

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie – technologie  
obrábění

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Hodnocení kvality povrchu při vrtání slitiny Inconel 718

Autor: **Bc. Oldřich DANĚK**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Miroslav ZETEK, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Oldřich DANĚK**  
Osobní číslo: **S15N0013K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojírenská technologie - technologie obrábění**  
Název tématu: **Hodnocení kvality povrchu při vrtání slitiny Inconel 718**  
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Úvod
2. Analýza současné poznatkové základny
3. Návrh metod pro provádění experimentů
4. Diskuse výsledků experimentů a jejich porovnání
5. Závěr

Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Rozsah kvalifikační práce: 50 - 70 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- STANĚK, Jiří a NĚMEJC, Jiří. Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 58 s. ISBN 80-7043-363-9
- SHAW, Milton Clayton, Metal cutting principles, Oxford University Press, 2005, ISBN 0-19-514206-3
- GRZESIK. Wit., Advanced machining process of metallic materials, Oxford, 2008, ISBN 978-0-08-044534-2
- CHEE KAI CHUA, KAH FAI LEONG, CHU SING LIM, Rapid Prototyping: Principles and Applications, World Scientific Publishing, 2010 ISBN: 13-978-981-277-897-0
- PATRI K. VENUVINOD, WEIYIN MA, Rapid Prototyping: Laser-Based and Other Technologies, Kluwer Academic Publishers, 2004, ISBN: 1-4020-7577-4

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.**  
Katedra technologie obrábění  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Kamil Kolařík, Ph.D.**  
Katedra inženýrství pevných látek, ČVUT Praha  
Datum zadání diplomové práce: **16. října 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 18. října 2017

## **Prohlášení o autorství**

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

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **AUTORSKÁ PRÁVA**

Podle Zákona o právu autorském. č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                      |  |                   |                         |  |
|----------------------|--|-------------------|-------------------------|--|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Daněk  | Jméno<br>Oldřich  |                         |  |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | 2303T004 „Strojírenská technologie – technologie obrábění“ |                   |                         |  |
| <b>VEDOUČÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Doc. Ing. Zetek, Ph.D.         | Jméno<br>Miroslav |                         |  |
| <b>PRACOVIŠTĚ</b>    | ZČU - FST - KTO  |                   |                         |  |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>   | <b>BAKALÁŘSKÁ</b> | Nehodící se<br>škrtněte |  |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Hodnocení kvality povrchu při vrtání slitiny Inconel 718   |                   |                         |  |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KTO | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2018 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                      |    |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| <b>CELKEM</b> | 63 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 53 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 10 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

|   |  |
|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS<br/>(MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL<br/>POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p> | <p>Diplomová práce obsahuje hodnocení kvality povrchu po vrtání slitiny Inconel 718. Byly použity vzorky standardního Inconelu 718 a tisknutého v příčném směru i v podélném směru. V práci je sledován vliv opotřebení nástroje na vlastnosti povrchové vrstvy. Pro zkoumání integrity povrchu bylo použito skenování povrchu technikou Focus Variation, měření drsnosti, měření mikrotvrdomosti metodou kolmých řezů, metalografický výbrus a měření zbytkového napětí pomocí rentgenové difrakce metodou <math>\sin^2\psi</math>.</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p>   | <p style="text-align: center;">vrtání, integrita povrchu, Inconel 718, zpevněná vrstva, rentgenová difrakce, zbytková napětí</p>   |

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

|                          |   |                 |                            |
|--------------------------|---|-----------------|----------------------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Daněk  | Name<br>Oldřich |                            |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | 2303T004 “ Manufacturing Processes – Technology of Metal Cutting“ |                 |                            |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Doc. Ing. Zetek, Ph.D.          | Name<br>Jiří    |                            |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU - FST - KTO   |                 |                            |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | <b>DIPLOMA</b>  | <b>BACHELOR</b> | Delete when not applicable |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Surface quality assessment of alloy Inconel 718 after drilling    |                 |                            |

|                |                        |                   |                      |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Machining Technology | <b>SUBMITTED IN</b> | 2018 |
|----------------|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------|

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

|                |    |                  |    |                       |    |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| <b>TOTALLY</b> | 63 | <b>TEXT PART</b> | 53 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 10 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

|   |  |
|---|--|
| <b>BRIEF DESCRIPTION<br/>TOPIC, GOAL, RESULTS<br/>AND CONTRIBUTIONS</b> | This diploma thesis deals with the evaluation of surface quality after drilling of Inconel 718 alloy. It was used samples of standard Inconel 718 material, printed in transverse direction and longitudinal direction. The effect of tool wearing to the surface layer properties was described. Scanning of surface via microscope with Focus Variation technique, transverse cut microhardness testing, metalography, residual stress measurement by x-ray diffraction using $\sin^2\psi$ method. |
| <b>KEY WORDS</b>  | drilling, surface integrity, Inconel 718, strengthened layer, X-ray diffraction, residual stress   |

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| Obsah.....   | 7  |
| Seznam obrázků .....   | 8  |
| Seznam grafů.....  | 10 |
| Seznam tabulek .....   | 11 |
| Seznam použitých zkratk.....                                     | 12 |
| Seznam použitých veličin.....                                    | 13 |
| 1. Úvod.....   | 14 |
| 2. Analýza současné poznatkové základny .....                    | 15 |
| 2.1 Superslitina Inconel 718.....                                | 15 |
| 2.1.1 Vlastnosti materiálu.....                                  | 15 |
| 2.1.2 Výroba a tepelné zpracování .....                          | 17 |
| 2.1.3 Výroba 3D tiskem .....                                     | 18 |
| 2.1.4 Obrobitelnost a řezné materiály .....                      | 20 |
| 2.1.5 Mechanismy opotřebení nástrojů .....                       | 22 |
| 2.1.6 Optimalizace technologie vrtání.....                       | 23 |
| 2.2 Obrobený povrch.....   | 23 |
| 2.2.1 Definice povrchu .....                                     | 23 |
| 2.2.2 Integrita povrchu .....                                    | 24 |
| 2.3 Vybrané vlastnosti povrchu a způsob jejich zkoumání .....    | 25 |
| 2.3.1 Mikrogeometrie a drsnost.....                              | 25 |
| 2.3.2 Mikrotvrdost a struktura povrchové vrstvy .....            | 30 |
| 2.3.3 Zbytkové napětí.....                                       | 31 |
| 3. Praktická část.....   | 37 |
| 3.1 Příprava a provedení experimentu.....                        | 37 |
| 3.1.1 Použitý polotovar .....                                    | 37 |
| 3.1.2 Průběh obrábění.....                                       | 37 |
| 3.1.3 Měření vybraných vlastností povrchu .....                  | 39 |
| 3.1.4 Tenzometrické radiografické měření zbytkových napětí ..... | 41 |
| 3.2 Výsledky měření .....  | 43 |
| 3.2.1 Opotřebení nástroje .....                                  | 43 |
| 3.2.2 povrchu.....   | 44 |
| 3.2.3 Distribuce mikrotvrdosti .....                             | 46 |
| 3.2.4 Mikrostruktura povrchové vrstvy.....                       | 48 |
| 3.2.5 Analýza SEM a EDS .....                                    | 50 |
| 3.2.6 Měření zbytkových napětí .....                             | 53 |
| 4. Diskuze získaných výsledků .....                              | 57 |
| 5. Závěr.....  | 59 |
| 6. Seznam použité literatury.....                                | 61 |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1: Diagram fázové přeměny slitiny Inconel 718 .....  | 18 |
| Obrázek 2: Princip metody DMLS tisku kovových materiálů .....  | 19 |
| Obrázek 3: Příklady konstrukčního řešení kontaktních snímačů .....   | 27 |
| Obrázek 4: Schéma Michelstonova interferometru (vlevo), zobrazení výstupu objektivu interferometru (vpravo) .....  | 28 |
| Obrázek 5: Náčrt principu normované technologie měření „Focus Variation“ podle Technické komise ISO .....  | 29 |
| Obrázek 6: Nejběžnější průběhy mikrotvrdosti v ovlivněných podpovrchových vrstvách...  | 30 |
| Obrázek 7: Zkouška dle Vickerse .....  | 31 |
| Obrázek 8: Druhy zbytkového napětí, $\sigma_I$ – makroskopické napětí, $\sigma_{II}$ , – mikroskopické napětí, $\sigma_{III}$ – submikroskopické napětí .....  | 32 |
| Obrázek 9: Mechanicky zatížená vrstva a průběhy napětí .....   | 33 |
| Obrázek 10: Povrchová vrstva s mechanickým a tepelným zatížením .....  | 33 |
| Obrázek 11: Rozdělení metod pro měření zbytkového napětí .....   | 35 |
| Obrázek 12: Deformace vzdáleností mřížkových rovin a změny úhlové polohy interferenčního maxima; $I_o$ a $I$ jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou $F$ ..... | 35 |
| Obrázek 13: Princip měření napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ .....   | 36 |
| Obrázek 14: Použité polotovary – konvenční tyč Inconelu 718 (vlevo), 3D tisknutý Inconel 718 v příčné orientaci (uprostřed), 3D tisknutý Inconel 718 v podélné orientaci (vpravo) .....  | 37 |
| Obrázek 15: Tiskárna EOS M290, která je součástí vybavení RTI .....  | 38 |
| Obrázek 16: Snímek použitého prášku pro tisk polotovaru – optická mikroskopie (vlevo) a řádkovací elektronová mikroskopie (vpravo) .....   | 38 |
| Obrázek 17: Podélně rozříznuté vzorky k analýze vnitřního povrchu otvoru .....   | 39 |
| Obrázek 18: Opticko-skenovací mikroskop pro snímání povrchu metodou „Focus variation“ IFM G4 .....   | 39 |
| Obrázek 19: Analyzované metalografické výbrusy vzorků (podélné nahoře a příčné dole)...  | 40 |
| Obrázek 20: $\theta$ - $\theta$ goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical v laboratoři tenzometrické radiografie KIPL na FJFI v Praze.....   | 41 |
| Obrázek 21: Efektivní hloubka vnikání $T_{ef}$ záření $MnK\alpha$ do niklu při určování stavu zbytkové napjatosti. Efektivní hloubka vnikání $T_{ef}$ určuje tloušťku vrstvy, z níž pochází 63,2 % z celkové difraktované energie .....    | 42 |
| Obrázek 22: Princip určení veličiny $FWHM$ .....   | 42 |
| Obrázek 23: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) břítu .....  | 43 |
| Obrázek 24: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) vedlejšího hřbetu nástroje ...   | 43 |



|   |    |
|---|----|
| Obrázek 25: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) vedlejšího hřbetu nástroje v barevné škále dle výšky nad referenční úrovní .....                                    | 43 |
| Obrázek 26: Nasnímaná mikrogeometrie povrchu otvorů .....   | 45 |
| Obrázek 27: Snímek metalografického výbrusu s vtisky po měření mikrotvrdosti HV 0,1 ...   | 47 |
| Obrázek 28: Příprava vzorku pro měření distribuce mikrotvrdosti dle Vickerse v povrchové vrstvě .....   | 47 |
| Obrázek 29: Schéma modifikace měření mikrotvrdosti metodou šikmého řezu – seříznutí vrchlíku v rovině normály vnitřního průměru, sbroušení vzorku o úhel $\alpha$ .....       | 47 |
| Obrázek 30: IN-S-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x .....  | 48 |
| Obrázek 31: IN-S-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x .....   | 48 |
| Obrázek 32: IN-X-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x .....  | 49 |
| Obrázek 33: IN-X-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x .....   | 49 |
| Obrázek 34: IN-Z-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x .....  | 49 |
| Obrázek 35: IN-Z-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x .....   | 49 |
| Obrázek 36: Oblast základního materiálu; vlevo: příčný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 1000x; vpravo: příčný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 500x .....                               | 50 |
| Obrázek 37: Detailní pohled na jehlicovité útvary; vlevo: podélný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 10 000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 10 000x .....              | 50 |
| Obrázek 38: Oblast základního materiálu s oblastí povrchové vrstvy; vlevo: podélný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 1000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 1000x ..... | 51 |
| Obrázek 39: Detailní pohled na oblast povrchové vrstvy; vlevo: příčný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 3000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 3000x .....              | 51 |
| Obrázek 40: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení ostrohraných částic na podélném řezu vzorku IN-S-1, částice Ti .....   | 52 |
| Obrázek 41: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení drobných nepravidelných útvarů na podélném řezu vzorku IN-S-1, částice Nb .....                                  | 52 |
| Obrázek 42: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení „bílých teček“ na příčném řezu vzorku IN-S-1 .....   | 52 |
| Obrázek 43: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení jehlicovitých útvarů na podélném řezu vzorku IN-X-1 .....  | 53 |

## Seznam grafů

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Graf 1:  | Modul pružnosti a koeficient teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě.....  | 16 |
| Graf 2:  | Mez kluzu, pevnost v tahu a tažnost v závislosti na teplotě (zkušební tyč ½“) .....                                   | 16 |
| Graf 3:  | Porovnání tahového diagramu žíhaného a vytvrzeného Inconelu 718 .....   | 18 |
| Graf 4:  | Parametr drsnosti $Ra$ .....  | 44 |
| Graf 5:  | Parametr drsnosti $Rz$ .....  | 44 |
| Graf 6:  | Parametr drsnosti $RSm$ .....   | 44 |
| Graf 7:  | Průběh mikrotvrdosti HV 0,1 od vnitřního k vnějšímu povrchu měřených vzorků .....                                     | 46 |
| Graf 8:  | Graf naměřených hodnot zbytkových napětí v radiálním směru a jejich trend - pro jednotlivé materiály i souhrnný ..... | 54 |
| Graf 9:  | Graf naměřených hodnot zbytkových napětí v radiálním směru a jejich trend - pro jednotlivé materiály i souhrnný ..... | 54 |
| Graf 10: | Veličina $FWHM$ odpovídající míře plastické deformace v závislosti na pořadí otvorů – axiální směr měření .....       | 56 |
| Graf 11: | Veličina $FWHM$ odpovídající míře plastické deformace v závislosti na pořadí otvorů – radiální směr měření .....      | 56 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1: Chemické složení niklové superslitiny Inconel 718 .....  | 15 |
| Tabulka 2: Další vlastnosti slitiny Inconel 718 .....   | 16 |
| Tabulka 3: Dvě různá tepelná zpracování Inconelu 718 .....  | 17 |
| Tabulka 4: Porovnání vlastností Inconelu 718 z dvou různých tepelných zpracování .....                                      | 18 |
| Tabulka 5: Soubory dat integrity povrchu dle ANSI .....   | 25 |
| Tabulka 6: Techniky hodnocení povrchu a podpovrchové vrstvy .....   | 25 |
| Tabulka 7: Vztah mezi parametry struktury povrchu a funkcí plochy .....   | 26 |
| Tabulka 8: Dosahované drsnosti různými druhy obrábění .....   | 28 |
| Tabulka 9: Definice základních topografických prvků .....   | 29 |
| Tabulka 10: Přehled zkoušek tvrdosti .....  | 30 |
| Tabulka 11: Norma tvrdost dle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1 .....  | 31 |
| Tabulka 12: Principy metod měření zbytkových napětí .....   | 34 |
| Tabulka 13: Přehled vyrobených vzorků a jejich označení .....   | 39 |
| Tabulka 14: Parametry drsnosti povrchu vedlejšího hřbetu vrtáku před a po opotřebení .....                                  | 43 |
| Tabulka 15: Vybrané parametry drsnosti povrchu otvorů .....   | 44 |
| Tabulka 16: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti v uvedené hloubce pod povrchem<br>do 0,5 mm .....                                | 46 |
| Tabulka 17: Tloušťka povrchové vrstvy $t$ určená pro: „př.“ - příčný výbrus,<br>„pod.“ - podélný výbrus, „vz.“ vzorek ..... | 48 |
| Tabulka 18: Naměřené hodnoty zbytkových napětí vzorků rentgenovou difrakcí metodou<br>$\sin^2\Psi$ .....                    | 53 |

## Seznam použitých zkratk

- 2D – dvou dimenzionální (plošný)
- 3D – tří dimenzionální (prostorový)
- CCD – Charge-Coupled Device (typ elektronické součástky snímající obraz)
- CVD – Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze)
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering (přímé laserové spékání kovu)
- EDS – Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (energeticky disperzní rentgenová spektroskopie)
- FJFI – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
- FST – Fakulta Strojní
- FWHM – Full Width in Half of Maximum (šířka v polovině maxima)
- HRC – hodnota tvrdosti zkouškou dle Rockwella
- HV – hodnota tvrdosti zkouškou dle Vickerse
- KIPL – Katedra inženýrství pevných látek
- PACVD – Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition (chemická depozice vrstev za asistence plazmatu)
- PVD – Physical Vapor Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)
- RTG – rentgenové záření / rentgen
- RTI – Regionální Technologický Institut
- SEM – Scanning Electron Microscopy (řádovací elektronový mikroskop)
- SK – slinutý karbid
- S-N-O – Stroj-Nástroj-Obrobek
- T-T-T – Time-Temperature-Transformation (čas-teplota-transformace)
- TZ – tepelné zpracování

## Seznam použitých veličin

|                                |                                    |   |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| $A$                            | [%]                                | tažnost   |
| $D$                            | [mm]                               | průměr  |
| $d$                            | [nm]                               | vzdálenost krystalových rovin                   |
| $E$                            | [Pa]                               | modul pružnosti v tahu                          |
| $f$                            | [mm]                               | posuv na otáčku                                 |
| $F$                            | [N]                                | silové zatížení                                 |
| $h$                            | [mm]                               | hloubka   |
| $HV$                           | [-]                                | tvrdost dle Vickerse                            |
| $l$                            | [m]                                | vzdálenost                                      |
| $n$                            | [-]                                | celé číslo                                      |
| $Ra$                           | [ $\mu\text{m}$ ]                  | průměrná aritmetická úchylka profilu            |
| $Re$                           | [Pa]                               | mez kluzu v tahu                                |
| $Rm$                           | [Pa]                               | mez pevnosti v tahu                             |
| $Rmax$                         | [ $\mu\text{m}$ ]                  | největší výška profilu na analyzovaném vzorku   |
| $Rmr$                          | [ $\mu\text{m}$ ]                  | materiálový nosný podíl profilu                 |
| $Rp_{0,2}$                     | [Pa]                               | smluvní mez kluzu                               |
| $RSm$                          | [ $\mu\text{m}$ ]                  | průměrná šířka prvků profilu                    |
| $Rz$                           | [ $\mu\text{m}$ ]                  | největší výška profilu                          |
| $Rz(10)$                       | [ $\mu\text{m}$ ]                  | výška nerovnosti profilu z deseti bodů          |
| $s_1, s_2$                     | [ $\text{TPa}^{-1}$ ]              | rentgenografické elastické konstanty            |
| $t$                            | [ $^{\circ}\text{C}$ ] / [s] / [m] | teplota / čas / tloušťka                        |
| $T_{ef}$                       | [ $\mu\text{m}$ ]                  | efektivní hloubka vniku RTG záření              |
| $t_t$                          | [ $^{\circ}\text{C}$ ]             | teplota tavení                                  |
| $v_c$                          | [m/s]                              | řezná rychlost                                  |
| $\alpha$                       | [ $^{\circ}$ ]                     | úhel sklonu                                     |
| $\gamma$                       | [ $\text{K}^{-1}$ ]                | teplotní součinitel roztažnosti                 |
| $\varepsilon$                  | [-]                                | relativní prodloužení (deformace)               |
| $\theta$                       | [ $^{\circ}$ ]                     | úhel svazku RTG záření vůči krystalové rovině   |
| $\lambda$                      | [nm]                               | vlnová délka                                    |
| $\rho$                         | [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]         | hustota   |
| $\sigma$                       | [Pa]                               | tahové napětí                                   |
| $\zeta$                        | [ $\Omega\text{m}$ ]               | měrný elektrický odpor                          |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | [Pa]                               | složky vektoru napětí                           |
| $\sigma_a$                     | [Pa]                               | zbytkové napětí v axiálním směru                |
| $\sigma_r$                     | [Pa]                               | zbytkové napětí v radiálním směru               |
| $\Psi$                         | [ $^{\circ}$ ]                     | orientace krystalové roviny vůči povrchu tělesa |

## 1. Úvod

Žárupevné niklové slitiny typu Inconel jsou známé již od šedesátých let. Jejich uplatnění v letectví i dalších odvětvích neustále roste. Zavedení technologie tisku kovových součástí nabízí zcela nové možnosti výroby i pro tyto materiály. Jednou ze základních technologických operací při výrobě stále zůstává vrtání. Na životnost a užité vlastnosti dynamicky namáhaných strojních součástí má zásadní vliv povrch součástí. Integrita povrchu je moderní způsob, který nehodnotí pouze dílčí vlastnosti povrchu, ale hodnotí je jako soubor dat s vnitřními souvislostmi. Navíc dává do souvislosti vlastnosti povrchové vrstvy, výrobní operace a funkce, které má součást plnit. Z tohoto pohledu je hodnocení integrity povrchu po vrtání konvenční a tištěné slitiny Inconel 718 velmi aktuální téma.

Teoretická část práce shrnuje současné poznatky. První podkapitola popisuje vlastnosti slitiny Inconel 718, způsoby její výroby včetně 3D tisku a možnosti obrábění. V další podkapitole je řešena problematika vlastností obrobeného povrchu a vysvětlen pojem integrita povrchu. Třetí podkapitola obsahuje popis vybraných parametrů povrchu. Těmito parametry jsou: mikrogeometrie, mikrostruktura, mikrotvrdość a zbytková napětí. Jsou zde uvedeny způsoby jejich určování.

Praktickou část tvoří experiment, při němž byly do konvenční a tištěné slitiny Inconel 718 vyvrtány otvory a následně analyzována kvalita obrobeného povrchu. V první podkapitole praktické části je teoreticky rozebrána příprava experimentu, zaznamenám průběh obrábění a provedení následných analýz. V druhé podkapitole jsou prezentovány a interpretovány následující výsledky: opotřebení nástroje a mikrogeometrie obrobeného povrchu vyjádřené prostřednictvím parametrů drsnosti naměřené opticko-skenovacím mikroskopem, hloubkový profil průběhu mikrotvrdości, mikrostruktura povrchové vrstvy sledovaná optickou mikroskopií a pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu spolu s energeticky disperzním spektrometrem a analýza zbytkových napětí rentgenografickou tenzometrií. Výsledky experimentu jsou komentovány v diskuzi, která zároveň obsahuje několik doporučení pro další experimenty a výzkum v této oblasti. V závěru jsou stručně shrnuty výsledky.

Cílem této diplomové práce je v první části shromáždit teoretické znalosti jako podklad pro provedení a vyhodnocení experimentu, který tvoří druhou část této práce. Výstupem experimentu má být hodnocení vlivu základního materiálu na vlastnosti povrchové vrstvy po obrobení. Tedy, zda má na výslednou kvalitu povrchu vliv, zde se jedná o konvenčně dodávaný Inconel 718 nebo o stejný materiál vyrobený 3D tiskem. Současně je cílem experimentu analyzovat kvalitu obrobeného povrchu v závislosti na opotřebení nástroje, interpretovat výsledky z pohledu integrity povrchu a případně určit doporučení pro vylepšení experimentálních metod.

## 2. Analýza současné poznatkové základny

Již ve 40 letech 20 století byl v Anglii zahájen vývoj superslitin typu Inconel a to ve spolupráci s leteckým průmyslem právě na základě potřeb materiálu pro rozvíjející se začátky používání proudových motorů. Od té doby byla vyvinuta celá řada superslitin, konkrétně Inconel 718 vznikl v 60 letech. Dnes je Inconel registrovaný obchodní název americké firmy Special Metals Corporation. V současné době superslitiny typu Inconel dosahují třetiny objemu veškerých vyráběných superslitin. Od začátků v letectví, kde je stále jeho hlavní využití, se rozšířil do oblasti aeronautiky, energetiky, petrochemie, kryogenních aplikací, výzkumných aplikací (je např. součástí tokamaků) a v poslední době našel uplatnění v automobilovém průmyslu. Za novinku v oblasti výroby ze slitin Inconel můžeme považovat 3D tisk. Přímé kovové laserové spékání (DMLS) bylo vyvinuto v roce 1995 v Německu a dnes se tak z Inconelu vyrábí například součásti raket firmy Space X. [1] [2] [3]

Z krátce popsané historie materiálu je zřejmé, že se v oblasti výroby a použití tohoto materiálu dosáhlo značného pokroku a úroveň znalostí je již velmi vysoká. A to i přesto, že se nejedná o běžný materiál, ale superslitinu pro použití v speciálních podmínkách. V této kapitole je blíže popsán materiál Inconel 718, problematika jeho výroby a obrábění resp. vrtání a metody umožňující zkoumat kvalitu obrobeného povrchu.

### 2.1 Superslitina Inconel 718

#### 2.1.1 Vlastnosti materiálu

Superslitina Inconel 718, jejíž chemický vzorec je NiCr19NbMo, má vysoký obsah niklu a je určena do extrémních podmínek jako jsou vysoké a nízké teploty, vysoce korozní prostředí a další speciální aplikace. Přednosti této niklové superslitiny jsou vysoká žáruvzdornost, žárupevnost, únavová pevnost a rozměrová stálost.

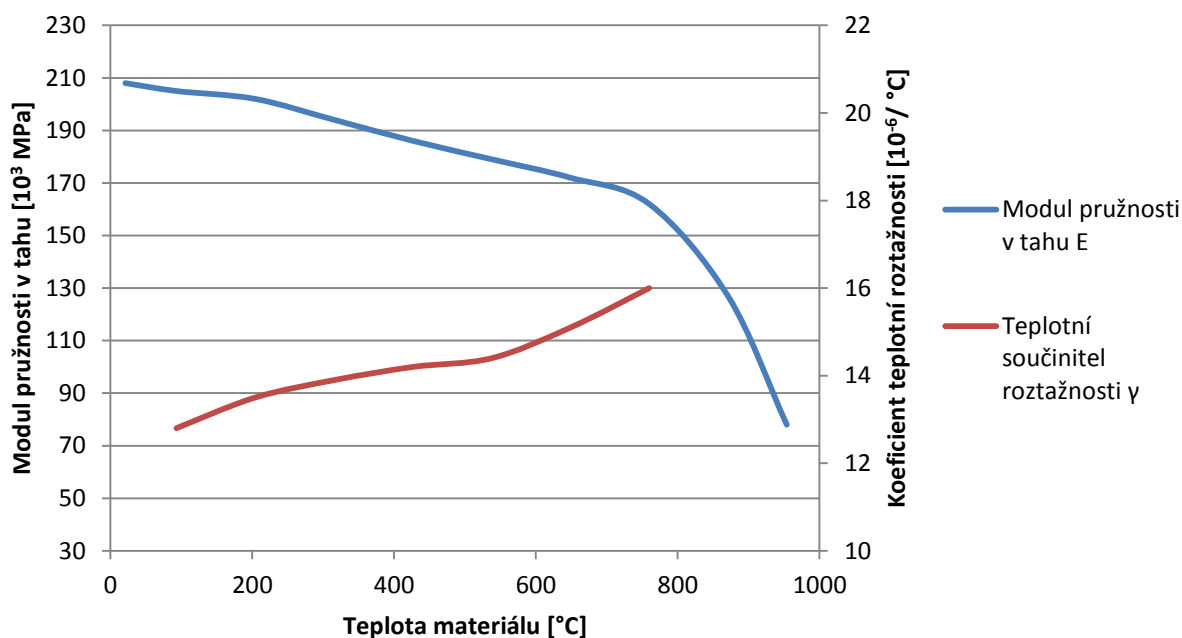
Nikl (Ni) je kov, který je feromagnetický, má vysokou kujnost, tažnost a je velmi odolný vůči korozi. Druhý nejzastoupenějším kovem ve slitině je chrom (Cr), jedná se o vůbec nejtvrdější kov s vysokou chemickou odolností, nejvíce se používá jako legura pro zlepšení mechanické a korozní odolnosti a žárupevnosti. Nikl spolu s niobem (Nb) tvoří sloučeninu Ni<sub>3</sub>Nb, zvyšuje pevnost za nižších teplot a snižuje objemovou roztažnost. Molybden společně s mědí dále zvyšují korozní odolnost. Tato slitina vždy obsahuje i malý obsah uhlíku, ten zhoršuje vlastnosti slitiny. Tvoří karbidy shlukující se na po hranicích zrn, tím se zhoršují mechanické vlastnosti i korozivzdornost. [4] [5]

| prvek           | obsah [%]   | prvek           | obsah [%]   | prvek | obsah [%]  |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-------|------------|
| Ni <sup>a</sup> | 50,0 – 55,0 | Ti              | 0,65 – 1,15 | Si    | max. 0,35  |
| Cr              | 17,0 – 21,0 | Al              | 0,20 – 0,80 | P     | max. 0,015 |
| Fe              | zbytek      | Co <sup>c</sup> | max. 1,00   | S     | max. 0,015 |
| Nb <sup>b</sup> | 4,75 – 5,50 | C               | max. 0,08   | B     | max. 0,006 |
| Mo              | 2,80 – 3,30 | Mn              | max. 0,35   | Cu    | max. 0,30  |

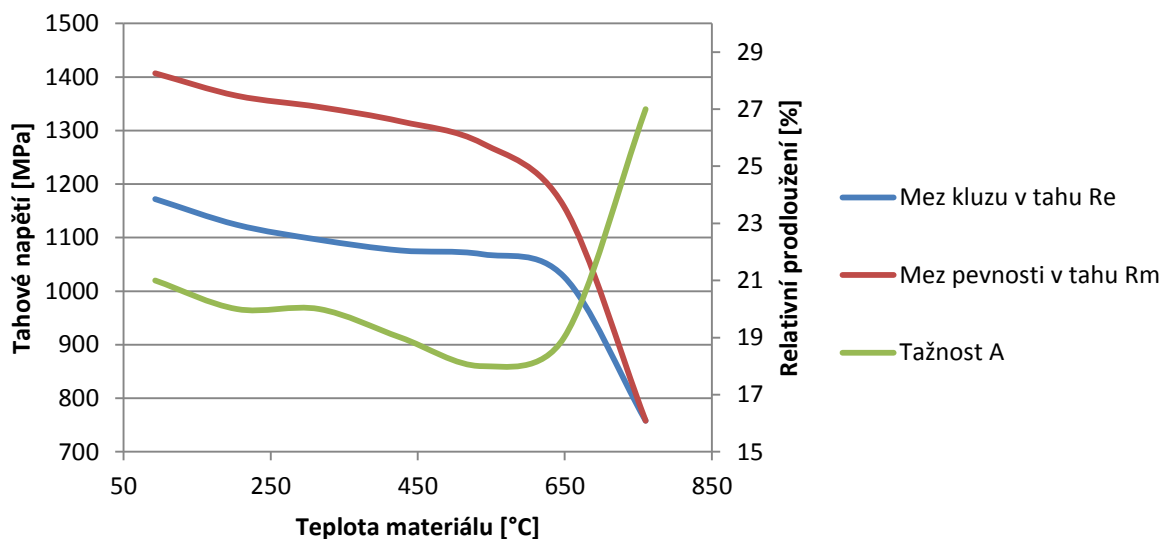
<sup>a</sup> společně s Co, <sup>b</sup> společně s Ta, <sup>c</sup> pokud je specifikováno

Tabulka 1: Chemické složení niklové superslitiny Inconel 718 [6]

Použitelnost Inconelu 718 je v rozmezí teplot -253 až 760 °C. Navíc jeho odolnost proti oxidaci a korozi je až do 980°C. Původně byl vyvinut pro aeronautiku, dnes je využíván hojně všude tam, kde je potřeba vysoká pevnost při extrémních teplotách, navíc v chemicky agresivním prostředí. Základní mechanické vlastnosti v závislosti na teplotě jsou v grafu 1 a grafu 2 další vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tabulce 2.



Graf 1: Modul pružnosti a koeficient teplotní roztažnosti Inconelu 718 v závislosti na teplotě [6]



Graf 2: Mez kluzu, pevnost v tahu a tažnost Inconelu 718 v závislosti na teplotě (zkušební tyč ½") [6]

| veličina                  | hodnota                |
|---------------------------|------------------------|
| hustota - $\rho$          | 8220 kg/m <sup>3</sup> |
| teplota tavení - $t_t$    | 1344 °C                |
| měrný el. odpor - $\zeta$ | 1210 $\mu\Omega$ /mm   |

Tabulka 2: Další vlastnosti slitiny Inconel 718 [6]



Tvrdość materiálu závisí na způsobu tepelného zpracování. Žíhaný materiál dosahuje tvrdosti 23 HRC, vytvrzováním lze zvýšit tvrdost až na 40 HRC. Velmi užitečnou vlastností Inconelu je korozní odolnost při vysokých teplotách, kdy právě vlivem vysoké teploty vzniká na povrchu oxidická vrstva působící jako ochrana proti další chemické degradaci materiálu. [6]

### 2.1.2 Výroba a tepelné zpracování

Polotovary Inconelu 718 lze dostat jako pásy, plechy, tyče a trubky, tedy podobně jako ostatní hutní materiál v typizovaných rozměrech nebo dle přání zákazníka. Odlitky se vyrábí nejčastěji tavbou ve vakuových indukčních pecích a odlévají se do forem tvaru dle potřeby. Kování se nejčastěji provádí na bucharu nebo lisováním, při němž je riziko vzniku podélných nebo příčných trhlin vlivem vlastního kování a tvorby shluků intermetalických částic. Inconel 718 lze rovněž využít v práškové metalurgii pro tepelné nástřiky, pájení a vstřikování drobných dílů. Tyto prášky jsou v nabídce např. německé firmy H. C. Starck pod označením Ampersint.

Na výsledné vlastnosti kovových materiálů má po chemickém složení největší vliv tepelné zpracování. Prostředí, doba a rychlost ohřevu i chladnutí určují výsledné funkční vlastnosti materiálu. Niklové slitiny se tepelně zpracovávají 5 základními technologiemi: žíhání, žíhání pro odstranění vnitřního pnutí, rozpouštěcí žíhání, žíhání pro vyrovnání pnutí a tvrzení stárnutím. Volba konkrétního způsobu tepelného zpracování závisí na chemickém složení slitiny a zejména na požadovaných vlastnostech konečného výrobku a jeho použití.

Žíhání nebo také měkké žíhání je způsob tepelného zpracování niklových slitin, které byly zpevněny za studena např. válcováním nebo tažením, jehož účelem je odstranění zpevnění materiálu vlivem rekystalizace. Stejně jako u ocelí je principem ohřev a výdrž na stanovené teplotě po stanovenou dobu a následně pomalé ochlazení. Parametry a vlastní způsob provedení žíhacího procesu závisí na chemickém složení slitiny, tvaru a rozměrech výrobku.

Při rozpouštěcím žíhání se slitina ohřeje na dostatečně vysokou teplotu, aby se během výdrže na této teplotě mohla jedna nebo více fází rozpustit do tuhého roztoku. Teplota nesmí překročit teplotu solidu, to by mělo za následek natavení hranice zrn, jejich hrubnutí a v důsledku ztrátu mechanických vlastností. Ohřev výrobku by měl být co nejrychlejší, proto se výrobky vkládají již do zahřáté pece, aby během ohřevu nedocházelo k hrubnutí zrn. Jednotlivé fáze zůstanou rozpuštěny v matici vlivem dostatečně rychlého zchlazení. Při následné stárnutí (nebo jinak také precipitačním vytvrzení) za vyšších teplot dochází k řízenému vylučování určitých fází a tím i k dosažení finálních vlastností tepelně zpracovaných dílů. Stárnutí má za následek výrazný růst tvrdosti materiálu, proto je zařazováno až na konec výrobního procesu. V případě potřeby obrábět díl po jeho vytvrzení stárnutím, se to může negativně projevit ve finančních nákladech na toto obrábění. [6] [7]

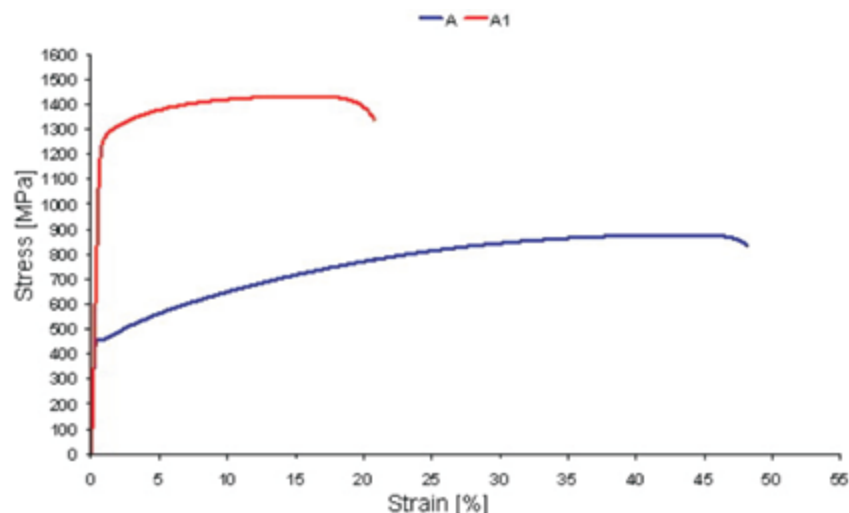
Pro srovnání zde uvádím dva konkrétní způsoby tepelného zpracování Inconelu 718 a výsledné vlastnosti materiálu:

| procedura | rozpouštěcí žíhání          | stárnutí   |
|-----------|-----------------------------|--|
| A         | 960°C ( $t = 1$ hod) → voda |  |
| A1        | 960°C ( $t = 1$ hod) → voda | 720°C ( $t = 8$ hod) $\xrightarrow{2 \text{ hod}}$ 620°C ( $t = 8$ hod) → vzduch |

Tabulka 3: Dvě různé tepelné zpracování Inconelu 718 [7]

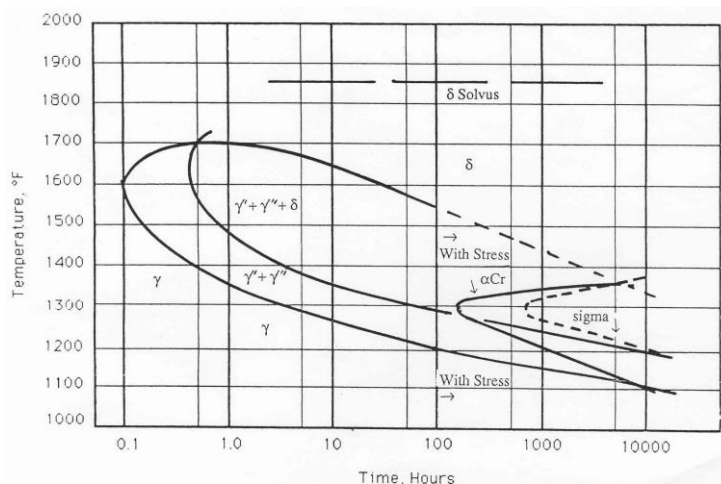
| procedura | $R_{p0,2}$ [MPa] | $R_m$ [MPa] | A [%] | HV0,3 |
|-----------|------------------|-------------|-------|-------|
| A         | 443              | 877         | 48    | 220   |
| A1        | 1230             | 1431        | 21    | 470   |

Tabulka 4: Porovnání vlastností Inconelu 718 z dvou různých tepelných zpracování [7]



Graf 3: Porovnání tahového diagramu žíhaného a vytvrzeného Inconelu 718 [7]

Na obrázku 1 je zobrazen T-T-T diagram fázových přeměn slitiny Inconel 718. Diagram je převzat z amerického zdroje, proto je teplota na svislé ose uvedena ve stupních Fahrenheitů, na vodorovné ose je čas v hodinách. Křivky diagramu představují hranice tvorby jednotlivých fází.



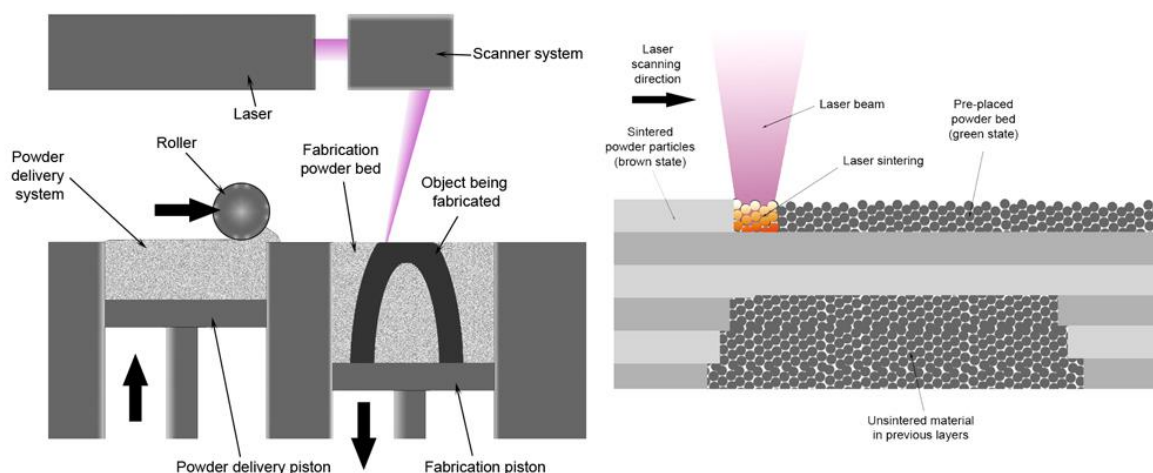
Obrázek 1: Diagram fázové přeměny slitiny Inconel 718 [8]

### 2.1.3 Výroba 3D tiskem

3D tisk je aditivní výrobní technologie pro součástky z polymerních a kovových materiálů. Jedná se o výrobu po vrstvách, z toho plyne možnost vyrábět geometricky složité vnější i vnitřní tvary (takové, které ani jinými způsoby vyrobit nelze), ale také celá řada nevýhod. Omezením této metody jsou vysoké finanční náklady tvořené vysokou pořizovací cenou stroje a stavebních materiálů. To platí u 3D tisku kovových materiálů – v případě tisku plastových součástí je hlavní omezení rychlost výroby a velikost výrobku. Dalším omezením jsou použitelné materiály, protože na každý materiál může být pro tisk použitelný. [9]

Z technologie tisku vrstvu po vrstvě přímo plyne geometrická nepřesnost, protože povrch takto vytisknutého předmětu nikdy nemůže být spojitý. Nepřesnost je úměrná tloušťce tisknuté vrstvy. Lze použít vhodnou orientaci výrobku vůči směru kladení vrstev nebo proměnou tloušťku vrstev, přesto určitá nepřesnost vždy zůstane. Navíc tloušťka tisknuté vrstvy je přímo úměrná času výroby. [10]

Při výrobě je využíváno lokálního ohřevu materiálu a krátkodobé změny jeho skupenství, s tím je spojena tepelná dilatace, vznik deformací a vnitřních napětí. Ani přes přehřev a ohřev vyráběné součásti tento efekt nelze úplně eliminovat a vzniklé vnitřní napětí se odstraňují vhodným tepelným zpracováním. Zmíněné negativa výroby 3D tiskem mohou být zmírněna použitím postprocesingu, vždy je však nutné brát v potaz výrobní čas, efektivnost a produktivitu. V porovnání s konvenčními metodami výroby je 3D tisk velmi nepřesný, drahý a výrobní rychlost je pomalá. Uplatňuje se tedy u tvarově složitých výrobků a u kusové nebo malosériové výroby. [9] [10]



Obrázek 2: Princip metody DMLS tisku kovových materiálů [11]

Na obrázku 2 je znázorněna metoda Direct Metal Laser Sintering (přímé spékání kovu laserem), jedná se o aditivní způsob výroby z kovových materiálů. Kovový prášek je rovnoměrně nanesen na podložku, následně dojde k jeho spečení fokusovaným laserem přesně v oblasti řezu budoucího tělesa. Po dokončení první vrstvy se podložka posune směrem dolů a je nanesená nová vrstva prášku. Opět dojde fokusovaným laserem k spečení prášku v oblasti řezu budoucího tělesa, zároveň dojde natavením ke spojení se spodní vrstvou. Tento proces se opakuje, dokud není vyrobeno celé těleso.

Touto metodou se vyrábějí jak prototypy, tak funkční výrobky. Lze dosáhnout téměř shodných mechanických vlastností jako při konvenční výrobě. Nepřesnosti v osách X a Y lze udržet v rámci požadovaných tolerancí a nepřesnost v ose Z nebývá obvykle tak zásadní. Drsnost povrchu je možné vylepšit buď leštěním, nebo opět laserem, který má výkon optimalizovaný tak, aby natavil povrchové píky materiálu a tavenina vyplnila morfologické údolí. V některých případech je výroba touto metodou cenově nejvýhodnější varianta, protože umožňuje navrhnout jinak nevyrobitelné komponenty.

Je mnoho parametrů, které ovlivňují výsledné vlastnosti vytisknutého výrobku: čistota prášku, velikost, tvar a morfologie povrchu jeho částic, výška tisknuté vrstvy, výkon laseru nebo teplota spékání. Z parametrů výsledného výrobku to jsou zejména: hustota, pórovitost a mikrostruktura. [9]

Výroba z Inconelu 718 metodou DMLS byla podrobena řadě experimentů. Jejich výsledkem jsou optimální parametry tisku: tloušťka vrstvy 125  $\mu\text{m}$ , hrubozrný prášek 53  $\mu\text{m}$  (u jemnějších docházelo k nekontrolovanému šíření) a teplota spékání 1300°C. Při takovýchto parametrech byl výsledný materiál bez následného tepelného zpracování téměř bez pórovitosti, hustota dosahovala 99% a struktura byla velmi jemnozrná. [12]

Při spékání kovového prášku fokusovaným laserem dochází k prudkému ohřátí natavení, tuhnutí, ochlazení a to ve velmi malé oblasti. Důsledkem toho se v součásti hromadí velké množství napětí, což má negativní vliv na mechanické vlastnosti výrobku. Eliminovat tento jev lze následným tepelným zpracováním. Obvyklé je žíhání pro odstranění vnitřního pnutí a vytvrzovací stárnutí, které dále mechanické vlastnosti zlepšuje. [12]

## 2.1.4 Obrobitelnost a řezné materiály

### 2.1.4.1 Obrobitelnost

Obrobitelností nazýváme komplexní vlastnost obrábění daného materiálu určitým způsobem. Obvykle bývá uvažována jako vlastnost pouze obráběného materiálu, ale co ji ovlivňuje kromě materiálových vlastností, jako jsou mechanické vlastnosti, chemické složení, obsah vměstků, zpevňování, tepelné zpracování a struktura materiálu, je také použitá technologie obrábění. Obrobitelnost je totiž ovlivněna mimo jiné řezným nástrojem, řeznými podmínkami, chlazením, upnutím obrobku a nástroje, chlazením, strategií řezného procesu apod. Je to způsob vyjádření efektivity obráběcího procesu za daných technologických podmínek.

Obrobitelnost můžeme posuzovat různými způsoby. Index obrobitelnosti je veličina založená na intenzitě otupování břitu ve srovnání s referenčním materiálem. Dalšími měřítky pro posouzení obrobitelnosti může být životnost nástroje, kvalita povrchu, řezné síly a výkon stroje, teplota, utváření třísky a další.

Zkoušky obrobitelnosti založené na posuzování otupení břitu se dělí do dvou skupin. Dlouhodobé zkoušky jsou založeny na stejných řezných podmínkách, jako jsou použity při vlastním obrábění. Z toho plyne jejich časová náročnost a také jsou drahé. Při krátkodobých zkouškách jsou řezné podmínky upraveny tak, aby se zkouška dala vyhodnotit v kratším čase. V praxi jsou tedy použitelnější, ale nemusí být objektivní do takové míry jako zkoušky dlouhodobé. [13]

Pro všeobecné vyhodnocování obrobitelnosti dělíme materiály do 8 skupin. Niklové superslitiny patří do skupiny c – těžké neželezné kovy. Při obrábění nástroji ze slinutých karbidů se dělí materiály do skupin dle jejich odlišného způsobu chování při obrábění. Skupina ISO-S je specifická v rozdílu vývinu tepla oproti ocelím a právě sem patří žárupevné superslitiny na bázi Ni, CO, Fe a Ti. Vlastní superslitiny na bázi niklu se dělí do čtyř skupin a dvou podskupin [14]:

**Skupina A** Obsah niklu více než 95 %, malá pevnost, vysoká houževnatost, v žíhaném stavu velice elastické, ve stavu za studena taženém je obrobitelnost lepší a více hladký povrch. Slitiny: 200, 201, 205, 212, 222.

**Skupina B** Slitiny niklu s mědí, vyšší pevnost a nižší houževnatost než skupina A, tažené za studena případně ještě žíhané pro snížení vnitřního pnutí, také mají lepší obrobitelnost a kvalitu povrchu. Slitiny: Monel 400, 401, 450, Ferry, Invar 36, 48, Kovar, MS 250.

Skupina C Podobné austenitickým ocelím, zejména slitiny tuhého roztoku nikl-chrom-železo, lépe obrobitelné ve stavu za studena taženém. Slitiny: Nickel 270, Monel K-500, Inconel 600, 601, 690, Nimonic 75, 86, Incoloy 800, 800HT, 802, 825, DS, Inco 330, 020.

Skupina D Podobné tvořena stárnutím vytvrditelnými slitinami a dělí se do dvou podskupin.

Skupina D-1 Slitiny ve stavu nestařeném. Slitiny: Duranickel 301, Incoloy 925, MA 956 a Ni-span-c 902.

Skupina D-2 Slitiny ze skupiny D-1 ve stavu stařeném a některé další: Inconel 617, 625, 706, 718, X-750, Nimonic 80A, 81, 90, 105, 115, 263, 901, PE11, PE16, PK56, Incoloy 903, 907 a další.

Díky mechanickým vlastnostem Inconelu 718 se řadí mezi těžce obrobitelné konvenčními metodami. Specifikum při obrábění tohoto materiálu je tvorba zpevněné vrstvy po oddělení třísky, v oblasti terciální plastické deformace. Pokud je hloubka řezu menší než tloušťka zpevněné vrstvy, tak dochází k velkému namáhání a opotřebení břitu. Vhodné je tedy obrábět s větší hloubkou řezu tvrdším nástrojem. Obrobitelnost lze vylepšit vhodným tepelným zpracováním, například normalizačním žíháním. [2]

#### 2.1.4.2 Řezné nástroje

K dosažení efektivní produktivity obrábění a dostatečné trvanlivosti břitu je třeba vybrat vhodný rezný materiál. Vzhledem k vlastnostem Inconelu 718 jsou požadavky na nástroj následující: vysoká pevnost hrany, teplotní odolnost, houževnatost, chemická stabilita a odolnost vůči opotřebení. Nejvíce zastoupenými reznými materiály pro obrábění Inconelu 718 jsou rychlořezné nástrojové oceli vyrobené práškovou metalurgií a slinuté karbidy. Oproti rychlořezným ocelím neumožňuje struktura slinutých karbidů vybroušení tak precizního ostří, další nevýhodou je jejich omezená houževnatost. Na druhou stranu jsou SK tvrdší a více otěruvzdorné. Mají vyšší tuhost a pevnost v tlaku. Dále v textu budou popsány hlavně slinuté karbidy, protože v experimentu byl použit nástroj právě ze slinutého karbidu.

Slinuté karbidy jsou kompozitní materiál vyráběný z karbidů některých kovů (W, Ti, Ta, Cr) a pojiva (nejčastěji Co, ale také Ni). Slinování je proces, při němž se zhuťný prášek tvrdých karbidů za vysoké teploty a tlaku se spéká s pojivem. Velikost tvrdých částic se používá v rozmezí 0,1 až 14  $\mu\text{m}$ . Čím menší velikost částic, tím vyšší tvrdost, lomová houževnatost a pevnost v ohybu. Tvrdost SK je 88 až 93 HRC až do teploty 1000°C.

Kvůli omezené houževnatosti je nutné slinuté karbidy při obrábění používat s menšími úběry a tím pádem vyššími otáčkami, čímž se generuje větší množství tepla. Materiál Inconel 718 je navíc velmi odolný proti opotřebení, což zvyšuje vývin tepla a také se hůře láme tříska. Méně ostrý břit způsobuje větší míru plastické deformace, tím pádem větší zpevněnou vrstvu. Z těchto důvodů se používají nástroje s vnitřním chlazením, kdy je chladicí kapalina vedena přímo do místa řezu. Používají se vyšší koncentrace olejové chladicí emulze. Nástroje z SK jsou náchylné na odštípnutí ostří a následnou celkovou destrukci nástroje. Žárupevné niklové slitiny jsou nejhůře obrobitelné nástroji z SK právě z pohledu trvanlivosti nástroje.

Často používaným způsobem, jak prodloužit trvanlivost a zvýšit výkonost SK nástrojů je deponování tenkých vrstev. Povlak na nástroji zvyšuje odolnost proti abrazi, snižuje koeficient tření, tvoří difuzní bariéru mezi nástrojem a obrobkem. Tyto vlastnosti si musí zachovávat i při vysokých teplotách a je nutná dokonalé přilnutí povlaku a substrátu. Důležitá

je zejména kombinace materiálu substrátu, povlaku a metoda nanášení – tyto tři složky musíme chápat jako komplexní systém, na jehož výsledné vlastnosti má vliv velké množství parametrů (TZ polotovaru nástroje, povrch nástroje po broušení, zbytkové napětí v nástroji, mikrogeometrie, dodržení technologického postupu deponace). Tloušťka povlakové vrstvy je obvykle v rozmezí 2 až 12  $\mu\text{m}$  a nejčastěji se používají materiály: TiC, TiN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , TiCN a v případě nástrojů pro vrtání Inconelu 718 je to AlTiN. [2] [14] [16]

Zcela klíčová je volba metody nanášení vrstvy a to zejména z hlediska teploty za níž deponace probíhá, protože vysoké teploty negativně ovlivňují vlastnosti substrátu. Základními metodami jsou [16]:

**PVD** Fyzikální napařování pomocí elektrického oblouku probíhá za nízkých teplot 400 - 600°C. Metoda vhodná i na nástroje s ostrými hranami. Touto metodou mohou být nanášeny materiály: TiN, TiCN, TiAlN, AlAlSiN, CrN,  $\text{MoS}_2$ , ... Povlaky jsou velice tvrdé a zvyšují odolnost proti opotřebení nástroje a jejich vnitřní tlakové pnutí zvyšuje houževnatost břitu.

**CVD** Při chemickém napařování z plynné fáze je dosahováno vysokých teplot až 1050°C. Principem je reakce plyných chemických sloučenin na povrchu substrátu. Výhodou metody je velmi dobrá adheze.

**PACVD** Pokročilá metoda chemického nanášení vrstvy pomocí plasmu. Je dosahováno nízkých teplot kolem 500°C a výhodou je dále velmi nízký koeficient tření.

### 2.1.5 Mechanismy opotřebení nástrojů

Deformační zpevňování způsobuje nejčastěji vrubové opotřebení hlavního ostří. Pokud je hloubka řezu menší než tloušťka zpevněné vrstvy, může dojít až k vylomení ostří. Jinak poloha vrubu odpovídá hloubce řezu. Vrub na vedlejším ostří vzniká v důsledku chemického otěru a zejména toto opotřebení ovlivňuje kvalitu obrobeného povrchu.

Další mechanismy opotřebení břitu mají příčinu ve vysoké teplotě řezu dosahující až 1150°C. Inconel 718 má nízkou tepelnou vodivost, vysokou pevnost a obsahuje tvrdé vměstky. Teplu se proto soustředí v místě řezu, neodchází s třískou ani se neodvádí dále do obrobku, ale převážně se kumuluje v nástroji. Navíc obsažené karbidy způsobují abrazivní opotřebení a zvyšují vývin tepla. Vysoká teplota v kombinaci s tlakem na řeznou hranu (až 3000  $\text{N}/\text{mm}^2$ ) způsobeným vysokými řeznými silami má za následek plastickou deformaci nástroje. Vysoké teplotě lze zabránit chlazením např. procesní kapalinou, která ochlazuje jak obrobek, třísku tak i nástroj. Kromě ochlazování má také mazací efekt, snižuje tření a tím snižuje abrazi a vývin tepla, současně působí jako difuzní bariéra. Ve výsledku použití využití procesní kapaliny prodlužuje trvanlivost nástroje. Vhodné je použití velkého průtoku s velkým tlakem, to zejména u vrtání s vnitřním chlazením nástroje zlepšuje odvod třísky. Alternativou k chlazení procesní kapalinou je efektivnější kryogenní chlazení, to však nepatří mezi základní vybavení obráběcích strojů. Chlazení také ovlivňuje hloubku povrchové vrstvy, což nemusí být vždy pozitivní jev.

Vylupování břitu a části čela vzniká především při použití řezné keramiky. K odlupování dochází postupně vlivem nestability řezného procesu. Opakovaně vzniká nová řezná hrana a jako důsledek vzniká povrch se zhoršenou kvalitou. K odloupení břitu může dojít i při použití materiálů vyráběných práškovou metalurgií, zejména slinutých karbidů. V tom případě však dochází k náhlému odloupení větší části břitu a dochází k celkové devastaci nástroje. [2] [17] [18]

### 2.1.6 Optimalizace technologie vrtání

Pro obrábění Inconelu 718 by měla být celá soustava obrobek-nástroj-stroj co nejvíce tuhá a stroj by měl mít dostatečnou výkonovou rezervu tak, aby byl zajištěn plynulý posuv a přesný řez. Pokud dojde k přerušení řezu, vznikne na dně vrtaného otvoru zpevněná vrstva, která následně ztíží odříznutí třísky. To může nastat vlivem nestability řezného procesu nebo zcela nevyhnutelně při vrtání s výplachem. Ke stabilitě přispívá i použití vrtáku s vysokou torzní tuhostí a zejména dostatečné chlazení a odvod třísek. Vhodnější jsou proto vrtáky s vnitřním chlazením.

Vrcholový úhel vrtáku je vhodný 130° a více, u kobaltové rychlořezné oceli 135°. Pro výrobu otvorů s větším průměrem než 20 mm se doporučuje použití děliče třísek zabraňující zanášení šroubovice vrtáku. Také je potřeba vzít v potaz materiál polotovaru. Pro hrubozrnnou strukturu odlitků se používá vyšší řezná rychlost a nižší posuv. Naopak pro jemnozrnnou strukturu výkovků se používá nižší řezná rychlost a vyšší posuv. Nejlépe obrobitelný je válcovaný polotovar, u nějž se dosahuje také nejdelší trvanlivosti nástroje. Velmi pozitivní vliv na obráběcí proces a kvalitu obrobeného povrchu má předehřev obrobku. Mez kluzu, pevnosti a pevnost v tahu výrazně klesá nad teplotou 750°C. Důležitější efekt má předehřev na tvorbu zpevněné vrstvy, kdy nad touto teplotou ke zpevnění dochází již velmi málo. Předehřev je možné realizovat plasmovým hořákem nebo laserem a nepatří mezi standardní vybavení obráběcích strojů. [18] [19]

Lze definovat obecná doporučení pro optimalizaci vrtání [19]:

- vhodná geometrie vrtáku snižující axiální síly a krouticí moment,
- použití vrtáku s vysokou torzní tuhostí,
- zlepšení samostředění vrtáku,
- změna tvaru třísek a zlepšení jejich odvodu.

## 2.2 Obrobený povrch

### 2.2.1 Definice povrchu

Povrch tělesa lze definovat jako obálku, jež je jeho součástí a zároveň rozhraním mezi okolím a základním (vnitřním) materiálem tělesa. Povrch je specifická část tělesa už jen proto, že atomy tvořící povrch nejsou obklopeny sousedními atomy rovnoměrně, jak je tomu uvnitř objemu, ale pouze z určitých směrů. Použití různých technologických operací ovlivňuje výsledné vlastnosti povrchové vrstvy. Povrch tvářeného obrobku je zcela jiný než povrch odlitků, výkovku, povrch po tepelném dělení, elektroerozivním obráběním nebo svařováním. Nejčastější technologie pro vznik funkčních povrchů je třískovým obráběním, protože dosahuje nejlepší geometrické a rozměrové přesnosti. Vlastnosti, kvalitu a strukturu obrobeného povrchu součásti lze dále vylepšit nebo modifikovat pomocí nanesení tenké vrstvy. [20]

Povrch obrobené součásti je tvořen odebráním třísek pomocí nástroje s jistým zaoblením ostří. Povrch tedy není zcela spojitý, ale je tvořen reliéfem daným geometrií nástroje a jeho trajektorií. Při odebrání třísky probíhá plastická deformace zasahující pod výsledný povrch a v místě řezu vzniká velké množství tepla. Nemůžeme tedy hovořit pouze o povrchu, ale o povrchové vrstvě, která má určitou hloubku.

Z hlediska mikrogeometrie povrchu hovoříme o jeho textuře, kterou tvoří drsnost, vlnitost a tvarová úchylka. Tyto tři veličiny rozlišujeme dle měřítka velikosti nerovnosti a rozhodující je poměr rozteče nerovností k jejich výšce (drsnost do 1:50, vlnitost do 50:1000, při menším

poměru nerovnost tvoří tvarovou odchylku). Geometrii součásti volíme i s ohledem na požadované vlastnosti výrobku. U výrobků, kde je rozhodující tuhost, bude poměr plochy povrchu k objemu daleko menší (vlastnosti výrobku jsou dány vlastnostmi především základního materiálu) než u výrobků, kde je naopak (na vlastnostech výrobku se zásadně podílí právě povrch) vyžadována pevnost. [21] [22]

Z chemického hlediska volíme materiál vhodný pro dané prostředí a teplotu, protože čistý povrch kovu bude s okolím reagovat. Jak moc bude povrch reagovat, závisí na elektronegativitě a oxidačním stavu prvků na povrchu, reaktivitě a teplotě. Reakce s okolím lze využít při nanášení tenkých vrstev. Naopak negativním jevem je koroze, což je fyzikálně-chemický samovolně probíhající proces narušování a znehodnocování materiálu. V tekutinách s redukční nebo oxidační povahou probíhá koroze chemická. Při korozi redukčními plyny (např. oduhličení nebo vodíková křehkost) dochází k vnikání molekul redukčních plynů do materiálu a reakci s nekovovými prvky. V případě styku kovu s elektrolytem vznikají disociací prostředí ionty a způsobují korozi elektrochemickou. U některých kovových materiálů, které mají vysoký záporný oxidační potenciál (hliník a jeho slitiny, titan, nikl, nerezová ocel, měď a další) se na povrchu vytváří pasivační vrstva z oxidu ušlechtlejšího než je původní materiál bránící další degradaci materiálu.

Z hlediska namáhání součásti jsou vlastnosti povrchové vrstvy zcela zásadní, protože únavové lomy vznikají na povrchu nebo těsně pod povrchem a více než 90% všech lomů na strojních součástech je způsobených únavou materiálu. Příčinou je dynamické zatížení, kdy se cyklicky na povrchu střídá tlakové a tahové namáhání. [23]

Napětí není rozloženo po povrchu součásti rovnoměrně. V místech makroskopických koncentrátorů napětí při překročení meze pevnosti dochází k porušení celistvosti tělesa a vzniku únavové trhliny. Jedná se především o konstrukční vruby, povrchové nerovnosti mikrogeometrie povrchu. Šíření trhliny na povrchu může bránit povrchové napětí a dislokace uvnitř materiálu.

Mechanickou a chemickou úpravou povrchu lze docílit vyšší únavové pevnosti. Podstatou je vnesení tlakového napětí do povrchové vrstvy, kdy se zvýší pevnost jen do určité hloubky a přitom zůstane houževnaté jádro. Mezi způsoby mechanického zpevnění povrchu patří válečkování nebo kuličkování. Při chemicko-teplném zpracování se vytváří povrchové vrstvy s jiným chemickým složením a jinými mechanickými vlastnostmi než má základní materiál. Mezi tyto metody patří nitridování, cementování, nitrocementování a karbonitridování.

Opotřebením se rozumí mechanické poškození povrchu vlivem styku s jiným tělesem nebo vlivem prostředí. Dochází při něm k porušování, přemísťování nebo odstraňování materiálu a tvorbě nového povrchu. Opotřebením se projevuje mikroplastickou deformací, únavou povrchových vrstev, vznikem oxidů, změnou struktury nebo aktivací povrchových vrstev. Rozlišujeme několik druhů opotřebením: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační. [24]

### 2.2.2 Integrita povrchu

Integrita povrchu je komplexním popisem vlastností povrchové vrstvy součásti. Zohledňuje způsob vzniku povrchové vrstvy technologickými operacemi a vyjadřuje její vlastnosti ve vztahu k funkčním požadavkům na celý výrobek. Jedna z definic integrity povrchu zní: „Souhrn všech charakteristik, kterými je možné hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jejím funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti se označuje jako integrita povrchu.“



Povrch je nejvíce namáhaná oblast z celé součásti (zejména v případě namáhání ohybem a krutem) a zároveň je povrchová vrstva v kontaktu s okolím, z toho plyne, že se vysokou měrou podílí na naplnění požadavků na funkci a spolehlivost výrobku. Již při návrhu součásti tedy musí konstruktér počítat s konkrétní integritou povrchu. Znalost vazby výrobní technologie – povrchová vrstva umožňuje výroby součásti s optimální integritou povrchu a tím vyšší efektivitu, životnost a spolehlivost. Pojem integrita povrchu byla poprvé zavedena Fieldem a Kahlesem roku 1964 a poprvé byla zakotvena v normě ANSI B211.1 z roku 1986. [23] [24]

| <b>minimální soubor údajů IP</b>  | <b>standardní soubor údajů IP</b>  | <b>rozšířený soubor údajů IP</b>   |
|---|--|--|
| povrchová úprava<br>snímek mikrostruktury (10x<br>nebo více)<br>mikrotrhliny<br>sledování stavu mikrotrhlin<br>mikrostruktura<br>plastická deformace<br>fázové přeměny<br>drsnost povrchu<br>chemicko-tepelné změny<br>snímky po vybraném leptání<br>mikrotvrdost | minimální soubor dat IP<br>únavové zkoušky<br>korozní únava<br>hodnocení zbytkového napětí | standardní soubor údajů IP<br>další mechanické zkoušky<br>pevnost v tahu<br>zkoušky tečení<br>jiné specifické zkoušky<br>(hodnocení třecích a<br>kluzných vlastností, těsnicí<br>vlastnosti) |

Tabulka 5: Soubory dat integrity povrchu dle ANSI [24]

## 2.3 Vybrané vlastnosti povrchu a způsob jejich zkoumání

Norma ANSI B211.1-1989 kromě výpisu veličin zahrnutých do integrity povrchu popisuje také způsob jejich určování. Způsoby měření lze rozdělit na techniky zaměřené na povrch a na povrchovou vrstvu:

| <b>hodnocení povrchu</b>   | <b>hodnocení povrchové vrstvy</b>   |
|--|---|
| vizuální zkoušky<br>textura<br>vlnitost<br>drsnost<br>geometrické tolerance<br>rozměrové tolerance | mikrostrukturní zkoušky<br>metalografické hodnocení<br>profil zbytkových napětí<br>zkoušky únavové pevnosti |

Tabulka 6: Techniky hodnocení povrchu a podpovrchové vrstvy [24]

### 2.3.1 Mikrogeometrie a drsnost

Skutečný povrch součásti se od ideálního povrchu daného výkresem liší díky procesu jeho výroby. V případě třískového obrábění se jedná o odebrání materiálu ve stavu plastické deformace nástrojem a nejpodstatnější faktory pro výsledný povrch jsou [25]:

- Řezný nástroj – materiál, tvar, geometrie břitu, opotřebení.
- Obráběný materiál, obrobitelnost – pružná a plastická deformace při tvorbě třísky.
- Obráběcí stroj – dynamické jevy (kmitání soustavy S-N-O), přesnost.

Mezi obrobkem a nástrojem působí adhezní síly, v jejichž důsledku se tvoří nárůstek. Ten ulpívá zejména na čele nástroje a tím mění jeho geometrii. Při oddělování nárůstku od nástroje se může přichytit na obrobku a vytvořit tak vyvýšeninu nebo po jeho následném odloupení zůstává v povrchu prohlubeň. V případě nedokonalého odvodu třísky (což může nastat obzvláště při vrtání) může zachycená tříška povrch poškrábat. Výsledný povrch obrobku záleží také na mikrogeometrii hřbetu nástroje, protože vlivem tření se přenáší na obrobek. Při obrábění kovů v křehkém stavu dochází vlivem napjatosti k vytrhávání zrn z povrchu. Vlivem kmitání dochází k ovlivňování trajektorie nástroje a to ve všech směrech. [25]

Nejrozšířenějším statistickým způsobem hodnocení mikrogeometrie povrchu jsou převážně výškové charakteristiky drsnosti povrchu a méně často tvarové charakteristiky profilu, do nichž lze zařadit stupeň plnosti profilu, maximální hodnotu, šikmost a špičatost funkce hustoty pravděpodobnosti a další. Parametry struktury povrchu a metodiky jejich určování jsou zavedeny normou ČSN EN ISO 4287:1998. Vztah mezi parametry struktury funkční plochy a jejich požadovaných provozních vlastností je shrnut v tabulce 7, kde je:  $R_a$  - průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,  $R_z$  - největší výška profilu (ISO 4287: 1998),  $R_z(10)$  - výška nerovnosti profilu z deseti bodů (ISO 4287-1:1984),  $R_{Sm}$  - průměrná šířka prvků profilu a  $R_{mr}$  - materiálový nosný podíl profilu. [26]

| provozní vlastnosti                                     | parametry struktury povrchu |           |       |          |          |
|---|-----------------------------|-----------|-------|----------|----------|
|   | $R_a$                       | $R_z(10)$ | $R_z$ | $R_{Sm}$ | $R_{mr}$ |
| únavová pevnost   | ⊙                           | ⊙         | ●     | ●        | ⊙        |
| kontaktní namáhání                                      | ●                           | ⊙         | ⊙     | ●        | ●        |
| únosnost uložení  | ●                           | ⊙         | ⊙     | ⊙        | ●        |
| těsnost spojení   | ●                           | ⊙         | ⊙     | ●        | ●        |
| odolnost proti korozi                                   | ●                           | ⊙         | ⊙     | ●        | ○        |
| elektrická a tepelná vodivost                           | ●                           | ⊙         | ⊙     | ●        | ●        |
| odrazivost  | ●                           | ⊙         | ⊙     | ●        | ●        |
| ● parametr vykazující podstatný vliv na danou vlastnost |                             |           |       |          |          |
| ○ parametr nemá vliv na odpovídající vlastnost          |                             |           |       |          |          |

Tabulka 7: Vztah mezi parametry struktury povrchu a funkcí plochy. Vybráno podle [27] a [28]

Abbotova křivka (tzv. nosná čára) je grafické znázornění relativní nosné délky profilu v závislosti na poloze čáry řezu. Jedná se o komplexní znázornění profilové charakteristiky povrchu a je z něj možné určovat jeho opotřebení. [16]

Je na konstruktérovi, aby vzhledem k požadovaným funkčním vlastnostem zvolil optimální hodnotu drsnosti. Příliš vysoké požadavky na maximální hodnotu drsnosti zbytečně prodražují a komplikují výrobu. Naopak např. u sestav, se vždy musí volit maximální drsnost vhodná pro daný stupeň lícování, aby nedošlo vlivem nerovností k překročení geometrických tolerancí. [17]

Potřeba kontroly obrobene drsnosti vzniká zejména na plochách, které mají přímý vliv na funkčnost součástí. Takové plochy jsou v kontaktu s dalšími součástmi nebo okolím. Dále budou uvedeny pouze vybrané metody měření drsnosti.

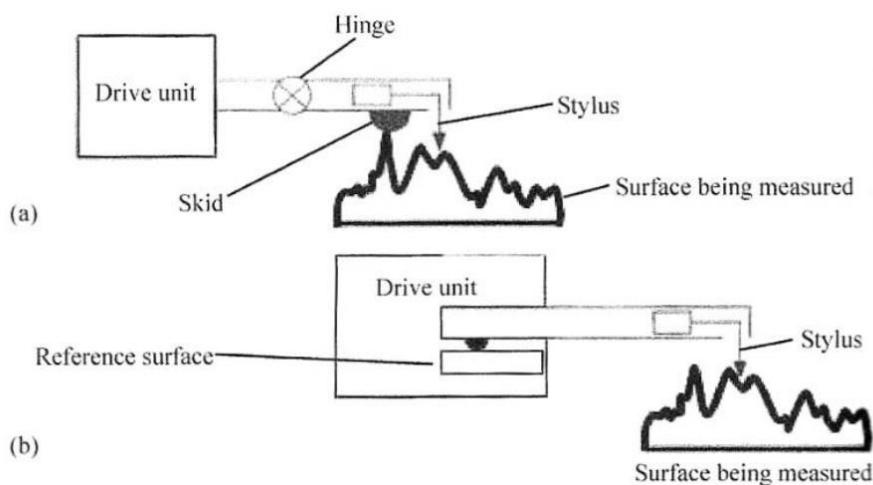
### 2.3.1.1 Kvalitativní hodnocení povrchu

Takto se kvalifikuje hodnocení povrchu za použití lidských smyslů a je založeno na porovnávání obrobené součásti s etalonem za pomoci hmatu, popř. zraku [29]. Na etalony jsou kladeny tyto požadavky: stejný materiál (jaký má zkoumaná součást), shodná výrobní metoda a shodný tvar (plochý, vydutý, vypuklý). Při porovnávání se součástí pak musí být dodrženy stejné podmínky pozorování (osvětlení) [22]. Přesnost této metody při porovnávání zrakem – za použití světelného mikroskopu – se prakticky uvažuje 1  $\mu\text{m}$ . Hmatem je možné (po získání praxe) rozpoznat rozdíl až 0,1  $\mu\text{m}$  [29].

### 2.3.1.2 Měření dotykovými přístroji

Jde o způsob měření, kdy se po povrchu součásti rovnoměrnou rychlostí posouvá hrot měřicího přístroje, jehož pohyb je zaznamenáván a následně je z něj tvořen profil povrchu součásti. Často se po součásti posouvá vedle hrotu ještě opěrná patka a výsledný profil je změřen jako rozdíl výšek hrotu a patky (relativní snímač). Pro měření se využívají diamantové hroty s vrcholovým úhlem 90° a zaoblenou špičkou, která má poloměr zaoblení (2, 5, popř. 10)  $\mu\text{m}$ . Přičemž při použití hrotu s poloměrem zaoblení špičky 2  $\mu\text{m}$  je možné měřit až do hodnot  $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ , než se projeví (nežádoucí) efekt zaoblení. [29]

Na obrázku 3 jsou zobrazena dvě z mnoha možných konstrukčních provedení kontaktních snímačů. V případě (a) se opěrná patka posouvá vedle hrotu po měřené součásti, v případě (b) opěrná patka klouže po referenčním povrchu, který musí mít shodný tvar se součástí a hrot se posouvá po zkoumaném povrchu.



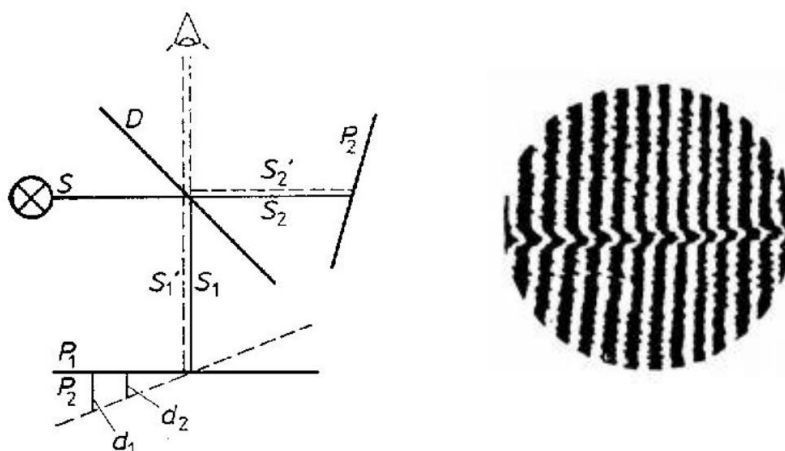
Obrázek 3: Příklady konstrukčního řešení kontaktních snímačů [30]

### 2.3.1.3 Měření interferenční metodou

Měření drsnosti pomocí interference světla se řadí mezi optické metody. Tyto metody dosahují přesnějších výsledků, než metody využívající kontaktní způsob měření (z důvodu zaoblení hrotu snímače), ale jejich použití vyžaduje značnou čistotu povrchu součásti. [29]

Princip metody je zobrazen na obrázku 4. Paprsek světla vychází ze zdroje  $S$  a pokračuje na polopropustnou diodu, kde se dělí. Část paprsku pokračuje na referenční zrcadlo a část paprsku se odrazí na měřenou součást. Od obou povrchů se paprsek odrazí zpět a přes diodu se dostane do objektivu, kde se skládá (interferuje). Výstup objektivu je zobrazen na obrázku vpravo, kde nerovnost přímých čar značí drsnost povrchu (vychýlení součásti zobrazené

na obrázku vlevo čárkovanou čarou). Existují různá provedení interferometrů, avšak princip metody je vždy zachován. [22]



Obrázek 4: Schéma Michelsonova interferometru (vlevo) [29], zobrazení výstupu objektivu interferometru (vpravo) [22]

#### 2.3.1.4 Drsnost dosahovaná metodami obrábění

Vzhled povrchu součásti se liší u každé metody obrábění. Záleží především na kinematice obráběcí metody, a také na geometrii nástroje (nástroje s definovanou, popř. nedefinovanou geometrií). Výsledný profil součásti ale záleží především na řezných podmínkách, kterými jsou, v případě konvenčního obrábění, velikost posuvu, řezná rychlost a hloubka řezu. [30]

| metoda obrábění | dosahovaná drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ] | metoda obrábění          | dosahovaná drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------------|---|--------------------------|---|
| soustružení     | 1,6                                     | broušení obvodem         | 0,4                                     |
| frézování       | 1,6                                     | honování                 | 0,4                                     |
| vrtání          | 1,6                                     | lapování                 | 0,2                                     |
| vyhrubování     | 6,3                                     | superfinašování          | 0,1                                     |
| vystružování    | 1,6                                     | elektrochemické obrábění | 1,6                                     |
| vyvrtávání      | 3,2                                     | elektroerozivní obrábění | 1,6                                     |

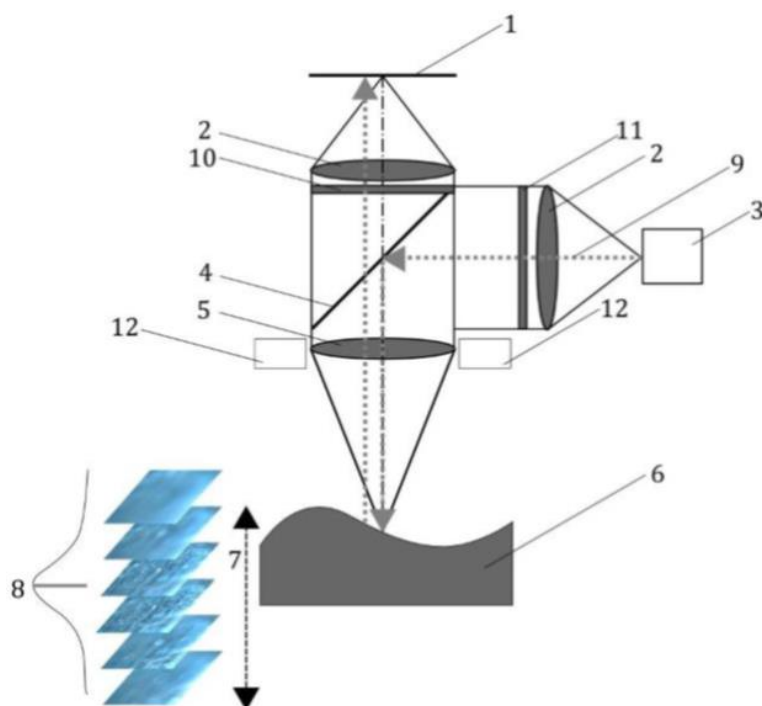
Tabulka 8: Dosahované drsnosti různými druhy obrábění [32] a [16]

#### 2.3.1.5 Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu

V současné době s rozvojem měřicí a počítačové technologie se stále více uplatňují nové metody zkoumání topografie povrchu. Jejich princip spočívá ve vytvoření 3D modelu skutečného povrchu (naskenování) a následné aplikaci algoritmů pro určení jeho charakteristik. Tento přístup umožňuje kromě profilových charakteristik určit i ty plošné (3D). Plošné metody měření obsahuje soubor norem ČSN EN ISO 25178.

Topografická mikroskopie využívá několika principů: konfokální mikroskop (laserový rastrovací nebo s rotujícím diskem), elektronový mikroskop (transmisivní nebo rastrovací), mikroskop s využitím meziatomových sil a měření pomocí „Focus Variation“ mikroskopu. Během experimentu byl použit právě ten posledně jmenovaný princip „Focus Variation“, proto je zde podrobněji popsán.

Název metody v překladu znamená „variací ostření“, její princip spočívá v kombinování velkého množství 2D snímků s velmi malou hloubkou ostrosti a pořízených z různé vzdálenosti od měřeného povrchu. Je využito koaxiální regulované osvětlení, které se od vzorku odráží na senzor mikroskopu. Algoritmicky je vyhodnocována míra ostrosti jednotlivých bodů a změna osvětlení. Určením míry ostrosti v závislosti na vzdálenosti objektivu od povrchu je jednotlivým bodům přiřazena výšková souřadnice. Naskenovaný model povrchu lze zobrazit jak v umělé paletě odpovídající vrstevnicím nebo ve skutečných barvách, což je také přednost právě této technologie.



Obrázek 5: Náčrt principu normované technologie měření „Focus Variation“ podle Technické komise ISO [34]

| <b>bodové prvky</b> |  |
|---------------------|--|
| pík                 | bod na povrchu, který je vyšší než všechny ostatní body v jeho okolí                 |
| prohlubeň           | nejnižší bod na povrchu, který je nižší než všechny ostatní body v jeho okolí        |
| bod sedla           | jeden bod příslušného sedla  |
| <b>čárové prvky</b> |  |
| přímka kurzu        | křivka oddělující přilehlé vrchy   |
| hřebenová přímka    | křivka oddělující přilehlá údolí   |
| <b>plošné prvky</b> |  |
| vrch                | oblast okolo piku taková, že směr všech maximálních cest končí v piku                |
| údolí               | oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni      |
| <b>množina bodů</b> |  |
| sedlo               | sada bodů na povrchu omezeném stupnicí, kde se kříží hřebenové přímky a přímky kurzu |

Tabulka 9: Definice základních plošných topografických prvků [35]

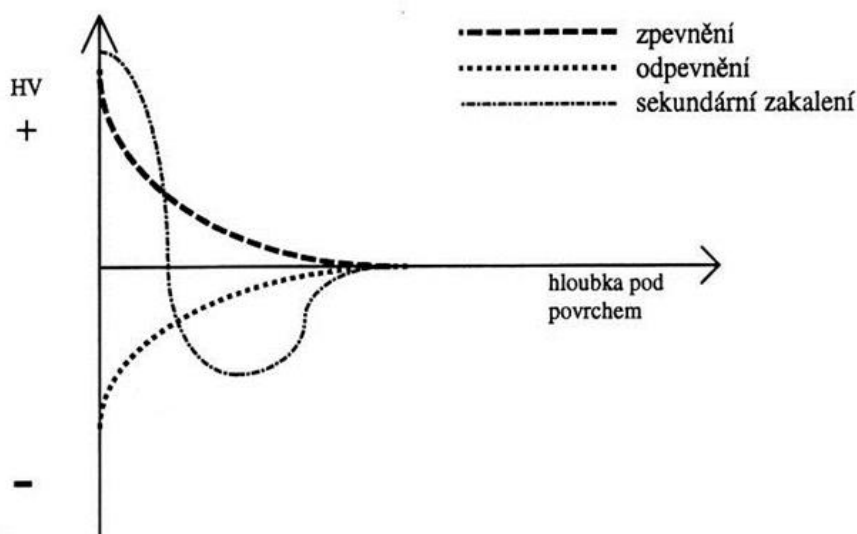
### 2.3.2 Mikrotvrdość a struktura povrchové vrstvy

Mechanické vlastnosti obrobeného povrchu jsou ovlivněny technologickými procesy výroby, nejvíce se změny projevují změnou tribologie a únavovými vlastnostmi. Výslednou jakost povrchové vrstvy lze nejčastěji posuzovat změnou tvrdosti. Gradient tvrdosti vzniká ve velmi tenkých vrstvách pod povrchem, proto je nejlépe jej hodnotit podle průběhu mikrotvrdości 0. Existují základní metody měření hloubkových gradientů mikrotvrdości: postupné odleptávání vrstev, metoda kolmých řezů, metoda šikmých řezů. [37] [38]

| rozdělení             |           |                    | název metody                   |
|-----------------------|-----------|--------------------|--------------------------------|
| zkoušky makrotvrdości | statické  | vrypové vnikací    | podle Matense                  |
|                       |           |                    | podle Brinella                 |
|                       |           |                    | podle Rockwella                |
|                       |           |                    | podle Vickerse                 |
|                       |           |                    | podle Knoppa                   |
|                       | dynamické | plastické nárazové | metoda volným pádem            |
|                       |           |                    | metoda stlačenou pružinou      |
|                       |           |                    | porovnávací metoda             |
|                       |           | elastické odrazové | metoda volným pádem (Shore)    |
|                       |           |                    | metoda kyvadlová (Durosop)     |
| zkoušky mikrotvrdości | statické  | vnikací            | metoda dle Vickerse (do 4,9 N) |

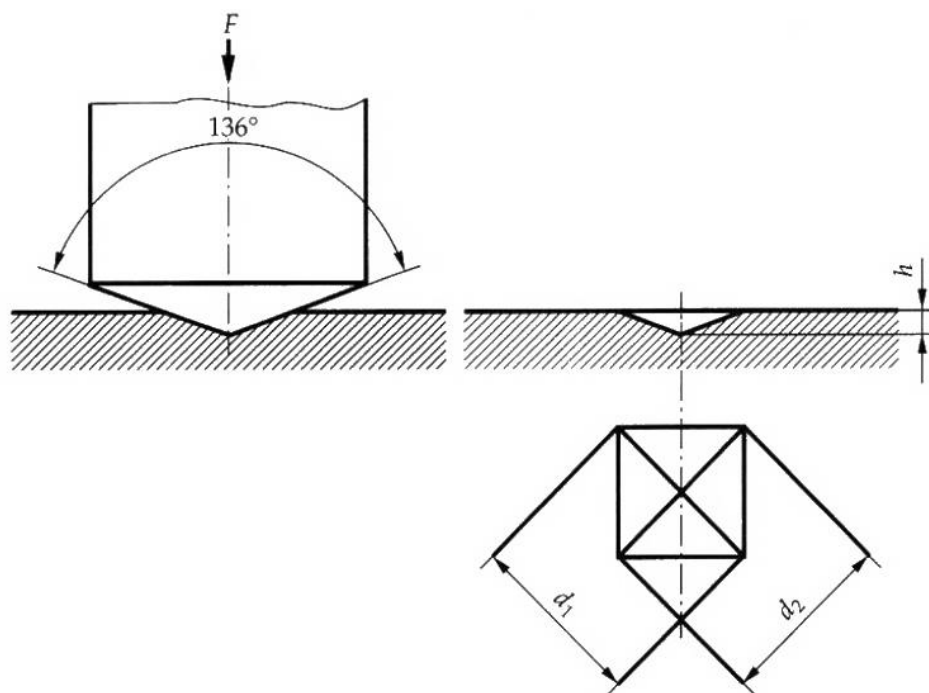
Tabulka 10: Přehled zkoušek tvrdosti dle [39]

Výsledný průběh mikrotvrdości ovlivňuje zejména: výchozí materiál a jeho původní struktura a druh ovlivnění a výsledná struktura povrchových vrstev. Existují tři základní charakteristiky průběhu mikrotvrdości znázorněné na obrázku 6. Zpevňování je způsobováno změnami krystalové mřížky, kdy roste mez kluzu a klesá tažnost a vrubová houževnatost. Odpevňování je způsobeno teplenými jevy, kdy dochází k zotavování materiálu. Sekundární zakalení je zpevňování s následným poklesem pod tvrdost jádra. Vzniká např. při broušení či obrábění laserem.



Obrázek 6: Nejběžnější průběhy mikrotvrdości v ovlivněných podpovrchových vrstvách dle [17], [37] a [38]

Pro měření mikrotvrdomosti se nejčastěji užívá metoda dle Vickerse, dále značená jako HV. Řadí se mezi statické metody vnikací. Indektorem je pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ \pm 0,5^\circ$ . Nevýhodou měření mikrotvrdomosti je fakt, že naměřenou hodnotu nelze přímo porovnávat se standardní tvrdostí, tzv. makrotvrdomostí. Standardní tvrdost je měřena obvykle se zatížením od 10 do 1200 Newtonů, naproti tomu mikrotvrdomost je měřena v rozmezí 0,0981 až 9,81 Newtonů. [40]



Obrázek 7: Zkouška dle Vickerse [41]

|                                | zkouška tvrdosti dle Vickerse | zkouška tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení | zkouška mikrotvrdomosti dle Vickerse |
|--------------------------------|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| rozsah tvrdosti                | $\geq HV 5$                   | HV 0,2 až HV 5                                    | HV 0,01 až HV 0,2                    |
| rozsah zkušebního zatížení [N] | $\geq 49,03$                  | 1,961 až 49,03                                    | 0,09807 až 1,961                     |

Tabulka 11: Norma tvrdost dle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1 [40]

Změna struktury se projevuje změnou mechanických vlastností materiálu v povrchové vrstvě obrobenej součásti. Většinou dochází ke změně krystalových mřížek a tudíž změně měrných objemů, které mají za následek vznik napětí v jednotlivých vrstvách. Konkrétní podobu změny mikrostruktury a krystalové mřížky lze vyhodnocovat na mikroskopickém snímku metalografického výbrusu vzorku. [40]

### 2.3.3 Zbytkové napětí

Jednou z nejpodstatnějších součástí integrity povrchu jsou zbytková napětí. Mají výrazný vliv na únavovou odolnost součásti. Vznik zbytkových napětí má podstatu v plastické deformaci, je podmíněn překročením meze kluzu v povrchové vrstvě. Vnější síly nebo momenty působící na těleso vytváří v tělese napětí označovaná jako vložena. V tělese však mohou existovat i napětí vnitřní. Silové účinky nebo momenty, v jejichž důsledku vznikají, jsou v celkovém objemu tělesa v rovnováze a mimo něj se neprojevují. V případě porušení celistvosti tělesa se

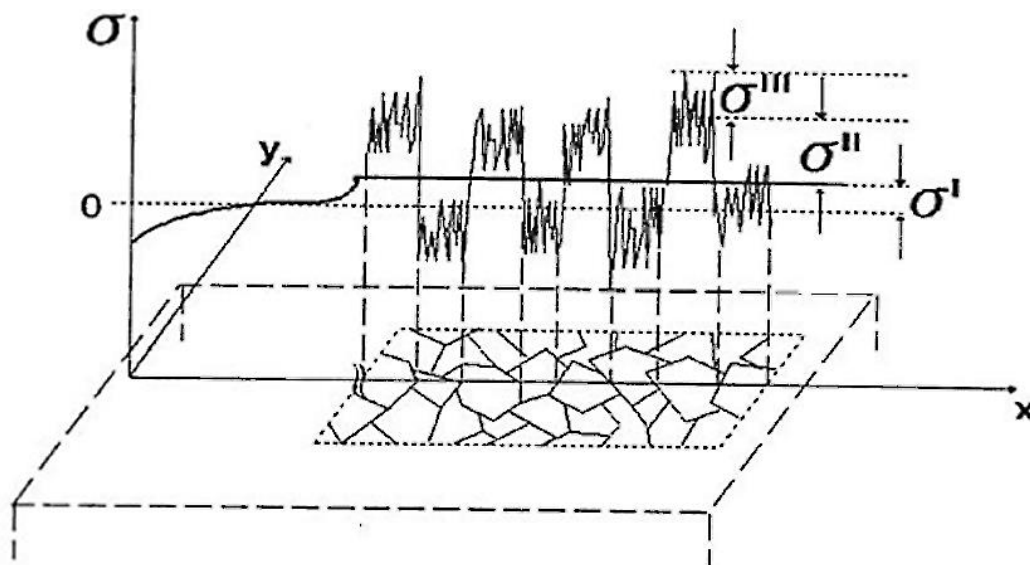
vnitřní napětí uvolní a dojde k deformaci tělesa. Dle ohraničení doby trvání napětí v tělese je můžeme rozdělit [42]:

- Vložená Způsobují je vnější síly a momenty. Elastická deformace v tělese bude existovat jen tak dlouho, dokud budou působit vnější síly. Můžou být způsobena i nemechanickými jevy – např. nehomogenní teplotní nebo magnetické pole.
- Zbytková Vznikají při překročení vnějších napětí přes mez kluzu. Přetrvávají i po odstranění příčin, které je vyvolaly.

Základní dělení zbytkových napětí je dle objemu, v kterém dosahují rovnováhy [42]:

- I. druhu (makroskopická) Dosahují rovnováhy v celém objemu součásti, jsou konstantní ve velkých oblastech.
- II. druhu (mikroskopická) Dosahují rovnováhy v objemu několika krystalů. Specifikem je, že krystaly různých fází mohou být napjaty opačně.
- III. Druhu (submikroskopická) Dosahují rovnováhy na úrovni meziatomových vzdáleností, doprovází poruchy krystalové mřížky.

Všechny tři druhy zbytkových napětí se vyskytují současně. Jejich rozložení v tělese je naznačeno níže na obrázku 8. V praxi nás nejvíce zajímají makroskopická zbytková napětí a pod pojmem zbytková napětí se rozumí především ta. Přítomnost zbytkových napětí má dva základní důsledky. Jedním je změna tvaru a rozměru součásti po zásahu do napěťové rovnováhy. Druhým je vliv zbytkových napětí na životnost, bezporuchovost i korozní odolnost strojních komponent. Z tohoto pohledu jsou výhodnější tlaková napětí v podpovrchové vrstvě, která vedou k výraznému prodloužení životnosti. Je možné je vyvolat způsoby úpravy povrchu (např. kuličkováním, válečkováním apod.). Tahová zbytková napětí podporují vznik trhlin, napěťovou korozi, snižují mez únavy a snižují křehkolomovou oblast. [43], [44], [45]



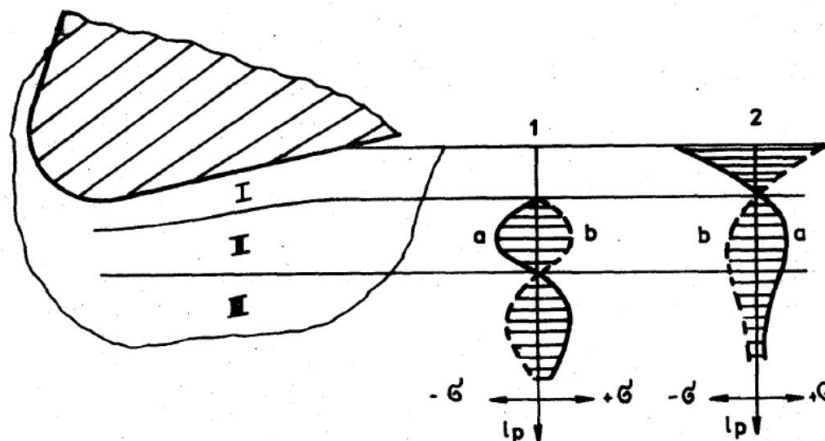
Obrázek 8: Druhy zbytkového napětí,  $\sigma_I$  – makroskopické napětí,  $\sigma_{II}$  – mikroskopické napětí,  $\sigma_{III}$  – submikroskopické napětí [42]



Výčet příčin, v jejichž důsledku vznikají zbytková napětí, je uveden níže. Vždy se jedná o kombinaci více nebo všech příčin. [46]

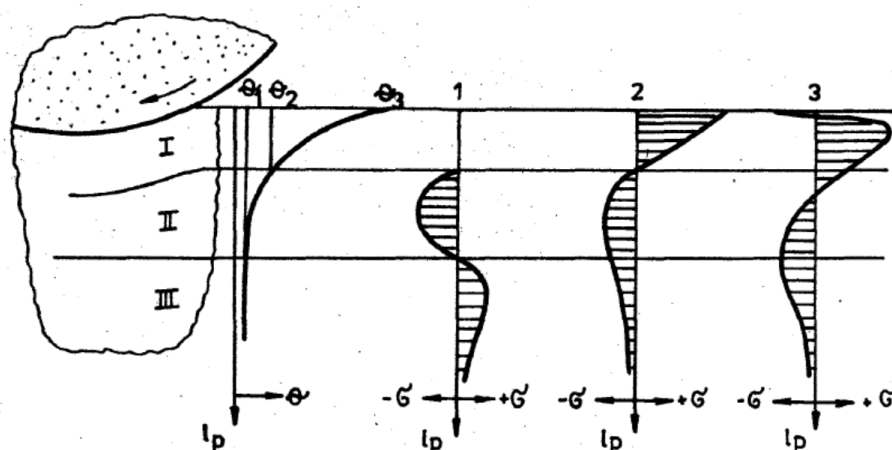
- Nerovnoměrná plastická deformace – mechanické síly a momenty
- Nerovnoměrný ohřev a ochlazování – nerovnoměrná tepelná deformace
- Nerovnoměrná změna struktury – nerovnoměrná změna měrných objemů fází (strukturální napětí)
- Chemické procesy – absorpce a difuze (pronikání cizích látek) a případné chemické reakce.

V případě zatížení povrchové vrstvy pouze mechanicky probíhá v povrchu plastická deformace a níže dochází pouze k deformaci elastické. V tomto zjednodušeném případě, kterému se může blížit např. obrábění při nízkých teplotách, nastávají dva případy v závislosti na poměru mezi hodnotou meze kluzu a meze pevnosti. Pro případ  $R_m/R_{p0,2} < 1,25$  platí křivka *a* na obrázku 9. Při obrábění těchto materiálů dochází k prodloužení zrn ve směru vzniku povrchu. Jde o důsledek tření hřbetu nástroje a prodloužení vrstvy *I*. Pro případ  $R_m/R_{p0,2} > 1,25$  platí křivka *b* na obrázku 9. Jedná se o houževnaté materiály a při obrábění těchto materiálů dochází k prodlužování zrn ve směru kolmém na povrch. [21]



Obrázek 9: Mechanicky zatížená vrstva a průběhy napětí [21]

Složitější případ nastává v případě, že je povrchová vrstva zatížena mechanicky, tepelně a dochází k změnám struktury. Příkladem může být broušení, při němž dochází k velkému vývinu tepla. Průběh vzniku profilu zbytkového napětí v podpovrchových vrstvách odpovídá obrázku 10.



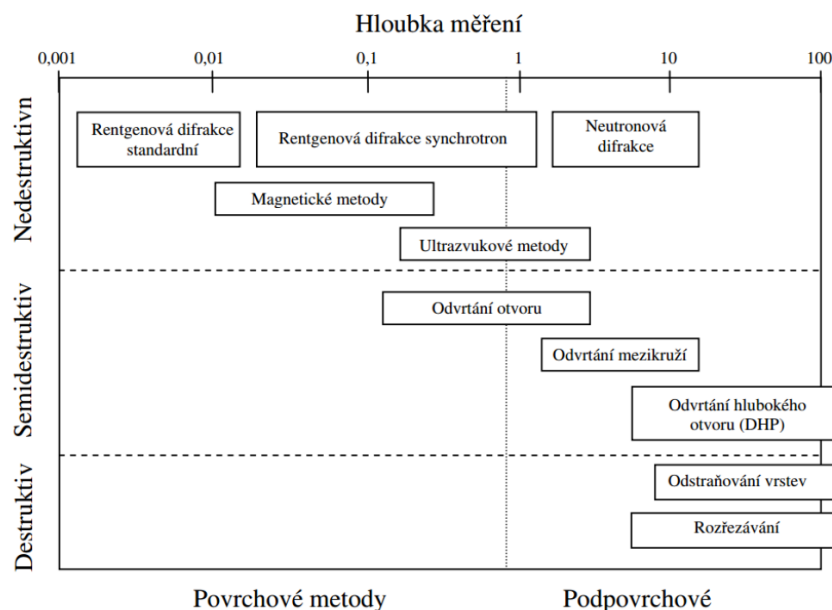
Obrázek 10: Povrchová vrstva s mechanickým a tepelným zatížením [21]

Metody pro určování zbytkového napětí nejsou přímě, ale vždy měří veličinu (např. deformaci), podle níž lze hodnotu zbytkového napětí dopočítat. Kromě přesnosti hodnoty měřené veličiny je také rozhodující mít k dispozici správné materiálové konstanty. Konkrétní způsob měření lze volit z velkého počtu dostupných metod. Volba je však závislá na mnoha okolnostech, které množství použitelných metod velice redukuje, někdy jednu metodu přímo determinují. Tyto skutečnosti jsou: typ (tvar) zkoumané součásti, její materiál, rozměry, hmotnost, zkoumané místo, hloubka měření, finanční náklady a dostupnost metody. Podle míry ovlivnění zkoumaného vzorku lze metody určování zbytkových napětí rozdělit na [21]:

- Destruktivní** Podstatou je odstraňování velmi tenkých povrchových vrstev a současné měření deformace.
- Semidestruktivní** Lokální poškození v místě měření (např. vrtání otvoru).
- Nedestruktivní** Nedochází k ovlivňování zkoumané součásti, podstatou jsou fyzikální jevy (např. difrakce, ultrazvuk, magnetismus).

| metoda zjišťování zbytkových napětí | tvar součásti          | způsob měření           |  |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|--|
| mechanické                          | plochý tvar            | deformace pásků         | změna délky                            |
|                                     |                        |                         | změna zakřivení                        |
|                                     |                        | vrtání otvorů           | válcový otvor                          |
|                                     |                        |                         | mezikruží                              |
|                                     | rotační tvar           | změna rozměru válce     | odstranění povrchové vrstvy            |
|                                     |                        | trubka                  | rozříznutí trubky                      |
|                                     |                        |                         | odstranění povrchové vrstvy            |
|                                     |                        |                         | odstranění vnitřní vrstvy              |
|                                     |                        | kroužek                 | rozříznutí                             |
|                                     |                        |                         | změna křivosti                         |
|                                     | podélné pásy z kroužků |                         |  |
|                                     | obecný tvar            | metoda sítí             | deformace sítě                         |
| křehké laky                         |                        | vznik trhlin            |  |
| křehké modely                       |                        | vznik trhlin            |  |
| fyzikální RTG                       | obecný tvar            | difrakce                | vzdálenost meziatomových rovin         |
| fyzikální UZ                        |                        | šíření vln              | změna rychlosti                        |
|                                     |                        |                         | odraz vln                              |
|                                     |                        |                         | vnitřní tlumení                        |
| elektrické                          | obecný tvar            | změna proudu            | změna potenciálu procházejícího proudu |
|                                     |                        |                         | změna velikosti vířivých proudů        |
|                                     |                        |                         | změna indukčního toku                  |
| magnetické                          | obecný tvar            | změny magnetismu        | magnetická indukce                     |
|                                     |                        |                         | zbytkový magnetismus                   |
| akustické                           | obecný tvar            | prozvučitelnost         | četnost akustických emisí              |
| chemické                            | obecný tvar            | difúze vodíku           | trhliny na povrchu                     |
|                                     |                        | změna chemické aktivity | změna struktury                        |

Tabulka 12: Principy metod měření zbytkových napětí [48]

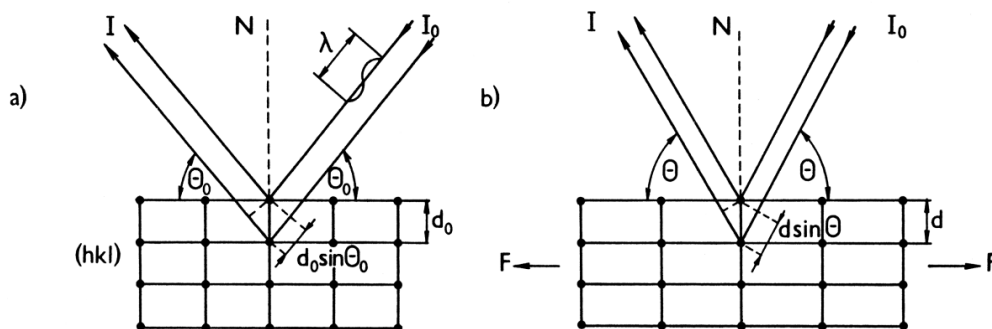


Obrázek 11: Rozdělení metod pro měření zbytkového napětí [47]

V této práci byla použita rentgenová difrakční tenzometrie (konkrétně metoda  $\sin^2\psi$ ) a z toho důvodu je zde podrobněji vysvětlena. Vlnové délky záření používaného při rentgenografické tenzometrické difrakční analýze jsou řádově desítky nanometrů, což odpovídá mezirovinným vzdálenostem v krystalech, z toho také plyne, že se jedná o měření celkového zbytkového napětí včetně 2. a 3. druhu (mechanické metody měří pouze makroskopické zbytkové napětí). Hloubka vniku RTG paprsku je pouze několik  $\mu\text{m}$ , jedná se tedy o měření ve velmi malé hloubce pod povrchem. K měření hloubkového profilu zbytkových napětí se využívá bezsilového odleptávání povrchové vrstvy (pak se jedná o semidestruktivní metodu). Pomocí difrakčních metod lze měřit pouze elastickou deformaci krystalové mřížky a s využitím teorie elasticity se z naměřených deformací vypočítá zbytkové napětí. Podstatou je využití rozptylu (difrakce) rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím viz obrázek 12. Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru  $\theta$ , pokud je rozdíl drah obou paprsků celočíselným násobkem vlnové délky použitého záření, tj. platí-li Braggova podmínka [49]:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

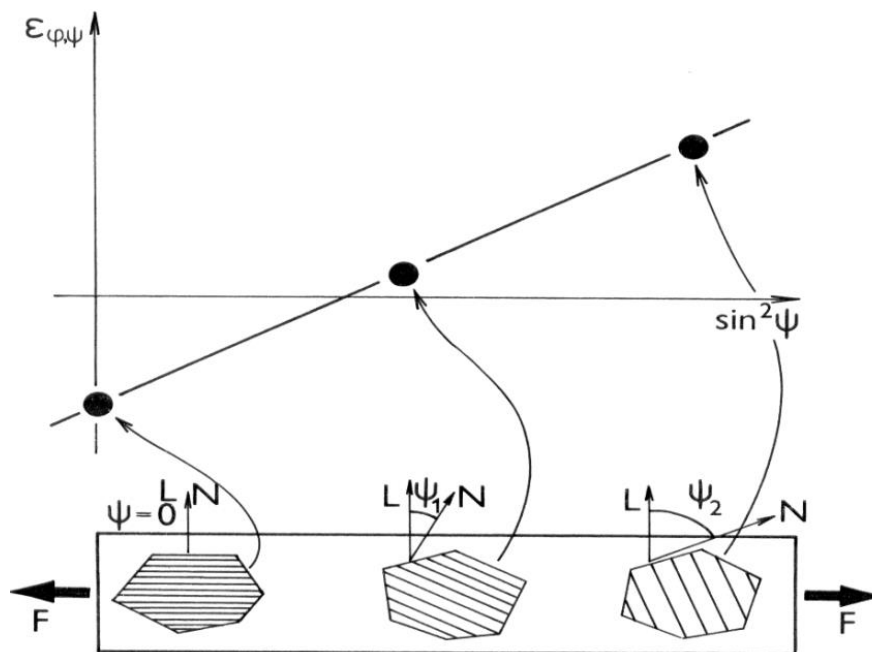
Kde  $d$  je vzdálenost sousedních krystalových rovin. Působením mechanického napětí se změní mezirovinná vzdálenost  $d$ , a tím i úhlová poloha  $\theta$ , neboť vlnová délka záření se nemění.



Obrázek 12: Deformace vzdáleností mřížkových rovin a změny úhlové polohy interferenčního maxima;  $I_0$  a  $I$  jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$  [49]

Při rentgenografických metodách se vychází z předpokladu, že stav napjatosti je dvouosý, ačkoli deformace je tříosá. Napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  působí v rovině rovnoběžné s povrchem a napětí  $\sigma_3$  působící ve směru normály povrchu můžeme zanedbat. [49]

Na obrázku 13 je znázorněn princip metody  $\sin^2\Psi$ . Ozařují se roviny, které jsou různě orientovány vůči povrchu – tj. úhel  $\Psi$ . V závislosti natočení roviny vůči zatížení  $F$  se mění mezirovinná vzdálenost. Výsledkem měření je tedy závislost mezi deformací  $\varepsilon$  a  $\sin^2\Psi$ , z této závislosti se určí makroskopické napětí pro měřený objem. Rentgenografické určování zbytkových napětí probíhá na velmi malých objemech, pro které zcela neplatí lineární teorie elasticity izotropních látek. Elastickou anizotropii je nutné respektovat pomocí rentgenografických elastických konstant. Ty lze určit teoretickým výpočtem nebo experimentálním měření mřížkových deformací při známém jednoosém zatížení. Mezi výhody a specifika rentgenové difrakční tenzometrie patří možnost kromě krystalických fází měřit i částečně amorfni, měřit podíl fázové přeměny a určovat zbytková napětí II. druhu pro každou fázi zvlášť. [49]



Obrázek 13: Princip měření napětí metodou „ $\sin^2\Psi$ “ [49]

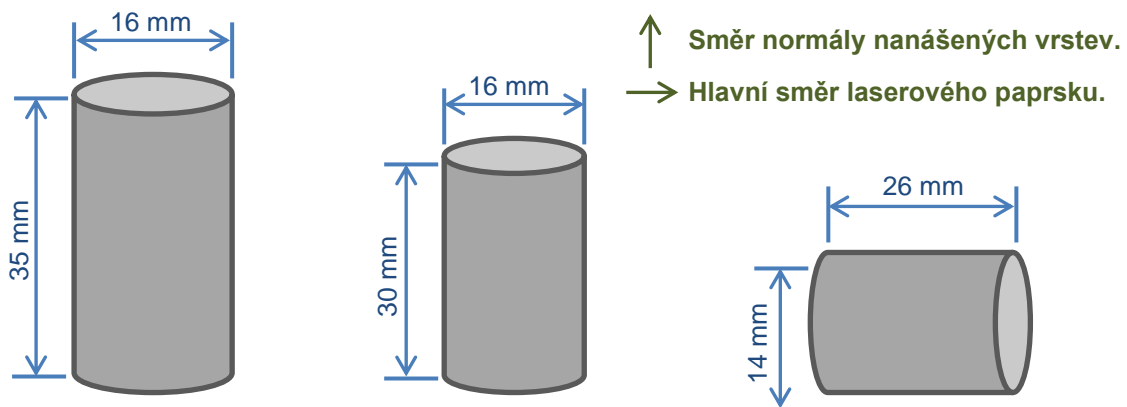
### 3. Praktická část

Předmětem praktické části této diplomové práce byla výroba otvorů do připravených polotovarů ze slitiny Inconel 718 a to jak z konvenčně dodávaného, tak i z tisknutého metodou DMLS v dvou různých orientacích vůči ose vrtaného otvoru a vyšetření vlastností povrchové vrstvy po obrobení. Realizace experimentu proběhla v Regionálním technologickém institutu FST včetně materiálových analýz a zbytková napětí byla naměřena v laboratoři strukturní rentgenografie na KIPL FJFI.

#### 3.1 Příprava a provedení experimentu

##### 3.1.1 Použitý polotovar

Výchozím polotovarem pro experiment byly válcová tělesa (obrázek 14) výšky cca 30 mm a o průměru cca 15 mm ze slitiny Inconel 718. Celkem bylo použito 6 kusů. Z toho 2 standardně dodávaný konvenční Inconel 718 ve stavu žíhaném naměkko nařezaný z kruhové tyče. Zbývající 4 kusy byly vytisknuty technologií DMLS a to 2 byly tisknuty v podélné orientaci (válec byl tisknut „na ležato“, tj. vrstvy byly nanášeny rovnoběžně s osou válce) ve směru osy Z a 2 byly tisknuty v příčné orientaci (válec byl tisknut „na výšku“, tj. vrstvy byly nanášeny kolmo na osu válce) ve směru osy X. Po vytisknutí byl materiál podroben tepelnému zpracování a to žíhání obdobně jako použitý konvenční Inconel 718. Před vrtáním byly čela polotovaru zarovnána na soustruhu.



Obrázek 14: Použité polotovary – konvenční tyč Inconelu 718 (vlevo), 3D tisknutý Inconel 718 v příčné orientaci (uprostřed), 3D tisknutý Inconel 718 v podélné orientaci (vpravo)

K výrobě tisknutých polotovarů byla použita 3D tiskárna EOS M290 (na obrázku 15) pracující na principu DMLS. Jako výchozí materiál byl zvolen prášek tvořený kulovými částicemi se střední velikostí  $38 \mu\text{m}$  (směs  $10 \mu\text{m}$  až  $64 \mu\text{m}$ ). Optický snímek použitého prášku je na obrázku 16.

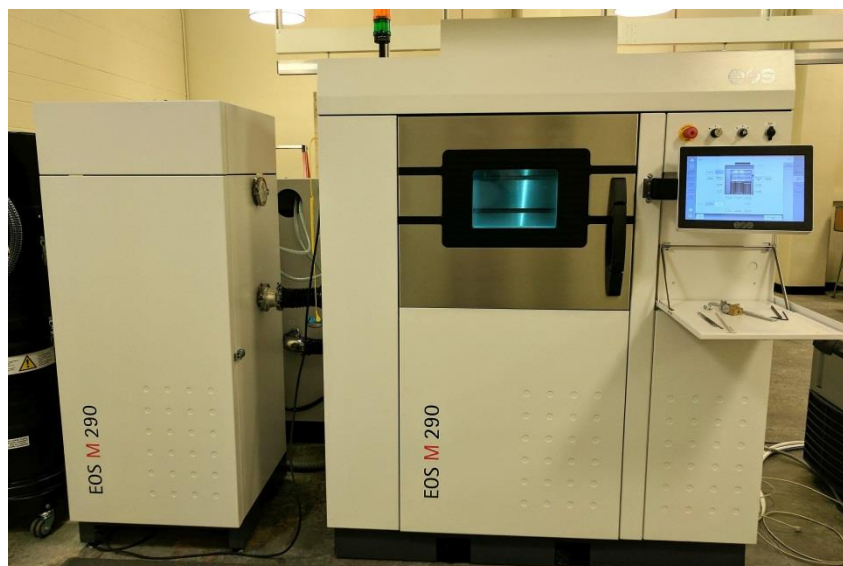
##### 3.1.2 Průběh obrábění

Jako obráběcí nástroj byl zvolen vrták ze slinutého karbidu bez povlaku s vnitřním chlazením. Vrtaný otvor měl průměr  $D = 10 \text{ mm}$  a hloubku válcové části  $h = 6 \text{ mm}$ . Řezná rychlost byla zvolena  $v_c = 15 \text{ m/min}$  a posuv na otáčku  $f = 0,12 \text{ mm}$ . Do každého z 6 připravených vzorků byl proveden otvor z obou stran. Celkem tak mělo vzniknout 12 otvorů. Při posledním otvoru však došlo k vyštípnutí ostří a následné celkové destrukci vrtáku. Na všech 11 takto vzniklých otvorů bylo laserem vygravírované označení (tabulka 13). Za účelem vyšetřování vlastností

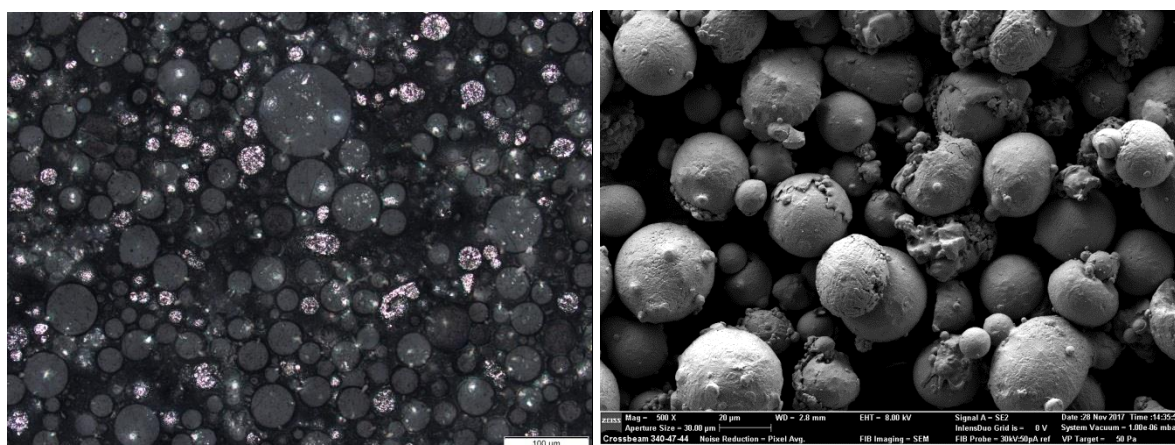
vnitřního povrchu byly válcové vzorky podélně rozříznuty rozbrušovací pilou v laboratořích RTI (obrázek 17).

Bylo vyzkoušeno více řezných podmínek, při kterých byla životnost nástroje příliš krátká, a již při prvním otvoru docházelo k destrukci nástroje. Delší životnost nástroje byla dosažena až při řezných podmínkách použitých v experimentu. Tato prvotní optimalizace měla za následek ztrátu velkého množství vrtáku, což negativně ovlivnilo experiment. Musel být totiž na celý experiment použit jediný vrták. To v důsledku zhoršilo možnost rozlišit mezi vlivem opotřebení nástroje a vlivem základního materiálu.

Před zahájením obrábění byl vrták naskenován opticko-skenovacím mikroskopem IFM G4 (obrázek 18). Při skenování byl vrták orientován vnější špičkou k objektivu tak, aby byla nasnímána plocha vedlejšího hřbetu, čela a fazetky, protože právě vedlejší ostří a fazetka se nejvíce podílí na kvalitě obrobeného povrchu otvoru. Vrták byl opětovně nasnímán po vyvrtání čtvrtého otvoru, aby bylo možné spojit opotřebení nástroje s trendem změny kvality obráběného povrchu. Následující snímání vrtáku mělo být provedeno po vyvrtání poslední dvanáctého otvoru, k čemuž nedošlo, protože při vrtání této došlo k destrukci nástroje.



Obrázek 15: Tiskárna EOS M290, která je součástí vybavení RTI



Obrázek 16: Snímek použitého prášku pro tisk polotovaru – optická mikroskopie (vlevo) a řádkovací elektronová mikroskopie (vpravo)

| pořadí    | 1.        | 2.     | 3.     | 4.                  | 5.     | 6.     | 7.     | 8.                 | 9.     | 10.    | 11.    |
|-----------|-----------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|
| označení  | IN-S-1    | IN-S-2 | IN-S-3 | IN-S-4              | IN-X-1 | IN-X-2 | IN-X-3 | IN-X-4             | IN-Z-1 | IN-Z-2 | IN-Z-3 |
| polotovar | konvenční |        |        | tisknutý „na výšku“ |        |        |        | tisknutý „podélně“ |        |        |        |

Tabulka 13: Přehled vyrobených vzorků a jejich označení



Obrázek 17: Podélně rozříznuté vzorky k analýze vnitřního povrchu otvoru



Obrázek 18: Opticko-skenovací mikroskop pro snímání povrchu metodou „Focus variation“ IFM G4

### 3.1.3 Měření vybraných vlastností povrchu

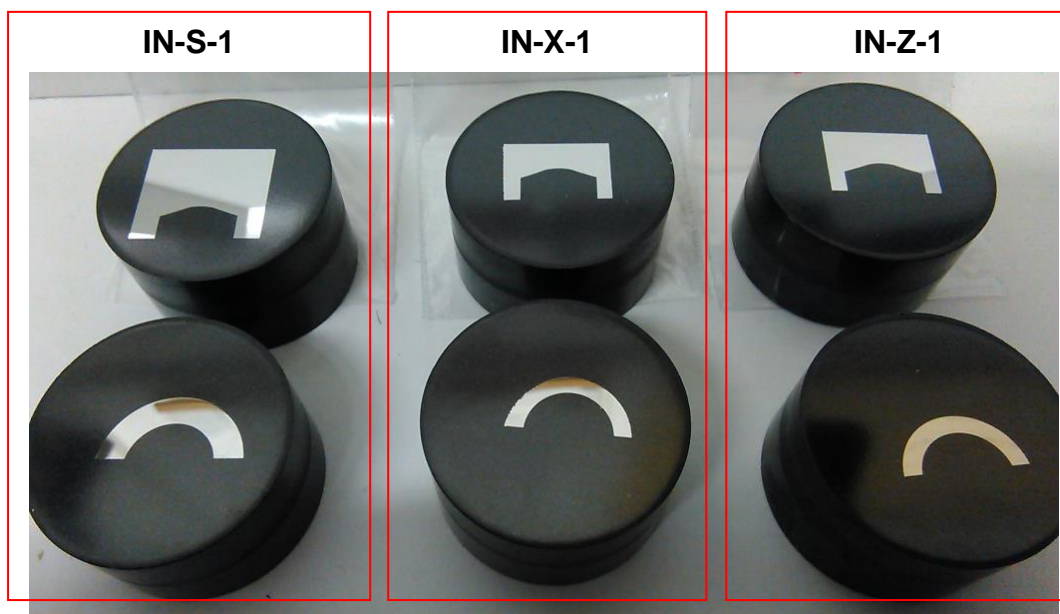
Jak již bylo popsáno výše, vzorky byly podélným řezem rozpůleny. První polovina byla analyzována na RTI. Tam byly vzorky dále upraveny tak, aby mohla být povrchová vrstva vyšetřována jak na podélném tak i na příčném řezu. Takto připravené vzorky byly zataveny do dentakrylové hmoty, následně standardním způsobem broušeny a leptány (leptadlo Adler), resp. byly připraveny metalografické výbrusy. Přesná podoba připravených výbrusů je na obrázku 19.

Jako první byla na vzorcích měřena mikrotvrdość HV 0,1 pomocí mikrotvrdoměru VMH-002V. Pro vyšetřování povrchové vrstvy je vždy vhodné zvolit metodu šikmých řezů, protože při kolmém řezu je obvykle měřený bod nejbliže k povrchu ve větší vzdálenosti od povrchu, než je tloušťka ovlivněné vrstvy. Toto měření tedy sice proběhlo, ale nepřineslo žádnou informaci o ovlivněné zpevněné povrchové vrstvě. Dále v této práci bude problematika podrobněji řešena.

Snímek mikrostruktury byl pořízen na optickém mikroskopu BX 61 s barevnou CCD kamerou DP22 a to se zvětšením: 50x, 100x, 200x, 500x a 1000x. Vzhledem k tloušťce povrchové vrstvy jsou použitelné snímky se zvětšením 500x a 1000x. Předem byl formulován předpoklad, že pořadí otvorů (resp. opotřebených nástrojů) nebude mít na mikrostrukturu povrchové vrstvy pozorovatelný vliv. Na základě tohoto předpokladu byly pořízeny snímky pouze vzorku z prvního, pátého a devátého otvoru (od každého materiálu polotovaru vždy první otvor). Tento předpoklad se potvrdil a snímky dalších vzorků nebyly pořízeny.

Jako doplňkové měření bylo provedeno snímání povrchu rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM) ZEISS EVO 25 se zvětšením 500x, 1000x, 3000x, 5000x a 10000x. Použitá analytická aparatura byla vybavena modulem EDS od Oxford Instruments využívající vznikající rentgenové záření, což umožňuje získat informaci o chemickém složení vzorku. Snímky z elektronového mikroskopu umožnili identifikovat malé struktury na hranicích zrn (dobře pozorovatelné od zvětšení 3000x) a EDS umožnilo určit jejich chemické složení. V základním materiálu konvenčního Inconelu 718 byly pozorovány specifické vměstky, jejichž složení bylo také analyzováno pomocí EDS. Výsledky těchto měření jsou v této práci uvedeny a krátce komentovány, nejsou však těžištěm práce.

Na druhé polovině podélně rozříznutých vzorků byl nejprve naskenován povrch opticko-skenovacím mikroskopem IFM G4 na RTI a vyhodnoceny parametry jeho mikrogeometrie. Následně byly vzorky podrobeny analýze zbytkových napětí v laboratoři strukturální rentgenografie KIPL FJFI v Praze vybavené difraktometrem X'Pert PRO MPD (obrázek 20) firmy PANalytical s vysoce účinným pozičně citlivým detektorem X'Cellerator. Právě toto měření tvoří stěžejní část této diplomové práce a z toho důvodu je zde podrobněji popsáno.



Obrázek 19: Analyzované metalografické výbrusy vzorků (podélné nahoře a příčné dole)



### 3.1.4 Tenzometrické radiografické měření zbytkových napětí

Difrakční měření bylo prováděno pomocí  $\theta$ - $\theta$  goniometru metodou  $\sin^2\psi$  s následujícími parametry:

- rentgenka s manganovou anodou a bodovým ohniskem,
- křížové clony o velikosti  $1 \times 0,5 \text{ mm}^2$ ,
- $\beta$ -filtr (absorbující difraktované záření  $MnK\beta$ ) z tenké chróm-berylnaté fólie umístěný před bodovým detektorem.

Parametry difrakčních experimentů byly:

- počáteční úhel  $2\theta_p = 141^\circ$ , koncový úhel  $2\theta_k = 163^\circ$ ,
- velikost kroku  $\Delta 2\theta = 0,8^\circ$ , přičemž byl zvolen kontinuální mód skenování úhlového intervalu,
- měření bylo realizováno při 9 náklonech úhlu  $\psi = 0; 0,12; 0,24; 0,3; 0,36$  pro kladné i záporné hodnoty úhlu  $\psi$  z důvodu tvaru měřeného vzorku v radiálním směru,  $\psi = -0,4; -0,3; \dots; 0; 0,2; 0,4; 0,6$  ve směru axiálním.

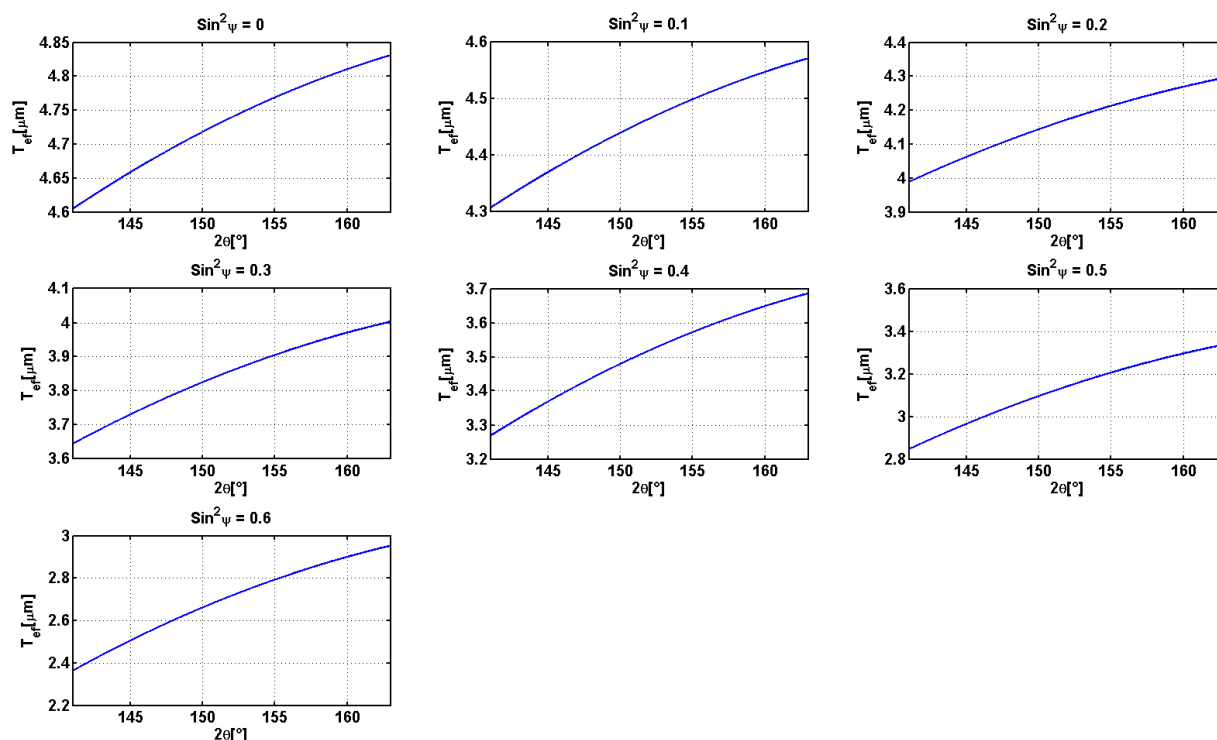
Byla analyzována difrakční linie  $\{311\}$  fáze Ni. Hodnoty zbytkových napětí jsou vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí  $2\theta(\sin^2\psi)$  za předpokladu dvojosého stavu zbytkové napjatosti ( $\theta$  je difrakční úhel,  $\psi$  – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel  $2\theta^{311}$  byl určen jako těžiště dubletu  $MnK\alpha_1\alpha_2$  difraktovaného mřížkových rovin  $\{311\}$  fáze Ni. Při výpočtu napětí byly použity rentgenografické elastické konstanty  $\frac{1}{2}s_2 = 6,57 \text{ TPa}^{-1}$ ,  $s_1 = -1,56 \text{ TPa}^{-1}$ . Experimentální chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou dle algoritmu výpočtu zbytkových napětí metodou  $\sin^2\psi$ .

Pro polohování analyzovaného tělesa při jeho měření na difraktometru bylo využito triangulačního laserového zaměřování s  $5 \mu\text{m}$  přesností stanovení polohy měřené oblasti povrchu vzorku vůči zdroji laserového svazku.

Velikost difraktujícího objemu byla dána velikostí ozářeného povrchu vymezeného křížovými clonami, geometrickým uspořádáním experimentu a efektivní hloubkou vnikání použitého rentgenového záření do zkoumaného materiálu, viz obrázek 20.

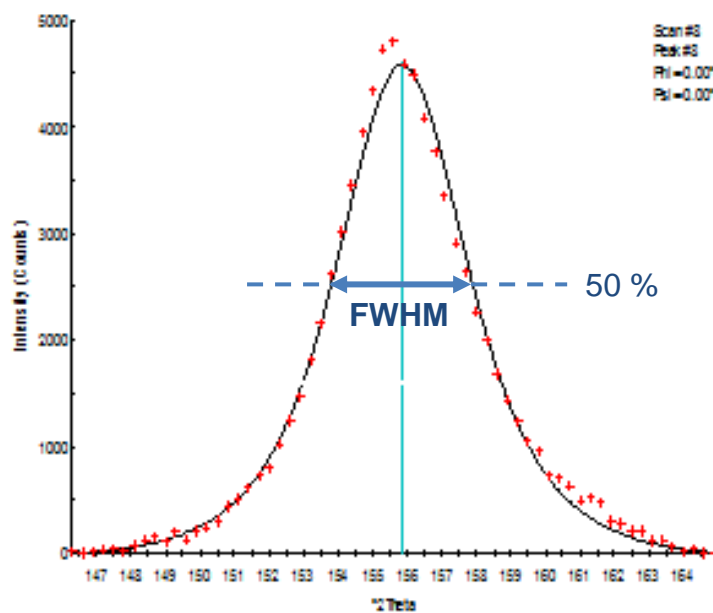


Obrázek 20:  $\theta$ - $\theta$  goniometru X'Pert PRO MPD firmy PANalytical v laboratoři rentgenografické tenzometrie KIPL na FJFI v Praze



Obrázek 21: Efektivní hloubka vnikání  $T_{ef}$  záření MnKa do niklu při určování stavu zbytkové napjatosti. Efektivní hloubka vnikání  $T_{ef}$  určuje tloušťku vrstvy, z níž pochází 63,2 % z celkové difraktované energie

Z naměřených dat lze kromě hodnoty zbytkového napětí určit také veličinu FWHM (obrázek 22), což je průměrná integrální šířka difrakční linie {311}  $\gamma$ -Ni při  $\psi = 0^\circ$  a reprezentuje míru plastické deformace povrchu analyzovaných vzorků. Experimentální chyba jejího stanovení nepřevyšuje  $0,05^\circ 2\theta$ .

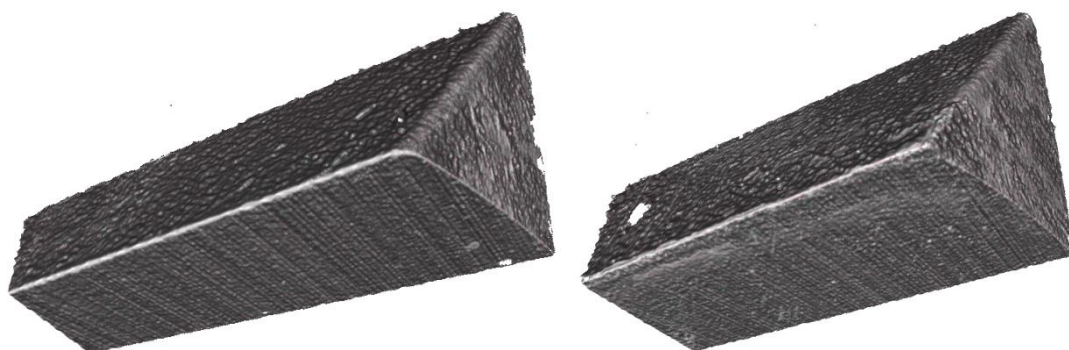


Obrázek 22: Princip určení veličiny FWHM

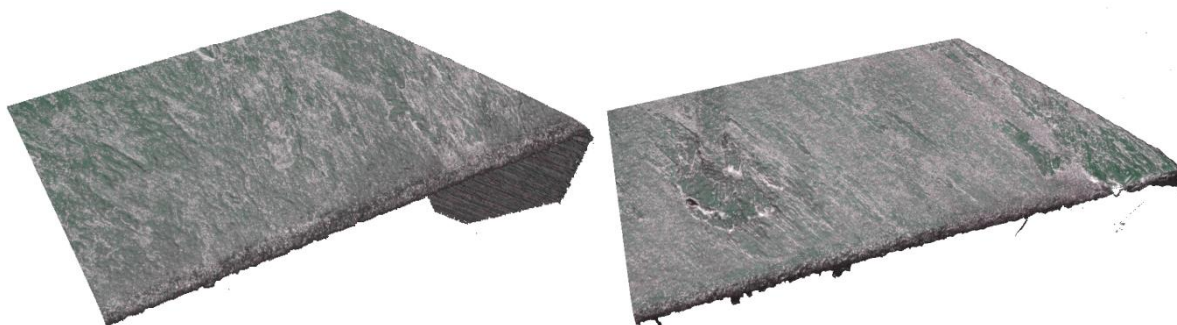
## 3.2 Výsledky měření

### 3.2.1 Opotřebení nástroje

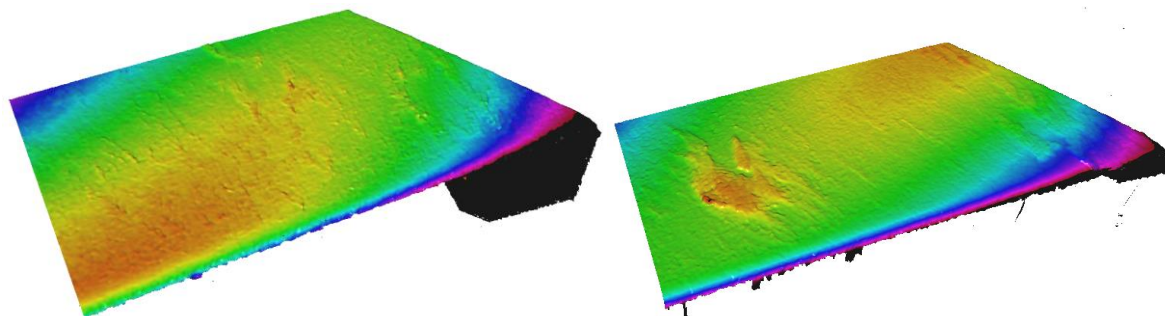
Na obrázcích 23 a 24 je naskenovaný nástroj v přirozených barvách, na obrázku 25 je vedlejší hřbet nástroje v barevné škále dle výšky povrchu nad referenční úrovní. Jedná se o stav nového nástroje a stav po 4 otvorech s celkovou hloubkou 24 mm, nástroj byl v řezu 25 s. Na vedlejší hřbetě a vnější špičce vrtáku je patrné opotřebení otěrem a geometrie ostří v okolí špičky je již nevýrazně pozměněna. Z obrázku 25 (vpravo) je patrné, že došlo k vytvoření nárůstku ve dvou oblastech vedlejšího hřbetu. V tabulce 14 jsou shrnuty parametry drsnosti vedlejšího hřbetu nástroje určené před a po opotřebení.



Obrázek 23: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) břitu



Obrázek 24: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) vedlejšího hřbetu nástroje



Obrázek 25: Snímky nového (vlevo) a opotřebeného (vpravo) vedlejšího hřbetu nástroje v barevné škále dle výšky nad referenční úrovní

|                        | $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ] | $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ] | $R_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ] | $R_{Sm}$ [ $\mu\text{m}$ ] |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>nový břit</b>       | 0,4                     | 2,1                     | 2,1                         | 34,7                       |
| <b>opotřebený břit</b> | 0,7                     | 3,6                     | 7,7                         | 70,4                       |

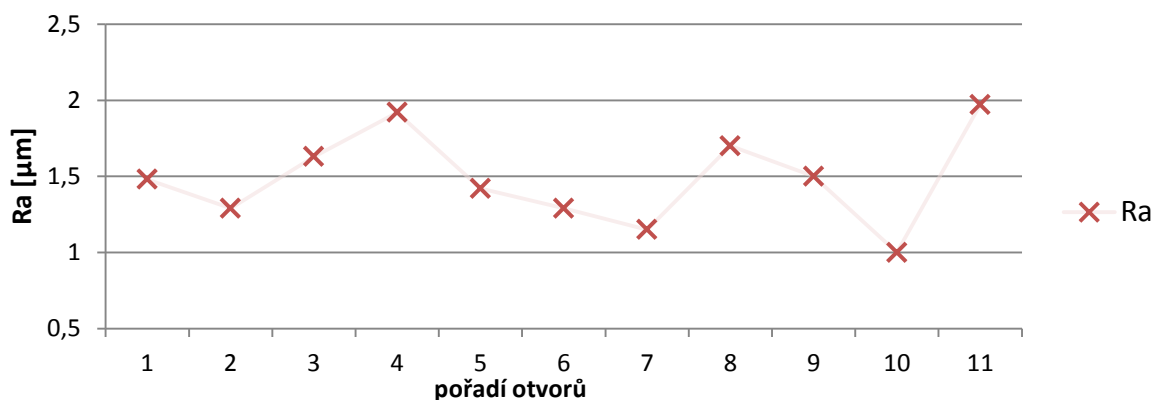
Tabulka 14: Parametry drsnosti povrchu vedlejšího hřbetu vrtáku před a po opotřebení

### 3.2.2 povrchu

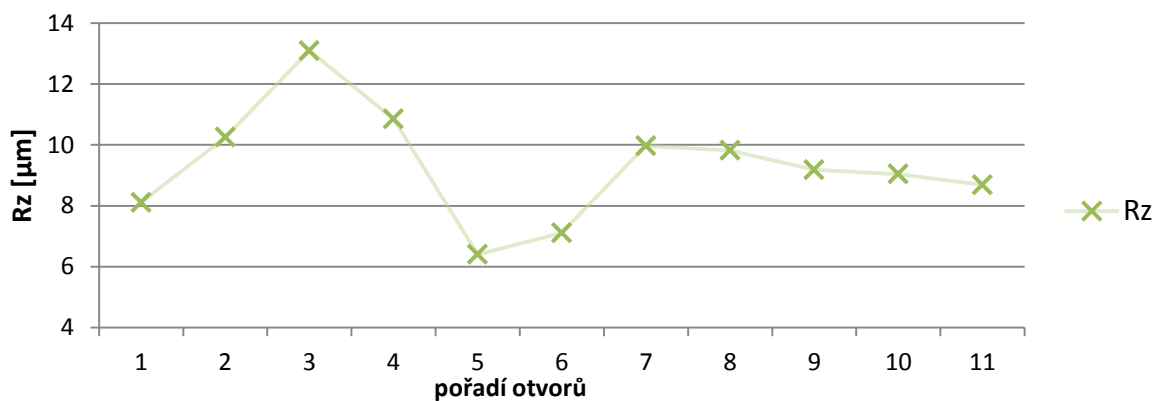
Na obrázku 26 jsou zobrazeny naskenované povrchy vnitřního povrchu otvorů v barevné škále odpovídající výšce povrchu, z kterých jsou určeny vybrané parametry drsnosti uvedené v tabulce 15 a zobrazené na grafech 4, 5 a 6.

| pořadí                | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     | 11     |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| označení              | IN-S-1 | IN-S-2 | IN-S-3 | IN-S-4 | IN-X-1 | IN-X-2 | IN-X-3 | IN-X-4 | IN-Z-1 | IN-Z-2 | IN-Z-3 |
| Ra [ $\mu\text{m}$ ]  | 1,48   | 1,29   | 1,63   | 1,92   | 1,42   | 1,29   | 1,15   | 1,70   | 1,50   | 1,00   | 1,97   |
| Rz [ $\mu\text{m}$ ]  | 8,11   | 10,25  | 13,09  | 10,85  | 6,40   | 7,11   | 9,97   | 9,82   | 9,18   | 9,04   | 8,69   |
| RSm [ $\mu\text{m}$ ] | 141,2  | 169,7  | 189,1  | 185,6  | 138,3  | 169,7  | 242,8  | 136,2  | 143,0  | 199,1  | 247,1  |

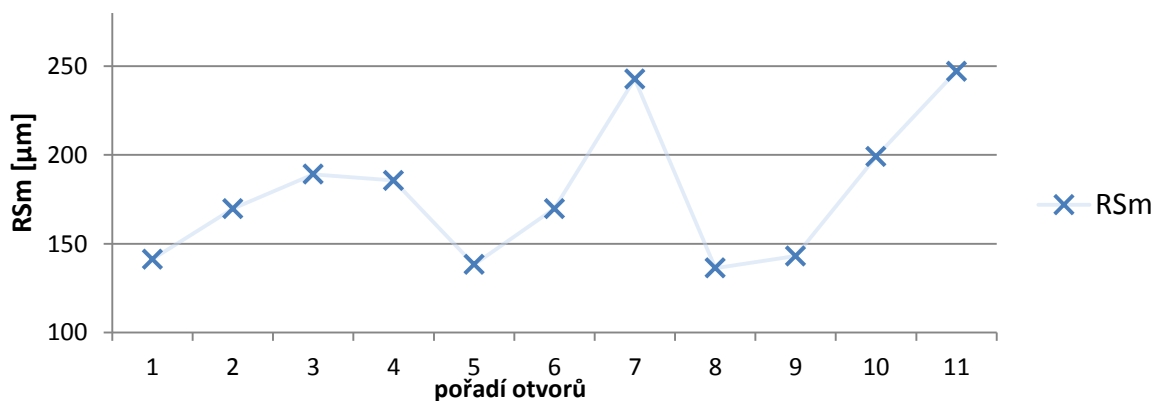
Tabulka 15: Vybrané parametry drsnosti povrchu otvorů



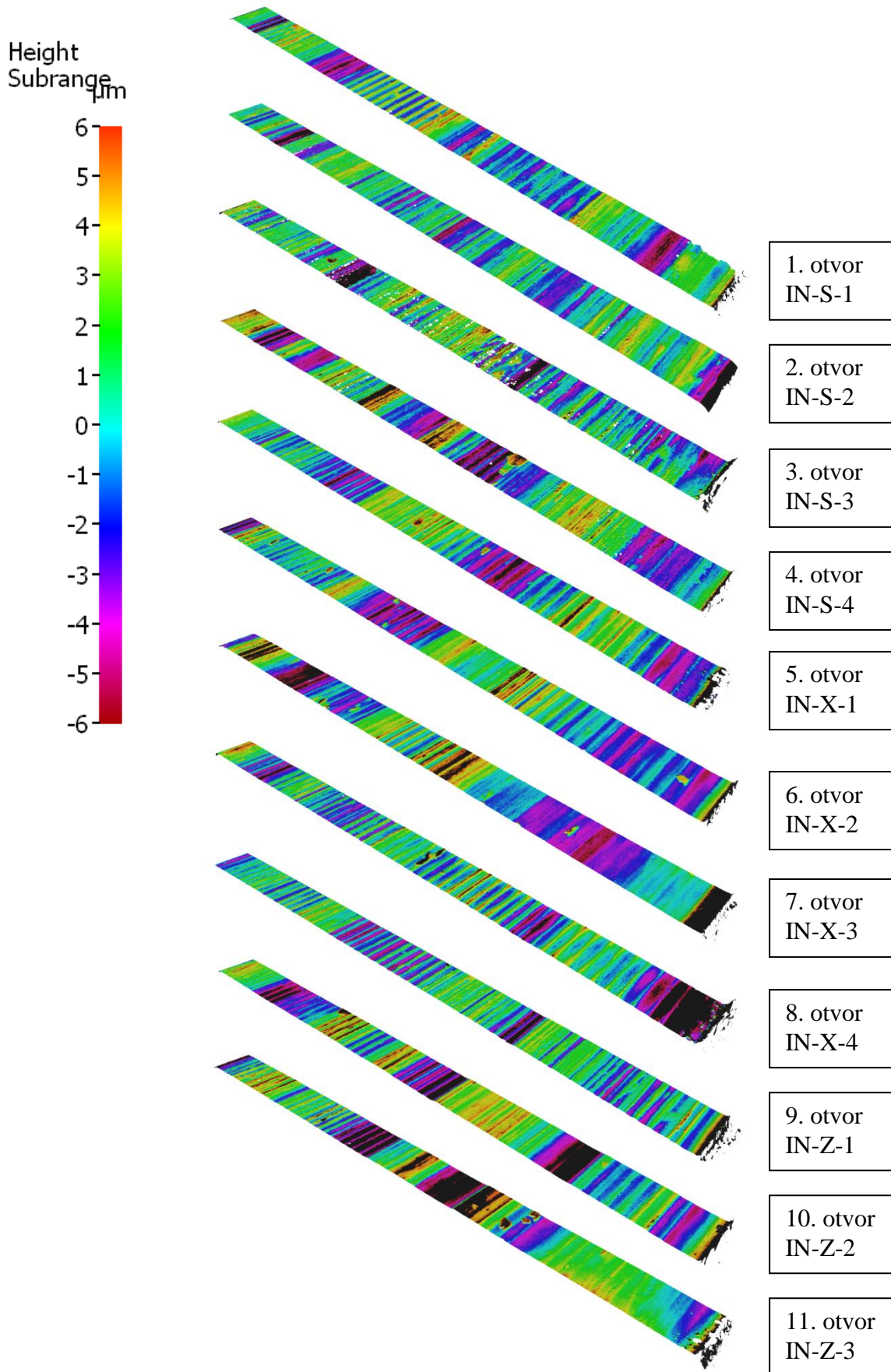
Graf 4: Parametr drsnosti Ra



Graf 5: Parametr drsnosti Rz



Graf 6: Parametr drsnosti RSm



Obrázek 26: Nasnímaná mikrogeometrie povrchu otvorů

### Dílčí závěr:

Textura povrchu otvorů je orientována ve směru hlavního pohybu nástroje. Z naměřených dat je patrná závislost parametrů drsnosti na opotřebení pouze u prvních 4 otvorů, u dalších otvorů může hrát roly nárůstek (zvláště pokud by byl nestabilní) nebo typ základního materiálu. Parametry drsnosti vzorků z tištěného Inconelu 718 nevykazují žádný trend. Pro vzorky z konvenční slitiny Inconelu 718 (první 4 otvory) lze říct, že spolu s opotřebením nástroje se zhoršují parametry drsnosti obráběného povrchu. Průměrné hodnoty sledovaných parametrů drsnosti jsou  $Ra = (1,5 \pm 0,3) \mu\text{m}$ ,  $Rz = (9,3 \pm 1,7) \mu\text{m}$  a  $RSm = (178 \pm 38) \mu\text{m}$ .

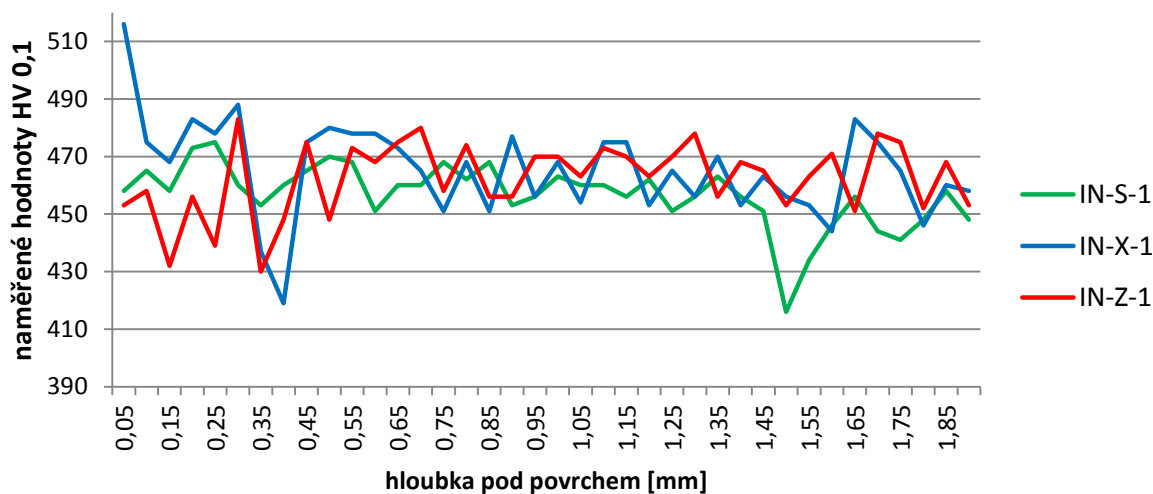
### 3.2.3 Distribuce mikrotvrdosti

K měření mikrotvrdosti byla použita metoda kolmého řezu, která není příliš vhodná pro měření průběhu mikrotvrdosti v povrchové vrstvě. V naměřených datech (tabulka 16 a graf 7) není pozorovatelná žádná oblast zpevnění a to z důvodu, že tloušťka ovlivněné vrstvy je menší než hloubka prvního měřeného bodu. Z tohoto pohledu je zajímavý první měřený bod v hloubce 50  $\mu\text{m}$  na vzorku IN-X-1, kde byla naměřena výrazně vyšší hodnota mikrotvrdosti než je průměrná hodnota tohoto zorku včetně započtení směrodatné odchylky. Bez opakování měření ve stejné hloubce na více místech daného vzorku nelze rozhodnout, zda se jedná o náhodnou nehomogenitu nebo je zde zachycen vliv zpevněné vrstvy.

Pro měření mikrotvrdosti byly použity metalografické výbrusy z příčných řezů. Vzorek s otisky po měření je na obrázku 27. Princip metody šikmého řezu je zobrazen na obrázku 28, kde se hloubka měřeného bodu vypočte podle vztahu  $h = l \cdot \text{tg}(\alpha)$ . Je zřejmé, že plochý vzorek se pod úhlem  $\alpha$  brousí snadno. Pokud chceme měřit průběh mikrotvrdosti povrchové vrstvy na vnitřním průměru metodou šikmého řezu, musí být vzorek před broušením pod úhlem  $\alpha$  ještě upravován. Jedno z možných řešení je zobrazeno na obrázku 29. Praktické provedení této metody měření může být obtížné z důvodu přesného určení vrchlíku.

| hloubka [mm] |        | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 |
|--------------|--------|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| HV 0,1       | IN-S-1 | 458  | 465 | 458  | 473 | 475  | 460 | 453  | 460 | 465  | 470 |
|              | IN-X-1 | 516  | 475 | 468  | 483 | 478  | 488 | 437  | 419 | 475  | 480 |
|              | IN-Z-1 | 453  | 458 | 432  | 456 | 439  | 483 | 430  | 448 | 475  | 448 |

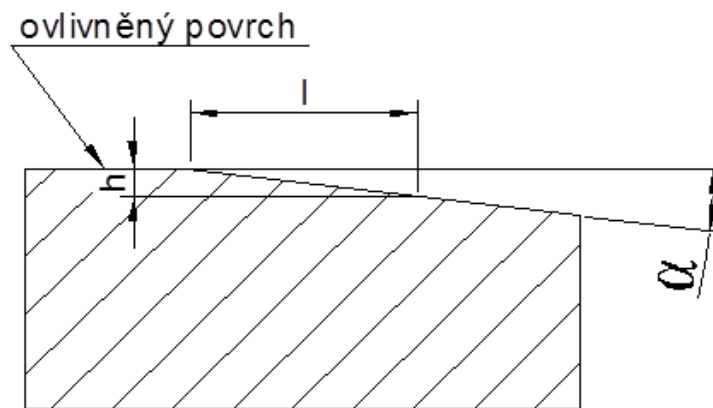
Tabulka 16: Naměřené hodnoty mikrotvrdosti v uvedené hloubce pod povrchem do 0,5 mm



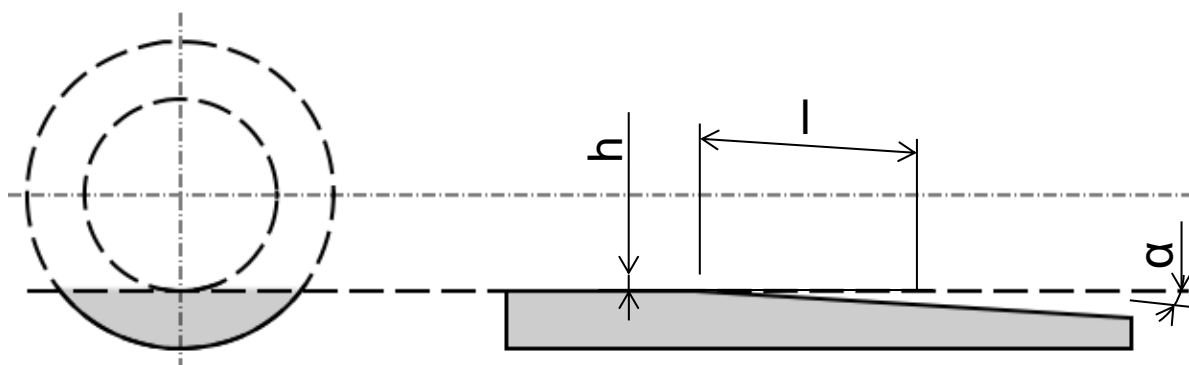
Graf 7: Průběh mikrotvrdosti HV 0,1 od vnitřního k vnějšímu povrchu měřených vzorků



Obrázek 27: Snímek metalografického výbrusu s vtisky po měření mikrotvrdosti HV 0,1



Obrázek 28: Příprava vzorku pro měření distribuce mikrotvrdosti dle Vickerse v povrchové vrstvě



Obrázek 29: Schéma modifikace měření mikrotvrdosti metodou šikmého řezu – seříznutí vrchlíku v rovině normály vnitřního průměru, sbroušení vzorku o úhel  $\alpha$

### Dílčí závěr:

Při měření mikrotvrdosti na příčném řezu vzorků nebyl pozorován vliv zpevnění povrchové vrstvy a to z důvodu, že měřením nebyla tato oblast pokryta. Na celém měřeném úseku nebyl zjištěn žádný trend, pouze běžné kolísání hodnot. Mezi vzorky nebyl prakticky žádný rozdíl hodnot:  $457 \pm 11$  HV 0,1 pro vzorek IN-S-1,  $465 \pm 16$  HV 0,1 pro vzorek IN-X-1 a  $462 \pm 13$  HV 0,1 pro vzorek IN-Z-1.

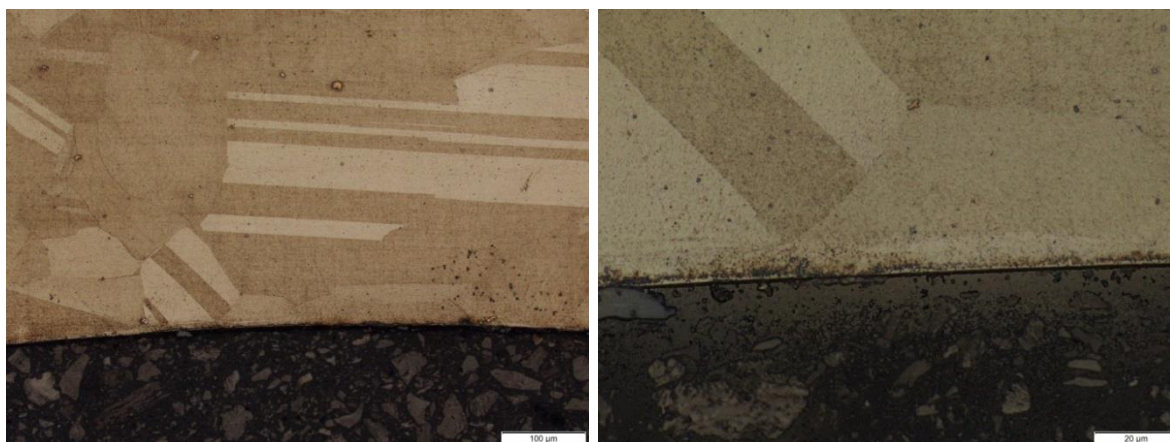
### 3.2.4 Mikrostruktura povrchové vrstvy

Pozorováním optickou mikroskopií byla zjištěna charakteristika mikrostruktury jednotlivých vzorků. Tloušťka povrchové vrstvy ovlivněné obráběním byla odečítána ze snímků se zvětšením 1000x vizuálním hodnocením. Pro každý výbrus bylo změřeno 10 hodnot, největší a nejmenší hodnota byla vyloučena a byl určen aritmetický průměr se směrodatnou odchylkou. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 17.

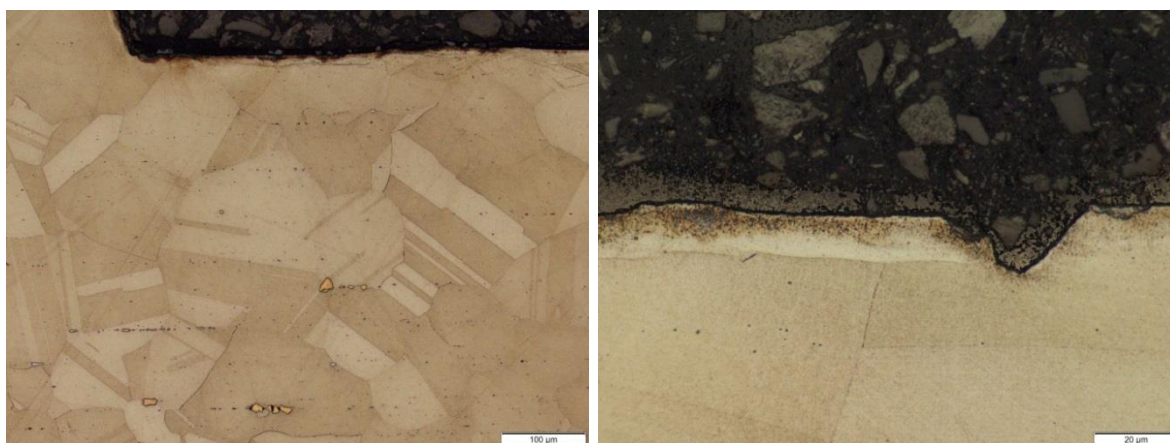
Mikrostruktura vzorku IN-S-1 z konvenčního Inconelu 718 je stejná na příčném (obrázek 30) i na podélném (obrázek 31) řezu a je tvořena zrny tuhého roztoku, která jsou oproti vzorkům z tisknutého materiálu větší a mají pravidelnější tvar, na rozdíl od nich také mikrostruktura obsahuje velké množství dvojčatových pásů a ostrohranné částice Ti a daleko menší a méně ostré částice Nb. Vzorek IN-X-1 (obrázek 32 a 33) tisknutý „na výšku“ s vrstvami nanášenými ve směru osy X vykazuje protažení zrn na příčném i podélném řezu. V případě, že by byl podélný řez proveden v rovině YZ, protažení zrn by nebylo patrné. Vzorek IN-Z-1 (obrázek 34 a 35) tisknutý „na ležato“ s vrstvami nanášenými ve směru osy Z vykazuje protažení zrn pouze na podélném řezu. V případě tištěného materiálu ve všech orientacích je daleko patrnější leptání hranic zrn, než je tomu u konvenčního.

| [mm]           | IN-S-1 | IN-X-1 | IN-Z-1 | Ø   |
|----------------|--------|--------|--------|-----|
| t              | 8,0    | 7,2    | 7,0    | 7,4 |
| $\Delta\sigma$ | 2,5    | 1,9    | 1,7    | 2,1 |

Tabulka 17: Tloušťka povrchové vrstvy  $t$  a její směrodatná odchylka  $\Delta\sigma$  určená pro jednotlivé vzorky

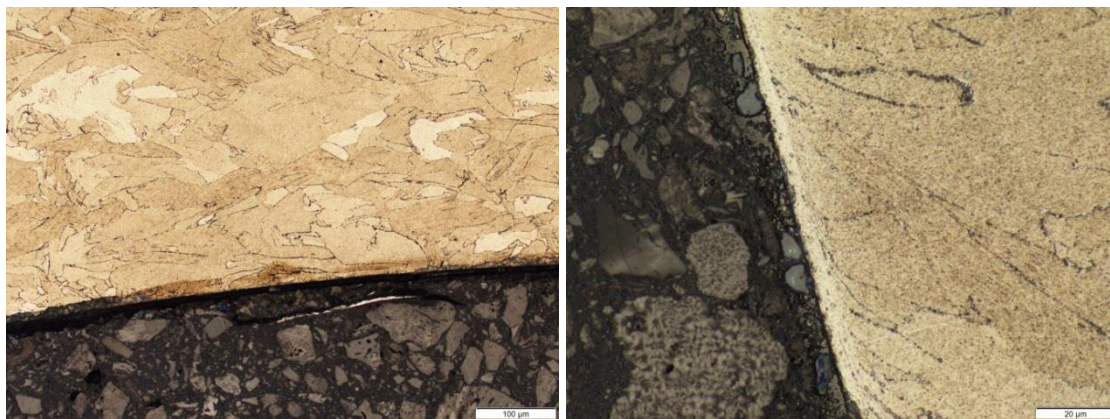


Obrázek 30: IN-S-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x

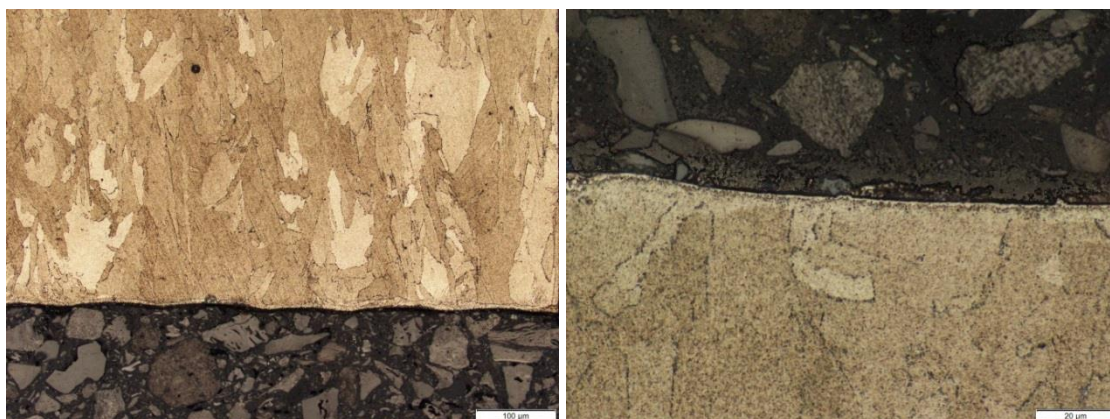


Obrázek 31: IN-S-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x

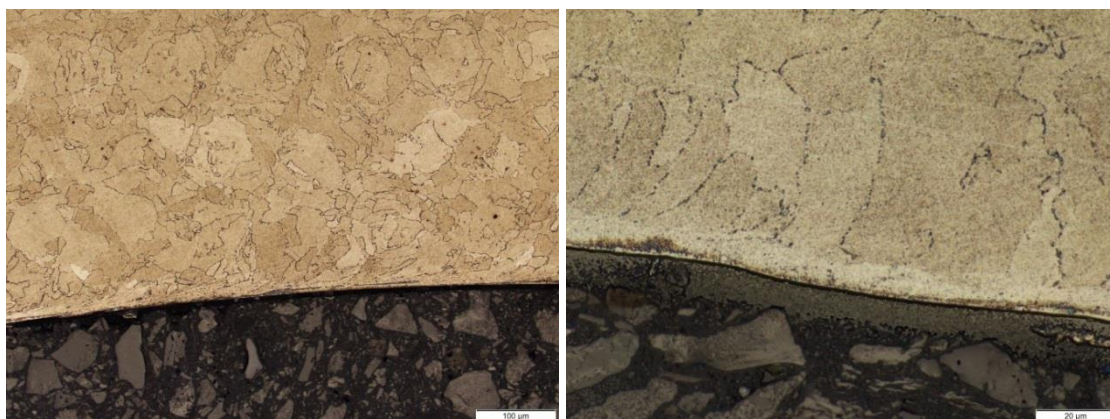




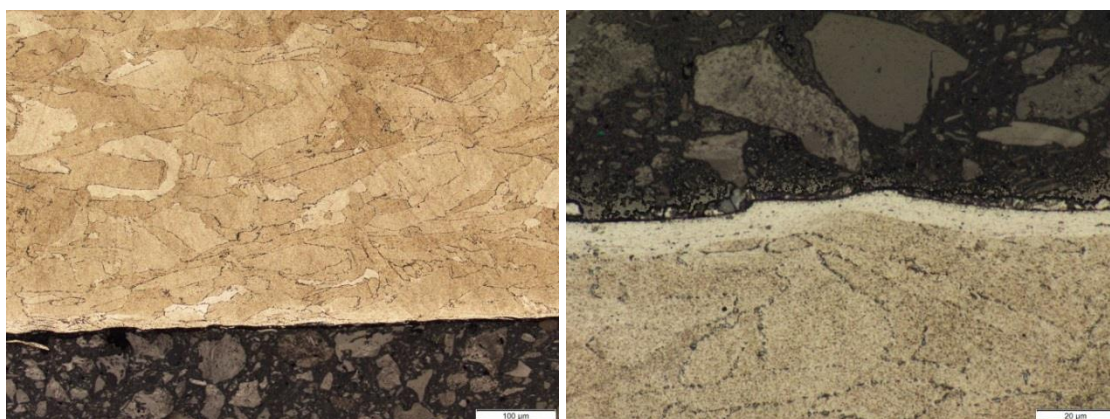
Obrázek 32: IN-X-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x



Obrázek 33: IN-X-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x



Obrázek 34: IN-Z-1 – příčný řez, zvětšení 200x a 1000x



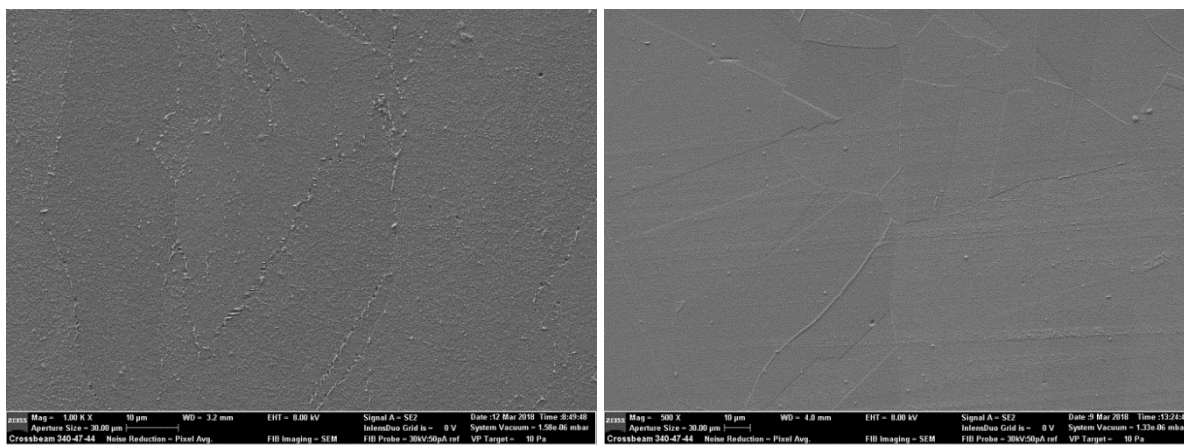
Obrázek 35: IN-Z-1 – podélný řez, zvětšení 200x a 1000x

## Dílčí závěr:

Výchozí mikrostruktura materiálu nemá vliv na tloušťku ani mikrostrukturu povrchové vrstvy. Naměřená tloušťka povrchové vrstvy byla v rámci běžné nerovnoměrnosti u všech analyzovaných vzorků obdobná a její hodnota byla stanovena jako  $t = (7 \pm 2) \mu\text{m}$ .

### 3.2.5 Analýza SEM a EDS

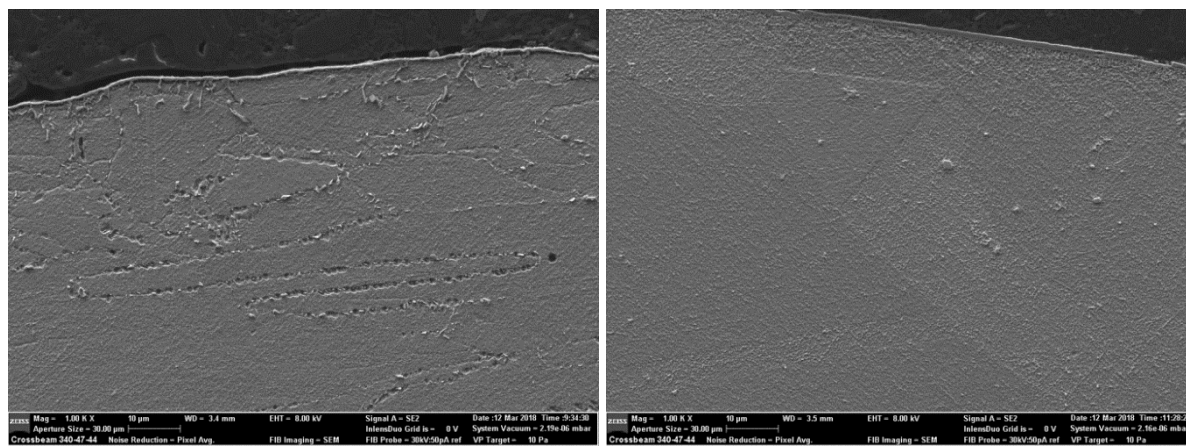
Analýza vzorků na rastrovacím elektronovém mikroskopu proběhla se zvětšením 500x, 1000x, 3000x, 5000x za využití sekundárních elektronů a při zvětšení 10000x bylo měřeno v režimu InlensDuo, kdy je využit signál z předního i zadního detektoru. Byl pozorován rozdíl mezi základním materiálem tisknutého a konvenčního Inconelu 718. Primární zrna konvenčního materiálu jsou více hladká a hranice zrn tvoří ostré tenké přechody (obrázek 36 a 37 vpravo). Naproti tomu tištěný materiál je tvořen primárními zrny s buněčnou substrukturou, jejich povrch je více zvrásněný a po hranicích primárních zrn jsou jehlicovité částice přecházející až do tenkých filmů (obrázek 37 a 38 vlevo). Dle literatury tyto útvary mohou být tvořeny fázemi  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  nebo Lavesovými fázemi [50] [51]. Navzdory rozdílům základního materiálu jsou povrchové vrstvy tištěného a konvenčního materiálu vytvořené obráběním velmi podobné (obrázek 38 a 39). Tvoří jej světlé rozhraní s okolím, pod ním mohutnější jednolitá tmavá vrstva, která je od základního materiálu ještě oddělena přechodovou vrstvou drobných struktur. V případě tištěného materiálu jehlicovité útvary zasahují až do svrchní části povrchové vrstvy.



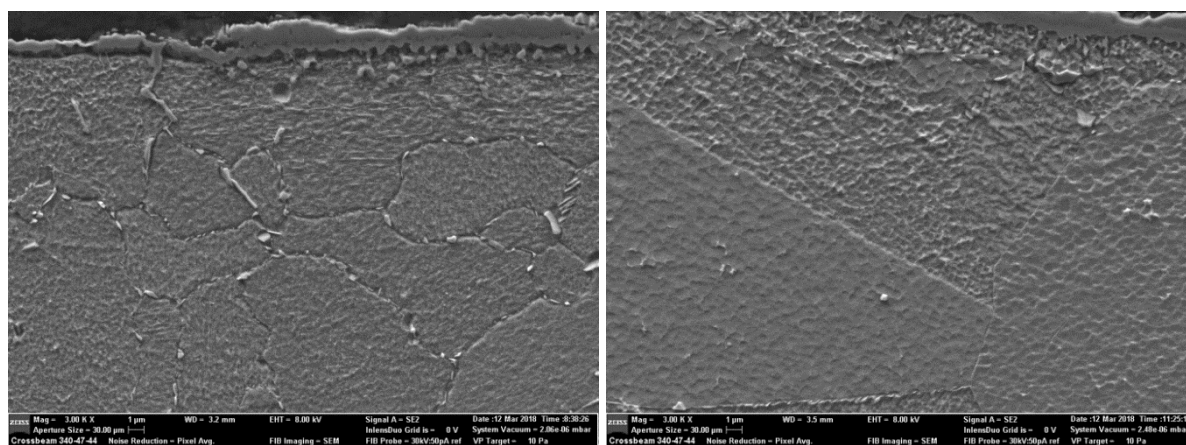
Obrázek 36: Oblast základního materiálu; vlevo: příčný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 1000x; vpravo: příčný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 500x



Obrázek 37: Detailní pohled na jehlicovité útvary; vlevo: podélný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 10 000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 10 000x



Obrázek 38: Oblast základního materiálu s oblastí povrchové vrstvy; vlevo: podélný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 1000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 1000x



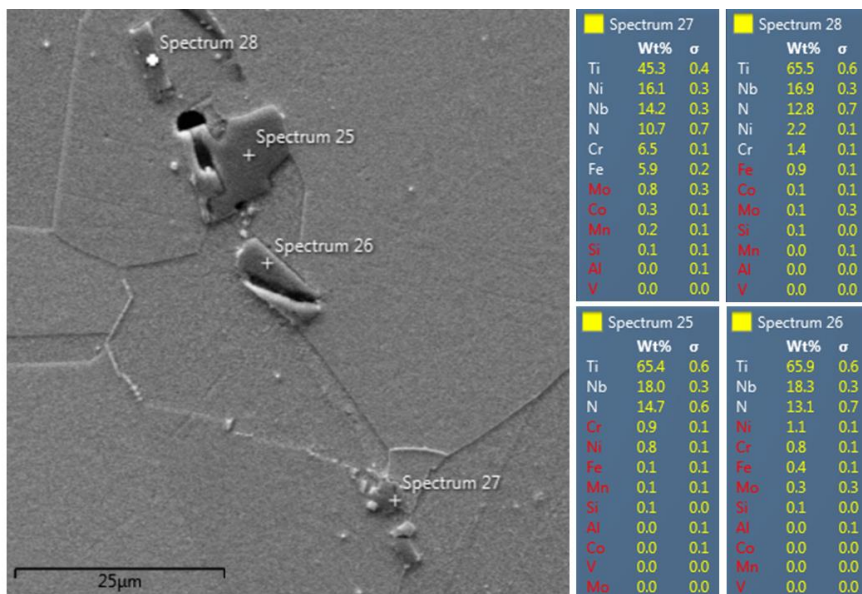
Obrázek 39: Detailní pohled na oblast povrchové vrstvy; vlevo: příčný řez vzorku IN-X-1, zvětšení 3000x; vpravo: podélný řez vzorku IN-S-1, zvětšení 3000x

Bodovou analýzou EDS bylo zjištěno chemické složení ostrohranných struktur konvenčního materiálu slitiny Inconel 718 pozorovaných optickou mikroskopií (např. obrázek 38 vlevo) uvnitř primárních zrn i na jejich hranicích. Naměřená spektra jsou uvedena na obrázku 40 – oproti základní matici je zde zvýšený obsah zejména titanu, méně zvýšený obsah niobu a vyskytuje se zde dusík.

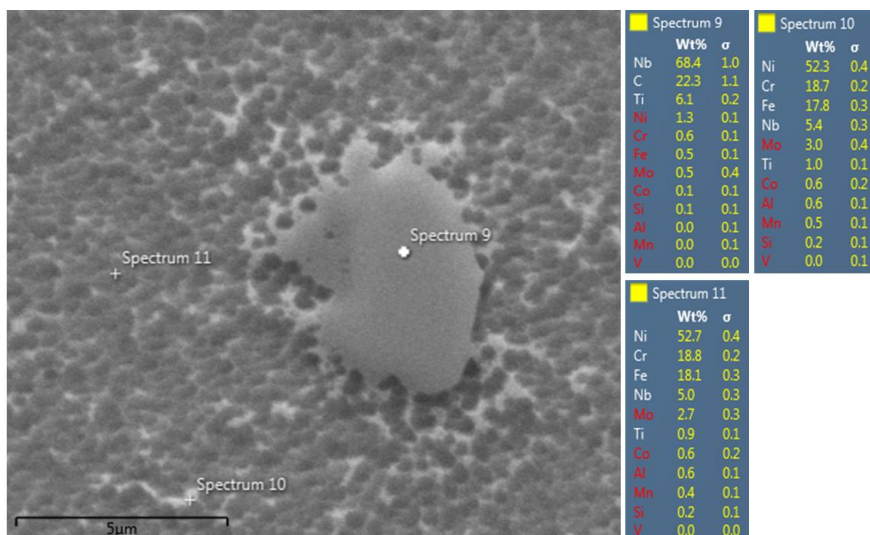
Rozměrově podstatně menší útvary v základním materiálu konvenčního Inconelu 718 viditelné na elektronové mikroskopii (např. obrázek 38 vpravo) byly také podrobeny bodové chemické analýze. Naměřená spektra jsou na obrázku 41 – oproti základní matici je zde zvýšený obsah především niobu, méně zvýšený obsah titanu a vyskytuje se zde uhlík. Oproti titanovým částicím v předchozím případě jsou tyto niobové částice tvarově nepravidelné útvary.

Bodová chemická analýza EDS útvarů v základním materiálu konvenčního Inconelu 718, které jsou na elektronové mikroskopii viditelné jako bílé tečky (např. obrázek 39 vpravo) je zobrazena na obrázku 42. Jsou to útvary s výrazně vyšším obsahem niobu a titanu na úkor chromu a niklu.

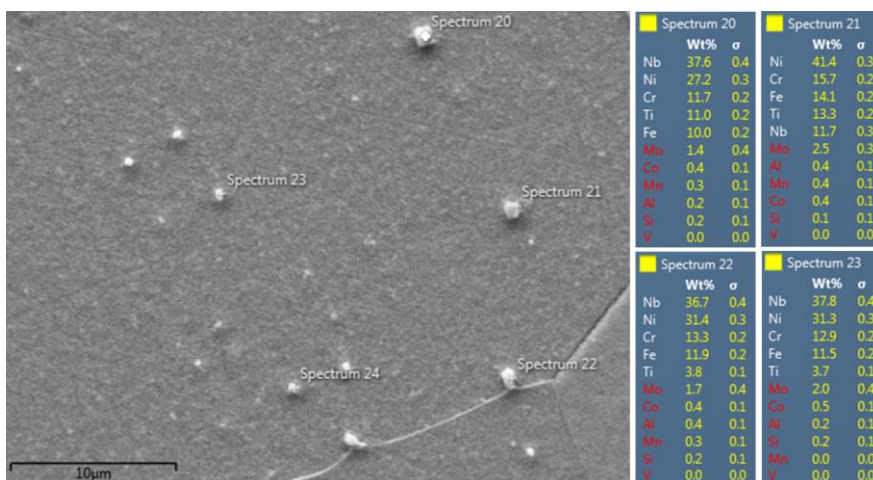
Jehlicovité útvary přecházející do tenkých filmů (potencionálně fáze  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  nebo Lavesova fáze) a její bodová chemická analýza EDS je na obrázku 43. Oproti matici je zde menší obsah chromu a vyšší obsah niobu a železa, místy je zde obsažen i kyslík a hliník.



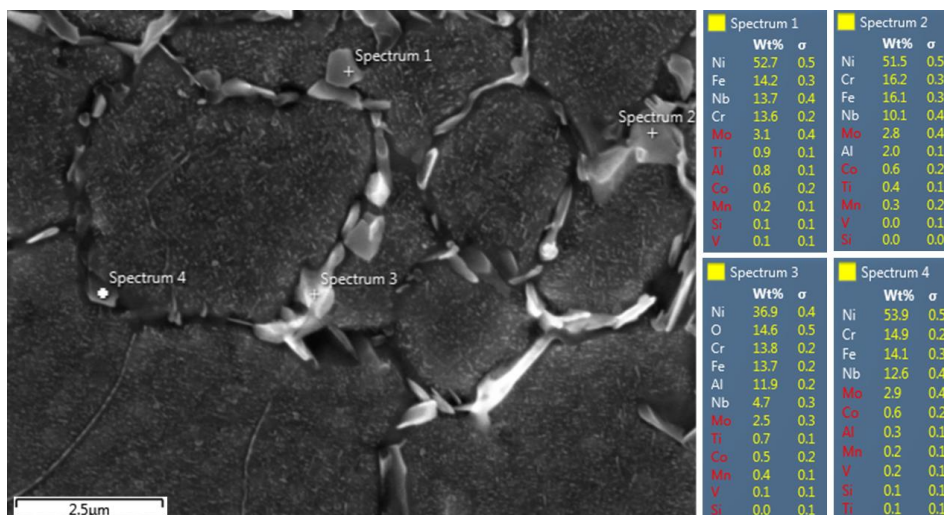
Obrázek 40: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení ostrohraných částic na podélném řezu vzorku IN-S-1, částice Ti



Obrázek 41: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení drobných nepravidelných útvarů na podélném řezu vzorku IN-S-1, částice Nb



Obrázek 42: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení „bíléh teček“ na příčném řezu vzorku IN-S-1



Obrázek 43: Bodová spektrální analýza EDS chemického složení jehlicovitých útvarů na podélném řezu vzorku IN-X-1

### Dílčí závěr:

Povrchová vrstva je tvořena třemi podvrstvami – svrchní slupkou, střední mohutnější jednodílnou vrstvou a spodní přechodovou oblastí s členitou sub-strukturou. Mohutnost jednotlivých podvrstev stejně jako povrchové vrstvy jako celku je nepravidelná, čemuž odpovídá i směrodatná odchylka její tloušťky zjištěné optickou mikroskopií.

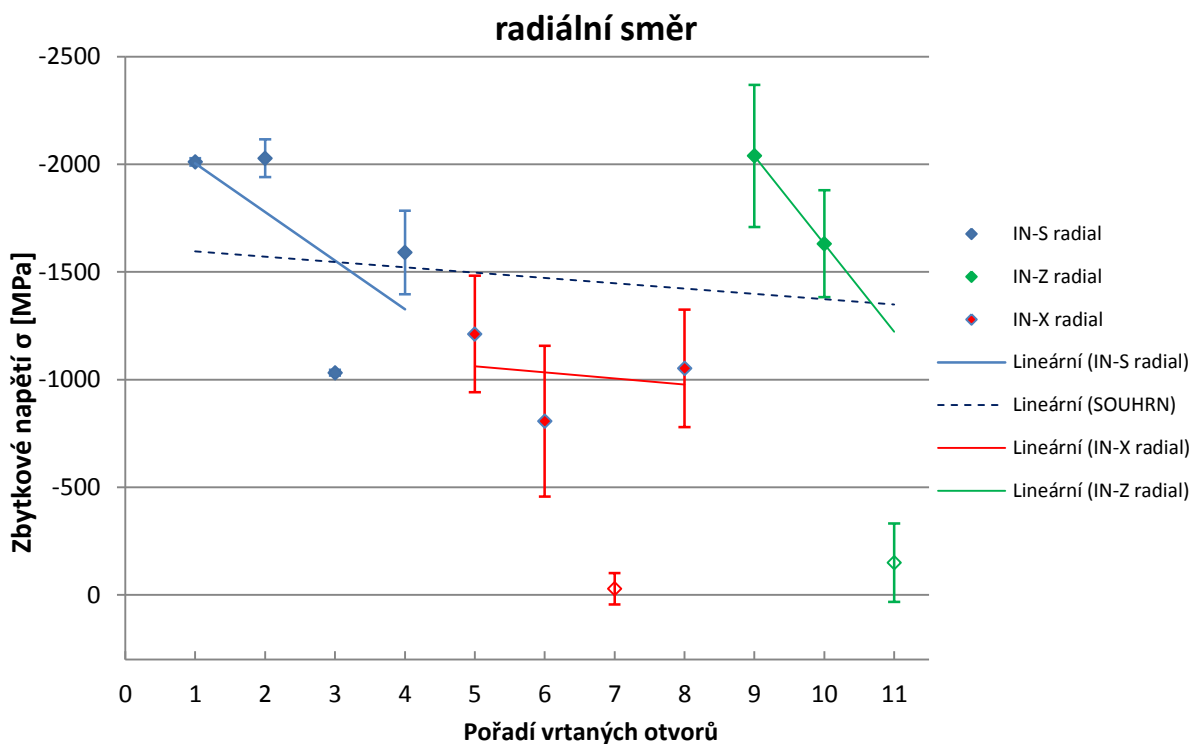
V základním materiálu konvenčního Inconelu 718 se vyskytují ostrohranné útvary uvnitř i na hranicích primárních s chemickou dominancí titanu, dále menší a nepravidelné útvary s vysokým obsahem niobu a „bíle tečky“ s vyšším podílem titanu a niobu a nižším obsahem chromu a niklu oproti základní matici. Pro tištěný materiál jsou zásadní jehlicovité útvary přecházející do tenkých filmů na hranicích primárních zrn. Tyto útvary jsou potenciálně identifikovány jako  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  nebo Lavesovy fáze. Primární zrna mají vnitřní jemnější sub-strukturou, která je v případě tištěného Inconelu 718 výraznější a nepravidelnější.

### 3.2.6 Měření zbytkových napětí

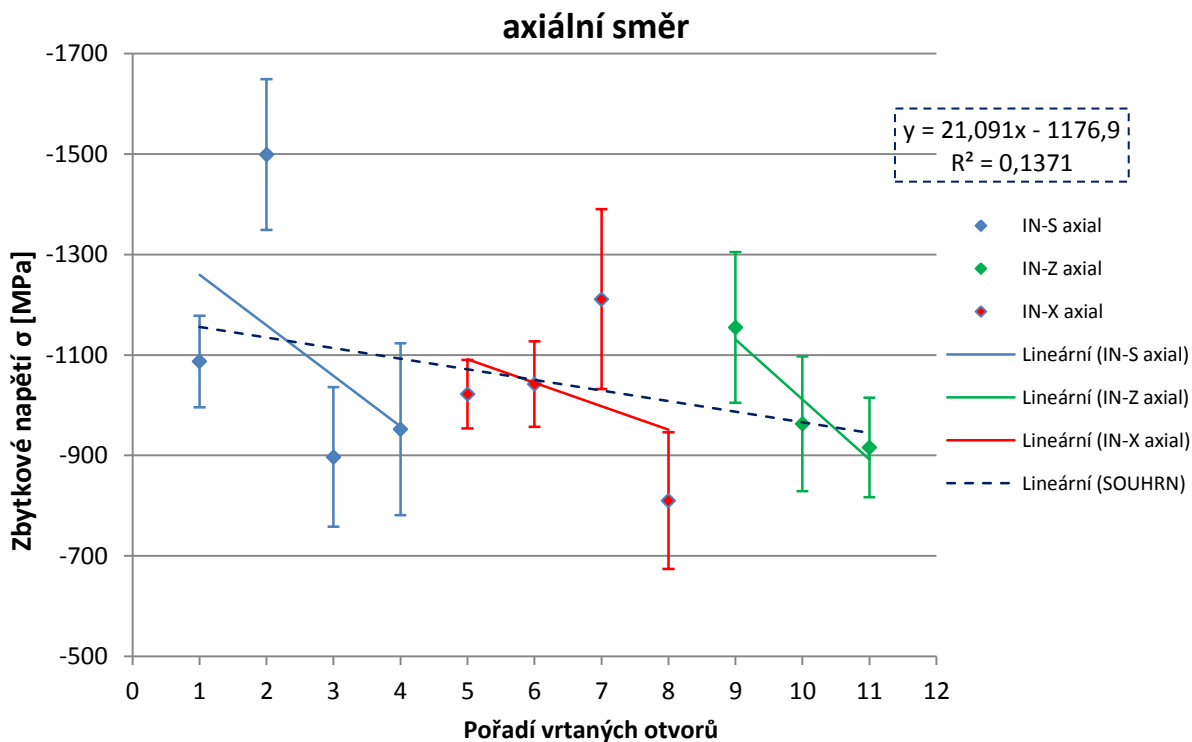
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 18 a zobrazeny v grafech 8 a 9. Hodnoty naměřené v radiálním směru vykazují o něco vyšší chybu měření než ve směru axiálním. Je to z důvodu použití menšího počtu úhlů náklonu kvůli geometrii vzorku.

| $\sigma \pm \Delta\sigma$<br>[Mpa] | axiální směr |                | radiální směr |                |     |
|------------------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------|-----|
|                                    | $\sigma$     | $\Delta\sigma$ | $\sigma$      | $\Delta\sigma$ |     |
| IN-S                               | 1            | -1087          | 91            | -2011          | 17  |
|                                    | 2            | -1499          | 150           | -2028          | 88  |
|                                    | 3            | -897           | 139           | -1032          | 13  |
|                                    | 4            | -952           | 171           | -1591          | 194 |
| IN-X                               | 5            | -1022          | 68            | -1212          | 271 |
|                                    | 6            | -1042          | 85            | -807           | 350 |
|                                    | 7            | -1211          | 179           | -29            | 73  |
|                                    | 8            | -810           | 136           | -1052          | 273 |
| IN-Z                               | 9            | -1155          | 150           | -2039          | 330 |
|                                    | 10           | -963           | 134           | -1631          | 248 |
|                                    | 11           | -916           | 99            | -150           | 182 |

Tabulka 18: Naměřené hodnoty zbytkových napětí vzorků rentgenovou difrakcí metodou  $\sin^2\Psi$



Graf 8: Naměřené hodnoty zbytkových napětí v radiálním směru a jejich trend - pro jednotlivé materiály i souhrnný



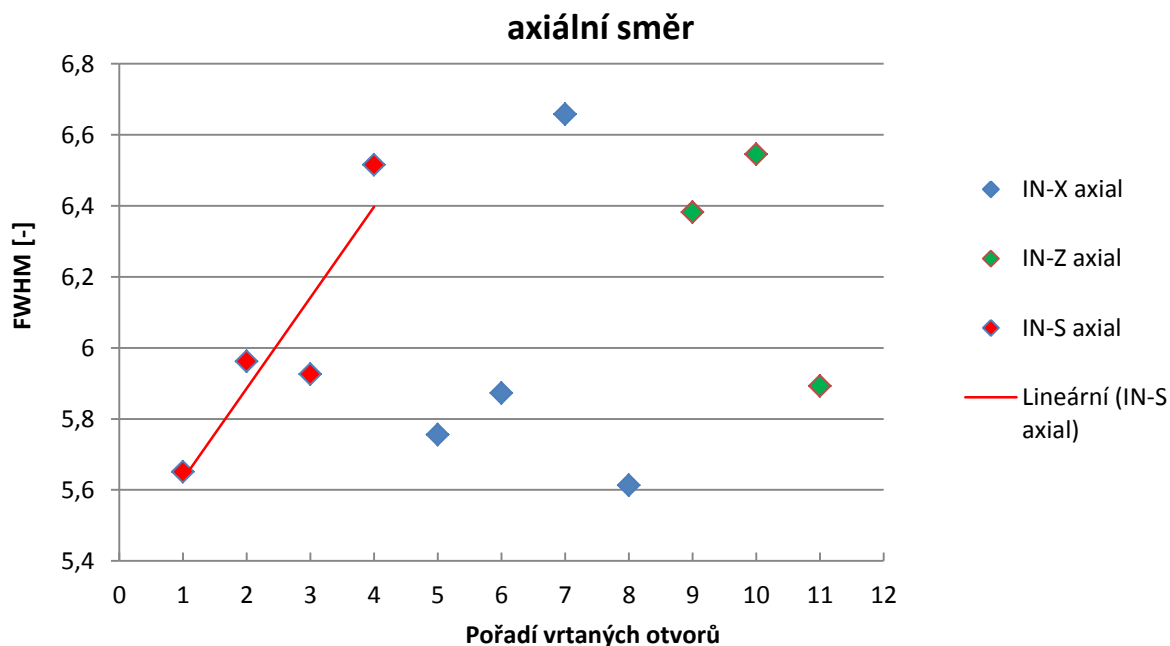
Graf 9: Naměřené hodnoty zbytkových napětí v radiálním směru a jejich trend - pro jednotlivé materiály i souhrnný

Pro sedmý a jedenáctý otvor jsou naměřené hodnoty zbytkových napětí velmi výrazně mimo rozsah ostatních hodnot, proto jsou sice v grafu 8 naznačeny, ale při zpracování dat (výpočet průměrné hodnoty zbytkových napětí a proložení spojnicí trendu) nejsou uvažovány. Pravděpodobně se jednalo o lokální nehomogenitu povrchové vrstvy (viditelná např. na obrázku 31). Za účelem kvantifikace zbytkového napětí v povrchové vrstvě nemá smysl tyto nehomogenity uvažovat. Z komplexního pohledu na integritu povrchu je však nutné brát v potaz, že i takovéto lokální nerovnoměrnosti v povrchové vrstvě existují.

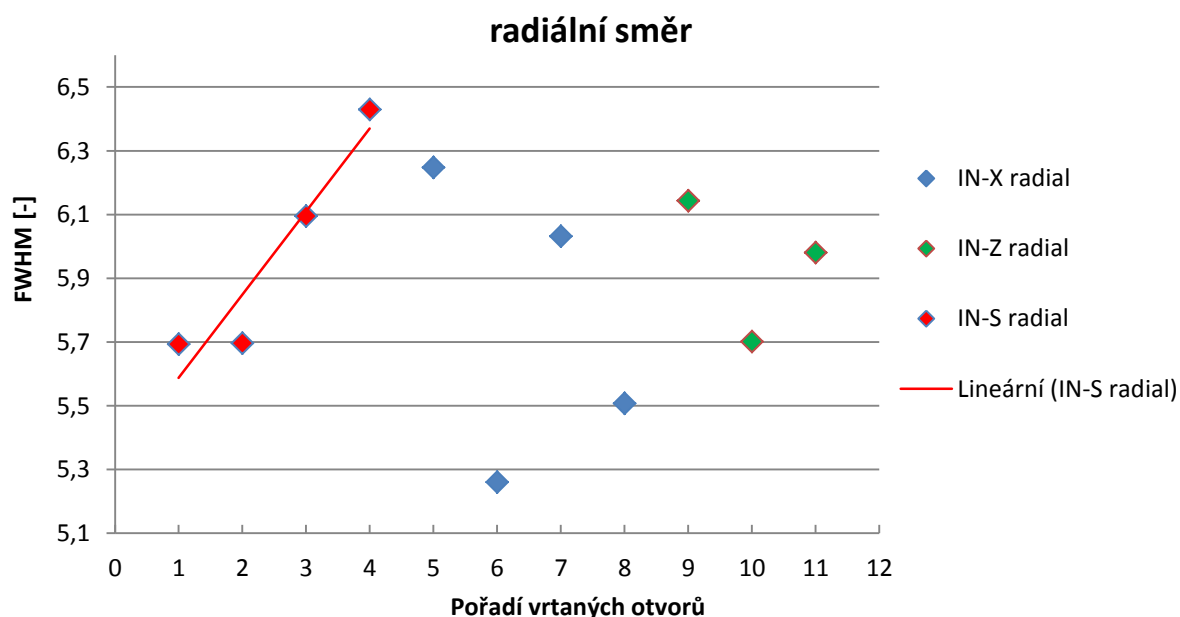
Metodou nejmenších čtverců byly naměřenými daty proloženy přímkou spojnice trendu (graf 8 a 9), a to jak pro jednotlivé materiály vzorků, tak i přes všechny naměřené hodnoty. Sledovat trend pouze pro jednotlivé materiály není ze statistického hlediska vhodné, protože se jedná o malý soubor dat. Přesto je zajímavé, že všechny 3 skupiny vzorků vykazují samostatně sestupný trend. Dle výsledků měření drsnosti, určování tloušťky povrchové vrstvy optickou mikroskopií i zkoumání mikrostruktury povrchové vrstvy rastrovacím elektronovým mikroskopem nemá výchozí materiál významný vliv na vlastnosti obráběním vytvořené povrchové vrstvy. Směrnice celkového trendu je v případě zbytkových napětí v radiálním i axiálním směru rostoucí (resp. sestupná z pohledu tlakového napětí). Závislost na pořadí otvorů lze také chápat jako závislost na celkové vyvrtné hloubce. Každý otvor má hloubku válcové části 6 mm. Zkoumaná povrchová vrstva je vytvářena vedlejším ostřím vrtáku, z toho důvodu by množství přerušení řezu nemělo mít významný vliv.

Průměrná hodnota zbytkového napětí analyzovaných vzorků je v axiálním směru  $\sigma_a = (-1050 \pm 138)$  MPa a ve směru radiálním je  $\sigma_r = (-1489 \pm 220)$  MPa. Jedná se o vysoké tlakové napětí, což je pro vlastnosti povrchové vrstvy pozitivní. Ve směru hlavního řezného pohybu nástroje bylo zjištěno vyšší tlakové napětí, což je v souladu s literaturou [49]. V kapitole 3.1.4 je uvedeno, že naměřené zbytkové napětí obsahuje objem daný ozařovanou plochou (cca  $0,5 \text{ mm}^2$ ) a hloubkou vniku záření (cca 3 až  $4,5 \mu\text{m}$ ). Měření neposkytuje informaci o hloubkovém profilu distribuce zbytkových napětí v povrchové vrstvě. Za tím účelem se jeví jako nejperspektivnější kombinace rentgenové difrakce a postupného elektrochemického odleptávání povrchu v místě měření.

Bylo využito dat získaných z měření radiografickou tenzometrií metodou  $\sin^2\Psi$ , pro určení veličiny FWHM, která odpovídá relativní míře plastické deformace v povrchové vrstvě. Závislost veličiny FWHM na pořadí otvorů je zobrazena v grafech 10 a 11. Jednoznačný trend lze vysledovat pouze u prvních 4 otvorů, tedy u vzorků z konvenční slitiny Inconelu 718. U ostatních vzorků zřejmě převážil vliv nárůstku, který výrazně mění geometrii nástroje, ale vlivem nestability nárůstku je geometrie nástroje tudíž i vliv na míru plastické deformace také nestabilní.



Graf 10: Veličina FWHM odpovídající míře plastické deformace v závislosti na pořadí otvorů – axiální směr měření



Graf 11: Veličina FWHM odpovídající míře plastické deformace v závislosti na pořadí otvorů – radiální směr měření

### Dílčí závěr:

Bylo zjištěno vysoké tlakové napětí v povrchové vrstvě a to  $\sigma_a = (-1050 \pm 138)$  MPa v axiálním a  $\sigma_r = (-1489 \pm 220)$  MPa radiálním směru. Naměřené hodnoty vykazují nevýrazný sestupný trend v závislosti na pořadí otvoru. Pro určení hloubkového profilu zbytkových napětí je možné využít kombinaci metody rentgenové difrakce a postupného elektrochemického odleptávání. Pro první 4 otvory (vzorky z konvenční slitiny Inconel 718) lze říci, že spolu s opotřebením břitu roste míra plastické deformace. U ostatních otvorů zřejmě převýšil vliv nestabilního nárůstu.



## 4. Diskuze získaných výsledků

Mikrogeometrie povrchu byla vyhodnocována pomocí optického mikroskopu s malou hloubkou ostrosti Alicona IFM G4. Metodou „Focus Variation“ získané skeny povrchu mohou být v přirozených barvách nebo v barevné škále dle výšky bodů. Tento způsob analýzy sledávám velmi vhodný jak pro měření parametrů drsnosti obrobeného povrchu, tak pro vyhodnocování opotřebení nástroje. Vnitřní povrch otvoru je utvářen především vnější špičkou, vedlejším ostřím a fazetkou vrtáku. Opotřebení vrtáku bylo analyzováno pouze po 4. otvoru, k analýze opotřebení po posledním otvoru bohužel nedošlo, protože při vrtání posledního otvoru se vrták rozpadl a nebylo možné jej analyzovat. Po 4 otvoru bylo patrné opotřebení vedlejšího hřbetu a vedlejšího ostří otěrem. Zároveň byly pozorovány dva vzniklé nárůstky. Bez sledování vývoje stavu vrtáku nelze říci, zda šlo o nestabilní nárůstek, ale na základě výsledků měření pro 5 až 11 otvor usuzují, že se opravdu jednalo o nestabilní nárůstek, protože naměřené parametry drsnosti a hodnoty veličiny FWHM totiž naznačují jistou nestabilitu řezného procesu. K destrukci vrtáku došlo v důsledku vyštípnutí části hlavního ostří. Pro další obdobné experimenty lze doporučit, aby byly vrtány hlubší otvory a opotřebení analyzováno po každém otvoru.

Mikrotvrdość byla změřena metodou kolmého řezu, podařilo se tak určit průběh mikrotvrdości napříč stěnou vzorku, který je v rámci běžných odchylek konstantní. Nepodařilo se zachytit průběh mikrotvrdości ve zpevněné povrchové vrstvě, protože ta zasahuje do menší tloušťky, než byla vzdálenost mezi obrobeným povrchem a prvním bodem měření mikrotvrdości. Tento problém je standardně u rovinných povrchů řešen metodou šikmého řezu, kdy je ovlivněný povrch zbroušen pod malým úhlem a na tomto zkosení je měřen hloubkový profil mikrotvrdości. Tato metoda nelze jednoduše aplikovat v případě, že ovlivněným povrchem je vnitřní průměr. V práci byla navržena možná modifikace metody šikmého řezu pro měření i v experimentu použitých vzorků. Přesto pro další experimenty lze doporučit použití vzorků čtvercového průřezu namísto válcových vzorků, za účelem zjednodušení broušení ovlivněného povrchu pod úhlem.

Studiem mikrostruktury optickou mikroskopií byla určena tloušťka povrchové vrstvy, která vykazuje nerovnoměrnost u všech analyzovaných vzorků. Byly pozorovány lokální přerušení a nehomogenity povrchové vrstvy, které mohou mít významný vliv na integritu obrobeného povrchu. Pro jejich studium je potřebné větší množství vzorků a za využití např. naskenované mikrogeometrie daného místa určit možné příčiny jejich vzniku během obrábění. Povrchová vrstva vykazuje stejné charakteristiky bez ohledu na to, o který materiál vzorku se jedná, nebo jak jsou vůči ní orientovaná protažená primární zrna. To bylo potvrzeno i na řádkovacím elektronovém mikroskopu. Tím bylo navíc identifikováno vnitřní vrstvení povrchové oblasti na svrchní tenkou vrstvu, střední mohutnější jednolitou vrstvu a spodní přechodovou vrstvu s ještě jemnější buněčnou substrukturou. V základním materiálu byly identifikovány specifické útvary, z nichž z hlediska povrchové vrstvy je nejvýznamnější jehlicovitá struktura přecházející do tenkých filmů. Dle literatury se může jednat o  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  nebo Lavesovy fáze [50]. Za využití EDS analýzy bylo určeno i chemické složení těchto struktur. Důležité je, že tyto struktury se podílí na stavbě spodní přechodové vrstvy. Při provádění obdobného experimentu lze doporučit se příště více zaměřit právě na mikrostrukturu povrchové vrstvy. SEM a EDS analýza v této práci přinesla množství informací o základním materiálu vzorků, ale podstatně méně o povrchové vrstvě.

Zpevňování povrchové vrstvy při obrábění Inconelu 718 je jeho dobře známá vlastnost. V souladu s tím bylo zjištěno vysoké tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Toto tlakové napětí zlepšuje užité vlastnosti povrchu, zejména únavovou odolnost. Nicméně

zjištěná hodnota nevypovídá o hloubkovém průběhu distribuce zbytkových napětí. Z celé řady dostupných metod na určování zbytkových napětí z nich se pro tento případ vzhledem ke geometrii vzorků nejvíce hodí kombinace použité rentgenové difrakce a elektro chemické leptání.

Pro vzorky z konvenční slitiny Inconelu 718 je znám výchozí i konečný stav bříty vrtáku. Pro tyto 4 první otvory je patrná závislost drsnosti obrobeného povrchu a mírou plastické deformace na opotřebení nástroje. Lze říci, že spolu s opotřebením nástroje se zhoršuje drsnost obrobeného povrchu a roste míra plastické deformace v povrchové vrstvě. Pro ostatní otvory tuto závislost nelze vysledovat zřejmě z důvodu tvorby nestabilního nárůstu. Z hodnot zbytkových napětí lze vysledovat celkový sestupný trend pro všechny vzorky bez ohledu na jejich materiál. Je tedy možné říci, že spolu s rostoucím opotřebením nástroje roste hodnota zbytkového napětí v povrchové vrstvě. Při analýze optickou mikroskopií a EDS nebyl pozorován žádný vliv základního materiálu na mikrostrukturu povrchové vrstvy. Doporučením pro obdobné experimenty je vždy pro obrábění jednotlivých materiálů používat nový nástroj a obrábět daný materiál až do konce trvanlivosti nástroje.

## 5. Závěr

Teoretická část této práce obsahuje, v první řadě popis niklové slitiny Inconel 718. Tato slitina je použita v experimentální části jako materiál pro vzorky a to ve formě konvenčně dodávaného a tištěného polotovaru. Teoretická část se dále věnuje integritě povrchové vrstvy a více se zabývá parametry analyzovanými v praktické části práce a metodami jejich měření.

Experimentální část se věnuje zjišťování parametrů integrity povrchu otvorů do slitiny Inconel 718, které byly provedeny jedním nástrojem za stejných řezných podmínek. Měl být sledován stav opotřebení nástroje a dán do souvislosti s integritou obráběného povrchu. To se podařilo provést pouze částečně, protože před závěrečnou analýzou nástroje došlo k jeho celkové destrukci během vrtání posledního vzorku.

Prvním z měřených parametrů integrity povrchu byla mikrogeometrie. Byla zjištěna závislost drsnosti obrobeného povrchu na pořadí otvoru (resp. opotřebení nástroje) a to pro vzorky z konvenční slitiny Inconel 718, u ostatních vzorků jsou výsledky ovlivněny pravděpodobně tvorbou nestabilního nárůstku. Spolu s rostoucím opotřebením nástroje se drsnost obrobeného povrchu zhoršuje. Jako charakteristické byly vybrány parametry a jejich průměrné hodnoty jsou  $Ra = (1,5 \pm 0,3) \mu\text{m}$ ,  $Rz = (9,3 \pm 1,7) \mu\text{m}$  a  $RSm = (180 \pm 40) \mu\text{m}$ . Na snímcích z opticko-skenovacího mikroskopu je patrná orientace textury povrchu ve směru hlavního řezného pohybu, tedy po spirále.

Měřením mikrotvrdomosti se nepodařilo zachytit vliv zpevněné vrstvy, protože ta zasahovala do menší hloubky, než byla vzdálenost prvního bodu měření mikrotvrdomosti od obrobeného povrchu. Byla navržena modifikovaná metoda šikmého řezu, která by mohla tento problém vyřešit. Hodnota mikrotvrdomosti napříč vzorky byla v rámci běžného kolísání téměř konstantní a pro všechny materiály shodná. Průměrná hodnota mikrotvrdomosti je  $(461 \pm 13) \text{HV } 0,1$ .

Pozorováním povrchové vrstvy optickou mikroskopií byla určena její tloušťka. Tloušťka povrchové vrstvy byla poměrně značně nerovnoměrná a lokálně byla úplně přerušena nehomogenitou nebo vrubem. Byly pozorovány a popsány rozdíly mezi mikrostrukturou jednotlivých základních materiálů vzorků, ty však na tloušťku povrchové vrstvy neměly vliv. Průměrná tloušťka povrchové vrstvy byla naměřena jako  $t = (7 \pm 2) \mu\text{m}$ .

Řádkovací elektronová mikroskopie kombinovaná s rentgenovou spektrometrií odhalila vnitřní členění povrchové vrstvy. Tvoří jej tři jednotlivé podvrstvy: vrchní tenká slupka, střední jednolitá mohutnější vrstva a spodní přechodová oblast, na jejíž mikrostrukturu se podílí  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  nebo Lavesovy fáze. Byly pozorovány a popsány rozdíly v mikrostrukturu konvenčního a tištěného materiálu, za pomoci bodové EDS analýzy určeno chemické složení specifických struktur.

Pátým velmi významným měřením bylo určení zbytkových napětí metodou rentgenové difrakce. Ve směru hlavního řezného pohybu, tedy ve směru radiálním z pohledu otvoru, bylo naměřené zbytkové napětí  $\sigma_r = (-1489 \pm 220) \text{MPa}$  tedy výrazně větší než ve směru axiálním  $\sigma_a = (-1050 \pm 138) \text{MPa}$ . Takto vysoké tlakové napětí značně zlepšuje užité vlastnosti povrchu. Naměřená hodnota pochází z velmi malého objemu přibližně 3-4  $\mu\text{m}$  pod povrchem. Pro určení hloubkového profilu zbytkových napětí je navržena kombinace metody rentgenové difrakce a postupného elektro chemického odleptávání měřené části povrchu. Radiografická tenzometrii umožnila také analýzu míry plastické deformace v povrchové vrstvě prostřednictvím veličiny FWHM. Pro vzorky z konvenční slitiny Inconel 718 je patrné, že čím větší opotřebení nástroje, tím větší míra plastické deformace. Pro ostatní vzorky tuto závislost

potvrdit nelze, obdobně jako u měření drsnosti povrchu je zde pravděpodobně vliv tvorby nestabilního nárůstu.

Vzorky byly podrobně zanalyzovány z pohledu integrity povrchu. Nebylo prokázáno, že by na integritu povrchu mělo vliv, zda se jedná o tištěný nebo konvenční Inconel 718. Bylo formulováno několik doporučení, jak lépe zkoumat integritu povrchu vnitřního povrchu otvorů a to modifikovaná metoda šikmého řezu pro měření mikrotvrdosti. Doporučením pro další studium vlivu opotřebení nástroje na vlastnosti povrchové vrstvy je pro jednotlivé materiály polotovaru používat nový nástroj a obrábět jím až do konce jeho trvanlivosti.

## 6. Seznam použité literatury

- [1] EISELSTEIN H. L. a D. J. TILLACK. *He invention and definition of alloy 625*. Inco Alloys International, Inc. Edited by E. A. Loria, The Minerals, Metals & Materials Society 1991. Dostupné z: [http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys\\_1991\\_1\\_14.pdf](http://www.tms.org/superalloys/10.7449/1991/Superalloys_1991_1_14.pdf)
- [2] OĞUZ ÇOLAK. *Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions*. Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, Dostupné z: [http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07\\_2012\\_730\\_Colak\\_02.pdf](http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07_2012_730_Colak_02.pdf)
- [3] Special Metals Corporation, *High-Performance Alloys for Resistance to Aqueous Corrosion* [online]. [cit. 2018-07-03] Dostupný z: [http://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Parr\\_Inconel-Incoloy-Monel-Nickel-Corrosion-Info.pdf](http://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Parr_Inconel-Incoloy-Monel-Nickel-Corrosion-Info.pdf)
- [4] JANOVEC, J.; J. CEJP; STEIDL. *Perspektivní materiály*. 3 vyd., Praha : ČVUT, 2008. 143 s. ISBN 978-80-01-04167-3.
- [5] BENEŠ, V. *Nauka o materiálu II*. 2 vyd., Praha : ČVUT, 1989. 152 s.
- [6] SPECIAL METALS CORPORATION. *Technical Data Sheet: Inconel 718* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: [www.specialmetal.com](http://www.specialmetal.com)
- [7] ČESNIK, Damir, Vitoslav BRATUŠ, Borut KOSEC, Janez ROZMAN a Milan BIZJAK. Heat treatment and fine-blankin Inconel 718. *RMZ – Materials and Geoenvironment*. 2008, 2.(55), 163-172.
- [8] MANNAN, Sarwan a Brett PUCKETT. Physical Metallurgy of Alloys 718, 925, 725, and 725HS for Service in Aggressive Corrosion Environments. *CORROSION 2003*. 16-20 March, San Diego, California: NACE International.
- [9] *Rapid prototyping and manufacturing technology* [online]. 2018 [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6075759>
- [10] Evektor. *Rapid prototyping* [online]. 2018 [cit. 2018-01-12]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/rapid-prototyping.aspx>
- [11] Selective laser melting system schematic. In: *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective\\_laser\\_melting\\_system\\_schematic.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selective_laser_melting_system_schematic.jpg)
- [12] TURKER, T.; D. GODLINSKI a F. PETZOLDT. Effect of production parameters on the properties of IN 718 superalloy by three-dimensional printing. *Materials characterization*. Fraunhofer, 2008, 12(59), 1728-1735. ISSN 1044-5803.
- [13] KOČMAN, K., PROKOP, J.: *Technologie obrábění*. Brno. Akademické nakladatelství. CERM, 2005. ISBN 80-214-3068-0
- [14] Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant Handbook* [online]. c2018 [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/>
- [15] OĞUZ ÇOLAK. *Investigation on Machining Performance of Inconel 718 under High Pressure Cooling Conditions*. Journal of Mechanical Engineering 58(2012)11, Dostupné z: [http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07\\_2012\\_730\\_Colak\\_02.pdf](http://www.sv-jme.eu/data/upload/2012/11/07_2012_730_Colak_02.pdf)
- [16] MÁDL, J.; KAFKA, J.; VRABEC, M.; DVOŘÁK, R.: *Technologie obrábění. 1. díl*, Praha: ČVUT, 2000
- [17] NECKÁŘ, F., KVASNÍČKA, I.: *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha: ČVUT, 1991

- [18] Y.C. Chen, Y.S. Liao. *Study on wear mechanism in drilling of Inconel 718 superalloy*. Journal of Materials Processing Technology. 2003, 140, stránky 269-273.
- [19] SHARMAN A.R.C., A. Amarasinghe, K. Ridgway; *Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718*. Sheffield : Univeristy of Sheffield, 2008, Journal Of Materials Processing Technology , Sv. 1-3, stránky 424-432.
- [20] KARÁSEK, J. *Přednáška z předmětu metrologie a montáž*. Technická univerzita v Liberci [online]. [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: [http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM\\_MM\\_PR\\_10\\_CZE\\_Karasek\\_Geometricke\\_vlastnosti\\_povrchu.pdf](http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_MM_PR_10_CZE_Karasek_Geometricke_vlastnosti_povrchu.pdf)
- [21] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [22] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [23] TURKOVICH, B. F. – FIELD, M. Survey on materialbehaviour in machining. *Analys of the CIRP*, 1981, vol. 30, no. 2, p. 533 – 540.
- [24] BELLOWS, G. FIELD, M. KOLHS, J. B.: Influence of material and its metallurgical state on surface integrity. In *Influence of metallurgy on machinability*. Cincinnati, ASM, 1975, p. 272 – 295.
- [25] VLIV PARAMETRŮ NA TEORETICKOU A SKUTEČNOU DRSNOST POVRCHU [online]. b.r. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_13.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_13.pdf)
- [26] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: ÚNMZ, 1999.
- [27] SLANEC, K. *Konstruování: geometrická přesnost výrobků 1. a 2. díl*. 1 vyd., Praha : ČVUT, 2006. 160 s. ISBN 80-01-02864-X.
- [28] LEVICKIJ, M. J.: *Normirovanije šerechovanosti poverchnosti detalej gladkich soedinenij*. Vest. Mašinostr., 1981, no. 6, s. 3 – 6.
- [29] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [30] DAVIM, J. Paulo. *Surface integrity in machining*. London: Springer, 2009. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [31] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [32] BUMBÁLEK, Bohumil a Jaroslav PROKOP. *VYSOCE PŘESNÉ METODY OBRÁBĚNÍ*. Brno, 2010. Dostupné také z: <http://cpoint.fme.vutbr.cz/akce/kurzy/>
- [33] ALICONA IMAGING GMBH. [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.alicon.com/home/>
- [34] VORBURGER, Ted. Optical Methods of Surface Measurement. [online]. 2012 [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://www.nist.gov/oles/upload/3-Vorburger-Ted-Optical-Methods-of-Surface-Measurement-MSSFAA-10jul12.pdf>
- [35] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 2012. Praha: ÚNMZ, 2012.

- [36] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. 2006. Praha: ÚNMZ, 2006.
- [37] BUDA, J. – BÉKÉS, J. *Teoretické základy obrábění kovov.* 2. vyd., Bratislava : ALFA, 1977. 693 s.
- [38] BUDA, J. – SOUČEK, J. – VASILKO, K. *Teória obrábění*. 1. vyd., Bratislava : ALFA, 1983. 360 s.
- [39] FIALA, J. – MENTL, V. – ŠUTTA, P. *Struktura a vlastnosti materiálů*. 1. vyd., Praha : Academia, 2003. 572 s. ISBN 80-200-1223-0.
- [40] DOLEŽAL, P a B PACAL. *HODNOCENÍ MIKROTVRDOSTI STRUKTUR MATERIÁLŮ* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2018-03-04]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [41] *Vickers Hardness Test PRINCIPLE* [online]. b.r. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>
- [42] KRAUS, I. – GANEV, N. *Difrakční analýza mechanických napětí*. 1. vyd., Praha : ČVUT, 1995. 274 s. ISBN 80-01-01366-9.
- [43] YOUTSOS, A. G. *Residual stress and its effect on fracture and fatigue*. 1st ed., Netherlands : Springer 2006. 234. s. ISBN-10: 1402053282.
- [44] PREVEY, P. S.: X-ray diffraction residual stress techniques. In *ASM Metals Handbook*. 9th ed., vol. 10, 1986, p. 380-392
- [45] SOYAMA, H. – PARK J, D. – SAKA, M.: Use of cavitating jet for introducing compressive residual stress. *Journal of manufacturing science and engineering*, February 2000, vol. 122, no.1, p. 83-89.
- [46] JANGA, D. Y. et al. Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. *Wear*, June 1996, vol. 194, no. 1-2, p. 168-173.
- [47] VÁCLAVÍK, J.; BUNDA, Z.; BOHDAN, P. a WEINBERG, O.: Aplikace vybraných metod pro měření zbytkového napětí. *ND3E for Safety / Defektoskopie 2012* [online]. b.r., 2012 [cit. 2018-03-06]. ISSN 1435-4934. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/>
- [48] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 9788024825335.
- [49] KRAUS, I. – GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. 1. vyd., Praha : ČVUT, 2004. 171 s. ISBN 80-01-03099-7.
- [50] NADAMMAL, Naresh et al. Effect of hatch length on the development of microstructure, texture and residual stresses in selective laser melted superalloy Inconel 718. *Materials & Design*. 2017, (134), 139-150.
- [51] NANDWANA, Peeyush et al. Powder bed binder jet 3D printing of Inconel 718: Densification, microstructural evolution and challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2017, (21), 207-218.