

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Obrobitelnost vybraných návarových materiálů pro technologii laser cladding



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tesař** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **439105**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Obrobitelnost vybraných návarových materiálů pro technologii laser cadding

Název bakalářské práce anglicky:

Machinability of selected hardfacing materials used for laser cladding technology

Pokyny pro vypracování:

1. Popis aktuálního stavu technologie laser cadding
2. Teorie řezání, řezné síly, integrita povrchu
3. Návrh a realizace experimentu obráběním
4. Analýza dosažených výsledků

Seznam doporučené literatury:

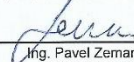
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

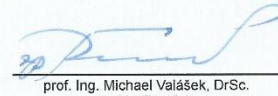
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

24.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji panu Ing. Pavlu Zemanovi Ph.D. za odborný dohled při tvorbě této bakalářské práce. Jeho rady a věcné připomínky mi byly velmi užitečné.

Anotace

Autor:	Matouš Tesař
Název BP:	Obrobitelnost vybraných návarových materiálů pro technologii laser cladding
Rozsah práce:	67 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:	3D tisk, laser cladding, aditivní výroba, obrobitelnost, složky celkové řezné síly, drsnost povrchu
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá rešerší technologie laser cladding a teorie řezání. Na základě těchto poznatků je nastaven a proveden experiment obrábění návarových materiálů.

Anotace

Author:	Matouš Tesář
Title of bachelor thesis:	Machinability of selected hardfacing materials used for laser cladding technology
Extent:	67 pages
Academic year:	2017/2018
Faculty:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12134 – Department of Machinig, Process Planning and Metrology
Supervisor:	Ing. Pavel Zeman Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Key words:	3D printing, laser cladding, additive manufacturing, machinability, cutting forces, surface roughness
Anotace:	This bachelor thesis deals with research of laser cladding and cutting theory. Based on this knowledge the conditions of an experiment are set.

Obsah

1. Úvod	11
2. Cíl práce.....	12
3. Popis aktuálního stavu technologie laser cladding	13
3.1. Definice aditivní výroby	13
3.2. Využití aditivní výroby	13
3.3. Kritéria aditivní výroby	14
3.4. Laser cladding.....	14
3.5. Přehled dodavatelů technologie laser cladding.....	15
3.5.1. Sciaky, Inc.....	15
3.5.2. Optomec	16
3.5.3. InssTek	17
3.5.4. Trumpf.....	18
3.5.5. BeAM.....	19
3.5.6. DMG Mori	20
3.5.7. Hybrid Manufacturing Technologies	21
3.5.8. POM Group.....	21
3.5.9. Huffman	22
3.5.10. OR Laser.....	23
3.5.11. IPG Photonics	23
3.5.12. Další dodavatelé	24
3.5.13. Technologie využitá v této práci	24
4. Třískové obrábění	27
4.1. Obrobek	27
4.2. Obráběcí nástroj.....	27
4.2.1. Nástrojové materiály	27
4.2.2. Nástrojová geometrie	27
4.3. Pohyby při obrábění.....	28
4.4. Mechanika tvorby třísky	28
4.5. Síly při řezání.....	29
4.6. Integrita povrchu.....	30
4.7. Kritéria třískového obrábění	31
4.7.1. Frézování.....	31

4.7.1.1.	Řezné podmínky frézování.....	32
4.7.1.2.	Síly při frézování.....	34
5.	Experiment.....	35
5.1.	Vytvoření vzorků technologií laser cladding.....	35
5.2.	Vzorky.....	35
5.2.1.	Rozměry vzorků.....	36
5.2.2.	Materiál vzorků.....	37
5.3.	Návrh experimentu.....	37
5.3.1.	Obráběcí centrum.....	37
5.3.2.	Upnutí do obráběcího centra.....	38
5.3.3.	Dynamometr a jeho příslušenství.....	40
5.3.4.	Zařízení na měření drsnosti.....	40
5.3.5.	Obráběcí nástroj.....	41
5.4.	Metodika měření.....	42
5.4.1.	Podmínky experimentu.....	42
5.4.2.	Postup měření sil při řezání.....	42
5.4.3.	Postup měření drsnosti povrchu.....	45
5.5.	Měření sil při řezání.....	45
5.5.1.	Vyhodnocení naměřených dat.....	48
5.5.2.	Shrnutí a analýza výsledků.....	53
5.6.	Měření drsnosti povrchu.....	54
5.6.1.	Vyhodnocení naměřených dat.....	56
5.6.2.	Shrnutí a analýza výsledků.....	60
6.	Závěr.....	62
7.	Seznam příloh.....	63
8.	Zdroje.....	64

Přehled použitých jednotek a veličin

Označení veličiny	Jednotka	Název veličiny
m	[kg]	hmotnost
l	[m]	délka
P	[W]	výkon
t	[s]	čas
v_c	[m/min]	řezná rychlost
v_f	[mm/min]	posuvová rychlost
v_e	[m/min]	rychlost výsledného řezného pohybu
f_n	[mm]	posuv na otáčku
f_z	[mm]	posuv na zub
η	[°]	úhel řezného pohybu
φ	[°]	úhel posuvového pohybu
F	[N]	síla
F_p	[N]	pasivní síla
F_c	[N]	řezná síla
F_f	[N]	síla posuvu
F_a	[N]	aktivní síla
F_{cN}	[N]	kolmá řezná síla
F_{fN}	[N]	kolmá posuvová síla
$F_{x_prům}$	[N]	průměrná síla ve směru X
F_{x_max}	[N]	maximální síla ve směru X
$F_{y_prům}$	[N]	průměrná síla ve směru Y
F_{y_max}	[N]	maximální síla ve směru Y
$F_{z_prům}$	[N]	průměrná síla ve směru Z
F_{z_max}	[N]	maximální síla ve směru Z
Ra	[μ m]	průměrná aritmetická úchylka profilu
Rz	[μ m]	největší výška profilu
Rsm	[mm]	průměrná šířka prvku profilu
Rt	[μ m]	celková výška profilu

D	[mm]	průměr nástroje
a_p	[mm]	hloubka řezu
h_{Dc}	[mm]	tloušťka třísky
b_{Dc}	[mm]	šířka třísky
κ_r	[°]	úhel nastavení hlavního ostří
A_D	[mm ²]	plocha odřezávané vrstvy
n	[min ⁻¹]	otáčky
λ_c	[mm]	mezní vlnová délka
f	[Hz]	frekvence
L_r	[mm]	jednotková měřicí délka
L_n	[mm]	celková měřicí délka

1. Úvod

Předmětem této práce bude především prozkoumat možnosti obrábění návarů, vytvořených technologií laser cladding. Tato technologie se řadí k moderním metodám aditivní výroby z kovů, nebo také 3D tisku kovů, které zažívají v posledních letech veliký rozmach.

Výhodou technologie laser cladding je možnost vyrábět tvarově komplikované součásti, které by za použití konvenčních obráběcích technologií nebylo možné vyrobit.

Při tvorbě součástí tímto procesem je možno využít nejmodernějších materiálů. Časté je například využití slitin titanu. Toto je umožněno také díky tomu, že při výrobě součástí nevzniká žádný odpad a je možné je odlehčit vytvořením jinak nedosažitelných tvarů, díky čemuž vzniká výrazná úspora na materiálu. Běžná je taky tvorba součástí z několika různých slití.

Struktury, vytvořené navařením nemají dokonalý povrch ani přesnost. Proto je zapotřebí jejich obrábění. Návarové materiály jsou těžko obrobitelné a jejich vlastnosti jsou vzhledem k jejich teplotnímu ovlivnění odlišné, vůči podobným materiálům a polotovarům připravenými klasickými metodami. Je tedy důležité prozkoumat jejich obrobitelnost.

Protože je při výrobě možno využít nejmodernějších materiálů a vyrábět výrazně odlehčené díly, nachází technologie laser cladding uplatnění především v letectví a dalších vyspělých průmyslových odvětvích a aplikacích.

2. Cíl práce

Cílem práce je prozkoumat technologii laser cladding, možnosti obrobitelnosti součásti po technologii laser cladding a následně navrhnout experiment, ve kterém bude obrobitelnost vyzkoušena v praxi.

Návrh experimentu a jeho důkladná příprava budou důležité především z důvodů omezeného počtu vzorků, které budou pro experiment k dispozici, a také kvůli jejich efektivnímu využití.

Dále bude provedeno vyhodnocení naměřených dat a jejich následná analýza. Především bude posuzován vliv řezných podmínek na průběh a výsledek obráběcího procesu. Konkrétně budou posuzovány drsnost obrobeného povrchu a složky výsledné síly řezání potřebné pro obrábění za různých podmínek.

3. Popis aktuálního stavu technologie laser cladding

Technologie laser cladding, kterou se zabývá tato práce, spadá do dynamicky se rozvíjejícího se odvětví aditivní výroby (additive manufacturing (AM)), neboli 3D tisku.

3.1. Definice aditivní výroby

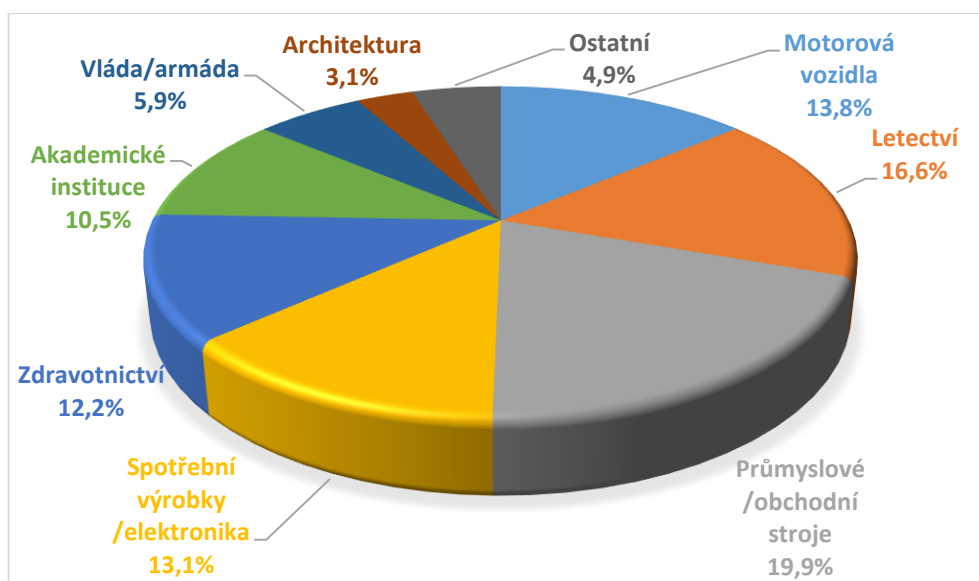
Aditivní výroba, je proces, při kterém jsou využívána 3D data, vytvořená v některém z CAD programů, k vytvoření součásti vrstvu po vrstvě. Toto je veliký rozdíl oproti tradiční výrobě, při které se soustruží, vrtá a brousí původní kus materiálu (polotovaru) tak, aby vznikla součást požadovaných tvarů. [1]

3D CAD model je rozdělen na jednotlivé horizontální vrstvy. Výrobní nástroj poté využívá tato geometrická data k postupnému nanášení vrstev, dokud není součást kompletní. [2]

Metoda 3D tisku je velmi výhodná pro použití ve vývojovém cyklu, při vývoji prototypů, protože výroba modelu je velice rychlá v porovnání s klasickým výrobním procesem. Díky tomu se v souvislosti s aditivní výrobou mluví o metodě rapid prototyping. [2]

3.2. Využití aditivní výroby

Společnost Wohlers Associates, Inc. již přes 2 desetiletí sbírá a publikuje souhrnné informace o aditivní výrobě. Na Obr. 1 je vidět, do jakých průmyslových odvětví dodávají společnosti zabývající se 3D technologií v roce 2016. [3]



Obrázek 1: Rozložení dodaných strojů do jednotlivých průmyslových odvětví [3]

Hlavní zastoupení mají průmyslové a obchodní stroje. To zahrnuje kancelářské vybavení, např.: počítače, kopírky a také průmyslové stroje jako CNC stroje a jiné. Průmysl motorových vozidel využívá tyto 3D technologie především k výrobě prototypů. V oboru medicíny našly metody 3D tisku uplatnění především při výrobě implantátů. [3]

3.3. Kritéria aditivní výroby

Aditivní výroba se dá dělit podle několika kritérií. Jsou jimi například samotný princip tvorby součásti, zdroj energie použitý k natavení materiálu, rychlost stavby součásti, nebo typ původního materiálu. [7]

Jedním ze systémů aditivní výroby je právě laser cladding. Někdy je nazýván také directed energy deposition (DED). [3]

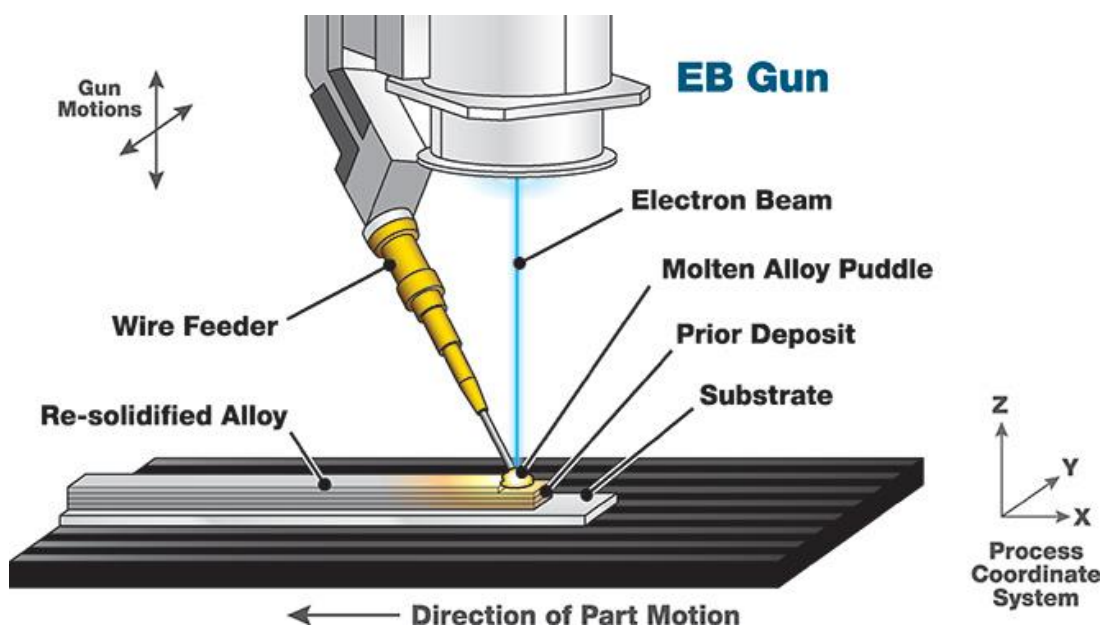
3.4. Laser cladding

Technologie laser cladding využívá k vytvoření jednotlivých vrstev součásti soustředěnou energii laseru (v některých případech také elektronového paprsku) k natavení a spojení původního materiálu s materiálem nanášeným přímo do místa působení energie. Materiál je na místo navařování přiváděn buď v podobě prášku, nebo drátu. Existuje také metoda WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing), která využívá standartního obloukového svařování pro tvorbu součásti. Tento proces je využíván pro tvarově jednodušší součásti v porovnání s ostatními metodami laser cladding. [3] [42]

Dělení procesů laser cladding:

- Podle původního materiálu
 - Systémy s přívodem materiálu v podobě prášku
 - Systémy s přívodem materiálu v podobě drátu
- Podle zdroje energie
 - Laser
 - Elektronový paprsek
 - Obloukové svařování (WAAM)

V případě této práce bude použit systém s přívodem nového materiálu ve formě drátu. Příklad metody laser cladding, která využívá přívodu drátu, je vidět na Obr. 2. Jedná se konkrétně o Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) od firmy Sciaky, Inc. [5]



Obrázek 2: Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]) [5]

Metoda directed energy deposition nabízí množství jedinečných vlastností. Jednou z nich je možnost nanášení několika různých materiálů na různých místech součásti. Další výhodou je, že většina těchto systémů používá víceosý nanášecí systém, nebo rovnou robotické rameno, takže tvorba součásti nemusí být limitována pouze na jednotlivé horizontální vrstvy. Tato vlastnost přímo vybízí k využití při opravách různých součástí. [3]

Společnosti, které vyrábějí zařízení na principu DED, často dodávají své produkty leteckému průmyslu. Běžné je také jejich využití při opravách vojenských strojů, nebo lopatek turbín. Opravování drahých součástí patří mezi hlavní použití této technologie. [4]

Ve srovnání s jinými metodami 3D tisku, je za pomoci technologie laser cladding možno vytvořit větší součásti. [4]

Produkty vytvořené technologií laser cladding jsou však drsné a hrubé. Většinou potřebují následné obrábění, aby se dosáhlo přesných požadovaných rozměrů a požadované kvality povrchu. Proto se v poslední době objevují na trhu hybridní systémy, které kombinují stroje na bázi technologie DED s CNC obráběcími centry. Součást je v jednom stroji, jak vytvořena, tak také rovnou obrobena na požadovanou velikost a drsnost. [3] [4]

Materiálů použitelných pro laser cladding je velké množství. Od uhlíkových ocelí přes nerezové oceli, titanové, hliníkové, měděné slitiny až po molybden, niob a tantal. Často používaná slitina je Inconel, což je austenitická superslitina na bázi niklu a chromu. Obecně se dá říct, že materiál ve formě prášku je dražší než ve formě drátu. [5]

3.5. Přehled dodavatelů technologie laser cladding

V této kapitole je přehled společností, které se zabývají výrobou strojů využívajících metodu laser cladding neboli directed energy deposition.

3.5.1. Sciaky, Inc.

Americká firma Sciaky patří do skupiny Phillips Service Industries. Nabízí svářecí systémy a servis. S výrobou strojů na aditivní výrobu začala v roce 2009. [3]

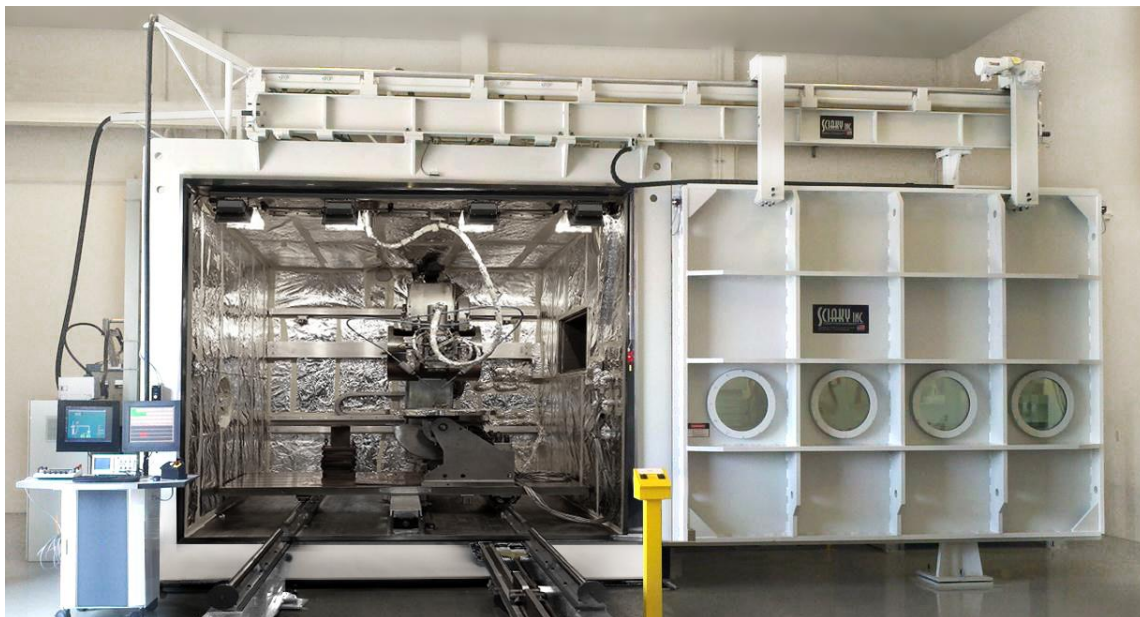
Jejich systém Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM[®]), přivádí materiál v podobě drátu. Jako zdroj tepla slouží elektronový paprsek. Součástí se tvoří uvnitř vakuové komory a jejich maximální velikost je ovlivněna právě velikostí komory. Společnost tvrdí, že jejich systém s rychlostí tvorby součásti od 3,18 do 9,07 kg za hodinu (v závislosti na zvoleném materiálu) je nejlepší na trhu. [5] [6]

Sciaky vyvinula pro své produkty vlastní řídicí software Interlayer Real-time imaging and Sensing System (IRISS). Ten monitoruje průběh procesu a upravuje parametry, jako je rychlost podávání drátu a výkon paprsku. [3]

Díky tomu, že EBAM se nabízí také ve verzi s přívodem 2 drátů najednou, je možnost tvořit součásti skládající se z různých slitin přímo během výroby. [3]

V portfoliu firmy se nachází několik strojů, odlišných velikostí pracovního prostoru. EBAM[®] 150 je s rozměry komory 3810 mm (150 palců) x 3810 mm x 3048 mm druhý

největší. Jejich největší stroj dokáže vyrobit součásti o rozměrech 5491 x 1219 x 1219 (mm). [6]



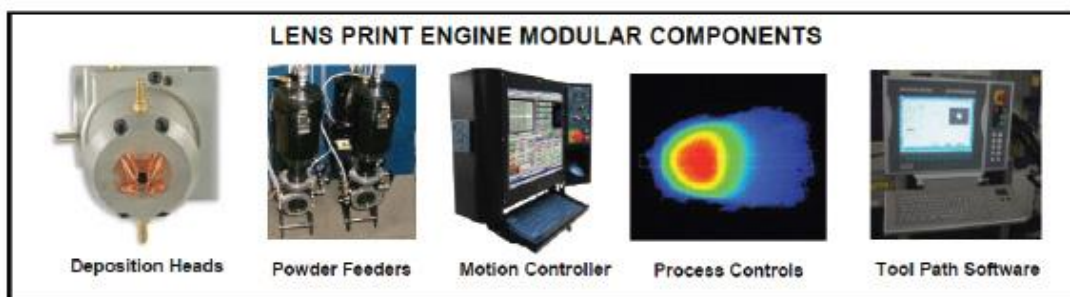
Obrázek 3: EBAM©150 Systém [6]

3.5.2. Optomec

Optomec je další americkou firmou využívající metodu laser cladding. Její vznik je úzce spojen s tanním vojenským průmyslem. Systém nese název Laser-engineered net shaping (LENS), materiál je přiváděn ve formě prášku a jako zdroj tepla slouží výkonný laser. [3] [4] [8]

Jejich stroje využívají hermeticky uzavřených komor, které jsou napuštěny argonem, aby bylo dosaženo velmi nízké koncentrace kyslíku a vlhkosti a součást byla chráněna před oxidací. [8]

Firma Optomec nabízí kompletní stroje pro výrobu součástí, ale také zařízení, které je možné přidat k existujícímu, nebo novému CNC obráběcímu centru. Komponenty přídatného zařízení jsou vidět na Obr 4. [8][9]



Obrázek 4: LENS komponenty k CNC centru [9]

Na Obr. 5 je vidět jedno z menších zařízení, určeného především pro univerzity, výzkumné ústavy, výrobce kovových prášků, nebo pro výrobu a opravu malých součástí. S maximálními rozměry výrobku 100 mm x 100 mm x 100 mm se jedná o základní

zařízení, pro vstup do aditivní výroby technologií directed energy deposition. Naopak největší z jejich strojů umožňuje výrobu dílů o velikosti až do 900 x 1500 x 900 (mm) a používá 1 kW laser. [10] [20]



Obrázek 5: LENS 450 [10]

Optomec také nabízí hybridní stroje, které kombinují jejich LENS technologii aditivní výroby s CNC frézkami. [19]

3.5.3. InssTek

InssTek je rychle se rozvíjející Jihokorejská společnost. Jejich technologie nese název Direct Metal Tooling (DMT). Jako zdroj tepla zde slouží laser a materiál je přiváděn ve formě prášku. Firma nabízí širokou škálu systémů od standardních strojů různých velikostí až po zařízení přímo na přání zákazníka. Jako výhody svých zařízení uvádí firma možnost využití běžně dostupných práškových kovů, namísto prášků vlastní výroby, což snižuje finanční náročnost a také použití více zásobníků na prášek, které umožňují výrobu jednoho dílu z různých slitin. [4] [11]

Největší stroj v jejich katalogu používá 5 kW laser a je schopen tvořit výrobky o velikosti až 4000 x 1000 x 1000 mm. [18]

Zajímavým zařízením je MX-Mini na Obr. 6, které sama společnost řadí do kategorie desktop. Se svojí velikostí pracovního prostředí 200 x 200 x 200 (mm) slouží především k vývoji materiálů a na výrobu drobných součástek. [12]



Obrázek 6: MX-mini společnosti InssTek [12]

3.5.4. Trumpf

Trumpf je německá společnost s dlouhou historií založená již v roce 1923. Je jednou z vedoucích firem na poli laserových a řezacích systémů. Firma nabízí kromě systémů na bázi directed energy deposition také systémy s práškovými loži. [4] [13]

Firma nabízí 2 základní stroje, které se liší především svojí velikostí. Maximální velikost vyrobitelné součásti většího z nich je 1540 x 1540 x 520 (mm), výkon laseru je až 6kW. Trumpf svůj proces nazývá jednoduše Laser Metal Deposition (LMD) a stroje využívají laseru a kovového prášku. Výhodou zařízení Trumpf je možnost využití i pro řezání laserem, a také laserové svařování. Díky tomu nabízí stroje se širokou škálou využití. [13] [14]



Obrázek 7: TruLaser Cell 3000 firmy Trumpf [14]

3.5.5. BeAM

Francouzská společnost BeAM je poměrně novým uskupením v tomto sektoru. Na vývoji technologie však pracují již přes 15 let, pod hlavičkou firmy Irep Laser. Firma nabízí stroje, které využívají laseru jako tepelného zdroje a kovový prášek. Výkony laserů, používaných v jejich strojích je do 4 kW a maximální rozměry výrobku jsou 1200 x 800 x 800 (mm) [4] [15]

BeAM nabízí 2 systémy: MobileCLAD a Magic 2.0, které dodává v různých kombinacích os a výkonnosti laserů. Zároveň pokračuje v jejich dalším vývoji. Na obr. 8 je vidět zařízení, které se velikostně řadí do středu jejich nabídky. [3] [16]



Obrázek 8: BeAM Modulo 400 [16]

3.5.6. DMG Mori

Společné úsilí firem DMG Mori a Sauer AG vedlo v roce 2013 k představení hybridního systému LASERTEC 65 3D, který kombinuje zařízení na aditivní výrobu s 5 osou frézku. Stroj využívá 2 kW laser a přiváděný materiál je v podobě kovového prášku. Zařízení má cylindrickou výrobní komoru o průměru 600 mm a výšce 400 mm. [3] [17]

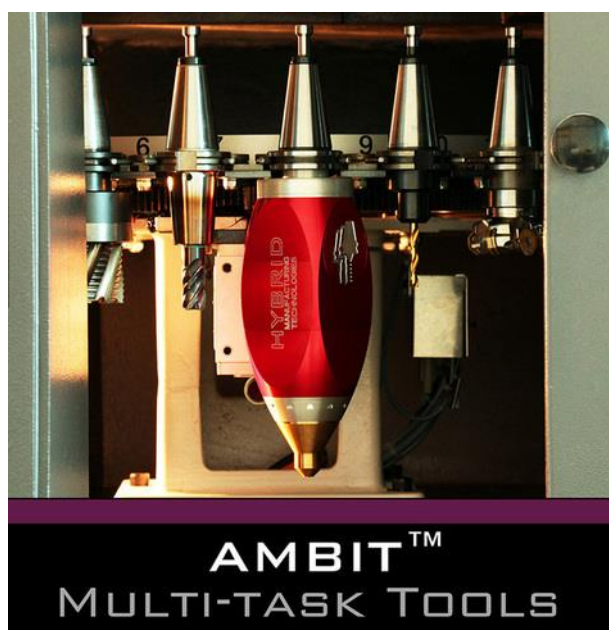


Obrázek 9: LASERTEC 65 3D [17]

3.5.7. Hybrid Manufacturing Technologies

Firma Hybrid Manufacturing Technologies a jejich systém AMBIT™ sedmé série nabízí možnost implementace aditivní výroby do obráběcích center. V podstatě vyrábí nanášecí hlavy, které je možno upnout na místo nástroje do CNC. Díky tomu je možné nanesený materiál rovnou obrábět, a to vše na jednom stroji a bez větších úprav. [21]

Jeich nanášecí hlavy využívají jako zdroj nového materiálu prášek a k jeho natavení je využíván laser. Na Obr. 10 je vidět jejich produkt AMBIT™. [21]



Obrázek 10: AMBIT™ [21]

3.5.8. POM Group

Tato americká společnost vyvíjí aditivní systém s názvem DM3D. Jejich technologii sami označují jako Direct Metal Deposition, která funguje na základě laseru a přívodu materiálu v podobě prášku. Stejně jako řešení od většiny ostatních firem, je i zde možné využít stroje na výrobu součástí, jejich opravu, případně k povrchovým úpravám. [22]

Stroje, které firma nabízí, se liší velikostí pracovního prostoru a výkonem laseru. Rozměry pracovního prostoru největšího z nich jsou 673 x 673 x 474 (mm). Výkony použitých laserů se pohybují v rozmezí 1 až 5 kW. [23]

Zajímavostí jsou stroje DMD 44R/66R – ROBOTIC DMD na Obr. 11, které jsou kombinací aditivního systému DM3D a šestiosého průmyslového robota. Díky velkému pracovnímu prostoru robota, který může mít dosah 1,95 m (DMD 44R), nebo 3,2 m (DMD 66R), je možné vytvářet, a především opravovat i masivní součásti. [24]



Obrázek 11: DMD 44R/66R – ROBOTIC DMD [24]

3.5.9. Huffman

Americká firma s dlouholetou historií, která v současné době nabízí několik variant čtyř, pěti a šestiosých zařízení na aditivní výrobu. Stroje využívají firemní technologie Laser Powder Fusion (LPF™) a Laser Fusion Welding (LFW). Některé jsou dostupné také v kombinaci s argonovou komorou, která umožňuje navařovat prášky reagující s kyslíkem. [25]

Stroje mají velikost pracovního prostředí od nejmenšího HA-263 s rozměry 200 x 200 x 200 (mm) až po největší HC-254 na Obr. 12 s rozměry 1625 x 356 x 356 (mm). [25]



Obrázek 12: Huffman HC-254 [25]

3.5.10. OR Laser

OR Laser je německá firma, vyrábějící systémy, které za pomoci laseru provádějí různé operace jako např.: Svařování, řezání, nebo gravírování. Vyrábějí však také práškovou trysku a práškový zásobník, které se dají připojit k jejich strojům. Díky tomu vznikne laser cladding systém schopný povrchových úprav, nebo 3D tisku. [26]

Velikost pracovního prostoru i výkon laseru pak záleží na původním stroji. Na obr. 13 je vidět stroj LRS EVO s nasazenou práškovou tryskou. Tento stroj nabízí výkon laseru od 160 do 300 W a rozměry pracovního prostředí 200 x 200 x 200 (mm). [26] [27]



Obrázek 13: LRS EVO DIODELINE s práškovou tryskou [27]

3.5.11. IPG Photonics

Společnost, která je původem z Ruska, je dnes rozšířená celosvětově s hlavním sídlem společnosti v Americe a výrobními továrnami v USA, Německu, Rusku a Itálii. Její specializací je výroba vláknových laserů a strojů, které tyto lasery používají k nejrůznějším účelům od řezání až po laser cladding. [28]

Zařízením této společnosti je šestiosé robotické rameno, které je uzavřeno v bezpečnostním pracovním prostoru. Zařízení je kvůli své velikosti využíváno

především k povrchovým úpravám a opravám velkých a drahých součástí. Systém přivádí materiál v podobě prášku, nebo drátu. Je možné využití laseru o výkonu 1 až 10 kW, většinou se využívá 2 kW. Pracovní prostor závisí na velikosti robotického ramena. Je možné využít ramena o dosahu až 2,69 m. [29]

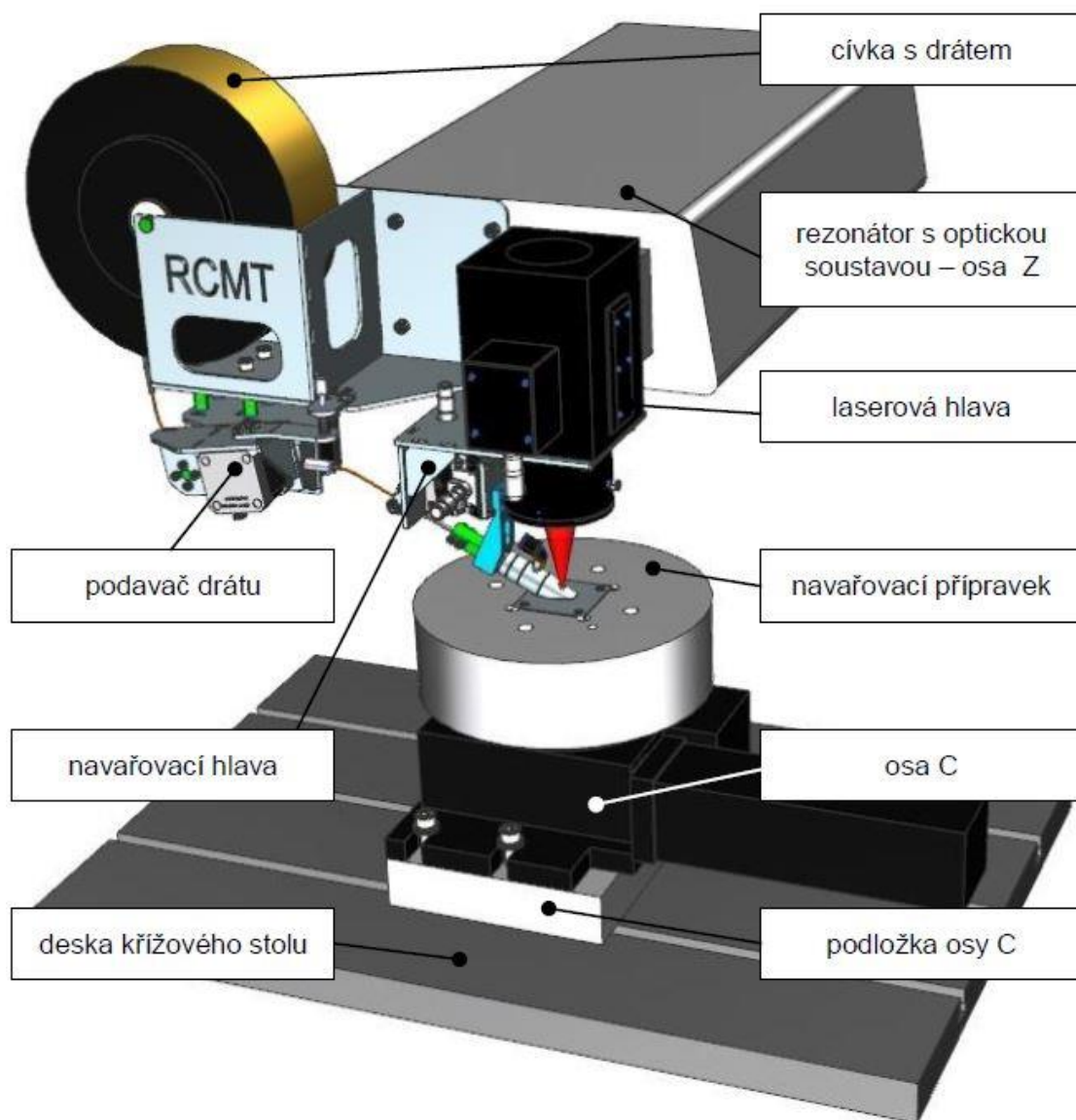
3.5.12. Další dodavatelé

Vzhledem k tomu, jak dynamicky rozvíjejícím odvětvím aditivní výroba, včetně technologie laser cladding, je, můžeme v současné době najít mnoho dalších firem, které se alespoň částečně touto technologií zabývají. Některé z nich dodávají práškové materiály (Höganäs) [30], jiné se zabývají výrobou práškových trysek, laserových systémů a různého dalšího příslušenství. Především v oblasti využití metody laser cladding pro povrchové úpravy je možné najít nespočet výrobců.

3.5.13. Technologie využitá v této práci

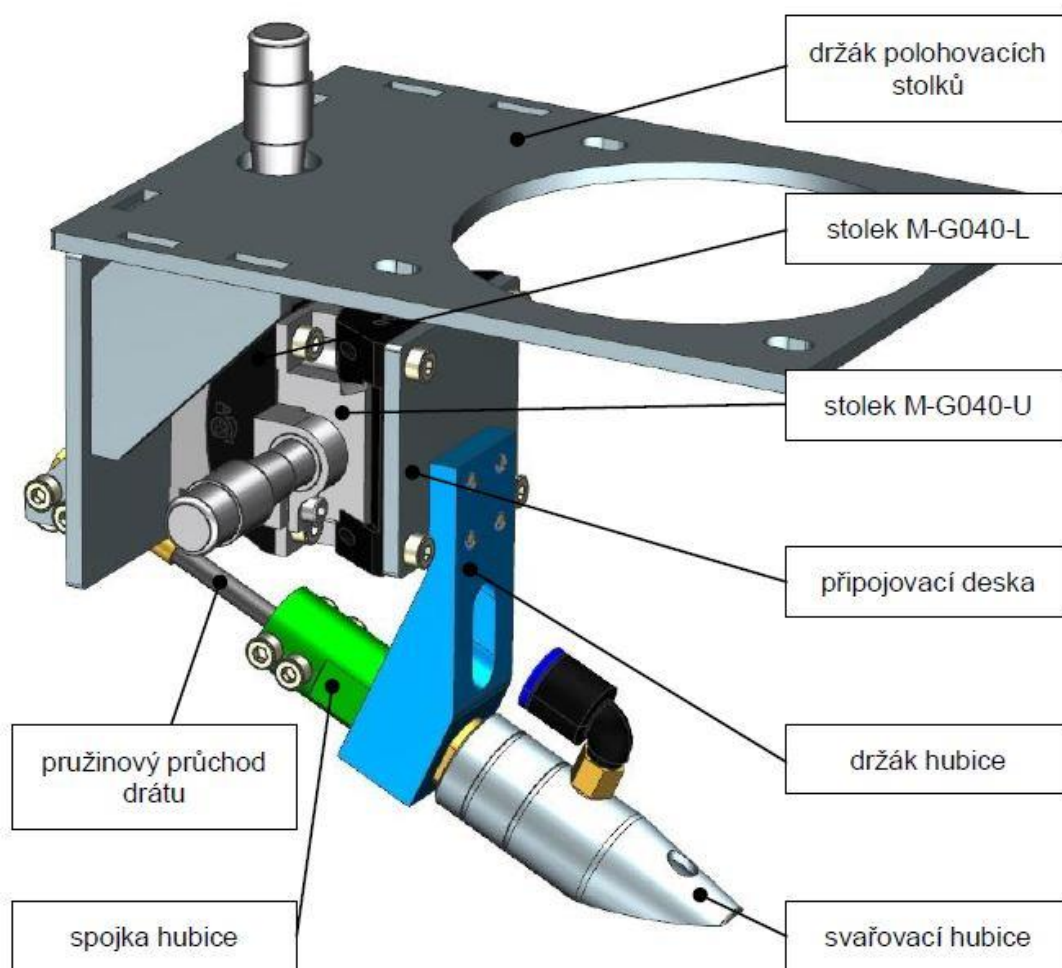
Pro navařování laserem je využíván tříosý stroj LUMONICS JK701H. Tento je osazen laserem o výkonu 550 W. Zároveň je na stroji instalována jedna přídatná rotační osa. [41]

Na Obr. 14 jsou vidět veškeré funkční části navařovací hlavy. Laserová hlava je umístěna na ose Z, pohyb v ose X a Y je zajišťován deskou křížového stolu. Je zde také patrná rotační osa C a automatický podavač drátu. [41]



Obrázek 14: Sestava navařovací hlavy [41]

Na Obr. 15 je detailně popsána samotná navařovací hlava. Důležitou roli hrají polohovací stolky M-GO40-U a M-GO40-L, které slouží k přesnému nastavení podavače tak, aby dodával drát přesně do ohniska laseru. [41]



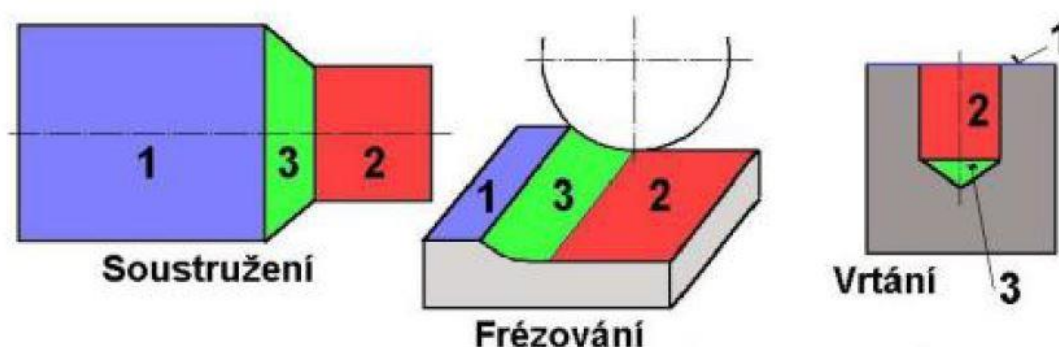
Obrázek 15: Detail navařovací hlavy [41]

4. Třískové obrábění

4.1. Obrobek

Obrobek můžeme rozdělit na 3 základní plochy. [32]

- Obráběná plocha je plocha obrobku, která má být odstraněna obráběním. Na Obr. 16 je zobrazena modře a popsána číslem 1. [32]
- Obrobená plocha je plocha obrobku, která je vytvořena působením nástroje. Na Obr. 16 je zobrazena červeně a popsána číslem 2. [32]
- Přechodová plocha je okamžitá plocha obrobku, která vzniká působením nástroje v průběhu jednoho zdvihu, nebo otáčky. Na Obr. 16 je zobrazena zeleně a popsána číslem 3. [32]



Obrázek 16: Plochy obrobku [32]

4.2. Obráběcí nástroj

Obráběcí nástroje jsou určeny jejich geometrií a řezným materiálem. [31]

4.2.1. Nástrojové materiály

Požadované vlastnosti nástrojových materiálů:

- Zaručená vysoká pevnost a tvrdost při pracovních podmínkách – odolnost vůči opotřebení a deformaci břitu. [31]
- Vysoká houževnatost – aby nedocházelo ke křehkému lomu. [31]
- Dobré chemické vlastnosti – předejití oxidaci a difúzi. [31]
- Odolnost vůči teplotním rázům a celková tepelná stálost. [32]
- Otěruvzdornost. [32]

4.2.2. Nástrojová geometrie

Ať už se jedná o velikosti sil při řezání a jejich rozložení, drsnost povrchu, hospodárnost obráběcího procesu apod. má nástrojová geometrie na tyto parametry obráběcího procesu výrazný vliv. Je proto jasné, že dokonalá znalost geometrie nástroje je naprostou nutností pro pochopení daného procesu obrábění. [32]

Všechny parametry jsou definovány ve dvou rovinách – nástrojových a pracovních. [32]

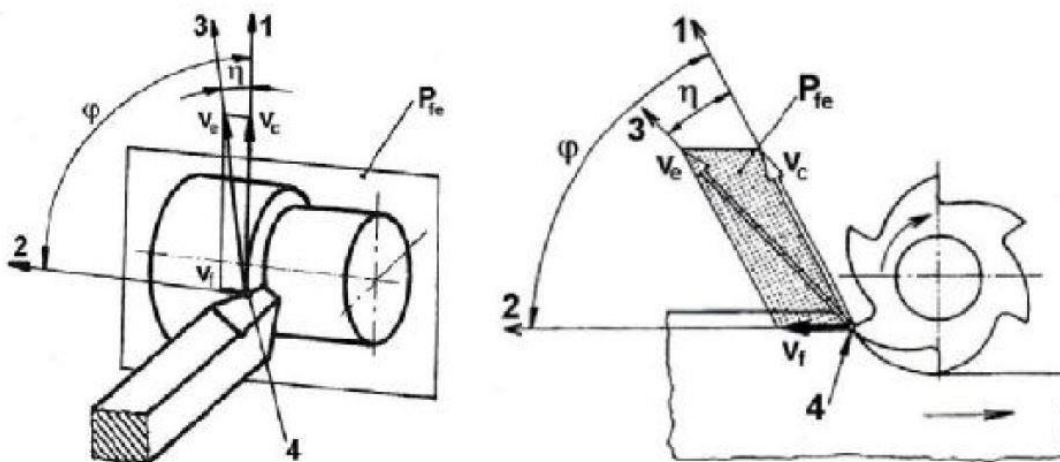
- Nástrojová – v této rovině se zobrazuje statická geometrie řezné části. [32]

- Pracovní (efektivní, kinetická) – zde se zobrazuje geometrie procesu řezání. [32]

4.3. Pohyby při obrábění

- Hlavní řezný pohyb – vzájemný pohyb obrobku a nástroje. Jeho směr uvažován jako okamžitý směr pohybu ostří.
- Řezná rychlost v_c – okamžitá rychlost hlavního řezného pohybu.
- Posuvový pohyb – další relativní pohyb vykonávaný strojem. Díky němu je tvorba třísky přerušovaná, nebo plynulá.
- Posuvová rychlost – v_f – okamžitá rychlost posuvového pohybu.
- Posuv f_n – vyjadřuje velikost posuvového pohybu, vztahuje se k otáčce obrobku, nebo nástroje.
- Výsledný řezný pohyb – vzniká vektorovým součtem hlavního řezného pohybu a posuvového pohybu.
- Rychlost výsledného řezného pohybu v_e – aktuální rychlost výsledného řezného pohybu.
- Úhel řezného pohybu η – úhel který svírá výsledný řezný pohyb a hlavní řezný pohyb v pracovní rovině P_{fe} .
- Úhel posuvového pohybu φ – úhel svíraný hlavním řezným pohybem a posuvovým pohybem.

Všechny uvedené pohyby jsou uvedeny na Obr. 17.



Obrázek 17: Kinematika nástroje a obrobku při podélném soustružení a válcovém frézování (1 – směr hl. pohybu, 2 – směr řez. Pohybu, 3 – směr posuvového pohybu, 4 – uvažovaný bod ostří) [32]

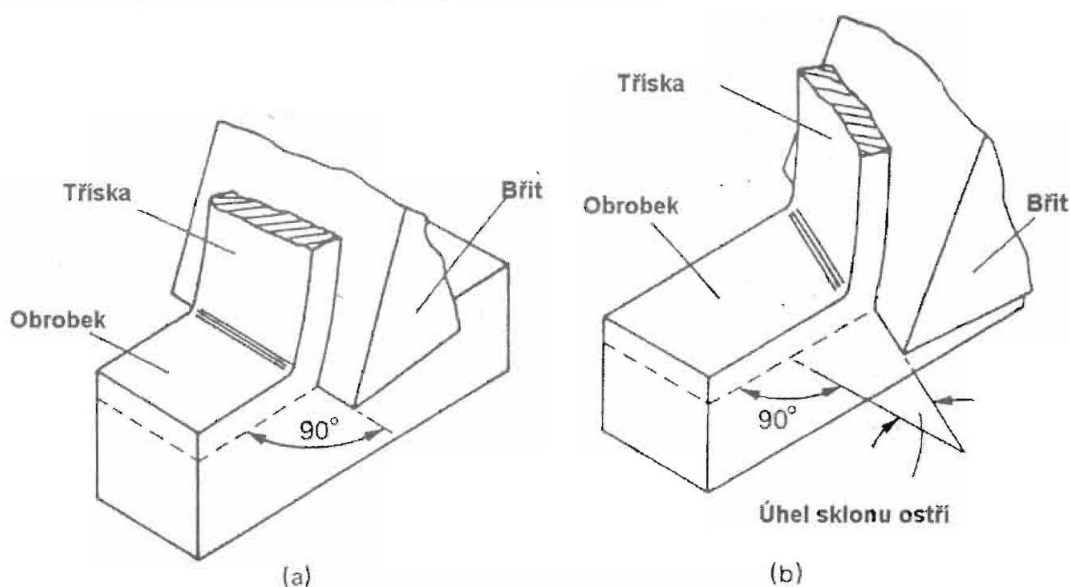
4.4. Mechanika tvorby třísky

Technologii obrábění můžeme definovat jako proces, při kterém dochází k oddělování materiálu z obrobku ve formě třísky. Tříska je výsledkem vzájemného pohybu bříty řezného nástroje a obrobku, respektive výsledkem silového působení bříty na obrobek, během střetu bříty a materiálu obrobku. Tato technologie je základním nástrojem výrobní technologie. Díky procesům obrábění je možné vytvořit výrobek požadovaného tvaru, rozměrové přesnosti a jakosti povrchu z původního polotovaru. [32] [33]

Tříska, vznikající během obrábění může být buď tvářená, nebo netvářená. Tvářená vzniká obráběním většiny technických materiálů, jako například oceli. Důvodem je vznik

plastické deformace u břitu rezného nástroje. Naopak při obrábění materiálu, jakými jsou například keramika, nebo horniny, plastická deformace nenastává. [33]

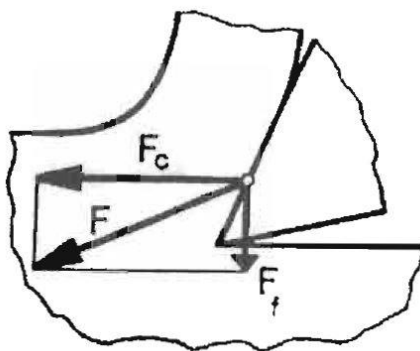
Základ všech operací spadajících do obrábění je znázorněn na Obr. 18. Obr. 18a zobrazuje ortogonální – volné řezání (směr rezného pohybu a ostří jsou navzájem kolmé). Toto nastává například při zapichování, hoblování, frézování frézami s přímými zuby, protahování apod. Obr. 18b zobrazuje vázané řezání, které nastává při vrtání, frézování frézami se šikmými zuby, podélném soustružení apod. [31]



Obrázek 18: (a) Ortogonální – volné řezání, (b) vázané řezání [31]

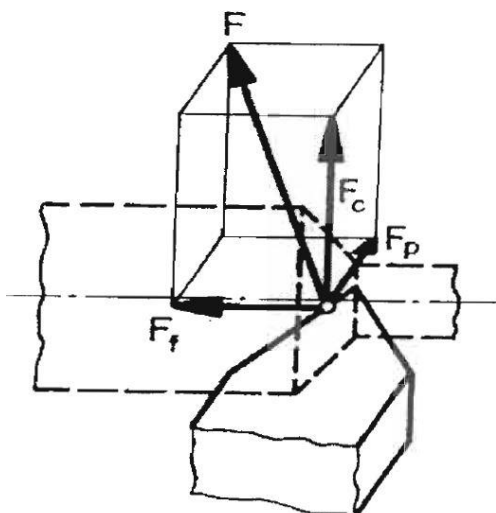
4.5. Síly při řezání

Během ortogonálního řezání řešíme tzv. dvourozměrný problém. To znamená, že celková řezná síla F leží v rovině kolmé na ostří a můžeme ji rozložit na řeznou sílu F_c a sílu posuvu F_f , viz Obr 19. [31]



Obrázek 19: Síly při řezání při ortogonálním řezání [31]

Na rozdíl od ortogonálního řezání je řezání vázané problémem trojrozměrným, tudíž celkovou řeznou sílu můžeme rozložit na řeznou sílu F_c , sílu posuvu F_f a pasivní sílu F_p jak je vidět na Obr. 20. [32]



Obrázek 20: Síly při řezání při vázaném řezání [31]

Řezná síla působí ve směru řezné rychlosti. Je to největší síla. Síla posuvu působí ve směru posuvu a pasivní síla, která se vyskytuje pouze u vázaného řezání, účinkuje kolmo na obrobenou plochu. Pasivní síla má velký vliv na přesnost obrobené plochy a na chvění při obrábění. [32]

Síly se měří pomocí dynamometrů. Jedná se o zařízení, měřící elastické deformace. Ty se měří různými způsoby, například mechanicky, elektricky, pneumaticky apod. [32]

Pro výpočet celkové řezné síly slouží vzorec:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \text{ [N]} \quad (1)$$

Další síla, kterou je možné určit ze sil základních je síla aktivní F_a . Pro její výpočet se užívá vzorce:

$$F_a = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \text{ [N]} \quad (2)$$

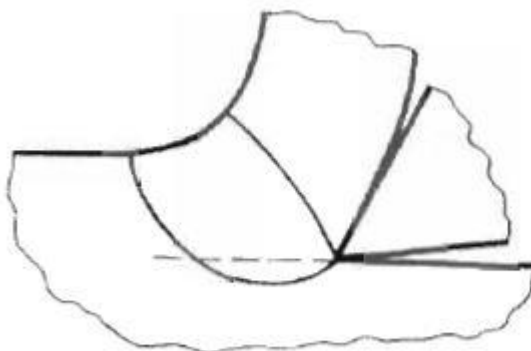
4.6. Integrita povrchu

Kvalita výsledného povrchu součásti závisí na typu, sledu i podmínkách užitých výrobních technologií. Povrchová vrstva (její kvalita) má vliv na funkčnost, předčasné opotřebení a v nejhorším případě i na havárie. [33]

Základními znaky pro měření kvality povrchu součásti jsou přesnost a drsnost. Existuje však mnoho dalších kritérií povrchové vrstvy, které mají vliv na spolehlivost a funkčnost součásti. Integritou povrchu označujeme soubor všech vlastností povrchové vrstvy. [31]

Přesnost součásti a drsnost povrchu označujeme jako topografii povrchu. Konkrétních topografických charakteristik je celá řada. Mimo ně spadají pod integritu povrchu strukturální změny, vady v povrchové vrstvě, průběh zpevnění, průběh zbytkových pnutí apod. [31] [33]

Na Obr. 21 je patrné, že oblast primární plastické deformace zasahuje pod úroveň budoucího povrchu, čímž dochází ke zpevnění povrchu součásti. Vlivem působící síly mohou vznikat trhliny v povrchu. [31]



Obrázek 21: Oblast primární plastické deformace [31]

Povrch ovlivňuje také vysoká teplota, vznikající při obrábění. Ta může za strukturní změny a ovlivňuje zbytková pnutí povrchové vrstvy. [31]

V neposlední řadě mají významný vliv na povrch posuv, úhel nastavení, vedlejší úhel nastavení a poloměr špičky nástroje. S rostoucím posuvem, nebo úhlem nastavení roste také drsnost povrchu. Naopak s klesajícím vedlejším úhlem drsnost roste. [31]

4.7. Kritéria třískového obrábění

Při procesu třískového obrábění dochází k úběru materiálu z polotovaru, čímž vzniká požadovaný tvar a rozměr součásti. Třískové obrábění je rozdělitelné z mnoha hledisek. Základní dělení je podle charakteru práce na ruční a strojní. Strojní metody třískového obrábění dále dělíme na obrábění:

- nástroji s definovanou geometrií (frézování, soustružení, vystružování, vrtání, zahlubování, hoblování atd.),
- nástroji s nedefinovanou geometrií (broušení, lapování, honování atd.)
- nekonvenční metody třískového obrábění (elektrochemické, elektroerozivní, vodním paprskem, laserovým paprskem atd.)
- úpravy obrobků ploch (leštění, hlazení atd.). [34]

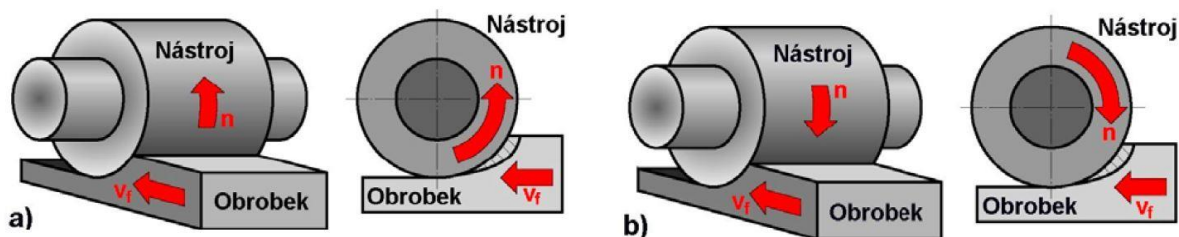
4.7.1. Frézování

Frézování je jednou z nejvyužívanějších metod obrábění. Jeho výhodou je vysoká kvalita obrábění při zachování vysoké výkonnosti. Šíře jeho využití sahá od obrábění rovinných ploch přes tvarové a rotační plochy až po obrábění závitů, ozubení a drážek. [34]

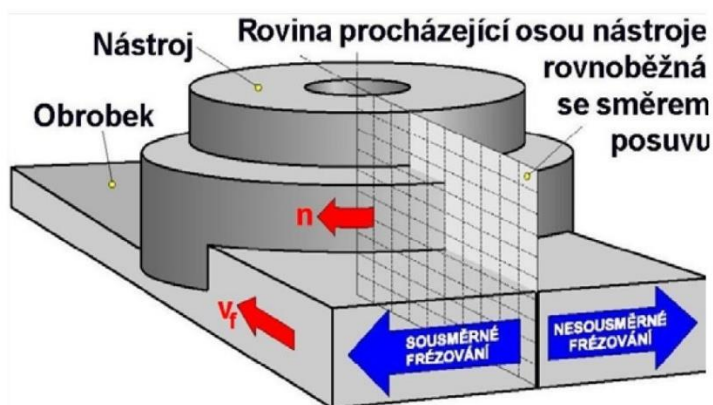
Tříska je tvořena břity nástroje, který rotuje – frézou. Hlavní pohyb je tudíž rotační a je vykonáván nástrojem. Vedlejším pohybem je posuv a bývá konán obrobkem. U moderních víceosých obráběcích center je možné posuvy plynule měnit a vykonávat je ve více směrech naráz. Samotný proces řezání je přerušovaný, jednotlivé zuby řezou krátké třísky. [34]

Dělení frézování dle polohy osy nástroje vzhledem k obráběné ploše:

- Válcové (Obr. 22) – obrábění probíhá obvodem nástroje, osa frézy je rovnoběžná s obráběnou plochou. [34]
- Čelní (Obr. 23) – obrábí se čelem nástroje, osa frézy je kolmá na obráběnou plochu. [34]



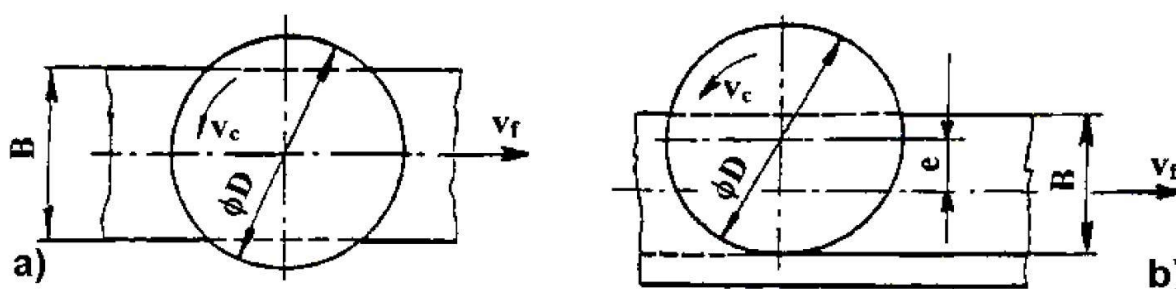
Obrázek 22: a) Válcové frézování nesousledné, b) Válcové frézování sousledné [34]



Obrázek 23: Čelní frézování [34]

Existují 2 metody frézování, které jsou určeny vzájemnou polohou osy frézy a obráběné plochy:

- Symetrické frézování (Obr. 24a) – osa frézy prochází středem obráběné plochy. [34]
- Nesymetrické frézování (Obr. 24b) – ose frézy neprochází středem obráběné plochy. [34]



Obrázek 24: a) Symetrické čelní frézování, b) Nesymetrické čelní frézování [34]

4.7.1.1. Řezné podmínky frézování

Za řeznou rychlost se považuje obvodová rychlost nástroje:

$$v_c = \frac{\pi * D * n}{1000} [m * min^{-1}] \tag{3}$$

Kde D je průměr nástroje [mm] a n jsou otáčky nástroje [min^{-1}].

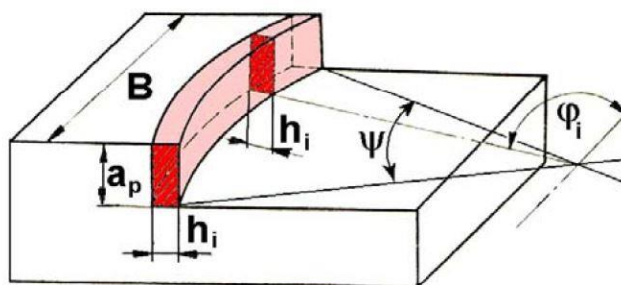
Posuv na otáčku f_n [mm] je délka posuvu obrobku za jednu otáčku nástroje, zatímco posuv na zub f_z [mm] je základní délkou pohybu. Jedná se o délku posuvu obrobku za jednu otáčku nástroje dělenou počtem zubů. [34]

$$f_n = f_z * z \quad [mm] \quad (4)$$

Kde z je počet zubů nástroje [-].

Výpočet posuvové rychlosti.

$$v_f = f_n * n = f_z * z * n \quad [mm * \text{min}^{-1}] \quad (5)$$



Obrázek 25: Čelní frézování – průřez třísky [34]

V závislosti na úhlu posuvového pohybu φ_i se při čelním frézování mění tloušťka třísky h_i . Tloušťku třísky ovlivňuje také úhel nastavení hlavního ostří κ_r a její hodnotu v danou chvíli můžeme vypočítat takto: [34]

$$h_i = f_z * \sin \varphi_i * \sin \kappa_r \quad [mm] \quad (6)$$

Jmenovitá šířka b_i je konstantní:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [mm] \quad (7)$$

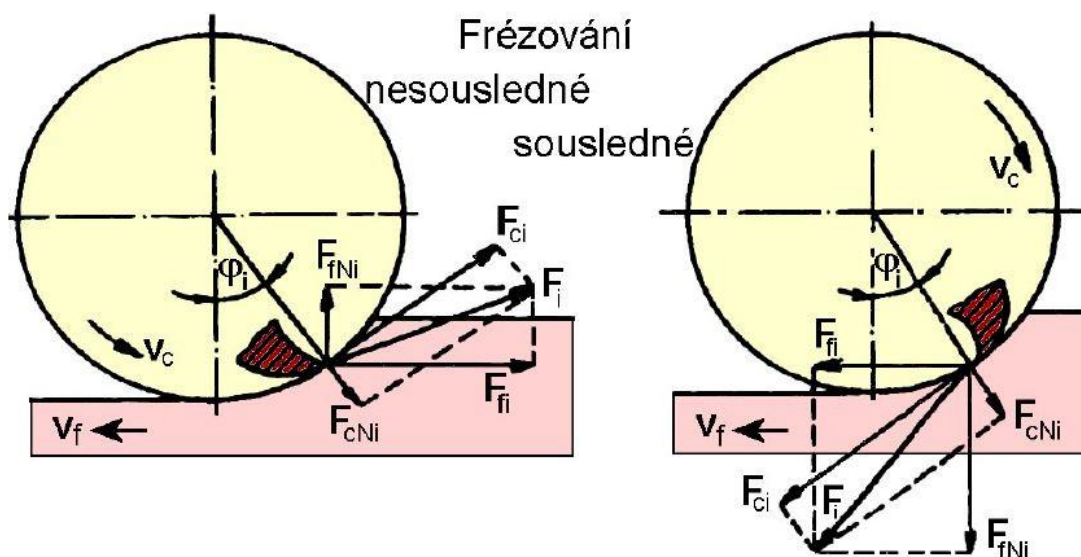
Kde a_p je hloubka řezu.

Plocha odřezávané vrstvy A_{Di} :

$$A_{Di} = b * h = a_p * f_z * \sin \varphi_i \quad [mm^2] \quad (8)$$

Viz Obr 25.

4.7.1.2. Síly při frézování



Obrázek 26: Síly řezání při válcovém frézování [34]

Na Obr. 26 je vidět rozklad výsledné řezné síly při válcovém frézování přímými zuby. Celková řezná síla F_i se rozkládá na síly F_{ci} a F_{cNi} , nebo F_{fi} a F_{fNi} a závisí na úhlu posuvového pohybu φ_i . [34]

- F_{ci} – řezná složka
- F_{cNi} – kolmá řezná složka
- F_{fi} – posuvová složka
- F_{fNi} – kolmá posuvová složka

5. Experiment

Vzhledem k tomu, že u většiny strojních součástek vytvořených metodou laser cladding je zapotřebí následného opracování (dokončení obráběním), aby bylo dosaženo požadovaného tvaru, povrchu a požadované přesnosti, je nutné zjistit, jak se nově vytvořený povrch, respektive nově vytvořená hmota, při obrábění chová a jakých kvalit obrobených povrchu jsme schopni dosáhnout.

Proto bylo rozhodnuto, že experiment bude zaměřen na určení a prozkoumání vlivu řezných podmínek na velikost složek výsledných řezných sil při frézování návarů a na drsnost obrobeného povrchu. Experiment bude realizován na jednom vybraném typu přídavného materiálu ve formě drátu, který je využíván pro technologii laser cladding.

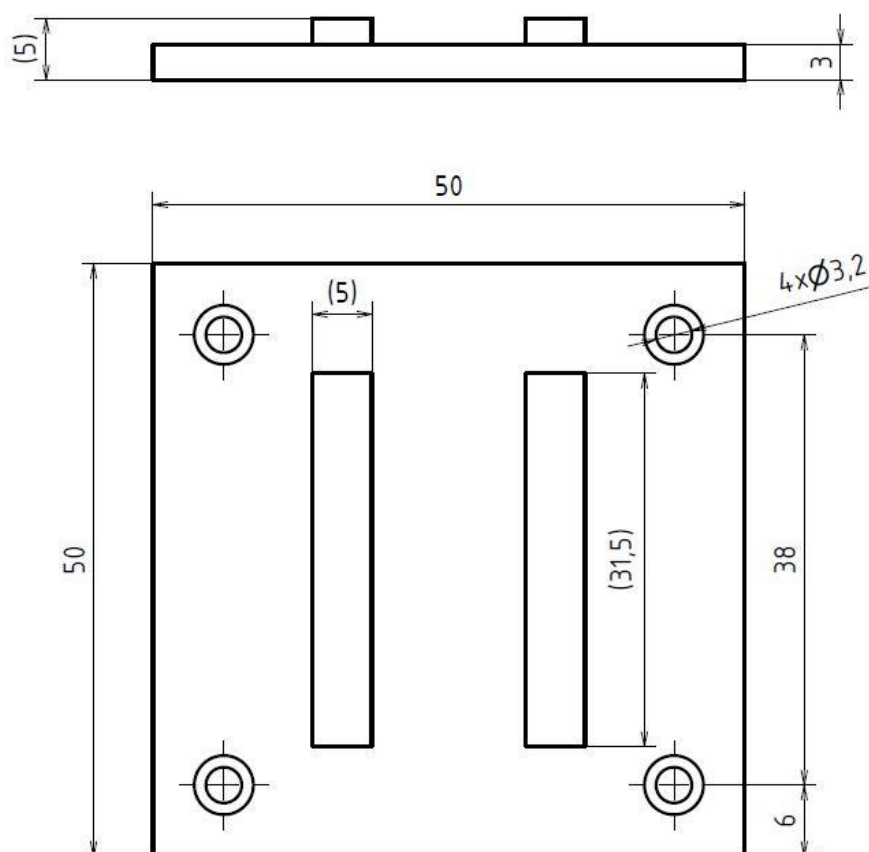
5.1. Vytvoření vzorků technologií laser cladding

Technologie laser cladding je realizována za pomoci pevnolátkového laseru JK701H Lumonics, který je společně s podavačem drátu a kladečí hlavou umístěn na tříosém stroji.

5.2. Vzorky

Vzorky, na kterých bude prováděno měření, mají všechny stejné rozměry a jsou ze stejných materiálů. Jsou jimi kovové destičky, přičemž na každé z nich je vytvořena dvojice návarů, viz Obr. 27. Každý návar bude označen a považován za samostatný vzorek.

5.2.1. Rozměry vzorků

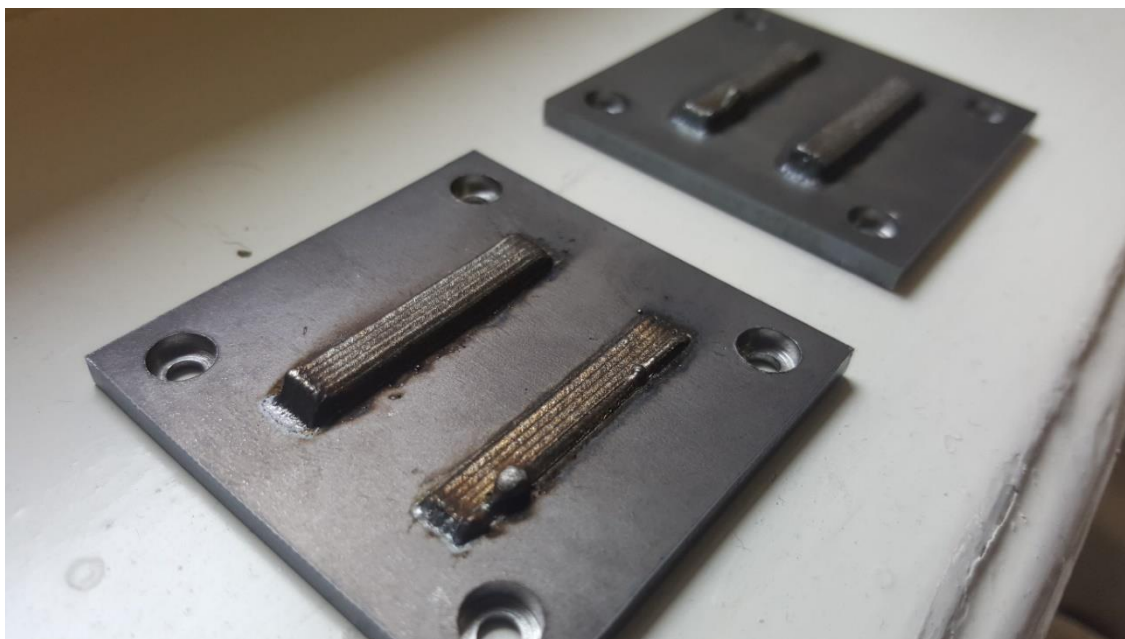


Obrázek 27: Vzorek a jeho rozměry

Rozměry navařených materiálů 31,5 x 5 (mm) jsou teoretické. Ve skutečnosti se přesná hodnota každého z nich liší v setinách až desetínách milimetru. Rozdíly v délce návaru nemají na experiment žádný vliv, rozdíly v šířce návaru, vzhledem k jejich velikosti, také ne.

Důležitá je ovšem pozice návaru na základní destičce. Bylo totiž dohodnuto, že je třeba frézovat návar přesně uprostřed. Tedy aby bylo frézování symetrické (viz kapitola 2.7.1.). Byla určena vzdálenost 16 mm od okraje přesně do středu obráběné plochy.

Tato rozměrová stálost usnadňovala průběh experimentu, konkrétně zjednodušovala práci při zadávání hodnot do programu obráběcího centra, jelikož nebylo nutné měřit každý jednotlivý vzorek a následně program upravovat.



Obrázek 28: Detail neobrobených vzorků

5.2.2. Materiál vzorků

Základní destičky jsou z oceli ČSN 11 373. Materiál navařený na destičkách je drát Autrod 12.51 o průměru 0,6 mm. Jedná se o základní, poměděný, běžně dostupný drát, používaný ke svařování. Typické chemické složení je: C 0,078 %, Si 0,85 % a Mn 1,46 %. [35]

5.3. Návrh experimentu

Náplní experimentu bude obrobení návarů danými reznými podmínkami. Při obrábění budou sbírána data z dynamometru, která budou později vyhodnocována. Vyhodnocení drsnosti bude provedeno poté. Návary budou zároveň očíslovány, aby bylo možné s nimi dále pracovat (přiřadit výsledky z měření sil k výsledkům měření drsnosti, a také k pozdějšímu nafocení vzorků na mikroskopu).

5.3.1. Obráběcí centrum

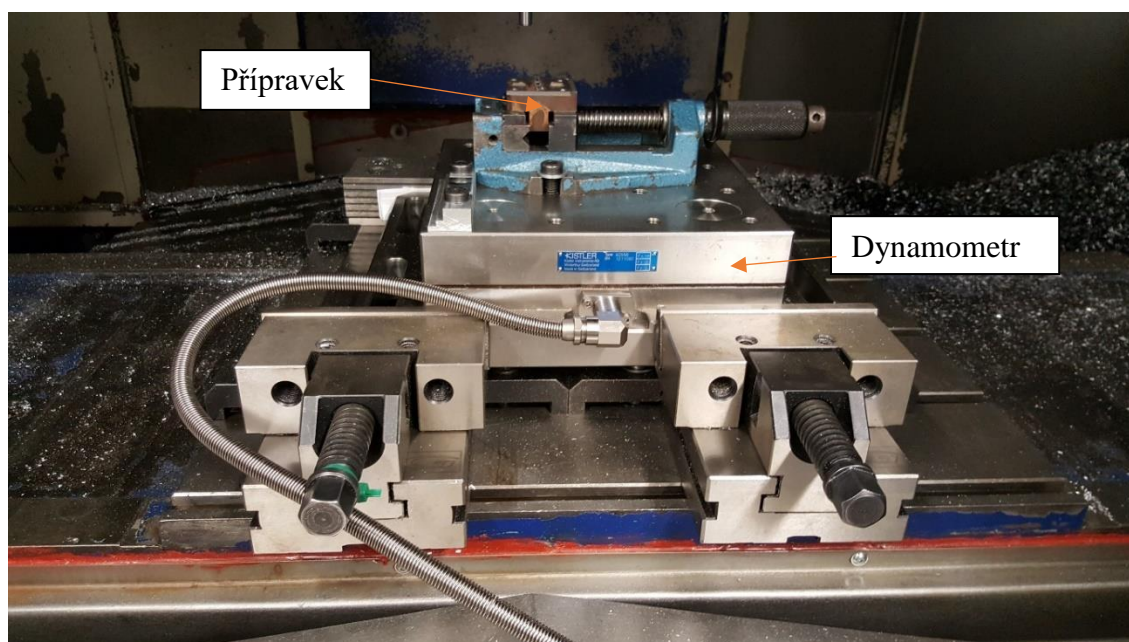
K obrábění bude použit stroj MCFV 5050 LN, viz Obr. 29. Jedná se o tříosou frézku s pracovními rozjezdy X: 500 mm, Y: 400 mm a Z: 400 mm. Maximální výkon vřeten je 18 kW a maximální otáčky vřetene jsou 15000 min^{-1} . CNC řídicí systém je Sinumerik 840 D. Stroj také obsahuje zásobník až na 20 nástrojů, který ovšem nebude při tomto experimentu potřeba.



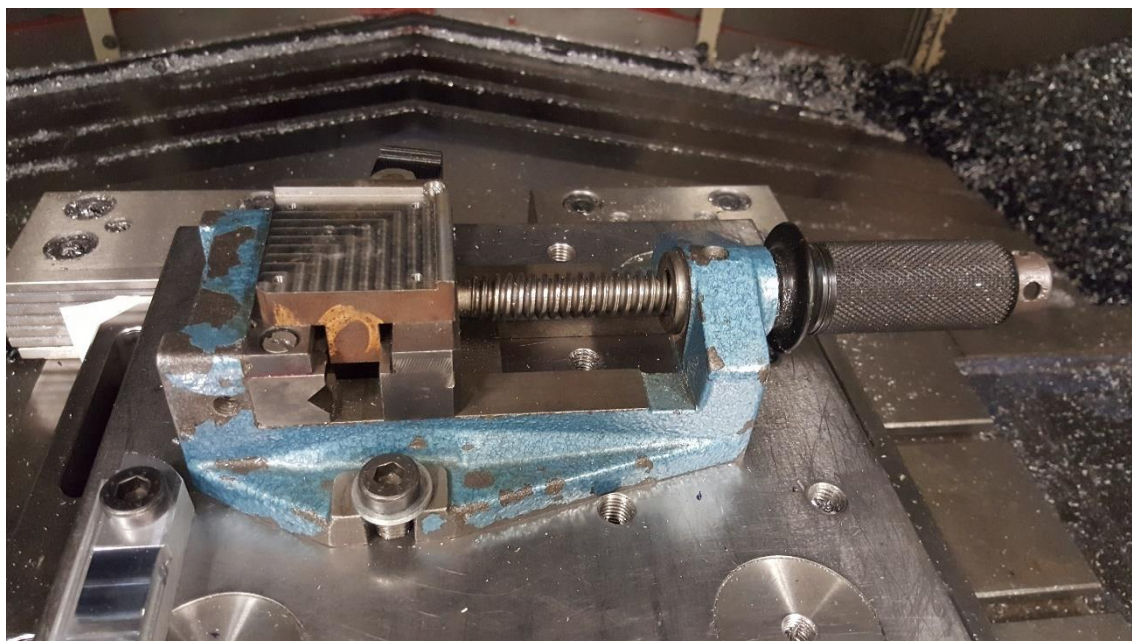
Obrázek 29: Obráběcí centrum

5.3.2. Upnutí do obráběcího centra

Na Obr. 30 je vidět celý upínací systém vzorku do obráběcího centra. Dynamometr je s pracovní podložkou pevně spojen svěrákem. Menší svěrák, který drží přípravek k upnutí vzorku, je přišroubovaný na dynamometru.



Obrázek 30: Upnutí vzorku do obráběcího centra



Obrázek 31: Detail upinacího systému a přípravku na upnutí vzorku

S ohledem na to, že dynamometr měří síly v osách X, Y a Z, bylo nutné jej vyrovnat, tedy sladit souřadné systémy obráběcího stroje a dynamometru. Vyrovnání probíhalo za pomoci úchylkoměru umístěného ve vřeteni stroje, viz Obr. 32.



Obrázek 32: Vyrovnání dynamometru v pracovním prostoru stroje

5.3.3. Dynamometr a jeho příslušenství

Na Obr. 30 je vidět piezoelektrický dynamometr od firmy Kistler. Konkrétně se jedná o typ 9255C. Rozsah sil, které je možno na tomto dynamometru měřit je pro síly ve směru X a Y -30 až 30 kN, pro síly ve směru Z je to -10 až 60 kN. [37]

K dalšímu příslušenství potřebnému k měření sil při řezání patří multikanálový zesilovač Kistler Type 5017B (Obr. 33). Zařízení pro sběr signálu a jeho přenosu do PC, konkrétně do softwaru DynoWare, Kistler Type 5697A (Obr. 33). A samozřejmě počítač, v tomto případě notebook, do kterého se jednotlivá měření ukládají.



Obrázek 33: Nahoře systém pro získávání dat Kistler Type 5697A, dole multikanálový zesilovač Kistler Type 5017B

5.3.4. Zařízení na měření drsnosti

Pro měření drsnosti bude využit přístroj od firmy Taylor Hobson Surtronic 3+. Přístroj využívá relativního snímání drsnosti. Data jsou přímo z přístroje přenášena do počítače, kde jsou zpracovány v programu TalyMap.

Pro zajištění stálosti měření a zajištění, že měření drsnosti bude probíhat vždy uprostřed jednotlivých návarů po celé jejich délce, bude použit posuvný stolek, viz Obr. 34.

Na Obr. 34 je vedle již obrobeného vzorku vidět také destička, která slouží ke kalibraci přístroje.



Obrázek 34: Měření drsnosti

5.3.5. Obráběcí nástroj

Jako nástroj byla zvolena fréza 20A2R070A20-SAD11E-C (DormerPramet). Jedná se dvoubřítý nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami. Pro tento experiment však bude nástroj používán jako jednobřítý, což má za následek, že posuv na otáčku f_n je stejný jako posuv na zub f_z .

Stejně tak zvolené destičky jsou od firmy Pramet. Konkrétně se jedná o typ ADMX 11T308SR-F s použitým rezným materiálem 8230. Destičky se hodí na obrábění materiálů skupin P, M a N. Celkově jsou to velice univerzální VBD a jsou vhodné pro obrábění při posuvu na zub f_z 0,07 – 0,12 mm a hloubce řezu a_p 0,5 – 9 mm. [38] [39]



Obrázek 35: Fréza upnutá ve stroji a vyměnitelné břitové destičky

5.4. Metodika měření

5.4.1. Podmínky experimentu

Pro začátek byly navrženy tyto řezné podmínky:

- Hloubka řezu $a_p = 1$ mm.
- Posuvy na otáčku $f_n = \{0,05; 0,085; 0,12\}$ mm.
- Řezné rychlosti $v_c = \{100; 300\}$ m.min⁻¹.

Tedy 6 různých kombinací řezných podmínek.

5.4.2. Postup měření sil při řezání

Měření sil při obrábění pro jednotlivé kombinace řezných podmínek se bude opakovat třikrát. Měření sil musí probíhat minimálně po dobu 3 sekund. Tento čas byl stanoven, aby se proces stačil ustálit a naměřená data byla relevantní.

Na základě řezné rychlosti a posuvu na otáčku se vypočítají otáčky a posuvová rychlost, které je potřeba znát pro nastavení frézování:

Řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min odpovídá 1591 otáček.

Řezné rychlosti $v_c = 300$ m/min odpovídá 4774 otáček.

Tabulka 1: Otáčky a posuvové rychlosti

v_f [mm.min ⁻¹]		n [min ⁻¹]	
		1591	4774
f_n [mm]	0,05	79,55	238,7
	0,085	135,235	405,79
	0,12	190,92	572,88

Z těchto podmínek jsou vypočteny minimální délky drah, které musí fréza urazit při frézování jednotlivých vzorků za jednotlivých podmínek. Vzhledem k následujícímu měření drsnosti byla stanovena také minimální délka dráhy 8 mm.

Tabulka 2: Dráhy frézy

délka dráhy [mm]		n [min ⁻¹]	
		1591	4774
f_n [mm]	0,05	8	11,94
	0,085	8	20,29
	0,12	9,55	28,65

Z Tab. 2 vyplývá, že na každé jednotlivé měření při rezné rychlosti $v_c = 100$ m/min stačí jeden návar. Na podmínky $f_n = 0,05$ mm a $v_c = 300$ m/min 2 návary a na každou ze zbylých 2 kombinací podmínek jsou potřeba 3 návary. To je dohromady 11 návary, tudíž 6 destiček.

Vzorky a jim přiřazené podmínky:

Tabulka 3: Vzorky a podmínky

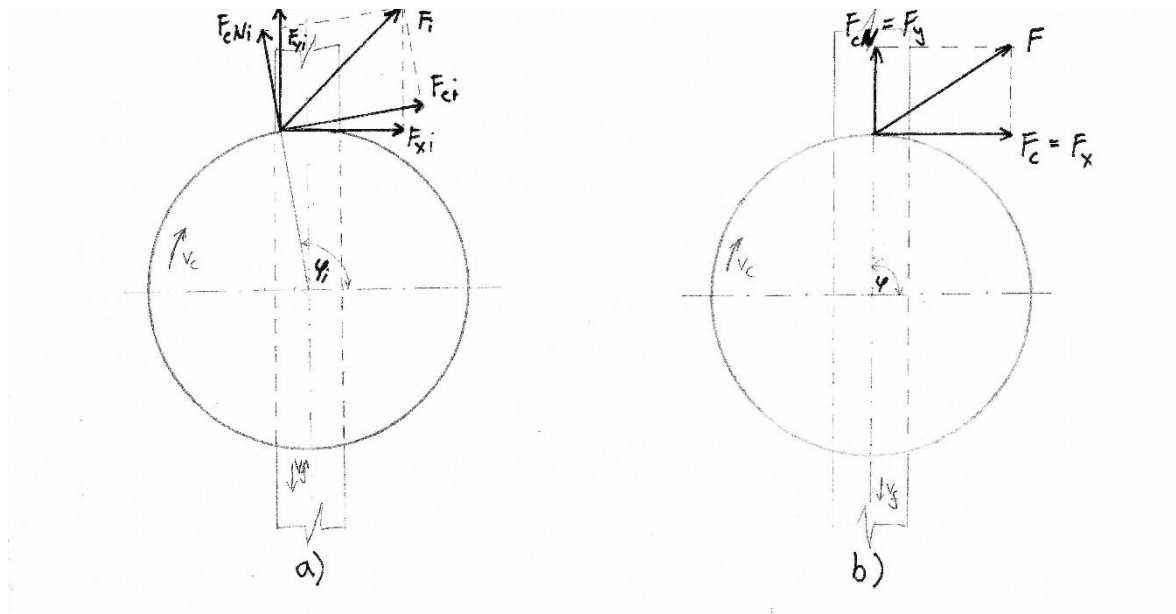
Vzorek	f_n [mm]	v_c [m/min]
V30	0,05	100
V31	0,05	300
V32	0,05	300
V33	0,085	100
V34	0,085	300
V35	0,085	300
V36	0,085	300
V37	0,12	100
V38	0,12	300
V39	0,12	300
V40	0,12	300



Obrázek 36: Všechny již obrobene vzorky

S ohledem na to, že výška jednotlivých návarů je mírně rozdílná, a navíc není po celé délce konstantní, musí být všechny vzorky před vlastním měřením sil upraveny, aby byla zaručena stálá hloubka řezu po celé délce návaru. Úprava probíhá odfrézováním dostatečně velké horní vrstvy tak, aby zbývající výška byla větší než potřebný 1 mm a zároveň byly odstraněny všechny povrchové vady a nerovnosti.

Frézování bude probíhat souměrným způsobem. V kapitole 2.7.1 byl popsán průběh tohoto způsobu frézování. Tento způsob byl zvolen právě proto, že řezná složka celkové řezné síly F_c bude podle předpokladů dosahovat svého maxima v ose návaru a tím pádem bude v danou chvíli shodná se silou F_x , kterou měří dynamometr. Na Obr. 37 je vidět rozdíl, mezi měřeními v libovolném úhlu posuvového pohybu (Obr. 37a) a v posuvovém úhlu 90° (Obr. 37b).



Obrázek 37: Znárodnění sil při obrábění

Co se vyměnitelných břitových destiček týče, bude na každé měření použita destička nová, aby jejich opotřebením neovlivňovalo experiment.

5.4.3. Postup měření drsnosti povrchu

Díky předchozímu měření sil při obrábění budou návary již obrobené a připravené k měření drsnosti. Každý návar bude očištěn technickým lihem, aby bylo zabráněno znečištění vzorku a tím pádem znehodnocení měření.

Na každém návary bude drsnost měřena na 5 různých místech. Důsledkem toho, že pro některé řezné podmínky stačil jeden návar a pro některé bylo zapotřebí až tří návary (viz kapitola 3.3.7.), nebude pro všechny podmínky stejný počet měření drsnosti. Například pro podmínky $f_n = 0,05$ mm a $v_c = 100$ m/min bude 5 měření, naopak pro podmínky $f_n = 0,12$ mm a $v_c = 300$ m/min bude měření 15 (5 na každém návary).

Drsnost se bude měřit na ose návary, pro zachování konzistentnosti měření.

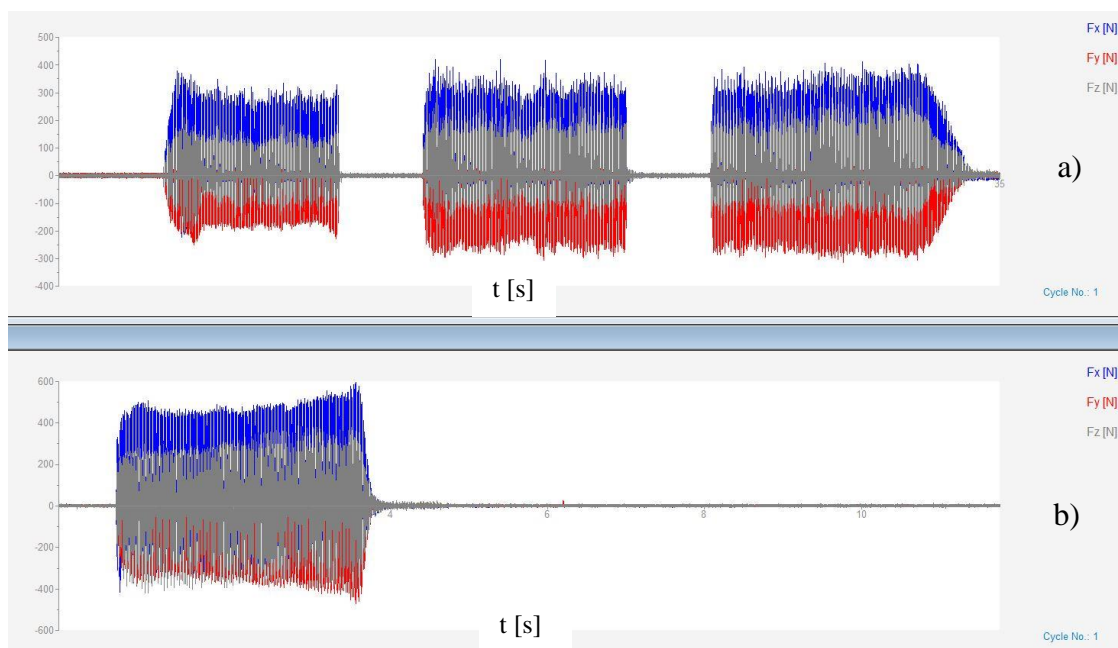
Před samotným měřením musí také dojít k nastavení správného filtru λ_c (mm) a jednotlivé/celkové měřicí dráhy L_r/L_n (mm). Tyto parametry budou nastaveny podle Tab. 4. Jako určující bude měřen profil R_{sm} , podle kterého se zvolí mezní vlnová délka a celková měřicí dráha, které mají být zadány do měřicího přístroje. [40]

Tabulka 4: Volba mezní vlnové délky (Mahr)

VOLBA MEZNÍ VLNOVÉ DÉLKY ISO 4288, ISO 3274				
Periodické profily	Aperiodické profily		Mezní vlnová délka (Cutoff)	Jednotlivá / celková měřicí dráha
R_{sm} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	L_r/L_n (mm)
> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08	0,08 / 0,4
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25	0,25 / 1,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8	0,8 / 4
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5	2,5 / 12,5
> 1,3 do 4	> 50 do 200	> 10 do 80	8	8 / 40

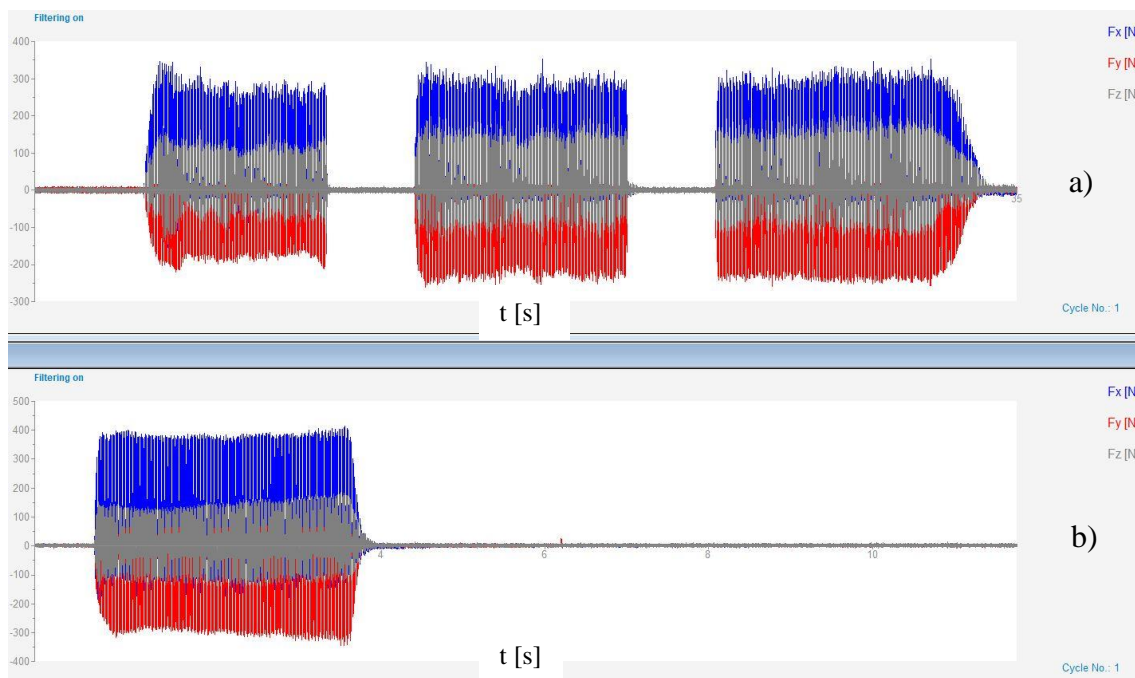
5.5. Měření sil při řezání

Měření probíhalo podle kritérií nastavených v kapitole 3.3.7.. Vzorky, na nichž měl být proveden větší počet měření, byly rozděleny na příslušný počet částí a mezi každou z nich byla časová prodleva. Tím vznikl určený počet měření na jednom vzorku (Obr. 38a). Naopak na Obr. 38b je vidět vzorek, na kterém bylo provedeno pouze jedno měření. Oba záznamy měření, které jsou na Obr. 38 jsou bez použití funkce filtrace dat.



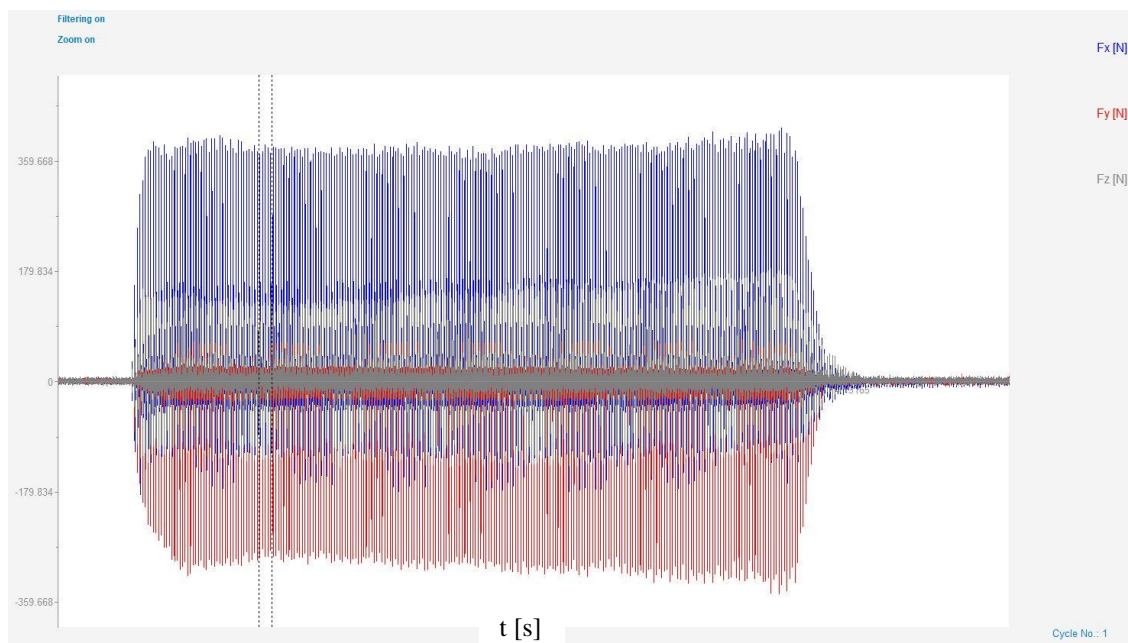
Obrázek 38: a) Záznam měření na vzorku V30, b) Záznam měření vzorku V38

Filtrace byla určena na základě vlastní frekvence soustavy dynamometru na 2500 Hz. Na všechny hodnoty a výsledky, které jsou získávány, bude uplatněna právě tato filtrace. Na Obr. 39 jsou vidět stejné záznamy jako na Obr. 38, s tím rozdílem, že je použita filtrace dat.

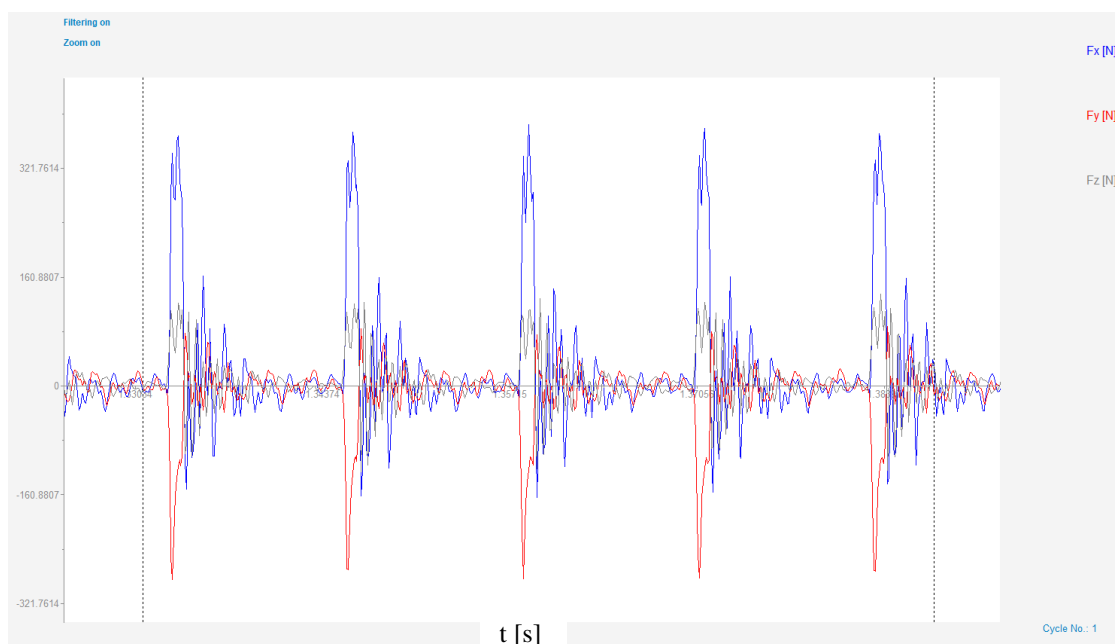


Obrázek 39: Záznam měření na vzorku a) V30, b) V38 s aplikovanou filtrací dat

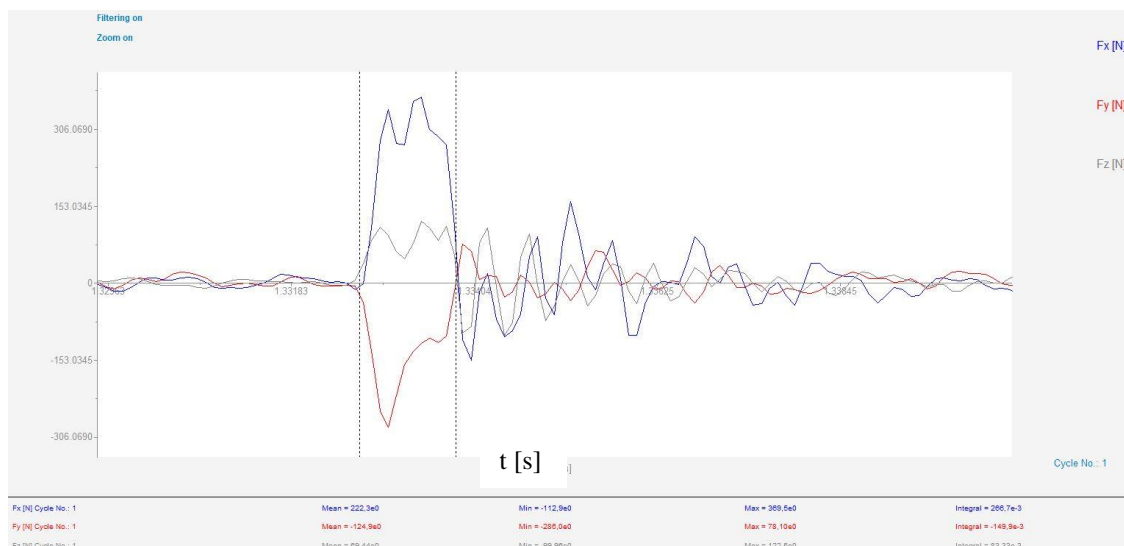
Z každého měření byla vybrána 3 místa (na začátku, uprostřed a na konci pracovního přejezdu), ve kterých bylo vyhodnoceno 5 jednotlivých záběrů.



Obrázek 40: Vzorek V38, příklad prvních 5 vyhodnocovaných záběrů, pohled na celý záznam měření



Obrázek 41: Vzorek V38, prvních 5 záběrů



Obrázek 42: V38, jednotlivý záběr

Z každého jednotlivého záběru (Obr. 42) bylo získáno 6 hodnot – 3 maximální F_{x_max} , F_{y_max} , a F_{z_max} a 3 průměrné $F_{x_prům}$, $F_{y_prům}$ a $F_{z_prům}$. Vzhledem k opačné orientaci sil dynamometru v ose y, než jak jsou složky výsledných řezných sil určeny na Obr. 37, jsou na záznamu obě hodnoty F_y záporné. Proto byly odečítány v absolutní hodnotě.

Tímto způsobem je pro každé měření získáno 15x6, tedy 90 hodnot. Všechny naměřené hodnoty jsou uvedené v přílohách na konci práce.

Vzhledem k tomu, že každé měření je opakováno třikrát, bude pro všechny řezné podmínky a pro všechny složky řezné síly (F_x , F_y , F_z) 45 maximálních a 45 průměrných hodnot.

Hodnoty F_z budou označeny jako F_p , tedy síla pasivní. Dále bude vypočtena průměrná a maximální aktivní síla a průměrná a maximální celková síla řezání. Vzorce jsou uvedeny v kapitole 2.5., jako řezná síla F_c je brána F_x , jako síla posuvu F_f je brána F_y .

Vyhodnocení všech těchto hodnot bude provedeno vytvořením průměrných hodnot, jejich směrodatných odchylek a následným vynesemím do grafu.

5.5.1. Vyhodnocení naměřených dat

Vyhodnocené (zpracované) hodnoty všech složek celkových řezných sil jsou uvedeny v Tab. 5 a Tab. 6.

Během experimentu byly zaznamenány vibrace při obrábění. Data, která mohla být takto ovlivněna, byla z vyhodnocení vyloučena.

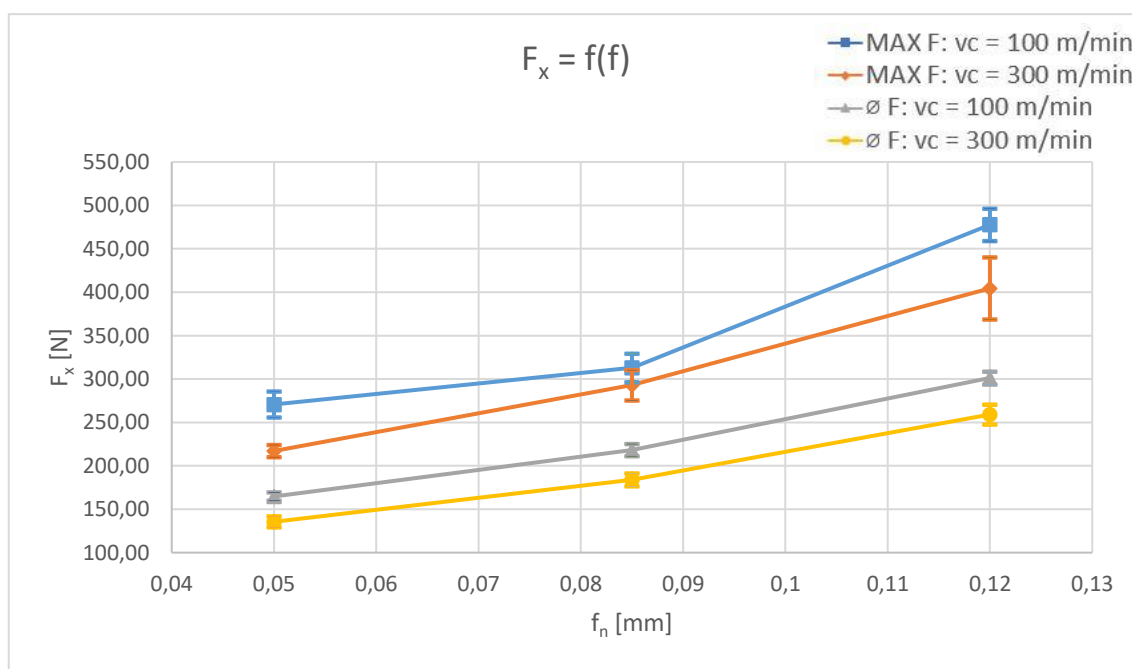
Tabulka 5: Průměrné hodnoty sil

Průměrné síly						
f_n [mm]	v_c [m/min]	F_x [N]	F_y [N]	F_p [N]	F_a [N]	F [N]
0,05	100	164,7	101,3	66,1	193,4	204,4
0,05	300	135,5	101,9	65,5	169,6	181,8
0,085	100	218,1	146,9	70,6	263,0	272,3
0,085	300	184,0	112,8	68,8	216,2	226,9
0,12	100	301,2	155,9	99,9	339,2	353,6
0,12	300	259,1	136,8	81,3	293,1	304,3

Tabulka 6: Maximální hodnoty sil

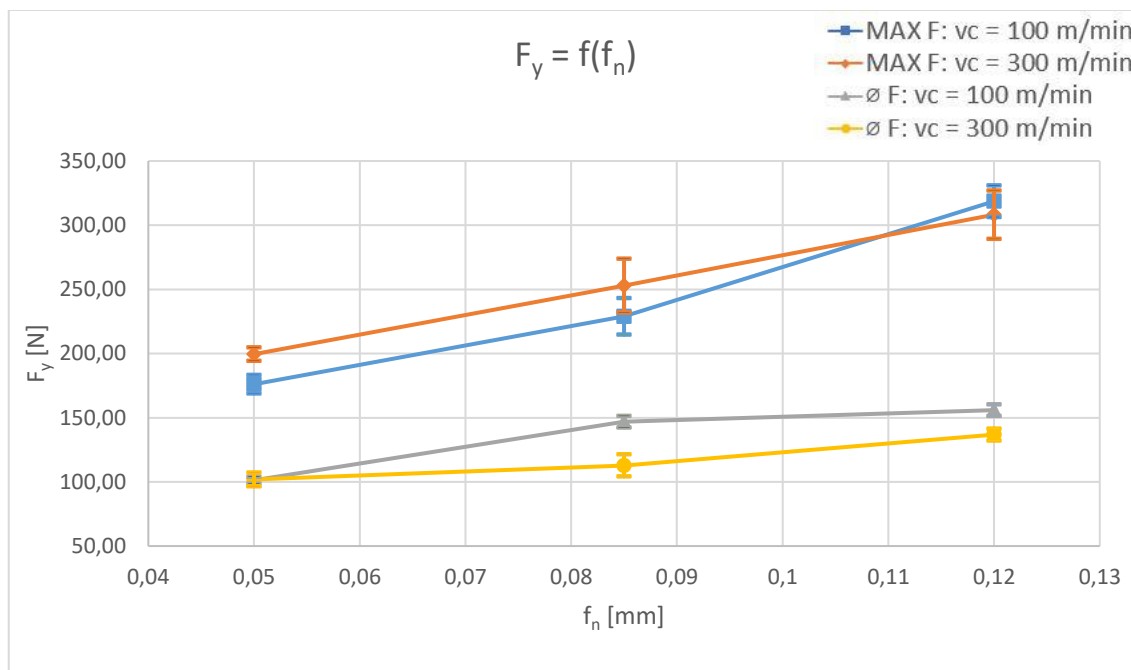
Maximální síly						
f_n [mm]	v_c [m/min]	F_c [N]	F_{cN} [N]	F_p [N]	F_a [N]	F [N]
0,05	100	270,7	176,1	114,2	323,1	342,8
0,05	300	217,1	199,5	94,4	294,9	309,7
0,085	100	312,8	228,9	108,2	387,8	402,7
0,085	300	292,9	252,9	133,3	387,0	409,5
0,12	100	477,6	318,6	183,5	574,4	603,2
0,12	300	404,4	308,2	160,0	508,7	533,5

Následují grafy závislostí jednotlivých sil na posuvu.



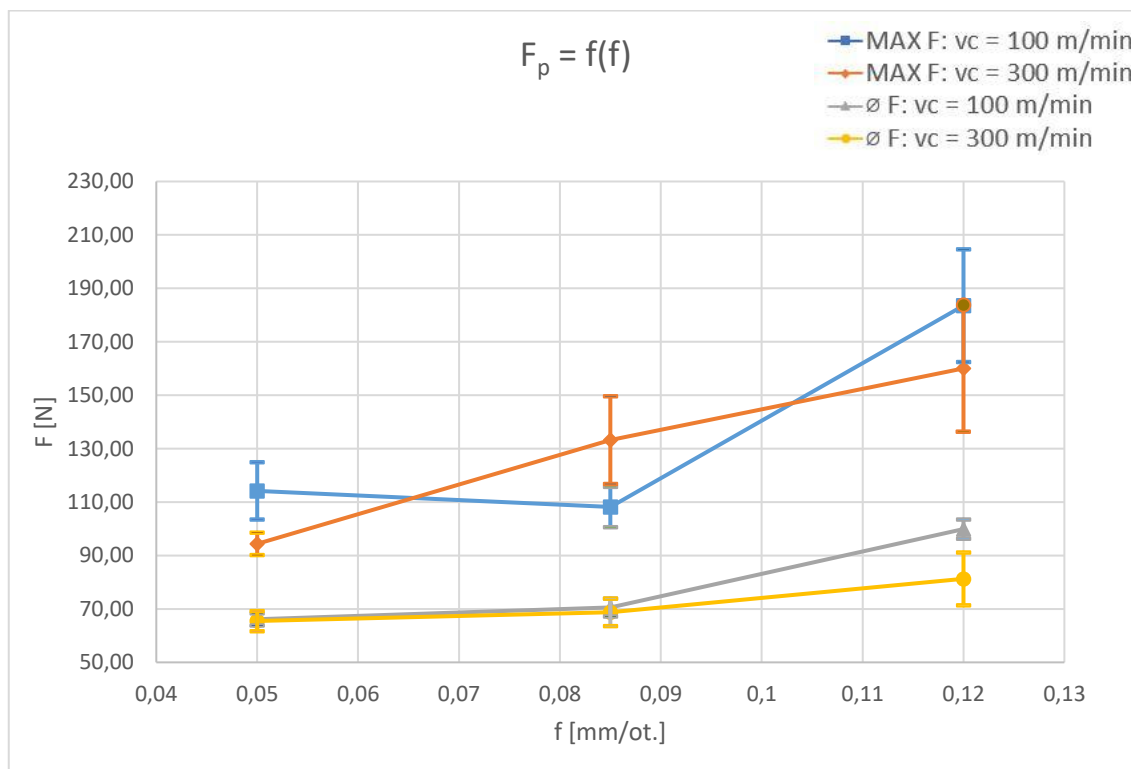
Graf 1: Závislost řezné složky síly F_x na posuvu f_n

Maximální i průměrná síla F_x rostou spolu s posuvem při obou řezných rychlostech. Pro větší řeznou rychlost je síla menší.



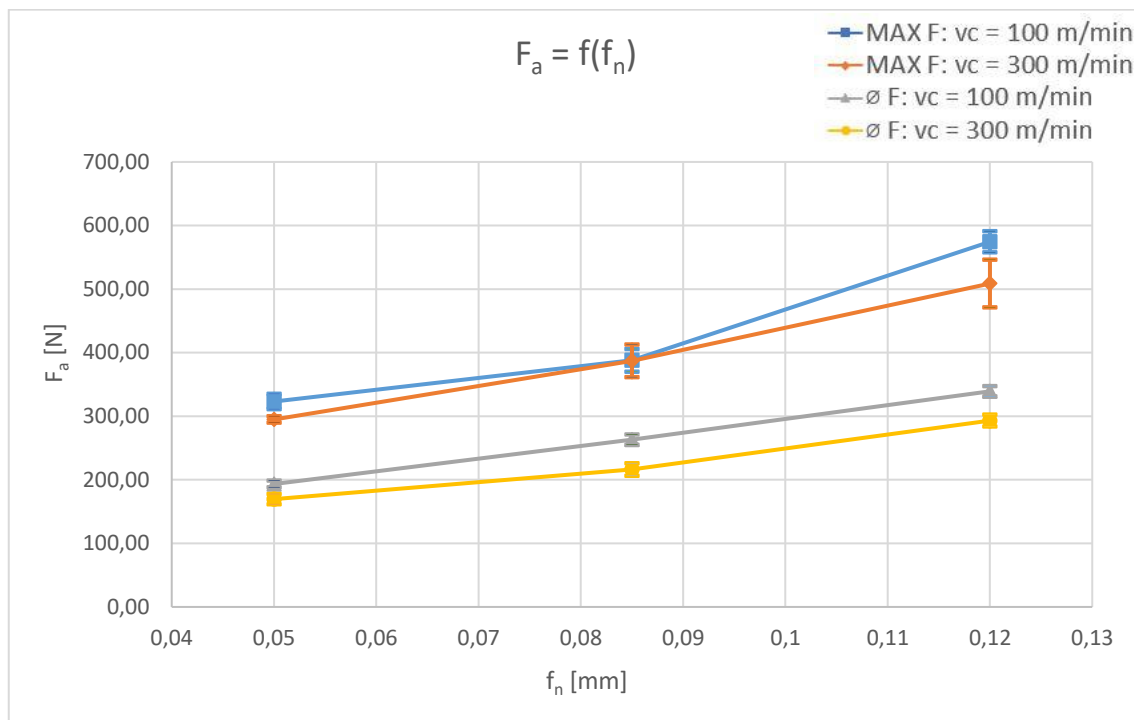
Graf 2: Závislost kolmé řezné složky síly F_y na posuvu f_n

Stejně jako v případě sil F_x i zde je patrná růstová tendence s posuvem. Na rozdíl od síly F_x je ve svých maximálních hodnotách síla F_y při vyšší řezné rychlosti vyšší.



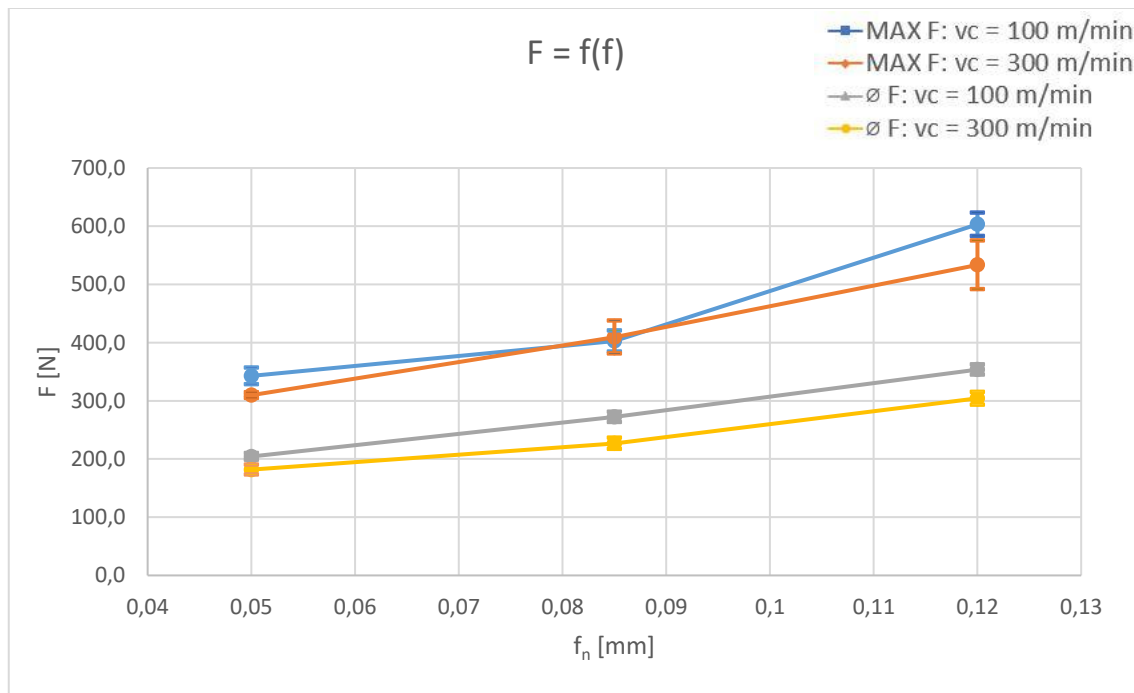
Graf 3: Závislost pasivní síly F_p na posuvu f_n

Graf pasivní síly nemá tak lineární průběh, jako předchozí grafy. Maximální pasivní síla při řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a posuvu $f_n = 0,085$ mm je nižší než při stejné řezné rychlosti a posuvu $f_n = 0,05$ mm.



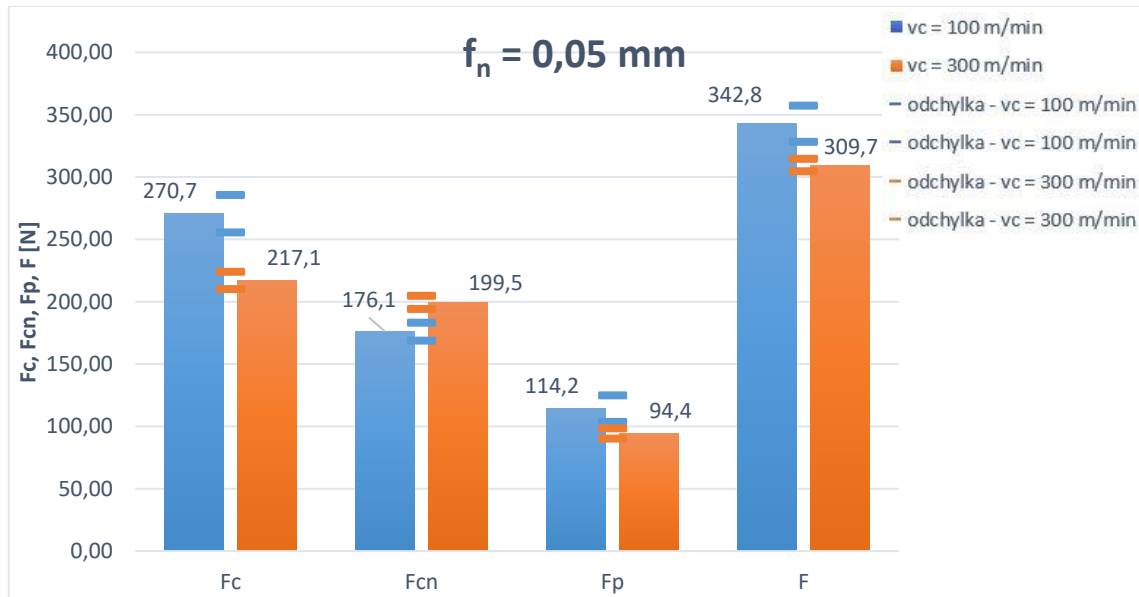
Graf 4: Závislost aktivní síly F_a na posuvu f_n

Graf aktivní síly, stejně jako následující graf celkové řezné síly, má podobné rozložení jako graf síly F_x (řezné síly). Tedy ve všech bodech grafu jsou síly větší při nižší řezné rychlosti a zároveň všechny křivky jsou rostoucí.

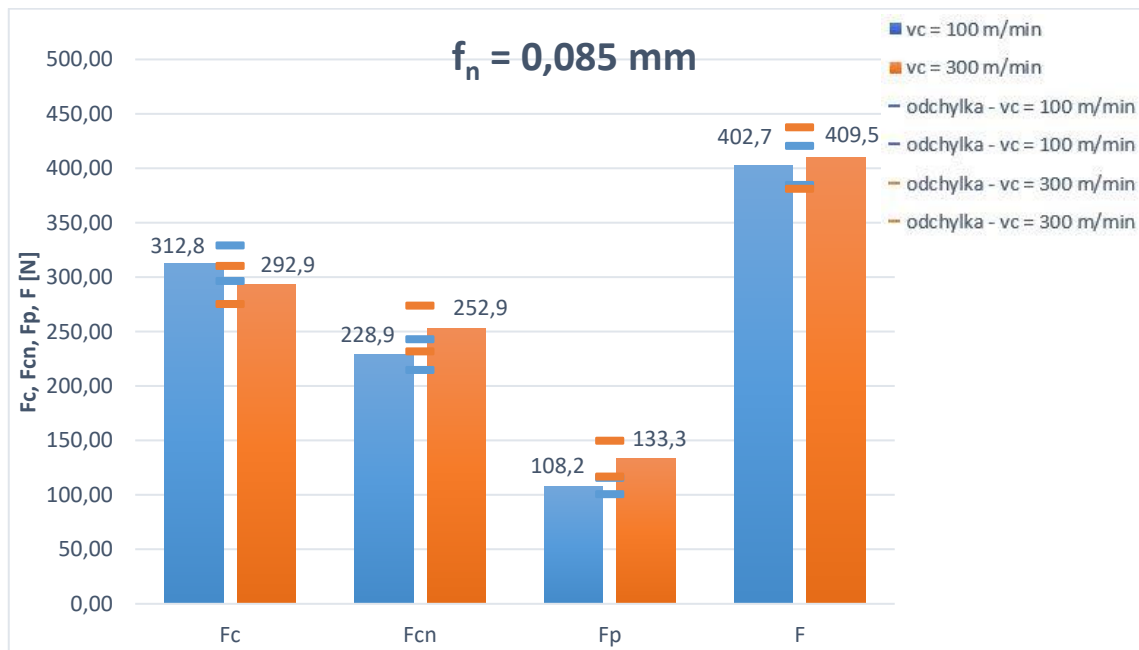


Graf 5: Závislost celkové řezné síly F na posuvu f_n

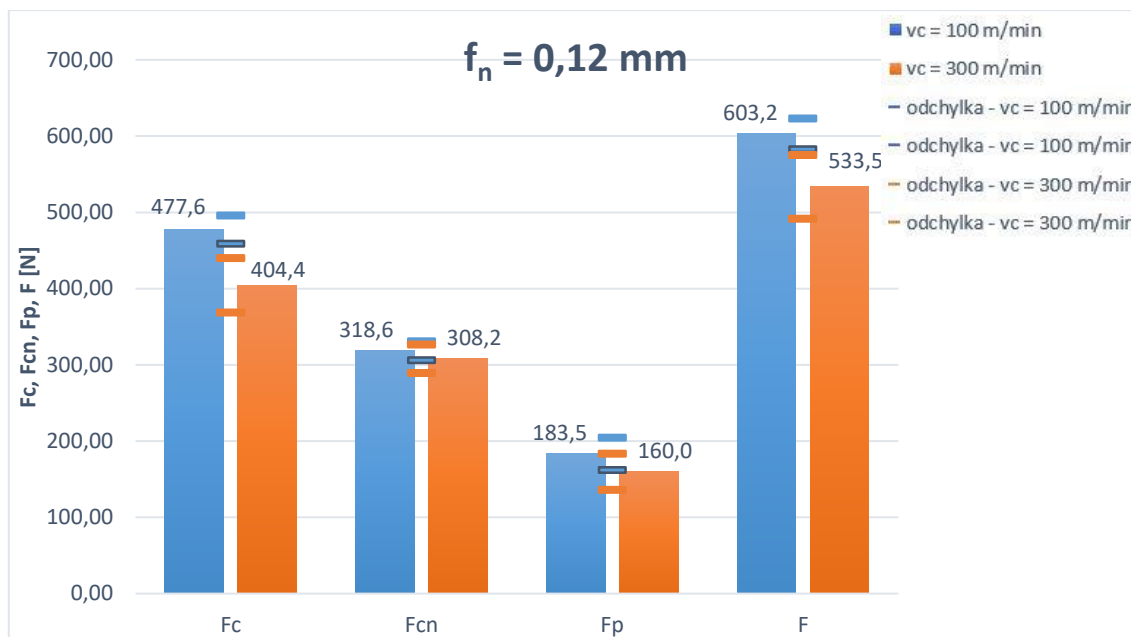
Poslední grafické srovnání bude vyjadřovat rozdíly mezi řeznou složkou síly F_c , kolmou řeznou složkou síly F_{cn} , pasivní silou F_p a celkovou řeznou silou F .



Graf 6: Rozdíly mezi jednotlivými silami při posuvu $f_n = 0,05$ mm



Graf 7: Rozdíly mezi jednotlivými silami při posuvu $f_n = 0,085$ mm



Graf 8: Rozdíly mezi jednotlivými silami při posuvu $f_n = 0,12 \text{ mm}$

Při všech posuvech je jasně největší složkou celkové řezné síly řezná síla F_c . Následuje kolmá řezná síla F_{cn} a síla pasivní F_p . Zároveň ve všech případech jsou síly větší pro řeznou rychlost $v_c = 100 \text{ m/min}$. Výjimku tvoří kolmá řezná síla a v jednom případě také síla pasivní.

5.5.2. Shrnutí a analýza výsledků

Podle popsaného postupu byly naměřeny a vyhodnoceny hodnoty sil při obrábění ocelových návarů.

Během experimentu bylo zjištěno, že při výrobě vzorků může vlivem tepelného zpracování docházet k jejich zvlnění, což může vést k vibracím při obrábění. Hodnoty při vibracích nebyly zahrnuty do vyhodnocení.

Bylo zjištěno, že ačkoli rozdíly v řezných rychlostech byly veliké (trojnásobné), rozdíly v silách potřebných pro obrábění při různých řezných rychlostech byly minimální. Dokonce bylo patrné, že při větší řezné rychlosti bylo zapotřebí menších sil. Např. při posuvu $f_n = 0,05 \text{ mm}$ byla celková řezná síla pro $v_c = 300 \text{ m/min}$ $F = 309,7 \text{ N}$ a pro $v_c = 100 \text{ m/min}$ $F = 342,8 \text{ N}$, což je 10 % rozdíl. Tato vlastnost je výhodná vzhledem k možnosti větší produktivity, při zachování nízkých sil.

Naopak s posuvem rostly také všechny složky výsledné síly řezání. Růst byl téměř lineární, až na sílu pasivní při řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$. Možnou příčinou výkyvů u pasivní síly, by mohla být nevhodnost vyměnitelných břitových destiček, pro které byl doporučený minimální posuv na zub 0,07 mm, přičemž minimální posuv na zub použitý během experimentu byl 0,05 mm.

Celková řezná síla při řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ a posuvu na otáčku $f_n = 0,05 \text{ mm}$ byla $F = 342,8 \text{ N}$, při řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ a posuvu $f_n = 0,12 \text{ mm}$ byla $F = 603,2 \text{ N}$. Celková řezná síla tedy mezi krajními hodnotami posuvu narostla o 76 %.

Co se porovnání jednotlivých složek celkových řezných sil týká, největší složkou byla řezná síla, následovaná kolmou řeznou silou a silou pasivní. I zde bylo patrné, že při obrábění vyšší řeznou rychlostí je zapotřebí stejné, spíše však menších sil.

Například pro $v_c = 300$ m/min a $f_n = 0,12$ mm jsou $F_c = 404,4$ N, $F_{cN} = 308,2$ N, $F_p = 160$ N. Celková řezná síla je pak $F = 533,5$ N. Řezná síla tedy byla o třetinu větší než kolmá řezná síla a více než dvakrát větší než pasivní síla.

5.6. Měření drsnosti povrchu

Měření probíhalo podle metodiky určené v kapitole 3.3.8..

Po kalibraci přístroje následovalo měření R_{sm} prvního vzorku, aby se mohla určit mezní vlnová délka λ_c a jednotlivá/celková měřicí dráha L_r/L_n . Výsledek byl $R_{sm} = 0,12$ mm, na základě toho bylo nastaveno $\lambda_c = 0,25$ mm a $L_n = 1,25$ mm, viz Tab. 4.

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách na konci práce.

Na všech vzorcích budou měřeny a následně vyhodnoceny tyto parametry drsnosti:

- R_a – průměrná aritmetická úchylka profilu
- R_z – největší výška profilu
- R_{sm} – průměrná šířka prvku profilu
- R_t – celková výška profilu

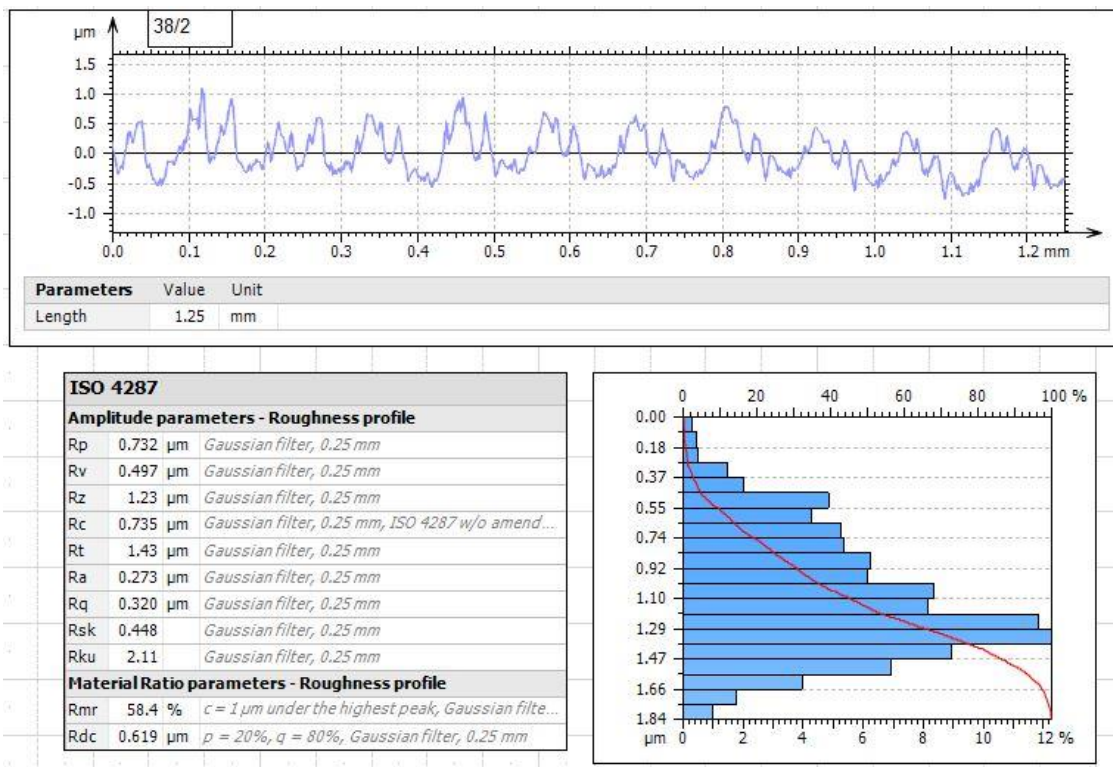
Vyhodnocení všech těchto hodnot bude provedeno vytvořením průměrných hodnot, jejich směrodatných odchylek a následným vynesemím do grafu.



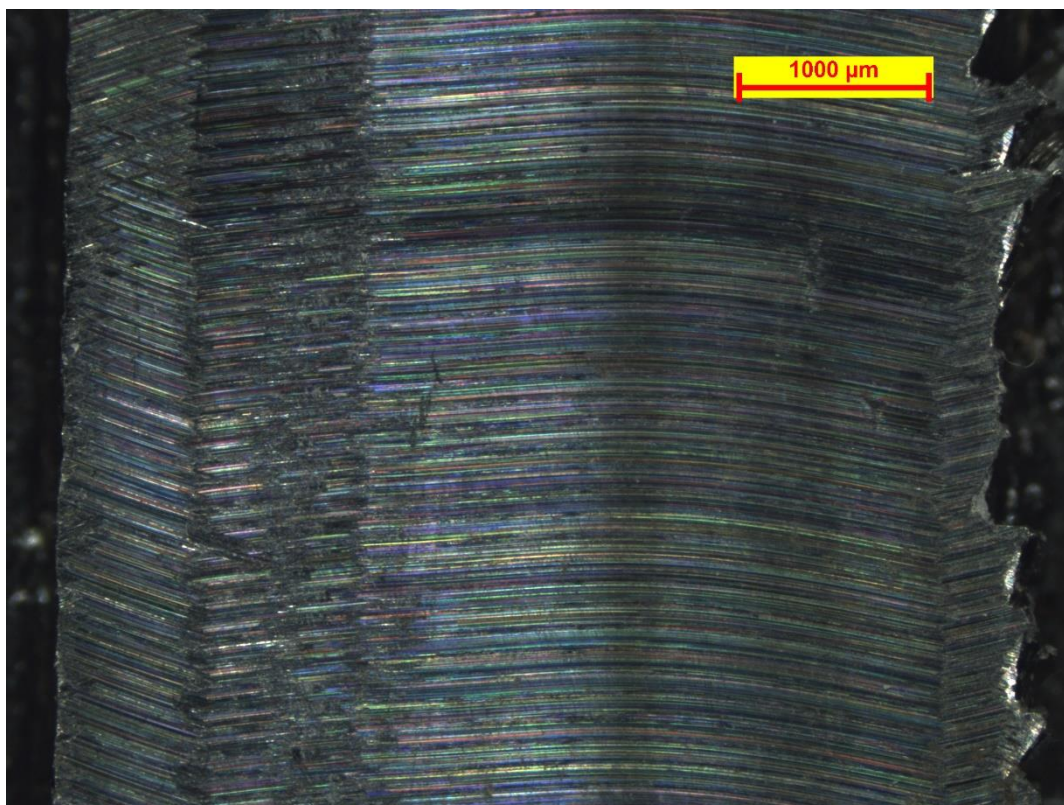
Obrázek 43: Měření drsnosti vzorku V37

Na Obr. 44 je ukázka z programu TalyMap. Konkrétně se jedná o vzorek V38, druhé měření z pěti. V horní části je vidět vyhodnocovaný profil povrchu. Vlevo dole je tabulka hodnoty, ze které byly vytaženy hodnoty pro následné zpracování. Vpravo dole se nachází

abbottova křivka, která udává množství materiálu, který se v dané hloubce povrchu nachází. Na Obr. 45 se nachází snímek povrchu vzorku V38.



Obrázek 44: Ukázka výstupu měření drsnosti v programu TalyMap



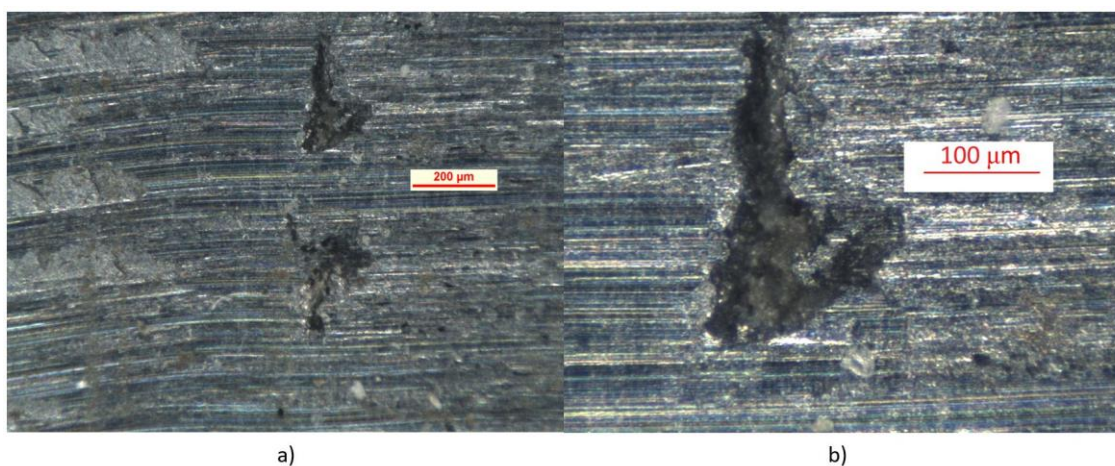
Obrázek 45: Detailní snímek povrchu vzorku V38

Při měření drsnosti občas docházelo k potížím s velkými výkyvy a jednotlivá měření musela být často opakována. Při detailním prozkoumání všech zvětšených vzorků byly nalezeny malé trhliny, viz Obr. 46 a Obr. 47.

Všechny trhliny se nacházely v řadách. Důvodem vzniku je příliš velká vzdálenost mezi jednotlivými housenkami nastavená při navařování.



Obrázek 46: Detailní snímek povrchu vzorku V33



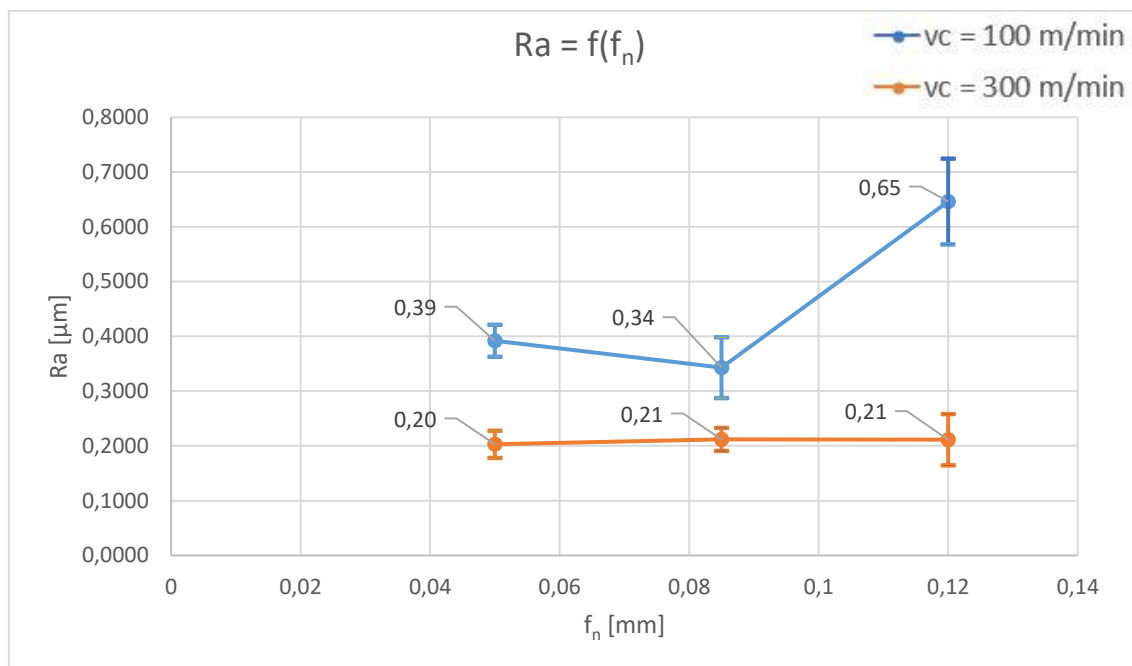
Obrázek 47: Snímky povrchu V33 a) měřítko = 200 µm b) měřítko = 100 µm

5.6.1. Vyhodnocení naměřených dat

Vyhodnocené hodnoty jednotlivých parametrů budou uvedeny vždy v tabulce před příslušným grafem.

Tabulka 7: Zpracované hodnoty Ra

Ra [μm]		v_c [m/min]	
		100	300
f_n [mm]	0,05	0,39	0,20
	0,085	0,34	0,21
	0,12	0,65	0,21



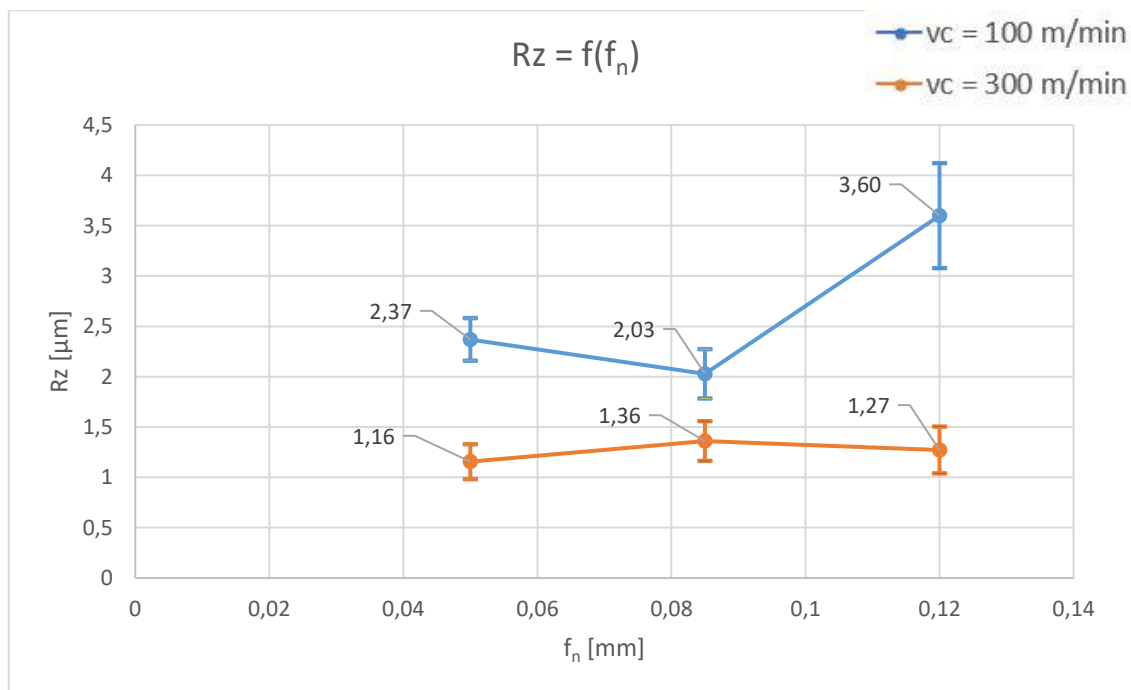
Graf 9: Závislost Ra na posuvu f_n

Závislost parametru drsnosti povrchu Ra na posuvu na otáčku f_n . Při řezné rychlosti $v_c = 300$ m/min je povrch z pohledu parametru Ra kvalitnější a zároveň konstantní s rostoucím posuvem. Při rychlosti $v_c = 100$ m/min je vidět výrazná změna s posuvem.

Podobně je možno popsat všechny následující grafy závislostí různých parametrů drsnosti.

Tabulka 8: Zpracované hodnoty Rz

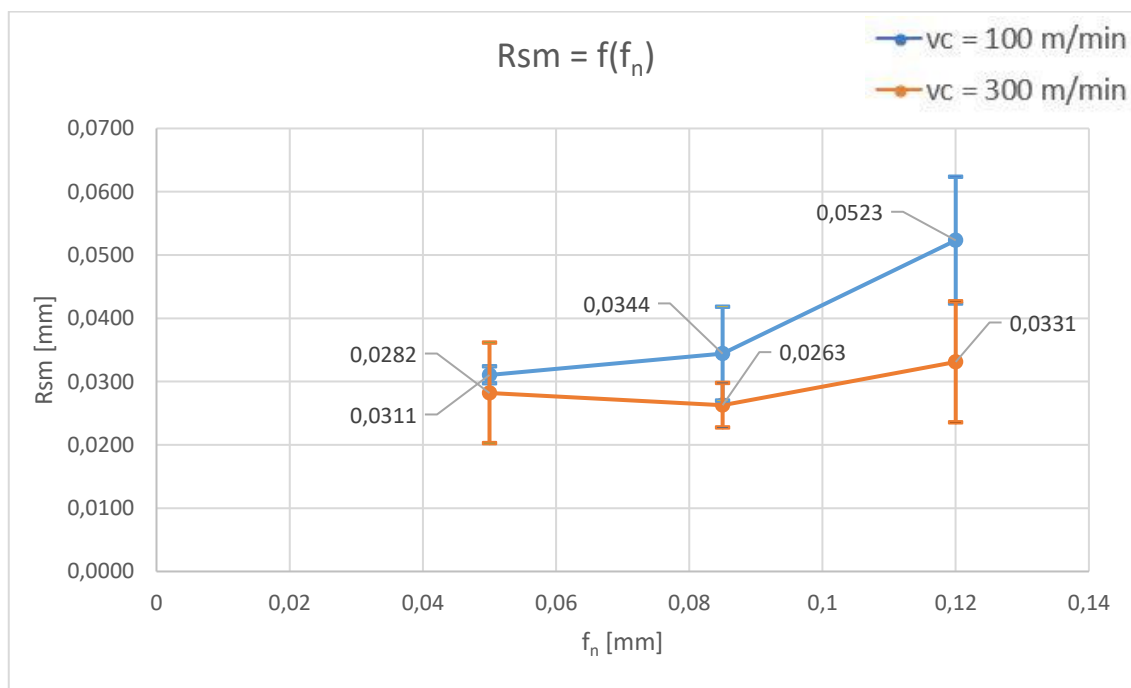
Rz [μm]		v_c [m/min]	
		100	300
f_n [mm]	0,05	2,37	1,16
	0,085	2,03	1,36
	0,12	3,60	1,27



Graf 10: Závislost Rz na posuvu f_n

Tabulka 9: Zpracované hodnoty Rsm

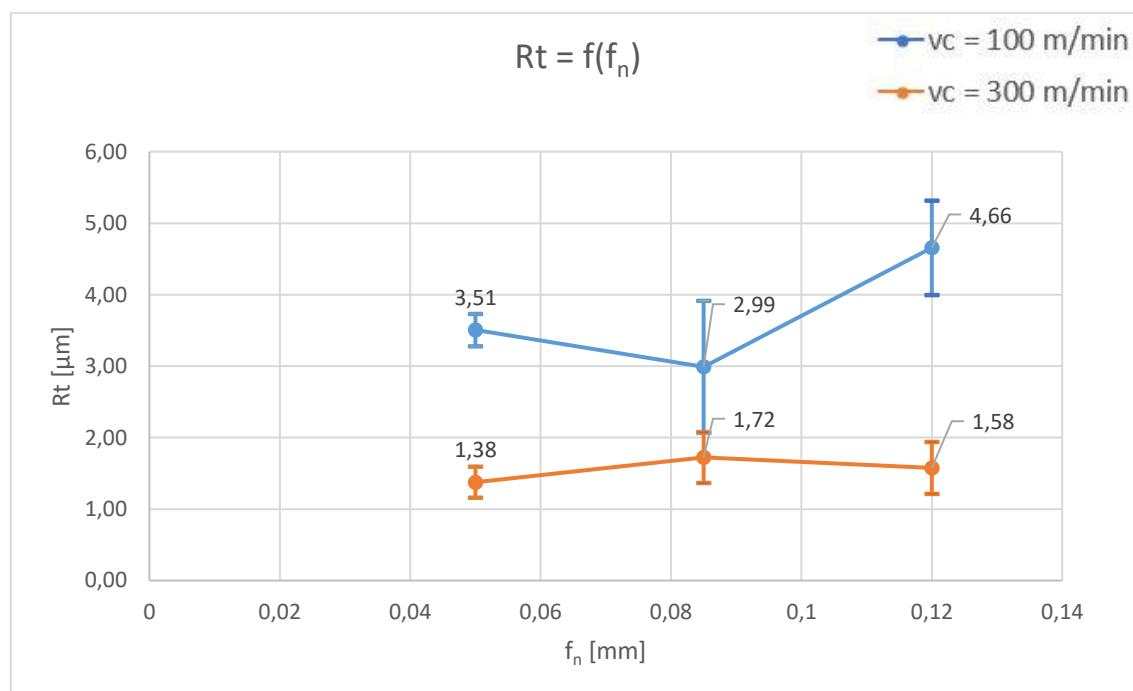
Rsm [mm]		v_c [m/min]	
		100	300
f_n [mm]	0,05	0,0311	0,0282
	0,085	0,0344	0,0263
	0,12	0,0523	0,0331



Graf 11: Závislost Rsm na posuvu f_n

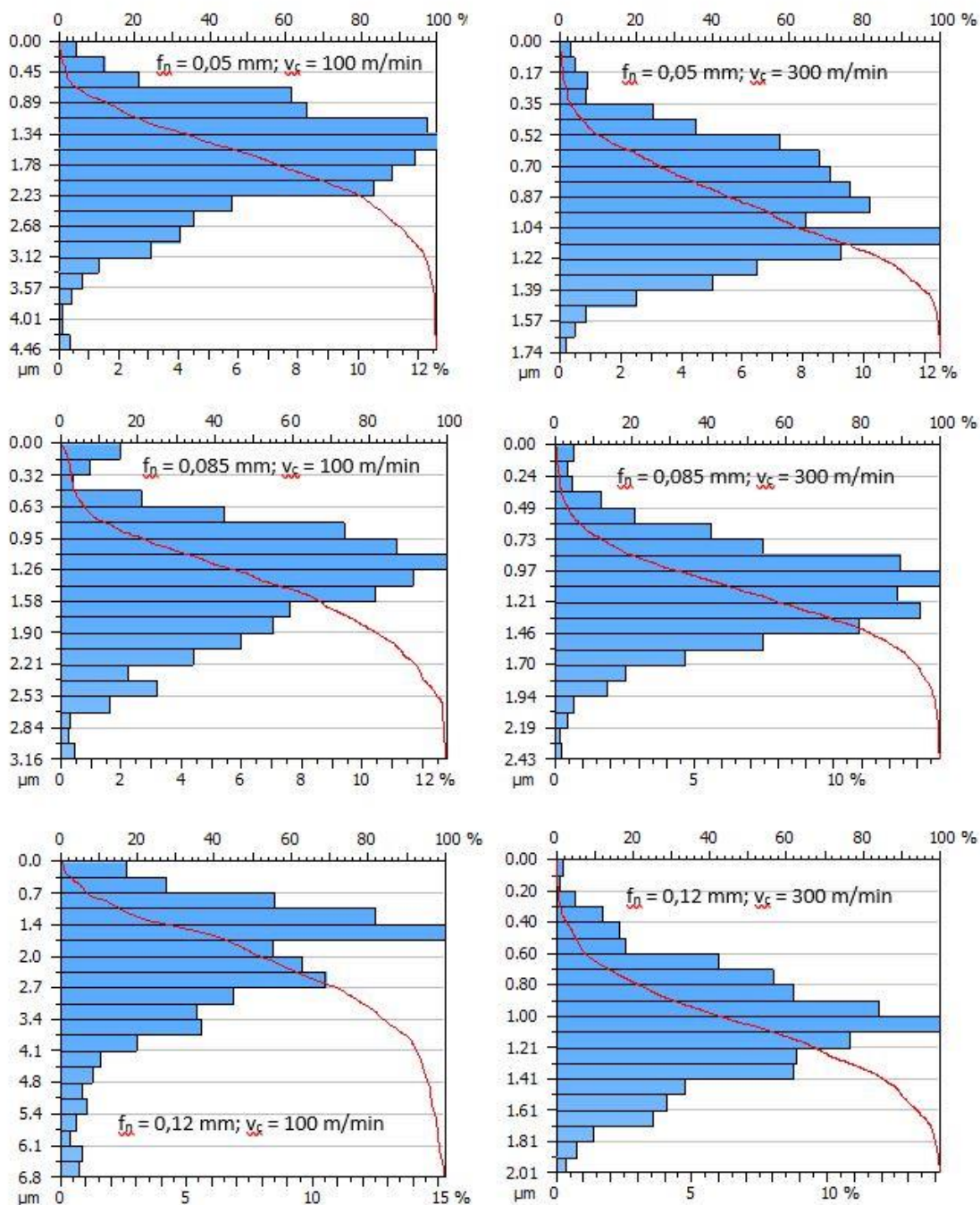
Tabulka 10: Zpracované hodnoty R_t

R_t [μm]		v_c [m/min]	
		100	300
f_n [mm]	0,05	3,51	1,38
	0,085	2,99	1,72
	0,12	4,66	1,58



Graf 12: Závislost R_t na posuvu f_n

Abbottovy křivky pro všechny řezné podmínky:



Obrázek 48: Abbottovy křivky pro všechny kombinace řezných podmínek

5.6.2. Shrnutí a analýza výsledků

Podle popsaného postupu byly naměřeny a vyhodnoceny hodnoty drsnosti povrchu při obrábění ocelových návarů.

Grafy všech parametrů povrchu mají podobný průběh, pouze graf pro hodnoty Rsm se mírně liší.

U řezné rychlosti $v_c = 100 \text{ m/min}$ byl patrný růst hodnot drsnosti povrchu s posuvem. Konkrétně u průměrné aritmetické úchytky profilu je nárůst mezi posuvy $f_n = 0,085 \text{ mm}$ a $f_n = 0,12 \text{ mm}$ téměř dvojnásobný. Zatímco u řezné rychlosti $v_c = 300 \text{ m/min}$ zůstávaly

hodnoty drsnosti na podobné úrovni. Hodnoty drsností při řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a posuvu $f_n = 0,05$ mm byly větší, než v případě řezné rychlosti $v_c = 100$ m/min a $f_n = 0,085$ mm. Důvodem může být opět nevhodnost typu vyměnitelných břitových destiček, pro které byly doporučeny posuvy $f_n = 0,07$ mm až $f_n = 0,12$ mm.

Vyhodnocení ukázalo, že při větší řezné rychlosti je dosaženo lepší kvality povrchu. Dokonce ani s rostoucím posuvem se kvalita nezhoršovala. Tyto vlastnosti umožňují výrazně vyšší produktivitu obrábění a zároveň dosažení vysoké kvality obrobených povrchů.

Závěrečným doporučením je upravit technologii navařování, konkrétně vzdálenost jednotlivých housenek v celkovém návaru tak, aby v nově vzniklém materiálu nevznikaly trhliny, které by mohly mít katastrofický dopad na funkčnost a odolnost součásti.

6. Závěr

Cílem této práce bylo určit obrobitelnost návarů vytvořených technologií laser cladding. Cílem bylo provést, experiment, jehož zaměřením bylo analyzovat vliv řezných podmínek na velikost sil při obrábění a na kvalitu obrobeného povrchu.

Z počátku práce byla provedena rešerše aktuálního stavu aditivní výroby. Dále se práce zabývá především metodu laser cladding. Byl popsán princip této technologie, její zařazení do rodiny technologií 3D tisku, její výhody a nevýhody. Velkou část tvoří výběr firem, které se momentálně technologii laser cladding věnují.

Dále byla provedena rešerše týkající se obrábění. Byla popsána základní teorie řezání, také byla probrána problematika sil při řezání, integrity povrchu a v poslední řadě byla popsána technologie frézování.

Na základě poznatků z rešeršní části byl navržen experiment. Jeho podstatou bylo prozkoumat obrobitelnost návarových materiálů z hlediska rozdílů mezi kvalitou povrchu a silami obrábění při různých řezných podmínkách frézování. Obrábění bylo prováděno 6 různými kombinacemi řezných podmínek (2 řezné rychlosti a 3 posuvy) na vzorcích stejných materiálových i tvarových specifikací.

Jako první probíhalo měření sil na dynamometru. Bylo zjištěno, že vyšší řezná rychlost znamenala mírný pokles složek celkových řezných sil, naopak s posuvem síly rostly. Také byly porovnány jednotlivé složky celkové řezné síly, kde největší z nich byla řezná síla. Naopak nejmenší silovou složkou byla síla pasivní.

Při měření sil při obrábění bylo zjištěno, že existuje možnost přílišného kmitání při obrábění způsobeného zvlněním destičky vlivem tepla při navařování. Plyne z toho důležitost pevného upnutí při samotném vytváření návarů a nutnost věnovat tomuto nebezpečí pozornost. Vibrace neměly vliv na vyhodnocená data.

Vyhodnocení hodnot drsnosti povrchu ukázalo, že při nižší řezné rychlosti měl posuv velký vliv na kvalitu obrobeného povrchu, zatímco při vyšší řezné rychlosti byla výsledná kvalita povrchu pro všechny posuvy téměř stejná, a navíc lepší než v případě rychlosti nižší.

Při zkoumání povrchu se objevily vady ve struktuře návaru, které byly způsobeny špatným nastavením výroby vzorků. Výroba vzorků však nebyla předmětem práce.

Shrnutím informací, získaných z měření sil a kvality povrchu, lze pro následné obrábění součástí, vyrobených metodou laser cladding, doporučit použití vyšší řezné rychlosti, protože kvalita povrchu s řeznou rychlostí roste a složky celkové řezné síly naopak zůstávají nízké.

7. Seznam příloh

Tabulky naměřených hodnot sil při obrábění část 1.

Tabulky naměřených hodnot sil při obrábění část 2.

Tabulky naměřených hodnot sil při obrábění část 3.

Tabulka naměřených hodnot 1: Průměrná aritmetická úchylka profilu

Tabulka naměřených hodnot 2: Největší výška profilu

Tabulka naměřených hodnot 3: Průměrná šířka prvku profilu

Tabulka naměřených hodnot 4: Celková výška profilu

8. Zdroje

- [1] ASTM International - Standards Worldwide [online]. Ig [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.astm.org/ABOUT/OverviewsforWeb2014/Additive-Manufacturing.pdf>
- [2] Additive Fabrication (Rapid prototyping, tooling). Manufacturing Cost Estimation [online]. CustomPartNet [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [3] WOHLERS, Terry T. Wohlers report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report. Fort Collins: Wohlers Associates, 2016. ISBN 978-0-9913332-2-6.
- [4] Comparison of Metal 3D Printing — Part Two: Directed Energy Deposition | 3DPrint.com [online]. 3DR Holdings, LLC [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://3dprint.com/182367/directed-energy-deposition/>
- [5] Wirefeed Additive Manufacturing vs. Powder Methods | Sciaky. Sciaky, Inc. | Industrial Metal 3D Printing | Arc + EB Welding [online]. Copyright © 2018 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>
- [6] Metal Additive Manufacturing Systems - EBAM® Systems | Sciaky. Sciaky, Inc. | Industrial Metal 3D Printing | Arc + EB Welding [online]. Copyright © 2018 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/metal-additive-manufacturing-systems>
- [7] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance [online]. 2014, 23(6), 1917-1928 [cit. 2018-07-16]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [8] 3D Printed Metals - LENS Metal Additive Manufacturing Technology. Additive Manufacturing Systems 3D Printing Electronics Metals [online]. Optomec, 2017 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/>
- [9] Metal 3D printing technology forms the base of the LENS Print Engine. Additive Manufacturing Systems 3D Printing Electronics Metals [online]. Optomec, 2017 [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/hybrid-cnc-machine-tool-and-3d-printer/>
- [10] Metal 3D printing for prototype and for repair applications for small parts . Additive Manufacturing Systems 3D Printing Electronics Metals [online]. Optomec [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/low-cost-metal-3d-printer/>
- [11] Directed Energy Deposition Technology Metal 3D Printing :: InssTek. InssTek DMT® metal 3D printing specialist :: InssTek [online]. InssTek [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.inssstek.com/content/technology>

- [12] DMT Desktop Metal 3D Printers Models :: InssTek. InssTek DMT® metal 3D printing specialist :: InssTek [online]. InssTek [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.insstek.com/content/desktop>
- [13] Systémy pro 3D tisk TRUMPF. [online]. TRUMPF [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/systemy-pro-3d-tisk/?LS=1
- [14] TruLaser Cell 3000 | TRUMPF. [online]. TRUMPF [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/zarizeni-pro-svarovani-laserovym-paprskem/trulaser-cell-3000/
- [15] DED Application & Process for 3D printing projects - BeAM Machines. BeAM Machines – Directed Energy Deposition [online]. BeAM Machines [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.beam-machines.com/applications-process-3d-printing>
- [16] Modulo 3D printing machine and 3D printing tools - BeAM Machines. BeAM Machines – Directed Energy Deposition [online]. BeAM Machines [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.beam-machines.com/products/modulo-400-3d-printing-machine>
- [17] Product overview by DMG MORI. DMG MORI Czech – CNC-controlled Lathes and Milling machines [online]. DMG MORI [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-3d>
- [18] InssTek. InssTek DMT® metal 3D printing specialist :: InssTek [online]. InssTek [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.insstek.com/content/standard/mxgrande>
- [19] Metal 3d Printer LENS Machine Tool Series - Optomec Additive Manufacturing. Additive Manufacturing Systems 3D Printing Electronics Metals [online]. Optomec, [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/lens-machine-tool-series/>
- [20] Large metal component part repair - LENS 850-R Systems. Additive Manufacturing Systems 3D Printing Electronics Metals [online]. Optomec [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/metal-component-repair-3d-printer/>
- [21] Hybrid Manufacturing Technologies - Home. Hybrid Manufacturing Technologies - Home [online]. Hybrid Manufacturing Technologies [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.hybridmanutech.com/>
- [22] 3D Printing - DM3D. DMD3D Technology [online] POM Group [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: http://www.pomgroup.com/index.php?option=com_content&view=article&id=194&Itemid=817
- [23] DMD3D Technology - dmd503d505d [online]. POM Group [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.pomgroup.com/images/dm3d/cutsheets/dmd503d505d.pdf>
- [24] DMD3D Technology - md44r66r [online]. POM Group [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.pomgroup.com/images/dm3d/cutsheets/dmd44r66r.pdf>

- [25] Huffman – HC-245ACC LPF Cladding & Joining System. Huffman – Home [online]. Huffman [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://huffman-llc.com/HC-245ACC-LPF-Cladding-Joining-System.aspx?sid=70&pid=17&red=yes>
- [26] Additive Manufacturing 2.0 - OR Laser . [online]. O.R. Lasertechnologie GmbH. [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.or-laser.com/nc/en/additive-manufacturing-20/>
- [27] LRS EVO OR Laser [online]. O.R. Lasertechnologie GmbH. [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.or-laser.com/en/lasersystems/lrs-evo/#id2-tab>
- [28] Fiber Lasers, Amplifiers and Laser Systems IPG Photonics [online]. IPG Photonics Corporation [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: [https://www.ipgphotonics.com/en#\[about-us](https://www.ipgphotonics.com/en#[about-us)
- [29] Robotic Laser Cladding Systems. [online]. IPG Photonics Corporation [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/laser-systems/cladding-and-coating/cladding-systems/laser-cladding-cells>
- [30] Höganäs' technology and powders for Additive Manufacturing/3D printing [online] Höganäs AB [cit. 16.07.2018] Dostupné z: <http://www.hoganas.com/en/business-areas/additive-manufacturing/>
- [31] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [32] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. Technologie II. 1. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [33] MÁDL, Jan. Teorie obrábění. Praha: ČVUT, 1989.
- [34] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Jana NOVÁKOVÁ a Lenka PETŘKOVSKÁ. Technologie II. 2. díl. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [35] OK Autrod 12.51 | Welding Consumables | Products & Solutions | ESAB. [online]. ESAB [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410121&tab=2>
- [37] Data sheet, Type 9255C [online] Kistler Eastern Europe s.r.o. [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=75350&model=document>
- [38] Milling 2009 CZ-SK [online]. M&V [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <https://katalog.mav.cz/data/pramet2/files/admx11.pdf>
- [39] materialy_VBD_frezovani [online]. M&V [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: https://katalog.mav.cz/data/pramet2/files/materialy_vbd_frezovani.pdf
- [40] Parametry drsnosti Mahr-NEW [online]. Kalibrační laboratoř Zindler [cit. 16.07.2018]. Dostupné z: <http://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

[41] PEŠEK, Jan. Konstrukce zkušebního zařízení pro laserové navařování oceli. 2014.

[42] Navařování metodou WAAM. Nejčtenější strojírenský časopis – MM spektrum [online]. www.mmspektrum.com [cit. 24.07.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Obrobitelnost vybraných návarových materiálů pro technologii laser cladding

PŘÍLOHY

Tabulky naměřených hodnot sil při obrábění část 3.

vzorek	č. měření na vzorku		13						14					
	f_n [mm]	v_c [m/min]	F_{x_max}	$F_{x_prům}$	F_{y_max}	$F_{y_prům}$	F_{z_max}	$F_{z_prům}$	F_{x_max}	$F_{x_prům}$	F_{y_max}	$F_{y_prům}$	F_{z_max}	$F_{z_prům}$
V30-1	0,05	100	284,00	163,60	168,80	102,40	120,20	65,83	265,20	164,20	181,50	103,50	116,30	66,50
V30-2	0,05	100	261,70	166,70	223,20	105,70	146,20	64,98	288,20	162,60	230,90	102,90	153,40	61,86
V30-3	0,05	100	312,50	169,50	229,40	102,50	178,40	61,01	303,80	174,10	228,60	104,90	174,30	66,37
V31-1	0,05	300	258,10	153,00	228,40	94,92	153,60	71,47	258,00	155,70	221,10	100,20	142,50	74,28
V31-2	0,05	300	254,70	148,50	226,30	92,67	154,10	71,84	250,60	166,50	235,60	103,40	139,60	78,03
V32-3	0,05	300	206,70	130,60	198,90	97,03	88,47	63,48	211,10	130,00	198,80	94,66	92,57	61,36
V33-1	0,085	100	312,40	216,90	227,30	146,60	107,60	70,03	327,70	219,20	237,40	147,80	117,10	70,19
V33-2	0,085	100	318,40	218,50	221,00	147,70	111,70	71,77	308,30	217,20	219,70	145,20	109,10	69,32
V33-3	0,085	100	315,30	240,30	268,60	160,20	116,20	80,87	324,90	226,20	263,50	149,10	109,70	76,69
V34	0,085	300	296,70	198,00	263,70	119,70	151,90	73,48	317,60	200,30	283,10	126,30	147,00	74,78
V35	0,085	300	271,90	185,00	245,00	115,90	132,90	65,99	277,80	184,50	254,50	114,70	136,20	67,26
V36	0,085	300	309,70	186,10	263,70	104,70	149,40	75,38	287,20	183,50	229,00	105,40	152,90	78,25
V37-1	0,12	100	453,40	295,40	316,30	155,30	159,60	98,65	456,20	288,00	308,30	152,10	152,00	97,78
V37-2	0,12	100	474,70	296,10	312,90	152,40	184,80	97,32	463,70	297,60	319,90	153,40	179,40	98,38
V37-3	0,12	100	492,90	306,60	301,80	160,90	226,90	106,50	460,40	296,30	356,40	164,90	221,40	102,40
V38	0,12	300	393,00	249,00	308,70	133,20	155,90	81,58	387,80	256,10	312,60	141,10	170,00	91,29
V39	0,12	300	411,60	247,50	322,50	138,80	176,40	70,18	383,00	252,20	307,30	144,30	158,60	75,79
V40	0,12	300	469,00	279,10	316,90	134,70	185,30	101,10	479,20	282,90	344,30	134,00	184,90	100,50

vzorek	č. měření na vzorku		15						Fx_max		Fx_prům	
	f_n [mm]	v_c [m/min]	F_{x_max}	$F_{x_prům}$	F_{y_max}	$F_{y_prům}$	F_{z_max}	$F_{z_prům}$	pru_xm	sm_odch	pru_xp	sm_odch
V30-1	0,05	100	292,20	168,60	181,70	103,70	124,90	69,54	270,72	15,05	164,71	4,68
V30-2	0,05	100	313,80	165,30	236,80	101,00	177,50	64,32	288,23	21,13	165,55	2,87
V30-3	0,05	100	306,00	167,40	236,30	100,90	166,40	61,24	301,65	17,80	168,19	3,61
V31-1	0,05	300	244,20	154,80	233,60	97,34	145,60	74,35	256,48	7,39	157,24	4,58
V31-2	0,05	300	243,90	163,50	238,90	103,70	152,00	79,19	252,15	5,15	159,03	4,33
V32-3	0,05	300	207,00	130,20	205,00	95,94	88,52	64,17	217,09	6,98	135,53	6,17
V33-1	0,085	100	324,30	216,00	224,30	146,80	131,50	70,89	312,69	13,07	218,18	3,57
V33-2	0,085	100	302,90	211,30	228,70	142,40	101,20	67,90	314,33	8,80	213,49	3,23
V33-3	0,085	100	332,10	241,80	267,50	155,40	122,00	81,91	311,49	23,63	222,67	9,03
V34	0,085	300	318,20	179,80	287,30	116,80	144,30	64,45	315,19	9,48	187,29	8,60
V35	0,085	300	293,40	182,80	257,50	116,30	131,80	63,74	276,79	6,58	183,27	5,62
V36	0,085	300	302,20	185,30	262,00	106,80	150,10	78,68	297,56	10,52	177,52	6,47
V37-1	0,12	100	468,00	294,20	343,40	157,30	207,40	99,24	467,35	14,16	294,88	6,22
V37-2	0,12	100	467,50	306,20	309,20	157,40	191,60	100,10	479,17	12,78	303,21	5,11
V37-3	0,12	100	539,00	322,50	302,90	163,60	257,70	112,90	486,39	22,04	305,65	6,21
V38	0,12	300	406,90	256,30	327,30	136,70	166,80	89,16	383,57	9,90	253,71	5,40
V39	0,12	300	397,00	254,00	339,20	143,00	175,00	75,33	379,39	15,42	249,83	3,23
V40	0,12	300	459,10	273,90	341,50	140,40	185,80	97,28	450,27	18,38	273,76	4,12

vzorek	č. měření na vzorku		Fy_max		Fy_prům		Fz_max		Fz_prům	
	f_n [mm]	v_c [m/min]	pru_ym	sm_odch	pru_yp	sm_odch	pru_zm	sm_odch	pru_zp	sm_odch
V30-1	0,05	100	176,07	7,21	101,29	2,74	114,23	10,70	66,13	2,32
V30-2	0,05	100	228,05	13,63	103,69	2,45	150,47	25,48	64,78	2,02
V30-3	0,05	100	234,17	5,78	104,33	1,98	167,15	16,49	64,42	2,21
V31-1	0,05	300	219,81	7,25	95,47	3,99	146,69	3,75	69,38	3,92
V31-2	0,05	300	233,09	5,32	99,92	3,20	150,23	5,82	78,21	2,57
V32-3	0,05	300	199,49	5,24	101,90	5,43	94,37	4,20	65,49	3,77
V33-1	0,085	100	229,65	7,81	149,01	3,28	109,60	9,10	69,83	1,95
V33-2	0,085	100	224,90	6,66	144,03	1,91	108,21	6,04	69,45	1,54
V33-3	0,085	100	232,13	21,72	147,61	5,59	106,73	6,99	72,53	4,66
V34	0,085	300	280,13	8,24	119,91	4,83	142,69	6,34	67,04	4,63
V35	0,085	300	240,15	14,50	116,96	3,99	117,51	12,05	64,74	2,70
V36	0,085	300	239,16	14,58	98,89	5,46	145,11	5,67	71,84	4,79
V37-1	0,12	100	309,83	10,22	155,06	5,46	174,37	17,57	98,44	3,81
V37-2	0,12	100	323,74	6,24	155,68	3,07	175,60	6,81	98,93	1,40
V37-3	0,12	100	322,35	13,77	156,95	4,28	200,60	23,27	102,28	3,75
V38	0,12	300	301,40	16,89	138,25	4,31	146,31	19,66	84,52	7,57
V39	0,12	300	302,55	19,68	139,83	2,42	149,56	19,42	71,44	2,53
V40	0,12	300	320,59	12,33	132,37	3,09	184,21	6,87	87,86	8,97

Tabulka naměřených hodnot 1: Průměrná aritmetická úchylka profilu

	f_n [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	Ra [μm]				
			1	2	3	4	5
V30	0,05	100	0,337	0,411	0,468	0,421	0,363
V31	0,05	300	0,23	0,163	0,215	0,21	0,212
V32	0,05	300	0,179	0,21	0,173	0,212	0,241
V33	0,085	100	0,408	0,302	0,281	0,412	0,312
V34	0,085	300	0,226	0,285	0,202	0,217	0,228
V35	0,085	300	0,246	0,231	0,214	0,214	0,201
V36	0,085	300	0,171	0,226	0,165	0,189	0,225
V37	0,12	100	0,696	0,705	0,626	0,703	0,501
V38	0,12	300	0,212	0,273	0,165	0,155	0,148
V39	0,12	300	0,189	0,154	0,223	0,322	0,24
V40	0,12	300	0,205	0,202	0,246	0,193	0,242

Tabulka naměřených hodnot 2: Největší výška profilu

	f_n [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	Rz [μm]				
			1	2	3	4	5
V30	0,05	100	2,23	2,56	2,67	2,58	2,16
V31	0,05	300	1,17	1,09	1,08	1,06	1,09
V32	0,05	300	1,05	1,18	0,989	1,08	1,48
V33	0,085	100	2,09	1,81	1,78	2,46	2
V34	0,085	300	1,45	1,6	1,2	1,46	1,52
V35	0,085	300	1,61	1,55	1,36	1,45	1,45
V36	0,085	300	1,11	1,21	0,912	1,15	1,3
V37	0,12	100	4,34	3,98	3,47	3,39	2,82
V38	0,12	300	1,06	1,23	1,15	1,02	0,94
V39	0,12	300	1,15	1,07	1,46	1,76	1,48
V40	0,12	300	1,24	1,48	1,63	1,12	1,28

Tabulka naměřených hodnot 3: Průměrná šířka prvku profilu

	f_n [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	RSm [mm]				
			1	2	3	4	5
V30	0,05	100	0,0307	0,0346	0,0284	0,0324	0,0297
V31	0,05	300	0,0517	0,0268	0,0428	0,0417	0,0389
V32	0,05	300	0,0233	0,0419	0,0208	0,0226	0,0324
V33	0,085	100	0,0488	0,0316	0,0313	0,0328	0,0275
V34	0,085	300	0,0258	0,0252	0,0228	0,0214	0,0223
V35	0,085	300	0,0316	0,0309	0,0222	0,0262	0,027
V36	0,085	300	0,0287	0,0278	0,027	0,0273	0,0303
V37	0,12	100	0,0441	0,0624	0,0455	0,0665	0,0431
V38	0,12	300	0,0323	0,0421	0,0323	0,0277	0,0234
V39	0,12	300	0,0345	0,0269	0,0286	0,0616	0,0341
V40	0,12	300	0,0205	0,0349	0,0415	0,0305	0,0257

Tabulka naměřených hodnot 4: Celková výška profilu

	f_n [mm]	v_c [m*min ⁻¹]	Rt [μ m]				
			1	2	3	4	5
V30	0,05	100	3,7	3,3	3,31	3,73	3,28
V31	0,05	300	1,35	1,53	1,23	1,22	1,29
V32	0,05	300	1,14	1,35	1,36	1,25	1,78
V33	0,085	100	2,71	2,3	2,29	4,78	2,87
V34	0,085	300	1,6	1,71	1,55	1,82	2,29
V35	0,085	300	2,18	1,93	1,66	2,03	1,45
V36	0,085	300	1,33	1,48	1,01	1,42	1,62
V37	0,12	100	5,81	4,86	4,45	4,31	3,85
V38	0,12	300	1,31	1,43	1,84	1,13	1,11
V39	0,12	300	1,26	1,39	1,79	2,41	2,15
V40	0,12	300	1,49	1,81	1,8	1,33	1,4