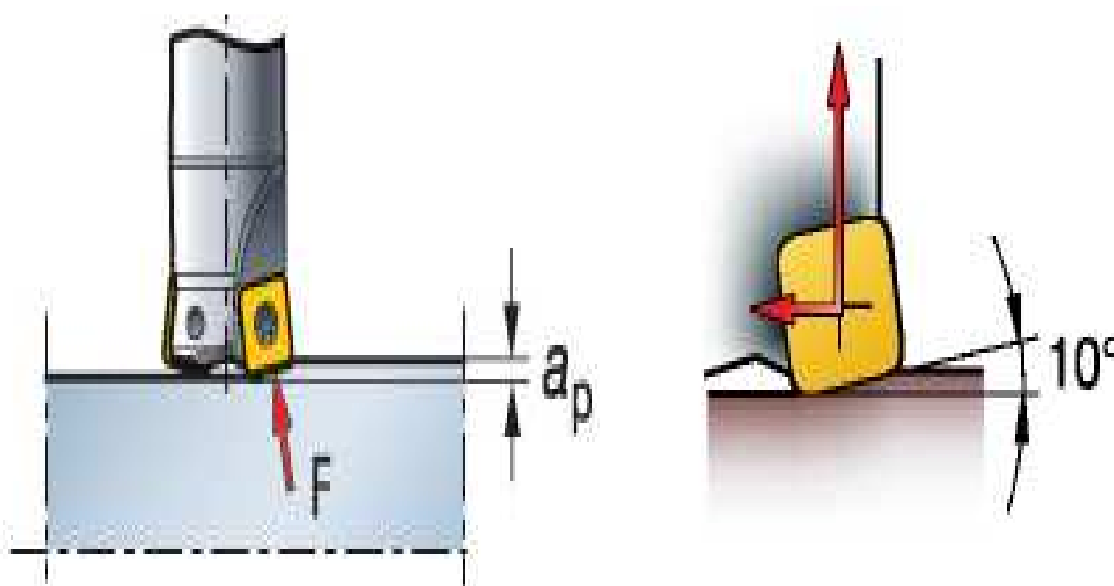
3.2.1 Výhody a nevýhody technologie HFC

Největší výhodou této metody je směr působení výsledné síly při obrábění. Výsledná síla působí do vřetene stroje, což umožňuje větší stabilitu řezného procesu, snížení vibrací a následně i prodloužení životnosti nástroje (viz. obr. 3.4). Změna poměru velikosti axiální a radiální síly je ovlivněna geometrií břitu nástroje.

Díky malému úhlu nastavení ostří je radiální složka síly minimalizována a axiální složka zvětšena. Snížením radiální síly je minimalizován vznik vibrací, a to i u nástrojů s velkým vyložením z vřetene stroje. I když je tato metoda spíše hrubovací operací, lze díky dosahované přesnosti rozměrů vynechat polo-dokončovací operace (semi-finishing) a rovnou po hrubování zahájit dokončování.

Metoda je také vhodná pro obrábění velkých otvorů a kapes, lze totiž vynechat z technologického postupu předvrtávací operace. Na produktivitě obrábění kapes a otvorů má velký vliv zvolená strategie obrábění (kruhová, šroubová interpolace), která ovlivňuje výrobní čas.

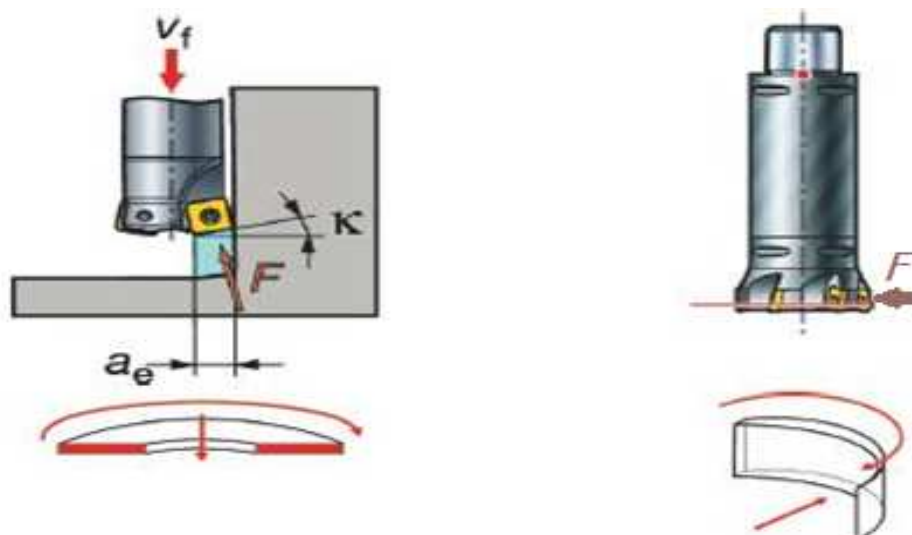
Nevýhodou této metody by na první pohled byla malá hloubka záběru a_p , tento nedostatek je možno minimalizovat zvýšením řezné rychlosti a tím i zvýšení produktivity [37].



Obr. 3.4 Znárodnění směru působení výsledné síly vlivem malého úhlu nastavení ostří nástroje [35].

3.2.2 Axiální frézování

Při axiálním (ponorném) frézování je materiál odebrán čelem nástroje, což umožňuje minimalizaci radiální složky síly (viz. obr. 3.5) [46].

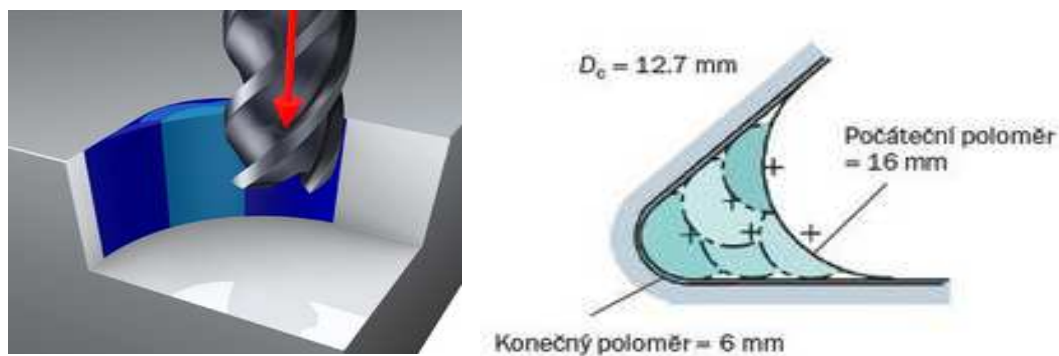


Obr. 3.5 Porovnání silového působení – axiální frézování a frézování obvodem nástroje [46].

Tato metoda je vhodná pro případy, kdy frézování obvodem nástroje nelze použít, a to z důvodu vzniku vibrací nebo menší produktivity.

Například [46]:

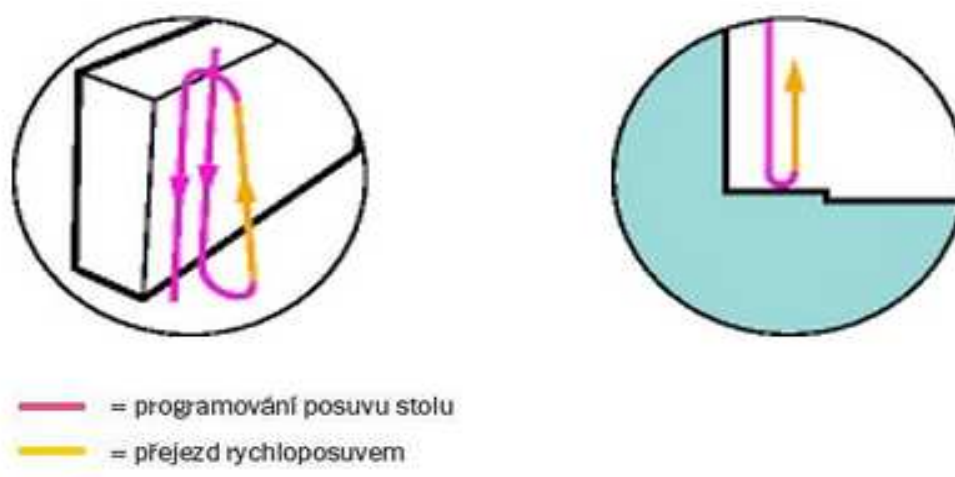
- extrémní vyložení nástroje – více jak $4 \times \phi D$ (průměr nástroje),
- špatná stabilita řezu,
- obrábění obtížně obrobitelných materiálů (například titan a jeho slitiny),
- polodokončovací operace rohů kapes (viz. obr. 3.6),
- nízký výkon stroje a tím nemožnost obrábět jinou technologií.



Obr. 3.6 Ponorné frézování – polodokončovací operace rohů [46].

Obecné rady výrobce Sandvik Coromat [46]:

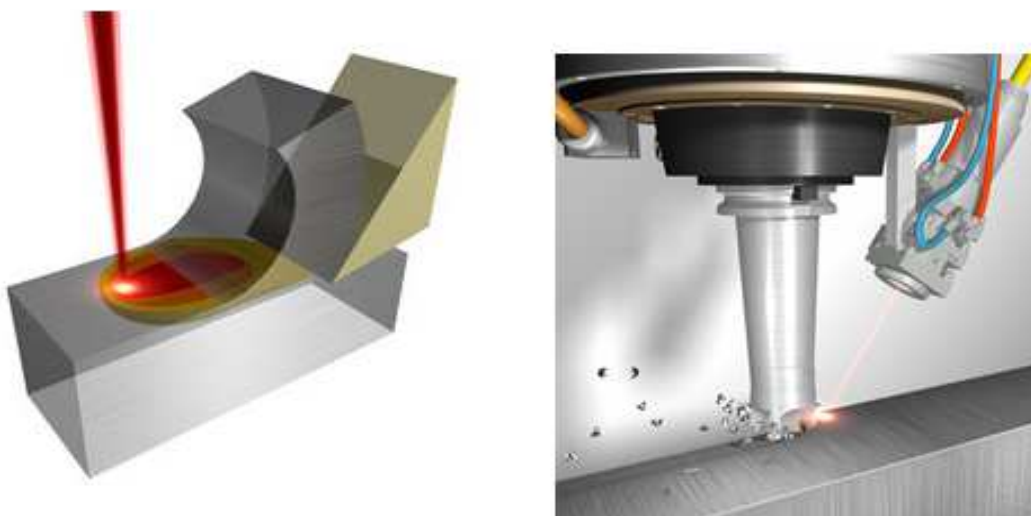
- u strojů s horizontální polohou vřetena je snazší odvod třísek z místa řezu,
- řezná kapalina nebo stlačený vzduch usnadňuje odvod třísek,
- v porovnání s tradičními metodami vyžaduje ponorné frézování použitím menších velikostí posuvu na zub,
- pro ponorné frézování jsou vhodné zejména nástroje s jemnou zubovou roztečí,
- pro maximální produktivitu je třeba volit maximální možnou velikost a_e – v závislosti na velikosti VBD,
- pro zamezení vzniku vibrací je nutné postupně snižovat hloubku ponoru nástroje,
- je vhodné využít programovací smyčky, aby se zamezilo přejezdům po obrobene ploše (viz. obr. 3.7).



Obr. 3.7 Programovací smyčka [46].

3.3 Obrábění s asistencí laseru (LAM – Laser Assisted Machining)

Tato technologie se řadí mezi nekonvenční metody obrábění. Kombinace laseru a třískového obrábění významně usnadňuje obrábění titanových slitin. Externí zdroj tepla (laserový paprsek) je vrhán před nástroj na obráběný materiál (viz. obr. 3.8 a 3.9). Vlivem zvýšení teploty povrchu obrobku se ozářená část před nástrojem změkčí. Vyšší teplotou v oblasti řezu dochází ke snížení Youngova modulu pružnosti (modul pružnosti v tahu), což má za následek snížení deformačního odporu a následnému poklesu řezných sil [38].

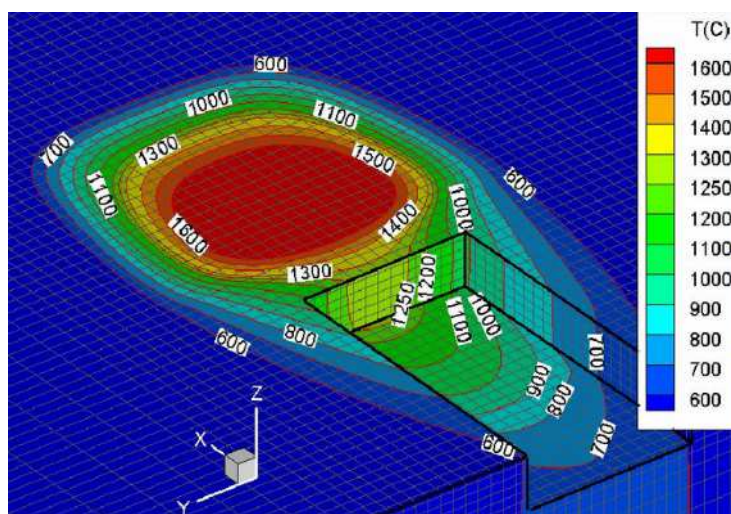


Obr. 3.8 Princip metody LAM - aplikované na frézování [39].

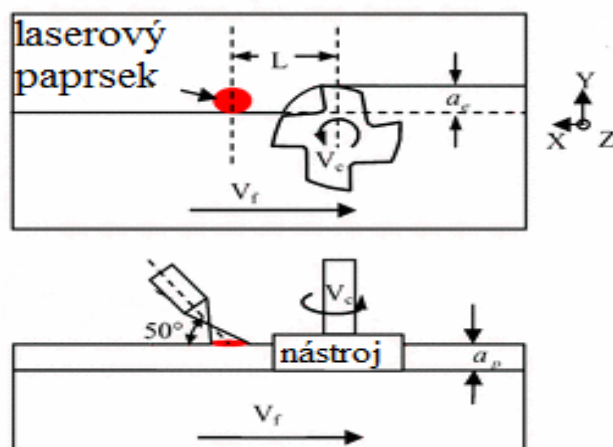
Tato metoda se převážně používá v kombinaci se soustružením, ale stále více přibývá aplikací s frézováním. Kombinace laser + frézování je velmi využívána v leteckém průmyslu [38].

Následující data pochází z experimentu vykonaným za těchto podmínek [38]:

- byl použit YAG laser o výkonu 2,5 kW, materiál obrobku Ti6Al4V,
- paprsek dopadal na obrobek pod úhlem $\alpha = 50^\circ$,
- vzdálenost mezi čočkou laseru a obrobkem 240 mm, což v kombinaci s ohniskovou vzdáleností čočky 200 mm vytvořilo na povrchu obrobku eliptický obrazec o velikosti 5x7 mm (velikosti poloos),
- vzdálenost paprsku od nástroje $L = 43,5$ mm,
- průměr frézy 40 mm, posuv na zub nástroje $f_z = 0,1$ mm, ,
radiální hloubka řezu $a_r = 5$ mm, axiální hloubka řezu $a_p = 1$ mm.



Obr. 3.9 Tepelně ovlivněná oblast [47].



Obr. 3.10 Nákres experimentu [38].

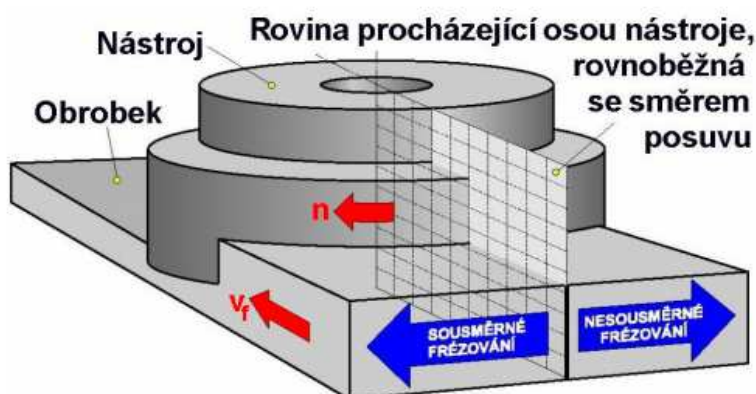
Pomocí dynamometru bylo snímáno silové zatížení v průběhu obrábění. Po tomto pokusu byla tato metoda porovnána s konvenčním frézováním. Metoda s laserem vykazovala velmi dobrou kvalitu obrobeneho povrchu, menší povrchové deformace, snížení silového zatížení během obrábění (až o 55%), delší životnost nástroje a v neposlední řadě vyšší produktivitu výroby. Rovněž tato metoda umožňuje použít vyšší řeznou rychlost [38].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

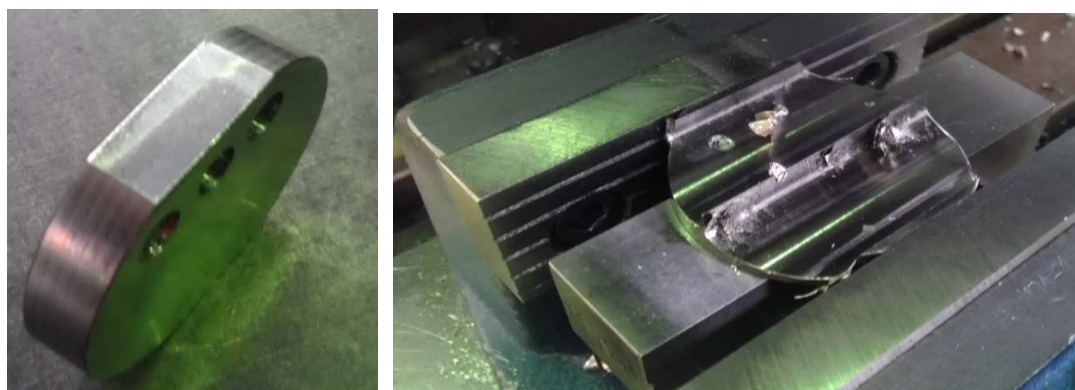
Experimentální část této diplomové práce se zabývá analýzou výrobních nákladů a optimalizací řezných podmínek pro obrábění titanových slitin. Vzhledem k tématu této práce „*Produktivní obrábění titanových slitin*“, byla zvolena technologie vysokoposuvového frézování (HFC). Jako představitel titanové slitiny byla zvolena slitina Ti-6Al-4V, která je hojně používána například v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu nebo například v medicíně (implantáty atd...).

4.1 Popis experimentu

Experiment spočíval ve změnách řezných podmínek (v_c a v_f) při čelním frézování daného vzorku. Hloubka odebírané vrstvy a_p a šířka záběru a_e byly konstantní. Každá varianta řezných podmínek byla použita na 2 průjezdy vykonávané v ose X. V průběhu celého experimentu bylo pomocí dynamometru snímáno silové zatížení v osách X, Y, Z. Získaná data byla zpracována pomocí výpočetní techniky. Dále byla měřena střední aritmetická hodnota drsnosti obrobeného povrchu R_a . Po dokončení experimentu bylo dílenským mikroskopem zjištěno opotřebení hřbetu nástroje. Experiment probíhal v dílně a laboratoři ÚST Odboru technologie obrábění na VUT - FSI v Brně. Zkouška probíhala dle časových, materiálových a nástrojových možností. Ze získaných hodnot byly vyvozeny závislosti $VB = f(v_f)$, $R_a = f(VB)$, $F_c = f(t)$...



Obr. 4.1 Symetrické čelní frézování [1].



Obr. 4.2 Upnutí obráběného vzorku.

4.2 Obráběcí stroj

Pro tento experiment byla zvolena vertikální frézka FD 32V (výrobce TOS, obr. 4.2)), která je díky svým parametrům plně vyhovující.

Parametry stroje:

- rozsah posuvu:
 - Osa X = 1000 mm
 - Osa Y = 320 mm
 - Osa Z = 450 mm
- vnější plocha stolu: 450 x 1450 mm
- otáčky vřetene 45 – 1400 ot./min v 16 stupních
- posuvová rychlost stolu 200 – 2000 mm/min
- kužel vřetene ISO 50
- příkon 14 kW



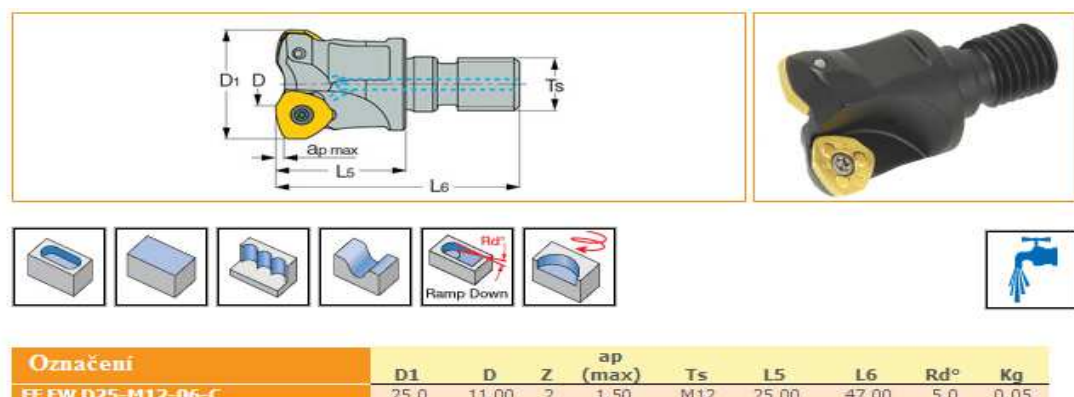
Obr. 4.3 Použitý stroj – vertikální frézka FD 32V.

4.3 Nástroj

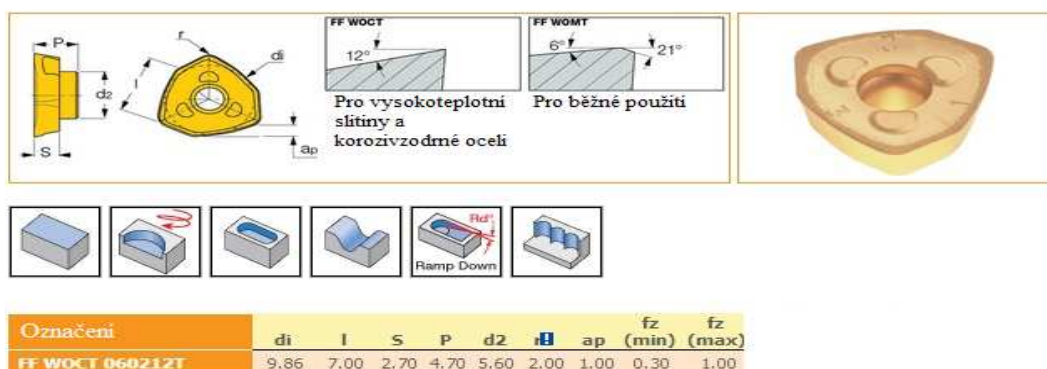
V experimentu byla použita čelní válcová fréza osazená vyměnitelnou břitovou destičkou ze sliutého karbidu. Tělo nástroje (frézovací hlavička) i VBD (viz. obr. 4.4 až 4.6) byly produktem firmy ISCAR a jsou vhodné pro obrábění velkou posuvovou rychlostí. Frézovací hlavička byla upnuta do vřetene stroje pomocí trnu a kleštinového upínače. VBD byla upnuta pomocí šroubku.



Obr. 4.4 Frézovací hlavička na upínacím trnu a doporučené řezné rychlosti pro jednotlivé třídy materiálu.



Obr. 4.5 Technický popis frézovací hlavičky [41].



Obr. 4.6 Technický popis vyměnitelné břitové destičky [42].

4.4 Obráběný vzorek

Při experimentu bylo použito vzorku o rozměrech 58x60x12 mm (d x š x v). Jako typický představitel titanové slitiny byl zvolen materiál Ti6Al4V. Fyzikální a mechanické vlastnosti jsou popsány v tabulce 4. 1 a 4. 2.

Tab. 4. 1 Fyzikální vlastnosti obráběného materiálu [20].

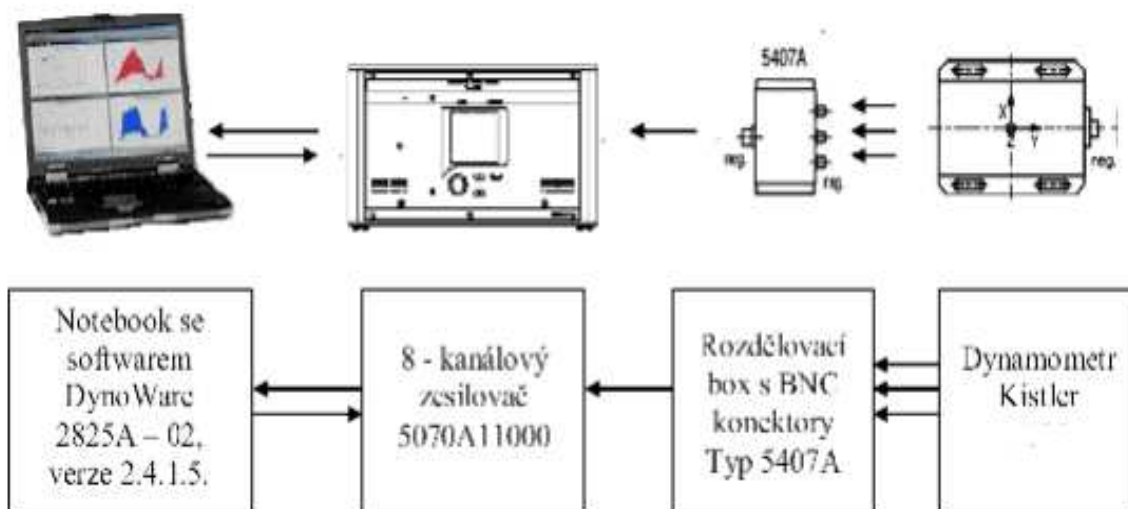
Vlastnost	Běžná hodnota
Hustota	4,42 g/cm ³
Bod tání	1650 °C
Poissonova konstanta	0,3 – 0,33
Měrný elektrický odpor při 25 °C	45·10 ⁻⁶ μΩcm
Tranzitní teplota T _β	999 °C

Tab 4. 2 Mechanické vlastnosti obráběného materiálu [20].

Vlastnost	Běžná hodnota
Mez pevnosti v tahu R _m	900 MPa
Mez kluzu R _e	830 MPa
Youngův modul pružnosti v tahu E	114 GPa
Tvrдость dle Rockwella	36 HRC
Tažnost materiálu A	14 %
Vrubová houževnatost	22 J

4.5 Měřidla použita při experimentu

Pro snímání silového zatížení během řezného procesu, bylo použito dynamometru od firmy KISTLER (katalogové označení 9272B) a 8 - kanálového zesilovače (katalogové označení 5070A). Tato sestava byla nastavena na nejvyšší možný počet snímaných dat (6000 Hz). Data byla zpracována notebookem pomocí softwaru Dynoware. Dynamometr byl před započítím experimentu mechanicky zkalibrován pomocí speciálního zařízení. Schéma měřící aparatury je znázorněno na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Schéma zapojení měřící aparatury [40].

Stanovení střední aritmetické hodnoty drsnosti povrchu (R_a), bylo prováděno pomocí mobilního analogového drsnoměru TR 100 (obr. 4.8). Měřící rozsah tohoto drsnoměru je $0,05 - 15,00 \mu\text{m}$, přesnost tohoto přístroje je $\pm 15\%$. Drsnoměr byl před měřením zkalibrován pomocí etalonu.



Obr. 4.8 Měření drsnosti obrobeného povrchu.

Po dokončení experimentu bylo dílenským mikroskopem (označení VUT 1458) zjišťováno opotřebení břitu nástroje, a to konkrétně kritérium VB (obr. obr. 4.9). Hodnota opotřebení byla získána odečtem hodnot na nóniusu.



Obr. 4.9 Dílenský mikroskop a opotřebení na hřbetu VBD.

4.6 Řezné podmínky použité při experimentu

V průběhu experimentu se měnily vybrané řezné podmínky (řezná rychlost v_c a rychlost posuvu v_f). Hloubka řezu a šířka záběru byly konstantní ($a_p = 1$ mm, $a_e = 25$ mm). Jednotlivé řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4.3. Z důvodu nedostatku obráběného materiálu nebylo možné vyzkoušet všechny varianty řezných podmínek.

Tab. 4.3 Řezné podmínky použité při experimentu.

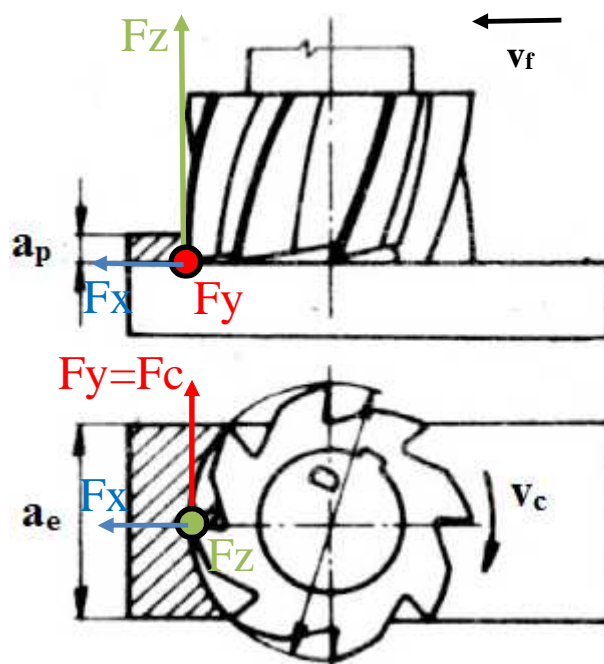
Řezná rychlost [m/min]	Rychlost posuvu v_f [mm/min]					
	200	500	800	1000	1250	1600
70,6	X	X	X	X	-	-
88,0	-	-	-	X	X	-
110,0	-	-	-	-	-	X

Poznámka: označení X – použití řezných podmínek

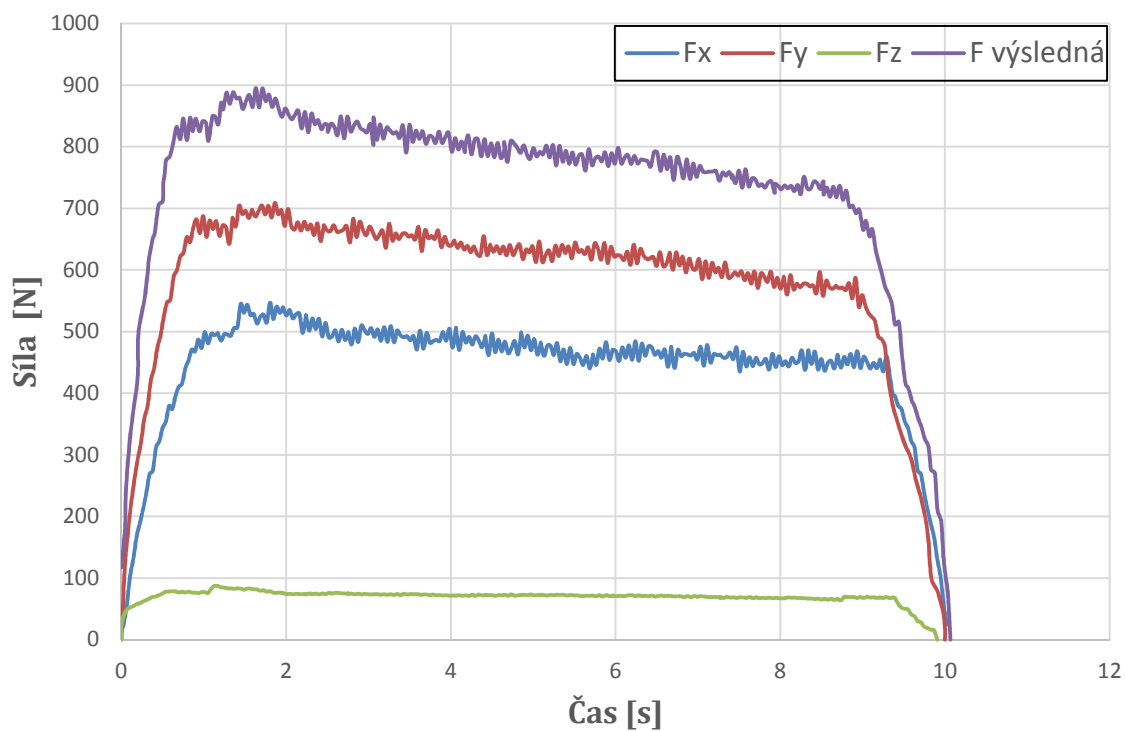
4.7 Výsledky experimentu

V průběhu experimentu bylo snímáno silové působení během obrábění, a to v osách X, Y a Z. Pro snížení pravděpodobnosti chybného měření byly za daných řezných podmínek provedeny 2 průjezdy v ose X. Dále pak byla měřena drsnost povrchu a opotřebení hřbetu nástroje VB. Průběhy silového zatížení, drsnosti povrchu a opotřebení jsou vyznačeny v následujících kapitolách.

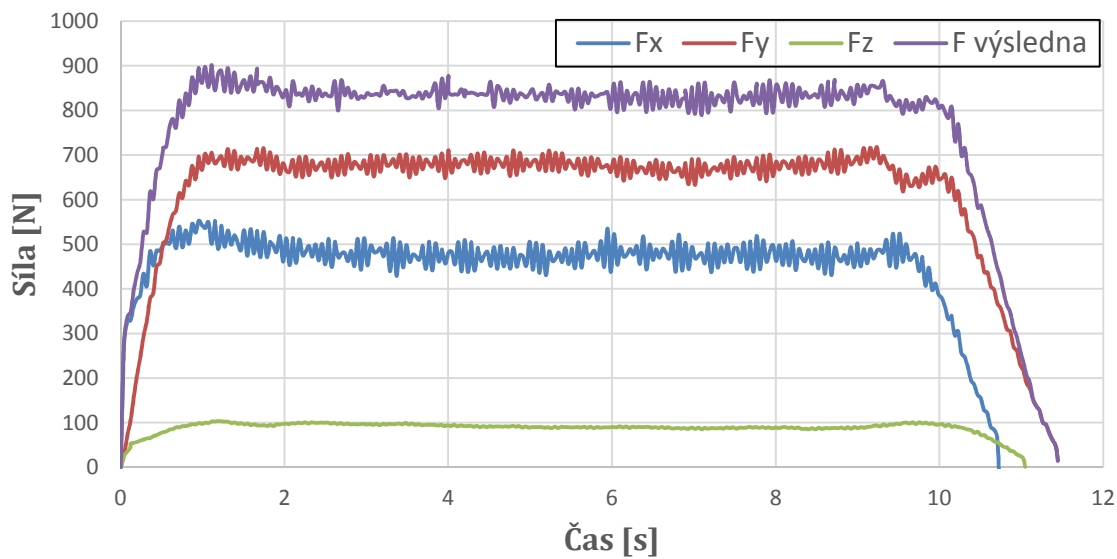
4.7.1 Silové působení a drsnost povrchu



Obr. 4.10 Silové působení při čelním frézování [49].



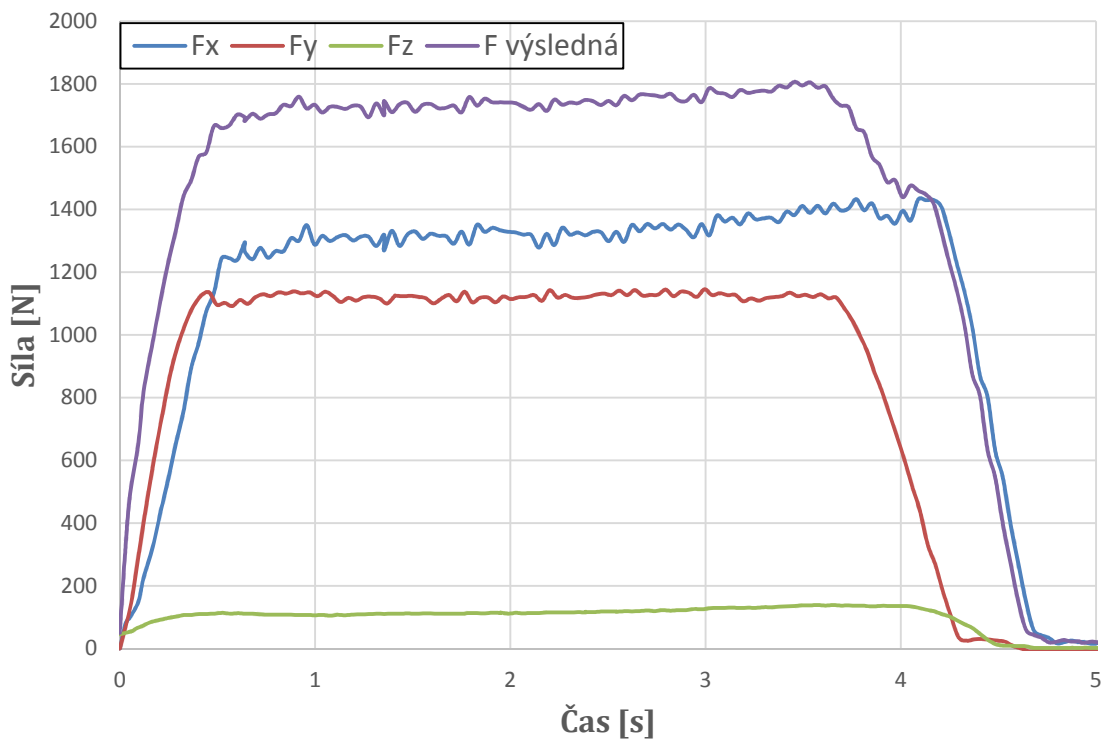
Obr. 4.11 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=200$ mm/min, průjezd č. 1.



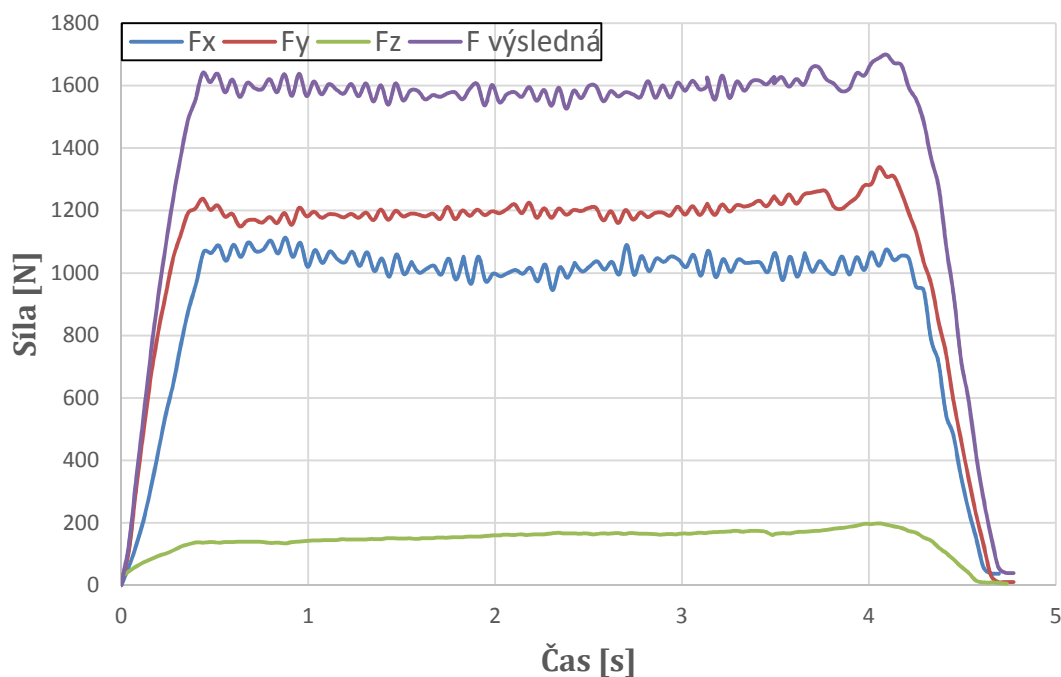
Obr. 4.12 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=200$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.4 Drsnost obroběného povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=70,6$ m/min, $v_f=200$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μm]	2,46	2,55



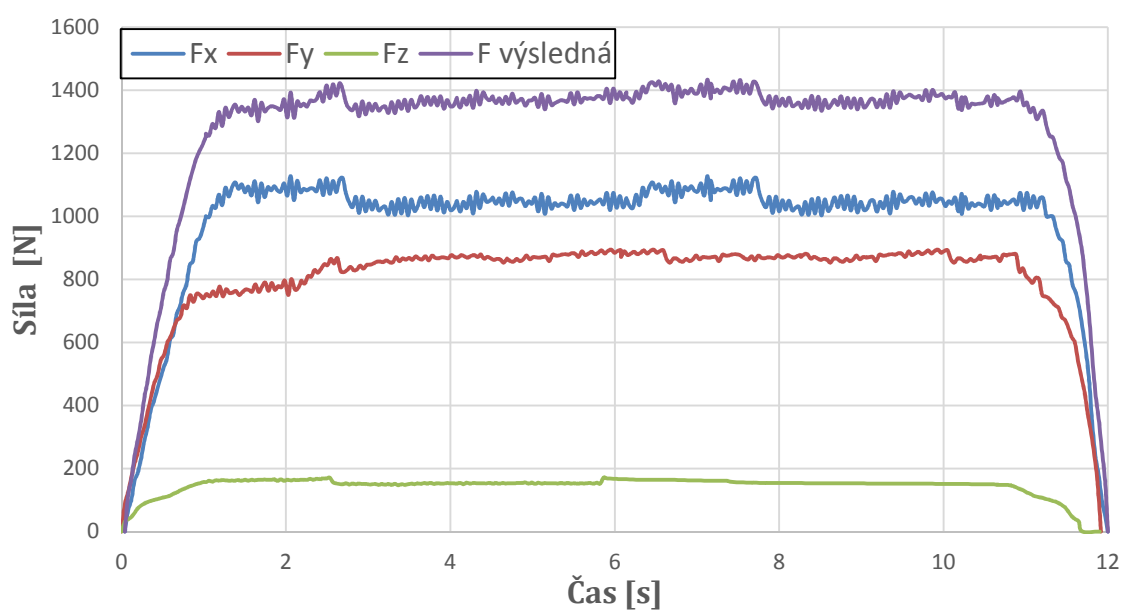
Obr. 4.13 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=500$ mm/min, průjezd č. 1.



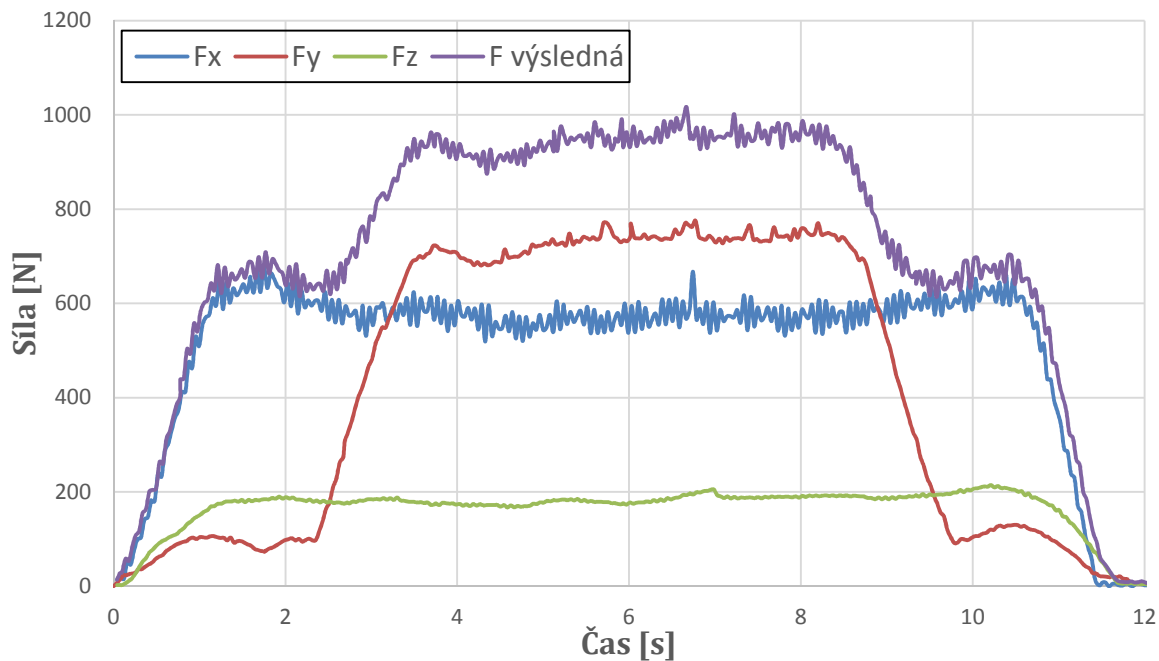
Obr. 4.14 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=500$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.5 Drsnost obrobeneho povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=70,6$ m/min, $v_f=500$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μ m]	2,80	2,57



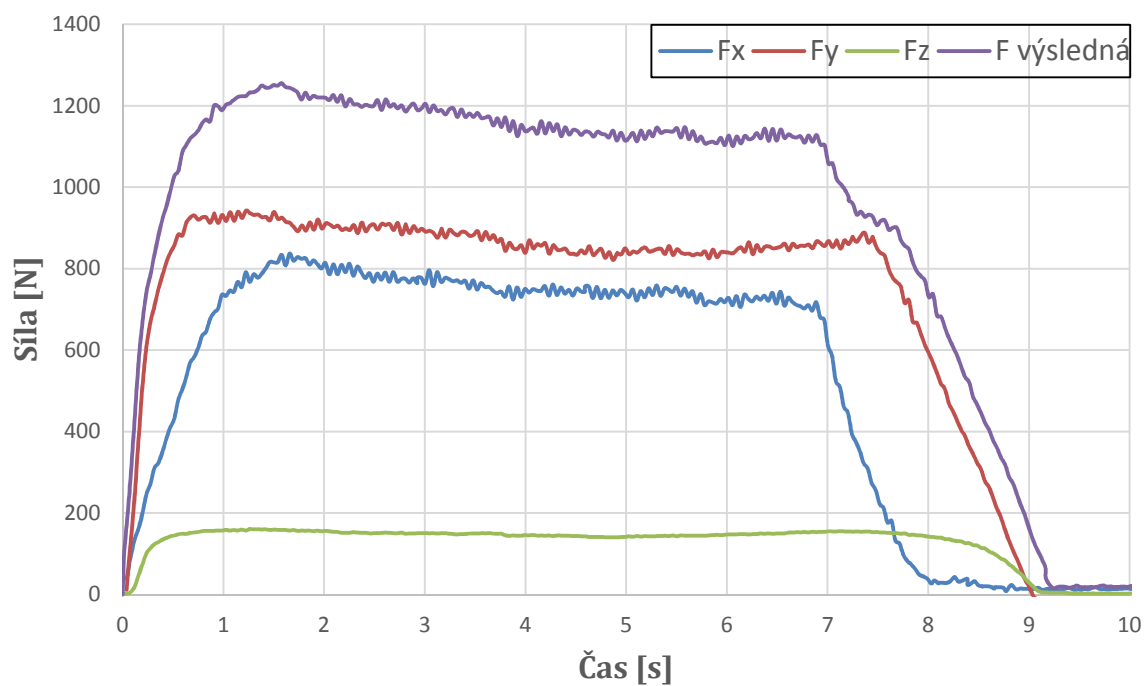
Obr. 4.15 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=800$ mm/min, průjezd č. 1.



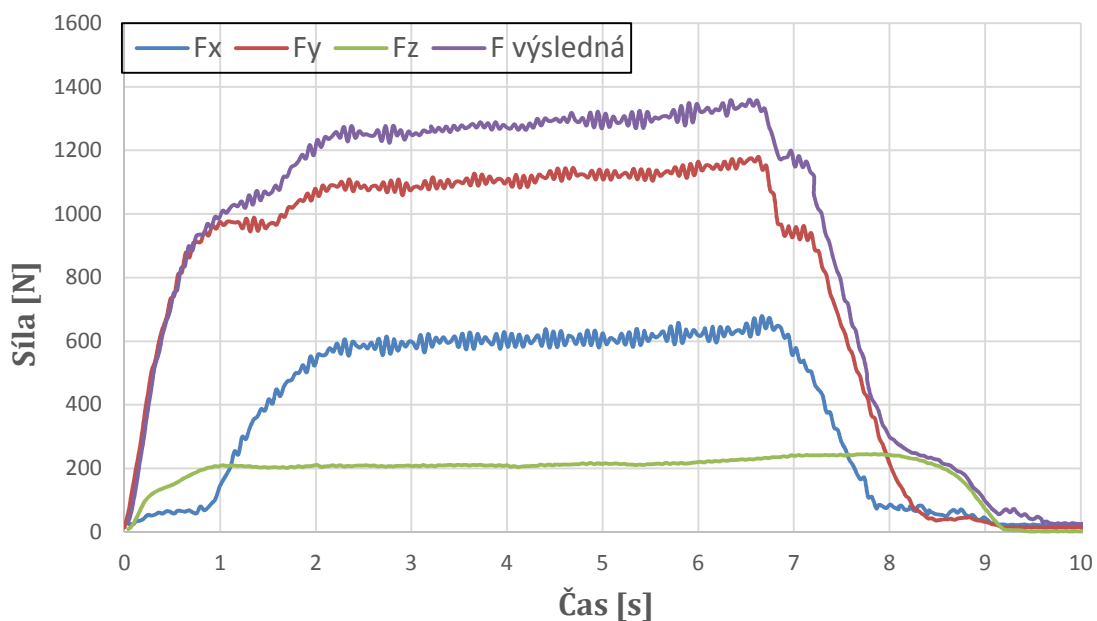
Obr. 4.16 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=800$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.6 Drsnost obroběného povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=70,6$ m/min, $v_f=800$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μm]	2,43	2,71



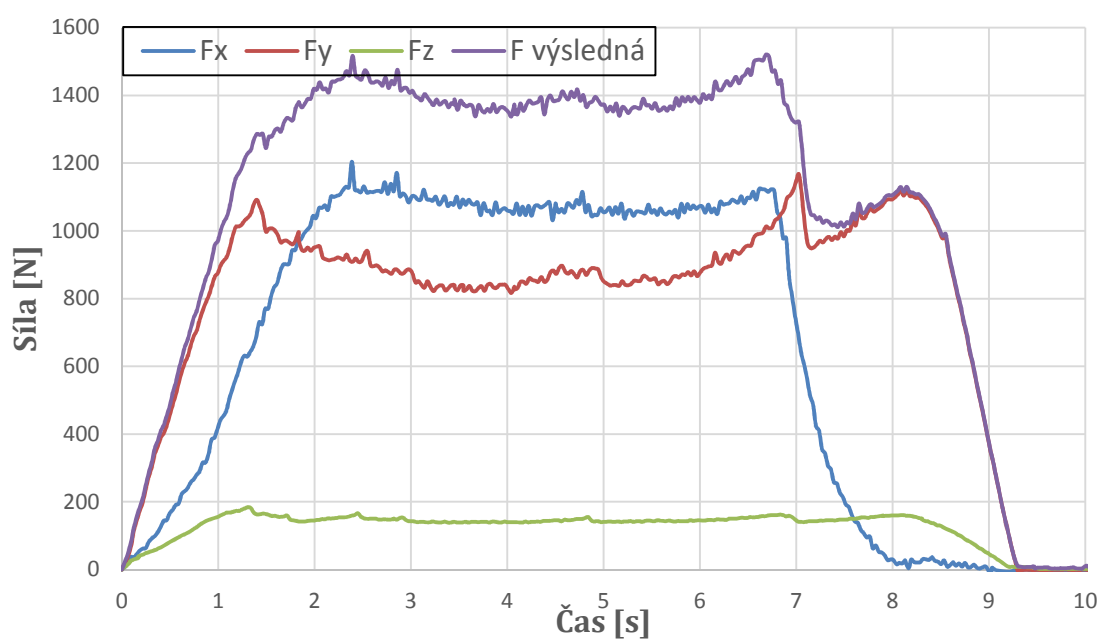
Obr. 4.17 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=1000$ mm/min, průjezd č. 1.



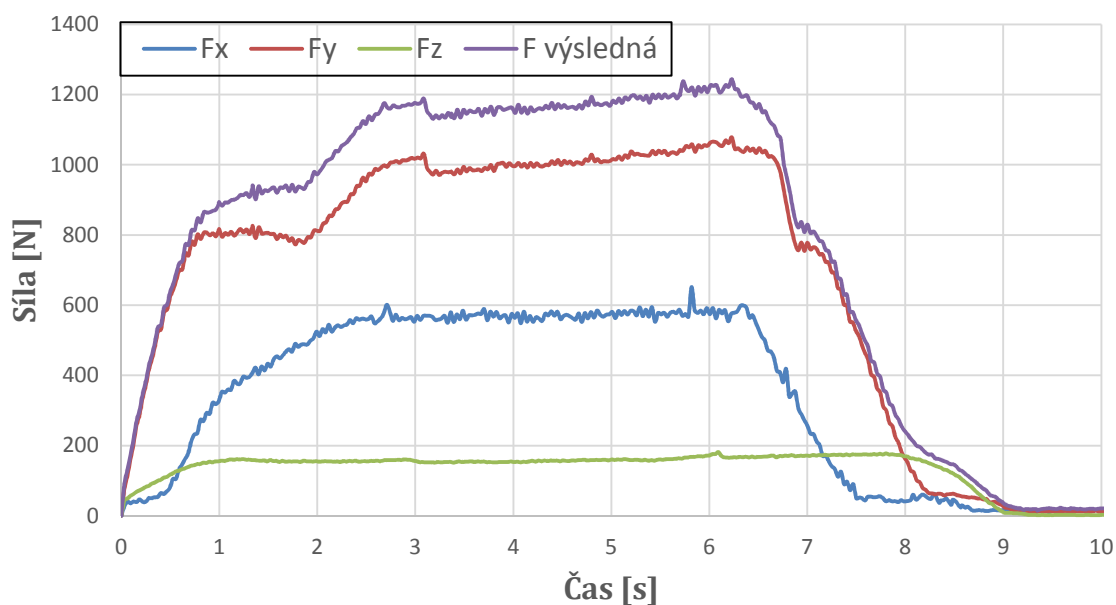
Obr. 4.18 Silové působení při $v_c=70,6$ m/min , $v_f=1000$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.7 Drsnost obrobeneho povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=70,6$ m/min, $v_f=1000$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μm]	1,81	2,14



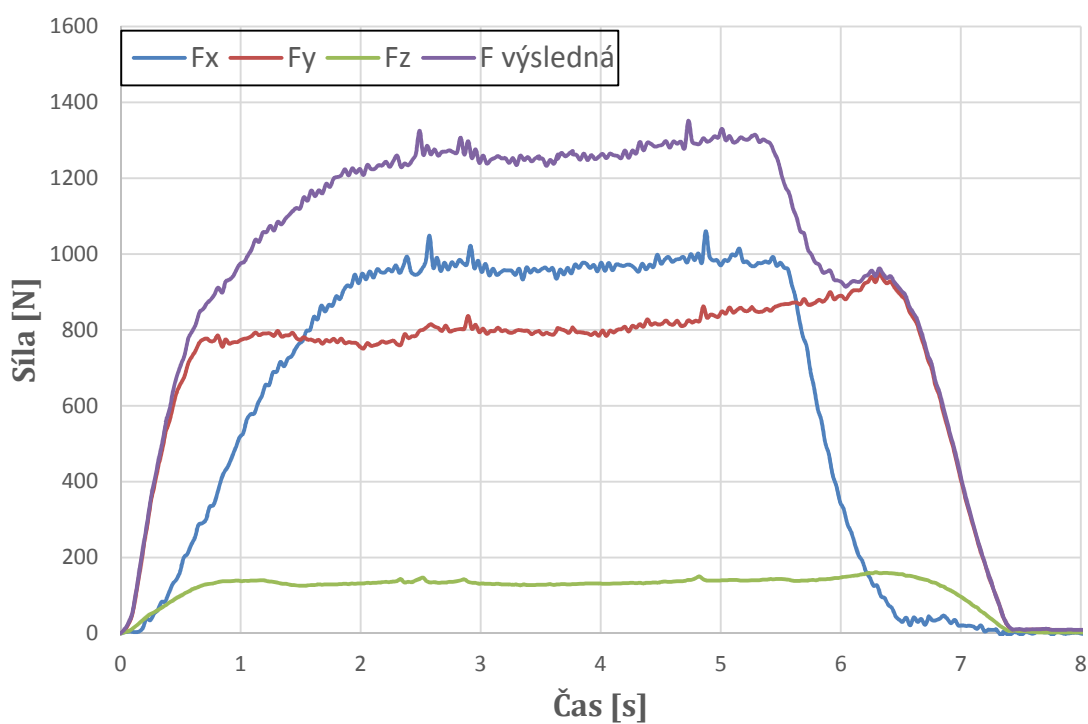
Obr. 4.19 Silové působení při $v_c=88$ m/min , $v_f=1000$ mm/min, průjezd č. 1.



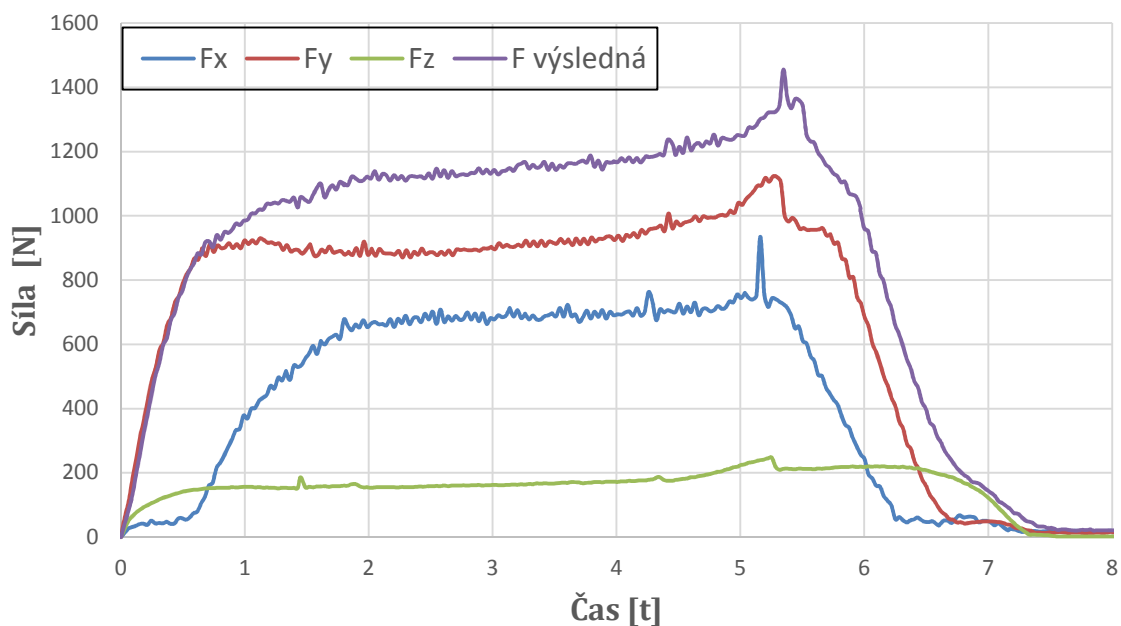
Obr. 4.20 Silové působení při $v_c=88$ m/min , $v_f=1000$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.8 Drsnost obrobeneho povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=88$ m/min, $v_f=1000$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μ m]	1,60	1,78



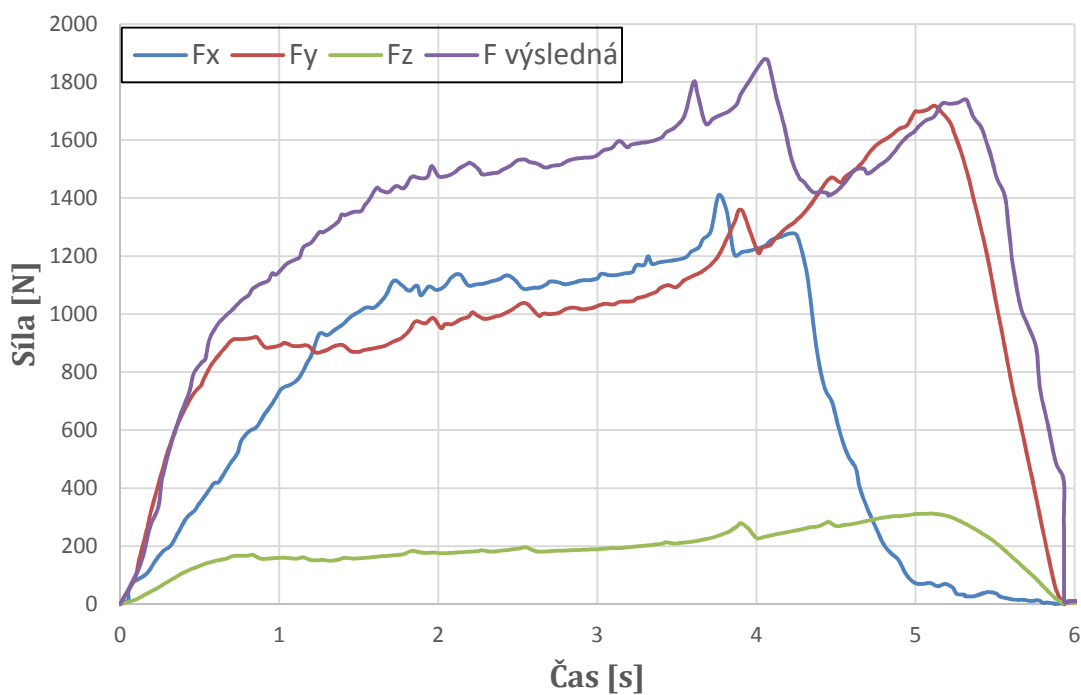
Obr. 4.21 Silové působení při $v_c=88$ m/min , $v_f=1250$ mm/min, průjezd č. 1.



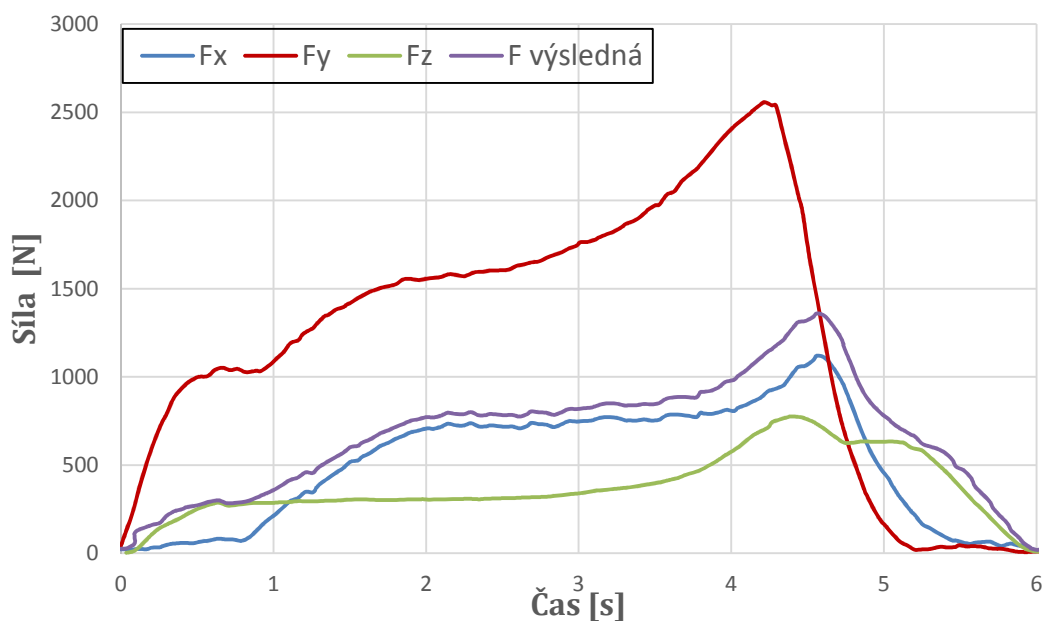
Obr. 4.22 Silové působení při $v_c=88$ m/min , $v_f=1250$ mm/min, průjezd č. 2.

Tab. 4.9 Drsnost obrobeneho povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=88$ m/min , $v_f=1250$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μ m]	1,83	2,18



Obr. 4.23 Silové působení při $v_c=110$ m/min , $v_f=1600$ mm/min, průjezd č. 1.

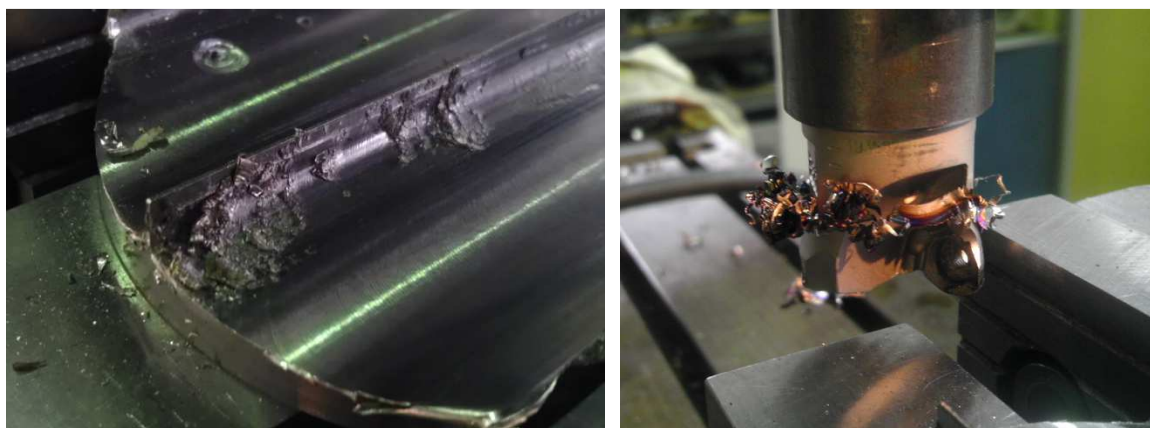


Obr. 4.24 Silové působení při $v_c=110$ m/min , $v_f=1600$ mm/min, průjezd č. 2.

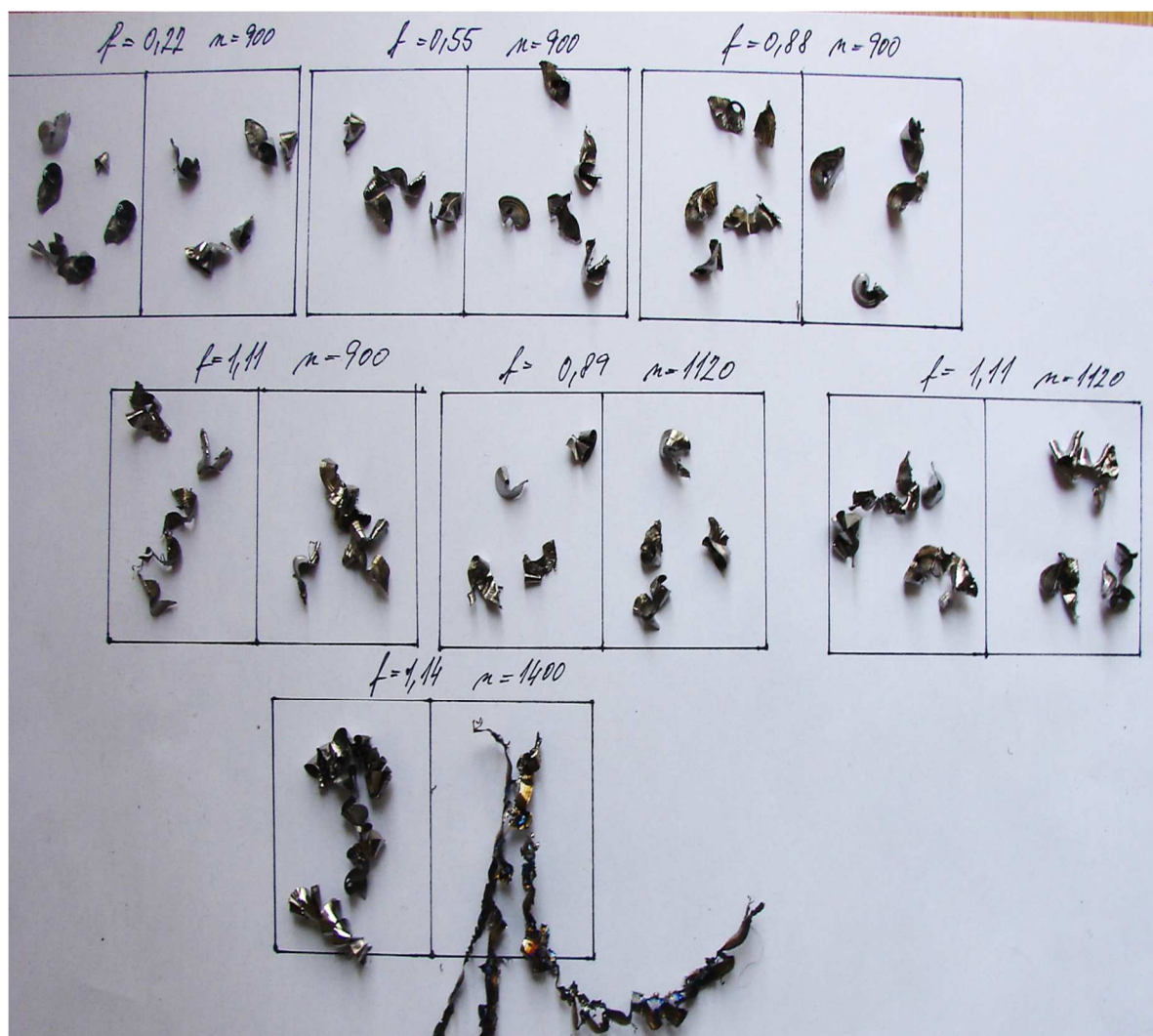
Tab. 4.10 Drsnost obrobeneho povrchu pro průjezd 1 a 2 ($v_c=110$ m/min, $v_f=1600$ mm/min).

Průjezd	1	2
Ra [μ m]	1,53	1,17

Pozn.: V průběhu druhého průjezdu bylo viditelné zvýšení teploty v místě řezu. Tato změna je rozpoznatelná i na průběhu silového zatížení (viz. obr. 4.24). Na obrobeneém povrchu se vyskytovaly útvary nataveného materiálu obrobku (viz. obr. 4.25). Na obr. 4.26 je možné provést porovnání třísek, které vznikly při použití jednotlivých rezných podmínek. Údaje o posuvu jsou zde vztaženy na posuv mm/zub nástroje.



Obr. 4.25 Povrch a tříška po průjezdu číslo 2.



Obr. 4.26 Vzniklé třísky po prvním a druhém průjezdu jednotlivými řeznými podmínkami.

4.7.2 Opatření vyměnitelné břitové destičky

Opatření na hřbetu (VB) VBD byla měřena pouze při posledních třech variantách řezných podmínek (viz. tabulka 4.11). Měření bylo prováděno po vykonání 2 průjezdů.

Tab. 4.11 Tabulka řezných, posuvových rychlostí a hodnot opotřebení na hřbetě nástroje VB.

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	VB [mm]
88	1000	0,52
88	1250	0,80
110	1600	1,11

Na obrázcích 4.27 až 4.29 je vyobrazeno opotřebení destičky pro každou z variant řezných podmínek.



Obr. 4.27 Opotřebení při řezných podmínkách $v_c=88$ m/min a $v_f=1000$ mm/min.



Obr. 4.28 Opotřebení při řezných podmínkách $v_c=88$ m/min a $v_f=1250$ mm/min.



Obr. 4.29 Opotřebení při řezných podmínkách $v_c=110$ m/min a $v_f=1600$ mm/min.

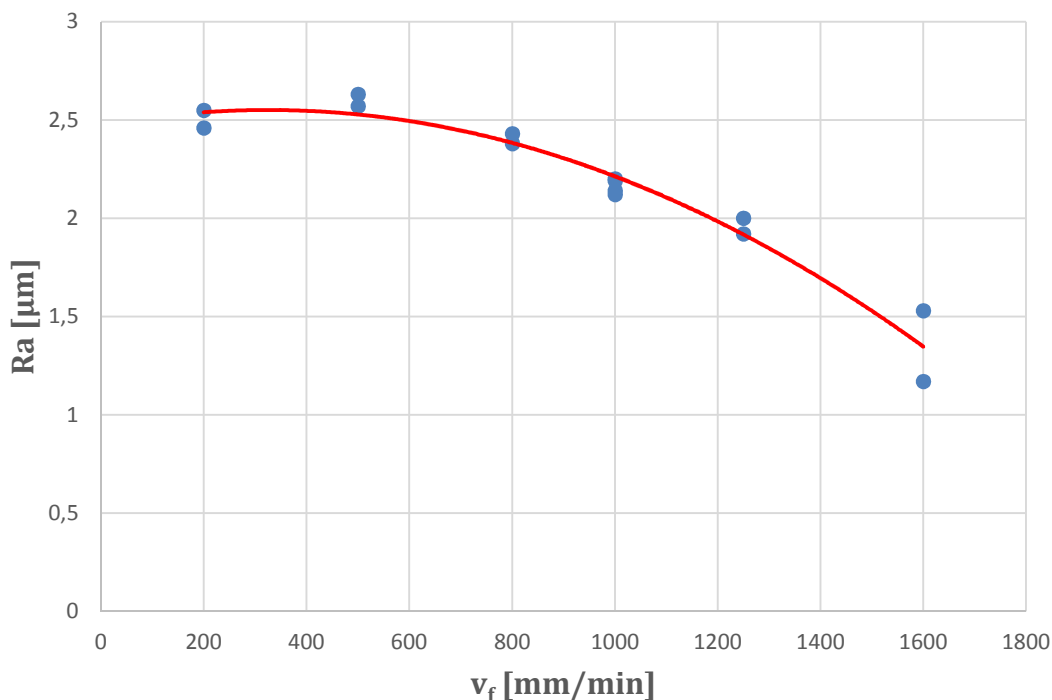
4.8 Rozbor výsledků experimentu

4.8.1 Dosažená drsnost povrchu

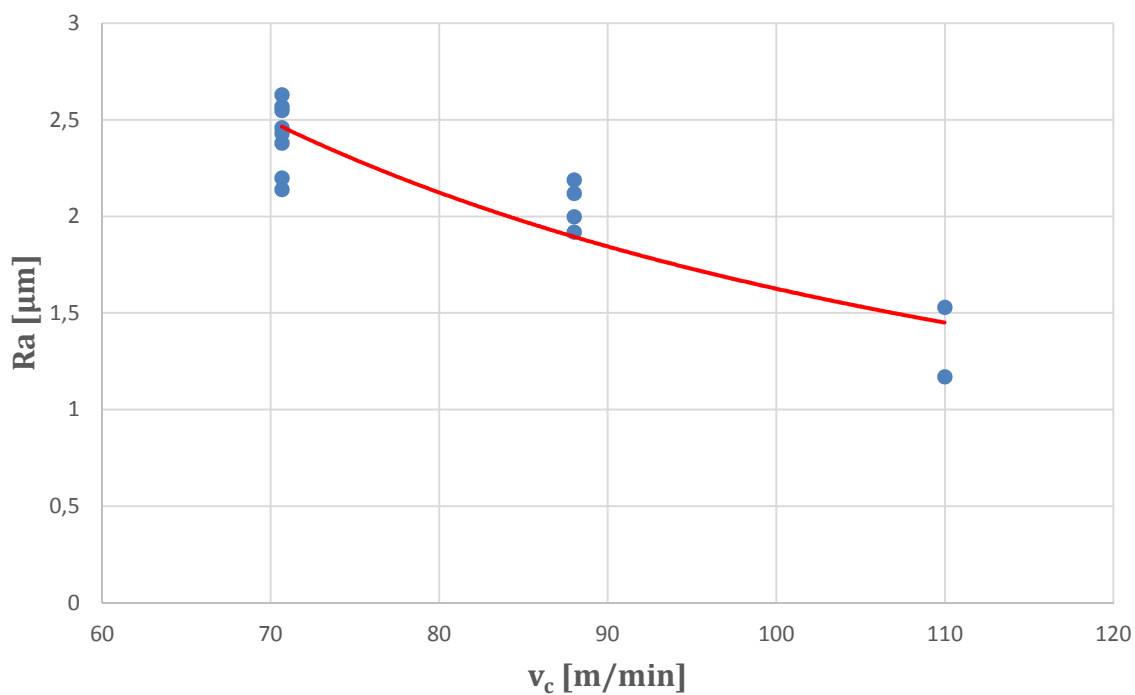
Ze získaných hodnot byly vyvozeny závislosti $Ra=f(v_f)$ (obr. 4.30), $Ra=f(v_c)$ (obr. 4.31) a $Ra=f(VB)$ (obr. 4.32). V tabulce 4.12 je přehled jednotlivých aritmetických úchylek povrchů (Ra), kterých bylo dosaženo při použití dané řezné a posuvové rychlosti. Při zvyšování posuvové rychlosti se drsnost povrchu snižovala. Tato nečekaná změna mohla být způsobena nárůstem teploty v oblasti řezu.

Tab. 4.12 Tabulka hodnot získaných v průběhu experimentu.

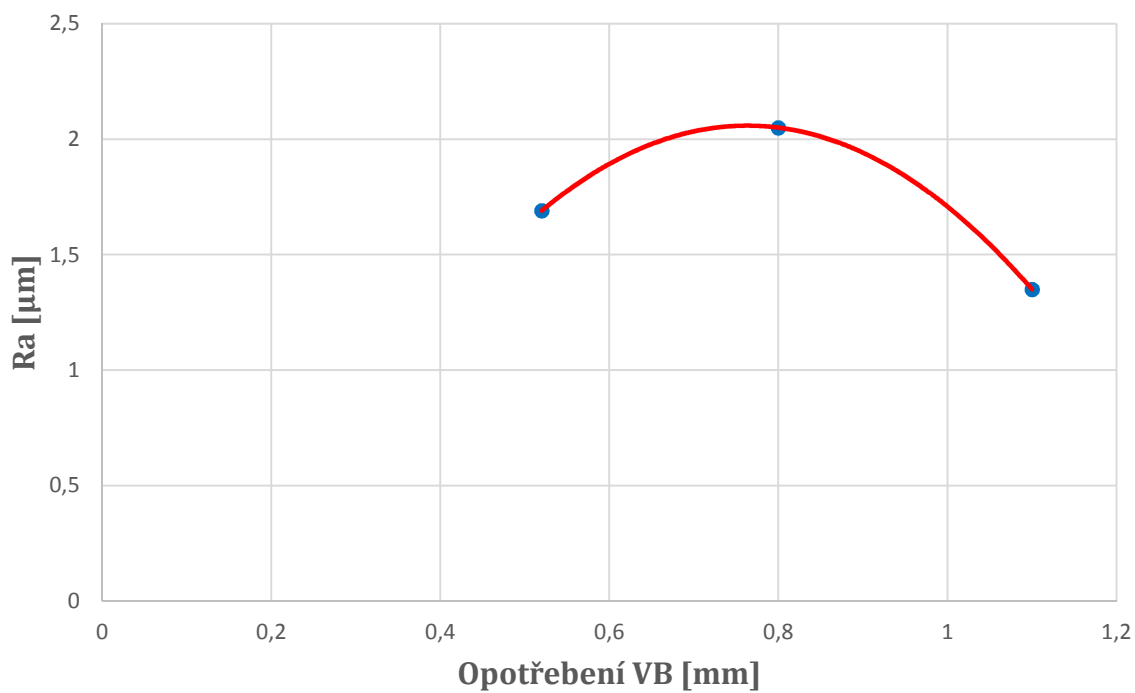
v_c [m/min]	v_f [mm/min]	Ra průjezd 1 [μm]	Ra průjezd 2 [μm]
70,6	200	2,46	2,55
70,6	500	2,8	2,57
70,6	800	2,43	2,71
70,6	1000	1,81	2,14
88,0	1000	1,6	1,78
88,0	1250	1,83	2,18
110,0	1600	1,53	1,17



Obr. 4.30 Závislost aritmetické odchylky drsnosti povrchu na posuvové rychlosti.



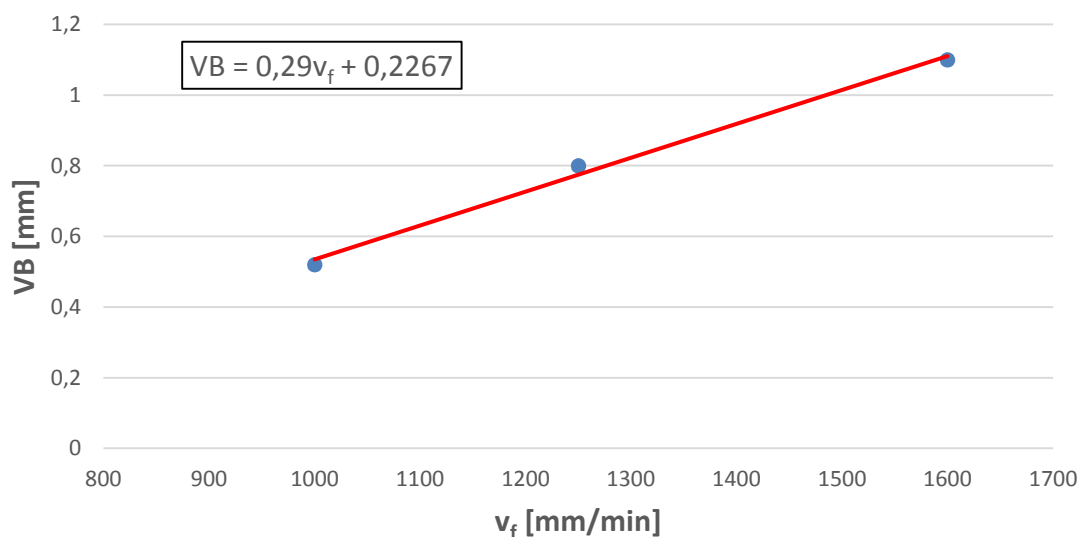
Obr. 4.31 Závislost aritmetické odchytky drsnosti povrchu na řezné rychlosti.



Obr. 4.32 Závislost aritmetické odchytky drsnosti povrchu na velikosti opotřebení na hřbetu nástroje.

4.8.2 Opotřebení nástroje

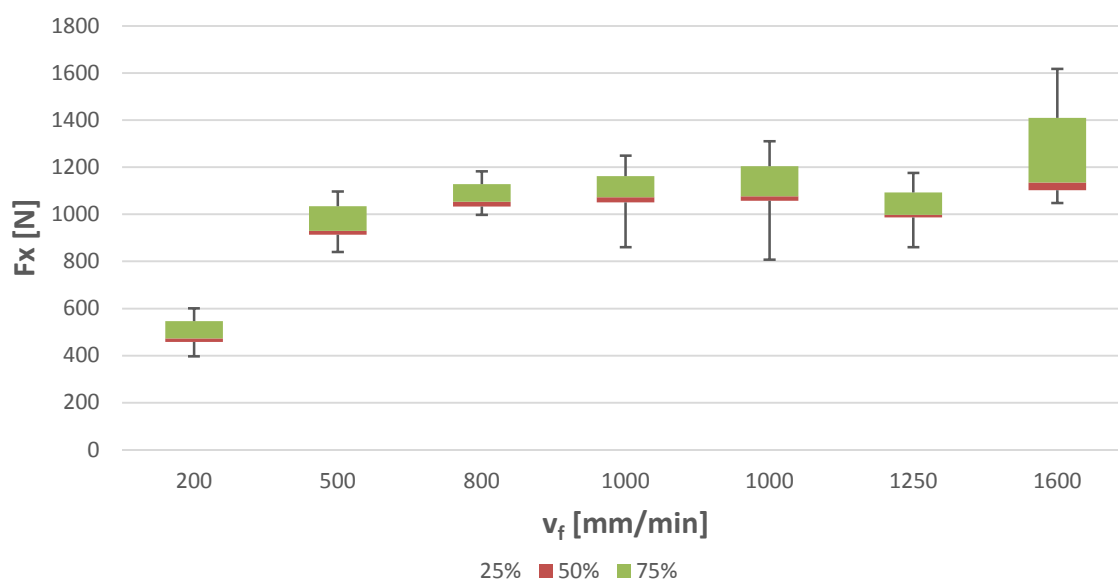
Získaná data z měření jsou zanesena do grafu (viz. obr. 4.33). Z grafu je patrná lineární závislost opotřebení na posuvové rychlosti. V literatuře je hodnota opotřebení $VB=0,8$ mm u frézování brána jako mezní, při jejím překročení je zvýšené riziko vylovení břitu.[24]



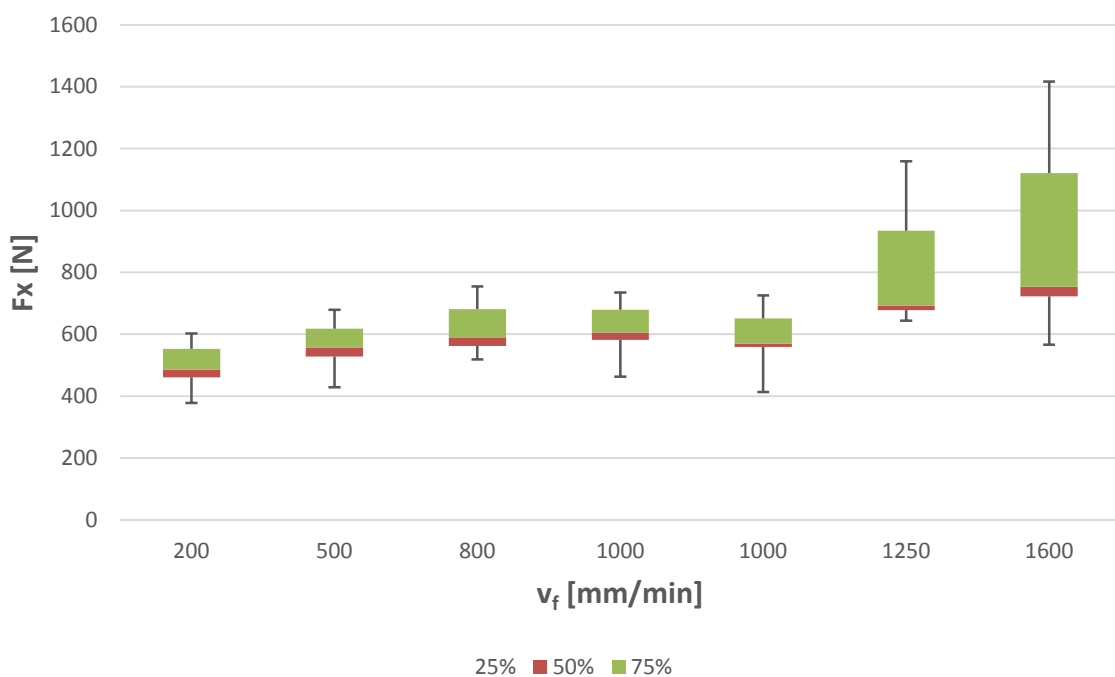
Obr. 4.33 Vyhodnocení opotřebení VB při jednotlivých posuvových rychlostech.

4.8.3 Silové působení

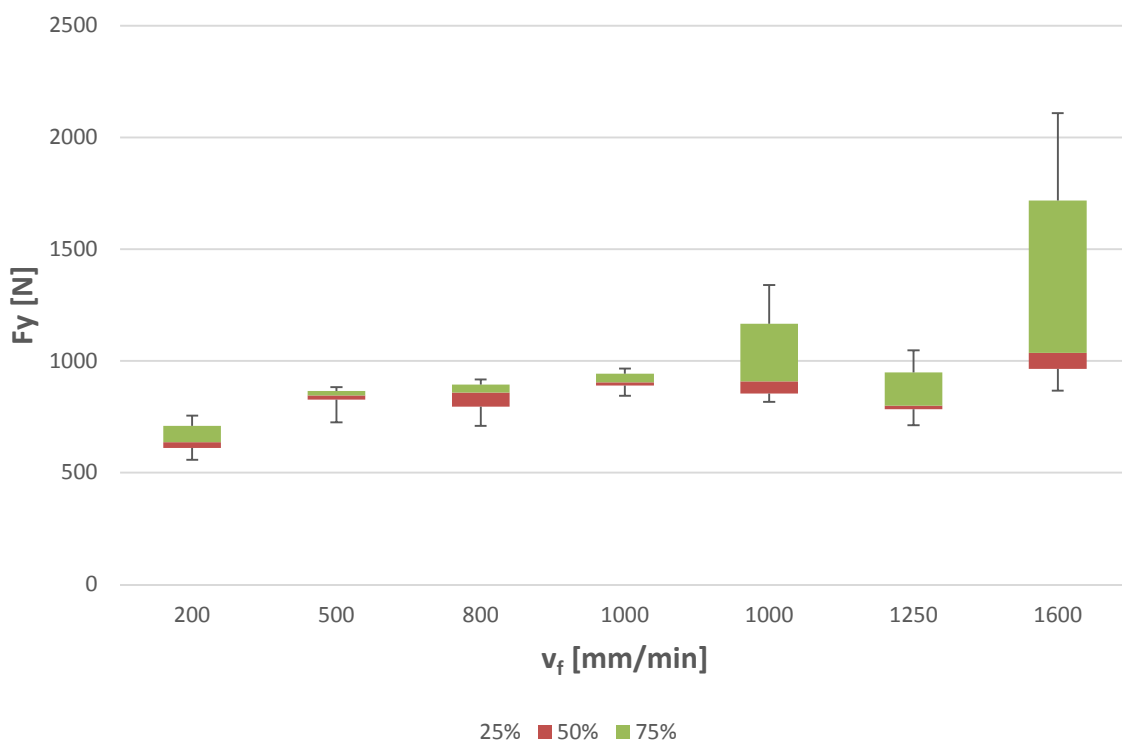
Na obrázcích 4.34 až 4.39 je statisticky vyhodnoceno silové působení (se spolehlivostí 95%) při průjezdech jednotlivými posuvovými rychlostmi, a to v osách X, Y, Z. Vyhodnocení bylo provedeno v programu Microsoft Excel.



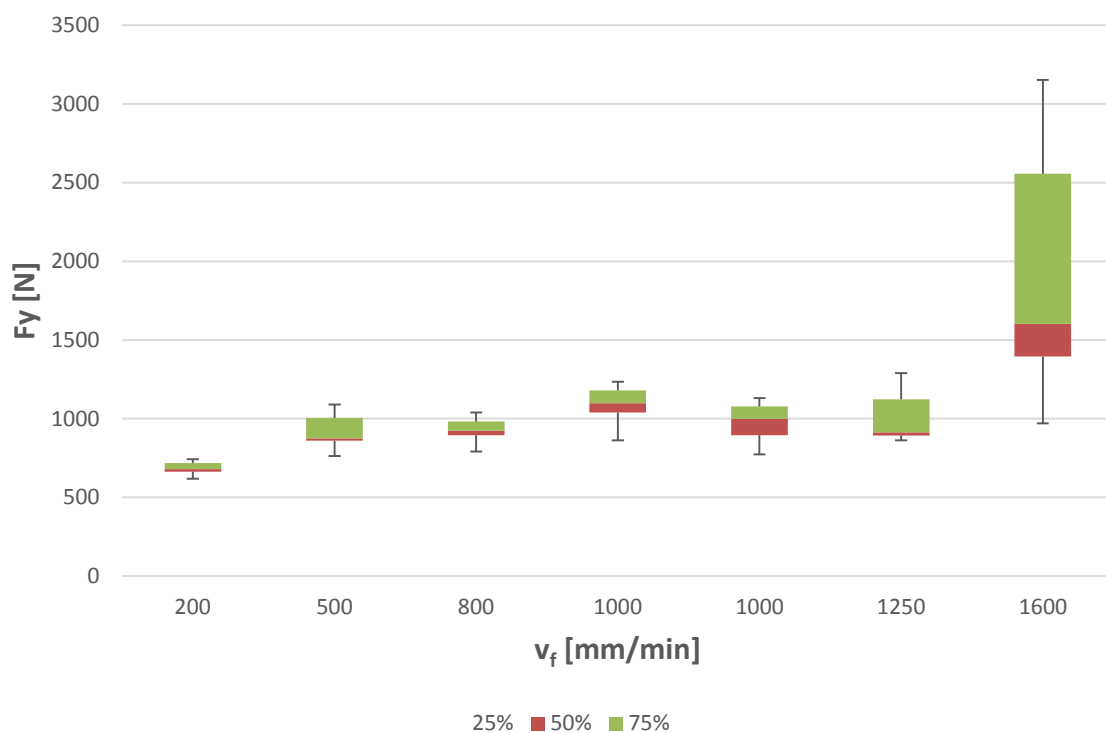
Obr. 4.34 Silové působení v ose X při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průjezdy č.1.



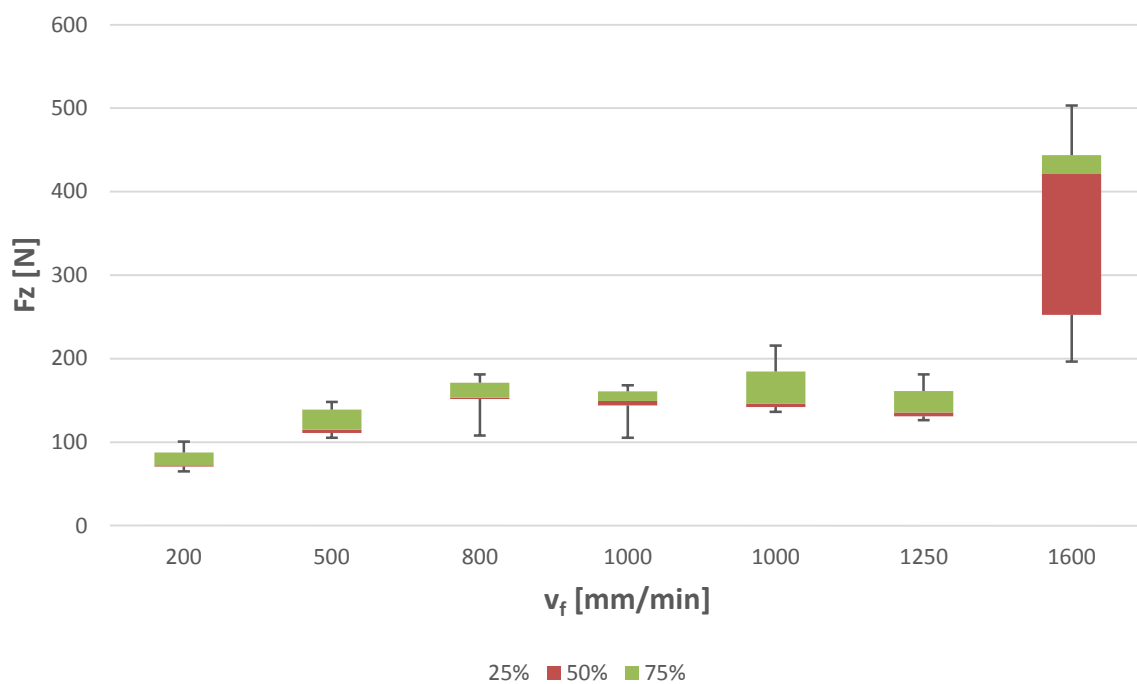
Obr. 4.35 Silové působení v ose X při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průřezdy č.2.



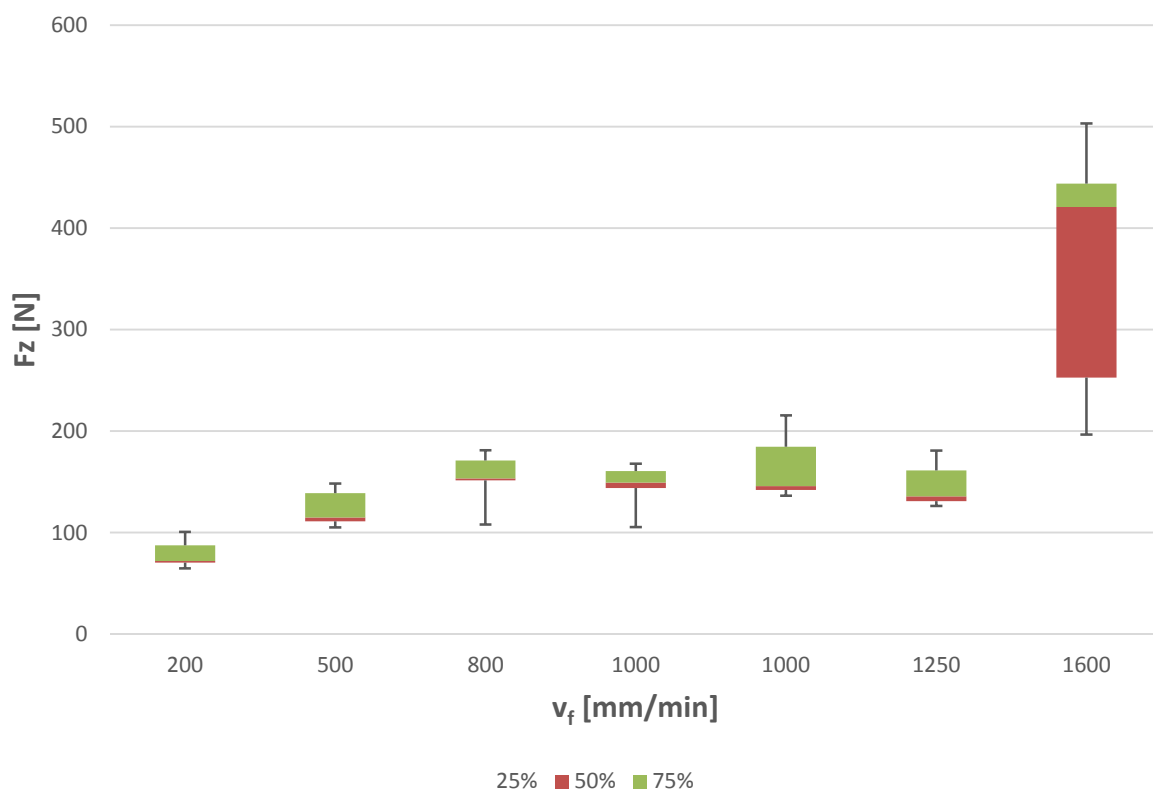
Obr. 4.36 Silové působení v ose Y při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průřezdy č.1.



Obr. 4.37 Silové působení v ose Y při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průřezy č.2.



Obr. 4.38 Silové působení v ose Z při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průřezy č.1.



Obr. 4.39 Silové působení v ose Z při různých hodnotách posuvu, tyto statistické hodnoty jsou pro průřezdy č.2.

5 ANALÝZA VÝROBNÍCH NÁKLADŮ

Výrobní náklady jsou velmi důležitým faktorem, který je využíván při porovnání produktivity výroby. V této kapitole jsou rozebírány výrobní náklady ve formě:

- elektrické energie,
- opotřebení nástroje.

5.1 Náklady na elektrickou energii

Se změnou řezných podmínek se mění i výrobní náklady. Důsledkem změny řezných podmínek se mění velikost silového zatížení a tím i nárok na výkon stroje.

Výpočet:

- příkon stroje P_c [kW]:

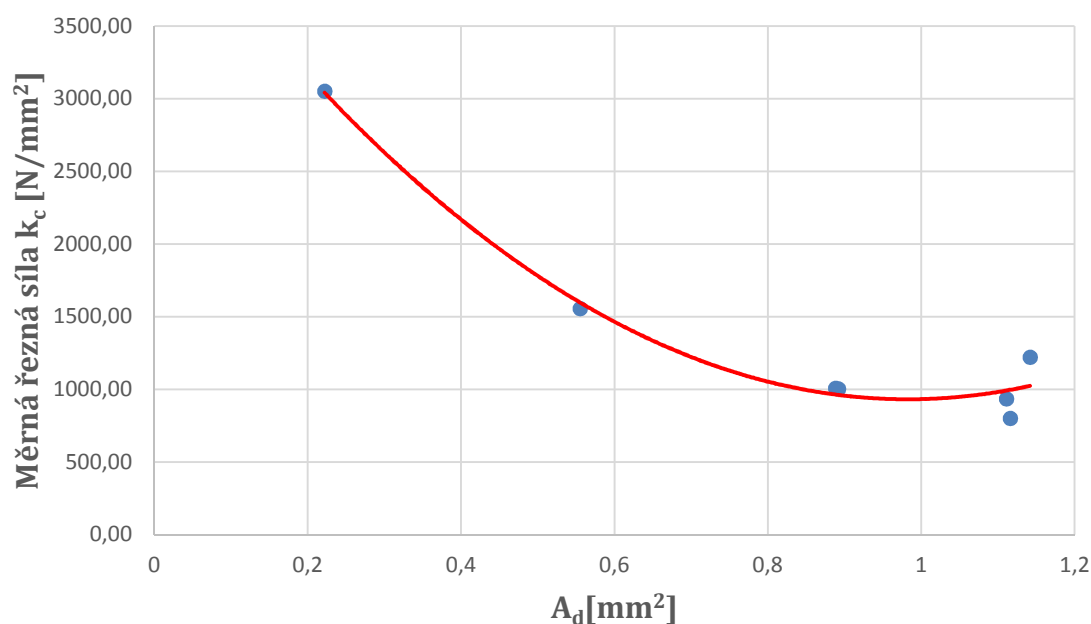
$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta} = \frac{677,587 \cdot 70,65}{60 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 1,146 \text{ kW} \quad (5.1)$$

Pozn.: Jelikož nebyla zjištěna přesná hodnota účinnosti η , byla zvolena 0,8.[3]

- měrná řezná síla [N/mm²]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} = \frac{677,587}{0,222} = 3052,19 \text{ N/mm}^2 \quad (5.2)$$

Pozn.: Za F_c byly použity střední hodnoty z průjezdů č. 2

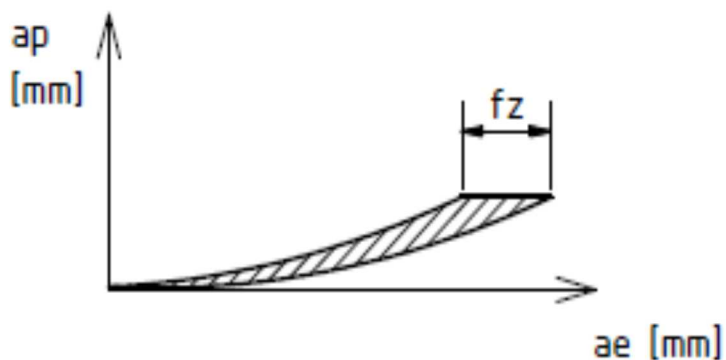


Obr. 5.1 Závislost měrné řezné síly na posuvové rychlosti.

- průřez třísky [mm^2]:

$$A_{Dmax} = a_{e max} \cdot a_p = f_z \cdot a_p = 0,222 \cdot 1 = 0,222 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

$$a_{e max} = f_z \cdot \sin\varphi_{90} = 0,222 \cdot 1 = 0,222 \text{ mm}$$



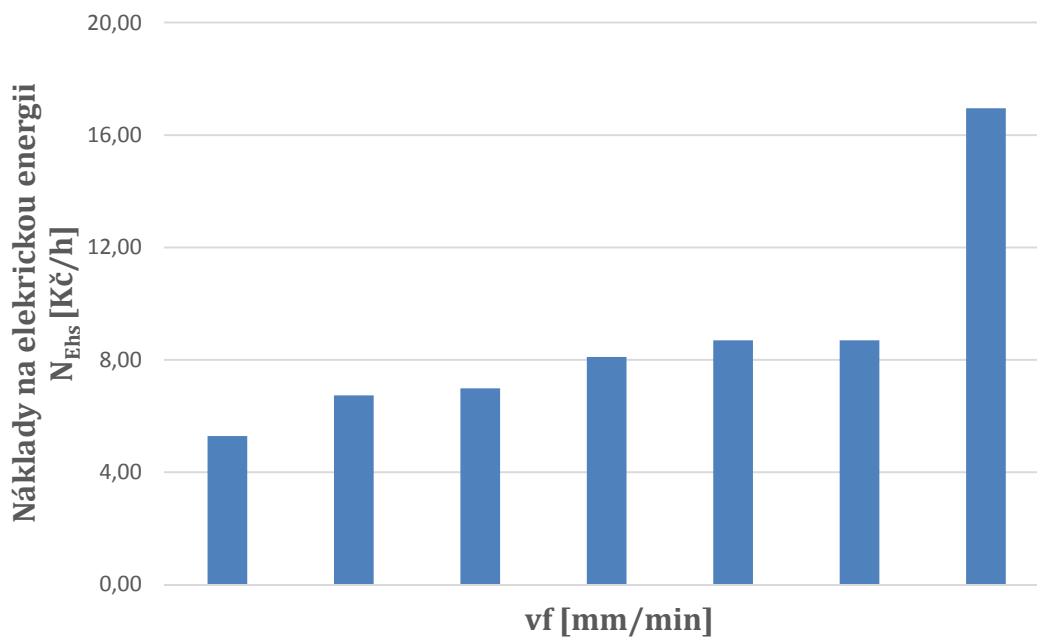
Obr. 5.2 Průřez třísky.

- náklady na elektrickou energii (1 hodina provozu stroje):

$$N_{Ehs} = Pc \cdot E_N = 0,998 \cdot 5,3 = 5,29, -Kč/h \quad (5.4)$$

Kde: E_N [Kč] - sazba za kWh

Pozn.: Tabulka s výsledky je přílohou této práce. Sazba za kWh byla zvolena dle dodavatele elektřiny (EON).



Obr. 5.3 Náklady na hodinu provozu stroje.

5.2 Náklady na nástroj

Jedná se o náklady vzniklé díky opotřebení celého nástroje nebo pouze VBD. Jako kritérium opotřebení VB bylo pro experiment zvoleno 0,8 mm. Na obrázku 5.2-1 je znázorněno opotřebení břitu nástroje (v procentech) v závislosti na rychlosti posuvu. U posuvové rychlosti 1600 mm/min opotřebení dosáhlo hodnoty 1,1 mm, což by při dalším používání VBD mohlo vést až ke zničení držáku. Cena VBD byla upřesněna obchodním zástupcem firmy ISCAR. Maloobchodní cena je 399,- Kč včetně DPH. Výpočet nákladů na nástroj byl vztažen na jeden břit VBD.[41]

- opotřebení jednoho břitu VBD v procentech:

$$X = \frac{VB}{VB_{krit}} \cdot 100 = \frac{0,52}{0,8} \cdot 100 = 65 \% \quad (5.5)$$

Kde: X [%] – hodnota opotřebení VBD

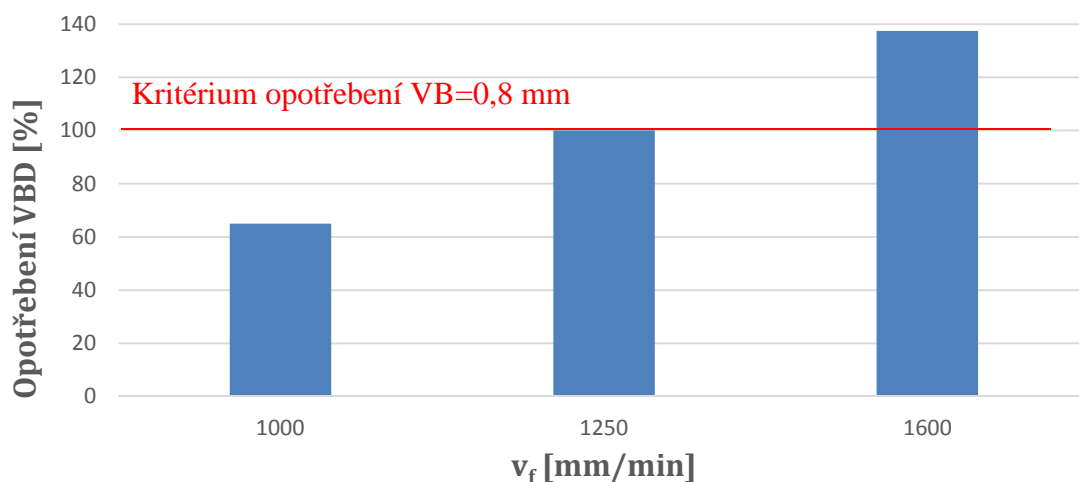
- náklady na nástroj:

$$N_n = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot Y = \left(1 - \frac{65}{100}\right) \cdot \frac{399}{3} = 46,5, -Kč \quad (5.6)$$

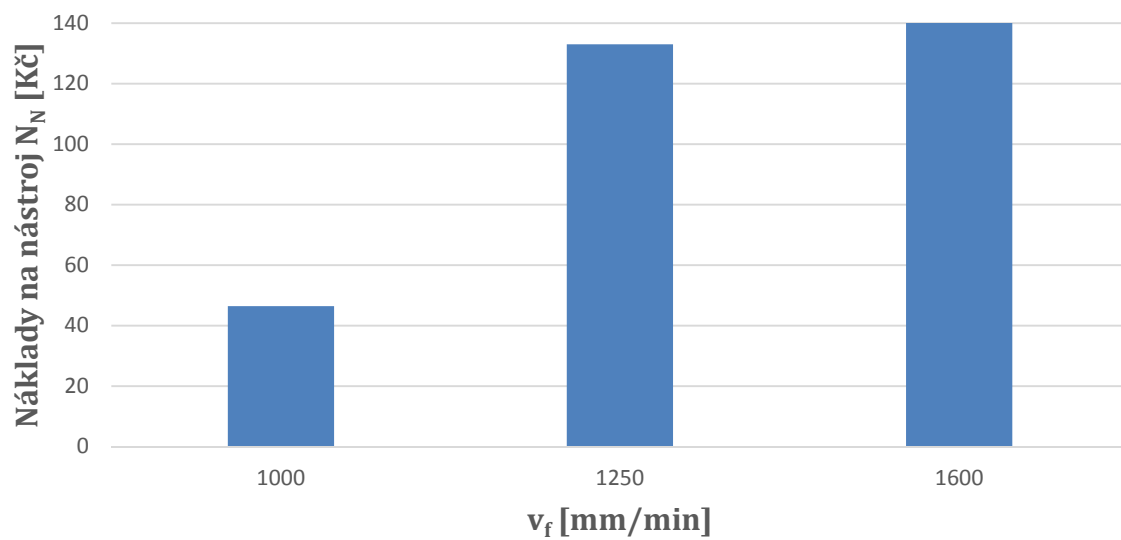
Kde: Y [Kč] – cena za břit nástroje

Tab. 5.1 Porovnání nákladů při jednotlivých řezných podmínkách.

v_f [mm/min]	VB [mm]	Cena VBD [Kč]	Opotřebení VBD [%]	Náklady na nástroj [Kč]
1000	0,52	399	65	46,5
1250	0,8	399	100	133
1600	1,11	399	137,5	133



Obr. 5.4 Opotřebení VBD.



Obr. 5.5 Náklady na nástroj.

6 OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK

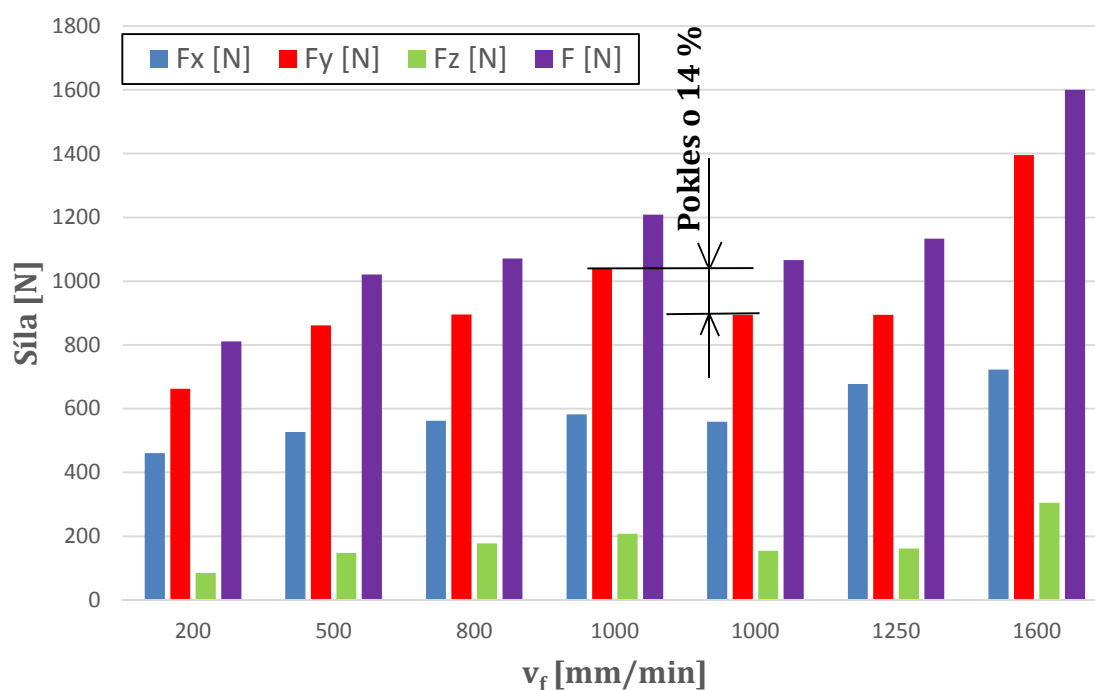
Vhodnou optimalizací řezných podmínek je možné zvýšit produktivitu výroby. Díky množství dat, která byla získána během experimentu, je možné optimalizovat řezné podmínky podle více kritérií (například podle silového zatížení, opotřebení nástroje, množství odebraného materiálu atd.).

6.1 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na silovém zatížení a opotřebení nástroje

Nástroj je během obrábění zatěžován silou F , která je výslednicí sil F_x , F_y a F_z . Velikost těchto sil je ovlivněna použitými řeznými podmínkami. Při vyšším silovém zatížení může dojít k výraznému opotřebení nástroje, které ovlivní výrobní náklady. V tabulce 6.1 jsou použity střední hodnoty sil z druhého průjezdu.

Tab. 6.1 Silové působení při jednotlivých posuvových rychlostech.

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	F_x [N]	F_y [N]	F_z [N]	F [N]
70,6	200	460,54	662,53	88,76	811,17
70,6	500	527,35	861,10	147,31	1020,44
70,6	800	561,71	894,90	177,47	1071,38
70,6	1000	581,89	1039,19	207,15	1208,89
88,0	1000	559,04	894,77	154,66	1066,33
88,0	1250	677,64	894,16	161,38	1133,47
110,0	1600	722,52	1395,26	304,63	1600,49

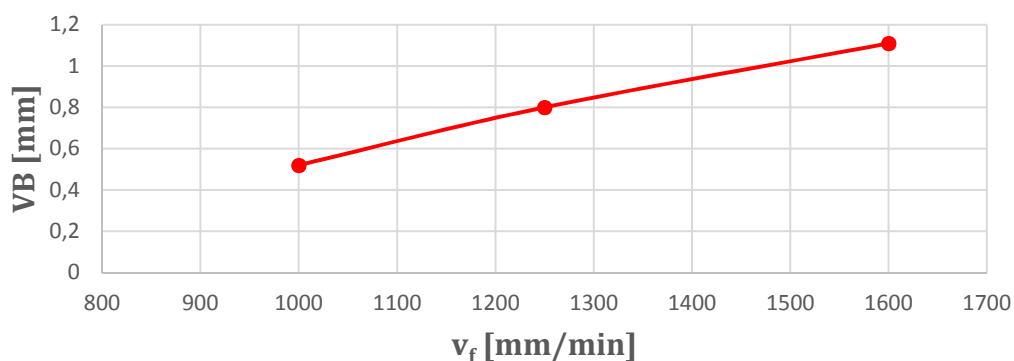


Obr. 6.1 Porovnání silového zatížení pro jednotlivé posuvové rychlosti.

Při nejnižší posuvové rychlosti ($v_f=200$ mm/min) je nástroj nejméně zatížen. S nárůstem posuvové rychlosti roste i silové zatížení, které lze snížit pomocí zvýšení řezné rychlosti (viz. obrázek 6.1). Naopak nejvyšších sil bylo dosaženo při řezných podmínkách $v_c=110$ m/min a $v_f=1600$ mm/min. S rostoucí posuvovou rychlostí roste i opotřebení na hřbetu nástroje. V tabulce 6.2 jsou uvedeny hodnoty opotřebení při daných řezných podmínkách.

Tab. 6. 2 Hodnoty opotřebení nástroje.

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	VB [mm]	F [N]
88	1000	0,52	1066,33
88	1250	0,80	1133,47
110	1600	1,11	1600,49



Obr. 6.2 Průběh opotřebení nástroje v závislosti na posuvové rychlosti.

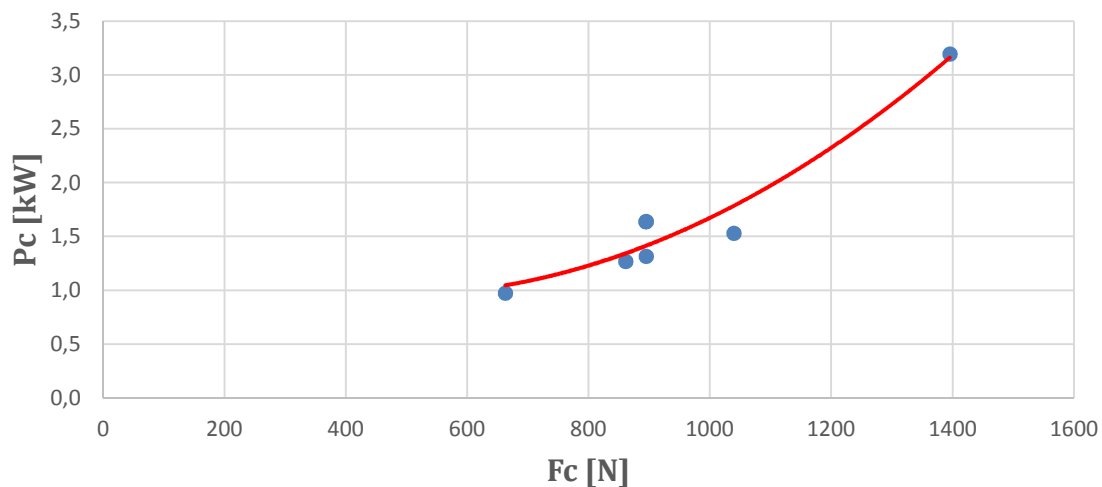
Při posuvové rychlosti 1000 mm/min se na hřbetu nástroje projevilo opotřebení 0,52 mm, které splňuje kritérium $0,52 < 0,8$ mm (viz. kapitola 5.2). Při posuvové rychlosti 1250 mm/min byla dosaženo opotřebení 0,8mm které je bráno jako mezní. Po průjezdu největší posuvovou rychlostí bylo opotřebení nad hodnotou kritéria ($1,1 > 0,8$ mm).

6.2 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na energetické náročnosti výroby

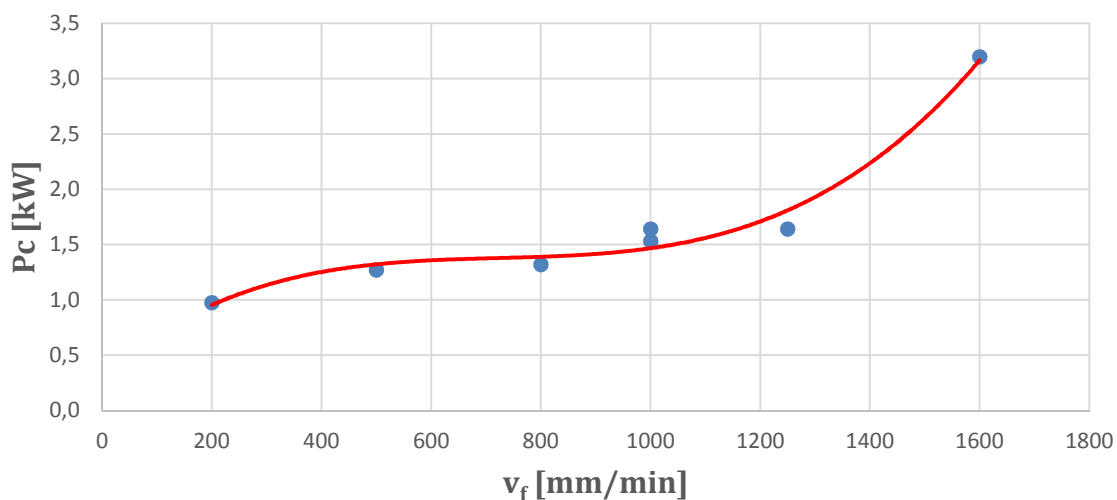
S rostoucím silovým zatížením se zvyšují i požadavky na příkon stroje, které se projeví ve výrobních nákladech.

Tab. 6.3 Požadavky na příkon stroje za určitých řezných podmínek.

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	F_c [N]	η	P [kW]	P_c [kW]
70,6	200	662,53	0,8	0,8	1,1
70,6	500	861,10	0,8	1,0	1,4
70,6	800	894,90	0,8	1,1	1,5
70,6	1000	1039,19	0,8	1,2	1,7
88,0	1000	894,77	0,8	1,3	1,9
88,0	1250	894,16	0,8	1,3	1,9
110,0	1600	1395,26	0,8	2,6	3,7



Obr. 6.3 Závislost příkonu stroje na řezné rychlosti.



Obr. 6.4 Závislost příkonu na posuvové rychlosti

Nejméně energeticky náročná je varianta s nejnižší posuvovou rychlostí, při které je spotřebováno 1,1 kW.

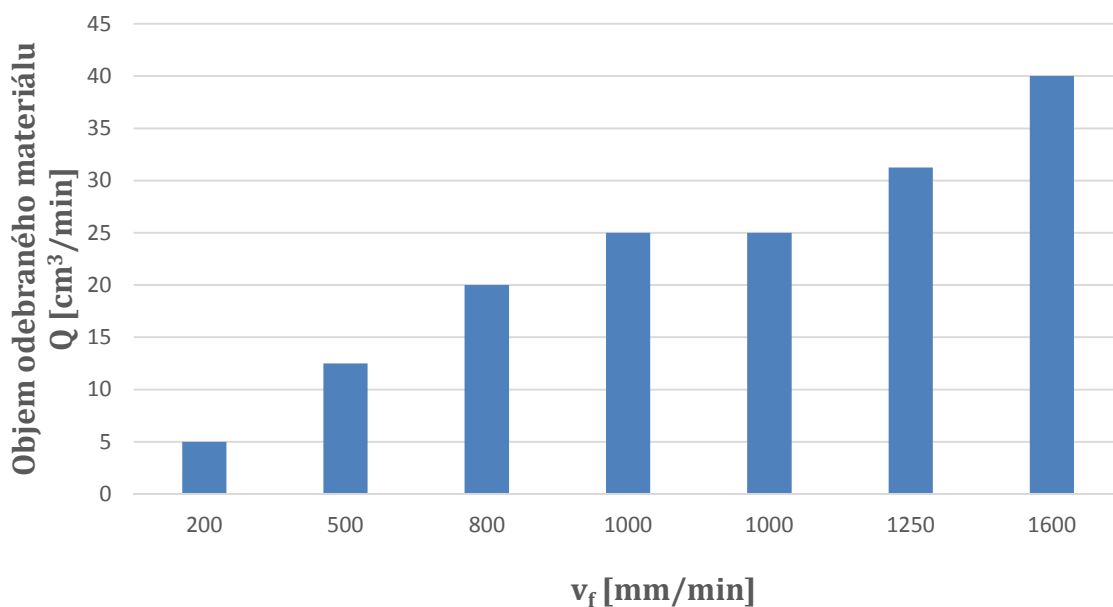
6.3 Optimalizace řezných podmínek v závislosti na množství obrobeného materiálu

Řezné podmínky lze optimalizovat i v závislosti na objemu obrobeného materiálu Q [cm^3/min]. V tabulce 6.3 jsou uvedeny hodnoty Q pro zvolené posuvové rychlosti.

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{1000} = \frac{1 \cdot 25 \cdot 200}{1000} = 5 \text{ cm}^3/\text{min} \quad (6.1)$$

Tab. 6.5 Údaje o objemu odebraného materiálu.

v_c [m/min]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]	Q [cm ³ /min]
70,6	200	1	25	5
70,6	500	1	25	12,5
70,6	800	1	25	20
70,6	1000	1	25	25
88,0	1000	1	25	25
88,0	1250	1	25	31,25
110,0	1600	1	25	40

Obr. 6.5 Závislost objemu odebraného materiálu na v_f .

S rostoucí posuvovou rychlostí roste i produktivita obrábění. Při obrábění s posuvovou rychlostí 200 mm/min bude odebráno 5 cm³ materiálu obrobku za minutu. Při použití například posuvové rychlosti 1250 mm/min bude za stejný časový úsek odebráno 31,25 cm³. Lze tedy říci, že díky obrábění vyššími posuvovými lze zvýšit produktivitu výroby.

ZÁVĚR

Experimentální část této práce byla založena na vysokoposuvovém čelním frézování titanové slitiny Ti6Al4V. V průběhu obrábění byly hodnoty a_p a a_e konstantní ($a_p=1\text{ mm}$, $a_e=25\text{ mm}$).

Při daných řezných podmínkách bylo dosaženo těchto výsledků:

- $v_c=70,6\text{ m/min}$, $v_f=200\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=677,5\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=3052,19\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=2,55\text{ }\mu\text{m}$.
- $v_c=70,6\text{ m/min}$, $v_f=500\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=861,53\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=1556\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=2,57\text{ }\mu\text{m}$.
- $v_c=70,6\text{ m/min}$, $v_f=800\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=894,9\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=1007,77\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=2,71\text{ }\mu\text{m}$.
- $v_c=70,6\text{ m/min}$, $v_f=1000\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=1039,19\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=935,36\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=2,14\text{ }\mu\text{m}$.
- $v_c=88\text{ m/min}$, $v_f=1000\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=894,9\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=1003,10\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=1,78\text{ }\mu\text{m}$,
 - opotřebení nástroje $VB=0,52\text{ mm}$.
- $v_c=88\text{ m/min}$, $v_f=1250\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=894,16\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=801,21\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=2,18\text{ }\mu\text{m}$,
 - opotřebení nástroje $VB=0,8\text{ mm}$.
- $v_c=110\text{ m/min}$, $v_f=1400\text{ mm/min}$:
 - střední hodnota řezné síly $F_c=1395,26\text{ N}$,
 - měrná řezná síla $k_c=1221,76\text{ N/mm}^2$,
 - drsnost povrchu obrobeného materiálu $R_a=1,17\text{ }\mu\text{m}$,
 - opotřebení nástroje $VB=1,1\text{ mm}$.

Obrábění za podmínek $v_c=110\text{ m/min}$, $v_f=1400\text{ mm/min}$ bylo doprovázeno zvýšenou teplotou v místě řezu, změna teploty se projevila i na barvě a tvaru třísek. Z důvodu velké hodnoty opotřebení VBD, nejsou tyto řezné podmínky doporučovány.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUMÁR, Anton. *Technologie I* [online]. [vid. 17.5.2013].
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [2] PROKOP, Jaroslav; KOCMAN, Karel. *Technologie výroby II - řešené příklady* [online]. [vid. 17.5.2013].
Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TechnVyroby_II.pdf
- [3] TAEGUTEC. *Příručka obrábění* [online]. [vid. 22.5.2013].
Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrabeni_2114.pdf
- [4] BARÁNEK, Ivan. *Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie*. 1.vydání. Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka: TnUAD, 2004. ISBN 80-8075-013-0.
- [5] EMAN, Pavel; VANĚČEK, David; ŠAFEK, Jiří. *Technologie HSC - velké ekonomické i ekologické přínosy* [online]. [vid. 25.2.2013].
Dostupné z: <http://technik.ihned.cz/c1-11353150-technologie-hsc> ISSN 1213 - 7693
- [6] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [7] FOREJT, Milan. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [8] HEDRICK, Art. *thefabricator.com* [online]. [vid. 27.2.2013]. Dostupné z: <http://www.thefabricator.com/article/toolanddie/cutting-tooling-costs>
- [9] TECHNICKÝ TÝDENÍK. *Řezné nástroje - Problematika obrábění dílů pro letecký průmysl* [online]. [vid. 4.3.2013].
Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-14_8526.html
- [10] SERVUS, T. *Trendy upínání rezných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička.
- [11] BORO VAN, Petr. *Upínání nástrojů* [online]. [vid. 11.3.2013]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html
- [12] TEPELNÉ UPÍNÁNÍ. *Diebold ThermoGrip® – Smršťovací technika* [online]. [vid. 13.3.2013]. Dostupné z: <http://www.tepelneupinani.cz/technika/>
- [13] SVOBODA, Jiří. *MM Průmyslové spektrum: Tvorba třísky při vysokorychlostním obrábění* [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o [vid. 2013-05-22]. ISBN 1212-2572.
Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/tvorba-trisky-pri-vysokorychlostnim-obrabeni.html> ISSN 1212-2572
- [14] VASILKO, Karol. *Obrábanie titánu a jeho zliatin*. 1. vyd. Prešov : Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity v Košiciach, so sídlom v Prešově, 2001. 120 s. ISBN 80-7099-683-8.
- [15] NESLUŠÁN, M., CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. 1.vyd. Žilina: EDIS, 2001. 195 s. ISBN 80-7100-933-4.
- [16] ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie: Určeno pro posl. fak. strojní*. 1. vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. 220 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0128-1.
- [17] HLUCHÝ, Miroslav, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Strojírenská technologie 2 - 2. díl: Koroze, základy obrábění, výrobní postupy*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1999, 176 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-718-3127-1.

- [18] DE VOS, Patrick. *MM Průmyslové spektrum: Příručka pro technology* [online]. [vid. 13.5.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
- [19] BRUHIS, Y., NOLAND, D., SEBRING, W. *HIGH PERFORMANCE MILLING : Meeting the Continuous Challenges of Machining New Innovative Materials, NIAGARA CUTTER*, 2007. 11 s.[online.]. [vid. 10.2.2013] Dostupné z: <http://www.niagaracutter.com/techinfo/whitepaper/NiagaraWhitePaper.pdf>
- [20] FILIPČÍK, J. *Optimalizace výroby dílu pro letecký průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 108 s. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [21] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Tepelná vodivost* [online]. [vid. 7.4.2013] Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Tepeln%C3%A1_vodivost&oldid=9851222
- [22] SLABÝ, O. *Produktivní obrábění titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [23] DE VOS, Patrick. *MM Průmyslové spektrum : Příručka pro technology - Opatření se nevyhneme!* [online]. [vid. 8.4.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html> ISSN 1212-2572
- [24] POPOV, A. *Teorie obrábění*. (přednáška) Praha : TUL – FS, Katedra obrábění a montáže, 16.3.2013.
- [25] BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje* [online]. [vid. 10.4.2013]. Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-6_8518.html
- [26] HOFMANN, Petr. *Zbytková pnutí při vysokorychlostním frézováním* [online]. [vid. 16.4.2013]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zbytkova-pnuti-pri-vysokorychlostnim-frezovani.html> ISSN 1212-2572
- [27] KARASEK, J. *Obrábění titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 80 s., příloh 2. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
- [28] HOUDEK, Josef; KOUŘIL, Karel. *MM Průmyslové spektrum: Opatření břitů nástroje ze slinutých karbidů* [online]. [vid. 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/opotrebeni-britu-nastroju-ze-slinutych-karbidu-2.html> ISSN 1212-2572
- [29] SECO TOOLS. *Co je Duratomic®?* [online]. [vid. 24.4.2013]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling1/General-Turning/What-is-Duratomic/#>
- [30] KOČMAN, Karel. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: CERM, 2005, 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [31] PAVELKA, R. *Analýza vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 110 s., 12 příloh. Vedoucí diplomové práce: Ing. Karel Osička, Ph.D.
- [32] BIERMANN, Dirk. *MM Průmyslové spektrum: Mikrofrézování jemných tvarů a struktur ve výrobě forem* [online]. 14.12.2010 [vid. 3.5.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mikrofrézovani-jemnych-tvaru-a-struktur-ve-vyrobe-forem.html> ISSN 1212-2572

- [33] FOREJT, Milan; HUMÁR, Anton a kol. *Experimentální metody - sylabus*. [online]. [vid. 17.5.2013]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf
- [34] KRÍŽ, Antonín; HÁDEK, Jiří a kol. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [vid. 3.5.2013]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/trvanlivost.html>
- [35] SANDVIK. *Sandvik.coromat* [online]. [vid. 6.5.2013]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromill_210/pages/default.aspx
- [36] PRAMET. *Pramet* [online]. [vid. 13.5.2013]. Dostupné z: <http://www.pramet.com/cz/produkty/frezovani/monolitni-frezy.html>
- [37] SECO TOOLS. *Frézování vysokým posuvem* [online]. [vid. 7.5.2013]. Dostupné z: <http://www.secotools.com/cs/Global/Products/Milling/Highfeed-Milling/>
- [38] (EDS), Srichand Hinduja ... *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*. Online-Ausg. Heidelberg [u.a.]: Springer, 2010. ISBN 978-184-9964-319.
- [39] WIEDENMANN, Robert. *IWB* [online]. [vid. 7.5.2013]. Dostupné z: http://www.iwb.tum.de/en/LasFraes+_+Laser+Assisted+Milling+of+hard_to_machine+Material
- [40] FLODR, Vojtěch. *Testování řezných nástrojů povlakovaných nanokrystalickými povlaky*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. s. 68, příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.
- [41] ISCAR. *ISCAR* [online]. [vid. 9.5.2013]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Ecat/familyHDR.asp?fnum=1800&mapp=ML&GFSTYP=M&lang=EN&tool=T&type=1&search=Y>
- [42] ISCAR. *ISCAR* [online]. [vid. 9.5.2013]. Dostupné z: <http://www.iscar.com/Ecat/item.asp?app=&mapp=ML&fnum=1591&GFSTYP=M&tool=I&cat=5698085&lang=EN>
- [43] NEDOMA, Jiří a kol. *Biomechanika lidského skeletu a umělých náhrad jeho částí*. Praha: Karolinum, 2006, 491. ISBN 80-246-1227-5.
- [44] FRANCE-METALLURGIE. *France-metallurgie* [online]. [vid. 12.5.2013]. Dostupné z: <http://aciers.free.fr/index.php/2008/12/>
- [45] KLAPKOVÁ, A. *Mechanické vlastnosti titanových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 54 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Stanislav Věchet, CSc..
- [46] SANDVIK. *Sandvik.coromat* [online]. [vid. 6.5.2013]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cscz/knowledge/milling/application_overview/holes_and_cavities/plunge_milling/pages/default.aspx
- [47] YUNG, Shin. *Purdue university* [online]. [vid. 13.5.2013]. Dostupné z: https://engineering.purdue.edu/LAMPL/research_micro%20machining.html
- [48] ZEMAN, Pavel. *MM průmyslové spektrum: Suché frézování materiálu Ti6Al4V vysokými rychlostmi*. [online]. [vid. 14.5.2013]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/suche-frezovani-materialu-ti6al4v-vysokymi-rychlostmi.html>
- [49] Strojírenství-frézování. In: [online]. [vid. 22.5.2013]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.cz/2011/03/22-frezovani-rovinnych-ploch-celnimi.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
E	[GPa]	Youngův modul pružnosti v tahu
E_E	[J]	mechanická práce
E_N	[Kč]	sazba za kWh
F_c	[N]	řezná síla
F_x	[N]	posuvová síla
F_z	[N]	síla působící v ose stroje
HSC	[-]	vysokorychlostní obrábění
HSS	[-]	rychlořezná ocel
HFC	[-]	vysokoposuvové obrábění
KB	[mm]	šířka žlábků na čele nástroje
KM	[mm]	poloha středu žlábků
KT	[mm]	poloha žlábků na čele
LAM	[-]	obrábění s asistencí laseru
NO	[-]	nástrojová ocel
N_{Ehs}	[Kč/h]	náklady na elektrickou energii
N_N	[Kč]	náklady na nástroj
Q_n	[J]	teplo odvedené nástrojem
Q_o	[J]	teplo odvedené do obrobku
Q_{pe}	[J]	teplo vzniklé v oblasti prim. plast. def.
Q_{pr}	[J]	teplo odvedeno do prostředí
Q_t	[J]	teplo odvedeno třískou
Q_α	[J]	teplo vzniklé třením o přech. plochu
Q_γ	[J]	teplo vzniklé třením tříška/čelo nás.
R_a	[μ m]	střední aritmetická hodnota drsnosti
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_z	[μ m]	nejvyšší výška profilu povrchu
TiC	[-]	karbid titanu
VB	[mm]	průměrné opotřebení hřbetu
VBD	[-]	vyměnitelná břitová destička
VB_C	[mm]	opotřebení hřbetu v oblasti špičky
VB_N	[mm]	vrubové opotřebení hřbetu

VR	[mm]	opotřebení špičky nástroje
WC	[-]	karbid wolframu
X	[%]	procento opotřebení břitové destičky
Y	[Kč]	cena vztažená na jeden břit
f_z	[mm]	posuv na zub nástroje
k	[-]	koeficient pýchování třísky
k_c	[N/mm ²]	měrná řezná síla
l	[mm]	délka ohřívání vrstvy
r_ε	[mm]	poloměr zaoblení ostří
t	[s]	čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
α	[mm/°C]	koef. lineární tepelné roztažnosti
γ	[°]	úhel čela nástroje
Δl_0	[mm]	délkový rozdíl
λ_t	[W/mK]	součinitel tepelné vodivosti
μ	[-]	koeficient tření
σ	[MPa]	napětí zpevněné povrchové vrstvy
φ	[°C]	kritická teplota ohřevu povrch. Vrstvy
φ_1	[°C]	původní teplota
φ_2	[°C]	teplota ohřevu povrchové vrstvy

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka vypočtených hodnot

