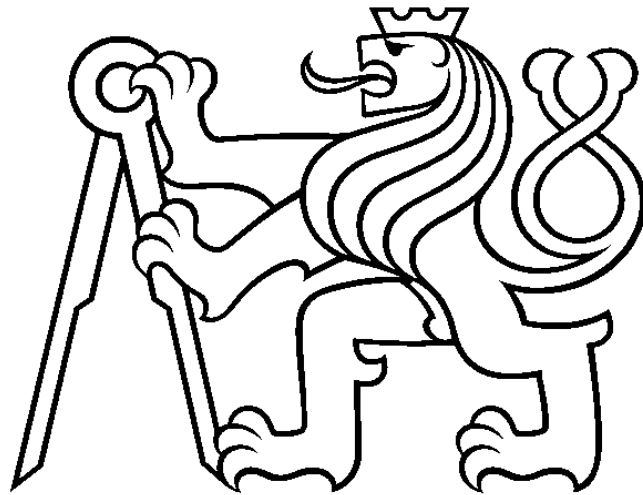


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



# Bakalářská práce

Obrobitelnost návarových materiálů

## **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**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. za odborné vedení, jeho ochotu, trpělivost a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

**Anotace**

Autor:	Michal Svatoň
Název BP:	Obrobitelnost návarových materiálů
Rozsah práce:	56 stran
Školní rok vyhotovení:	2016/2017
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, aditivní výroba, navařování, obrobitelnost, návar, volba nástroje
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá řešením obrobitelnosti materiálů a technologií kovového 3D tisku. Na základě poznatků o obrobitelnosti a 3D tisku je učiněna volba vhodného nástroje pro obrábění tištěných součástí z kovu. Poté je na CNC stroji MCVL 1000 ověřena vhodnost zvoleného nástroje.

**Annotation**

Author:	Michal Svatoň
Title of bachelor thesis:	Machinability of hardfacing materials
Extent:	56 pages
Academic Year:	2016/2017
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
Key words:	3D printing, additive manufacturing, welding, machinability, welded material, tool selection
Annotation:	This bachelor thesis deals with research of machinability of materials and technologies of metallic 3D printing. Based on knowledge of machinability and 3D printing, a suitable tool for machining of printed metal parts is chosen. Then the suitability of the selected tool is verified on MCVL 1000 CNC.

## Obsah

1	Úvod.....	9
2	Cíl práce .....	10
3	Obrobitelnost materiálu.....	11
	3.1 Definice obrobitelnosti materiálu .....	11
	3.2 Značení obrobitelnosti materiálu .....	12
	3.3 Proces obrábění .....	13
	3.4 Kinematika řezného procesu.....	14
	3.5 Trvanlivost bříty.....	15
4	3D TISK .....	16
	4.1 Definice 3D tisku .....	16
	4.2 Historie 3D tisku .....	16
	4.3 Aplikace 3D tisku v současnosti .....	18
	4.4 Kovová aditivní výroba.....	19
	4.5 Technologické výzvy aditivní výroby z kovů.....	20
	4.5.1 Systémy s práškovými loži.....	20
	4.5.2 Systémy s přívodem prášku hubicí na místo navařování .....	21
	4.5.3 Systémy s drátovým přívodem.....	22
	4.6 Parametry drátového navařování v porovnání s práškovým.....	22
	4.7 Shrnutí.....	24
5	Nastavení experimentu .....	25
	5.1 Technologie navařování .....	25
	5.2 Vzorky.....	27
6	Měření tvrdosti zkušebních návarů .....	28
	6.1 Metodika měření .....	28
	6.2 Parametry měření .....	29
	6.3 Zkušební vzorky.....	30

6.4	Postup měření.....	31
6.4.1	Měření vzorků z běžné oceli .....	31
6.4.2	Přípravek na upínání vzorků .....	35
6.4.3	Měření vzorků z korozivzdorné oceli.....	36
6.5	Zpracování naměřených hodnot.....	39
6.5.1	Zpracování a vyhodnocení vzorků z oceli .....	39
6.5.2	Zpracování a vyhodnocení vzorků z korozivzdorné oceli .....	41
6.6	Shrnutí.....	44
6.6.1	Vzorky z oceli .....	44
6.6.2	Vzorky z korozivzdorné oceli .....	45
7	Návrh technologie obrábění .....	45
7.1	Volba nástroje .....	46
7.2	Nastavení experimentu.....	46
7.2.1	Vzorky.....	47
7.2.2	Řezné podmínky.....	47
7.3	Obrábění.....	48
7.4	Měření tvrdosti a drsnosti obrobených ploch.....	51
8	Závěr.....	53
9	Seznam příloh.....	55
10	Seznam literatury.....	55

## Přehled použitých jednotek a veličin

<u>Označení veličiny</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Název veličiny</u>
Ap	[mm]	hloubka řezu
d	[mm]	průměr / střední hodnota úhlopříček
F	[N]	zatěžovací síla
f	[mm]	posuv
f <sub>l</sub>	[Hz]	frekvence laseru
f <sub>o</sub>	[mm]	ohnisková vzdálenost
f <sub>z</sub>	[mm/zub]	posuv na zub
HV1	[/]	tvrdost podle Vickerse
m	[kg]	hmotnost
N	[ot*min <sup>-1</sup> ]	otáčky
P	[W]	výkon
Q	[J]	energie pulsu
Ra	[μm]	střední aritmetická úchylka drsnosti
Rz	[μm]	střední vzdálenost výšky nerovností
t	[s]	doba zatížení
V	[m <sup>3</sup> ]	objem / objem budované součásti
v <sub>c</sub>	[m*min <sup>-1</sup> ]	řezná rychlost
α	[°]	úhel přívodu materiálu
η	[°]	úhel řezného pohybu
λ	[nm]	vlnová délka
φ	[°]	úhel posuvového pohybu



# 1 Úvod

Tato práce se zabývá obrobiteľnosťí návarů vytvořených pomocí technologie laserového navařování oceli, neboli kovového 3D tisku. Jedná se velice moderní způsob výroby součástí, který se v posledním desetiletí dočkává velkého rozšíření a má velký potenciál pro budoucí aplikace ve všech odvětvích strojírenské výroby.

V první rešeršní části tato práce popisuje co to je obrobiteľnosť materiálů a jaké faktory jí ovlivňují. Ve druhé rešeršní části popisuje historický vývoj technologií 3D tisku a současné způsoby výroby kovových součástí pomocí této technologie.

Na základě poznatků z rešeršních částí, je v první fázi experimentu navržen postup pro ověření obrobiteľnosti návarů vytvořených kovovým 3D tiskem a ve druhé fázi je ze zjištěných informací navržen vhodný nástroj pro obrábění návarů.

V závěrečné části experimentu následuje ověření vhodnosti zvoleného nástroje během experimentálního obrobení vzorků a stanovení jeho vlivu na tvrdost a jakost obráběného povrchu.

## 2 Cíl práce

- Rešerše obrobitelnosti materiálů.
- Rešerše technologií 3D tisku se zaměřením na tisk kovů.
- Volba vhodné technologie pro určení obrobitelnosti návarů.
- Analýza tvrdosti vybraných návarových materiálů.
- Návrh vhodného obráběcího nástroje a vyměnitelných břitových destiček.
- Ověření vhodnosti nástroje a technologie obrábění.

### 3 Obrobitelnost materiálu

#### 3.1 Definice obrobitelnosti materiálu

Obrobitelnost materiálu označuje celkový vliv fyzikálních vlastností a chemického složení kovů na průběh a kvalitativní výsledky procesu řezání. Dá se posuzovat z hlediska vlivu materiálu obrobku na sílu otěru, energetické bilance během procesu řezání, ale také vlivu na tvorbu třísky a vytváření nového povrchu obrobku. Z hlediska technologií obrábění je obrobitelnost materiálu jedna z nejdůležitějších vlastností materiálu, lze jí také definovat jako míru schopnosti materiálu být zpracováván některou z metod obrábění. Jedná se o jeden z hlavních faktorů sloužících pro volbu řezných podmínek. [4][5]

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují obrobitelnost materiálu, mezi nejdůležitější se řadí:

- způsob výroby a tepelné zpracování materiálu,
- mikrostruktura materiálu,
- chemické složení materiálu,
- fyzikální a chemické vlastnosti materiálu,
- metoda obrábění,
- pracovní prostředí,
- geometrie nástroje,
- druh a vlastnosti nástrojového materiálu.

Dalším důležitým pojmem při řešení obrobitelnosti materiálu je řezivost. Řezivost je schopnost nástroje obrábět konkrétním způsobem daný materiál obrobku. Řezivost a obrobitelnost jsou pojmy, které spolu velice úzce souvisí. Velká část kritérií, které určují obrobitelnost, zároveň určují i řezivost. [12]

Obrobitelnost i řezivost se dle charakteristik dělí na absolutní a relativní.

*Absolutní řezivost, resp. obrobitelnost* je charakterizována vztahy mezi parametry souvisejícími s řezivostí, resp. obrobitelností nebo velikostí určité veličiny

*Relativní řezivost, resp. obrobitelnost* je charakterizována poměrem velikosti veličin udávaným pomocí bezrozměrných čísel, jedná se o poměr veličiny daného materiálu

obrobku, resp. nástroje proti veličině etalonového materiálu pro daný obrobek, resp. nástroj.

Pro vyhodnocení obrobitelnosti a řezivosti se využívá několik hledisek. Hlavním hlediskem je intenzita opotřebování břitu. Intenzita opotřebování břitu je ovlivněna abrazivními vlastnostmi obráběného materiálu a platí, že čím větší tvrdost má obráběný materiál, tím vyšší je jeho abrazivní působení na nástroj. Z tohoto důvodu platí, že čím větší je tvrdost obráběného materiálu, tím nižší je trvanlivost břitu. Další hlediska pro vyhodnocení obrobitelnosti jsou teplotní, silové, technologické a kvalitativní. [12]

Pokud je potřeba dostatečně přesně a objektivně stanovit obrobitelnost zatím neznámé kombinace materiálu nástroje a obráběného materiálu, mohou se použít jedny z následujících metod:

- míra závislosti na řezné rychlosti,
- dosažená drsnost obrobené plochy,
- velikost opotřebení břitu nástroje,
- množství energie potřebné k odřezání dané vrstvy materiálu,
- vztah k dosahované teplotě řezání,
- druh a tvar tvořící se třísky.

### **3.2 Značení obrobitelnosti materiálu**

Pokud je obrobitelnost posuzována pomocí hodnoty  $v_r$ , tak se prakticky jedná o vyhodnocení úběru obráběného materiálu pomocí daného nástroje při smluveném konstantním průřezu třísky v daném řezném prostředí. Pro potřeby vyhodnocování obrobitelnosti jsou technické konstrukční materiály rozděleny do devíti základních skupin, které jsou označovány malými písmeny:

- a – litiny,
- b – oceli,
- c – těžké neželezné kovy (měď a slitiny mědi),
- d – lehké neželezné kovy (hliník a slitiny hliníku),
- e – plastické hmoty,
- f – přírodní nerostné hmoty,
- g – vrstvené hmoty,

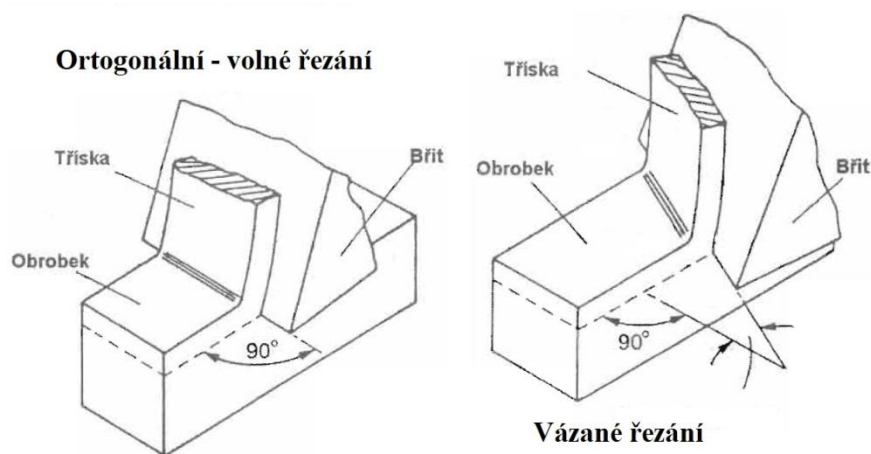
- v – tvrzené litiny pro výrobu válců.

V každé skupině je vždy vybrán jeden materiál sloužící jako etalon obrobitelnosti pro danou skupinu, a ve vztahu k tomuto materiálu je poté stanovována relativní obrobitelnost všech ostatních materiálů ve skupině. [12]

Dále se materiály dělí do tříd, třída je označována číslem umístěným před písmeno, které označuje danou skupinu materiálů (např. 11a. a 14a. atd.). Odstupňování obrobitelnosti v jednotlivých třídách je dáno geometrickou řadou s kvocientem  $q = 10^{1/10} = 1,26$ . Třída etalonového materiálu má hodnotu  $q = 1$ , což znamená, že hodnota řezné rychlosti v dané třídě je vždy 1,26 krát vyšší/nížší než hodnota v sousední třídě. Materiály v třídách s nižším číslem mají horší obrobitelnost než etalonový materiál a materiály v třídách s vyšším číslem mají lepší obrobitelnost než etalonový materiál. [4] [5] [12]

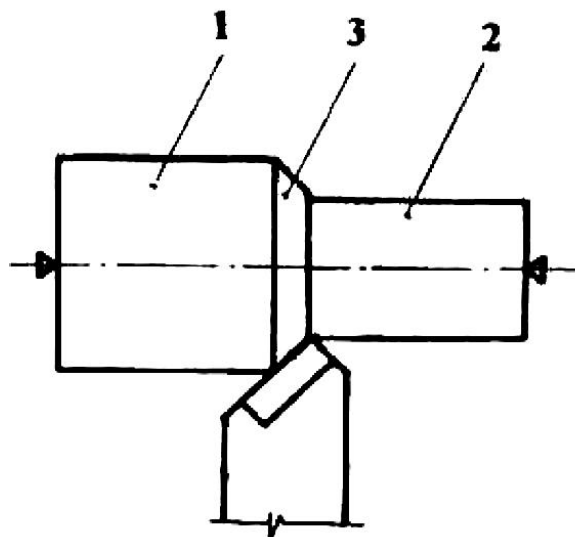
### 3.3 Proces obrábění

Obráběcí proces je realizován v obráběcím systému, který se dá členit na podsystémy obráběcích strojů, řezných nástrojů, manipulačních prostředků a obráběcího prostředí. Předmětem obráběcího procesu je obrobek a následným výstupem z obráběcího procesu jsou obrobené plochy. Během obrábění dochází k oddělování částic materiálu obrobku ostřím nástroje. Podstata procesů řezání materiálu pomocí nástroje je zobrazena na Obr. 1. [12]



Obr. 1: Proces řezání materiálu [12]

Obrobek je objektem obráběcího procesu, na kterém jsou z geometrického hlediska charakterizovány obráběné, obrobené a přechodové plochy, tyto plochy jsou zobrazeny na Obr.2.:



Obr. 2: Základní plochy na obrobku [11]

- 1 - obráběná plocha – plocha, která má být obrobená řezáním
- 2 - obrobená plocha – plocha, která byla získána jako výsledek procesu obrábění
- 3 - přechodová plocha – povrch obrobku, který byl vytvořen působením bříty nástroje na obrobek během zdvihu nebo otáčky nástroje nebo obrobku

### 3.4 Kinematika řezného procesu

Kinematika řezného procesu je identifikována relativními pohyby nástroje a obrobku vyjádřenými pomocí vhodných veličin [12].

*Hlavní pohyb* – pohyb mezi nástrojem a obrobkem, který je realizovaný obráběcím strojem

*Směr hlavního pohybu* – směr okamžitého hlavního pohybu daného bodu ostří vzhledem k obrobku

*Řezná rychlost*  $v_c$  – okamžitá rychlost pohybu bodu na ostří vzhledem k obrobku

*Posuvový pohyb* – pohyb realizovaný obráběcím strojem jakožto další relativní pohyb mezi obrobkem a nástrojem, umožňuje plynulé nebo přerušované odřezávání třísky ve spojitosti s hlavním pohybem

*Posuv* – velikost posuvového pohybu, v průběhu obrábění se vyjadřuje jako posuv na otáčku nástroje nebo obrobku  $f$  [mm]

*Směr posuvového pohybu* – určen směrem okamžitého posuvového pohybu bodu ostří vzhledem k obrobku

*Řezný pohyb* – pohyb vycházející ze současného hlavního a posuvového pohybu

*Směr řezného pohybu* – dán směrem okamžitého řezného pohybu bodu ostří vzhledem k obrobku

*Úhel posuvového pohybu*  $\varphi$  – vyjádřen jako úhel mezi směry současného posuvového a hlavního pohybu

*Úhel řezného pohybu*  $\eta$  – dán úhlem mezi směrem řezného pohybu a směrem hlavního pohybu

### 3.5 Trvanlivost břítu

Délka trvání řezného procesu, která souvisí s provozuschopným stavem břítu. Doba, po kterou je nástroj schopen plnit požadované funkce, které jsou dány příslušnými parametry. Trvanlivost nástroje je interval mezi nasazením nástroje do řezného procesu a vznikem poruchy, která ukončí provozuschopný stav nástroje.

Trvanlivost břítu  $T$  je závislá na řezných podmínkách. Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti se pro konstantní ostatní podmínky vyjadřuje pomocí Taylorova vztahu ve tvaru:

$$T = f(v_c) = C_T * v_c^{-m} \text{ [min]} \quad (1)$$

$C_T$  – konstanta [ - ]

$m$  – exponent [ - ]

$v_c$  – řezná rychlost [ $\text{m} * \text{min}^{-1}$ ]

Konstanta  $C_T$  závisí především na materiálu obrobku a nástroje, nabývá hodnot  $10^8$  až  $10^{12}$ .

Velikost exponentu  $m$  vyznačuje vlastnosti řezného nástroje:

- Nástrojové oceli  $m = 10 - 8$
- Rychlořezné oceli  $m = 8 - 5$
- Slinuté karbidy  $m = 5 - 2,5$
- Řezná keramika  $m = 2,5 - 1,5$

[5] [6] [12]

## 4 3D TISK

### 4.1 Definice 3D tisku

3D tisk kovů, nebo také *additive manufacturing* (AM), je proces spojování materiálu podle dat 3D modelu pro vytvoření součásti. Oproti běžnému způsobu výroby součásti, který probíhá odebráním materiálu (např. frézování, soustružení atd.), probíhá tato metoda pomocí kladení materiálu na podložku vrstvu po vrstvě. 3D tisk se využívá pro výrobu modelů, prototypů, nástrojových komponent a produkci dílů z plastů, kovů, keramiky, skla, kompozitů a biomateriálů. [1]

### 4.2 Historie 3D tisku

3D tisk by se dal považovat za poměrně mladý způsob výroby součásti, ale jedná se o více než 50 let starou technologii. [2]

První nástup 3D tisku se datuje do roku 1987 kdy společnost 3D system vyvinula stereolithografii (SL), během tohoto procesu je spékán tekutý polymer citlivý na UV světlo pomocí laseru. Na tomto principu byl postaven první komerčně dostupný stroj SLA – 1. [3]

V roce 1991 vzniká několik nových systémů odlišných od SL. Společnost Helisys, uvádí systém spékání vyřezaných desek materiálu pomocí laseru označený LOM (Laminated object manufacturing). Společnost Stratasys uvádí metodu FDM (Fused deposition modeling), během tohoto procesu je extrudován materiál součásti a podpůrný materiál ze dvou hubic, čímž vzniká vyráběná součást. Způsob FDM je dnes jeden z nejznámějších způsobů 3D tisku. [3]

Tyto postupy byly vhodné pouze k výrobě plastových součásti.

Až vyvinutí metody SLS (Selective laser sintering) Dr. Carlem Deckardem na počátku devadesátých let označuje počátky 3D tisku kovů. Na tomto způsobu staví společnost DTM svůj první komerčně dostupný stroj pro tisk kovových nástrojů. V tomto stroji docházelo ke spékání kovového prášku s povrchovou vrstvou polymeru pomocí laseru, který byl následně spečen v peci, kde se spálil zbytek pojivového polymeru a zbytek kovového prášku se spekl dohromady. [3]

V roce 1993 bylo na trh uvedeno zařízení DSPC od společnosti Soligen, které pracovalo na technologii Binder Jetting (tryskání pojiva). Princip tohoto stroje je



podobný inkoustové tiskárně. Pomocí tiskové hlavy je nanášeno lepidlo na práškový materiál. [3]

V roce 1994 uvádí společnost Solidscape technologii Material Jetting, která se značně podobá technologii Binder Jetting. Rozdílem mezi těmito technologiemi je, že se na budovací plochu nanáší vosk nebo fotopolymer, který je poté vrstvu po vrstvě vytvrzován UV světlem. [3]

V roce 2000 oznamuje společnost POM technologii DMD (direct metal deposition), proces během kterého se vyrábí nebo opravují součásti přímo z kovového prášku. Tato technologie se dočkala komerčního využití v roce 2002. [3]

Od roku 2002 trh s 3D tiskárnami pozvolna rostl, až do mohutného boomu který probíhá v posledních letech, kdy se začínají tiskárny využívat jak pro běžnou komerční výrobu, tak i pro soukromé použití. [3]

Například automobilový průmysl začal investovat do 3D tisku hned po jeho komercializaci na konci 80. a začátku 90. let. Využíval jej hlavně pro výrobu prototypů a designových návrhů. V dnešní době automobil dále využívá 3D tisk pro validaci designu, výrobu speciálních nástrojů a zkoušky funkčnosti a složitosti součástí. Objem výroby běžných součástí pro automobil je pro sériovou výrobu pomocí 3D tisku příliš velký, ale začínají se objevovat první výjimky. [3]

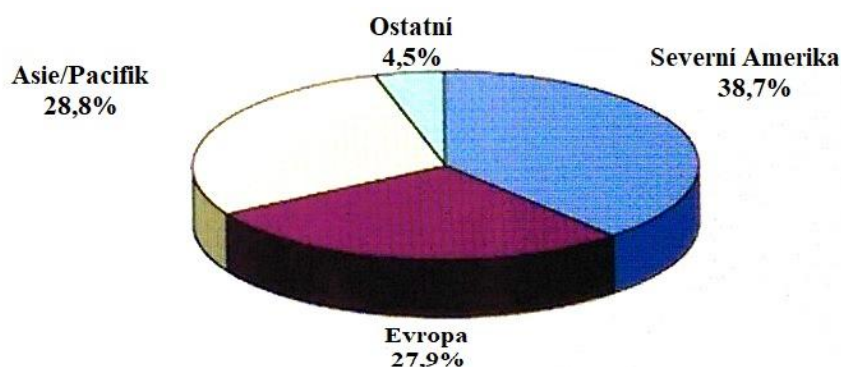
V lednu 2009 se sešlo 70 zástupců z celého světa v mezinárodním ředitelství ASTM (mezinárodní normalizační komise), aby vytvořili komisy pro technologie aditivní výroby. Tato komise byla vytvořena za účelem standardizace testování, postupů, materiálů, designu a terminologie v rámci 3D tisku. V říjnu tohoto roku je vydána první terminologická příručka.[3]

V roce 2012 komise ASTM schválila seznam všech aditivních technologií, které jsou rozděleny do jednotlivých kategorií podle technologického procesu výroby součástí. Tento seznam je uvedený v Tab.1. [8]

Tab.1: Seznam technologií 3D tisku definovaných komisí ASTM [8]

Technologie	Specifikace
<b>Extruze materiálu</b>	Proces, během kterého je materiál tryskán hubicí nebo otvorem
<b>Tryskání materiálu</b>	Proces, během kterého jsou tryskány a ukládány drobné kapičky materiálu
<b>Tryskání pojiva</b>	Proces, ve kterém je ukládáno tekuté pojivo do práškového materiálu
<b>Laminace plátů</b>	Proces, během kterého jsou spojovány pláty materiálu
<b>Fotopolymerizace</b>	Proces, během kterého je v nádobě vytvrzován tekutý fotopolymer citlivý na světlo
<b>Spékání práškových loží</b>	Proces, během kterého jsou selektivně spékány plochy práškového materiálu pomocí termální energie
<b>Přímé vkládání energie</b>	Proces, během kterého zaměřená termální energie taví materiál při nanášení na povrch

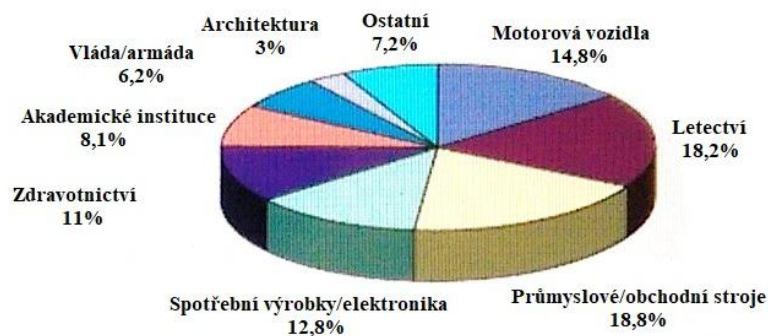
Na Obr.3 je znázorněné zastoupení všech systémů 3D tisku podle rozmístění ve světových regionech. Tento graf znázorňuje kumulativní souhrn informací od všech výrobců o prodeji 3D tiskáren od počátků až do současnosti. Z grafu je vidět že největší množství strojů je rozmístěno v Severní Americe, dále pak v Asijském a Pacifickém regionu velice blízce následovaném Evropou. [8]



Obr. 3: Zastoupení systémů 3D tisku v jednotlivých světových regionech [8]

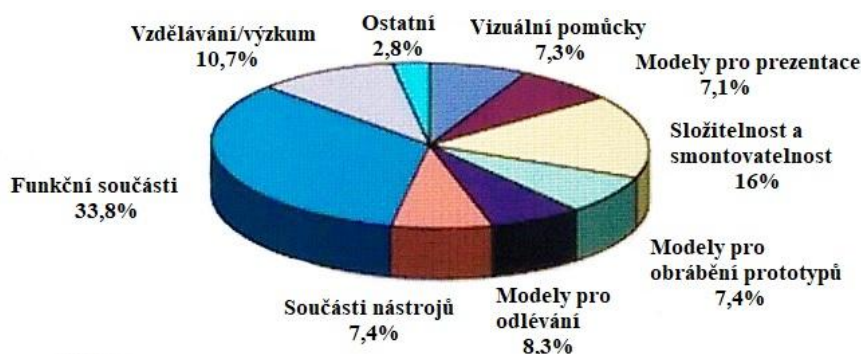
### 4.3 Aplikace 3D tisku v současnosti

Posledních 22 let, společnost Wohlers Associates poptává informace od vedoucích výrobců 3D technologií, ohledně podílu prodaných strojů do různých odvětví trhu. Souhrn těchto informací pro začátek roku 2017 je uveden na Obr.4. Z těchto informací je patrné, že vedoucím sektorem jsou průmyslové/obchodní stroje.



Obr. 4: Graf zastoupení nových strojů v odvětvích průmyslu pro rok 2017 [8]

Na Obr.5 je graf, znázorňující zastoupení vyrobených součástí pomocí 3D tiskáren v roce 2017. Největší zastoupení mají funkční součásti, následně kontrola složitelnosti a montáž. [8]



Obr. 5: Zastoupení vyráběných komponent pro rok 2017 [8]

Pro potřeby této práce, je podstatné bližší seznámení s možnostmi kovového tisku, jelikož tato práce se zabývá obrobiteľnosťí návarů vytvořených na 3D tiskárně.

#### 4.4 Kovová aditivní výroba

Kovové výrobní systémy se mohou klasifikovat podle způsobu přísunu materiálu, zdroje energie, objemu výroby a dalších parametrů. Nejčastěji používané materiály jsou uvedeny v Tab. 2. [1]

Tab.2: Materiály [7]

Slitiny Ti	Slitiny Al	Nástrojové oceli	Superslitiny	Nerezové oceli	Žárovzdorné slitiny
Ti-6Al-4V	Al-Si-Mg	H13	IN625	316	MoRe
ELI Ti	6061	Cermet	IN718	420	Ta-W
CP Ti			Stellit	347	CoCr
Γ-TiAl				PH 17-4	Alumina

## 4.5 Technologické výzvy aditivní výroby z kovů

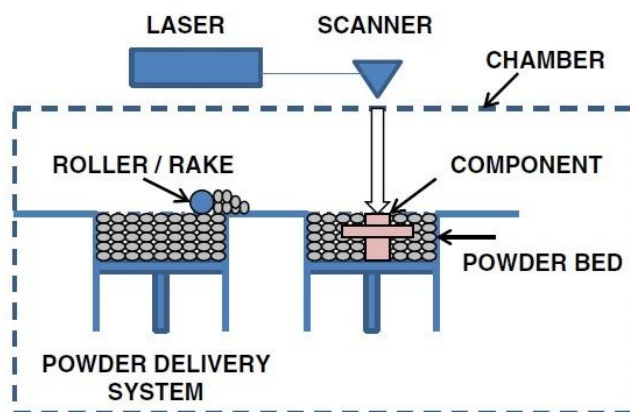
Jak již bylo zmíněno, aditivní výroba je proces, během kterého se součást vytváří kladením vrstev materiálu. Jedna vrstva je kladena na předchozí vrstvu a to vyúsťuje ve velice komplexní časově závislé teplotní profily, které vznikají ve vyráběné součásti. Výsledkem je, že součást může prožívat několik cyklů tuhých a tekutých fází. Počet těchto změn se může lišit podle použitého vybavení, času mezi přejedy a velikosti součásti. [1]

Kombinovaný efekt rapidního tuhnutí, směrového chladnutí a transformace fází zapříčiněného opakovanými termálními cykly vede ke značnému ovlivnění mikrostruktury nanesených materiálů. Rapidní tuhnutí snižuje množství elementárního dělení a rozšiřuje rozpustnost v tuhém stavu a může mít za důsledek tvorbu metastabilních fází. Směrový odběr tepla může vést k požadované směrovosti růstu zrn. Opakované termální cykly mohou mít komplexní důsledky, například tvorba mikrostrukturních pásků, tedy mikrostrukturní rozdíly mezi jednotlivými vrstvami materiálu. [1]

Procesy výroby součástí z kovu se mohou rozdělit do dvou kategorií, první kategorií jsou systémy s práškovými loži, druhou kategorií jsou systémy s přívodem materiálu na místo navařování. Druhá kategorie se dále může rozdělit na přívod materiálu ve formě prášku a přísun materiálu v celku pomocí drátu. [1]

### 4.5.1 Systémy s práškovými loži

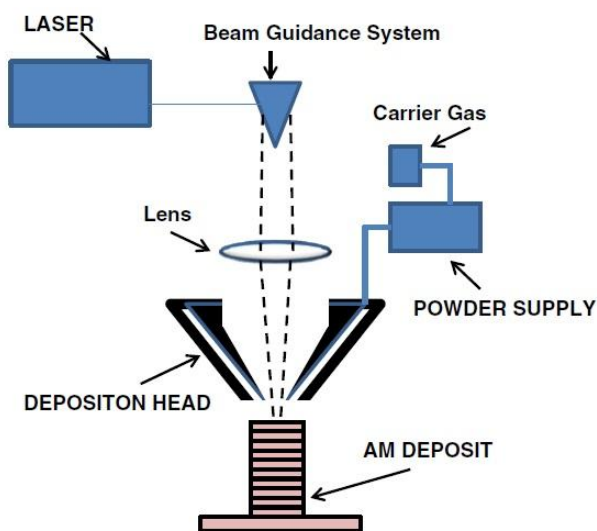
Většina systémů s práškovými loži je vyráběna v USA. Objem, který jsou tyto stroje schopné vybudovat, je menší než  $0,03 \text{ m}^3$ . Na Obr. 6 je schematické znázornění běžného systému s práškovými loži. Prášková lože jsou tvořena přihrnováním prášku ze zásobníku na pracovní plochu, zdrojem energie je buďto laser nebo elektronový paprsek. Zdroj je naprogramován tak, aby spékal prášek ve tvaru dané součásti, jakmile je vytvořena kompletní vrstva součásti, je přihrnuta další dávka prášku do pracovního prostoru a proces se opakuje, dokud není vybudována celá součást. Výhodou tohoto systému je možnost produkovat tvarově náročné součásti, za zachování přesných rozměrů. Nevýhodou je potřeba velké zásoby prášku a nutnost budovat opory v budované součásti, aby si zachovala přesný tvar během výroby. [1]



Obr. 6 : Práškové lože [1]

#### 4.5.2 Systémy s přívodem prášku hubicí na místo navařování

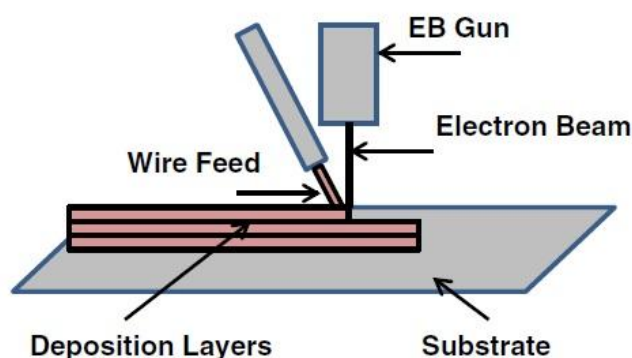
Objemy součástí, které je možné budovat, jsou větší než u systémů s loži (přibližně 1.2 m<sup>3</sup>). Dále je možné lépe vytvářet vysoké dílce. Prášek je přiváděn skrz hubici přímo na pracovní plochu. Laser vytváří vrstvu po vrstvě, až do vytvoření kompletní součásti. Schematické znázornění přívodu prášku je ukázáno na Obr.7. Nejvýznamnější dva typy tohoto systému na trhu jsou: 1. Pracovní prostor je stacionární a pohybuje se hubice s laserem, 2. Laser a hubice jsou stacionární a pohybuje se pracovní prostor. Výhodou těchto systémů je možnost vytvářet větší součásti a možnost opravování poškozených nebo opotřebovaných součástí. [1]



Obr. 7 : Přívod hubicí [1]

### 4.5.3 Systémy s drátovým přívodem

Systémy s přívodem materiálu v drátové formě přisunují drát přímo do místa, kde dopadá zdroj energie. Jakožto zdroje se mohou používat laser, elektronový paprsek nebo plasmový oblouk. Během procesu jsou na sebe postupně navařovány jednotlivé housenky materiálu pro vytvoření součásti. Schéma navařování je naznačeno na Obr.8. Systémy se vyznačují nejvyšší rychlostí budování součástí a zároveň jsou vhodné pro tvorbu objemnějších součástí. Jejich nevýhodou je potřeba většího opracování, protože nedosahují takové přesnosti vytvořených součástí jako práškové systémy. [1]



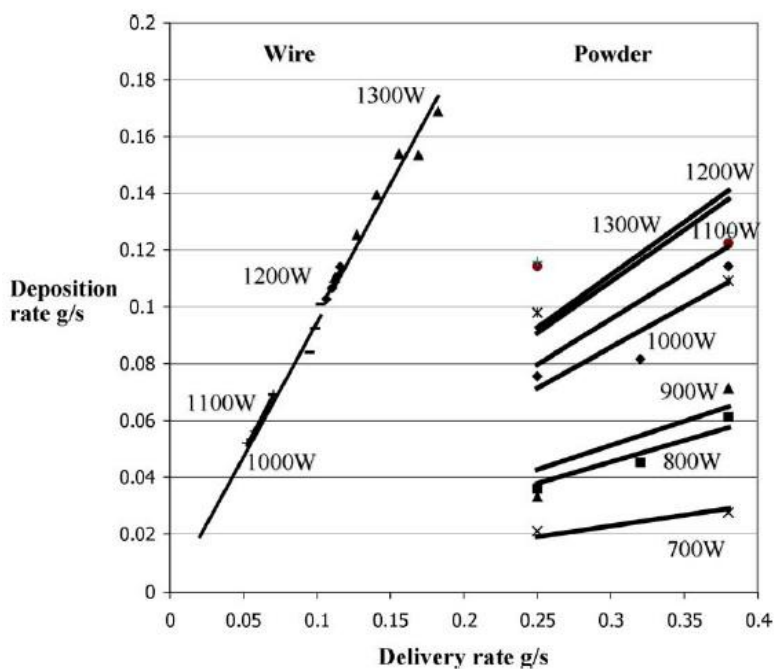
Obr. 8 : Přisun drátu [1]

### 4.6 Parametry drátového navařování v porovnání s práškovým

Tato technologie vytváří návarý z kovu, které jsou se základovým materiálem spojeny metalicky, dá se využít pro opravu či úpravu poškozených součástí nebo pro výrobu součástí nových. Jedná se o velice mladou technologii a v současné době se výzkumem v této oblasti zabývá řada vědeckých pracovišť. Hlavním cílem je stanovit vhodné parametry procesu navařování pro dosažení kvalitních návarů při výrobě součástí. Všechna porovnání vlastností návarů drátové a práškové technologie v této kapitole jsou z publikace [7].

Mezi nejdůležitější parametry patří výkon laseru a velikost stopy laseru. Tyto parametry ovlivňují maximální průměr drátu a rychlost jakou se dá efektivně navařovat při zajištění dobré kvality návaru. Běžná laserová zařízení mají k dispozici lasery o výkonu v řádech kilowatt (běžně okolo 3kW) a navařují dráty o větším průměru (okolo 1,2mm). Zařízení použité pro tuto práci má maximální výstupní výkon

550W, což umožňuje tvorbu kvalitních návarů z drátu o průměru do 0,6 mm. Vliv výkonu laseru na efektivitu kladení materiálu je vidět na Obr. 9, který je převzatý z publikace [7] a také srovnává technologii drátového a práškového navařování. Je z něj také vidět, že výkon laseru má o dost větší vliv na drátové navařování než práškové, protože efektivita kladení stoupá pro drátové technologie o dost prudčeji. [7]



Obr. 9: Efektivita ukládání v závislosti na přísunu materiálu a výkonu laseru [7]

Materiál může být do místa navařování přiváděn buďto zepředu nebo zezadu, pro práškové technologie přední přísun způsobuje o 20-45% lepší usazování zatímco zadní přísun menší oxidaci výsledného návaru a o 20% menší drsnost povrchu. Pro drátové technologie zadní přísun drátu způsobuje větší zvlnění výsledného povrchu a pro co nejlepší návar by měl být použit přední přísun. [7]

Dalším důležitým parametrem je bod, do kterého je přiváděn materiál. Zatímco pro materiál ve formě prášku, nemá bod, do kterého je materiál přiváděn, žádný vliv na kvalitu návaru, tak pro drátové technologie tento parametr může značně ovlivnit kvalitu výsledného návaru. Pokud je drát veden do středu nebo zadní části taveniny je dosahováno o dost nižší kvality návaru než pro směřování drátu do vedoucího bodu taveniny. [7]

Úhel, pod kterým je drát do taveniny směřován je také podstatný, zatímco pro práškové technologie úhel nijak neovlivňuje kvalitu návaru, tak pro drátové technologie se jedná o kritickou složku nastavení stroje. Rozsah pro souvislý návar u předního přísunu je limitován na  $\alpha = 10 - 75^\circ$  a pro zadní přísun  $\alpha = 105 - 170^\circ$ . Pokud je drát přisouvám pod hodně malým úhlem, dojde ke zdvihnutí drátu po ztuhnutí taveniny a tedy k přerušení souvislého navařování. Pro úhly větší než  $60^\circ$  dochází k zvětšenému zvlnění, které může vést až k nerovnoměrnému nebo přerušovanému návaru. Zařízení, které vytváří návary pro tuto práci, pracuje s úhlem sklonu  $30^\circ$ . [7]

Výsledné vlastnosti navařeného materiálu se pro jednotlivé technologie také odlišují. Drátové technologie dosahují drsnosti  $40 - 60 \mu\text{m}$  (Ra), zatímco průměrná drsnost povrchu práškové metody je  $70-90 \mu\text{m}$  (Ra), což je o 20-30% vyšší. Na povrchu práškových návary také ulpívají částečně roztavené částice prášku. [7]

Z hlediska mikrostrukturního a morfologického mezi návary vytvořenými drátovou a práškovou metodou nejsou žádné zásadní rozdíly. Zkoumání prášku, drátu a návary pomocí rentgenové difrakce neukazuje žádné změny v elementárním složení, vzorky zůstávají v austenitické fázi. Mikrostruktura je dendritická s velikostí buněk mezi  $2$  a  $15 \mu\text{m}$ . Zrno materiálu je u podkladového materiálu jemnější a při postupu návarem vzhůru zrno hrubne. Toto by se dalo přisoudit rapidnějšímu chladnutí materiálu u spodních vrstev v důsledku navařování na chladný povrch, při pokládání dalších vrstev se proces chladnutí zpomaluje a dochází k růstu hrubšího zrna. [7]

## 4.7 Shrnutí

V úvodní části práce byly shrnuty základní informace ohledně obrobitelnosti materiálu, a jakým způsobem ji nejlépe vyhodnotit. Ve druhé části rešerše byly rozepsány informace o historii a vývoji jednotlivých technologií 3D tisku a dále byly blíže rozebrány technologie kovového tisku.

Z informací zpracovaných v rešerši bylo zjištěno, že kovové návary vytvořené pomocí 3D tisku mohou mít ve svém průběhu různorodé vlastnosti. Největší vliv na obrobitelnost má tvrdost obráběného materiálu, protože čím větší je tvrdost obráběného materiálu, tím větší jsou jeho abrazivní schopnosti a dochází k rychlejšímu opotřebování břitů. Vzhledem k tomu, že jsou návary v této práci vytvářeny vrstvou po vrstvě, dá se očekávat, že tvrdost se v průběhu jednotlivých vrstev bude měnit, což



by mohlo mít zásadní vliv na jejich obrobitelnost. Aby bylo zjištěno, jak se v rámci návaru mění tvrdost, bylo rozhodnuto, že se v experimentální části této práce vytvoří vzorky, pro které se podrobně zjistí průběh tvrdosti. A na základě zjištěné tvrdosti bude možné určit obrobitelnost navařeného materiálu.

## 5 Nastavení experimentu

### 5.1 Technologie navařování

Pro technologie navařování laserem je používán pevnolátkový laser JK 701H Lumonics. Tento laserový zdroj je instalován na 3-osém stroji od firmy Sitec. Stroj s laserem jsou na Obr.10 a v Tab.3 jsou zaznamenány jeho parametry.

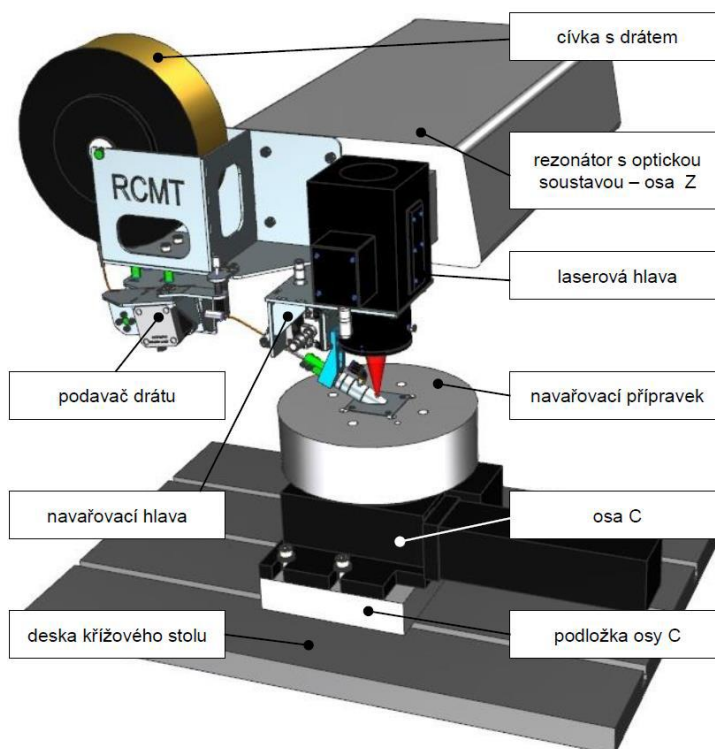


Obr. 10: 3-osý stroj od Firmy Sitec s laserem JK 701H Lumonics

Tab.3: Technické parametry laseru JK 701H

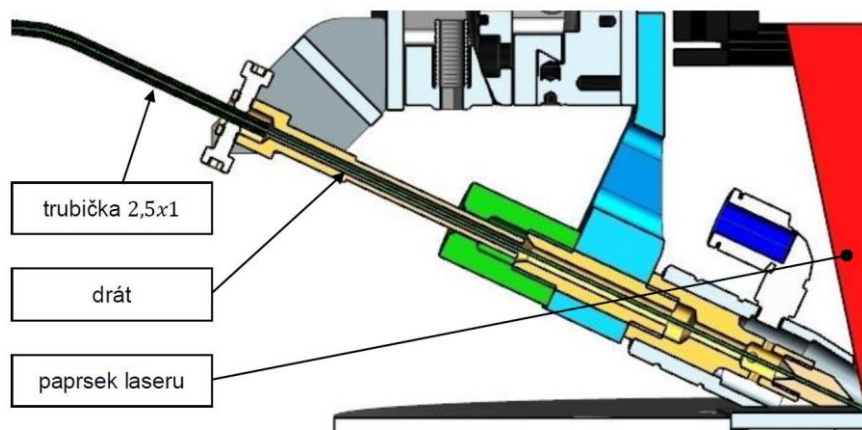
Druh laseru, aktivní prostředí	Pevnolátkový, ND:YAG
Vlnová délka [nm]	1064
Výstupní výkon [W]	550
Energie pulsu [J]	0,1 – 70
Šířka pulsu [ms]	0,5 – 20
Frekvence [Hz]	0,2 – 500
Ohnisková vzdálenost [mm]	80, 120, 200
Technologické použití	Svařování, řezání, vrtání, navařování

Nezbytnou součástí navařování pomocí drátu je kladecí hlava, která zajišťuje přidávání materiálu do místa navařování v součinnosti s řízením laseru. Jedná se o řešení hlavy s automatickým bočním podáváním drátu, model na Obr.11. Navařovací hlava dopraví drát ze zásobníku do fokusovaného laserového paprsku, kde je nataven a následně navařen na tisknutý díl. Křížový stůl laseru zajišťuje lineární návary v ose X a Y. Rotační osa C slouží k navařování rotačně symetrických dílů. Posuv v ose Z zajišťuje laserová hlava. [10]



Obr. 11: Model navařovací hlavy [10]

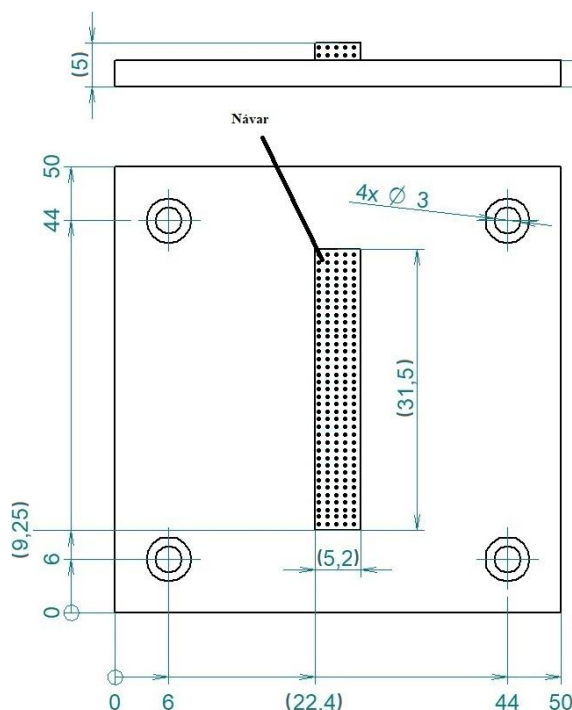
Pro co nejlepší kvalitu navařování je nutné dodržet správné nastavení místa: ohnisko laserového paprsku – drát. Nejvhodnější nastavení, použito pro navařování v této práci, je takové, při kterém je fokusovací čočka zaostřená na špičku drátu, přičemž drát se musí nacházet na v pozici, kde vždy skončí po navařování. Navařování drátu probíhá v ochranné atmosféře při konstantním tlaku 1 bar. Řešení průchodu drátu navařovací hlavou je vyobrazeno na Obr.12. [10]



Obr. 12: Řez navařovací hlavou [10]

## 5.2 Vzorky

Vzorky pro tuto práci jsou kovové destičky, na kterých je vytvořen návar pomocí technologie popsané v kapitole 5.1. Materiál základní destičky pro ocelové návary je z oceli ČSN 11 373, materiál destičky pro návary z korozivzdorné oceli je z materiálu ČSN 17 240. Základní rozměry všech vzorků jsou uvedeny na Obr.13.



Obr.13: Rozměry vzorků

Základní destičky byly vypáleny pomocí vodního paprsku, takže jejich rozměry jsou shodné pro všechny vzorky. Rozměry navařovaného materiálu jsou uvedené jako teoretické, protože jejich hodnota se pro každý vzorek odlišuje v rámci

desetin mm. Tato práce se zaměřuje na obrobiteľnosť návarového materiálu, ktorou rozměrové rozdíly nijak neovlivní. Na Obr.14 je fotografie vzorku.



Obr.14: Fotografie vzorku

## 6 Měření tvrdosti zkušebních návarů

### 6.1 Metodika měření

Zkoušky tvrdosti se dělí do tří skupin: statické, dynamické a zkoušky vrypem. Nejčastěji používané jsou zkoušky statické, během kterých vnikací těleso z tvrdého materiálu (diamant, ocel apod.) působí pod konstantním zatížením po určitou dobu na povrch vzorku, kde vytvoří trvalou deformaci. Nejvíce používané metody jsou Brinellova, Rockwellova a Vickersova. Odlišnosti těchto metod jsou ve tvaru vnikacího tělesa.

Všechna měření tvrdosti v této práci budou vyhotovena na přístroji SHIMADZU HVM-2T na Obr.13.



Obr. 15: Mikrotvrdoměr SHIMADZU HMV-2T

Tento tvrdoměr je konstruován pro statickou metodu měření, je možné zvolit 9 různých velikostí zatěžovacích sil, které jsou závislé na hmotnosti závaží: 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g, 1000 g, 2000 g.

Tvrdoměr umožňuje měření metodami podle Vickerse, Knoop, Brinella nebo Berkovic.

## 6.2 Parametry měření

Pro měření tvrdosti v této práci byla zvolena metoda podle Vickerse. Tvrdost měřená podle Vickerse je odvozena z velikosti zatěžovací síly působící na vnikací těleso (diamantový hrot ve tvaru jehlanu o vrcholovém úhlu 136°) a plochy tisku na povrchu zkušebního tělesa. Získaná hodnota tvrdosti je bezrozměrné číslo, ke kterému se připojí označení HV s údajem o velikosti zatěžovací síly. Princip zkoušky podle Vickerse je na Obr. 14 [13]. Vzorec pro výpočet tvrdosti:

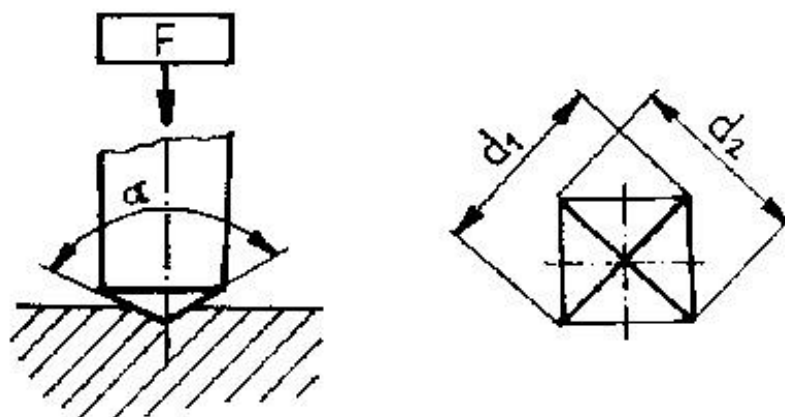
$$HV = 0,1891 \times F/d^2 \quad (2)$$

Kde

HV.....tvrdost podle Vickerse

F.....zatěžovací síla F

d.....střední hodnota délky úhlopříček v mm



Obr. 16: Princip zkoušky podle Vickerse [13]

Pro všechna měření tvrdosti byly nastaveny tyto parametry:

- 1) zkušební zatížení = 9,807N (HV1),
- 2) zatěžovací jednotka = automatický výběr závaží, automatické zatěžování a odlehčování,
- 3) doba působení zatěžovací síly = 10s,
- 4) vnikací těleso = čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ ,
- 5) měřicí mikroskop = objektiv 40x, okulár 10x (režim pozorování okulárem nebo snímání kamerou),
- 6) optické vyhodnocení = oboustranně kolimační metoda s optickým encoderem, efektivní měřicí rozsah  $250\mu\text{m}$  (objektiv 40x),
- 7) pracovní stůl = 120 x 120 mm,
- 8) výška zkoušeného vzorku = maximální výška 100 mm, maximální hloubka 140 mm.

### 6.3 Zkušební vzorky

V kapitole 5.2 již byly uvedeny základní rozměry vzorků a materiál podkladových destiček. Celkově pro tuto práci bylo vytvořeno 6 vzorků uvedených v Tab.4. Návarový materiál vzorků 1-3 je drát Autrod12.51 o průměru 0,6mm (chemické složení: C 0,06-0,14%; Si 0,7-1,00%; Mn 1,3-1,6%; P 0,025% a S 0,025 %). Návarový materiál vzorků 4-6 je korozivzdorný drát V2A – 304 o průměru 0,6mm (chemické složení: C 0,08%; Cr 18-20%; Mn 2%; Ni 8-10,5%; Si 1%) Tyto materiály

byly zvoleny, protože to jsou jedny z nejvíce zastoupených materiálů ve strojírenské výrobě a jejich důkladné zdokumentování by mělo největší potenciál pro reálné aplikace.

Tab.4: Seznam vzorků

Označení vzorku	Materiál	Počet návarů	Rozteč housenek	Měření tvrdosti
Vzorek 1	Ocel – Autrod 12.51	6x3	0,7x0,6	Ano
Vzorek 2	Ocel – Autrod 12.51	6x3	0,7x0,6	Ano
Vzorek 3	Ocel – Autrod 12.51	5x3	0,8x0,6	Ne
Vzorek 4	Korozivzdorná ocel – V2A - 304	6x3	0,7x0,6	Ano
Vzorek 5	Korozivzdorná ocel – V2A - 304	6x3	0,7x0,6	Ano
Vzorek 6	Korozivzdorná ocel – V2A - 304	5x3	0,8x0,6	Ne

Protože návary na vzorcích 3 a 6 byly vytvořeny jiným množstvím návarů a odlišnou roztečí housenek, bylo rozhodnuto, že se měření tvrdosti bude provádět pouze na shodných vzorcích, aby se mohla ověřit opakovatelnost měření.

## 6.4 Postup měření

Pro získání co nejlepší představy o průběhu tvrdosti v návaru, bylo rozhodnuto, že se bude měřit tvrdost povrchu návaru bez opracování, tvrdost povrchu návaru po očištění tryskáním a dále ve vrstvách vytvořených na frézce pomocí stopkové frézy v různých hloubkách návaru.

### 6.4.1 Měření vzorků z běžné oceli

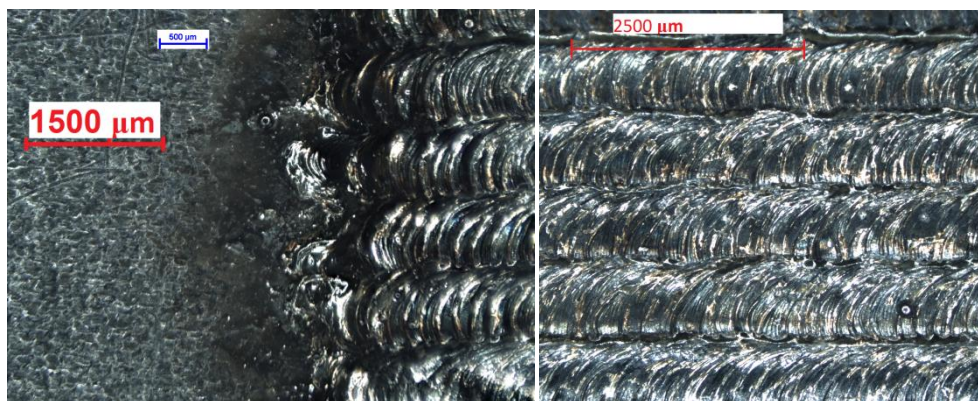
Z důvodu nedostatečného rozevření svěráku mikrotvrdoměru pro destičky, musela být u prvních měřených vzorků provedena korekce šířky, aby se daly upnout. Tato úprava byla provedena pomocí ruční pilky na kov a vzhled vzorku po úpravě je na Obr.17. Tato úprava žádným způsobem tepelně ani strukturně neovlivňuje vzorek a nevnese odchylky do navazujících měření. Šířka vzorku před úpravou byla 50 mm, po úpravě 33 mm. Aby se destička v průběhu měření na mikrotvrdoměru neprohýbala, byla podepřena kovovými hranoly.



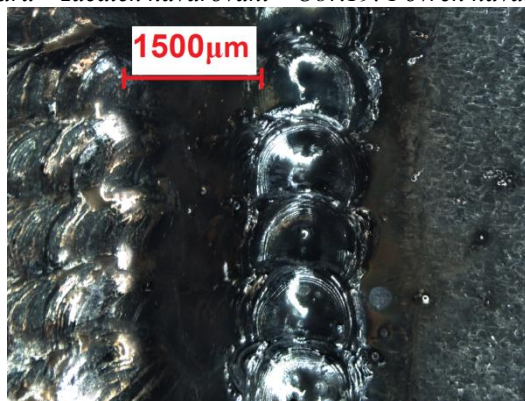


Obr17: Upravená šířka vzorku

Během měření tvrdosti, se vyskytnuly obtíže s hledáním rovných ploch pro vytvoření vtisků, na kterých by se dala korektně odečíst tvrdost. Pro získání lepší představy o povrchu návaru, byl povrch nafocen na mikroskopu, tyto fotografie jsou na Obr.18, Obr.19 a Obr.20.



Obr.18: Povrch návaru – začátek navařování Obr.19: Povrch návaru – střed navařování



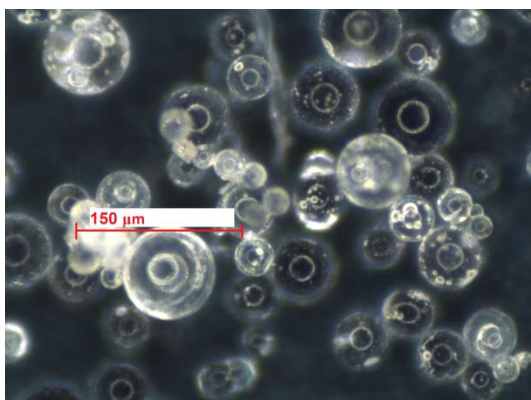
Obr.20: Povrch návaru – konec navařování

Z Obr.18-20 je vidět, že povrch návarů není vůbec rovný. Na snímcích je vidět velická vlnitost povrchu, odlišnosti ve zbarvení povrchu, což by mohly být odlišné struktury vyloučené na povrchu návaru a drobné nečistoty. Aby se podařilo naměřit dostatečné množství korektních vtisků, musel být prohledán celý povrch návaru,

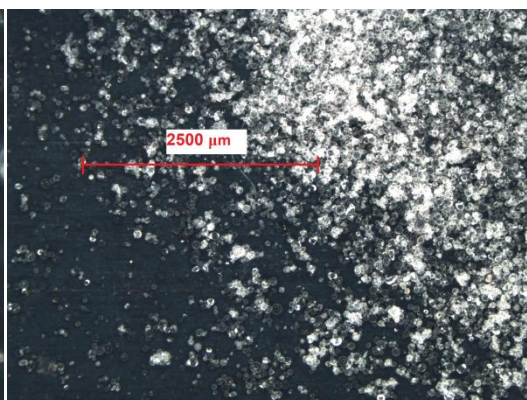


protože nerovnosti povrchu komplikovaly hledání rovných míst. Některé vtisky se kvůli kvalitě povrchu zdeformovaly a museli být vyřazeny ze souboru naměřených hodnot. Všechny naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulkách v příloze na konci této práce.

Po naměření hodnot tvrdosti na povrchu návaru, byl povrch upraven tryskáním, aby se zjistilo, zda se tryskáním neodstraní povrchové nečistoty a struktury. A také jak se tryskáním ovlivní povrchová tvrdost návaru. Náplň, kterou byly vzorky tryskány, je na Obr.21 a Obr.22.

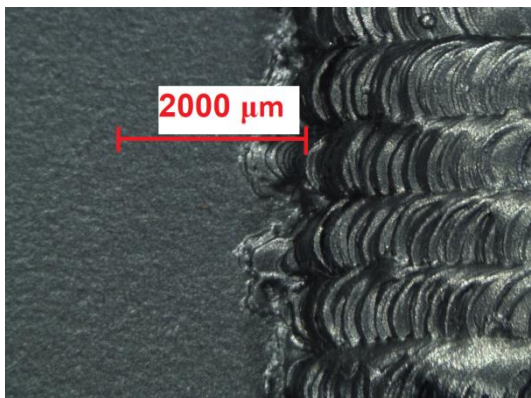


Obr.21: Tryskání - náplň

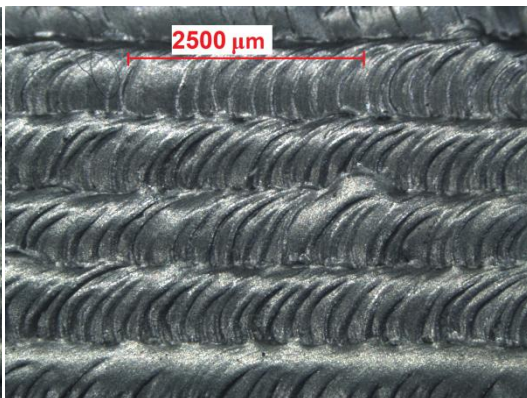


Obr.22: Tryskání – náplň

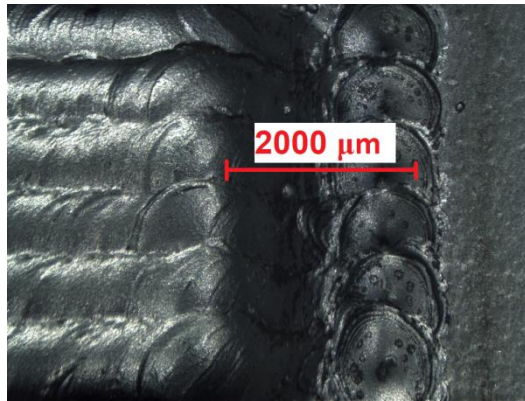
Tryskáním vzorků se zlepšily podmínky pro měření tvrdosti, na mikroskopu mikrotvrdoměru se snáze hledaly plochy pro umístění vtisků. Po tryskání návaru byl povrch opět nafocen na mikroskopu, aby se zjistilo, jak se změní povrchová struktura a zda se tryskáním odstraní nečistoty. Na Obr.23, Obr. 24 a Obr. 25 jsou fotografie tryskaného povrchu. Je vidět, že tryskáním se odstranily všechny vtisky z předchozího měření tvrdosti. Z Obr.21 a Obr.22 je vidět, že se nejedná o vysoce abrazivní směs, ale je dostačující na očištění povrchu a odstranění původních vtisků.



Obr.23: Tryskaný povrch – začátek navařování



Obr.24: Tryskaný povrch – střed navařování



Obr.25: Tryskaný povrch – konec navařování

Dalším krokem při zjišťování tvrdosti, bylo zjistit, jak se mění tvrdost v návaru směrem od podkladové destičky až po povrch samotného návaru. Pro zjištění tohoto průběhu, bylo rozhodnuto, že se provede vytvoření zkušebních úběrů pomocí stopkové frézy na každém návaru. Zároveň se tímto měřením ověří, jak se mění tvrdost návaru v průběhu obrábění, protože některé materiály jsou náchylné ke zvyšování tvrdosti během obrábění. Pro obsazení různých hloubek byly vytvořeny na návaru stupňovité úběry materiálu. Náskres obrábění a rozměry stupňů jsou na Obr.27. Nástroj použitý pro obrábění ocelových vzorků byla stopková fréza  $\varnothing 10$ . Fotografie frézy na Obr.26. Obrobení bylo provedeno na frézce FNGJ 32.

**Řezné podmínky:**

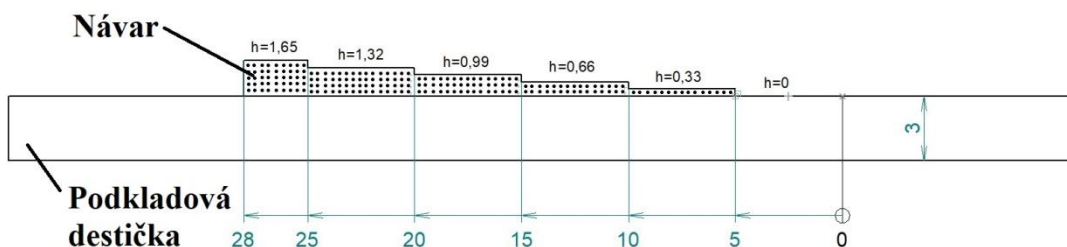
$f = 50 \text{ mm/min}$

$N = 200 \text{ ot/min}$

$v_c = 1,57 \text{ m/min}$

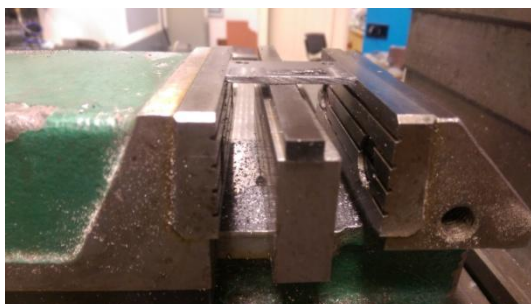


Obr.26: Stopková fréza  $\varnothing 10$

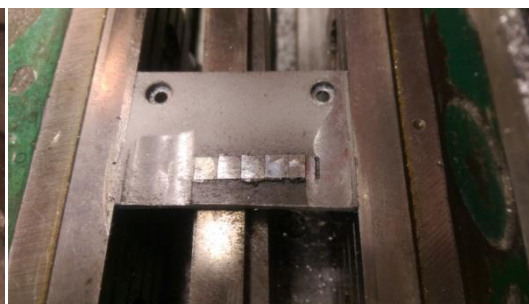


Obr.27: Rozměry stupňů

Na dalších obrázcích Obr.28 a Obr.29 je vyfoceno uchycení vzorku ve stroji a vzhled stupňů po obrobení.

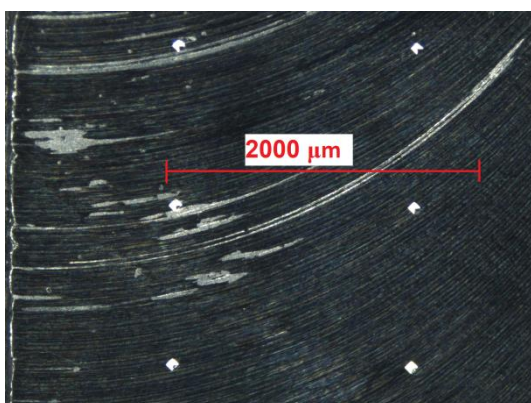


Obr.28: Upnutí vzorku

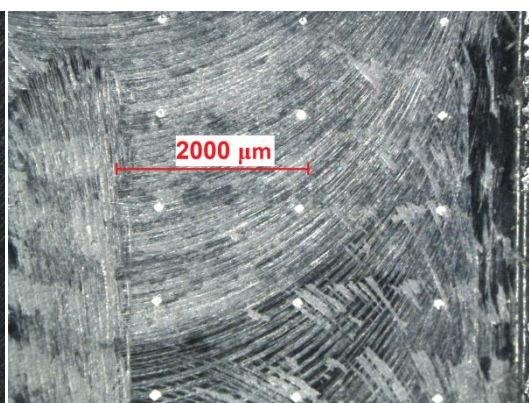


Obr.29: Vzorek – stupně

Pro každý stupeň vytvořený frézováním byla následně změřena tvrdost, zároveň s tím byla změřena i tvrdost podkladové destičky v nulové hloubce návaru v místě obrábění a tvrdost podkladové destičky mimo obráběnou plochu. Tato měření byla provedena, aby se zjistilo, jak se navařením a obrobením ovlivní materiál podkladové destičky. Na dalších obrázcích jsou snímky obrobených ploch, na kterých jsou vidět vtisky z mikrotvrdoměru, vyfocené na mikroskopu. Na Obr.30 je snímek obrobené plochy návaru ve výšce 0,66 mm nad podkladovou destičkou. Na Obr.31 je plocha v hloubce 0 mm, čili na rozmezí podkladové destičky a samotného návaru.



Obr.30: Obrobená plocha – výška 0,66 mm



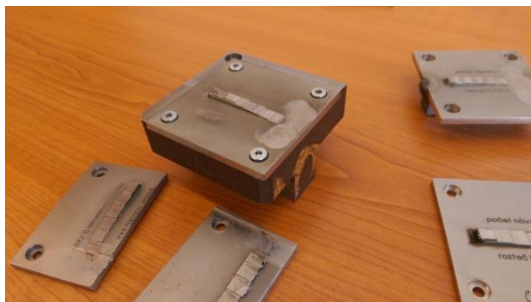
Obr.31: Obrobená plocha – výška 0 mm

#### 6.4.2 Přípravek na upínání vzorků

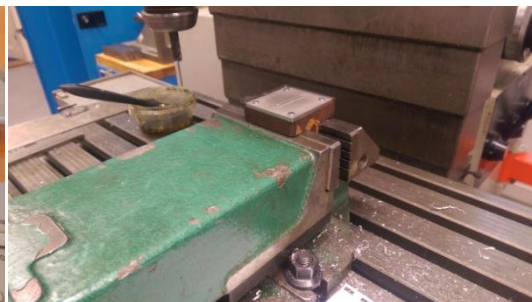
Během práce s prvními vzorky, se musely všechny vzorky ručně zužovat a komplikovaně upínat do frézy a mikrotvrdoměru. Aby se tento proces zlehčil a uspořil se čas strávený upínáním, bylo rozhodnuto o vytvoření upínacího přípravku. Do tohoto přípravku by se měl upnout vzorek a následně by měl jít v přípravku snadno upnout jak do frézy tak do mikrotvrdoměru. Požadavky na přípravek byly, přesnost upnutí, opakovatelnost upnutí, pevnost upnutí. Je totiž očekáváno, že vzorek bude namáhán silami při obrábění a zároveň namáhán zatížením při vytváření vtisků na



mikrotvrdoměru. Na obrázcích Obr.32 a Obr.33 jsou fotografie přípravku mimo stroj a upnutého ve stroji.



Obr.32: Přípravek



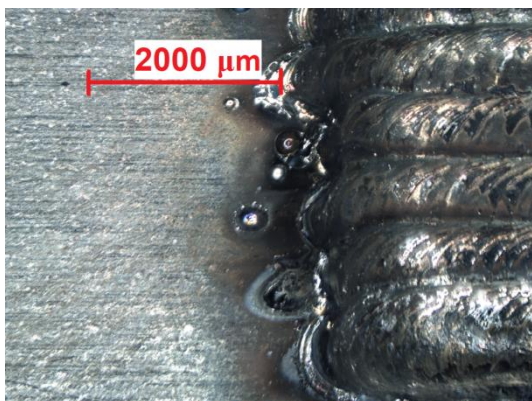
Obr.33: Přípravek ve stroji

### 6.4.3 Měření vzorků z korozivzdorné oceli

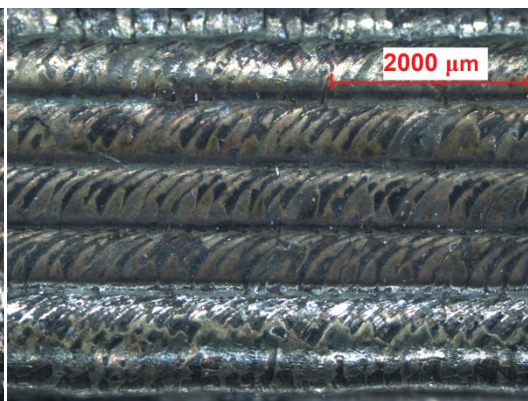
Všechny vzorky z korozivzdorné oceli se měli měřit stejným postupem jako vzorky z normální oceli, ale mezi měřeními jednotlivých vzorků byla větší časová mezera a z níže popsaných důvodů se musel upravit postup měření a vyhodnocování.

První měřený korozivzdorný vzorek byl vzorek číslo 4. V okamžiku měření tohoto vzorku ještě nebyl přípravek pro upínání a zkoušely se různé varianty řešení upnutí. Pro vzorek 4 se udělalo experimentální navaření ocelového hranolu 10x10x30 na spodní stranu podkladové destičky a upínání za tento hranol. Ale už při navaření se zjistilo, že se vytváří poměrně velká tepelně ovlivněná oblast svaru, kterými byl hranol přivařen. Zároveň došlo k lehkému prohnutí podkladové destičky kvůli pnutí od svarů.

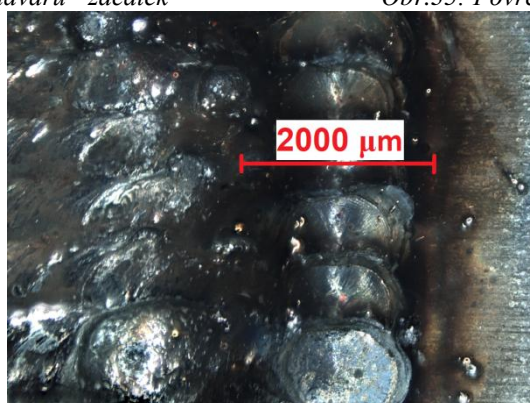
Na obrázcích Obr.34, Obr.35 a Obr.36 jsou fotografie z mikroskopu před navařením hranolu, na obrázcích Obr.37 a Obr.38 jsou fotografie okrajů svaru a destičky, na kterých je vidět tepelně ovlivněná oblast. Po bližším prozkoumání bylo zjištěno, že tepelně ovlivněná oblast je mimo oblast svařování, takže měření tvrdosti nebudou ovlivněna. Ale kvůli riziku tepelného ovlivnění a pnutí, které by potenciálně mohlo způsobit navařování na další destičky, se učinilo rozhodnutí pro výrobu přípravku na upínání, který je popsán v kapitole 5.4.2.



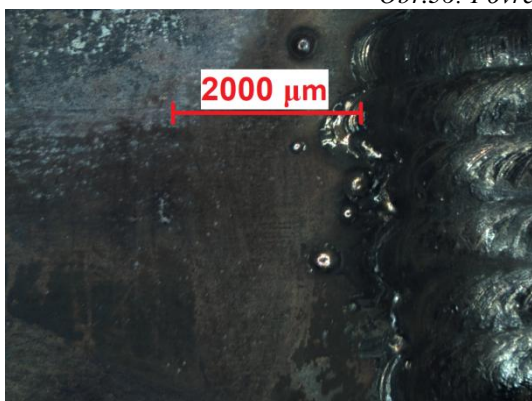
Obr.34: Povrch návaru - začátek



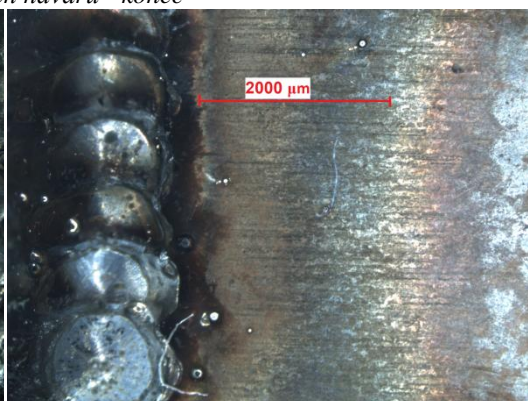
Obr.35: Povrch návaru - střed



Obr.36: Povrch návaru - konec



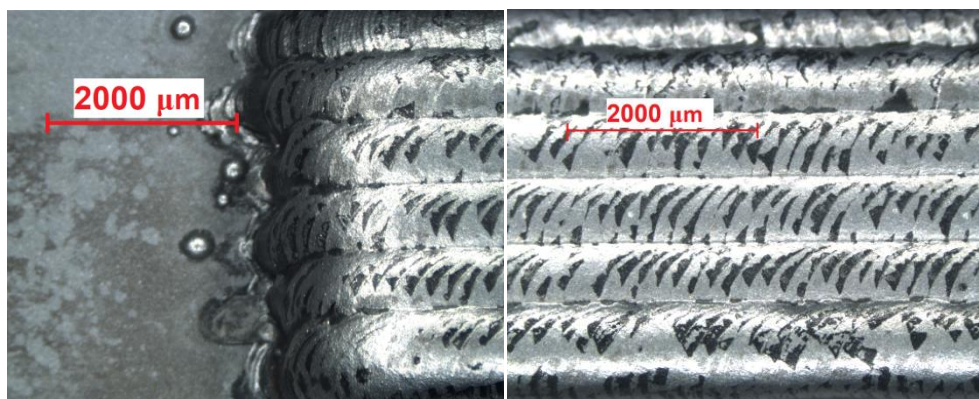
Obr.37: Začátek návaru po navaření



Obr.38: Konec návaru po navaření

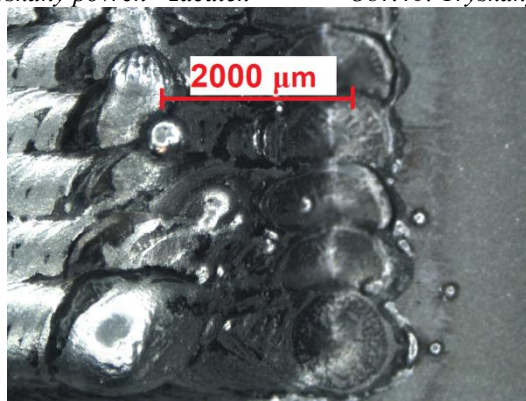
Jak je vidět na obrázcích Obr.34-38 povrchová struktura návaru z korozivzdorné oceli má odlišnou strukturu než návary z běžné oceli. Toto se potvrdilo i při upnutí do mikrotvrdoměru a zároveň se ukázalo, že měření tvrdosti bude značně problematické. Na povrchu návaru byly struktury různých barev, a při pokusu o udělení vtisku pro změření tvrdosti se prolomila povrchová vrstva a vtisk se zdeformoval. To že na povrchu návaru je slabá křehká vrstva se potvrdilo i u vzorku číslo 5, který měl úplně stejné vlastnosti. Hodnoty se nakonec podařilo naměřit po důkladném hledání bodů pro měření a opakovaném měření nepovedených vtisků.

Dalším krokem bylo tryskání vzorku, od kterého se předpokládalo, že odstraní vrstvu, která se při prvním měření prolamovala a podaří se udělat kvalitní měření tvrdosti. Povrchová vrstva se tryskáním opravdu odstranila a podařilo se udělat kvalitní měření. Na obrázcích Obr.39, Obr.40 a Obr.41 jsou fotky tryskaného vzorku.



Obr.39: Tryskaný povrch - začátek

Obr.40: Tryskaný povrch - střed

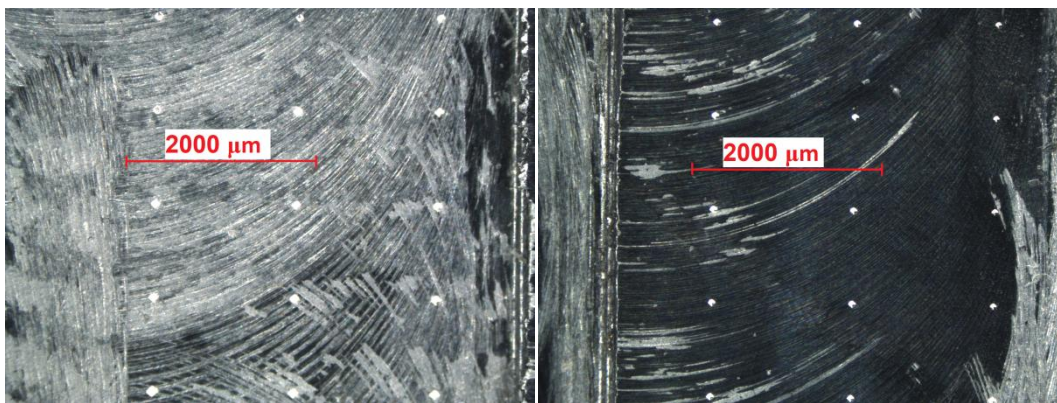


Obr.41: Tryskaný povrch – konec

Stejný postup tryskání a měření tvrdosti se měl udělat i pro vzorek číslo 5, ale někdo nedopatřením vyhodil náplň na tryskání a nahradil jí korundem, což se zjistilo až po tryskání pátého vzorku. Tento problém odhalil, že výměnou náplně na tryskání se zásadně změnila naměřená povrchová tvrdost návaru. Zároveň byl povrch po tryskání korundem značně poškozený a bylo velice obtížné změřit tvrdost. Zatímco pro vzorek 4 tryskaný původní náplní byla průměrná tvrdost povrchu 308,9 HV1, tak pro vzorek 5 tryskaný korundem byla průměrná tvrdost 391,3 HV1.

Dále se postupovalo stejně jako u ocelových vzorků, vzorek 4 se přes hranol upnul do frézky a obrobil za shodných řezných podmínek jako předchozí vzorky. Na vzorku 4 bylo vytvořeno odstupňování stejné jako na ocelových vzorcích. Na těchto stupních byla následně změřena tvrdost. Na obrázcích Obr.42 a Obr.43 jsou fotografie z mikroskopu dvou obroběných ploch se vtisky z mikrotvrdoměru.





Obr.42: Obrobená plocha – výška 0

Obr.43: Obrobená plocha – výška 0,66

Před začátkem obrábění vzorku 5, se zjistilo, že původní nástroj byl někým použit pro obrábění a má poškozené zuby, takže nebyl použitelný pro tento experiment. Poněvadž nebyl dostupný stejný nástroj, jaký se použil pro předchozí vzorky, musel se vybrat nástroj jiný. Opět se jednalo o stopkovou frézu  $\varnothing 10$ . Odlišností vůči původnímu nástroji bylo větší množství břitů. Řezné podmínky se zachovaly shodné jako u prvního nástroje.

Pro všechny korozivzdorné vzorky se opět změřila tvrdost podkladové destičky v místě návaru a mimo návar, aby bylo zjištěno, jak se ovlivní tvrdost navařováním a obráběním.

## 6.5 Zpracování naměřených hodnot

Pro vytvoření dostatečně velkého souboru hodnot pro zpracování, bylo rozhodnuto, že pro každou měřenou veličinu bude naměřeno 15 hodnot. Tyto hodnoty byly následně vyhodnoceny vytvořením průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a rozptylu.

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulkách v příloze na konci práce.

### 6.5.1 Zpracování a vyhodnocení vzorků z oceli

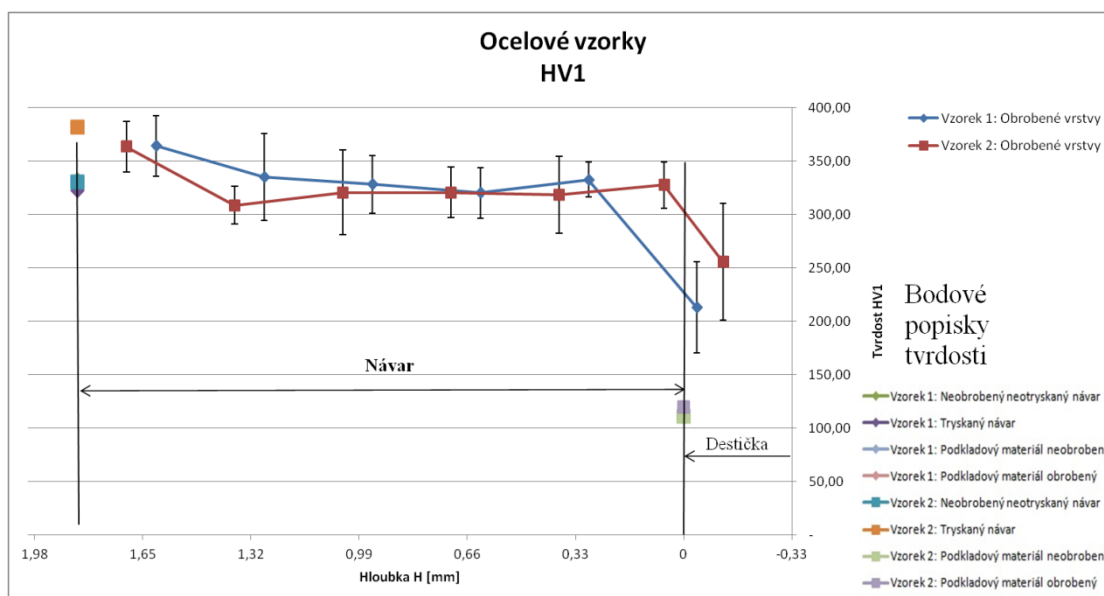
Zpracované soubory hodnot jsou sjednoceny pro přehlednost do tabulek, jedná se o Tab.5 a Tab.6. V Tab.6 jsou zaznamenány jiné hodnoty hloubky než u Tab.5, tento rozdíl je způsoben nepřesností upnutí, která zapříčinila prohnutí destiček při obrábění. Hodnoty hloubky byly zkorigovány pomocí digitálního hloubkoměru, aby odpovídaly reálné hodnotě. Následně byl z těchto hodnot vytvořen Graf 1, který znázorňuje tvrdost návaru v závislosti na hloubce. V grafu jsou hodnoty pro oba vzorky, pro porovnání opakovatelnosti měření.

Tab.5: Vzorek 1

Vzorek 1 - tabulka hodnot HV1			
	Průměrná hodnota	Sm.Odchylka	Rozptyl
<b>Povrch návaru [HV1]</b>	332,2	59,6	3551,8
<b>Tryskaný povrch[HV1]</b>	322,3	26,9	724,2
<b>H=1,61mm[HV1]</b>	364,2	28,4	803,9
<b>H=1,28mm[HV1]</b>	335,1	40,9	1670,6
<b>H=0,95mm[HV1]</b>	328,1	26,9	721,3
<b>H=0,62mm[HV1]</b>	320,2	23,7	563,2
<b>H=0,29mm[HV1]</b>	332,5	16,3	267,1
<b>H=-0,04mm[HV1]</b>	213	42,4	1799,5

Tab.6: Vzorek 2

Vzorek 2 - Tabulka hodnot HV1			
	Průměrná hodnota	Sm.Odchylka	Rozptyl
<b>Povrch návaru[HV1]</b>	330,3	19,9	395
<b>Tryskaný povrch[HV1]</b>	381,9	35,6	1270
<b>H=1,7mm[HV1]</b>	363,3	23,5	550,6
<b>H=1,37mm[HV1]</b>	308,5	17,7	313,3
<b>H=1,04mm[HV1]</b>	320,7	39,4	1550,1
<b>H=0,71mm[HV1]</b>	320,7	23,9	569,3
<b>H=0,38mm[HV1]</b>	318,5	36	1296,5
<b>H=0,06mm[HV1]</b>	327,4	21,9	481,3
<b>H=-0,12mm[HV1]</b>	255,7	54,7	2997,3



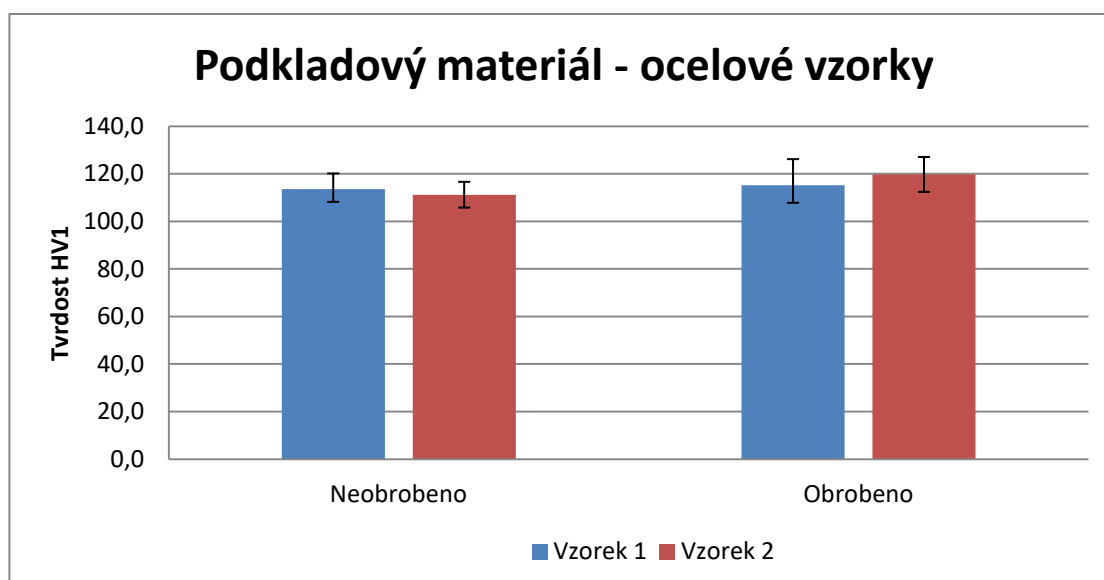
Graf 1: Závislost tvrdosti na hloubce obrobení návaru

Z tabulek a grafů je vidět, že nejtvrďší částí návaru z běžné oceli je povrchová vrstva očištěná tryskáním. To by mohlo být zapříčiněno rychlostí chlazení materiálu ve vrchní části, protože poslední housenka je v kontaktu se vzduchem a není do ní



vnášeno teplo přes další housenku. Ve střední části návaru je tvrdost obou vzorků shodná a téměř konstantní, k další změně dochází až u podkladového materiálu, kde tvrdost lehce vzrůstá a poté prudce klesá. Nárůst tvrdosti v blízkosti podkladové destičky se může přisoudit rapidnějšímu chladnutí, kdy je materiál návaru ochlazován jak vzduchem, tak destičkou. Následný pokles tvrdosti je způsoben zásahem měření do podkladového materiálu. Je pravděpodobné, že na rozmezí podkladu a návaru se materiál destičky roztavuje a znovu tuhne, čímž stoupá tvrdost.

Některé materiály mají tendenci zvyšovat svou tvrdost při obrábění. Aby se tato skutečnost ověřila, udělalo se měření tvrdosti podkladové destičky v místě, kde bylo obráběno, ale nebyl zde navařován materiál a v místě kde nebylo obráběno. Porovnání těchto hodnot je v Graf 2, a je na nich vidět že u běžné oceli nedochází k vytvrzování v průběhu obrábění.



Graf 2: Porovnání tvrdosti obrobene a neobrobene podkladové destičky

### 6.5.2 Zpracování a vyhodnocení vzorků z korozivzdorné oceli

Naměřené hodnoty vzorků z korozivzdorné oceli jsou stejně jako vzorky z oceli zpracovány do tabulek a grafů. V Tab.8 a Tab.9 jsou zapsány hodnoty pro vzorky 4 a 5. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.4.3, na vzorek 4 byl navařen kovový hranol pro snadnější upínání do frézky a mikrotvrdoměru, ale vzorek se tím zdeformoval a opět pro hodnoty hloubky musela být provedena korekce pomocí digitálního hloubkoměru. Pro vzorek 5 už byl vyroben upínací přípravek a jeho správná funkce se potvrdila během obrábění, protože hodnoty hloubky přesně

odpovídaly nastaveným hodnotám a proto se nemusela dělat korekce. Z hodnot vypsaných v tabulkách byl následně vytvořen Graf 3.

Jak je vidět v tabulkách i grafu, tak hodnoty tvrdosti povrchu neobrobeného návaru jsou shodné a jejich rozdíl je v rámci směrodatné odchylky. Tato hodnota navíc byla obtížně měřitelná z důvodu lámavosti povrchové vrstvy. Zásadní rozdíl mezi vzorky 4 a 5 je v měření tvrdosti povrchu tryskaného návaru. Tento rozdíl vznikl pravděpodobně použitím jiné tryskací náplně pro vzorek 5.

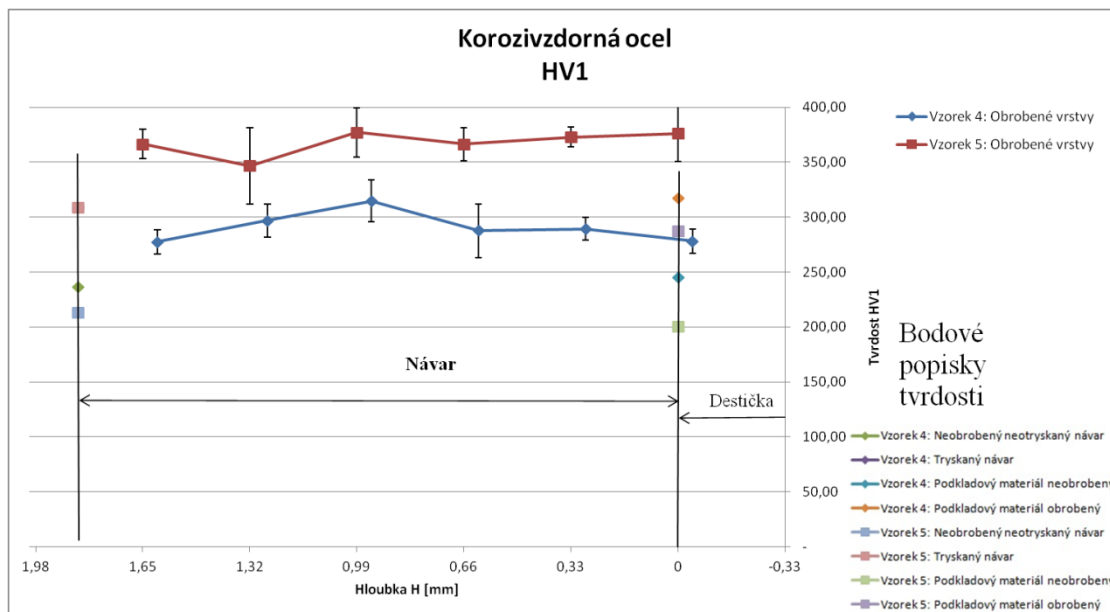
Další rozdíl je v rámci obráběných vrstev, kde jsou všechny hodnoty pro vzorek 5 vyšší než pro vzorek 4. Z grafu 3 je vidět, že růst a pokles tvrdosti návaru v závislosti na hloubce je pro oba vzorky přibližně stejný, ale všechny hodnoty vzorku 5 jsou přibližně o 20% vyšší než pro vzorek 4. Jediným rozdílem mezi postupem obrábění těchto vzorků, byla změna obráběcího nástroje. Což by odpovídalo skutečnosti, že korozivzdorná ocel má tendenci zvyšovat svou tvrdost v průběhu obrábění a tato vlastnost je závislá na tvaru použitého nástroje.

Tab.7: Vzorek 4

<b>Vzorek 4 - Tabulka hodnot HV1</b>			
	Průměrná hodnota	Sm.Odchylka	Rozptyl
<b>Povrch návaru [HV1]</b>	236,5	20,6	422,6
<b>Tryskaný povrch [HV1]</b>	308,9	24,2	588,1
<b>H=1,605 mm [HV1]</b>	277,6	11,2	125,7
<b>H=1,265 mm [HV1]</b>	297,0	15,1	226,8
<b>H=0,945 mm [HV1]</b>	314,9	18,9	356,2
<b>H=0,615 mm [HV1]</b>	287,7	24,4	595,8
<b>H=0,285 mm [HV1]</b>	289,4	10,5	110,2
<b>H=-0,045 mm [HV1]</b>	278,2	11,1	124,3

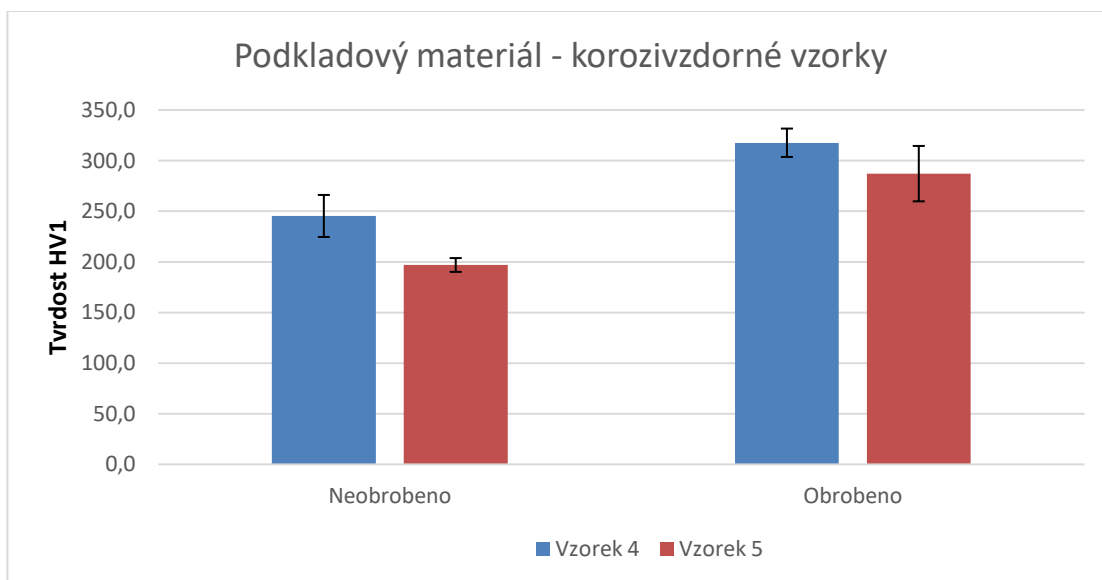
Tab.8: Vzorek 5

<b>Vzorek 5 - Tabulka hodnot HV1</b>			
	Průměrná hodnota	Sm.Odchylka	Rozptyl
<b>Povrch návaru [HV1]</b>	213,4	7,1	49,8
<b>Tryskaný povrch [HV1]</b>	391,3	49,4	2444,8
<b>H=1,65 mm [HV1]</b>	366,5	13,4	180,6
<b>H=1,32 mm [HV1]</b>	346,7	34,7	1207,3
<b>H=0,99 mm [HV1]</b>	377,2	22,2	494,3
<b>H=0,66 mm [HV1]</b>	366,5	15,1	226,6
<b>H=0,33 mm [HV1]</b>	372,9	9	81,7
<b>H=0 mm [HV1]</b>	375,9	25,4	647,7



Graf 3: Závislost tvrdosti na hĺoubce obrobení návaru

Pro potvrzení růstu tvrdosti materiálu během obrábění, byly změřeny hodnoty tvrdosti podkladového materiálu mimo oblast návaru, kde bylo obráběno a v místě kde nebylo obráběno. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu 4.



Graf 4: Porovnání tvrdosti obrobené a neobrobené podkladové destičky

Z Grafu 4 je vidět, že pro vzorek 4 byla naměřena vyšší tvrdost destičky mimo oblast obrábění než pro vzorek 5. Tento rozdíl pravděpodobně vznikl navařením

upínacího hranolu na destičku. Z tohoto důvodu bylo uděláno měření na destičce vzorku 6, které vyšlo 197HV1. Což odpovídá tvrdosti destičky vzorku 5.

V pravých dvou sloupcích jsou vyneseny hodnoty tvrdosti podkladové destičky po obrobení, hodnoty jsou pro oba vzorky v rámci napočítané odchylky přibližně shodné, ale pro vzorek 4 byl proveden úběr materiálu do větší hloubky destičky než pro vzorek 5. Což by mohlo způsobit menší zvýšení tvrdosti u vzorku 5 a větší zvýšení tvrdosti pro vzorek 4.

## 6.6 Shrnutí

V kapitolách 5.4 a 5.5 byl popsán postup měření vzorků a jakým způsobem byly vyhodnoceny naměřené hodnoty. Vzorky byly ze dvou různých materiálů, jednalo se o jedny z nejběžnějších a nejvíce zastoupených ocelových materiálů ve strojírenské výrobě, jejichž rozšíření a běžnost byly jedny z hlavních důvodů pro použití, protože aplikovatelnost poznatků z měření v této práci by mohla mít široké využití.

### 6.6.1 Vzorky z oceli

Pro ocelové vzorky bylo zjištěno, že tvrdost návarů vytvořených pomocí drátového 3D tisku je nejvyšší na povrchu návaru po tryskání. Po odebrání svrchní části materiálu frézováním začíná tvrdost vůči tryskanému povrchu klesat. Ve střední části návaru se tvrdost návaru stabilizuje na nejnižší hodnotě a drží si relativně stabilní průběh až do blízkosti podkladové destičky, u které dochází k mírnému růstu tvrdosti. Tento průběh tvrdosti odpovídá rychlosti ochlazování navařeného materiálu v jednotlivých částech návaru. Měkčí povrchová vrstva bude ovlivněna struskou a nečistotami na povrchu, což způsobuje nižší tvrdost. Po tryskání má návar na povrchu nejvyšší tvrdost, což odpovídá rychlému chladnutí návaru vzhledem k přímému přístupu ke vzduchu a nevnášení tepla dalším navařováním. Nízká tvrdost střední části návaru je naopak způsobena pomalejším chladnutím návaru, z důvodu opakovaného vnášení tepla kladením jednotlivých housenek. Závěrečný nárůst tvrdosti u podkladové destičky je způsoben rapidnějším ochlazením prvních housenek o podkladový materiál.

Dále bylo provedeno ověření, zda má obrábění vliv na tvrdost navařovaného materiálu. Oba vzorky po obrobení vykazovaly stejnou tvrdost materiálu jako před obrobením, což odpovídá tomu, že běžná ocel má minimální tendenci zvyšovat svou tvrdost během obrábění.

Na základě průběhu tvrdosti v navařeném materiálu a zjištěních z rešeršní části o obrobiteľnosti vyplívá, že pro všechny budoucí ocelové návary, lze určit obrobiteľnost celého návaru odstraněním povrchové vrstvy materiálu a změřením tvrdosti, protože na tryskaném povrchu dosahuje návar nejvyšší tvrdosti.

### **6.6.2 Vzorky z korozivzdorné oceli**

Pro korozivzdorné vzorky bylo zjištěno, že měření tvrdosti je obtížnější než pro vzorky ocelové. Na povrchu těchto vzorků se vytváří malá vrstva křehkého materiálu, který se při pokusu o měření tvrdosti láme a komplikuje odečítání hodnoty tvrdosti. Tvrdost materiálu je nejnižší u povrchu návaru, tvrdost tryskaného návaru roste v závislosti na použité náplni. Následně tvrdost roste až do střední části návaru, odkud si drží konstantní průběh až po podkladový materiál. Dále se kvůli nutnosti použití jiného nástroje pro každý vzorek potvrdila tendence korozivzdorných ocelí ke změně tvrdosti v průběhu obrábění. Průběh tvrdosti návaru v závislosti na hloubce pro druhý nástroj měl stejný průběh, ale všechny hodnoty druhého vzorku byly přibližně o 20% vyšší.

## **7 Návrh technologie obrábění**

V závislosti na poznacích, které byly získány v předchozích kapitolách, bude v této kapitole zvolen vhodný nástroj pro obrábění daných materiálů a ověření zda je zvolená technologie vyhovující. Bude zvolen nástroj, který bude schopen obrábět oba materiály. Z hlediska časové náročnosti ověřovacího experimentu bude provedeno ověření pouze pro jeden materiál. Zvoleným materiálem je ocel, protože se jedná o běžnější materiál.

Volba nástroje bude provedena vzhledem k hodnotám tvrdosti zjištěným po obrobení vzorků v první části experimentu.

## 7.1 Volba nástroje

Pro odebrání materiálu návaru je zvolen způsob sousledného frézování nástrojem s vyměnitelnou břitovou destičkou. Byl zvolen dvoubřitý nástroj průměru 20 mm s označením 20A2R070A20-SAD11E-C (DormerPramet).

Do tohoto nástroje musí být zvoleny vhodné břitové destičky, pro zadané parametry jsou vyhovující destičky ADMX 11T308SR-F z řezného materiálu 8230. Jde o širokopásmový substrát a povlak, který pro obrábění ocelí nabízí interval P20-P40 a pro obrábění korozivzdorných ocelí M20-M35. Materiál je tak kompromisem mezi otěru-vzdorností a houževnatostí.

Dále bylo potřeba zvolit geometrii břitu, pro tuto aplikaci byla zvolena dokončovací geometrie typu F, pro možnost aplikace minimálního posuvu na zub na úrovni 0,07 mm, protože pro měření tvrdosti je potřeba co nejvyšší jakost povrchu.

Zvolený nástroj a vyměnitelné břitové destičky jsou na Obr.44.



Obr.44: Zvolený nástroj a VBD

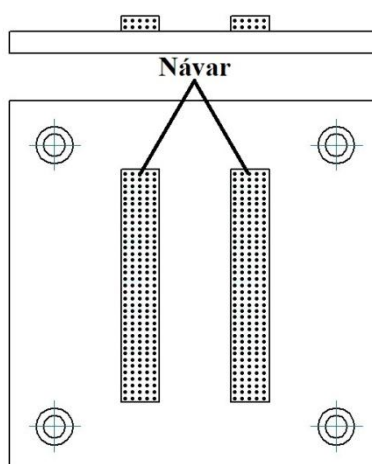
## 7.2 Nastavení experimentu

Pro zjištění vhodnosti nástroje na obrábění návarů a jeho vliv na obrobený materiál, bylo vytvořeno pět vzorků s identickým postupem navaření. Každý vzorek bude obráběn novou řeznou hranou břitové destičky, aby bylo zamezeno ovlivnění

obráběného povrchu opotřebenou destičkou. Stroj, na kterém budou všechny vzorky obráběny, je frézovací centrum MCLV 1 000 (KOVOSVIT MAS). Po obrobení budou pro všechny vzorky změřeny tvrdosti a drsnosti obrobené plochy, aby bylo zjištěno, jak se mění tvrdost a drsnost povrchu v závislosti na řezných podmínkách.

### 7.2.1 Vzorky

Pro potřeby experimentu, bylo vytvořeno 6 návarů vyrobených technologií popsanou v kapitole 5. Vzhled vzorků je na Obr.45. Na jednom vzorku bude provedeno zkušební obrobení, podle kterého se upraví řezné podmínky pro zbytek experimentu.



Obr.45: Vzorky

### 7.2.2 Řezné podmínky

Pro každý návar bude použita jiná řezná rychlost. Ideální řezná rychlost udávaná výrobcem pro zvolené břitové destičky je 210-265 m/min. Byly zvoleny řezné rychlosti: 100, 150, 200, 250 a 300 m/min, čímž bude obsaženo celé spektrum rychlostí a zjistí se, jak se materiál chová, pokud jsou zvoleny nižší a vyšší řezné rychlosti a jaký vliv má tato rychlost na vyměnitelné břitové destičky.

Doporučený optimální posun na zub  $f_z$  od výrobce je v rozmezí 0,07-0,12 mm/zub, pro zkušební vzorek bude použito  $f_z=0,1$  mm/zub.

Doporučená hloubka řezu  $a_p$  od výrobce je v rozmezí 0,2 - 9,0 mm. Výška návarů se pohybuje v rozmezí 1,8 – 2 mm. Aby bylo dosaženo dostatečné kvality povrchu, budou všechny vzorky připraveny jednou destičkou na výšku 1,2 mm a následně bude každý vzorek obroben novou destičkou na výšku 0,75 mm. Tato výška byla zvolena, protože z předchozího experimentu vyplývá, že v těchto místech by pro všechny destičky měla být shodná tvrdost materiálu.

### 7.3 Obrábění

Na Obr.46 a Obr.47 jsou vyfoceny nástroj připravený k upnutí do stroje a nástroj upnutý ve stroji.



Obr.46: Nástroj upnutý v držáku



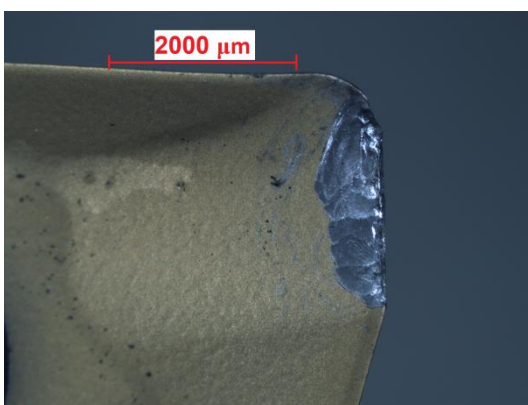
Obr.47: Nástroj upnutý ve frézovacím centru

Na zkušebním návaru bylo uděláno testovací obrobení za těchto řezných podmínek:

$$v_c = 100 \text{ m/min} \quad N = 1592 \text{ ot/min}$$

$$f_z = 0,1 \text{ mm/zub}$$

Tato kombinace řezné rychlosti a posuvu nebyla vhodná, protože docházelo k vylamování břitu destičky, destička s poškozeným břitem je na Obr.48.



Obr.48: Zkušební břitová destička



Obr.49: Obrobené vzorky

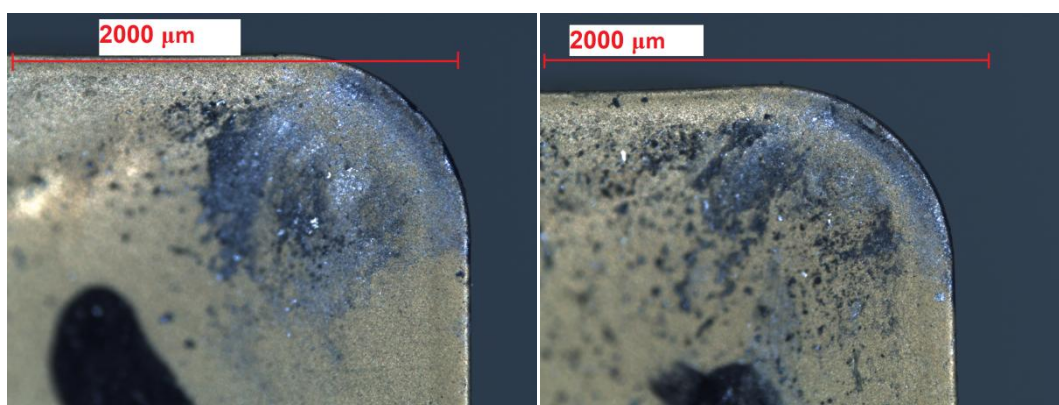


Z důvodu vyštípování břitu destičky byl snížen posuvu na zub  $f_z$  na 0,075 mm/zub. Tato zkušební destička bude použita pro přípravu všech vzorků na výšku 1,2. Po změně posuvu na zub už probíhalo obrábění všech vzorků bez problémů a všechny obrobené destičky jsou vyfoceny na Obr.49. V Tab.9 jsou dopočítány všechny řezné podmínky pro jednotlivé řezné rychlosti. Na každé destičce je popsáno kde byl začátek a konec obrábění, a jakým číslem břitu byl daný vzorek obráběn.

Tab.9: Tabulka řezných podmínek

vc [m/min]	100	150	200	250	300
N [ot/min]	1592	2389	3185	3981	4777
$f_z$ [mm/zub]	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
f [mm/min]	79,6	119,4	159,2	199,0	238,9

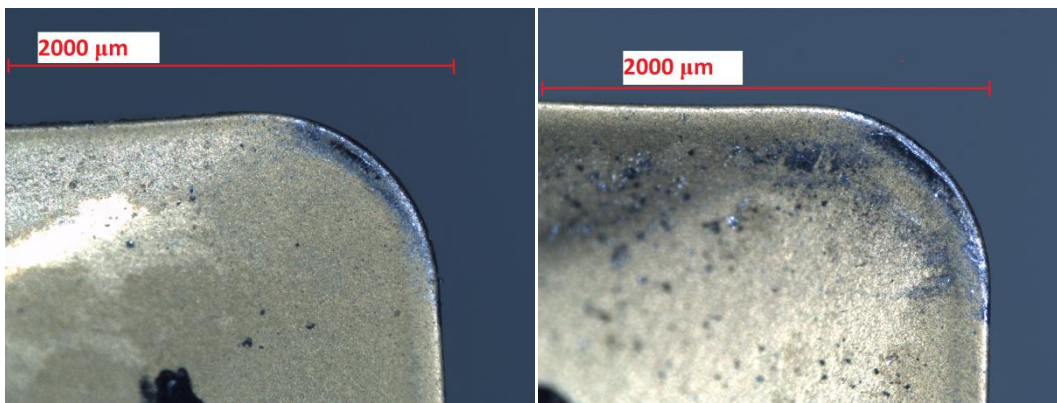
Aby bylo zjištěno, zda se obrábění za neoptimálních podmínek neprojevuje na vyměnitelných břitových destičkách, byly všechny břity vyfoceny na mikroskopu. Pokud by se na destičkách po jednom přejezdu projevilo poškození, znamenalo by to, že se vnáší nepřesnosti do měření tvrdosti obrobeného povrchu. Stav destiček je na Obr.50 – Obr.54. Na Obr.50 a Obr.51 je vidět, že při nižších řezných rychlostech, než jsou doporučené, nedochází téměř k žádnému poškození destiček. Jsou vidět pouze drobné nerovnosti na řezné hraně.



Obr.50: Břit 1

Obr.51: Břit 2

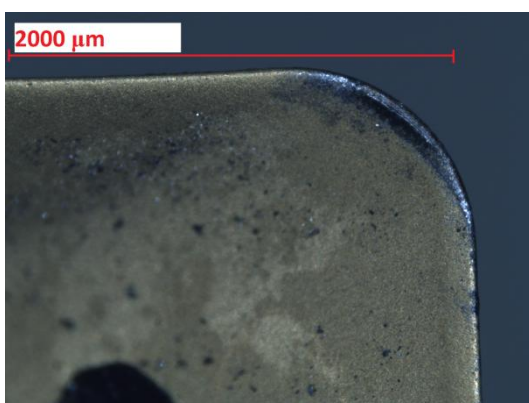
Na Obr.52 a Obr.53 jsou snímky destiček v rámci doporučených řezných podmínek od výrobce. Destičky jsou v dobrém stavu a není na nich žádné viditelné poškození.



Obr.52: Břit 3

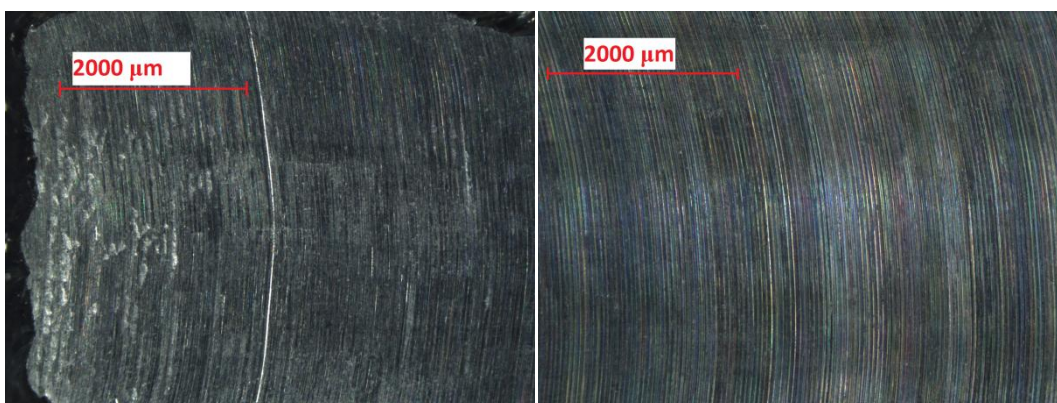
Obr.53: Břit 4

Na Obr.54 je snímek břitu po obrábění vyšší řeznou rychlostí, než je doporučena. Destička je stále v dobrém stavu, řzná rychlost není příliš vysoká, takže zatím nedochází k žádnému zásadnímu poškození. Na obrázku je vidět náznak oxidace povrchu řzné hrany.



Obr.54: Břit 5

Dalším krokem bylo vyfocení obrobených ploch na mikroskopu. Obrobené plochy jsou k vidění na Obr.55 a Obr.56, jelikož všechny plochy vypadaly stejně, jsou přiloženy pouze dvě fotografie.



Obr.55: Obrobená plocha břit 1

Obr.56: Obrobená plocha břit 4

## 7.4 Měření tvrdosti a drsnosti obrobených ploch

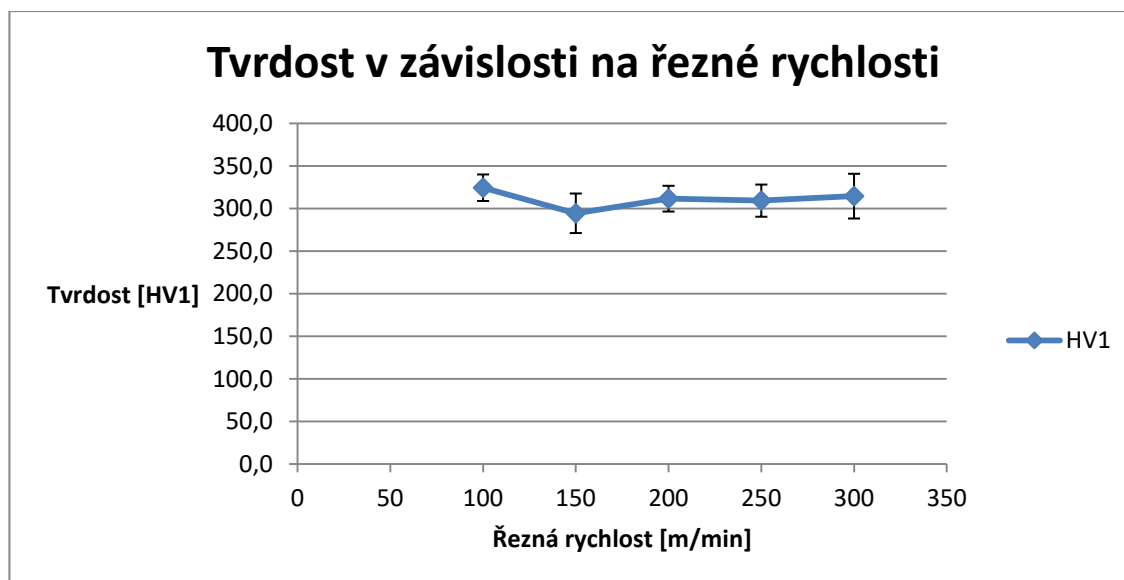
Pro ověření vlivu řezné rychlosti na navařený materiál, musí být změřena tvrdost obrobené plochy a dále drsnost povrchu na začátku a konci obrábění.

Tvrdot materiálu bude měřena na každé návaru, na obou krajích a ve středu, vždy od začátku obrábění po konec obrábění. Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulkách v přílohách na konci této práce. Protože se tvrdost návaru nemění v závislosti na pozici vtisku, naměřené hodnoty všech návarů byly zpracovány pro celý návar vcelku. Souhrn všech naměřených hodnot je v Tab.10

Tab.10: Tvrdot návarů v závislosti na řezné rychlosti

Řezná rychlost [m/min]	Destička 10		Destička 20		Destička 30
	100	150	200	250	300
	Návar 1	Návar 2	Návar 3	Návar 4	Návar 5
Průměr HV1 celého návaru [HV1]	324,4	294,4	311,5	309,2	314,5
Směrodatná odchylka	15,6	23,2	15,1	18,9	26,2
Rozptyl	243,2	539,2	228,7	357,0	688,8

Z hodnot uvedených v Tab.10 byl vytvořen Graf 5, který znázorňuje závislost tvrdosti na řezné rychlosti.



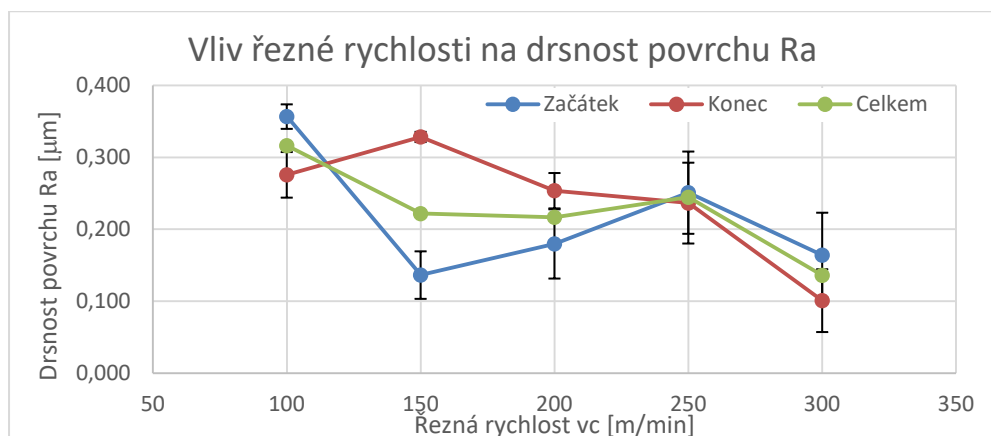
Graf 5: Tvrdot v závislosti na řezné rychlosti

V Grafu 5 je vidět, že řezná rychlost nemá žádný vliv na tvrdost návaru, protože všechny odchylky jsou v rozmezí chybových úseček.

Dalším krokem bylo změření drsnosti povrchu Ra v závislosti na řezné rychlosti, hodnoty drsnosti byly měřeny na začátku a konci obrábění. Tyto hodnoty byly zpracovány v Tab.11 a následně zpracovány do Grafu 6.

Tab.11: Tabulka drsností Ra a Rz

Řezná rychlost [m/min]	100	150	200	250	300
Ra na začátku obrábění [ $\mu\text{m}$ ]	0,36	0,14	0,18	0,25	0,16
Ra na konci obrábění [ $\mu\text{m}$ ]	0,28	0,33	0,25	0,24	0,10
Ra průměrné [ $\mu\text{m}$ ]	0,32	0,22	0,22	0,24	0,14
Rz na začátku obrábění [ $\mu\text{m}$ ]	2,72	1,04	1,37	1,91	1,25
Rz na konci obrábění [ $\mu\text{m}$ ]	2,10	2,50	1,93	1,80	0,77
Rz průměrné [ $\mu\text{m}$ ]	2,41	1,69	1,65	1,86	1,04



Graf 6: Vliv řezné rychlosti na drsnost povrchu Ra

Z Grafu 6 je vidět, že drsnost povrchu s rostoucí řeznou rychlostí spíše klesá, což odpovídá trendu dokončovacích technologií, kdy se pro co nejlepší jakost povrchu používají co nejvyšší řezné rychlosti.

## 8 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo zvolení vhodného nástroje pro obrábění návarů vytvořených technologií 3D tisku a následné ověření vhodnosti zvoleného nástroje.

Na začátku práce byla provedena rešerše obrobitelnosti materiálů a 3D tisku, v rámci rešerše obrobitelnosti byly vysvětleny základní pojmy a shrnuty hlavní faktory ovlivňující obrobitelnost. V rešeršní části 3D tisku byla shrnuta historie a jednotlivé technologie 3D tisku. Dále byly podrobněji rozepsány technologie kovového tisku, které se dělí na práškové a drátové. V rámci této práce se pracovalo s návary vytvořenými pomocí drátové technologie, která byla v rámci rešerše důkladněji popsána.

Z poznatků získaných v rešeršní části o obrobitelnosti, bylo vybráno vyhodnocování tvrdosti návarů pro určení jejich obrobitelnosti. Aby byla získána co nejlepší představa o vývoji tvrdosti návaru, byly vytvořeny vzorky, pro které byla změřena tvrdost. Tyto vzorky byly kovové destičky z běžné oceli a korozivzdorné oceli, na které bylo navařeno 6 housenek ve 3 vrstvách. Pro každý typ materiálu byly použity dva identické vzorky.

Jako první byly provedeny měření povrchových tvrdostí všech návarů, následně byly návary tryskány a byla pro ně opětovně změřena tvrdost. Dalším krokem bylo obrobení návarů frézováním do různých hloubek návaru, aby byl určen průběh tvrdosti v rámci celého návaru. Pro ocelové návary bylo zjištěno, že tvrdost návaru je nejvyšší na povrchu po očištění tryskáním, od povrchu tvrdost pozvolně klesá a ve středu návaru dosahuje nejnižší hodnoty, odkud má konstantní průběh a poté roste v blízkosti podkladového materiálu. Toto je ovlivněno rychlostí ochlazování navařeného materiálu.

Měření tvrdosti povrchu korozivzdorných návarů ukázalo, že se na nich vytváří slabá křehká vrstva, která se během měření tvrdosti prolamuje. Kvůli jiné tryskací náplni byly veliké odlišnosti v naměřené tvrdosti tryskaného povrchu. Následné obrobení a měření tvrdosti obrobených ploch ukázalo, že se celková tvrdost v rámci návaru nemění tolik jako u běžné oceli. Ale na druhou stranu z důvodu změny obráběcího nástroje bylo zjištěno, že u korozivzdorného materiálu dochází u vzorků

během obrábění ke změně tvrdosti, zatímco u ocelových vzorků nedošlo obráběním k žádným změnám.

Na základě poznatků prvního experimentu byl zvolen nástroj vhodný pro obrábění návarů z běžné i korozivzdorné oceli. Volba byla provedena podle tvrdosti tryskaného povrchu, kde je tvrdost návaru nejvyšší.

Byl zvolen dvoubřitý nástroj o průměru 20 mm s označením 20A2R070A20SAD11E-C (DormerPramet) a břitové destičky ADMX 11T308SR-F z řezného materiálu 8230.

V závěrečné části experimentu bylo provedeno ověření vhodnosti zvoleného nástroje a břitových destiček pro obrábění návarů a jeho vliv na tvrdost a drsnost obrobeného povrchu v závislosti na řezné rychlosti. Ověření bylo z hlediska časové náročnosti provedeno pouze pro běžnější z materiálů a to ocel.

Bylo vytvořeno šest zkušebních návarů, které byly vyrobeny identickou technologií s technologií použitou pro vytvoření vzorků v úvodní experimentální části. Každý návar byl obroben novým břitem vyměnitelné břitové destičky, aby bylo zaručeno, že opotřebení břitu nevnese rozdíly do naměřených hodnot. Pro všechny obrobené návary byla následně změřena tvrdost a drsnost na začátku a konci obrábění.

Po zpracování naměřených hodnot bylo vyhodnoceno, že vliv řezné rychlosti na tvrdost povrchu obrobené vrstvy je minimální a je možno zvolit jakékoliv řezné podmínky z rozmezí doporučeného od výrobce. Měření drsnosti nám dále potvrdilo, že s rostoucí řeznou rychlostí roste jakost obrobeného povrchu.

## 9 Seznam příloh

Tabulka naměřených hodnot 1: Vzorek 1

Tabulka naměřených hodnot 2: Vzorek 2

Tabulka naměřených hodnot 3: Vzorek 4

Tabulka naměřených hodnot 4: Vzorek 5

Tabulka naměřených hodnot 5: Tvrdosti destiček vzorků 1,2,4 a 5

Tabulka naměřených hodnot 6: Tvrdost ploch obrobených specifickou řeznou rychlostí, řezné hrany 1 a 2

Tabulka naměřených hodnot 7: Tvrdost ploch obrobených specifickou řeznou rychlostí, řezné hrany 3, 4 a 5

## 10 Seznam literatury

[1] FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(6), 1917-1928 [cit. 2016-11-05]. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z. ISSN 10599495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-014-0958-z>

[2] WONG, Kaufui V. a Aldo HERNANDEZ. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering* [online]. 2012, **2012**, 1-10 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.5402/2012/208760. ISSN 2090-5130. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>

[3] WOHLERS, Terry T. *Wohlers report 2014: 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report* [online]. Fort Collins: Wohlers Associates, 2014 [cit. 2017-03-19]. ISBN 9780991333226.

[4] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II: [Určeno pro posl. 4. roč. fak. stroj.]*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-7078-228-5.

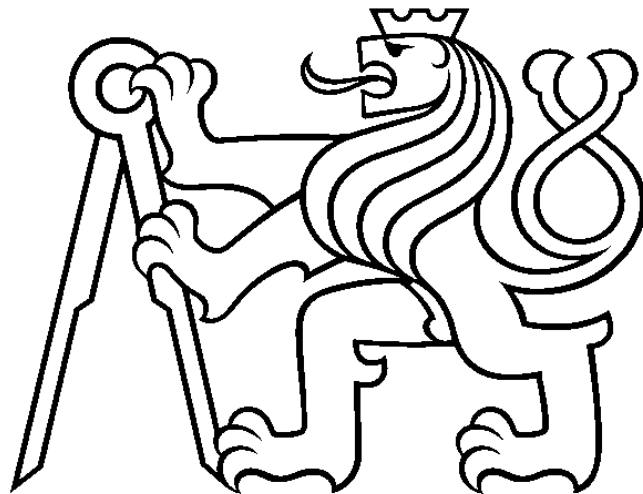
- [5] CHILDS, Thomas. *Metal machining: theory and applications*. New York: Wiley, 2000. ISBN 034069159x.
- [6] BOOTHROYD, G. a W. A. KNIGHT. *Fundamentals of machining and machine tools*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, c1989. ISBN 0-8247-7852-9.
- [7] SYED, Waheed Ul Haq, Andrew J. PINKERTON a Lin LI. A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping. *Applied Surface Science* [online]. 2005, **247**(1-4), 268-276 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.138. ISSN 01694332. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433205001777>
- [8] WOHLERS, Terry T. a Tim. CAFFREY. *Wohlers report 2016: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, c2015. ISBN 9780991333219.
- [9] WOHLERS, Terry T. a Tim. CAFFREY. *Wohlers report 2017: 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report*. Fort Collins, Colo.: Wohlers Associates, c2015. ISBN 9780991333219.
- [10] PEŠEK, Jan. *Konstrukce zkušebního zařízení pro laserové navařování oceli*. Praha, 2014. Diplomová práce. ČVUT - Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jan Smolík, Ph.D.
- [11] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-214-1996-2.
- [12] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [13] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 80-7043-417-1.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



# Bakalářská práce

Obrobitelnost návarových materiálů

**Přílohy**

Tabulka naměřených hodnot 1: Vzorek 1

<b>Vzorek 1</b>	Tvrđost neobrobeného neotryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost tryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,61mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,28mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,95mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,62mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,29mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=-0,04mm [HV1]
Číslo měření								
1	331	282	373	374	350	309	341	154
2	311	302	316	336	302	306	291	187
3	484	354	387	346	335	277	362	209
4	310	367	378	296	329	305	334	216
5	321	289	350	280	299	331	326	208
6	299	281	401	392	344	323	344	171
7	383	296	342	367	315	288	323	200
8	268	311	376	326	316	326	326	218
9	273	328	332	286	343	336	347	184
10	342	318	329	278	291	322	344	313
11		326	396	410	363	298	344	196
12		348	387	358	328	326	327	187
13		325	388	325	344	326	332	221
14		319	387	361	382	366	337	224
15		359	321	291	281	364	310	307
Průměrná hodnota	332,2	320,3	364,2	335,1	328,1	320,2	332,5	213,0
Směrodatná odchylka	59,6	26,7	28,4	40,9	26,9	23,7	16,3	42,4
Rozptyl	3551,8	713,7	803,9	1670,6	721,3	563,2	267,0	1799,5

Tabulka naměřených hodnot 2: Vzorek 2

<b>Vzorek 2</b>	Tvrđost neobrobeného neotryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost tryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,7mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,37mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,04mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,71mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,38mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,06mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=-0,12mm [HV1]
Číslo měření									
1	339	289	371	310	265	295	349	325	227
2	326	419	368	345	320	323	253	338	209
3	305	413	320	328	345	337	271	308	165
4	323	408	358	318	376	364	317	331	193
5	332	401	382	290	314	318	295	321	276
6	315	420	372	310	271	309	349	332	347
7	295	414	371	317	320	307	329	326	269
8	304	361	359	335	373	310	297	312	289
9	337	384	376	305	374	355	301	327	319
10	351	384	420	298	316	317	348	341	301
11	348	414	371	277	290	305	361	348	225
12	344	355	346	297	245	359	291	313	347
13	357	364	321	294	353	331	315	283	249
14	306	326	348	312	342	304	306	319	202
15	361	370	367	291	306	276	396	387	217
Průměrná hodnota	329,5	381,5	363,3	308,5	320,7	320,7	318,5	327,4	255,7
Směrodatná odchylka	20,3	36,8	23,5	17,7	39,4	23,9	36,0	21,9	54,7
Rozptyl	411,6	1352,4	550,6	313,3	1550,1	569,3	1296,5	481,3	2997,3

Tabulka naměřených hodnot 3: Vzorek 4

<b>Vzorek 4</b>	Tvrdomost neobrobeného neotryskaného povrchu [HV1]	Tvrdomost tryskaného povrchu [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=1,605mm [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=1,265mm [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=0,945mm [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=0,615mm [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=0,285mm [HV1]	Tvrdomost obrobeného povrchu hloubka H=-0,045mm [HV1]
Číslo měření								
1	219	314	269	334	272	282	289	273
2	229	267	286	318	291	260	298	281
3	253	321	279	299	306	283	282	280
4	244	290	278	299	333	286	279	272
5	230	292	269	293	352	296	293	289
6	246	302	271	316	298	362	281	269
7	251	280	274	290	311	298	276	289
8	230	322	278	294	320	280	294	271
9	198	347	308	297	336	274	294	274
10	199	311	278	283	310	270	309	250
11	237	290	294	272	319	318	310	269
12	283	311	278	295	323	294	292	285
13	237	366	268	289	327	275	289	291
14	250	318	274	281	320	268	275	294
15	242	303	260	295	305	269	280	286
Průměrná hodnota	236,5	308,9	277,6	297,0	314,9	287,7	289,4	278,2
Směrodatná odchylka	20,6	24,2	11,2	15,1	18,9	24,4	10,5	11,1
Rozptyl	422,6	588,1	125,7	226,8	356,2	595,8	110,2	124,3

Tabulka naměřených hodnot 4: Vzorek 5

<b>Vzorek 5</b>	Tvrđost neobrobeného neotryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost tryskaného povrchu [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,65mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=1,32mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,99mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,66mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0,33mm [HV1]	Tvrđost obrobeného povrchu hloubka H=0mm [HV1]
Číslo měření								
1	205	417	352	342	331	348	369	418
2	219	336	369	272	359	352	379	375
3	203	394	374	298	372	358	387	382
4	228	394	356	374	378	354	381	360
5	220	432	360	377	361	364	377	372
6	206	452	372	341	387	351	372	379
7	221	458	373	301	366	348	374	414
8	211	350	354	317	370	358	363	343
9	209	287	365	366	387	371	357	366
10	215	370	344	381	373	371	383	354
11	206	469	404	387	385	373	381	363
12	217	383	371	383	441	391	379	365
13	220	365	361	349	378	393	372	397
14	208	421	376	336	388	377	360	419
15	213	342	367	376	382	388	360	332
Průměrná hodnota	213,4	391,3	366,5	346,7	377,2	366,5	372,9	375,9
Směrodatná odchylka	7,1	49,4	13,4	34,7	22,2	15,1	9,0	25,4
Rozptyl	49,8	2444,8	180,6	1207,3	494,3	226,6	81,7	647,7

Tabulka naměřených hodnot 5: Tvrdosti destiček vzorků 1,2,4 a 5

<b>Tvrdost destiček</b>	Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 4		Vzorek 5	
	Tvrdost obrobené destičky [HV1]	Tvrdost neobrobené destičky [HV1]	Tvrdost obrobené destičky [HV1]	Tvrdost neobrobené destičky [HV1]	Tvrdost obrobené destičky [HV1]	Tvrdost neobrobené destičky [HV1]	Tvrdost obrobené destičky [HV1]	Tvrdost neobrobené destičky [HV1]
Číslo měření								
1	153	115	110	118	305	231	309	194
2	115	122	108	110	318	249	254	213
3	110	102	107	111	326	237	251	185
4	110	113	114	102	306	261	340	194
5	108	116	123	115	315	287	299	198
6	103		115		309	225	276	
7	107		123		301	227	275	
8	116		131		304		309	
9	119		127		311		239	
10	108		122		316		256	
11	116		119		341		309	
12	115		129		333		283	
13	114		127		342		292	
14	117		118		336		304	
15	116		123		301		311	
Průměr	115,1	113,6	119,7	111,2	317,6	245,3	287,1	196,8
Směrodatná odchylka	11,0	6,5	7,3	5,4	14,0	20,8	27,4	9,2
Rozptyl	121,6	42,6	53,9	29,4	196,4	431,3	748,4	83,8

Tabulka naměřených hodnot 6: Tvrdost ploch obrobených specifickou řeznou rychlostí, řezné hrany 1 a 2

	Hrana 1			Hrana 2		
Řezná rychlost [m/min]	100			150		
	Destička 10					
	Návar 1			Návar 2		
Číslo měření ↓	okraj [HV1]	střed [HV1]	okraj [HV1]	okraj [HV1]	střed [HV1]	okraj [HV1]
1 (Začátek obrábění)	302	314	303	278	270	302
2	323	313	354	259	310	348
3	324	325	360	280	289	337
4	323	338	356	269	294	329
5	320	333	344	279	298	310
6	327	350	331	289	300	302
7	318	329	319	279	318	320
8	319	328	329	273	302	329
9	316	306	324	282	295	258
10	324	333	343	275	301	324
11	326	316	348	283	300	235
12	309	293	329	278	289	298
13	317	319	344	279	301	335
14	301	296	331	284	290	331
15 (Konec obrábění)	304	320	316	268	302	275
<b>Průměr HV1</b>	316,9	320,9	335,4	277,0	297,3	308,9
<b>Směrodatná odchylka</b>	8,5	14,9	15,7	7,1	10,4	30,6
<b>Rozptyl</b>	72,0	221,6	245,7	51,1	108,6	937,6
<b>Průměr HV1 celého návaru</b>	324,4			294,4		
<b>Směrodatná odchylka</b>	15,6			23,2		
<b>Rozptyl</b>	243,2			539,2		



Tabulka naměřených hodnot 7: Tvrdost ploch obrobených specifickou řeznou rychlostí, řezné hrany 3,4 a 5

	Hrana 3			Hrana 4			Hrana 5		
Řezná rychlost [m/min]	200			250			300		
	Destička 20						Destička 30		
	Návar 3			Návar 4			Návar 5		
Číslo měření ↓	okraj [HV1]	střed [HV1]	okraj [HV1]	okraj [HV1]	střed [HV1]	okraj [HV1]	okraj [HV1]	střed [HV1]	okraj [HV1]
1 (Začátek obrábění)	276	269	298	290	336	321	296	361	293
2	337	304	333	295	316	314	300	354	316
3	315	296	320	295	321	324	300	348	304
4	307	281	323	310	279	325	282	360	336
5	322	314	326	307	316	321	307	352	314
6	312	302	318	304	329	319	282	340	307
7	322	283	331	305	315	325	286	353	279
8	309	297	322	292	316	330	281	344	314
9	312	308	330	304	311	333	309	310	348
10	314	291	315	303	300	334	294	306	294
11	314	310	318	313	283	324	288	314	350
12	307	294	321	310	310	339	292	289	296
13	317	300	317	317	279	330	298	281	348
14	315	320	319	292	303	327	309	306	356
15 (Konec obrábění)	329	319	332	269	273	255	283	318	354
<b>Průměr HV1</b>	313,9	299,2	321,5	300,4	305,8	321,4	293,8	329,1	320,6
<b>Směrodatná odchylnka</b>	12,8	13,9	8,5	11,6	18,6	18,8	9,6	25,9	25,0
<b>Rozptyl</b>	164,5	192,3	71,7	134,0	346,4	352,8	92,8	672,7	623,0
<b>Průměr HV1 celého návaru</b>	311,5			309,2			314,5		
<b>Směrodatná odchylnka</b>	15,1			18,9			26,2		
<b>Rozptyl</b>	228,7			357,0			688,8		