

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



## Bakalářská práce

**Obrobitelnost návarových materiálů pro technologii 3D kovového tisku**

2018

Adam Hoznauer

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

## **Poděkování**

Mé poděkování směřuje panu Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D., jenž mi svými cennými radami pomáhal s vypracováním této bakalářské práce.

## Anotace

Autor:	Adam Hoznauer
Název BP:	Obrobitelnost návarových materiálů pro technologii 3D kovového tisku
Rozsah práce:	49 stran
Školní rok vyhotovení:	2017/2018
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Zeman Ph.D.
Zadavatel:	ČVUT – FS
Klíčová slova:	Aditivní technologie, WAAM, Navařování, Obrobitelnost, 3D Tisk
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá obrobitelností materiálu vytvořeného technologií 3D tisku metodou WAAM. Z rešeršní části vychází experiment, který zkoumá řezné síly při frézování a drsnost obrobeného povrchu takto vytvořeného materiálu.

## Annotation

Author:	Adam Hoznauer
Title of bachelor thesis:	Machinability the materials used by 3D metal printing technology
Extent:	49 pages
Academic year:	2017/2018
University:	ČVUT – Fakulta strojní
Department:	Ú12134 – Department of Machining, Process Planning and Metrology
Supervisor:	Ing. Pavel Zeman Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Keywords:	Additive technology, WAAM, hardfacing, machinability, 3D printing
Annotation:	This bachelor thesis deals with machinability of material created by additive technology using method of WAAM. From recherche part come out experiment, which explore cutting forces during milling and surface roughness of material produced by this method.

## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Cíl práce.....	8
3	Aditivní technologie.....	9
	3.1 Metody 3D tisku.....	9
	3.2 Historie a vývoj 3D tisku.....	10
	3.3 3D tisk kovu.....	12
	3.4 Technologie WAAM.....	14
4	Třískové obrábění.....	16
	4.1 Teorie obrábění.....	16
	4.1.1 Princip a kinematika obrábění.....	16
	4.1.2 Řezivost a obrobitelnost.....	17
	4.2 Řezné síly.....	19
	4.2.1 Definice řezných sil.....	19
	4.2.2 Přímé měření.....	20
	4.3 Integrita povrchu.....	21
	4.3.1 Definice integrity povrchu.....	21
	4.3.2 Drsnost povrchu.....	23
5	Experiment obrobitelnosti návarových materiálů.....	26
	5.1 Příprava a analýza vzorků.....	26
	5.2 Návrh experimentu.....	27
	5.3 Měření řezných sil.....	30
	5.4 Měření drsnosti.....	33
	5.5 Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	36
	5.5.1 Měření řezných sil.....	36
	5.5.2 Měření drsnosti obrobeného povrchu.....	40
6	Závěr.....	44
7	Seznam použité literatury.....	46
8	Příloha.....	50

## 1 Úvod

Tato práce se zabývá obrobitelností návarů vytvořených pomocí aditivní technologie WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Jde o technologii, pomocí níž lze vytvářet nebo i opravovat velkou škálu různých součástí v různých odvětvích strojírenské výroby. Aditivní technologie poskytují nové možnosti při výrobě součástí velké tvarové složitosti nebo z těžkoobrobitelných materiálů, snižují náklady, šetří materiál a v současné době se z těchto důvodů začínají čím dál více využívat v mnoha odvětvích, od tvorby zubních korunek ve zdravotnictví po výrobu lopatkových kol turbín v leteckém průmyslu.

Teoretická část práce v úvodu seznamuje s obecnými možnostmi aditivní výroby, její historií a detailně popisuje technologii WAAM. Dále popisuje různé aspekty třískového obrábění, především s ohledem na následující experiment, to znamená obecný úvod do třískového obrábění, řezné síly, obrobitelnost, řezivost, integritu povrchu atd.

Z poznatků z rešeršních částí pak vychází experimentální část práce, ve které se měří a vyhodnocují řezné síly při obrábění vzorku vytvořeného metodou aditivní technologie a drsnost po jeho obrobení. Získaná data jsou zanesena do grafů a na jejich základě je následně zhodnocena obrobitelnost materiálu zpracovaného touto cestou.

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je posouzení obrobiteľnosti návarového materiálu při frézování za různých řezných podmínek. Zhodnocení je provedeno na základě změření řezné síly přímou metodou pomocí dynamometru a změření drsnosti obrobeného povrchu drsnoměrem. Získaná data z tohoto experimentu přispějí k rozšíření znalostí pro další využití technologie aditivní výroby, zejména metody navařování kovového materiálu elektrickým obloukem.



## 3 Aditivní technologie

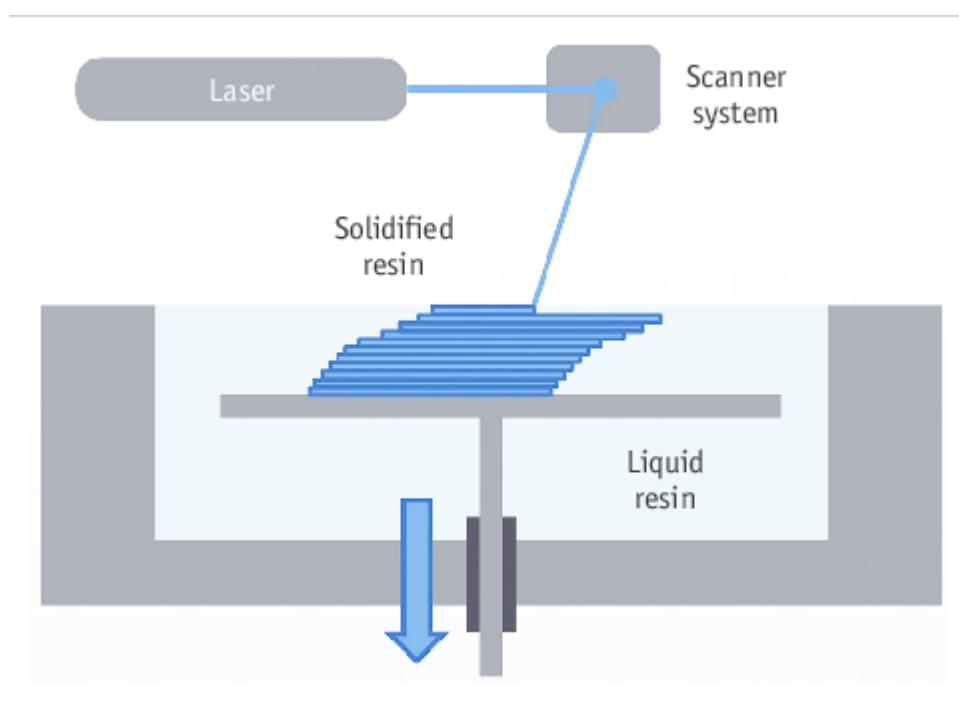
### 3.1 Metody 3D tisku

3D Tisk je laické označení pro technologii aditivní výroby, během které vzniká výrobek postupným nanášením výchozího materiálu ve vrstvách. Na rozdíl od obrábění je tedy materiál přidáván, nikoliv ubírán. Touto technologií je možno zpracovávat širokou škálu různých materiálů, od plastů přes kovy až po potraviny. Tato práce se zabývá pouze aditivní výrobou z kovu a především pak obrobiteľností hotových struktur touto technologií vyrobených. Aditivní výrobu popisuje norma ISO/ASTM 52900:2015 (Additive Manufacturing – General Principles – Terminology), která ji rozděluje do 7 současných výrobních procesů:

- **Vytlačování materiálu** (Material Extrusion) – materiál je selektivně vytlačován přes trysku nebo distribučním otvorem; metoda se používá převážně pro tisk termoplastů.
- **Nanášení tryskáním** (Material Jetting) – kapičky materiálu jsou selektivně ukládány; tisknout lze polymery a vosky.
- **Tryskání pojiva** (Binder Jetting) – tekuté pojivo je vrstvu po vrstvě nanášeno za účelem spojení práškových materiálů; tisknout lze kovy, písek nebo keramiku.
- **Laminace plátů** (Sheet Lamination) – pláty materiálu jsou spojovány a jako celek vytvářejí model.
- **Fotopolymerace** (Vat Photo-polymerization) – fotopolymerní kapalina v nádobě je vrstvu po vrstvě vytvrzována polymeračním světlem; zdrojovým materiálem pro vytvrzování je pryskyřice.
- **Spékání práškové vrstvy** (Powder Bed Fusion) – přivedená tepelná energie (laserový nebo elektronový paprsek) spéká práškový kov vrstvu po vrstvě; tavit lze oceli, hliníkové a titanové slitiny, kobalt-chromové slitiny, exotické materiály atd.
- **Přímé energetické nanášení** (Directed Energy Deposition) – materiál je nataven soustředěnou tepelnou energií i při změně polohy.[1]

## 3.2 Historie a vývoj 3D tisku

Jedná se o relativně novou technologii používanou pouze několik desetiletí. Nejstarší technologie 3D tisku se poprvé objevila koncem osmdesátých let, kdy byla nazývána technologií Rapid Prototyping (RP). Je to proto, že procesy byly původně koncipovány jako rychlá a nákladově efektivnější metoda pro vytváření prototypů pro vývoj průmyslových produktů. První patentovou přihláškou pro technologii RP podal v květnu 1980 dr. Kodama v Japonsku. Bohužel dr. Kodama nedodal úplnou patentovou specifikaci před koncem ročního termínu po podání žádosti, takže patent nezískal.[2]



Obr. 1: Princip stereolitografie [3]

Dne 11.3.1986 si Charles Hull nechal patentovat stereolitografii – jedná se o technologii, kdy je polymerová kapalina vytvrzována pomocí ultrafialového laserového paprsku. Ten v roce 1986 založil společnost 3D Systems, které se podařilo dosáhnout výrazných úspěchů na poli 3D tisku. Prvním vyrobeným strojem byl Lithography Apparatus SLA-1 a prvním veřejně dostupným byl SLA-250, nicméně tento stroj měl velmi vysoké pořizovací náklady. Název 3D tisk použilo poprvé americké MIT (Massachusetts Institute of Technology) v roce 1993. MIT následně zapůjčilo licence šesti firmám, aby zajistilo rychlejší vývoj technologie.[4]

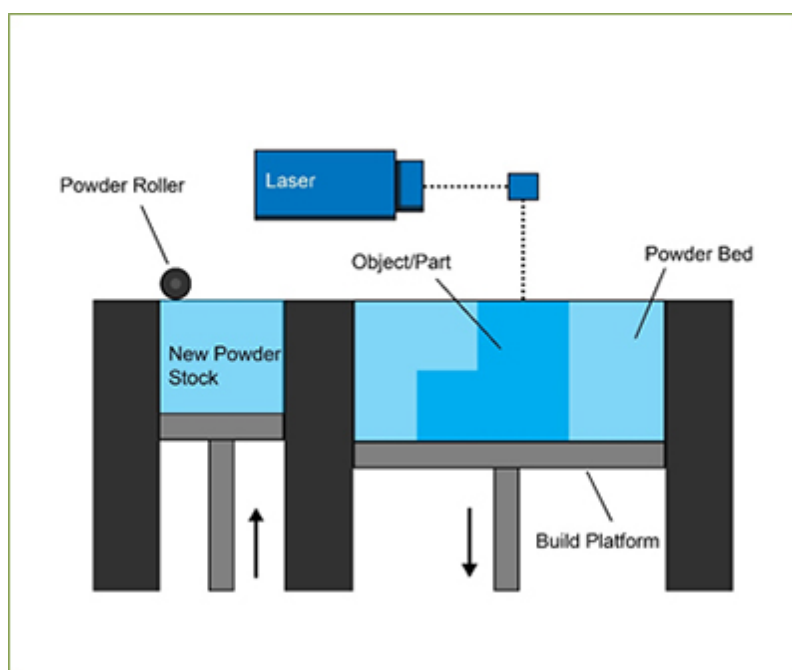


*Obr. 2: 3D tiskárna SLA-250 [5]*

V 90. letech přibylo dalších několik procesů, společností, přičemž některé z nich začaly experimentovat s kovy. Značný přínos pro rozšíření technologie mezi veřejnost měl RepRap (zkratka Replicating rapid prototyper) projekt, založený v roce 2005 v Anglii Adrianem Bowyerem. Jedná se o komunitní projekt na principu opensource, kdy je možné na této tiskárně vytisknout klíčové díly potřebné ke stavbě druhého kusu. Veškeré plány pro stavbu dalšího zařízení jsou komunitou vývojářů volně poskytnuty veřejnosti a díky cenové dostupnosti se stal velice oblíbeným. V roce 2008 se objevila první hromadná služba Shapeways, která vytvářela levné 3D modely pro architekty a designéry. V témže roce byla vytisknuta první protéza nohy. Od roku 2010 začala končit platnost několika patentů, díky čemuž se mohly začít 3D tiskárny rozšiřovat po celém světě. [6]

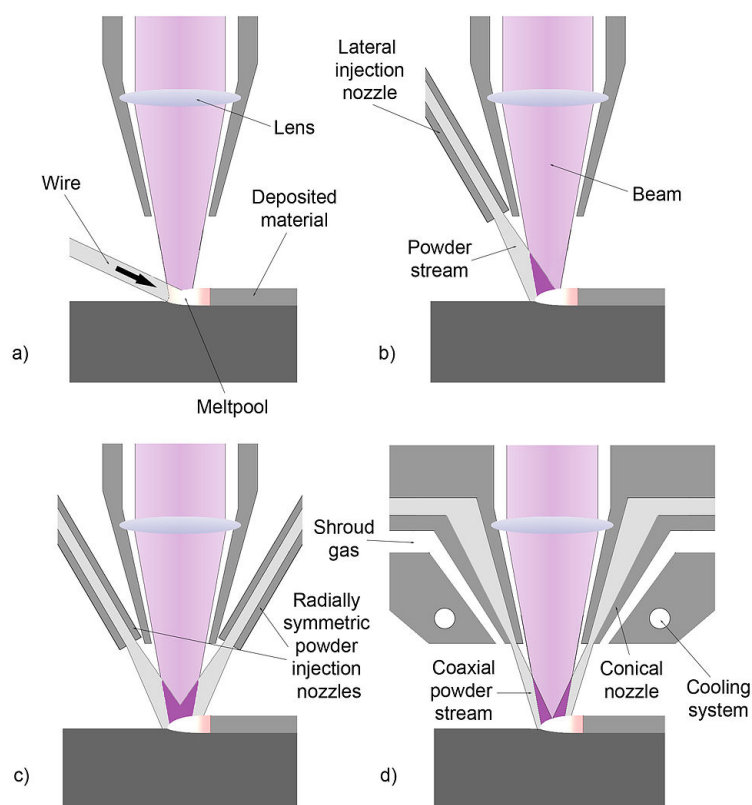
### 3.3 3D tisk kovu

Existuje více metod 3D tisku z kovu, přičemž každá z nich má své výhody i nevýhody. Liší se v rychlosti tvorby součástí, kvalitě a přesnosti tisku, využitelnosti pro různé materiály a dalších ohledech. Je možné vytvářet součásti z ocelí, hliníkových slitin, slitin mědi, titanu a dalších materiálů. Výchozí materiál může být použit ve formě prášku nebo drátu, vzácně i v jiné podobě, například ve formě folie či tenkého plechu. Prášková technologie může využívat buď přímé dodávání prášku do místa tavení (známé též jako Laser Cladding nebo Laser Metal Deposition) nebo práškové lože (Selective Laser Melting či Direct Metal Laser Sintering), do kterého se doplňuje materiál po vrstvách a následně se přesně zacílí a roztaví pouze potřebný materiál. Poslední dvě jmenované metody se liší tím, že při SLM je použit prášek s jedním bodem tání a při výrobě je zcela roztaven, zatímco při DMLS je prášek složen z materiálů o různém bodu tání, které spolu reagují na molekulární úrovni při zvýšených teplotách.[7]



Obr. 3: Systém s práškovým ložem [8]

Při technologii Laser Cladding nebo také laser metal deposition (LMD) je prášek dodáván kontinuálně do místa navařování, navíc umožňuje operovat i s výchozím materiálem ve formě drátu. Drát přivádí podávací mechanismus a prášek je dodáván buď pomocí gravitace nebo unášen proudem inertního plynu. Využívá se přitom boční tedy laterální nebo koaxiální tryska, přičemž koaxiální tryska umožňuje vytvářet složitější součásti, jelikož materiál z laterální trysky nemusí být schopen se dostatečně rychle dodávat do všech míst navařování. I drát může být přiváděn koaxiálně, kdy je po obvodu navařovací hlavy umístěno více paprsků a středem do místa styku paprsků je přiváděn drát spolu s plynem tvořícím ochrannou atmosféru. Výhodou použití laseru k navařování je malá tepelně ovlivněná oblast, což snižuje deformaci součásti a díky rychlému chladnutí a tuhnutí návaru pak pomáhá získat jemnou mikrostrukturu, která zlepšuje jeho vlastnosti, například mez pevnosti nebo otěruvzdornost.[9]



Obr. 4: Různé způsoby přivádění materiálu do místa tavení při použití drátu (a) nebo prášku (b),(c),(d) [10]

Dále je pak možno dělit aditivní technologie tisku z kovu podle způsobu tavení materiálu, které může probíhat například laserem, elektronovým paprskem, plynovým hořákem nebo elektrickým obloukem. Vytvářet 3D tiskem kovové součásti lze i bez tavení materiálu. Aditivní technologii bez tavení materiálu představuje například Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), při které vzniká produkt spojováním kovových fólií ultrazvukovými vibracemi.[11]

### 3.4 WAAM

Jedná se o navařování drátového materiálu pomocí elektrického oblouku (Wire Arc Additive Manufacturing). Touto technologií lze vytvářet složité součásti, které jsou jinými postupy výrobně složité a neekonomické. Je možno tvořit součásti ze všech svařitelných materiálů, například z ocelí, hliníku, titanu, niklu, mědi nebo jejich slitin. Výhodou metody je rychlost nanášení, možnost vytvářet i součásti větších rozměrů, na rozdíl od aditivních technologií využívající laser nebo elektronový paprsek, a cena, především oproti technologiím využívajícím prášek.[12]



*Obr. 5: Lopatka čerpadla vytvořená technologií WAAM z materiálu G3Si rychlostí 230cm<sup>3</sup>/h*

*[13]*

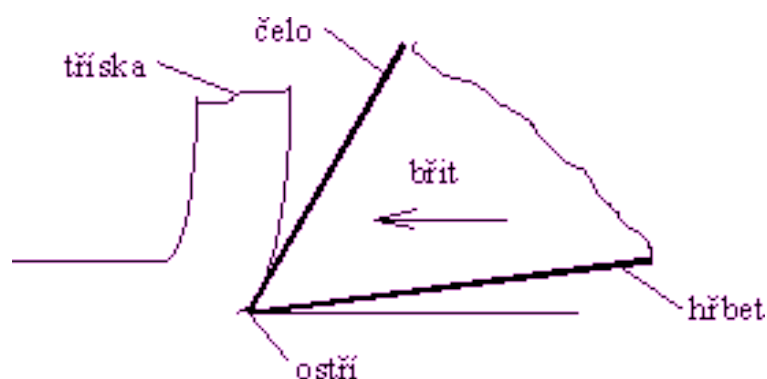
Nejčastěji je pro tuto metodu využívána technologie obloukové svařování (resp. navařování) wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (TIG/WIG), případně obloukové navařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (MIG/MAG). Pohyb navařovací hlavy je zabezpečen pomocí robotického ramena nebo počítačem řízeným portálem, případně může být navařovací hlava zakomponována do téměř klasického obráběcího centra. Rychlost nanášení může být až jeden kilogram materiálu za hodinu pro technologii TIG a několik kilogramů pro technologii MIG/MAG. Nevýhodou MIG/MAG je méně stabilní oblouk a rozstřík materiálu v průběhu navařování, dále možná zvýšená porézita navařovaného materiálu.[12]

## 4 Třískové obrábění

### 4.1 Obecný úvod k třískovému obrábění

#### 4.1.1 Princip a kinematika obrábění

Třískovým obráběním se rozumí proces, kterým vznikají součásti požadovaných parametrů (tvaru, rozměrů, přesnosti) odebráním materiálu ve formě třísky břitem, jež je vtlačován do povrchu obrobku řeznou silou. Existuje mnoho druhů třískového obrábění, například soustružení, frézování, vrtání, řezání, broušení, vystružování, hoblování, obrážení, superfinišování, lapování, honování, protahování, atd... Jednotlivé technologie se liší v mnoha zásadních parametrech, jako je třeba řezná rychlost či velikost třísky a jsou vhodné pro jiné aplikace. U některých technologií, například soustružení nebo obrážení, koná hlavní řezný pohyb obrobek, u jiných je to nástroj (vrtání, frézování). Většina produktivních technologií používaných ve strojírenské výrobě využívá břit s definovanou geometrií, pro dokončovací operace se pak používají především technologie, kde brusivo s množstvím nepravidelných a nahodile orientovaných břitů vytvoří hladší povrch. Jelikož většina obráběcích procesů je automatizována, je požadavkem, aby byla tříska dělena v co nejkratší délce, jelikož by se mohla dlouhá odcházející tříska dostat zpět mezi nástroj a obrobek a poškodit tak povrch obrobku či břit nástroje.[14]



Obr. 6: Vznik třísky při obrábění [15]



Pohyb nástroje se dělí na řezný, stávající se z hlavního a vedlejšího pohybu (posuvu) a na přísuv. Každý z těchto pohybů může být konán jak obrobkem, tak nástrojem. Hlavní pohyb může být přímočarý, otáčivý či složený. Přímočarý hlavní pohyb je typický pro hoblování, obrázení nebo protahování. Otáčivý je používán při soustružení, vrtání, vyvrtávání frézování či broušení. Složený řezný pohyb se využívá především při dokončovacích operacích jako je lapování či honování. Posuv můžeme dělit na základě tvaru dráhy na přímočarý nebo křivočarý, nejčastěji otáčivý, a na základě časového průběhu na plynulý či přerušovaný.[15]

### 4.1.2 Řezivost a obrobiteľnosť

Obrobiteľnosť lze definovat jako míru schopnosti daného materiálu být opracován obráběním. Rozumí se tím souhrn vlastností, které charakterizují daný materiál a jiných faktorů, které mají vliv na průběh obrábění. Jedná se zejména o chemické složení obráběného materiálu, jeho fyzikální a chemické vlastnosti, způsob výroby a tepelné zpracování obráběného materiálu, metodu obrábění, pracovní prostředí a geometrii nástroje. Nejčastěji se při vyhodnocování obrobiteľnosti vychází z intenzity opotřebování břitu.[14]

Technické konstrukční materiály jsou z hlediska obrobiteľnosti rozděleny do devíti základních skupin, které se označují malými písmeny:

- a-litiny
- b-oceli
- c-těžké neželezné kovy (měď a její slitiny)
- d-lehké neželezné kovy (hliník a jeho slitiny)
- e-plastické hmoty
- f-přírodní nerostné hmoty
- g-vrstvené hmoty
- v-tvrzené litiny

V jednotlivých skupinách jsou materiály podle obrobiteľnosti rozděleny až do 20 tříd, označených čísly 1 až 20. Tyto třídy jsou odstupňovány v geometrické řadě s kvocientem 1,26. [14]

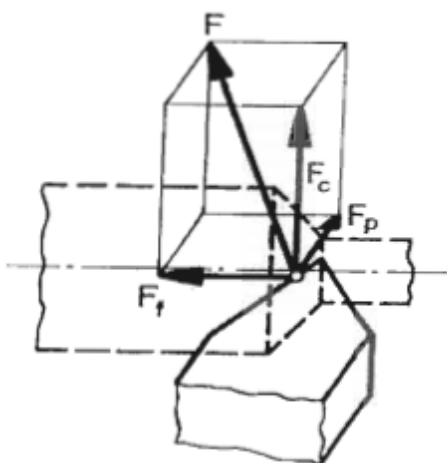
Řezivostí se rozumí schopnost nástroje efektivním způsobem odebrat třísku z obráběného materiálu. Tato vlastnost úzce a neoddělitelně souvisí s obrobiteľností. Je závislá na fyzikálních a mechanických vlastnostech nástroje, ale souběžně je ovlivňována například použitou metodou obrábění, geometrií nástroje, řeznými podmínkami, řezným prostředím atd. [16]

Obrobiteľnost ovlivňuje celý průběh i výsledek obrábění materiálu, má vliv na řezné síly, trvanlivost nástroje či na kvalitu obrobeného povrchu. K objektivnímu posouzení obrobiteľnosti se užívá několik metod. Při nich je sledována dosažitelná řezná rychlost pro dané podmínky, řezný odpor vznikající při obrábění, příkon potřebný pro obrábění, teplota břítu, jakost obrobené plochy a další parametry. Ve strojírenství je obrobiteľnost daného materiálu vyjádřena poměrem řezné rychlosti dosažitelné u tohoto materiálu k řezné rychlosti dosažitelné u materiálu etalonového, při jinak stejných podmínkách.[16]

## 4.2 Řezné síly

### 4.2.1 Definice řezných sil

Síla obrábění je síla, kterou je nástroj vtlačován do obráběného materiálu. Působí v obecném směru a lze ji rozložit do tří navzájem kolmých směrů. Je to složka ve směru vektoru řezné rychlosti (řezná síla  $F_c$ ), složka ve směru přísuvu (pasivní síla  $F_p$ ) a složka ve směru posuvu (síla posuvu  $F_f$ ). Složka ve směru řezné rychlosti je ze všech sil největší a určuje velikost průtažné síly (například u hoblování nebo protahování), případně velikost kroučícího momentu při rotačním pohybu. Síla posuvu se na celkovém příkonu podílí jen málo a působí ve směru největší tuhosti obráběcí soustavy. Pasivní síla působí naopak ve směru nejmenší tuhosti obráběcí soustavy, což výrazným způsobem ovlivňuje přesnost obrobené plochy. Řezné síly jsou limitujícím prvkem obrobitelnosti a ovlivňují spotřebu energie během procesu obrábění. Vysoké řezné síly zvyšují neúměrně nároky na výkon a snižují trvanlivost nástroje. Síly lze určit měřením nebo výpočtem, přičemž měřit je lze nepřímo z příkonu hlavního elektromotoru obráběcího stroje nebo přímo pomocí dynamometrů.[14] [17]



Obr. 7: Rozklad řezné síly na tři na sebe navzájem kolmé složky při soustružení [14]

Výpočet pro nepřímé měření řezných sil se provádí především z výkonu elektromotoru obráběcího stroje a používá se pro něj vztah po užitečný výkon při obrábění:

$$P_{už} = F_c \cdot v_c$$

$P_{už}$  - užitečný výkon a jedná se o rozdíl mezi celkovým výkonem obráběcího stroje a výkonem při chodu naprázdno [W]

$F_c$  – Řezná síla [N]

$v_c$  - je řezná rychlost [m/s]

Tato metoda nevyžaduje pořízení drahé speciální měřicí techniky a je možné ji využít při všech druzích obrábění. Umožňuje nám však bohužel získat pouze řeznou složku síly a není tolik přesná, jelikož zanedbává rozdílnou účinnost pohonu stroje při chodu naprázdno a pod zátěží.[18]

#### 4.2.2 Přímé měření

Přímé měření řezných sil probíhá pomocí měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění pomocí dynamometrů. Podle počtu měřených složek rozlišujeme dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a dynamometry pro měření krouticích momentů. Mohou být konstruovány jako mechanické, hydraulické, pneumatické, optické nebo jako elektrické (indukční, kapacitní, odporové, piezoelektrické). Pro cejchování jiných druhů dynamometrů se zpravidla používají mechanické dynamometry, jelikož lze u nich nejsnáze vyloučit nežádoucí rušivé vlivy a mají lineární vztah mezi sledovanou silou a vlastními měřenými údaji. V technické praxi jsou pak nejčastěji užívány elektrické dynamometry, které mají mnoho výhod, například malé rozměry měřicích elementů, snadný přenos signálu, možnost snímání signálu při rotujících a pohybujících se součástech a podobně.[19]



Obr. 8: Třísložkový dynamometr od firmy Kistler [20]

Dle způsobu mechanicko-elektrické transformace lze u elektrických dynamometrů rozlišovat systémy parametrické, jež vyhodnocují změnu jednoho z parametrů elektrického obvodu (indukčnosti  $L$ , kapacity  $C$  a odporu  $R$ ) a systémy generátorové, jejichž princip spočívá ve vzniku napětí nebo proudu při deformaci, například při piezoelektrickém jevu. [19]

## 4.3 Integrita povrchu

### 4.3.1 Definice integrity povrchu

Je značné množství charakteristik kvality povrchové vrstvy a souhrn všech těchto charakteristik je nazýván integrita povrchu. Mezi její nejdůležitější parametry patří například drsnost, rozměrová a tvarová přesnost či zbytková pnutí. Všechny tyto vlastnosti mají vliv na užitnost vyrobené součásti, ať už z hlediska životnosti, provozní kvality nebo bezpečnosti. Integrita povrchu je ovlivněna podmínkami při jeho vzniku, tedy při obrábění. Jedná se například o oblast primární plastické deformace, jež zasahuje pod úroveň budoucího povrchu, což je výrazné hlavně při velkých úhlech řezu, například při broušení. Dále může být integrita povrchu ovlivněna vysokou teplotou v povrchové vrstvě, jež způsobí strukturní změny, či vznikajícím nestabilním nárůstkem, jež ovlivňuje drsnost obrobené plochy či její přesnost, například při vystružování. [14]

Přesnost vyrobené součásti je popsána pomocí rozměrových a geometrických tolerancí. Rozměrové tolerance jsou určeny normou ČSN 01 4201 a dělí se do 20 tříd přesnosti označených čísly tak, že se vzrůstajícím číslem rozsah rozměrů roste, respektive přesnost klesá. Poloha tolerančních polí se označuje písmenem umístěním před číslem. Dále je možné na výkrese toleranci rozměru předepsat nefunkční kótu a poté pro ně platí všeobecné úchytky ve 4 třídách přesnosti – f – jemná, m – střední, c – hrubá, v – velmi hrubá podle ČSN ISO 2768-1.

Geometrické tolerance se dělí na tolerance tvaru, tolerance směru, tolerance polohy a tolerance házení. Všeobecná geometrická tolerance obsahuje 3 třídy přesnosti – H – nejpřesnější, K – střední, L – nejméně přesný stupeň. Mezi tolerance tvaru patří tolerance přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, tvaru profilu a tvaru plochy, tolerance směru obsahuje tolerance rovnoběžnosti, kolmosti a sklonu, tolerance polohy obsahuje toleranci umístění, toleranci soustřednosti a souososti a toleranci souměrnosti. Tolerance házení se pak dělí na toleranci házení kruhového a celkového. [21]

Zbytková pnutí představují mechanická napětí v tělese, která jsou přítomná bez působení vnějších sil a vznikají jako důsledek výrobních postupů. Tlaková zbytková napětí jsou výhodná z toho hlediska, že uzavírají vznikající trhliny, zatímco tahová podporují jejich vznik a rozvoj. Pokud jsou příliš velká, a to ať už tahová nebo tlaková, může vlivem jejich uvolňování docházet k deformacím materiálu. Vznik zbytkových napětí je v základním přiblížení spojen s výskytem plastické deformace: Zbytková napětí jsou rovna rozdílu mezi skutečnými napětími v pružně plastickém tělese a fiktivními napětími, které by v něm vznikly za předpokladu ideálně pružného materiálu.[22]

Příčiny jejich vzniku je možné rozdělit do několika skupin:

- Mechanické – zbytkové pnutí tvoří nehomogenní plastická deformace vzniklá při mechanickém zpracování materiálu
- Tepelné – pnutí tvořeno tepelnou deformací v důsledku nehomogenního teplotního

pole

- Chemické a strukturní – při nich pnutí vzniká změnami objemu materiálu v důsledku chemických reakcí, fázových přeměn a rozdílných vlastností jednotlivých fází
- Vícevrstvé struktury – zde pnutí vytváří různé fyzikální vlastnosti jednotlivých vrstev
- Nové technologie – pnutí vzniká nerovnovážnými podmínkami procesu ve speciálních technologiích vytváření a modifikace materiálů
- Konstrukční celky – nepřesnosti jednotlivých součástí spojených v konstrukční celek vytváří vnitřní pnutí

Většinou je celkové pnutí způsobeno více vlivy, které ovlivňují výsledné zbytkové pnutí v materiálu. [22]

Zbytková napětí mohou být trojího druhu. Zbytková napětí prvního druhu zasahují celý objem součásti nebo její podstatnou část, takže mají makroskopický charakter. Mezi tato napětí patří i napětí v nekonečně tenké, ale rozsáhlé oblasti. Porušením kompaktnosti součásti například jejím rozdělením dojde ke změně její makrogeometrie. Zbytková napětí druhého druhu zasahují objem několika krystalových zrn a porušením kompaktnosti součásti nemusí dojít ke změně její makrogeometrie. Zbytková napětí třetího druhu se projevují v objemu několika atomových vzdáleností a dosahují rovnováhy jen v dostatečně velké části zrna. Porušením kompaktnosti součásti nedojde ke změně její makrogeometrie. [23]

### 4.3.2 Drsnost povrchu

Strukturu povrchu obrobku lze popsat pomocí tří základních parametrů:

- P-profil – Základní profil, složený z profilu W a R
- R-profil – Profil drsnosti, krátkovlnné složky
- W-profil – Profil vlnitosti, dlouhovlnné složky

Strukturou povrchu jsou myšleny nerovnosti povrchu součásti, které vznikly jako stopy po nástroji.[24]

Drsnost povrchu součásti v příčném a podélném směru se zpravidla liší. Příčný směr je kolmý ke směru řezného pohybu, podélný je s ním rovnoběžný. Stupeň drsnosti měříme zásadně ve směru největší drsnosti. Druh a stupeň drsnosti záleží na způsobu obrábění, vlastnostech obráběného materiálu, na tvaru a geometrii břitu obráběcího nástroje a na řezných podmínkách. Drsnost je možno definovat několika parametry, mezi nejčastější patří Ra, Rz, Rt, Rp, RSm a Rmr.[25]

### **Hodnota Ra**

Hodnota Ra je střední hodnotou všech odchylek od střední čáry profilu na vyhodnocované délce. Na základě tohoto parametru nelze určit, jestli mají odchylky charakter výstupků nebo prohlubní, navíc tato hodnota není významně ovlivněna ojedinělými odchylkami, což zvyšuje riziko zanedbání velkého výstupku či rýhy.[24]

### **Hodnota Rz**

Průměrná hodnota z výšek profilu, které se stanoví z největší výšky výstupku a největší hloubky rýhy na každé jednotlivé základní délce. Typicky je na vyhodnocované délce pět základních délek, ale za určitých okolností se měří na jiný počet základních délek. Největší hodnota výšky profilu na vyhodnocované délce se nazývá Rzmax.[24]

### **Hodnota Rt**

Součet výšky největšího výstupku a hloubky největší prohlubně na celé vyhodnocované délce. Jedná se o jeden z nejpřísnějších požadavků na drsnost povrchu.[24]

### **Hodnota Rp**

Je průměrnou hodnotou největších výšek výstupků od střední čáry profilu stanovených na jednotlivých základních délkách.[24]

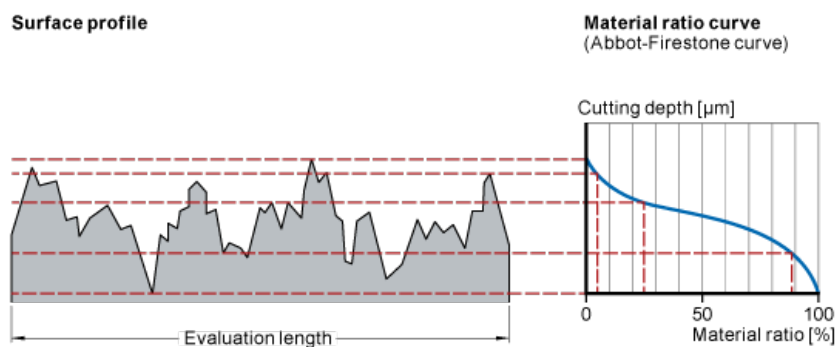
### **Hodnota Rsm**

Jde o délkový parametr určující průměrnou šířku prvků profilu v rozsahu základní délky.



### Hodnota Rmr(c) – Materiálový poměr profilu (nosná křivka)

Je nejvhodnějším parametrem pro určení míry odolnosti proti opotřebení daného povrchu. Udává se v procentech a určuje podíl materiálu profilu v dané výšce. Na základě parametrů Rmr lze sestavit tzv. nosnou (Abbotovu) křivku. [24]

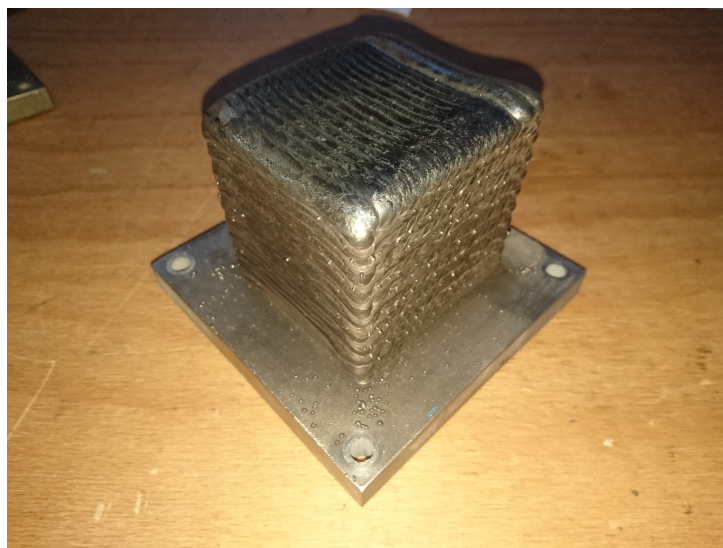


*Obr. 10: Abbotova křivka podílu materiálu [26]*

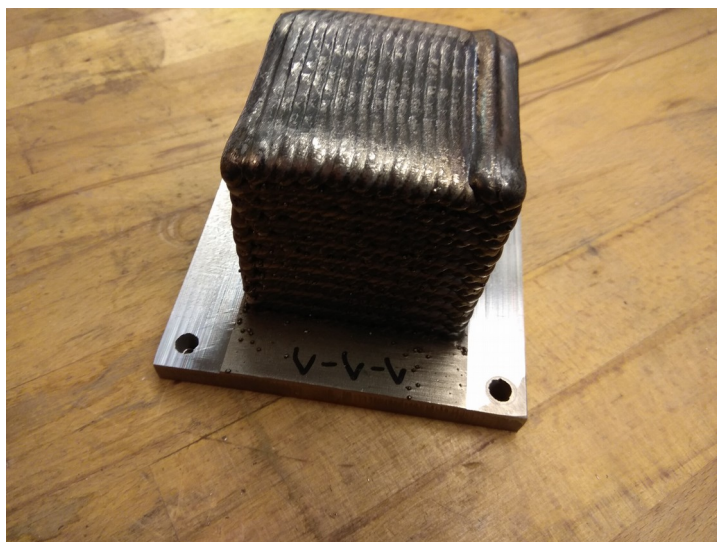
## 5 Experiment obrobitelnosti návarových materiálů

### 5.1 Příprava a analýza vzorku

Vzorek byl připraven pouze jeden a to to pomocí technologie WAAM, z materiálu DIN 1.4404. Přesné rozměry nebylo možné určit, jelikož byl povrch vzorku značně nepravidelný, nicméně přídavek byl dostatečný, aby bylo možné do objemu vzorku vepsat krychli o rozměrech 60x60x60 mm. Podle hodnot dodaných ke vzorku byla tvrdost vzorku na povrchu 165.3667HB. Vzorek bylo po vizuální kontrole nutno k experimentu dále připravit. Pravděpodobně tepelné působení při tvorbě návaru způsobilo prohnutí základové desky vzorku a tudíž bylo nutné ji pro dokonalé upnutí pro následné měření řezných sil zesponovat. Také musela být tato základová deska obrobena i z vrchu, jelikož byla znečištěna odstříkujícím kovem v průběhu navařování a to by mohlo ovlivnit kvalitu upnutí vzorku pomocí upínek.



*Obr. 11: Neupravený vzorek znečištěný kapičkami odstříkujícího kovu a na prohnuté základní desce*

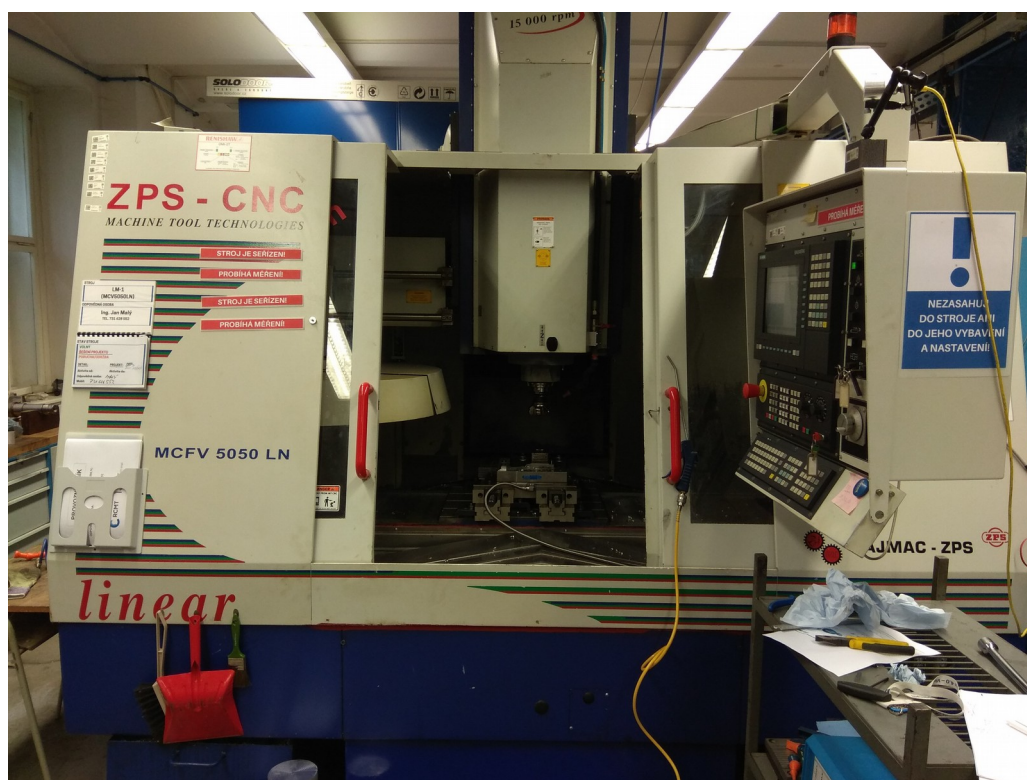


*Obr. 12: Připravený vzorek se zarovnanou spodní stranou destičky a odstraněnými kapičkami odstříkujícího kovu*

Povrch vzorku je velice členitý a naznačuje, že technologie bude v praxi využitelná především v kombinaci s následným obráběním, kdy se navaří materiál s dostatečným přídavkem a ten se poté třískově obrobí, což však v porovnání s konvenčními metodami stále může znamenat značnou úsporu, jak materiálu, tak času.

## 5.2 Návrh experimentu

Obráběným a testovaným materiálem byla zvolena nerezová ocel AISI 316L, tedy DIN 1.4404 či ČSN 17439. Materiál je svařitelný bez rizika vzniku mezikrystalové koroze v oblasti tepelného ovlivnění a má dobrou třískovou obrobitelnost, což z něj činí vhodného kandidáta na materiál pro aditivní výrobu. Navíc lze tuto nerezovou ocel použít i pro styk s potravinami a pouze hraničním obsahem niklu je omezeno použití pro styk s pitnou vodou. [27]



Obr. 13: Celkový pohled na použité obráběcí centrum

Materiál byl navařen technologií WAAM na ocelovou čtvercovou podložku do tvaru krychličky o straně  $>60$  mm, jelikož metoda neumožňuje navařit zcela přesné rozměry a bylo třeba mít jistou rezervu. Tento vzorek byl upnut upínkami na piezoelektrický dynamometr firmy Kistler v CNC obráběcím centru MCFV 5050 LN (LM1), jež disponuje výkonem 18 kW a maximálně 15000 otáčkami za minutu, což znamená více než dostatečnou výkonovou rezervu pro tento experiment. Řídicím systémem stroje je Sinumerik 840.D.

Obráběcím nástrojem byla čelní fréza Double Octomill firmy Seco typ R220.48 – 0080 - 09 06SA o průměru 80 mm, do které se upínají speciální oboustranné destičky Double Octomill velikosti 09 s celkem 16 řeznými hranami od téže firmy. Frézy Double Octomill mají také povlakované povrchově kalené těleso zajišťující dlouhou životnost nástroje a ochranu nástroje před opotřebením, přičemž také zabraňuje navařování žhavých třísek k tělesu frézy. Konkrétní destičkou pak byla zvolena ONMU090520ANTN-M14-15° T350M. Do frézovací hlavy byla upnuta pouze jedna.[28]



*Obr. 14: Použitá vyměnitelná břitová destička Double Octomill [29]*



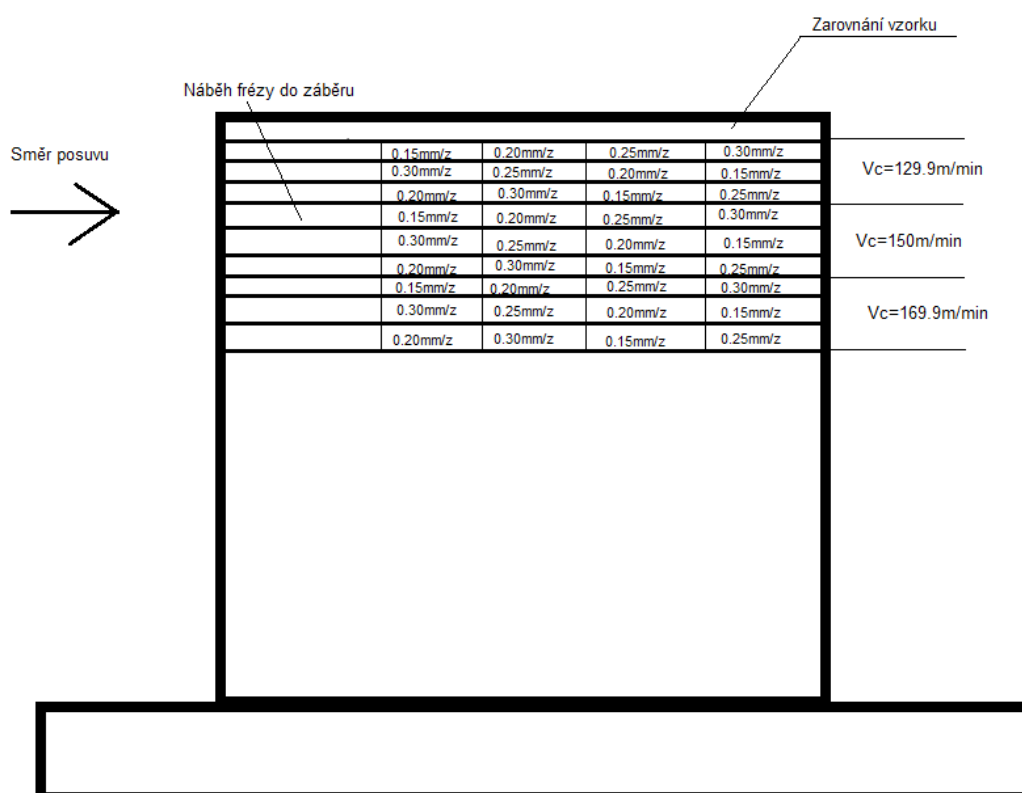
*Obr. 15: Použitá fréza SECO R220.48 upnutá v obráběcím centru*

Řezné podmínky byly stanoveny v souladu s katalogovými požadavky pro daný obráběný materiál a vyměnitelnou břitovou destičku. Hloubka řezu pro experiment byla stanovena na 2 mm. Daná destička má doporučený rozsah posuvů na zub při obrábění materiálu DIN 1.4404 0.15-0.3 mm a zároveň řezné rychlosti 170 m/min pro posuv na zub 0.15 mm, 145 m/min pro 0.25 mm a 130 m/min pro 0.35 mm. Z toho byly stanoveny čtyři různé posuvy na zub odstupňované po pěti setinách milimetru - 0.15, 0.2, 0.25 a 0.3 mm a troje otáčky - 517, 597 a 676 za minutu, z čehož vyplývají při průměru frézy 80 mm řezné rychlosti 130, 150 a 170 m/min. Frézování se provádělo v první části za sucha, ve druhé byla ručně dodávána olejová emulze.



### 5.3 Měření řezných sil

V této části bylo měření pro každou kombinaci podmínek provedeno třikrát, aby byla získána statisticky relevantní data. Na každé vrstvě byly měřeny síly pro všechny čtyři posuvy při jedné řezné rychlosti, v dalších dvou vrstvách pak bylo pouze pořadí posuvů změněno, aby se vyloučil vliv opotřebení destičky a případné nehomogenity návarového materiálu. Po odebrání tří vrstev při jedné řezné rychlosti byla tato zvýšena a měření provedeno znovu při vyšší řezné rychlosti. Celkem bylo pro měření řezných sil použito 9 vrstev materiálu, přičemž na každou odebíranou vrstvu byla vyměnitelná břitová destička otočena a použit nový břit. Princip rozdělení použitých řezných podmínek na vzorku je vyobrazen na nákresu uvedeném níže. K měření řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr firmy Kistler a software DynoWare, který sloužil i pro následné vyhodnocení výsledků.

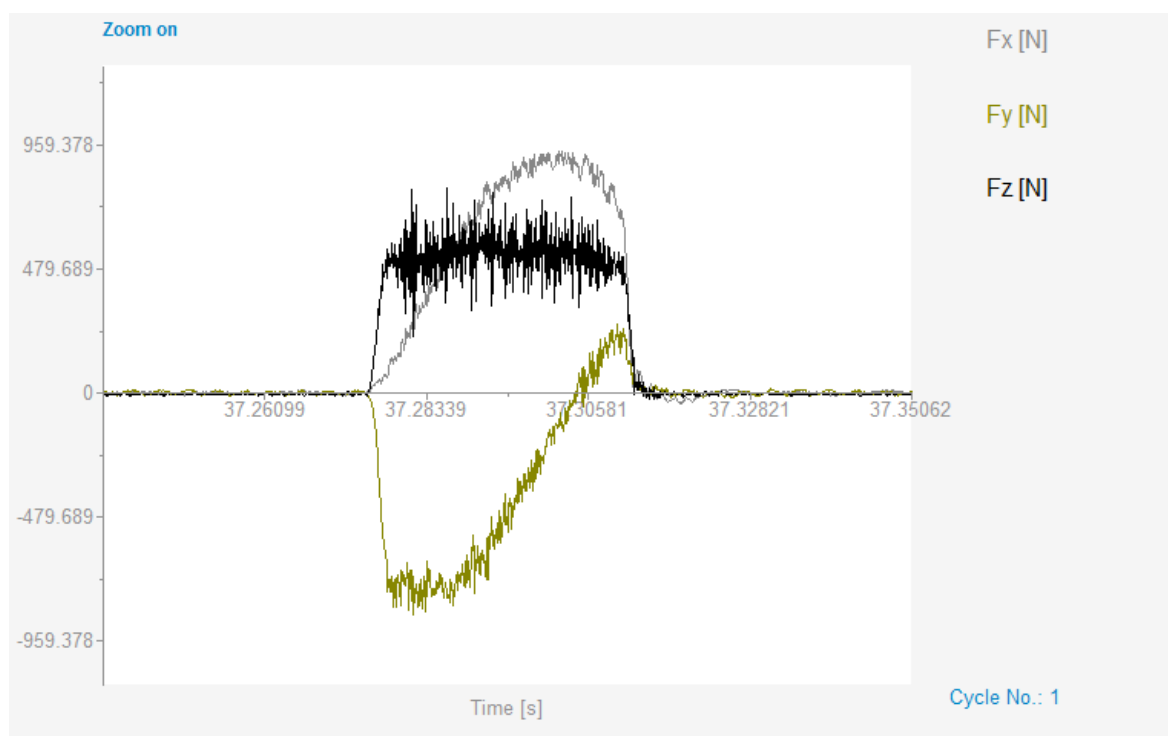


Obr. 16: Rozložení jednotlivých posuvů a řezných rychlostí v objemu vzorku



Obr. 17: Vyhodnocovací aparatura k dynamometru Kistler

Při jedné daných řezných podmínkách se na každé odebírané vrstvě materiálu vyhodnocovalo celkem 9 záběrů, z toho vždy tři po sobě jdoucí a to na začátku řezu, ve prostřed a na jeho konci. Celkem tedy bylo při každé kombinaci řezných podmínek získáno 27 hodnot pro každou jednotlivou složku řezné síly. Dále bylo pomocí programu Microsoft Excel vypočítáno stejný počet hodnot aktivní síly  $F_a$  skládající se z vektorového součtu dvou na sebe kolmých složek síly  $F_x$  a  $F_y$ . Toto bylo provedeno z toho důvodu, že průběh složek síly  $F_x$  i  $F_y$  byl vychýlen na jednu stranu a tudíž  $F_a$  neodpovídá velikosti přepony na dvou kolmých odvěsnách o velikosti maximálních hodnot  $F_x$  a  $F_y$ , ale je o něco menší.



Obr. 18: Průběh složek řezné síly v průběhu jednoho záběru při nejnižším posuvu na zub 0.15 mm a otáčkách  $517 \text{ min}^{-1}$  ukazuje stranové vychýlení dvou složek řezné síly  $F_y$  a  $F_x$

V průběhu měření složek řezné síly byla detekována velice poměrně výrazné poškození povrchu způsobené neznámou příčinou. Tento jev byl v přibližně stejné intenzitě patrný pro všechny kombinace řezných podmínek a bylo tedy rozhodnuto, že následující obrábění vrstev pro měření drsnosti bude provedeno za použití olejové emulze, která měla povrch po obrábění zlepšit.

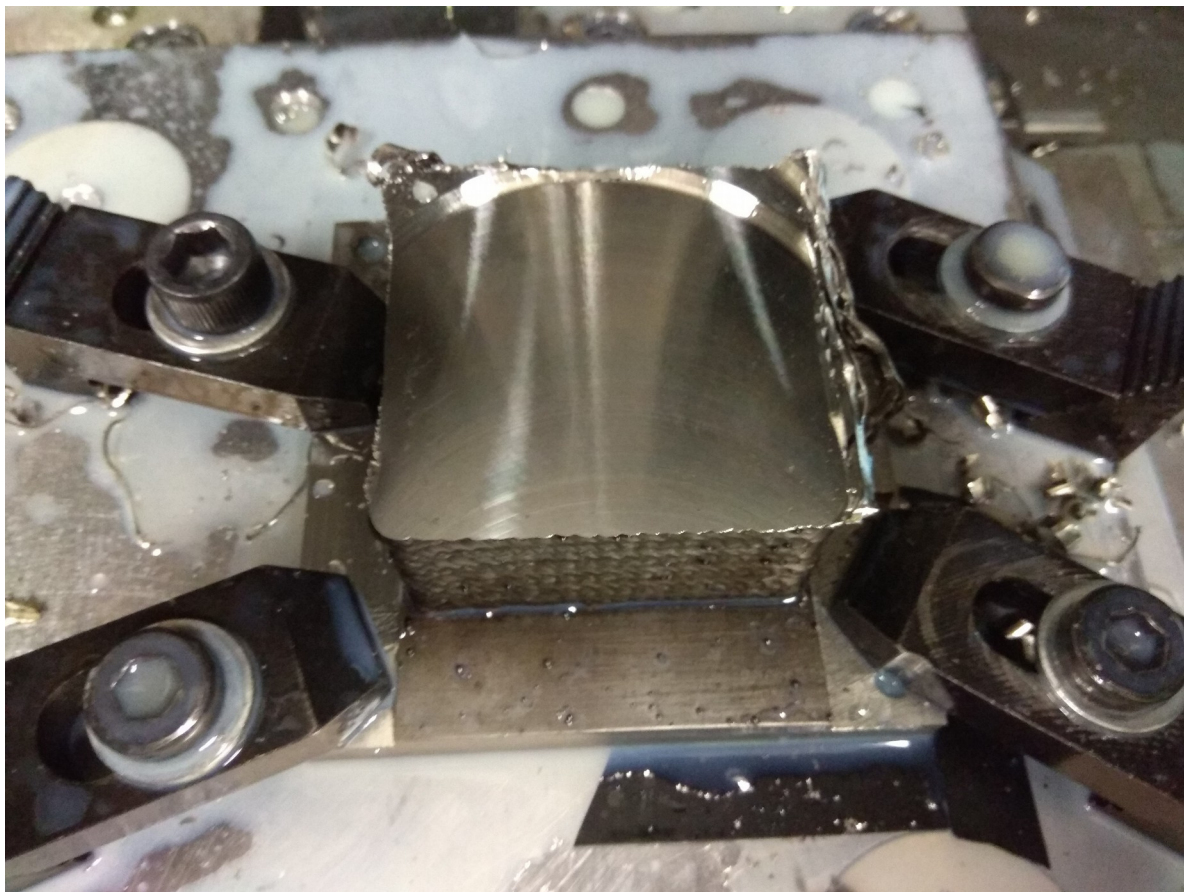


## 5.4 Měření drsnosti obrobeného povrchu

K měření drsnosti byla vždy za kombinace jedné řezných podmínek odebrána celá vrstva materiálu a následně jsme přímo na vzorku upnutém ve stroji provedli měření drsnosti. Vrstvy byly odebírány shora od nejnižších otáček a posuvů po největší a každá vrstva byla odebrána novým břitem vyměnitelné destičky. Zároveň mezi jednotlivými vrstvami bylo provedeno zarovnání 0.1 mm, aby došlo k odstranění zbytkového materiálu na vzdálené hraně vzorku, kam nástroj při vytváření povrchu pro měření nezajíždí, aby nedošlo k obrábění povrchu na druhé straně frézy a tím i zkreslení výsledků. Z důvodů nekvalitního povrchu detekovaného při první části experimentu bylo toto obrábění provedeno za použití olejové emulze dávkované ručně, jelikož okruh pro procesní kapalinu na použitém stroji nebyl zprovozněn. Procesní kapalina byla do místa řezu dodávána průtokem zhruba 1 l/min.

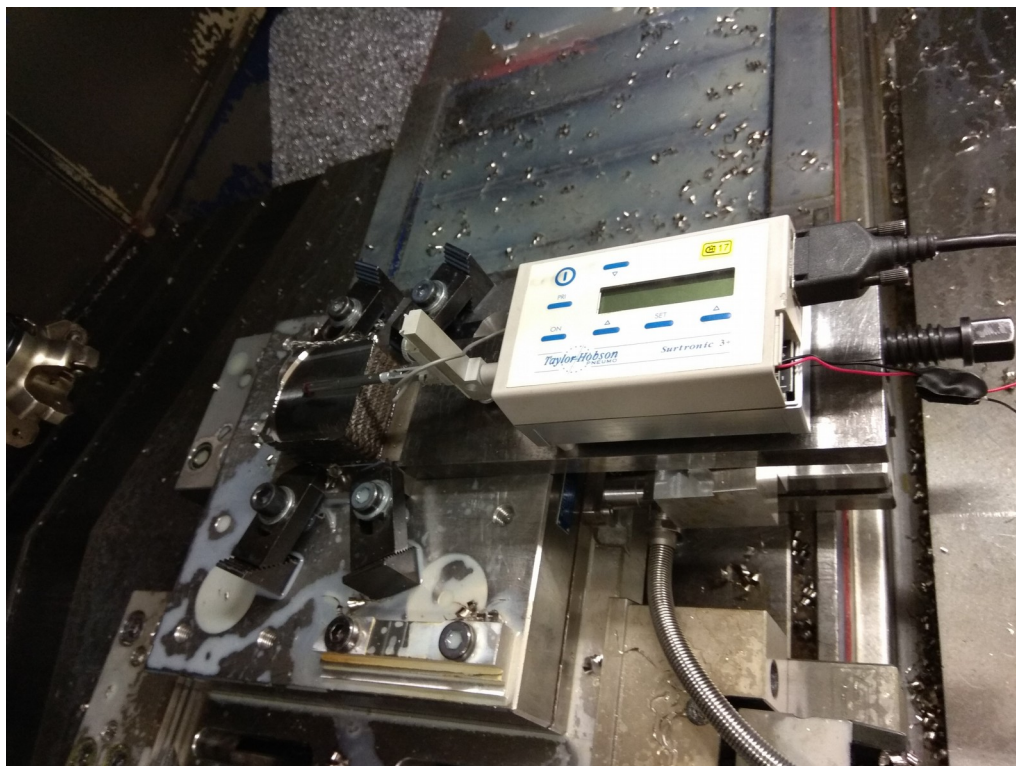


*Obr. 19: Povrch poškozený při obrábění za sucha, nevhodný pro měření drsnosti*



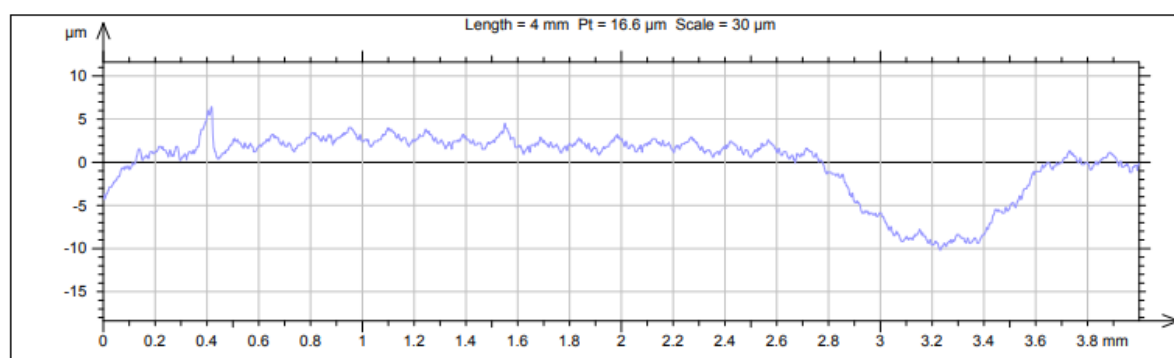
*Obr. 20: Povrch při použití ručně dávkované olejové emulze do místa řezu*

K měření drsnosti byl použit drsnoměr Surtronic 3+ firmy Taylor-Hobson připojený sériovým portem k PC. Tento drsnoměr byl vypořádán tak, aby ho bylo možno usadit do stroje a nebylo nutné po každé vrstvě vzorek vyjmout, změřit a znovu upnout. Na každé vrstvě bylo měřeno měření v rozsahu pěti základních délek a to v ose pohybu frézovací hlavy. Bylo použito filtrování mikrodrsnosti nastavené na 2.5  $\mu\text{m}$ , Gaussův filtr a základní délka stanovena na 0.25 mm (pro první vrstvu 0.8 mm).



Obr. 21: Drsnoměr uložený ve stroji

Dodávaná kapalina značně zlepšila kvalitu obrobeného povrchu, z čehož bylo vyvozeno, že příčina špatného povrchu při obrábění za sucha by mohla být v nestabilním nárůstku, který někdy při obrábění nerezových ocelí vzniká. Nepravidelné poškození patrné na pravé straně grafu zobrazeného níže z měření první vrstvy při posuvu na zub 0.15 a řezné rychlosti 130 m/min je pravděpodobně způsobeno pórem v materiálu. Vzhledem k použití filtrace při měření drsnosti jsou tyto výchyly odfiltrovány jakožto vlnitost a tudíž nemají na naměřenou drsnost vliv.



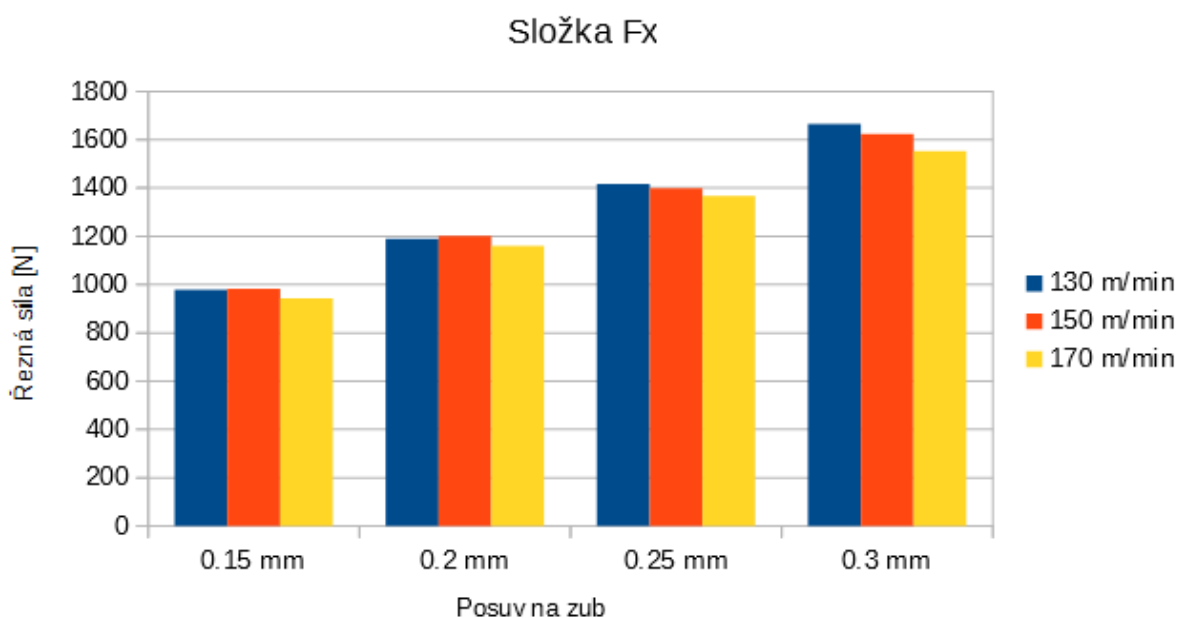
Obr. 22: Graf s patrnou dírou (pravděpodobně pórem)



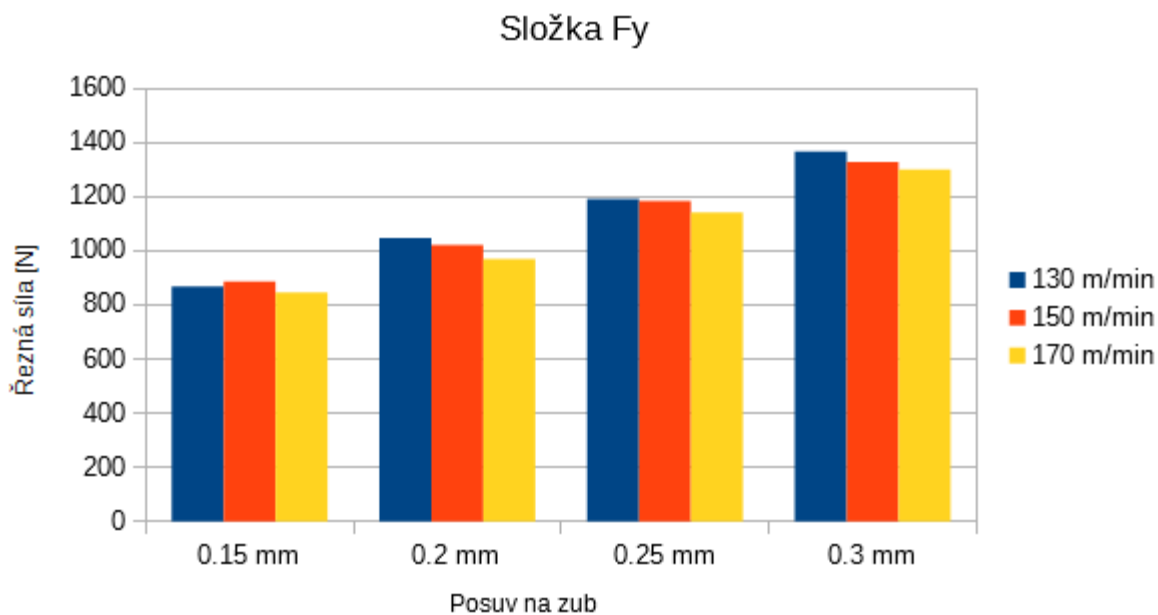
## 5.5 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

### 5.5.1 Měření řezných sil

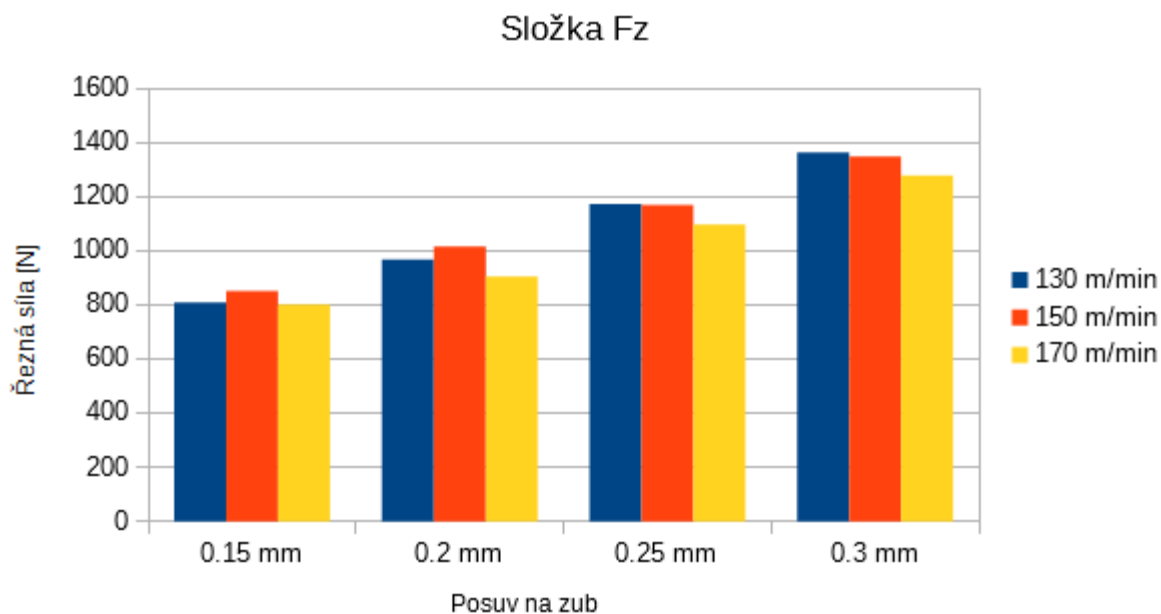
Z měření řezných sil při obrábění navařovaného vzorku z oceli DIN 1.4404 rovinnou frézou byly získány hodnoty, jež jsou zaneseny v následujících grafech. Každý sloupec je hodnota zprůměrovaná z 27 záběrů při zadaných podmínkách. Kompletní seznam naměřených hodnot z měření řezných sil je v příloze na konci této práce. Pro pozorovatele stojícího před strojem směřovala složka  $F_x$  vpravo,  $F_y$  směrem k němu a  $F_z$  do země.



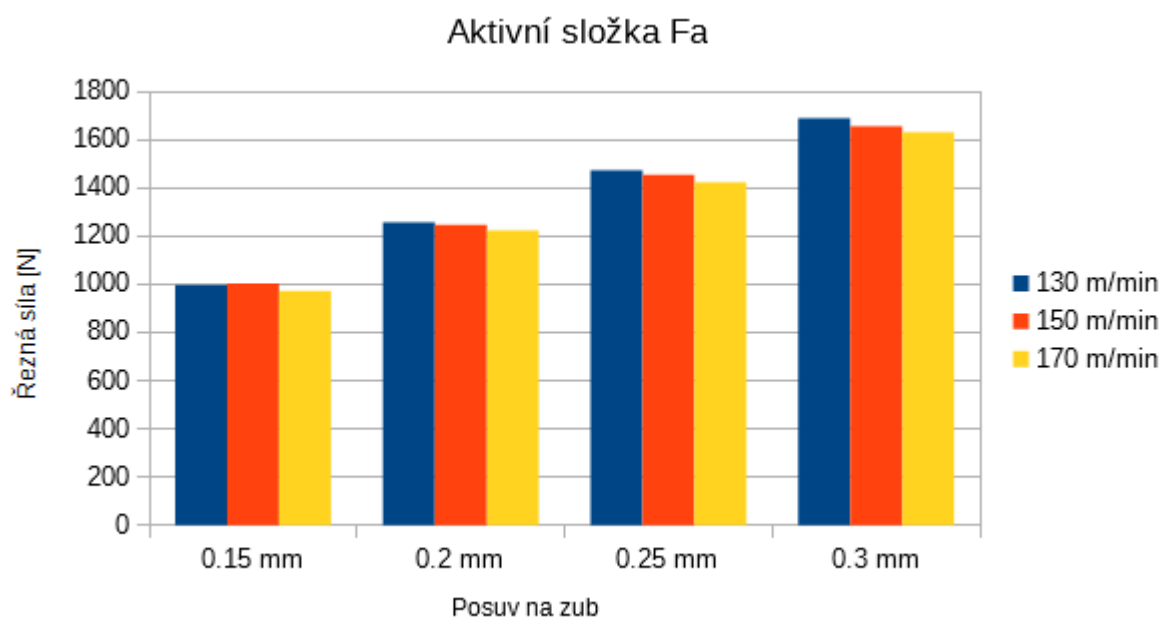
Obr. 23: Graf výsledků složky  $F_x$  řezné síly



Obr. 24: Graf výsledků složky  $F_y$  řezné síly

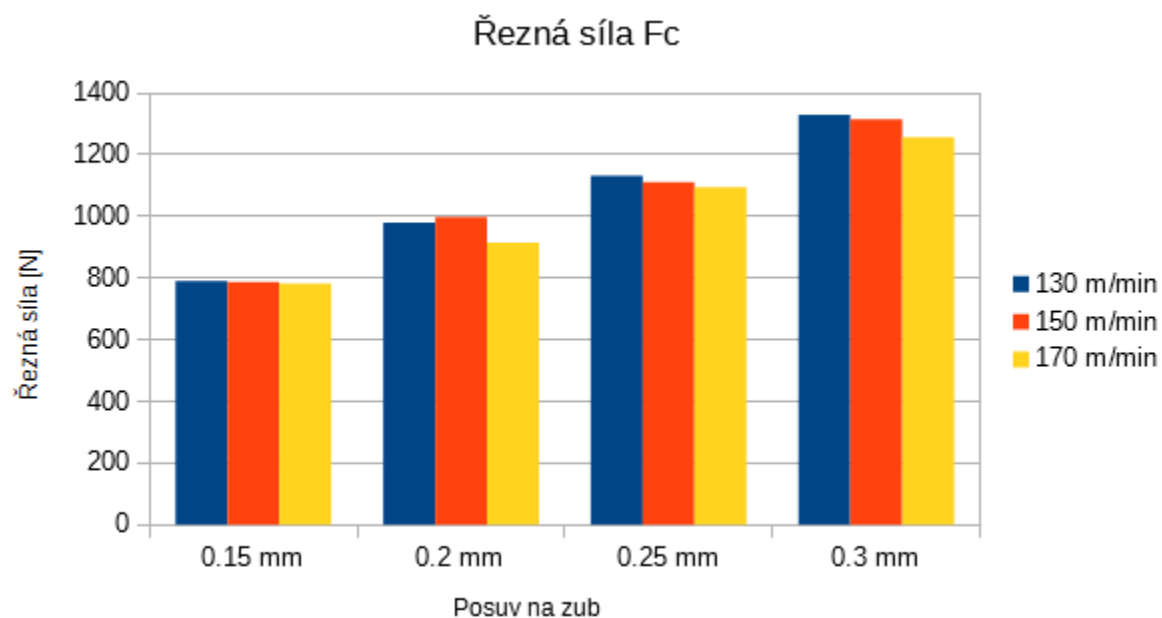


Obr. 25: Graf výsledků složky  $F_z$  řezné síly

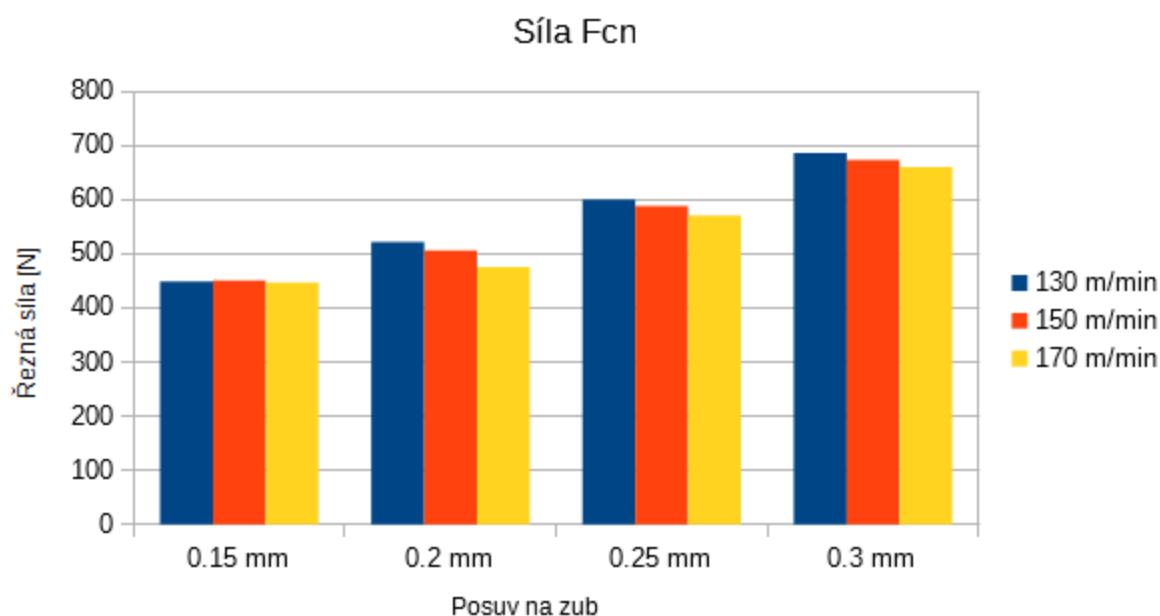


Obr. 26: Graf výsledků aktivní složky  $F_a$

Aktivní složka  $F_a$  je tvořena jako vektorový sil  $F_c$  a  $F_{cn}$ , jejichž hodnoty odpovídají přibližně 80% maximální hodnoty  $F_x$  (pro  $F_c$ ) a 50% maximální hodnoty  $F_y$  (pro  $F_{cn}$ ).



Obr. 27: Graf výsledků řezné síly  $F_c$

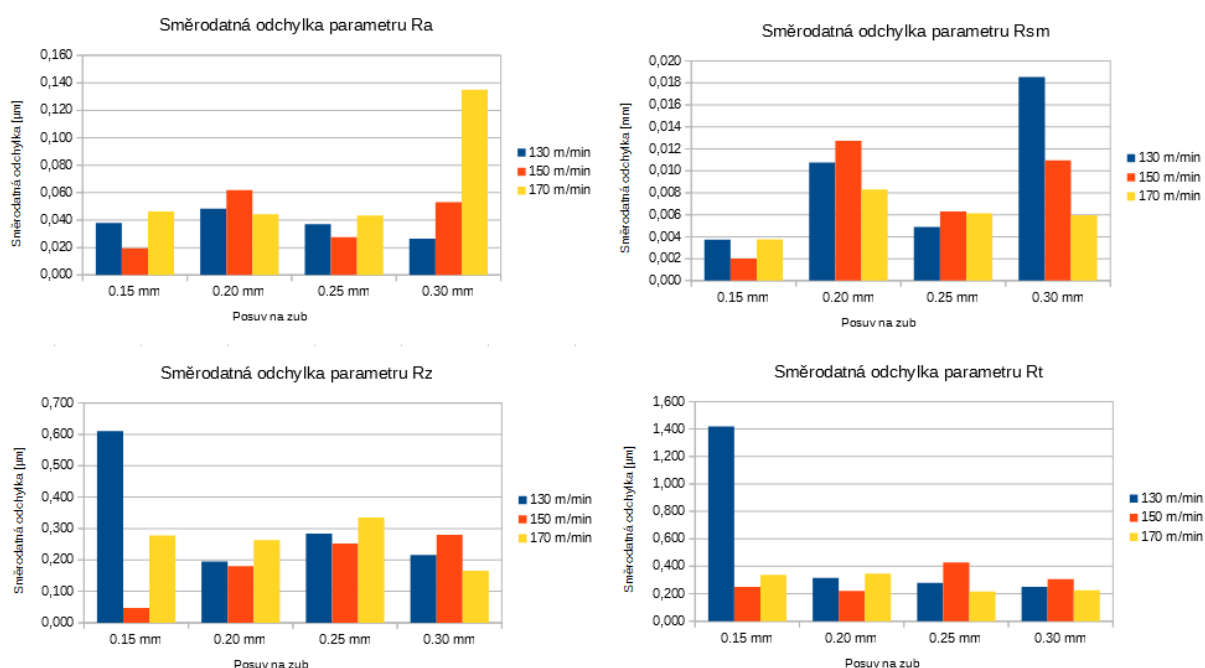


*Obr. 28: Graf výsledků síly  $F_{cn}$*

Z výsledků řezných sil je jasně patrné, že při obrábění materiálu navařeného technologií WAAM rovinnou frézou SECO 220.48 zvyšující se řezná rychlost snižuje v podstatě všechny složky řezné síly. Vliv posuvu je přesně opačný, tedy zvětšující se posuv na zub řezné síly zvyšuje. V naměřených hodnotách nebyly nalezeny žádné, které by výrazným způsobem vybočovaly, z čehož lze usuzovat, že vlastnosti navařovaného materiálu jsou v celém objemu relativně homogenní, obrobiteľnosť materiálu je z hlediska řezných sil dobrá a samotné obrábění takto vyrobeného materiálu nepůsobí žádné problémy.

## 5.5.2 Měření drsnosti obrobeného povrchu

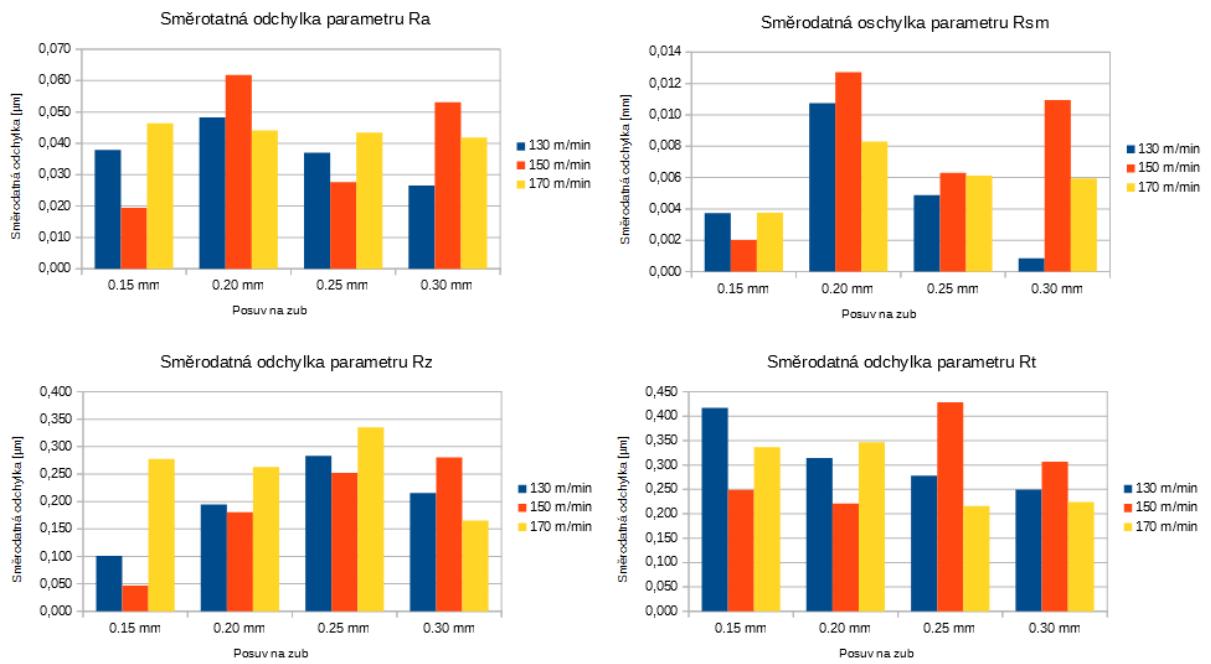
Při měření drsnosti byly zkoumány čtyři parametry a to Ra, Rz, RSm a Rt. Pro snadné vyhodnocení byly i tyto výsledky zaneseny do grafu. Měření probíhalo na pěti základních délkách na každé vrstvě, tedy každý sloupec představuje hodnotu zprůměrovanou z pěti naměřených hodnot. Z důvodu nejednoznačnosti a značné kolísavosti výsledků byly vypočteny směrodatné odchylky, aby bylo možné vyloučit chyby vzniklé extrémními hodnotami.



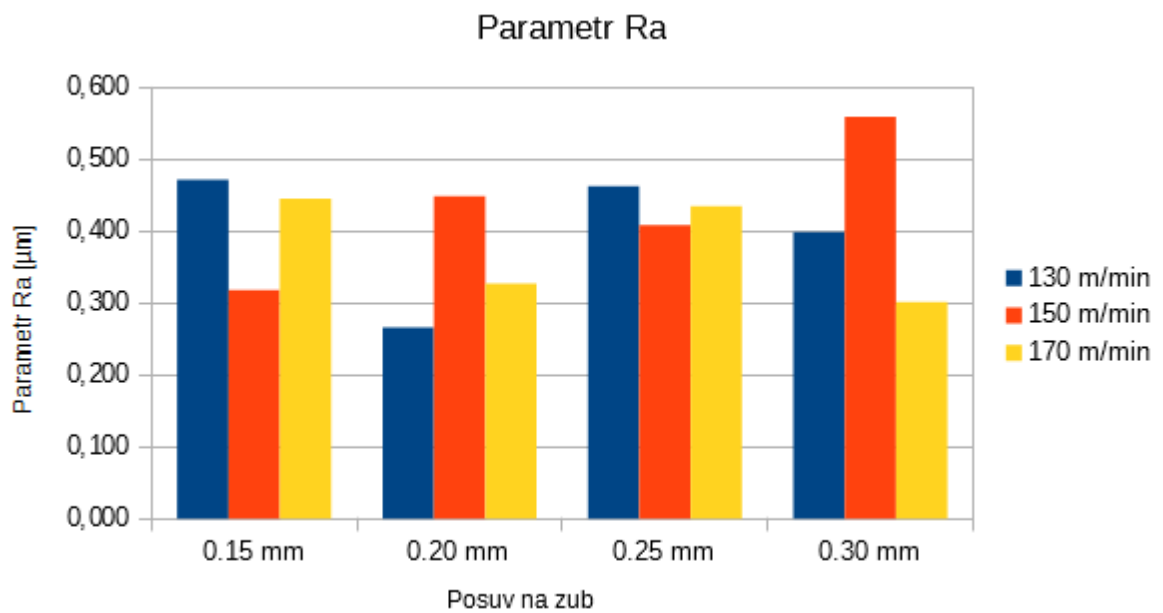
Obr. 29: Grafy směrodatných odchylek z naměřených drsností

Grafy směrodatných odchylek naznačují, že při určitých měřeních došlo k ovlivnění výsledků extrémními hodnotami, konkrétně u parametru Ra v poslední vrstvě (maximální posuv na zub 0.3 mm a maximální řezná rychlost 170 m/min), Rz a Rt v první vrstvě (minimální posuv na zub 0.15 mm a minimální řezná rychlost 130 m/min) a u parametru Rsm se jednalo o více vrstev, největší odchylka však byla vypočtena u měření čtvrté vrstvy (maximální posuv na zub 0.3mm a minimální řezná rychlost 130 m/min). Byla tedy provedena korekce v podobě vyloučení nejextrémnějších hodnot z dat tak, aby byly extrémně velké směrodatné odchylky sníženy na úroveň ostatních. Po vyloučení těchto hodnot byly teprve vytvořeny grafy závislosti drsnosti na řezných podmínkách.

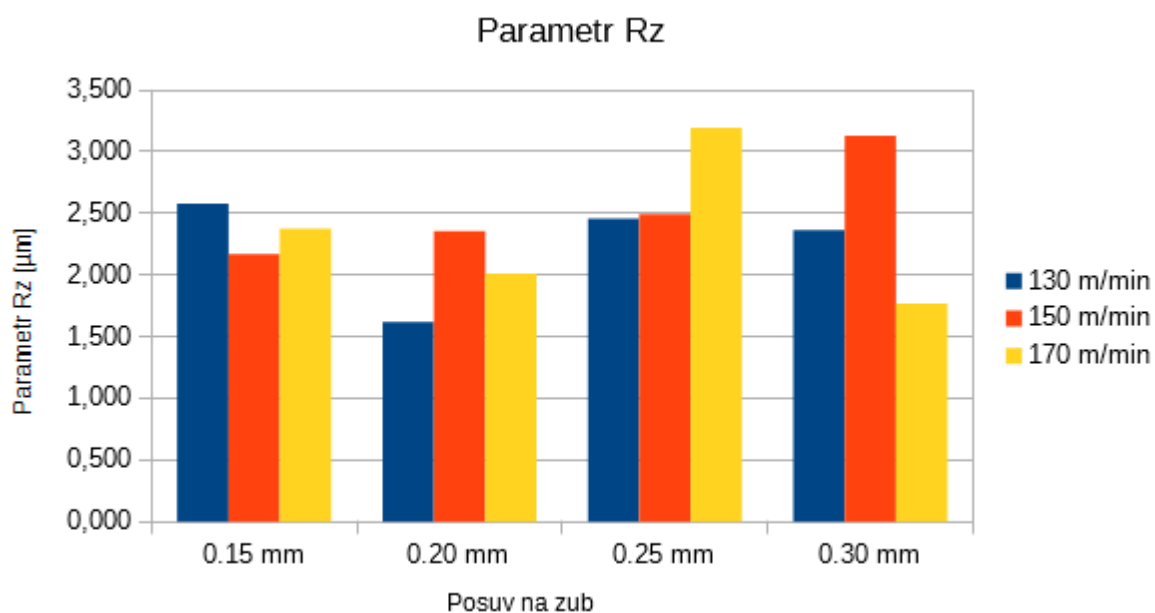




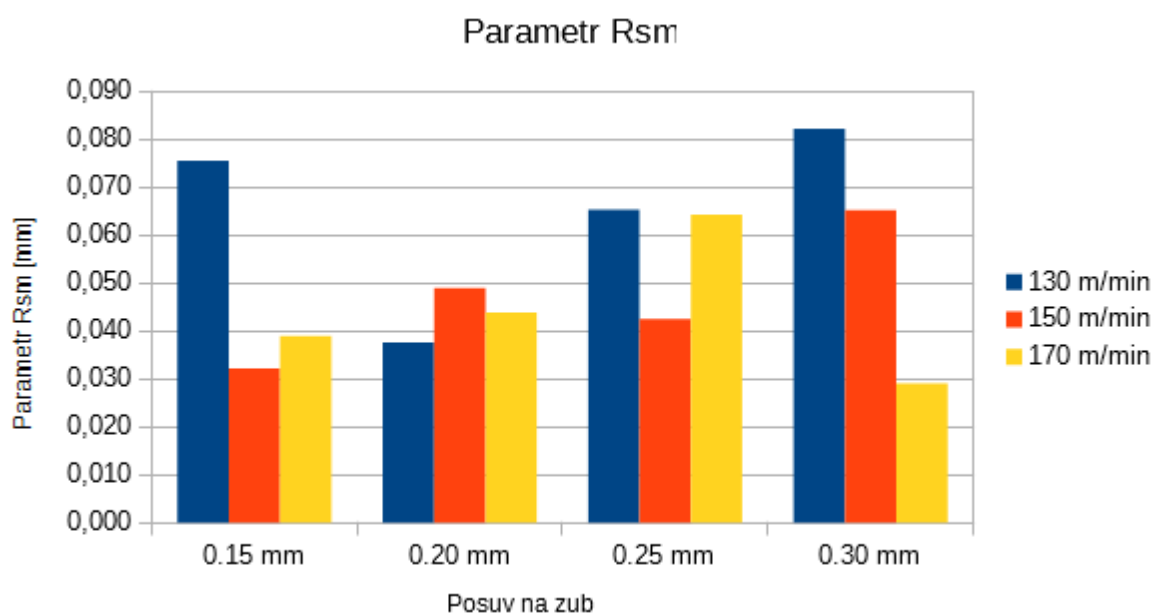
Obr. 30: Grafy směrodatných odchylek po korekci



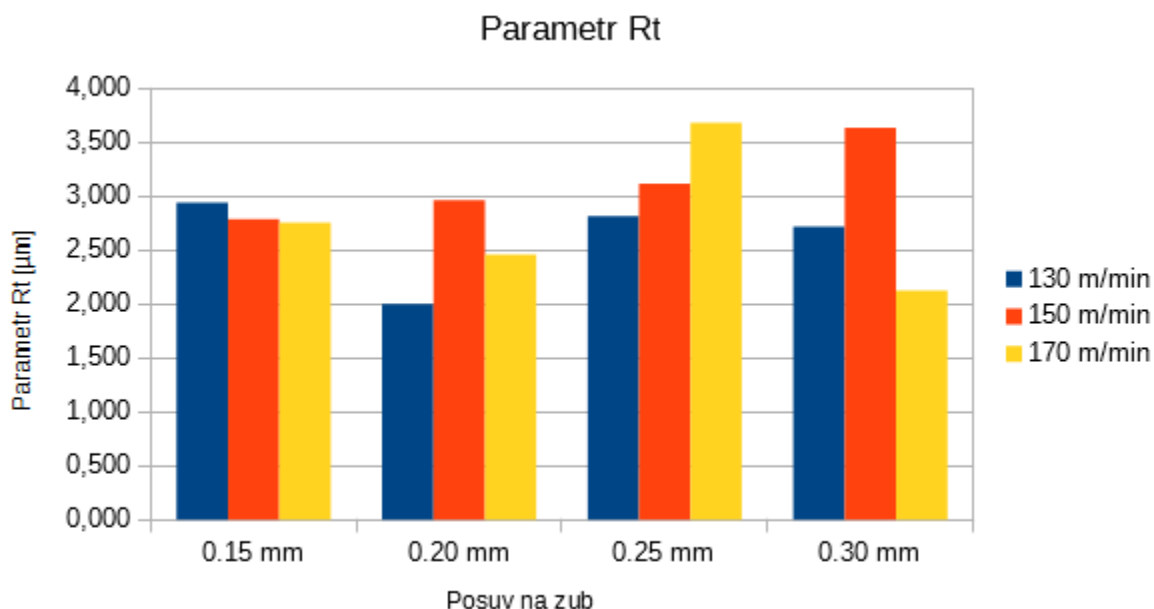
Obr. 31: Graf parametru Ra po korekci



Obr. 32: Graf parametru Rz po korekci



Obr. 33: Graf parametru Rsm po korekci



*Obr. 34: Graf parametru Rt po korekci*

Výsledky naměřené drsnosti neposkytují zdaleka tak jednoznačné informace jako výsledky měření řezných sil. Všechny zkoumané parametry drsnosti se změnou řezných podmínek nahodile kolísaly a je otázkou, zda je to způsobeno vlastnostmi takto zpracovaného materiálu, nerovnoměrným dávkováním řezné kapaliny, které v případě ručního dodávání není příliš přesné, nebo nevhodně zvolenými nástrojem vzhledem k takto zpracovanému materiálu. Ani korekce a vyloučení extrémních hodnot neposkytlo relevantní výsledky a žádanou závislost mezi drsností obrobeného povrchu a řezných podmínek. V případě optimalizace řezných podmínek, automatického dodávání procesní kapaliny ve správném množství a použití jiného nástroje s jinými destičkami pak rozhodně není vyloučeno ani dosažení lepší kvality povrchu a možnost použít obrobený navařovaný materiál i na funkční povrchy.

## 6. Závěr

Cílem této práce mělo být zhodnocení obrobiteľnosti návaru vzniklého metodou WAAM na základě hodnot získaných měření řezných sil a drsnosti obrobeného povrchu.

V první části práce byla vypracována řešerše obsahující teorii 3D tisku a třískového obrábění. Část o 3D tisku obsahuje jeho základní principy, historii a výčet možných principů aditivní technologie z kovů. Dále detailněji seznamuje s technologií laser cladding a navařováním pomocí WAAM. Část o třískovém obrábění popisuje jeho princip a kinematiku, obrobiteľnost, řezivost, řezné síly a jejich měření a také integritu povrchu.

Na základě řešeršní části pak byl vypracován návrh experimentu, pro který byl navařen technologií WAAM jeden vzorek z nerezové oceli DIN 1.4404. Vzorek byl určen ke změření řezných sil při obrábění a drsnosti povrchu po obrobení.

Měření řezných sil potvrdilo, že při správné technologii výroby je vzorek v celém objemu přibližně homogenní, jelikož se řezné síly na jednotlivých vrstvách při stejných řezných podmínkách příliš nelišily, a se vzrůstající řeznou rychlostí klesají jednotlivé složky řezných sil a naopak se vzrůstajícím posuvem na zub se řezná síla zvětšuje. Při maximálním posuvu a minimální řezné rychlosti dosahovaly řezné síly až 1700N.

Z měření drsnosti obrobeného povrchu nelze vyvodit jednoznačné výsledky. Jednoznačný vliv řezné rychlosti a posuvu na sledované parametry určující drsnost obrobené plochy nebyl pozorován. Drsnost povrchu definovaná parametrem  $R_a$  byla v rozmezí 0.2-0.55 $\mu\text{m}$ . Dále je možné si všimnout, že při posuvu 0.2mm/z byla drsnost nejnižší a lišila se při změně řezné rychlosti nejméně. Při měření drsnosti bylo zjištěno, že při obrábění tohoto materiálu daným nástrojem za sucha dochází k vytváření nekvalitního povrchu způsobeného pravděpodobně kousky odlomeného nestabilního nárůstku přichycenými na obrobený povrch. Použití procesní kapaliny tento problém eliminovalo. Dále byla při měření drsnosti několikrát

změřena díra přesahující několikanásobek hloubky stopy po nástroji a jedná se pravděpodobně o porezitu materiálu.

## 7. Seznam použité literatury

- [1] Začínáme s 3D tiskem kovů #2: Technologie 3D tisku kovů (SLM) – Konstrukter.cz. *Konstrukter.cz – CAD/CAM/PLM a pokrokové technologie pro vývoj výrobků* [online]. Copyright © 2012 [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <https://www.konstrukter.cz/zaciname-s-3d-tiskem-kovu-2-technologie-3d-tisku-kovu-slm/>
- [2] Historie 3D tisku... - 3dfactory.cz. *Úvod – 3dfactory.cz* [online]. Copyright © 2017 3dfactory.cz [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <https://3dfactory.cz/2017/10/27/historie/>
- [3] Basic principle of stereolithography apparatus method. | Download Scientific Diagram. *ResearchGate | Share and discover research* [online]. Copyright © ResearchGate [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method\\_fig3\\_297605485](https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method_fig3_297605485)
- [4] Technologie 3D tisku. *itnetwork.cz - Ajtácká sociální síť a materiálová základna pro C#, Java, PHP, HTML, CSS, JavaScript a další.* [online]. Copyright © 2018 itnetwork.cz [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>
- [5] *Triad scientific* - [online]. Copyright © [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: <http://triadscientific.com/pics/2851.jpg>
- [6] Vytváření objektů v 21. století aneb historie 3D tisku – iMagazín. *iMagazín - Apple news* [online]. Copyright © 2018 iSTYLE Česká republika. Všechna práva vyhrazena. [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <http://imagazin.cz/vytvareni-objektu-v-21-stoleti-aneb-historie-3d-tisku>
- [7] Introduction to Metal 3D printing | 3D Hubs. *3D Hubs: Local Manufacturing | 3D Printing & CNC Machining* [online]. Copyright ©2018 3D Hubs [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-metal-3d-printing>

- [8] Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University. *Loughborough University - A top ten university and 1st in the UK for Student Experience* [online]. Copyright © 2018 Loughborough University. All rights reserved. [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [9] *DSpace at University of West Bohemia* [online]. Copyright © [cit. 29.06.2018]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/13481/1/DP\\_Fiedler\\_2014\\_zmensene\\_pdf.pdf](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/13481/1/DP_Fiedler_2014_zmensene_pdf.pdf)
- [10] Cladding (metalworking) – Wikiwand. *Wikiwand* [online]. [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/en/Cladding\\_\(metalworking\)](http://www.wikiwand.com/en/Cladding_(metalworking))
- [11] Ultrasonic Additive Manufacturing | *Fabrisonic* [online]. Copyright © Fabrisonic [cit. 27.06.2018]. Dostupné z: <https://fabrisonic.com/ultrasonic-additive-manufacturing-overview/>
- [12] Navařování metodou WAAM. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2018 [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [cit. 12.07.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [13] WAAM — Wire Arc Additive Manufacturing. *FIT Prototyping GmbH - Prototypenbau und Vorserienmodelle* [online]. Copyright © [cit. 14.07.2018]. Dostupné z: <http://www.fit-prototyping.de/waam.php?language=2>
- [14] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [15] *Základy obrábění* [online]. Copyright © [cit. 25.06.2018]. Dostupné z: <http://www.jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [16] Obrobitelnost materiálu ELUC [online]. Copyright © [cit. 25.06.2018]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1201>

- [17] Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami? *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2018 [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com) [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-rezными-silami.html>
- [18] Měření složek síly řezání [online]. Copyright © [cit. 26.06.2018]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_08.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf)
- [19] ČEP, Robert a Jan PETRŮ. Experimentální metody v obrábění. Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [20] Katedra technologie obrábění - Měřicí vybavení KTO/RTI. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Copyright © 1991 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: [https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni\\_katedry/merici\\_vybaveni\\_KTO.html](https://www.kto.zcu.cz/o-katedre/Vybaveni_katedry/merici_vybaveni_KTO.html)
- [21] Předepisování přesnosti rozměrů, tvaru a polohy [online]. Copyright © [cit. 12.07.2018] Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=10931&revision=-1&instance=1>
- [22] Odvrtávací metoda (metoda otvoru) | Termomechanika technologických procesů. [online]. Copyright © 2000 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody>
- [23] Integrita povrchu – Josef Urban [online]. Copyright © [cit. 13.07.2018]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita\\_Urban1.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/Integrita_Urban1.pdf)
- [24] Měření jakosti povrchu. [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: [https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/measuring\\_surfaces/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/measuring_surfaces/pages/default.aspx)



[25] Drsnost obrobeného povrchu | TumliKOVO:Technologie strojního obrábění kovů. *Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů* [online]. Copyright © 2010 TumliKOVO. Všechna práva vyhrazena. [cit. 21.07.2018]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>

[26] Vlastnosti povrchu stykových ploch. [online]. Copyright © [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/seals/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information/specifications-for-effective-sealing-systems/counter-surface-finish-properties/index.html>

[27] NEREZOVÁ OCEL 1.4404 - INOX, spol. s r. o. *Prodej nerezového hutního materiálu - trubek, jablek, tyčí, plechů, příslušenství - INOX, spol. s r. o.* [online]. Copyright © [cit. 15.07.2018] Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>

[28] *Seco Tools* [online]. Copyright © [cit. 16.07.2018] Dostupné z: <https://www.secotools.com/#article/606>

[29] *Seco Tools* [online]. Copyright © [cit. 16.07.2018] Dostupné z: [https://www.secotools.com/#article/p\\_02688956](https://www.secotools.com/#article/p_02688956)

## 8. Příloha

Pozn. - Naměřené hodnoty jsou v Newtonech, složka  $F_y$  je záporná, jelikož její největší amplituda byla v tomto směru

### Vrstva 1 – řezná rychlost 130 m/min

#### Posuv na zub 0.15 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 962,3; 987,6; 959,9$	$F_{xprům} = 969,933$
$F_y = -791,0; -828,1; -834,2$	$F_{yprům} = -817,767$
$F_z = 780,2; 782,6; 789,4$	$F_{zprům} = 784,067$
$F_a = 988,9; 1001,3; 992,4$	$F_{aprům} = 994,2$

<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 972,0; 946,7; 933,2$	$F_{xprům} = 950,633$
$F_y = -880,7; -846,1; -872,0$	$F_{yprům} = -866,267$
$F_z = 743,5; 762,6; 777,9$	$F_{zprům} = 761,333$
$F_a = 1008,8; 991,1; 995,6$	$F_{aprům} = 998,5$

<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 981,8; 968,2; 975,3$	$F_{xprům} = 975,1$
$F_y = -880,7; -844,0; -872,7$	$F_{yprům} = -865,8$
$F_z = 802,7; 853,8; 775,1$	$F_{zprům} = 810,533$
$F_a = 1012,1; 987,5; 998,7$	$F_{aprům} = 999,433$

---

$F_{xprům} = 965,222$	- průměry všech devíti záběrů na této vrstvě při posuvu na zub 0.15mm
$F_{yprům} = -849,944$	
$F_{zprům} = 785,311$	
$F_{aprům} = 997,378$	

#### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1200; 1179; 1149$	$F_{xprům} = 1176$
$F_y = -1029; -1062; -1046$	$F_{yprům} = -1045,667$
$F_z = 896,3; 897,8; 903,8$	$F_{zprům} = 899,3$
$F_a = 1235,2; 1285,7; 1281,7$	$F_{aprům} = 1267,533$

<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1169; 1151; 1196$	$F_{xprům} = 1172$
$F_y = -1048; -1098; -1078$	$F_{yprům} = -1074,667$
$F_z = 953,1; 863,3; 973,8$	$F_{zprům} = 930,067$
$F_a = 1223,5; 1247,1; 1294,1$	$F_{aprům} = 1254,9$

<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1230; 1187; 1189$	$F_{xprům} = 1202$
$F_y = -1163; -1102; -1090$	$F_{yprům} = -1118,333$
$F_z = 1030; 1008; 994,4$	$F_{zprům} = 1010,8$
$F_a = 1299,8; 1274,4; 1253,4$	$F_{aprům} = 1275,867$

---

$F_{xprům} = 1183,333$
$F_{yprům} = -1079,556$
$F_{zprům} = 946,722$
$F_{aprům} = 1266,1$

**Posuv na zub 0.25 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1402; 1456; 1425	F <sub>xprům</sub> = 1427,667
F <sub>y</sub> = -1181; -1240; -1147	F <sub>yprům</sub> = -1189,333
F <sub>z</sub> = 1275; 1228; 1223	F <sub>zprům</sub> = 1242
F <sub>a</sub> = 1501,2; 1478,6; 1455,5	F <sub>aprům</sub> = 1478,433
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1352; 1349; 1455	F <sub>xprům</sub> = 1385,333
F <sub>y</sub> = -1170; -1209; -1180	F <sub>yprům</sub> = -1186,333
F <sub>z</sub> = 1137; 1102; 1106	F <sub>zprům</sub> = 1115
F <sub>a</sub> = 1485,4; 1492,2; 1443,1	F <sub>aprům</sub> = 1473,567
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1436; 1382; 1423	F <sub>xprům</sub> = 1413,667
F <sub>y</sub> = -1222; -1265; -1152	F <sub>yprům</sub> = -1213
F <sub>z</sub> = 1117, 1091, 1239	F <sub>zprům</sub> = 1149
F <sub>a</sub> = 1486,6; 1492,3; 1465	F <sub>aprům</sub> = 1481,3
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1408,889	
F <sub>yprům</sub> = -1196,222	
F <sub>zprům</sub> = 1168,667	
F <sub>aprům</sub> = 1477,767	

**Posuv na zub 0.3 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1742; 1600; 1653	F <sub>xprům</sub> = 1665
F <sub>y</sub> = -1381; -1415; -1297	F <sub>yprům</sub> = -1364,333
F <sub>z</sub> = 1256; 1283; 1382	F <sub>zprům</sub> = 1307
F <sub>a</sub> = 1682,3; 1699,1; 1688,8	F <sub>aprům</sub> = 1690,1
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1641; 1646; 1657	F <sub>xprům</sub> = 1648
F <sub>y</sub> = -1341; -1346; -1466	F <sub>yprům</sub> = -1384,333
F <sub>z</sub> = 1337; 1280; 1261	F <sub>zprům</sub> = 1292,667
F <sub>a</sub> = 1693,4; 1667,6; 1690,9	F <sub>aprům</sub> = 1683,967
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1771; 1613; 1714	F <sub>xprům</sub> = 1699,333
F <sub>y</sub> = -1456; -1362; -1403	F <sub>yprům</sub> = -1407
F <sub>z</sub> = 1305; 1234; 1344	F <sub>zprům</sub> = 1294,333
F <sub>a</sub> = 1701,1; 1680; 1677,3	F <sub>aprům</sub> = 1686,133
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1670,778	
F <sub>yprům</sub> = -1385,222	
F <sub>zprům</sub> = 1298	
F <sub>aprům</sub> = 1686,733	

## Vrstva 2 – řezná rychlost 130 m/min

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1666; 1620; 1591	F <sub>xprům</sub> = 1625,667
F <sub>y</sub> = -1255; -1284; -1287	F <sub>yprům</sub> = -1275,333
F <sub>z</sub> = 1306; 1235; 1333	F <sub>zprům</sub> = 1291,333
F <sub>a</sub> = 1724,5; 1666,4; 1686,3	F <sub>aprům</sub> = 1692,4
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1733; 1666; 1699	F <sub>xprům</sub> = 1699,333
F <sub>y</sub> = -1334; -1334; -1365	F <sub>yprům</sub> = -1344,333
F <sub>z</sub> = 1555; 1351; 1113	F <sub>zprům</sub> = 1339,667
F <sub>a</sub> = 1685,4; 1694,4; 1701	F <sub>aprům</sub> = 1693,6
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1670; 1824; 1782	F <sub>xprům</sub> = 1758,667
F <sub>y</sub> = -1379; -1370; -1326	F <sub>yprům</sub> = -1358,333
F <sub>z</sub> = 1309; 1539; 1305	F <sub>zprům</sub> = 1384,333
F <sub>a</sub> = 1703,5; 1791,1; 1698,3	F <sub>aprům</sub> = 1730,967
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1694,556	
F <sub>yprům</sub> = -1326	
F <sub>zprům</sub> = 1338,444	
F <sub>aprům</sub> = 1705,655	

### Posuv na zub 0.25 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1418; 1376; 1384	F <sub>xprům</sub> = 1392,667
F <sub>y</sub> = -1151; -1191; -1141	F <sub>yprům</sub> = -1161
F <sub>z</sub> = 1032; 1109; 1206	F <sub>zprům</sub> = 1115,667
F <sub>a</sub> = 1466,3; 1481,2; 1475,3	F <sub>aprům</sub> = 1474,267
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1396; 1444; 1511	F <sub>xprům</sub> = 1450,333
F <sub>y</sub> = -1197; -1172; -1217	F <sub>yprům</sub> = -1195,333
F <sub>z</sub> = 1324; 1222; 1215	F <sub>zprům</sub> = 1253,667
F <sub>a</sub> = 1458,8; 1458,9; 1479,8	F <sub>aprům</sub> = 1465,833
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1440; 1434; 1469	F <sub>xprům</sub> = 1447,667
F <sub>y</sub> = -1223; -1251; -1163	F <sub>yprům</sub> = -1212,333
F <sub>z</sub> = 1260; 1218; 1474	F <sub>zprům</sub> = 1317,333
F <sub>a</sub> = 1482,5; 1475,9; 1484,7	F <sub>aprům</sub> = 1481,033
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1430,222	
F <sub>yprům</sub> = -1189,556	
F <sub>zprům</sub> = 1228,889	
F <sub>aprům</sub> = 1473,711	

**Posuv na zub 0.2 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1225; 1215; 1217$	$F_{xprům} = 1219$
$F_y = -1023; -1039; -1093$	$F_{yprům} = -1051,667$
$F_z = 1156; 1088; 1012$	$F_{zprům} = 1085,333$
$F_a = 1214,1; 1268,4; 1234,6$	$F_{aprům} = 1239,033$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1206; 1164; 1171$	$F_{xprům} = 1180,333$
$F_y = -1003; -1032; -1018$	$F_{yprům} = 1017,667$
$F_z = 1004; 948,9; 885,3$	$F_{zprům} = 946,067$
$F_a = 1284,4; 1224,3; 1264,7$	$F_{aprům} = 1257,8$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1199; 1213; 1196$	$F_{xprům} = 1202,667$
$F_y = -1029; -1043; -999,3$	$F_{yprům} = -1023,767$
$F_z = 959,0; 904,4; 922,6$	$F_{zprům} = 928,667$
$F_a = 1233,4; 1245,7; 1264,9$	$F_{aprům} = 1248$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1200,667$	
$F_{yprům} = -1031,033$	
$F_{zprům} = 986,689$	
$F_{aprům} = 1248,278$	

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 969,1; 997,0; 990,1$	$F_{xprům} = 985,4$
$F_y = -901,1; -947,9; -900,7$	$F_{yprům} = -916,567$
$F_z = 846,1; 855,0; 904,9$	$F_{zprům} = 868,667$
$F_a = 1014,2; 994,6; 998,1$	$F_{aprům} = 1002,3$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 987,5; 1025; 1022$	$F_{xprům} = 1011,5$
$F_y = -868,2; -924,8; -860,4$	$F_{yprům} = -884,467$
$F_z = 789,6; 826,9; 946,7$	$F_{zprům} = 854,4$
$F_a = 989,9; 997; 1010,3$	$F_{aprům} = 999,067$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 992,9; 997,6; 1017$	$F_{xprům} = 1002,5$
$F_y = -872,7; -909,0; -907,4$	$F_{yprům} = -896,367$
$F_z = 743,9; 750,9; 836,0$	$F_{zprům} = 776,933$
$F_a = 977,6; 995,5; 1007,3$	$F_{aprům} = 993,467$
<hr/>	
$F_{xprům} = 999,8$	
$F_{yprům} = -899,134$	
$F_{zprům} = 833,333$	
$F_{aprům} = 998,277$	

## Vrstva 3 – řezná rychlost 130 m/min

### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1178; 1160; 1150	F <sub>xprům</sub> = 1162,666
F <sub>y</sub> = -1044; -1019; -1025	F <sub>yprům</sub> = -1029,333
F <sub>z</sub> = 906,4; 921,1; 850,7	F <sub>zprům</sub> = 892,733
F <sub>a</sub> = 1244,3; 1267,4; 1258,8	F <sub>aprům</sub> = 1256,833
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1168; 1182; 1186	F <sub>xprům</sub> = 1178,667
F <sub>y</sub> = -1064; -1007; -1019	F <sub>yprům</sub> = -1030
F <sub>z</sub> = 1100; 981,9; 931,1	F <sub>zprům</sub> = 1004,333
F <sub>a</sub> = 1277,6; 1284,9; 1267,5	F <sub>aprům</sub> = 1276,667
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1239; 1202; 1185	F <sub>xprům</sub> = 1208,667
F <sub>y</sub> = -1052; -1075; -1005	F <sub>yprům</sub> = -1044
F <sub>z</sub> = 990,2; 1006; 1033	F <sub>zprům</sub> = 1009,733
F <sub>a</sub> = 1263,6; 1242,1; 1248,8	F <sub>aprům</sub> = 1251,5

---

F<sub>xprům</sub> = 1183,333  
 F<sub>yprům</sub> = -1034,444  
 F<sub>zprům</sub> = 968,933  
 F<sub>aprům</sub> = 1261,667

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1584; 1568; 1645	F <sub>xprům</sub> = 1599
F <sub>y</sub> = -1471; -1365; -1396	F <sub>yprům</sub> = -1410,667
F <sub>z</sub> = 1467; 1417; 1257	F <sub>zprům</sub> = 1380,333
F <sub>a</sub> = 1666,1; 1697,7; 1674,3	F <sub>aprům</sub> = 1679,367
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1686; 1608; 1607	F <sub>xprům</sub> = 1633,667
F <sub>y</sub> = -1484; -1372; -1312	F <sub>yprům</sub> = -1389,333
F <sub>z</sub> = 1535; 1383; 1402	F <sub>zprům</sub> = 1440
F <sub>a</sub> = 1680,2; 1669,2; 1692,4	F <sub>aprům</sub> = 1680,6
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1621; 1601; 1768	F <sub>xprům</sub> = 1663,333
F <sub>y</sub> = -1429; -1310; -1357	F <sub>yprům</sub> = -1365,333
F <sub>z</sub> = 1530; 1496; 1602	F <sub>zprům</sub> = 1542,667
F <sub>a</sub> = 1675,5; 1684,3; 1683,1	F <sub>aprům</sub> = 1680,967

---

F<sub>xprům</sub> = 1632  
 F<sub>yprům</sub> = -1388,444  
 F<sub>zprům</sub> = 1454,333  
 F<sub>aprům</sub> = 1680,311

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 979,5; 970,0; 968,0$	$F_{xprům} = 972,5$
$F_y = -869,4; -870,5; -859,2$	$F_{yprům} = -866,367$
$F_z = 933,1; 854,7; 850,1$	$F_{zprům} = 879,3$
$F_a = 991,4; 1007,3; 1022,4$	$F_{aprům} = 1007,033$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 965,2; 966,1; 968,0$	$F_{xprům} = 966,433$
$F_y = -838,6; -853,1; -889,4$	$F_{yprům} = -860,367$
$F_z = 760,1; 754,0; 777,5$	$F_{zprům} = 763,867$
$F_a = 989,6; 997,8; 992,3$	$F_{aprům} = 993,233$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 966,3; 977,3; 968,4$	$F_{xprům} = 970,667$
$F_y = -854,6; -849,0; -829,8$	$F_{yprům} = -844,467$
$F_z = 740,2; 825,8; 791,8$	$F_{zprům} = 785,933$
$F_a = 997,6; 992,2; 1006,4$	$F_{aprům} = 998,733$
<hr/>	
$F_{xprům} = 969,866$	
$F_{yprům} = -857,066$	
$F_{zprům} = 809,7$	
$F_{aprům} = 999,667$	

**Posuv na zub 0.25 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1472; 1398; 1377$	$F_{xprům} = 1415,667$
$F_y = -1235; -1142; -1280$	$F_{yprům} = -1219$
$F_z = 1063; 1210; 1162$	$F_{zprům} = 1145$
$F_a = 1455,3; 1455,7; 1487,6$	$F_{aprům} = 1466,2$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1447; 1391; 1352$	$F_{xprům} = 1396,667$
$F_y = -1199; -1126; -1241$	$F_{yprům} = -1188,667$
$F_z = 1222; 1058; 1093$	$F_{zprům} = 1124,333$
$F_a = 1467,2; 1462,9; 1497,2$	$F_{aprům} = 1475,767$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1428; 1399; 1404$	$F_{xprům} = 1410,333$
$F_y = -1144; -1211; -1150$	$F_{yprům} = -1168,333$
$F_z = 1054; 1113; 1142$	$F_{zprům} = 1103$
$F_a = 1471,3; 1449,7; 1491,3$	$F_{aprům} = 1470,767$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1407,556$	
$F_{yprům} = -1192$	
$F_{zprům} = 1124,111$	
$F_{aprům} = 1470,911$	

## Vrstva 4 – řezná rychlost 150 m/min

### Posuv na zub 0.15 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 971,5; 962,4; 955,2$	$F_{xprům} = 963,033$
$F_y = -1020; -1012; -1040$	$F_{yprům} = -1024$
$F_z = 779,9; 793,3; 789,7$	$F_{zprům} = 787,633$
$F_a = 999,7; 1009,2; 1002,4$	$F_{aprům} = 1003,767$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 984,9; 1011; 1010$	$F_{xprům} = 1001,967$
$F_y = -858,3; -915,1; -891,7$	$F_{yprům} = -888,367$
$F_z = 928,6; 870,0; 828,4$	$F_{zprům} = 875,667$
$F_a = 1013,4; 1005,6; 1008,8$	$F_{aprům} = 1009,267$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1011; 1085; 1025$	$F_{xprům} = 1040,333$
$F_y = -940,2; -884,2; -917,7$	$F_{yprům} = -914,033$
$F_z = 935,4; 954,1; 940,5$	$F_{zprům} = 943,333$
$F_a = 1020,4; 1004,6; 1007,7$	$F_{aprům} = 1010,9$

---

$F_{xprům} = 1001,778$   
 $F_{yprům} = -942,133$   
 $F_{zprům} = 868,877$   
 $F_{aprům} = 1007,978$

### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1215; 1264; 1184$	$F_{xprům} = 1221$
$F_y = -1088; -1087; -1051$	$F_{yprům} = -1075,333$
$F_z = 1022; 1063; 1149$	$F_{zprům} = 1078$
$F_a = 1227,6; 1224,3; 1234,1$	$F_{aprům} = 1228,667$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1249; 1226; 1233$	$F_{xprům} = 1236$
$F_y = -1093; -1059; -1088$	$F_{yprům} = -1080$
$F_z = 1133; 982,1; 991,1$	$F_{zprům} = 1035,4$
$F_a = 1256,5; 1247,2; 1224,4$	$F_{aprům} = 1242,7$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1257; 1276; 1222$	$F_{xprům} = 1251,667$
$F_y = -1073; -1037; -1070$	$F_{yprům} = -1060$
$F_z = 989,4; 1195; 1068$	$F_{zprům} = 1084,133$
$F_a = 1251,3; 1224,7; 1249,9$	$F_{aprům} = 1241,967$

---

$F_{xprům} = 1236,222$   
 $F_{yprům} = -1071,778$   
 $F_{zprům} = 1065,844$   
 $F_{aprům} = 1237,778$



**Posuv na zub 0.25 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1430; 1437; 1446$	$F_{xprům} = 1437,667$
$F_y = -1224; -1261; -1255$	$F_{yprům} = -1246,667$
$F_z = 1175; 1238; 1554$	$F_{zprům} = 1322,333$
$F_a = 1477,3; 1472,7; 1495,3$	$F_{aprům} = 1481,767$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1407; 1418; 1377$	$F_{xprům} = 1400,667$
$F_y = -1214; -1229; -1219$	$F_{yprům} = -1220,667$
$F_z = 1210; 1273; 1205$	$F_{zprům} = 1229,333$
$F_a = 1427,3; 1494,4; 1461,7$	$F_{aprům} = 1461,133$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1441; 1453; 1429$	$F_{xprům} = 1441$
$F_y = -1322; -1251; -1194$	$F_{yprům} = -1255,667$
$F_z = 1140; 1157; 1269$	$F_{zprům} = 1188,667$
$F_a = 1443,4; 1467,3; 1456,4$	$F_{aprům} = 1455,7$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1426,444$	
$F_{yprům} = -1241$	
$F_{zprům} = 1246,778$	
$F_{aprům} = 1466,12$	

**Posuv na zub 0.3 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1669; 1680; 1582$	$F_{xprům} = 1643,667$
$F_y = -1450; -1461; -1469$	$F_{yprům} = -1459,667$
$F_z = 1351; 1459; 1491$	$F_{zprům} = 1433,667$
$F_a = 1666,3; 1657,4; 1659,4$	$F_{aprům} = 1661,033$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1742; 1650; 1702$	$F_{xprům} = 1698$
$F_y = -1394; -1363; -1338$	$F_{yprům} = -1365$
$F_z = 1312; 1345; 1323$	$F_{zprům} = 1326,667$
$F_a = 1644; 1652,2; 1633,2$	$F_{aprům} = 1643,133$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1583; 1631; 1670$	$F_{xprům} = 1628$
$F_y = -1363; -1557; -1358$	$F_{yprům} = -1426$
$F_z = 1307; 1332; 1360$	$F_{zprům} = 1333$
$F_a = 1671,2; 1658,9; 1645,2$	$F_{aprům} = 1658,433$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1656,556$	
$F_{yprům} = -1416,889$	
$F_{zprům} = 1364,444$	
$F_{aprům} = 1654,12$	

## Vrstva 5 – řezná rychlost 150 m/min

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1685; 1581; 1531$	$F_{xprům} = 1599$
$F_y = -1233; -1234; -1197$	$F_{yprům} = -1221,333$
$F_z = 1241; 1133; 1247$	$F_{zprům} = 1207$
$F_a = 1633,1; 1635,4; 1648,1$	$F_{aprům} = 1638,867$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1556; 1517; 1553$	$F_{xprům} = 1542$
$F_y = -1283; -1292; -1203$	$F_{yprům} = -1259,333$
$F_z = 1291; 1362; 1400$	$F_{zprům} = 1351$
$F_a = 1652; 1661,3; 1654,7$	$F_{aprům} = 1656$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1638; 1637; 1593$	$F_{xprům} = 1622,667$
$F_y = -1221; -1232; -1272$	$F_{yprům} = -1241,667$
$F_z = 1162; 1287; 1363$	$F_{zprům} = 1270,667$
$F_a = 1667,3; 1646,4; 1662,2$	$F_{aprům} = 1658,633$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1587,889$	
$F_{yprům} = -1240,778$	
$F_{zprům} = 1276,222$	
$F_{aprům} = 1651,167$	

### Posuv na zub 0.25 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1359; 1393; 1373$	$F_{xprům} = 1375$
$F_y = -1203; -1123; -1159$	$F_{yprům} = -1161,667$
$F_z = 1008; 1076; 1203$	$F_{zprům} = 1095,667$
$F_a = 1434,5; 1468,7; 1470$	$F_{aprům} = 1457,733$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1528; 1419; 1501$	$F_{xprům} = 1482,667$
$F_y = -1186; -1150; -1116$	$F_{yprům} = -1150,667$
$F_z = 1194; 1153; 1278$	$F_{zprům} = 1208,333$
$F_a = 1492,2; 1445,2; 1471,8$	$F_{aprům} = 1469,733$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1357; 1381; 1397$	$F_{xprům} = 1378,333$
$F_y = -1181; -1201; -1158$	$F_{yprům} = -1180$
$F_z = 1347; 1161; 1209$	$F_{zprům} = 1239$
$F_a = 1451,1; 1468,4; 1442,4$	$F_{aprům} = 1453,967$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1412$	
$F_{yprům} = -1164,111$	
$F_{zprům} = 1181$	
$F_{aprům} = 1460,478$	

**Posuv na zub 0.2 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1202; 1202; 1236	F <sub>xprům</sub> = 1213,333
F <sub>y</sub> = -965,6; -1015; -965,9	F <sub>yprům</sub> = -982,167
F <sub>z</sub> = 1072; 948,7; 983,2	F <sub>zprům</sub> = 1001,3
F <sub>a</sub> = 1245,5; 1232,1; 1254,8	F <sub>aprům</sub> = 1244,133
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1179; 1192; 1188	F <sub>xprům</sub> = 1186,333
F <sub>y</sub> = -1006; -1013; -1024	F <sub>yprům</sub> = -1014,333
F <sub>z</sub> = 972,5; 1043; 1041	F <sub>zprům</sub> = 1018,833
F <sub>a</sub> = 1261,2; 1258,1; 1262,3	F <sub>aprům</sub> = 1260,533
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1179; 1178; 1177	F <sub>xprům</sub> = 1178
F <sub>y</sub> = -1121; -1006; -993,7	F <sub>yprům</sub> = -1040,233
F <sub>z</sub> = 1072; 1011; 976,8	F <sub>zprům</sub> = 1019,933
F <sub>a</sub> = 1263,4; 1254,8; 1259,7	F <sub>aprům</sub> = 1259,3
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1192,556	
F <sub>yprům</sub> = -1012,224	
F <sub>zprům</sub> = 1013,356	
F <sub>aprům</sub> = 1254,656	

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 973,4; 955,7; 962,5	F <sub>xprům</sub> = 963,867
F <sub>y</sub> = -878,3; -875,9; -858,8	F <sub>yprům</sub> = -871
F <sub>z</sub> = 911,9; 872,5; 917,8	F <sub>zprům</sub> = 900,733
F <sub>a</sub> = 994,3; 1009,9; 992,5	F <sub>aprům</sub> = 998,9
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 945,6; 957,6; 947,1	F <sub>xprům</sub> = 950,1
F <sub>y</sub> = -905,5; -865,0; -865,5	F <sub>yprům</sub> = -878,667
F <sub>z</sub> = 831,7; 812,3; 881,0	F <sub>zprům</sub> = 841,667
F <sub>a</sub> = 1011,2; 1003,6; 999,7	F <sub>aprům</sub> = 1004,833
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 957,8; 970,4; 996,1	F <sub>xprům</sub> = 974,767
F <sub>y</sub> = -847,8; -844,6; -884,7	F <sub>yprům</sub> = -859,033
F <sub>z</sub> = 803,4; 957,9; 808,4	F <sub>zprům</sub> = 856,567
F <sub>a</sub> = 997,7; 1006,4; 1004,2	F <sub>aprům</sub> = 1002,767
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 962,911	
F <sub>yprům</sub> = -869,567	
F <sub>zprům</sub> = 866,322	
F <sub>aprům</sub> = 1002,167	

## Vrstva 6 – řezná rychlost 150 m/min

### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1171; 1199; 1186$	$F_{xprům} = 1185,333$
$F_y = -942,8; -945,6; -965,6$	$F_{yprům} = -951,333$
$F_z = 865,1; 890,4; 980,8$	$F_{zprům} = 912,1$
$F_a = 1225,3; 1215,8; 1234,4$	$F_{aprům} = 1225,167$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1196; 1168; 1158$	$F_{xprům} = 1174$
$F_y = -995,3; -973,8; -986,0$	$F_{yprům} = -985,033$
$F_z = 1018; 1058; 896,3$	$F_{zprům} = 990,767$
$F_a = 1265,7; 1254,4; 1264,3$	$F_{aprům} = 1261,467$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1179; 1165; 1169$	$F_{xprům} = 1171$
$F_y = -1023; -1036; -1004$	$F_{yprům} = -1021$
$F_z = 1000; 966,7; 1052$	$F_{zprům} = 1006,233$
$F_a = 1254,7; 1251,6; 1259,7$	$F_{aprům} = 125,333$

---


$$F_{xprům} = 1176,778$$

$$F_{yprům} = -985,789$$

$$F_{zprům} = 969,7$$

$$F_{aprům} = 1247,322$$

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1635; 1711; 1623$	$F_{xprům} = 1656,333$
$F_y = -1339; -1318; -1325$	$F_{yprům} = -1327,333$
$F_z = 1480; 1331; 1370$	$F_{zprům} = 1393,667$
$F_a = 1676,5; 1661,6; 1672,3$	$F_{aprům} = 1670,133$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1625; 1626; 1691$	$F_{xprům} = 1647,333$
$F_y = -1324; -1372; -1330$	$F_{yprům} = -1342$
$F_z = 1334; 1383; 1526$	$F_{zprům} = 1414,333$
$F_a = 1664,4; 1652,3; 1674,2$	$F_{aprům} = 1663,633$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1569; 1570; 1578$	$F_{xprům} = 1572,333$
$F_y = -1300; -1319; -1364$	$F_{yprům} = -1327,667$
$F_z = 1517; 1434; 1277$	$F_{zprům} = 1409,333$
$F_a = 1664,5; 1658,7; 1659,6$	$F_{aprům} = 1660,933$

---


$$F_{xprům} = 1625,333$$

$$F_{yprům} = -1332,333$$

$$F_{zprům} = 1405,778$$

$$F_{aprům} = 1664,9$$

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 999,5; 1010; 974,1$	$F_{xprům} = 994,533$
$F_y = -862,6; -875,9; -864,1$	$F_{yprům} = -867,533$
$F_z = 805,7; 771,6; 813,3$	$F_{zprům} = 796,867$
$F_a = 999,7; 1001,5; 1004,3$	$F_{aprům} = 1001,833$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 971,3; 952,4; 955,9$	$F_{xprům} = 959,867$
$F_y = -831,3; -832,7; -842,4$	$F_{yprům} = -835,467$
$F_z = 870,2; 867,0; 808,1$	$F_{zprům} = 848,433$
$F_a = 1008,4; 1006,4; 1010,1$	$F_{aprům} = 1008,3$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 965,8; 974,2; 989,8$	$F_{xprům} = 976,6$
$F_y = -848,4; 860,2; -849,3$	$F_{yprům} = -853,233$
$F_z = 863,3; 840,5; 729,8$	$F_{zprům} = 811,2$
$F_a = 1012,4; 998,6; 1005,7$	$F_{aprům} = 1005,567$
<hr/>	
$F_{xprům} = 977$	
$F_{yprům} = -852,078$	
$F_{zprům} = 818,833$	
$F_{aprům} = 1005,233$	

**Posuv na zub 0.25 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1358; 1363; 1377$	$F_{xprům} = 1366$
$F_y = -1152; -1195; -1227$	$F_{yprům} = -1191,333$
$F_z = 1250; 1077; 1049$	$F_{zprům} = 1125,333$
$F_a = 1423,4; 1425,7; 1435,6$	$F_{aprům} = 1428,233$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1362; 1372; 1422$	$F_{xprům} = 1385,333$
$F_y = -1117; -1158; -1165$	$F_{yprům} = -1146,667$
$F_z = 1110; 1114; 1349$	$F_{zprům} = 1191$
$F_a = 1447,6; 1435,7; 1446,9$	$F_{aprům} = 1443,4$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1328; 1339; 1319$	$F_{xprům} = 1328,667$
$F_y = -1116; -1093; -1114$	$F_{yprům} = -1107,667$
$F_z = 934,6; 883,0; 978,7$	$F_{zprům} = 932,1$
$F_a = 1435,6; 1457,1; 1436,8$	$F_{aprům} = 1443,167$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1360$	
$F_{yprům} = -1148,556$	
$F_{zprům} = 1082,811$	
$F_{aprům} = 1438,267$	

## Vrstva 7 – řezná rychlost 170 m/min

### Posuv na zub 0.15 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 927,8; 927,2; 923,4$	$F_{xprům} = 926,133$
$F_y = -976,6; -936,1; -914,9$	$F_{yprům} = -942,533$
$F_z = 741,5; 747,0; 805,6$	$F_{zprům} = 764,7$
$F_a = 968,6; 991,2; 987,4$	$F_{aprům} = 982,4$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 939,7; 923,9; 968,8$	$F_{xprům} = 944,133$
$F_y = -830,1; -822,6; -821,5$	$F_{yprům} = -824,733$
$F_z = 768,6; 746,9; 787,7$	$F_{zprům} = 767,733$
$F_a = 974,2; 978,8; 976,4$	$F_{aprům} = 976,467$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 994,2; 960,2; 945,1$	$F_{xprům} = 966,5$
$F_y = -858,2; -883,8; -916,0$	$F_{yprům} = -886$
$F_z = 778,7; 818,8; 856,8$	$F_{zprům} = 818,1$
$F_a = 981,2; 985,6; 982,4$	$F_{aprům} = 983,067$

---

$F_{xprům} = 945,589$   
 $F_{yprům} = -884,422$   
 $F_{zprům} = 849,767$   
 $F_{aprům} = 980,644$

### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1171; 1186; 1168$	$F_{xprům} = 1175$
$F_y = -990,1; -1017; -999,9$	$F_{yprům} = -999$
$F_z = 994,5; 999,1; 951,0$	$F_{zprům} = 981,533$
$F_a = 1223,6; 1248,8; 1237,9$	$F_{aprům} = 1236,766$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1228; 1197; 1202$	$F_{xprům} = 1209$
$F_y = -966,3; -981,7; -969,4$	$F_{yprům} = -972,467$
$F_z = 905,8; 862,2; 951,3$	$F_{zprům} = 906,433$
$F_a = 1239,9; 1224,1; 1190,8$	$F_{aprům} = 1218,267$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1183; 1164; 1162$	$F_{xprům} = 1143$
$F_y = -973,1; -1026; -983,6$	$F_{yprům} = -994,233$
$F_z = 963,4; 948,3; 940,8$	$F_{zprům} = 950,833$
$F_a = 1198,7; 1214,7; 1225,7$	$F_{aprům} = 1213,033$

---

$F_{xprům} = 1175,667$   
 $F_{yprům} = -988,567$   
 $F_{zprům} = 946,267$   
 $F_{aprům} = 1222,689$

**Posuv na zub 0.25 mm**

**I.** - tři záběry na začátku odebírané délky

$F_x = 1363; 1398; 1408$   $F_{xprům} = 1389,667$   
 $F_y = -1146; -1143; -1130$   $F_{yprům} = -1139,667$   
 $F_z = 1161; 1137; 1094$   $F_{zprům} = 1130,667$   
 $F_a = 1405,3; 1394,2; 1397,2$   $F_{aprům} = 1398,9$

**II.** - tři záběry v polovině odebírané délky

$F_x = 1363; 1330; 1338$   $F_{xprům} = 1343,667$   
 $F_y = -1234; -1149; -1126$   $F_{yprům} = -1169,667$   
 $F_z = 1160; 1225; 1156$   $F_{zprům} = 1180,333$   
 $F_a = 1384,9; 1380,4; 1456,8$   $F_{aprům} = 1407,367$

**III.** - tři záběry na konci odebírané délky

$F_x = 1335; 1360; 1372$   $F_{xprům} = 1355,667$   
 $F_y = -1194; -1120; -1186$   $F_{yprům} = -1166,667$   
 $F_z = 1030; 1074; 1306$   $F_{zprům} = 1136,667$   
 $F_a = 1403,7; 1412,7; 1397,6$   $F_{aprům} = 1404,667$

---

$F_{xprům} = 1363$   
 $F_{yprům} = -1158,667$   
 $F_{zprům} = 1149,222$   
 $F_{aprům} = 1403,644$

**Posuv na zub 0.3 mm**

**I.** - tři záběry na začátku odebírané délky

$F_x = 1557; 1532; 1540$   $F_{xprům} = 1543$   
 $F_y = -1340; -1321; -1313$   $F_{yprům} = -1324,667$   
 $F_z = 1363; 1372; 1386$   $F_{zprům} = 1373,667$   
 $F_a = 1587,3; 1596,4; 1576,9$   $F_{aprům} = 1586,867$

**II.** - tři záběry v polovině odebírané délky

$F_x = 1573; 1533; 1571$   $F_{xprům} = 1559$   
 $F_y = -1477; -1364; -1341$   $F_{yprům} = -1394$   
 $F_z = 1492; 1335; 1469$   $F_{zprům} = 1432$   
 $F_a = 1672,8; 1664,2; 1567,1$   $F_{aprům} = 1634,7$

**III.** - tři záběry na konci odebírané délky

$F_x = 1545; 1563; 1562$   $F_{xprům} = 1556,667$   
 $F_y = -1265; -1371; -1448$   $F_{yprům} = -1361,333$   
 $F_z = 1434; 1289; 1290$   $F_{zprům} = 1337,667$   
 $F_a = 1624,7; 1635,5; 1627,4$   $F_{aprům} = 1629,2$

---

$F_{xprům} = 1552,889$   
 $F_{yprům} = -1360$   
 $F_{zprům} = 1381,111$   
 $F_{aprům} = 1616,922$

## Vrstva 8 – řezná rychlost 170 m/min

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1562; 1595; 1628	F <sub>xprům</sub> = 1595
F <sub>y</sub> = -1377; -1262; -1250	F <sub>yprům</sub> = -1296,333
F <sub>z</sub> = 1189; 1253; 1175	F <sub>zprům</sub> = 1205,667
F <sub>a</sub> = 1656,3; 1647,7; 1654,2	F <sub>aprům</sub> = 1652,733
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1570; 1517; 1602	F <sub>xprům</sub> = 1563
F <sub>y</sub> = -1212; -1240; -1168	F <sub>yprům</sub> = -1206,667
F <sub>z</sub> = 1298; 1406; 1170	F <sub>zprům</sub> = 1291,333
F <sub>a</sub> = 1642,3; 1637,8; 1643,7	F <sub>aprům</sub> = 1641,267
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1569; 1577; 1585	F <sub>xprům</sub> = 1577
F <sub>y</sub> = -1263; -1218; -1264	F <sub>yprům</sub> = -1248,333
F <sub>z</sub> = 1077; 1176; 1352	F <sub>zprům</sub> = 1201,667
F <sub>a</sub> = 1638,9; 1659,4; 1642,2	F <sub>aprům</sub> = 1646,833
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1578,333	
F <sub>yprům</sub> = -1250,444	
F <sub>zprům</sub> = 1232,889	
F <sub>aprům</sub> = 1646,944	

### Posuv na zub 0.25 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1362; 1376; 1460	F <sub>xprům</sub> = 1399,333
F <sub>y</sub> = -1139; -1136; -1160	F <sub>yprům</sub> = -1145
F <sub>z</sub> = 1045; 1094; 1196	F <sub>zprům</sub> = 1111,667
F <sub>a</sub> = 1377,6; 1384,6; 1374,9	F <sub>aprům</sub> = 1379,033
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1340; 1359; 1409	F <sub>xprům</sub> = 1369,333
F <sub>y</sub> = -1131; -1115; -1174	F <sub>yprům</sub> = -1140
F <sub>z</sub> = 1015; 1030; 1140	F <sub>zprům</sub> = 1061,667
F <sub>a</sub> = 1452,1; 1444,3; 1456,7	F <sub>aprům</sub> = 1451,033
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1432; 1346; 1348	F <sub>xprům</sub> = 1375,333
F <sub>y</sub> = -1154; -1103; -1096	F <sub>yprům</sub> = -1117,667
F <sub>z</sub> = 1068; 974,1; 1147	F <sub>zprům</sub> = 1063,033
F <sub>a</sub> = 1432,6; 1436,8; 1429,8	F <sub>aprům</sub> = 1433,067
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1381,333	
F <sub>yprům</sub> = -1134,222	
F <sub>zprům</sub> = 1078,789	
F <sub>aprům</sub> = 1421,044	



**Posuv na zub 0.2 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1146; 1147; 1164	F <sub>xprům</sub> = 1152,333
F <sub>y</sub> = -979,8; -965,0; -950,2	F <sub>yprům</sub> = -965
F <sub>z</sub> = 917,8; 966,2; 884,4	F <sub>zprům</sub> = 922,8
F <sub>a</sub> = 1210,3; 1224,5; 1218,7	F <sub>a</sub> prům = 1217,833
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1169; 1167; 1126	F <sub>xprům</sub> = 1154
F <sub>y</sub> = -981,4; -977,5; -969,5	F <sub>yprům</sub> = -976,133
F <sub>z</sub> = 835,5; 945,4; 912,0	F <sub>zprům</sub> = 897,633
F <sub>a</sub> = 1244,7; 1215,5; 1204,3	F <sub>a</sub> prům = 1221,5
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 1138; 1140; 1151	F <sub>xprům</sub> = 1143
F <sub>y</sub> = -944,4; -959,0; -943,1	F <sub>yprům</sub> = -948,833
F <sub>z</sub> = 893,8; 878,9; 874,8	F <sub>zprům</sub> = 882,3
F <sub>a</sub> = 1197,7; 1215,4; 1227,6	F <sub>a</sub> prům = 1213,567
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 1149,778	
F <sub>yprům</sub> = -963,322	
F <sub>zprům</sub> = 900,911	
F <sub>a</sub> prům = 1217,633	

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
F <sub>x</sub> = 930,0; 943,5; 924,8	F <sub>xprům</sub> = 932,767
F <sub>y</sub> = -827,3; -825,2; -826,7	F <sub>yprům</sub> = -826,4
F <sub>z</sub> = 735,2; 774,4; 742,3	F <sub>zprům</sub> = 750,633
F <sub>a</sub> = 967,8; 974,8; 962,1	F <sub>a</sub> prům = 968,233
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
F <sub>x</sub> = 950,0; 943,1; 940,8	F <sub>xprům</sub> = 944,633
F <sub>y</sub> = -803,4; -829,3; -829,3	F <sub>yprům</sub> = -837,333
F <sub>z</sub> = 761,5; 787,2; 746,2	F <sub>zprům</sub> = 764,967
F <sub>a</sub> = 957,9; 972,4; 971,3	F <sub>a</sub> prům = 967,2
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
F <sub>x</sub> = 960,6; 953,0; 945,1	F <sub>xprům</sub> = 952,9
F <sub>y</sub> = -817,9; -806,4; -826,4	F <sub>yprům</sub> = -816,9
F <sub>z</sub> = 752,8; 761,4; 810,2	F <sub>zprům</sub> = 774,8
F <sub>a</sub> = 975,8; 965,8; 978,4	F <sub>a</sub> prům = 973,333
<hr/>	
F <sub>xprům</sub> = 943,433	
F <sub>yprům</sub> = -826,878	
F <sub>zprům</sub> = 763,467	
F <sub>a</sub> prům = 969,589	

## Vrstva 9 – řezná rychlost 170 m/min

### Posuv na zub 0.2 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1179; 1157; 1168$	$F_{xprům} = 1168$
$F_y = -984,6; -952,0; -947,6$	$F_{yprům} = -960,067$
$F_z = 889,7; 903,7; 934,9$	$F_{zprům} = 909,433$
$F_a = 1234,7; 1237,6; 1231,1$	$F_{aprům} = 1234,467$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1158; 1112; 1131$	$F_{xprům} = 1133,667$
$F_y = -948,0; -949,2; -956,3$	$F_{yprům} = -951,167$
$F_z = 798,3; 826,9; 823,4$	$F_{zprům} = 816,2$
$F_a = 1197,7; 1214,3; 1227,8$	$F_{aprům} = 1213,267$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1147; 1161; 1176$	$F_{xprům} = 1161,333$
$F_y = -960,1; -990,0; -938,9$	$F_{yprům} = -963$
$F_z = 863,7; 921,9; 856,4$	$F_{zprům} = 880,667$
$F_a = 1247,6; 1242,2; 1251,3$	$F_{aprům} = 1247,033$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1154,333$	
$F_{yprům} = -958,078$	
$F_{zprům} = 868,767$	
$F_{aprům} = 1231,589$	

### Posuv na zub 0.3 mm

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1488; 1512; 1505$	$F_{xprům} = 1501,667$
$F_y = -1325; -1269; -1335$	$F_{yprům} = -1309,667$
$F_z = 1237; 1343; 1142$	$F_{zprům} = 1240,667$
$F_a = 1612,3; 1621; 1634,7$	$F_{aprům} = 1622,667$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1531; 1504; 1533$	$F_{xprům} = 1522,667$
$F_y = -1314; -1303; -1276$	$F_{yprům} = -1297,667$
$F_z = 1274; 1208; 1067$	$F_{zprům} = 1183$
$F_a = 1652,1; 1644,3; 1653,8$	$F_{aprům} = 1650,067$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1544; 1552; 1574$	$F_{xprům} = 1556,667$
$F_y = -1294; -1255; -1281$	$F_{yprům} = -1276,667$
$F_z = 1271; 1208; 1067$	$F_{zprům} = 1236,333$
$F_a = 1621,3; 1635,5; 1637,1$	$F_{aprům} = 1631,3$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1527$	
$F_{yprům} = -1294,667$	
$F_{zprům} = 1220$	
$F_{aprům} = 1634,678$	

**Posuv na zub 0.15 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 977,6; 946,5; 938,9$	$F_{xprům} = 954,333$
$F_y = -878,0; -835,6; -845,9$	$F_{yprům} = -853,167$
$F_z = 756,6; 761,5; 795,0$	$F_{zprům} = 771,033$
$F_a = 968,8; 974,3; 978,6$	$F_{aprům} = 973,9$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 936,6; 954,7; 939,1$	$F_{xprům} = 943,467$
$F_y = -806,1; -803,5; -805,2$	$F_{yprům} = -805,033$
$F_z = 769,0; 872,8; 796,0$	$F_{zprům} = 812,6$
$F_a = 979,1; 975,6; 981,3$	$F_{aprům} = 978,667$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 938,6; 918,1; 919,3$	$F_{xprům} = 925,333$
$F_y = -832,7; -819,5; -816,3$	$F_{yprům} = -822,833$
$F_z = 767,3; 818,9; 783,4$	$F_{zprům} = 789,867$
$F_a = 961,1; 968,4; 964,3$	$F_{aprům} = 964,6$
<hr/>	
$F_{xprům} = 941,044$	
$F_{yprům} = -827,011$	
$F_{zprům} = 791,167$	
$F_{aprům} = 972,389$	

**Posuv na zub 0.25 mm**

<b>I.</b>	- tři záběry na začátku odebírané délky
$F_x = 1368; 1366; 1323$	$F_{xprům} = 1352,333$
$F_y = -1115; -1134; -1078$	$F_{yprům} = -1109$
$F_z = 1099; 1007; 1088$	$F_{zprům} = 1064,667$
$F_a = 1444,2; 1431,3; 1399,1$	$F_{aprům} = 1424,867$
<b>II.</b>	- tři záběry v polovině odebírané délky
$F_x = 1347; 1469; 1355$	$F_{xprům} = 1390,333$
$F_y = -1216; -1175; -1116$	$F_{yprům} = -1169$
$F_z = 1070; 1032; 1101$	$F_{zprům} = 1067,667$
$F_a = 1452,3; 1461,2; 1452,7$	$F_{aprům} = 1455,4$
<b>III.</b>	- tři záběry na konci odebírané délky
$F_x = 1355; 1337; 1318$	$F_{xprům} = 1336,667$
$F_y = -1151; -1130; -1144$	$F_{yprům} = -1131,667$
$F_z = 1063; 1097; 1032$	$F_{zprům} = 1064$
$F_a = 1461,3; 1458,8; 1457,2$	$F_{aprům} = 1459,1$
<hr/>	
$F_{xprům} = 1359,778$	
$F_{yprům} = -1136,556$	
$F_{zprům} = 1065,445$	
$F_{aprům} = 1446,456$	

**Průměrné hodnoty pro otáčky 517min<sup>-1</sup> (rychlost 130 m/min)****Posuv na zub 0.15 mm**F<sub>xprům</sub> = 978,296F<sub>yprům</sub> = -868,715F<sub>zprům</sub> = 809,448F<sub>aprům</sub> = 998,440**Posuv na zub 0.2 mm**F<sub>xprům</sub> = 1189,111F<sub>yprům</sub> = -1048,344F<sub>zprům</sub> = 967,448F<sub>aprům</sub> = 1258,681**Posuv na zub 0.25 mm**F<sub>xprům</sub> = 1415,555F<sub>yprům</sub> = -1192,592F<sub>zprům</sub> = 1173,889F<sub>aprům</sub> = 1474,129**Posuv na zub 0.3 mm**F<sub>xprům</sub> = 1665,778F<sub>yprům</sub> = -1366,555F<sub>zprům</sub> = 1363,592F<sub>aprům</sub> = 1690,9**Průměrné hodnoty pro otáčky 597min<sup>-1</sup> (rychlost 150 m/min)****Posuv na zub 0.15 mm**F<sub>xprům</sub> = 982,563F<sub>yprům</sub> = -887,926F<sub>zprům</sub> = 851,344F<sub>aprům</sub> = 1005,126**Posuv na zub 0.2 mm**F<sub>xprům</sub> = 1201,852F<sub>yprům</sub> = -1023,264F<sub>zprům</sub> = 1016,3F<sub>aprům</sub> = 1246,585**Posuv na zub 0.25 mm**F<sub>xprům</sub> = 1399,481F<sub>yprům</sub> = -1184,556F<sub>zprům</sub> = 1170,196F<sub>aprům</sub> = 1454,955**Posuv na zub 0.3 mm**F<sub>xprům</sub> = 1623,259F<sub>yprům</sub> = -1330F<sub>zprům</sub> = 1348,815F<sub>aprům</sub> = 1656,729

**Průměrné hodnoty pro otáčky 676min<sup>-1</sup> (rychlost 170 m/min)****Posuv na zub 0.15 mm**F<sub>x</sub>prům = 943,355F<sub>y</sub>prům = -846,104F<sub>z</sub>prům = 801,467F<sub>a</sub>prům = 974,207**Posuv na zub 0.2 mm**F<sub>x</sub>prům = 1159,925F<sub>y</sub>prům = -969,989F<sub>z</sub>prům = 905,315F<sub>a</sub>prům = 1223,970**Posuv na zub 0.25 mm**F<sub>x</sub>prům = 1368,037F<sub>y</sub>prům = -1143,148F<sub>z</sub>prům = 1097,819F<sub>a</sub>prům = 1423,715**Posuv na zub 0.3 mm**F<sub>x</sub>prům = 1552,74F<sub>y</sub>prům = -1301,703F<sub>z</sub>prům = 1278F<sub>a</sub>prům = 1632,848