



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

HODNOCENÍ OBROBITELNOSTI MATERIÁLU VYROBENÉHO POMOCÍ ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

EVALUATION OF THE MACHINABILITY OF MATERIAL PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Richard Bílek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Kolomý

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Richard Bílek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Štěpán Kolomý**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení obrobitelnosti materiálu vyrobeného pomocí aditivní technologie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se bude zabývat testováním obrobitelnosti materiálu, který bude vyroben pomocí aditivní technologie. Bakalářská práce bude navrhnout vhodnou metodu pro potřeby testování a získání naměřených dat. Dále se práce bude zabývat zpracováním získaných dat, vzájemným porovnáním a vyvozením patřičných závěrů.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše zabývající se studiem obrobitelnosti materiálu vyrobeného pomocí aditivní technologie.
- Definice pozorovaných veličin.
- Návrh vhodné metodiky pro realizaci testů.
- Verifikace obrobitelnosti pro danou aplikaci.
- Vyhodnocení a porovnání výsledků.

Seznam doporučené literatury:

UÇAK, Necati, Adem ÇIÇEK a Kubilay ASLANTAS. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. Online. Journal of manufacturing processes. Elsevier, 2022, 80, 414-457. ISSN 1526-6125. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.023>. [citováno 2023-10-24].

MAUCHER, Clemens, Heiko TEICH a Hans-christian MÖHRING. Improving machinability of additively manufactured components with selectively weakened material. Online. Production engineering (Berlin, Germany). Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, vol. 15, no. 3-4, 535-544. ISSN 0944-6524. Dostupné z: <https://doi:10.1007/s11740-021-01038-2>. [citováno 2023-10-24].

AHMAD, Sajjad, Soham MUJUMDAR a Vinay VARGHESE. Role of porosity in machinability of additively manufactured Ti-6Al-4V. Online. Precision engineering. Elsevier, 2022, 76, 397-406. ISSN 0141-6359. Dostupné z: <https://doi:10.1016/j.precisioneng.2022.04.010>. [citováno 2023-10-24].

BAI, Yuchao, Cuiling ZHAO, Yu ZHANG, Jie CHEN a Hao WANG. Additively manufactured CuCrZr alloy: Microstructure, mechanical properties and machinability. Online. Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing. Lausanne: Elsevier B. V, 2021, 819, 141528. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi:10.1016/j.msea.2021.141528>. [citováno 2023-10-24].

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením obrobiteľnosti vysoce pevnostní maraging oceli M300, která je vyrobená ve třech typech vzorků. Dva vzorky byly aditivně vyrobeny metodou Selective Laser Melting, z nichž byl jeden následně tepelně zpracován. Třetí vzorek byl vyroben konvenčním způsobem pomocí válcování. Testování probíhalo frézováním za různých řezných podmínek. V praktické části byly odebrány vzniklé třísky a měřeny tvrdosti jednotlivých vzorků, dále pak jednotlivé složky silového zatížení během obrábění, drsnosti povrchu a opotřebení na hřbetu nástroje. Naměřená data a morfologie třísek byly dále analyzovány a vyhodnocovány. Výstupem práce je doporučení vhodné řezné rychlosti pro obrábění aditivně vyrobené oceli maraging M300.

Klíčová slova

obrobiteľnost, aditivní výroba, maraging ocel, frézování, opotřebení nástroje

ABSTRACT

This bachelor thesis evaluates the machinability of high strength maraging steel M300, which is produced in three types of samples. Two samples were additively manufactured by Selective Laser Melting, one of which was subsequently heat treated. The third sample was produced by conventional rolling. Testing was carried out by milling under different cutting conditions. In the practical part the resulting chips were taken and hardness of individual samples, then the individual cutting forces during machining, surface roughness and the flank wear were measured. The measured data and chips morphology were further analysed and evaluated. The output of the work is a recommendation of the appropriate cutting speed for machining the additively manufacturing maraging steel M300.

Keywords

machinability, additive manufacturing, maraging steel, milling, tool wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BÍLEK, Richard. *Hodnocení obrobitelnosti materiálu vyrobeného pomocí aditivní technologie* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157929>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Štěpán Kolomý.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Hodnocení obrobitelnosti materiálu vyrobeného pomocí aditivní technologie vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 24.05.2024

místo, datum

Richard Bílek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Štěpánu Kolomému za podporu, cenné připomínky a odborné rady, které mi napomohly při vypracování bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Jiřímu Čechovi za jeho čas strávený při obsluhování CNC stroje.

V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině a těm, kteří se jakýmkoli způsobem podíleli na vzniku této bakalářské práce, ať už poskytnutými radami nebo morální podporou.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 OBROBITELNOST	11
2.1 Hodnocení obrobiteľnosti	11
2.2 Faktory ovlivňující obrobiteľnost	12
2.3 Faktory používané pro vyhodnocení obrobiteľnosti	15
2.4 Zkoušky obrobiteľnosti	20
3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE	23
3.1 Proces výroby	24
3.2 Používané metody aditivních technologií	24
3.3 Selektivní laserové tavení	27
4 PRAKTICKÁ ČÁST	29
4.1 Popis metodiky testování	30
4.2 Použitý stroj a nástroj	31
4.3 Měřicí přístroje	32
4.4 Struktura a měření tvrdosti	34
4.5 Naměřené složky sil	35
4.6 Opotřebení nástroje	37
4.7 Drsnost povrchu	39
4.8 Utváření třísky	44
ZÁVĚR.....	46

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Aditivní technologie přináší do strojírenského průmyslu revoluční přístup výroby složitých trojrozměrných objektů bez nutnosti složitých a časově náročných procesů. Tyto technologie pracují s přidáváním materiálu vrstvu po vrstvě, a tím se zásadně odlišují od konvenčních technologií, u kterých se požadovaného tvaru dosahuje buď odebráním přebytečného materiálu ostřím řezného nástroje, tvarováním pomocí dutiny zápusťky nebo litím materiálu do formy.

Většina součástí vyrobených aditivní technologií nedosahuje kvalitního povrchu, a proto je vyžadován vhodný způsob dokončovacího obrábění na funkčních plochách za účelem dosažení vhodných rozměrů, tvarů a textury povrchu. Z tohoto důvodu je nutné znát obrobitelnost aditivně vyrobených součástí, která popisuje vhodnost materiálu být zpracován některou z metod obrábění, a která úzce souvisí s volbou řezných podmínek, materiálem řezného nástroje, efektivitou procesu a udržitelností výroby. Obrobitelnost zůstává stále klíčovým faktorem pro optimální využití těchto materiálu v průmyslové praxi.

Zkoumaným materiálem byla maraging ocel M300. Tato ocel byla pro potřeby testování vyhotovena ve třech vzorcích, které se od sebe lišily způsobem výroby. Aditivní technologií metodou selektivního laserového tavení byly vyrobeny dva vzorky, jeden ze vzorků byl následně tepelně zpracován pomocí precipitačního vytvrzování. Poslední testovaný vzorek byl vyroben pomocí válcování. U jednotlivých vzorků byla na základě provedených testů vyhodnocována obrobitelnost.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

U aditivních technologií nelze, nebo by bylo velmi obtížné, dosáhnout povrchu, který by mohl být považovaný za funkční ihned po vytištění. Proto je důležité zařadit různé způsoby dokončovacích operací, které zajistí lepší drsnost povrchu a správné geometrické tvary. Abychom mohli zajistit tyto požadavky, je nutné znát vlastnosti a obrobitelnost daného materiálu, se kterým úzce souvisí volba řezných podmínek a materiál použitého řezného nástroje.

Testovaným materiálem byla ocel maraging M300 neboli 18Ni300 vyrobená pomocí selektivního laserového tavení. Maraging oceli patří do třídy nízkouhlíkových ocelí s vysokou pevností v tahu [1]. Důvodem jejich vysoké pevnosti je precipitace tvrdých intermetalických sloučenin [1].

Maraging oceli jsou ve velkém měřítku využívány v automobilovém i leteckém průmyslu. Důvodem je již zmiňovaná vysoká pevnost, výborná svařitelnost a rozměrová stabilita [1]. Zároveň výsledné mikrostruktury těchto ocelí mají dobrou odolnost proti šíření trhlin, vyhovující tepelnou vodivost a dobrou obrobitelnost až do teplot dosahujících 500 °C [2]. To z nich dělá vhodný materiál k tvorbě forem pro vstřikování plastů nebo například pro tlakové lití hliníku, případně zinkových slitin [2]. Společně s aditivní výrobou lze ve formách docílit vhodných konformních chladících kanálků, které jsou následně dokončovány pomocí obrábění abrazivním tokem [3].

Příkladem studie zabývající se hodnocením obrobitelnosti aditivně vyrobené maraging oceli M300 je článek od Fortunata a spol., kde bylo pomocí selektivního laserového tavení zhotoveno 16 vzorků. Vzorky se od sebe lišily metodou tepelného zpracování, případně skenovací strategií tisku. Testování probíhalo frézováním čelní frézou o průměru 50,88 mm se čtyřmi vyměnitelnými kulatými keramickými destičkami. Obrábění bylo bez chlazení při řezné rychlosti 190 a 380 m·min⁻¹ při konstantním posuvu (0,08 mm) a šířce záběru ostří (0,5 mm). Výsledkem studie bylo zjištění, že minimálního opotřebení nástroje je dosahováno u vzorku upraveného rozpouštěcím žiháním a maximálního u vzorku, který nebyl tepelně zpracován. Zároveň zvýšením řezné rychlosti je dosahováno lepší drsnosti povrchu [2].

Další studií zabývající se obrobitelností maraging oceli M300 je článek od Duval-Chaneaca a spol., kde byla testována drsnost povrchu chladícího kanálku. Obrábění probíhalo pomocí abrazivního toku. Zjišťoval se vliv viskozity a koncentrace abraziva v použitém médiu. Výsledkem bylo zjištění, že se zvyšující se koncentrací brusiva a viskozity média je dosahováno nižších hodnot drsnosti povrchu [3].

Studie od Baia a spol. se mimo jiné zabývala vlivem směru tavenin aditivně vyrobené oceli M300 metodou selektivního laserového tavení při kontaktu s řezným nástrojem. Zjištěním byly vyšší posuvové síly při obrábění tavenin, které byly rovnoběžné se směrem posuvu řezného nástroje oproti taveninám, které byly ke směru posuvu kolmé [4].

I když proběhlo testování obrobitelnosti maraging oceli M300 (viz výše), tak většina studií použila vyměnitelné břitové destičky nebo nástroj s nedefinovanou geometrií břítu. Nedocházelo k porovnání konvenčně vyrobené maraging oceli M300 s aditivně vyrobenou. Nebyl pozorován vliv řezné rychlosti na utváření třísky nebo měřena drsnost povrchu na obrobených stranách.

2 OBROBITELNOST

Obrobitelnost je souhrnný vliv chemického složení a fyzikálních vlastností materiálu. Popisuje míru vhodnosti daného materiálu být zpracován určitým způsobem obrábění. To znamená, jak snadné nebo naopak obtížné je odebírání třísky z povrchu obráběné součásti. Z tohoto důvodu se jedná o jednu z nejdůležitějších vlastností materiálu, který je určen k obrábění, neboť obrobitelnost je hlavním činitelem pro volbu rezných podmínek a pro správnou funkci nástroje. Obecně je obrobitelnost posuzována dle vlivu materiálu obrobku na intenzitu otěru, na energetické bilanci procesu řezání, na tvorbě třísky a vytvoření nového povrchu po obrobení součásti.[5; 6]

Přestože se jedná převážně o materiálovou vlastnost, existuje úzký vztah stupně obrobitelnosti materiálu k velikosti jednotlivých faktorů, které jsou součástí samotného procesu řezání. Mezi tyto faktory se například řadí součinitel popisující tření třísky po čele nástroje, velikost plochy řezu, velikost měrné deformační práce nebo stupeň zpevnění v odřezávané vrstvě. Závislost těchto faktorů vzhledem ke stupni obrobitelnosti se zatím nepodařilo přesným matematickým vztahem vyjádřit.[5; 6]

Obrobitelnost je ovlivněna mnoha faktory, z nich jsou nejpodstatnější [5; 7]:

- tepelné zpracování obráběného materiálu,
- chemické složení obráběného materiálu,
- fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu,
- rezní podmínky a prostředí,
- mikrostruktura obráběného materiálu,
- geometrie nástroje a jeho materiálové vlastnosti.

2.1 Hodnocení obrobitelnosti

Obrobitelnost ve vysoké míře souvisí s řezivostí. Proto je nutné poznamenat, že mnoho kritérií vztahující se k hodnocení obrobitelnosti je současně i kritériem hodnotící řezivost. [8]

Dle charakteristik obrobitelnosti je možné rozeznávat obrobitelnost absolutní a relativní [8]:

- Absolutní obrobitelnost – je charakterizována funkčními vztahy a souvisejícími parametry, ale může být vyjádřena i velikostí určité veličiny, která charakterizuje obrobitelnost. Mezi vhodné absolutní veličiny za konstantních a nejlépe stejných podmínek obrábění, kdy se porovnávají např. pouze různé tvrdosti stejného druhu oceli, se řadí [5]:
 - objem obrobeného materiálu,
 - rezná dráha,
 - nebo velikost obrobené plochy o určité kvalitě.

Výsledky absolutní obrobitelnosti predikují srovnání výsledků při rozdílné trvanlivosti nástrojů a jsou obvykle citlivé na velikost rezné rychlosti. Proto je v praxi vhodné používat relativní hodnocení obrobitelnosti. [5; 6]

- Relativní (komparační) obrobitelnost – je definována pomocí bezrozměrných čísel. Ty udávají poměr mezi velikostmi dané veličiny. Přesněji mezi velikostí veličiny vztahující se k danému (testovanému) materiálu a velikostí veličiny, která odpovídá etalonovému materiálu. Při tomto poměru lze využít celkové nebo přepočtené (měrné) veličiny. Pro pevně definované podmínky obrábění, jako je například průřez třísky nebo rezná rychlost, se jedná například o tyto veličiny [5; 6]:
 - velikost celkových sil a rezných momentů,

- druh utváření a dělení třísky,
- velikost celkové energie, která je potřebná k odebrání dané tloušťky materiálu obrobku,
- hodnota teploty řezání,
- dosahovaná kvalita povrchu obrobené plochy.

Pro vyjádření obrobitelnosti je využíván index obrobitelnosti (1.1). Ten vychází z intenzity opotřebení břitu a jedná se o poměr dvou veličin. Přesněji o poměr mezi řeznou rychlostí zkoumaného materiálu a řeznou rychlostí etalonového materiálu při trvanlivosti 15 minut a jinak stejných podmínkách. [6; 7]

- Vzorec pro výpočet indexu obrobitelnosti [6]:

$$K_v = \frac{v_{cT/VB(ZK)}}{v_{cT/VB(ET)}} \quad (1.1)$$

kde: $v_{cT/VB(ZK)}$ – řezná rychlost v_c při trvanlivosti T pro opotřebení hřbetu VB zkoušeného materiálu [$m \cdot min^{-1}$],

$v_{cT/VB(ET)}$ – řezná rychlost v_c při trvanlivosti T pro opotřebení hřbetu VB etalonového materiálu [$m \cdot min^{-1}$].

Pro potřeby vyhodnocování obrobitelnosti jsou technické materiály rozděleny do devíti základních skupin, které jsou označeny pomocí malého písmena, viz tab. 1. Každá skupina má jeden konkrétní materiál, který slouží jako etalon. Pomocí poměru s tímto etalonem jsou určovány relativní obrobitelnosti všech ostatních materiálů v dané skupině. [6; 7]

K popisu obrobitelnosti je dále využita třída, která je definována pomocí čísla umístěného před označením dané skupiny materiálů. Jednotlivé třídy jsou od sebe odstupňovány vzhledem ke střední hodnotě indexu obrobitelnosti, která je dána pomocí geometrické řady s hodnotou kvocientu $q = 1,26$ (třída etalonového materiálu má hodnotu kvocientu $q = 1$). To znamená, že hodnota řezné rychlosti v určité třídě je vždy 1,26násobně vyšší, případně nižší než hodnota řezné rychlosti v třídě sousední. Materiály, které jsou zařazeny do třídy s vyšším číslem, než je číslo třídy etalonového materiálu, mají lepší obrobitelnost. Naopak materiály zařazeny do třídy s nižším číslem mají obrobitelnost vůči etalonovému materiálu horší. [5; 6]

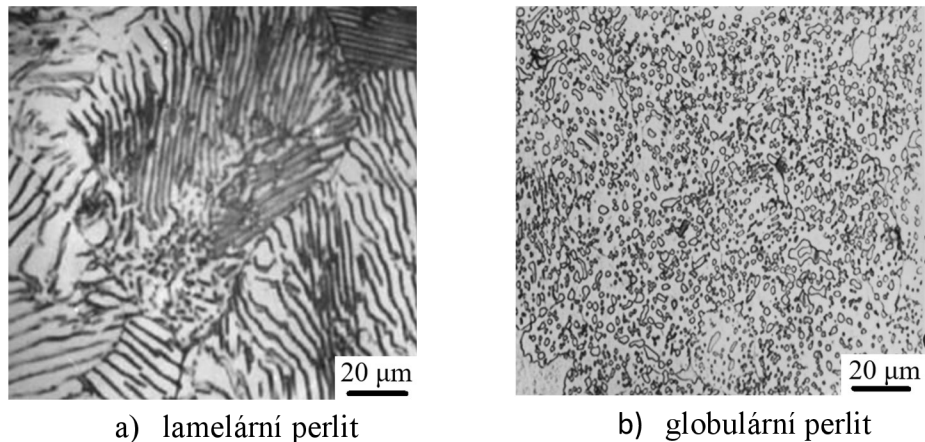
Tab. 1 Základní skupiny materiálů pro vyhodnocování obrobitelnosti [5].

Označení skupiny	Materiál	Označení skupiny	Materiál	Označení skupiny	Materiál
a	Litiny	d	Lehké neželezné kovy	g	Vrstvené hmoty
b	Oceli	e	Plastické hmoty	h	Pryže
c	Těžké neželezné kovy	f	Přírodní nerostné hmoty	v	Tvrzené litiny pro výrobu válců

2.2 Faktory ovlivňující obrobitelnost

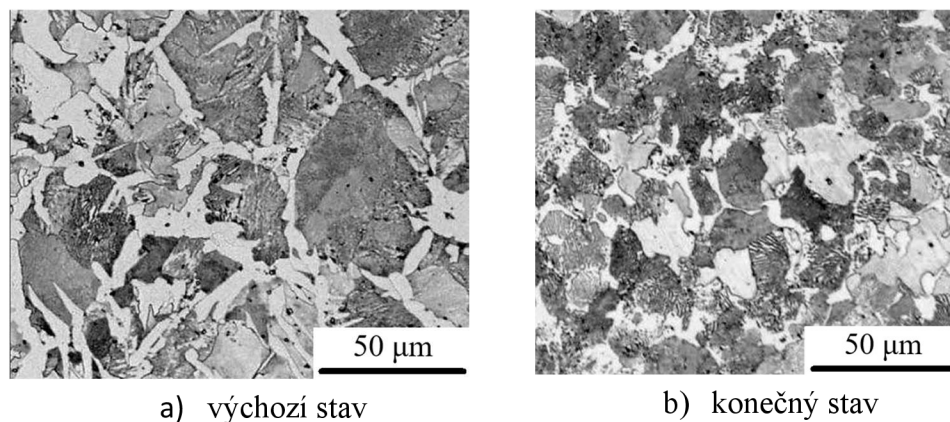
Faktory, které ovlivňují obrobitelnost, ať už v pozitivním či negativním slova smyslu, je u ocelí celá řada. Jedná se především o mikrostrukturu, tepelnou vodivost, obsah uhlíku a legujících prvků v dané oceli nebo tvrdosti, kterou obráběný materiál dosahuje. Zmíněné faktory mohou působit na ostří řezného nástroje, a tím ovlivňovat jeho trvanlivost nebo řezivost, která úzce souvisí s obrobitelností. [6; 9]

- Tepelné zpracování – je označováno jako řízený proces, který slouží ke změně mikrostruktury zpracovávaného materiálu. Provádí se za účelem získání vlastností, které usnadní další zpracování nebo umožní dosažení potřebných vlastností pro finální výrobek. Žihání naměkko a normalizační žihání jsou metody tepelného zpracování, které se používají pro zlepšení obrobiteľnosti [10]:
 - Žihání naměkko – je používáno pro zlepšení obrobiteľnosti. Při tomto procesu tepelného zpracování dochází ke změně lamelárního perlitu, viz obr. 1a, na globulární, viz obr. 1b. Získáním globulárního perlitu docílíme toho, že nástroj obrábí méně tvrdé struktury oproti nežíhanému stavu, kde je perlit lamelární. Princip spočívá v ohřevu na teplotu těsně pod hodnotou A_{c1} , několikahodinové výdrž na dané teplotě a ochlazení. Čím pomaleji probíhá ochlazovací proces přes kritické teploty, tím dochází k vytvoření hrubších karbidů a v důsledku je výsledná tvrdost nižší. [11]



Obr. 1 Struktura před a po žihání naměkko [12].

- Normalizační žihání – je používáno ke zjemnění hrubého zrna, které mohlo v oceli vzniknout při lití, tváření za vysokých teplot nebo předchozím dlouhodobým žiháním při vysokých teplotách. Přeměněním hrubého zrna, viz obr. 2a, na jemnější a rovnoměrně velké, viz obr. 2b, se vytvoří vhodnější podmínky pro zlepšení obrobiteľnosti. Princip spočívá v ohřevu o 30 až 50 °C nad teplotu A_{c3} . Následuje krátká výdrž na teplotě, která je závislá na tloušťce materiálu a volné ochlazení na vzduchu. [11; 13]



Obr. 2 Struktura před a po normalizačním žihání [12].

- Tepelná vodivost – je vlastnost daného materiálu, která popisuje, jak rychle je schopný přenášet teplo z jedné zahřáté části do jiné. Tím je v důsledku značně ovlivněna

obrobitelnost, neboť při samotném procesu obrábění dochází ke vzniku tepla, které generuje nárůst teploty na ostří rezného nástroje a dochází tak ke snížení jeho životnosti. Z pohledu rezného nástroje je tak důležitá jeho geometrie břitu, neboť při ostřejším ostří dochází k menšímu deformování a lepšímu odřezávání materiálu, a tím se vytváří méně tepla, které by mělo negativní účinek na trvanlivost nástroje. Dalším důležitým faktorem je rezná rychlost, jejíž vyšší hodnoty způsobují rychlejší deformaci materiálu a vytváří tak více tepla. Zároveň vytvoří za jednotku času více třísek, což znamená že je dosaženo většího objemu odebraného materiálu, který odvede více tepla z oblasti řezu. Proto musí být rezná rychlost vhodně volena. Obecně však platí, že materiály s dobrou tepelnou vodivostí umožňují odchod tepla do okolního prostředí (převážně pomocí třísek) daleko lépe než materiály se špatnou tepelnou vodivostí, kde je odchod tepla především do břitové destičky. [14; 15]

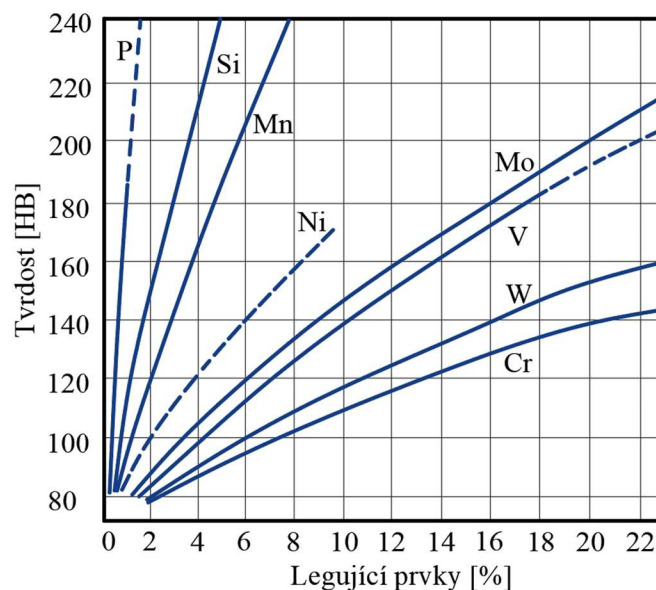
- Obsah uhlíku – v oceli ovlivňuje řadu vlastností. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku dosahuje ocel vyšší pevnosti a prokalitelnosti. Na druhou stranu dochází ke snížení tažnosti, svařitelnosti, houževnatosti, tepelné vodivosti, ale hlavně obrobitelnosti [16]. Například u uhlíkových ocelí s obsahem uhlíku do 0,8 % jsou podstatnými strukturními složkami perlit a ferit. Perlit se vyznačuje vysokou tvrdostí, naopak ferit má tvrdost nízkou, na rozdíl od tvárnosti, která je vysoká. Při obrábění je ferit příčinou tvorby nežádoucích páskových a smotaných třísek kvůli jeho velké tvárnosti. Dále způsobuje špatnou kvalitu povrchů a tvoří ořepy. Perlit je naopak činitelem silného brusného opotřebování a způsobuje vyšší silové zatížení při obrábění. [9]
- Legující prvky – ovlivňují obrobitelnost pozitivním i negativním směrem, záleží jak na jejich množství, tak i na jejich vlivu na vlastnosti oceli. Fosfor s hmotnostním obsahem do 0,1 % snižuje houževnatost, zvyšuje lámavost třísky i celkovou kvalitu na obrobené ploše. Síra, podobně jako fosfor napomáhá k vytvoření lámavé třísky, je v oceli přítomna ve formě sulfidu manganu (MnS), který tvoří tenkou mazací vrstvu mezi třískou a ostřím břitové destičky. Dalším prvkem, který zlepšuje obrobitelnost, je olovo. Technicky je vhodnější než síra, díky jeho částečné rozpustnosti v železe, kde narušuje souvislost feritu na hranicích zrn, a tím napomáhá ke zlepšení obrobitelnosti. Obecně se dá říct, že olovo i síra mají během obrábění mazací účinky. Vzhledem k závadným účinkům, z hlediska zdravotního a ekologického, kterými olovo disponuje, je v dnešní době omezeně používán. Negativním prvkem je křemík. Jeho sloučeniny jako je SiO_2 zvyšují abrazivní a brusný ořez, který negativně působí na ostří rezného nástroje. Další negativní vlivy mají karbidotvorné prvky. Souhrn příznivých i nepříznivých přísad je uveden v tab. 2. [5; 15; 17]

Tab. 2 Rozdělení jednotlivých prvků dle jejich vlivu na obrobitelnost [5; 17].

Příznivé legury	Nepříznivé legury
P (do 0,1 hm.%), S, Pb, Ca, Mn (+S)	Cr, Mo, W, V, Ti, Nb, O, C, Al, Ni

- Deformační zpevnění – je jev, ke kterému dochází během rezného procesu, především u materiálů, které jsou náchylné k nadměrné plastické deformaci. V materiálu dochází vlivem plastické deformace k oslabení krystalické struktury, a to tak, že dojde k posunu vzájemných dislokací. Posuny jsou iniciovány pouze při zatížení odpovídající velikosti a vedou ke zvýšení odolnosti vůči dalším případným deformacím. Z toho vyplývá, že samotné rezné procesy mohou iniciovat trvalé změny tvaru obrobku nebo zvyšovat tvrdost na vnějším povrchu. Oceli s vysokým obsahem manganu, korozivzdorné či duplexní korozivzdorné oceli jsou vysoce náchylné k deformačnímu zpevnění. [15]

- Mechanické vlastnosti – jsou dalším faktorem, který výrazným způsobem ovlivňuje hodnocení obrobitelnosti. Nejpodstatnějším z nich je tvrdost, která má vliv na velikost jednotlivých složek celkové síly, a je výrazně ovlivněna legujícími prvky, viz obr. 3, které mají vliv na zvýšení tvrdosti železa. Čím větší je tvrdost obráběného materiálu, tím vyšší jsou i řezné síly, neboť tvrdší materiály výrazněji odolávají deformacím. Vysoké řezné síly negativně ovlivňují spotřebu energie a způsobují větší deformace na řezných nástrojích, které mohou vést ke vzniku nežádoucích vibrací a v krajních případech až ke ztrátě rozměrové tolerance. Pevnost v tahu je další mechanickou vlastností podílející se na obrobitelnosti. Pevnost podobně jako tvrdost ovlivňuje spotřebu energie při procesu řezání, tj. při řezání materiálu s vysokou pevností v tahu je vynaloženo více energie než u materiálu, který ji má nižší. Tyto vztahy jsou však obtížné a dosud není uveden žádný vzorec, který by umožňoval výpočet obrobitelnosti materiálu pouze na základě dat týkajících se pevnosti materiálu v tahu. [15; 18]



Obr. 3 Vliv legujících prvků na zvýšení tvrdosti železa [15].

2.3 Faktory používané pro vyhodnocení obrobitelnosti

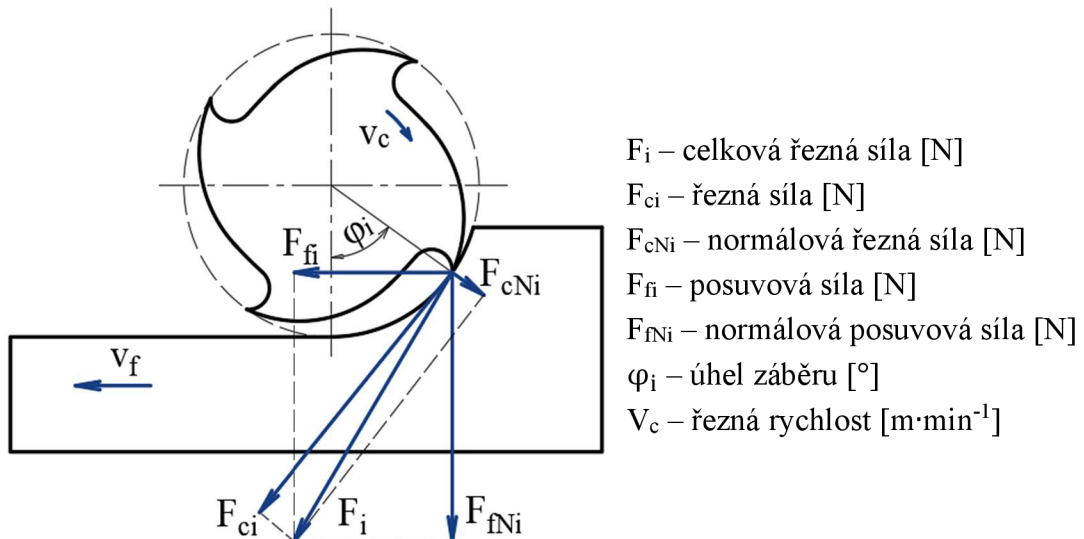
Obrobitelnost může být posuzována z hlediska několika faktorů, které spolu neoddělitelně souvisí. Mezi hlavní patří vzniklé silové zatížení, které velkou měrou ovlivňuje i ostatní faktory obrobitelnosti. Nepřímo se mohou na vyhodnocení obrobitelnosti podílet i vzniklé náklady, například na řezné nástroje nebo použité stroje. [15]

Vybrané faktory pro vyhodnocení obrobitelnosti jsou:

- Jednotlivé složky celkové síly – výrazně ovlivňují spotřebu energie během samotného procesu obrábění a jejich směry a amplitudy jsou rozdílné v jednotlivých řezných procesech. Vysoké hodnoty sil způsobují vysoký výkon stroje, vibrace, vyšší deformace jak nástrojů, tak obrobků. Při zisku vysokých řezných sil může dojít až k vylomení břitu řezného nástroje nebo rapidnímu zkrácení jeho životnosti. Velikost jednotlivých složek celkové síly je ovlivněna zejména [18; 19; 20]:
 - druhem obráběného materiálu,
 - geometrií a materiálem ostří řezného nástroje,
 - způsobem upnutí obrobku,
 - způsobem upnutí řezného nástroje,

- metodou obrábění.

Čím tvrdší je obráběný materiál, tím vyšší bude celkové silové zatížení, a čím bude pozitivnější geometrie řezného nástroje, tím budou jednotlivé složky celkové síly nižší. Pozitivní geometrie řezného nástroje je dána především úhlem čela. Pozitivní úhel čela znamená ostřejší ostří. Naopak při jeho snižování dochází k růstu pasivní a posuvové složky celkové síly. [18; 21]



Obr. 4 Silové zatížení na zubu válcové frézy [22].

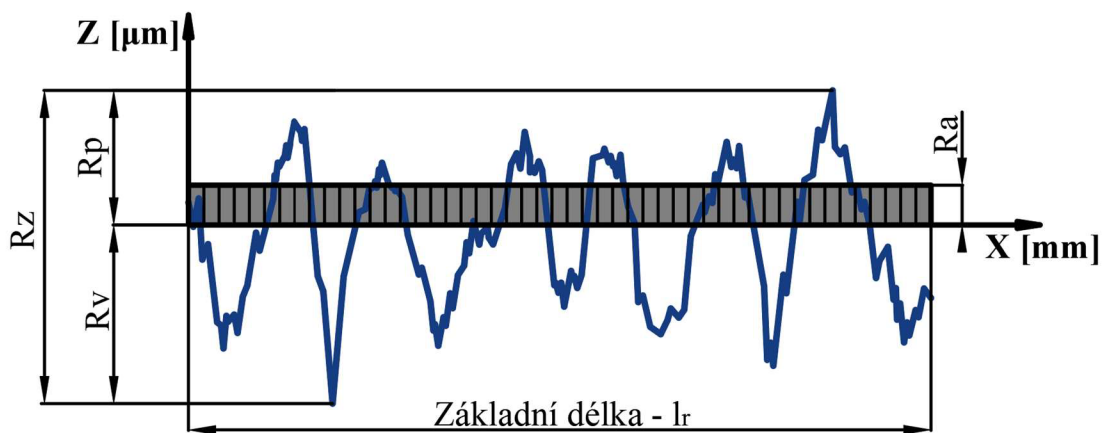
Silové zatížení v jednotlivých procesech obrábění může být měřeno nebo vypočteno. Výpočet řezné síly u frézování spočívá ve vynásobení měrné řezné síly s průřezem třísky. Zmíněný průřez třísky je závislý na šířce záběru ostří, posuvu na zub, ale především na poloze záběrného zubu frézy, který je proměnlivý v průběhu záběru a je dán pomocí úhlu záběru. Měrná řezná síla je vyjádřena pomocí empirických konstant C_{Fc} a exponentu x , které jsou voleny v závislosti na druhu obráběného materiálu a pro nově vytvořené materiály nemusí být zatím stanoveny. Praxí používanější metodou je měření jednotlivých složek sil pomocí piezoelektrického dynamometru, viz obr. 5. Tato metoda je založena na měření náboje, který je úměrný měrné veličině, přes kabel s vysokou izolací do nábojového zesilovače pro zajištění převodu na proporcionální napětí. Zesilovač je připojený do počítače, kde je pomocí vhodného softwaru zaznamenáván průběh sil v čase. [20; 22; 23]



Obr. 5 Dynamometr Kistler 9119A [24].

- Textura povrchu – vyjadřuje náhodné, případně opakované odchylky od geometrického povrchu [25]. Dále je členěna, dle velikostí rozteče měřených nerovností na jednotlivé

složky. Složka s nejmenší roztečí nerovností je drsnost povrchu, prostřední složkou je vlnitost povrchu a složka, která má největší rozteč nerovností, je základní profil. Významnými parametry, která se hojně využívají ve výkresové dokumentaci, jsou parametry drsnosti povrchu R_a , R_z . Jedná se o parametry R profilu. R_a vyznačuje průměrnou aritmetickou úchylku zkoumaného profilu, jedná se tedy o aritmetický průměr absolutních hodnot v ose Z na základní délce l_r , viz obr. 6 [25]. R_z na druhou stranu popisuje nejvyšší výšku profilu drsnosti a je dán součtem výšky nejvyššího výstupku R_p a hodnotou nejhlubší prohlubně zkoumaného profilu R_v na základní délce, viz obr 6 [25]. Zmíněné nerovnosti povrchu vznikají především v důsledku zpracování materiálu. Na povrchu, který byl zpracován některou z metod obrábění jsou zmíněné nerovnosti způsobeny řeznými nástroji, brusivem. U ploch, které nebyly obrobeny, jsou nerovnosti vytvořeny dle daného způsobu zpracování. Například nerovnosti způsobené formou u odlitků nebo zápustkou u výkovek. [25; 26; 27]



Obr. 6 Průměrná aritmetická úchylka R_a a nejvyšší výška profilu R_z [25].

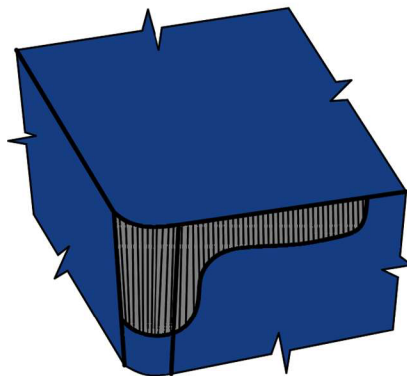
Měření drsnosti povrchu se dále dá rozdělit dle metody měření, a to na metodu kvalitativní a kvantitativní, a podle dotyku na přístroje kontaktní a bezkontaktní [28]:

- Kvalitativní metoda – využívá porovnávání vzorkovnic povrchů s měřeným povrchem za využití komparačních mikroskopů. Jedná se o zastaralou metodu, která je závislá na míře schopností posuzujícího operátora [28; 29].
 - Kvantitativní metoda – je zaměřena na vyhodnocení parametrů za pomoci matematických popisů. K této metodě jsou hojně využívány profilometry, které zvládají měřit drsnost, vlnitost, případně i tvar. [28; 29]
 - Kontaktní přístroje – spočívají v pohybu snímacího hrotu, o vrcholovém úhlu 60° případně 90° se zaoblením 2, 5 nebo 10 μm, po testovaném povrchu. Pohyb hrotu přejíždí přes výstupky, prohlubně, a za pomoci indukčního měřidla je převáděn na elektrický signál, který je posléze počítačově zpracováván a vyhodnocován. [28; 29]
 - Bezkontaktní přístroje – hojně využívána především ve vědecké praxi využívá snímače laserové nebo častěji snímače CLA, které jsou založené na chromatické aberaci délky. Bezkontaktní metoda je velmi náchylná na nečistoty nebo zbytkové olejové vrstvy, a proto je vyžadován řádně očištěný povrch před započítáním samotného měření. [28; 29]
- Opotřebení řezného nástroje – je postupně probíhající děj, který nastává u každého řezného nástroje. Při kontaktu bříty s obrobkem, a následně i s odcházející třískou, dochází k různým mechanismům opotřebení, především vlivem mechanického, chemického nebo tepelného zatížení bříty nástroje. Mezi hlavní příčiny způsobující

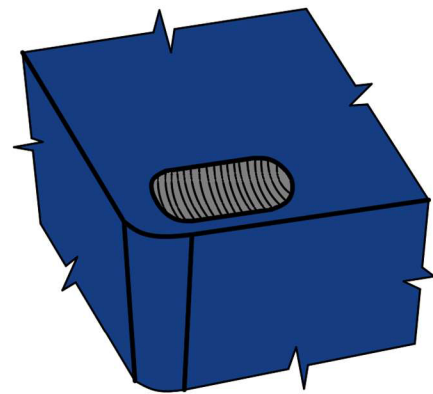
postupné opotřebení břitu patří abraze, adheze, difúze nebo oxidace. Mezi další mechanismy opotřebení patří plastická deformace povrchových vrstev břitu nebo křehký lom na ostří. Tyto mechanismy opotřebení se nedějí postupně, ale náhle v určitém okamžiku. Opotřebení se nelze vyvarovat, lze pouze zajistit, aby bylo bezpečné, kontrolovatelné a předvídatelné. [9; 30; 31]

Jednotlivé druhy opotřebení jsou například [30]:

- Opotřebení na hřbetu nástroje, viz obr. 7 – se řadí mezi abrazivní formy opotřebení, které je způsobeno tvrdými mikroskopickými karbidovými vměstky, případně deformačně zpevněnými částicemi materiálu obrobku. Tyto tvrdé částice se zasekávají při procesu obrábění do nástroje a vytrhávají jednotlivé části povlaku a následně působí na povrch ostří, které rozrušují. V důsledku zmíněného procesu dochází k uvolňování kobaltu ze základní struktury, který zvyšoval soudržnost jednotlivých karbidových zrn, které se vlivem absence kobaltu uvolňují. Tato forma opotřebení, vyskytující se na hřbetní ploše břitu, je snadno předvídatelná a kontrolovatelná, neboť se stabilně rozvíjí a pokud se neobjeví žádný jiný typ opotřebení dříve, skončí funkčnost řezného nástroje právě na tomto opotřebení. [30; 32; 33]
- Výmol na čele, viz obr. 8 – je způsobený kombinací mechanismů abrazivního a difuzního opotřebení. Abrazivní vliv je způsobený během odebrání materiálu z obrobku, kdy jeho tvrdé částice obsažené v tříске dřou o čelo nástroje a broušícími pochody postupně vytvářejí výmol. Difuzní vliv je uskutečňován v místě s nejvyšší teplotou, tedy v kontaktní zóně mezi odcházející třískou a materiálem řezného nástroje, přičemž vzniklé teplo uvolňuje zrna karbidu wolframu ze základní struktury a uhlík se váže na materiál odcházející třísky, což vede ke vzniku výmolu. [30; 32; 33]



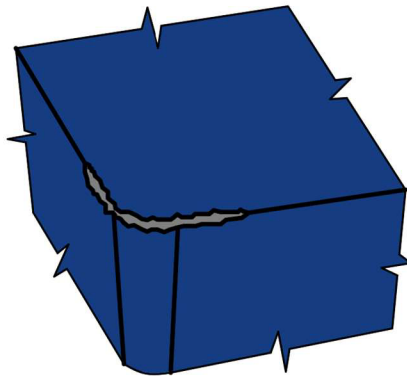
Obr. 7 Opotřebení na hřbetu nástroje [30].



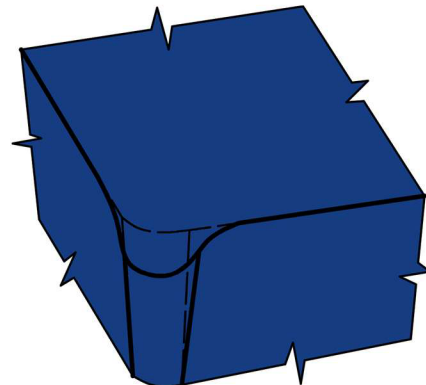
Obr. 8 Výmol na čele [30].

- Vyštipování ostří, viz obr. 9 – je typ opotřebení, který nastává vlivem mechanické nestability, a to především vibracemi stroje, obrobku nebo nástroje samotného. Dalšími faktory, které podmiňují tento typ opotřebení, jsou tvrdé vměstky obsažené v povrchové vrstvě obráběného materiálu a nesouvislé přerušované řezy, které způsobují místní přetížení řezné části nástroje. Dlouhodobým místním přetížením dochází ke vzniku prasklin a následnému vyštipování ostří, přičemž se vyštipováním rozumí jako ztráta drobných částeczek z ostří řezného nástroje. [32; 33]
- Plastická deformace, viz obr. 10 – je dalším typem opotřebení, vznikajícím především za tepelného přetěžování nástroje, které je vyvíjeno v důsledku

vysokých řezných rychlostí s vysokými hodnotami posuvů nebo při obrábění materiálu s vysokou tvrdostí. Příkladem mohou být kalené oceli nebo superslitiny. Vzniklé teplo je hlavní příčinou změkčení pojiva a společně s vlivem mechanického přetěžování vyvíjeného na břit nástroje, dochází k deformaci jeho špičky, zlomení nebo k rychlému vytvoření opotřebení na hřbetu. [30; 32; 33]

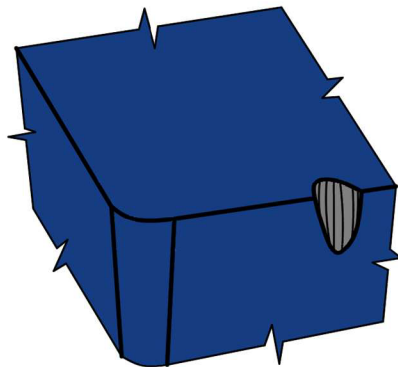


Obr. 9 Vyštipování ostří [30].

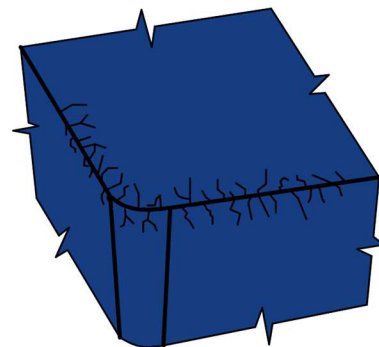


Obr. 10 Plastická deformace [30].

- Opotřebení ve tvaru vrubu, viz obr. 11 – je opotřebení, ke kterému může docházet na hlavním, ale zároveň i na vedlejším hřbetu řezného nástroje. Při projevu vrubu na vedlejším hřbetu břitu se jedná o opotřebení způsobené v důsledku mechanických příčin, a to zejména, když je povrch obráběného materiálu tvrdší případně abrazivnější než jeho jádro. Jakmile se objeví vrub na hlavním hřbetu břitu, jedná se o adhezní opotřebení, které zároveň může souviset i s oxidačním opotřebením. Vruby následně vznikají v oblasti, kde dochází ke kontaktu boku třísky s břitem nástroje a omezují se zásadně na místo, kudy do oblasti řezu proudí vzduch. [9; 30; 33; 34]
- Hřbenové trhliny, viz obr. 12 – vznikají především vlivem teplotních šoků, kdy teplota materiálu břitu vlivem záběru roste a při výstupu kolísá. Použití chladících kapalin se proto nedoporučuje. Dalším faktorem, který přispívá tomuto typu opotřebení jsou mechanické rázy. Z výše zmíněného vyplývá, že se tento typ opotřebení vyskytuje především při frézování nebo u soustružení s přerušovanými řezy. Hřbenové trhliny vznikají v celé délce břitu. Následně může docházet k vylamování řezného materiálu mezi jednotlivými trhlinami, které může vyústit až v náhlý lom břitu. [30; 33; 34]



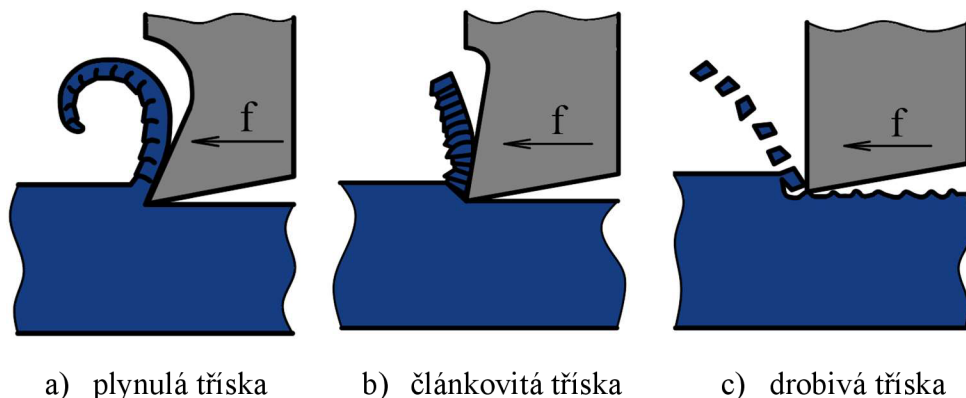
Obr. 11 Vrub na ostří [30].



Obr. 12 Hřbenové trhliny [30].

- Tvorba třísky – má velký vliv na kvalitu a produktivitu obrábění, neboť jejich nevhodný tvar či způsob odvádění ovlivňuje obrobitelnost a efektivitu výroby. Při obrábění dochází k možnému vzniku tří druhů třísek [35; 36]:

- Plynulá tříška, viz obr. 13a – vzniká především u měkkých a houževnatých materiálů, kterými mohou být oceli případně slitiny hliníku nebo mědi. Dále je podmínkou pro vytvoření plynulé třísky malý posuv, velká řezná rychlost a velké pozitivní úhly čela. Tříška odchází po čele nástroje a na této straně styku je hladká. To je důvodem, proč je tento druh třísky z hlediska kvality obrobene plochy nejvhodnější. Tříška je dále formována do různých šroubovic nebo spirál a vzhledem k jejich délce může docházet k namotávání na obrobek nebo nástroj. Bez použití utvařeče třísky může dojít ke zvýšenému riziku poranění obsluhy nebo poškození nástroje a obrobku. [36; 37]
- Článekovitá tříška, viz obr. 13b – je vytvářena při obrábění tvrdších a tvárných materiálů nebo při středních úhlech čela a nízkých řezných rychlostech. Při utváření třísky dochází ke vzniku jednotlivých segmentů, které jsou patrné na její vnější straně. Tříška odchází po čele nástroje v krátkých intervalech a tvaruje se do různých tvarů, nejčastěji však do krátkých šroubovic. Pro procesy obrábění se jedná o nejpříznivější utváření. [36; 37]
- Drobná tříška, viz obr. 13c – se vytváří při obrábění tvrdých a křehkých materiálů nebo při velké šířce záběru ostří, nízké řezné rychlosti a negativních úhlech čela. Drobná tříška je způsobena vylamováním malých elementů, které mají mezi sebou malou soudržnost. Vlivem vylamování dochází k horší dosahované textuře povrchu. Velikost třísky je optimální pro její snadné odvádění z místa řezu, ale způsobuje narušování břitu nástroje. [36; 37]



Obr. 13 Druhy třísek [37].

2.4 Zkoušky obrobiteľnosti

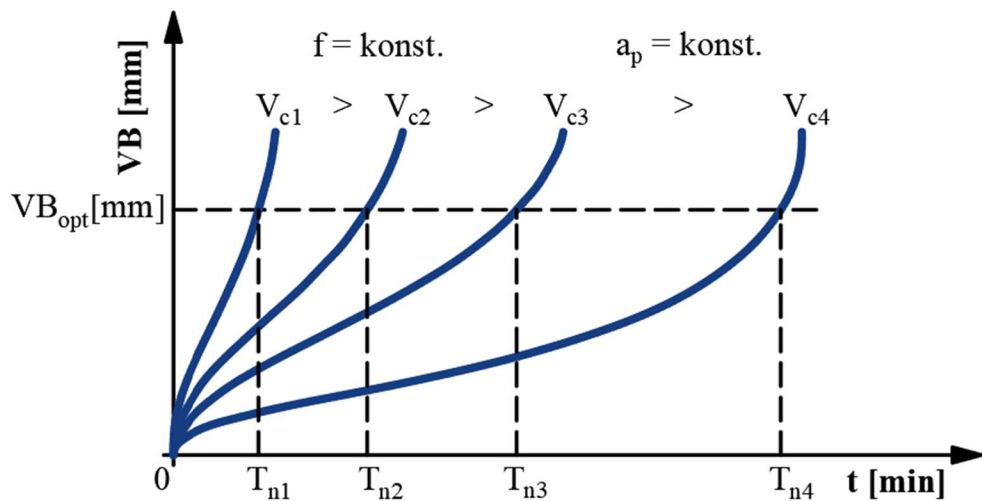
Stupeň obrobiteľnosti zadaného materiálu se může lišit u soustružení, frézování, broušení nebo jiné metody obrábění. Tam, kde je využita jedna metoda obrábění a materiál při tomto způsobu vykazuje vysokou obrobiteľnost, při aplikaci jiné metody tomu může být naopak. Proto je nanejvýše vhodné, aby se zkoušky obrobiteľnosti aplikovaly pro různé metody zvlášť. [6; 8; 15]

Rozlišují se zkoušky dlouhodobé a krátkodobé, případně přímé a nepřímé [6; 8]:

- Dlouhodobé zkoušky obrobiteľnosti – Jedná se o zkoušku trvanlivosti prováděnou frézováním nebo soustružením při zvolených konstantních řezných podmínkách. Pro zvolenou geometrii a druh řezného nástroje se obrábí pomocí odstupňovaných řezných rychlostí až do optimálního otupení břitu. Řezná rychlost je hlavním parametrem této zkoušky. Tuto zkoušku lze určit za základní, neboť se podle ní hodnotí míra objektivit ostatních zkoušek obrobiteľnosti [38]. Dále je používána i pro určování řezivosti nástroje. [8]

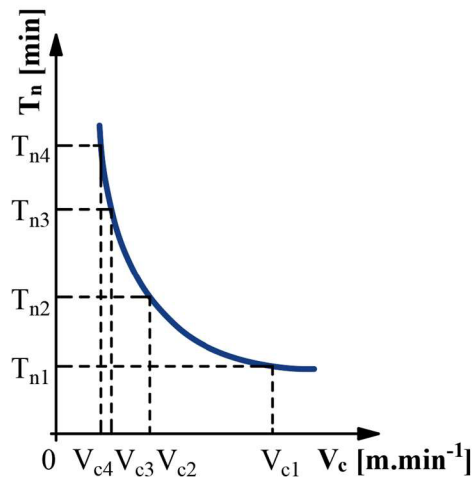
Průběh dlouhodobé zkoušky má tři obecné kroky [8]:

- V první řadě je potřebné změřit časový průběh opotřebení na hřbetu nástroje (VB) pro několik zvolených hodnot řezných rychlostí, při jinak konstantních řezných podmínkách. Následně se sestojí křivky otupení, viz obr. 14. [6; 8]

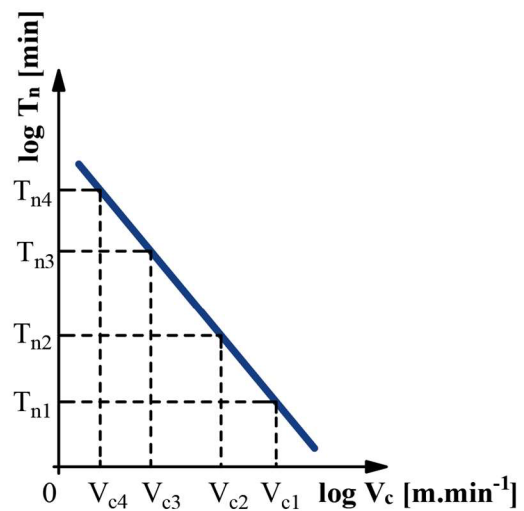


Obr. 14 Křivky otupení [8].

- Ve druhém kroku se určí kritérium opotřebení VB_{opt} . Pomocí této hodnoty je stanovena odpovídající trvanlivost břitu pro všechny řezné rychlosti, viz obr. 15. [8]
- Následuje sestojení závislosti $T_n = f(v_c)$, která je vyobrazena v logaritmických souřadnicích, viz obr. 16. Následně je pro vybranou trvanlivost možné stanovit index obrobitelnosti. Ten se stanoví pomocí srovnání řezné rychlosti zkoumaného materiálu s řeznou rychlostí etalonového materiálu. [8]



Obr. 15 Jednotlivé trvanlivosti na základě kritéria opotřebení [8].



Obr. 16 Závislost trvanlivosti na řezné rychlosti [8].

- Krátkodobé zkoušky obrobitelnosti – mají výhodu v mnohem kratší době trvání a ve vysoké úspoře materiálu. Jejich přesnost je však ve srovnání s dlouhodobými zkouškami méně objektivní, ale vyhovující. Při současném rychlém vývoji nových materiálů, které jsou pevné, tvrdé, a přitom houževnaté je tato zkouška velmi žádaná. Používají se především u třískového obrábění s řeznou geometrií břitu, která je definovatelná. [6; 8]

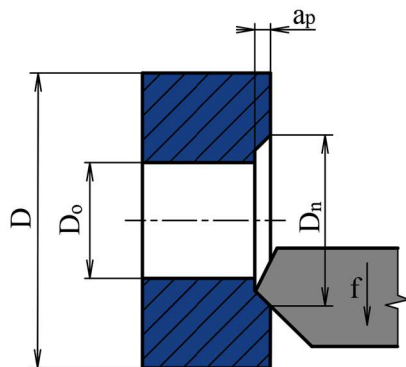
Své uplatnění nacházejí především pro rozřídění skupiny materiálu podle stupně obrobitelnosti, k ověření možné změny stupně obrobitelnosti u jednotlivých dodávek stejného materiálu nebo pro rychlé určení relativní obrobitelnosti u nově vyvinutých materiálů. [6; 8]

Podle principu se tyto zkoušky dále dělí na přímé a nepřímé. U přímého přístupu je zjišťována intenzita opotřebení řezné části nástroje za smluvně upravených podmínek. Přímé metody zjišťování obrobitelnosti jsou [6; 8]:

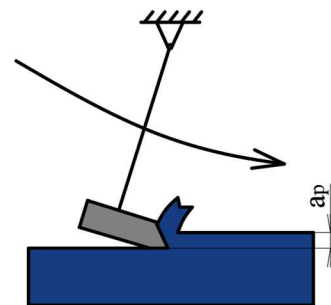
- čelní krátkodobá zkouška, viz obr. 17,
 - spočívá v testování na mezikruží o průměrech D_0 a D . Soustruží se z vnitřního průměru D_0 na průměr D_n , při konstantních otáčkách, posuvu a hloubce záběru ostří. Na průměru D_n nástroj dosahuje předem stanovené hodnoty opotřebení. Kritériem je porovnání řezných rychlostí na zkoumaném a etalonovém materiálu na obráběném průměru D_n . [8]
- mikrozkouška trvanlivosti,
- snížení míry opotřebení,
- použití nástroje se sníženou řezivostí,
- zvýšením řezné rychlosti.

Naopak u nepřímého testování se vychází z předpokládaného vztahu mezi opotřebením řezné části nástroje a parametry, které jsou charakteristické pro řezný proces. Nepřímé metody zjišťování obrobitelnosti jsou [6; 8]:

- Leyensetterova metoda, viz obr. 18,
 - vychází z principu Charpyho kladiva. Pomocí připevněného nože (na kyvadle) je do vzorku vyryt žlábek. Hodnota indexu obrobitelnosti je pak poměr mezi délkou žlábků, případně hloubkou vniku nože mezi zkoumaným a etalonovým materiálem. Nůž musí být pokaždé spuštěn ze stejné výšky. [8]
- dynamická metoda,
- měření tvrdosti obrobku,
- mikrometrická metoda,
- porovnání tvaru třísky,
- vrtání při konstantním tlaku,
- pomocí teploty řezání,
- měření hloubky zpevněné vrstvy.



Obr. 17 Princip čelní krátkodobé zkoušky [8].



Obr. 18 Princip Leyensetterovy metody [8].

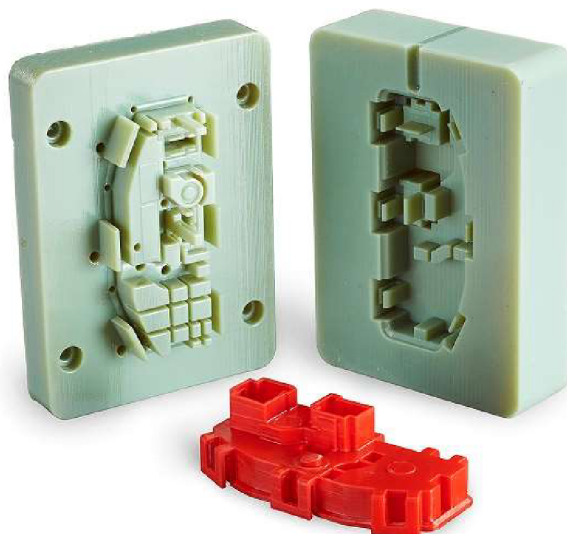
3 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE

Aditivní výroba (AV) je proces, při kterém dochází k vytvoření hmotného modelu z digitální předlohy. Hmotný model se vytváří postupným přidáváním materiálu, který je nejčastěji ve formě prášku, kapaliny nebo drátu, a to horizontálně vrstvu po vrstvě o konstantní tloušťce, dokud nevznikne finální trojrozměrný tvar. Tím se zásadně odlišují od subtraktivních technologií, kde je finálního tvaru dosaženo pomocí odebrání výchozího materiálu. [39]

Tyto technologie umožňují vyrábět velmi složité vnější i vnitřní tvary bez nutnosti složitých a časově náročných procesů. Avšak aby bylo možno vytvořit požadovaný tvar musí být přidávaný materiál vhodně nataven, popřípadě vytvrzen pomocí laseru, elektronového svazku, plazmy nebo lepidla. [39]

Hlavní předností AV je zajištění rychlejší a levnější výroby prototypových dílů. Ty napomáhají k nalezení chyb ve výrobní dokumentaci, ověření vyrobitelnosti a smontovatelnosti, a tím zajišťují kratší etapu vývoje výrobku a výrazně podporují jeho rychlejší uvedení do sériové výroby. To napomáhá výrobku při zvyšování jeho konkurenceschopnosti na trhu. [40]

Firma Robert Seuffer GmbH & Co. KG, která vyrábí senzory, elektroniku a ovládací systémy pro použití v mnoha průmyslových odvětvích, je konkrétním příkladem snížení nákladů a výrobního času pomocí využití aditivní technologie. Firma uvedla, že prováděla testování k ověření vhodnosti a funkčnosti potenciálních nových dílů vytvořením prototypů pomocí kovových forem. Kovové formy jsou drahé a jejich dodací lhůty se pohybují okolo několika týdnů. Využitím formy vyrobené aditivní technologií PolyJet, viz obr. 19 firma uspořila 98 % nákladů a 96 % výrobního času, viz tab. 3. To znamená urychlení výroby nových forem po každé úpravě designu, a tím docílení rychlejšího uvedení finálního produktu na trh. [41]



Obr. 19 Forma vyrobená aditivní technologií PolyJet [42].

Tab. 3 Úspory nákladů a doba výroby [41].

Metoda	Náklady [Kč]	Doba výroby [dny]
Kovová forma	1 230 528	56
Forma PolyJet	30 765	2
Úspory	1 199 763	54

I aditivní technologie mají své nevýhody, jako je například pomalost, rozměrové omezení závislé na velikosti stroje nebo smrštění rozměrů. Navíc kvůli smrštění dochází i k většímu tření, což může způsobit změnu kruhových otvorů na oválné. [43]

3.1 Proces výroby

Proces výroby, viz tab. 4, je u všech metod aditivních technologií velmi podobný. V prvním kroku se buď vymodeluje požadovaný tvar v některém z CAD softwaru nebo máme skutečnou součást, která je naskenována některou z metod kontaktního či nekontaktního skenování. Případně může být využit libovolný řídicí CNC program. Vzhledem k tvorbě modelu, který může být i velmi komplexní, se jedná o časově velmi náročnou oblast. [40; 44]

Dalším krokem je převod a přenos dat. Model, který byl vytvořen v některém z CAD softwaru, je převeden nejčastěji do formátu STL. Tento typ souboru popisuje povrch součásti ve formě konečného množství trojúhelníkových ploch. STL soubor je následně přenesen do vhodného softwaru. Tato oblast je velmi krátká a pravděpodobně i časově nejkratší z celého procesu výroby. [44; 45]

Třetím krokem je kontrola a příprava. V této fázi lze vytvářet podpěry, které jsou nezbytné pro správné vytištění součásti. Následně je softwarem vygenerovaný kód, který nese údaje o přesných drahách nástroje, aby bylo možné vytisknout součást vrstvu po vrstvě. [44]

Předposledním krokem je samotný tisk. Tato oblast procesu je plně automatizovaná. Vzhledem k dlouhé době tisku, který může trvat i několik hodin, je obvyklé, že operátoři nechávají tisknout součásti přes noc. Většina tiskáren je vybavena informativními systémy, které mohou operátorovi na dálku sdělovat informace o průběhu tisku. [44]

Pátým a posledním krokem je konečná úprava dílu tzv. postprocessing. Ten zahrnuje odstraňování případných podpěr, které mohly být využity pro správné vytištění převislých stěn na zhotovované součásti. Jakmile je součást zbavena podpůrných prvků může být dále prováděno abrazivní tryskání, chemické vyhlazování, obrábění nebo tepelné zpracování. Hlavním cílem je zlepšení finálních vlastností tištěných součástí. [44; 46]

Tab. 4 Jednotlivé kroky procesu výroby.

Krok	Proces
1.	Vytvoření modelu v softwaru CAD
2.	Konverze dat do formátu STL
3.	Kontrola a příprava (tvorba podpor)
4.	Tisk dílu
5.	Postprocessing

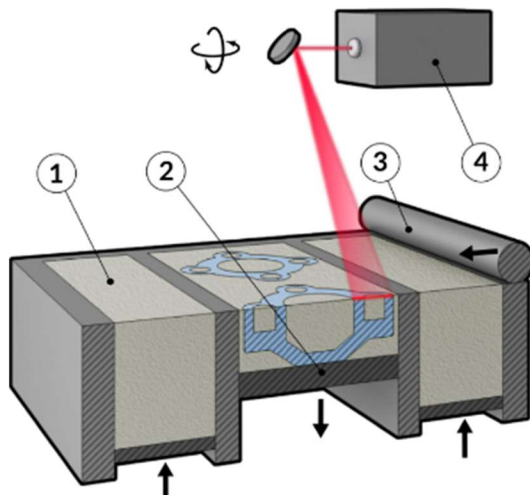
3.2 Používané metody aditivních technologií

Ocelové vzorky pro potřeby testování je možné vyrobit několika různými metodami. Jednotlivé metody mají své vlastní výhody a nevýhody a jejich vhodnost záleží na specifických požadavcích. Obecně se mohou odlišovat pracovním postupem, dosažitelnou přesností, rychlostí nebo požadovanou cenou výroby. Uvažované metody výroby mohou být například:

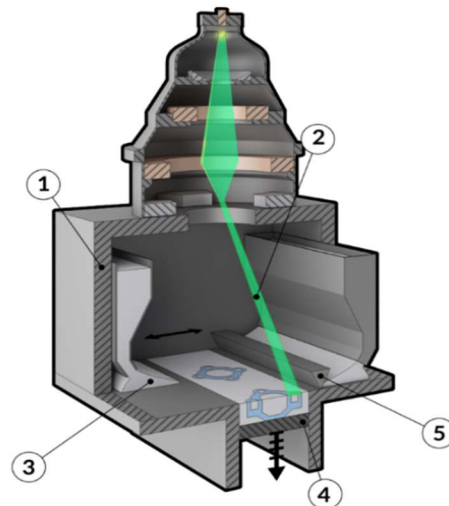
- Selektivní laserové spékání neboli Selective Laser Sintering, (SLS) – je metoda založena na postupném spékání jednotlivých vrstev kovového prášku pomocí laserového paprsku. Postup výroby je znázorněný na obrázku 20. Velmi jemný prášek (1) obsahující částice 20 až 100 μm je v první fázi nanesen na podkladovou desku (2) [40]. Vrstva, nanesená na tuto desku pomocí nanášeče (3), má tloušťku obvykle pod 0,1 mm [47]. Čím tenčí vrstva, tím vyšší přesnost, ale delší doba výroby. Nanesená vrstva je pomocí CO_2 laseru (4) postupně natavována, čímž dojde k samotnému spékání prášku. Okolní nespékaný materiál slouží jako podpora. Po vytvoření první vrstvy se podkladová deska sníží o tloušťku jedné vrstvy dolů a celý proces se opakuje, dokud

není dosaženo finální výšky součásti. Z důvodů zamezení oxidace při samotném procesu je pracovní komora naplněna inertním plynem, kterým je obvykle dusík případně argon. [40; 47]

- Tavení elektronovým svazkem neboli Electron Beam Melting, (EBM) – je metoda znázorněná na obrázku 21, která využívá jako zdroj tepla k natavování jednotlivých vrstev prášku elektronový paprsek (2). Paprsek je řízen pomocí elektromagnetických čoček. Potřebné teplo vzniká přeměnou kinetické energie elektronů při jejich dopadu na výchozí práškový materiál (3). Ten je pomocí dávkovacího zařízení (5) nanášen na podkladovou desku (4), která se při dokončení jedné vrstvy posune o její tloušťku směrem dolů. Tloušťka jedné vrstvy je obvykle kolem 50 μm . Celý proces se odehrává ve vakuové komoře (1), aby se zabránilo oxidaci, která by mohla ohrozit vysoce reaktivní materiály. Výhoda této metody je v její vysoké posuvové rychlosti, která dokáže udržovat několik natavených míst současně. To ve výsledku snižuje teplotní rozdíly mezi jednotlivými místy na součásti a umožňuje dosažení nižších hodnot zbytkových napětí. Touto metodou lze dosáhnout materiálových vlastností ekvivalentních s kovanými výrobky nebo lepších než u výrobků litych. Své uplatnění má v leteckém, zdravotnickém a automobilovém průmyslu. [48; 49; 50]



Obr. 20 Princip metody SLS [51].

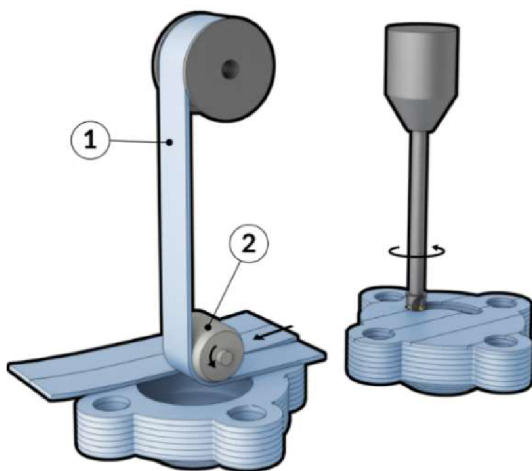


Obr. 21 Princip metody EBM [49].

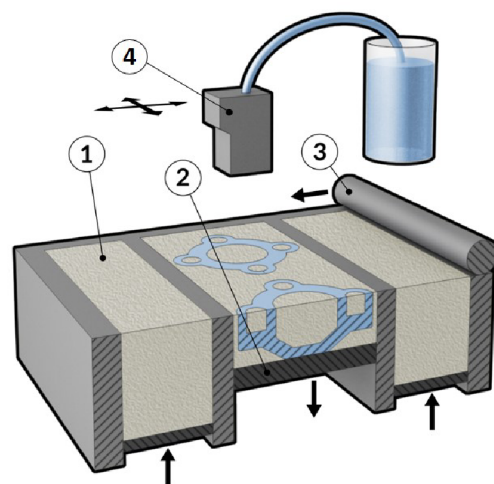
- Ultrazvuková konsolidace neboli Ultrasonic Consolidation, (UC) – tato metoda, která je vyobrazena na obrázku 22 využívá k docílení požadovaného tvaru dva po sobě jdoucí kroky, které se neustále opakují, dokud není dosaženo finálního tvaru výrobku. Prvním krokem je nanesení kovového pásu (1) a jeho následné svaření s pásem předchozím pomocí ultrazvukových vibrací a vysokého tlaku, které zajišťuje sonotroda (2). Svaření materiálu se uskutečňuje už při teplotě nižší než 50 % teploty tání materiálu. Po skončení této operace následuje obrobení nanesené vrstvy do požadovaného tvaru v dané vrstvě. Výhodou této metody je spojování dvou různých materiálů a tvoření složitých vnitřních kontur v daném mezikroku. Navíc tato metoda nevyžaduje ochrannou atmosféru. Výraznou nevýhodou je velký odpad materiálu. [52; 53]
- Tryskání pojiva do práškového lože neboli Binder Jetting, (BJ) – je proces výroby, který se dá rozdělit do tří fází. První fází je samotný 3D tisk, který předchází fázi odstraňování kovového prášku a slinování. Princip tisku je znázorněn na obrázku 23. Jemný prášek (1) je pomocí nanášecího mechanismu (3) rozprostřen v rovnoměrné vrstvě na podkladovou desku (2). Tisková hlava (4) poté nanese na požadovaná místa pojivo, které zajistí spojení prášku. Tento proces se opakuje, dokud nevznikne finální součást.

Takto vytištěná součást, nazývaná jako zelený díl (green body), nemá potřebné mechanické vlastnosti pro požadované aplikace. Proto se dostáváme do fáze odstranění kovového prášku kolem zeleného dílu, kterému předchází vytvrzování z důvodu zvýšení pevnosti pro lepší manipulaci se součásti. Po vytvrzení a odstranění prášku může být zahájena poslední fáze, slinování, která je kombinována s odstraňováním pojiva. Slinování zajistí vzájemným spojením práškových částic požadované mechanické vlastnosti. Provedení je následující [54; 55]:

- zelený díl je zahříván na nízkou teplotu obvykle od 175 do 450 °C v rámci několika hodin z důvodu úplného odpaření pojiva,
- díl bez pojiva je nazýván jako díl hnědý (brown body), tento díl se dále slinuje při zvýšené teplotě,
- následně je slinutý díl ochlazen.

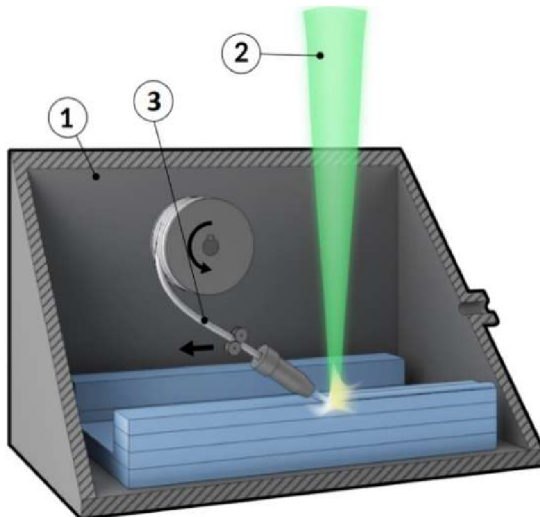


Obr. 22 Princip metody UC [53].

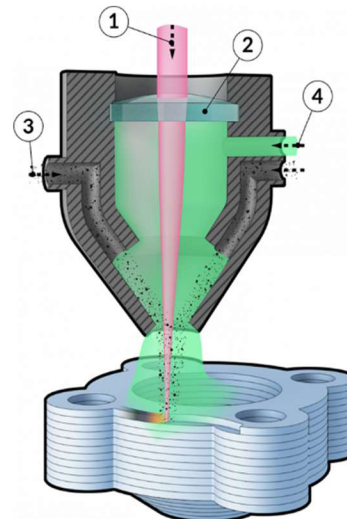


Obr. 23 Princip metody BJ [55].

- Výroba volného tvaru elektronovým paprskem neboli Electron Beam Freeform Fabrication (EBF3) – princip metody schematicky vyobrazený na obrázku 24 využívá vakuovou komoru (1), která zabraňuje vzniku oxidů, a energii fokusovaného elektronového paprsku (2). Elektronový paprsek roztaví kovový drát (3), který je kontinuálně dodáván do místa ohniska ze zásobníku. Roztavený materiál okamžitě tuhne. Z tohoto důvodu není vyžadována stavba podpěr. Opět se postupuje vrstvu po vrstvě, dokud není dokončen požadovaný tvar. Tato metoda umožňuje vyrábět díly s plnou hustotou, což znamená, že výrobek bude mít podobné vlastnosti jako výrobky, které jsou vytvořeny klasickými metodami. Zároveň je tato metoda jediná, kterou lze provozovat i v prostředí s nulovou gravitací. [56; 57]
- Laserem navržené síťové tvarování neboli Laser Engineered Net Shaping (LENS) – je metoda AT vyobrazená na obrázku 25, která využívá laserový generátor k vytvoření laserového paprsku (1). Paprsek je pomocí čočky (2) zaostřen do ohniska, kde je pomocí trysky vstřikován kovový prášek (3). Dochází k roztavení kovového prášku a přilnutí k předcházející vrstvě. Po zhotovení celé vrstvy se laserová hlava řízeně posune o tloušťku jedné vrstvy směrem nahoru. Pro ochranu laseru i taveniny vůči oxidaci se přivádějí inertní plyny (4). LENS má využití u tvorby geometricky náročných součástí, ale je hojně využíván i pro opravy poškozených nebo opotřebovaných povrchů. Značnou nevýhodou je vznik deformací součásti vzhledem k vysokému zbytkovému napětí. [58; 59]



Obr. 24 Princip metody EBF3 [56].



Obr. 25 Princip metody LENS [58].

3.3 Selektivní laserové tavení

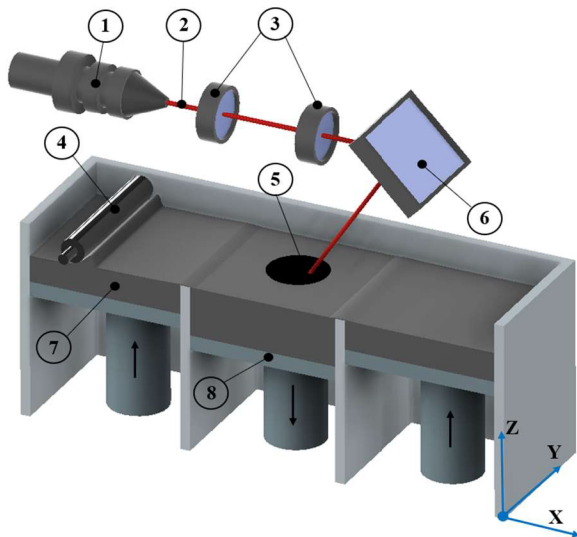
Selektivní laserové tavení neboli Selective Laser Melting, (SLM) je aditivní technologie, která byla využita při výrobě vzorků pro praktickou část této bakalářské práce. Metoda SLM byla vyvinuta spoluprací F & S Stereolithographietechnik GmbH s institutem pro laserové technologie Fraunhofer ILT [60]. První patent na tuto technologii byl podán v roce 1997 a zveřejněn o rok později [60].

Princip technologie SLM, viz obr. 26 je velmi podobný výše zmiňované metodě SLS. Zde ale dochází k úplnému roztavení kovového prášku, nikoliv jenom ke spékání, což umožňuje výrobu homogennějších součástí s vyšší rozměrovou přesností a lepšími fyzikálními vlastnostmi, neboť úplným roztavením je snižována hodnota poréznosti a dosahovaná hustota tak může být až 100 %. Přestože je možné výtisk použít jako finální produkt, je vhodné ho pro přesné aplikace dále zpracovávat na funkčních plochách vhodnou metodou obrábění. [61; 62]

SLM je založeno na tavení jednotlivých vrstev kovového prášku (7), který je nanášen pomocí dávkovacího zařízení (4) na pohyblivou podkladovou desku (8) uloženou v pracovní komoře. Ta je naplněna inertním plynem, argonem nebo dusíkem, který zamezuje oxidaci. Tloušťka nanášené vrstvy prášku musí být rovnoměrně rozprostřena a bývá okolo 30 μm . Nanášený prášek je taven pomocí mimořádně silného laserového paprsku (2), který je vyzařován pomocí laseru (1) a usměrňován prostřednictvím čoček (3) do zrcadla (6), které následně svým natáčením koriguje paprsek v potřebných osách X a Y. Takto korigovaný paprsek začne obkreslovat vzor první vrstvy tištěné součásti (5). Jakmile je první vrstva dokončena, podkladová deska je posunuta o tloušťku jedné vrstvy v ose Z směrem dolů. Tento princip se opakuje, dokud není dosaženo finální výšky požadované součásti. [61; 62; 63]

Tisknutá součást může obsahovat velice složité geometrické tvary, vnější i vnitřní, které by bylo velmi obtížné vytvořit subtraktivní technologií. Příkladem geometrické složitosti mohou být nástroje s vnitřními kanálky pro přívod procesních kapalin, turbíny, viz obr. 27 a další komplexně složité součásti. Geometrická složitost není jedinou předností této metody, mezi další patří [62; 63; 64]:

- vysoká homogenita,
- vyšší rozměrová přesnost než u SLS,
- velký výběr kovových materiálů (koroziivzdorné a nástrojové oceli, slitiny Al, Ti, Ni),
- nebo vysoká efektivita využití materiálu.



Obr. 26 Princip metody SLM [65].



Obr. 27 Turbína vyrobená metodou SLM [66].

Nevýhody této technologie jsou obecnými nevýhodami všech aditivních technologií. Patří sem vysoká pořizovací cena jak tiskáren, tak materiálů určených pro tisk i vysoká cena samotného provozu. Dále je velikost výrobků omezena velikostí pracovního prostoru tiskárny. Navíc dochází ke smrštění tištěného dílce, proto musí být funkční rozměry vhodně navrženy, aby po vytištění odpovídaly požadovaným hodnotám. Ve srovnání s vysokorychlostním obráběním se stále jedná o velmi pomalý proces výroby, i když selektivní laserové tavení zvládá rychlost tvoření až $70 \text{ cm}^3/\text{h}$. [61; 62; 63; 64]

Tato metoda AT si našla své uplatnění v různých průmyslových odvětvích. Schopnost vyrábět lehké komponenty s vysokou geometrickou složitostí tvaru se uplatňuje v leteckém průmyslu pro výrobu lopatek turbín nebo palivových trysek, viz obr. 28. V lékařském průmyslu je SLM využito pro zubní náhrady, implantáty nebo pro výrobu chirurgických nástrojů. V automobilovém průmyslu je tato metoda využívána například pro výrobu výfukových potrubí, viz obr. 29. [63; 64]



Obr. 28 Palivové trysky [67].



Obr. 29 Výfukové potrubí [68].

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Pro vyhodnocování obrobitelnosti byly porovnávány tři vzorky, viz tab. 5, na základě naměřených dat. Vzorky se lišily výrobou případně tepelným zpracováním. Materiálem testovaných vzorků byla maraging ocel M300 jejíž chemické složení je uvedeno v tab. 6. V první fázi měření byla získána data ve formě sil ve směrech os x, y a z, které byly změřeny při frézování standartním nástrojem, který se pohyboval v předem navržených drahách. Následně byla měřena tvrdost vzorků, která předcházela měření drsnosti na obrobených plochách. V neposlední řadě bylo pomocí optického mikroskopu změřeno opotřebení břitů.

Tab. 5 Vzorky využity v praktické části.

Aditivně vyrobený vzorek (ADIT)		Aditivně vyrobený vzorek s tepelným zpracováním (ADIT-TZ)		Konvenčně vyrobený vzorek (KON)	
Číslo vzorku:	1	Číslo vzorku:	2	Číslo vzorku:	3
					

Tab. 6 Chemické složení maraging oceli M300 [69].

Chemické složení [hm. %]									
Fe	Ni	Co	Mo	Ti	Si	Mn	C	P	S
zbytek	17–19	7–10	4,5–5,2	0,3–1,2	≤0,1	≤0,15	≤0,03	≤0,01	≤0,01

Prvním testovaným vzorkem byla maraging ocel M300, která byla vyrobena aditivní technologií SLM, procesní parametry jsou uvedeny v tab. 7. Druhý vzorek byl stejného materiálu jako první, včetně výroby pomocí aditivní technologie SLM, změnou bylo pouze tepelné zpracování. Tepelným zpracováním bylo precipitační vytvrzování (obvykle označováno pojmem stárnutí), které způsobuje zvýšení mechanických vlastností zejména pevnosti v tahu (až 2x) a tvrdosti. Zvýšení vlastností je způsobeno v důsledku precipitace intermetalických sloučenin při teplotě cca 500 °C a výdrži na teplotě až několik hodin (3–6 dle bližší specifikace materiálu). Posledním testovaným vzorkem byla opět maraging ocel M300, pouze vyrobená konvenčním způsobem pomocí válcování. [70; 71]

Tab. 7 Procesní parametry využity při tisku vzorků.

Energetická hustota [J · mm ⁻³]	Výkon laseru [W]	Rychlost skenování [mm · s ⁻¹]	Tloušťka vrstvy [mm]	Šrafovací vzdálenost [mm]
127	400	830	0,04	0,095

Mechanické vlastnosti zmíněné oceli jsou odlišné v různých směrech testovaného vzorku, viz obr. 30. Zároveň použitý, tepelně zpracovaný vzorek pomocí precipitačního vytvrzování při

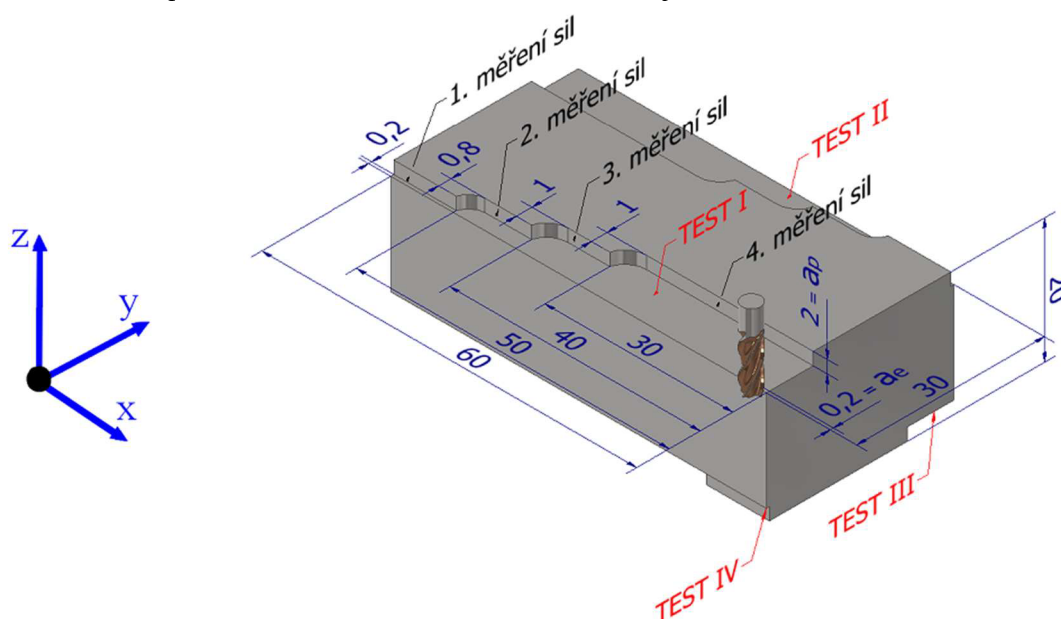
490 °C po dobu 6 hodin vykazuje mnohem vyšší mechanické vlastnosti oproti vzorku, který tepelně zpracován nebyl. Mechanické vlastnosti v závislosti na směru jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 Mechanické vlastnosti maraging oceli M300 [69].

	Bez tepelného zpracování	S tepelným zpracováním
Směr	Pevnost v tahu [MPa]	
Horizontální (XY)	1147	1917
Vertikální (Z)	1035	1952
Směr	Mez kluzu [Mpa]	
Horizontální (XY)	976	1873
Vertikální (Z)	794	1898
Směr	Modul pružnosti v tahu [Gpa]	
Horizontální (XY)	185	218
Vertikální (Z)	189	199
Směr	Tvrдость	
Horizontální (XY)	350 HV 0,5	574 HV 0,5
Vertikální (Z)	357 HV 0,5	561 HV 0,5

4.1 Popis metodiky testování

Všechny použité vzorky pro praktickou část byly zuhlovány na rozměry 60×30×20 mm. Při testu I byla určena dráha frézy s konstantní šířkou radiálního záběru ostří, kdy $a_e = 0,2$ mm a s konstantní šířkou záběru ostří, kdy $a_p = 2$ mm. Rozdílem v jednotlivých sériích průjezdů byla délka obrobené dráhy, která byla zkrácena vždy o 10 mm vůči předchozí sérii. Důvodem bylo zachování plochy určené k měření drsnosti povrchu na jednotlivých stranách. V každém posledním průjezdu dané série bylo měřeno silové zatížení pomocí piezoelektrického dynamometru od společnosti Kistler. Metodika testování je uveden na obr. 30.



Obr. 30 Metodika testování.

Ostatní testy, II, III a IV zkušebních vzorků, byly obráběny se stejnou šířkou radiálního záběru ostří i šířkou záběru ostří jako při testu I. Změnou byla pouze hodnota řezné rychlosti, která byla pro každý test rozdílná, viz tab. 9. Měření silového zatížení ve zbylých testech probíhalo vždy v posledním průjezdu dané série, stejným způsobem jako při testu I.

Tab. 9 Řezné podmínky pro testování.

Test	v_c [m·min ⁻¹]	f_z [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	Chlazení
I	30	0,02	2	0,2	Ne
II	40	0,02	2	0,2	Ne
III	50	0,02	2	0,2	Ne
IV	60	0,02	2	0,2	Ne

4.2 Použitý stroj a nástroj

Použitým obráběcím strojem, pro provedení experiment, bylo vertikální pětiosé obráběcí centrum MCV 1210, viz obr. 31. Stroj disponuje elektrovřetenem o maximálním výkonu 31 kW, který umožňuje dosažení maximálních otáček o hodnotě 18 000 min⁻¹. Bližší technické údaje jsou uvedeny v příloze 1. [72]



Obr. 31 Obráběcí centrum MCV 1210.

Zvoleným nástrojem, pro obrábění vzorků, byla čtyřbřitá válcová čelní stopková fréza ze slinutého karbidu s vnějším průměrem 3 mm, viz obr. 32. Pro každý obrobený test (I–IV) na daném vzorku byla využita fréza nová. Důvodem bylo zajištění shodných vstupních podmínek

pro jednotlivé testy. Celkově bylo využito dvanáct fréz, na kterých bylo následně měřeno opotřebení pomocí optického mikroskopu.



Obr. 32 Čtyřbřitá válcová čelní stopková fréza.

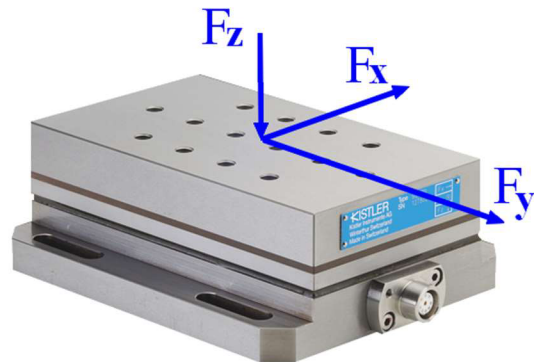
4.3 Měřicí přístroje

V rámci testování byly využity různé přístroje, které byly nezbytnou součástí pro zajištění potřebných dat pro jejich následnou analýzu a vyhodnocení. Všechny přístroje byly využity v rámci univerzitních dílen Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Využité přístroje pro potřeby testování byly:

- Piezoelektrický dynamometr Kistler, viz obr. 34 – umožňující měřit silové zatížení v jednotlivých osách x , y a z . Dynamometr Kistler byl zapojen přes distribuční box do zesilovače typu 5070, viz obr. 33, který byl zapojený do notebooku. Pomocí softwaru Dynoware bylo následně analyzováno silové zatížení v čase ve zmíněných osách.



Obr. 33 Zesilovač Kistler.



Obr. 34 Dynamometr Kistler 9257B [73].

- Tvrdoměr Zwick Roell ZHR 4150AK, viz obr. 35 – využitý pro potřeby testování využívá metodu měření tvrdosti dle Rockwella. Jeho předběžné zatížení má hodnotu 10 kg. Zkušební zatížení je nastavitelné dle potřeby o hodnotách 60, 100 a 150 kg. Hodnota tvrdosti je přímo odečtena z tvrdoměru. [74]
- Drsnoměr firmy Taylor Hobson, viz obr. 36 – umožnil měření drsnosti povrchu na obrobenech plochách a stranách. Jedná se o přístroj s horizontálním posuvem hrotu v rozmezí 0–50 mm. Přístroj byl zapojen do počítače, kde se pomocí softwaru Ultra Version vyhodnotily potřebná data.



Obr. 35 Tvrdoměr.

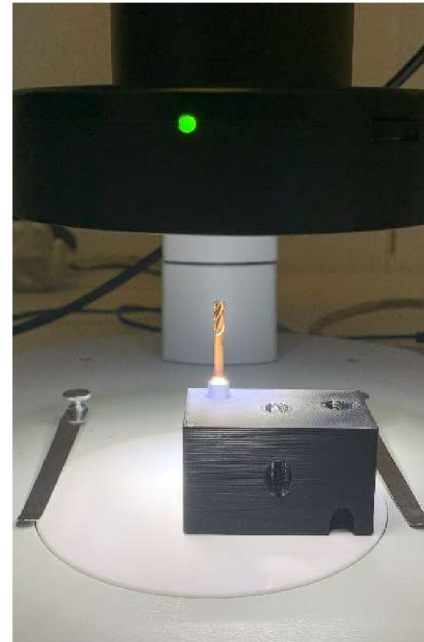


Obr. 36 Drsnoměr Taylor Hobson.

- Mikroskop Olympus SZX10, viz obr. 37a – je stereo mikroskop vhodný pro výzkumné účely vzhledem k jeho vysokému rozlišení. Mikroskop byl spárován se softwarem PRECiV Capture, který poskytuje základní funkce 2D měření. Prostřednictvím tohoto softwaru bylo změřeno opotřebení použitých nástrojů, který byly pro snadnější kontrolu uloženy v přípravku, viz obr. 37b. [75]



a) Olympus SZX10



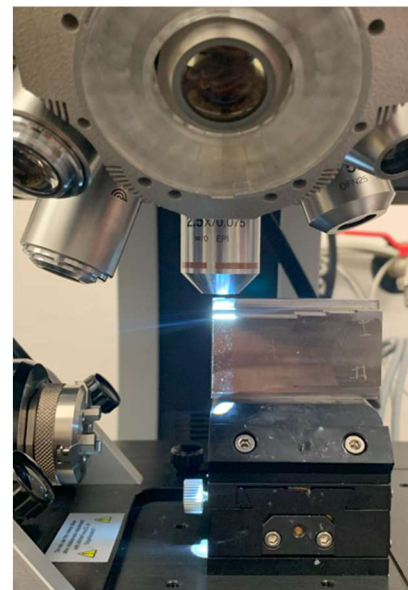
b) upevnění nástroje v přípravku

Obr. 37 Sestava mikroskopu.

- Alicona InfiniteFocus G5, viz obr. 38a – byla využita pro detailní zkoumání obrobených drah. InfiniteFocus je vysoce přesný a rychlý optický 3D měřicí systém [76]. Při měření vzorků v dané poloze, viz obr. 38b, byl využit objektiv se zvětšením 2,5x a s numerickou aperturou objektivu 0,075. Vzhledem k eliminaci nežádoucích odlesků, které by mohly zkreslit vyhodnocovaný povrch, byl použit polarizační filtr.



a) Alicona InfiniteFocus G5

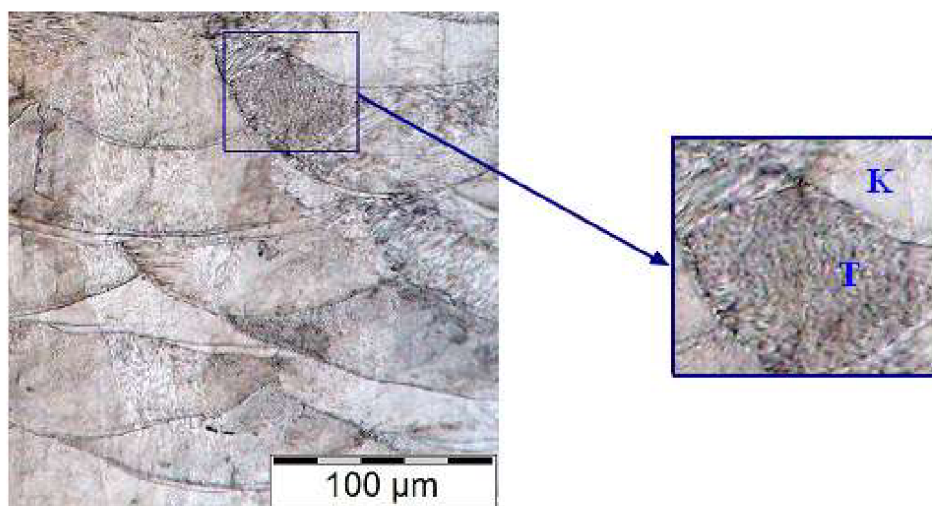


b) poloha vzorku

Obr. 38 Měřicí sestava.

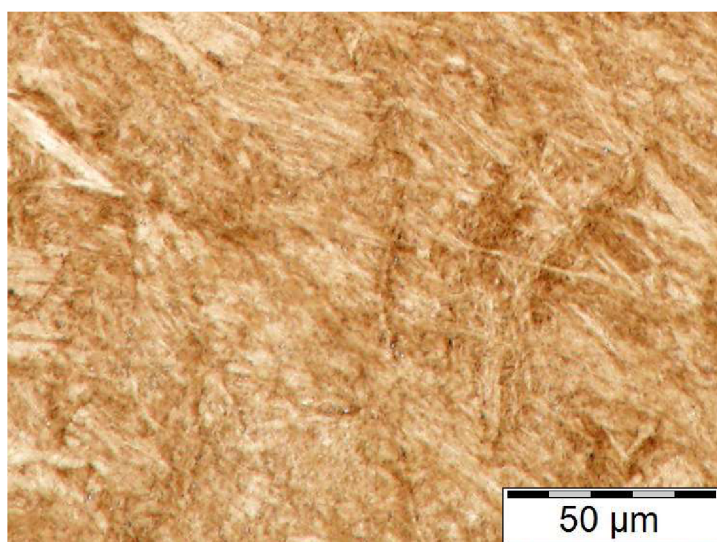
4.4 Struktura a měření tvrdosti

Na vyobrazené struktuře ADIT vzorku, viz obr. 39, jsou vidět dva opakující se stavy. Temperovaný (T) a kalený (K). Tato buněčná struktura obsahuje po vytisknutí převážně martenzit a malý podíl zbytkového austenitu dle [1]. Nanesením další vrstvy je předchozí vrstva vystavena zvyšování teploty zapříčiněného přenosem tepla z tuhající vrstvy směrem k substrátu. V důsledku tohoto děje se do určité vzdálenosti od tuhající vrstvy mohou dříve vytvořené vrstvy temperovat. Bílé oblasti jsou považovány za zakalené a jejich tvrdost je oproti temperovaným oblastem vyšší. [77]



Obr. 39 Struktura ADIT vzorku.

Mikrostrukturní změna po stárnutí ADIT-TZ vzorku, viz obr. 40, je způsobena uvolněním zbytkového napětí a intermetalickou precipitací [1]. Precipitační vytvrzování bylo provedeno při 490 °C po dobu 6 hodin. Tato zkrácená doba stárnutí omezila zpětnou koncentraci austenitu precipitací tvrdých intermetalických sloučenin jako jsou Ni_3Mo , Ni_3Ti a Ni_3Al [1]. Pomocí těchto sloučenin se zlepšily mechanické vlastnosti. Vzhledem k jejich vysoké tvrdosti může dojít k vyššímu abrazivnímu opotřebení řezného nástroje.



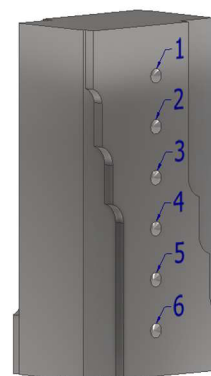
Obr. 40 Struktura po stárnutí ADIT-TZ vzorku.

U všech testovaných vzorků byla měřena jejich tvrdost, dle metody Rockwella. Použitým indentorem byl diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Tvrdost je důležitým měřítkem pro následné vyhodnocování řezných sil. Předpokladem je rostoucí řezná síla s rostoucí

tvrdostí. Naměřené hodnoty tvrdosti jednotlivých vzorků (1–3) jsou uvedeny v tab. 10. Na obr. 41 je schematicky znázorněna poloha jednotlivých vpichů.

Tab. 10 Naměřené tvrdosti zkušebních vzorků.

Číslo vpichu:	Tvrdost [HRC]		
	ADIT	ADIT-TZ	KON
1	31,6	48,1	36,3
2	31,7	51,7	36,6
3	32,0	52,0	35,8
4	31,1	52,6	36,8
5	31,9	52,4	35,8
6	32,1	52,7	35,8



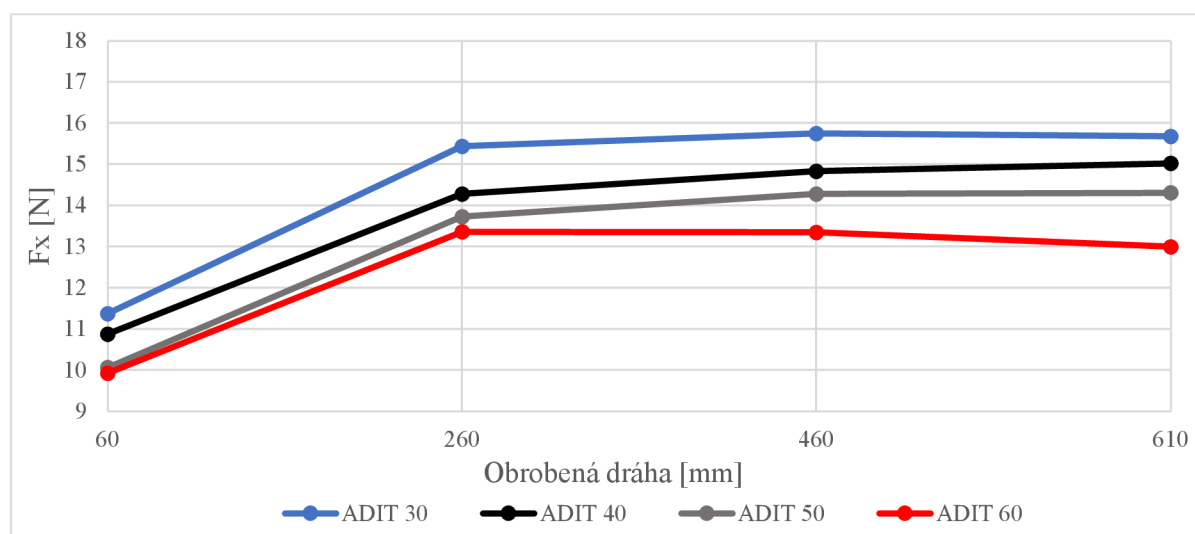
Obr. 41 znázornění vpichů ve vzorku.

Nejtvrdším změřeným vzorkem byl ADIT-TZ. Tvrdost tohoto vzorku je dána tepelným zpracováním, kterým bylo precipitační vytvrzování. Vzorek ADIT nemá velké rozdíly v jednotlivých tvrdostech, které by mohly být zapříčiněny výskytem pórů při tisku vzorku.

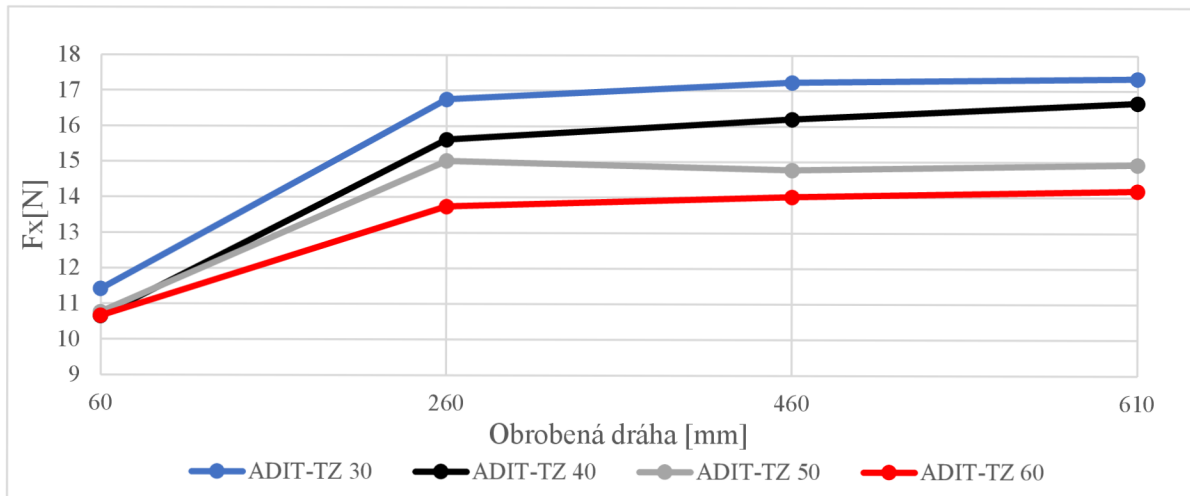
4.5 Naměřené složky sil

Síly naměřené pomocí piezoelektrického dynamometru v osách x, y a z, byly zpracovány do výsledných grafů v závislosti na obrobené dráze. Síly naměřené v ose x reprezentují posuvovou sílu F_f . V ose y byly naměřeny síly charakterizující řeznou sílu F_c . Pasivní síly, které směřovaly do osy nástroje, byly měřeny v ose z.

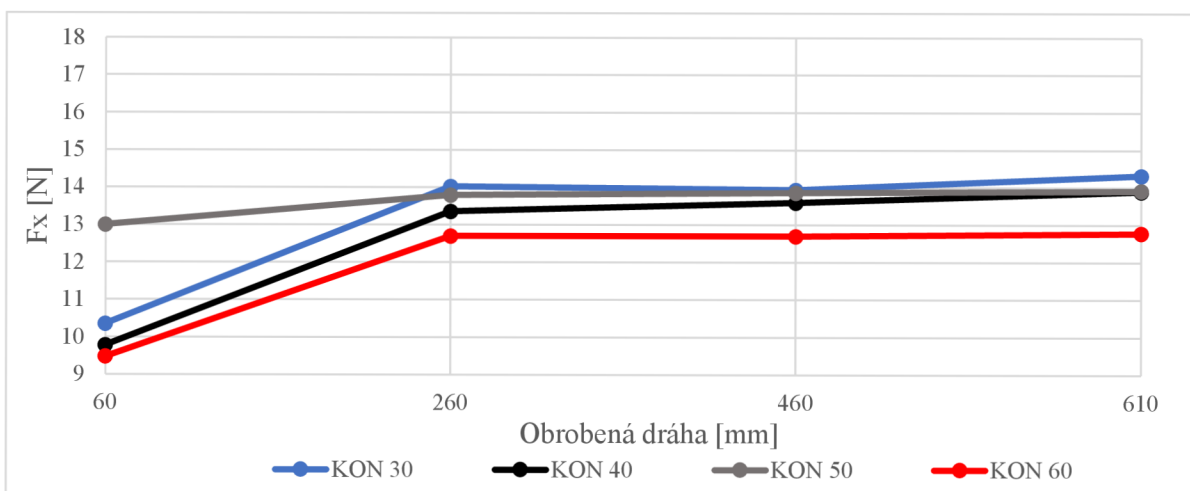
Na obr. 42, 43 a 44 jsou uvedeny grafy zobrazující posuvovou složku celkové síly pro jednotlivé vzorky. Na grafech je vidět, že každá křivka posuvových sil má pokaždé rostoucí charakter. Zvláště strmý nárůst je do obrobené dráhy v délce 260 mm, který je zapříčiněn v důsledku počátečního opotřebení nově zavedeného řezného nástroje. Navazující pozvolný nárůst, až do obrobené dráhy 610 mm, je realizován zvětšováním opotřebení na nástroji. Dále z grafů vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí klesá posuvová složka celkové síly. Nejnižších posuvových sil je pak dosahováno pokaždé při řezné rychlosti $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ u všech zkušebních vzorků.



Obr. 42 Posuvová síla pro ADIT vzorek.

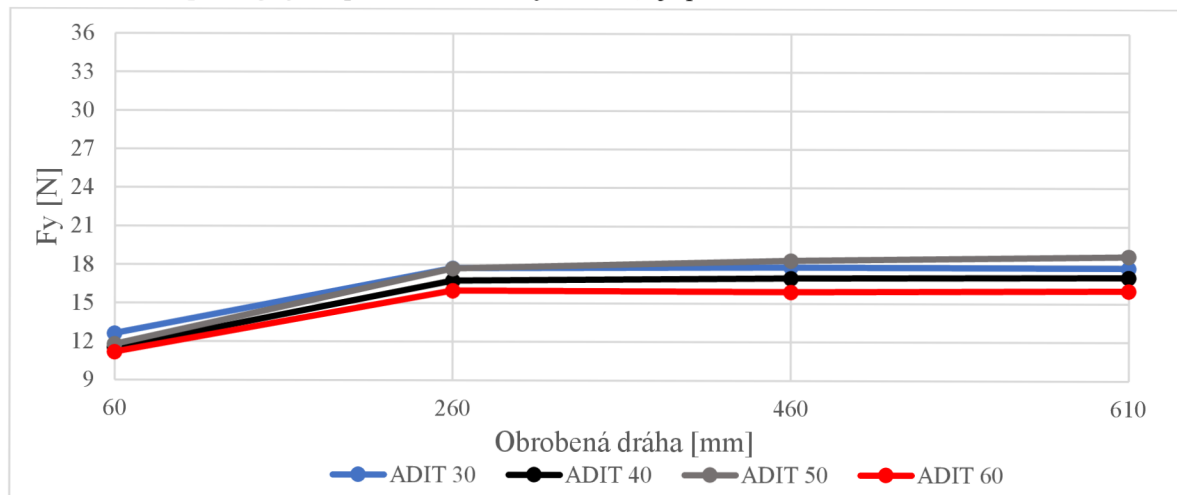


Obr. 43 Posuvová síla pro vzorek ADIT-TZ.

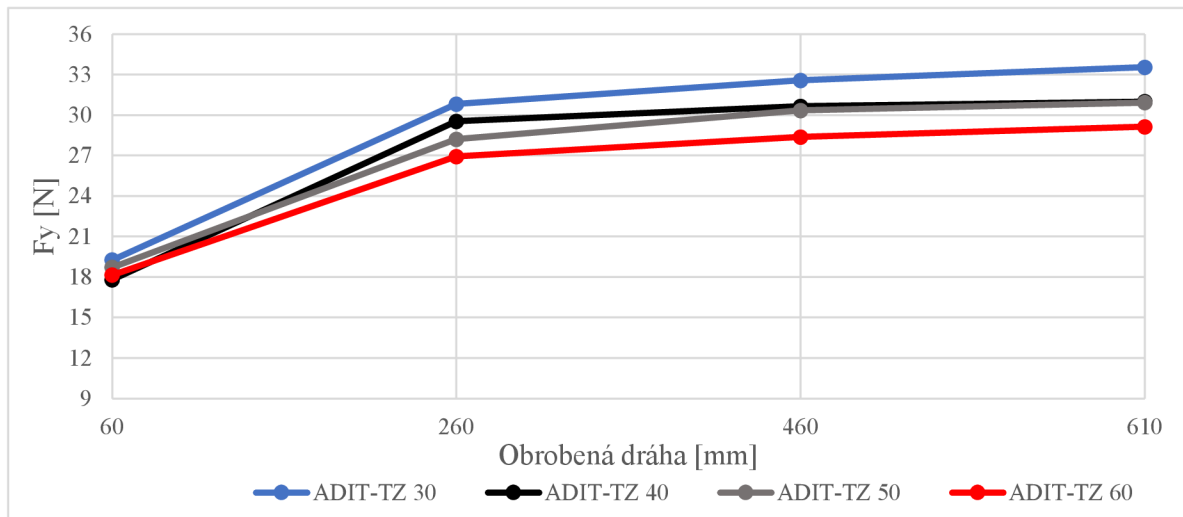


Obr. 44 Posuvová síla pro KON vzorek.

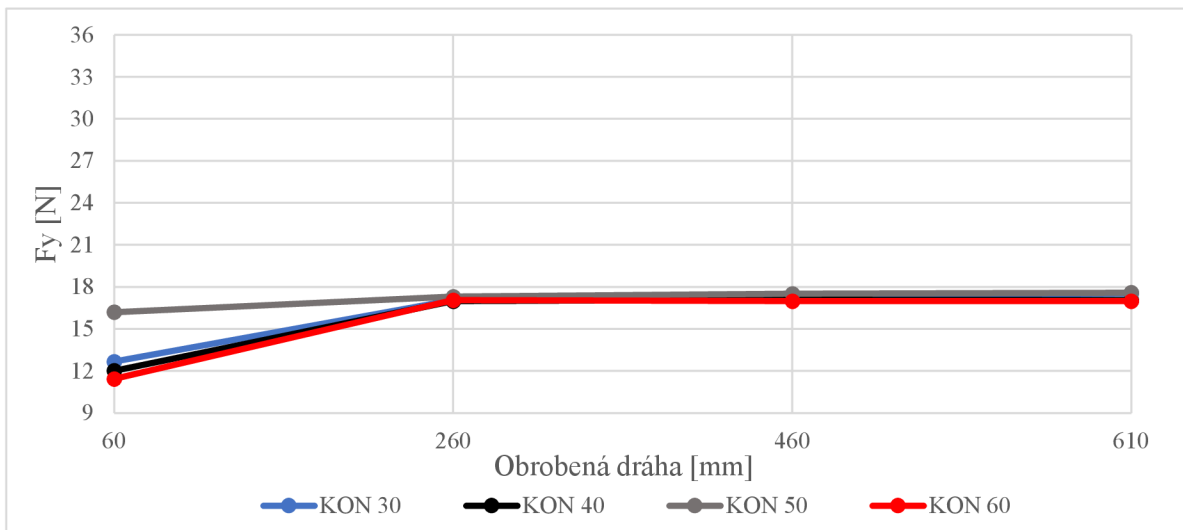
Na obr. 45, 46 a 47 jsou dále uvedeny grafy, které znázorňují průběh řezné síly na ujeté dráze nástroje. Opět si lze povšimnout rapidního nárůstu mezi prvním a druhým měření sil, kdy nástroj obrobil dráhu 260 mm dlouhou. Tento nárůst je stejně jako u posuvové složky zapříčiněn vzniklým opotřebením na novém nástroji. Z grafů dále vyplývá, stejně jako u posuvové složky celkové síly, že se zvyšující se řeznou rychlostí klesá řezná síla. Nejnižších hodnot řezných sil je dosahováno při nejvyšší použité řezné rychlosti, tj. při $60 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 45 Řezná síla pro ADIT vzorek.



Obr. 46 Řezná síla pro ADIT-TZ vzorek.

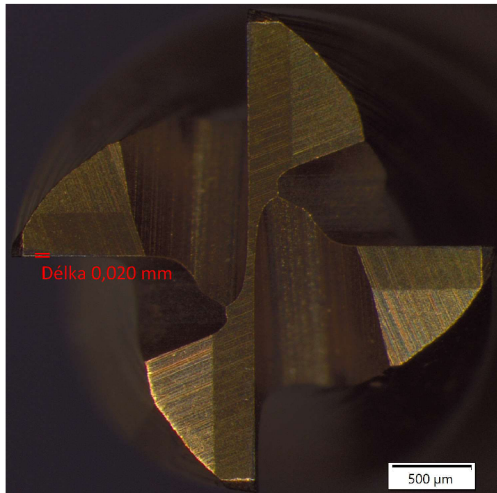


Obr. 47 Řezná síla pro KON vzorek.

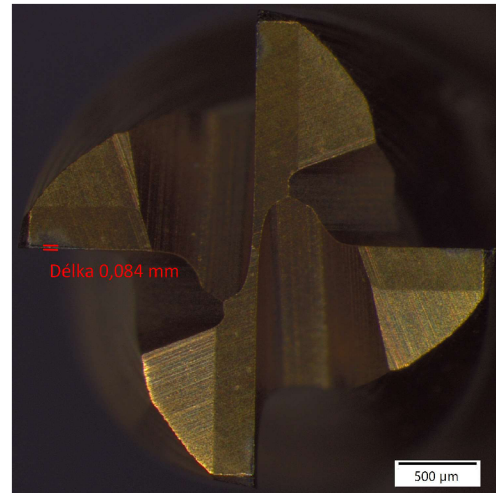
Nejvyšší hodnoty řezných i posuvových sil byly dosahovány, ve většině případů, při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, kromě ADIT a KON vzorku, kde byla nejvyšší hodnota řezných sil dosahována při rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Nejnižší hodnoty řezných i posuvových sil byly měřeny pokaždé při řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Příčinou snížení řezných sil v důsledku zvyšování řezné rychlosti je nárůst řezné teploty, která vyvolá odpevňování materiálu, a tím dochází ke snížení řezného odporu [78].

4.6 Opotřebení nástroje

Opotřebení na hřbetu nástroje bylo měřeno pomocí vytištěného přípravku na všech zubech jednotlivých fréz, které byly využity v průběhu testování. Celkově tak bylo měřeno na hřbetní opotřebení dvanáct fréz. Pro jednotlivé řezné rychlosti a nové vzorky byla využita vždy fréza nová, materiálem nástroje byl pokaždé slinutý karbid. Na obrázku 48, lze vidět hřbetní opotřebení, které dosahovalo nejmenší hodnoty. Nejmenší hodnota opotřebení byla naměřena u KON a ADIT vzorku o hodnotě $0,02 \text{ mm}$. V obou případech byla řezná rychlost o velikosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Naopak opotřebení, které dosahovalo nejvyšší hodnoty, a to ($0,084 \text{ mm}$) bylo naměřeno u ADIT-TZ vzorku, viz obr. 49. V tomto případě byla hodnota řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Hodnoty posuvu na zub, šířky záběru i radiální šířky záběru ostří byly vždy konstantní.

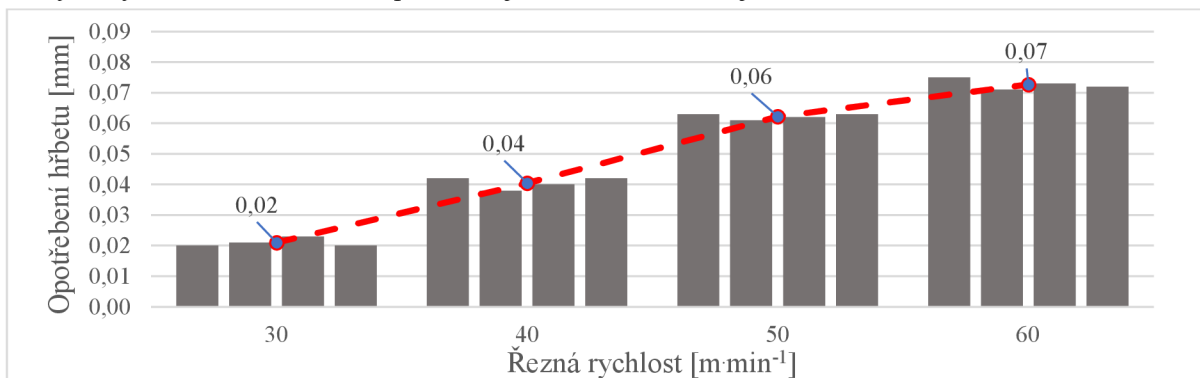


Obr. 48 Nejnižší naměřené opotřebení.

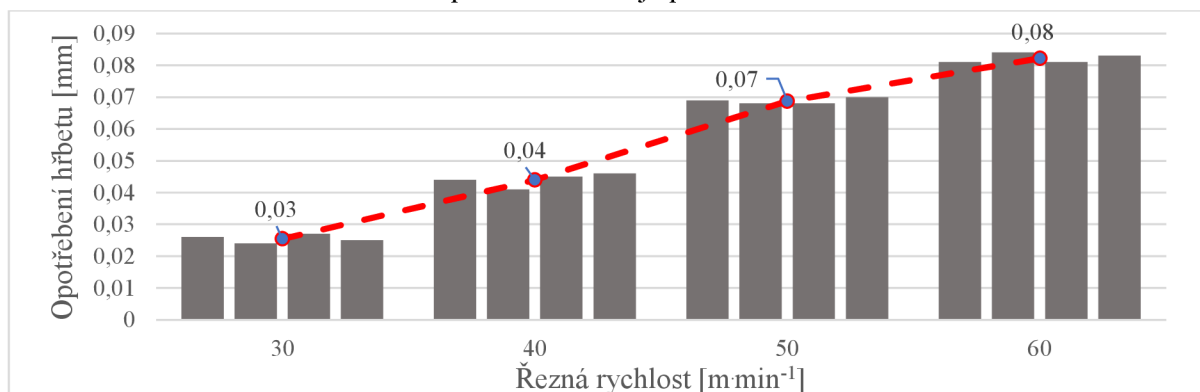


Obr. 49 Nejvyšší naměřené opotřebení.

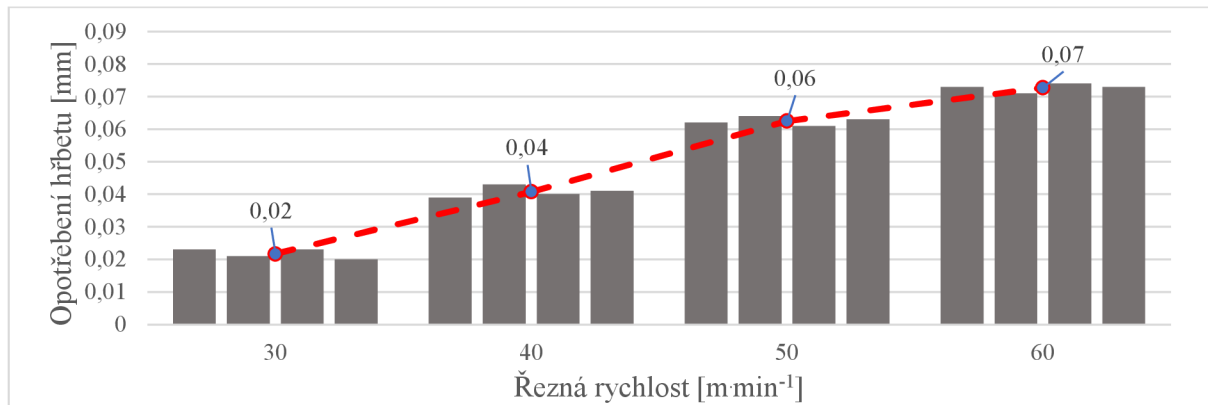
Následně byly hodnoty opotřebení, pro jednotlivé zuby nástroje, vneseny do grafů, viz obr. 50, 51 a 52. Grafy znázorňují jednotlivé hodnoty opotřebení na každém zubu frézy, pro každou řeznou rychlost u jednotlivých vzorků, tj. u ADIT, ADIT-TZ a KON. Body vnesené do grafů pak reprezentují průměrnou hodnotu opotřebení, počítanou ze čtyř zubů pro každou frézu. Nejmenší průměrná hodnota opotřebení byla dosažena u ADIT a KON vzorku, při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, nejvyšší hodnota pak u ADIT-TZ vzorku, při řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. ADIT-TZ vzorek vykazoval nejvyšší hodnoty hřbetního opotřebení, které jsou způsobeny precipitací tvrdých intermetalických sloučenin, tj. Ni_3Mo , Ni_3Ti a Ni_3Al . Průměrná hodnota opotřebení u řezné rychlosti při $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ je stejná u KON i ADIT vzorku. Z grafů vyplývá skutečnost, že se zvyšující se řeznou rychlostí roste hodnota opotřebení, které bylo způsobeno především abrazivním charakterem. Pro zlepšení obrobitelnosti je vhodnější obrábět při nižších řezných rychlostech, neboť se prodlužuje životnost nástroje.



Obr. 50 Opatřebení nástroje pro ADIT vzorek.



Obr. 51 Opatřebení nástroje pro ADIT-TZ vzorek.



Obr. 52 Opotřebení nástroje pro KON vzorek.

4.7 Drsnost povrchu

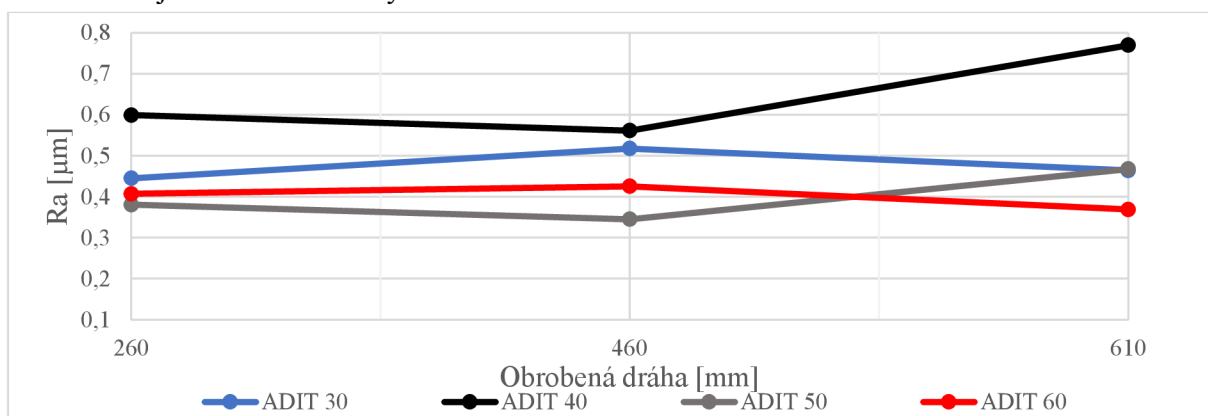
Po obrobení všech vzorků následovalo měření drsnosti povrchů jednotlivých ploch a stran, vytvořenými za určitých řezných podmínek. Jednotlivé měřené plochy jsou vyobrazeny na obr. 53. Rameno drsnoměru, na kterém byl upevněn hrot, se pohybovalo v určité dráze na plochách 1, 2 a 3. Následně byly pomocí softwaru vyhodnoceny jednotlivé průměrné aritmetické úchylky R_a a nejvyšší výšky profilu drsnosti R_z . Data byla následně zpracovávána, pro větší přehlednost do tří samostatných grafů, a to jak pro průměrné aritmetické úchylky, tak pro nejvyšší výšky profilu.



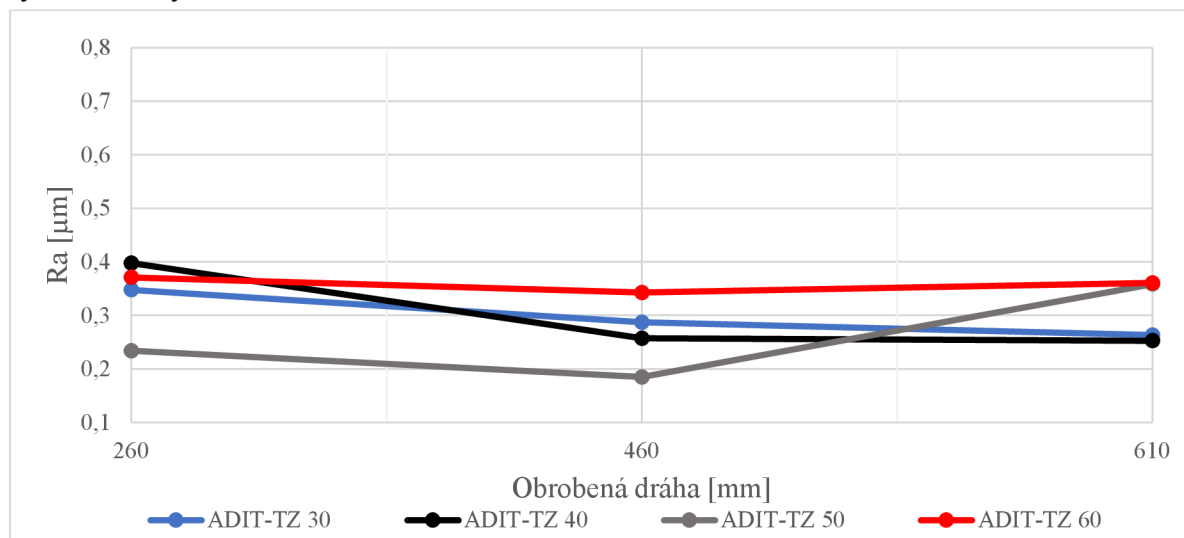
Obr. 53 Měřené plochy a strany.

Na obr. 54, 55 a 56 jsou znázorněny grafy průměrné aritmetické úchylky R_a . Kvalita povrchů může být ovlivněna výchozí strukturou vzorků a tvorbou třísky. Na grafech je patrná klesající tendence křivek mezi obrobenou dráhou 260 mm a 460 mm. Tento pokles je způsobený v důsledku použití nového nástroje, kdy vlivem počáteční fáze opotřebení dochází u ostří nástroje k jeho mírnému zaoblení. Dále křivky drsností pro jednotlivé řezné rychlosti mezi testovanými vzorky nevykazují žádnou posloupnost.

U ADIT vzorku, viz obr. 54, je dosahováno nízké hodnoty R_a při řezné rychlosti 50 m·min⁻¹ a obrobené dráze nástroje 460 mm. Křivka má dále rostoucí charakter. Nejrovnoměrnějšího výsledku je dosahováno při řezné rychlosti 60 m·min⁻¹. Při této rychlosti dochází u ADIT vzorku k nejmenším naměřeným hodnotám složek sil.

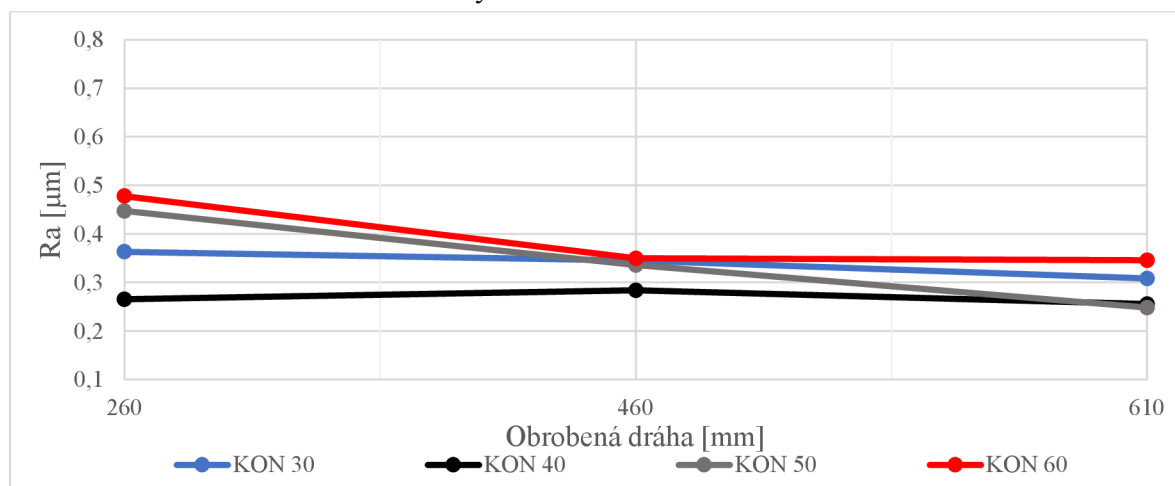

 Obr. 54 Naměřené hodnoty R_a na plochách ADIT vzorku.

U ADIT-TZ vzorek, viz obr. 55, je stejně jako u ADIT vzorku nízké hodnoty Ra dosahováno při řezné rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a ujeté dráze nástroje 460 mm. Ra má následně od dráhy 460 mm rostoucí charakter. Nejvhodnější řeznou rychlostí, pro získání rovnoměrné hodnoty Ra, se jeví řezná rychlost $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při této rychlosti má křivka klesající charakter s rostoucí délkou obrobene dráhy. Dosahované hodnoty složek sil jsou v porovnání s ostatními řeznými rychlostmi vyšší.



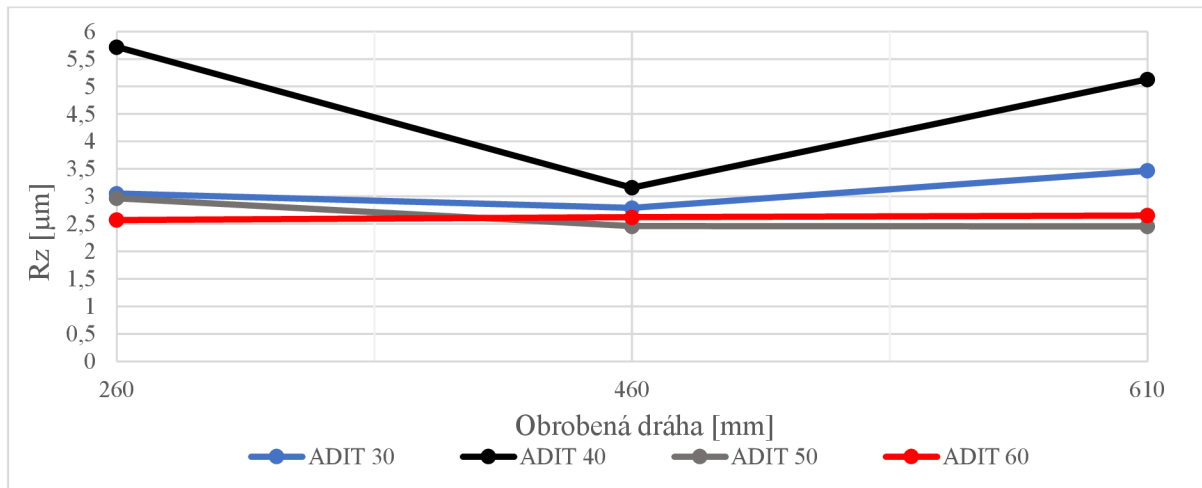
Obr. 55 Naměřených hodnoty Ra na plochách ADIT-TZ vzorku.

U KON vzorku, viz obr. 56, je dosahováno nejlepší hodnoty Ra při řezné rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a při ujeté dráze nástroje 610 mm. V závislosti na dráze má tato křivka stále klesající tendenci. Nejrovnoměrnějšího výsledku je dosahováno při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, kde zároveň dochází ke vzniku menších naměřených hodnot složek sil.

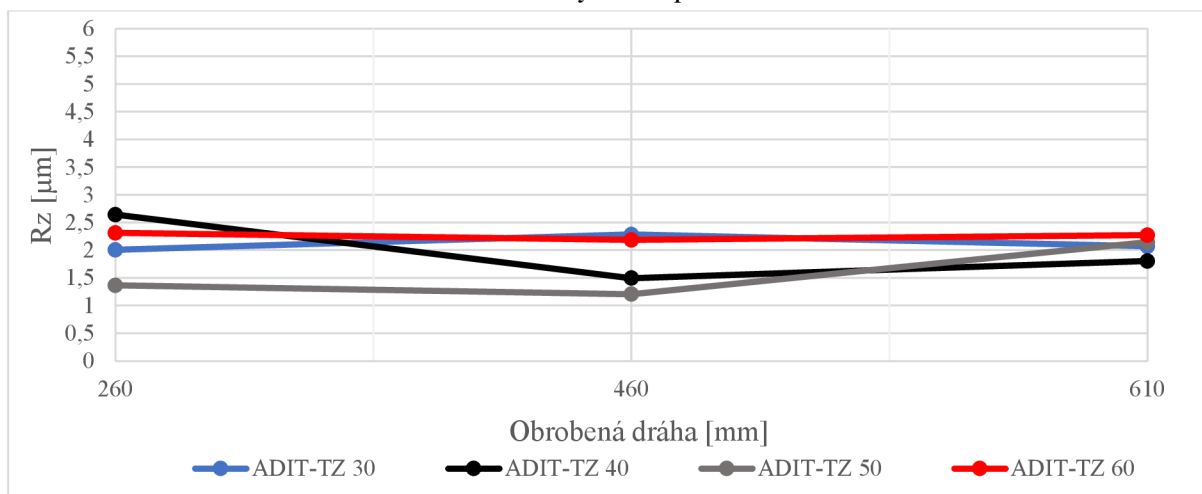


Obr. 56 Naměřené hodnoty Ra na plochách KON vzorku.

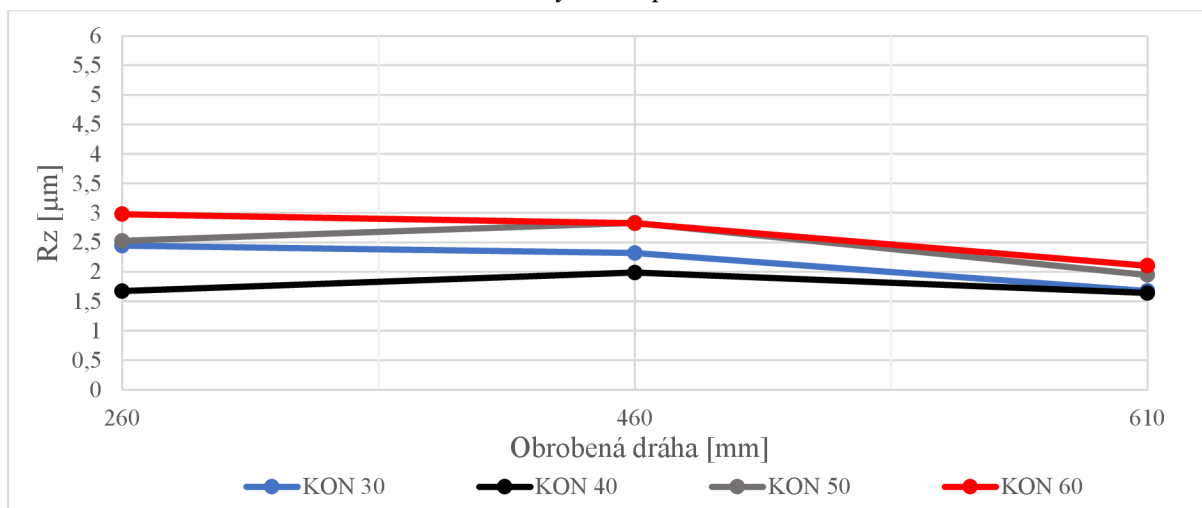
Na obr. 57, 58 a 59 jsou znázorněny grafy pro nejvyšší výšky profilu drsnosti Rz. Z níže uvedených grafů vyplývá, že nejrovnoměrnějšího povrchu, co se týče výstupku a prohlubní, je dosahováno u ADIT vzorku při řezných rychlostech 30, 50 a $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ došlo k adhezivnímu přilnutí třísek s obráběným materiálem, to je důvodem pro velký rozptyl jednotlivých naměřených hodnot. U ADIT-TZ vzorku bylo nejnížší hodnoty dosahováno na obrobene dráze v délce 460 mm při řezné rychlosti $50 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Se zvyšováním obrobene dráhy zároveň vzrostla i naměřená hodnota. U KON vzorku bylo nejnížší hodnoty dosahováno opět v délce 460 mm, ale při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Se zvyšováním obrobene dráhy docházelo u všech řezných rychlostí na KON vzorku ke snížení naměřených hodnot Rz.



Obr. 57 Naměřené hodnoty Rz na plochách ADIT vzorku.



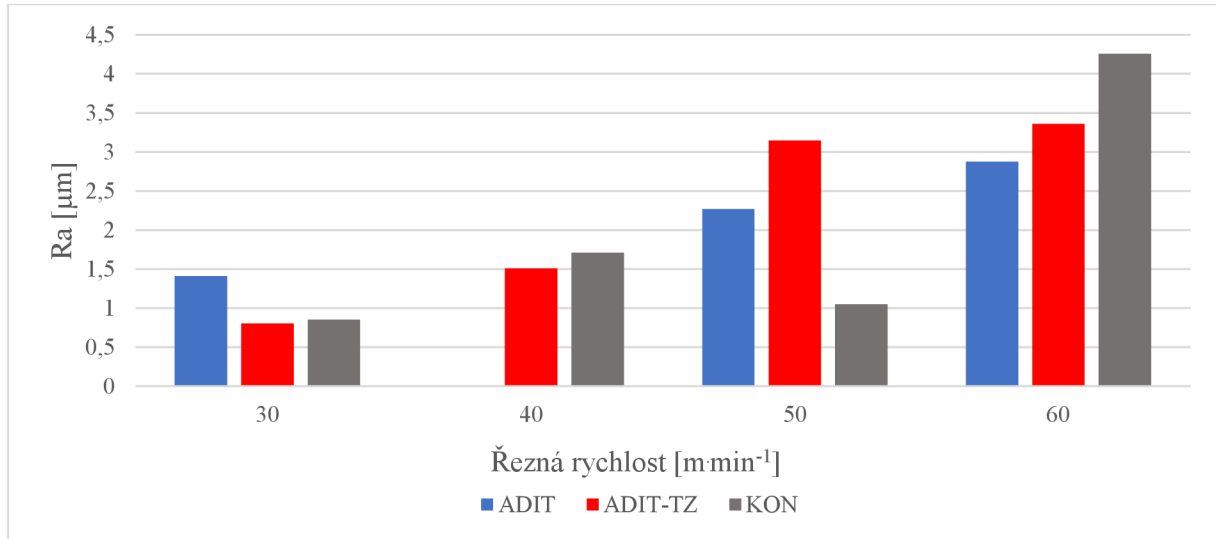
Obr. 58 Naměřené hodnoty Rz na plochách ADIT-TZ vzorku.



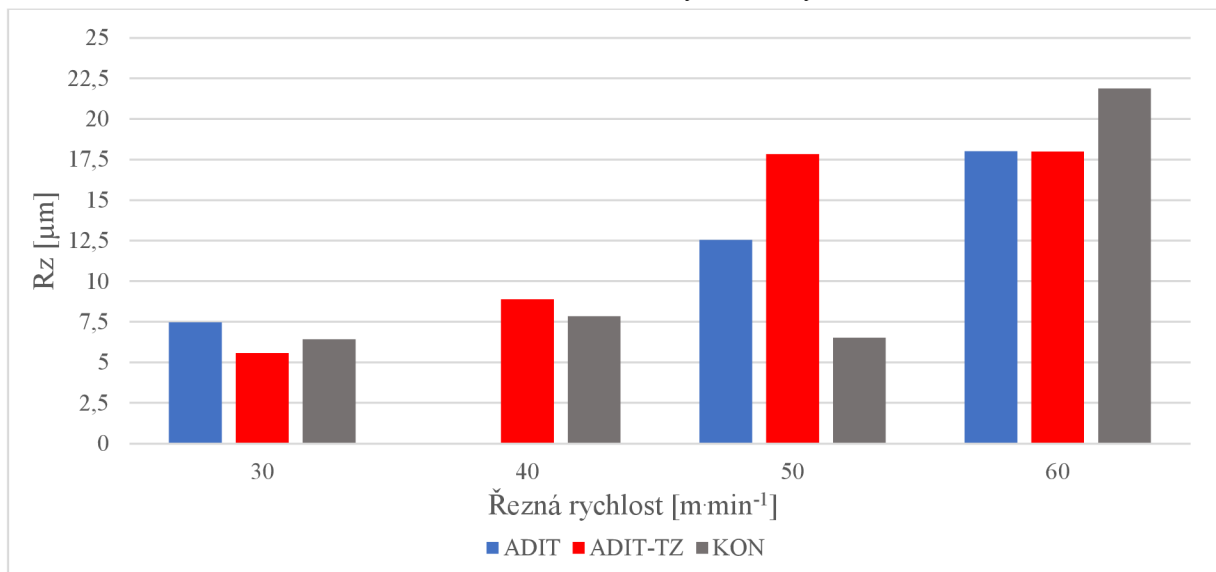
Obr. 59 Naměřené hodnoty Rz na plochách KON vzorku.

Dále byly na jednotlivých vzorcích vyhodnocovány obrobené strany dle obr. 53. Vzhledem k vysokým hodnotám Ra i Rz nebylo možné vyhodnotit některé strany 1, 2 a 3. Důvodem byla jejich krátká délka, která nevyhovovala vyhodnocované délce podle ČSN ISO 4288. V grafech, viz obr. 60 a 61, jsou zaznamenány naměřené hodnoty Ra a Rz pro stranu 4. V obou uvedených grafech chybí sloupec pro ADIT vzorek při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, důvodem byly adhezně přilnuté třísky k obrobenému povrchu, které znemožnily danou stranu vyhodnotit.

Z níže uvedených grafů vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí rostou hodnoty Ra i Rz. Důvodem je vliv vibrační a opotřebení nástroje, které roste se zvyšující se hodnotou řezné rychlosti, a tím způsobují nerovnoměrnost povrchu obráběné strany. Menších drsností povrchu je dosahováno u všech vzorků při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Vyšších drsností povrchu je dosahováno vždy při nejvyšší použité řezné rychlosti, tj. při $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obr. 60 Naměřené hodnoty Ra strany 4.



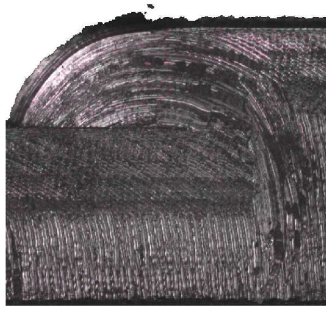
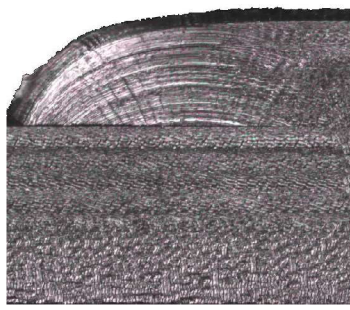
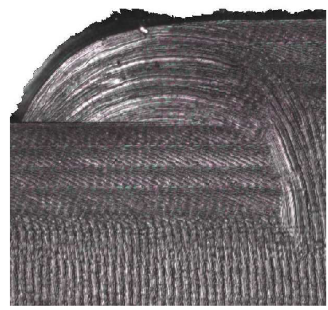
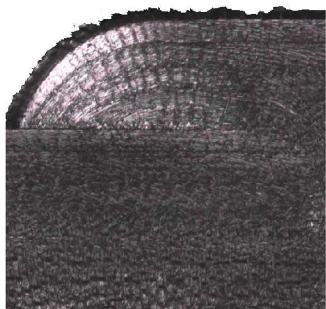
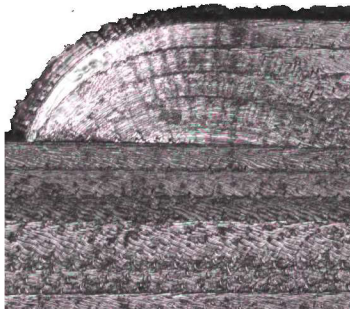
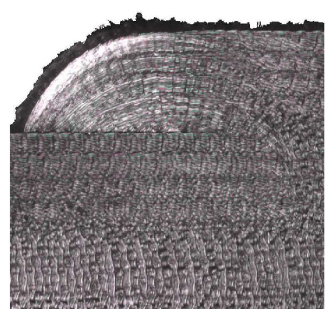
Obr. 61 Naměřené hodnoty Rz strany 4.

Pomocí přístroje Alicona InfiniteFocus G5 byly pořízeny snímky pro detailní posouzení obrobenejších drah, viz tab. 11. Ze získaných snímků je patrné, že vzorky s nižší tvrdostí, dle tab. 10 ADIT a KON, mají vyšší plasticitu materiálu a snadno se deformují. To způsobuje zvýšení bočního plastického toku a jednotlivé stopy po frézování, které odpovídají posuvu na zub jsou více patrné, podobných závěrů bylo dosaženo v [4]. Precipitační vytvrzování u ADIT-TZ vzorku způsobilo navýšení tvrdosti a snížení plasticity, což způsobilo, že jednotlivé stopy po posuvu nástroje nejsou tak patrné, neboť u materiálu s nižší plasticitou dochází k menšímu plastickému toku materiálu při obrábění [79].

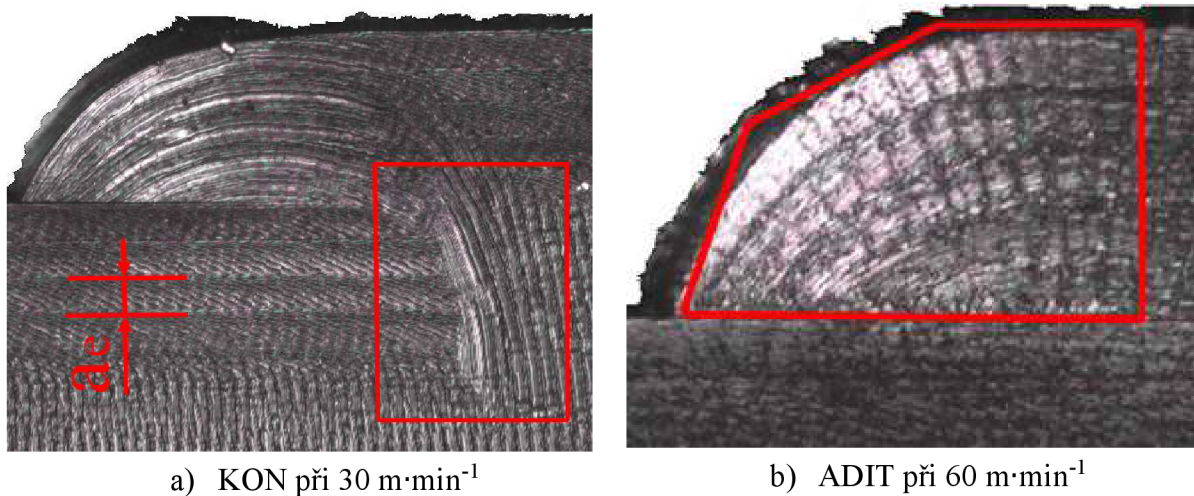
Vzorky s nižší tvrdostí mohou při nižších řezných rychlostech způsobovat tvorbu nárůstku na břitu nástroje vlivem kontinuální třísky, která má tendenci na nástroji ulpívat, což je příčinou protáhlých řezných drah při výjezdu nástroje v maximálním úhlu opásání. Se zvýšením řezné rychlosti dochází k markantnějšímu pěchování třísky na čele řezného nástroje, což v důsledku

způsobuje větší lámání třísky i při obrábění méně tvrdých vzorků, tj. ADIT a KON. Výsledkem zvýšení řezné rychlosti až na $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ nevykazují měkčí materiály prodloužení řezných drah při výjezdu nástroje v maximálním úhlu opásání.

Tab. 11 Detail obrobeneých ploch testovaných vzorků.

v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	ADIT	ADIT-TZ	KON
30			
60			

Na obrázku 62a je vyobrazen detail KON vzorku při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Do obrázku byla zaznamenána radiální šířka záběru ostří, kdy $a_e = 0,2 \text{ mm}$. V červeném obdélníku jsou znázorněny, již zmíněné, protažené řezné dráhy při výjezdu nástroje. Na obrázku 62b jsou v červeném obrazci znázorněny stopy způsobené vlivem vibrací nástroje při větším úhlu opásání. Tyto stopy jsou v určité míře patrné u všech testovaných vzorků při řezných rychlostech dosahujících $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

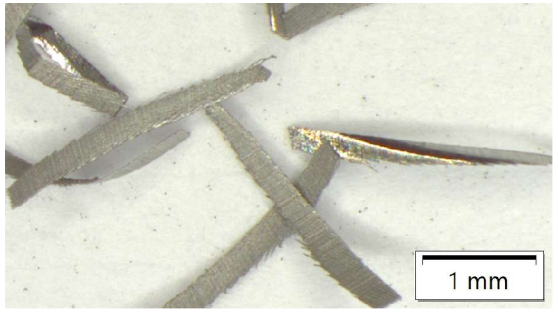



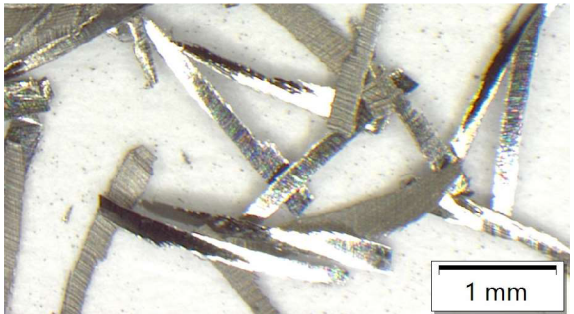



Obr. 62 Detail obrobeneých ploch.

4.8 Utváření třísky

Vzniklé třísky byly odebrány bezprostředně po skončení jednotlivých testů (I–IV) na testovaných vzorcích. V tab. 12 jsou vyobrazeny vybrané třísky vzniklé při nejnižších a nejvyšších řezných rychlostech tj. 30 a 60 m·min⁻¹. Ostatní třísky jsou uvedeny v příloze 2.

Tab. 12 Třísky testovaných vzorků při řezné rychlosti 30 a 60 m·min⁻¹.

v_c [m·min ⁻¹]	
30	60
ADIT	
	
ADIT-TZ	
	
KON	
	

V tab. 12 je vidět, že všechny odebrané třísky při řezné rychlosti 30 m·min⁻¹ mají stužkový krátký tvar. Při zvyšování řezné rychlosti až na maximální testovací hodnotu tj. 60 m·min⁻¹, mají třísky u ADIT vzorku vždy shodný tvar jako při počáteční řezné rychlosti. Výjimkou je řezná rychlost 40 m·min⁻¹, kdy došlo k adheznímu ulpívání třísek vlivem jejich špatného odchodu z řezu. Vzorek ADIT-TZ a KON vykazují při zvyšování řezné rychlosti obdobné třísky jako při nižších řezných rychlostech. Nepatrné změny v tvaru a délce mohou být způsobeny změnou posuvové rychlosti vlivem zvyšujících se řezných rychlostí, neboť šířka záběru i radiální šířka záběru ostří jsou v průběhu všech testů konstantní. Změna v délce jednotlivých třísek mezi testovanými vzorky je uskutečněna v důsledku jejich rozdílné tvrdosti, kdy materiál s vyšší tvrdostí vykazuje kratší délku utvářené třísky.

Pro detailní zkoumání vzniklých třísek byl použit skenovací elektronový mikroskop (SEM). Z fotek uvedených v tab. 13 je vidět, že s vyšší řeznou rychlostí dochází k rostoucí vzdálenosti mezi primárními střížnými rovinami (vyznačená vzdálenost a) podobně jako u [80]. Naopak, sekundární střížné roviny jsou blíže u sebe (vyobrazeno písmenem b). Důvodem je větší pěchování třísky o čelo nástroje vlivem rostoucí řezné rychlosti. Vzdálenost střížných rovin je větší s vyšší tvrdostí, jak bylo pozorováno v [4]. To je v souladu se vzorky ADIT a ADIT-TZ v obou uvedených řezných rychlostech. Vzorky s vyšší plasticitou (ADIT a KON) umožňují materiálu lépe se deformovat a tvořit zubovou třísku (znázorněno pomocí písmene c) na rozdíl od ADIT-TZ vzorku, kde jsou zuby krátké nebo ulomené (žlutý kruh s písmenem d).

Tab. 13 Třísky testovaných vzorků při řezné rychlosti 30 a 60 m·min⁻¹ analyzované pomocí SEM.

v_c [m·min ⁻¹]	
30	60
ADIT	
ADIT-TZ	
KON	

ZÁVĚR

Při testování obrobitelnosti maraging oceli M300 se vycházelo ze tří vzorků, z nichž dva byly aditivně vyrobeny metodou SLM a třetí konvenčně pomocí válcování. Z aditivně vyrobených vzorků byl jeden tepelně zpracován precipitačním vytvrzováním. Dle navržené metodiky bylo provedeno 12 testů s proměnlivou řeznou rychlostí za jinak konstantních řezných podmínek. Následně byly vyvozeny tyto závěry:

- U všech testovaných vzorků bylo se zvyšující se řeznou rychlostí dosaženo nižších hodnot řezných i posuvových sil. Důvodem je, že se zvyšující se řeznou rychlostí dochází k nárůstu řezné teploty, která vyvolá odpevnění materiálu, a tím je docíleno nižšího silového zatížení.
- U aditivně vyrobeného vzorku s tepelným zpracováním lze pozorovat vysoké hodnoty řezných sil ve srovnání s hodnotami u aditivně a konvenčně vyrobeného vzorku. Důvodem je jejich odlišná tvrdost.
- Nejvyššího hřbetního opotřebení (0,08 mm, průměr ze 4 zubů) dosahovala fréza použitá při obrábění aditivně vyrobeného vzorku s tepelným zpracováním při řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Opotřebení bylo převážně abrazivního charakteru způsobené precipitáty, které vznikly během tepelného zpracování. Se zvyšující se řeznou rychlostí rostly hodnoty hřbetního opotřebení u všech použitých fréz.
- Drsnost povrchu naměřená na plochách u aditivně vyrobeného vzorku vykazuje vhodné hodnoty R_a ($0,4 \text{ }\mu\text{m}$) i R_z ($2,5 \text{ }\mu\text{m}$) při řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Hodnoty R_a při této řezné rychlosti mají mezi obrobenou dráhou 460 mm a 610 mm klesající tendenci a zároveň naměřené řezné i posuvové síly dosahují nízkých hodnot.
- Aditivně vyrobený vzorek s tepelným zpracováním vykazuje klesající hodnoty R_a ($0,4$ až $0,25 \text{ }\mu\text{m}$) v závislosti na obrobené dráze při řezných rychlostech 30 a $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.
- Konvenčně vyrobený vzorek dosahuje malých naměřených hodnot R_a ($0,3 \text{ }\mu\text{m}$) i R_z ($2 \text{ }\mu\text{m}$) na plochách při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Při této řezné rychlosti byly zároveň naměřeny nižší hodnoty řezných i posuvových sil.
- Při měření drsnosti povrchu na obrobené straně docházelo ke zvyšování naměřených hodnot R_a i R_z s rostoucí řeznou rychlostí u všech testovaných vzorků. Nízkých hodnot bylo dosahováno při řezné rychlosti $30 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (R_a od $0,8$ do $1,4 \text{ }\mu\text{m}$, dle vzorku), vysokých při $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (R_a od $2,9$ do $4,2 \text{ }\mu\text{m}$, dle vzorku).
- Vzorky s nižší tvrdostí a vyšší plasticitou, tj. aditivní a konvenční, tvoří v důsledku nižších řezných rychlostí protažené řezné dráhy při výjezdu nástroje.
- Vyšší řezná rychlost způsobuje větší vzdálenost primárních střížných rovin a menší vzdálenost sekundárních střížných rovin na odebrané třisce.

Z výše předložených výsledků vyplývá, že obrobitelnost maraging oceli M300 závisí na metodě výroby případně na tepelném zpracování. Aditivně vyrobený vzorek je vhodnější obrábět při řezné rychlosti $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Důvodem je docílení nízkých hodnot R_a na plochách, které mezi obrobenou dráhou 460 a 610 mm klesají a současně dochází ke vzniku malých řezných a posuvových sil. Vlivem vyšší řezné rychlosti nedochází k tvorbě protažených řezných drah při výjezdu nástroje.

Aditivně vyrobený vzorek s tepelným zpracováním je vhodné obrábět při řezné rychlosti 30 případně $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ kvůli lepší drsnosti povrchu ploch, stran a menšímu opotřebení nástroje. Konvenčně vyrobený vzorek vykazuje nízké hodnoty drsnosti povrchu ploch při řezné rychlosti $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, které jsou spojené s dosažením nižších hodnot řezných a posuvových sil a současně s menším opotřebením nástroje. Pro zamezení vzniku protažených řezných drah je doporučeno zvýšit řeznou rychlost na $60 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. TOSCIOGLU, Emre; KHAN, Hamaid Mahmood; KAYNAK, Yusuf; COSKUN, Mert; TARAKACI, Gurkan et al. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel. Online. *Rapid prototyping journal*. 2021, roč. 27, č. 10, s. 1900-1909. ISSN 1355-2546. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2020-0269>. [cit. 2024-05-05].
2. FORTUNATO, Alessandro; LULAJ, Amarildo; MELKOTE, Shreyes; LIVERANI, Erica; ASCARI, Alessandro et al. Milling of maraging steel components produced by selective laser melting. Online. *International journal of advanced manufacturing technology*. 2018, roč. 94, č. 5, s. 1-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0922-9>. [cit. 2024-05-18].
3. DUVAL-CHANEAC, M.S.; HAN, S.; CLAUDIN, C.; SALVATORE, F.; BAJOLET, J. et al. Characterization of maraging steel 300 internal surface created by selective laser melting (SLM) after abrasive flow machining (AFM). Online. *Procedia CIRP*. 2018, roč. 77, s. 359-362. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.035>. [cit. 2024-05-18].
4. BAI, Yuchao; ZHAO, Chuling; YANG, Jin; HONG, Ruochen; WENG, Can et al. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021, roč. 288, s. 1-18. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116906>. [cit. 2024-05-18].
5. Obrobitelnost materiálů. In: FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, s. 182-188. ISBN 80-214-2374-9.
6. Opatřebení řezných nástrojů. Online. In: *Úvod do teorie obrábění*. Ostrava: --, 2013, s. 3-25. ISBN 978-80-248-3013-1. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_002/%C3%A1vod%20do%20terioie%20o br%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf. [cit. 2024-02-11].
7. *Obrobitelnost materiálů*. Online. ELUC - elektronická učebnice. 2020. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1201>. [cit. 2024-02-11].
8. ČEP, Robert a PETRŮ, Jana. *Experimentální metody v obrábění: učební text*. Online. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_ obrabeni.pdf. [cit. 2024-03-05].
9. *GARANT PŘÍRUČKA OBRÁBĚNÍ*. Online. 34. vyd. Garant. Dostupné z: <https://www.scribd.com/doc/75385172/Garant-PRIRUCKA-OBRABANIA>. [cit. 2024-03-13].
10. BODYCOTE. *Tepelné zpracování*. Online. Bodycote. C2024. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/tepelne-zpracovani/>. [cit. 2024-03-13].
11. JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka*. 3. uprav. a dopl. vyd. Praha: SNTL, 1977.
12. VĚCHET, Stanislav a NĚMEC, Karel. *Tepelné zpracování ocelí*. Online. In: . Dostupné z: https://docplayer.cz/107062817-Tepelne-zpracovani-oceli-doc-ing-stanislav-vechet-csc-ing-karel-nemec-ph-d.html#google_vignette. [cit. 2024-05-19].
13. *NORMALIZAČNÍ ŽÍHÁNÍ*. Online. Meduna. [cca 2021]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/normalizacni-zihani>. [cit. 2024-03-13].

-
14. *Příručka pro technology - Není teplota příliš vysoká nebo nízká?* Online. VOS, Patrick De. MM Průmyslové spektrum. C2001-2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka>. [cit. 2024-03-06].
 15. DE VOS, Patric a STAHL, Jan-Eric. *Obrábění kovů teorie v praxi*. Lund: SECO, 2014.
 16. *Vliv prvků na vlastnosti ocelí*. Online. Kovintrade. [cca 2021]. Dostupné z: <https://www.kovintrade.cz/vliv-prvku-na-vlastnosti-oceli/>. [cit. 2024-03-06].
 17. *Obrobitelnost*. Online. In: BOGNER EDELSTAHL. Bogner Edelstahl. [cca 2021]. Dostupné z: <https://www.bogner.cz/docs/sortiment/Obrobitelnost.pdf>. [cit. 2024-03-08].
 18. *Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami?* Online. MM Průmyslové spektrum. C2001-2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>. [cit. 2024-03-11].
 19. *Řezné podmínky při frézování*. Online. ELUC. 2020. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1238>. [cit. 2024-03-20].
 20. *Cutting Force*. Online. KISTLER. KISTLER measure, analyze, innovate. C2024. Dostupné z: <https://www.kistler.com/US/en/cutting-force/C00000102>. [cit. 2024-03-24].
 21. *MĚŘENÍ SLOŽEK SÍLY ŘEZÁNÍ*. Online. In: VŠB-TUO. TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. [cca 2021]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_08.pdf. [cit. 2024-03-20].
 22. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
 23. *Cutting Force Measurement: Measuring Chain*. Online. In: KISTLER. M3 micro. 2020. Dostupné z: <https://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/MIKRODYNAMOMETRO/cutting%20force%20measurement.pdf>. [cit. 2024-03-24].
 24. *Multicomponent dynamometers*. Online. In: KISTLER. KISTLER measure, analyze, innovate. C2024. Dostupné z: <https://www.kistler.com/GB/en/cp/multicomponent-dynamometers-9119a/P0000605>. [cit. 2024-03-24].
 25. SVOBODA, Pavel a BRANDEJS, Jan. *Základy konstruování*. Vydání osmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2020. ISBN 978-807-6230-347.
 26. *Měření drsnosti*. Online. ELUC. [cca 2020]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1571>. [cit. 2024-04-02].
 27. Integrita obrobeného povrchu. In: *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, s. 217-220. ISBN 8021423749.
 28. *Měření drsnosti*. Online. M&B Calibr. [cca 2021]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>. [cit. 2024-04-04].
 29. *Metody měření drsnosti povrchu*. Online. ELUC. [cca 2020]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>. [cit. 2024-04-04].
 30. *Opotřebení nástroje*. Online. ELUC. [cca 2020]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1203>. [cit. 2024-03-26].
 31. FOREJT, Milan a PÍŠKA, Miroslav. Mechanismy a formy opotřebení nástrojů. In: *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, s. 202-212. ISBN 80-214-2374-9.
 32. *Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme!*. Online. MM Průmyslové spektrum. C2001-2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/>. [cit. 2024-03-27].
-

-
33. SECO. *PŘEHLED ZÁKLADNÍCH PROJEVŮ OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ PRO OBRÁBĚNÍ KOVŮ*. Online. Seco. 2023. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/122073?language=cs>. [cit. 2024-03-27].
 34. *Měření opotřebení nástrojů*. Online. In: VŠB - Technická univerzita Ostrava. [cca 2020]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_05.pdf. [cit. 2024-04-01].
 35. *Příručka pro technology - Jak rozpoznat správné utváření třísek?* Online. MM Průmyslové spektrum. C2024. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek?fbclid=IwAR16Mx8lO_deUvnMX1nfpKLnFPIw_RtrcGCcDZGde4VzoTAMxLtawgqP69U. [cit. 2024-03-24].
 36. *Video: Naučte se poznat podle třísek, zda správně obrábíte*. Online. STROJIRENSTVI.CZ. C2013-2024. Dostupné z: https://www.strojirenstvi.cz/video-naucte-se-poznat-podle-trisek-zda-spravne-obrabite/?fbclid=IwAR1BBf-jYhGZpyli2cub9-Xp1ZWGXn_gWrOUhZEC39bfeZDYq91VV2UjiLE. [cit. 2024-03-24].
 37. ELUC. *Tvar třísky a geometrie nástroje*. Online. ELUC. Dostupné z: https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1816?fbclid=IwAR3b_ScqMh7_KoNgNU6T4ceIABuTKYlsXtgzJWI8r6gXeUIwVM3XDaPmqP4. [cit. 2024-03-24].
 38. BILÍK, Oldřich. *Obrábění II*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1994. ISBN 80-707-8228-5.
 39. *3D tisk a jeho možnosti*. Online. FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE. 2023. Dostupné z: <https://fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/>. [cit. 2024-02-12].
 40. SEDLÁK, Josef. *Additivní technologie, reverzní inženýrství*. In: BUMBÁLEK, Bohumil; HUMÁR, Anton; PÍŠKA, Miroslav; POLZER, Aleš; PROKOP, Jaroslav et al. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, s. 200-214. ISBN 978-80-214-4025-8.
 41. *How One Company Reduced Their Mold Production Time By 96%*. Online. CADIMENSIONS. 2023. Dostupné z: <https://resources.cadimensions.com/cadimensions-resources/production-time-reduced-by-54-days>. [cit. 2024-02-14].
 42. *Prototype moulds with PolyJet technology*. Online. In: OBJECTIVE3D DIRECT MANUFACTURING. C2016. Dostupné z: <https://www.direct3dprinting.com.au/products/tooling-injection-moulding/>. [cit. 2024-02-14].
 43. HORIZON TECHNOLOGY. *3 ADVANTAGES & DISADVANTAGES OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS VS. PM*. Online. Horizon Technology. 2021. Dostupné z: <https://www.horizontechnology.biz/blog/advantages-and-disadvantages-of-additive-manufacturing-process-vs-powder-metallurgy>. [cit. 2024-02-17].
 44. CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. *3d Printing and Additive Manufacturing*. Online. World Scientific Publishing Co Pte, 2017. ISBN 9789813149274. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/vutbrno/reader.action?docID=5227282>. [cit. 2024-02-18].
 45. *Co je to STL model?* Online. Tisky 3D. C2024. Dostupné z: <https://www.tisky3d.cz/blog/co-je-to-stl-model/>. [cit. 2024-02-18].
-

-
46. *Post-processing*. Online. ONE3D. C2024. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/post-processing/>. [cit. 2024-02-18].
 47. *Selective Laser Sintering, SLS*. Online. Manufacturing guide. [2020]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>. [cit. 2024-02-21].
 48. *EBM - průlomová technologie výroby exponovaných součástí*. Online. MM Průmyslové spektrum. C2001-2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ebm-prulomova-technologie-vyroby-exponovanych-soucasti>. [cit. 2024-02-21].
 49. *Electron Beam Melting, EBM*. Online. Manufacturing guide. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-melting-ebm>. [cit. 2024-02-21].
 50. *What is Electron Beam Melting (EBM)?* Online. Markforged. 2020. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-electron-beam-melting-ebm>. [cit. 2024-02-21].
 51. *Selective Laser Sintering, SLS*. Online. In: Manufacturing guide. [cca 2020]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/selective-laser-sintering-sls>. [cit. 2024-02-21].
 52. *WHAT IS ULTRASONIC ADDITIVE MANUFACTURING?* Online. TWI. C2024. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-ultrasonic-additive-manufacturing>. [cit. 2024-02-21].
 53. *Ultrasonic Consolidation, UC*. Online. Manufacturing guide. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/ultrasonic-consolidation-uc>. [cit. 2024-02-21].
 54. *BINDER JETTING JAKO REVOLUČNÍ NÁSTROJ ADITIVNÍ VÝROBY KOVOVÝCH DÍLŮ*. Online. ADDITIVE SYSTEMS. 2022. Dostupné z: <https://additivesystems.cz/binder-jetting-jako-revolucni-nastroj-aditivni-vyroby-kovovych-dilu/>. [cit. 2024-02-22].
 55. *Binder jetting*. Online. Manufacturing guide. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting>. [cit. 2024-02-22].
 56. *Electron Beam Freeform Fabrication, EBF3*. Online. Manufacturing guide. 2020. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-freeform-fabrication-ebf3>. [cit. 2024-02-22].
 57. *ADDITIVE MANUFACTURING: ELECTRON BEAM FREEFORM FABRICATION*. Online. PLM Tech Talk Blog. 2017. Dostupné z: <https://plmtechtalk.com/2017/07/21/additive-manufacturing-electron-beam-freeform-fabrication/>. [cit. 2024-02-22].
 58. *Laser engineered net shaping, LENS*. Online. Manufacturing Guide. [2020]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/laser-engineered-net-shaping-lens-0>. [cit. 2024-02-27].
 59. *Laser Engineered Net Shaping*. Online. ScienceDirect. 2021. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/laser-engineered-net-shaping>. [cit. 2024-02-27].
 60. YAP, C. Y.; CHUA, C. K.; DONG, Z. L.; LIU, Z. H.; ZHANG, D. Q. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. Online. *Applied Physics Reviews*. 2015, roč. 2, č. 4, s. 1-5. ISSN 1931-9401. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.4935926>. [cit. 2024-05-16].
 61. *SLM (Selective Laser Melting)*. Online. Cotu. [cca 2022]. Dostupné z: https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting?fbclid=IwAR1-ms28xR0KggqKvYqh0Iolj5P5uG0_PyoqgTRHqDs3-NUwFkQvknuRxE. [cit. 2024-02-28].
-

-
62. CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. POWDER-BASED ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEMS. Online. In: *3d Printing and Additive Manufacturing*. World Scientific Publishing Co Pte, 2017, s. 148-152. ISBN 9789813149274. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/vutbrno/reader.action?docID=5227282>. [cit. 2024-02-28].
 63. *Exploring The Slm Working Principle*. Online. TRUER. C2024. Dostupné z: <https://am-material.com/news/exploring-slm-working-principle/>. [cit. 2024-02-28].
 64. *Jak Funguje Tisk SLM*. Online. METAL 3DP. [cca 2020]. Dostupné z: https://met3dp.cz/how-slm-printing-works/?fbclid=IwAR0mmna9FQqIFtDwNVL9_NVxRxu535kcd7zFuaki-N0yCdnfWhDKBZ8LxY. [cit. 2024-02-29].
 65. *Schematics of additive manufacturing (AM) by selective laser melting (SLM)*. Online. In: ResearchGate. 2017. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-additive-manufacturing-AM-by-selective-laser-melting-SLM-7_fig1_317510558. [cit. 2024-05-09].
 66. *SLM 3D Printing Services*. Online. In: DEK. C2024. Dostupné z: <https://www.dekmake.com/slm-3d-printing-services/>. [cit. 2024-02-28].
 67. *Benefits of 3D Printed Fuel Nozzle*. Online. In: E-Plus-3D. [cca 2020]. Dostupné z: <https://www.eplus3d.com/benefits-of-3d-printed-fuel-nozzle.html>. [cit. 2024-03-02].
 68. *SLM 3D Printing Stainless Steel Automobile Exhaust Pipe*. Online. In: BECU. C2015. Dostupné z: <https://be-cu.com/slm-3d-printing-stainless-steel-automobile-exhaust-pipe/>. [cit. 2024-03-02].
 69. *MARAGING STEEL M300*. Online. In: Addimen. 2020. Dostupné z: https://www.addimen.com/wp-content/uploads/2020/09/Maraging-steel-M300.pdf?fbclid=IwAR3UEuvV50j5l8yoAwP3ztwvG60Sy9ckFnceONTDb7V7RDEpa_gNFwB63chU_aem_AU4j_kdJ1bplBASyTzgsW3NM2aWNIRcGy5Ap2It4Sb7jGw9Gf0T3wRsJ2OjXEiSfp_RTbV4-YNSiMx0wHi1MzFde. [cit. 2024-04-10].
 70. *What is maraging steel?* Online. COSA Steel. 2020. Dostupné z: <https://www.cosasteel.com/what-is-maraging-steel/>. [cit. 2024-04-20].
 71. Oceli s vysokou pevností. In: *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, s. 118-119. ISBN 80-7080-600-1.
 72. *VERTIKÁLNÍ OBRÁBĚČÍ CENTRUM MCV 1210: Technická data*. Online. In: TAJMAC-ZPS. TAJMAC-ZPS. Dostupné z: https://www.tajmac-zps.cz/media/files/about/download/files-32/prospekt-mcv-1210_1.pdf. [cit. 2024-04-13].
 73. *Multicomponent dynamometers, maximum forces up to 10 kN, cover plate 100x170 mm / 9257B*. Online. In: KISTLER. KISTLER measure, analyze, innovate. C2024. Dostupné z: <https://www.kistler.com/DE/en/cp/multicomponent-dynamometers-9257b/P0000675>. [cit. 2024-04-23].
 74. *ZHR Rockwell hardness testers*. Online. ZwickRoell. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/hardness-testing-machines/rockwell-hardness-testers/zhr/#c67140>. [cit. 2024-04-15].
 75. *Research Stereomicroscope System SZX10*. Online. Olympus. Dostupné z: <https://www.olympus-ims.com/en/microscope/szx10/>. [cit. 2024-04-15].
 76. *InfiniteFocus G5*. Online. In: BRUKER ALICONA. Université Polytechnique. Dostupné z: https://www.uphf.fr/sites/default/files/media/2022-11/alicona_if_g5.pdf. [cit. 2024-04-14].
-

77. DEIRMINA, Faraz; PEGHINI, Nicola; ALMANGOUR, Bandar; GRZESIAK, Dariusz a PELLIZZARI, Massimo. Heat treatment and properties of a hot work tool steel fabricated by additive manufacturing. Online. *Materials Science and Engineering*. 2019, s. 109-121. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.027>. [cit. 2024-05-04].
 78. BAI, Yuchao; ZHAO, Cuiling; ZHANG, Yu; CHEN, Jie a WANG, Hao. Additively manufactured CuCrZr alloy: Microstructure, mechanical properties and machinability. Online. *Materials Science and Engineering: A*. 2021, roč. 819, s. 1-17. ISSN 0921-5093. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141528>. [cit. 2024-05-21].
 79. CHEN, Wuyi. Cutting forces and surface finish when machining medium hardness steel using CBN tools. Online. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2000, roč. 40, č. 3, s. 1-12. ISSN 0890-6955. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00011-5). [cit. 2024-05-18].
 80. DHALE, Karuna; BANERJEE, Nilanjan; KUMAR SINGH, Ramesh a OUTEIRO, José C. Investigation on chip formation and surface morphology in orthogonal machining of Zr-based bulk metallic glass. Online. *Manufacturing letters*. 2019, roč. 19, s. 25-28. ISSN 2213-8463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.01.002>. [cit. 2024-05-21].
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	šířka radiálního záběru ostří	[mm]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
D	vnější průměr	[mm]
D_0	vnitřní průměr	[mm]
D_n	vyhodnocovaný průměr	[mm]
F_{ci}	řezná síla	[N]
F_{cNi}	normálová řezná síla	[N]
F_{fi}	posuvová síla	[N]
F_{fNi}	normálová posuvová síla	[N]
F_i	celková řezná síla	[N]
F_x	složka síly v ose x	[N]
F_y	složka síly v ose y	[N]
f_z	posuv na zub	[mm]
K_v	index obrobitelnosti	[-]
l_r	základní délka	[mm]
R_a	průměrná aritmetická úchylka	[μ m]
R_p	nejvyšší výstupek	[μ m]
R_v	nejhlubší prohlubeň	[μ m]
R_z	nejvyšší výšky profilu drsnosti	[μ m]
VB	opotřebení na hřbetu nástroje	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
$v_{cT/VB(ET)}$	řezná rychlost při dané trvanlivosti a opotřebení u et. materiálu	[m·min ⁻¹]
$v_{cT/VB(ZK)}$	řezná rychlost při dané trvanlivosti a opotřebení u zk. materiálu	[m·min ⁻¹]
φ_i	úhel záběru	[°]

Zkratky


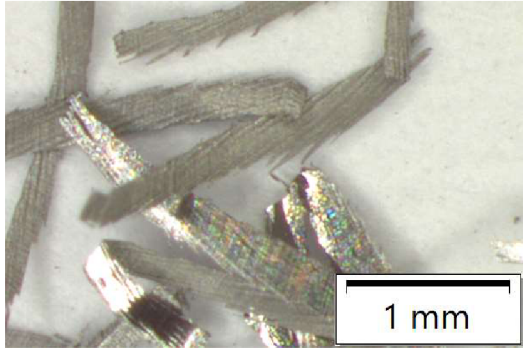
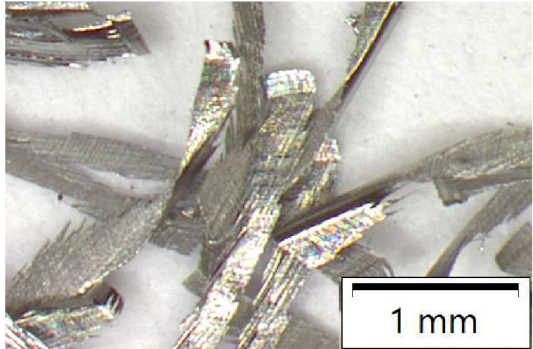

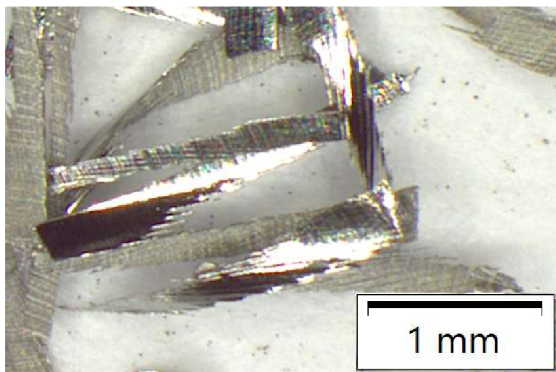
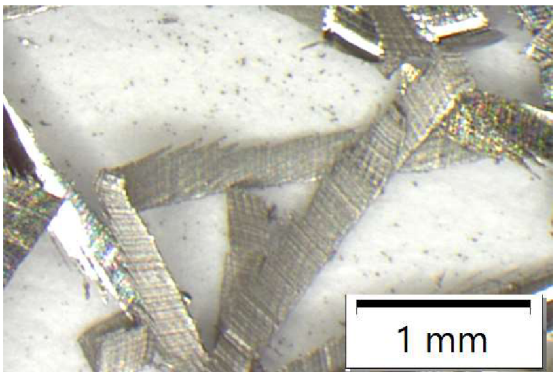
Označení	Legenda
AV	aditivní výroba
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
STL	stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
UC	Ultrasonic Consolidation
BJ	Binder Jetting
EBF3	Electron Beam Freeform Fabrication
LENS	Laser Engineered Net Shaping
SLM	Selective Laser Melting
ADIT	aditivně vyrobený vzorek
ADIT-TZ	aditivně vyrobený vzorek s tepelným zpracováním
KON	konvenčně vyrobený vzorek
SEM	Scanning Electron Microscope

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Technická data obráběcího centra MCV 1210
Příloha 2 Třísky testovaných vzorků při řezné rychlosti 40 a 50 m·min⁻¹

.

Pracovní pojezd		Hmotnosti	
Osa X – křížový suport	1 000 mm	Stroj (včetně zásobníku nástrojů)	11 500 kg
Osa Y – příčník	800 mm	Rídící systém	HEIDENHAIN, SIEMENS*, FANUC*
Osa Z – smykadlo	600 mm		
Pracovní stůl		DVOUOSÁ CNC HLAVA – Vřetenová*	
Pracovní plocha	1 200 × 1 000 mm	Maximální výkon	23 kW
Počet T-drážek	11	Maximální krouticí moment	72 Nm
Rozměr drážek – druhá drážka zprava	18H7 mm	Maximální otáčky	18 000 min ⁻¹
– ostatní drážky	18H8 mm	Upínací kužel	HSK-A63
Rozteč drážek	100 mm	Osa A	
Maximální zatížení	3 000 kg	Rozsah osy A	±115 °
Vzdálenosti		Rychlost otáčení osy A	max. 60 min ⁻¹
Čelo vřetená od stolu	elektrovřetená	Maximální moment	538 Nm
	150 – 750 mm	Brzdný moment	1 500 Nm
		dvouosá CNC hlava	
		65 – 665 mm	
Posuvy v osách X, Y, Z		Osa C	
Max. pracovní posuv	40 m/min	Rozsah osy C	±200 °
Rychloposuv	40 m/min	Rychlost otáčení osy C	max. 60 min ⁻¹
Maximální zrychlení os	5 m/s ²	Maximální moment	356 Nm
Přesnost		Brzdný moment	2 000 Nm
Odměňovací systém v ose X, Y, Z	přímý	Přesnost (VDI/DGQ 3441)	
Přesnost polohování – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z	0,008 mm	Přesnost polohování (P) – osa A (bez elektronické kompenzace)	±20 arc. sec
Opakovaná přesnost – VDI/DGQ 3441 v ose X, Y, Z	0,005 mm	Přesnost polohování (P) – osa C (bez elektronické kompenzace)	±10 arc. sec
Vřetenová jednotka		DVOUOSÝ OTOČNÝ STŮL*	
Typ	elektrovřetená	Osa A (naklápací osa)	
Max. otáčky vřetená	15 000 min ⁻¹ 18 000 min ^{-1*} 12 000 min ^{-1*} 14 000 min ^{-1*}	Rozsah osy A	±95 °
Max. výkon vřetená	31 kW 31 kW 30 kW 37 kW	Rychlost otáčení osy A	max. 25 min ⁻¹
Max. krouticí moment vřetená	197 Nm 197 Nm 143 Nm 236 Nm	Maximální krouticí moment (M _{kmax})	960 Nm
Upínací kužel	ISO 40 HSK-A63 HSK-T100 HSK-A100	Maximální hmotnost dílce pro souvislou interpolaci	560 kg
Automatický zásobník nástrojů		Osa C (rotační osa)	
Počet nástrojů v zásobníku	30	soustružení**	frézování
Čas výměny nástroje (nástroj – nástroj)	3,5 s	Upínací plocha stolu	Ø 600 mm Ø 600* / Ø 800 mm
Maximální průměr nástroje		Rozsah osy C	360 ° 360 °
– při obsazených sousedních místech v zásobníku	80 mm	Rychlost otáčení	max. 400 min ⁻¹ max. 100 min ⁻¹
– při neobsazených sousedních místech v zásobníku	115 mm	Maximální krouticí moment (M _{kmax})	1 000 Nm 1 000 Nm
Maximální délka nástroje	250 mm	Brzdný moment	3 000 Nm 3 000 Nm
Maximální hmotnost nástroje včetně držáku	6,5 kg	Přesnost (VDI/DGQ 3441)	
Pneumatický agregát		Přesnost polohování (P) – osa A	12 arc. sec
Tlak vzduchu na vstupu	0,6 – 0,8 MPa	Přesnost polohování (P) – osa C	6 arc. sec
Provozní tlak	0,55 MPa	** v kombinaci s elektrovřetenem s upínáním HSK-T100 dle požadavku zákazníka	
Požadavky na elektrickou energii		Popis vyobrazení a číselné údaje nemusí vždy souhlasit s posledním provedením stroje.	
Připojovací napětí	3 × 400 V/50 Hz 3 × 480 V/60 Hz	Výrobce	TAJMAC-ZPS, a. s.
Příkon provozní	45 kVA	tržda 3. května 1180	763 02 Zlín, Malenovice
Proud při plném zatížení stroje	125 A	ČESKÁ REPUBLIKA	ITALY
		Tel: +420 577 532 072	Fax: +420 577 533 626
		www.tajmac-zps.cz	e-mail: info@tajmac-zps.cz
		Holding	TAJMAC-MTM, S. p. A.
		Via Gran Sasso 15	20092 Cinisello Balsamo (MI)
		ITALY	Tel: +39 02 6601 7878
			Fax: +39 02 6601 1457
			www.tajmac-mtm.it
			e-mail: tajmac@tajmac-mtm.it

v_c [m·min ⁻¹]	
40	50
ADIT	
 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
ADIT-TZ	
 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>
KON	
 <p>1 mm</p>	 <p>1 mm</p>