



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SILOVÁ NÁROČNOST PŘI TŘÍSKOVÉM OBRÁBĚNÍ ADITIVNĚ VYROBENÉHO MATERIÁLU

FORCE REQUIREMENTS FOR CHIP MACHINING OF ADDITIVELY MANUFACTURED MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Kolomý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Adam Kolomý**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Silová náročnost při třískovém obrábění aditivně vyrobeného materiálu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se bude zabývat testováním obrobitelnosti materiálu, který bude vyroben pomocí aditivní metody 3D tisku. Součástí práce bude navržení vhodné metodiky testování a sběru dat. Práce se bude dále zabývat zpracováním naměřených dat a vyvozením patřičných závěrů.

Cíle diplomové práce:

Literární rešerše zabývající se studiem obrobitelnosti 3D tisknutých materiálů.
Definice sledovaných veličin.
Návrh vhodné metodiky pro potřeby testování.
Verifikace obrobitelnosti pro danou aplikaci.
Vyhodnocení výsledků.

Seznam doporučené literatury:

DU, Wei, BAI, Qian a ZHANG, Bi. Machining characteristics of 18Ni-300 steel in additive/subtractive hybrid manufacturing. online. International journal of advanced manufacturing technology. 2017, roč. 95, č. 5-8, s. 2509-2519. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1364-0>. [cit. 2022-04-27].

CROCCOLO, Dario, DE AGOSTINIS, Massimiliano, FINI, Stefano, OLMI, Giorgio, ROBUSTO, Francesco et al. Sensitivity of direct metal laser sintering Maraging steel fatigue strength to build orientation and allowance for machining. online. Fatigue & fracture of engineering materials & structures. 2019, roč. 42, č. 1, s. 374-386. ISSN 8756-758X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/ffe.12917>. [cit. 2024-01-06].

TASCIOGLU, Emre, KHAN, Hamaid, KAYNAK, Yusuf, COŞKUN, Mert, TARAKCI, 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. 2024-01-06].

BAI, Yuchao, ZHAO, Cuiling, 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. 116906. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116906>. [cit. 2024-01-06].

DUAN, Chunzheng, WANG, Minjie, CAI, Yu Jun a DOU, T. Microcosmic mechanism of material softening and fracture in primary shear zone during high speed machining of hardened steel. online. Materials science and technology. 2011, roč. 27, č. 3, s. 625-630. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <https://doi.org/10.1179/026708309X12526555493152>. [cit. 2024-05-11].

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Součástí této závěrečné práce bylo posouzení obrobitelnosti aditivně vyrobené nástrojové oceli H13. Vyhodnocení tohoto parametru spočívalo v obrábění tří druhů vzorků zhotovených pomocí odlišných metod výroby. První typ vzorku byl zhotoven pomocí aditivní technologie Bound Metal Deposition. Druhý typ vzorku byl připraven pomocí totožné technologie, ke které se tentokrát přidalo tepelné zpracování charakteristické kalením a následným dvoustupňovým popouštěním. Poslední typ vzorku byl vyroben pomocí konvenční technologie válcování se stejným tepelným zpracováním. Obrábění připravených vzorků probíhalo na frézce, kde se využilo tří různých metod. Frézovalo se buď ve směru kolmém, podélném nebo vertikálním ke směru tištění či válcování. Pro každou obráběcí metodu a typ vzorku byl použit jeden dílčí vzorek a řezný nástroj, tedy celkově devět vzorků a fréz. Pro návrh metodiky testování bylo využito plánovaného experimentu (DoE), kde pro každé konkrétní nastavení řezných podmínek bylo provedeno trojí opakování pro lepší vypovídající hodnotu experimentu. Obrobitelnost byla následně posuzována na základě topografie povrchu jednotlivých obrobených povrchů, silového zatížení v průběhu obrábění, opotřebení nástroje a obrobených třísek. Na základě těchto dat je pak vytvořeno doporučení, která z metod a za jakých řezných podmínek je vhodná pro obrábění daného materiálu.

Klíčová slova

Bound Metal Deposition, frézování, nástrojová ocel H13, obrobitelnost, řezné podmínky, aditivní technologie

ABSTRACT

As part of this final thesis, the machinability of additively manufactured H13 tool steel was assessed. The evaluation of this parameter involved machining three types of samples produced using different manufacturing methods. The first type of sample was made using the additive Bound Metal Deposition technology. The second type was prepared using the same technology, but with additional heat treatment consisting of quenching followed by two-stage tempering. The final type of sample was produced using conventional rolling technology with the same heat treatment applied. The machining of the prepared samples was carried out on a milling machine using three different methods. Milling was performed either in a direction perpendicular, parallel, or vertical to the printing or rolling direction. For each machining method and sample type, one individual sample and one cutting tool were used, resulting in a total of nine samples and nine milling tools. The testing methodology was designed using a Design of Experiments (DoE) approach, where each specific cutting condition was repeated three times to improve the reliability of the results. Machinability was then evaluated based on the surface topography of the machined surfaces, the cutting forces during machining, tool wear, and the characteristics of the generated chips. Based on this data, recommendations were developed regarding which methods and cutting conditions are most suitable for machining this material.

Keywords

Bound Metal Deposition, milling, tool steel H13, machinability, cutting conditions, additive manufacturing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLOMÝ, Adam. *Silová náročnost při třískovém obrábění aditivně vyrobeného materiálu*. Online, diplomová práce. Josef SEDLÁK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165763>.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Silová náročnost při třískovém obrábění aditivně vyrobeného materiálu vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno, 19.05.2025

místo, datum

Adam Kolomý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Josefu Sedlákoví Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mně poskytl při vypracování diplomové práce.

Rád bych vyjádřil upřímné poděkování své rodině za jejich podporu a trpělivost během mého studia a při vypracování této závěrečné práce.

OBSAH

Zadání práce

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	12
2 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVU	17
2.1 Powder Bed Fusion (PBF).....	17
2.1.1 Selective Laser Sintering (SLS).....	17
2.1.2 Selective Laser Melting (SLM)	18
2.1.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	18
2.2 Binder Jetting (BJ).....	19
2.3 Direct Energy Deposition (DED)	19
2.4 Fused Deposition Modeling (FDM)	20
2.5 Bound Metal Deposition (BMD).....	21
2.5.1 Strategie tisku BMD	22
3 SILOVÁ NÁROČNOST PŘI FRÉZOVÁNÍ	25
3.1 Vyhodnocování dílčích složek sil při frézování	25
3.1.1 Přímé měření jednotlivých složek celkové síly	25
3.1.2 Parametry ovlivňující velikost silového zatížení	26
4 VYHODNOCOVÁNÍ KVALITY POVRCHU.....	29
4.1 Parametry drsnosti povrchu.....	29
4.2 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu	29
4.3 Měření drsnosti povrchu.....	30
4.3.1 Dotykové metody měření	30
4.3.2 Bezdotykové metody měření	30
4.3.3 Činitelé mající vliv na výsledky měření drsnosti povrchu	31
5 PRAKTICKÁ ČÁST	32
5.1 Popis experimentu	32
5.2 Příprava vzorků	34
5.2.1 Aditivně vyrobené vzorky	34
5.2.2 Aditivně vyrobené vzorky s tepelným zpracováním	34
5.2.3 Konvenčně vyrobené vzorky s tepelným zpracováním	35
5.2.4 Tvrdost vzorků.....	35
5.3 Použité zařízení během testování	35
5.3.1 Obráběcí stroj.....	35
5.3.2 Řezný nástroj	36
5.3.3 Měřicí přístroje	37

5.4	Vyhodnocení aditivně vyrobeného materiálu.....	39
5.4.1	Vyhodnocení silového zatížení.....	40
5.4.2	Vyhodnocení topografie povrchu	41
5.4.3	Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje	43
5.4.4	Vyhodnocení třísky.....	44
5.4.5	Vyhodnocení struktury vzorků	45
5.5	Vyhodnocení aditivně vyrobeného materiálu s tepelným zpracováním.....	46
5.5.1	Vyhodnocení silového zatížení.....	46
5.5.2	Vyhodnocení topografie povrchu	48
5.5.3	Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje	50
5.5.4	Vyhodnocení třísky.....	52
5.5.5	Vyhodnocení struktury vzorků	52
5.6	Vyhodnocení konvenčně vyrobeného materiálu s tepelným zpracováním	53
5.6.1	Vyhodnocení silového zatížení.....	53
5.6.2	Vyhodnocení topografie povrchu	55
5.6.3	Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje	57
5.6.4	Vyhodnocení třísky.....	58
5.6.5	Vyhodnocení struktury vzorků	59
5.7	Porovnání jednotlivých metod a vzorků.....	60
5.7.1	Z hlediska silového zatížení.....	60
5.7.2	Z hlediska topografie povrchu	61
5.7.3	Z hlediska třísky	64
5.7.4	Z hlediska opotřebení nástrojů.....	66
5.7.5	Z hlediska struktury vzorků	66
ZÁVĚR.....		68

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Aditivní technologie je v dnešním světě již neodmyslitelnou součástí strojírenské výroby. Její využití neustále roste napříč mnoha odvětvími, jako jsou automobilový, zdravotnický, stavební, vojenský, šperkařský či letecký průmysl. Hlavní výhoda této technologie spočívá v maximálním využití materiálu a schopnosti vyrábět složité tvary součástí. Existuje řada aditivních metod a strategií, které budou v této diplomové práci popsány. Největší pozornost však bude věnována metodě Bound Metal Deposition (BMD), protože byla využita při realizaci praktické části této závěrečné práce, v níž se hodnotila obrobiteľnosť materiálu vyrobeného práve touto aditivní metódou. Ve strojírenské výrobě je cílem dosáhnout co nejlepší obrobiteľnosti materiálu prostřednictvím vhodně zvolené technologie obrábění. Obrobiteľnosť materiálu hraje významnou roli při snižování opotrebení rezných nástrojů a zkrácení doby obrábění, což vede k nižším výrobním nákladům a vyšší produktivitě.

V rámci této závěrečné práce se proto vyhodnocovala obrobiteľnosť aditivně vyrobené nástrojové oceli H13. Pro potřeby experimentu a efektivní testování byly připraveny tři druhy vzorků z oceli H13:

1. aditivně vytištěný vzorek,
2. aditivně vytištěný vzorek s tepelným zpracováním (kalení a dvoustupňové popouštění),
3. konvenčně vyrobený (válcováním) vzorek po tepelným zpracováním (kalení a dvoustupňové popouštění).

Na základě zvolené technologie a rezných podmínek obrábění bude vzájemně porovnávána obrobiteľnosť jednotlivých vzorků v závislosti na opotrebení nástroje, velikosti silového zatížení, drsnosti povrchu a dalších parametrech obrábění. Výsledky tohoto srovnání budou sloužit jako doporučení, která z metod obrábění a které rezné podmínky jsou vhodné pro dosažení efektivní výroby a požadovaných vlastností obrobku.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Aditivní technologie je pokročilá metoda, při které se plasty, polymery nebo kovy nanášejí vrstvu po vrstvě, než vznikne požadovaný tvar součásti. Tyto materiály jsou ve formě prášku nebo drátu, který se taví pomocí laseru či elektronového paprsku. Oproti konvenčním výrobním metodám se snižují ztráty materiálu a náklady na nástroje. Metoda Selective Laser Melting (SLM) patří mezi nejpokročilejší technologie pro aditivní nanášení kovů, neboť finální součásti dosahují mechanických vlastností podobných kovaným dílům. [1; 2]

Aditivní technologie, jako jsou SLM, Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), Electron Beam Melting (EBM), Laser Additive Manufacturing (LAM) a Laser Metal Deposition (LMD), umožňují výrobu kovových součástí se značnou geometrickou složitostí, které by se konvenčními metodami zhotovovaly obtížně. Díky vysoké individualizaci se aditivní výroba stále více využívá v průmyslových odvětvích, například v dopravním průmyslu a medicíně. Nevýhodou těchto součástí je však vysoká drsnost povrchu a poměrně nízká rozměrová přesnost, které nedosahují takové kvality jako u konvenčně vyráběných dílů. K dosažení požadované kvality povrchu a přesných geometrických rozměrů je proto zapotřebí provést dokončovací obrábění. [3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11]

Z tohoto důvodu roste snaha o optimalizaci dokončovacích operací, aby byly výhody aditivní technologie co nejlépe využity. Válcování za studena zlepšuje pevnost, životnost, odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebení u aditivně vyrobených dílů díky snížení drsnosti povrchu, plastické deformaci a zavedení zbytkových tlakových napětí. [12]

Obecně platí, že součásti vyrobené aditivní technologií vykazují vyšší hodnoty tvrdosti a pevnosti v tahu, což má za následek horší obrobiteľnosť ve srovnání s konvenčními metodami. Pórovitost navíc dále zhoršuje obrobiteľnosť. Nicméně existují řezné podmínky, za kterých je možné dosáhnout lepší obrobiteľnosti – např. při kryogenním chlazení. [13]

Aditivně vyráběné maraging oceli mají průměrně o 15 % vyšší pevnost než konvenčně vyráběné maraging oceli. Tento rozdíl však zásadně neovlivňuje jejich obrobiteľnosť. Přesto byly u aditivně vyráběných maraging ocelí zaznamenány mírně vyšší řezné síly – přibližně o 5 %. Při vyšších rychlostech docházelo u nástrojů používaných při obrábění těchto ocelí k rychlejšímu opotřebení kvůli vyšším tlakům a teplotám. Vyhodnocení zbytkových napětí odhalilo, že i přes počáteční rozdíly ve stavu povrchu (u aditivně vyráběných ocelí činilo 150 MPa a u konvenčně vyráběných ocelí 500 MPa) měly po obrábění obdobné hodnoty zbytkových napětí. Obecně způsobují maraging oceli při obrábění výrazné abrazivní opotřebení kvůli své tažnosti, což zvyšuje nároky na trvanlivost nástrojů. [10]

U těchto maraging ocelí došlo po kryogenním ochlazení k výraznému snížení vlivu směru tisku na tlakovou sílu a kroutící moment, což vedlo ke zlepšení obrobiteľnosti. Směrová anizotropie byla pozorována i při tvorbě třísek: třísky tvořené rovnoběžně se směrem tisku materiálu byly tlustší a širší než třísky vzniklé kolmo k tomuto směru. To naznačuje, že obrábění ve směru tisku materiálu spotřebovává více energie než obrábění kolmo k tomuto směru. [14]

K maraging ocelím se vyjadřoval i tým Tascioglu, který zjistil, že vzorky vyrobené metodou SLM mají po výrobě vyšší tvrdost a nižší drsnost povrchu než vzorky vyrobené tvářením. Díky tepelnému zpracování a povrchové úpravě lze dosáhnout stejných výsledků v tvrdosti, drsnosti povrchu a opotřebení jako v případě konvenční výroby. [15]

Při zkoumání maraging 18Ni-300 oceli se dospělo k závěru, že součásti vyrobené SLM mají jemnější zrna s epitaxiálními dendrity. Jejich povrchová tvrdost je zároveň o 31,6 % vyšší než u kovaných součástí. Při obrábění SLM vzorků jsou nutné větší řezné síly než u kovaných vzorků. Při rychlosti posuvu $320 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ činí rozdíl přibližně 30 %. Při shodném posuvu vykazují SLM vzorky lepší drsnost povrchu než kované vzorky. Při jemném frézování mají

SLM vzorky na povrchu tahová zbytková napětí, což je způsobeno tepelným napětím z aditivní výroby. Naopak povrch kovaných vzorků obsahuje tlaková napětí. Při frézování za vyšších řezných podmínek se u SLM vzorků objevují větší tlaková napětí než u tvářených vzorků v důsledku nižší plasticity. [11]

V dalším výzkumu, kde se rovněž vyhodnocovala ocel 18Ni-300 zhotovená metodou SLM, bylo zjištěno, že horní strana vzorku má vyšší tvrdost, což způsobuje větší silové zatížení a opotřebení nástroje než při obrábění boční strany vzorku. S rostoucím časem precipitačního vytvrzování byla pozorována vyšší tvrdost materiálu a s tím související vyšší silové zatížení. Dále bylo pozorováno větší opotřebení nástroje při obrábění a zároveň dochází k zhoršení kvality povrchu. [16]

Směr tisku materiálu ani přídavek na obrábění nemají vliv na únavovou pevnost precipitačně vytvrzené aditivně vyrobené maraging oceli MS1. Mez únavy činila 581 MPa (28 % pevnosti v tahu). Na tento výsledek mělo vliv stárnutí, větší tloušťka vrstev a nízký koeficient tepelné roztažnosti, které přispívají ke snížení zbytkového napětí vznikajícího při stavbě. [17]

Obrábění superslitin na bázi niklu a titanu je nákladné a časově náročné ve srovnání s ocelí či slitinami na bázi hliníku. To vedlo k rozvoji aditivní výroby, která umožňuje produkovat díly s téměř finálním tvarem, což zkracuje dodací lhůty a minimalizuje materiálové ztráty. Kovové díly vyrobené aditivní výrobou však stále vyžadují dokončovací obrábění pro dosažení přesných rozměrů a kvalitního povrchu. [18]

Niklové slitiny Inconel 625 vyráběné laserovou fúzí v práškovém loži vykazují rozdílné chování vlivem směru tisku a strategií nanášení při dokončovacím frézování. Silové zatížení roste s vyšší řeznou rychlostí. S rostoucí rychlostí posuvu se odporová síla také zvyšuje kvůli většímu průřezu třísky. Strategie tisku ovlivňuje hustotu a mikrostrukturu, což mění silové zatížení – vyšší síla se vyskytuje při $SRR = 90^\circ$ (otáčení materiálu mezi nanášením jednotlivých vrstev o 90°). Třísky mají vějířovitý tvar, na jehož okrajích se objevují pilové zuby. Podél okrajů třísek vznikají zejména radiální trhliny. Nejčastějším opotřebením břitových destiček je vylamování ostří a povlaku. Na obrobeném povrchu se vyskytují stopy po posuvu a adhezně ulpělý materiál. [3]

Patel a kol. ve svém článku zkoumali frézování laserem tavené slitiny niklu Inconel 625, vliv směru obrábění a strategie tisku materiálu na velikost silového zatížení a tvar třísek. Silové zatížení při obrábění podél směru nanášení materiálu bylo větší než řezné síly při obrábění kolmo na směr růstu zrn. Třísky vznikající při obrábění jsou vějířovité a nespojitě, s pilovými zuby na vnějším okraji. Na vnitřní straně třísek, zejména v radiálním směru, se nacházejí trhliny. [19]

S vyšší řeznou rychlostí při obrábění superslitin na bázi niklu a titanu docházelo k vyšší míře opotřebení řezného nástroje. Použitím kryogenního chlazení při obrábění se zvýšila životnost nástroje. Zejména u titanových slitin se snížilo opotřebení díky poklesu tvorby výmolů až o 60 %. Orientace řezného nástroje vůči směru sestavení tištěné součásti výrazně ovlivnila kvalitu povrchu, která se zhoršovala při vyšších řezných rychlostech a posuvech. Třísky vznikající při obrábění těchto superslitin byly kratší v důsledku vysoké tvrdosti a omezené plastické deformace materiálu. [18]

Srovnání obrobiteľnosti superslitin LAM a tvářených superslitin Inconel 718 ukázalo, že LAM Inconel 718 má nehomogenní mikrostrukturu s vadami, nižší hustotu ($8,1577 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), vyšší tepelnou vodivost ($24,7 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$) a nižší nanotvrdost (412 HV_{0,2}) v porovnání s tvářenou variantou. Dále měl LAM Inconel 718 nepravidelné třísky se zubatými hranami, nižší silové zatížení a vibrace díky své nižší hustotě, malé nanotvrdosti a nízké řezné teplotě. U slitiny Inconel 718 byla dosažena podobná povrchová drsnost jak při obrábění LAM materiálu, tak při

obrábění tvářené verze superslitiny Inconel 718. Povlakované karbidové nástroje vykazovaly delší průměrnou životnost 12,41 min při obrábění LAM Inconelu 718, zatímco u obrábění tvářené varianty superslitiny Inconelu 718 byla životnost kratší a činila 3,28 min. [8]

Niklová superslitina Inconel 718 (IN718) je široce využívána v leteckém, jaderném a chemickém průmyslu. Díly z IN718, vyrobené jak konvenčními, tak aditivními metodami, vyžadují následné obrábění pro dosažení požadované rozměrové přesnosti a povrchové kvality pro uvedená použití. Obrobitelnost stěny IN718 vyrobené metodou LMD se liší v závislosti na místě kvůli rozdílné tvrdosti ve směru nanášení materiálu. Spodní část stěny se obrábí složitěji než horní část, která je vzdálenější od substrátu. Obrábění spodní části stěny IN718 vyžaduje vyšší řezné síly, zvyšuje drsnost povrchu a teploty více než obrábění horní části. Zatímco spodní oblast vykazuje výrazné odchylky v těchto parametrech, horní část vykazuje minimální rozdíly. Obrobitelnost stěn IN718 vyrobených metodou LMD je v prostředí suchého řezání horší než při použití Minimum Quantity Lubrication (MQL). MQL zlepšuje všechny parametry obrábění bez ohledu na místo, přičemž největší přínos je v dolní části stěny. MQL zlepšuje obrobitelnost a snižuje opotřebení nástroje, ale spotřeba energie zůstává obdobná jako při suchém řezání. [6]

Výzkum Zimmermanna a kol. se zabýval obrobitelností laserem natavených práškových materiálů AlSi10Mg. Tento materiál byl testován na základě různých nastavení výrobních parametrů použitých pro L-PBF a směru pohybu posuvu čelní frézy vzhledem k náběhu obrobku. Výsledky byly porovnány s odlitým a tepelně zpracovaným referenčním materiálem AlSi10Mg. Zimmermann a kol. ve svém výzkumu dospěli k těmto závěrům [5]:

- Souvislé třísky se tvořily bez ohledu na metodu výroby materiálu a řezné podmínky aplikované při frézování. Forma třísek se však lišila. Při frézování referenčního materiálu vznikaly nespojitě třísky, zatímco při obrábění aditivně vyráběné hliníkové slitiny vznikaly spirálovité segmenty třísek. [5]
- Větší počet hranic nanášeného materiálu při technologii L-PBF zvyšuje výsledné řezné síly [5].
- Výrobní metoda materiálu AlSi10Mg ovlivňuje povrchovou drsnost a výslednou povrchovou strukturu frézované součástky [5].

Při porovnávání aditivně vyráběných materiálů AISI 316L s obráběním stejně specifikovaného výchozího materiálu vyrobeného kontinuálním litím byly zjištěny následující poznatky:

- Typ opotřebení nástroje závisí na způsobu výroby materiálu. U referenčního materiálu dochází k abrazivnímu opotřebení, což zahrnuje zaoblení břitu. U aditivně vyráběných materiálů se na nástroji objevuje z velké části adhezní opotřebení. [20]
- Referenční materiál vykazoval zvýšené silové zatížení v důsledku zvýšené šířky záběru ostří. [20].
- Referenční vzorek způsobuje vznik protažených drah nástroje na obrobeném povrchu. Zatímco aditivně vyráběné materiály jsou křehčí a vykazují nižší drsnost povrchu. [20]

Cílem práce Fonseca a kol. bylo zhodnotit obrobitelnost tenkostěnných konstrukcí vyrobených dvěma různými variantami aditivní technologie: konvenčním nanášením MIG (Metal Inert Gas) a aditivní výrobou drátem a obloukem (WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing), a inovativní variantou kování za tepla (HF-WAAM – Hot Forging Wire and Arc Additive Manufacturing). Jako referenční vzorek byla použita izotropní nízkouhlíková ocel. Mikrostruktura ve všech vzorcích vykazovala lokální izotropii, s jemnější strukturou a menší zrnitostí. Řezná síla, vynaložený výkon při řezání a spotřebovaná energie byly při obrábění aditivně vyrobeného materiálu až o 12 % nižší než u nízkouhlíkové oceli. Zároveň došlo ke 14% zlepšení při obrábění metodou HF-WAAM oproti vzorkům zhotoveným metodou

WAAM. Vzorky vyrobené metodou WAAM měly o 5 % až 90 % lepší drsnost povrchu, zatímco vzorky vyrobené metodou HF-WAAM dosahovaly zlepšení drsnosti povrchu v rozmezí 7 % až 84 %, a to i přes větší tvrdost materiálu. Nejlepší drsnost povrchu byla dosažena při vyšší řezné rychlosti. U všech variant výroby byly tvořeny spojitě třísky. Obrábění HF-WAAM se jeví jako vhodná metoda, protože s optimálními řeznými parametry lze obrábět materiály s lepšími mechanickými vlastnostmi, nižší spotřebou energie a menším silovým zatížením, aniž by se znehodnotila kvalita povrchu [21].

Ve studii od Miliona a kol. byly porovnávány parametry povrchu u Ti6Al4V SLM dílů s konvenční válcovanou slitinou. SLM vzorky po dokončení vykazovaly vyšší zpevnění materiálu, než jak tomu bylo u konvenčně vyrobené slitiny. Dále byly aditivně vyrobené vzorky hůře obrobitelné, protože při obrábění vznikala o 22 % větší axiální síla [22].

Podobná problematika se zkoumá i v oblasti 3D tisku plastů. Studie od Suna a kol. se zaměřila na testování vzorků z polylaktidu (PLA) ve tvaru psích kostí, které byly vyrobeny metodou Fused Deposition Modeling (FDM) a podrobeny tahovým zkouškám při různých rychlostech deformace. Výsledky ukázaly, že vztah mezi napětím a deformací závisí na úhlu tisku vůči vodorovné rovině a také na rychlosti deformace. Vzorky tištěné pod menším úhlem byly pružnější a jejich pevnost rostla s vyššími rychlostmi deformace. Naopak vzorky s větším sklonem vůči vodorovné rovině měly vyšší mez kluzu při dynamickém zatížení, ale byly méně citlivé na změny rychlosti deformace. Tyto vzorky se obecně lámaly křehce už při malých deformacích [23].

Výzkum Wanga a Liu se zabývá řeznými vlastnostmi čtyř keramických monolitních čelních fréz (Si_3N_4 , Ti(C,N), SG4 a LT55) při obrábění kalené oceli AISI H13 (HRC 60–62) a jejich porovnáním s referenčním nástrojem ze slinutého karbidu. Výsledky ukázaly, že keramické nástroje obecně vykazují nižší silové zatížení, lepší kvalitu obrobeného povrchu a delší životnost nástroje. Nejlepší výsledky vykazoval nástroj s povlakem Ti(C,N), a to díky nízké řezné síle, dobré kvalitě povrchu a dlouhé životnosti, což jej činí vhodným pro obrábění tenkostěnných součástí. Použité keramické frézy se díky vysoké tvrdosti a nízké chemické afinitě s obráběným materiálem jeví jako jedna z možností pro obrábění kalených ocelí. [24]

Studie týmu Abu Bakara se zaměřuje na opotřebení nástroje při frézování kalené oceli AISI H13 s různým poloměrem břitu nástroje za sucha a za kryogenních podmínek (chlazení kapalným dusíkem). Byly použity nepovlakované čtyřbřité frézy z cementovaného karbidu s průměrem 6 mm a dvěma variantami poloměru břitu – $R_\epsilon = 0,018$ mm a $R_\epsilon = 0,03$ mm. Experiment prokázal, že kryogenní podmínky při obrábění významně prodlužují životnost nástroje. Nástroj s větším poloměrem břitu dosáhl až o 55 % delší životnosti oproti stejnému nástroji bez použití kryogenního chlazení. Hlavními mechanismy opotřebení byly adhezni a abrazivní opotřebení. Tyto mechanismy byly méně patrné při kryogenním obrábění díky účinnějšímu odvodu tepla. Větší poloměr břitu navíc snižuje opotřebení na nástroji díky lepšímu rozložení zatížení, což dále prodlužuje jeho životnost. [25]

V rámci této studie byla porovnána obrobitelnost aditivně vyrobených a konvenčně vyráběných vzorků z oceli H13. Porovnání bylo provedeno na základě řezné síly a řezných koeficientů. Aditivně vyrobené vzorky byly zhotoveny pomocí Laser Engineering Net Shaping (LENS) a WAAM. Aditivní materiály vykazují vyšší tvrdost (HRC) a zároveň i vyšší silové zatížení než válcovaný materiál, což se projevuje horší obrobitelností. Z těchto důvodů je potřeba modifikovat řezné podmínky pro aditivně vyrobené díly, aby byla dosažena lepší obrobitelnost. [26]

Studie [4] se zabývá obráběním nástrojové oceli H13 vyrobené technologií materiálové extruze (Bound Metal Deposition) a analyzuje vliv řezných podmínek (řezná rychlost, posuv na zub a způsob chlazení) na opotřebení nástroje, silové zatížení, drsnost povrchu, mikrostrukturu,

nanotvrdost a zbytková napětí. Nejnižší drsnosti povrchu ($0,08\text{ }\mu\text{m}$) bylo dosaženo při řezné rychlosti $80\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, posuvu na zub $0,005\text{ mm}$ a chlazení kapalinou. Chlazení přineslo i nejvyšší zbytková tlaková napětí (-783 MPa) a nejvyšší povrchovou tvrdost (550 HV) po obrobení. Naopak suché obrábění snižovalo opotřebení nástroje a silové zatížení, ale vedlo ke snížení zbytkových napětí o $78\text{ }\%$, pravděpodobně vlivem částečného vyžhání materiálu. Celkově studie potvrzuje, že suché obrábění představuje perspektivní technologii pro dosažení kvalitního povrchu a vhodné struktury. [27]

2 TECHNOLOGIE 3D TISKU KOVU

Jedná se o technologii, která je již poměrně stará. Již začátek 20. století přinesl první patenty – např. vrstvené koňské podkovy. Technologie 3D tisku kovu se pak postupně vyvíjela do podoby, jakou známe dnes [28]. Primárním typem materiálu je kovový prášek. Typy technologií 3D tisku kovu jsou často děleny na základě způsobu, jak dochází ke vzniku součástí. Jako předloha pro tisk se používá CAD model, který se nejčastěji uloží ve formátu STL. Poté je součást pomocí programu zvaného slicer rozdělena na dílčí vrstvy. Tento program vygeneruje G-kód potřebný k výrobě součásti. Využívá se například tavení prášku pomocí laseru či extruze kovového filamentu [29; 30]. V následujících kapitolách jsou popsány zvolené technologie zabývající se 3D tiskem kovu.

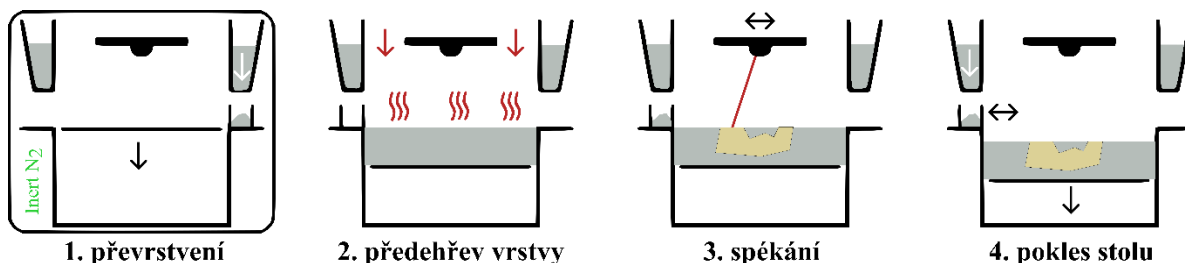
2.1 Powder Bed Fusion (PBF)

Tato nejčastěji používaná metoda 3D tisku kovu využívá ke spékání kovového prášku laser nebo elektronový paprsek, který se nanáší na pracovní stůl pomocí speciálního nože či válce. Výsledná součást se poté přefiltruje, aby se odstranil nevyužitý prášek. Tento zbylý prášek se pak může opět využít. Powder Bed Fusion se častěji vyskytuje pod firemními názvy jako Direct Metal Printing (DMP), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Selective Laser Sintering (SLS) či Selective Laser Melting (SLM). [29; 31; 32] Vybrané technologie jsou podrobněji vysvětleny dalších podkapitolách.

Mezi základní výhody této technologie patří relativně nízká drsnost při použití tloušťky vrstvy 20 μm , přesnost a možnost vyrábět tvarově složité díly [31; 32]. Mezi slabé stránky této technologie patří vysoké pořizovací náklady, nemožnost tisku přepisných částí a nutnost dokončovacích operací po vytištění součásti [31].

2.1.1 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS technologie využívá CO_2 laser k natavování práškového materiálu při výrobě 3D součástí. Tento postup, vynalezený na konci 80. let 20. století, spočívá v nanášení tenkých vrstev prášku na pracovní stůl, které laser postupně spéká do požadovaného tvaru. Po každé vrstvě se přidá další a proces se opakuje, dokud není model kompletní. Veškerý prášek, který během výroby funguje jako opora pro vytvářený díl, zůstává neporušený a po dokončení celého procesu může být znovu využit. [30; 33] Postup výroby touto metodou je schematicky zobrazen na obrázku 1.

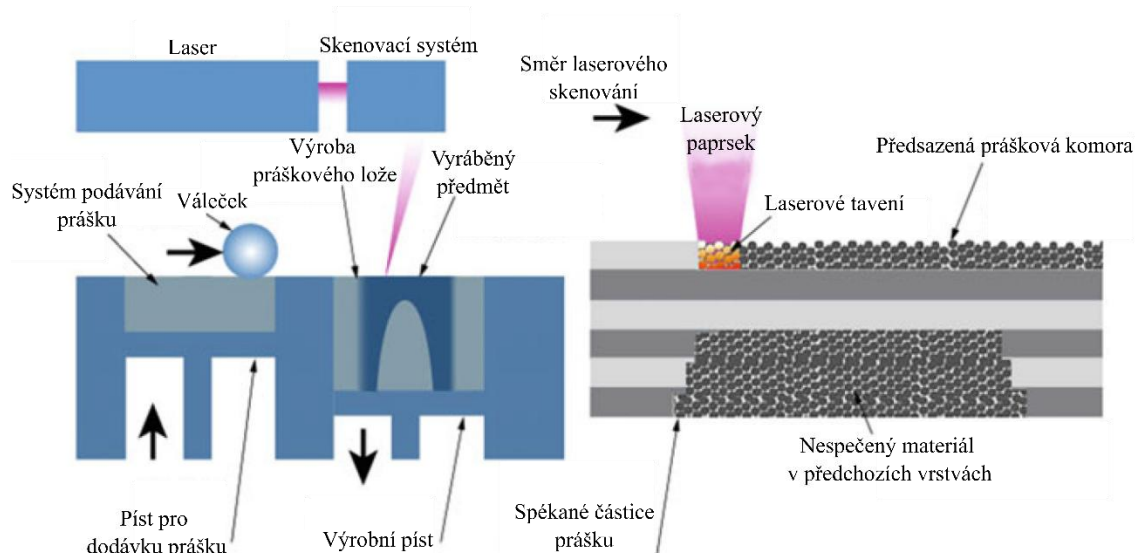


1. Před zahájením výrobního procesu je komora naplněna netečným plynem, což zajišťuje stabilní výrobní podmínky a nižší porozitu součástí. [33]
2. Recoater nanáší slabou vrstvu prášku na ohřátý stůl. [33]
3. Laser nejprve vypálí obrys součásti, čímž roztaví a spojí částice prášku, pak stejným způsobem zpracuje vnitřní část součásti. [33]
4. Jakmile dojde k zhotovení vrstvy, tak se pracovní stůl poníží o šířku součásti. Takhle se proces opakuje, až je součást hotová. [33]

Obr. 1 Postup výroby součásti pomocí SLS [33].

2.1.2 Selective Laser Melting (SLM)

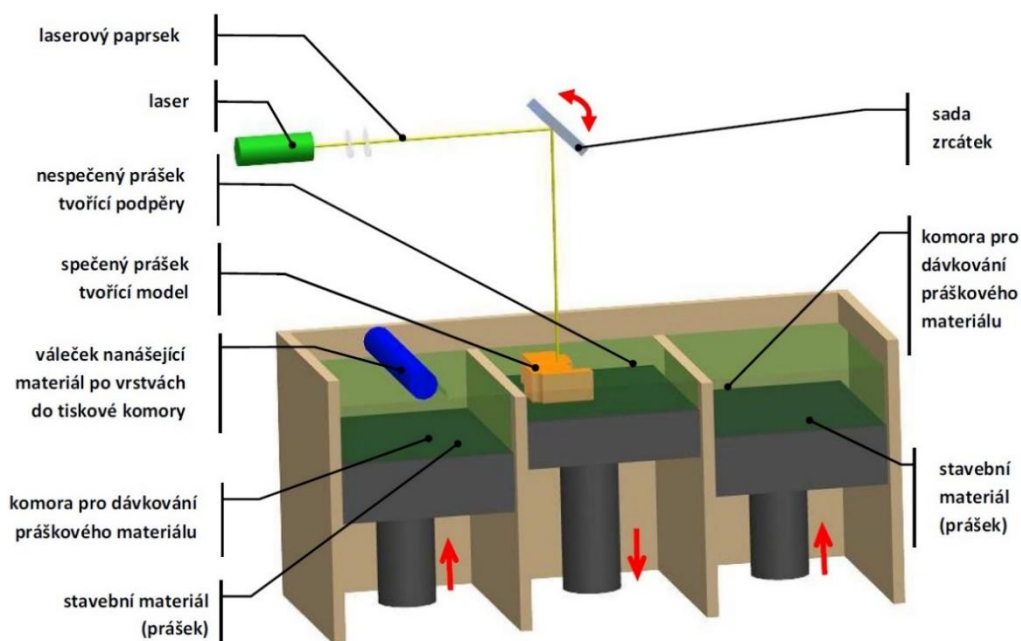
Jedná se o technologii (obr. 2), která je podobná metodě SLS. Na rozdíl od metody SLS dochází u SLM k úplnému roztavení prášku [28; 34]. Součást tak vzniká jako homogenní struktura s lepšími mechanickými vlastnostmi. Při správném nastavení výrobních parametrů lze pomocí technologie SLM zhotovit složité součástky s mechanickými vlastnostmi, kterých dosahují tvářené materiály [35]. Tiskne se v ochranné plynu – Ar nebo N [34]. Touto metodou je možné tisknout materiály z oceli, mědi, hliníku, titanu, kobaltu, chromu či zlata [36; 37]. Výhodou SLM je nižší porozita v porovnání se SLS. Nevýhodou metody je dlouhotrvající tisk [34].



Obr. 2 Schéma výroby technologie SLM [28].

2.1.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

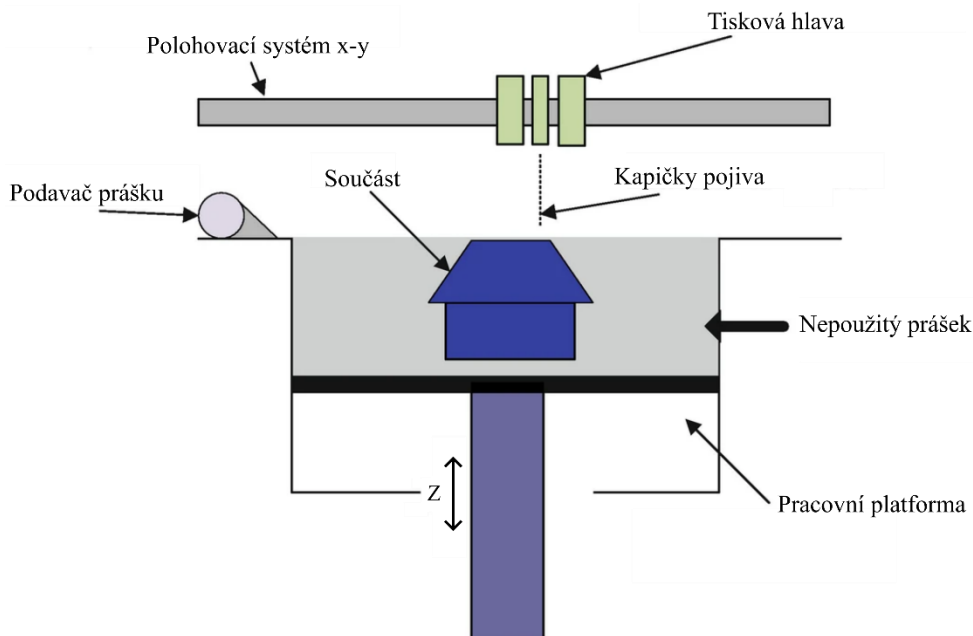
Metoda Direct Metal Laser Sintering (DMLS) (obr. 3) rovněž funguje na podobném principu jako SLS. Významný rozdíl spočívá v tom, že u DMLS je nutné dosáhnout vyšších teplot pro spékání prášku. Laser musí mít tedy větší výkon. Výroba probíhá v ochranné atmosféře Ar. [30]



Obr. 3 Schéma výroby DMLS [30].

2.2 Binder Jetting (BJ)

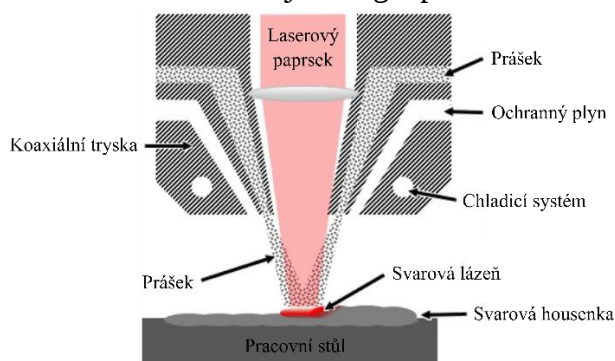
Tato technologie spočívá v chemickém vytvrzování materiálu za použití pojiva. Princip této metody (obr. 4) spočívá v aplikaci slabé vrstvy prášku na pracovní platformu, která je následně spojena (slepena) pojivem. Po vytištění vrstvy se pracovní platforma sníží a na ní se nanese nová vrstva prášku, což je podobné metodám nanášení v PBF technologiích. Proces (obr. 4) se opakuje, dokud stroj nevytvoří finální výrobek. Pomocí této technologie lze vyrábět díly nejen z kovu ale i z keramiky. [29; 30; 38]



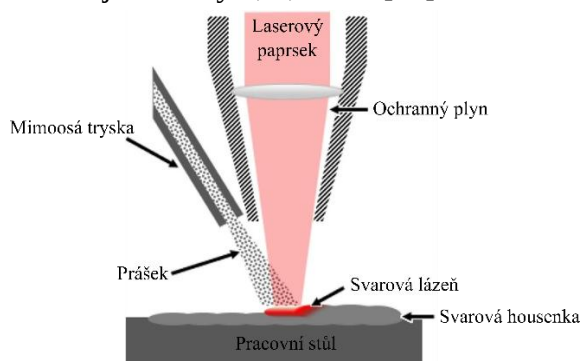
Obr. 4 Schéma výroby BJ [38].

2.3 Direct Energy Deposition (DED)

Výchozí materiál v podobě prášku nebo drátu je přiváděn na pracovní stůl, na který je současně soustředěn energetický zdroj, jako je laserový paprsek, elektrický oblouk, elektronový nebo plazmový paprsek. Tento proces vytváří tavicí lázeň, která neustále natavuje materiál vrstvu po vrstvě. Jednotlivé zdroje energie pro metodu DED ukazují obrázky 5, 6, 7 a 8. [39]

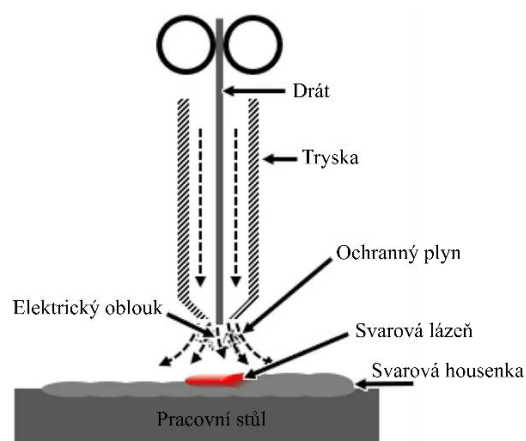


Obr. 5 DED s koaxiální přívodem prášku [40].

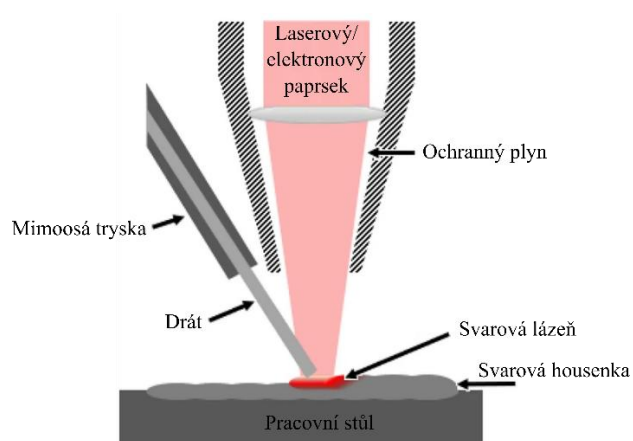


Obr. 6 DED s vnějším přívodem prášku [40].

Typický stroj pro přímé energetické nanášení (DED) se skládá z trysky umístěné na víceosém rameni, která nanáší roztavený materiál na pracovní stůl, kde ztuhne. Tato technologie je obdobná extruzi materiálu. Rozdíl spočívá v tom, že tryska má možnost pohybu v různých směrech a není omezena na určitou osu. Materiál se při nanášení taví svazkem elektronů nebo laserem. Nejčastěji se tato technologie používá pro tisk kovů, nicméně se dá uplatnit i při zpracování polymerů a keramiky. [41]



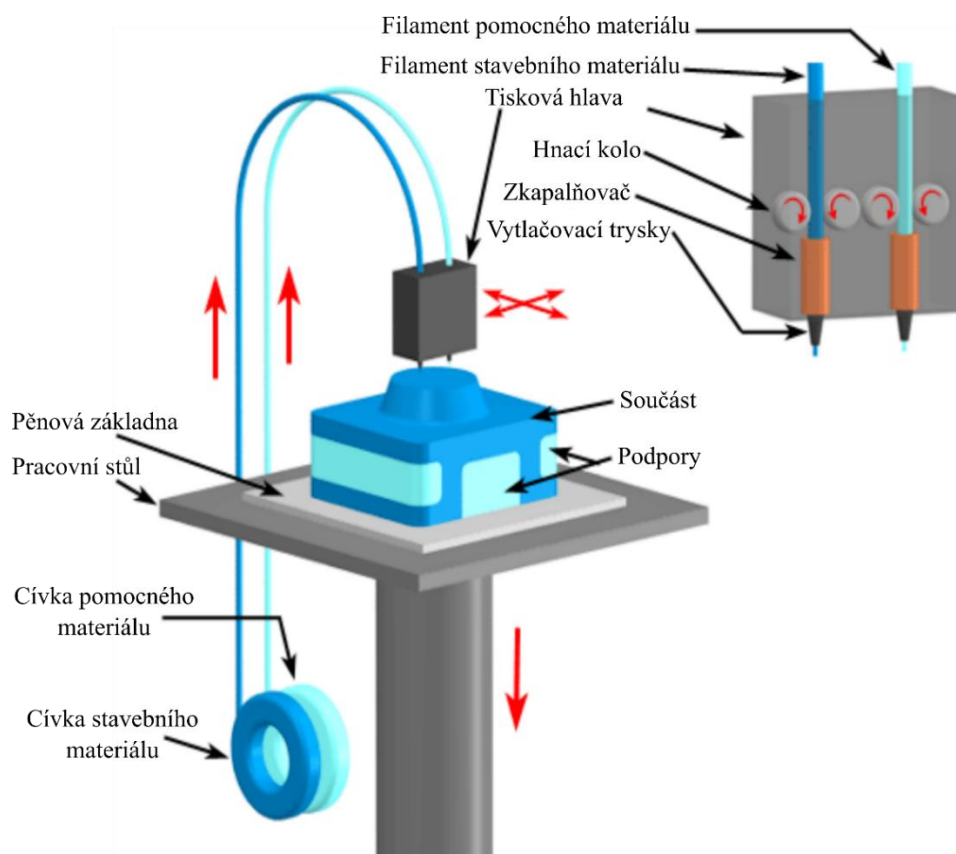
Obr. 7 DED s koaxiální přívodem drátu [40].



Obr. 8 DED s vnějším přívodem drátu [40].

2.4 Fused Deposition Modeling (FDM)

Základní princip této metody spočívá v pokládání nataveného filamentu po jednotlivých vrstvách na pracovní stůl, viz obrázek 9 [30]. Materiál je tlačěn do tiskové hlavy, kde ho vytlačovací tryška nataví a vrství na pracovní stůl. Jakmile dojde k dokončení vrstvy, tak se podložka vertikálně posune a začne tisk nové vrstvy. Pracovní stůl se dokáže pohybovat v ose z, zatímco tisková hlava se přesouvá v osách x a y. Schematicky je tento postup znázorněn na obrázku 9 [42]. Tato metoda má oproti jiným technologiím levnější vybavení. Nedostatkem metody je nízká hustota a vysoká smršťovitost výtisků [31].



Obr. 9 Schéma výroby FDM [43].

2.5 Bound Metal Deposition (BMD)

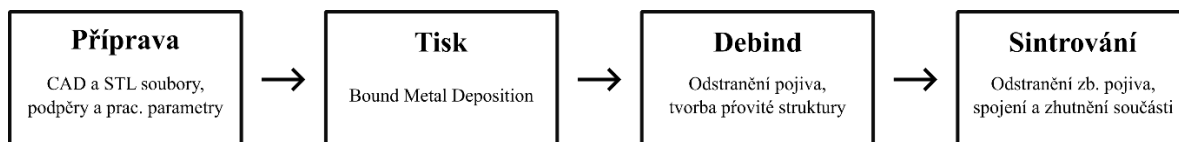
V rámci této diplomové práce bude tato technologie podrobně popsána, protože se v praktické části budou zkoumat konkrétní vzorky vyrobené touto metodou.

Je to aditivní technologie, která využívá extruzi (vytlačování) termoplastického média obsahujícího kovový prášek k tvorbě kovových součástí. Termoplastické médium je v podobě tyčinek, v nichž je kovový prášek spojen pomocí polymerního pojiva a vosku. Tyto tyče jsou poté zahřívány a extrudovány na pracovní stůl, kde dochází k tvorbě požadovaného dílu (obr. 10) vrstvu po vrstvě. Poté následuje odstranění pojiva vlivem tepla a sintrování vyčištěného dílu, což vede ke zpevnění hotové součásti. [44; 45; 46]



Obr. 10 Součást vyrobená technologií BMD.

Tato technologie pracuje na principu zahřívání tyčí pomocí extruderu (jeden pro keramické materiály a druhý pro kovové materiály), který změkčuje pojivo, aby mohly být dané tyče vytlačovány přes trysku. Nejprve se vytiskne tzv. raft, na který se nanáší samotný díl s podporami. Vrstva mezi podporou a dílem slouží k regulaci smrštění. Navíc tato keramická vrstva nepřilne ke kovu, tudíž usnadní oddělení dílu od podpor. Následuje přemístění dílu do debinderu, kde dochází k rozpuštění přebytečného pojiva pomocí chemické reakce se speciální kapalinou, čímž vzniká pórovitá struktura, jež je vhodná pro sintrování. Poté v peci dochází k ohřevu součásti na teplotu tavení, tím zbylé pojivo ze součásti odchází, což má za následek konečné zahuštění na přibližných 99,8 %, které je spojené s následným smrštěním okolo 20 % (dle materiálu). Proces sintrování je optimalizovaný pro každý materiál a díl pomocí dilatometrie. [46; 47] Postup výroby BMD je schematicky znázorněn na obrázku 11.



Obr. 11 Schéma postupu výroby BMD vytvořeno podle [47].

Za pomoci aditivních technologií spojených s extruzí materiálu je možné tisknout komponenty, které nebylo předtím možné vyrobit konvenčními metodami např. lisováním, litím, Metal Injection Molding (MIM) či práškovou metalurgií. Předností této metody jsou geometricky a tvarově přesné součásti a funkční prototypy. BMD má možnost využití při výrobě nástrojů, přípravků, ale i v malosériové výrobě. [44; 45; 46]

Pomocí metody BMD je možné docílit těchto parametrů [47]:

- tolerance tisknutí je $\pm 0,5$ mm při rozměru součásti menší než 60 mm. S rostoucí velikostí součásti dochází ke zvětšování tolerance (každý jeden mm nad 60 mm přidává přibližně $\pm 0,008$ mm),
- minimální výška vrstvy je 0,050 mm. Běžná výška vrstvy je okolo 0,16 mm,
- hustota součásti se pohybuje v rozmezí od 96 % do 99 %,
- minimální tloušťka tisknuté součásti je 1 mm,
- povrch může být matný či lesklý,
- maximální rychlost tisku je 16 cm³ materiálu za hodinu.

Roli při 3D tisku hraje také výplň, která u technologie BMD je zcela uzavřená s malými dutinami, neboť součástí BMD je proces vytlačování. Výjimku tvoří velmi malé součásti. Dále uzavřená výplň není možná u metody SLS, neboť u této metody je potřeba, aby se nepoužitý prášek odebral z dutin. Proto musí být výplň otevřená. Výplň zároveň určuje pokles hmotnosti při zachování konstrukčních vlastností vytištěné součásti. [44; 46]

Touto technologií lze zpracovávat řadu materiálů, které je možné slinovat v termoplastickém médiu. Příkladem jsou nástrojové a korozivzdorné oceli, keramika, karbidy, měď, Ti a Ni slitiny. [44; 45; 46; 47]

Basak a kol. ve své studii zkoumali dopad parametrů tisku na mechanické a mikrostrukturní vlastnosti korozivzdorné oceli 316 L, která byla vyrobena metodou BMD. Tento tým došel k závěru, že při použití trysky s menším průměrem se docílí lepší drsnosti povrchu. Naopak součástky vytisknuté tryskou s větším průměrem dosahovaly větší pevnosti v tahu. Také menší tloušťka vrstvy a větší hustota výplně pozitivně ovlivnily pevnost v tahu, protože došlo k poklesu pórovitosti. [48]

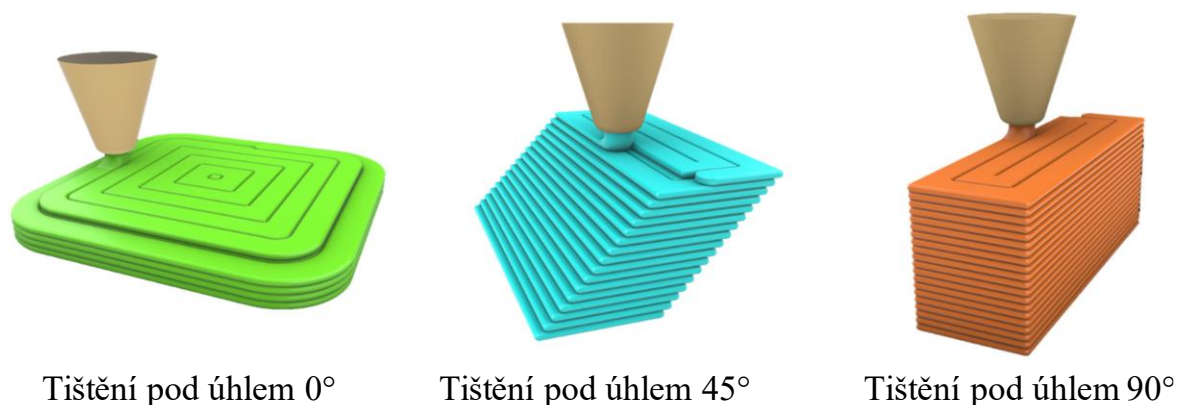
Ocel 316 L byla také testována v projektu od Gabilonda a kol., kde bylo podobně využito metody BMD. Zkoumaly se válcové vzorky z hlediska odlišných teplot během tisknutí v komoře, vyplňovacích vzorů a poloh tisku (vodorovná a svislá pozice). Svisle vytisknuté vzorky dosahovaly zhruba o 1 % nižší porozity (5,67 %) než vzorky vodorovně zhotovené. Zároveň se u svislých vzorků docílilo o 160 MPa větší meze kluzu v tahu (R_e) než u svisle postavených vzorků. Dále na mechanické vlastnosti měly vliv jednotlivé výplně. Důsledkem nižšího výskytu pórů měly vzorky mající liniový vzor (obr. 14) o 20 MPa větší mez kluzu R_e v tahu než vzorky s koncentrickým vzorem, viz obrázek 14. [49]

Ve výzkumu Iacopa a kol. se porovnávaly dva vytištěné kovové (korozivzdorná ocel 17-4 PH) vzorky pomocí technologie BMD. První vzorek byl pouze sintrován, zatímco druhý vzorek byl navíc ještě tepelně zpracován procesem precipitačního vytvrzování. V rámci výzkumu se došlo k tomu, že vzorky, u kterých bylo provedeno tepelné zpracování, vykazovaly o 23 % větší mez kluzu a o 50 % vyšší pevnost v tahu. Modul pružnosti nebyl ovlivněn tepelným zpracováním. Nejvyšší spotřebu energie měla část tisku a sintrování – nad 80 %. U méně namáhaných součástí není potřeba dělat proces precipitačního vytvrzování. U nosných a vysoce namáhaných dílů je vhodné provést tepelné zpracování. [50]

2.5.1 Strategie tisku BMD

V aditivní výrobě hraje strategie tisku významnou roli při dosahování požadovaných mechanických vlastností zhotovené součástky. Různé nastavení parametrů, jako je orientace výplně, hustota, nebo úhel nanášení jednotlivých vrstev materiálu, může ovlivnit nejen pevnost, tuhost a houževnatost výrobku, ale také jeho mikrostrukturu, povrchové vlastnosti a odolnost

vůči vnějším vlivům. Tyto faktory jsou zvláště důležité u kovových materiálů, kde i drobné odchylky ve strategii tisku mohou vést k výrazným rozdílům v mechanických vlastnostech výsledného dílce. Cílem této části kapitoly je zjistit vliv různých tiskových strategií (obr. 12) na fyzikální vlastnosti výrobků a ukázat, jak optimalizace těchto parametrů může vést k lepším mechanickým vlastnostem hotové součásti.

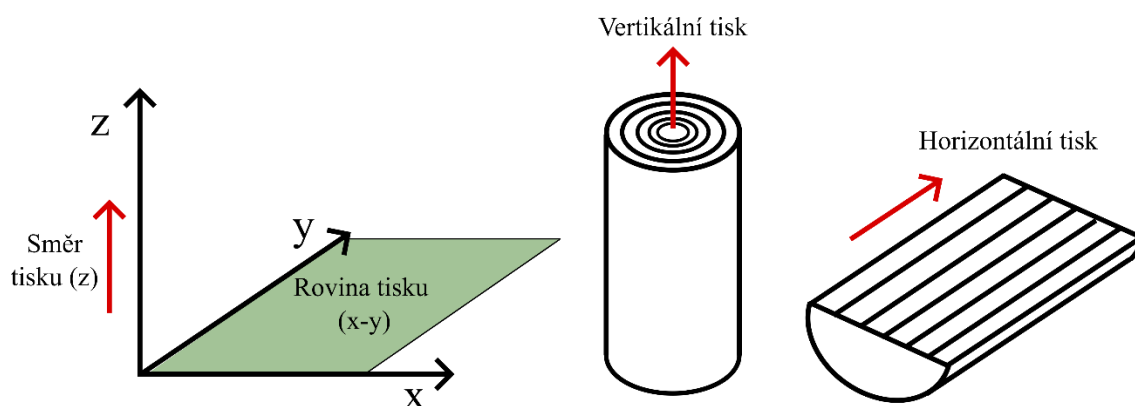


Obr. 12 Tiskové strategie – směr tisku [51].

Tímto jevem se zabýval tým Di Pompea a kol., který konkrétně zkoumal vzorky z korozivzdorné oceli 17-4PH, které byly vytištěny technologií BMD pod úhlem 45° a 90°, viz obrázek 12. Ve svém výzkumu došli k závěru, že strategie nanášení vrstev má přímý vliv na fázové složení a nanotvrdost vyrobených vzorků. Vzorky, které byly vytištěny pod úhlem 45°, vykazovaly snížený obsah δ -feritu a vysokou tvrdost. [52]

Proces vrstvení ovlivňuje i korozní odolnost výsledného dílce. Forcellese a kol. se na tuto vlastnost zaměřili u korozivzdorné oceli 17-4PH, kde zkoumali vzorky s různým úhlem vrstvení – 0°, 45° a 90° (obr. 12), které následně porovnávali s tvářenou formou oceli. Aditivně vyrobené vzorky vytištěné pod úhlem 90° měly největší přítomnost defektů a vad, oproti tomu vzorky vytištěné pod úhly 0° a 45° obsahovaly méně pórů a vad. Vzorky, které byly vytištěny pod úhlem 45°, vykazovaly výrazně lepší odolnost vůči korozi ve srovnání s jinými vzorky vytvořenými aditivní výrobou. [51]

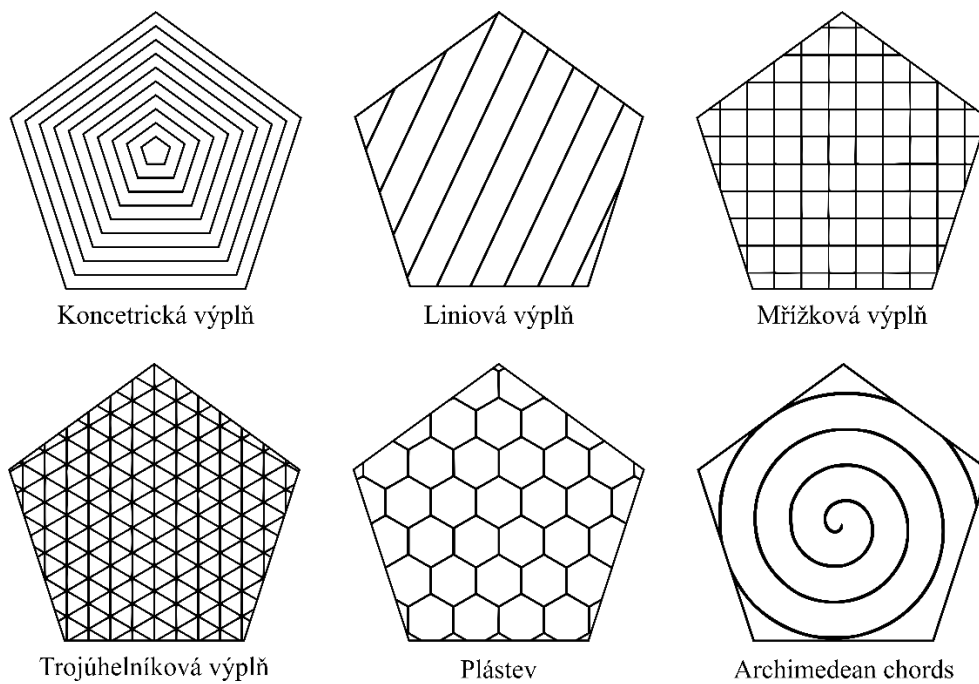
Ve výzkumu od Gabilonda a kol. se zjišťoval vliv strategie tisku na porozitu tištěných komponentů. Konkrétně zkoumali ocel 316L, kde mezi sebou porovnávali vzorky, které byly tištěné horizontálně a vertikálně, viz obrázek 13. [53]



Obr. 13 Horizontální a vertikální vzorek vytvořeno podle [53].

Vlivem pokládání jednotlivých vrstev dochází k vytvoření vzduchových dutin, což způsobilo vznik pórů. Horizontálně tvořené díly s koncentrickou výplní obsahovaly pórovitost okolo 5 až 6 %, což bylo zhruba o procento lepší než u dílů tvořených vertikálně. Díky tomu bylo u horizontálních dílů dosaženo o 160 MPa větší mez pevnosti v tahu. Rovněž vzor výplně měl

vliv na pórovitost dílu. Vzorčky s liniovým vzorem vykazovaly pórovitost nižší jak 5 %, což je méně než u vzorků s koncentrickým vzorem. [53] Vybrané vzory výplně jsou znázorněny na obrázku 14.



Obr. 14 Vybrané vzory výplně v aditivní technologii vytvořeno podle [54].

3 SILOVÁ NÁROČNOST PŘI FRÉZOVÁNÍ

Frézování patří mezi důležité a rozšířené způsoby obrábění materiálů v průmyslové výrobě. Jeho podstatou je rotace řezného nástroje (frézy), který přerušovaně odebírá materiál z obrobku a vznikají třísky proměnlivé tloušťky. U frézování na rozdíl od soustružení koná hlavní řezný pohyb nástroj a vedlejší pohyb nejčastěji obrobek. Řezný pohyb při frézování probíhá po trajektorii připomínající zkrácenou cykloиду. Frézování se využívá pro obrábění různých materiálů, jako jsou kovy, plasty nebo dřevo, a to s vysokou přesností. [55; 56; 57]

Technologie frézování se neustále vyvíjí s nástupem moderních CNC (Computer Numerical Control) strojů, které umožňují automatizaci a přesné ovládání řezných procesů. CNC frézky jsou řízeny počítačovými programy, což zvyšuje efektivitu výroby, snižuje chybovost a umožňuje komplexní a přesné zpracování součástek. [55; 57]

3.1 Vyhodnocování dílčích složek sil při frézování

V moderním průmyslu je znalost složek sil (jejich směru a velikosti) při obrábění zásadní pro správnou optimalizaci a hodnocení řezného procesu. Díky jejich analýze je možné zlepšit kvalitu obrobku, prodloužit životnost nástrojů, zvýšit bezpečnost, snížit výrobní náklady a zvýšit produktivitu. Navíc analýza složek řezných sil umožňuje minimalizovat vznik nežádoucích vibrací, protože složky sil mají vliv na stabilitu systému S-N-O-P (stroj – nástroj – obrobek – přípravek). V neposlední řadě složky řezných sil indikují z energetického hlediska výkon a vzniklé teplo v průběhu obrábění. [58; 59] Tyto složky lze určovat buď výpočtem na základě známých parametrů, nebo přímým měřením. Dále bude popsáno pouze přímé měření, a to z důvodu využití této metody v praktické části.

3.1.1 Přímé měření jednotlivých složek celkové síly

Složky řezných sil se při procesu obrábění zjišťují pomocí **dynamometrů**, které vyhodnocují deformace v soustavě S-N-O-P. Dynamometry se dělí podle tří charakteristik [60; 61]:

- na základě **použité vyhodnocující metody** (podle metody převodu působící síly z deformačního prvku na indikační) – pneumatické, optické, mechanické, elektrické (odporové, piezoelektrické apod.), hydraulické atd.,
- na základě **technologie obrábění** – univerzální, pro frézování, soustružení, vrtání atd.,
- na základě **množství vyhodnocujících složek sil** – jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro hodnocení krouticích momentů.

Aby byly složky řezných sil správně určeny, musí dynamometry splňovat následující podmínky [60; 61]:

- **správného nastavení**, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivňování jednotlivých řezných sil mezi sebou,
- **tuhosti**, která je určena působící silou F , jež vyvolává deformaci,
- **setrvačnosti**, na kterou má přímý vliv hmotnost soustavy. Tento parametr je vhodné co nejvíce eliminovat,
- **neměnnosti hodnot** – hodnoty musí být stále po celou dobu měření,
- **citlivosti** – musí být správně nastavena,
- **opakovatelnosti** – během měření musí být možnost opakovat měření.

Měřicí soustava je obvykle složena z pružného prvku, který přijímá okolní zatížení. Dále se v soustavě vyskytuje snímač, jenž má za úkol transformovat mechanický parametr změny pružného prvku na analogickou veličinu vyhodnocující soustavy. V neposlední řadě je součástí přijímač, který zvyšuje a vyhodnocuje signál snímače a ukládá intenzitu zatížení. [60; 61]

V současnosti se velmi často používají piezoelektrické dynamometry, které pro určení deformace uplatňují piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev pracuje na principu elektrického náboje, který vzniká na vnější straně krystalu. Elektrický náboj vzniká v důsledku mechanického zatížení. Základním zařízením dynamometru je piezoelektrický snímač, což je tvarová destička nejčastěji z křemíku, titaničitanu barnatého nebo Seignettovy soli. V průběhu stlačování destičky je hodnota síly přímo úměrná hodnotě náboje, což znamená, že se s klesajícím zatížením lineárně snižuje náboj. Při nulovém stlačení piezoelektrického snímače je náboj nulový. Příkladem piezoelektrických dynamometrů jsou dynamometry Kistler (obr. 15), které jsou vhodné pro měření silových účinků při obrábění. [60; 61]



Obr. 15 Dynamometr Kistler 9257B pro měření silového zatížení ve třech osách.

3.1.2 Parametry ovlivňující velikost silového zatížení

Pro správné vyhodnocování složek sil při obrábění je nutné určit, které činitele ovlivňují velikost silového zatížení. Vliv jednotlivých parametrů bude rovněž vysvětlen v následujících podkapitolách.

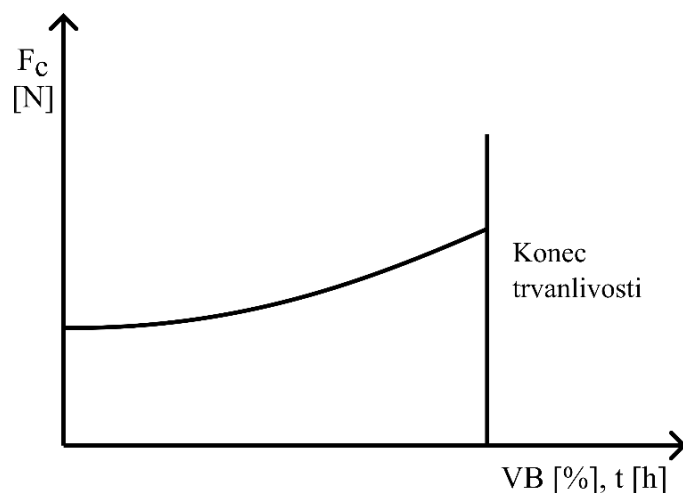
Vliv řezného nástroje

Řezný nástroj ovlivňuje velikost dílčích sil řadou parametrů, jako je materiál či geometrie břitu nástroje – úhel hřbetu, čela, šroubovice, nastavení hlavního ostří nebo poloměr zaoblení špičky. Také opotřebení nástroje má vliv na velikost jednotlivých složek sil. [60; 61; 62]

Čím je menší úhel čela, tím je větší řezná síla a naopak [63]. Ostřejší břit nástroje vede ke snížení jednotlivých složek výsledné síly. Nicméně nejde úhel čela snižovat do nekonečna, protože příliš tenké ostří je křehké a může se lehce zlomit. [59]

Úhel nastavení hlavního ostří ovlivňuje zejména pasivní a posuvovou složku síly [60; 61]. Se snižujícím se úhlem nastavení hlavního ostří dochází k nárůstu posuvové síly, což zvyšuje tendenci k vibračním obrobku. [64] Při snížení úhlu nastavení vedlejšího ostří dojde naopak k poklesu sil při obrábění [64].

V průběhu obrábění dochází k nárůstu opotřebení nástroje, což má často za následek zvýšení řezné síly při obrábění (až o 50 %), viz obrázek 16 [65].



Obr. 16 Dopad opotřebení nástroje na velikost řezné síly [65].

Obecně lze říct, že s rostoucí tvrdostí řezného nástroje klesá jeho opotřebení a zároveň dochází ke snížení velikosti jednotlivých složek výsledné síly. Volba materiálu řezného nástroje závisí na materiálu obráběného polotovaru. [63] V neposlední řadě, čím větší je poloměr zaoblení špičky nástroje, tím se zvyšuje posuvová síla [66].

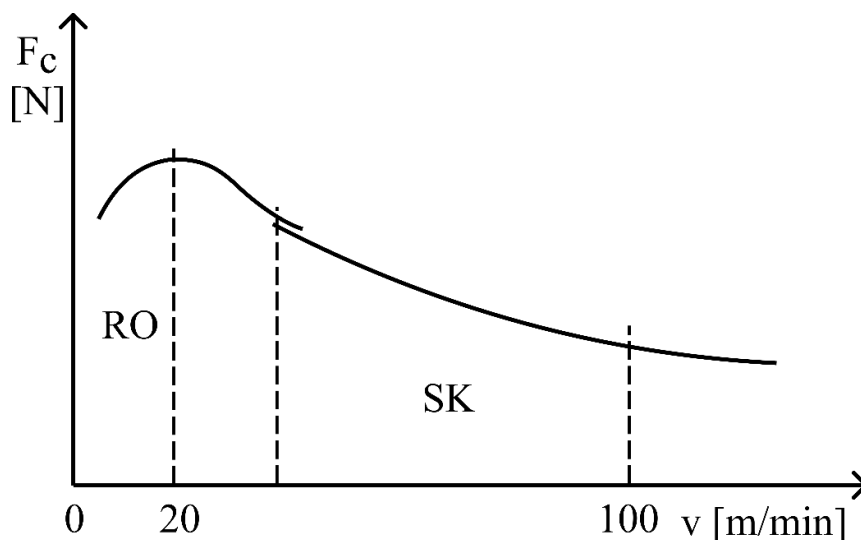
Vliv obrobku

Materiál obrobku má zásadní vliv na velikost jednotlivých složek sil. S rostoucí pevností, tvrdostí a houževnatostí dochází k nárůstu sil při obrábění. [59; 63]

Řezné podmínky

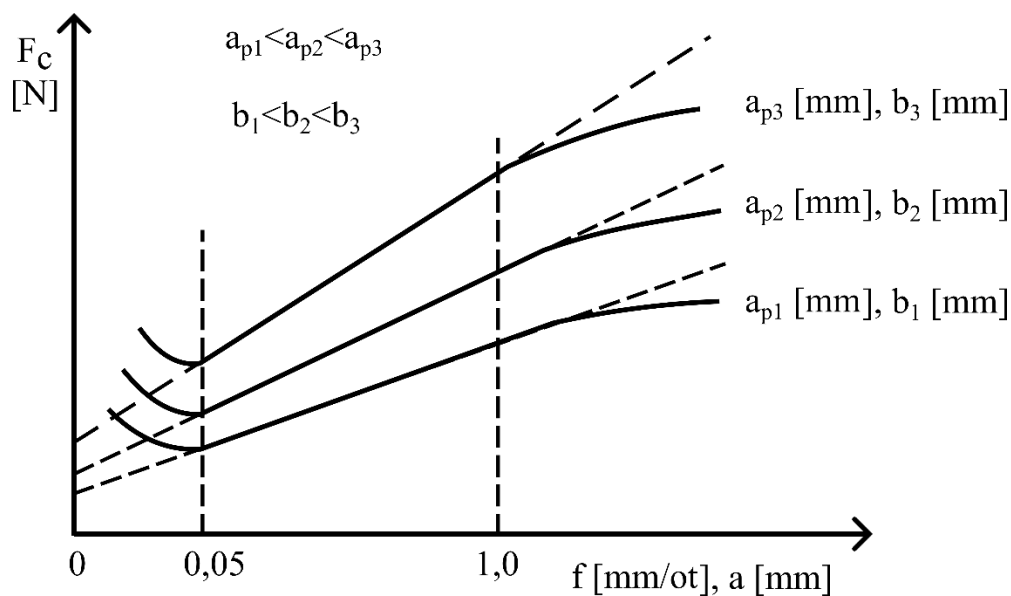
Rovněž nastavení řezných parametrů má vliv na velikost jednotlivých složek sil. Významnou teorií v této oblasti je tzv. Kienzleův princip. [59]

Vliv řezné rychlosti na velikost řezné síly popisuje obrázek 17, na kterém je znázorněn nárůst řezné síly do hodnoty řezné rychlosti $20 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, po níž následuje pozvolný pokles [63]. Při vysokorychlostním obrábění dochází na rozdíl od konvenčního obrábění k tepelně odpevňujícímu jevu obráběného materiálu. Ten způsobuje pokles řezného odporu a řezných sil. Tento efekt nastává zejména u tvárných materiálů, jako jsou například slitiny hliníku. Během vysokorychlostního obrábění nastává lineární navyšování řezné síly se zvyšováním objemu odebíraného materiálu jedním břitem frézy [58].



Obr. 17 Dopad řezné rychlosti na velikost řezné síly [65].

Řezná síla klesá do hodnoty posuvu 0,05 mm (obr. 18). Od této hodnoty dochází s rostoucím posuvem k navyšování řezné síly v průběhu obrábění, viz obrázek 18 [67]. Důležitým parametrem je také řezný poměr, což je poměr mezi šířkou záběru ostří a posuvem na otáčku. Se zmenšující se hodnotou tohoto poměru vzniká v řezném procesu nižší řezná síla [63]. S navyšováním šířky záběru ostří lineárně narůstá řezná síla [63].



Obr. 18 Dopad posuvu na velikost řezné síly [65].

Na hodnotu řezné síly má podobně vliv i řezné prostředí. Pokud se při obrábění nástrojem z rychlořezné oceli použije procesní kapalina, dojde k poklesu řezné síly (okolo 13 %) v porovnání s obráběním bez chladicí emulze. [67]

4 VYHODNOCOVÁNÍ KVALITY POVRCHU

Drsnost povrchu je důležitý parametr, pomocí něhož se vyhodnocuje výsledná kvalita povrchové vrstvy. Výsledná drsnost povrchu po obrábění má dopad na korozní, ořetuvzdorné a únavové vlastnosti materiálu. Díly, které jsou dynamicky zatěžovány, se obvykle nejprve poškodí v povrchové vrstvě, proto je kvalita povrchu důležitým parametrem. Profil povrchu součásti je ovlivněn technologií obrábění. Například plocha, která se podélně soustruží, bude šroubovitá, zatímco při použití čelního soustružení bude vznikat spirálovitý povrch. Hoblovaný povrch bude mít zase žlábkovitou strukturu. [60]

4.1 Parametry drsnosti povrchu

Drsnost povrchu oproti délkovým rozměrům, hmotnosti či jiným veličinám není jasně vymezená. Z toho důvodu je popsána několika parametry, které ji mohou charakterizovat. [68]

Mezi základní parametry drsnosti povrchu, odpovídající normě DIN EN ISO 4287, patří podle [68]:

- **R_a** (aritmetická úchylka profilu), což je aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu [69].
- **R_z** se vypočítá jako aritmetický průměr z absolutní hodnot pěti maximálních a pěti minimálních výsledků od profilu [69].
- **R_y** vyjadřuje hodnotu, která rozděluje skutečný profil na dvě poloviny ploch, které se sobě rovnají [69].
- **R_{max}** představuje rozdíl mezi minimální a maximální drsností profilu – zhruba šestinásobek R_a [69].
- **R_t** (celková výška profilu drsnosti) odpovídá součtu maximální a minimální drsnosti na zkoumané délce profilu [68].

4.2 Faktory ovlivňující kvalitu povrchu

Existuje celá řada faktorů, které mají dopad na výslednou kvalitu povrchu obrobené součásti. Správným nastavením řezných podmínek a výběrem technologie obrábění lze dosáhnout nízké drsnosti povrchu.

Mezi základní parametry ovlivňující kvalitu povrchové vrstvy patří:

- **plastická deformace**, která ovlivňuje kvalitu povrchu prostřednictvím tvorby nárůstku a prostřednictvím adhezních sil mezi řezným nástrojem a obráběným materiálem. V průběhu obrábění odchází vzniklý nárůstek z povrchu nástroje a připevňuje se na výslednou povrchovou vrstvu. Tento proces vytváří nerovnosti ve formě hrbolků, které se během dalšího obrábění oddělují od povrchu, což způsobuje nerovnosti. [60]
- Správná volba **geometrie břitu** – obecně platí, že pro neželezné kovy a měkké materiály je vhodné použít pozitivní geometrii břitu [70]. Existují také speciální hladicí vyměnitelné břitové destičky tzv. Wiper, které umožňují zachovat kvalitu povrchu při zvýšení rychlosti posuvu. [71]
- **Tření** mezi hřbetem nástroje a obráběným materiálem způsobuje vnášení geometrických nerovností na povrch obrobku a opotřebení ostří řezného nástroje [60].
- **Opotřebení nástroje**, které může způsobovat při obrábění vtrhávání částí materiálu z povrchu obrobku [70].

- Správné nastavení **řezných podmínek**, kde například s rostoucím zaoblením poloměru špičky nástroje se snižuje drsnost obrobené plochy [66]. Dále zmenšující se úhel nastavení vedlejšího ostří způsobuje zlepšení jakosti povrchu, avšak na druhou stranu dochází ke zvýšení tření mezi hřbetem nástroje a materiálem obrobku [64]. Významným parametrem, který ovlivňuje drsnost povrchu jsou také posuv nástroje na otáčku a řezná rychlost [72]. V případě menších hodnot posuvové rychlosti se dosahuje nižších drsností povrchu [73]. Nastavením vyšší řezné rychlosti se zpravidla dosahuje nižších drsností povrchu [71]. Volba sousledného frézování poskytuje lepší jakost povrchu než nesousledné frézování [56; 74]. V neposlední řadě se použitím chladicí kapaliny může zlepšit kvalita povrchu – lepší odvod třísek [71; 68]. Dále utvařecí třísky napomáhá ke správnému odvedení třísky z místa řezu, což se rovněž může projevit navýšením kvality povrchu [75].
- **Tuhost a stabilita stroje** má zásadní vliv při tlumení vibrací, což ovlivňuje výslednou kvalitu obrobeného povrchu. Rovněž pevné upnutí polotovaru má vliv na celkovou drsnost povrchu. [70]

4.3 Měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu se dá zjišťovat pomocí různých metod měření. Metody se buď dělí na metody subjektivní – posuzování na základě zraku a hmatu nebo na metody objektivní, kam patří metody dotykové nebo bezdotykové. Vybrané metody měření drsnosti povrchu jsou detailněji popsány v následujících podkapitolách. [68]

4.3.1 Dotykové metody měření

Mezi základní dotykové metody měření patří:

- **Dotykové profilometry**, pomocí nichž se rovnou zjišťují dílčí parametry drsnosti povrchu [61].
- **Laboratorní drsnoměry**, které jsou vhodné pro měření drsnosti u hůře dostupných ploch, protože součástí zařízení je sada vyměnitelných dotykových hrotů různých velikostí [76].

4.3.2 Bezdotykové metody měření

Mezi základní bezdotykové metody měření patří:

- **laserové konfokální mikroskopy**, které poskytují velmi přesné třírozměrné měření. [76].
- **Optické mikroskopy** - Alicona, díky nimž je možné zjistit topografii povrchové vrstvy s barevností. Výhodou tohoto zařízení je možnost měření 2D či 3D geometrie a drsnosti [77]. Přístroj umožňuje až tisícinásobné zvětšení. Přístroj je schopný vyhodnocovat drsnost i na závitech, rádiusech nebo zkoseních [78].
- **Metoda světelného řezu**, při níž se pomocí odrazu paprsku od zkoumaného povrchu se vyhodnocuje drsnost povrchu [61].
- Zařízení využívající **interferenci světla**. Tato technologie využívá přechodu paprsku přes polopropustné zrcadlo, kde část tohoto paprsku dopadá na měřený povrch, odkud se tato část paprsku odráží do okuláru. Zbytek původního paprsku se odráží od zrcadla rovnou do objektivu, kde paprsky interferují [61].

- **Elektronové mikroskopy**, které využívají ke zkoumání povrchu svazek elektronů. Dělí se na autoemisní a termoemisní typy [79].

4.3.3 Činitelé mající vliv na výsledky měření drsnosti povrchu

Na výsledky měření drsnosti povrchu dle [68] může mít vliv řada okolností, jako například:

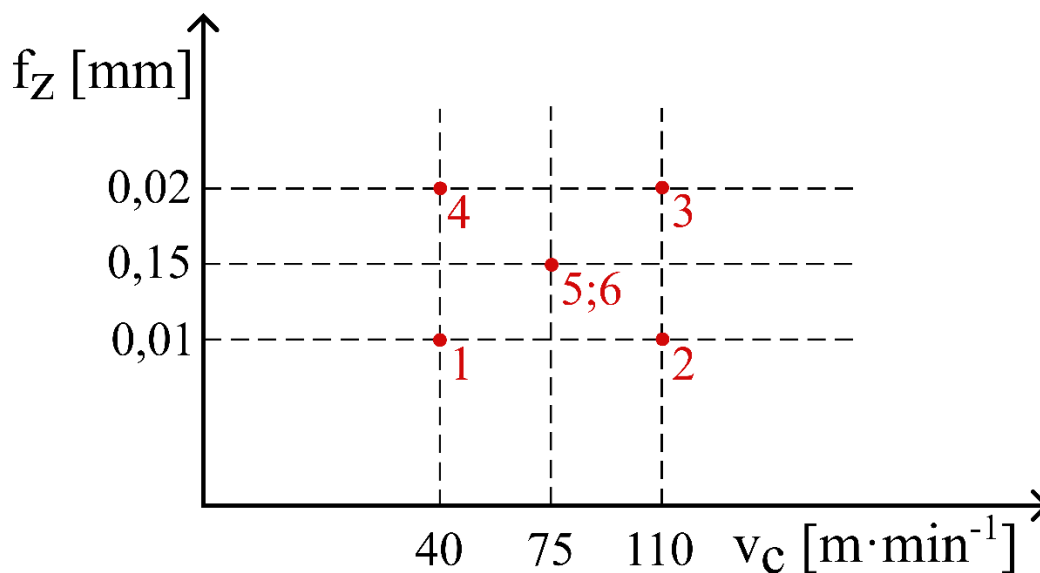
- správný výběr technologie měření a měřicího zařízení,
- okolní prostředí – je důležité během měření zaručit stálost okolního prostředí (teploty, vlhkosti apod.),
- lidský faktor,
- příprava měřeného kusu – očištění apod.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část diplomové práce se zaměřila na hodnocení obrobitelnosti aditivně vyrobeného materiálu. Vzhledem k tomu, že metoda tisku BMD tvoří materiál vrstvu po vrstvě, nemusí být dosaženo homogenních vlastností materiálu v jednotlivých směrech. Proto bylo hlavním cílem této praktické části pozorovat vliv směru obrábění (kolmého, podélného nebo vertikálního) na výsledné silové zatížení, drsnost povrchu a opotřebení nástroje. Hodnocení spočívalo v porovnání obrobitelnosti tří různých variant nástrojové oceli H13 – 3D tištěného materiálu, 3D tištěného materiálu s tepelným zpracováním a konvenčně vyrobeného materiálu rovněž s tepelným zpracováním.

5.1 Popis experimentu

Experiment byl navržen tak, aby bylo možné pozorovat vliv směru obrábění na výsledné složky celkové síly, drsnosti povrchu a opotřebení nástroje. Tyto jevy se lišily v závislosti na obráběném materiálu a směru obrábění (tab. 1), ale také na řezných podmínkách. V rámci testování byly použity řezné podmínky podle plánovaného experimentu (DoE). Pomocí plánovaného experimentu bylo navrženo celkem šest měření pro každý vzorek podle schématu zobrazeného na obrázku 19. Mezi proměnné parametry patřily řezná rychlost a posuv na zub. Pro ověření vlivu těchto podmínek byly provedeny obráběcí testy, které byly realizovány jak pro maximální, tak pro minimální řezné podmínky. Kromě toho byly testy provedeny i pro střední hodnoty řezných podmínek (popsány jako body 5 a 6 na obr. 19). Každý z provedených testů tj. 1–6 byl třikrát zopakován pro získání více dat, a aby bylo dosaženo přesnějšího vyhodnocení výsledků.



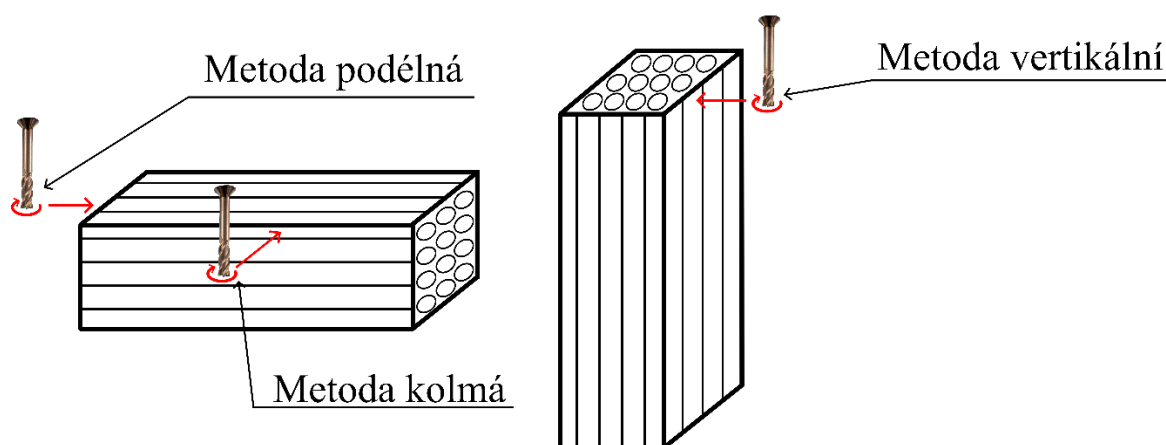
Obr. 19 Ilustrativní schéma plánovaného experimentu.

Obrobitelnost se vyhodnocovala pomocí devíti vzorků, které se obráběly za použití různých řezných podmínek a metod (směrů) obrábění. Konkrétně byly použity tři vzorky, které byly aditivně vyrobené (3D vzorky), tři vzorky, které byly rovněž aditivně vyrobené tentokrát však s tepelným zpracováním (3D+TZ vzorky), a tři vzorky konvenčně vyrobené s tepelným zpracováním (KON+TZ vzorky). Tabulka 1 shrnuje jednotlivé použité vzorky a metody obrábění.

Tab. 1 Použité vzorky a metody obrábění.

Metoda	3D vzorek	3D+TZ vzorek	KON+TZ vzorek
Kolmá	1. vzorek	2. vzorek	3. vzorek
Podélná	1.1 vzorek	2.1 vzorek	3.1 vzorek
Vertikální	1.2 vzorek	2.2 vzorek	3.2 vzorek

Kvůli tomu, že vzorky vykazují odlišné mechanické vlastnosti v různých směrech, byly při testování zvoleny různé metody obrábění. **Kolmá metoda** se vyznačuje tím, že směr obrábění je kolmý ke směru pokládání materiálu u aditivně vyrobených vzorků, zatímco u konvenčně vyrobených vzorků je kolmý ke směru válcování. **Podélná metoda** probíhá ve směru pokládání materiálu nebo ve směru válcování. **Metoda vertikální** se opět provádí kolmo na směr pokládání materiálu nebo na směr válcování, avšak v tomto případě je vzorek umístěn ve svislé poloze. Jednotlivé metody jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku 20.



Obr. 20 Jednotlivé metody (směry) obrábění.

Před začátkem obrábění byly všechny vzorky zkráceny, aby vlákna materiálu u vyrobených vzorků směřovala pouze jedním směrem, což umožnilo lepší vyhodnocení vlivu směru obrábění. Po celou dobu obrábění byla zachována konstantní šířka záběru ostří – $a_p = 0,2 \text{ mm}$ a konstantní šířka radiálního záběru ostří – $a_e = 2,4 \text{ mm}$, což činilo 80 % průměru frézy. Délka dráhy frézy při obrábění činila 7 mm, viz obrázek 21.



Obr. 21 Ukázka obrobených drážek ve vzorku.

Při obrábění dílčích drah bylo měřeno silové zatížení v osách x, y a z pomocí dynamometru Kistler využívajícího piezoelektrický jev. Následně byla analyzována drsnost jednotlivých obrobených ploch. Poté bylo vyhodnoceno opotřebení použitých rezných nástrojů za pomoci optického mikroskopu. Na závěr se vyhodnotila struktura třísky a samotných vzorků. Následovalo vyhodnocení nanotvrdosti pro analýzu povrchového zpevnění materiálu.

5.2 Příprava vzorků

V následujících podkapitolách jsou popsány postupy výroby jednotlivých vzorků, přičemž všechny vzorky jsou vyrobeny ze stejné nástrojové oceli H13, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce 2.

Tab. 2 Chemické složení nástrojové oceli H13 uvedené v hmotnostních procentech [hm. %].

Cr	Mo	Si	V	C	Mn	P	S	Fe
4,80-5,50	1,10-1,70	0,80-1,20	0,80-1,20	0,30-0,45	0,20-0,60	Max 0,03	Max 0,03	Zbytek

5.2.1 Aditivně vyrobené vzorky

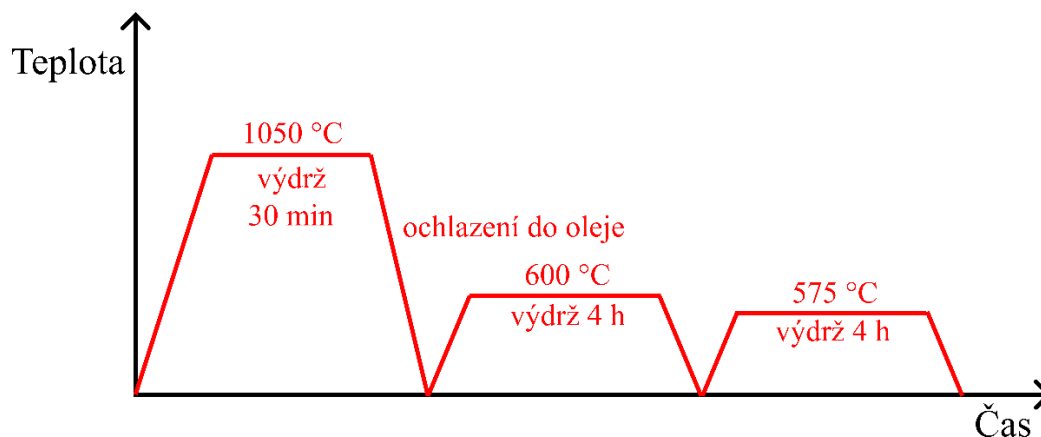
První skupina testovaných vzorků byla zhotovena pomocí aditivní technologie, a to konkrétně pomocí metody BMD. Vzorky byly vyrobeny pomocí zařízení Studio System od společnosti Desktop Metal, které zahrnuje 3D tiskárnu, zařízení pro odstranění pojiva a slinovací pec. Pro tisk kovových vzorků z materiálu H13 byla použita extruzní tryska o průměru 400 μm při teplotě 175 $^{\circ}\text{C}$, zatímco tisková platforma byla přehřívána na 65 $^{\circ}\text{C}$. Stavební komora byla uzavřena a vyhřívána na 50 $^{\circ}\text{C}$.

Proces vymílání pojiva trval 252 hodin a probíhal ve dvou fázích. Nejprve byly vzorky ponořeny do rozpouštědla, kde teplota tekutiny dosahovala 44 $^{\circ}\text{C}$. Poté následoval sušicí krok, při kterém se teplota v nádržích zvýšila na 70 $^{\circ}\text{C}$. Nakonec proběhlo slinování v atmosféře čistého argonu podle podmínek stanovených společností Desktop Metal, s doporučenou dobou 41 hodin.

5.2.2 Aditivně vyrobené vzorky s tepelným zpracováním

Druhá skupina testovaných vzorků byla taktéž vyrobena stejnou aditivní technologií, kde navíc bylo použito tepelné zpracování. Tepelné zpracování (TZ) vzorku probíhalo v několika fázích. Nejprve bylo provedeno přehřívání vzorku s maximální rychlostí ohřevu 222 $^{\circ}\text{C}$ za hodinu, kdy výsledná teplota dosáhla 820 $^{\circ}\text{C}$. Následovalo zvýšení teploty na 1050 $^{\circ}\text{C}$, při které byl vzorek udržován po dobu 30 minut. Následovalo kalení do oleje až do dosažení pokojové teploty.

Další fází bylo dvoustupňové popouštění. Nejprve byl vzorek zahřát na 600 $^{\circ}\text{C}$, kde setrval po dobu čtyř hodin, a poté byl chlazen na vzduchu do pokojové teploty. Druhé popouštění probíhalo při 575 $^{\circ}\text{C}$ s udržením na této teplotě po dobu 4 hodin, opět s chlazením na vzduchu. Schematicky je celý průběh tepelného zpracování zobrazen na obrázku 22.



Obr. 22 Schéma tepelného zpracování.

5.2.3 Konvenčně vyrobené vzorky s tepelným zpracováním

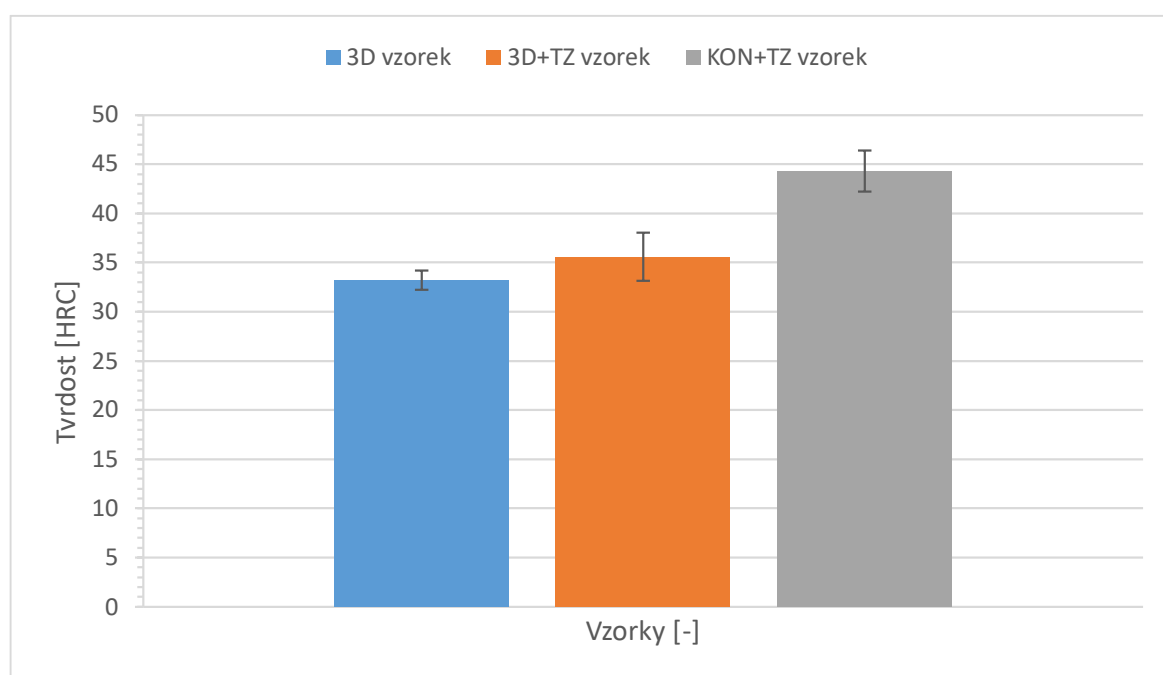
Poslední skupinu testovacích vzorků tvořily vzorky konvenčně vyrobené metodou válcování. Tepelné zpracování probíhalo stejnou formou jako u aditivně vyrobených vzorků s tepelným zpracováním. Vzorky byly dodány ve formě ploché tyče, která byla nařezána a přichystána do požadovaných tvarů určených pro testování.

5.2.4 Tvrdost vzorků

Pomocí tvrdoměru Zwick Roell ZHR bylo u každého vzorku provedeno sedm měření tvrdosti podle Rockwella. Z naměřených hodnot byla následně vypočítána průměrná hodnota. Konkrétní velikosti průměrných hodnot jsou uvedeny v tabulce 3 a znázorněny v grafu na obrázku 23. Největší tvrdost byla naměřena u vzorku KON+TZ, zatímco nejmenší tvrdost byla zjištěna u vzorku 3D.

Tab. 3 Tvrdost jednotlivých vzorků v HRC.

3D vzorek	3D+TZ vzorek	KON+TZ vzorek
$33,21 \pm 0,98$	$35,59 \pm 2,42$	$44,31 \pm 2,11$



Obr. 23 Graf tvrdosti jednotlivých vzorků.

5.3 Použité zařízení během testování

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé zařízení, která byla použita při realizaci experimentu a pro zajištění vyhodnocení patřičných veličin.

5.3.1 Obráběcí stroj

Experiment byl prováděn na tříosé frézce VF-2SSYT od firmy Haas, která je zobrazena na obrázku 24. Stroj je schopen dosáhnout maximální rychlosti otáček elektrovřetena $12\,000\text{ min}^{-1}$ a jeho maximální výkon činí $22,4\text{ kW}$. Maximální dráhy pojezdu jsou 762 mm v ose x, 508 mm v ose y a 508 mm v ose z. Upínání je pomocí ISO kuželu CT 40. Více technických specifikací stroje lze nalézt v příloze 1. [80]



Obr. 24 Třiosá frézka Haas 2SSYT.

5.3.2 Řezný nástroj

Pro obrábění vzorků byla použita čtyřbřitá čelní válcová stopková fréza ze slinutého karbidu o vnějším průměru 3 mm, viz obrázky 25 a 26. Fréza je schopna obrábět materiál o tvrdosti 60 HRC. Každý vzorek byl obráběn vždy novou frézou, aby byly zajištěny stejné vstupní podmínky pro všechny testy. Tudiž bylo celkem použito devět řezných nástrojů, na nichž se poté optickým mikroskopem vyhodnocovalo opotřebení.



Obr. 25 Použitá čtyřbřitá čelní válcová stopková fréza.



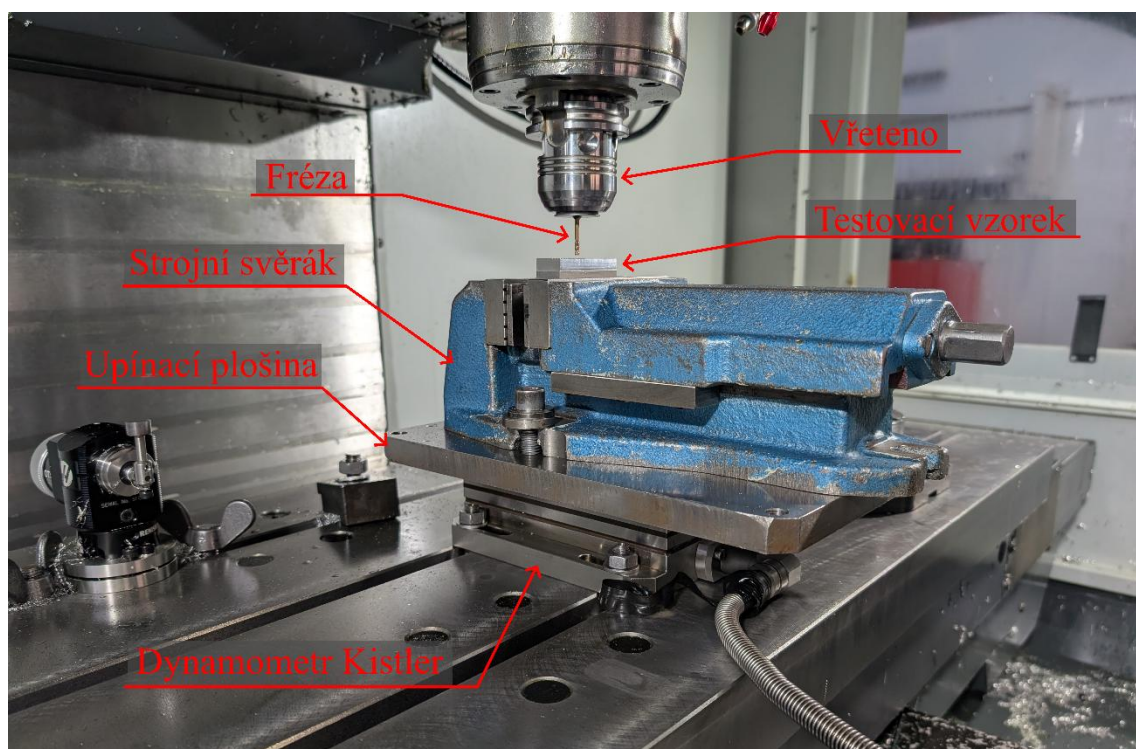
Obr. 26 Upnutá čtyřbřitá čelní válcová stopková fréza.

5.3.3 Měřicí přístroje

Pro zajištění potřebných dat k následnému vyhodnocení obrobitelnosti byly při testování použity různé měřicí přístroje. Veškerá měřicí aparatura byla k dispozici v univerzitních dílnách Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. V rámci experimentu byla použita tato měřicí zařízení:

Piezelektrický dynamometr Kistler

Jedná se o zařízení schopné měřit silový účinek během procesu obrábění ve třech na sebe kolmých osách. Během obrábění byl dynamometr použit se vzorkovací frekvencí 6000 Hz (za jednu sekundu zaznamená 6000 hodnot), což umožnilo efektivní měření průběhu silového zatížení. Na obrázku 27 je zachycen dynamometr v průběhu testování.



Obr. 27 Ukázka použití dynamometru Kistler v průběhu obrábění.

Drsnoměr Taylor Hobson

Pro měření drsnosti byl použit drsnoměr Taylor Hobson (obr. 28), který byl propojen s počítačem, na němž byl instalován program Ultra Version, umožňující zpracování naměřených výsledků. Drsnoměr měří v horizontálním směru, přičemž snímací hrot umožňuje posun až do délky 50 mm.



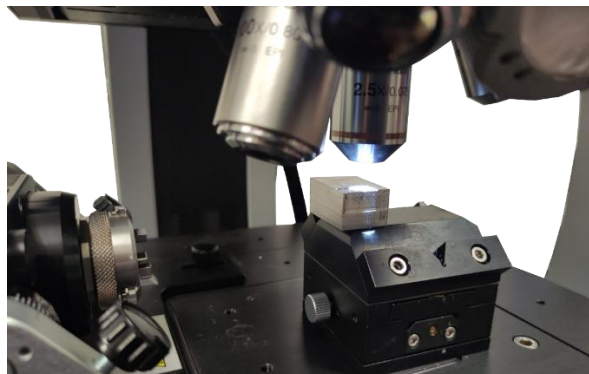
Obr. 28 Proces měření tvrdosti pomocí drsnoměru Taylor Hobson.

Optický mikroskop Alicona Infinite Focus G5

Jedná se o velmi přesné trojrozměrné měřicí zařízení, viz obrázek 29. V průběhu měření testovaných vzorků byl uplatněn objektiv s numerickou aperturou 0,075 a s 2,5násobným zvětšením. Proces měření povrchu vzorků je znázorněn na obrázcích 29 a 30.



Obr. 29 Optického mikroskopu Alicona InfiniteFocus.



Obr. 30 Proces měření povrchu vzorků pomocí optického mikroskopu Alicona.

Tvrdoměr Zwick Roell ZHR

Tvrdost povrchu obrobených drah byla měřena pomocí tvrdoměru Zwick Roell ZHR (obr. 31 a 32). Tvrdoměr využívá stupnici tvrdosti v jednotkách HRC (Rockwell). Pro měření se použil diamantový hrot. Výhodou tohoto zařízení je jednoduchost, rychlost a relativní přesnost.



Obr. 31 Proces měření tvrdosti pomocí tvrdoměru ZwickRoell.



Obr. 32 Tvrdoměr Zwick Roell ZHR.

Mikroskop Olympus SZX10

Tento optický stereomikroskop byl uplatněn pro vyhodnocení opotřebení řezných nástrojů, které byly použity při experimentu. Frézy byly během vyhodnocování uloženy do speciálního přípravku pro snadnější měření. Pro zjištění konkrétní velikosti opotřebení byl s mikroskopem spárován program PRECiV Capture. Proces měření je znázorněn na obrázku 33.



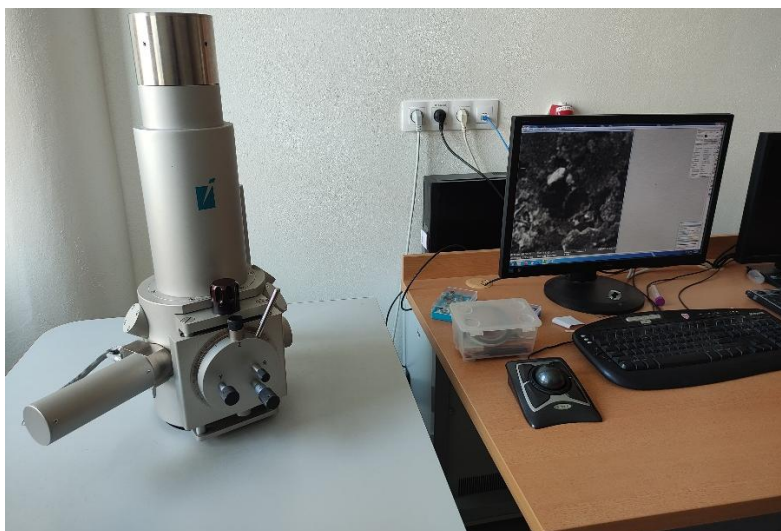
Obr. 33 Proces měření opotřebení nástrojů pomocí mikroskopu Olympus SZX10.

Skenovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA

Pomocí skenovacího elektronového mikroskopu TESCAN VEGA (obr. 34 a 35) byly vyhodnoceny třísky. Jedná se o zařízení, které je schopné dosáhnout vysokého zvětšení, neboť využívá svazek elektronů. Pro správné zobrazení se nastavilo urychlující napětí 30 kV, pracovní vzdálenost 10,44 mm, zorné pole 500 μm a detektor SE (Secondary Electrons). Během vyhodnocení byl mikroskop propojen s počítačem pomocí softwaru VegaTC.



Obr. 34 Skenovací elektronový mikroskop TESCAN VEGA.



Obr. 35 Proces měření ve skenovacím elektronovém mikroskopu TESCAN VEGA.

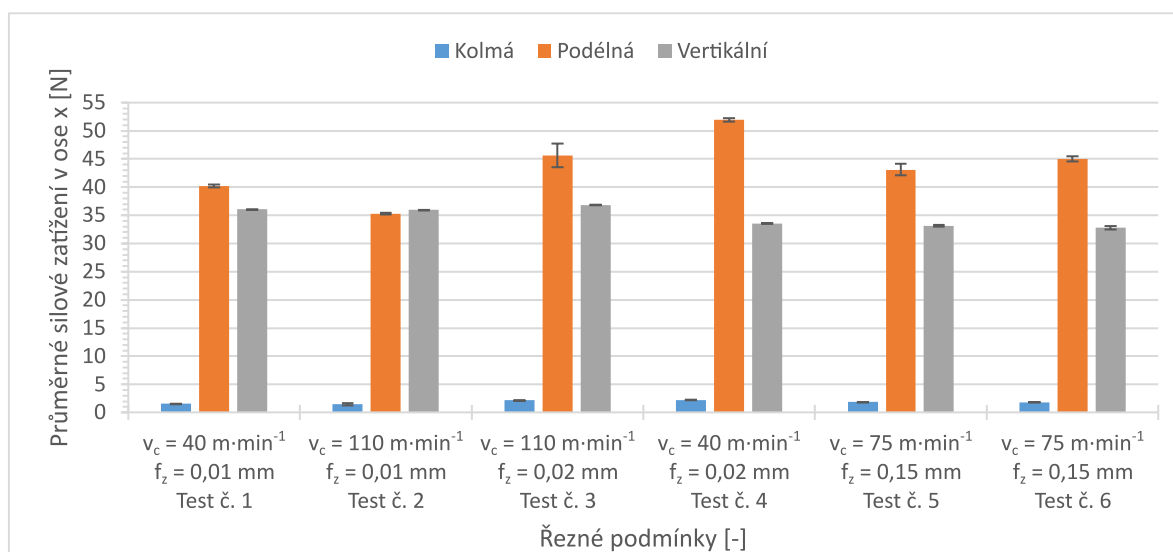
5.4 Vyhodnocení aditivně vyrobeného materiálu

V této kapitole jsou popsány jednotlivé výsledky, které byly získány po obrobení aditivně vyrobených vzorků dílčími metodami. Obrábění jednotlivých drážek probíhalo za řezných podmínek podle pořadí plánovaného experimentu DoE, viz obrázek 19. Mezi zkoumané oblasti patří silové zatížení, topografie povrchu, opotřebení nástroje, třísky a nanotvrdost. Následující podkapitoly tyto oblasti vyhodnocují.

5.4.1 Vyhodnocení silového zatížení

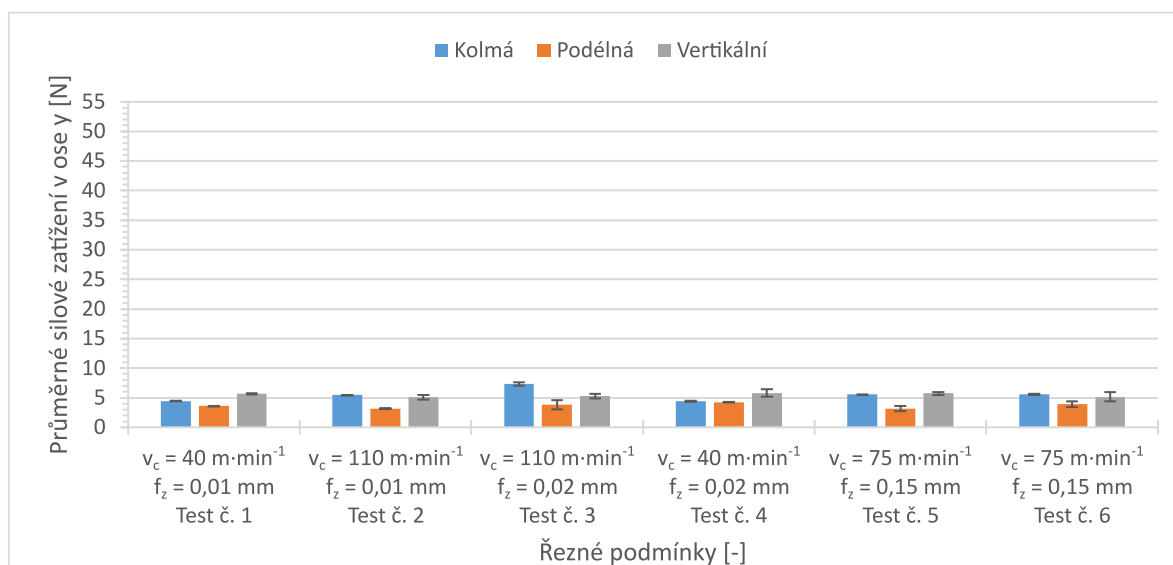
Pro záznam hodnot silového zatížení během obrábění byl použit dynamometr Kistler, který je schopný zaznamenávat silové zatížení ve třech na sebe kolmých osách, tj. x, y a z. Pro porovnání jednotlivých složek celkové síly byly použity záznamy provedené v softwaru Dynoware a následně byly vyexportovány do textových souborů. Tyto textové soubory byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel. Grafy jednotlivých sil v příslušných osách jsou zobrazeny na obr. 36, 37 a 38. Grafy zobrazují porovnání silového zatížení v dílčích osách pro jednotlivé směry obrábění (kolmo, podél a vertikálně k dráhám tisku) aditivně vyrobeného vzorku bez tepelného zpracování.

Při pohledu na silové zatížení v ose x (obr. 36) je možné vidět, že v případě obrábění podél tisknutých drah bylo dosaženo nejvyšších hodnot, a to pro všechny řezné podmínky. Tento fakt může být způsobený tím, že během obrábění podél musí nástroj obrábět materiál nástrojové oceli, zatímco při obrábění kolmo a vertikálně je materiál nástrojové oceli oddělen mezerami (póry), které nebyly dostatečně zaceleny během sintrování (spékání vzorku během výroby). Tyto mezery jsou dobře patrné na obrázku vyhodnocující strukturu materiálu, viz kapitola 5.4.5. Kvůli necelistvému materiálu (materiál vykazuje vysokou porozitu) dochází ke snížení silového zatížení na nástroj.



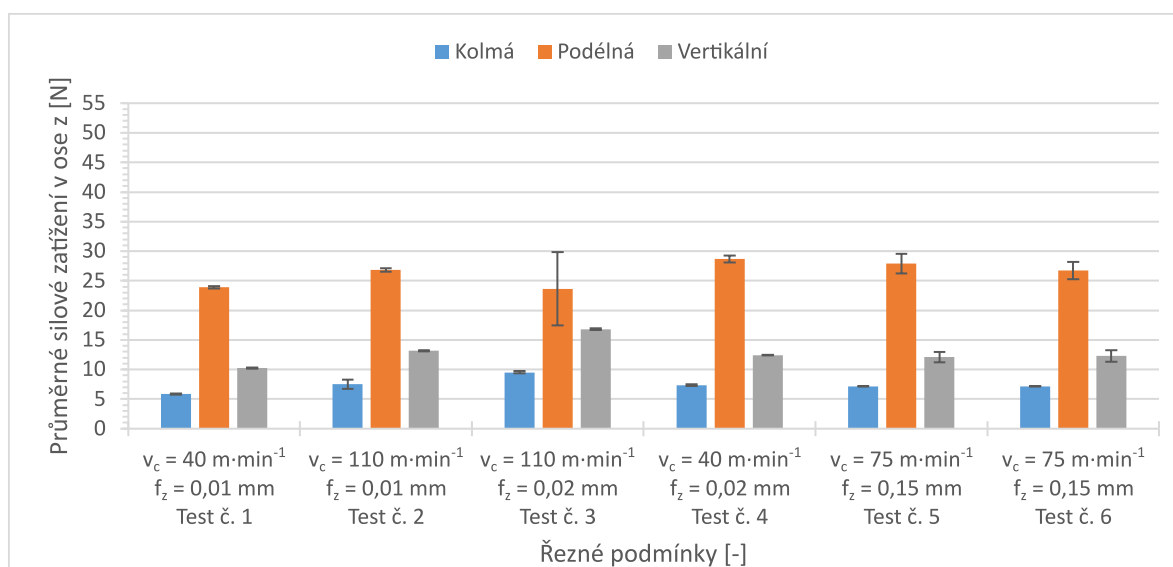
Obr. 36 Diagram silového zatížení v ose x při obrábění 3D vzorku.

Při pohledu na silové zatížení v ose y (obr. 37) je možné vidět, že tato síla dosahuje celkově nižších hodnot ve srovnání se silovým zatížením v ose x (obr. 36).



Obr. 37 Diagram silového zatížení v ose y při obrábění 3D vzorku.

Co se týče silového zatížení v ose z, viz obrázek 38, tak je možné pozorovat obdobný trend jako v případě silového zatížení v ose x (obr. 36), tzn. že při obrábění podél dosahovalo silové zatížení v ose z nejvyšších hodnot. Co se týče vlivu řezných podmínek, tak je patrné že největšího silového zatížení v ose x bylo dosaženo při maximálním posuvu na zub ($f_z = 0,02$ mm) minimální řezné rychlosti. Vyšší posuv na zub zvětšuje průřez třísky, což odpovídá nárůstu silového zatížení. Jak je možné dále vyvodit, tak při posuvu na zub 0,02 mm a řezné rychlosti $v_c = 110$ m·min⁻¹ je silové zatížení nižší než v případě testu provedeném za posuvu na zub 0,02 mm a řezné rychlosti $v_c = 40$ m·min⁻¹. Tento jev může být způsobený teplotním odpevněním obráběného materiálu. Při vyšší řezné rychlosti dochází k vyššímu vývinu tepla, což má za následek odpevnění materiálu a snížení silového zatížení. Při použití stejných řezných podmínek jako v případě testu č. 5 a 6 došlo v obou případech k dosažení stejného silového zatížení. Díky tomu, lze říct, že obrábění nebylo ovlivněno dalšími jevy jako je například tuhost upnutí nástroje a obrobku.

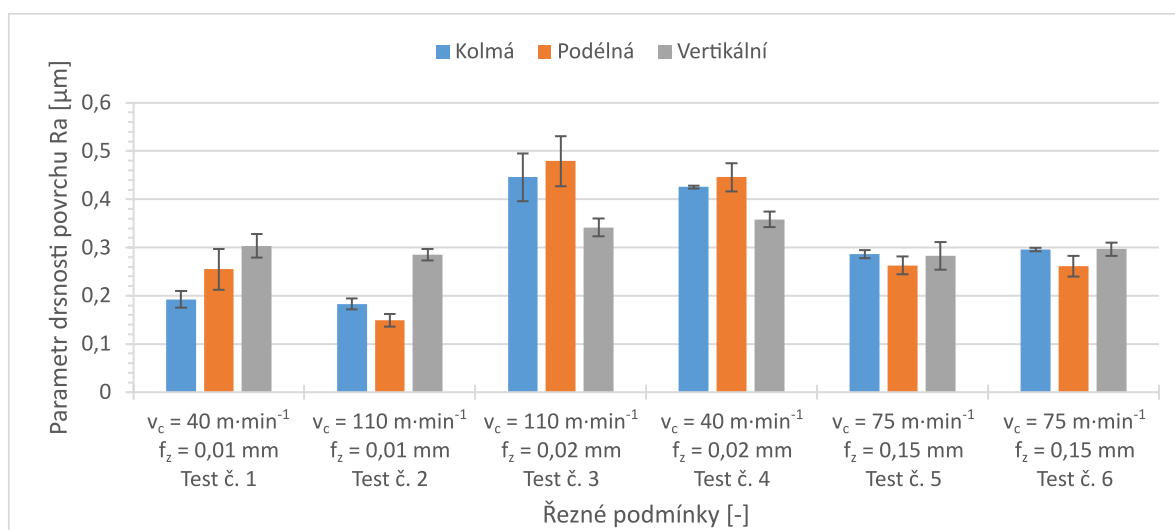


Obr. 38 Diagram silového zatížení v ose z při obrábění 3D vzorku.

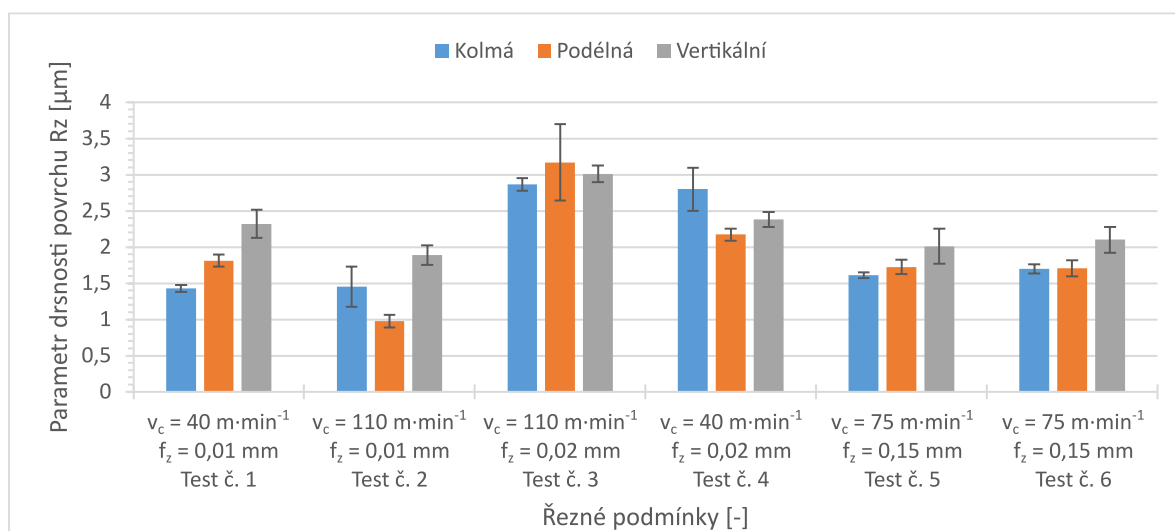
5.4.2 Vyhodnocení topografie povrchu

Drsnost povrchu byla hodnocena pomocí průměrné aritmetické odchylky R_a a maximální výšky profilu R_z . Obrázek 39 zobrazuje získané výsledky parametru drsnosti R_a při obrábění

3D vzorku pro jednotlivé směry obrábění. Na základě získaných dat je možné říct, že v případě testů č. 1 a 4, kdy došlo ke zvýšení posuvu na zub, došlo také ke zvýšení drsnosti povrchu pro všechny směry obrábění. Podobného trendu bylo dosaženo i v případě testů č. 2 a 3. Z těchto výsledků je možné vyvodit, že se zvyšujícím se posuvem na zub roste drsnost povrchu. Co se týče vlivu řezné rychlosti tak je možné pozorovat, že u testu č. 1 a 2 došlo při zvýšení řezné rychlosti ke snížení drsnosti povrchu. Pokud byly testy provedeny za stejných řezných podmínek, jako v případě testů č. 5 a 6, tak bylo dosaženo podobných výsledků pro všechny směry obrábění. Při porovnání testů za nejnižších (test č. 1) a nejvyšších řezných podmínek (test č. 3) je možné vydedukovat, že došlo ke zvýšení drsnosti povrchu. Tento fakt je způsoben navýšením posuvu na zub a také tím, že za vyšších řezných podmínek docházelo k tvorbě nežádoucích vibrací na obrobeném povrchu vzorku, viz vyhodnocení povrchu pomocí Alicony. Jak je možné pozorovat, tak směr obrábění nemá na kvalitu povrchu zásadní vliv. Při pohledu na obrázek 40, který zobrazuje maximální výšku profilu Rz, je možné říct, že drsnost Rz koresponduje s předchozími tvrzeními.



Obr. 39 Diagram drsnosti Ra při obrábění 3D vzorku.



Obr. 40 Diagram drsnosti Rz při obrábění 3D vzorku.

Při pohledu na detailní texturu povrchu po frézování (obrázky v tabulce 4) jsou patrné jednotlivé stopy po nástroji, které odpovídají posuvu na zub. Pokud byl posuv na zub nastaven na nižší hodnotu (0,01 mm), jsou stopy blíže u sebe, zatímco při posuvu 0,02 mm jsou stopy

dále od sebe. Na povrchu jsou viditelné jednotlivé aditivně tištěné dráhy a případně nedostatečně sintrovaný materiál, který se projevuje póry tvořícími linie. Tyto linie se objevují ve směru kolmém i podélném na směr obrábění, zatímco při vertikálním obrábění se pórovité linie jeví jako kruhové tečky.

Při obrábění podél 3D tištěných drah docházelo při nižších řezných rychlostech k tvorbě nežádoucích vibrací, avšak ve srovnání s obráběním kolmým na směr drah byly vibrace méně znatelné. Lze tedy dojít k závěru, že vizuálně nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo při obrábění 3D tištěného materiálu za maximálních řezných podmínek.

Tab. 4 Ukázky obrobených drah po jednotlivých metodách obrábění u vzorku 3D.

Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

5.4.3 Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje

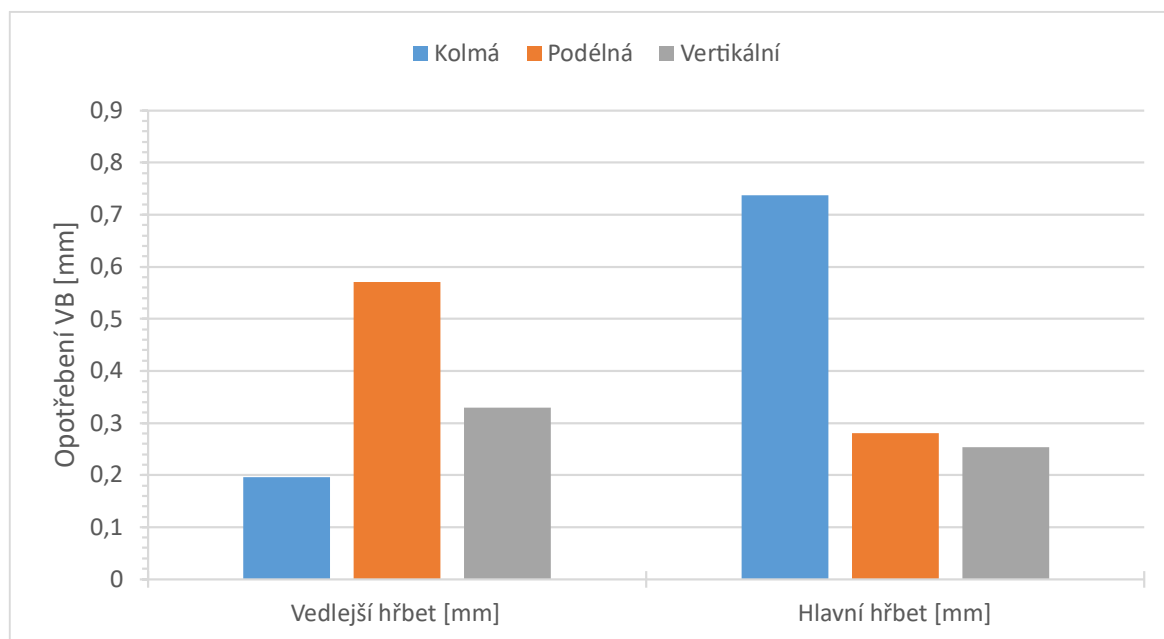
Na základě naměřených hodnot opotřebení VB (tabulka 5 a obr. 41) lze konstatovat, že nejnižší opotřebení bylo zaznamenáno při použití vertikální metody. U této metody dosahovalo opotřebení na vedlejší hřbetě hodnoty 0,329 mm a na hlavním hřbetě 0,253 mm, což jsou nejnižší hodnoty ze všech tří zkoumaných metod. Oproti tomu největší opotřebení na hlavním hřbetě bylo naměřeno u kolmé metody, kde dosahovalo 0,738 mm. Tento výsledek ukazuje, že tato metoda způsobuje výrazné zatížení hlavního hřbetu, což může vést k rychlejšímu opotřebení nástroje, viz obrázky v tabulce 6.

Tab. 5 Hodnoty opotřebení VB v mm po jednotlivých metodách obrábění u 3D vzorku.

Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Vedlejší hřbet [mm]	0,196	0,571	0,329
Hlavní hřbet [mm]	0,738	0,281	0,253

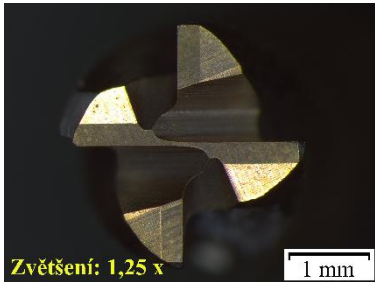
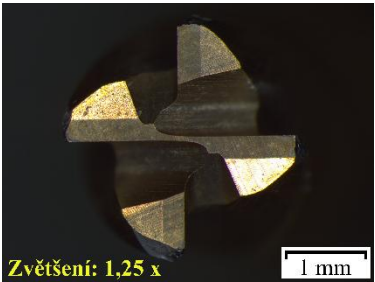
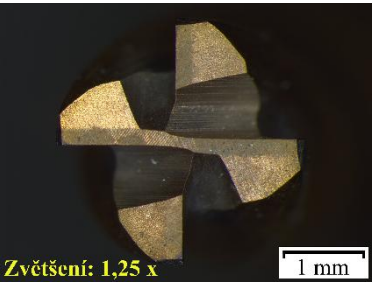
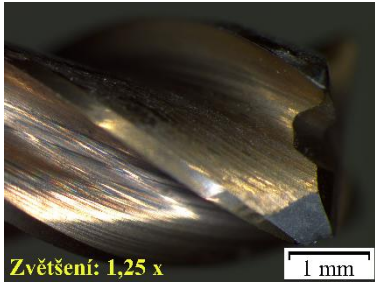
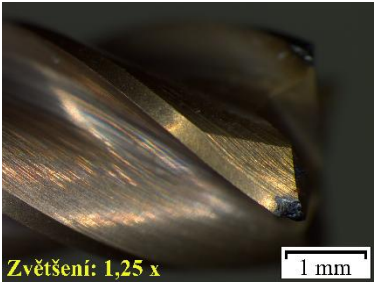
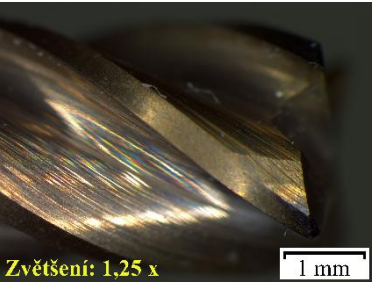
Podélná metoda vykazovala nejvyšší opotřebení na vedlejší hřbetě, konkrétně 0,571 mm, což naznačuje, že při tomto způsobu obrábění dochází k největšímu zatížení této části nástroje. Oproti tomu na hlavním hřbetě bylo opotřebení nižší, a to 0,281 mm. Největší rozdíl mezi opotřebením vedlejšího a hlavního hřbetu byl zaznamenán právě u podélné metody, což ukazuje na její nerovnoměrný vliv na různé části nástroje. Kolmá metoda se oproti tomu vyznačovala

nižším opotřebením na vedlejší hřbetě (0,196 mm), avšak výrazně vyšším opotřebením hlavního hřbetu, což naznačuje, že tato metoda více zatěžuje právě tuto oblast. Vertikální metoda dosahovala nejnižšího opotřebení na obou hřbetech, což ukazuje na její šetrnější působení na nástroj ve srovnání se zbývajících dvěma metodami.



Obr. 41 Diagram opotřebení nástroje po obrábění 3D vzorku.

Tab. 6 Ukázky opotřebení nástrojů po obrábění materiálu vyrobeného aditivní metodou pomocí vybraných metod frézování.

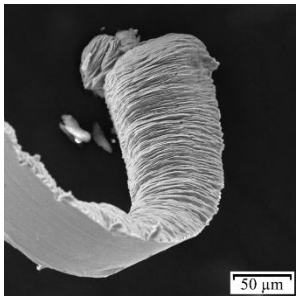
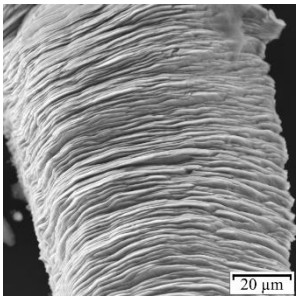
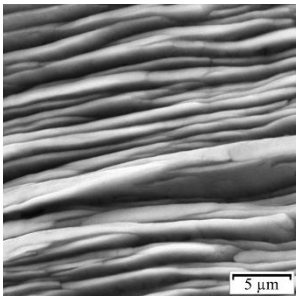
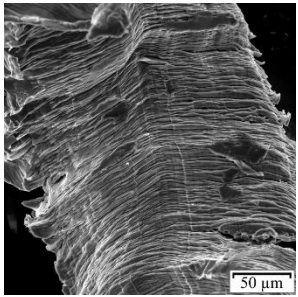
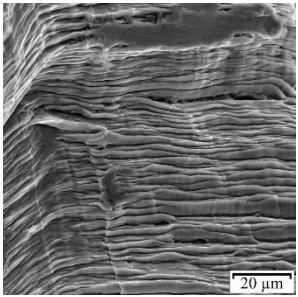
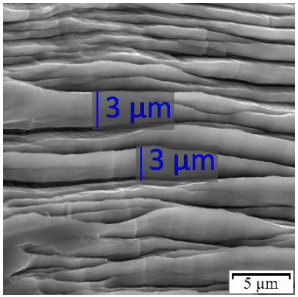
Metoda kolmá	Metoda podélná	Metoda vertikální
		
		

5.4.4 Vyhodnocení třísky

Při obrábění 3D tištěného materiálu nedocházelo k tvorbě segmentové třísky, což je důsledkem jeho nejnížší tvrdosti. Při detailním pohledu na třísky v tabulce 7 lze rozpoznat primární střížné roviny, které jsou projevem formování třísky o čelo řezného nástroje. Vyšší řezná rychlost a posuv na zub vedou k tvorbě sekundárních střížných rovin, což je patrné i u tohoto materiálu.

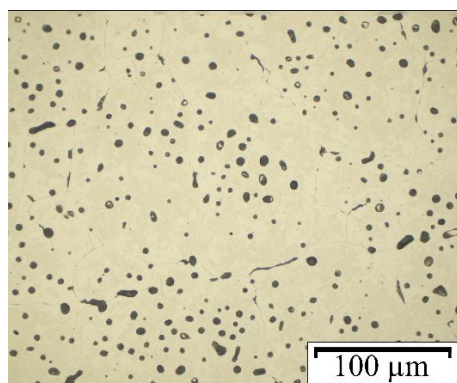
Sekundární roviny vznikají především v důsledku intenzivnějšího pěchování na čele nástroje, přičemž jsou charakteristické silnými, úzce lokalizovanými plastickými deformacemi. Při zvýšení řezných podmínek bylo možné pozorovat zvětšení šířky třísky, což souvisí především s navýšením posuvu na zub.

Tab. 7 Ukázky třísek po metodě obrábění kolmo u vzorku 3D.

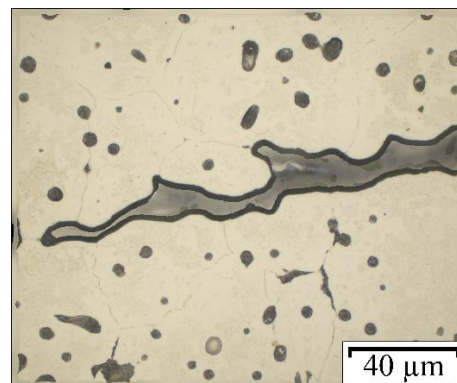
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

5.4.5 Vyhodnocení struktury vzorků

Snímky, viz obr. 42 a) a b), ukazují struktury vyobrazené v podélném řezu (rovnoběžný se směrem tisku). Struktura, která byla focena na více místech, vykazuje vysokou porozitu, již lze přisoudit použité aditivní metodě. Tyto póry se ve struktuře vyskytují z důvodu neúplného sintrovacího procesu. Jak bylo zkoumáno ve studii [81], tak pórovitost lze snížit použitím vyšší teploty slinování (čím vyšší teplota slinování, tím nižší pórovitost a vyšší hustota materiálu), nebo nižším parametrem tloušťky vrstvy. Mikrostruktura se skládá z původních zrn austenitu. Vady v materiálu se projevují buď jako jednotlivé póry (tečky) nebo jako celé pásy, které jsou patrné i na obrobeném povrchu, viz fotky obrobeného povrchu z Alicony. Navíc tyto póry mohou způsobovat vyštípování nástroje a křehký lom břitů (což bylo pozorováno na nástrojích) z důvodu tvorby přerušovaného řezu. Kvůli vysoké porositě materiálu musí nástroj neustále vyjíždět a najíždět do řezu, což ovlivňuje jeho životnost.



a) Zvětšení 500x

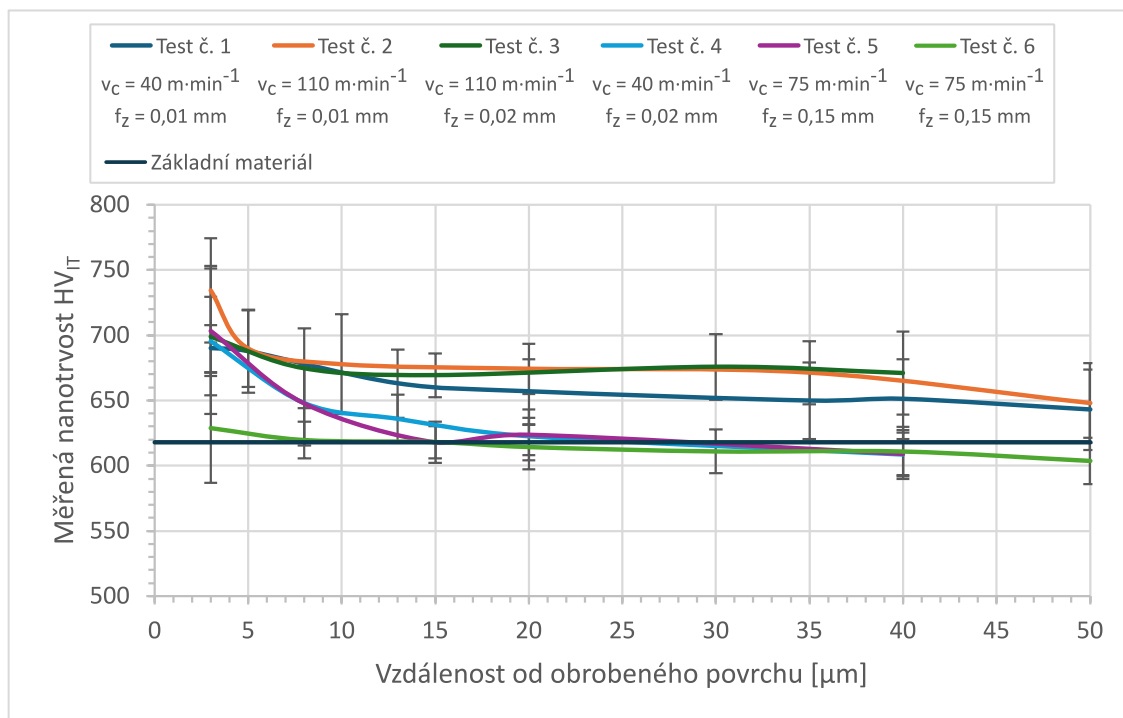


b) Zvětšení 1000x

Obr. 42 Snímky naleptané struktury nástrojové oceli H13 ve vytištěném stavu.

Pro získání vlivu řezných podmínek na povrchové zpevnění byla měřena nanotvrdost na metalograficky připravených vzorcích. Získaná data nanotvrdosti v závislosti na vzdálenosti od

obrobeného povrchu při obrábění 3D vzorku bez tepelného zpracování jsou zobrazeny na obr. 43.



Obr. 43 Graf závislosti nanotvrdosti na vzdálenosti od obrobeného povrchu pro 3D vzorek.

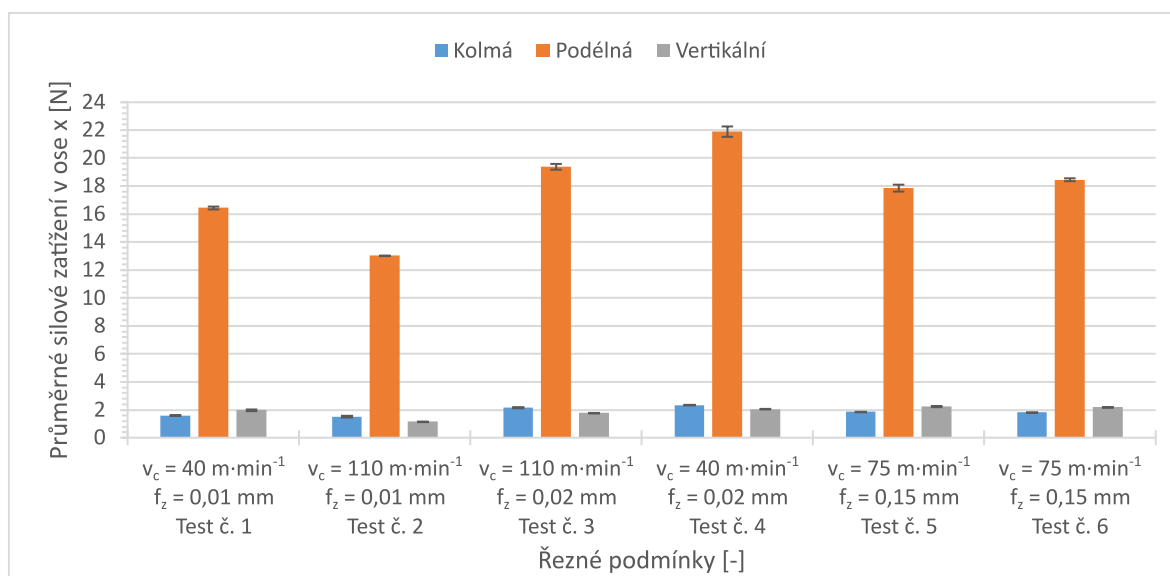
Z důvodu časové náročnosti byla nanotvrdost měřena pouze při obrábění metodou kolmo na tištěné dráhy a pro všechny řezné podmínky. Jak je možné pozorovat, viz obrázek 43, tak povrch po obrobení vykazoval zpevněnou povrchovou vrstvu. Tato vrstva vzniká při řezání materiálu a z důvodu intenzivní plastické deformace. Dle záznamu nanotvrdosti, lze usuzovat, že intenzivní plastická deformace se projeví nárůstem nanotvrdosti, a to do vzdálenosti přibližně 50 μm od obrobeného povrchu. Dále je možné pozorovat, že navýšení řezných podmínek ($v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f_z = 0,02 \text{ mm}$) způsobilo intenzivnější plastickou deformaci, která se projevila nárůstem nanotvrdosti v podpovrchové oblasti.

5.5 Vyhodnocení aditivně vyrobeného materiálu s tepelným zpracováním

Podobně i v této kapitole jsou popsány zjištěné výsledky, které byly získány po obrobení aditivně vyrobených vzorků s tepelným zpracováním jednotlivými metodami. Obrábění dílčích drážek probíhalo za řezných podmínek podle pořadí plánovaného experimentu DoE, viz obrázek 19. Mezi zkoumané oblasti patří silové zatížení, topografie povrchu, opotřebení nástroje, trisky a nanotvrdost. Následující podkapitoly tyto oblasti vyhodnocují.

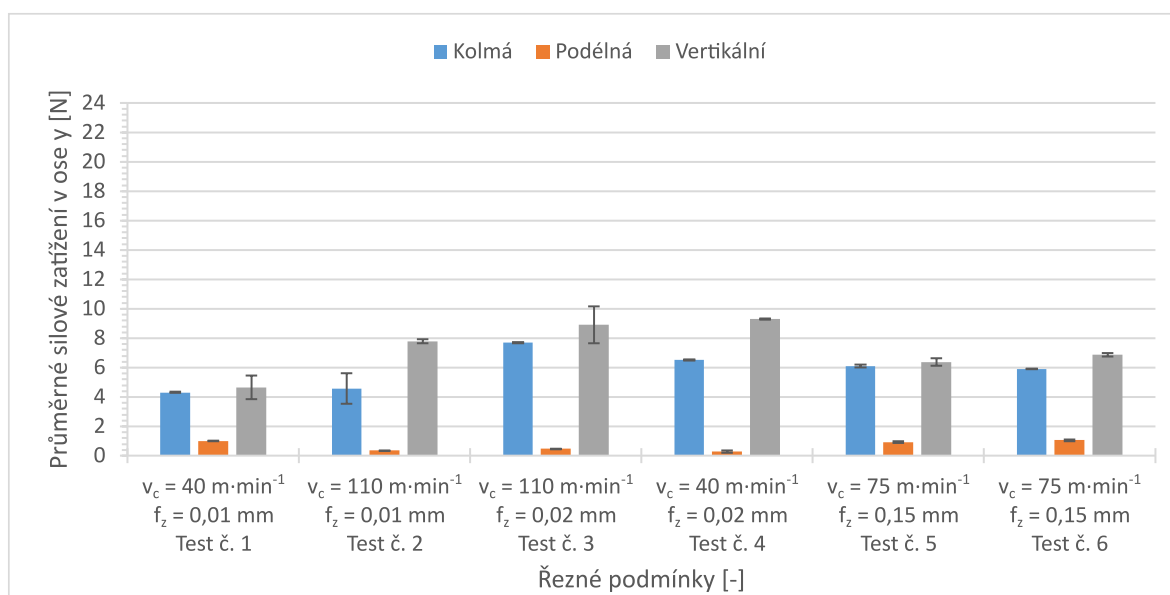
5.5.1 Vyhodnocení silového zatížení

V případě obrábění aditivně vyrobeného vzorku po tepelném zpracování bylo postupováno obdobně jako v případě vzorku bez tepelného zpracování. Grafy zobrazují porovnání zatížení v jednotlivých osách pro dané směry obrábění (kolmo, podél a vertikálně k dráhám tisku) aditivně vyrobeného vzorku s tepelným zpracováním. Příslušné grafy jsou zobrazeny na obrázcích 44, 45 a 46. Při pohledu na silové zatížení v ose x je možné vidět, že v případě obrábění podél tisknutých drah bylo dosaženo nejvyšších hodnot silového zatížení, a to pro všechny řezné podmínky. Tento fakt je způsobený stejným důvodem jako v případě obrábění tepelně nezpracovaného vzorku.



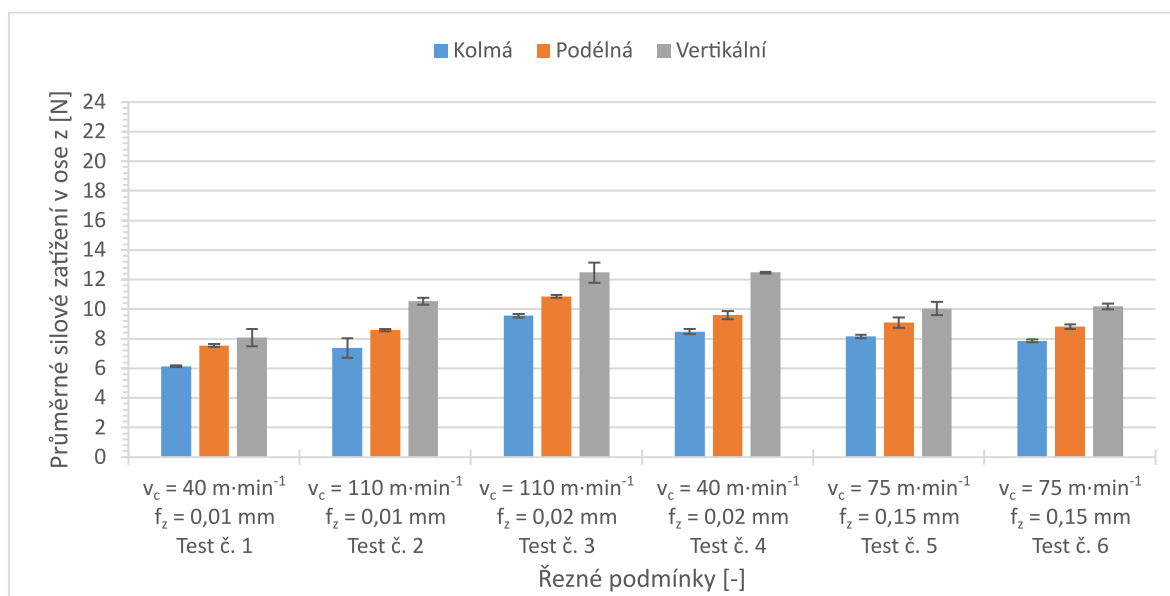
Obr. 44 Diagram silového zatížení v ose x při obrábění 3D+TZ vzorku.

Při pohledu na silové zatížení v ose y (obr. 45) je možné vidět, že tato síla dosahuje nižších hodnot silového zatížení v podélném směru ve srovnání se silovým zatížením v ose x (obr. 44). Naopak ostatní silová zatížení ve směru kolmém a vertikálním jsou ve všech testech vyšší.



Obr. 45 Diagram silového zatížení v ose y při obrábění 3D+TZ vzorku.

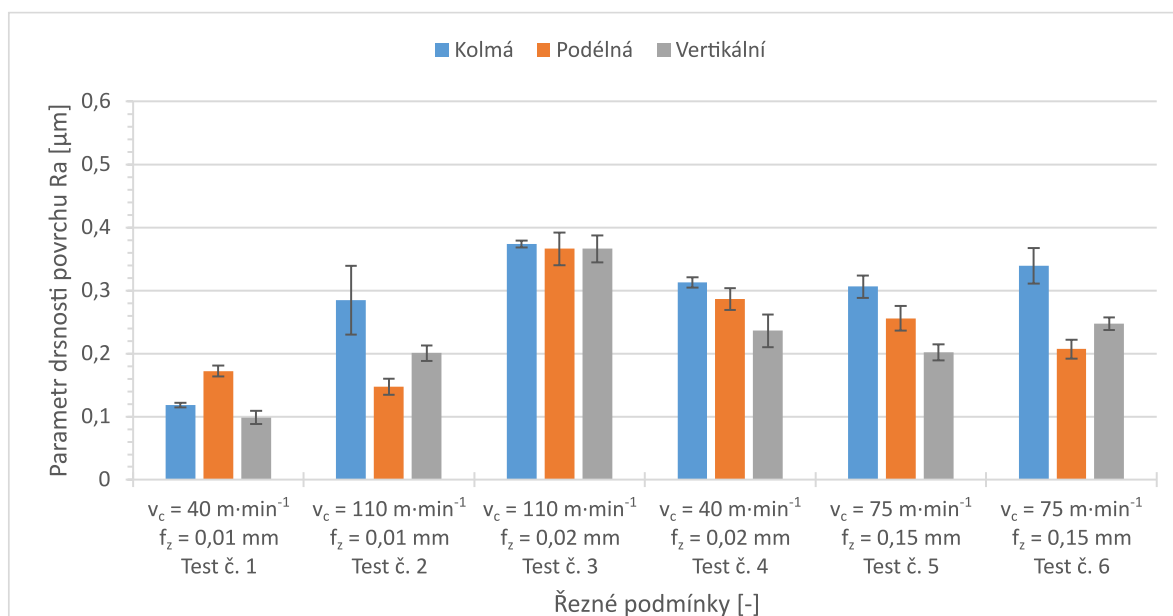
Při porovnání silového zatížení v ose z (obr. 46) se zatížením v ose y (obr. 45) v jednotlivých směrech dosahovalo silové zatížení v ose z celkově vyšších hodnot.



Obr. 46 Diagram silového zatížení v ose z při obrábění 3D+TZ vzorku.

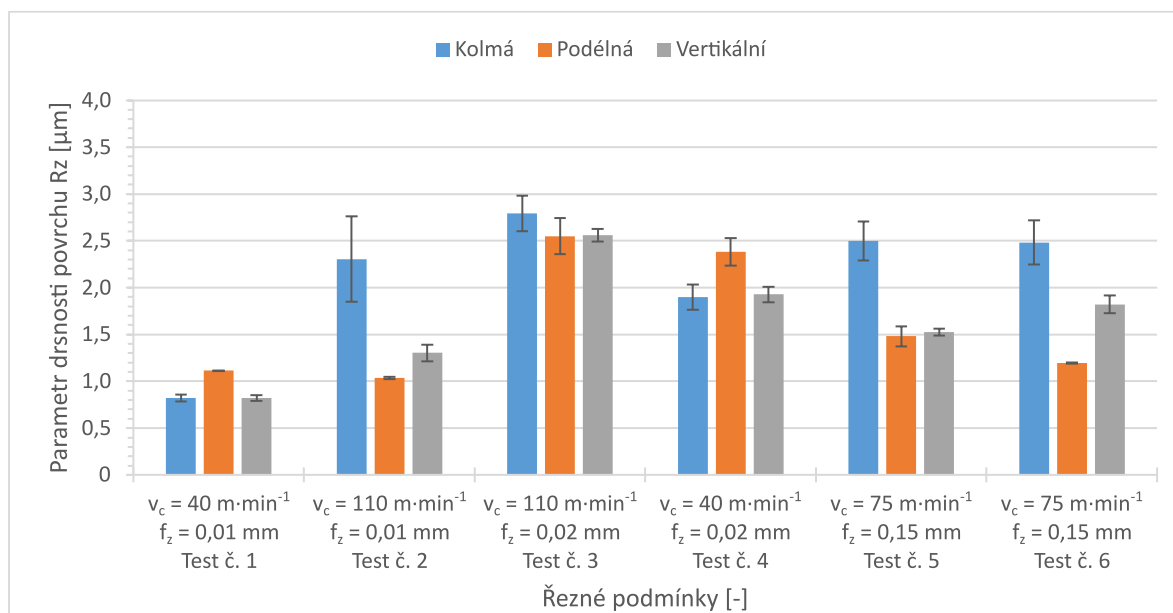
5.5.2 Vyhodnocení topografie povrchu

Drsnost povrchu při obrábění 3D+TZ materiálu byla hodnocena obdobně jako v předchozím případě. Obrázek 47 zobrazuje získané výsledky při obrábění 3D vzorku s tepelným zpracováním (TZ) pro jednotlivé směry obrábění. Na základě získaných dat je možné říct, že v případě testů č. 1 a 4, kdy došlo ke zvýšení posuvu na zub, došlo také ke zvýšení drsnosti povrchu pro všechny směry obrábění. Podobného trendu bylo dosaženo i v případě testů č. 2 a 3. Z těchto výsledků je možné vyvodit podobný závěr jako v předchozím případě, tj. že rostoucí posuv na zub způsobuje vyšší drsnost povrchu. Co se týče vlivu řezné rychlosti, tak je možné pozorovat, že u testu č. 1 a 2 došlo při zvýšení řezné rychlosti ke zvýšení drsnosti povrchu. Pokud byly testy provedeny za stejných řezných podmínek, jako v případě testů č. 5 a 6, tak bylo dosaženo podobných výsledků pro všechny směry obrábění. Při porovnání testů za nejnižších (test č. 1) a nejvyšších řezných podmínek (test č. 3) je možné vydedukovat, že došlo ke zvýšení drsnosti povrchu. Tento fakt je způsobený navýšením posuvu na zub a také tím, že za vyšších řezných podmínek docházelo k tvorbě nežádoucích vibrací na obrobeném povrchu vzorku, viz vyhodnocení povrchu pomocí Alicony. Ke tvorbě vibrací docházelo zejména při obrábění metodou vertikálně. Z výsledků však nelze jednoznačně určit, že by směr obrábění měl zásadní vliv na kvalitu povrchu.



Obr. 47 Diagram drsnosti Ra při obrábění 3D+TZ vzorku.

Při pohledu na obrázek 48, který zobrazuje maximální výšku profilu Rz, je možné říct, že drsnost Rz koresponduje s předchozími tvrzeními. Při porovnání obou vzorků, tj. 3D a 3D+TZ, tak je možné vidět, že vzorek TZ vykazoval ve většině případů lepší drsnost povrchu v porovnání s tepelně nezpracovaným vzorkem. Tento fakt může být způsoben vyšší tvrdostí materiálu po tepelném zpracování. Díky nižší tvrdosti 3D vzorku dochází k adheznímu ulpívání obráběného materiálu na čele nástroje a tvorbě nárůstku. Nárůstek se následně projevuje výraznějšími stopami na obrobeném povrchu a také plastickým tokem materiálu. Tyto věci v důsledku zhoršují drsnost povrchu u materiálů s nižší tvrdostí a vyšší houževnatostí.



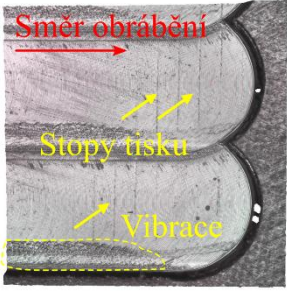
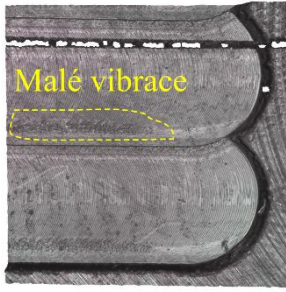
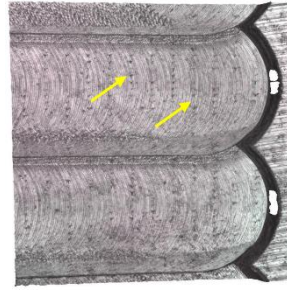
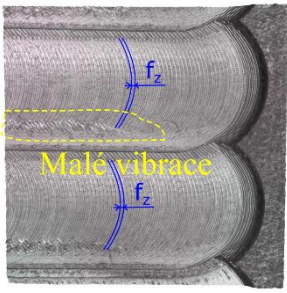
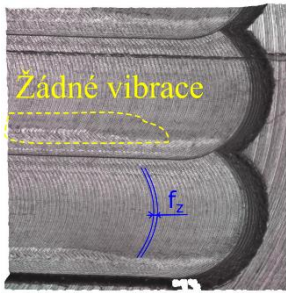
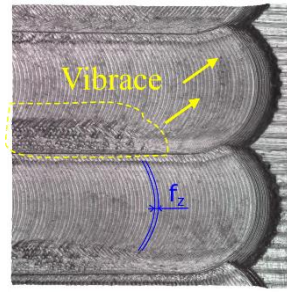
Obr. 48 Diagram drsnosti Rz 3D+TZ vzorku.

Při obrábění aditivně vyrobeného materiálu, který byl tepelně zpracován (obrázky v tabulce 8), docházelo ke snížení tvorby vibrací při nižších řezných rychlostech. Při obrábění kolmo na tisknuté dráhy došlo k výraznému snížení nežádoucích vibrací ve srovnání s 3D tištěným vzorkem. Při nižších řezných podmínkách byla vyhodnocena lepší kvalita obrobeného povrchu, protože nedocházelo k nadměrným vibracím.

Obrábění podél tisknutých dráh vykazovalo menší tvorbu vibrací než obrábění kolmo na ně. Při vyšších řezných rychlostech se objevily drobné stopy po vibracích, což může být způsobeno opotřebením nástroje.

Nejlepší kvalita povrchu byla dosažena při obrábění vertikálně vůči tisknutým dráhám za minimálních řezných podmínek. Povrch vykazoval vysokou jakost s minimem vibrací, což potvrzuje, že tepelně zpracovaný aditivně vyrobený materiál poskytuje lepší obrobiteľnost než materiál bez tepelného zpracování.

Tab. 8 Ukázky obrobených drah po jednotlivých metod obrábění u vzorku 3D+TZ.

Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

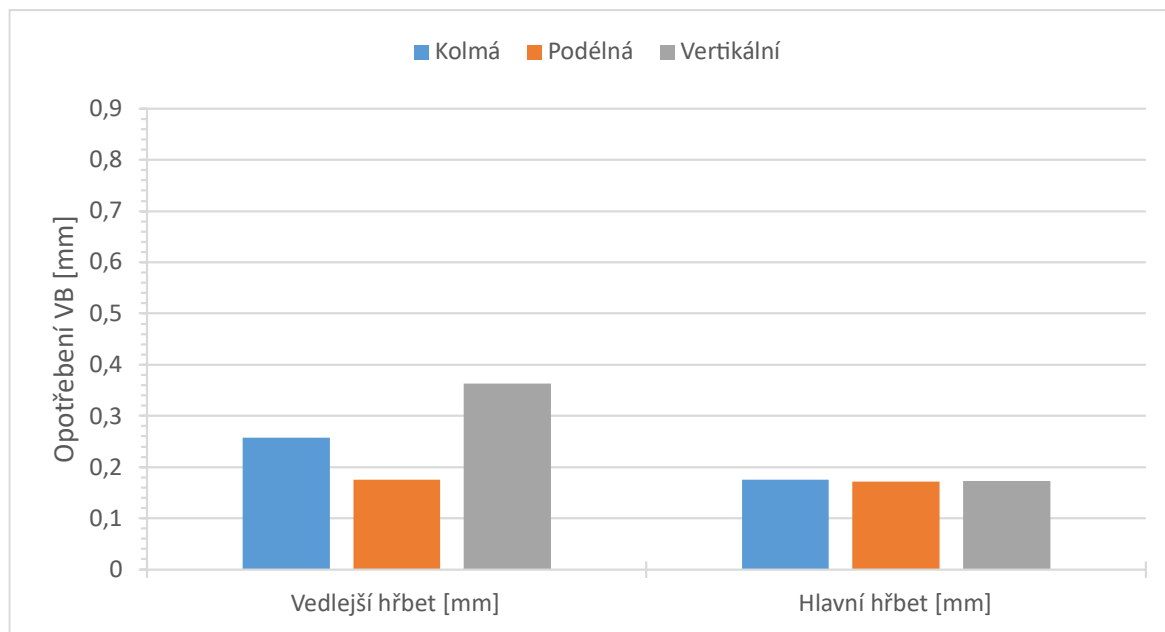
5.5.3 Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje

Z naměřených hodnot opotřebení VB po obrábění vzorku 3D+TZ (tabulka 9, obrázek 49 a obrázky v tabulce 10) lze dojít k závěru, že nejnižší opotřebení na vedlejší hřbetě bylo naměřeno u podélné metody, kde dosahovalo hodnoty 0,175 mm. Naopak nejvyšší opotřebení vedlejšího hřbetu bylo zaznamenáno u vertikální metody s hodnotou 0,363 mm, což ukazuje, že při této metodě dochází k výraznějšímu zatížení této části nástroje. Kolmá metoda se v tomto případě pohybovala mezi těmito dvěma extrémy, přičemž opotřebení vedlejšího hřbetu dosáhlo hodnoty 0,258 mm. Tyto výsledky naznačují, že podélné obrábění má nejmenší dopad na vedlejší hřbet nástroje, zatímco vertikální metoda je v tomto ohledu nejméně příznivá.

Pokud jde o opotřebení hlavního hřbetu, rozdíly mezi jednotlivými metodami byly minimální. Nejvyšší hodnota byla naměřena u kolmé metody (0,175 mm), avšak podélná i vertikální metoda vykazovaly velmi podobné výsledky s hodnotami 0,171 mm a 0,173 mm. To ukazuje, že z hlediska opotřebení hlavního hřbetu není mezi těmito metodami zásadní rozdíl a všechny tři způsoby obrábění vedly k téměř shodnému opotřebení této části nástroje. Výraznější rozdíly mezi metodami byly tedy patrné pouze u vedlejšího hřbetu, kde vertikální metoda vedla k největšímu opotřebení, zatímco podélná metoda vykazovala nejnižší hodnoty.

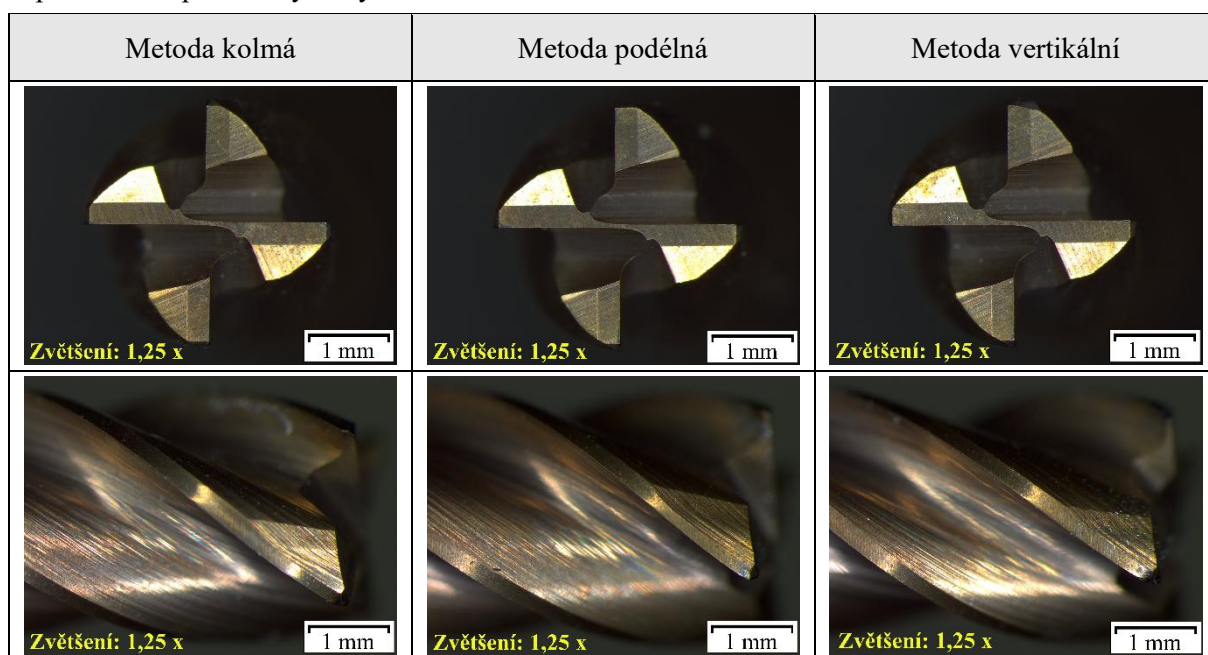
Tab. 9 Hodnoty opotřebení VB v mm po jednotlivých metodách obrábění u 3D+TZ vzorku.

Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Vedlejší hřbet [mm]	0,258	0,175	0,363
Hlavní hřbet [mm]	0,175	0,171	0,173



Obr. 49 Diagram opotřebení nástroje po obrábění 3D+TZ vzorku.

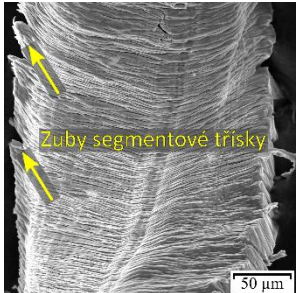
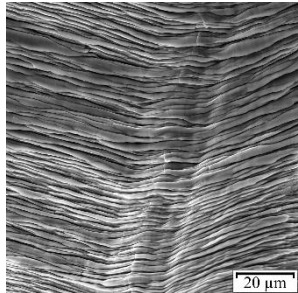
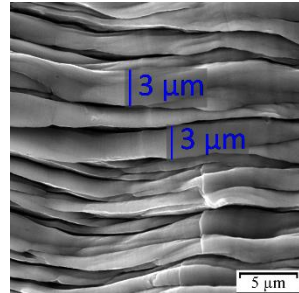
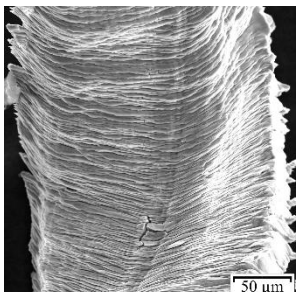
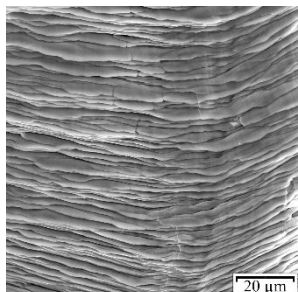
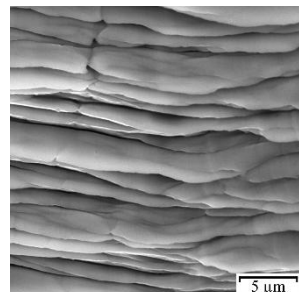
Tab. 10 Ukázky opotřebení nástrojů po obrábění materiálu vyrobeného aditivní metodou s tepelným zpracováním pomocí vybraných metod frézování.



5.5.4 Vyhodnocení třísky

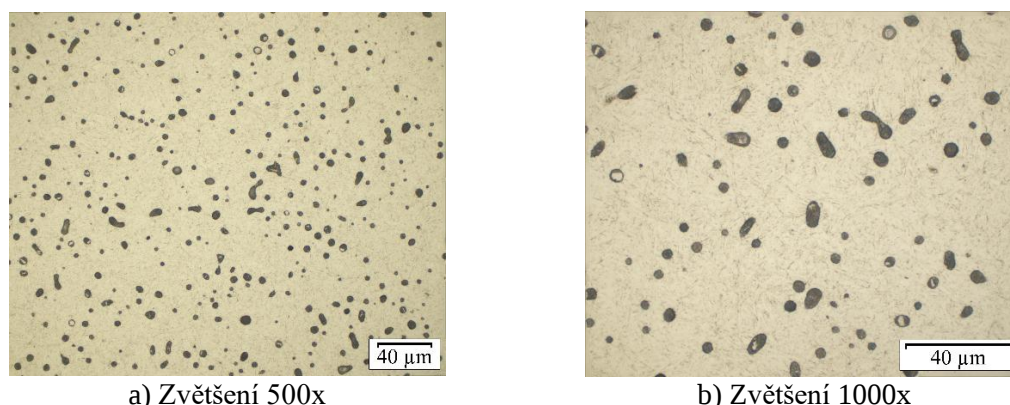
U 3D tištěného materiálu s tepelným zpracováním docházelo k tvorbě segmentové třísky, což je projevem vyšší tvrdosti materiálu oproti tepelně nezpracované variantě. Při vyšší řezné rychlosti docházelo k tvorbě zubů na tříse, což je důsledek intenzivního petchování materiálu na čele nástroje. Primární střížné roviny byly patrné na všech třískách, zatímco sekundární střížné roviny se tvořily při vyšších řezných podmínkách, což je způsobeno lokalizovanými plastickými deformacemi. Výška jednotlivých segmentů třísky měla klesající tendenci s rostoucí tvrdostí obráběného materiálu. Při zvýšení řezné rychlosti bylo pozorováno snižování vzdálenosti mezi primárními střížnými rovinami v důsledku intenzivního petchování materiálu. Obrázky jednotlivých třísek jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11 Ukázky třísek po metodě obrábění kolmo u vzorku 3D+TZ.

Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

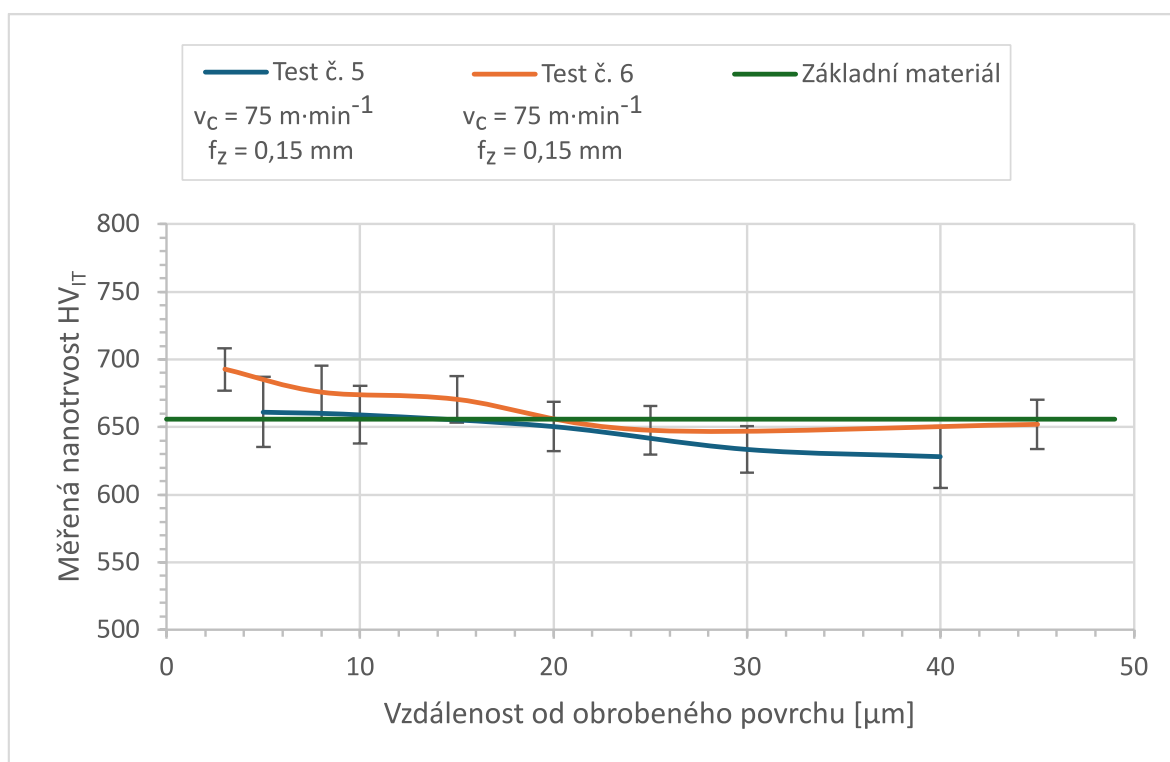
5.5.5 Vyhodnocení struktury vzorků

Snímky struktury v naleptaném stavu vzorku nástrojové oceli po tepelném zpracování jsou vidět na obr. 50. Jak je možné pozorovat, tak struktura obsahuje nižší množství pórů, a to díky procesu tepelného zpracování. Díky němu došlo k dalšímu sintrovacímu procesu, který způsobil zhuštění materiálu a zvýšení celkové hustoty. Vady v podobě pásů jsou po tepelném zpracování méně patrné, což koresponduje s obrázky obrobeného povrchu pořízenými pomocí přístroje Alicona. Jak je možné dále pozorovat, tak původní austenitická zrna obsahují martenzitickou strukturu, která způsobila navýšení tvrdosti oproti materiálu bez tepelného zpracování.



Obr. 50 Snímky naleptané struktury nástrojové oceli H13 ve vytištěném stavu po TZ.

U 3D tištěného a tepelně zpracovaného vzorku bylo postupováno obdobným způsobem jako v předchozím případě. Získaná data nanotvrdosti v závislosti na délce od obrobeného povrchu při obrábění 3D vzorku s tepelným zpracováním jsou uvedena na obr. 51. Z důvodu časové náročnosti byla nanotvrdost měřena pouze při obrábění metodou kolmo na tištěné dráhy a pro minimální (test 1) a maximální (test 3) řezné podmínky. Tyto hodnoty jsou porovnány s hodnotami naměřenými na základním materiálu. Jak je možné pozorovat, tak povrch po obrobení vykazoval zpevněnou povrchovou vrstvu do hloubky 20 μm . Dále je možné pozorovat, že navýšení řezných podmínek ($v_c = 110 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $f_z = 0,02 \text{ mm}$) způsobilo intenzivnější plastickou deformaci, která se projevila nárůstem nanotvrdosti v podpovrchové oblasti podobně jako v předchozím případě. Při porovnání nanotvrdosti s předchozím 3D tištěným vzorkem je možné vydedukovat, že v případě, kdy byl vzorek tepelně zpracován, tak povrchové zpevnění nedosahovalo takové hloubky jako v případě 3D vzorku. Tento jev lze vysvětlit vyšší tvrdostí obrobeného materiálu, která zvyšuje jeho odolnost vůči plastické deformaci.



Obr. 51 Graf závislosti nanotvrdosti na vzdálenosti od obrobeného povrchu pro 3D+TZ vzorek.

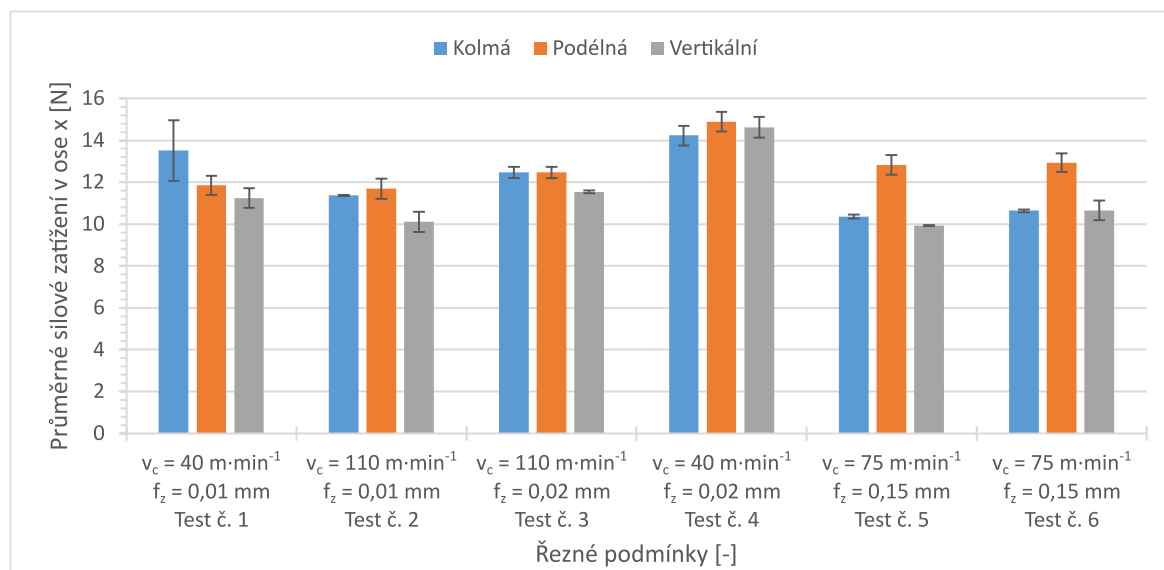
5.6 Vyhodnocení konvenčně vyrobeného materiálu s tepelným zpracováním

Tato kapitola taktéž popisuje dílčí výsledky, které byly získány po obrobení konvenčně vyrobených vzorků s tepelným zpracováním dílčími metodami. Obrábění jednotlivých drážek probíhalo za řezných podmínek podle pořadí plánovaného experimentu DoE, viz obrázek 19. Mezi zkoumané oblasti patří silové zatížení, topografie povrchu, opotřebení nástroje, třísky a nanotvrdost. Následující podkapitoly tyto oblasti vyhodnocují.

5.6.1 Vyhodnocení silového zatížení

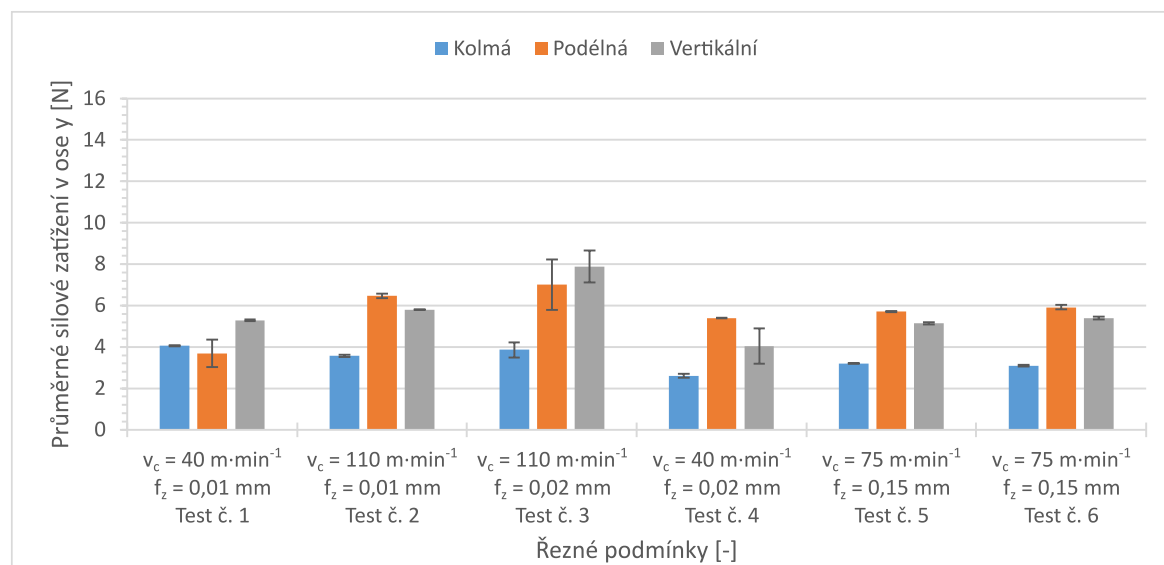
V případě obrábění tepelně zpracované nástrojové oceli vyrobené pomocí válcování se pro vyhodnocení silového zatížení postupovalo stejným způsobem jako v předchozích případech při obrábění 3D tištěného a 3D tištěného tepelně zpracovaného vzorku. Grafy porovnávají

silové zatížení v osách x, y a z pro jednotlivé směry obrábění (kolmo, podél a vertikálně k dráhám tisku) konvenčně vyrobeného vzorku po tepelném zpracování jsou zobrazeny na obrázcích 52, 53 a 54. Při pohledu na silové zatížení v ose x (obr. 52) je možné vidět, že v případě obrábění podél směru válcování bylo dosaženo podobných hodnot jako v případě obrábění kolmo a vertikálně na tištěné dráhy. Tento fakt může být způsobený tím, že díky tepelnému zpracování došlo k rekrytalizaci struktury a směr válcování už není patrný.

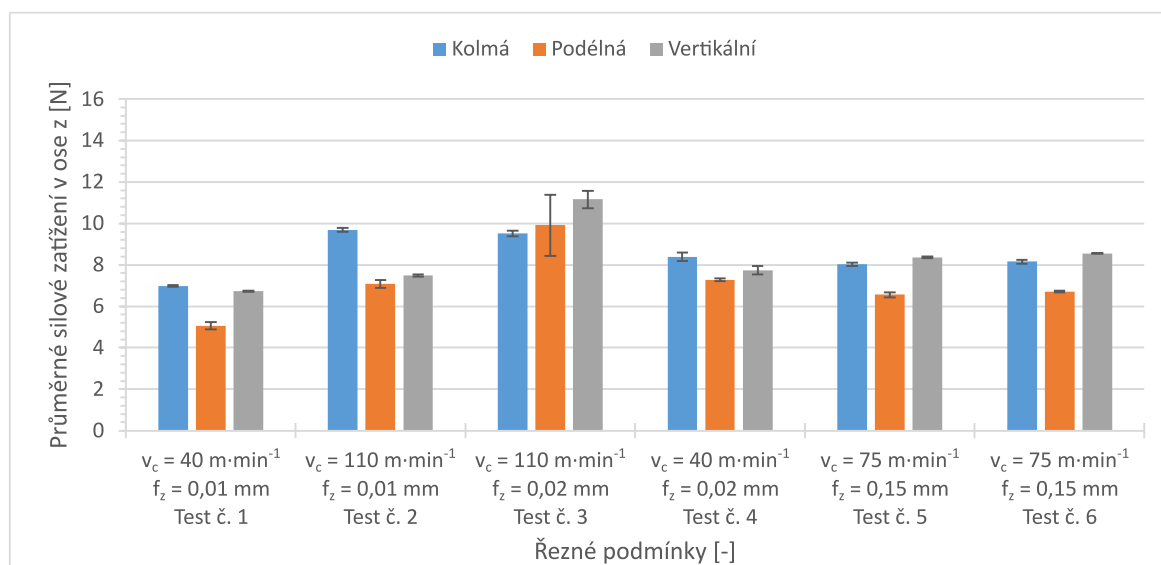


Obr. 52 Diagram silového zatížení v ose x při obrábění KON+TZ vzorku.

Silové zatížení v ose y dosahovalo ve srovnání se silovým zatížením v osách x (obr. 52) a z (obr. 54) ve všech metodách obrábění nejnižších hodnot silového zatížení.



Obr. 53 Diagram silového zatížení v ose y při obrábění KON+TZ vzorku.



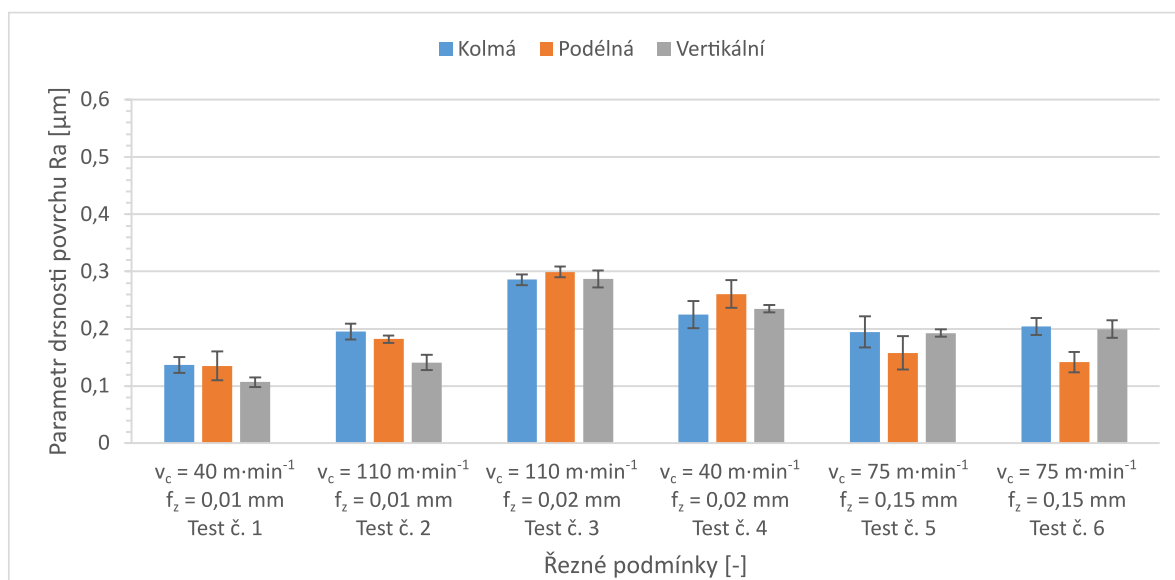
Obr. 54 Diagram silového zatížení v ose z při obrábění KON+TZ vzorku.

5.6.2 Vyhodnocení topografie povrchu

Drsnost povrchu při obrábění KON+TZ materiálu byla hodnocena obdobně jako v předchozím případě. Obrázek 55 zobrazuje získané výsledky při obrábění KON+TZ vzorku s tepelným zpracováním pro jednotlivé směry obrábění. Na základě získaných dat je možné říci, že v případě testů č. 1 a 4, kdy došlo ke zvýšení posuvu na zub, došlo také ke zvýšení drsnosti povrchu pro všechny směry obrábění. Podobného trendu bylo dosaženo i v případě testů č. 2 a 3. Tyto výsledky potvrzují závěry z předchozích dvou materiálů tzn., že zvyšující se posuv na zub způsobuje vyšší drsnost povrchu pro všechny tři obráběné materiály.

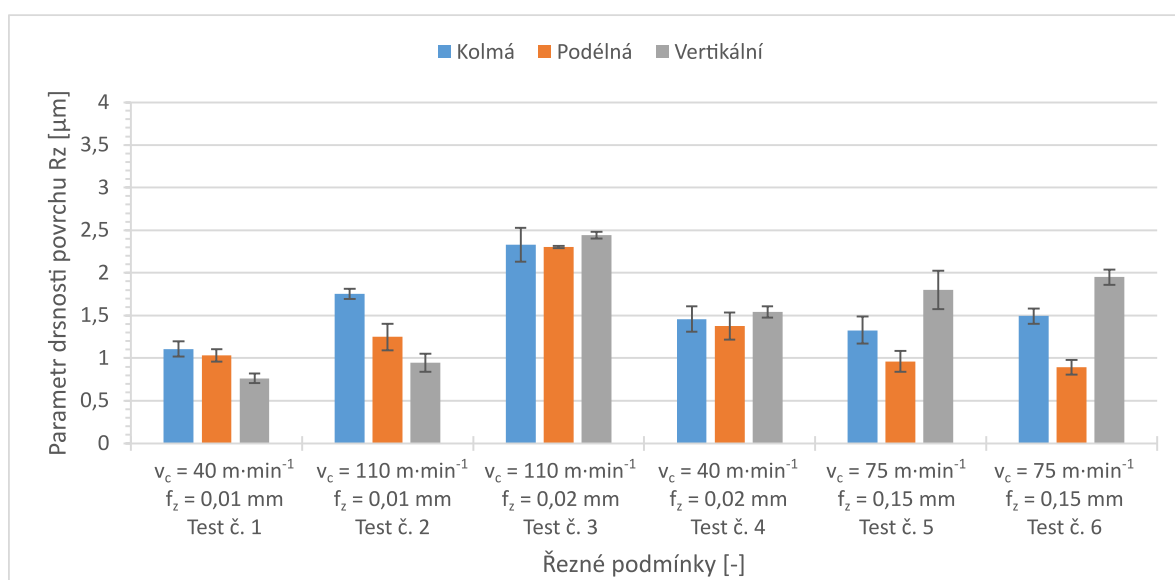
Co se týče vlivu řezné rychlosti tak je možné pozorovat, že u testů č. 1 a 2 došlo při zvýšení řezné rychlosti ke zvýšení drsnosti povrchu obdobně jako u obrábění materiálu 3D+TZ. Při porovnání testů provedených za stejných řezných podmínek (testy č. 5 a 6) tak je možné pozorovat obdobné výsledky drsnosti povrchu pro všechny materiály. Lze tedy prohlásit, že frézování vykazuje za stejných podmínek podobné výsledky bez ohledu na obráběný materiál či směr.

Při porovnání testů za minimálních (test č. 1) a maximálních řezných podmínek (test č. 3) je možné pozorovat nárůst drsnosti povrchu. Tento fakt je způsoben navýšením posuvu na zub a také tím, že za vyšších řezných podmínek docházelo k tvorbě nežádoucích vibrací na obrobeném povrchu vzorku, viz vyhodnocení povrchu pomocí Alicony. Vibrace na povrchu jsou pravděpodobně způsobené vyššími složkami silového zatížení působící na nástroj. Kvůli tomu má nástroj tendenci vibrovat a způsobit tak nežádoucí stopy na obráběném povrchu, jak je to patrné z obrázků pořízených pomocí přístroje Alicona při obrábění ve vertikálním směru, viz níže. Jak je možné pozorovat, tak směr obrábění nemá na kvalitu povrchu zásadní vliv ani v případě obrábění vzorku KON+TZ.



Obr. 55 Diagram drsnosti Ra při obrábění KON+TZ vzorku.

Obrázek 56, zobrazující maximální výšku profilu Rz vykazuje obdobné chování a závislosti popsané pro drsnost povrchu Ra. Při porovnání všech vzorků, tj. 3D, 3D+TZ a KON+TZ tak je možné vidět klesající tendenci obrobeného povrchu s rostoucí tvrdostí obráběného materiálu. I v případě, kdy KON+TZ materiál vykazoval známky nežádoucích vibrací (zejména při maximálních podmínkách a obrábění ve vertikálním směru) tak byla dosažena nižší drsnost povrchu ve srovnání s 3D+TZ vzorkem. Tento fakt je způsobený vyšší tvrdostí obráběného materiálu a koresponduje s tvrzením z předchozí kapitoly 5.6.1.



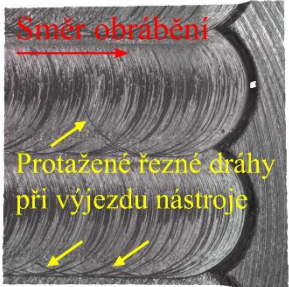
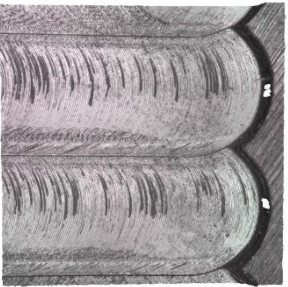
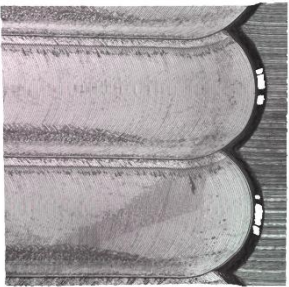
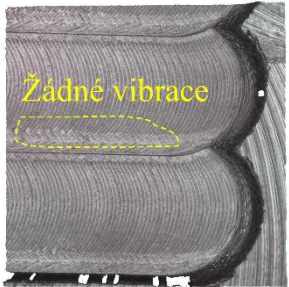
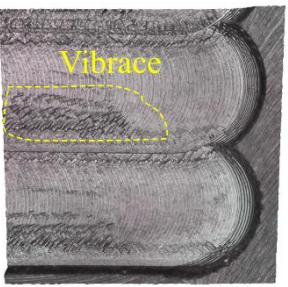
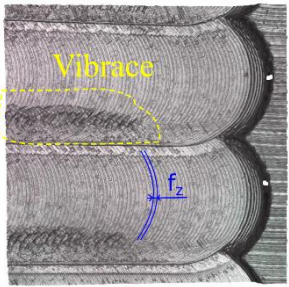
Obr. 56 Diagram drsnosti Rz KON+TZ vzorku.

Tabulka 12 ukazuje detailní snímky obrobených drah vzorku KON+TZ. Při obrábění tohoto materiálu ve směru kolmém na tištěné dráhy nebyly při maximální řezné rychlosti 110 m·min⁻¹ patrné žádné vibrace, zatímco při nejnižší řezné rychlosti (40 m·min⁻¹) byly při výjezdu nástroje z řezu pozorovány protažené řezné dráhy. Nejlepší vizuální kvality povrchu bylo dosaženo za maximálních řezných podmínek.

Při obrábění podél tisknutých drah byly u materiálu KON+TZ vibrace patrné při vyšších řezných rychlostech, což mohlo být způsobeno opotřebením nástroje. Při vertikálním obrábění nebyly protažené řezné dráhy pozorovány ani za minimálních, ani za maximálních řezných

podmínek. Povrch vykazoval vizuálně lepší jakost ve srovnání s ostatními směry obrábění, a to pouze s minimálním množstvím vibrací.

Tab. 12 Ukázky obrobených drah po jednotlivých metodách obrábění u vzorku KON+TZ.

Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

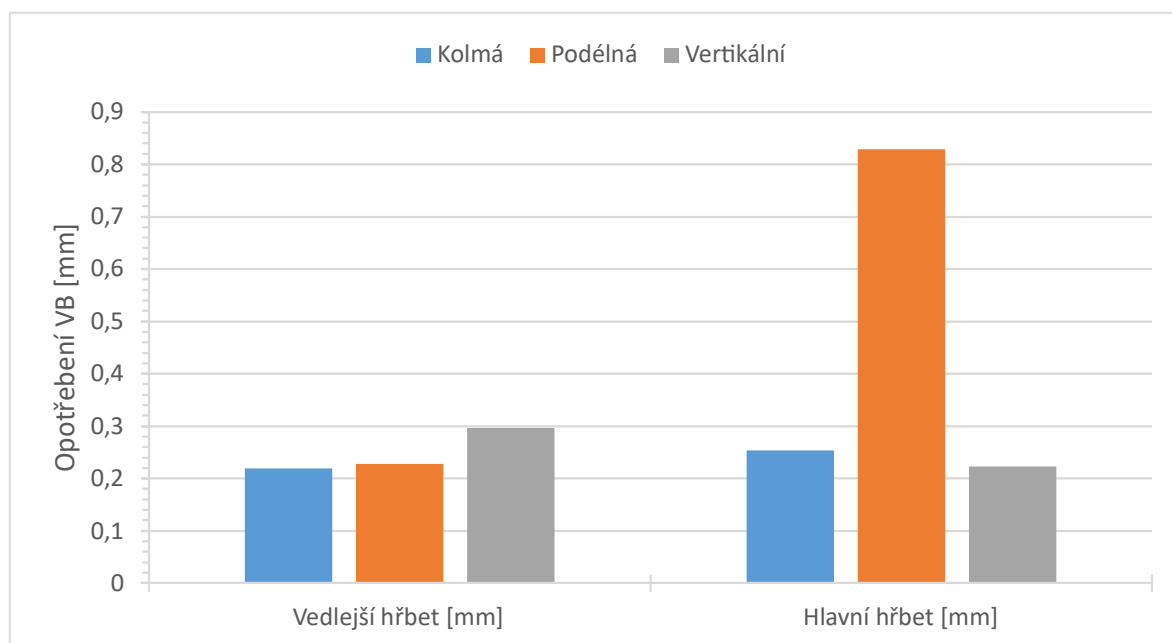
5.6.3 Vyhodnocení opotřebení řezného nástroje

Naměřené hodnoty opotřebení VB po obrábění KON+TZ vzorku (tabulka 13, obrázek 57 a obrázky v tabulce 14) ukazují, že nejnižší opotřebení vedlejšího hřbetu bylo zaznamenáno u kolmé metody, kde dosáhlo hodnoty 0,219 mm. Podélná metoda vykazovala velmi podobné opotřebení s hodnotou 0,228 mm, zatímco nejvyšší opotřebení vedlejšího hřbetu bylo naměřeno u vertikální metody (0,297 mm). Tento rozdíl naznačuje, že vertikální metoda způsobuje vyšší zatížení této části nástroje, zatímco kolmá a podélná metoda vedou k podobné úrovni opotřebení.

Tab. 13 Hodnoty opotřebení VB v mm po jednotlivých metodách obrábění u KON+TZ vzorku.

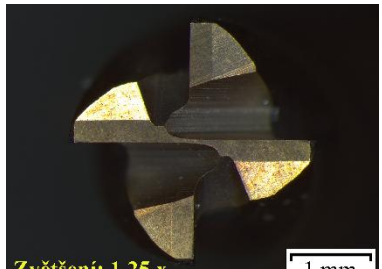
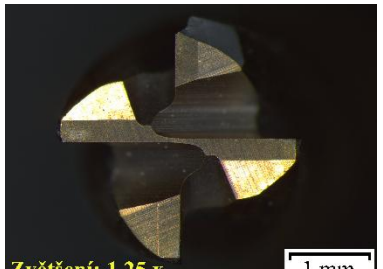
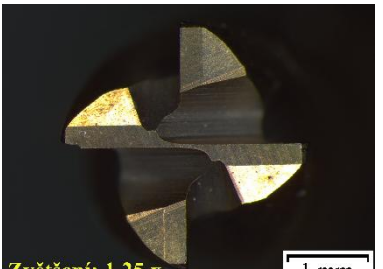
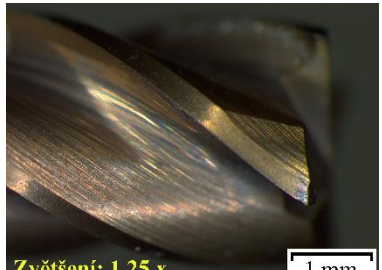
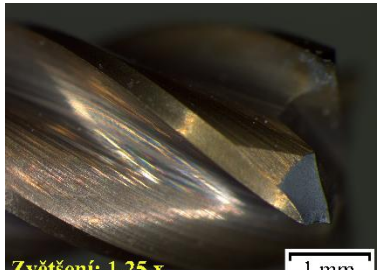
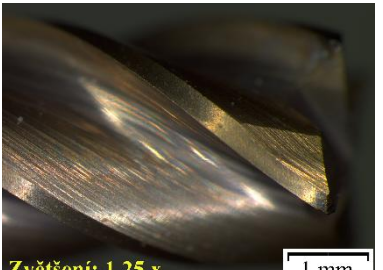
Metoda	Kolmá	Podélná	Vertikální
Vedlejší hřbet [mm]	0,219	0,228	0,297
Hlavní hřbet [mm]	0,253	0,829	0,223

V případě hlavního hřbetu jsou rozdíly mezi jednotlivými metodami výraznější. Podélná metoda vykazovala nejvyšší opotřebení, které dosáhlo hodnoty 0,829 mm, což je výrazně více než u ostatních metod. Oproti tomu nejnižší opotřebení bylo naměřeno u vertikální metody (0,223 mm), což naznačuje, že tato metoda je v tomto ohledu nejšetnější. Kolmá metoda se pohybovala mezi těmito dvěma extrémy s opotřebením hlavního hřbetu na úrovni 0,253 mm. Tyto výsledky ukazují, že podélná metoda významně zatěžuje hlavní hřbet nástroje, zatímco vertikální metoda zde způsobuje nejmenší opotřebení.



Obr. 57 Diagram opotřebení nástroje po obrábění KON+TZ vzorku.

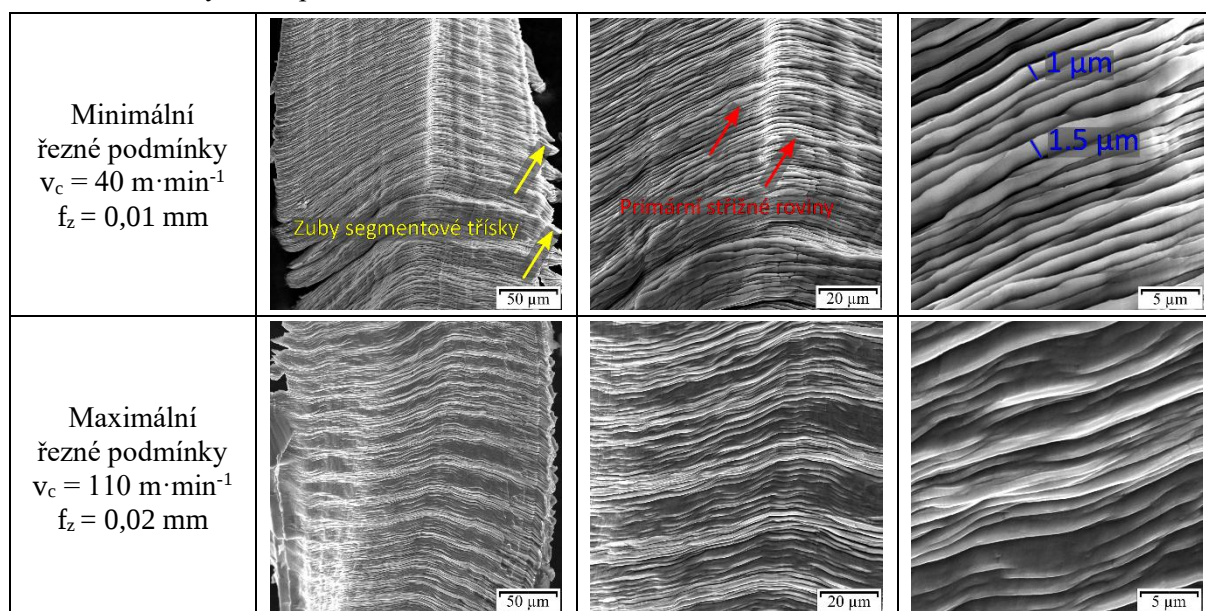
Tab. 14 Ukázky opotřebení nástrojů po obrábění konvenčně vyrobeného materiálu s tepelným zpracováním pomocí vybraných metod frézování.

Metoda kolmá	Metoda podélná	Metoda vertikální
 Zvětšení: 1,25 x	 Zvětšení: 1,25 x	 Zvětšení: 1,25 x
 Zvětšení: 1,25 x	 Zvětšení: 1,25 x	 Zvětšení: 1,25 x

5.6.4 Vyhodnocení třísky

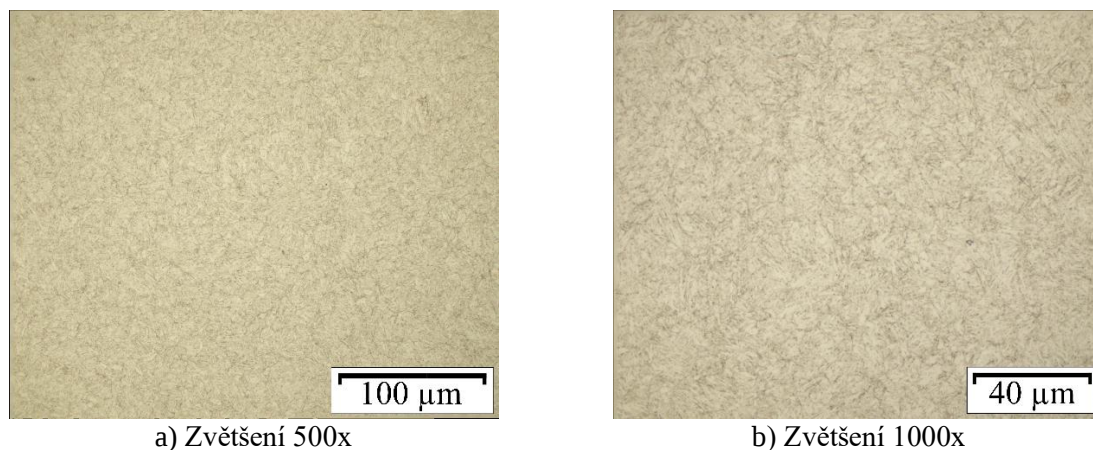
Obrábění konvenčního materiálu s tepelným zpracováním vedlo k tvorbě segmentové třísky, což je důsledek vysoké tvrdosti tohoto materiálu. S rostoucí řeznou rychlostí bylo patrné formování zubů na tříse, které vznikaly kvůli silnému pěchování materiálu na čele řezného nástroje. Na všech třískách byly zřetelné primární střížné roviny, zatímco sekundární střížné roviny se objevovaly při zvýšených řezných podmínkách. Tento jev je způsoben úzce lokalizovanými plastickými deformacemi. Výška jednotlivých segmentů třísky se s rostoucí tvrdostí materiálu snižovala. Při vyšší řezné rychlosti došlo ke snížení vzdálenosti mezi primárními střížnými rovinami v důsledku intenzivního pěchování materiálu. Obrázky dílčích třísek jsou popsány v tabulce 15.

Tab. 15 Ukázky třísek po metodě obrábění kolmo u vzorku KON+TZ.



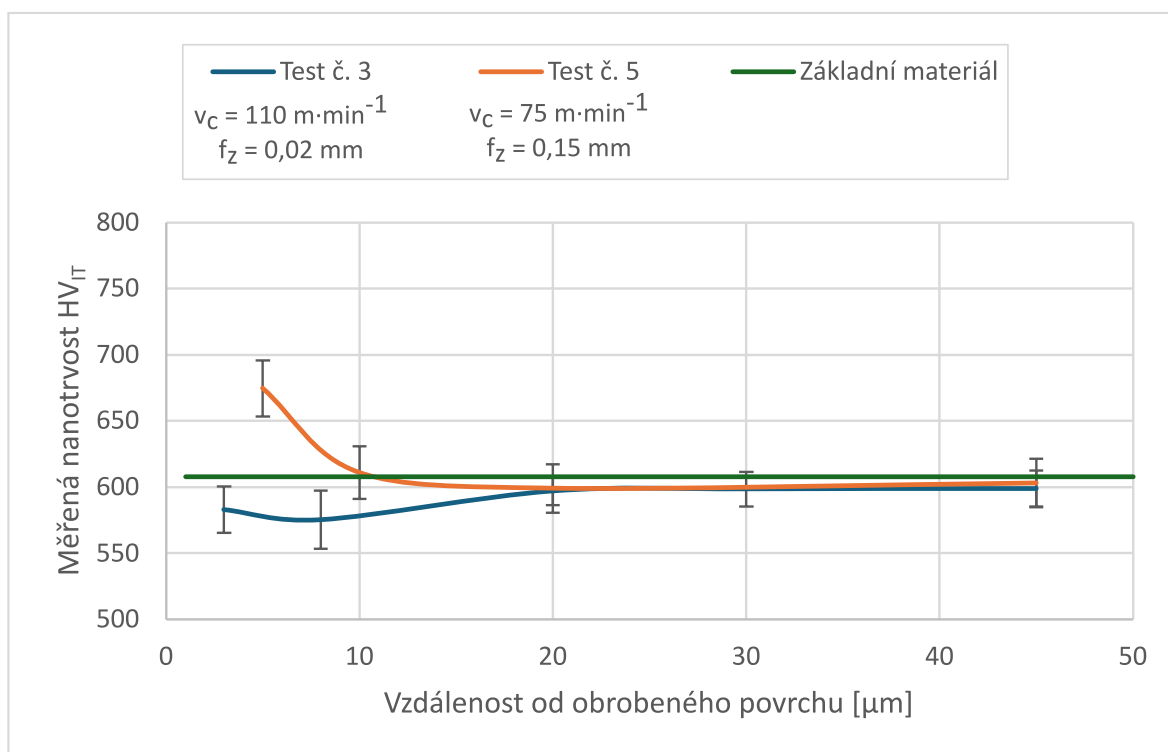
5.6.5 Vyhodnocení struktury vzorků

Struktura konvenční oceli po tepelném zpracování, nafocená pomocí optického mikroskopu, je vidět na obrázku 58. Je možné si všimnout, že struktura po kalení obsahuje martenzitickou strukturu, která je hlavní příčinou nárůstu tvrdosti. Dále je možné pozorovat, že materiál obsahuje pouze minimální množství pórů, což je způsobeno zejména metodou výroby materiálu (válcování).



Obr. 58 Struktura konvenčního materiálu po tepelném zpracování.

V případě konvenčního vzorku s tepelným zpracováním se postupovalo obdobně jako v případě 3D a 3D+TZ vzorku. Opět je možné pozorovat nárůst nanotvrdosti v podpovrchové vrstvě, a to vlivem intenzivní plastické deformace obráběného materiálu. Klesající tendence nanotvrdosti se projevuje přibližně do 20 μm (obr. 59), kde nanotvrdost dosahuje průměrné hodnoty tvrdosti, viz obr. 23. Při porovnání s ostatními vzorky, vzorek KON+TZ vykazoval nejmenší vzdálenost zpevněné vrstvy (přibližně 20 μm) od obrobeného povrchu. Tento fakt je pravděpodobně způsoben tvrdostí materiálu, která dosahovala nejvyšší hodnoty u KON+TZ vzorku.



Obr. 59 Graf závislosti nanotvrdosti na vzdálenosti od obrobeného povrchu pro KON+TZ vzorek.

5.7 Porovnání jednotlivých metod a vzorků

Součástí této kapitoly je porovnání dílčích metod a vzorků mezi sebou, aby bylo možné snadno vytvořit závěry o vhodnosti jednotlivých obráběcích strategií. V kapitole jsou znovu použity obrázky z předchozích kapitol, avšak tentokrát jsou umístěny vedle sebe pro snadnější srovnání.

5.7.1 Z hlediska silového zatížení

Při porovnání aditivně vyrobeného vzorku se vzorkem, který byl navíc tepelně zpracován, je možné pozorovat celkově nižší silové zatížení ve směru osy x. Díky tepelnému zpracování (kalení a dvojité popouštění) dojde k odstranění zbytkových napětí, což může způsobit ve výsledku nižší silové zatížení. Při pohledu na silové zatížení v ose y je možné vidět, že tato síla dosahuje celkově nižších hodnot ve srovnání se silovým zatížením v ose x. V případě silového zatížení v ose z, je možné si všimnout, že bylo dosaženo ve všech směrech obrábění podobných hodnot silového zatížení. Tento fakt může být opět způsobený změnou struktury materiálu po tepelném zpracování. Co se týče vlivu řezných podmínek na velikost silového zatížení, tak je možné pozorovat, že nejvyššího zatížení bylo dosaženo při maximálním posuvu na zub ($f_z = 0,02 \text{ mm}$) a minimální řezné rychlosti. Vyšší posuv na zub zvětšuje průřez třísky, což odpovídá nárůstu silového zatížení. Při posuvu na zub $0,02 \text{ mm}$ a řezné rychlosti $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je silové zatížení nižší než při testu s posuvem na zub $0,02 \text{ mm}$ a řeznou rychlostí $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což lze dále odvodit. Tento rozdíl pravděpodobně souvisí s teplotním odpevněním obráběného materiálu, jelikož vyšší řezná rychlost způsobuje intenzivnější vývin tepla, což vede ke snížení pevnosti materiálu a tím i silového zatížení. Tento jev je možné potvrdit při pohledu na testy č. 1 a 2, kde je možné vidět, že opět při zvýšení řezné rychlosti došlo ke snížení silového zatížení. Při použití stejných řezných podmínek jako u testů č. 5 a 6 bylo dosaženo totožného silového zatížení, což naznačuje, že proces obrábění nebyl ovlivněn dalšími faktory, jako je tuhost upnutí nástroje a obrobku.

V případě srovnání konvenčně vyráběného vzorku s tepelně nezpracovaným vzorkem je zřetelné sledovat celkově nižší silové zatížení ve směru osy x. Při pohledu na silové zatížení

v ose y je možné pozorovat, že toto silové zatížení dosahuje celkově nižších hodnot ve srovnání se silovým zatížením v ose x. Rovněž je možné pozorovat, že silové zatížení vykazuje rovnoměrný charakter pro všechny směry frézování. V případě silového zatížení v ose z bylo dosaženo ve všech směrech obrábění podobných hodnot silového zatížení. Tento fakt může být opět způsobený změnou struktury materiálu po tepelném zpracování. Pokud jde o vliv řezných podmínek na velikost silového zatížení, lze pozorovat, že nejvyšší zatížení bylo dosaženo při maximálním posuvu na zub ($f_z = 0,02$ mm) a minimální řezné rychlosti. Vyšší posuv na zub zvětšuje průřez třísky, což vede k nárůstu silového zatížení. Při posuvu na zub 0,02 mm a řezné rychlosti $v_c = 110$ m·min⁻¹ je silové zatížení nižší než při testu s posuvem na zub 0,02 mm a řeznou rychlostí $v_c = 40$ m·min⁻¹, což lze dále odvodit. Tento rozdíl pravděpodobně souvisí s teplotním změkčením obráběného materiálu, protože vyšší řezná rychlost způsobuje intenzivnější vývin tepla, což vede ke snížení pevnosti materiálu a tím i silového zatížení. Tento jev lze potvrdit při pohledu na testy č. 1 a 2, kde je vidět, že při zvýšení řezné rychlosti došlo ke snížení silového zatížení. Při použití stejných řezných podmínek jako u testů č. 5 a 6 bylo dosaženo stejného silového zatížení, což naznačuje, že proces obrábění nebyl ovlivněn dalšími faktory, jako je tuhost upnutí nástroje a obrobku nebo případné vibrace.

Celkově lze říci, že tepelné zpracování vedlo ke zvýšení mechanických vlastností, zejména pak ke zvýšení tvrdosti. Avšak z pohledu silového zatížení lze konstatovat, že po tepelném zpracování došlo k rekrystalizaci materiálu, která způsobila lepší obrobitelnost a nižší silové zatížení. Dále lze konstatovat, že po tepelném zpracování vykazoval materiál nižší porozitu. Pokud má materiál méně pórů, které mohou fungovat jako přerušovaný řez, je možné pozorovat menší výskyt vyštipování břitů. Toto opotřebení nebylo po tepelném zpracování tolik patrné.

5.7.2 Z hlediska topografie povrchu

V následujících kapitolách je porovnávána topografie povrchu jednotlivých vzorků po obrobení vybranými metodami obrábění. Konkrétně byla srovnávána drsnost povrchu, které bylo dosaženo jednotlivými metodami.

Drsnost povrchu

Při porovnání obrobitelnosti jednotlivých vzorků z hlediska drsnosti povrchu obecně platí, že zvyšující se posuv na zub způsobuje nárůst drsnosti povrchu u všech tří testovaných materiálů (3D, 3D+TZ a KON+TZ). Tento trend byl potvrzen v rámci jednotlivých testů a nezávisel na směru obrábění.

Vliv řezné rychlosti se projevil rozdílně mezi jednotlivými vzorky. Zatímco u 3D materiálu vedlo zvýšení řezné rychlosti ke snížení drsnosti povrchu, u vzorků s tepelně zpracovaným materiálem (3D+TZ a KON+TZ) došlo naopak ke zvýšení drsnosti. Tento rozdíl lze vysvětlit rozdílnou odezvou materiálu na silové zatížení a možnou tvorbou nárůstků u měkčích materiálů.

Největší drsnost povrchu byla dosažena při nejvyšších řezných podmínkách (test č. 3), kde docházelo k tvorbě vibrací. Tento efekt byl nejvýraznější při obrábění KON+TZ vzorku ve vertikálním směru, kde vibrace pravděpodobně vznikaly v důsledku vyššího silového zatížení nástroje. Navzdory tomu měl KON+TZ materiál obecně nejnižší drsnost povrchu, což potvrzuje závislost kvality povrchu na tvrdosti materiálu.

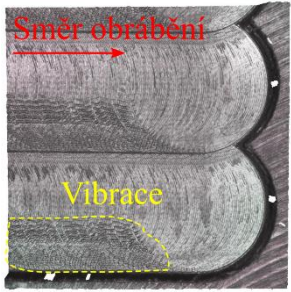
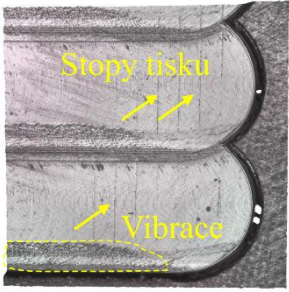
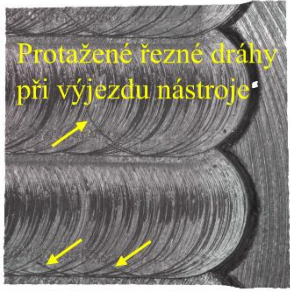
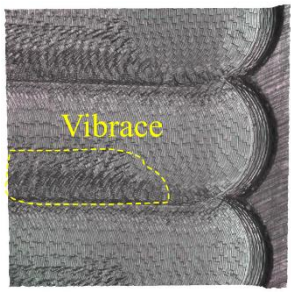
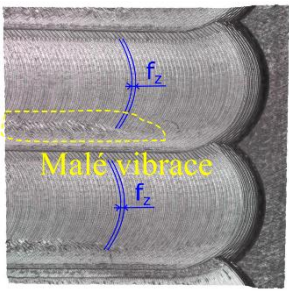
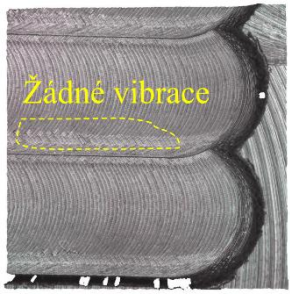
Porovnání jednotlivých vzorků ukazuje, že drsnost povrchu klesá s rostoucí tvrdostí materiálu. Nejvyšší drsnost vykazoval 3D vzorek, zatímco 3D+TZ dosahoval lepších hodnot a nejlepší kvalitu měl KON+TZ materiál. Tento jev je způsoben nižším adhezním ulpíváním materiálu na nástroji u tvrdších materiálů, což omezuje tvorbu nárůstků a plastický tok materiálu.

Celkově lze konstatovat, že při stejných řezných podmínkách byly dosaženy podobné hodnoty drsnosti bez ohledu na směr obrábění. Nejlepší povrchovou kvalitu poskytl KON+TZ materiál, následovaný 3D+TZ vzorkem, zatímco nejhorší drsnost byla naměřena u 3D materiálu.

Obrábění kolmo na tisknuté dráhy:

V případě, kdy byl materiál obráběn kolmo na 3D tištěné dráhy, docházelo při nižších řezných rychlostech k tvorbě nežádoucích vibrací vznikajících při výjezdu nástroje z řezu. Tyto vibrace se projevují horší kvalitou povrchu. V případě, kdy došlo k obrábění materiálu s vyšší tvrdostí (3D+TZ a KON+TZ) došlo také ke snížení množství vibrací při výjezdu nástroje z místa řezu. Pokud byl materiál obráběn při vyšší řezné rychlosti, tak byly vibrace více viditelné. V případě obrábění materiálu KON+TZ (nejvyšší tvrdost) za řezné rychlosti $110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je možné si všimnout, že na povrchu nejsou viditelné žádné stopy po obrábění, které by byly indukované vibracemi. Pokud byl materiál KON+TZ obráběn při nižší řezné rychlosti ($40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), tak je možné pozorovat protažené řezné dráhy při výjezdu nástroje z řezu. Lze tedy konstatovat, že vizuálně nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo při obrábění materiálu KON+TZ při maximálních řezných podmínkách. Jednotlivé dráhy, které vznikly po obrábění metodou kolmou, jsou porovnány v tabulce 16.

Tab. 16 Porovnání obrobených drah u jednotlivých vzorků při metodě kolmé.

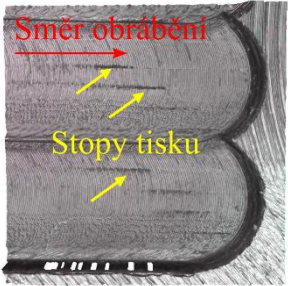
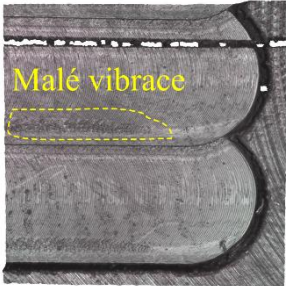
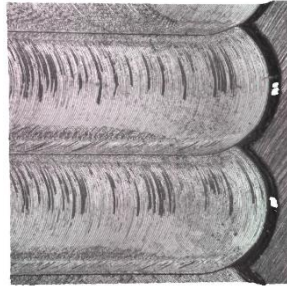
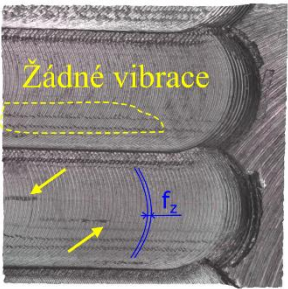
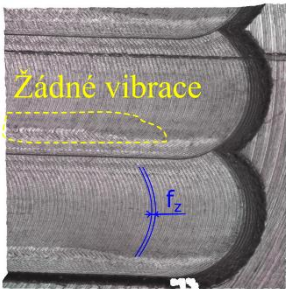
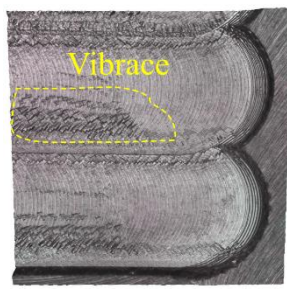
Vzorek	3D	3D+TZ	KON+TZ
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

Obrábění podél tisknutých drah:

V případě, kdy byl materiál obráběn podél 3D tištěných drah, docházelo při nižších řezných rychlostech k tvorbě nežádoucích vibrací vznikajících při výjezdu nástroje z řezu. Avšak ve srovnání s obráběním kolmo na směr drah jsou vibrace mnohem méně patrné. Rovněž byl pozorován menší počet protažených řezných drah při obrábění materiálu KON+TZ při nižších řezných podmínkách ($f_z = 0,01 \text{ mm}$; $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$). V případě, kdy došlo k obrábění materiálu s vyšší tvrdostí (3D+TZ a KON+TZ), došlo také ke snížení množství vibrací při výjezdu nástroje z místa řezu. Pokud byl materiál obráběn při vyšší řezné rychlosti, tak byly vibrace více viditelné. V případě obrábění materiálu KON+TZ (nejvyšší tvrdost) při řezné rychlosti $110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je možné si všimnout, že na povrchu jsou viditelné stopy po obrábění, které by byly indukované vibracemi. Tento jev může být způsobený tím, že tento test byl proveden jako poslední z dané série a nástroj už vykazoval známky opotřebení. Z tohoto důvodu

je možné, že vibrace na povrchu jsou projevem opotřebení nástroje. Lze tedy konstatovat, že vizuálně nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo při obrábění materiálu 3D a 3D+TZ při maximálních řezných podmínkách. Jednotlivé dráhy, které vznikly po obrábění metodou podélnou, jsou porovnány v tabulce 17.

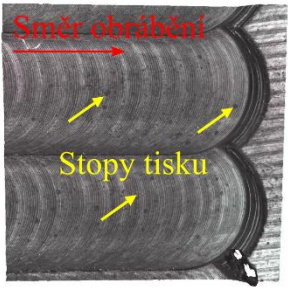
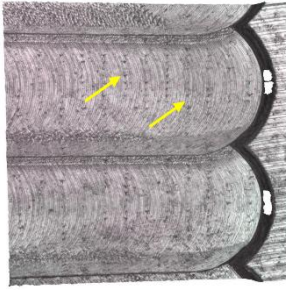
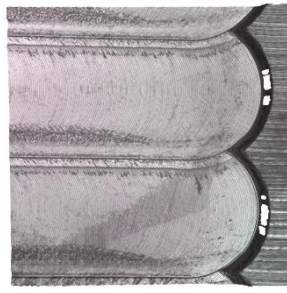
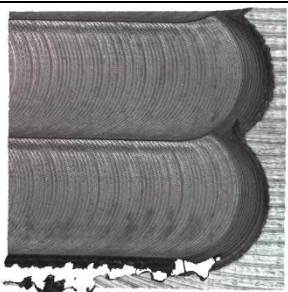
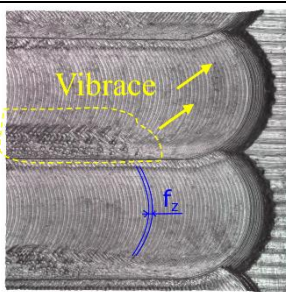
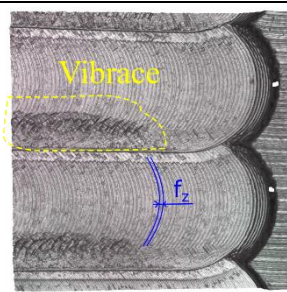
Tab. 17 Porovnání obrobených drah u jednotlivých vzorků při metodě podélné.

Vzorek	3D	3D+TZ	KON+TZ
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

Obrábění vertikálně ve směru tisknutých drah:

V případě, kdy byl materiál obráběn vertikálně ve směru 3D tištěných drah, tak téměř nedocházelo při nižších řezných rychlostech k tvorbě nežádoucích vibrací vznikajících při výjezdu nástroje z řezu. Co se týče protažených řezných drah při obrábění materiálu KON+TZ, ty nebyly pozorovány ani za minimálních, ani za maximálních řezných podmínek. V případě toho, kdy došlo k obrábění materiálu s vyšší tvrdostí (3D+TZ a KON+TZ), a za vyšších řezných podmínek ($f_z = 0,02 \text{ mm}$; $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), byly pozorovány vibrace při výjezdu nástroje z místa řezu. Lze tedy konstatovat, že vizuálně nejlepší kvality povrchu bylo dosaženo při obrábění materiálu 3D, 3D+TZ a KON+TZ při minimálních řezných podmínkách. Dále lze dojít k závěru, že v případě obrábění vertikálně ve směru tištěných drah vykazuje povrch ve srovnání s ostatními směry (kolmo a podél) vizuálně lepší jakost obrobeného povrchu pouze s minimálním množstvím vibrací. Jednotlivé dráhy, které vznikly po obrábění metodou vertikální, jsou porovnány v tabulce 18.

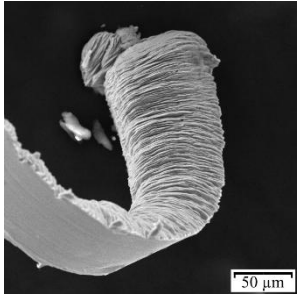
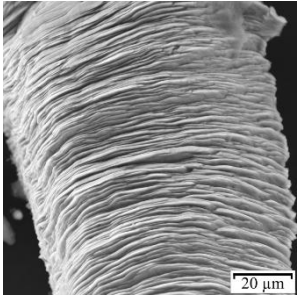
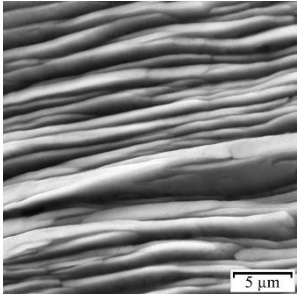
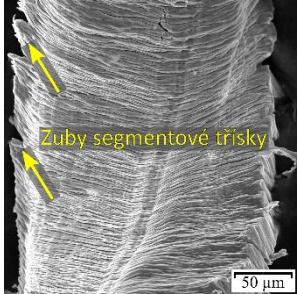
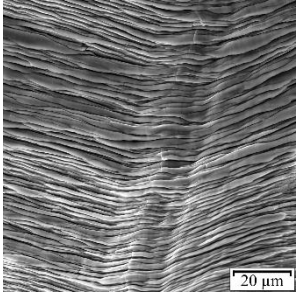
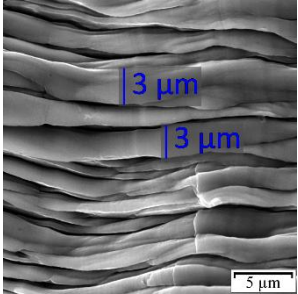
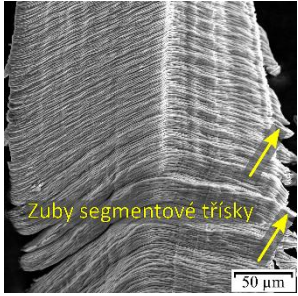
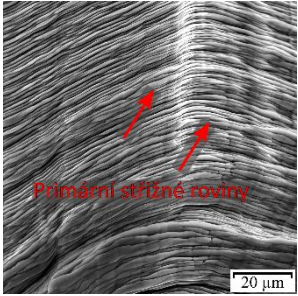
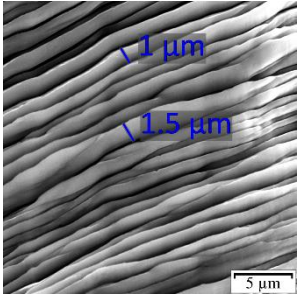
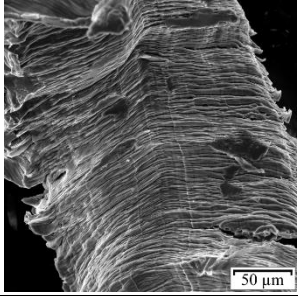
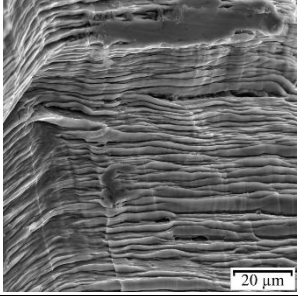
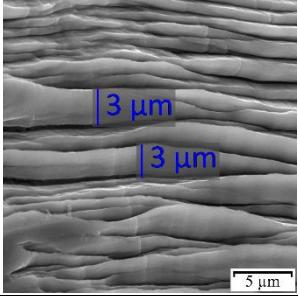
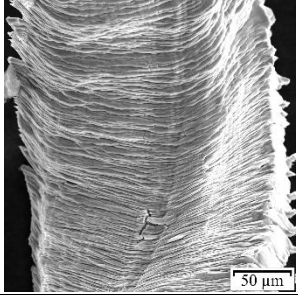
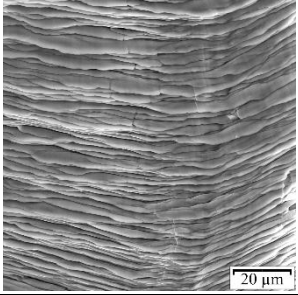
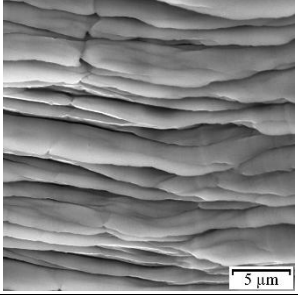
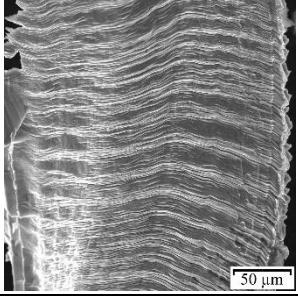
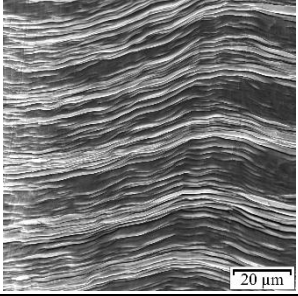
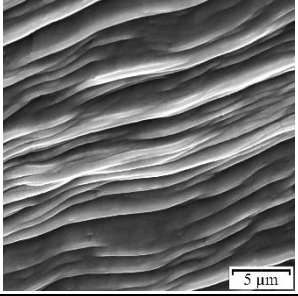
Tab. 18 Porovnání obrobených drah u jednotlivých vzorků při metodě vertikální.

Vzorek	3D	3D+TZ	KON+TZ
Minimální řezné podmínky $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,01 \text{ mm}$			
Maximální řezné podmínky $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ $f_z = 0,02 \text{ mm}$			

5.7.3 Z hlediska třísky

Při pohledu na obrázky v tabulce 19 tak je vidět, že ve většině případů docházelo k tvorbě segmentové třísky. Segmentová tříska se netvořila v případě obrábění 3D tištěného materiálu, a to z důvodu jeho nejnižší tvrdosti. Segmentová tříska je projevem vyšší tvrdosti materiálu. Dále je možné pozorovat, že v případě zvýšení řezné rychlosti docházelo k tvorbě zubů na tříse. Při detailním pohledu je možné rozpoznat, že na všech třískách jsou patrné primární střížné roviny jako projev formování třísky o čelo řezného nástroje. Vyšší řezná rychlost a posuv na zub vedou k tvorbě sekundárních střížných rovin, což je patrné u všech obrobených materiálů. K tomuto efektu dochází zejména kvůli intenzivnějšímu přechování na čele nástroje. Tyto sekundární roviny jsou projevem silných, úzce lokalizovaných plastických deformací. Výška jednotlivých segmentů třísky (na obrázcích s největším zvětšením) vykazuje klesající tendenci s rostoucí tvrdostí obrobeného materiálu. Dále je z fotografií uvedených v tab. 19 vidět, že s vyšší řeznou rychlostí dochází ke snižování vzdálenosti mezi primárními střížnými rovinami, a to z důvodu intenzivního přechování materiálu. Při pohledu na třísky, které vznikly při obrábění 3D tištěného materiálu, je možné pozorovat větší šířku třísky v případě zvýšení řezných podmínek. Tento fakt koresponduje především s navýšením posuvu na zub.

Tab. 19 Porovnání třísek po metodě obrábění kolmo u jednotlivých vzorků.

Minimální řezné podmínky – $v_c = 40 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; $f_z = 0,01 \text{ mm}$	3D vzorek			
	TZ+3D vzorek			
	KON+ TZ vzorek			
Maximální řezné podmínky – $v_c = 110 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; $f_z = 0,02 \text{ mm}$	3D vzorek			
	TZ+3D vzorek			
	KON+ TZ vzorek			

5.7.4 Z hlediska opotřebení nástrojů

Porovnáním naměřených hodnot opotřebení VB po obrábění jednotlivých vzorků (3D, 3D+TZ a KON+TZ) lze identifikovat rozdíly v zatížení nástroje mezi jednotlivými metodami obrábění. Nejvyšší opotřebení vedlejšího hřbetu bylo naměřeno u vzorku 3D při použití podélné metody (0,571 mm), zatímco u 3D+TZ vzorku a KON+TZ vzorku byla tato metoda v porovnání s ostatními šetrnější a dosahovala nižších hodnot opotřebení (0,175 mm a 0,228 mm). Naopak vertikální metoda způsobila největší opotřebení vedlejšího hřbetu u 3D+TZ vzorku (0,363 mm) a KON+TZ vzorku (0,297 mm), zatímco u 3D vzorku bylo nejvyšší opotřebení vedlejšího hřbetu pozorováno u podélné metody. Kolmá metoda se v opotřebení vedlejšího hřbetu pohybovala mezi těmito hodnotami, kde nejnižší hodnoty dosáhla u vzorku 3D (0,196 mm) a nejvyšší u 3D+TZ vzorku (0,258 mm).

V případě opotřebení hlavního hřbetu se nejvyšší hodnota vyskytla u KON+TZ vzorku při podélné metodě, kde dosáhla výrazně vyššího opotřebení (0,829 mm) než u ostatních vzorků. Naopak u 3D a 3D+TZ vzorku podélná metoda nevykazovala extrémní hodnoty opotřebení hlavního hřbetu (0,281 mm a 0,171 mm). Vertikální metoda byla ve většině případů nejšetrnější, protože u všech vzorků vedla k nejnižšímu opotřebení hlavního hřbetu (0,253 mm u 3D, 0,173 mm u 3D+TZ a 0,223 mm u KON+TZ). Kolmá metoda měla hodnoty opotřebení hlavního hřbetu vyrovnané napříč vzorky, přičemž nejvyšší hodnotu dosáhla u 3D vzorku (0,738 mm) a nejnižší u 3D+TZ vzorku (0,175 mm).

Celkově lze tedy pozorovat, že největší rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou patrné u podélného obrábění, které u vzorku 3D vedlo k největšímu opotřebení vedlejšího hřbetu a u vzorku KON+TZ k výrazně vyššímu opotřebení hlavního hřbetu. Vertikální metoda naopak vykazovala konzistentně nižší hodnoty opotřebení hlavního hřbetu u všech vzorků, avšak u vedlejšího hřbetu byla méně příznivá, zejména u 3D+TZ vzorku. Kolmá metoda se pohybovala mezi těmito extrémy, přičemž v některých případech byla šetrnější než podélná metoda, avšak nedosahovala konzistentně nízkých hodnot jako vertikální metoda u hlavního hřbetu.

5.7.5 Z hlediska struktury vzorků

Při porovnání struktury jednotlivých vzorků bylo zjištěno, že aditivně vyrobený vzorek bez tepelného zpracování vykazoval nejvyšší pórovitost ze všech zkoumaných materiálů. Póry vznikaly vlivem neúplného sintrovacího procesu a ve struktuře se objevovaly buď jako jednotlivé body, nebo jako pásové vady. Tato vysoká pórovitost negativně ovlivnila obrábění, protože způsobovala přerušovaný řez, vyštipování břitů nástroje a celkově snižovala jeho životnost.

Aditivně vyrobený vzorek po tepelném zpracování vykazoval oproti netepelně zpracovanému vzorku výrazné zlepšení struktury. Tepelné zpracování vedlo ke snížení pórovitosti a ke zhutnění materiálu, což se příznivě projevilo na kvalitě obrobeného povrchu. Pásové vady, které byly výrazné u vzorku bez tepelného zpracování, byly po tepelném zpracování méně patrné. Přesto však i po tomto procesu zůstala pórovitost vyšší než u konvenčně vyráběného materiálu.

Konvenčně vyrobený a tepelně zpracovaný vzorek měl nejkompaktnější strukturu ze všech hodnocených vzorků. Materiál obsahoval martenzitickou strukturu, která je charakteristická vysokou tvrdostí, a vykazoval minimální množství pórů. Tento výsledek je dán použitím tradiční technologie výroby, zejména válcováním a následným kalením, což vedlo k dosažení nejvyšší hustoty a homogenní struktury materiálu.

Z hlediska hloubky zpevněné vrstvy po obrábění bylo zjištěno, že všechny vzorky vykazovaly nárůst nanotvrdosti v oblasti blízké obrobenému povrchu. Největší hloubku zpevnění, přibližně

50 μm , měl aditivně vyrobený vzorek bez tepelného zpracování. To je způsobeno nižší základní tvrdostí materiálu, která umožnila větší plastickou deformaci. U aditivního vzorku po tepelném zpracování byla hloubka zpevněné vrstvy nižší, což odpovídá vyšší tvrdosti materiálu po tepelném zpracování a tím i jeho vyšší odolnosti proti plastické deformaci. Konvenčně vyrobený vzorek vykazoval podobnou hloubku zpevnění, přibližně 20 μm , což bylo dáno nejvyšší tvrdostí základního materiálu a jeho nejnižší schopností plastické deformace.

Celkově lze shrnout, že z hlediska kompaktnosti materiálu a minimální pórovitosti vykazoval nejlepší vlastnosti konvenčně vyrobený vzorek. Tepelné zpracování aditivního vzorku vedlo ke zlepšení struktury a snížení pórovitosti, ale kvalitou stále nedosahovalo úrovně konvenčního materiálu. Z hlediska hloubky zpevněné vrstvy po obrábění byla největší u aditivního vzorku bez tepelného zpracování, což odpovídá jeho nižší tvrdosti a vyšší schopnosti plastické deformace.

Porovnání struktury a vlastností vzorků lze shrnout následovně:

- 3D vzorek bez tepelného zpracování měl nejvyšší pórovitost a největší hloubku zpevněné vrstvy ($\sim 50 \mu\text{m}$), což vedlo ke zhoršeným podmínkám při obrábění.
- 3D vzorek po tepelném zpracování vykazoval sníženou pórovitost a zhutnění materiálu, ale stále nedosahoval kvality konvenčního materiálu; hloubka zpevnění byla nižší.
- Konvenčně vyrobený vzorek měl nejkompaktnější strukturu s minimální pórovitostí a nejvyšší tvrdost, což vedlo k nejnižší hloubce zpevněné vrstvy (15–20 μm).
- Z hlediska kvality materiálu vykazoval nejlepší výsledky konvenční vzorek, z hlediska schopnosti plastické deformace byl naopak nejvýraznější 3D vzorek bez tepelného zpracování.

ZÁVĚR

V praktické části této diplomové práce byla na základě zvolených kritérií vyhodnocována obrobitelnost oceli H13. Pro realizaci experimentu byly vyrobeny tři druhy vzorků – aditivně vyrobený, aditivně vyrobený s tepelným zpracováním a konvenčně vyrobený s tepelným zpracováním. Tyto vzorky byly obráběny třemi různými metodami (kolmou, podélnou a vertikální) vzhledem k tištěným drahám a směru válcování. Mezi hlavní dosažené výsledky pro jednotlivé vzorky lze zařadit následující:

Aditivně vyrobený materiál

Silové zatížení:

- Nejvyšší silové zatížení v osách x a z bylo zaznamenáno při obrábění podél tiskových drah, pravděpodobně kvůli vyšší materiálové soudržnosti v tomto směru. Při obrábění kolmo a vertikálně byly tyto síly nižší díky vyšší porozitě materiálu.
- Silové zatížení v ose y bylo obecně nižší než silové zatížení v osách x a z.
- Nejvyšší zatížení vznikalo při maximálním posuvu a nízké řezné rychlosti.
- Vyšší řezná rychlost vedla ke snížení silového zatížení vlivem teplotního odpevnění materiálu.

Topografie povrchu:

- Při nižších posuvech na zub za současného navýšení řezné rychlosti dochází ke zlepšení drsnosti povrchu
- Se zvyšujícím se posuvem na zub se zhoršuje drsnost povrchu.
- Směr obrábění neměl zásadní vliv na výslednou drsnost.
- Vizuálně nejlepší kvality povrchu byla dosažena při obrábění za maximálních řezných podmínek.

Opotřebení nástroje:

- Vertikální metodou se dosahovalo nejnižší opotřebení nástroje.
- Kolmá metoda vykazovala největší opotřebení na hlavním hřbetu.
- Podélná metoda vede k nejvyššímu opotřebení na vedlejším hřbetě.

Struktura:

- Materiál vykazoval vysokou pórovitost, kde byly patrné jednotlivé póry a pásy.
- Póry způsobují přerušovaný řez, vyštipování a křehký lom bříty.
- Zpevněná vrstva sahala do hloubky cca 50 μm , přičemž vyšší řezné podmínky vedly k větší plastické deformaci.

Aditivně vyrobený materiál s tepelným zpracováním

Silové zatížení:

- Nejvyšší silové zatížení v ose x bylo zaznamenáno při obrábění podél tiskových drah, a to u všech řezných podmínek, což je způsobeno vyšší soudržností materiálu v daném směru.
- Ostatní trendy odpovídají výsledkům u vzorku bez tepelného zpracování.

Topografie povrchu:

- Zvýšením posuvu na zub dochází ke zvýšení drsnosti povrchu.
- Obecně platí, že zvýšení řezné rychlosti vede ke zhoršení drsnosti povrchu.
- Nejlepší kvalita povrchu byla dosažena při vertikálním obrábění za minimálních řezných podmínek.
- Zvýšená tvrdost díky tepelnému zpracování vedla k omezení tvorby nárůstku a snížení ulpívání materiálu na čele nástroje.

Opotřebení nástroje:

- Při obrábění podélnou metodou dochází k nejnižšímu opotřebení vedlejšího hřbetu, zatímco při použití vertikální metody je naopak toto opotřebení největší.
- V případě opotřebení hlavního hřbetu jsou rozdíly mezi jednotlivými metodami minimální.

Struktura:

- Materiál se vyznačoval sníženou pórovitostí díky tepelnému zpracování, kde pásy byly již méně výrazné.
- Ve srovnání s 3D vzorkem se zde vyskytuje menší riziko přerušovaného řezu.
- Zpevněná vrstva dosahovala hloubky přibližně 20 μm , což je menší než u 3D vzorku v důsledku vyšší tvrdosti výchozího materiálu. Vyšší řezné podmínky opět vedly ke zvýšení nanotvrdosti.

Konvenčně vyrobený materiál s tepelným zpracováním**Silové zatížení:**

- Silové zatížení v ose x vykazovalo podobné hodnoty nezávisle na metodě obrábění, což je způsobeno tím, že v důsledku tepelného zpracování došlo k rekrytalizaci struktury a směr válcování již není patrný.

Topografie povrchu:

- Se zvyšujícím se posuvem na zub dochází ke zvýšení drsnosti povrchu.
- Obecně platí, že zvýšení řezné rychlosti vede ke zhoršení drsnosti povrchu.
- Vertikální metoda obrábění přinesla vizuálně nejkvalitnější povrch bez známek protažených řezných drah nebo vibrací, a to při jakýchkoli řezných podmínkách.
- Tyto vzorky vykazovaly nejnižší hodnoty drsnosti, což souvisí s vyšší tvrdostí materiálu, která omezila tvorbu nárůstků a ulpívání materiálu na čele nástroje.

Opotřebení nástroje:

- Vertikální metodou se dosahuje nejnižšího opotřebení hlavního hřbetu, zatímco největšího opotřebení vedlejšího hřbetu.
- Kolmá metoda vykazuje nejnižší opotřebení vedlejšího hřbetu a opotřebení hlavního hřbetu je na úrovni mezi vertikální a podélnou metodou.
- Podélná metoda způsobuje největší opotřebení hlavního hřbetu.

Struktura:

- Materiál byl charakteristický martenzitickou strukturou a nejnižší pórovitostí v důsledku výrobní metody pomocí válcování.
- Zpevněná vrstva se vyskytovala do hloubky přibližně 15–20 μm , což představovalo nejmenší hloubku plastické deformace kvůli nejvyšší tvrdosti výchozího materiálu.

Pro dosažení nízké drsnosti povrchu a snížení opotřebení nástroje se doporučuje obrábět vertikální metodou. V případě, že je preferováno dosažení přesných rozměrů a zamezení vzniku nárůstku i za cenu vyššího silového zatížení, se doporučuje obrábět materiál s vyšší tvrdostí. Pro dosažení nízké drsnosti povrchu a snížení opotřebení nástroje se doporučuje obrábět konvenčně vyrobený materiál s tepelným zpracováním. Pro zvýšení obrobitelnosti a prodloužení životnosti nástroje při obrábění aditivně vyrobeného materiálu se doporučuje zařadit tepelné zpracování, které snižuje pórovitost a tím i výskyt přerušovaného řezu. Pro dosažení nižší drsnosti povrchu je vhodné použít menší posuv na zub. V případě, že je potřeba snížit silové zatížení a je akceptovatelné mírné zhoršení drsnosti povrchu, je doporučeno zvýšit řeznou rychlost, která vede k teplotnímu odpevnění materiálu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŞIRIN, Tolga Berkay a Yusuf KAYNAK. Surface integrity and wear resistance of maraging steel produced by additive manufacturing direct metal laser sintering. *Journal of Advances in Manufacturing Engineering* [online]. 2020, **1**(3), 83 - 92 [cit. 2024-09-18]. Dostupné z: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jame/issue/65470/1011997>
- [2] TAN, Chaolin, Kesong ZHOU, Xin TONG, Yushan HUANG, Jing LI, Wenyou MA, Fuhai LI a Tongchun KUANG. Microstructure and Mechanical Properties of 18Ni-300 Maraging Steel Fabricated by Selective Laser Melting. In: *Advances in Engineering Research* [online]. Atlantis Press, 2016, s. 404-410 [cit. 2024-09-18]. ISBN 978-94-6252-249-7. ISSN 2352-5401. Dostupné z: doi:10.2991/icadme-16.2016.66
- [3] FEI, Jixiong, Guoliang LIU, Kaushalendra PATEL a Tuğrul ÖZEL. Effects of machining parameters on finishing additively manufactured nickel-based alloy inconel 625. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* [online]. Basel: MDPI, 2020, **4**(2), 32 [cit. 2024-09-16]. ISSN 2504-4494. Dostupné z: doi:10.3390/jmmp4020032
- [4] RAVAL, Parth, Deep PATEL, Ravikumar PRAJAPATI, Vishvesh BADHEKA, Munish Kumar GUPTA a Navneet KHANNA. Energy consumption and economic modelling of performance measures in machining of wire arc additively manufactured Inconel-625. *Sustainable Materials and Technologies* [online]. Elsevier B.V, 2022, **32**, e00434 [cit. 2024-09-16]. ISSN 2214-9937. Dostupné z: doi:10.1016/j.susmat.2022.e00434
- [5] ZIMMERMANN, Marco, Daniel MÜLLER, Benjamin KIRSCH, Sebastian GRECO a Jan C. AURICH. Analysis of the machinability when milling AlSi10Mg additively manufactured via laser-based powder bed fusion. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2021, **112**(3-4), 989-1005 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-06391-7
- [6] OZANER, Ozan Can, Angshuman KAPIL, Yuji SATO, et al. Dry and Minimum Quantity Lubrication Machining of Additively Manufactured IN718 Produced via Laser Metal Deposition. *Lubricants* [online]. Basel: MDPI, 2023, **11**(12), 523 [cit. 2024-09-16]. ISSN 2075-4442. Dostupné z: doi:10.3390/lubricants11120523
- [7] GRECO, Sebastian, Marc SCHMIDT, Katja KLAUER, Benjamin KIRSCH a Jan C. AURICH. Hybrid manufacturing: influence of material properties during micro milling of different additively manufactured AISI 316L. *Production engineering (Berlin, Germany)* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, **16**(6), 797-809 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-022-01139-6
- [8] CHEN, Liyong, Qingzhong XU, Yan LIU, Gangjun CAI a Jichen LIU. Machinability of the laser additively manufactured Inconel 718 superalloy in turning. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2021, **114**(3-4), 871-882 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-06940-8
- [9] IMBROGNO, Stano, Sergio RINALDI, Antonio RASO, Alberto BORDIN, Stefania BRUSCHI a Domenico UMBRELLO. 3D FE simulation of semi-finishing machining of Ti6Al4V additively manufactured by direct metal laser sintering. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. Palermo: Esaform, 2018, s. 23-25 [cit. 2024-09-16]. ISBN 073541663X. ISSN 0094-243X. Dostupné z: doi:10.1063/1.5034910

- [10] DURO, Miguel, Tiago SILVA, Maria José MARQUES, António BATISTA, Pedro ROSA a Abílio DE JESUS. Influence of post-processing milling conditions on the machinability and residual stresses evolution of LPBF 18Ni300 maraging steel. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2023, **127**(5-6), 2287-2297 [cit. 2024-09-17]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-023-11492-0
 - [11] DU, Wei, Qian BAI a Bi ZHANG. Machining characteristics of 18Ni-300 steel in additive/subtractive hybrid manufacturing. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2018, **95**(5-8), 2509-2519 [cit. 2024-09-18]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-1364-0
 - [12] SANGUEDOLCE, Michela, Giovanna ROTELLA a Luigino FILICE. On the Effects of Burnishing Process on Tribological Surface Resistance of Additively Manufactured Steel. *ESAFORM 2021 | 24th International Conference on Material Forming* [online]. Université de Liège, 2021 [cit. 2024-09-17]. Dostupné z: doi:10.25518/esaform21.1903
 - [13] UÇAK, Necati, Adem ÇİÇEK a Kubilay ASLANTAS. Machinability of 3D printed metallic materials fabricated by selective laser melting and electron beam melting: A review. *Journal of manufacturing processes* [online]. Elsevier, 2022, **80**, 414-457 [cit. 2024-10-16]. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2022.06.023
 - [14] GODARA, Mohit, Jino JOSHY, Basil KURIACHEN a Jose MATHEW. Experimental analysis on the effect of build directions during microdrilling of SLM fabricated maraging steel (18-Ni-300). *Progress in additive manufacturing* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2024, **9**(4), 733-752 [cit. 2024-09-18]. ISSN 2363-9512. Dostupné z: doi:10.1007/s40964-023-00478-9
 - [15] TASCIOGLU, Emre, Hamaid Mahmood KHAN, Yusuf KAYNAK, Mert COŞKUN, Gurkan TARAKCI a Ebubekir KOÇ. Effect of aging and finish machining on the surface integrity of selective laser melted maraging steel. *Rapid prototyping journal* [online]. Bradford: Emerald Publishing Limited, 2021, **27**(10), 1900-1909 [cit. 2024-09-18]. ISSN 1355-2546. Dostupné z: doi:10.1108/RPJ-11-2020-0269
 - [16] BAI, Yuchao, Cuiling ZHAO, Jin YANG, Ruochen HONG, Can WENG a Hao WANG. Microstructure and machinability of selective laser melted high-strength maraging steel with heat treatment. *Journal of materials processing technology* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2021, **288**, 116906 [cit. 2024-09-18]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2020.116906
 - [17] CROCCOLO, Dario, Massimiliano DE AGOSTINIS, Stefano FINI, Giorgio OLMI, Francesco ROBUSTO, Snežana ĆIRIĆ-KOSTIĆ, Slobodan MORAČA a Nebojša BOGOJEVIĆ. Sensitivity of direct metal laser sintering Maraging steel fatigue strength to build orientation and allowance for machining. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures* [online]. HOBOKEN: Wiley, 2019, **42**(1), 374-386 [cit. 2024-09-18]. ISSN 8756-758X. Dostupné z: doi:10.1111/ffe.12917
 - [18] KHANNA, Navneet, Kishan ZADAFIYA, Tej PATEL, Yusuf KAYNAK, Rizwan Abdul RAHMAN RASHID a Ana VAFADAR. Review on machining of additively manufactured nickel and titanium alloys. *Journal of materials research and technology* [online]. Elsevier B.V., 2021, **15**, 3192-3221 [cit. 2024-09-16]. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2021.09.088
-

-
- [19] PATEL, Kaushalendra, Jixiong FEI, Guoliang LIU a Tuğrul ÖZEL. Milling investigations and yield strength calculations for nickel alloy Inconel 625 manufactured with laser powder bed fusion process. *Production engineering (Berlin, Germany)* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, **13**(6), 693-702 [cit. 2024-09-17]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-019-00922-2
- [20] GRECO, Sebastian, Marc SCHMIDT, Katja KLAUER, Benjamin KIRSCH a Jan C. AURICH. Hybrid manufacturing: influence of material properties during micro milling of different additively manufactured AISI 316L. *Production engineering (Berlin, Germany)* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2022, **16**(6), 797-809 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-022-01139-6
- [21] FONSECA, Pedro P., Catarina VIDAL, Francisco FERREIRA, Valdemar R. DUARTE, Tiago A. RODRIGUES, Telmo G. SANTOS a Carla M. MACHADO. Orthogonal cutting of Wire and Arc Additive Manufactured parts. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2022, **119**(7-8), 4439-4459 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-022-08678-3
- [22] MILTON, Samuel, Antoine MORANDEAU, Florent CHALON a Rene LEROY. Influence of Finish Machining on the Surface Integrity of Ti6Al4V Produced by Selective Laser Melting. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2016, **45**, 127-130 [cit. 2024-09-18]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.02.340
- [23] SUN, Z.P., Y.B. GUO a V.P.W. SHIM. Influence of printing direction on the dynamic response of additively-manufactured polymeric materials and lattices. *International journal of impact engineering* [online]. Oxford: Elsevier, 2022, **167**, 104263 [cit. 2024-09-16]. ISSN 0734-743X. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijimpeng.2022.104263
- [24] WANG, Bing a Zhanqiang LIU. Cutting performance of solid ceramic end milling tools in machining hardened AISI H13 steel. *International journal of refractory metals & hard materials* [online]. OXFORD: Elsevier, 2016, **55**, 24-32 [cit. 2025-05-09]. ISSN 0263-4368. Dostupné z: doi:10.1016/j.jrmhm.2015.11.004
- [25] ABU BAKAR, H.N., J.A. GHANI, C.H. Che HARON, M.J. GHAZALI, M.S. KASIM, S. AL-ZUBAIDI a N. JOUINI. Wear mechanisms of solid carbide cutting tools in dry and cryogenic machining of AISI H13 steel with varying cutting-edge radius. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2023, **523**, 204758 [cit. 2025-05-09]. ISSN 0043-1648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2023.204758
- [26] MONTEVECCHI, Filippo, Niccolò GROSSI, Hisataka TAKAGI, Antonio SCIPPA, Hiroyuki SASAHARA a Gianni CAMPATELLI. Cutting Forces Analysis in Additive Manufactured AISI H13 Alloy. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2016, **46**, 476-479 [cit. 2025-05-09]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.04.034
- [27] KOLOMY, Stepan, Martin MALY, Josef SEDLAK, Jan ZOUHAR, Martin SLANY, Pavel HRABEC a Karel KOURIL. Machinability of extruded H13 tool steel: Effect of cutting parameters on cutting forces, surface roughness, microstructure, and residual stresses. *Alexandria engineering journal* [online]. Elsevier B.V, 2024, **99**, 394-407 [cit. 2025-05-09]. ISSN 1110-0168. Dostupné z: doi:10.1016/j.aej.2024.05.018
- [28] YANG, Li, Keng HSU, Brian BAUGHMAN, Donald GODFREY, Francisco MEDINA, Mamballykalathil MENON a Soeren WIENER. *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production* [online]. Cham: Springer Nature, 2017, 1 s. [cit. 2025-05-18]. ISBN 9783319551289. ISSN 1860-5168. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-55128-9
-

-
- [29] Types of 3D Printing in Metal: Types of 3D Printing in Metal. In: *Markforged* [online]. 2024 [cit. 2024-09-23]. Dostupné z: <https://markforged.com/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal>
- [30] Přehled technologií 3D tisku. In: *Dk metal* [online]. 2022 [cit. 2024-09-24]. Dostupné z: <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/prehled-technologie-3d-tisku>
- [31] MCCLEMENTS, Dean a Aaron LICHTIG. 4 Types of Metal 3D Printing Processes and Their Materials. In: *Xometry* [online]. 2024 [cit. 2024-09-24]. Dostupné z: <https://www.xometry.com/resources/3d-printing/types-of-metal-3d-printing/>
- [32] 3D tisk z kovů. In: *MCAE* [online]. 2024 [cit. 2024-09-24]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/sluzby/3d-tisk-z-kovu/>
- [33] Selective Laser Sintering (SLS). In: *ONE3D* [online]. 2024 [cit. 2024-09-25]. Dostupné z: <https://www.one3d.cz/technologie/detail/selective-laser-sintering-sls/>
- [34] SLM (Selective Laser Melting): Jak tato technologie 3D tisku funguje? Jak vznikla a kam spěje? Pro koho je určena? Jaké jsou její výhody a nevýhody? In: *Cotu* [online]. 2024 [cit. 2024-09-25]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/118/slm-selective-laser-melting>
- [35] YADROITSEV, I. a I. SMUROV. Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape. In: *Physics Procedia* [online]. Elsevier B.V., 2010, s. 551-560 [cit. 2024-09-25]. ISSN 1875-3892. Dostupné z: doi:10.1016/j.phpro.2010.08.083
- [36] SLM. In: *3D-tisk.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-09-25]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/wiki/slm/>
- [37] FAYED, Eslam M., Mohammad SAADATI, Davood SHAHRIARI, Vladimir BRAILOVSKI, Mohammad JAHAZI a Mamoun MEDRAJ. Effect of homogenization and solution treatments time on the elevated-temperature mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by laser powder bed fusion. *Scientific reports* [online]. England: Nature Publishing Group, 2021, **11**(1), 2020-2020 [cit. 2024-09-25]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-021-81618-5
- [38] GIBSON, Ian, David ROSEN, Brent STUCKER a Mahyar KHORASANI. *Additive Manufacturing Technologies* [online]. Third Edition. Springer, 2021 [cit. 2024-09-25]. ISBN 978-3-030-56127-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-56127-7_8
- [39] SVETLIZKY, David, Mitun DAS, Baolong ZHENG, et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials today (Kidlington, England)* [online]. Elsevier, 2021, **49**, 271-295 [cit. 2024-09-25]. ISSN 1369-7021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2021.03.020
- [40] AHN, Dong-gyu. Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* [online]. Seoul: Korean Society for Precision Engineering, 2021, **8**(2), 703-742 [cit. 2024-09-25]. ISSN 2288-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s40684-020-00302-7
- [41] About Additive Manufacturing: Directed Energy Deposition. In: *Loughborough University* [online]. 2023 [cit. 2024-09-25]. Dostupné z: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/directedenergydeposition/>
-

- [42] FDM (Fused deposition modeling): How did the most widespread 3D printing technology come about and what are the trends in it? Read more. In: *Cotu* [online]. 2024 [cit. 2024-09-26]. Dostupné z: <https://www.cotu.cz/en/blog/134/fdm-fused-deposition-modeling>
 - [43] SAI, P. Chennakesava a Yeole SHIVRAJ NARAYAN. Fused Deposition Modeling - Insights. In: *International Conference on Advances in Design and Manufacturing* ([online]. Bonfring, 2024, s. 1345-1350 [cit. 2024-09-26]. ISBN 978-93-84743-12-3. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Shivraj-Narayan-Yeole/publication/269702639_Fused_Deposition_Modeling_-_Insights/links/5493dd010cf22d7925da3c6c/Fused-Deposition-Modeling-Insights.pdf
 - [44] Deep Dive: Bound Metal Deposition (BMD): What is BMD? In: *Desktop Metal* [online]. Burlington, 2022 [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://www.desktopmetal.com/resources/deep-dive-bmd>
 - [45] What is Bound Metal Deposition (BMD)? In: *Cimquest* [online]. 2023 [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://cimquest-inc.com/what-is-bound-metal-deposition-bmd/>
 - [46] A Closer Look at Bound Metal Deposition™: Deep Dive: Bound Metal Deposition™. In: *Proto 3000* [online]. 2018 [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://proto3000.com/3d-printing/metal-3d-printing/deep-dive-bound-metal-deposition/>
 - [47] Bound Metal Deposition from Desktop Metal: BMD 3D Printing Technology Overview. In: *Proto 3000* [online]. 2024 [cit. 2024-09-30]. Dostupné z: <https://proto3000.com/service/3d-printing-services/technologies/bound-metal-deposition-2/>
 - [48] BASAK, Animesh K., Alokesh PRAMANIK, Yeong X. CHEN, Chander PRAKASH, N. RADHIKA a S. SHANKAR. Bound metal deposition of stainless steel 316L: Effect of process variables on microstructural and mechanical behaviors. *Materialia* [online]. Elsevier B.V, 2024, **36**, 102196 [cit. 2024-09-26]. ISSN 2589-1529. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtla.2024.102196
 - [49] GABILONDO, Maitane, Xabier CEARSOLO, Mario ARRUE a Francisco CASTRO. Influence of Build Orientation, Chamber Temperature and Infill Pattern on Mechanical Properties of 316L Parts Manufactured by Bound Metal Deposition. *Materials* [online]. Switzerland: MDPI, 2022, **15**(3), 1183 [cit. 2024-09-30]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15031183
 - [50] IACOPO, Bianchi, Di Pompeo VALERIO, Mancina TOMMASO, Pieralisi MASSIMILIANO a Vita ALESSIO. Environmental impacts assessment of Bound Metal Deposition 3D printing process for stainless steel. *Procedia CIRP* [online]. Elsevier B.V, 2022, **105**, 386-391 [cit. 2024-09-30]. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2022.02.064
 - [51] FORCELESE, Pietro, Tommaso MANCIA, Michela SIMONCINI a Tiziano BELLEZZE. Investigation on Corrosion Resistance Properties of 17-4 PH Bound Metal Deposition As-Sintered Specimens with Different Build-Up Orientations. *Metals (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2022, **12**(4), 588 [cit. 2024-10-15]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met12040588
 - [52] DI POMPEO, Valerio, Eleonora SANTECCHIA, Alberto SANTONI, Kamal SLEEM, Marcello CABIBBO a Stefano SPIGARELLI. Microstructure and Defect Analysis of 17-4PH Stainless Steel Fabricated by the Bound Metal Deposition Additive Manufacturing Technology. *Crystals (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2023, **13**(9), 1312 [cit. 2024-10-15]. ISSN 2073-4352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst13091312
-

-
- [53] GABILONDO, Maitane, Xabier CEARSOLO, Mario ARRUE a Francisco CASTRO. Influence of Build Orientation, Chamber Temperature and Infill Pattern on Mechanical Properties of 316L Parts Manufactured by Bound Metal Deposition. *Materials* [online]. Switzerland: MDPI, 2022, **15**(3), 1183 [cit. 2024-10-15]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15031183
- [54] PRUSA, Josef. Vzory výplně. In: *Prusa research* [online]. 2024 [cit. 2024-10-15]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vzory-vyplne_177130
- [55] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *VÝROBNÍ TECHNOLOGIE II: Obrábění*. Cerm, 2002. ISBN 80-214-2189-4.
- [56] HUMÁR, Anton. TECHNOLOGIE I: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část. In: *Ústav strojírenské technologie* [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE, 2003 [cit. 2024-10-22]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf
- [57] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění. 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000, 81 s. ISBN 80-01-02-091-6.
- [58] SKOPEČEK, Tomáš. Vliv vybraných parametrů procesu na řezné síly při HSC. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 2002 [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-vybranych-parametru-procesu-na-rezne-sily-pri-hsc>
- [59] DE VOS, Patrick. Příručka pro technology - Jak je to s řeznými silami? In: *Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-je-to-s-reznymi-silami>
- [60] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, 146 s. [cit. 2024-11-12]. ISBN 978-80-248-2533-5. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Experimentalni_metody_%20v_obrabeni.pdf
- [61] BRYCHTA, Josef, Robert ČEP, Marek SADÍLEK, Lenka PETŘKOVSKÁ a Jana NOVÁKOVÁ. *NOVÉ SMĚRY V PROGRESIVNÍM OBRÁBĚNÍ: učební text* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007, 251 s. [cit. 2024-11-12]. ISBN 978-80-248-1505-3. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/texty.pdf>
- [62] KOLÁŘ, Petr. Výzkum vlivu opotřebení řezného nástroje na velikost řezných sil. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyzkum-vlivu-opotrebeni-rezneho-nastroje-na-velikost-reznych-sil>
- [63] KNAPP, Jiří. *Experimentální měření řezných sil pro zjišťování řezného odporu* [online]. Plzeň, 2022 [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://naos-be.zcu.cz/server/api/core/bitstreams/720c1ed3-3fca-444e-911a-d9597e0d3fc2/content>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Josef SKLENIČKA.
- [64] Geometrie břitu obecně. In: *Tumlikovo* [online]. 2011 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/geometrie-britu-obecne/#more-2827>
- [65] GAZDA, Jaromín. *Teorie obrábění: Řezné síly při obrábění*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 1993, 123 s. ISBN 80-7083-110-3.
-

-
- [66] KUDELA, Miroslav. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Sandvik CZ, 1997, 800 s. ISBN 80-238-2222-5.
- [67] ZEMAN, Petr. *Měření užitečného výkonu při podélném soustružení* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2024-11-18]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/server/api/core/bitstreams/a9cfa0d5-65e7-4414-89e8-91b98279c715/content>. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jan Jersák.
- [68] Měření struktury povrchu. In: *Accretech* [online]. 2019 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>
- [69] Měření drsnosti povrchu - Drsnoměry Profiloměry. In: *Proinex Instruments* [online]. 2022 [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/a/mereni-drsnosti-povrchu-drsnomery-profilomery>
- [70] KOVÁŘ, Jiří. Ovlivnění kvality a jakosti obrobené plochy při frézování. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 2004 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/ovlivneni-kvality-a-jakosti-obrobene-plochy-pri-frezovani>
- [71] Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obrobených součástí. In: *Sandvik Coromant* [online]. 2024 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>
- [72] Drsnost obrobeného povrchu. In: *Tumlikovo* [online]. 2011 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>
- [73] Rychlost posuvu vs. řezná rychlost: Podrobné vysvětlení jejich rozdílů v obrábění. In: *AT machining* [online]. 2024 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://at-machining.com/cs/feed-rate-vs-cutting-speed/>
- [74] KOLESA, Ivan. Frézování. In: *Sous Vodňany* [online]. 2022 [cit. 2024-10-31]. Dostupné z: https://www.sousvodnany.cz/zet/File/drop/odv_s2.a_2_05_frezovani-1610373585.pdf
- [75] Pět kroků, jak udržet třísky pod kontrolou. In: *Strojirenstvi.cz* [online]. Seco Tools CZ, 2022 [cit. 2024-11-19]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/pet-kroku-jak-udrzet-trisky-pod-kontrolou/>
- [76] ZETEK, Miroslav, Helena ZÍDKOVÁ a Ivana ČESÁKOVÁ. VLIV TVARU ŘEZNÉ HRANY NÁSTROJE NA PRŮBĚH ŘEZNÉHO PROCESU. In: *Mercel Czech republic* [online]. University of West Bohemia in Pilsen, 2009 [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: https://www.mercel.cz/mercelcz_files/drsnost_povrchu.pdf
- [77] Komplexní hodnocení jakosti povrchu. In: *Průmyslové spektrum* [online]. 2014 [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/komplexni-hodnoceni-jakosti-povrchu>
- [78] Měření a kontrola. In: *Hofmeister* [online]. 2016 [cit. 2024-11-20]. Dostupné z: <https://www.hofmeister.cz/sluzby/kontrola/>
- [79] KOPECKÁ, Jitka a Petra ŠALAMÚNOVÁ. *Elektronová mikroskopie – [EM]* [online]. Praha, 2024 [cit. 2024-11-21]. Dostupné z: <https://nano.vscht.cz/wp-content/uploads/navody/charakterizace/EM.pdf>. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.
- [80] VF-2SSYT. In: *Haas F1 Team* [online]. 2025 [cit. 2025-02-17]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ssyt.html>
-

- [81] NANDWANA, Peeyush, Rangasayee KANNAN a Derek SIDDEL. Microstructure evolution during binder jet additive manufacturing of H13 tool steel. *Additive manufacturing* [online]. United States: Elsevier B.V, 2020, **36**, 101534 [cit. 2025-04-26]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2020.101534

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole

Označení	Legenda	Jednotka
a_e	šířka radiálního záběru ostří	[mm]
a_p	šířka záběru ostří	[mm]
F_x	složka síly v ose x	[N]
F_y	složka síly v ose y	[N]
F_z	složka síly v ose z	[N]
f_z	posuv na zub	[mm]
Ra	průměrná aritmetická úchylka profilu	[μ m]
Rz	největší výška profilu	[μ m]
VB	opotřebení břitu nástroje	[mm]
v_c	řezná rychlost	[m·min ⁻¹]

Zkratky

Označení	Legenda
3D	aditivně vyrobený vzorek
3D+TZ	aditivně vyrobený s tepelným zpracováním vzorek
AM	Additive Manufacturing (aditivní technologie/výroba)
ASHM	Additive/Subtractive Hybrid Manufacturing
BJ	Binder Jetting
BMD	Bound Metal Deposition
CNC	Computer Numerical Control
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMP	Direct Metal Printing
DoE	plánovaný experiment
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
HF-WAAM	Hot Forging Wire and Arc Additive Manufacturing
KON+TZ	konvenčně vyrobený vzorek
LAM	Laser Additive Manufacturing
LMD	Laser Metal Deposition
L-PBF	Laser Powder Bed Fusion
MIM	Metal Injection Molding
MIG	Metal Inert Gas
MQL	Minimum Quantity Lubrication
PBF	Powder bed fusion
PLA	polylaktid (kyselina polymléčná)
Re	mez kluzu
SE	Secondary Electrons
SK	slinutý karbid
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
S-N-O-P	stroj – nástroj – obrobek – přípravek
SSR	the scan strategy layer-to-layer stripe rotation (otáčení materiálu mezi nanášením jednotlivých vrstev)
TZ	tepelné zpracování
VBD	vyměnitelná břitová destička
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Technické specifikace obráběcí centra Haas Super-Speed VF-2SSYT

DRÁHY POJEZDU

	S.A.E	METRIC
Osa X	30.00 in	762 mm
Osa Y	20.00 in	508 mm
Osa Z	20.00 in	508 mm
Vzdálenost od čela vřetena ke stolu (~ max.)	24.0 in	610 mm
Vzdálenost od čela vřetena ke stolu (~ min.)	4.0 in	102 mm

SPINDLE

	S.A.E	METRIC
Max. výkon	30.0 hp	22.4 kW
Max. rychlost	12000 rpm	12000 rpm
Max. krouticí moment	90.0 ft-lbf @ 2000 rpm	122.0 Nm @ 2000 rpm
Hnací systém	Inline Direct-Drive	Inline Direct-Drive
Kužel	CT40 BT40 HSK- A63	CT40 BT40 HSK-A63
Mazání ložisek	Air / Oil Injection	Air / Oil Injection
Chlazení	Liquid Cooled	Liquid Cooled

FEEDRATES

	S.A.E	METRIC
Max. obrábění	833 ipm	21.2 m/min
Rychloposuv na X	1400 ipm	35.6 m/min
Rychloposuv na Y	1400 ipm	35.6 m/min
Rychloposuv na Z	1400 ipm	35.6 m/min

STŮL	S.A.E	METRIC
Délka	36.0 in	914 mm
Šířka	18.0 in	457 mm
Šířka T-drážek	0.626 in to 0.630 in	15.90 mm to 16.00 mm
Vzdálenost T-drážek od středu	4.92 in	125 mm
Počet standardních T-drážek	3	3
Max. zatížení stolu (rovnoměrně rozložené)	1500 lb	680 kg

AXIS MOTORS	S.A.E	METRIC
Max. síla X	1995 lbf	8874 N
Max. síla Y	1995 lbf	8874 N
Max. síla Z	3085 lbf	13723 N

TOOL CHANGER	S.A.E	METRIC
Typ	SMTC	SMTC
Kapacita	30+1	30+1
Max. průměr nástroje (plný)	2.5 in	64 mm
Max. průměr nástroje (vedlejší prázdný)	5.4 in	127 mm
Max. délka nástroje (od kalibrované čáry)	11 in	279 mm
Max. hmotnost nástroje	12.0 lb	5.0 kg
Nástroj k nástroji (prům.)	1.80 s	1.80 s
Tříška-tříška (prům.)	2.40 s	2.40 s

VŠEOBECNĚ**S.A.E****METRIC**

Objem chladicí kapaliny

55 gal

208 L

AIR REQUIREMENTS**S.A.E****METRIC**

Air Required†

4 scfm @ 100 psi

113 L/min @ 6.9 bar

Přímá vzduchová hadice

3/8 in

3/8 in

Spojka (vzduchová)

3/8 in

3/8 in

Min. tlak vzduchu

80 psi

5.5 bar

**ELECTRICAL
SPECIFICATION****S.A.E****METRIC**

Rychlost vřetena

12000 rpm

12000 rpm

Hnací systém

Inline Direct-Drive

Inline Direct-Drive

Výkon vřetena

30.0 hp

22.4 kW

Vstupní střídavé napětí (3 fáze) –
nízké

220 VAC

220 VAC

Jmenovitý odběr (3 fáze) – nízký

70 A

70 A

Input AC Voltage (3 Phase) -
High*

440 VAC

440 VAC

Full Load Amps (3 Phase) -
High*

35 A

35 A