

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 Strojní inženýrství

**Studijní specializace:** Strojírenská technologie – technologie obrábění

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Porovnání obrobitelnosti konvenčního Inconelu a 3D tištěného  
Inconelu 718**

**Autor:** Michal Straka

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Povolný

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal STRAKA**  
Osobní číslo: **S22B0348P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**  
Téma práce: **Porovnání obrobitelnosti konvenčního Inconelu a 3D tištěného Inconelu 718**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

## Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky
2. Analýza současného stavu
3. Návrh experimentu obrábění
4. Vyhodnocení
5. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Mádl, J.: Teorie obrábění. Praha, ČVUT 2002
- Humár, A.: Technologie I Technologie obrábění – 2. část Brno, VUT 2004
- Elektronické informační zdroje dostupné z [www.knihovna.zcu.cz](http://www.knihovna.zcu.cz)
- Science direct, dostupné z <http://www.sciencedirect.com>
- Scopus, dostupné z <http://www.scopus.com>
- SpringerLink, dostupné z <http://www.springerlink.com>
- MM průmyslové spektrum, dostupné z [www.mmspektrum.com](http://www.mmspektrum.com)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Povolný**  
Katedra technologie obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Ondřej Maršálek**  
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Jan Řehoř, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Povolnému za jeho odborné vedení, čas a ochotu poskytnutou při konzultacích a trpělivost při tvorbě mé práce.

## ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Straka	<b>Jméno</b> Michal	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Povolný	<b>Jméno</b> Michal	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST – KTO		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Porovnání obrobiteľnosti konvenčního Inconelu a 3D tištěného Inconelu 718		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KTO	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	50	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	50	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Cílem této práce je poskytnout poznatky v oblasti obrobiteľnosti 3D tištěného materiálu Inconel 718 ve srovnání s konvenčně vyrobenou variantou tohoto materiálu. V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti a mikrostruktura Inconelu 718 a vysvětleny parametry 3D tisku, které ovlivňují konečné vlastnosti tištěných součástí. Popsány jsou také významné rozdíly mezi vlastnostmi 3D tištěného a konvenčního materiálu. V experimentální části práce je analyzován průběh řezných sil, opotřebení řezného nástroje a drsnosti obrobeného povrchu, tak aby bylo možné objektivně porovnat obrobiteľnost obou materiálů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Aditivní výroba, 3D tisk, Inconel 718, Obrábění, Obrobiteľnost, DMLS

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Straka	Name Michal		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Povolný	Name Michal		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS			
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Machinability comparison of conventional Inconel and 3D printed Inconel 718			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KTO	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	50	<b>TEXT PART</b>	50	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The aim of this thesis is to provide insights into the machinability of 3D printed Inconel 718 compared to a conventionally manufactured version of this material. The theoretical part of the thesis describes the properties and microstructure of Inconel 718 and explains the 3D printing parameters that affect the final properties of the printed parts. Significant differences between the properties of the 3D printed and conventional material are also described. In the experimental part of the thesis, the progression of cutting forces, cutting tool wear and roughness of the machined surface is analyzed so that the machinability of both materials can be objectively compared.
<b>KEY WORDS</b>	Additive Manufacturing, 3D Printing, Inconel 718, Machining, Machinability, DMLS

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	11
1 Úvod do problematiky.....	12
1.1 Cíl práce.....	13
2 Současný stav znalostí o Inconelu 718.....	14
2.1 Inconel 718 .....	14
2.1.1 Složení Inconelu 718.....	14
2.1.2 Mikrostruktura Inconelu 718.....	14
2.2 Tištěný Inconel 718 .....	15
2.2.1 Parametry tisku.....	15
2.2.2 Mikrostruktura.....	17
2.2.3 Porovnání vlastností .....	19
2.2.4 Tepelné zpracování .....	20
3 Problematika obrábění Inconelu 718.....	21
3.1 Metody obrábění Inconelu 718.....	22
3.2 Druhy řezných materiálů .....	23
3.3 Řezné prostředí .....	25
4 Návrh experimentu obrábění.....	27
4.1 Zkušební materiál .....	27
4.2 Obráběcí stroj .....	28
4.3 Nástroj .....	29
4.4 Zařízení použité pro vyhodnocení .....	30
4.4.1 Měření drsnosti.....	30
4.4.2 Měření opotřebení .....	31
4.4.3 Měření řezných sil.....	31
5 Průběh experimentu.....	33
6 Vyhodnocení experimentu .....	35
6.1 Vyhodnocení opotřebení.....	35
6.2 Vyhodnocení řezných sil .....	39
6.3 Vyhodnocení měření drsnosti .....	41
6.4 Zhodnocení výsledků.....	44
7 Závěr.....	46



## **Přehled použitých zkratk a symbolů**

ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
KTO	Katedra technologie obrábění
MQL	Minimum quantity lubrication
DMLS	Direct metal laser sintering
SLM	Selective laser melting
KNB	Kubický nitrid boru
PKD	Polykrystalický diamant
HSS	High speed steel
CNC	Computer numeric control
VBD	Vyměnitelná břitová destička

## Seznam obrázků

Obrázek 1 (a) Vzdálenost mezi šrafy, (b) Strategie vrstev, (c) Rotace vrstev [33] .....	16
Obrázek 2 Směr tisku [34] .....	17
Obrázek 3 Před tepelným zpracováním [13].....	19
Obrázek 4 Po tepelným zpracováním [13].....	20
Obrázek 5 Dvojité stárnutí s homogenizačním žíháním [15].....	21
Obrázek 6 Parametry řezných materiálů [12] .....	24
Obrázek 7 Závislost tvrdosti řezných materiálů a $\gamma'$ struktury na teplotě [1].....	24
Obrázek 8 Schématické znázornění tepelného zpracování .....	28
Obrázek 9 Soustruh EMCO MAXXTURN 25 [36].....	28
Obrázek 10 Popis držáku SCLCL 1212F-09 [44].....	29
Obrázek 11 Popis VBD CCMT 09T304-SM IC807 [37] .....	30
Obrázek 12 Drsnoměr Surtronic Duo II [38] .....	30
Obrázek 13 Digitální mikroskop KEYENCE VHC-6000 [39].....	31
Obrázek 14 Dynamometr KISTLER typ 9119AA2 a jeho parametry [40] .....	32
Obrázek 15 Digitalizační karta KISTLER typ 5691A [41].....	32
Obrázek 16 Zesilovač KISTLER typ 5080 [42].....	32
Obrázek 17 Pohled do prostoru obráběcího stroje před obráběním .....	33
Obrázek 18 Naměřená hodnota opotřebení .....	33
Obrázek 19 Měření opotřebení vyměnitelné břitové destičky .....	34
Obrázek 20 Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál).....	35
Obrázek 21 Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min .....	36
Obrázek 22 Otřep na obráběném materiálu.....	36
Obrázek 23 Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál).....	37
Obrázek 24 Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min .....	37
Obrázek 25 Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min .....	38
Obrázek 26 Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál).....	38
Obrázek 27 Porovnání průběhu opotřebení.....	39
Obrázek 28 Měření řezných sil .....	39
Obrázek 29 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min.....	40
Obrázek 30 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min.....	40
Obrázek 31 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min.....	41
Obrázek 32 Porovnání průměrné drsnosti při obrábění .....	42

Obrázek 33 Průběh opotřebení řezného nástroje a drsnosti při $V_c = 40$ m/min .....	43
Obrázek 34 Průběh opotřebení řezného nástroje a drsnosti při $V_c = 55$ m/min .....	43
Obrázek 35 Průběh řezných sil a drsnosti při $V_c = 40$ m/min .....	44
Obrázek 36 Průběh řezných sil a drsnosti při $V_c = 55$ m/min .....	44

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti Inconel 718 [18] [19].....	14
Tabulka 2 Chemické složení Inconelu 718 [9].....	14
Tabulka 3 Měrná tepelná vodivost řezných materiálů [10], [12].....	24
Tabulka 4 Řezné podmínky použité při experimentu .....	27
Tabulka 5 Parametry tiskárny EOS M 290 [35].....	27
Tabulka 6 Základní parametry EMCO MAXXTURN 25 [43] .....	29
Tabulka 7 Parametry držáku SCLCL 1212F-09 [44].....	29
Tabulka 8 Parametry VBD CCMT 09T304-SM IC807 [37] .....	30
Tabulka 9 Parametry drsnoměru Surtronic Duo II [38] .....	31

## 1 Úvod do problematiky

Inconel 718 je superslitina na bázi niklu široce rozšířená v leteckém průmyslu. Inconel 718 byl navržen tak, aby si zachoval vysokou pevnost při vysokých teplotách, odolával korozi a creepovým procesům. Díky svým unikátním vlastnostem má široké uplatnění nejen v leteckém průmyslu, ale i v dalších odvětvích jako je nukleární nebo petrolejový průmysl, kde jsou konstrukční části vystaveny vysokým teplotám a extrémním podmínkám. Důvodem vývoje a zdokonalení vlastností superslitin jako Inconel 718 pro letecký průmysl je zejména snížení spotřeby fosilních paliv.

Na druhou stranu výjimečně dobré vlastnosti a velmi špatná tepelná vodivost, řadí Inconel 718 mezi jeden z nejhůře obrobitelných materiálů. Pevnost při vysokých teplotách tohoto materiálu, zůstává poměrně vysoká. To ovlivňuje velikost řezných sil potřebných k obrábění, které jsou značně vysoké. Důsledkem toho můžou teploty v místě řezu dosahovat až 1300°C. Takto extrémní podmínky při procesu obrábění jsou důvodem krátké životnosti nástroje při obrábění a nízké produktivity výroby. Kromě toho vysoké teploty a řezné síly mohou způsobovat zbytkové napětí a podpořit tvorbu trhlin v obrobeném povrchu. Z těchto důvodů se Inconel 718 řadí mezi těžkoobrobitelné materiály.

Samotný řezný proces, ale i výsledný produkt nejvíce ovlivňuje zejména volba řezných podmínky, materiál a geometrie řezného nástroje a řezné prostředí. Široké uplatnění a nízká produktivita vedli v minulosti k výzkumu zaměřenému na porozumění této problematice. V současné době je do jisté míry tato problematika popsána. Vývoj výkonnějších řezných materiálů, vhodné geometrie nástroje a efektivní chlazení vedli k produktivnějšímu obrábění tohoto materiálu. Výzkum zaměřený na problematiku obrobitelnosti Inconelu 718, ale stále pokračuje ve vývoji efektivnějších metod a adoptování environmentálních trendů do výroby součástí z Inconelu 718 jako je MQL a minimální produkce odpadu.

Mezi konvenční způsoby výroby tohoto materiálu patří především tvářecí procesy a slévání. V posledních letech se mezi tyto metody rozšířili aditivní technologie. Právě 3D tisk představuje nové výzvy k obrábění. Vývoj v této oblasti v posledních letech vedl ke změně zaměření z výroby prototypů na výrobu plně funkčních dílů. Zhotovení komplexních dílů s produkcí prakticky nulového množství odpadu je nespornou výhodou v porovnání s obráběním. 3D tisk přináší řadu výhod, ale i nevýhod. Současné způsoby výroby pomocí aditivních technologií neposkytují dostatečnou povrchovou kvalitu a rozměrovou přesnost, která je pro tyto součásti vyžadována. Je tedy nutné jejich další obrábění. Výsledná mikrostruktura, a tedy i vlastnosti výsledné součásti se mohou lišit v závislosti na parametrech tisku a často nedosahují takové kvality jako konvenční metody. Postupné přidávání materiálu vede ke vzniku minimálního množství odpadu v porovnání s běžnými metodami obrábění, kde je vznik odpadu jedním z faktorů zvýšení nákladů výsledného produktu. Aditivní výroba je vhodná pro malé součásti s ohledem na délku tisku a vysokou cenu použitých materiálů.

## 1.1 Cíl práce

Tato bakalářská práce se zaměřuje na srovnání obrobitelnosti dvou typů materiálů – konvenčního a 3D tištěného Inconelu 718. Hlavním cílem práce je zjistit, jak se tyto dva materiály liší v oblasti obrobitelnosti. V úvodní teoretické části práce jsou nejprve představeny základní vlastnosti a mikrostruktura Inconelu 718. Dále je popsán proces tisku a vliv, který mají jeho parametry na vlastnosti materiálu, tak jak jsou popsány v literatuře. Důraz je kladen na popis některých odlišností a porovnání vlastností obou materiálů. V této části práce je rovněž popsáno, jaké výzvy a problémy se vyskytují v oblasti obrábění konvenčního Inconelu 718, což je materiál, který je již delší dobu testován za účelem zlepšení efektivity a produktivity obrábění součástí z něj vyrobených. Tyto problémy jsou významné a výrazně ovlivňují jak kvalitu, tak i přesnost obrábění materiálu. Je důležité podotknout, že tištěný Inconel 718 je v literatuře nejčastěji popisován z hlediska jeho vlastností, mikrostruktury a různých mechanických zkoušek, ale méně z hlediska jeho obrobitelnosti.

Druhá část bakalářské práce se zaměřuje na experiment, který byl proveden za účelem srovnání obrobitelnosti obou materiálů. Experiment se zaměřuje na porovnání kritérií, jako opotřebení rezného nástroje, drsnost obrobeného povrchu a velikost rezných sil při obrábění. Výsledky experimentu poskytnou základní představu o obrobitelnosti obou materiálů a poskytnou prostor pro další zkoušky obrobitelnosti tištěného Inconelu 718 z hlediska rozdílných parametrů tisku, které mají výrazný vliv na vlastnosti tištěných součástí. Cílem experimentu není stanovit index obrobitelnosti nebo poskytnout hodnoty pro porovnání s jinými materiály.

## 2 Současný stav znalostí o Inconelu 718

### 2.1 Inconel 718

Inconel 718 je precipitačně vytvrzená superslitina na bázi niklu. Je využíván v aplikacích, kde je potřeba udržet vysokou pevnost i při vysokých teplotách nebo v korozivním prostředí, popřípadě v kombinaci obou. Mechanické vlastnosti Inconelu 718 jsou popsány v Tabulce 1. Je nutné zmínit nízkou tepelnou vodivost Inconelu 718, která se pohybuje kolem  $11,2 [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  a má negativní vliv na obrobiteľnosť. [18] [19]

Tabulka 1 Mechanické vlastnosti Inconel 718 [18] [19]

Pevnost v tahu [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tvrdość HRC
1375	1100	200	42-44

#### 2.1.1 Složení Inconelu 718

Tak jako u jiných slitin, výsledné vlastnosti velmi úzce souvisí s chemickým složením. Základním prvkem je nikl, velmi podstatnou roli ve složení mají i Nb a Ti, které mají důležitou roli při tvorbě precipitátů nebo Cr, který je přítomen pro zajištění odolnosti proti oxidaci vytvořením pasivní vrstvy oxidu chromu. Celkové chemické složení je popsáno v Tabulce 2. Inconel 718 obsahuje různé fáze, které vznikají při tuhnutí nebo tepelném zpracování. Vysoké pevnosti je docíleno při tepelném zpracování, kdy precipitují hlavní zpevňující fáze. [18] [19] [5]

Tabulka 2 Chemické složení Inconelu 718 [9]

Prvek	% hmotnosti	Prvek	% hmotnosti	Prvek	% hmotnosti
Ni	50 - 55	Ti	0,65 - 1,15	Si	0,35
Cr	17 - 21	Al	0,2 - 0,8	P	0,015
Fe	Zůstatek	Co	1	S	0,015
Nb	4,75 - 5,5	C	0,08	B	0,006
Mo	2,8 - 3,3	Mn	0,35	Cu	0,3

#### 2.1.2 Mikrostruktura Inconelu 718

Podobně jako jiné niklové slitiny je matrice Inconelu 718 tvořená tuhým roztokem  $\gamma$  s kubickou plošně středěnou krystalovou mřížkou (FCC). Mezi mikrostrukturními mechanismy zpevnění je precipitace metastabilních fází  $\gamma'$  a  $\gamma''$  koherentních s matricí  $\gamma$  tím nejvýznamnějším. Hlavní fází vytvrzující matrici je z těchto dvou  $\gamma''$  Ni<sub>3</sub>Nb, krystalizující v BCT mřížce. Vyskytuje se ve tvaru disků. Jedná se o metastabilní fázi, která je koherentní se základní matricí. Druhá vytvrzující fáze v mikrostruktuře  $\gamma'$  Ni<sub>3</sub>(Al,Ti) má v porovnání s fází  $\gamma''$  menší dopad na zpevnění. Fáze je koherentní a krystalizuje v FCC mřížce. Precipitace fáze  $\gamma'$  se zvyšuje s obsahem Ti a Al, přítomnost Nb zvyšuje precipitaci fáze  $\gamma''$ .

[5], [6], [8], [32]

#### Nežádoucí fáze v mikrostruktuře

Spolu se zpevňujícími fázemi se v mikrostruktuře mohou objevovat další dvě fáze, které mají dopad na mechanické vlastnosti. Mezi nežádoucí fáze patří  $\delta$  Ni<sub>3</sub>Nb s ortorombickou mřížkou. Tato fáze může vzniknout přestárnutím při tepelné úpravě nebo při dlouhodobému vystavení vysokým teplotám. Vzniká transformací metastabilní fáze  $\gamma''$ . Fáze  $\delta$  je sice stabilní, ale není

koherentní s maticí  $\gamma$ . Její vznik má přímý vliv na úbytek fáze  $\gamma''$  a tedy i pevnosti. Ačkoli studie naznačují, že mírné množství této fáze může zlepšit vysokoteplotní mechanické chování díky omezení růstu zrn je považována za nežádoucí z hlediska vlastností materiálu. Nežádoucí vliv na mechanické vlastnosti mají i Lavesovy fáze. Jedná se o křehkou strukturu s HCP mřížkou obvykle na hranicích zrn a v interdendritických oblastech. Tyto fáze vznikají segregací Nb, Si a Mo při tuhnutí. Složení těchto fází se může lišit podle podmínek tuhnutí, ale obecně je lze popsat  $(\text{Ni,Fe,Cr})_2(\text{Nb,Mo,Ti})$ . Lavesovy fáze mohou mít zejména dva následující negativní vlivy na strukturu. Využití prvků tvořících  $\gamma'$  a  $\gamma''$  v neúčinné formě a iniciování trhlin v důsledku křehkosti těchto fází. [5], [6], [32]

## 2.2 Tištěný Inconel 718

V současné době se aditivní procesy nevyrovňají rozměrově přesnost a kvalitě povrchu, které nabízí obrábění. Zároveň díly vyrobené touto metodou mohou mít ve své struktuře vady, zbytková napětí a lišit se v mikrostruktuře. Tato problematika bude popsána dále v této kapitole. V důsledku toho mohou součásti vyrobené touto technologií vyžadovat další zpracování v závislosti na jejich použití. [14], [16]

Vývoj v oblasti aditivní výroby vedl ke vzniku řady metod. Metodou, která bude využita v této práci je DMLS. Základním principem technologie DMLS je roztavení tenkých vrstev kovového prášku vrstvu po vrstvě pomocí laserového paprsku. Tímto způsobem je možné vytvořit jakýkoli tvar a geometrii, dokonce i takové, které nelze získat žádnou jinou technologií. Během procesu tisku se platforma, na které je díl tisknut sníží o jednu vrstvu tloušťky. Poté je rovnoměrně nanesen kovový prášek a laserový paprsek selektivně spéká prášek do pevného stavu. Tento proces, se opakuje, dokud není díl dokončen. Tato technologie je ve své podstatě totožná s metodou SLM. Mnoho prací, jak zahraničních, tak na ZČU, se zabývalo dopadem parametrů tisku, jako je orientace tištěné součásti nebo směr natavování vrstev, na mechanické vlastnosti. Příkladem je [29], kde byly porovnány mechanické vlastnosti pomocí statických a dynamických zkoušek spolu se zkouškami creepových vlastností. Podobnou problematiku popisuje také [30]. Článek [31] a [32] se zabývají vlivem parametrů tisku a orientace součásti na výsledné vlastnosti. Tyto poznatky budou dále popsány v této kapitole, ale z hlediska obrobitelnosti nebude jejich vliv brán v potaz. [14], [16]

### 2.2.1 Parametry tisku

Aditivní výrobní technologie jsou velmi závislé na správné volbě výrobních parametrů, které ovlivňují kvalitu i ekonomickou stránku vytisknutých součástí. Hlavními parametry jsou výkon laseru, rychlost skenování (rychlost pohybu laseru), vzdálenost šrafování, tloušťka vrstev, a směr tisku součásti. [33]

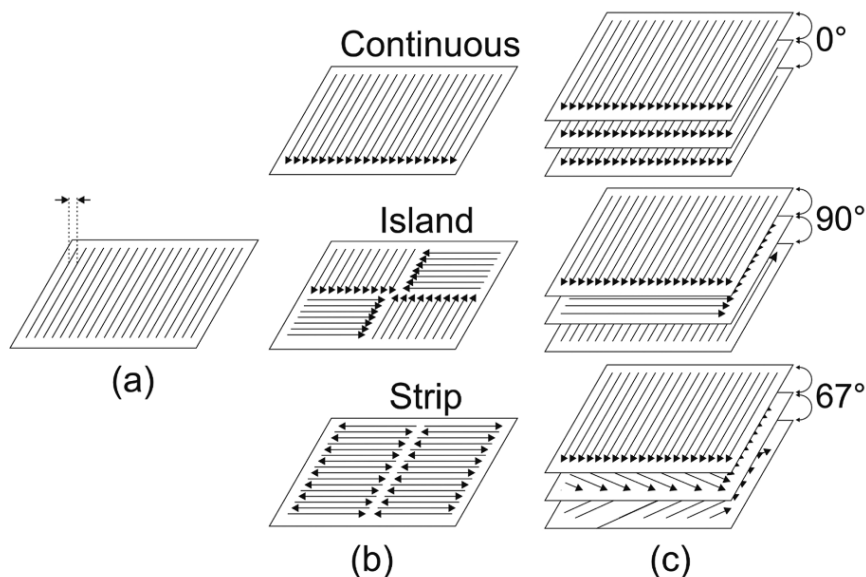
Výkon laseru je hlavním parametrem, který řídí přenos energie na zpracovávaný prášek. Cílem je jeho řízení a homogenní tavení. Příliš vysoký výkon vede ke vzniku pórovitosti v součástech. Optimalizace tohoto parametru je také důležitá u pro snížení celkových nákladů na výrobní proces. [33]

Rychlost skenování popisuje, jak rychle se laserový paprsek pohybuje po povrchu, a je tak rozhodujícím faktorem pro definování rychlosti vytváření komponent. Ačkoli vysoké rychlosti

skenování přispívají k vysokým rychlostem tisku, může také vést ke vzniku pórovitosti z důvodu nedostatku fúze. [33]

Parametry šrafování definují dráhu, kterou laserový paprsek prochází v rámci jedné vrstvy a také to, jak se tato dráha mění mezi jednotlivými vrstvami. Tři hlavní aspekty tohoto parametru jsou vzdálenost mezi šrafy, strategie vrstev a mezi jednotlivými vrstvami. Různé možnosti těchto parametrů jsou zobrazeny na obrázku 1. [33]

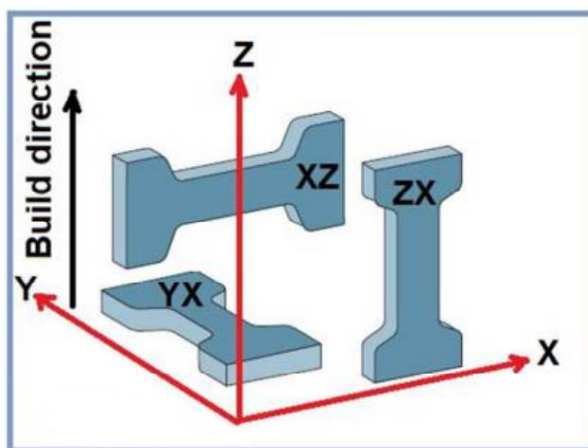
Vzdálenost šrafování definuje prostor mezi dvěma průchody laserového paprsku. Optimální vzdálenost šrafování je spojená s minimální pórovitostí. Strategie nanášení vrstvení má silný vliv na konečnou mikrostrukturu a topografii povrchu součástí. Kontinuální strategie má tendenci vytvářet větší zbytková napětí a anizotropii než alternativní strategie. V případě spékání vrstev bez rotace dochází k větší heterogenitě a zbytkovým napětím, protože laserový paprsek je stále zaměřen na stejnou oblast. Tloušťka vrstvy prášku určuje výšku každé následující vrstvy, a tím řídí rychlost vytváření a následně i celkovou dobu výroby jednotlivých komponent. Vyšší tloušťka vrstvy je spojena se nežádoucími změnami vlastností výsledné součásti, jako je snížená rozměrová přesnost a nižší mechanické vlastnosti. [33]



Obrázek 1 (a) Vzdálenost mezi šrafy, (b) Strategie vrstev, (c) Rotace vrstev [33]



Vliv směru tisku je dalším nezanedbatelným parametrem 3D tisku, který má významný dopad na konečné vlastnosti tisknutých součástí. Při tisku vzorků je důležité zvážit směr tisku, protože horizontální nebo vertikální tisk vyvolává odlišný tepelný gradient a způsobuje vznik odlišné mikrostruktury a anizotropie. Podle konkrétního příkladu, který lze vidět na obrázku 2, mohou být vzorky tisknuté ve směrech XZ a YZ pevnější v tahu než ty, které jsou tisknuty ve směru ZX. Součásti tisknuté ve směru ZX mají také odlišnou tvrdost a houževnatost. Směr tisku může mít vliv na dobu tisku a množství podpor, které jsou potřebné pro tisk součástí. Například, pokud je součást tisknuta ve svislém směru, může být vyžadováno více podpor, což zvyšuje náklady na výrobu. Na druhé straně, pokud je součást tisknuta v horizontálním směru, bude potřeba méně podpor a tisk může být rychlejší. Je tedy zřejmé, že směr tisku má velký dopad na celkovou kvalitu a náklady výroby 3D tisknutých součástí. Je důležité zvážit správný směr tisku pro zajištění optimálních vlastností a minimalizace nákladů. [34]



Obrázek 2 Směr tisku [34]

### 2.2.2 Mikrostruktura

Mikrostruktura 3D tištěného Inconelu 718 se typicky liší napříč výškou z důvodů odlišnosti tepelného profilu při tisku. Kvůli přímému kontaktu spodních vrstev s podložkou se dosahuje vyšší rychlosti ochlazování těchto vrstev. Proto horní vrstvy obsahují hrubší sloupcovité dendrity než spodní vrstvy. Jak už bylo zmíněno jedním z nežádoucích úkazů v mikrostrukturu nejen 3D tištěných součástí je vznik Lavesových fází bohatých na Nb a Mo. Důsledek pomalejšího ochlazování vyšších vrstev součástí je vznik většího množství těchto fází. Ke zvýšení obsahu vytvrzujících fází  $\gamma'$  a  $\gamma''$  a snížení obsahu Lavesových fází je po tisku nutné použít tepelného zpracování. Tyto odlišnosti v mikrostrukturu mají vliv na mechanické vlastnosti napříč tištěnou součástí. U hrubozrnných oblastí dochází k nejvyšší deformaci při zatížení a konečnému porušení z důvodů nižšího modulu pružnosti a meze kluzu. [13], [20], [21]

### Pórovitost

Jedním z dalších nedostatků v mikrostrukturu je pórovitost. Existuje řada odlišných mechanismů vzniku těchto pórů. Patří mezi ně: nedostatečné roztavení a nedostatečná fúze mezi vrstvami, smrštění během chladnutí a zachycení plynu v roztaveném kovu. Nedostatečná fúze mezi vrstvami má nejčastěji za vznik pórů nepravidelného tvaru podél fúzních linií a je zapříčiněna pouze částečně roztaveným kovovým práškem. Póry vzniklé v důsledku zachycení plynu jsou nejčastěji kruhového tvaru a jsou náročné na odstranění post procesním

zpracováním. Existence pórů v mikrostruktuře má za následek předčasnou tvorbu trhlin, nižší houževnatost a negativní vliv na mechanickou integritu a odolnost v podmínkách s cyklickým zatížením. Navíc u pórů se zachyceným plynem v součástech pro vysokoteplotní aplikace mohou tyto plyny způsobovat vnitřní napětí a urychlovat vznik trhlin. Vznik a distribuce pórů v součástech vyrobených aditivními technologiemi může být signifikantně ovlivněna parametry 3D tisku a do jisté míry lze optimalizací těchto parametrů zamezit vzniku těchto pórů. [13]

### **Zbytková napětí**

Vznik zbytkových napětí je dalším důležitým jevem, který může podstatně ovlivňovat mechanické vlastnosti a integritu 3D tištěných součástí. Příčinou vzniku zbytkových napětí je opět teplotní gradient vznikající při tisku. Při tisku starší nanesené vrstvy brání volnému rozpínání nově naneseným vrstvám, a to vede k plastické deformaci těchto nových vrstev při vysoké teplotě. Jak dochází k chladnutí nových vrstev, smršťování je omezeno předchozími vrstvami a výsledkem je zbytkové napětí v nové vrstvě. Zbytková napětí ovlivňují výsledné mechanické charakteristiky tištěného dílu, jako je houževnatost, chování při růstu trhlin a odolnost proti korozi. [13]

Tepelné zbytkové napětí vede k tvorbě a růstů dvou typů trhlin a to solidifikační trhliny a kapalinové trhliny. Trhliny při tuhnutí se objevují v poslední chvíli tuhnutí na nejvyšší vrstvě tisknuté součásti. Tyto trhliny jsou odstraněny po nanesení další vrstvy. Na výsledném dílu tedy zůstávají pouze trhliny vzniklé po nanesení poslední vrstvy, které mohou být odstraněny obráběním a nemají příliš velký vliv na výslednou kvalitu. [13]

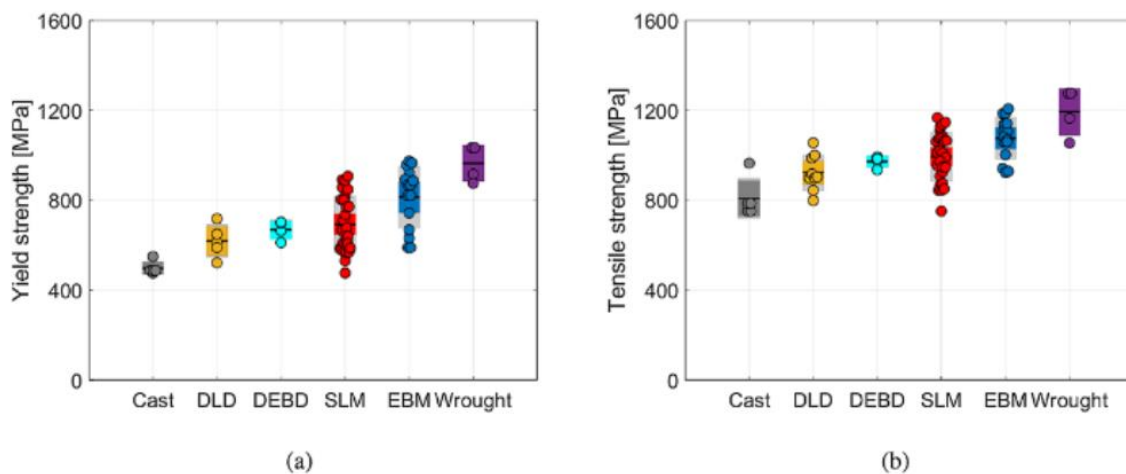
Kapalinové trhliny vznikají v tepelně ovlivněné oblasti a dále rostou s přibývajícimi vrstvami. Při pomalém tuhnutí na hranici zrn vznikají Lavesovy fáze s nízkou teplotou tání. Při nanesení další vrstvy se tyto vrstvy mohou přetavit a pod příčným tepelným pnutím následně vytvořit trhliny. Tyto trhliny nelze odstranit obráběním, proto je nutné jejich vzniku předcházet, protože mají ve výsledné součásti negativní vliv na mechanickou integritu. Jednou z možností je zvýšení rychlosti tuhnutí a tím zamezení vzniku Lavesových fází a tedy i trhlin. [13]

### **Anizotropie a Heterogenita**

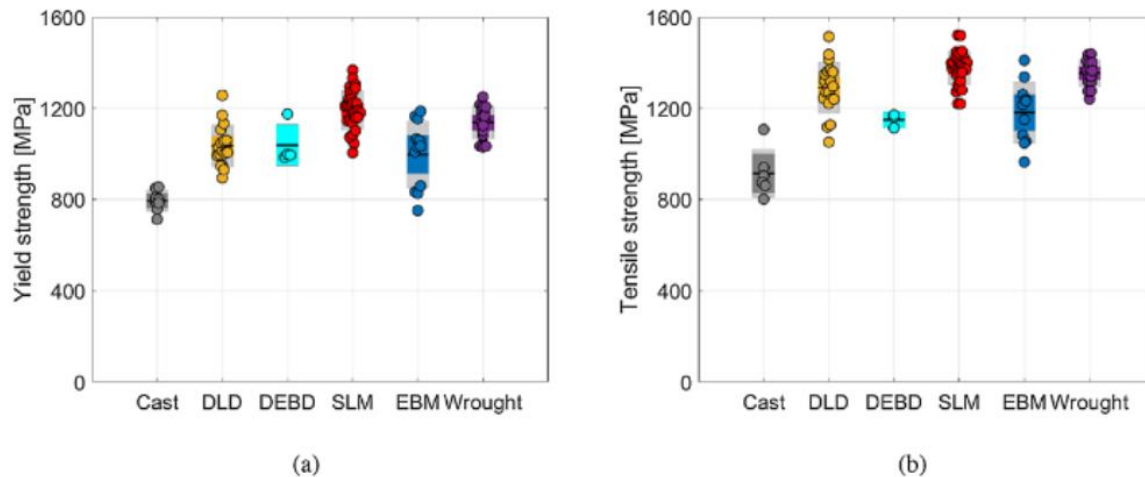
Řada studií uvádí anizotropii a heterogenitu v aditivně vyrobených součástech jak v mikrostruktuře, tak ve výsledných mechanických vlastnostech těchto součástí. 3D tištěné součásti procházejí během procesu tisku opakovaným zahříváním a chladnutím, natavením a tuhnutím, což vede ke vzniku anizotropní a nehomogenní mikrostruktury, která se podstatně liší od konvenčně vyrobených součástí. Navíc pórovitost, defekty a nedostatečné fúze mezi vrstvami mohou mít také vliv na anizotropii a heterogenitu vlastností 3D tištěných dílů. Zatímco tyto vlastnosti mohou představovat výhodu při obrábění, ve formě nižšího zatížení nástroje v jednom směru, mají zpravidla negativní vliv při použití výsledné součásti. Anizotropie není však vždy příznivou vlastností při obrábění a může vést ke kolísání rezných sil, což může vést k vylamování břitu nástroje. [20], [1]

### 2.2.3 Porovnání vlastností

Řada studií zkoumala chování 3D tištěných součástí, různými metodami tisku, při namáhání tahem. Na obrázku 3 jsou zobrazeny hodnoty meze pevnosti v tahu a meze kluzu naměřených v těchto studiích pro některé druhy aditivních technologií v porovnání s litým a tvářeným Inconelem 718. Na obrázku 4 jsou potom uvedeny hodnoty pro tepelně zpracované vzorky, které jsou relevantnější z důvodu většího množství dat v této oblasti. Z obou obrázků je vidět, že hodnoty vzorků vyrobených aditivními technologiemi se pohybují mezi hodnotami vzorků vytvořených litím a tvářením. Vyšší pevnost 3D tištěných vzorků v porovnání s litými je nejčastěji připisována jemnější mikrostruktuře aditivně vyrobených dílů. Na druhou stranu aditivní technologie zaostávají za tvářením hlavně z důvodu porozity a vad obsažených v mikrostruktuře. S ohledem na pevnost a houževnatost u 3D tištěných vzorků je houževnatost vyšší a pevnosti nižší u tepelně nezpracovaných vzorků z důvodu absence hlavních vytvrzujících fází  $\gamma'$  a  $\gamma''$ . Co se týče tvrdosti řada studií zjišťovala rozložení tvrdosti napříč součásti. Podobně jako u dalších vlastností a vad je kolísání v tvrdosti závislé na parametrech a druhu 3D tisku. Některé studie zjistili prakticky nulové kolísání tvrdosti napříč součástí jiné pozorovali nižší tvrdost ve vyšších vrstvách. Vyšší tvrdost ve spodních částech může být připisována vyšší míře precipitačního vytvrzování z důvodu opakovaného zahřívání ve spodních vrstvách. [13], [21]



Obrázek 3 Před tepelným zpracováním [13]



Obrázek 4 Po tepelným zpracováním [13]

V případě pevnosti a tvrdosti se 3D tištěné součásti po tepelném zpracování blíží a v některých případech i přesahují hodnoty součástí tvářených, které jsou v současné době převážně používány. Není tomu však u odolnosti proti únavě, kde tištěné součásti zaostávají za tvářenými a někdy i litými zejména při dlouhodobém použití. Na vině jsou zejména póry v mikrostruktúře a zbytková napětí, které iniciují vznik trhlin. [13], [21]

### Únavové a Creepové vlastnosti

Podpovrchové vady, anizotropie a povrchové nerovnosti ovlivňují výkonnost 3D tištěných součástí v cyklických únavových podmínkách. Studie uvádějí kratší únavovou životnost a vyšší rychlost růstu trhlin při cyklickém zatěžování u součástí po tisku ve srovnání s konvenčními výrobními procesy. Tato horší výkonnost je významnější při vysokých amplitudách deformace a teplotách. Vzorok vytištěné v různých orientaci, mají navíc různou únavovou životnost a rychlost růstu trhlin. Na druhou stranu se uvádí, že mikrostruktura je méně rozhodující než výskyt podpovrchových vad, jako jsou póry, pokud jde o snížení únavové životnosti. Obrobené vzorky, tak nevykazují významné rozdíly z hlediska únavové životnosti a rychlosti růstu trhlin bez ohledu na mikrostrukturu. [33]

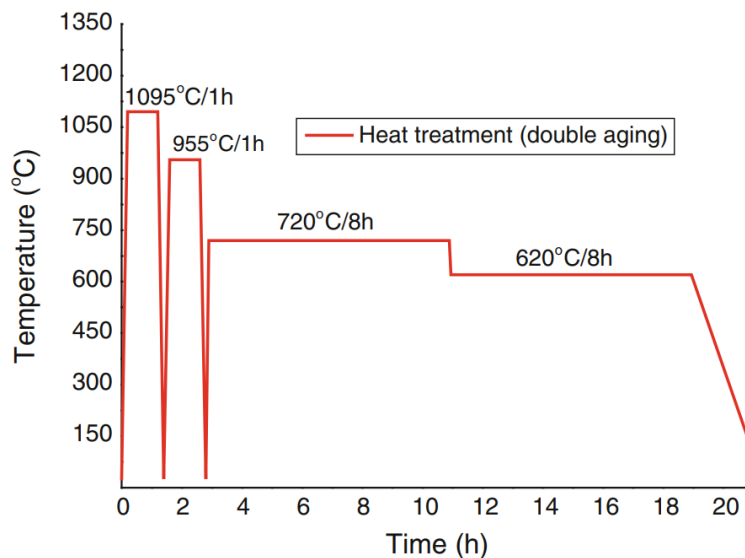
V důsledku rychlého tuhnutí při použití tisku součástí vyráběné touto technikou vykazují jemnozrnnou strukturu, což zhoršuje jejich odolnost proti creepu. Vzhledem k tomu, že posuv po hranici zrn byl identifikován jako dominantní proces pro creepové poškození v těchto materiálech. S ohledem na tuto skutečnost může  $\delta$  fáze působit jako bariéra proti trhlinám a zabránit posunu hranic zrn. Naopak Lavesovy fáze jsou považovány za nežádoucí pro odolnost proti creepu kvůli vzniku mezi krystalových defektů a vysoké křehkosti. [33]

### 2.2.4 Tepelné zpracování

Inconel 718 se tepelně zpracovává, aby se zvýšila mechanická pevnost vlastnosti jak při vysokých teplotách, tak při pokojové teplotě. Toho se obvykle dosahuje precipitačním vytvrzováním. Tepelným zpracováním, které je založeno na rozpouštěcím žíhání, po němž následuje stárnutí. Zatímco cílem vysokoteplotního rozpouštěcího žíhání je vytvořit homogenní, izotropní mikrostrukturu, bez zbytkových napětí, která je bez precipitátů, stárnutí tuto mikrostrukturu bere jako základ pro precipitaci  $\gamma'$  a  $\gamma''$  fází. Při výrobě pomocí aditivních

technologí se však počáteční mikrostruktura těchto slitin výrazně liší od tvářených i odlévaných, a proto potřebují přizpůsobené tepelné zpracování. [33], [15]

Zatímco tvářené součásti z Inconelu 718 se obvykle podrobují rozpouštěcí žhání při 980 °C po dobu 1 h a následně dvojímu stárnutí při 720 °C po dobu 8 h a 620 °C po dobu 8 h, u odlitků tomuto postupu předchází homogenizační proces 1080 °C po dobu 1 h. Proces dvojitého stárnutí s homogenizačním žháním je zobrazen na obrázku 5 V případě aditivních technologií jsou přidány kroky pro snížení zbytkových napětí 1065 °C po dobu 1,5 h a HIP (izostatické lisování za tepla) 1120 °C po dobu 4 h, aby se řešily problémy vzniklé během procesu aditivní výroby. HIP (izostatické lisování za tepla) se obvykle používá ke snížení pórovitosti tištěných vzorků. [33], [15]



Obrázek 5 Dvojité stárnutí s homogenizačním žháním [15]

### 3 Problematika obrábění Inconelu 718

Obrobitelnost je technologická vlastnost materiálu, která charakterizuje jeho vhodnost k obrábění. Na obrobitelnost mají vliv mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu, tepelné zpracování, struktura a způsob výroby. Materiál s dobrou obrobitelností vyžaduje nízkou energii k obrábění, výsledný povrch součásti je kvalitní a opotřebení břitu je minimální. Obrobitelnost není závislá pouze na obráběném materiálu, ale i způsobu obrábění, řezných podmínkách, řezném prostředí nebo materiálu řezného nástroje. Empiricky zjištěné hodnoty obrobitelnosti pro daný materiál při daném setu podmínek nemusí nutně dovolovat predikci chování materiálu, když se podmínky změni. Niklové superslitiny jsou spojeny s velmi obtížnou obrobitelností. Hlavním problémem při obrábění Inconelu 718 je vznik velkých řezných sil a vysoké teploty v místě řezu zejména z důvodu vysoké pevnosti a špatné tepelné vodivosti Inconelu 718. Důsledkem těchto faktorů je krátká životnost nástroje a nízký úběr materiálu vedoucí ke snížené produktivitě. Vysoké řezné síly také způsobují velké pnutí v povrchové vrstvě obráběného materiálu. Obrobitelnost těchto součástí je silně ovlivněna mikrostrukturou materiálů. Vzhledem k tomu, že vytisknuté vzorky ve stavu po tisku vykazují anizotropii, jsou podmínky a výsledky obrábění závislé na směru úběru materiálu. V tomto ohledu, se očekává lepší kvalita povrchu při obrábění s řezným rychlostí podél směru skenování namísto směru tisku. Výsledná kvalita je dále ovlivněna vadami přítomnými v tištěných

součástech, které na druhou stranu ulehčují odebrání materiálu, a snižují nástrojové opotřebení ve srovnání s tvářenými materiály. Z toho vyplývá, že ačkoli lze použitím HIP snížit výskyt defektů, tato technika snižuje obrobiteľnosť. Mezi faktory vedoucí k obtížné obrobiteľnosti Inconelu 718 patří:

- Vysoká pevnost v tahu a stříhu.
- Materiál si zachová vysoké hodnoty mechanických vlastností i za vysokých teplot.
- Materiál má schopnost vytvrzování v důsledku plastických deformací a tepelného zatížení v procesu a tepelného zatížení v procesu oddělování třísky.
- Vysoké mechanické zatížení nástroje v důsledku vysokých řezných sil.
- Vysoké teploty v místě řezu 900 °C až 1300 °C.
- Materiál má nízkou tepelnou vodivost, což vede k tomu, že se jen málo tepla odvádí třískou a obrobkem, zatímco velké množství tepla zůstává v nástroji.
- Vysoká adheze mezi nástrojem a třískou (náchyllost ke tvorbě nárustku).
- Struktura obrobku obsahující karbidy způsobuje intenzivní abrazivní opotřebení nástroje.
- Prvky obsažené v Inconelu 718 mají vysokou chemickou afinitu k prvkům, které jsou přítomny ve většině řezných nástrojů, což způsobuje difúzní opotřebení nástroje.

[11] [10], [33]

### 3.1 Metody obrábění Inconelu 718

Mezi hlavní metody používané při obrábění Inconelu 718 patří soustružení, frézování, vrtání a broušení. Tyto metody se liší v tom, jakým způsobem odstraňují materiál a jaké nástroje při nich jsou používány. Každá z těchto metod tedy přináší specifické výzvy a potenciální problémy při obrábění Inconelu 718. [1]

#### Frézování

Frézování tvoří podstatnou část všech operací při obrábění Inconelu 718. V porovnání se soustružením není nástroj ani obrobek zatížen vysokou teplotou. Naopak dochází ke zvýšené mechanické zátěži povrchu obrobku i nástroje. Velikost tohoto zatížení závisí však na řezných podmínkách, geometrii a materiálu nástroje. [1]

#### Vrtání

Jako další metodou ve velké míře využívanou při obrábění Inconelu 718 je vrtání. Špatná tepelná vodivost materiálu nutí odchod tepla pouze přes nástroj a chladicí kapalinu. V důsledku toho dochází k vysokému termomechanickému zatížení v porovnání s dalšími metodami. [1]

#### Soustružení

Při soustružení dochází k úběru materiálu jednobřitým nástrojem, který je v konstantním kontaktu s obráběným materiálem. Ve spojení s velmi špatnou tepelnou vodivostí Inconelu 718 mohou dosahovat teploty v místě řezu až 1200 °C. Tento fakt je hlavním omezením při soustružení Inconelu 718. Dopady jsou především na životnost nástroje, ale i povrchovou vrstvu materiálu. V této práci bude uvažován pouze případ soustružení Inconelu 718. Významný vliv na trvanlivost břitu a celkovou obrobiteľnosť při soustružení má zejména výběr materiálu řezného nástroje a způsob chlazení. V dalších kapitolách bude tato problematika podrobněji popsána. [1], [17]

## Broušení

Při broušení dochází k úběru materiálu řezným účinkem náhodně rozložených tvrdých abrazivních zrn různého tvaru, velikosti a geometrie. Vzhledem k vysokému zápornému úhlu sklonu zrn je specifická potřeba energie v tomto procesu velmi vysoká ve srovnání s jinými konvenčními obráběcími procesy. Vyšší potřeba energie při broušení má za následek vyšší produkci tepla a následně vysokou teplotu v zóně broušení, což nepříznivě ovlivňuje kvalitu broušeného produktu. Tento problém lze do jisté míry minimalizovat použitím super abrazivních kotoučů, které mají velmi vysokou tepelnou vodivost. Studie zaměřené na tuto problematiku docházejí k závěru, že pro broušení Inconelu 718 je vhodnější kotouč s vysokou pórovitostí, při použití kotoučů z KNB nebo korundu. [22] [23]

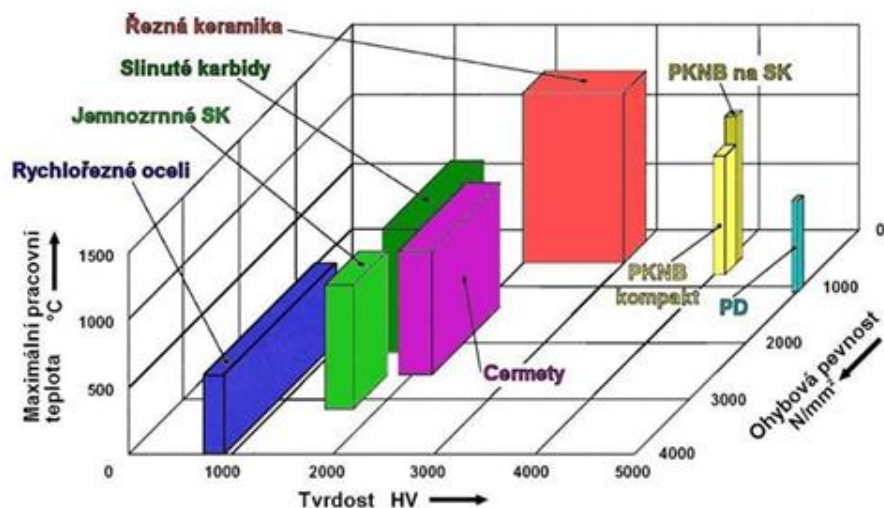
## 3.2 Druhy řezných materiálů

Během obrábění Inconelu 718 jsou řezné materiály vystaveny extrémnímu tepelnému a mechanickému zatížení, které způsobuje plastické deformace a rychlé opotřebení nástrojů. Materiály použité pro obrábění musí mít adekvátní vlastnosti. Řezný materiál použitý pro obrábění Inconelu 718 by měl disponovat následujícími vlastnostmi:

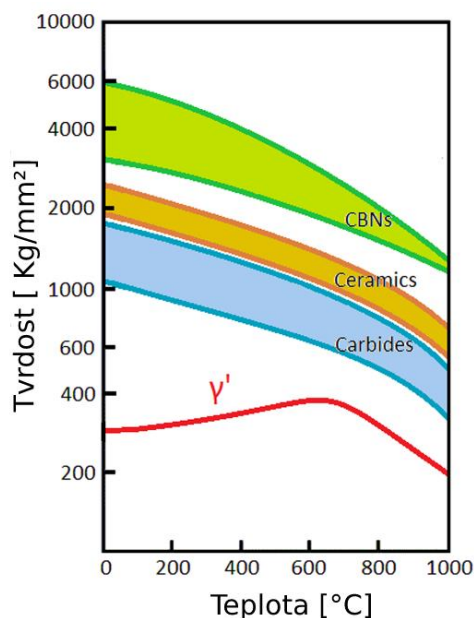
- vysoká tvrdost za tepla
- vysoká pevnost a houževnatost
- vysoká chemická stabilita
- vysoká odolnost proti opotřebení
- vysoká odolnost proti tepelným šokům

Většina těchto vlastností je ovlivněna teplotou. Vysoké teploty při obrábění běžných materiálů vedou často k snížení pevnosti obrobku a zlepšení obrobiteľnosti. Není tomu tak u Inconelu 718, který byl navržen pro odolávání teplotám do 750°C. Naopak tvrdost fáze  $\gamma'$  se zvyšuje až do přibližně 700°C. Závislost tvrdosti na teplotě některých řezných materiálů a fáze  $\gamma'$  je vidět na obrázku 7. Vzhledem k vysokým teplotám a vysoké tvrdosti Inconelu 718 jsou nástroje z HSS nepoužitelné. Velmi tvrdé PKD nástroje nemohou být použity z důvodu nízké teplotní stálosti. Proto je výběr řezných materiálů omezený na řeznou keramiku, slinuté karbidy a nástroje z KNB. Vysoká tvrdost řezného materiálu zaručuje vyšší odolnost proti otěru. Vysoká houževnatost snižuje šanci prasknutí nástroje. Materiály s vysokou tvrdostí mají obvykle nízkou houževnatost a naopak. Na obrázku 6 jsou znázorněny parametry řezných materiálů. [1], [2]





Obrázek 6 Parametry řezných materiálů [12]



Obrázek 7 Závislost tvrdosti řezných materiálů a  $\gamma'$  struktury na teplotě [1]

Vzhledem ke špatné tepelné vodivosti Inconelu 718 je větší množství tepla odváděno prostřednictvím nástroje. Řezné materiály s vysokou tepelnou vodivostí efektivně odvádějí teplo z místa řezu což předchází vzniku vysokých teplot na špičce nástroje. Tepelná vodivost řezných materiálů je uvedena v Tabulce 3. [1]

Tabulka 3 Měrná tepelná vodivost řezných materiálů [10], [12]

Materiál	Měrná tepelná vodivost [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Slinutý karbid (94% WC + 6% Co)	80 - 100
Keramika (Oxidická)	12
PKNB	45 - 200



## **KNB**

Jedná se o druhý nejtvrdší řezný materiál po diamantu. Nástroje z KNB si uchovávají vysokou tvrdost i za zvýšených teplot. Mimo vysoké tvrdosti se vyznačují i vysokou otěruvzdorností a chemickou stabilitou. Mezi nevýhody patří zejména nízká houževnatost a vyšší cena. Životnost nástroje může být významně prodloužena chlazením a depozicí povlaků. Vzhledem k vysoké tvrdosti a křehkosti jsou tyto nástroje náchylné k lomu břitu při vyšší hloubce řezu. Z těchto důvodů jsou používány zejména pro dokončovací operace. [1], [2]

## **Řezná keramika**

Řezná keramika je křehký materiál vyznačující se dobrou tepelnou a chemickou stabilitou. Nástroje z řezné keramiky získaly popularitu zejména díky možnosti použití několika násobně vyšších řezných rychlostí v porovnání s nástroji ze slinutých karbidů. Zároveň jsou levnější alternativou oproti nástrojům z KNB. Nicméně nástroje z řezné keramiky mají i řadu nevýhod. Mezi ty nejvýznamnější se řadí velmi špatná odolnost proti teplotním šokům způsobených cyklickým zahříváním a ochlazováním při obrábění s chlazením. Další významnou slabostí řezné keramiky je nízká houževnatost jejímž důsledkem jsou tyto nástroje citlivé na dynamické namáhání. Poslední podstatnou nevýhodou je nízká tepelná vodivost v porovnání s ostatními řeznými materiály. Vzhledem ke špatné drsnosti obroběného povrchu jsou tyto nástroje vhodné především k hrubování. [1], [2]

## **Slinuté karbidy**

Slinuté karbidy (WC – Co) jsou nejpoužívanějším materiálem pro řezné nástroje. Nízká cena, vysoká houževnatost a vysoká tepelná vodivost jsou hlavními důvody zařazení slinutých karbidů mezi řezné materiály používané pro obrábění Inconelu 718. Mezi nejvýznamnější druhy opotřebení patří zejména opotřebení na hřbetu a opotřebení vlivem adheze. Vysoká teplota při obrábění usnadňuje difúzi niklu a železa do kobaltové matrice nástrojů je významným omezením pro obrábění s nepovlakovanými karbidy. V důsledku toho se používají povlakované karbidové nástroje, které zvyšují výkon obrábění. [1], [2]

## **3.3 Řezné prostředí**

Řezné prostředí je podstatným aspektem procesu obrábění. Mezi nejdůležitější funkce řezného prostředí se řadí zejména chlazení řezného nástroje a obrobku, odplavování špon a mazání. Vhodná volba metody chlazení zvyšuje produktivitu obrábění a má dopad na výsledné náklady výroby. Mezi nároky kladené na řezné prostředí patří hlavně zdravotní nezávadnost, chemická stálost a chemická neutralita jak obrobku, tak i k nástroji. Teplo při procesu obrábění vzniká vlivem plastických deformací při formování třísky, vlivem tření mezi nástrojem a obrobkem a třením mezi nástrojem a třískou. Především při obrábění Inconelu 718, kdy teploty v místě řezu dosahují velmi vysokých teplot, má chlazení a mazání podstatný vliv na životnost řezného nástroje. Efektivní chlazení představuje výzvu obzvláště při soustružení, kdy je nástroj v neustálém kontaktu s obrobkem je často přívod řezné kapaliny do místa řezu omezený. Porovnání a výběr vhodné metody chlazení při obrábění Inconelu 718 byl předmětem řady prací, tak aby se dosáhlo vyšší produktivity, životnosti řezného nástroje, ale i snížení dopadů na životní prostředí. Některé druhy chlazení a mazání budou dále popsány v této kapitole. [24], [28]

### **Konvenční chlazení**

V případě využití konvenčního chlazení, dochází k nedostatečnému přívodu řezné kapaliny do místa řezu. Kvůli velmi vysoké teplotě v blízkosti břitu řezného nástroje při obrábění Inconelu 718 dochází k rapidnímu vypařování řezné kapaliny, která se proto nedostane do oblasti sekundárních a terciálních plastických deformací. Řada studií uvádí, nežádoucí difúzní, abrazivní a adhezní otěr a tedy i snížení životnosti řezného nástroje a produktivity v takovém případě. [26]

### **Vysokotlaké chlazení (HPC)**

Jednou z nejvyžívanějších metod používaných ke zvýšení účinků řezné kapaliny v případě soustružení Inconelu 718 je přívod řezné kapaliny pod vysokým tlakem do místa řezu. Kinetická energie řezné kapaliny přiváděné pod vysokým tlakem napomáhá lámání třísky a zároveň snížení tepla vznikajícího vlivem plastické deformace a tření při odcházení třísky po čele řezného nástroje. Přesto, že řezná kapalina v takovém případě neprotrikne přímo do místa řezu, dochází k podstatnému prodloužení životnosti nástroje. [26], [27]

### **Suché chlazení a MQL**

Suché obrábění a obrábění s minimálním množstvím maziva (MQL) se objevily jako ekologické metody v porovnání se záplavovým chlazením. Obrábění Inconelu 718 za sucha vede k oděru, adhezi a poškození povrchu. Zatímco abraze není přímo způsobena chlazením ale karbidovými částicemi v Inconelu 718, bylo zjištěno, že navařování a adheze souvisejí suchým procesem a mohou vést k tvorbě nárůstku. Řada prací naznačuje, že obrábění Inconelu 718 za sucha pomocí stávajících technologií není ekonomické. [25]

Ve srovnání se suchým obráběním se MQL představuje jako velmi efektivní, a přitom ekologická alternativa tím že umožňuje vyšší efektivitu obrábění a lepší kvalitu povrchu. MQL funguje na principu použití stlačeného vzduchu k rozstříkovaní malého množství oleje do obráběcí místa řezu. Využití malého množství maziva nemá pozitivní vliv pouze na ekologickou stránku obrábění, ale i snížení nákladů na obrábění a snadnější recyklaci odpadu. [25], [26]

### **Kryogenní chlazení**

Kryogenní chlazení je metoda využívající tekutý dusík ( $LN_2$ ) nebo oxid uhličitý ( $CO_2$ ) k podchlazení nástroje nebo obrobku při procesu obrábění. Při obrábění dochází k odpařování přiváděné kapaliny, což eliminuje potřebu filtrace a likvidace chladicích kapalin, což vede k suchému a čistému obrobku a třískám. Běžně se používají tři metody přívodu kryogenní kapaliny, a to: chlazení obrobku, nepřímé chlazení a chlazení řezné zóny. Nejrozšířenější metodou, zejména při obrábění obtížně obrobitelných materiálů, jako je Inconel 718 je chlazení řezné zóny. Zlepšení obrobitelnosti při kryogenním chlazení se přisuzuje sníženému mechanismu opotřebení souvisejícímu s difúzí. Kryogenní chlazení také vede ke zlepšení kvality povrchu, nižší drsnosti povrchu a má příznivý vliv na lámání třísek. Kryogenní obrábění Inconelu 718 však obecně vykazuje krátkou životnost nástroje. Kryogenní chlazení samo o sobě není pro obrábění Inconelu 718 výhodné, protože vede ke zvýšení tvrdosti materiálu a rychlému opotřebení nástroje. [25]

## 4 Návrh experimentu obrábění

Cílem experimentální části bylo provést srovnání obrobitelnosti konvenčního Inconelu 718 a Inconelu 718 tištěného aditivní technologií, přičemž jako metoda obrábění bylo použito soustružení. Nicméně, výsledky získané touto metodou se mohou lišit v případě použití jiných metod obrábění, jak je popsáno v kapitole 2.4. Pro oba materiály byly připraveny vzorky, které byly obráběny při třech různých řezných rychlostech s konstantním posuvem a přísuvem a bez použití řezné kapaliny. Řezné podmínky jsou uvedeny v tabulce 4. Pro srovnání obrobitelnosti byly měřeny řezné síly, drsnost obrobeného povrchu a opotřebení řezného nástroje v závislosti na času obrábění.

**Tabulka 4 Řezné podmínky použité při experimentu**

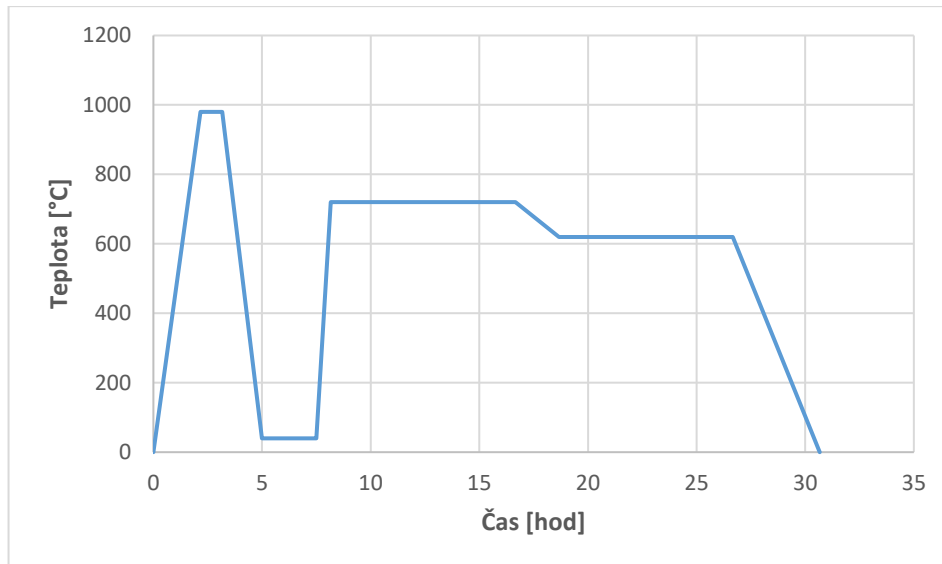
Pořadí měření	Vc [m/min]	f [mm/ot]	ap [mm]
1	40	0,15	0,5
2	55	0,15	0,5
3	75	0,15	0,5

### 4.1 Zkušební materiál

Pro účely experimentu byly použity dva vzorky. Jeden 3D vytisknutý a druhý z válcované tyče z materiálu Inconel 718. Tabulka 2 obsahuje složení Inconelu 718, které odpovídá oběma vzorkům. 3D vytisknutý vzorek byl vyroben pomocí DMLS procesu na tiskárně EOS M 290. Tisk vzorku proběhl ve vertikálním směru. Tato tiskárna umožňuje tisknout řadu materiálů a její parametry jsou popsány v tabulce 5. Poté byl vzorek vyrobený 3D tiskem podroben obvyklému tepelnému zpracování pro materiál Inconel 718, které zahrnovalo žhánání a precipitační vytvrzení, aby byly dosaženy požadované vlastnosti. Tepelné zpracování je schématicky znázorněno na obrázku 8.

**Tabulka 5 Parametry tiskárny EOS M 290 [35]**

Konstrukční objem	250 x 250 x 325 mm
Typ laseru	Yb-vláknový laser; 400 W
Rychlost skenování	až 7,0 m/s
Průměr zaostření	100 μm
Ochranný plyn	Argon, Dusík
Konstrukční materiály	Slitiny hliníku
	Slitiny mědi
	Slitiny niklu
	Slitiny titanu
	Slitiny kobaltchromové
	Nerezová ocel Nástrojová ocel



Obrázek 8 Schématické znázornění tepelného zpracování

## 4.2 Obráběcí stroj

Při výběru stroje pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů je velmi důležité zvolit správný stroj, který bude schopen efektivně zvládnout náročné podmínky obrábění. Použití špatně zvoleného stroje může vést ke špatné kvalitě obrábění, zvýšenému opotřebení nástrojů. Je tedy nutné vybrat stroj s dostatečnou výkonností a přesností. CNC soustruh EMCO MAXXTURN 25, vybavený řídicím systémem Siemens Sinumerik, který je k dispozici v laboratořích KTO, byl vybrán z důvodu své schopnosti efektivně zvládat náročné podmínky obrábění, ale také možnosti měření rezných sil. Tento stroj je zobrazen na obrázku 9 a v tabulce 6 jsou uvedeny základní parametry. Soustruh EMCO má k dispozici protivřetenou ve kterém byl umístěn otočný hrot, pro podepření obrobku, aby se minimalizovaly vibrace, které by mohly negativně ovlivnit průběh obrábění a měření.



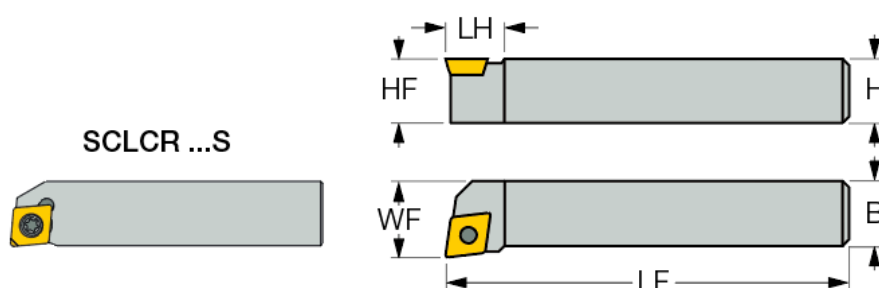
Obrázek 9 Soustruh EMCO MAXXTURN 25 [36]

Tabulka 6 Základní parametry EMCO MAXXTURN 25 [43]

Max. průměr obrobku	114 mm
Vzdálenost mezi vřeteny	485 mm
Max. otáčky vřeten	8000 ot/min
Max. výkon hl. vřetene	6,5 kW
Max. výkon protivřetena	3,5 kW

### 4.3 Nástroj

Pro provedení experimentu byl vybrán držák SCLCL 1212F-09, který disponuje upínací částí o rozměrech 12x12 mm. Tato velikost byla hlavním faktorem pro výběr držáku, protože musel být kompatibilní s dynamometrem, který byl použit k měření řezných sil. Úhel nastavení hlavního ostří držáku je 95°. Tento držák je vhodný pro použití s VBD s úhlem hřbetu 7°. Základní parametry tohoto držáku jsou uvedeny v obrázku 10 a tabulce 7.

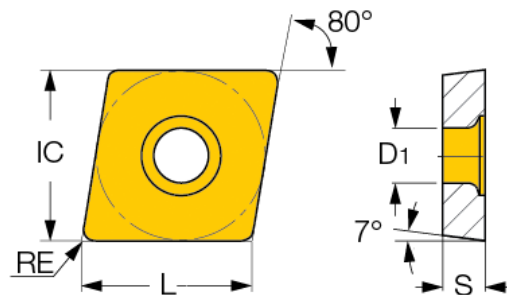


Obrázek 10 Popis držáku SCLCL 1212F-09 [44]

Tabulka 7 Parametry držáku SCLCL 1212F-09 [44]

h	b	l1	l2	f	$\kappa_r$
12	12	80	14	16	95°

Vzhledem k zvolenému držáku a požadovaným podmínkám obrábění byla využita VBD s označením CCMT 09T304-SM IC807 od společnosti Iscar. Jedná se o jednostrannou VBD s pozitivním úhlem čela a úhlem hřbetu 7°. Destička disponuje tenkou vrstvou povlaku TiAlN+TiN. Tento nástroj je doporučen pro soustružení žáruvzdorných slitin, austenitických nerezových ocelí a tvrdých ocelí s nízkými až středními řeznými rychlostmi. Parametry VBD jsou uvedeny v obrázku 10 a tabulce 7.



Obrázek 11 Popis VBD CCMT 09T304-SM IC807 [37]

Tabulka 8 Parametry VBD CCMT 09T304-SM IC807 [37]

L	IC	S	D1	RE	ft	ap
9,7	9,52	3,97	4,4	0,4	0,06 - 0,25	0,5 - 2,5

## 4.4 Zařízení použité pro vyhodnocení

### 4.4.1 Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo prováděno v periodických intervalech pomocí ručního přenosného drsnoměru Surtronic Duo II, který je zobrazen na obrázku 11. Princip fungování tohoto drsnoměru spočívá ve vedení diamantového snímacího hrotu po měřeném povrchu. Vertikální pohyb je detekován piezoelektrickým snímačem, který převádí mechanický pohyb na elektrický signál. Rozsah měření tohoto přístroje je 200  $\mu\text{m}$  s přesností 0,01  $\mu\text{m}$ . Pomocí drsnoměru je možné měřit parametry drsnosti jako Ra, Rz, Rp, Rv, které se po měření zobrazí na LCD displeji. Další parametry jsou uvedeny v tabulce 8.



Obrázek 12 Drsnoměr Surtronic Duo II [38]

**Tabulka 9 Parametry drsnoměru Surtronic Duo II [38]**

Snímač	Rozlišení	0,01 $\mu\text{m}$
Měření	Rozsah Z	200 $\mu\text{m}$
	Přesnost	5% čtení + 0,1 $\mu\text{m}$
	Šum	0,07 $\mu\text{m}$
Kalibrace	Postup	Automatická SW kalibrace
	Etalon	Etalon drsnosti vyhovuje kalibraci dle ISO 4287
Parametry	Norma	ISO 4287
	ISO 4287 (drsnost)	Ra, Rz, Rp, Rv, Rt, Rz1max, Rsk, Rq, Rku
	ISO 4287 (primární)	Pa, Pz, Pp, Pv, Pt
Sestava snímače	Typ snímače	piezoelektrický
	Typ snímacího hrotu	Diamantový, rádius 5 $\mu\text{m}$
Snímač	Přítlačná síla snímače	200 mg
	Typ měření	S opěrkou
Filtr	Typ filtru	Gaussův / 2CR
	Cut-of	0,8 mm
Posuvová jednotka	Dráha snímání	5 mm
	Rychlost snímání	2 mm / sek.
Zobrazení	Jednotky	$\mu\text{m}$

#### 4.4.2 Měření opotřebení

Velmi důležitým parametrem pro porovnání obrobitelnosti bylo opotřebení řezného nástroje. Pro měření opotřebení byl použit digitální mikroskop KEYENCE VHC-6000, který je zobrazen na obrázku 12. Software dostupný k tomuto přístroji umožňuje měření opotřebení a ukládání snímků získaných pomocí mikroskopu.



**Obrázek 13 Digitální mikroskop KEYENCE VHC-6000 [39]**

#### 4.4.3 Měření řezných sil

Měření řezných sil probíhalo pomocí Vícesložkového dynamometru MiniDyn od firmy KISTLER typ 9119AA2, který funguje na principu piezoelektrického jevu. Dynamometr je zobrazen na obrázku 13 s tabulkou která obsahuje nejdůležitější parametry.

Měřicí rozsah	$F_x, F_y, F_z$	kN	-4 až 4
	$M_x, M_y$	Nm	-150 až 150
	$M_z$	Nm	-300 až 300
Kalibrovaný rozsah měření	100% $F_x, F_y, F_z$	N	0 až 4000
	10% $F_x, F_y, F_z$	N	0 až 400
	1% $F_x, F_y, F_z$	N	0 až 40
Citlivost	$F_x, F_z$	pC/N	≈26
	$F_y$	pC/N	≈13
Linearita	10% až 20%	%/FSO	≤±0,3
	0% až <10%	%/FSO	≤±0,5
Hystereze	10% až 20%	%/FSO	≤±0,3
	0% až <10%	%/FSO	≤±0,5
Kapacitance	$F_x, F_y, F_z$	pF	230



Obrázek 14 Dynamometr KISTLER typ 9119AA2 a jeho parametry [40]

Celá aparatura pro měření řezných sil dále obsahovala osmikanálový zesilovač KISTLER typ 5080 a digitalizační kartu KISTLER typ 5691A. Zesilovač mění elektrický náboj vzniklý díky piezoelektrickému jevu na proporcionální výstupní napětí a je zobrazen na obrázku 15. Digitalizační karta byla využita pro připojení k PC a přenosu naměřených dat do softwaru DynoWare. Dygytalizační karta je zobrazena na obrázku 14.



Obrázek 15 Digitalizační karta KISTLER typ 5691A [41]

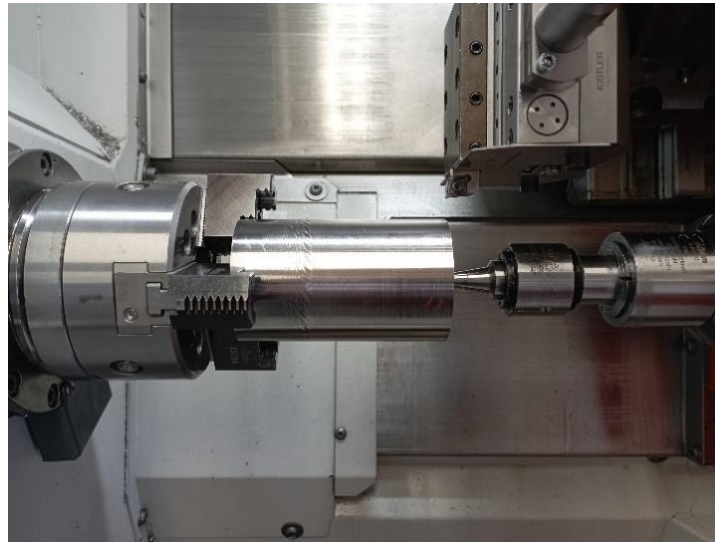


Obrázek 16 Zesilovač KISTLER typ 5080 [42]



## 5 Průběh experimentu

Účelem experimentu bylo srovnat obrobiteľnosť dvoch materiálů pomocí tří kritérií: opotřebenění nástroje, velikost řezných sil a drsnost obrobeného povrchu. Nicméně, cílem nebylo stanovit index obrobiteľnosti nebo posoudit obrobiteľnost ve srovnání s jinými materiály. Naměřená data budou pouze porovnána navzájem. Mezi jednotlivými měřeními byly intervaly přibližně o délce dvou minut. Na obrázku 16 je vidět prostor obráběcího stroje před obráběním. Testovaný materiál je upnutý do čelistí a podepřený otočným hrotem, tak aby bylo zajištěno dostatečně tuhé upnutí.



Obrázek 17 Pohled do prostoru obráběcího stroje před obráběním

Soustružnický nůž byl upnut do dynamometru, který byl poté připojen přes zesilovač a digitalizační kartu k notebooku. Dynamometr se soustružnickým nožem je vidět v pravém horním rohu na obrázku 17. Během obrábění byl použit již připravený program, ve kterém byla po každém přejezdu upravena nová hloubka řezu. Při spuštění programu bylo vždy před najetím nože do řezu manuálně spuštěno měření pomocí dynamometru. Po vyjetí nože z řezu bylo měření ukončeno a data byla uložena pro další zpracování. Poté byla břitová destička vyjmuta a následovalo měření na digitálním mikroskopu. V softwaru dostupném k mikroskopu byla hodnota opotřebenění změřena pomocí dvou paralelních čar. Příklad snímku s naměřenou hodnotou je vidět na obrázku 18.



Obrázek 18 Naměřená hodnota opotřebenění

Břitová destička byla umístěna do předem připraveného přípravku. Mikroskop byl nastaven na stonásobné přiblížení a natočen o úhel  $14^\circ$ , aby byl dosažen co nejlepší pohled na destičku, která byla měřena. Postup měření opotřebení je vidět na obrázku 19. Ten se opakoval po každém řezu.



**Obrázek 19** Měření opotřebení vyměnitelné břitové destičky

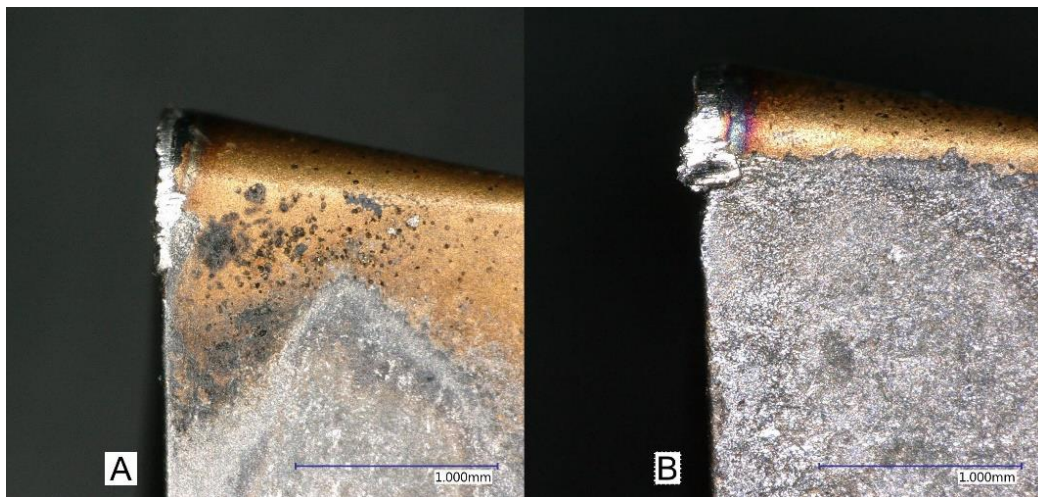
Destička byla poté vrácena do držáku, aby byla připravena na další řez, a následovalo měření drsnosti povrchu. Měření drsnosti bylo provedeno ve třech různých polohách obrobeneho povrchu, aby bylo získáno co nejpřesnější měření. Před spuštěním dalšího řezu byl také změřen obrobeneý průměr na třech místech, což bylo důležité pro kontrolu přesnosti obrábění. Všechna měření byla prováděna stejným způsobem pro všechny řezné rychlosti, aby byla zajištěna konzistence výsledků a aby bylo možné porovnávat údaje v rámci celého experimentu.

Pro oba vzorky byla po obrábění provedeno měření tvrdosti. Výsledky ukázaly, že vzorek vytvořený 3D tiskem měl vyšší tvrdost než vzorek z válcované tyče. Podle naměřených hodnot byla tvrdost 3D tiskem vytvořeného vzorku přibližně 52 HRC, zatímco tvrdost konvenčního vzorku byla přibližně 44 HRC. Tato rozdílná tvrdost může být způsobena různými tepelnými zpracováními, kterým byly oba vzorky podrobeny.

## 6 Vyhodnocení experimentu

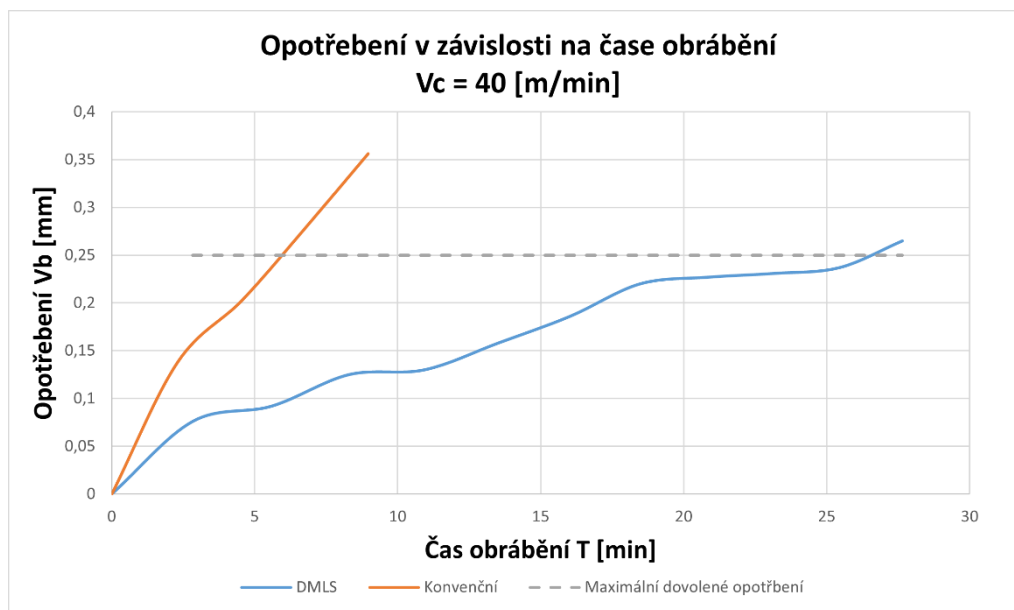
### 6.1 Vyhodnocení opotřebení

Během obrábění byl nástroj považován za opotřeбенý, pokud došlo k dosažení průměrné hodnoty opotřebení hřbetu 0,25 mm, nebo k vylomení břitu. Na obrázku 20 jsou uvedeny snímky dvou různých řezných destiček použitých při soustružení při řezné rychlosti 40 m/min. Břitová destička s označením A byla použita pro obrábění tištěného materiálu, zatímco destička s označením B konvenčního. Oba snímky byly pořízeny po stejné době obrábění. Už po prvním řezu bylo patrné, že při obrábění tištěného materiálu docházelo k výrazně menšímu opotřebení než u konvenčního materiálu.



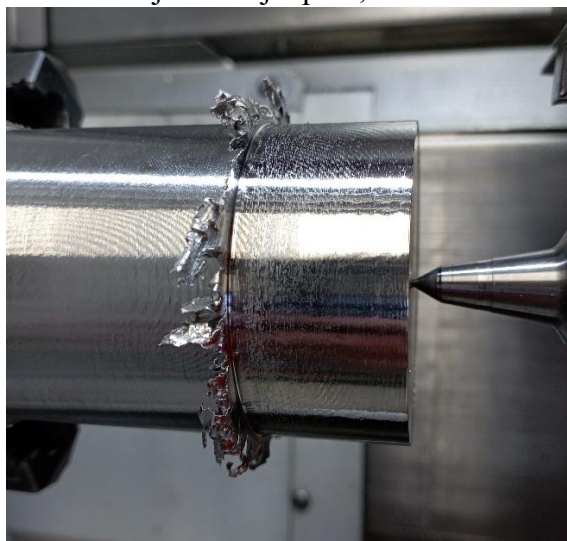
Obrázek 20 Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál)

Na obrázku 21 je zobrazena celková trvanlivost obou řezných nástrojů. Z grafu je zřejmé, že trvanlivost při obrábění tištěného materiálu byla přibližně čtyřnásobně delší oproti konvenčnímu materiálu. U obou materiálů docházelo v průběhu obrábění k tvorbě nárůstku a abrazivního opotřebení hřbetu řezného nástroje. Během obrábění obou materiálů se na začátku vytvářela článkovitá tříska. U tištěného materiálu však tato tříska zůstávala poměrně konzistentní až do úplného opotřebení břitu, zatímco u konvenčního materiálu se později vytvořila plynulá tříska.



**Obrázek 21 Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min**

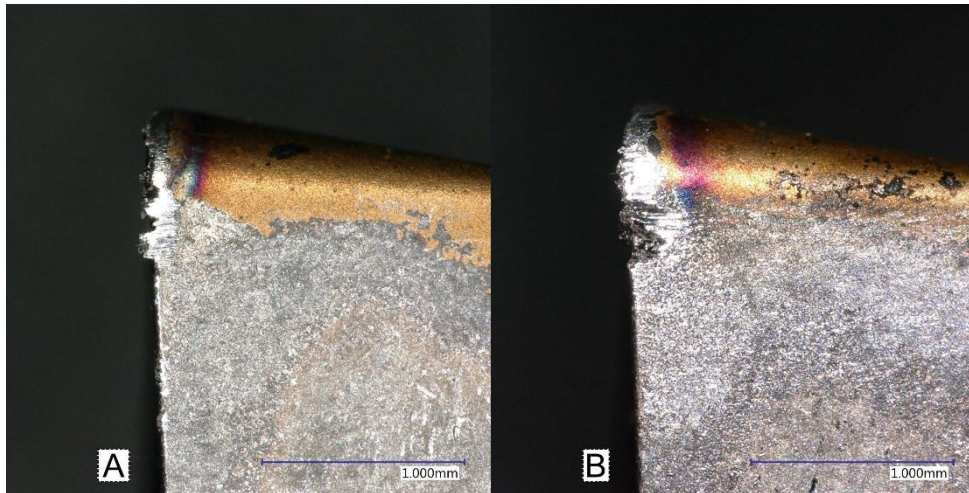
Na obrázku 22 je vidět otřep, který vznikl při obrábění konvenčního materiálu. Tento otřep mohl být jedním z faktorů, které vedly k výrazně menší trvanlivosti břitu při obrábění tohoto materiálu. Na obrázku 20 je patrné, že destička B má opotřebení daleko za hloubkou řezu, což může být důsledkem vzniku tohoto otřepu. V posledním měření bylo opotřebení břitové destičky i za hloubkou řezu tak velké, že nebylo možné přesně určit jeho hodnotu, ale tato hodnota byla výrazně nad dovolenou mezí. Měření bylo v případě konvenčního materiálu ukončeno až při opotřebení břitu 0,356 mm což odpovídalo necelým 9 min obrábění, ale k určenému opotřebení hřbetu nástroje došlo již po 6,7 min.



**Obrázek 22 Otřep na obráběném materiálu**

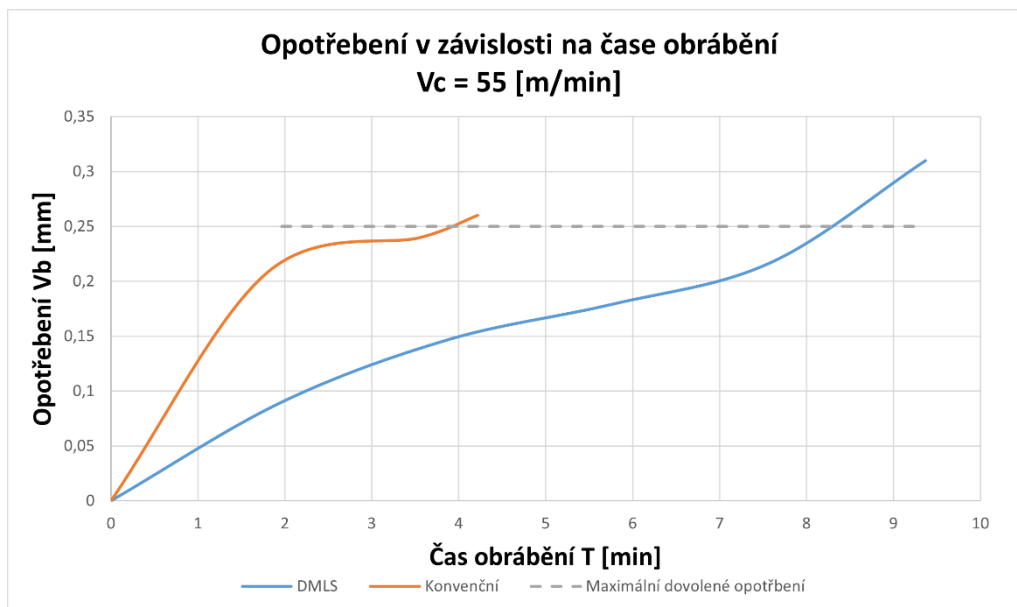
Při dalším měření byla zvolena řezná rychlost 55 m/min, zatímco ostatní parametry obrábění zůstaly stejné. Pro soustružení 3D tištěného materiálu byla použita vyměnitelná břitová destička označená jako A na obrázku 23. Pro soustružení konvenčního materiálu byla použita destička s označením B na stejném obrázku. Snímky obou destiček byly pořízeny po stejné době řezu. Podobně jako v předchozím měření s nižší řeznou rychlostí (40 m/min) bylo zjištěno, že při obrábění konvenčního materiálu došlo k většímu opotřebení než u 3D tištěného materiálu.





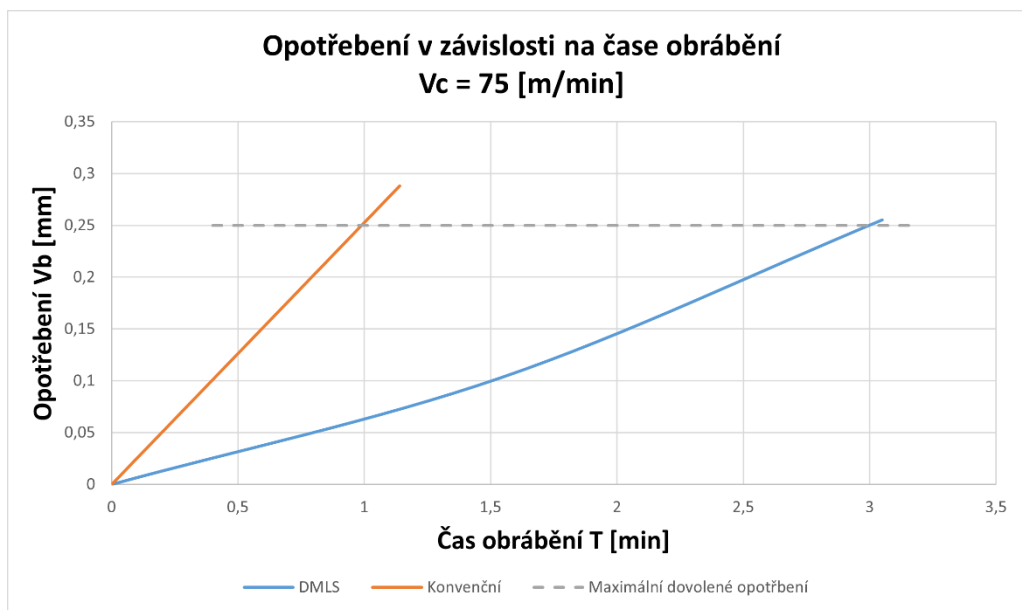
**Obrázek 23** Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál)

Na obrázku 24 je znázorněn graf zobrazující opotřebení obou vyměnitelných břitových destiček v závislosti na době řezu. Jak bylo očekáváno, při vyšší řezné rychlosti došlo k rychlejšímu opotřebení obou řezných nástrojů než při nižší řezné rychlosti. Nicméně, rozdíl mezi dobou dosažení stanoveného opotřebení pro konvenční a 3D tištěný materiál nebyl tak výrazný jako v předchozím měření. Konvenční materiál dosáhl stanoveného opotřebení přibližně dvakrát rychleji než 3D tištěný materiál. Průběh obrábění byl podobný jako v prvním měření. Při obrábění konvenčního materiálu docházelo taktéž ke vzniku otřepu před řezným nástrojem. Opotřebení řezného nástroje však vznikalo výrazně méně mimo část, která byla v řezu oproti předešlému měření.



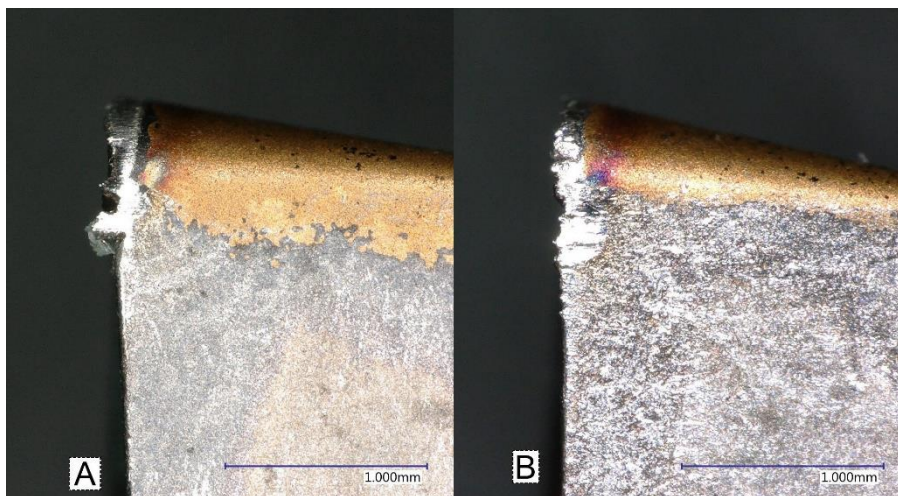
**Obrázek 24** Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min

Pro poslední měření byla zvolena vyšší řezná rychlost 75 m/min při zachování ostatních řezných podmínek. Výsledkem bylo velmi rychlé opotřebení obou vyměnitelných břitových destiček. Průběh tohoto opotřebení je vidět v grafu na obrázku 25.



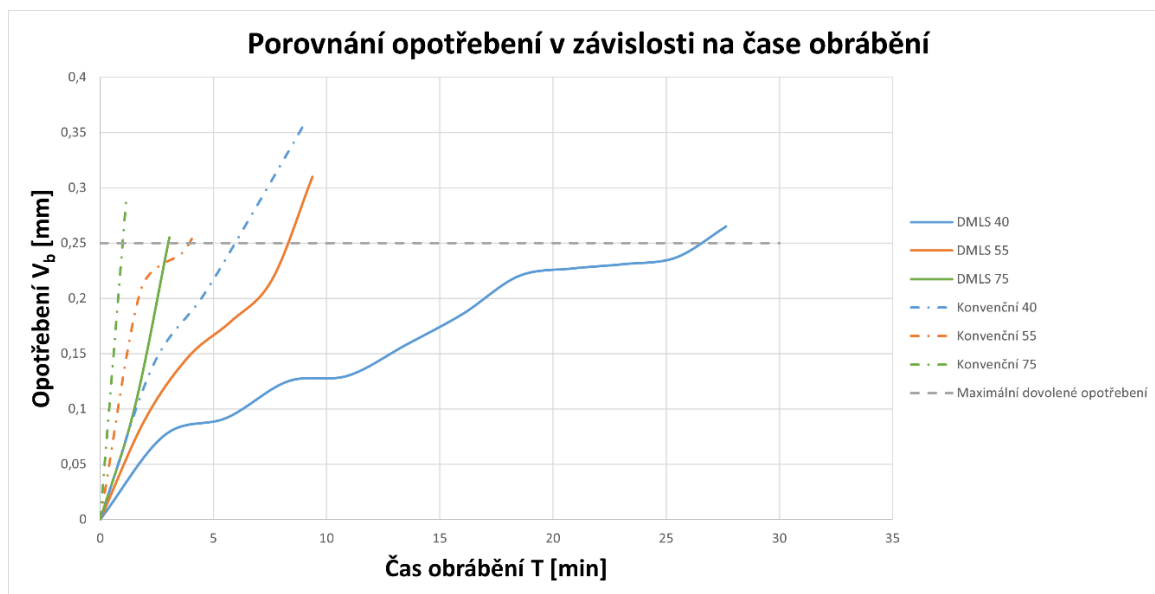
Obrázek 25 Průběh opotřebení při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min

Na obrázku 26 je možné porovnat úroveň opotřebení obou destiček po stejné délce řezu. Destička B, která byla použita při obrábění konvenčního materiálu, dosáhla opotřebení již po jedné minutě obrábění. Při obrábění 3D tištěného materiálu se podobně jako v předešlých měřeních potvrdil trend pomalejšího opotřebení řezného nástroje v porovnání s konvenčním materiálem.



Obrázek 26 Porovnání VBD při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min (A 3D tištěný materiál, B konvenční materiál)

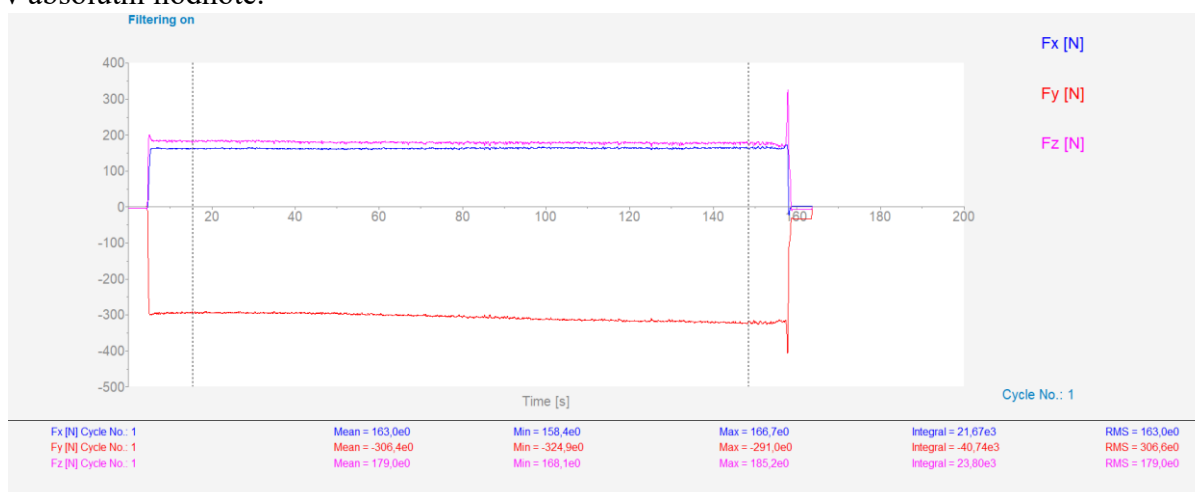
Porovnání mezi všemi řeznými rychlostmi je vidět v grafu na obrázku 27. Je patrné, že při nižší řezné rychlosti došlo k výrazně delší době dosažení stanoveného opotřebení u 3D tištěného materiálu, ve srovnání s ostatními měřeními u konvenčního i 3D tištěného materiálu. Při vyšší řezné rychlosti se tyto časy více srovnaly. V grafu je také vidět, že k opotřebení při obrábění 3D tištěného materiálu řeznou rychlostí 75 m/min došlo dříve jen o krátkou dobu než při obrábění konvenčního materiálu řeznou rychlostí 55 m/min.



Obrázek 27 Porovnání průběhu opotřebenění

## 6.2 Vyhodnocení řezných sil

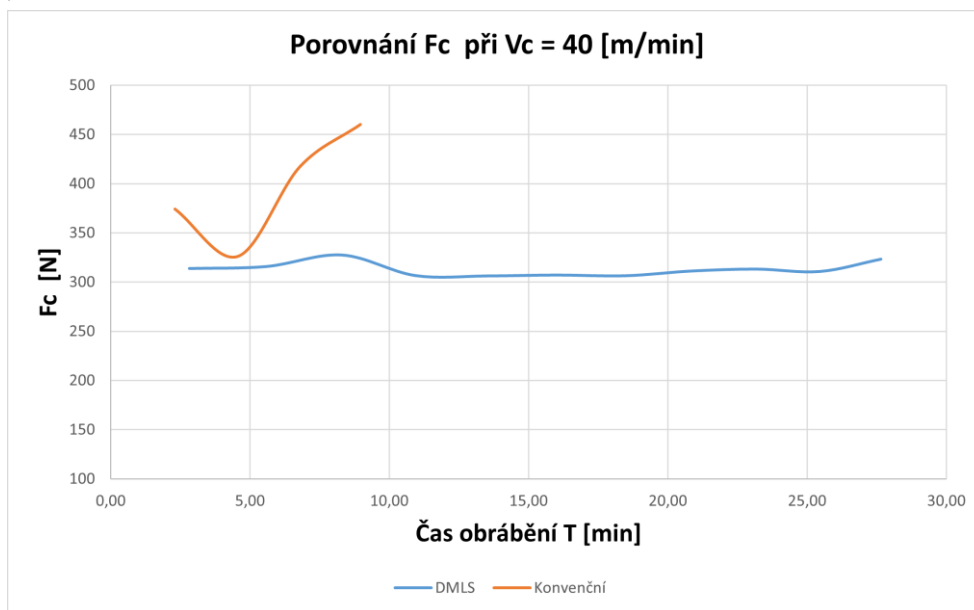
Pro analýzu řezných sil během experimentu byl použit softwaru DynoWare, který byl připojen k dynamometru od firmy KISTLER. Pro získání co nejpřesnějších výsledků byla z naměřených dat vybrána oblast, která nezahrnuje nájezd ani výjezd z řezu, což by mohl mít vliv na chvění celé soustavy. Výsledné naměřené hodnoty byly dále upraveny pomocí filtru a byla zaznamenána průměrná hodnota pro každou jednotlivou složku. Příklad vybrané oblasti, která je ohraničena svislými čarami je vidět na obrázku 28. Vzhledem k tomu, že dynamometr a obráběcí stroj mají různé souřadnicové systémy, platí, že  $F_x$  představuje pasivní složku řezné síly,  $F_y$  hlavní složku řezné síly a  $F_z$  označuje axiální složku řezné síly. Pro vyhodnocení byla použita pouze data naměřená pro hlavní složku řezné síly  $F_c$ , která byla zaznamenána v absolutní hodnotě.



Obrázek 28 Měření řezných sil

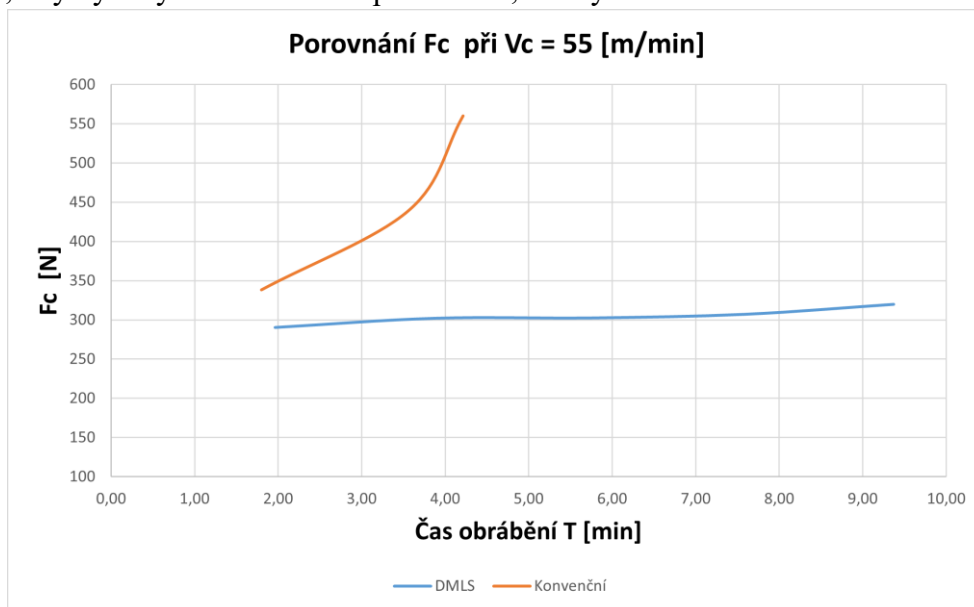
V grafu na obrázku 29 jsou zaznamenány hodnoty řezných sil naměřených při řezné rychlosti 40 m/min. U 3D tištěného vzorku byly hodnoty hlavní řezné síly  $F_c$  v průběhu času relativně stálé, i když docházelo k postupnému opotřebenění nástroje. Rozdíly v naměřených hodnotách byly minimální a pohybovaly se v řádu jednotek N, což naznačuje, že řez byl během celého

obrábění stabilní. Pokud se objevily mírné výchyly, mohly být způsobeny například vznikem nárůstku, který se během obrábění vytvářel. Naopak u konvenčního vzorku rostly hodnoty hlavní řezné síly  $F_c$  výrazně rychleji, podobně jako rychlost opotřebení nástroje. Poslední naměřená hodnota byla zaznamenána poté, co bylo dosaženo stanoveného stupně opotřebení. Zvyšující se řezné síly nemusely být způsobeny pouze rychlým opotřebením nástroje, ale také otřepem, který se vytvářel před nástrojem při obrábění a mohl přispívat k rozkmitání celé soustavy.



Obrázek 29 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 40 m/min

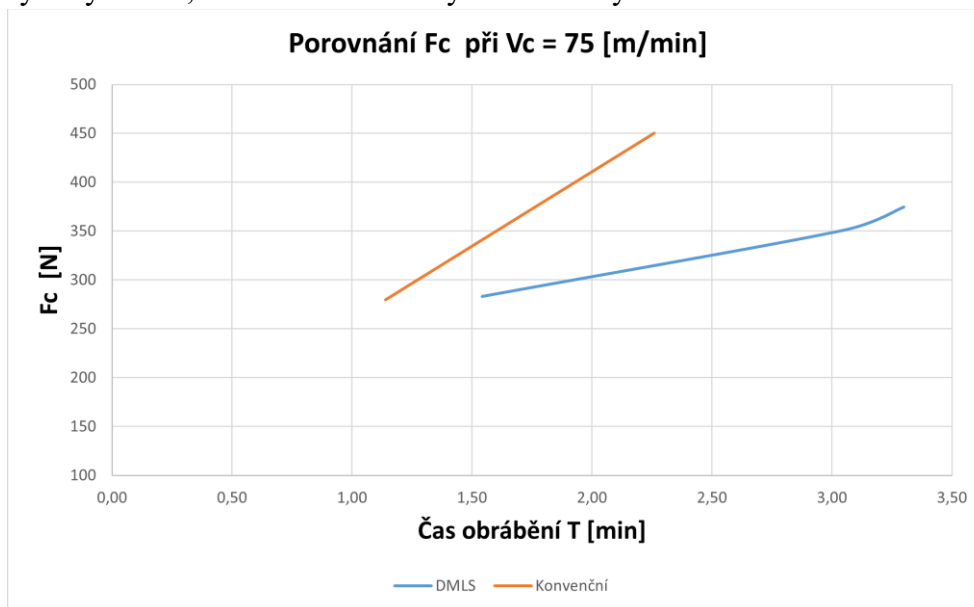
Průběh naměřených řezných sil při řezné rychlosti 55 m/min byl podobný jako při předešlé řezné rychlosti. Z grafu na obrázku 30 je patrné, že již od začátku obrábění byly řezné síly při obrábění konvenčního materiálu vyšší než u 3D tištěného materiálu. Hodnoty řezných sil při obrábění 3D tištěného materiálu byly velmi podobné jako při obrábění s nižší řeznou rychlostí. Při obrábění konvenčního materiálu byly naměřené hodnoty výrazně vyšší, zejména na konci obrábění, kdy byla výsledná hodnota přibližně 1,75x vyšší než u 3D tištěného materiálu.



Obrázek 30 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 55 m/min



Během posledního měření při řezné rychlosti 75 m/min bylo naměřeno méně hodnot než v předchozích měřeních. Toto bylo ovlivněno opotřebením hřbetu řezného nástroje. Nicméně, ve srovnání s měřením opotřebením, bylo možné získat více údajů o řezné síle  $F_c$  před samotným vylomením řezného nástroje. Tyto naměřené hodnoty jsou zaznamenány v grafu na obrázku 31. V porovnání s předchozími měřeními při nižších řezných rychlostech, byl průběh řezných sil u obou vzorků více srovnatelný. Hodnoty naměřené při prvním řezu jsou téměř totožné u obou materiálů, ale v dalších měřeních se hodnoty postupně rozcházejí. Stejně jako u předchozích dvou řezných rychlostí, došlo k naměření vyšší řezné síly u konvenčního materiálu.



Obrázek 31 Průběh řezných sil při obrábění řeznou rychlostí 75 m/min

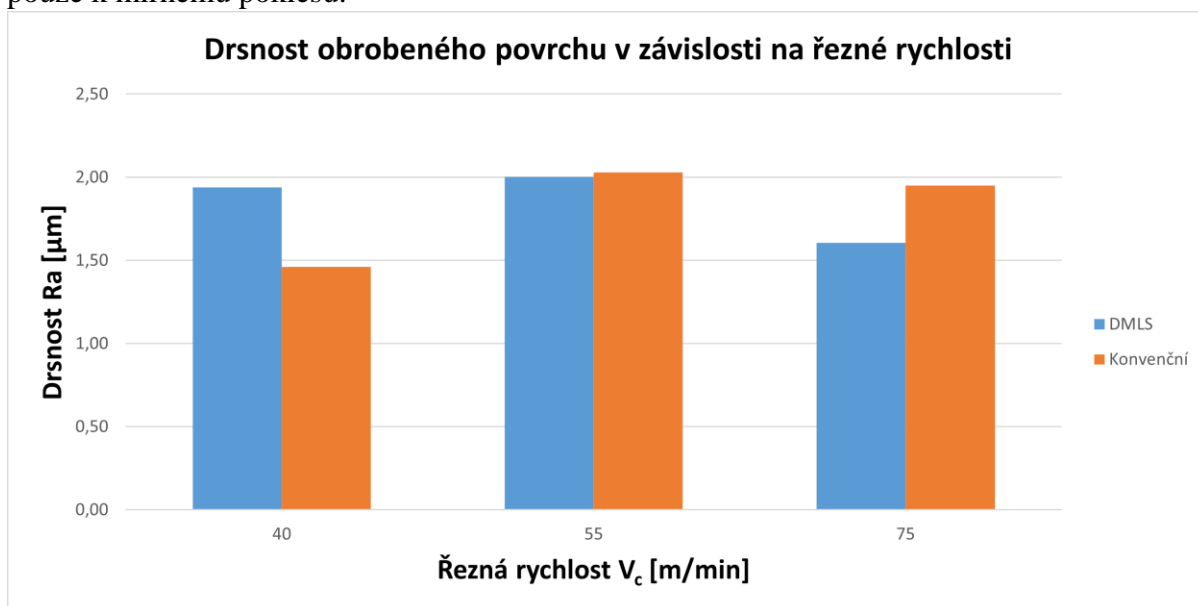
### 6.3 Vyhodnocení měření drsnosti

Během měření drsnosti byly hodnoty získávány buď ze tří, nebo v některých případech ze dvou různých míst obrobeneho povrchu. Tyto hodnoty byly následně zaznamenány do tabulky a průměrovány pro každý řez a celkovou dobu obrábění při dané řezné rychlosti pro jednotlivé materiály. V grafu na obrázku 32 jsou porovnány hodnoty drsnosti, které byly naměřeny během obrábění. Z grafu vyplývá, že při řezné rychlosti 40 m/min byla průměrná hodnota drsnosti obrobeneho povrchu a o přibližně 0,5  $\mu\text{m}$  nižší u konvenčního materiálu než u 3D tištěného materiálu. Nicméně u 3D tištěného materiálu bylo naměřeno více hodnot drsnosti, což by mohlo naznačovat, že tyto hodnoty jsou přesnější.

Hodnoty drsnosti při obrábění s řeznou rychlostí 55 m/min pro 3D tištěný materiál jsou mírně vyšší než v předchozím měření. Konvenční materiál však vykazoval v tomto případě výrazně vyšší průměrnou drsnost než při nižší řezné rychlosti, a dokonce mírně převyšuje hodnoty naměřené pro tištěný materiál.

Z důvodu krátké životnosti řezných nástrojů bylo při obrábění s řeznou rychlostí 75 m/min naměřeno jen málo hodnot drsnosti, stejně jako u předchozích měření. Z grafu je patrné, že hodnoty drsnosti naměřené pro 3D tištěný materiál byly nižší než hodnoty naměřené při nižších řezných rychlostech u tohoto materiálu. Naopak drsnost obrobeneho povrchu u konvenčního

materiálu zůstala na podobné hodnotě jako při obrábění s předchozí řeznou rychlostí, došlo pouze k mírnému poklesu.

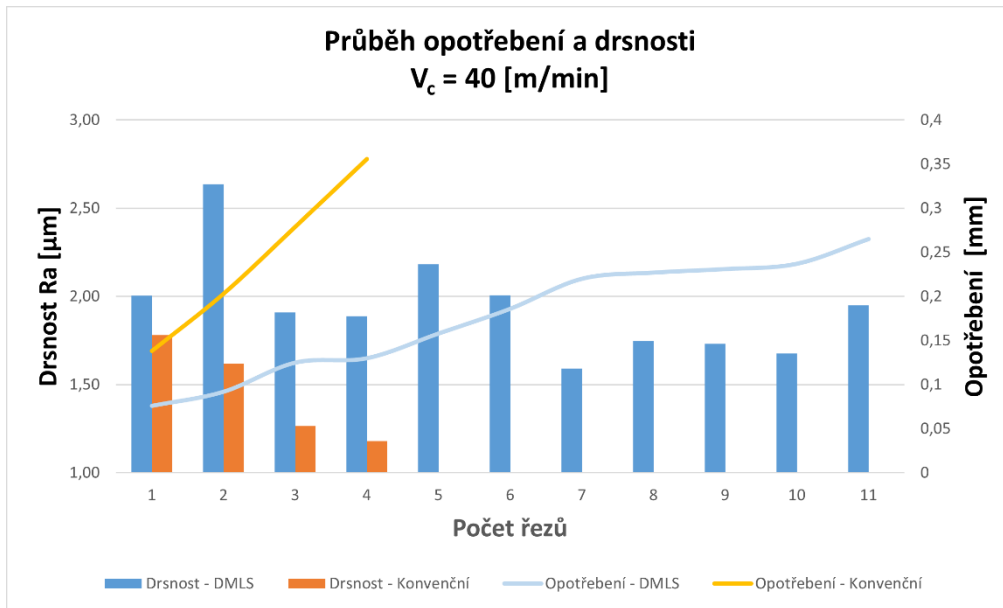


Obrázek 32 Porovnání průměrné drsnosti při obrábění

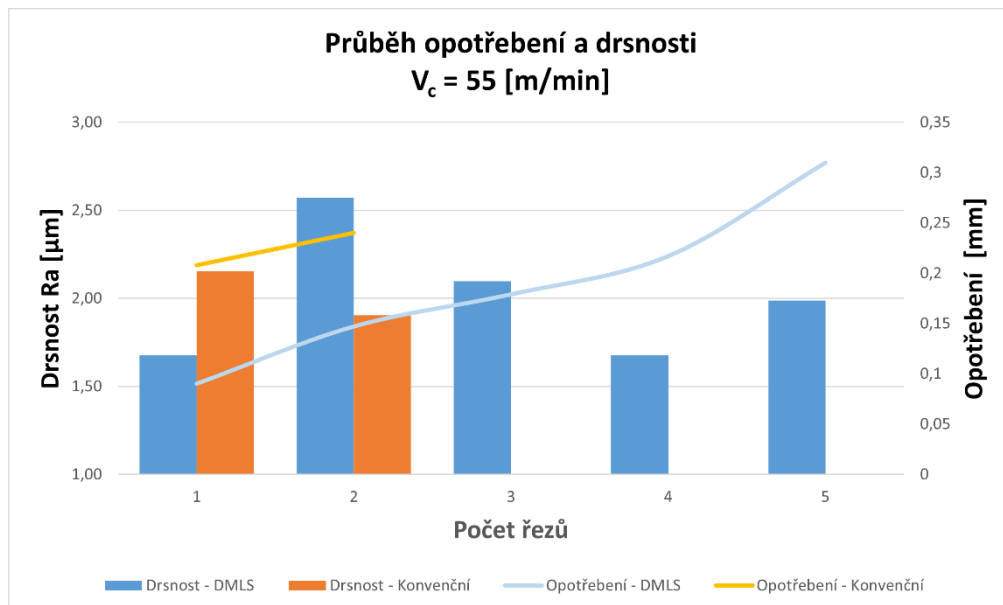
Na obrázku 33 a 34 jsou grafy znázorňující výsledky měření opotřebení a drsnosti při jednotlivých řezech pro řeznou rychlost 40 m/min a 55 m/min. Pro poslední řeznou rychlost nebylo možné vytvořit odpovídající graf z důvodu nedostatečného množství naměřených hodnot. Z obou grafů je zřejmé, že při obrábění konvenčního materiálu byla drsnost nižší se zvyšujícím se opotřebením. Avšak u vyšší řezné rychlosti bylo naměřeno pouze nízké množství hodnot, což není dostatečné pro jednoznačné potvrzení této závislosti.

U tištěného materiálu nelze pozorovat jednoznačnou závislost mezi drsností povrchu a opotřebením řezného nástroje. Pouze při nižší řezné rychlosti byly mezi 3. a 4. řezem a mezi 7. a 10. řezem hodnoty drsnosti i opotřebení přibližně konstantní. Pro ostatními hodnoty není patrná žádná zřetelná závislost. Při vyšší řezné rychlosti došlo k podobnému jevu jako při nižší řezné rychlosti, kdy byla naměřena nejvyšší drsnost při druhém řezu a následným poklesem. Mezi 3. a 4. řezem došlo s rostoucím opotřebením k poklesu drsnosti podobně jako u konvenčního materiálu. Poslední řez však vykazoval opět vyšší drsnost, což může být způsobeno výraznějším nárůstem opotřebení ve srovnání s předchozími řezy.

S ohledem na konstantní řezné podmínky při obrábění obou materiálů je možné předpokládat, že odlišná závislost drsnosti na opotřebením je důsledkem rozdílů mezi těmito materiály. Existuje několik faktorů, které mohly ovlivnit drsnost a opotřebením, jako je rozdílná mikrostruktura, různá tvrdost nebo odlišný mechanismus tvorby třísky.



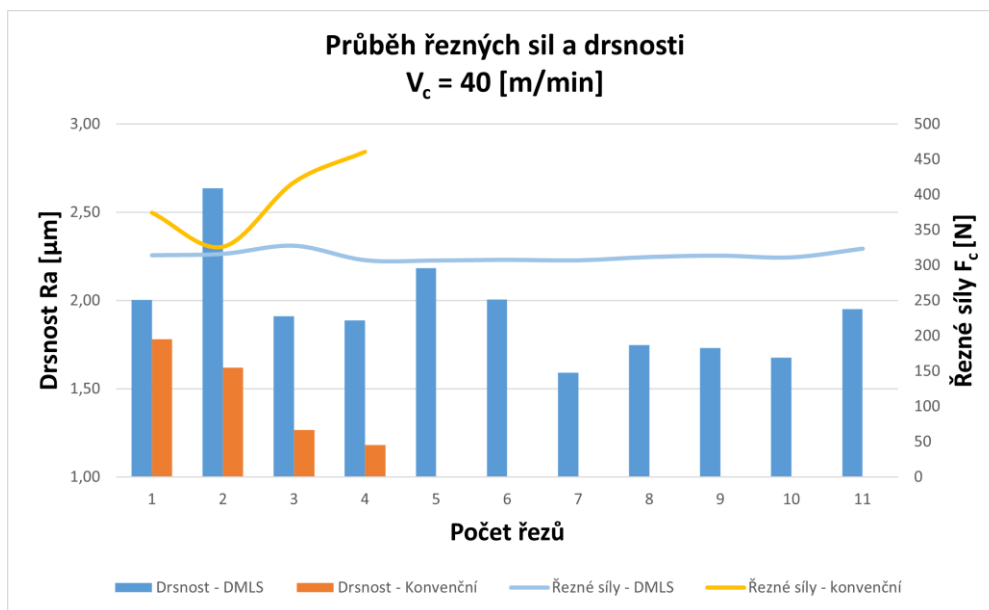
Obrázek 33 Průběh opotřebení řezného nástroje a drsnosti při  $V_c = 40$  m/min



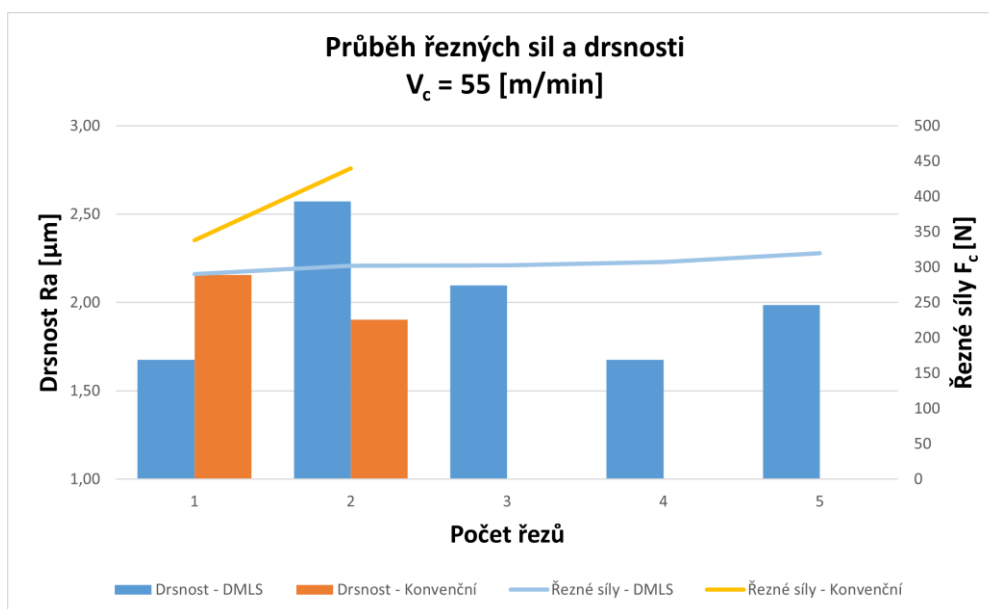
Obrázek 34 Průběh opotřebení řezného nástroje a drsnosti při  $V_c = 55$  m/min

Průběh drsnosti a řezných sil je zobrazena v grafech na obrázcích 35 a 36. I v tomto případě nebylo možné vytvořit graf pro nejvyšší řeznou rychlost z důvodu nízkého počtu naměřených hodnot. Při obrábění konvenčního materiálu při řezné rychlosti 55 m/min došlo ke snížení drsnosti obrobeneho povrchu s rostoucími řeznými silami. Stejně jako u průběhu opotřebení řezného nástroje a drsnosti při stejné řezné rychlosti není úplně jasné, zda existuje závislost mezi oběma hodnotami z důvodu nedostatečného množství naměřených hodnot. V tomto případě není jasná závislost ani z nižší řezné rychlosti pro konvenční materiál.

Hodnoty drsnosti obrobeneho povrchu při obrábění tištěného materiálu nevykazují žádnou závislost na řezných silách a jeví se oproti nim spíše nahodile vzhledem k tomu, že hodnoty řezných sil byly při obrábění poměrně konstantní bez významných změn v průběhu celého obrábění pro obě řezné rychlosti.



Obrázek 35 Průběh řezných sil a drsnosti při  $V_c = 40$  m/min



Obrázek 36 Průběh řezných sil a drsnosti při  $V_c = 55$  m/min

## 6.4 Zhodnocení výsledků

Při zhodnocení výsledků obrobitelnosti bude považován za lépe obrobitelný ten materiál, který dosáhl lepších výsledků při daném kritériu. Tedy delší životnosti řezného nástroje, nižších řezných sil a nižší drsnosti obrobeného povrchu.

Výsledné hodnoty opotřebení řezného nástroje ve všech případech ukazují na lepší obrobitelnost vytisknutého materiálu. K tomu do jisté míry přispěl otřep, který vznikl při obrábění konvenčního materiálu. Opotřebení, které vznikalo v jeho důsledku na břitových destičkách je zřejmé ze snímků z mikroskopu. Vyšší tvrdost tištěného materiálu může naznačovat vyšší křehkost, což by bylo konzistentní i s už například zmíněnou prací [29] a mohlo ovlivnit opotřebení řezného nástroje. Mezi další faktory, které mohli mít vliv na opotřebení, ale nebyly měřeny patří zejména teplota v místě řezu a obsah karbidových částic v

mikrostruktúre obou materiálů. Tyto faktory jsou obecně považovány za problémy při obrábění Inconelu 718 a mohou způsobovat zvýšenou míru opotřebení řezného nástroje. Výsledky měření řezných sil ukazují podobnou tendenci jako opotřebení. U tištěného materiálu byla velikost řezných sil nižší při všech řezných rychlostech, což nasvědčuje lepší obrobiteľnosti tohoto materiálu. V případě konvenčního materiálu došlo k výraznějšímu nárůstu řezných sil, což může být způsobeno rychlejším opotřebením řezného nástroje. Dle naměřených hodnot drsnosti lze usoudit, že při nižší řezné rychlosti vykazuje konvenční materiál lepší obrobiteľnost, vzhledem k nižším naměřeným hodnotám drsnosti. Naopak při vyšší řezné rychlosti byly naměřené hodnoty drsnosti nižší při obrábění tištěného materiálu, a proto není zcela jasné, který materiál má v tomto ohledu lepší obrobiteľnost. I když výsledky měření drsnosti nejsou zcela jednoznačné, z experimentu lze vyvodit, že tištěný Inconel 718 má lepší obrobiteľnost.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo porovnat obrobiteľnosť 3D tištěného a konvenčního Inconelu 718. V rámci teoretické části byl představen testovaný materiál, včetně jeho vlastností, využití, mikrostruktury a problematiky spojené s jeho obráběním. Metoda použitá pro 3D tisk v této práci je DMLS ta byla popsána v teoretické části, včetně parametrů tisku, které mají vliv na výsledné vlastnosti vytisknuté součásti. Byly také vysvětleny nejpodstatnější rozdíly, které vznikají při 3D tisku, jako například poréznost, heterogenita, anizotropie a zbytková napětí. Tyto rozdíly byly popsány z hlediska jejich vlivu na mechanické vlastnosti materiálu, včetně výsledků statických i dynamických zkoušek, provedených v rámci jiných prací, a dále bylo popsáno porovnání některých mechanických vlastností. Problematika špatné obrobiteľnosti a souvisejících vlastností Inconelu 718, které k ní vedou je dlouhodobě známá a poměrně dobře popsána v literatuře. Tím se také zabývá teoretická část. Kromě toho jsou v této souvislosti zmíněny specifické problémy a rozdíly v obrobiteľnosti při použití různých metod obrábění. Důležitý byl také popis nejpoužívanějších řezných materiálu a řezných prostředí používaných při obrábění Inconelu 718, včetně jejich výhod a nevýhod.

V experimentální části byly zvoleny tři ukazatele pro porovnání obrobiteľnosti obou materiálů byly jimi opotřebení řezného nástroje, drsnost obrobené plochy a velikost řezných sil. Tyto údaje byly měřeny v pravidelných časových intervalech při třech řezných rychlostech. Hlavním ukazatelem obrobiteľnosti bylo zejména opotřebení řezného nástroje. Při všech řezných rychlostech byla životnost delší při obrábění 3D tištěného materiálu. Největší rozdíl byl při nejnižší řezné rychlosti, při které byla životnost řezného nástroje několika násobně vyšší u tištěného materiálu. Nejmenší rozdíl byl naopak při použití nejvyšší řezné rychlosti, kdy došlo k velmi rychlému opotřebení u obou vyměnitelných břitových destiček. To mělo také vliv na množství naměřených hodnot. Ke stanovenému opotřebení došlo však dříve i v tomto případě při obrábění konvenčního materiálu. Při měření řezných sil byla porovnána pouze hlavní složka řezných sil. Řezné síly vykazovaly podobný trend jako opotřebení. Ve všech měřeních byla průměrná hodnota vyšší při obrábění konvenčního materiálu. Měření drsnosti nebylo jednoznačně vypovídající jako předešlá dvě kritéria. Při nejnižší řezné rychlosti byly hodnoty drsnosti nižší při obrábění konvenčního materiálu. To se však změnilo při zvýšení řezné rychlosti, kdy byly hodnoty drsnosti skoro totožné u obou materiálů. Pro nejvyšší použitou řeznou rychlost byly však hodnoty nižší u tištěného materiálu. Z výsledků lze usuzovat lepší obrobiteľnost tištěného Inconelu 718.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] DE BARTOLOMEIS, Andrea, Stephen T. NEWMAN, I. S. JAWAHIR, Dirk BIERMANN a Alborz SHOKRANI. Future research directions in the machining of Inconel 718. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021, **297**, 117260. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2021.117260
- [2] EZUGWU, E.O, J BONNEY a Y YAMANE. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **134**(2), 233–253. Dostupné z: doi:10.1016/s0924-0136(02)01042-7
- [3] JENA, A. K. a M. C. CHATURVEDI. The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys. *Journal of Materials Science* [online]. 1984, **19**(10), 3121–3139 [vid. 2020-10-15]. Dostupné z: doi:10.1007/bf00549796
- [4] Kubický nitrid boru - CBN. *www.osu.cz* [online]. [vid. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/03011.html>
- [5] DENG, Dunyong a Ekonomisk OCH. *Additively Manufactured Inconel 718 : Microstructures and Mechanical Properties*. Linköping: Department Of Management And Engineering, Linköping University, 2018. ISBN 9789176853832.
- [6] Superalloys: A Primer and History. *Tms.org* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.tms.org/Meetings/Specialty/Superalloys2000/SuperalloysHistory.html>
- [7] AZADIAN, Saied, Liu-Ying WEI a Richard WARREN. Delta phase precipitation in Inconel 718. *Materials Characterization* [online]. 2004, **53**(1), 7–16 [vid. 2019-11-23]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchar.2004.07.004
- [8] BALAN, Alexandre, Michel PEREZ, Thibaut CHAISE, Sophie CAZOTTES, Didier BARDEL, Fabien CORPACE, François PICHOT, Alexis DESCHAMPS, Frédéric DE GEUSER a Daniel NELIAS. Precipitation of  $\gamma''$  in Inconel 718 alloy from microstructure to mechanical properties. *Materialia* [online]. 2021, **20**, 101187 [vid. 2022-05-02]. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtla.2021.101187
- [9] *INCONEL*® alloy 718 [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
- [10] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [11] PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [12] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [13] HOSSEINI, E. a V.A. POPOVICH. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718. *Additive Manufacturing* [online]. 2019, **30**, 100877. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100877
- [14] DUDA, Thomas a L Venkat RAGHAVAN. Durrës [online]. 2016, **49**(29), 103–110. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2016.11.111

- [15] Volpato, Guilherme Maziero, et al. "A Comprehensive Literature Review on Laser Powder Bed Fusion of Inconel Superalloys." *Additive Manufacturing*, vol. 55, July 2022, p. 102871, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102871>. Accessed 26 May 2022.
- [16] Additive Fabrication. *Custompartnet* [online]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>
- [17] KITAGAWA, T., A. KUBO a K. MAEKAWA. Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6Al-6V-2Sn. *Wear* [online]. 1997, **202**(2), 142–148 [vid. 2019-11-04]. Dostupné z: [doi:10.1016/s0043-1648\(96\)07255-9](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(96)07255-9)
- [18] Special Metals INCONEL® Alloy 718. *www.matweb.com* [online]. [vid. 2022-12-15]. Dostupné z: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=94950a2d209040a09b89952d45086134](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=94950a2d209040a09b89952d45086134)
- [19] Alloy 718 - Outstanding Nickel Alloys from NeoNickel. *NeoNickel* [online]. [vid. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.neonickel.com/alloys/nickel-alloys/alloy-718/>
- [20] KOK, Y., X.P. TAN, P. WANG, M.L.S. NAI, N.H. LOH, E. LIU a S.B. TOR. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. *Materials & Design* [online]. 2018, **139**, 565–586. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matdes.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021)
- [21] SMITH, Derek H., Jonathan BICKNELL, Luke JORGENSEN, Brian M. PATTERSON, Nikolaus L. CORDES, Igor TSUKROV a Marko KNEZEVIC. Microstructure and mechanical behavior of direct metal laser sintered Inconel alloy 718. *Materials Characterization* [online]. 2016, **113**, 1–9 [vid. 2021-08-30]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matchar.2016.01.003](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.003)
- [22] DE OLIVEIRA, Déborah, Raphael Lima DE PAIVA, Rosemar Batista DA SILVA a Pedro Henrique DE CARVALHO CASTRO. Assessment of the grindability of Inconel 718 under different coolant delivery techniques. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online]. 2019, **42**(1) [vid. 2023-01-21]. Dostupné z: [doi:10.1007/s40430-019-2093-0](https://doi.org/10.1007/s40430-019-2093-0)
- [23] SINHA, Manoj Kumar, Dinesh SETTI, Sudarsan GHOSH a P. VENKATESWARA RAO. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2016, **21**, 124–133 [vid. 2023-01-21]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jmapro.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.12.004)
- [24] OGEDENGBE, T.S., A. P. OKEDIJI, A. A. YUSSOUF, O. A. ADEROBA, O. A. ABIOLA, I. O. ALABI a O. I. ALONGE. The Effects of Heat Generation on Cutting Tool and Machined Workpiece. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, **1378**, 022012. Dostupné z: [doi:10.1088/1742-6596/1378/2/022012](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022012)
- [25] DE BARTOLOMEIS, Andrea, Stephen T. NEWMAN, Dirk BIERMANN a Alborz SHOKRANI. State-of-The-Art Cooling and Lubrication for Machining Inconel 718. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* [online]. 2020, **143**(5) [vid. 2021-10-25]. Dostupné z: [doi:10.1115/1.4047842](https://doi.org/10.1115/1.4047842)
- [26] FAN, Wei, Wei JI, Lihui WANG, Lianyu ZHENG a Yahui WANG. A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, **110**(11-12), 2863–2879 [vid. 2022-05-17]. Dostupné z: [doi:10.1007/s00170-020-06052-9](https://doi.org/10.1007/s00170-020-06052-9)



- [27] EZUGWU, E.O. a J. BONNEY. Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2004, **153-154**, 1045–1050 [vid. 2020-03-03]. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.329
- [28] SHARMA, Vishal S., Manu DOGRA a N.M. SURI. Cooling techniques for improved productivity in turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2009, **49(6)**, 435–453 [vid. 2019-05-17]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmactools.2008.12.010
- [29] ČERNÝ, Ivo, Jan KEC, Tomáš VLASÁK, Luboš REMAR, Miroslav JERSÁK a Miroslav ZETEK. Mechanical Properties and Fatigue Resistance of 3D Printed Inconel 718 in Comparison with Conventional Manufacture. *Key Engineering Materials* [online]. 2018, **774**, 313–318 [vid. 2019-12-16]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.774.313
- [30] VLASÁK, Tomáš, Šárka NEUMANNOVÁ, Jan KEC, Adam POLOCH, Ivo ČERNÝ a Miroslav ZETEK. *Vliv technologie 3D tisku na vlastnosti materiálu INC 718* [online]. B.m.: Západočeská univerzita v Plzni, 2020 [vid. 2023-05-08]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11025/50719
- [31] ONUIKE, Bonny a Amit BANDYOPADHYAY. Additive manufacturing in repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel 718. *Materials Letters* [online]. 2019, **252**, 256–259 [vid. 2021-12-09]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2019.05.114
- [32] BEAN, G. E., T. D. MCLOUTH, D. B. WITKIN, S. D. SITZMAN, P. M. ADAMS a R. J. ZALDIVAR. Build Orientation Effects on Texture and Mechanical Properties of Selective Laser Melting Inconel 718. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2019, **28(4)**, 1942–1949 [vid. 2019-12-16]. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-019-03980-w
- [33] Volpato, Guilherme Maziero, et al. “A Comprehensive Literature Review on Laser Powder Bed Fusion of Inconel Superalloys.” *Additive Manufacturing*, vol. 55, July 2022, p. 102871, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102871>. Accessed 26 May 2022.
- [34] Alsalla, Hamza Hassn, et al. “The Effect of Different Build Orientations on the Consolidation, Tensile and Fracture Toughness Properties of Direct Metal Laser Sintering Ti-6Al-4V.” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, no. 2, 12 Mar. 2018, pp. 276–284, <https://doi.org/10.1108/rpj-04-2016-0067>. Accessed 11 May 2020.
- [35] EOS M 290 - Mid-Size 3D Printing. [www.eos.info](http://www.eos.info) [online]. Dostupné z: <https://www.eos.info/en/industrial-3d-printer/metal/eos-m-290>
- [36] zVĚDAvosti: Obrábění hrou. *Bav se vědou* [online]. 24. březen 2020 [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://bavsevedou.zcu.cz/zvedavosti-obrabeni-hrou/>
- [37] ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - CCMT/CCGT-SM : 5566931 - CCMT 09T304-SM. [www.iscar.com](http://www.iscar.com) [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/ecatalog/item.aspx?cat=5566931&fnum=867&mapp=IS&app=20&GFSTYP=M&isoD=1&lang=WZ>
- [38] Surface Roughness Tester Handheld | Surtronic Duo II. [www.taylor-hobson.com](http://www.taylor-hobson.com) [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/products/surface-profilers/handheld-surtronic/surtronic-duo-surface-roughness-tester>
- [39] Digitální mikroskop VHX-6000 Pokročilé pozorování s uživatelsky přívětivým prostředím | KEYENCE International Belgium. [www.keyence.eu](http://www.keyence.eu) [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: [https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/vhx-6000/index\\_cz.jsp](https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/vhx-6000/index_cz.jsp)

[40] KistlerB2bFrontend. *www.kistler.com* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/PT/en/p/multicomponent-dynamometer-minidyn-4-kn-cover-plate-55x80-mm-9119aa2/000000000018017665>

[41] Data Acquisition System (DAQ) for up to 2 force plates, 16 channels | Kistler. *www.kistler.com* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/DE/en/cp/data-acquisition-system-daq-for-up-to-2-force-plates-16-channels-5691a/P0000372>

[42] Laboratory charge amplifiers, multi-channel, low noise, measuring ranges  $\pm 2$  to  $\pm 2200000$  pC, freq. range  $\approx 0 \dots 200$  kHz | Kistler. *www.kistler.com* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/INT/en/cp/laboratory-charge-amplifiers-multi-channel-low-noise-measuring-ranges-%C2%B12-to-%C2%B12200000-pc-freq.-range-%E2%89%80-%E2%80%A6-200-khz-5080a/P0000276>

[43] Maxxturn 25. *Emco Group UK* [online]. [vid. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://emco.co.uk/maxxturn-25/>

[44] ISCAR Cutting Tools - Metal Working Tools - SCLCR/L : 3600847 - SCLCL 1212F-09. *www.iscar.com* [online]. [vid. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=3600847&fnum=337&mapp=IS&lang=WZ>