

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



KVALITA POVRCHOVÉ VRSTVY:
VÝZKUM VYBRANÝCH PARAMETRŮ INTEGRITY POVRCHU
PŘI OBRÁBĚNÍ MATERIÁLŮ LETECKÉHO PRŮMYSLU

SURFACE INTEGRITY:
RESEARCH OF SELECTED SURFACE INTEGRITY PARAMETERS IN
MACHINING OF AEROSPACE MATERIALS

DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor: Ing. Zdeněk Pitrmuc
Studijní obor: Strojírenská technologie
Školící pracoviště: Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Školitel: Prof. Dr. Ing. František Holešovský
Školitel specialista: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Praha

2022

Přehled disertační práce:

Vysoká škola:	České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Téma disertační práce:	Kvalita povrchové vrstvy: Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu
Akademický rok:	2021/2022
Autor:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Školitel:	Prof. Dr. Ing. František Holešovský
Školitel specialista:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Klíčová slova:	Zbytkové napětí, Mikrotvrdost, Integrita povrchu, Titanové slitiny, Inconel, Nerezové oceli, Metalografie, Zpevňovací technologie, Shotpeening, Elektrolytické rozpouštění

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	173
Počet obrázků:	91
Počet tabulek:	28
Počet příloh:	0

Dissertation Thesis Overview:

University:	Czech Technical University in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Head of the Department:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Dissertation Thesis Theme:	Surface integrity: Research of selected surface integrity parameters in machining of aerospace materials
Academic Year:	2021/2022
Author:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Supervisor:	Prof. Dr. Ing. František Holešovský
Supervisor Specialist:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Key words:	Residual stresses, Microhardness, Surface Integrity, Titanium alloys, Inconel, Stainless Steel, Metallography, Surface strengthening technologies, Shotpeening, Electrolytic etching

Scope of Dissertation Thesis:

Number of pages:	173
Number of pictures:	91
Number of tables:	28
Number of attachments:	0

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Františka Holešovského a Ing. Vítězslava Rázka, CSc. Dále prohlašuji, že jsem použil pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 27. 5. 2022

.....

podpis

Poděkování

Tímto děkuji školiteli své disertační práce prof. Dr. Ing. Franštíšku Holešovskému, školiteli specialistovi Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. a vedoucímu ústavu Ing. Liboru Beránkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, vstřícnost a kolegiální přístup. Dále děkuji kolegovi Ing. Bedřichu Doležalovi za to, že pomohl udávat správný směr mému pracovnímu i osobnímu životu. Nezanedbatelný podíl na dokončení disertační práce má zázemí rodiny a partnerka Barbora Hruboňová. Tímto bych se jí rád omluvil za čas, který jsem jí nemohl věnovat ve významném období života. Zvláštní poděkování in memoriam patří doc. Ing. Jindřichu Kafkovi, CSc., který mi v závěru života předal mnoho technických znalostí a zkušeností. Formoval výrazně moji odbornost i životní postoje.

Anotace:

Tato disertační práce s názvem „Kvalita povrchové vrstvy: Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se zabývá komplexním hodnocením integrity povrchu materiálů používaných v letectví a dalších pokročilých odvětvích průmyslu s důrazem na analýzu zbytkových napětí. Práce podrobně popisuje vývoj mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí a její ověření prostřednictvím porovnání výsledků se standardizovanou metodou rentgenové difrakce. Metoda je dále aplikována na měření zbytkových napětí titanové slitiny, niklové slitiny a austenitické nerezové oceli po základních operacích obrábění i pokročilých technologiích dokončování povrchů. Výsledky zbytkových napětí jsou prezentovány v úzké vazbě na změny mikrostruktury a profilu mikrotvrdosti povrchu.

Klíčová slova

Zbytkové napětí, Mikrotvrdost, Integrita povrchu, Titanové slitiny, Inconel, Nerezové oceli, Metalografie, Zpevňovací technologie, Shotpeening, Elektrolytické rozpouštění

Abstract:

This dissertation thesis "Surface integrity: Research of selected surface integrity parameters in machining of aerospace materials" deals with a comprehensive assessment of the surface integrity of metal materials used in aviation and other high value manufacturing industries with an emphasis on the analysis of residual stresses. The work describes in detail the development of a mechanical method for measuring the depth profiles of residual stresses and its verification by comparing the results with a standardized X-ray diffraction method. The method is further applied to the measurement of residual stresses of titanium alloy, nickel alloy and austenitic stainless steel after basic machining operations and advanced surface finishing technologies. The results of residual stresses are presented in close relation to microstructural changes and microhardness profile of the surface.

Key words

Residual stresses, Microhardness, Surface integrity, Titanium alloys, Inconel, Stainless steel, Metallography, Surface strengthening technologies, Shotpeening, Electrolytic etching

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Jednotka	Název
R_{max}	[μm]	Maximální hloubka drsnosti
R_z	[μm]	Hloubka drsnosti
R_a	[μm]	Průměrná aritmetická hodnota drsnosti
R_{sm}	[μm]	Střední vzdálenost rýh
$R_{mr}(c)$	[μm]	Materiálový podíl profilu drsnosti
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
A	[%]	Tažnost
HV	[-]	Tvrдость dle Vickerse
HRC	[-]	Tvrдость dle Rockwella
HB	[-]	Tvrдость dle Brinella
KV	[J]	Nárazová práce
KCV	[J/cm ²]	Vrubová houževnatost
F	[N]	Síla
d	[mm]	Délka úhlopříčky vtisku
t	[s]	Čas
T, θ	[°C]	teplota
α	[K ⁻¹]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelná vodivost
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
ρ	[kg/m ³]	Hustota
σ	[MPa]	Mechanické, zbytkové napětí
ε	[-]	Poměrná deformace, deformace mřížky
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
B	[T]	Magnetická indukce
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
Θ	[°]	Difrakční (Braggův) úhel
λ	[nm]	Vlnová délka
ψ	[°]	Úhel natočení vzorku kolem osy procházející středem
$IACS$	[%]	International Annealed Cuprum Standard - měrná vodivost
U	[V]	Elektrické napětí
J	[A/dm ²]	Proudová hustota
R_R	[mm/min]	Removal rate – minutový úběr
V	[mm ³]	Objem
H	[mm]	Dosažená hloubka leptání (celková tloušťka odleptané vrstvy)
b	[mm]	Šířka vzorku
a	[mm]	Délka měřicího třmenu

φ	[°]	Úhel pootočení koncového průřezu
h	[mm]	Tloušťka vzorku
Δy_1	[mm]	Průhyb nosníku
Δy_2	[mm]	Deformace od natočení měřicího třmenu v rovině měření
Δy	[mm]	Celková měřená deformace
l	[mm]	Výška leptané plochy
I	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
Mo	[Nm]	Ohybový moment
s_σ	[MPa]	Směrodatná odchylka pro zbytkové napětí
v_σ	[%]	Variační koeficient
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
a_p	[mm]	Hloubka řezu
f_{ot}	[mm.ot ⁻¹]	Posuv při soustružení
f_z	[mm.z ⁻¹]	Posuv na zub
κ_r	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří v rovině základní
γ_o	[°]	Úhel čela v rovině ortogonální (výsledný)
γ_{oD}	[°]	Úhel čela držáku v rovině ortogonální
γ_{VBD}	[°]	Úhel čela utvařeče břitové destičky v rovině ortogonální
α_o	[°]	Úhel hřbetu v rovině ortogonální
β_o	[°]	Úhel břitu v rovině ortogonální
r_ε	[mm]	Poloměr špičky nože
FL	[mm]	Focus Level – parametr posunu fokusace vůči hladině
FIB	[-]	Focused Ion Beam – iontové odprašování povrchu
SEM	[-]	Skenovací elektronová mikroskopie
RTG	[-]	Rentgenová
XRD	[-]	X-Ray Diffraction – rentgenová difrakce
hkl	[-]	Značení mřížkových parametrů
d_{hkl}	[-]	Mezirovinná vzdálenost
$WEDM$	[-]	Wire EDM – Elektroerozivní drátové řezání
CMM	[-]	Coordinate-Measuring Machine – souřadnicový měřicí stroj
HTU, HCP	[-]	Hexagonální těsně uspořádaná mřížka
KTS, CCP	[-]	Kubická těsně uspořádaná mřížka
TZ	[-]	Tepelné zpracování
$VCÚ$	[-]	Vysokocyklová únava
R	[-]	Parametr cyklického zatížení
$LPBF$	[-]	Aditivní technologie - laserové spékání kovových prášků
LSP	[-]	Laser shock peening

OBSAH:

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1. Úvod	12
2. Integrita povrchu	13
2.1. Vymezení pojmu integrita povrchu	13
2.2. Charakteristiky a složky integrity povrchu.....	15
2.3. Zbytková napětí	22
2.4. Mechanismy a příčiny vzniku zbytkových napětí	23
2.5. Vazba zbytkových napětí a technologie	24
2.6. Vliv zbytkových napětí na statickou pevnost.....	25
2.7. Vliv zbytkových napětí na životnost	26
2.8. Metody měření zbytkových napětí	28
2.9. Inovace v měřeních zbytkových napětí v posledních 10 letech	40
2.10. Použitelnost metod pro měření lopatek z Ti6Al4V	44
3. Cíle disertační práce	48
4. Vývoj metody měření zbytkových napětí	49
4.1. Základní koncepce měřicího zařízení	49
4.2. Upínací přípravky a prodloužení	51
4.3. Software - zpracování deformačních křivek.....	52
4.4. Vývoj elektrolytického rozpouštění.....	55
4.5. Postup provedení měření	62
4.6. Výpočtové vztahy	63
4.7. Implementace CAD na neobdélníkové průřezy.....	65
4.8. Ověřování metody měření	67
4.9. Porovnání výsledků s metodou rentgenové difrakce (XRD).....	75
5. Popis dalších použitých laboratorních metod a postupů	83
5.1. Příprava metalografických vzorků.....	83
5.2. Měření mikrotvrdosti	87
5.3. Kapilární metoda	88
6. Integrita povrchu titanových slitin - Ti6Al4V	90
6.1. Titanová slitina – Ti6Al4V	90
6.2. Vliv vybraných technologií na změny integrity povrchu	92
6.3. Hodnocení integrity povrchu – slitina Ti6Al4V	100

7. Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí	111
7.1. Austenitická nerezová ocel – AISI 304	111
7.2. Návrh experimentu vlivu nástrojové geometrie při soustružení.....	112
7.3. Hodnocení integrity povrchu – nerezové oceli.....	115
7.4. Dílčí závěry.....	120
8. Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713LC	121
8.1. Inconel 713 LC	121
8.2. Návrh experimentu – ověřování hloubkového broušení.....	122
8.3. Hodnocení integrity povrchu – lopatky Inconel 713 LC	125
9. Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L	132
9.1. Nerezová ocel AISI 316L	132
9.2. Popis experimentu – ověřování mechanických vlastností.....	133
9.3. Hodnocení integrity povrchu a mechanických vlastností.....	135
10. Důsledky pro vědu	143
11. Důsledky pro průmyslovou praxi.....	144
12. Závěr	145
13. Splnění cílů práce.....	147
14. Seznam literatury.....	149
15. Publikace autora	160
15.1. Publikace přímo související s disertační prací.....	160
15.2. Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora	161
Seznam obrázků.....	167
Seznam tabulek	171
Seznam použitého software.....	173

1. Úvod

Dosažení co nejlepšího využití materiálu, maximální spolehlivosti a vysoké životnosti výrobků je podmíněno zkvalitněním konstrukčních, výpočtových i výrobních činností. Nejpokročilejší oblasti strojírenského průmyslu jako je letectví, energetika či zbrojní průmysl již delší dobu ke zvýšení užitečných parametrů svých výrobků a technologických celků zavádí nové netradiční materiály, které kromě svých nezpochybnitelných předností v konkrétní aplikaci přinášejí obvykle i komplikace na straně výrobních technologií. Na stavu povrchové vrstvy součástí se současně podílí vlivy materiálu, konstrukce i použité výrobní technologie. Povrch součástí je vysoce exponovaný po stránce provozního zatížení a zároveň tvoří rozhraní podléhající vlivům vnějšího prostředí. Proto je nutné mít dostatek poznatků také o vlivu jednotlivých technologií zejména na zbytkovou napjatost, stupeň zpevnění a strukturní stabilitu povrchu. Ideální by bylo mít takové penzum znalostí, abychom prostřednictvím volby řezných podmínek, nebo obecněji technologických parametrů dokončovacích operací, dokázali užité vlastnosti povrchu cíleně řídit.

Doktorská práce s názvem „Kvalita povrchové vrstvy: Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se komplexně zabývá integritou povrchu, popisem a hodnocením jejich jednotlivých složek. Detailní pozornost je věnována zbytkovým napětím v povrchové vrstvě, jakožto složce předurčující rozměrovou stálost a dynamickou životnost za provozu. Základní prostředek k jejich systematickému výzkumu představuje vývoj a optimalizace mechanické metody experimentálního měření hloubkových průběhů zbytkových napětí. Metoda pracuje na principu měření uvolněné deformace po elektrolytickém rozpouštění povrchové vrstvy v definované oblasti. V konečné podobě metoda umožňuje velmi rychlé a nenákladné stanovení průběhů zbytkových napětí. Na rozdíl od ostatních metod probíhá měření celého průběhu kontinuálně na jedno upnutí, navíc bez silového a tepelného účinku při úběru materiálu.

Druhá polovina doktorské práce je věnována ověřování vyvinuté metody, jejímu porovnání s nejčastěji používanou metodou rentgenové difrakční tenzometrie a aplikaci metody na pokročilé materiály využívané primárně v letectví a energetice – titanovou slitinou Ti6Al4V, Inconel 713LC a nerezovou ocel AISI 304. Analyzované povrchy byly cíleně zpracovány technologiemi, se kterými se lze nebo pravděpodobně bude možné setkat právě v pokročilých odvětvích průmyslu. Výsledky typických průběhů zbytkových napětí pro jednotlivé technologie jsou v práci doplněny o vyhodnocení dalších složek integrity povrchu a navazují na publikační činnost autora v oblasti kvality povrchové vrstvy a dokončovacích technologií.

2. Integrita povrchu

2.1. Vymezení pojmu integrita povrchu

Povrchová vrstva je nejexponovanějším místem součástí. Tvoří hranici mezi materiálem a prostředím a jako taková je podrobena chemickým a elektrochemickým korozním pochodům. V ohybu a krutu je maximální napětí v krajních vláknech. Při kontaktním zatížení, tribologických aplikacích je taktéž namáhán povrch.

Potřeba hlubšího studia vlastností povrchu a povrchových vrstev řady technických materiálů, zejména kovových, vyvolala vznik nových oblastí materiálového inženýrství označovaných jako „povrchové inženýrství (surface engineering)“. Pro komplex charakteristik povrchu a povrchových vrstev se užívá v odborné literatuře pojem „integrita povrchu (surface integrity)“. Tento výraz nepatří přesně definované fyzikální nebo technologické veličině, ale je to více méně volný soubor takových vlastností povrchu a povrchové vrstvy, které jsou vytvořeny nebo ovlivněny technologickými procesy a u kterých se současně očekává vliv na funkční vlastnosti součástí. [1]

Kvalita povrchové vrstvy hraje výraznou roli u součástí dynamicky namáhaných a u součástí, které jsou ve vzájemném kontaktu, případně i pohybu. V leteckém, kosmickém a vojenském průmyslu je spolehlivost a tedy i životnost klíčová. Konstruktor by měl vždy brát v úvahu možnosti výroby komponent a v maximální míře konzultovat s technologií a materiálovými inženýry dosažitelné stavy povrchové vrstvy konkrétních technologií. Na základě reálných, nejlépe experimentem dokázaných parametrech součástí lze provádět nová dimenzování součástí dříve, než si to vyžádají selhání v provozu. Bohužel v průmyslové praxi je velice často vazba mezi designem, materiálovými vlastnostmi a použitou výrobní technologií ignorována. Zvyšování spolehlivosti se děje předimenzováním průřezů, nebo náhradou materiálů. Tak, či onak se nejedná o řešení ideální. Na jedné straně dochází k neefektivnímu zvyšování hmotnosti, plýtvání vstupním materiálem, na straně druhé dochází zpravidla k růstu nákladů. Vhodná povrchová úprava v nejnamáhanějších místech je další z prostředků zvýšení provozní spolehlivosti. [2]

Obrábění a tváření výrazně působí na povrchovou vrstvu komponent. Zároveň lze prostřednictvím parametrů těchto procesů kvalitu povrchové vrstvy řídit. Silové a tepelné působení některých technologií vede ke změně vlastností a struktur materiálu. Shodný požadovaný vzhled, rozměrovou přesnost, drsnost součástí lze docílit více technologiemi a více


soubory podmínek v rámci jedné technologie. To ovšem ještě neznamená, že mají všechny tyto součásti shodné užité vlastnosti.

Přehled vlivů a možných účinků na povrchovou vrstvu uvádí Tab. 2.1 vypracovaná již v roce 1970 v GE Aircraft Engine Group Cincinnati. Konstruktor či technolog na základě tohoto výčtu určí účinky podstatné pro funkci a spolehlivost součásti. Vybrané účinky je třeba sledovat a individuálně jim přiřadit vhodné způsoby kontroly u vývojových, ověřovacích i sériových zkoušek.

Na nově vzniklé povrchy se z pohledu integrity jako komplexní veličiny nahlíží teprve v posledních desetiletích a prvotně v technologicky pokročilejších odvětvích průmyslu jako je letectví, automotive a zbrojní průmysl.

Tab. 2.1: Vlivy a účinky na povrchovou vrstvu [3].

Vliv	Účinek na povrchovou vrstvu	
Mechanický	Plastická deformace Přeložky, převalený a vytrhaný povrch Změny tvrdosti Trhliny - makro a mikroskopické Zbytková napětí Změna odolnosti proti únavě	
Metalurgický	Fázové transformace Velikost, tvar a orientace zrn Velikost precipitátů a jejich rozložení Cizí vměstky Dvojčatění Rekrytalizace	
Chemický	Mezikrystalická napadení (IGA) Mezikrystalická koroze (IGC) Mezikrystalická oxidace (IGO) Kontaminace Zkřehnutí Důlková nebo selektivní koroze Koroze a koroze pod napětím	

Vliv	Účinek na povrchovou vrstvu
Tepelný	<p>Tepelně ovlivněná zóna</p> <p>Natavení povrchových vrstev</p> <p>Přeskupení materiálu</p> 
Elektrický	<p>Změna elektrické vodivosti</p> <p>Změna magnetických vlastností</p>

2.2. Charakteristiky a složky integrity povrchu

Soubor charakteristik, jimiž je vhodné popsat (definovat) povrchovou vrstvu je různě široký v závislosti na odvětví průmyslu, výrobní technologii, způsobu zatěžování, provozním prostředí. Dosažení vyšší kvality povrchové vrstvy s sebou často přináší zvýšení nákladů na výrobu (např. drsnost) i na kontrolu, je-li vůbec proveditelná. Technologické a konstrukční úpravy by měly projít ekonomickým hodnocením. [1]

Za nejvýznamnější a nejčastěji sledované vlastnosti, které charakterizují integritu povrchu po obrábění lze považovat:

- mikrogeometrii obrobeného povrchu
- zpevněnou vrstvu - stupeň a hloubka
- strukturní, fázové a chemické změny v povrchové vrstvě
- zbytková napětí - smysl, velikost a gradient [1], [2]

V návaznosti na Tab. 2.1 byl v GE Aircraft Engine Group Cincinnati vytvořen systém úrovní požadovaných ověřovacích zkoušek povrchové vrstvy. Vyšší úroveň vždy obsahuje úroveň nižší. Obsah konkrétních úrovní následuje:

Minimální soubor dat (Minimum Data Set - MDS)

- topografie - drsnost, profil
- makrotrhliny
- fotodokumentace povrchu, stopy po obrábění
- profil či mapa mikrotvrdosti
- metalografie na příčném řezu - mikro, makro hodnocení, strukturní změny, mikrotrhliny, vměstky, mezikrystalické napadení, selektivní leptání, tepelně ovlivněná zóna

- elektronová mikroskopie - SEM (20, 200, 1000, 2000x)

Standardní soubor dat (Standart Data Set - SDS)

- minimální soubor dat
- průběh zbytkových napětí
- únavové zkoušky - dosažení požadovaných limitů

Úplný soubor dat (Extended Data Set - EDS)

- standardní soubor dat
- zkoušky koroze pod napětím
- únavové zkoušky úplné
- ostatní specifické zkoušky [3]

2.2.1. Mikrogeometrie povrchu

Mikrogeometrie povrchu závisí v první řadě na tvaru břitu nástroje a jeho relativním pohybu vůči obrobku. Například u soustružení lze snadno spočítat teoretickou výšku nerovnosti (maximální hloubku drsnosti) z velikosti posuvu f_{ot} a poloměru zaoblení špičky r_ϵ . [1]

$$R_{max} = \frac{f_{ot}^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (2.1)$$

Povrch je ovlivněn náhodnými nebo doprovodnými jevy jakými jsou tuhost soustavy, samobuzené kmitání, odchylka od teoretické polohy břitu vůči obrobku, tvorba nárůstku a vnější vlivy. Mikrogeometrie je prostorová, jednotlivé parametry nabývají odlišných hodnot v různých směrech. Aby bylo možné mikrogeometrii vůbec hodnotit, vyhodnocuje se v rovině a ve zvoleném úseku. Hovoříme o drsnosti povrchu.

Mikrogeometrie povrchu se hodnotí parametry uvedenými v normě ČSN EN ISO 4287. Obecně platí označení: P-základní profil, W-vlnitost, R-drsnost. Ačkoli norma definuje velké množství parametrů, níže jsou uvedeny pouze některé významnější:

- Rz – hloubka drsnosti
- Rmax – maximální hloubka drsnosti
- Ra – průměrná aritmetická hodnota drsnosti
- Rsm – střední vzdálenost rýh
- Rmr (c) – materiálový podíl profilu v určité hladině řezu (c)

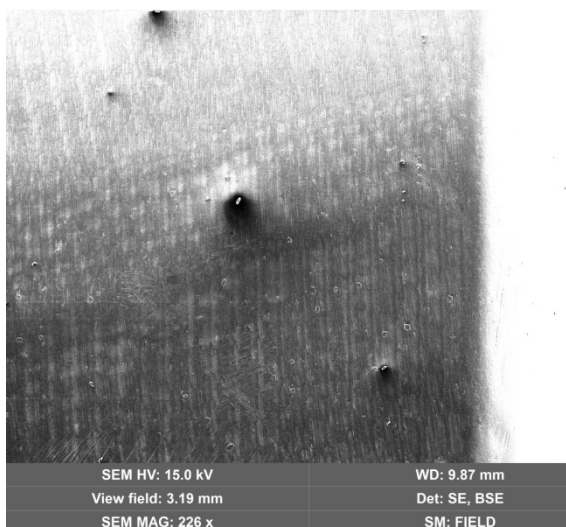
Součásti ve vzájemném kontaktu se dotýkají pouze vrcholky nerovností. Tyto nerovnosti se navíc vlivem koncentrace zatížení a plastické deformace za provozu součásti snižují (efekt

záběhu). I přes nepřeberné množství charakteristik neexistuje a nemůže existovat jedna konkrétní vystihující funkčnost plochy. Některé z nich ani nelze dílenskými drsnoměry měřit. V praxi stále přežívá omezení na používání charakteristiky Ra, která v některých aplikacích dává informaci naprosto irelevantní. Konstruktor by měl předepisovat takový parametr, který je vhodný pro konkrétní charakter styku.

2.2.2. Morfologie

Nesprávně zvolený druh obráběcí operace, pracovních podmínek, nástroje a stroje podporuje výskyt opakujících se nebo nahodilých vad na povrchu a v podpovrchové vrstvě. Zrovna tak tyto vady vznikají při předchozích operacích na polotovaru - lící proces, tvářecí pochody, nevhodná metalurgie (Obr. 2.1). Některé z nich mohou být odkryty při procesu obrábění, ačkoli byl proveden za vhodných podmínek (např.: trhliny, póry, inkluze, vměstky, oxidické pleny). Pro jejich posouzení je nutné zjistit typ, tvar, velikost, rozložení, orientaci a původ.

Hrubé poruchy vznikají vlivem příliš intenzivní plastické deformace v povrchové vrstvě. Projevují se stupni, převalky, částicemi nalepeného materiálu, stopami po zachvění nástroje frézy, trhlínami. Jemné poruchy jsou drobné stopy po nástroji, rýhy po broušení, zbytky brusiva (Obr. 2.2), mikrotrhlinky a mikrotrhlinky po neideálním břitě (Obr. 2.3). Teplotní, silové a chemické působení může vést k výrazné změně vlastností. Tím se povrchová vrstva odlišuje od jádra například mikro a makrostrukturou, napadením IGA, IGO, IGC, měrným objemem, tvrdostí, vodivostí. [4]

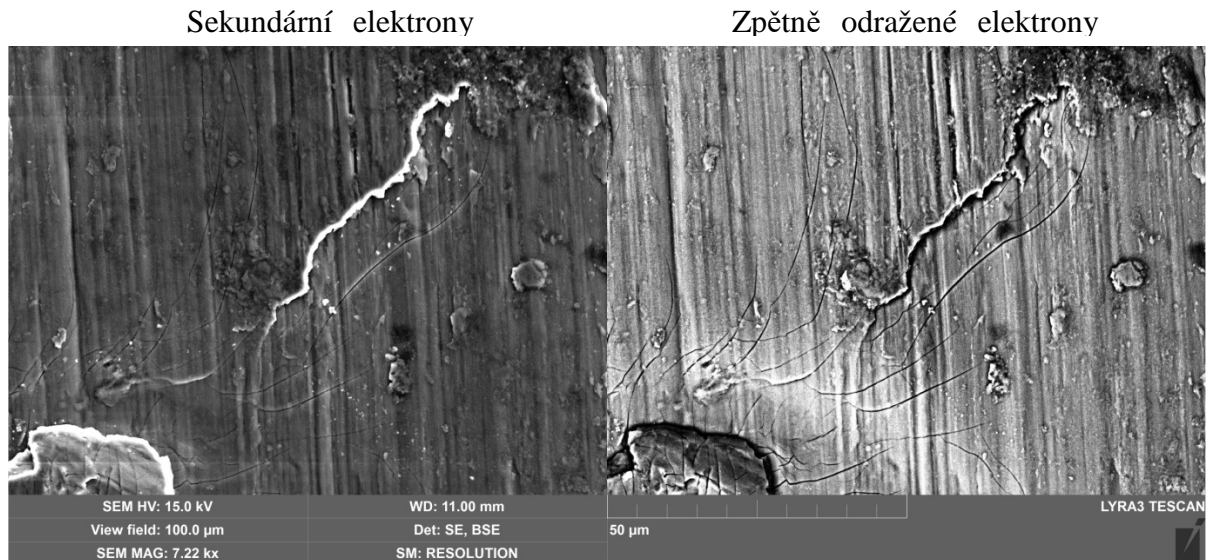


Obr. 2.1: SEM Ti-6Al-4V - póry odkryté při obrábění



Obr. 2.2: SEM Ti-6Al-4V - zrna brusiva zaražená v základním materiálu

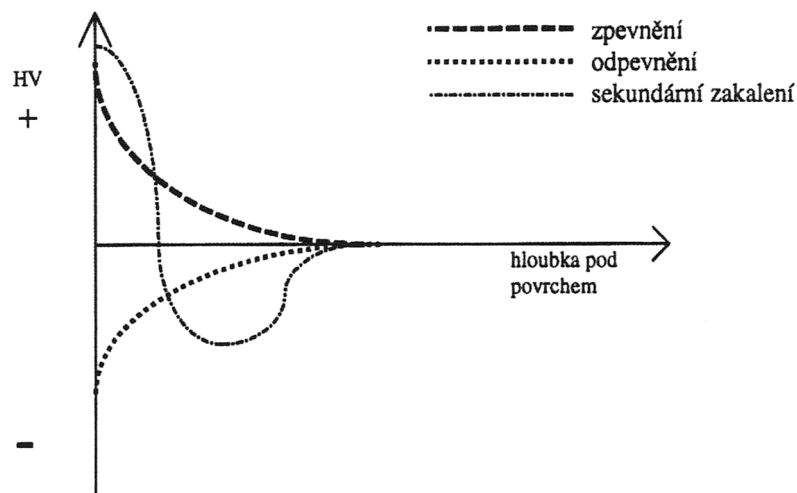
Ve studiu morfologie povrchu sehrává nezastupitelnou roli skenovací elektronová mikroskopie doplněná příslušenstvím - analyzátory chemického složení, odprašování fokusovaným iontovým paprskem FIB.



Obr. 2.3: SEM Ti-6Al-4V - vlasové trhliny, vertikálně stopy po broušení

2.2.3. Stupeň a hloubka zpevnění

Nová povrchová vrstva vznikla za působení tepelných, mechanických a chemických vlivů. Jako taková se liší vloženou energií od zbytku průřezu. Nově vzniklý povrch se může odlišovat funkčními a mechanickými vlastnostmi. Jednoduše proveditelným nástrojem jak tyto změny mechanických vlastností posuzovat jsou změny tvrdosti. Vrstvy jsou velmi tenké, a proto se hodnotí průběh mikrotvrdosti v závislosti na hloubce pod povrchem [1]. Jednotlivé hloubky se dosahují na kolmých a šikmých řezech, eventuálně metodou postupného odleptávání. Čím menší zatížení, tím je kladen větší důraz na přípravu povrchu a rovinnost vzorku. Vickersova a Knoopova metoda jsou prakticky jediné použitelné statické vnikací metody [3]. V praxi se vyskytují 3 charakteristické průběhy (Obr. 2.4). Jejich existence je podmíněna mimo jiné výchozím materiálem obrobku a jeho původní strukturou, druhem ovlivnění a výslednou strukturou povrchové vrstvy. Jedná se o zpevnění, odpevnění a zpevnění s následným poklesem pod tvrdost jádra. Zpevnění s následným poklesem tvrdosti je výsledkem tzv. sekundárního zakalení způsobeného např. broušením, nebo laserem. [1], [5].



Obr. 2.4: Typické průběhy mikrotvrlosti v podpovrchových vrstvách [6]

2.2.4. Mikrotvrlost

Rozdíl oproti zkouškám makrotvrlosti tkví v nižších zatěžujících silách. Zkoušky mikrotvrlosti jsou vhodné pro měření: tenkých součástí, povlaků, jednotlivých složek, fází, průběhů mikrotvrlosti v podpovrchových vrstvách a svarech.

Tab. 2.2: Rozdělení zkoušek dle Vickerse [7]

Oblast zkušebního zatížení [N]	Symbol tvrdosti	ČSN EN ISO 6507-1
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Tvrlost dle Vickerse
$1,961 \leq F \leq 49,03$	HV 0,2 až HV 5	Tvrlost dle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F \leq 1,961$	HV 0,001 až HV 0,2	Mikrotvrlosti dle Vickerse

Měření mikrotvrlosti podle Vickerse je definováno normou ČSN EN ISO 6507-1. Indentor pro měření mikrotvrlosti má menší příčné ostří, jinak je shodný. Norma je rozdělena do 3 částí (Tab. 2.2).

Malé vtisky se obtížněji měří, a proto by povrch měl být zhotoven v kvalitě metalografického výbrusu. Vtisky již nezachovávají geometrickou podobnost. Minimální tloušťky vrstvy, vzorku, časy zatěžování, rychlosti zatěžování a vzdálenost mezi vtisky definuje norma.

Měří se délka úhlopříček d_1 a d_2 , z nichž se vypočítá průměrná délka úhlopříčky $d = (d_1+d_2)/2$. F je zkušební zatížení. Vztah pro výpočet mikrotvrlosti dle Vickerse [7]:

$$HV = \frac{0,1891 \cdot F}{d^2} \quad (2.2)$$

Tab. 2.3: Označení naměřené mikrotvrdosti dle Vickerse [7]

X HV F/t
X - naměřená hodnota mikrotvrdosti [-]
HV - tvrdost podle Vickerse (Hardness Vickers)
F - zátěžovací síla [N]
t - doba působení [s]; pokud t = 10 s až 15 s, neuvádí se
Příklad: 230 HV 0,01/20 = 230 mikrotvrdost dle Vickerse, zátěžovací síla 0,09807 N působící po dobu 20 s

2.2.5. Strukturní, chemické a fázové změny

Strukturní změny v povrchové vrstvě lze obtížně generalizovat. Konkrétní možné pochody se liší materiál od materiálu. Některé materiály jsou více stabilní, jiné méně. U některých může docházet ke změně struktury za nižších teplot, než je obvyklé, ale v součinnosti s určitým stupněm plastické deformace. Hovoří se o transformaci indukované plastickou deformací.

Většina obráběcích operací za použití standardních řezných podmínek nevede ke strukturním změnám běžných technických materiálů. Nedosahuje se kritických teplot a nedosahuje se ani potřebné doby jejich působení. Po frézování a soustružení lze na kolmém metalografickém výbrusu pozorovat texturu vyvolanou plastickou deformací v oblasti primární plastické deformace. Tato textura se objevuje zejména u feriticko-perlitických ocelí a hliníkových slitin. Teprve při vyšších teplotách, tedy vyšších řezných rychlostech se objevuje přerušovaná až souvislá tzv. bílá vrstva o tloušťce do 10 μm, o které lze předpokládat, že vznikla „termomechanickým zpracováním“. [5]

O poznání rizikovější operací je broušení. Teploty při broušení dosahují a při nevhodných podmínkách výrazně převyšují teploty fázových přeměn oceli. Rychlost ohřevu bývá až 10^5 až 10^6 °C.s⁻¹, ale působí velice krátkodobě (10^{-1} až 10^{-3} s⁻¹) [1]. Vrstva zároveň relativně rychle chladne. Zdroji tepla jsou místa řezu jednotlivých zrn, kde jsou také dosahovány extrémní teploty. Tepelné zatížení povrchu lze výrazně omezovat přívodem procesní kapaliny, většinou olejové emulze. Nejcitlivější na strukturní změny v povrchových vrstvách vzniklé účinkem broušení jsou zušlechťené oceli s martenzitickou strukturou, např. nástrojové a ložiskové. Nesprávným broušením lze vyvolat dva základní typy podpovrchových struktur [1]:

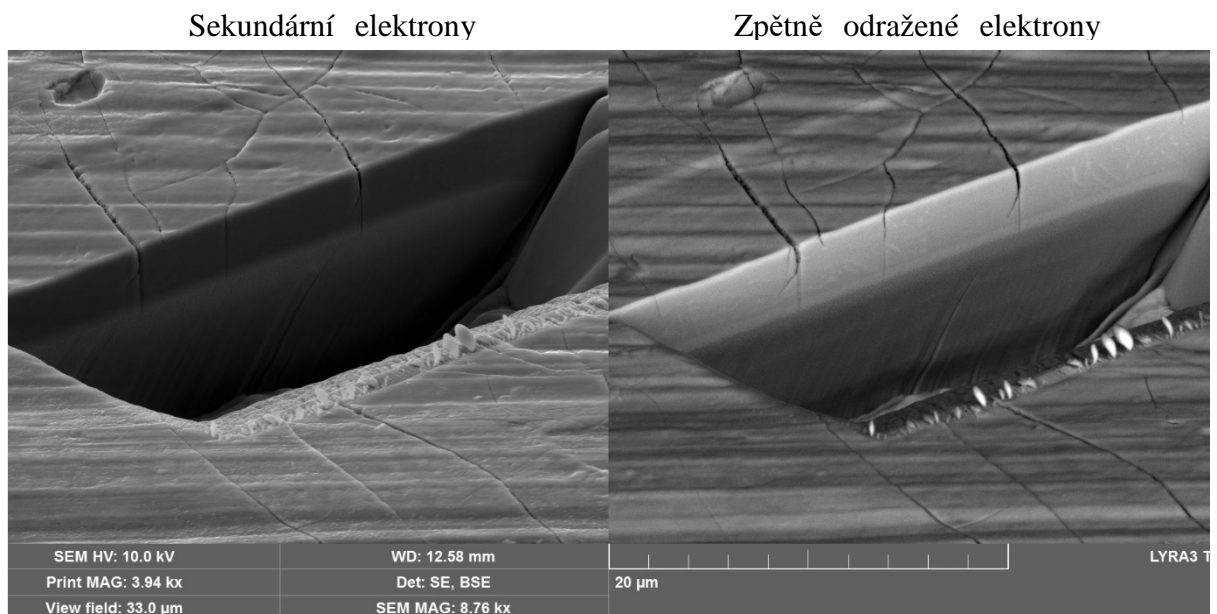
- Vysokopouštěný martenzit - žluté až hnědomodré náběhové barvy
 - pokles tvrdosti funkcí teploty a času
- Martenziticko-austenická vrstva
 - teplota překročí A_{C1}

- vzniká austenit
- sytě modrá barva opalu

Schopnost vyvolání změn struktury silně závisí na fyzikálních vlastnostech (tepelné vodivosti) a tvrdosti základní struktury. Generalizované mechanismy změn struktury jsou obvykle odvozené od nejprobádanějších běžných konstrukčních ocelí, které pro slitiny jiných prvků mají pouze omezenou, nebo dokonce žádnou platnost.

Například niklové slitiny i při nevhodném broušení prakticky nevykazují změny na úrovni mikrostruktury ať už v podobě změny fáze, rozpuštění karbidů nebo hrubnutí zrna. Vzhledem k velmi nízké tepelné vodivosti a žárupevnosti lze pozorovat pouze náběhové barvy a nestandardně vysoká tahová zbytková napětí s vysokými gradienty. [8], [9]

Nerezové oceli se stabilizovanou austenitickou strukturou mají ve stavu po rozpouštěcím žihání homogenní velmi měkkou (přibližně 160 až 220 HV napříč skupinou) strukturu s vysokou tažností. Vzhledem k rozšíření oblasti austenitu vlivem vysokých obsahů slitinových prvků – min. 17 % Cr, min. 8 % Ni – jsou tyto oceli minimálně náchylné ke změně fázového složení aplikací tepelných režimů. S vyloučením hrubnutí zrna při přehřátí (nad 950 °C) a s vyloučením precipitace karbidů po hranicích zrn v rozmezí teplot 400 až 800 °C. Na druhou stranu jsou tyto struktury silně náchylné k deformačnímu zpevňování a formaci deformačně indukovaného martensitu. [10], [11]



Obr. 2.5: SEM + řez FIBem - trhliny v alfatizované vrstvě Ti6Al4V o tloušťce 7 μm

Titanové slitiny mají nadprůměrnou tepelnou kapacitu, ale velmi špatnou tepelnou vodivost. Situace je navíc komplikována vysokou afinitou titanu k prvkům C, O, N, které

stabilizují fázi α ve dvoufázových slitinách $\alpha+\beta$ a jsou obsaženy v okolní atmosféře. Důsledkem je vznik pouze několik mikrometrů silné křehké alfatizované vrstvy (alpha case) (Obr. 2.5). Titan již při teplotách kolem 300 °C získává náběhové barvy. [2], [5]

2.3. Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou velice často opomíjena primárně z důvodu obtížného zjišťování, nákladům, nutnosti součást destruovat, nebo nutnosti vyrobit technologický vzorek. Přitom mají významný vliv na životnost dynamicky namáhané součásti. Jsou jednou z charakteristik integrity povrchu stejně tak jako například mikrogeometrie.

Vnitřní napětí zůstávající v součásti i po odstranění zatížení, které je vyvolalo se nazývají zbytková napětí. Součást jako taková zůstává v silové a momentové rovnováze. Jakýkoli zásah nebo odebrání materiálu ze součásti způsobí přerozdělení zbytkových napětí a deformaci součásti. To je mimo jiné princip mechanických měření zbytkových napětí. Zásadní podmínkou pro vznik zbytkových napětí je překročení meze kluzu materiálu v určitém objemu (vrstvě materiálu), nikoliv v celém objemu. Příčinou všech mechanismů vzniku zbytkových napětí jsou intenzivní plastická deformace a zvýšená teplota, což jsou průvodní jevy při obrábění. Ideální smysl, velikost a průběh zbytkových napětí nelze jednoznačně definovat. Pro každou individuální aplikaci existuje příznivý a nežádoucí průběh zbytkových napětí. Pro dynamicky namáhané součásti se přednostně požaduje tlakové zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Nevhodná zbytková napětí (tahová) působí na součást jako konstrukční vrub vyvolávající špičky napětí. Zbytkové napětí bývá vyvoláno především druhem technologie, podmínkami, technologickou nekázní, a proto se často hovoří o tzv. technologickém vrubu. V souvislosti se vznikem lze rozlišit zbytková napětí:

- časová - Zanikají po odstranění příčin a vyrovnání teplot součásti (např. po vyjmutí obrobku z upnutí a odstranění zatížení stále existují zbytková napětí vlivem nestejněměrného chladnutí). Vzniklá napětí nepřesáhnou mez kluzu.
- trvalá - Došlo k překročení meze kluzu. Po teplotní stabilizaci a odejmutí zatížení v součásti nadále zůstávají. Vyvolaná vnitřní napětí byla dostatečně velká, aby překročila mez kluzu. [1]

Většina materiálů je polykrystalická. Podle objemu v němž dosahují vnitřní napětí rovnováhy, se rozlišují 3 druhy zbytkových napětí:

Zbytková napětí I. druhu

Zbytková napětí I. druhu jsou důsledkem nekompatibility mezi makroskopickými oblastmi. Považují se za homogenní, tj. konstantní, co do směru a velikosti. Rovnováhy se dosahuje v makroskopických objemech, typicky nekonečných tenkých vrstvách a deskách. Porušením silové rovnováhy dojde vždy ke změně makroskopických rozměrů. Pod pojmem zbytkových napětí v technické praxi se rozumí tento druh. [12], [13]

Zbytková napětí II. druhu

Objemy, v nichž je uvažováno homogenní napětí, jsou podstatně menší a omezují se na velikost jednotlivých krystalů. Ve vícefázových soustavách mohou být krystalky různých fází napjaty i opačně. Měřitelná jsou na některých materiálech za použití difrakčních metod. Jinými metodami není jejich detekce možná. U rentgenové difrakce se projevují změnou šířky difrakční linie [12]. Porušení silové a momentové rovnováhy nemusí vyvolat změny makroskopických rozměrů.[1], [13]

Zbytková napětí III. druhu

Jedná se o napětí, která jsou nehomogenní i v rozsahu několika meziatomových vzdáleností. Tvoří napěťová pole doprovázející mřížkové poruchy v reálných krystalech. Nikdy nedochází ke změnám makroskopických rozměrů porušením rovnováhy. [12], [13]

2.4. Mechanismy a příčiny vzniku zbytkových napětí

Nerovnoměrné plastické deformace

Uplatňuje se zde plastická deformace povrchu a elastická deformace jádra vyvolaná silovým účinkem například při tváření za studena, normálovými složkami řezných sil při obrábění, třením hřbetu nástroje o povrch. Silový účinek většinou není nutně doprovázen zásadním zvýšením teploty. Silově deformovaná vrstva se většinou snaží zaujmout větší rozměr (plasticky se natáhnout), čemuž brání jádro vzorku a to indukuje v povrchové vrstvě napětí tlakové. [1],[2]

Nerovnoměrný ohřev či ochlazení

Oba procesy způsobují nerovnoměrné smršťování a natahování vrstev. Tento jev doprovází například tepelné zpracování, ochlazování místa řezu chladicí kapalinou, chladnutí odlitků a výkovek. Problematika tepelných zbytkových napětí, obzvlášť pokud je spojena se silovým účinkem, je charakterizována několika modely vzniku, které lze podrobněji dohledat v [1], [2], [3].

Rozdělí-li se součást pomyslně na povrchovou vrstvu a jádro, pak by se povrchová vrstva při ohřevu o $\Delta\theta$ materiálu o roztažnosti α a délky l protáhla o Δl . To by nastalo za předpokladu, že by nebyla pevně spojena s materiálem jádra. Uvažujeme, že na jádro již účinek rozdílu teplot nepůsobí a deformace povrchové vrstvy je brzděná a tedy vyvozuje v povrchové vrstvě napětí:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{\Delta l}{l} \cdot E = \alpha \cdot E \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (2.3)$$

Nerovnoměrná fázová transformace

Jedná se o přeměnu stávajících, nebo vylučování nových strukturních složek v povrchové vrstvě. Silové a tepelné účinky iniciují právě tyto přeměny. Nebudou-li se tyto iniciační účinky uvažovat, tak zbytková napětí vznikají v důsledku různých měrných objemů jednotlivých struktur. [1]

Absorbce prvků do povrchové vrstvy

Absorbci prvků lze považovat za difúzní proces a jako takový je podpořen zvýšenou teplotou. Zároveň změna chemického složení často úzce souvisí se strukturními změnami a těmto napomáhá. Absorbce prvků a reakční pochody v místě styku obráběného materiálu a řezného prostředí mohou vést i ke vzniku nových vrstev a povlaků se značnou chemickou odlišností od základního materiálu. [14]

2.5. Vazba zbytkových napětí a technologie

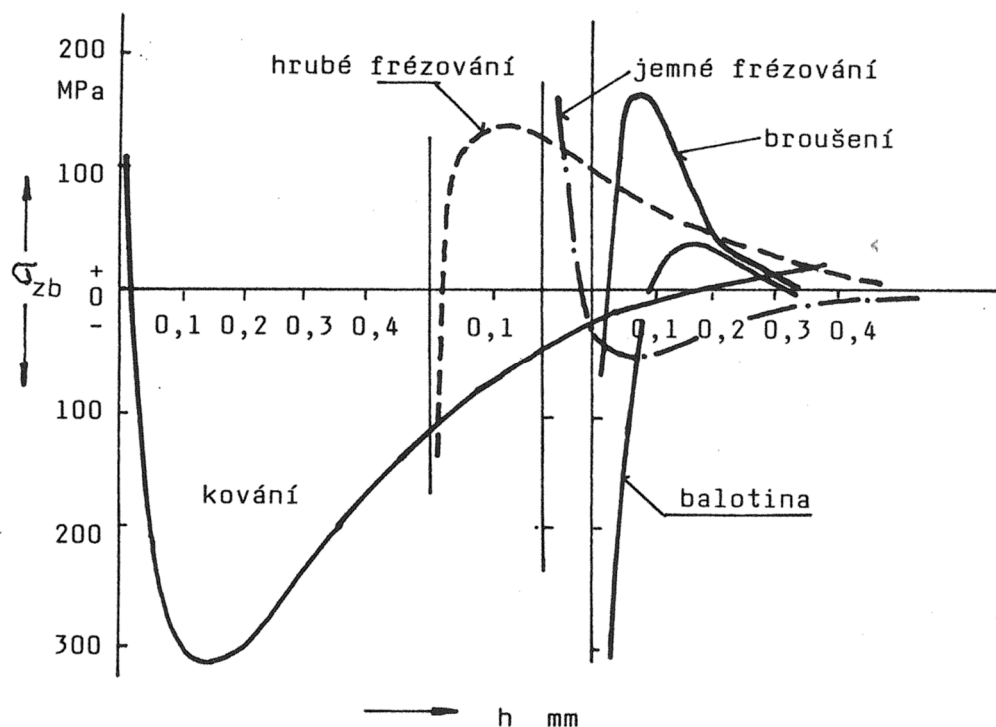
Průběhy zbytkových napětí je možné odhadovat na základě vlivů a mechanismu přetvoření povrchové vrstvy jednotlivých technologií. Při lapování, honování, superfiniši dochází k úběru mikrotřísek. Netřískové dokončovací metody, válečkování, kuličkování, přehlazování, balotínování je hlavním mechanismem plastická deformace povrchové vrstvy. Všechny tyto dokončovací metody jsou doprovázeny nízkými teplotami, čímž je umožněn vznik zbytkových napětí tlakových.

Specifickou oblastí obrábění jsou nekonvenční technologie. Elektrochemické obrábění a dokončování odstraňuje materiál elektrolytickým rozpouštěním. Nepůsobí zde ani velké mechanické síly, ani teploty a povrchová vrstva zůstává bez napětí. [6]

Na stav zbytkové napjatosti v povrchové vrstvě nemá vliv pouze poslední dokončovací technologie, nýbrž všechny předchozí, např. tváření, nerovnoměrně provedené tepelné zpracování. Jakou měrou závisí hlavně na přídavcích. Předěšlé operace (technologie) s větší „hrubostí“ (například těžké hrubování s velkým úběrem materiálu v podobě třísky) práce navíc zpravidla zasahují větší hloubku povrchové vrstvy. Výsledný průběh zbytkových napětí je

výsledek superpozice vlivů jednotlivých operací. K superpozici napětí dochází pouze v oblasti pružných deformací. Každá nová plastická deformace vyvolaná dalším technologickým procesem „smaže“ zbytková napětí z předchozí. Je však třeba zdůraznit, že jen ve vrstvě naposledy plasticky deformované. [1]

Příklad rozložení zbytkových napětí po jednotlivých technologiích pro list lopatky turbokompresoru z materiálu 10Ch17N2 uvádí Obr. 2.6. Na kované lopatce je v tomto případě hrubovacím frézováním odebrán přírůstek 0,5 mm, jemným frézováním 0,2 mm a jemným broušením 0,05 mm. Poslední operace broušení vnáší nepříznivé tahové napětí se špičkou těsně pod povrchem. Toto nepříznivé napětí se podařilo do značné míry eliminovat balotínováním. Z hlediska únavových a korozních vlastností by bylo vhodné broušení nezařazovat. [1]



Obr. 2.6: Zbytková napětí po jednotlivých úsecích výrobního postupu lopatky turbokompresoru [1]

2.6. Vliv zbytkových napětí na statickou pevnost

Vliv zbytkových napětí na statickou pevnost není jednoznačný. Je třeba rozlišovat jednotlivé typy namáhání a také jednotlivé technologie. Základní Saint-Venantův princip pružnosti pevnosti (roznesení napětí do celého průřezu) má v případě uvažování zbytkových napětí svá omezení. Zbytková napětí lze chápat jako určitý způsob předepnutí materiálu.

Efekt zbytkových napětí na statickou pevnost se uvažuje na vlastnosti celého průřezu. Předpokládá se, že gradienty zbytkových napětí jsou malé a ovlivněná vrstva představuje

podstatnou část průřezu. Tuto představu lze přijmout u technologií objemového tváření, lití, a některých tepelných zpracování.

Rozhodně tuto představu nelze přijmout pro technologie obrábění (s výjimkou velice tenkých součástí). Ovlivněná vrstva dosahuje maximálně do 0,3 mm. Statická pevnost pak není ovlivněna. Při superpozici zbytkového napětí a napětí od vnějšího zatěžování může být v povrchové vrstvě překročena mez pevnosti. Pak se na povrchu objeví mělké trhliny zpravidla kolmé na směr zatěžování. Oslabení nosného průřezu nebývá významné a pokud součást neprochází cyklickým zatěžováním, neměly by tyto trhliny ohrozit provozní spolehlivost. Uvažujeme-li jako aplikaci nepředepjatou konstrukci a bez působení korozního prostředí. [1]

Při namáhání na vzpěr zbytková napětí vždy snižují kritické napětí. U plastických materiálů a jednoosé napjatosti vede zbytkové napětí ke snižování meze kluzu. Při víceosé napjatosti a ohybu bylo naopak zjištěno zvýšení meze kluzu. [1]

2.7. Vliv zbytkových napětí na životnost

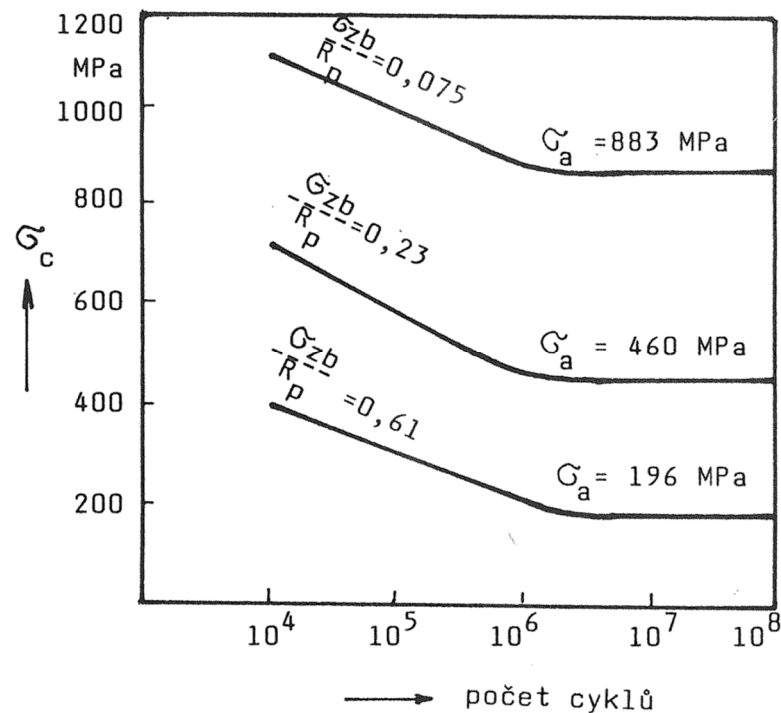
Zbytková napětí mají vliv především na životnost dynamicky namáhaných součástí. Mnoho selhání součástí v provozu je způsobeno únavou při cyklickém zatěžování. Poruchy pak nastávají v oblastech vrubů, koncentrace napětí, vrypů a povrchových mikrotrhlin. Průměrné hodnoty mechanických vlastností získaných ze statických zkoušek tahem poskytují informaci o průměrných vlastnostech v celém průřezu.

Citlivost únavové pevnosti na změny vlastností v povrchové vrstvě si lze vykládat tím, že při ohybu a krutu je vždy maximální napětí v krajních vláknech na povrchu. Navíc povrchová vrstva je nejvíce postižena metalurgickými vadami, vrypy, ryskami, vakantními místy, difuzí cizích prvků a strukturních změn.[1], [15]

Zkušenosti z praxe a experimentálního výzkumu potvrzují veškeré teorie o tom, že tahová zbytková napětí únavovou pevnost snižují a tlaková naopak zvyšují. Jejich účinek není rovnocenný [1]. Jelikož povrch nikdy není dokonalý, obsahuje vměstky, inkluze, vruby a mikrotrhliny, z nichž se obvykle šíří únavové trhliny. [15], [16]

Tlaková napětí zamezují nebo zpomalují iniciační a propagační fázi. Obecně je v povědomí odborné veřejnosti určitá souvislost mezi drsností povrchu a mezí únavy σ_c – ve smyslu zvyšující se meze únavy se snižující se drsností. Tato závislost platí však jen velmi omezeně a mnohdy se jedná sekundární závislost. Při tahovém zbytkovém napětí nehraje drsnost povrchu téměř roli, při tlakovém napětí ano, ale nikoli klíčovou. Nárůst nákladů na výrobu součástí s nižší drsností za účelem zvýšení meze únavy je výrazně progresivní. Navíc vliv vyšších

hodnot drsnosti na snižování meze únavy může být doprovodný projev. Povrchy hrubě obrobené mají velmi často vyšší hodnoty tahových zbytkových napětí v povrchové vrstvě. Z důvodu snadného měření je pak mez únavy dávána (v některých případech chybně) do spojitosti primárně s drsností. [16]

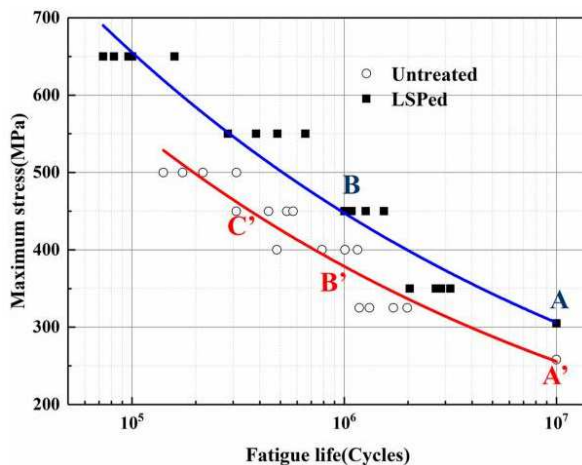


Obr. 2.7: Wöhlerovy křivky pro různá tahová zbytková napětí [1]

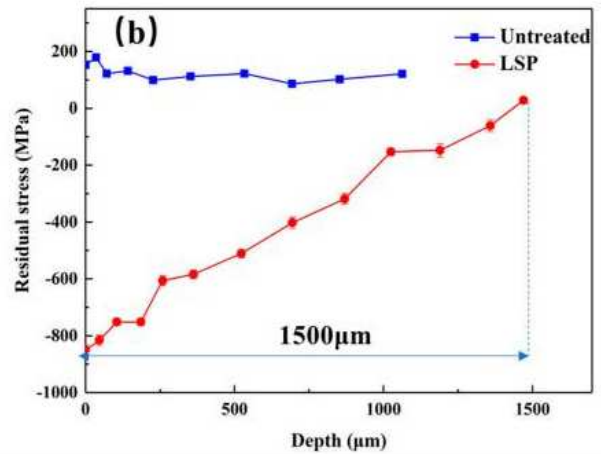
Vliv zbytkových napětí na mez únavy v ohybu ložiskové oceli je patrný z Obr. 2.7, který dokládá závislost počtu cyklů do porušení vzorků na souměrně střídavém napětí σ_a pro vzorky s různou úrovní tahové zbytkových napětí po broušení. Křivka, která je v diagramu nejvýše měla minimální tahová zbytková napětí a mez únavy je přibližně čtyřnásobná oproti křivce nejnižší. Obdobné výsledky byly získány při zkouškách kontaktní únavy (pittingu). [1]

Zejména v leteckém průmyslu a energetice jsou používány materiály s nestandardními fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, například niklové a titanové slitiny. Lze očekávat, že povrchové vrstvy těchto materiálů budou ještě náchylnější na technologii výroby a budou vnášet do této oblasti jistá specifika. To už se například u titanových slitin s jejich malou tepelnou vodivostí projevilo.

Publikace [17] hodnotí přínos vyvození hloubkového průběhu zbytkového napětí po technologii Laser shock peening (LSP) – tentokrát výrazně tlakového. Přínos v oblasti časové životnosti je podle odstupů Wohlerových křivek významější. Mez únavy σ_c pro 10^7 se po zpracování technologií LSP zvýšila o 16 % z 264 MPa na 305 MPa.



Obr. 2.8: Posun wohlerovy křivky ($R=0,1$) pro Ti6Al4V po zpevnění technologií LSP (modrá) vůči stavu bez zpevnění (červená) [17].



Obr. 2.9: Průběh zbytkových napětí únavových těles pro základní stav (modrá) a pro stav po LSP s výraznými tlakovými napětími (červená) [17].

2.8. Metody měření zbytkových napětí

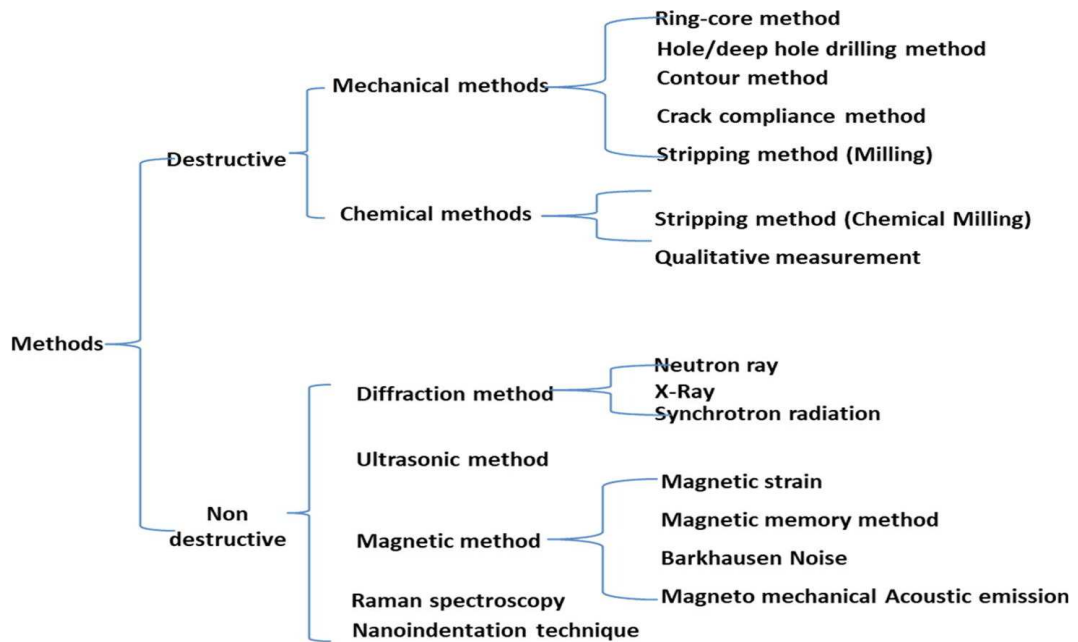
Měření zbytkových napětí je poměrně náročný proces. Bez ohledu na metodu je vyhodnocován makroobjem materiálu, u kterého je výsledek měření vždy zatížen nebezpečím zásadní chyby při nedodržení postupu či podmínek. Pro měření zbytkových napětí dosud nemáme tak jednoduché a propracované metody jako pro vyhodnocování základních fyzikálních a materiálových vlastností. V posledních desetiletích došlo k výraznému pokroku v metodách měření zbytkových napětí. Jelikož principy metod jsou známy již řadu let, je snahou vytvořit jednoduchá a spolehlivá zařízení, jež by byla schopna transformovat měření zbytkových napětí z ryze laboratorních prostor do kontroly výroby, případně je přímo implementovat do výrobních procesů. Všechny současné metody měření zbytkových napětí jsou velmi náročné z hlediska zařízení a techniky, jsou relativně zdlouhavé, často i nepřesné. Rovněž provádění tohoto typu analýz vyžaduje individuální přípravu měření pro konkrétní aplikaci, řadu pilotních vzorků a mimořádnou expertízu lidského faktoru.

Je-li požadováno stanovit průběh zbytkových napětí ve směru normály k povrchu do větších hloubek a nikoli pouze limitní povrchové vrstvy, vedou prakticky všechny metody k zásahu do součásti, případně její destrukci za účelem vyhotovení příčného řezu. Zejména v poslední době s rozvojem výpočetní techniky a metody konečných prvků je snahou pokoušet se o hodnocení zbytkových napětí pomocí simulací a celých matematických modelů predikující výslednou zbytkovou napjatost pro jednotlivé technologie. Některé lze nalézt například v publikacích [18], [19], [20], [21], [22]. Mechanismus vzniku těchto napětí je natolik složitý, obsahuje tolik vstupů, že se výpočtové modely stěží shodují s realitou a ověření zbytkových

napětí experimentální cestou je nezbytné. V historické posloupnosti bylo zbytkové napětí určováno:

- **z makroskopických deformací** uvolněných během odstranění definovaného objemu (vrstvy), ve kterém zbytkové napětí působí. Odebráním vrstvy materiálu, porušením celistvosti, nařiznutím dojde k porušení rovnováhy vnitřních sil. Deformace se sleduje na prodloužení, průhybu, zkosení, nebo změně křivosti. Tento mechanismus tvoří základ všech mechanických metod. Princip je obdobný jako získávání meze kluzu a meze pevnosti, které jsou rovněž odvozeny z deformace vzorku pod zatížením.
- **ze zbytkové deformace kovové mřížky**. Na tomto základě jsou vybudovány rentgenová a neutronová difrakce
- **ze změny fyzikálních veličin**, které jsou závislé na zbytkovém napětí, např. sonických či magnetických. [1], [12]

Formální rozdělení metod lze provést na základě mnoha kritérií. Dle použitého fyzikálního principu je možné rozlišovat: mechanické, difrakční, magnetické, ultrazvukové a ostatní metody nepřímé. Z pohledu porušení celistvosti součásti dělíme metody na: destruktivní, semidestruktivní, nedestruktivní [12]. Zbytková napětí se stanovují buď v těsné blízkosti povrchu, nebo v celém průřezu součásti. I tento požadavek je stěžejní pro výběr metody a metody by podle tohoto kritéria měly být rozděleny dle názoru autora taktéž. V předních světových publikacích věnovaných metodám měření zbytkových napětí [12], [13], [24], [25] je toto reflektováno částečně hodnocením oblastí použitelnosti, nikoliv ve vlastním rozdělení. V přehledu metod autoři uvádí značné množství metod, z nichž některé jsou vysoce aplikačně specifické (z pohledu informace i materiálu) – metoda kontur využívaná specificky na příčné řezy svarů; Ramanova spektroskopie pouze detekční technika. V rešerši metod níže jsou uvedené pouze ověřené a obecně aplikovatelné metody užívané v technické strojírenské praxi.



Obr. 2.10: Přehled metod měření zbytkových napětí dle [25]

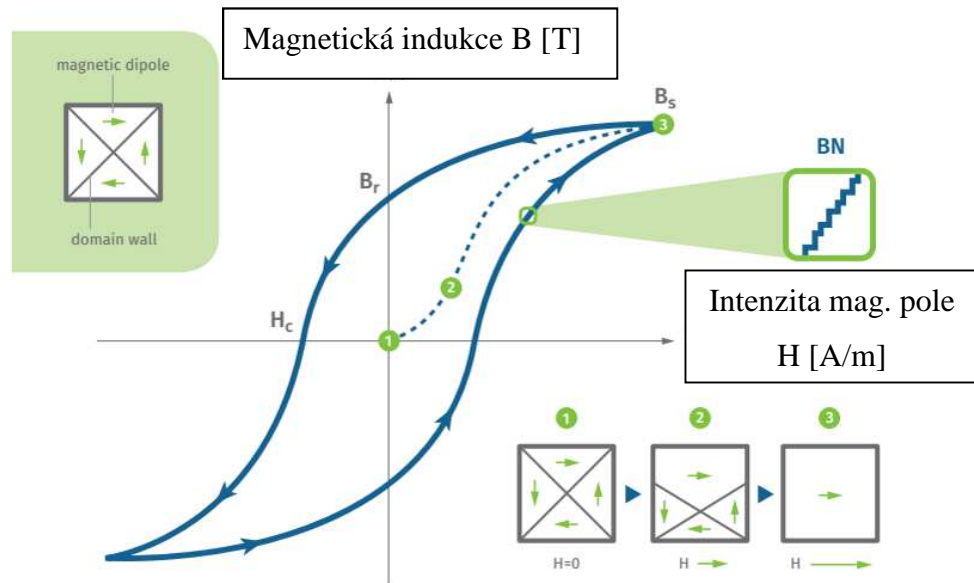
2.8.1. Magnetické metody

Magnetické metody jsou typickým představitelem nedestruktivních, operativních metod. Využívají se ve vědě i průmyslových měřeních. Magnetické vlastnosti materiálu jsou ovlivněny zbytkovými napětími, tvrdostí, strukturními a fázovými změnami. Z názvu vyplývá omezení aplikace na feromagnetické materiály. Obecně lze pro stanovení zbytkových napětí sledovat 3 fyzikální jevy:

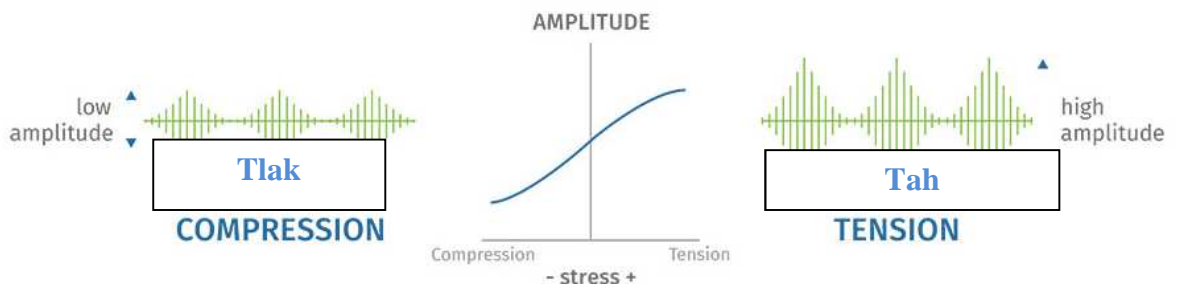
- magnetostrikce - změna rozměru v magnetickém poli
- zbytkový magnetismus - změna hysterezní křivky s napjatostí
- magnetická indukce - změna průběhu a hustoty siločar s napjatostí [4]

Barkhausenův šum

Jev, při kterém elastické vlastnosti ovlivňují doménovou strukturu a magnetické vlastnosti, nazýváme magnetoelastická interakce. Důsledkem této interakce u materiálů s pozitivní magnetostrikcí (většina ocelí, kobalt, železo) je snižování intenzity Barkhausenova šumu tlakovým napětím a zvyšování intenzity tahovým napětím [23], [26]. Přesnost metody je podmíněna možnostmi kalibrace převodu magnetoelastického parametru MP na hodnoty mechanického napětí v MPa. Dosahované hloubky se výrazně liší v závislosti na materiálu a jeho tlumení, které charakterizuje zejména vodivost a permeabilita. Velmi obecně lze říci, že lze měřit hloubky od 0,01 až 1,5 mm [27].



Obr. 2.11: Magnetizační křivka (hysterezní smyčka) ve feromagnetické látce s vyznačením Barkhausenova šumu. [23]



Obr. 2.12: Projev tlakového/tahového napětí na velikost amplitudy Barkhausenova šumu. [23], [26]

Měření zbytkových napětí pomocí Barkhausenova šumu je v současné době už využíváno sériově pro vybrané aplikace (např. kontrola vačkových hřídelů, kde nelze provádět destruktivní zkoušení), nicméně je třeba ji chápat stále spíše jako komparační nebo detekční techniku. Spolehlivost stanovení absolutních hodnot napětí je závislá na mnoha dalších parametrech.

Stabilitě výsledků této metody a jejímu srovnání se podrobně věnuje publikace [28]. Autoři zde poukazují na důležitost kalibrace, která by měla být prováděna ideálně na stejném produktu, se stejnou geometrií a shodnou velikostí zrna. Na zjištění rozdílných hodnot napětí v závislosti na velikosti zrna autoři poukazují nejen u stanovení napětí zbytkového, ale i u napětí provozního při tahové zkoušce. Autoři rovněž provedli porovnávací měření vůči rentgenové difrakci, z něhož vyplynuly zásadní rozdíly výsledků. [28]

2.8.2. Ultrazvuková metoda

Princip ultrazvuku je znám a využíván po desetiletí, ale aplikace pro měření zbytkových napětí je relativně mladá. Těžiště know-how leží ve zpracování signálu po interakci vlnění s pevnou látkou. Ultrazvuková metoda je zástupcem nedestruktivních metod. Jakýkoli bod na vyšetřované součásti lze opakovaně v čase měřit, čímž metoda získává potenciál při zkoumání vývoje zbytkových napětí, relaxace v dynamicky namáhaných součástech v průběhu celé jejich životnosti. [29]

Na stanovení velikosti zbytkových napětí působí podobné faktory jako při použití magnetické metody, avšak ve větší míře. Rychlost šíření vlnění je ovlivněna tvrdostí, krystalickou texturou, hustotou dislokací a strukturními změnami. Efekt těchto faktorů může mít, přednostně v tenkých vrstvách, výraznější vliv na výsledek zkoušky, než samotné zbytkové napětí. Vzhledem k tomu lze často obdržet výsledky smíšené kvality, jelikož uvedené vlivy nelze prakticky separovat. Proto je ultrazvuková metoda pouze v omezené míře použitelná na povrchy, na nichž byla aplikována technologie vnášející do součásti zbytkové napětí zároveň se změnami výše uvedených faktorů (povrchové kalení, indukční kalení, kuličkování, svařování atd.). Z dostupných zařízení na trhu lze jmenovat například EMAT se softwarem DIO 2000 od firmy Starmans s.r.o. V současném provedení lze metodu chápat jako metodu porovnávací. [30]

2.8.3. Chemické metody

V souvislosti s kontrolou broušených povrchů „na opal“ se používá metoda, jejíž princip spočívá v tom, že broušená součást se ponoří do vodního roztoku kyseliny sírové H_2SO_4 nebo solné HCl . Atomární vodík difunduje do základního materiálu, kde se rekombinuje za vzniku molekulárního vodíku. Molekulární vodík se přednostně umísťuje do submikroskopických trhlinek kovu. Molekulární vodík rekombinací navyšuje svůj objem a vyvolává napětíové pole. V molekulární formě není možný rozklad ani průnik do hloubky základního materiálu a dochází k hromadění v povrchové vrstvě, respektive v submikroskopických trhlinkách. V povrchové vrstvě se vytváří vysoký tlak vyvolávající trojosou napjatost. Tato napjatost se přičte ke zbytkovým napětím po broušení a přesáhne-li místně mez pevnosti, vytvoří se trhlinky. Čím větší bude zbytkové napětí, tím dříve a tím větší trhlinky vzniknou. Metodu je třeba považovat za detekční nebo porovnávací. [4]

2.8.4. Metoda křehkých laků

Metodou křehkých laků lze obdržet výsledky obdobného rozsahu i kvality jako v případě chemické metody. Na součást se nanese nátěr křehkého laku. Do součásti se vyvrtá otvor

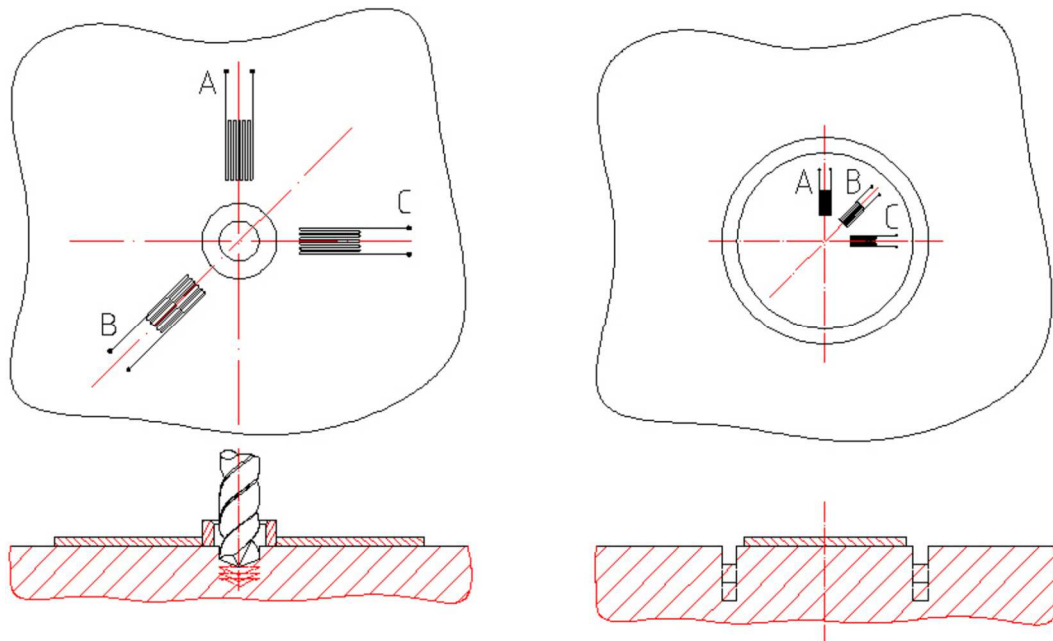
a dojde k přestavbě vnitřních napětí, čímž dojde zároveň k deformaci. Této deformaci lak nemůže odolat a popraská. Velikost, hustota a směr trhlinek v laku pak slouží jako měřítko pro posouzení velikosti a směru pnutí, nikoliv ke stanovení absolutní hodnoty. [1]

2.8.5. Mechanické metody

Metoda otvoru - odvrtávací

K technicky zajímavým a velice rozšířeným mechanickým způsobům měření patří semidestruktivní metoda vrtání otvoru malého průměru (obvykle 1 až 4 mm) do hodnoceného povrchu (Obr. 2.13). Tím dojde k přerozdělení (částečnému uvolnění) zbytkových napětí a na povrchu tělesa lze prostřednictvím tenzometrů měřit deformace. Z deformací se za použití experimentálně nebo teoreticky zjištěných kalibračních koeficientů určí velikosti a směry hlavních napětí. Metoda vrtání otvoru je popsána normou ASTM E 837. Zpracování výsledků se výrazně liší pro uvažování homogenní a nehomogenní napjatosti po tloušťce (viz níže).

Pro vyšetření zbytkových napětí je třeba nalepit speciální tenzometrickou růžici a připojit k registračnímu zařízení. Nejčastěji je použita růžice typu $0^\circ/45^\circ/90^\circ$. Nad růžicí se upevní vrtací přípravek co nejpřesněji mezi tenzometry. Po instalaci se provede tzv. nulové čtení. Postupně po jednotlivých krocích se odvrtají, lépe řečeno odfrézují jednotlivé vrstvy. Odečítání deformací z jednotlivých tenzometrů probíhá v každém kroku odvrtávání. Vyhodnocení a výpočet velikosti a směru hlavních napětí se provede za pomoci softwaru.



Obr. 2.13: Schéma metody otvoru (vlevo) a metody uvolňování sloupky (vpravo) [31]

Pro vyhodnocení výsledků je zavedeno několik předpokladů. V oblasti tenzometrické rúžice je na povrchu uvažováno homogenní zbytkové napěťové pole. Zbytkové napětí kolmé k povrchu je ve všech hloubkách uvažováno jako nulové. Napětí ve vrstvě (tělese) je považováno za lineárně elastické po celou dobu trvání experimentu. [30]

Při vyšetřování gradientů zbytkových napětí je minimální hloubka pod povrchem 50 μm za ideálních podmínek. Tudíž do této hloubky metoda nedává žádnou informaci a to může být problém například u vysokorychlostního frézování (HSC), broušení a dalších technologií obrábění, u nichž jsou ovlivněné povrchové vrstvy velmi tenké.

Metoda sloupku

Vrtáním drážky tvaru mezikruží je uvolňován sloupek materiálu o průměru 15 až 150 mm. Hloubka vrtané drážky se pohybuje v rozsahu 0,25 až 1,5 průměru sloupku. Tenzometrická rúžice je lepena na sloupku (Obr. 2.13). K vrtání se využívá korunová fréza. Tato metoda spadá do stejné kategorie jako metody otvoru. Rovněž princip, předpoklady a omezení se v mnohém shodují. Jedná se o semidestruktivní metodu s výraznějším zásahem, a proto je vhodné tuto metodu aplikovat pro větší součásti. [30], [31]

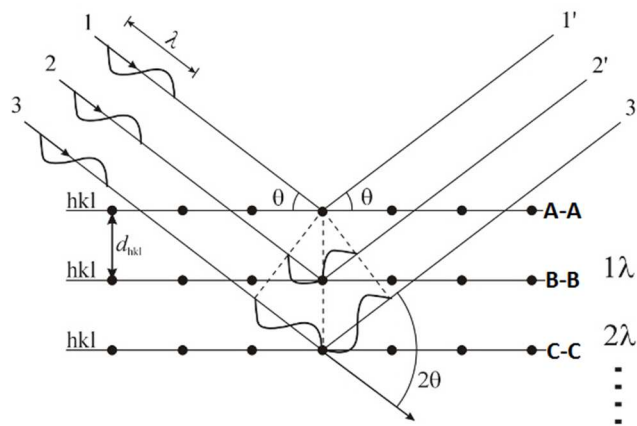
2.8.6. Difrakční metoda

Nejvíce rozšířená nedestruktivní metoda pro stanovení povrchového napětí (do efektivní hloubky vnikání RTG svazku) je rentgenová difrakce (RTG, z angličtiny XRD – X-ray diffraction). Tento trend je podpořen dostupností komerčních difraktometrů – Seifert, GE inspection Technologies, StressScan a dalších, i vznikem mezinárodních norem pro provádění těchto zkoušek, např. SAE HS-784. Podstatou RTG tenzometrie je využití rozptylu (difrakce) na krystalech k měření změn vzdáleností mřížkových rovin vyvolaných napětím.

Fyzikální podstata RTG difrakce

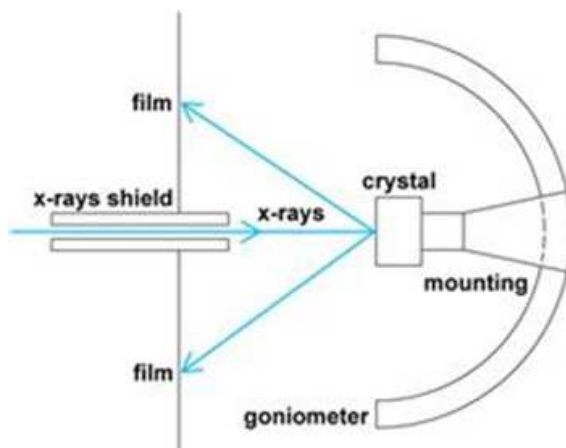
Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách typu hkl (rovnoběžných, s mezivinnou vzdáleností d_{hkl}) vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru θ , pokud je rozdíl drah obou paprsků celočíselným násobkem n vlnové délky λ použitého zařízení, tj. pokud je splněna Braggova rovnice: [6]

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.4)$$



Obr. 2.14: Interakce RTG záření s krystalografickými rovinami [32]

Dopadá-li svazek RTG paprsků na polykrytalický materiál s dostatečně malými zrny, pak jsou základní podmínky pro difrakci splněny pro mnoho náhodně orientovaných krystalků, jejichž některé krystalografické roviny splňují Braggův zákon. Z takového materiálu jsou RTG paprsky difraktovány ve svazku tvořícím povrchy kuželové plochy. Je-li vzorek z ideálního homogenního jemnozrnného materiálu, na film, či image-plate se zobrazí spojitě úzké jasné difrakční kroužky [4]. Kroužek je tvořen efektem jednotlivých zrn, kterých je v jemnozrnném materiálu dostatek. Zjišťuje se radiální rozložení intenzity.



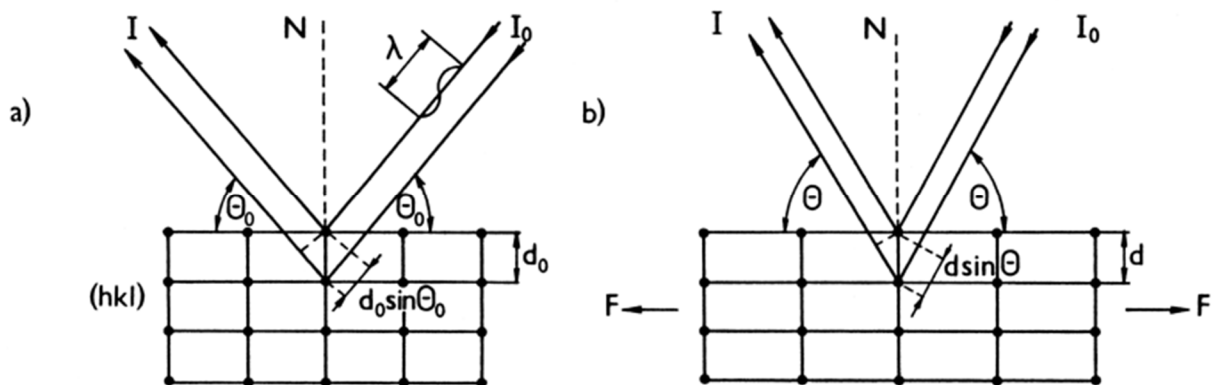
Obr. 2.15: Kuželová plocha při tzv. zpětném odrazu (vlevo) [33]



Obr. 2.16: Difrakční (Debye-Scherrerův) kroužek (vpravo) [34]

Působením mechanického napětí se změní mezivzrostová vzdálenost a tím i difrakční úhel θ (Braggův úhel). Vlnová délka se interakcí s krystalem nemění. Diferencováním Braggovy rovnice lze odvodit vztah mezi mřížkovou deformací ε v napjatém krystalu a úhlovým posunem interferenčního maxima. Zjištěné deformace se pak pomocí matematických modelů založených na vztazích teorie elasticity a rozšířeného Hookova zákona pro izotropní materiály přepočítají na napětí ve vrstvě působící. Je třeba zdůraznit, že RTG difrakce měří pouze elastické

deformace a že při odvození výpočtových vztahů je uvažován homogenní, spojitý, izotropní materiál.[6], [35]



Obr. 2.17: Změna mezivinné vzdálenosti a difrakčního úhlu při RTG difrakci [34]

Specifické rysy

- Metoda je omezená na krystalické materiály nebo krystalické složky těchto kompozic. Máme-li vzorek z amorfního materiálu, difrakce nemůže z principu fungovat.
- Difrakční informace při nedestruktivním způsobu jsou obdrženy z jednotek až několika málo desítek μm (výjimečně). Při nedostatečné jakosti (topografické) povrchu je jejich věrohodnost zpochybnitelná.
- Jako odměrná základna je použita krystalová mřížka. Teoreticky tedy metoda umožňuje měření na jednotlivých fázích (duplexní slitiny).
- Neutronová a RTG difrakce jsou jako jediné schopny měřit a odlišit zbytková napětí 1. a 2. druhu. Je to jeden s důvodů, proč se hodnoty napětí zjištěné RTG metodou často neshodují s výsledky naměřenými jinými způsoby, především mechanickými.
- RTG difrakce detekuje pouze elastické deformace [34].
- Úzký paprsek umožňuje lokální měření, např. v okolí čela trhliny.

Spolehlivost metody

Spolehlivé výsledky lze obdržet při splnění těchto požadavků:

- Provedení většího počtu měření pro vyloučení místních vlivů.
- Přesnost úhlu incidence je lepší než $0,5^\circ$.
- Vzorek má jemnozrnnou strukturu s maximální hodnotou střední velikosti zrna $d_{stf} = 30 \mu\text{m}$ bez textury nebo orientace struktury. U tvářených materiálů

s deformovanými zrny a anizotropií jsou větší rozdíly (chyby) a neostře nespojitě difrakční kroužky. [12]

- Povrch má ve vyšetřovaném místě vhodnou topografii (ideálně elektrolyticky leštěný).
- Vyšetřovaný kov dává dostatečně ostré difrakční kroužky. [4]

Neutronová difrakce

Na shodném fyzikálním principu jako RTG difrakce pracuje také difrakce neutronová. Neutronové záření není limitováno hloubkou vnikání tak výrazně jako rentgenové. Pronikavost neutronů je výrazně vyšší, jelikož jejich koeficient zeslabení je zhruba o 3 řády nižší oproti rentgenu. To umožňuje výzkum velkých objemů materiálu v řádu cm^3 . Změnou orientace vzorku k dopadajícímu záření lze nedestruktivním způsobem stanovit charakter distribuce napětí v různých oblastech ocelí do tloušťky 15 mm a u Al slitin až do hloubky 50 mm. Základní omezující podmínkou je dispozice zařízení a zdroj neutronů. [1]

2.8.7. Metoda elektrolytického odleptávání vrstev

V laboratoři obrábění Fakulty strojní ČVUT v Praze byla doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. a doc. Ing. Jindřichem Kafkou, CSc. vypracována mechanická metoda měření zbytkového napětí využívající elektrolytické (anodové rozpouštění) nebo chemické rozpouštění vrstev materiálu a snímání deformace uvolněné po úběru povrchové vrstvy [4]. Metoda se vyvinula z klasické metody pásků. Přesto, že se deformace uvolňuje kontinuálně, odečet deformace a následný výpočet zbytkových napětí bylo možné provádět pouze inkrementálně a s ohledem na charakter průběhů v nerovnoměrných krocích.

Podrobný rozbor výpočtových vztahů, detailní popis postupu měření, zpracování měření a omezující podmínky jsou uvedeny v dalších kapitolách vzhledem k tomu, že v těchto bodech metoda doznala určitých vývojových změn, které byly prováděny v rámci této disertační práce. Následující odstavce uvádějí pouze princip, aplikační možnost a hodnocení metody.

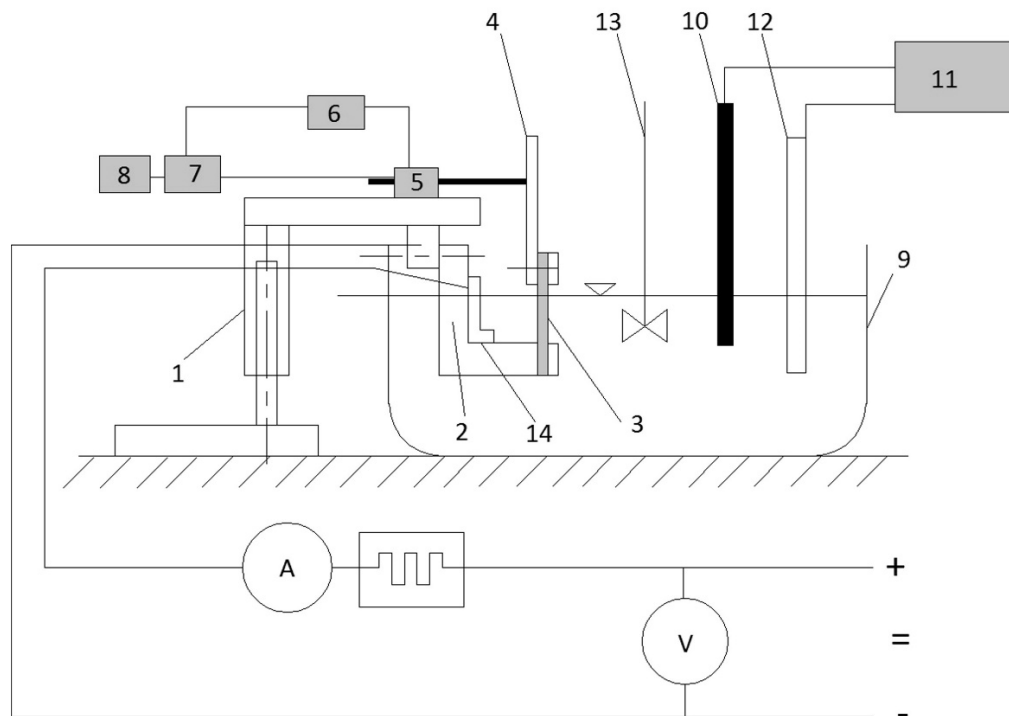
Bezilový pomalý úběr materiálu předurčil tuto metodu ke spolehlivému měření průběhů zbytkových napětí především v menších hloubkách pod povrchem. V české literatuře lze tuto techniku nalézt také pod názvy: Metoda postupného elektrolytického rozpouštění, Metoda vetknutého nosníku. V anglické literatuře lze obdobné mechanické principy měření nalézt obvykle pod názvem „Cantilever beam method“, „Beam deflexion method“, „Stripping Method“, „Relaxation method“, „Layer removal Method“, avšak žádná z takto prezentovaných metod se s výše uvedenou metodou neshoduje. Shoda panuje na úrovni principu, kterým je

měření uvolněné deformace po narušení součásti, nikoliv v kontinuálním způsobu snímání, způsobu úběru ani ve vyhodnocení a rozlišitelnosti metody.

Zařízení

V laboratoři obrábění FS ČVUT probíhá měření na zařízení FN-1 vlastní konstrukce. Zařízení je využíváno již delší dobu s určitými omezeními poplatnými době jeho vzniku - především na straně sensoriky a zpracování záznamu. Vzhledem k práci s kyselinami je celé vlastní zařízení umístěno v digestoři. Výpary z elektrolytu napadají zařízení a urychlují korozi částí a přípravků z kovových materiálů.

Popis zařízení FN-1 (Obr. 2.18): 1-stojan; 2-upínací třmen; 3-zkušební vzorek; 4-měřicí třmen; 5-indukční snímač; 6-napájecí obvody; 7-obvod pro el. nastavení polohy snímače; 8-registrační počítač; 9-nádoba s elektrolytem; 10-kontaktní teploměr; 11-automatické spínací relé; 12-topné tělísko; 13-míchadlo; 14-katoda; 15-variátor



Obr. 2.18: Schéma pro měření zbytkových napětí FN-1 [2]

Elektrolyty se liší v závislosti na rozpouštěném materiálu. Pro slitiny titanu byla v minulosti využívána směs s majoritním podílem kyseliny octové CH_3COOH a minoritními obsahy kyseliny chlorovodíkové HCl s kyselinou fluorovodíkovou HF . Lázeň je intenzivně promíchávána a temperována. Teplota se musí pohybovat mezi $18\text{ }^\circ\text{C}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$. Použité kyseliny, především HF , vyžadují přísné dodržování pravidel bezpečnosti a ochrany zdraví při práci s kyselinami, oplachy náradí, používání specifických ochranných pomůcek. Elektrolyt musí být umístěn v nádobě umožňující úplné zakrytí, jelikož se elektrolyt používá dlouhodobě.

Nádoba s elektrolytem je vyrobena z plastu odolávajícímu použitým kyselinám (HF leptá i sklo). Intenzivního promíchávání lázně se docílí mechanickým míchadlem, nebo míchání stlačeným vzduchem (rychlejší odpar, více zplodin).

Měřicí třmen (extenze) musí být co nejlehčí a co nejtužší, aby nedocházelo k přidavným deformacím u tenkých vzorků. Stojan s upínacím čepem musí zajistit upnutí vzorku a snímače deformace vzorku tak, aby bylo možné:

- vodivé spojení vzorku a (+) pólu zdroje
- ustavit měřenou plochu rovnoběžně s katodou
- snímat deformace ve směru kolmém k leptané ploše

Všechny komponenty, a povrchy kromě měřené plochy je třeba důkladně chránit proti účinku kyselin. Ochranný povlak musí být pružný, aby při ohybu nepraskal a byl dobře odstranitelný. Osvědčila se směs včelích a lyžařských vosků.

Katoda má tvar desky. Měla by být několikanásobně větší než leptaná plocha. Pro elektrolyty na bázi vodních roztoků k leptání ocelí je nejvhodnější olověná. Pro směsi kyselin na leptání slitin titanu je nejvhodnější titanová. Důležitým parametrem procesu je vzdálenost anody a katody. Se vzdáleností intenzita úběru nelineárně klesá.

Pro měření deformace je použit bezdotykový indukční snímač. Signál ze snímače je vyveden do počítače a průběh deformace je v reálném čase vykreslován do grafu. Snímač má citlivost 10^{-3} mm. V případě kontaktního mechanického měření deformace musí být snahou minimalizovat přitlačnou sílu, aby nedošlo k ovlivnění měření odporem snímače.

Existují dvě možnosti řízení procesu leptání: proudová a napěťová stabilizace. Napěťová stabilizace je vhodnější, jelikož nedochází k pasivačním pochodům a procházející proud se ustálí na určité hodnotě podle plochy anody (která se může v průběhu rozpouštění nepatrně měnit).

Zhodnocení metody

Metoda vetknutého nosníku umožňuje hodnotit pouze zbytková napětí I. druhu, a to jejich průměrné velikosti ve zvolené vrstvě. Jedná se o metodu destruktivní. Tvar vzorků rozhodně není libovolný. Musí mít vždy schopnost fungovat jako vetknutý nosník a existují i jistá omezení v jeho tloušťce (nelze jednoduše zobecnit, omezení vždy podmíněna velikostí přítomných napětí). Na druhou stranu poskytuje možnost vyhodnocovat deformaci po velmi malých krocích (5, 10 μ m). Množství a odstup kroků je do jisté míry věc pracnosti při zpracování naměřených dat, nikoliv při vlastním měření. Kroky jsou prakticky libovolné. Velkou předností metody je možnost určování napětí pro materiály, kde např. RTG difrakce podává nejednoznačné výsledky. Příkladem mohou být polymorfni slitiny titanu s fázemi α a β ,

vícefázové oceli s obsahem jemného martenzitu, nebo hrubozrné odlitky lopatek niklových superslitin. Přesnost metody je závislá na přesnosti určení deformace zkušebního vzorku a určení tloušťky odleptané vrstvy. V případě, že již existují třmeny a přípravky pro konkrétní aplikaci je v podstatě nejrychlejší pro stanovení hloubkového průběhu. Určité skupiny materiálů vyžadují individualizaci procesu po stránce parametrů a elektrolytů. Potenciální zpřesnění by mohlo nastat při aplikaci pokročilejšího elektronického řízení (měření prošlého náboje) a použití vhodného elektrolytu, který by napomohl rovnoměrnému leptání plochy.

2.9. Inovace v měřeních zbytkových napětí v posledních 10 letech

Následující odstavce ve stručnosti sumarizují nové pokroky, významné inovace, podnětné experimenty a směry současného výzkumu problematiky stanovení zbytkových napětí. Snahou bylo mapovat vědecké publikace za posledních 7 let. Publikací věnovaných způsobu měření zbytkových napětí a popisu techniky měření je velmi málo. Naprostá většina publikací je věnována výsledkům a aplikacím již známých a komerčně dostupných technik měření (především rentgenové difrakci, metodě vrtání otvoru a Barkhausenově šumu) a novost publikací spočívá primárně v oblasti aplikací.

2.9.1. Speciální aplikace

Zřejmě zajištění rozměrové stability výrobků z plastů vede k přenášení know-how o měření zbytkových napětí kovů na plasty. Pro měření zbytkových napětí se využívají výhradně mechanické a optické metody – vrtání otvoru, odebrání vrstvy a měření deformace, odleštění vrstvy s následným hodnocením změn lomu světla. Detailně o měření vrtáním otvoru a specificích aplikace na nekovové materiály pojednává článek [36].

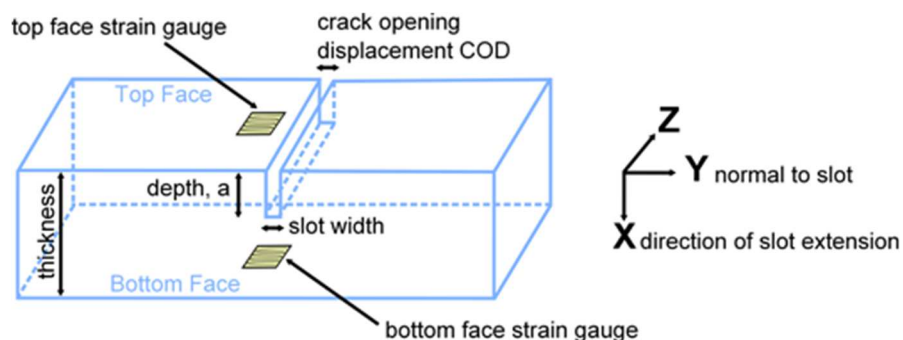
Velmi jednoduchá metoda detekce zbytkového napětí na vstříkovaných průhledných polymerních deskách byla publikována v roce 2013 [37]. V průhledných deskách vstříkovaného polykarbonátu bylo provedeno několik indentací po celé ploše desky. Na základě vyhodnocení desky pomocí polarizovaného světla byly detekovány oblasti bez napětí a místa s maximálním napětím. Přenositelnost této metody na kovové materiály je prakticky nemožná. Lze ji použít pouze na rovinné vzorky a navíc stanovuje „mapu přítomnosti napětí“, nikoliv absolutní hodnoty.

Zbytkové napětí bylo v poslední několika letech vyhodnocováno na tenkých vrstvách a povlacích. Publikace [38] popisuje experiment měření zbytkových napětí v 2,5 μm tenké

vrstvě niklu na ocelovém plechu prostřednictvím mechanické metody využívající snímání deformace vzorku po chemickém úběru vrstvy. Plech představoval vetknutý nosník, který se po odebrání vrstvy ustaví do nového stavu rovnováhy. K odstranění vrstvy bylo využito chemické leptání kyselinou dusičnou. Ke snímání průhybu nosníku bylo využito laserové odměřování. Bylo detekováno tlakové napětí jako jedna hodnota v celé vrstvě. Tato metoda využívá stejný princip jako metoda elektrolytického rozpouštění využívaná na FS ČVUT, avšak nebude zdaleka tak produktivní. Pro stanovení průběhu napětí na větší vrstvě jednoho materiálu by tato metoda narazila na základní problém. Tím je změna koncentrace relativně malého množství leptadla a nedostatečné míchání s důsledkem v nerovnoměrné rychlosti leptání.

V roce 2014 se objevila metoda přejímající principy mechanické metody vrtání sloupku, avšak posouvá princip a možnosti měření do oblastí blízkých povrchu prostřednictvím použití skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) k pozorování a měření deformací. K odprašování drážky kolem „tenzometrické růžice“ se využilo fokusovaného svazku iontů galia přímo v elektronovém mikroskopu [39]. Pozitivum této metody spočívá v tom, že posouvá tradiční mechanickou metodu měřící napětí I. druhu výrazně blíže povrchu – první čtení v hloubce jednotek μm ve srovnání s $50 \mu\text{m}$ u klasické metody vrtání sloupku.

Jako nejmladší z mechanických metod měření zbytkových napětí je uváděna metoda rozřezávání (slitting method) [12]. Tato metoda pracuje na principu uvolňování deformace při postupném prořezávání vrstev tenkým drátem (WEDM). Deformace je snímána tenzometrem lepeným na zadní straně. Využití tato metoda nachází při měření větších tloušťek, svarů plátů plechu, laserpeeningu. Velkým tloušťkám jsou poplatné také větší kroky při stanovení hloubkového profilu [40], [41]. Zbytkové napětí způsobené technologií WEDM na bocích a dně řezu je zanedbávána.



Obr. 2.19: Princip metody rozřezávání (slitting method), polohy tenzometrů [14]

V roce 2021 byl v publikován v prestižním International Journal of Fatigue způsob odvození zbytkového napětí ve svaru na základě měření mikrotvrdomosti [42]. Experiment byl prováděn na vysokopevnostních ocelích S690 a VR690, zbytkové napětí bylo stanovováno na

rozhraní svaru v tepelně ovlivněné zóně, mikrotvrdot byla měřena zatížením HV 1, výsledky zbytkového napětí byly korelovány se simulací. Vazba zbytkových napětí na zvýšené hodnoty mikrotvrdoti je v tomto případě spíše ojedinělá a rozhodně by neměl být tento přístup ke stanovení zbytkových napětí generalizován. U potvrzení výsledků simulace provedeným experimentem (navíc nepřímou metodu) lze spekulovat i o jeho účelnosti. Publikací prezentujících zajímavé způsoby měření zbytkových napětí a jejich shodu s měřením zavedenými postupy je celá řada. Obvykle se jedná o specifické aplikace a prezentují shodu na jednom konkrétním materiálu a typu vzorků. Jejich obecná použitelnost bývá velmi omezená již při prvním ohledání metodiky. Tyto články nejsou dále zpracovávány.

2.9.2. Aplikace na titanových slitinách

V poslední době se výzkumu integrity povrchu slitin Ti6Al4V intenzivně věnuje kolektiv profesora Berenda Denkena z University v Hannoveru [43], [44], [45].

V roce 2014 byl publikován rozsáhlý experiment týkající se vlivu zbytkových napětí na rozměrové změny obrobků. Ukázalo se, že zbytková napětí jsou zásadní a obtížně zjistitelnou příčinou kroucení strukturních částí a rozměrných profilů u draků letadel. V článcích se zároveň vyskytuje hodnocení mikrostrukturních změn po tepelných zpracováních.

Vliv řezné rychlosti na zbytková napětí, hloubku zpevnění a metalografickou texturu po obrábění lze nalézt v [45], [46]. Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi, případně nedostatečném přívodu procesních kapalin mohou u titanu vznikat nebezpečné alfatizované vrstvy. Alfatizovaná vrstva je výrazně tvrdší než dvoufázový základní materiál, ale také má výrazně vyšší křehkost, což je problematické u dynamicky namáhaných součástí. Křehká vrstva vytváří predispozice ke vzniku trhlinek v provozu nebo i v průběhu dokončování, a tím vede k iniciaci únavových trhlin. Alfatizovaná vrstva je tvořena v tenké vrstvě povrchu pouze fází alfa. Ta se vytváří v důsledku synergického působení vysoké teploty a alfa-stabilizujících prvků (C, O, N, H) z okolního prostředí – typicky intenzivním broušením, obráběním za sucha, nebo tepelným zpracováním na vzduchu [46].

Velice užitečné jsou poznatky o vztahu zbytkových napětí a křivek vysokocyklové únavy v publikacích [15], [16]. Autoři prezentují zvýšení meze únavy pro jednotlivé parametry asymetrie cyklického zatěžování R u povrchů s vyvozeným tlakovým zbytkovým napětím. Efekt zvýšení meze únavy se snižuje s rostoucím parametrem R . Od hodnoty parametru $R = 0,6$ již nelze pozitivní vliv prokázat. U rozsahu $R = -1$ až $0,6$ bylo místo iniciace únavové trhliny lokalizováno v podpovrchových vrstvách.

2.9.3. Používání mechanické metody s úběrem vrstev ve světě

Ačkoliv je v dnešní době měření rentgenovou difrakční tenzometrií dominantní a preferované, předchozí kapitoly uvádí několik poměrně aktuálních aplikací, při nichž je zbytkové napětí stanovováno z deformací po definovaném porušení součásti [37], [39], [41], [43], [44], [45], [47], [48].

V roce 2014 publikovala skupina prof. Berenda Denkena z University v Hannoveru metodu měření zbytkových napětí přímo na frézce vybavené obrobkovou sondou. Profil (deska) z hliníkové slitiny EN AW-7075 byl upnut na frézce a představoval vetknutý nosník. Frézka byla osazena dotykovou sondou. Po odfrézování vrstvy vždy proběhlo měření ohnutí desky a z naměřených dat bylo dopočítáno napětí ve vrstvě. Hloubky řezu při odstraňování vrstvy se pohybují v řádech desetin milimetrů až milimetrů, což předurčuje metodu k měření zbytkových napětí z hutní výroby polotovaru, nikoliv po obrábění, nebo dokonce po dokončovacích technologiích. Zaručení konstantní hloubky řezu v dalších vrstvách, kdy už je nosník v ohnutém stavu není popsáno. Navíc autoři opomněli vliv samotného frézování. Tuto problematiku superpozice napětí po různých technologických operacích řeší práce [41]. Způsob měření průhybu nosníku a stanovení nejistoty dále zpracovává publikace [48]. Chyba při měření průhybu bez uvažování natočení průřezu roste s velikostí nosníku.

Na slitině Ti6Al4V byl proveden stejným kolektivem obdobný experiment [45]. K využití hodnocení deformace nebyla použita dotyková sonda, ale tenzometr lepený na zadní straně. Publikace uvádí vazbu řezných podmínek frézování na hloubku a úroveň zpevnění vrstvy s důrazem na minimální zpevnění. Bylo provedeno porovnání výsledků s měřením rentgenovou difrakcí. Autor uvádí velmi dobrou shodu a upozorňuje na robustnost mechanických metod necitlivých na texturu a velikost zrn.

Prakticky veškeré nedostatky rentgenové difrakční tenzometrie popsané kapitole 2.8.6 vedly k použití mechanické metody za použití elektrolytického odleptávání vrstev detailně popsané v [44]. Metoda byla využita za účelem měření zbytkových napětí na Ti6Al4V termomechanicky zpracované v beta oblasti. K úběru vrstvy bylo použito elektrochemické obrábění a jemné laserové obrábění. Deformace byla měřena tenzometrem. Metoda byla využita pro laboratorní měření vzorku ve tvaru destičky. Elektrochemickým obráběním s velmi malou mezielektrodovou vzdáleností se nedosáhlo uspokojivě rovinného povrchu. Povrch byl porézní v důsledku nedostatečného odplavování bublinek kyslíku. Parametr drsnosti byl na hodnotě $R_z = 20 \mu\text{m}$ a povrch nebyl kovově lesklý - zřejmě z důvodu tvorby pasivačních vrstev. Proto se autoři přiklonili k laserovému obrábění vrstev. Parametry, elektrolyt a koncepci

zařízení pro leptání nepovažuji za vhodné a jsem přesvědčen, že proces anodického rozpouštění na FS ČVUT je již v současné době na vyšší úrovni. Přenositelnost metody použité kolektivem prof. Denkena bude zřejmě omezená ve vztahu k tvarovým plochám lopatek.

Publikace s názvem „Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal“ [49] se zabývá stanovením nejistot a chyb při měření zbytkových napětí mechanickou metodou odstraňování vrstev. Jako srovnávací metoda byla využita rengenová difrakční tenzometrie. Odstraňování vrstev bylo prováděno na 1 mm tenkém plechu nízkouhlíkové za studena válcované oceli. Úběr materiálu byl prováděn aplikací 45% kyseliny dusičné. Jednotlivé vrstvy byly odebrány v navazujících krocích chemického leptání a v těchto krocích byl také měřen průhyb plechu pomocí optického zařízení s interferometrem. Navzdory velmi uspokojivé shodě měření s výsledky komparačního měření rentgenovou difrakcí je metoda zatížena celou řadou chyb z procesu nerovnoměrného úběru vrstvy. Vzhledem k větším krokům a výpočtu průměrného napětí ve vrstvě (difrakce měří přímo v hloubce) je shoda poměrně překvapivá. Tento způsob měření je nejbližší metodě elektrolytického odleptávání vrstev vyvíjené v rámci disertační práce, avšak je v prezentované podobě zásadně hůře uzpůsobena pro spojitě měření hloubkových průběhů. Rovněž výpočtově neponižuje napětí o sumu korekcí na úběr předchozích vrstev.

2.10. Použitelnost metod pro měření lopatek z Ti6Al4V

V rámci doktorského studia byl vývoj mechanické metody měření s elektrolytickým odleptáváním vrstev primárně směřován do oblasti leteckého průmyslu a titanových slitin. Byla provedena řada aplikací metody na slitině Ti6Al4V a aplikace přímo souvisejí s přínosy pro vědu a praxi, kterým je věnována samostatná kapitola. Metoda byla vyvíjena zejména na základě požadavku pro měření průběhu zbytkových napětí od 5 μm do 0,3 mm pod povrchem a na základě zhodnocení aktuálně známých metod.

Dílčí srovnání metod pro měření obdobné úlohy bylo řešeno i v některých vědeckých člancích v posledním desetiletí [5], [43], [44], [45]. Články mnohdy uvádí popis experimentů a otevírají diskuzi ohledně neshody výsledků obdržených různými metodami spíš, než aby poskytovaly jasné a odůvodněné stanovisko o tom, jaký přístup je správný pro konkrétní aplikace. Následující pasáže sumarizují pouze některé, ale klíčové přednosti a nedostatky jednotlivých metod pro výše definované požadavky měření.

Tab. 2.4: Hodnocení použitelnosti metod pro konkrétní aplikaci – Ti6Al4V

Metoda	Výhody	Nevýhody	Použitelnost
Magnetické metody	nedestruktivní	nutnost kalibrace jinou metodou	NE
	rychlá, mobilní	nutný převod magneto-elastického parametru na hodnotu napětí [12],[50]	
		omezení na feromagnetické materiály	
Ultrazvukové metody	nedestruktivní	citlivost metody na změnu tvrdosti, textury, hust. dislokací, struktur [12]	NE
	rychlá	problematická definice hloubky vnikání [47]	
		nutná kalibrace na tažených vzorcích [30]	
Chemické metody + metody křehkých laků		destruktivní	NE
		nutné přešetřování, přebrušování součástí	
		pouze kvalitativní hodnocení (tlak/tah)	
		nemožnost určení hloubkového profilu	
Metoda otvoru, sloupku, rozřezávání	vhodné pro objemová pnutí, velké obrobky, svařence, odlitky [40],[41],[47]	destruktivní	NE
	lze určit směr hlavních napětí	předpoklad homogenního napětíového pole je v oblasti celé ruzice [30], [31]	
		první záznam na rovném vzorku je 50 µm pod povrchem (pro rovný povrch)	
		kroky do hloubky minimálně v řádu setin milimetru	
		poměrně nákladné	
		nebezpečí ovlivnění měřených hodnot (silově i tepelně při úběru)	
Difrakční metody	nedestruktivní pro limitní povrchové vrstvy	destruktivní prohloubkové průběhy	ANO
	perspektivní a rozvíjející se metoda	problematická u vícefázových materiálů s rozdílnou krystalickou strukturou jednotlivých fází [1],[44]	
	standardizace metody	vyžaduje jemnozrnnou strukturu [6],[12],[33],[44]	

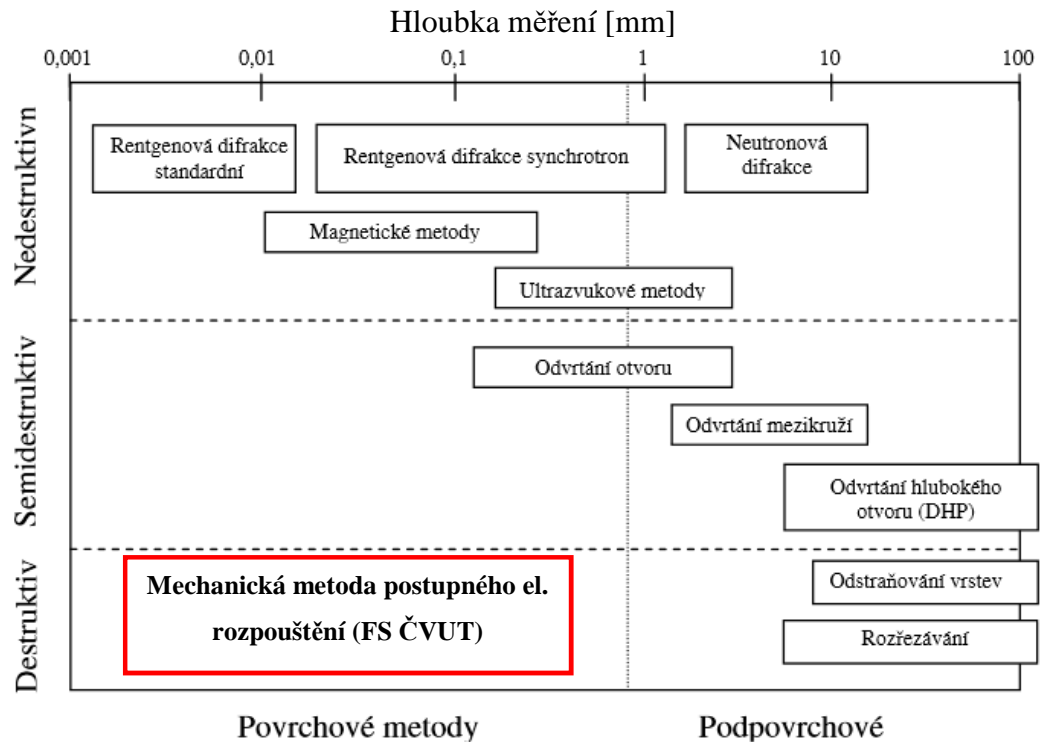
Metoda	Výhody	Nevýhody	Použitelnost
	schopnost měřit zbytková napětí 2. řádu	pro hloubkové průběhy velice nákladné a časově náročné	
	současné měření 2 kolmých směrů (σ_L a σ_T)	stabilita výsledků závislá na fázovém složení a velikosti zrna	
Mechanická metoda postupného elektrolytického odleptávání (FS CVUT)	jasné rozlišení tahu, tlaku a dosažené hloubky leptání	destruktivní	ANO
	kontinuální snímání na jedno upnutí	práce s nebezpečnými látkami ve větších objemech	
	bezsilový úběr, bez tepelného ovlivnění	relativně velká chyba při odečtu ze závislosti deformace v čase	
	potenciál ke zpřesnění	nutnost odladění techniky leptání pro jednotlivé aplikace	
		tvarová omezení vzorků	

Na základě provedeného srovnání požadavků na měřicí metodu vyhovuje pouze metoda rentgenové difrakce používaná v režimu inkrementálního úběru elektrolytickým odleštěním a mechanická metoda postupného elektrolytického odleptávání s kontinuálním snímáním deformace vyvíjená v rámci disertační práce.

Obdobná situace je u měření turbínových lopatek z niklových slitin, které se vyrábějí v naprosté většině případů metodami přesného lití. Odlitky mají přirozeně poměrně hrubozrnnou strukturu s citelným dendritickým odmíšením a výrazným rozptylem velikosti zrna. Zrna mají běžně rozměr úhlopříčky v řádu milimetrů, aby lopatky mohly dostatečně odolávat tečení. Publikace [44] uvádí jako vhodnou velikost zrna pro rentgenovou difrakční tenzometrii do 30 μ m (střední úhlopříčka). Praktické zkušenosti z projektu PBS Broušení TA04010600 potvrzují nestabilitu výstupů této metody pro měření zbytkových napětí na Inconelu 713LC, a to primárně z důvodu výrazné asymetrie zrna a rozptylu jejich velikosti. Na broušené ploše zámku téže lopatky bylo provedeno po délce několik bodových povrchových měření s rozptylem -200 až -900 MPa. Zpochybnitelnost výsledků lze navíc podpořit přítomností brusných trhlin, které by se ve vrstvě s takovými tlakovými napětími vůbec vyskytovat neměly. Problematice integrity povrchu lopatek z niklových superslitin je věnována kapitola 8.

Z pohledu dělení metod měření zbytkových napětí je rovněž důležitý rozsah hloubek pod povrchem, ve kterých je schopna metoda napětí zjišťovat. Z tohoto pohledu lze zavést rozdělení na metody povrchové, které jsou schopny hodnotit ovlivnění povrchu technologií, jíž byl povrch zhotoven a metody podpovrchové zjišťující vnitřní zbytková napětí působící ve výrazně

větších objemech. Pomyslná hranice mezi těmito skupinami není přesně definována. Na Obr. 2.20 [51] je přehled hloubek, v nichž lze realizovat měření vybranými metodami. Je zde rovněž zanesena oblast aplikace vyvíjené mechanické metody postupného elektrolytického odleptávání. Jak plyne z obrázku metoda je schopna pokrýt prakticky největší oblast aplikací. Rozdělení není omezené pouze na titanové slitiny, ale je obecně platné pro všechny materiály.



Obr. 2.20: Rozdělení metod dle hloubky měření [51]

3. Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je systematické určení vlastností integrity povrchu v závislosti na použité technologii u perspektivních technických materiálů využitelných v pokročilých technických oborech jako je letectví, energetika, medicinský a zbrojní průmysl.

K dosažení tohoto cíle je nutné vyvinout efektivní a dostupnou metodu měření zbytkových napětí a komplexně analyzovat vybrané technologické vzorky reprezentující stavy, které se mohou vyskytovat v různých fázích rozpracovanosti výrobků ve výše zmíněných oblastech.

Na základě kritické rešerše v kapitole 2.10 *Použitelnost metod pro měření lopatek z Ti6Al4V* byly identifikovány metody měření zbytkových napětí, které umožňují zjišťování hloubkových průběhů zbytkové napjatosti v povrchu součástí. Kapitola 2.9 *Inovace v měřeních zbytkových napětí v posledních 10 letech* prezentuje aktuální směry vývoje i aplikace metod pro měření zbytkových napětí. Z obsahu obou kapitol vyplývá potřeba vývoje robustní metody měření hloubkových profilů zbytkových napětí, kterou lze spolehlivě využít zejména k hodnocení vlivu dokončovacích a zpevňovacích technologií. Na základě provedené rešerše bylo rovněž zjištěno, že vyvíjená mechanická metoda měření průběhů zbytkových napětí je jedinečná koncepcí zařízení i zpracováním naměřených dat. V konfiguraci, která je předmětem kapitoly 4 není metoda publikována. Doposud využívané jsou pouze její dílčí principy a způsoby úběru materiálu. Vymezení se vůči existujícím publikacím uvádějícím tyto dílčí principy je předmětem kapitoly 2.9.3 *Používání mechanické metody s úběrem vrstev ve světě*.

Ke splnění hlavního cíle je potřeba dospět splněním dílčích cílů:

1. Vývoj mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí s využitím postupného elektrolytického odleptávání vrstev a její ověření porovnáním se standardizovanou měřicí metodou
2. Experimentální určení vlastností podstatných pro integritu povrchu vzorků s úpravami použitých experimentálních metod pro garantovanou opakovatelnost výsledků
3. Určení vazeb mezi použitou technologií a dosaženými vlastnostmi integrity povrchu (zbytkovými napětími, mikrotvrdostí a lokálními změnami mikrostruktury) pro jednotlivé materiály

4. Vývoj metody měření zbytkových napětí

Na základě provedené rešerše dosavadních publikací lze prohlásit, že mechanická metoda vyvíjená na FS ČVUT vychází z obecně uznávaných a používaných principů chování mechaniky kontinua, ale je unikátní koncepcí zařízení.

Základní koncepce metody byla již popsána v přehledu způsobů měření zbytkových napětí – kapitola 2.8.7. V rámci disertační práce byla metoda zásadně přepracována primárně po stránce senzoriky, zpracování dat a techniky úběrů s cílem eliminovat výrazné variability na straně měření a zproduktivnění metody. Vývojem dotčené body jsou předmětem kapitol 4.1 až 4.4.

Zproduktivnění metody umožnilo nasazení technologie do vývojových zkoušek dokončovacích operací lopatek leteckých motorů v rámci společného projektu FS ČVUT, GE Aviation Czech a SPM Italy v letech 2016 až 2021. V květnu 2019 byla laboratoř auditována a následně certifikována mezi ověřené dodavatele pro potřeby programu vývoje skupiny GE Aviation.

Pro vývoj a zpřesnění metody byla klíčová rekonstrukce digestoře s novým měřicím stojanem a zakoupení sond pro bezdotykové měření vzdálenosti.

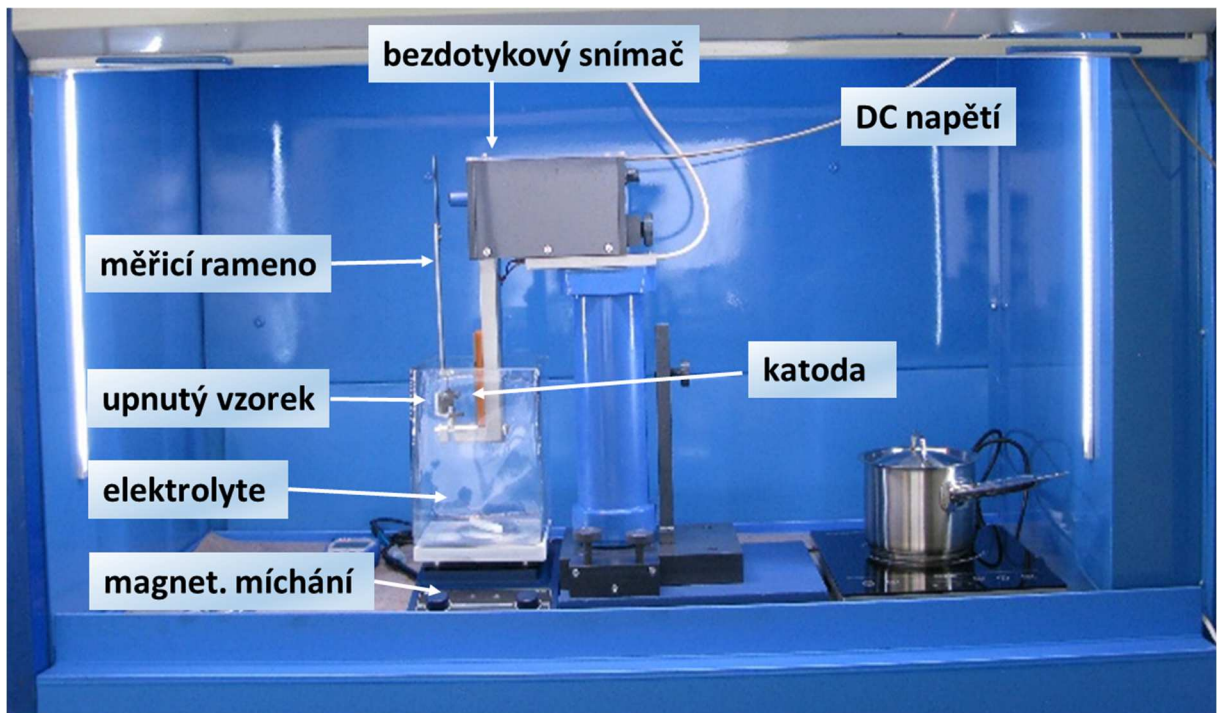
4.1. Základní koncepce měřicího zařízení

Za účelem omezení kmitání záznamu deformace byl navržen a vyroben nový měřicí stojan. Stojan má větší plochu katody než předchozí verze. Těžiště stojanu bylo záměrně posunuto mimo osu sloupku. Stojan je montovaný z jednotlivých profilů a pro případ nutnosti větší vzdálenosti vzorku lze jeho spodní rameno prodloužit. Prodloužení spodního ramene je omezeno možností vysunutí trubky nesoucí zašroubované čidlo. Vysunutí čidla z jeho krytu je možné v rozsahu 20 až 80 mm. Čidlo se pohybuje na saních, které jsou umístěny v krytu, aby nedošlo k jejich předčasnému koroznímu napadení (totéž platí o čidle a kabeláži). Prostor čidla a jeho posuvu je mírně přetlakován stlačeným vzduchem. V případě většího rozsahu, například měření velkých ložiskových kroužků je nutno provést posunutí saní úpravou podkladové desky.

Na svislé části stojanu je instalována katoda. Katoda je upevněna do izolační podkladové destičky o rozměrech 50x100 mm, která prakticky definuje maximální plochu katody. Katody jsou výměnné a doposud byly používány z olova a základní nerezové austenitické slitiny AISI 304.

Celý sloupek má možnost vysunutí a otočení mimo nádobu s elektrolytem. Konstrukce stojanu má přípravu pro umístění pneumatického válce. Vzorek upnutý v přípravku se po

maskování okolí vyšetřované plochy umísťuje do nádoby s elektrolytem. Tvar nádoby není pevně předepsán. Lze používat běžné laboratorní nádoby z chemicky odolného polykarbonátu, nebo boritanového skla (např. Simex). Nádoba je umístěna na magnetické míchačce, která pomalým mícháním zajišťuje primárně teplotní stabilizaci vzorku a strhávání bublinek kyslíku, aby se zamezilo selektivnímu leptání v jejich okolí – obvykle na vrchním rozhraní vyšetřované plochy.



Obr. 4.1: Měřicí zařízení v konfiguraci pro měření lopatek

Vhodná sensorika pro snímání deformace

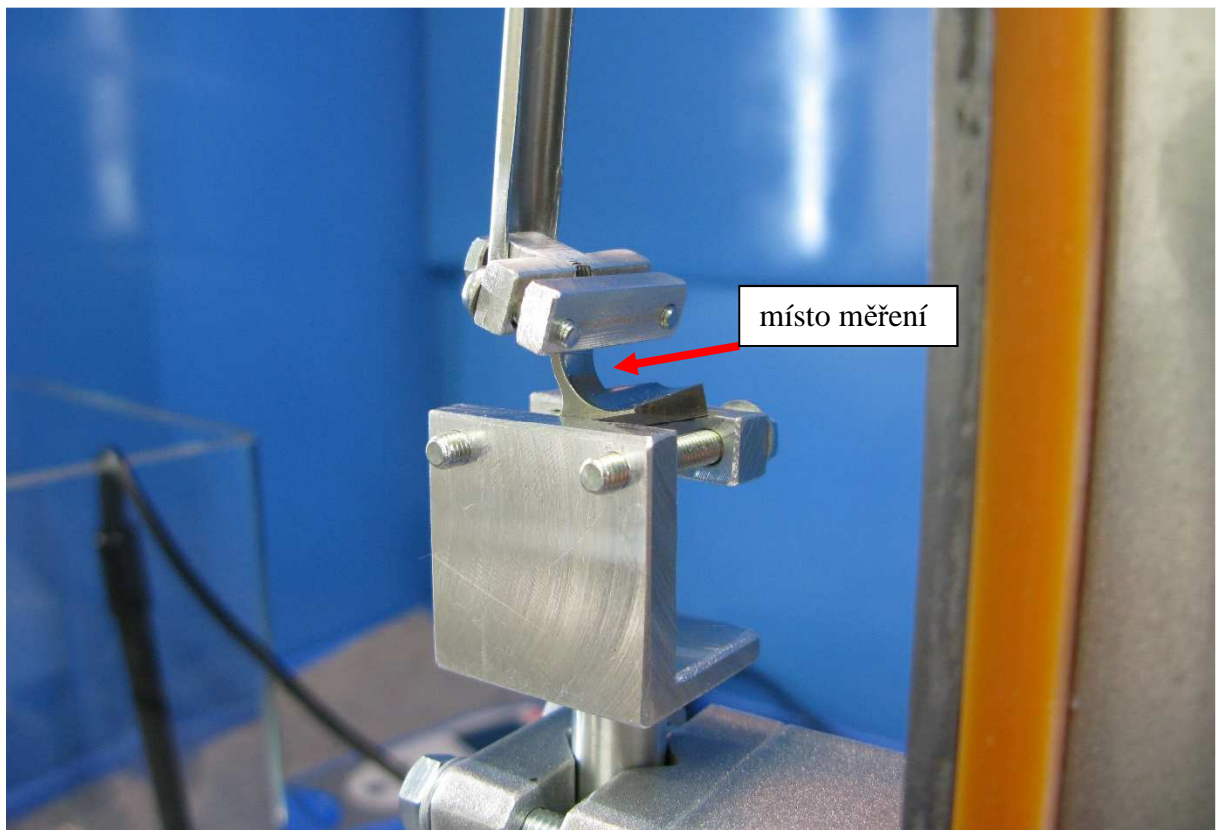
Na základě dosavadních zkušeností s měřeními vzorky byly vybrány a testovány 3 sondy. Dvě sondy výrobce Balluf pracují na indukčním principu a pokrývají rozsah měření průhybu od 2 do 6 mm. Mimo tento rozsah výrobce již nezaručuje lineární závislost mezi vzdáleností a výstupním napětím. Pro okraje rozsahů lze jednoduše vytvořit cejchovní křivky matematicky aproximovatelné rovnicí hyperboly a mocninné funkce a záznam v příslušném intervalu korigovat, nicméně výměna čidla s příslušným rozsahem je ve výsledku časově ekonomičtější. Pro měření velmi tuhých vzorků (eventuálně malých napětí) s očekávaným malým průhybem bylo zakoupeno čidlo Microepsilon NCDT pracující na principu vířivých proudů s rozsahem linearit 0 až 2 mm a minimalizovaným časovým driftem měřené veličiny. Vzhledem ke shodnému výstupu 0 až 10V a stejným rozměrům závitu snímačů je zařízení přestavitelné během 1 hodiny.



Obr. 4.2: Bezdotykový snímač vzdálenosti Mikroepsilon NCDT

4.2. Upínací přípravky a prodloužení

Měřicí zařízení vyžaduje návrh a výrobu upínacích přípravků a prodloužení. Ty mohou být univerzální pro technologické vzorky (pásky a jiné prizmatické průřezy), nebo vyloženě jednoúčelové tvarově optimalizované například pro tvarové vzorky a segmenty lopatek. Opakované upnutí výrazně zjednodušuje a zpřesňuje měření. Eliminuje se uvolnění deformace mimo osu čidla vlivem chybného upnutí a natočení roviny ohybu. K výrobě upínacích přípravků lze využít libovolný elektricky vodivý materiál a libovolnou výrobní technologii. U složitých přípravků lze efektivně využít aditivní technologie.



Obr. 4.3: Prizmatické upínání svěráčku s kulisou pro měření segmentu koryta lopatky

Prodloužení se upíná na vzorek nad měřenou plochou a slouží k násobení výchylky způsobené ohybem. Při návrhu je vhodné využít materiály s nízkou hmotností a dostatečnou tuhostí, nicméně zatížení od proudění elektrolytu a průhybu vlastní hmotností jsou minimální. V praxi se osvědčila kombinace leteckého duralu na upínací část, nerezový plech (tl. 0,5 mm) ohnutý do tvaru U-profilu a výstřižek tenkého plechu jakožto detekční plocha pro senzor deformace.



Obr. 4.4: Měřící ramena připevněná na vzorcích

4.3. Software - zpracování deformačních křivek

Do roku 2016 byl záznam deformace v čase zpracováván ručním odečítáním grafického záznamu na papíře v předem stanovených intervalech – přibližně 15 nerovnoměrně rozložených bodů na průběh do hloubky 0,2 mm. Původní odečítání intervalů ze záznamu bylo rovněž extrémně zdouhavé a z důvodu pracnosti by neumožňovalo provedení experimentů v zamýšleném rozsahu.

Digitalizace měření sebou přinesla jeden významný problém, a tím byl počet naměřených hodnot. Tisíce odečítaných hodnot limitovaly možnosti volby výpočetního softwaru, který bylo možné využít. Po zvážení zbyly jen dvě možnosti: MS Office Excel a SW Matlab. S ohledem na větší rozšíření i jeho větší znalosti uživatelem (resp. vyhodnocujícími), byl zvolen jako první volba SW Excel s možností programovat makra ve Visual Basic rozhraní.

Postup, který byl využíván dříve při grafické metodě záznamu dat, bylo nutné pro automatizované zpracování přizpůsobit. První, nejjednodušší úkol, spočíval v načtení dat ze záznamového SW ve formátu *.dat. Jelikož tato naměřená data mají pevnou strukturu, byla zvolena, s ohledem k dalším skutečnostem, možnost vkládat tato data přes schránku. Makro Excelu samo zajistí nejen načtení vlastních naměřených hodnot, ale i načtení dalších nutných

informací ze záznamu, jako je např. interval odečítání hodnot deformace, informace o vzorku, obsluze a podmínkách.

Dalším krokem, který bylo nutné naprogramovat, je určení naměřených hodnot, které budou určené pro výpočet zbytkového napětí. U grafického záznamu byl tento krok stěžejní, kladl velké požadavky na zkušenou obsluhu a byl zdrojem variability měření. U digitalizovaných naměřených hodnot je řešení tohoto kroku velmi obtížné z důvodu nutnosti vytvoření spojitého průběhu za současné eliminace chvění a náhodných vnějších otřesů. Ty byla schopna zkušená obsluha na grafickém záznamu identifikovat, ignorovat, nebo vhodně graficky proložit. V průběhu vývoje softwaru bylo potřeba vyjít z několika základních poznatků:

- Pro zpracování počítačem je nejlepší proložit všechna naměřená data vhodnou křivkou a tuto křivku teprve použít pro výpočet velikosti zbytkových napětí. Pouhý jednoduchý intervalový výběr záznamu deformace omezuje možnosti práce s výslednými profily zbytkových napětí.
- Na základní průběh se superponuje souvislý rozkmit elektrického obvodu, mechanické vibrace od míchání a odvětrání digestoře. Klíčová je volba způsobu filtrace dat a matematické zpracování průběhu, aby se odstranila chyba odečtu a úplně se při této činnosti eliminoval lidský faktor.
- Míra závažnosti superpozice chvění na deformační křivku se liší v závislosti na absolutních hodnotách měřené deformace a také na tuhosti vzorku. Situaci matematického zpracování komplikují zákmity deformace způsobené okolními vlivy – náraz, dovření dveří, dupnutí v místnosti, sepnutí kompresoru ve vedlejší místnosti.
- Nejlepší regresní křivkou, která vystihuje průběh naměřených zbytkových napětí, je polynom. Stupeň polynomu není možné zobecnit a bude dále nutná kontrola obsluhy při vyhodnocování. Polynom menšího stupně plně neaproximuje křivku a nevystihne všechny inflexní body, polynom vyšších stupňů oproti tomu přidává neexistující inflexní body.

Po vyřešení těchto problémů, které mohou nastat při vyhodnocování, již bylo postoupeno k vlastnímu programování. Kde to bylo možné, bylo upřednostněno naprogramování Excelu pomocí vzorců namísto programování ve Visual Basic. Nové zpracování využívá sérii maker v prostředí MS Excel ke třídění dat, ořezu deformační křivky o teplotní stabilizace a k analýze dat.

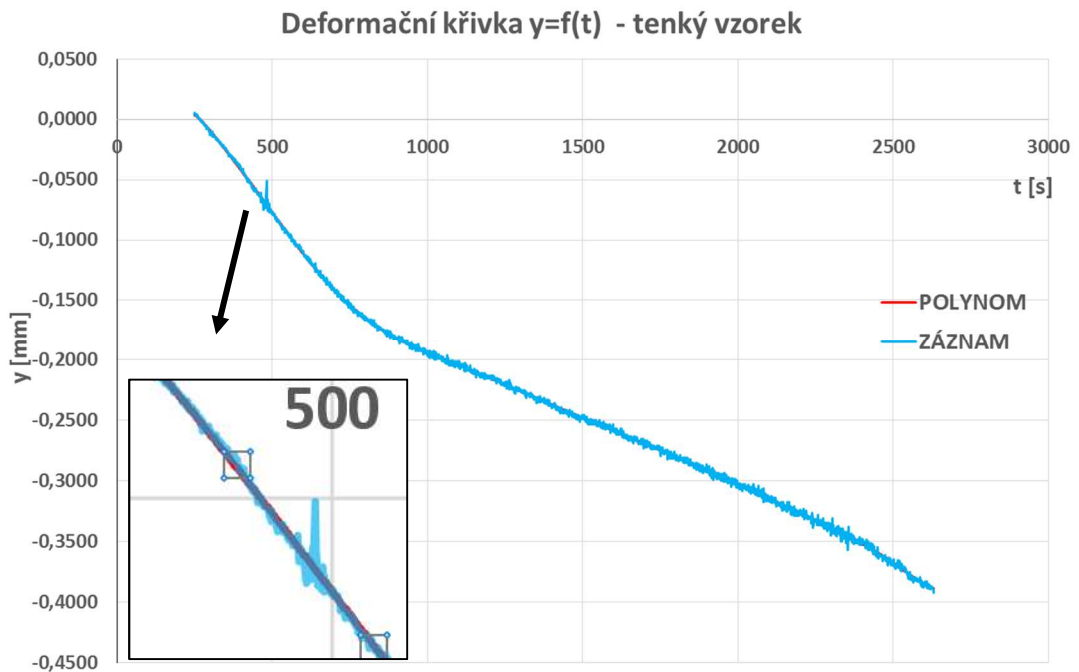
Rozkmit záznamu software eliminuje vlečeným průměrem předchozích záznamů. Náhlé výkmity záznamu lze pomocí podmínek diference mezi předchozími odečty eliminovat. Podmínkou pro eliminaci je nárůst oproti předchozímu výkmitu o více než trojnásobek. Výkmit je ignorován pouze trvá-li odchylka záznamu méně než 10 hodnot (10 sekund), jinak není podmínka aplikována. Tyto krátkodobé výrazné výkmity záznamu (např. Obr. 4.6) je možné zanedbat s ohledem na počet měřených hodnot a intervalu odečítání naměřených hodnot. Například na modelovém záznamu s 2000 hodnot a stanovením hloubkového profilu do hloubky 0,15 mm bude zanedbání 10 hodnot (10 sekund záznamu) představovat posun průběhu podél osy y o 0,5 %, což představuje 0,75 μm . Je třeba poznamenat, že zkušební obsluha v době měření do prostoru zařízení nevstupuje a nutnost této eliminace výkmitů je velmi ojedinělá.

Uživatel navolí oblast záznamu, při níž docházelo k úběru materiálu a měření uvolněné deformace. Oblasti teplotní stabilizace soustavy, případně po vypnutí zdroje jsou na základě zadání času zahájení a ukončení elektrolytického rozpouštění oříznuty. Zbývající oblast naměřených hodnot se potom uživateli zobrazuje spolu s regresní křivkou tak, aby osoba, která měření vyhodnocuje, mohla snadno určit optimální stupeň polynomu. Optimální stupeň polynomu se obvykle u měřených vzorků pohybuje mezi stupni 9 a 13 a jeho hodnota je závislá na průběhu deformace. U všech stupňů polynomu je třeba vždy kontrolovat shodu náhrady polynomem s naměřenými daty. Zejména citlivé jsou konce měření u proložení vyššími stupni polynomu, kde může docházet například ke strmému a bezdůvodnému obratu ze stavu stabilních vyrovnávacích napětí zpět k vysokým tlakům a tahům. Z tohoto důvodu je vhodné odleptávat vždy o cca 10 % větší hloubku, než je požadované stanovení hloubky profilu, aby mohl být konec záznamu jednoduše ignorován.

Po zjištění regresní závislosti již není pro obsluhu velkým problémem tuto závislost použít pro výpočet hodnot zbytkových pnutí. Následně jsou jednotlivé koeficienty exportovány do samostatného makra. Obsluha softwaru je vyzvána k zadání geometrických a materiálových charakteristik (prizmatický nosník). Na základě zadání geometrických charakteristik je vytvořen polynom hloubkového profilu zbytkových napětí a vykreslen průběh. Vzhledem k matematickému popisu lze zadat i inverzní úlohu k vykreslení průběhu a v libovolné hloubce nechat vyvolat hodnotu zbytkového napětí a přírůstek deformace.

$l = 2,4$	šířka odleptané plochy [mm]
$a = 216$	délka měřícího třmenu(rameno) [mm]
$H = 0,272$	celková odleptaná hloubka [mm]
$E = 113000$	modul pružnosti [Nmm^{-2}]
$h = 1,2$	tloušťka vzorku(původní) [mm]

Obr. 4.5: Zadávané geometrické charakteristiky výpočtu



Obr. 4.6: Záznam deformace proložený polynomem

4.4. Vývoj elektrolytického rozpouštění

K porušení rovnováhy vzorku a uvolnění snímané deformace je třeba zvolit vhodnou metodu, která nevede k tepelnému zatížení vyšetřovaného povrchu a nevyvozuje v povrchu další parazitní zbytková napětí od mechanického zatížení. Chemický a elektrochemický úběr představují jediné možné a do současné koncepce integrovatelné způsoby bezsilového úběru. Vzhledem k obtížnému řízení chemického leptání a omezené linearitě úběru v čase bylo od tohoto způsobu upuštěno, nicméně lze ho použít pro speciální případy. Předmětem návrhu a optimalizace se proto stalo elektrolytické rozpouštění, u kterého lze z formálního hlediska rozlišovat režimy leptání a leštění. Z pohledu potřeby odstranění tenkých vrstev, delší procesních časů měření a potřebné kvality povrchu odebírané plošky bylo na elektrolytický

úběr nahlíženo jako na leštění, a to jak v rešeršní činnosti na počátku vývoje, tak v průběhu vlastní optimalizace.

4.4.1. Potenciálně vhodné elektrolyty

Základním a uceleným zdrojem poznatků o leštění titanových slitin byla Výzkumná zpráva o leštění titnu od doc. Mejty z Katedry organické chemie VŠCHT z roku 1990 [52]. Tato výzkumná zpráva popisuje chování slitin VT6 (ekvivalent Ti6Al4V) a VT8 při elektrochemických dějích, uvádí přehled možných elektrolytů, polarizační řivky pro vybrané elektrolyty a upozorňuje na značná zdravotní rizika, která omezují nasazení této technologie na povrchové leštění tvarově složitých dílů. Z uvedeného zdroje byly převzaty základní poznatky pro technickou praxi a byly dále využívány v procesu optimalizace pro aplikaci měření zbytkových napětí. Práce konstatuje silnou tendenci k tvorbě pasivačních vrstev, vhodnost použití pulsní techniky leštění k rozbourání pasivační vrstvy startovacími pulsy, nevhodnost přítomnosti vody (i jako produktu reakce v průběhu použití) v elektrolytech, schopnost narušování pasivní vrstvy ionty F^- , NO_3^- a Cl^- (ClO_3^- , ClO_4^-), problematiku stavby aparatury a ekologickou zátěž při použití HF^- . Práce uvádí 14 typů známých elektrolytů. 8 typů elektrolytů bylo podrobeno testování a dva elektrolyty byly doporučeny jako potenciálně vhodné:

- 65 % H_2SO_4 + 20 % HF + 15 % glycerol
- 40 % H_2SO_4 + 20 % HF + 40 % HNO_3

Téměř shodné elektrolyty používané pro leštění chirurgických stentů uvádí publikace [53]. Práce dále hodnotí jako silně nevhodné elektrolyty s obsahem kyseliny fosforečné H_3PO_4 z důvodu periodické pasivace. Veškeré elektrolyty s obsahem kyseliny fluorovodíkové přinášejí nepříjemné ekologické a zdravotní problémy. Bez ohledu na použitý elektrolyt lze očekávat potřebná napětí na soustavě v rozmezí $U = 10$ až 55 V, proudové hustoty $J = 0,5$ až 2 $A \cdot cm^{-2}$, teploty v rozmezí 0 až 60 °C.

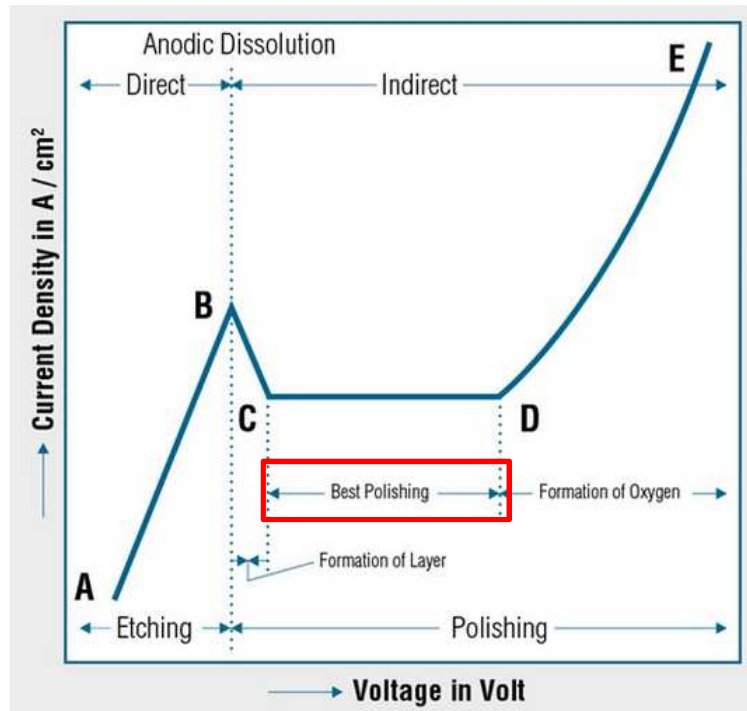
Vzhledem k zdravotním aspektům použití kyseliny fluorovodíkové byly dále hledány a testovány pouze elektrolyty s obsahem iontů Cl^- . Základem těchto elektrolytů je silná oxidační kyselina chloristá $HClO_4$. Kyselina je k dostání v koncentraci okolo 70 %, nese s sebou vyjma akutního poleptání skrytá zdravotní rizika, nerozpouští polyethylenové, polykarbonátové, ani skleněné nádoby. Představuje nebezpečí v podobě exploze nezředěné kyseliny při ohřevu nad 45 °C a je tedy potřeba dbát na její uskladnění. Ze studia vědeckých publikací [54], [55], [56] vyplývá možnost použití tohoto elektrolytu v kombinaci s butanolem, metanolem a kyselinou octovou. Autoři obdrželi přijatelné výsledky i bez temperace, za použití

platinové katody a v oblasti napětí 10 až 40 V, proudových hustot 0,1 až 0,3 A.cm⁻². Elektrolyty na bázi kyseliny chloristé lze po technické stránce využít i pro leštění nerezových ocelí a niklových slitiny, nicméně vzhledem k ceně lze pro tyto materiály nalézt levnější alternativy.

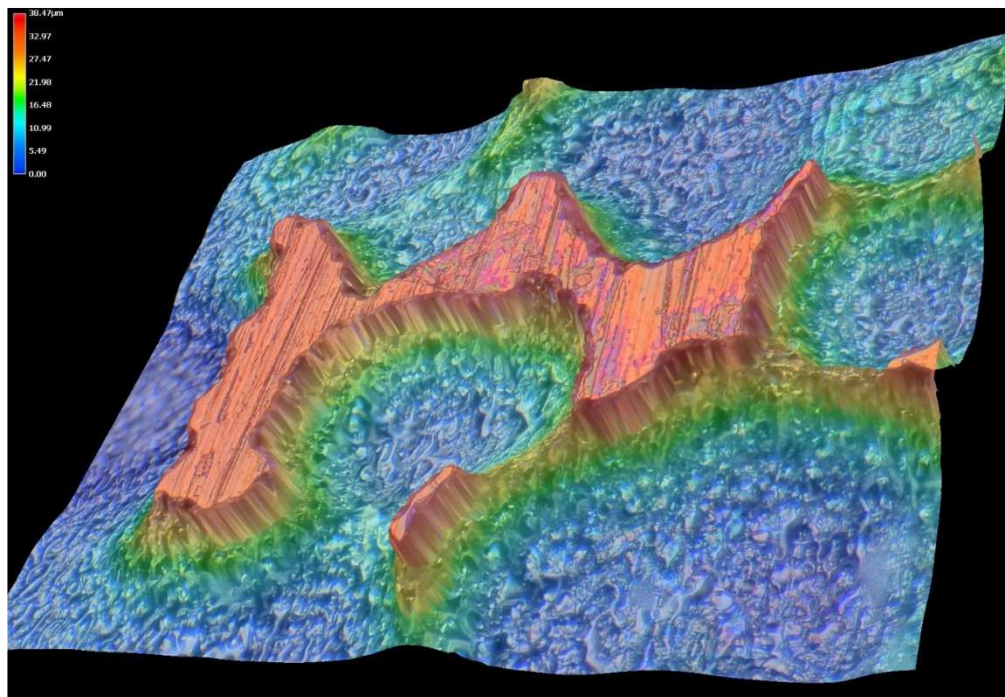
4.4.2. Testování elektrolytu na bázi HClO₄

Testování elektrolytu bylo prováděno přímo v zařízení pro měření zbytkových napětí, především z důvodu možné interakce s ostatními materiály zařízení, osazení univerzální olověnou katodou a také z důvodu proudění elektrolytu okolo vyšetřované plochy. Pro eliminaci počtu pokusů a systematické určení oblasti leštění byla pro titanovou slitinu a austenitickou nerezovou ocel vytvořena experimentální závislost proudové hustoty J [A/dm²] na napětí U [V]. Elektrolyt se skládal ze 135 ml kyseliny chloristé HClO₄, 1300 ml methanolu CH₃OH a 700 ml 2-butoxy ethanol CH₃(CH₂)₃OCH₂CH₂OH. Mezielektrodová vzdálenost byla zvolena 55 mm, teplota elektrolytu 22 až 25 °C.

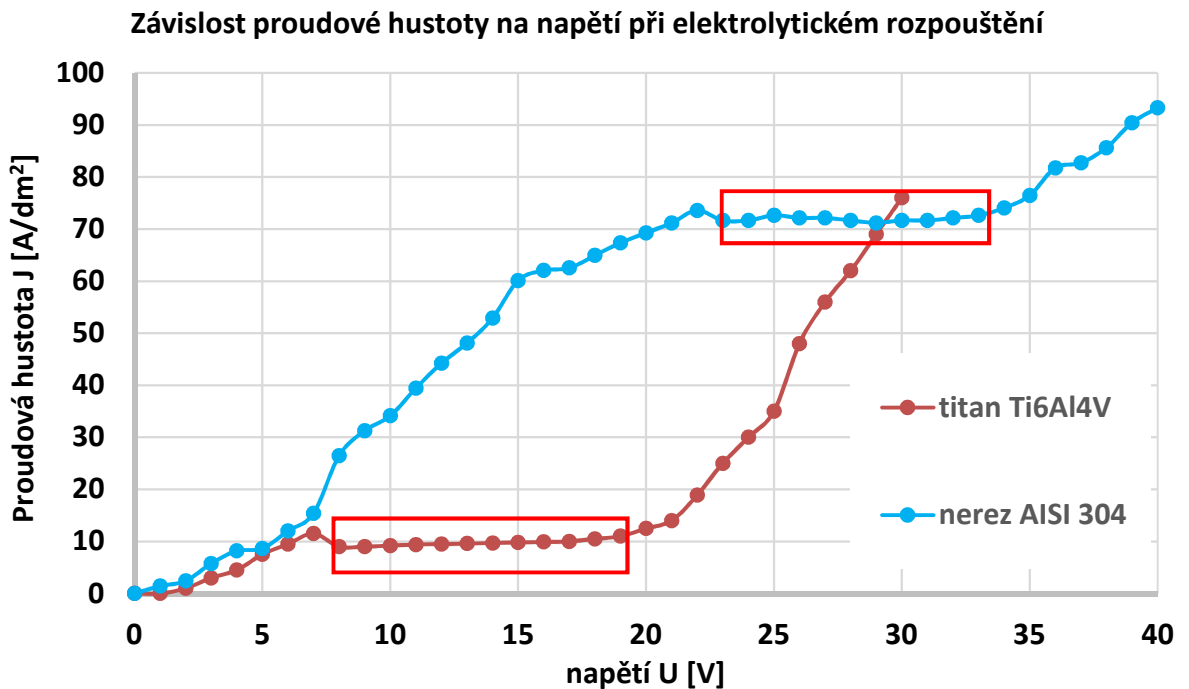
Z naměřených závislostí je patrná jasná odlišnost reálného průběhu (Obr. 4.9) od průběhu teoretického (Obr. 4.7), který lze nalézt v literatuře. V literatuře lze nalézt idealizované průběhy obvykle bez konkrétních hodnot. V případě vědeckých publikací zase nastavení experimentu neumožňuje (zejména z důvodů materiálů katod, temperování a mezielektrodové vzdálenosti) přímé použití potenciálových křivek. Na Obr. 4.7 je příklad typické potenciálové křivky s vyznačením charakteristických oblastí. Ve vzestupné části A-B by mělo docházet k leptání, což by po stránce úběru nebylo rozhodně přípustné u vícefázových slitin z důvodu selektivního leptání fází. Toto selektivní leptání bylo v průběhu technologických zkoušek pozorováno na alfa fázi (Obr. 4.8). Sestupná oblast B-C by měla být charakteristická formováním viskózní vrstvy a prudkým poklesem rychlosti rozpouštění. V případě technologických zkoušek tento jev, stejně tak jako ostrý přechod do tvorby bublin kyslíku nebyl pozorován. Lešticí plato C-D představuje oblast nejvhodnějších parametrů leštění. Navzdory nárůstu napětí příliš neroste proudová hustota, v této oblasti lze rychlost rozpouštění efektivně řídit a nedochází k zásadnímu opotřebení elektrolytu. Pro titanovou slitinu lze toto plato vymezit napětím 8 až 20 V, kdežto pro nerezovou ocel napětím 24 až 33 V. Z pohledových vlastností je vhodné se držet v horní polovině tohoto intervalu. Horní hranici tohoto intervalu je vhodné opravdu nepřekračovat (zejména u nerezové oceli), jelikož dochází k rychlejší degradaci elektrolytu. Tu lze částečně kompenzovat doplňováním směsi alkoholů (kompenzace vývoje plynů na elektrodách), nicméně s většími proudovými hustotami dochází k ohřevu vzorku i elektrolytu.



Obr. 4.7: Teoretická závislost proudové hustoty na napětí s vyznačením oblasti C-D vhodné pro leštění [57]



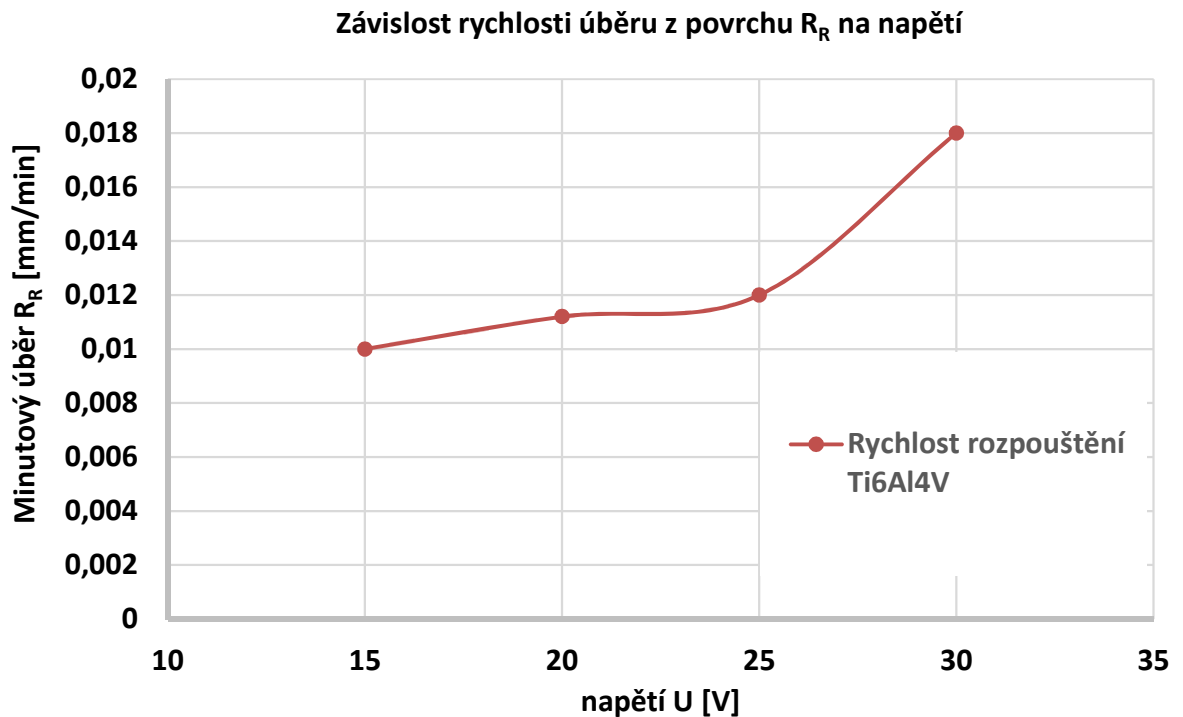
Obr. 4.8: Výšková mapa - selektivní leptání alfa fáze a nedotčené obálky beta fáze



Obr. 4.9: Experimentálně zjištěné závislosti proudové hustoty na napětí pro Ti6Al4V a AISI 304

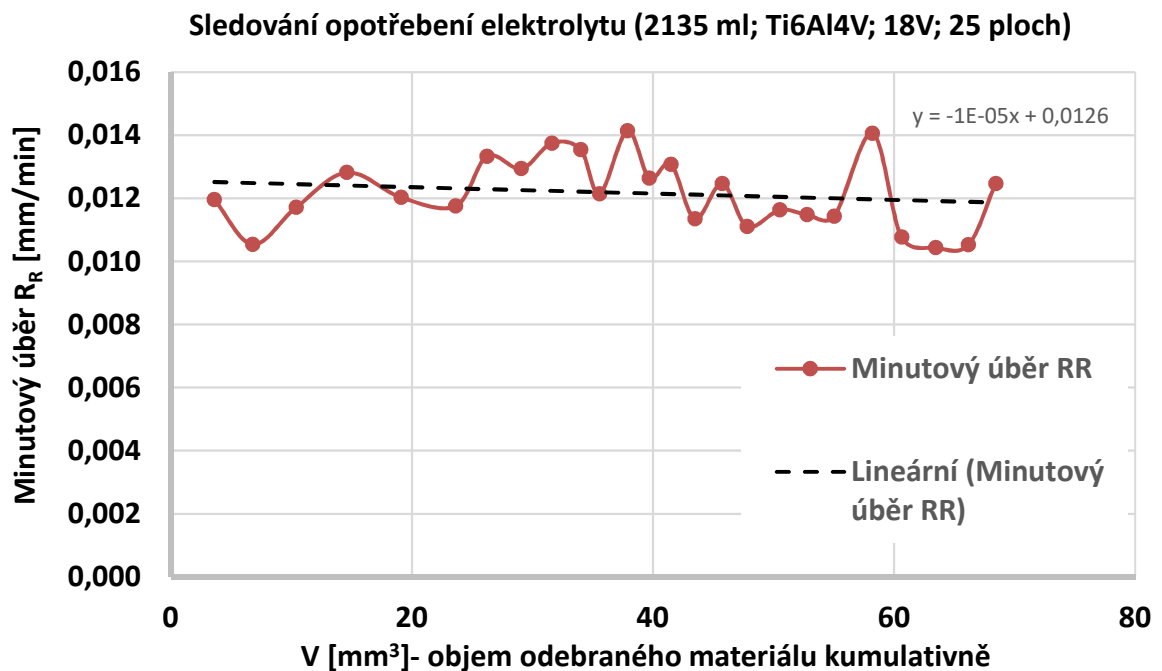
4.4.3. Experimentální stanovení rychlosti úběru

Platnost experimentálně zjištěné závislosti proudové hustoty na napětí lze nepřímou potvrdit i sledováním závislosti množství rozpuštěného materiálu na přiloženém napětí. Zkouška úběru byla provedena na vzorcích s vymezenou leptanou plochou 5x10 mm. Povrch vzorků byl leštěný, aby se eliminovala chyba rychlejšího úbytku nerovného povrchu. Při konstantním napětí byl sledován úbytek materiálu za stálý časový úsek 2 minut. Vyhodnocení množství odebraného materiálu bylo provedeno prostřednictvím zjištění váhového úbytku. Rozměr leptané plochy byl měřen ex-post a je tedy vstupem do výpočtu. Na základě měření lze vyhodnotit odleštěnou hloubku, ze které lze vydělením časem získat hodnotu minutového úběru R_R (removal rate). Měření bylo provedeno v oblasti nejvhodnějšího leštění a přechodu do vzestupné části křivky. Při výše zmíněné koncentraci elektrolytu a pokojové teplotě lze pro vhodná napětí 15 až 20 V očekávat minutové úběry 0,01 až 0,012 mm/min (Obr. 4.10).



Obr. 4.10: Experimentálně zjištěná závislost minutového úběru R_R na napětí U [V]

Pro měření hloubkových profilů větších sérií vzorků je klíčová znalost rychlosti úběrů. Obsluha zařízení nemá v průběhu měření zbytkových napětí informace o dosažené hloubce a musí ji tedy predikovat a stanovit potřebnou dobu rozpouštění. Pomineme-li náhlé výkyvy teplot v místnosti, použití vysokých úrovní napětí zapříčiňující ohřev soustavy a odpar elektrolytu v důsledku nevhodného dlouhodobého skladování může tuto predikci ohrozit změna vodivosti, a tím i rychlosti rozpouštění v důsledku nasycení nebo opotřebení elektrolytu. K popisu tohoto jevu byla odleptávána série vzorků reprezentující měřené vzorky v počtu 25 ks leštěných ploch z materiálu Ti6Al4V v 2135 ml elektrolytu při napětí 18V. Způsobem shodný s předchozím experimentem byly stanoveny minutové úběry z povrchu. Z provedeného vyhodnocení lze na základě vykreslení spojnice lineárního trendu pozorovat mírný, avšak při počtu měření, diskutabilní pokles. Při průběžném vyhodnocování dosažených hloubek a dostatečném množství elektrolytu nepředstavuje jeho degradace zdroj variability pro vyhodnocování průběhu zbytkových napětí.

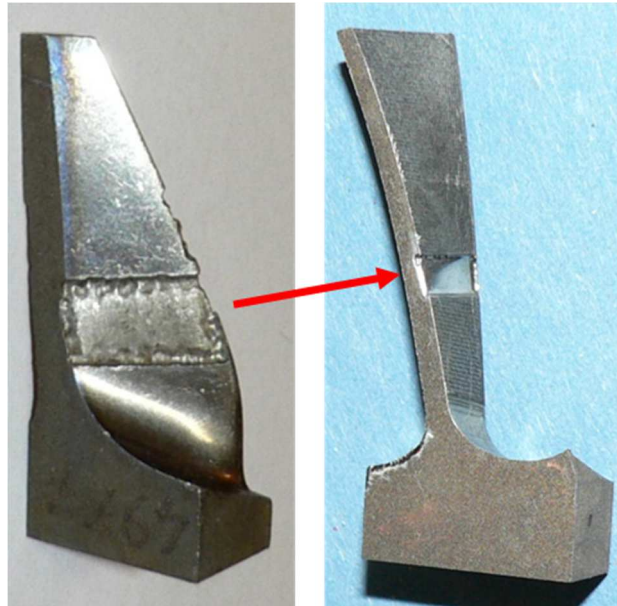
Obr. 4.11: Závislost minutového úběru R_R na kumulativním množství rozpuštěného materiálu

4.4.4. Dílčí závěry a doporučení

Elektrolyt na bázi HClO_4 je vhodný pro použití v konkrétní aplikaci za pokojových teplot do $25\text{ }^\circ\text{C}$. Představuje menší biologická a zdravotní rizika. V rozmezí 15 až 20 V zanechává na titanových slitinách hladký, lesklý, rovnoměrný povrch bez stop selektivního či bodového leptání. Rovněž rychlost rozpouštění okolo $0,01\text{ mm/min}$ je dostatečná pro danou aplikaci. Relativně nízké potřebné proudové hustoty okolo 10 A/dm^2 nekladou nároky na zdroje napětí a jak bylo potvrzeno, nedochází k ohřevu elektrolytu, změnám vodivosti a rychlosti rozpouštění. Předložené parametry představují stabilní způsob bezsilového úběru.

To vše platí pro relativně malé plochy, respektive poměry rozpouštěné plochy k objemu elektrolytu – přibližně do 70 ml/mm^2 rozpouštěné plochy. Elektrolyt je nevhodné vystavovat působení vzduchu mimo samotná měření z důvodu odparu lehčích alkoholů a opotřebení elektrolytu. Doplněním alkoholů se udržuje vodivost na výchozí hodnotě. Vodivost a tím rychlost rozpouštění za vyšších teplot progresivně narůstá a jediné možné řešení je chlazení lázně, nebo navyšování objemu a tím i tepelné kapacity. Teoreticky by pro stabilizaci rychlosti rozpouštění bylo vhodné stabilizovat prošlý náboj Q v Coulombech jakožto řídicí veličinu a na základě prošlého náboje řídit napětí na zdroji (regulační veličina) pro stav $dC/dt=0$ v mezích napětí ploché části potenciálové křivky.

Elektrolyt nepředstavuje omezení na straně maskování nerozpouštěných částí vzorku a upínacích částí zařízení. Kromě krycího vosku jsou pro rovné plochy používány krycí pásky, které umožňují ostřejší ohraničení plochy. Pro tvarově komplikované plochy lze rovněž použít chránění zbytku vzorku nástřikem krycího laku.



Obr. 4.12: Porovnání vzhledu leptaných ploch před (vlevo) a po optimalizaci elektrolytického rozpouštění (vpravo)

4.5. Postup provedení měření

Vzorek je zvážen, proměřen a je k němu pevně upevněn měřicí třmen (extenze). Vážení vzorku má význam pro výpočet dosažené hloubky leptání. Váhový úbytek vstupuje do výpočtu hloubky namísto proměrování tloušťky mikrometrem. Po zvážení nedotčeného vzorku se provede vymezení (krytí) leptané plochy tak, aby nebyla zasažena maskovacím voskem a zbytek vzorku i s upevněním měřicího třmenu se izoluje voskem. Leptaná ploška se odkryje. Vzorek i s měřícím třmenem se pevně upne do upínacího třmenu. Tím je vodivě spojen. Na celý tento uzel se pak opatrně ponorem nanese opět maskovací vosk.

Je-li vše vyjma vyšetřované plošky bezpečně odizolováno, celý stojan se nadzvedne a přesune do nádoby s elektrolytem. Spustí se záznam deformace. S velkou pravděpodobností není teplota vzorku a elektrolytu shodná, tudíž je třeba nechat vyrovnat teploty. Během této doby lze pozorovat průběh deformace (y) v čase (t). V momentě, kdy dojde k vyrovnání teplot a $dy/dt = 0$ se spíná proud a začíná vlastní proces anodického rozpouštění.

Deformace je měřena spojitě po celou dobu anodického rozpouštění. Rámcové doby k dosažení minimální požadované hloubky jsou získány empiricky a za dodržení podmínek

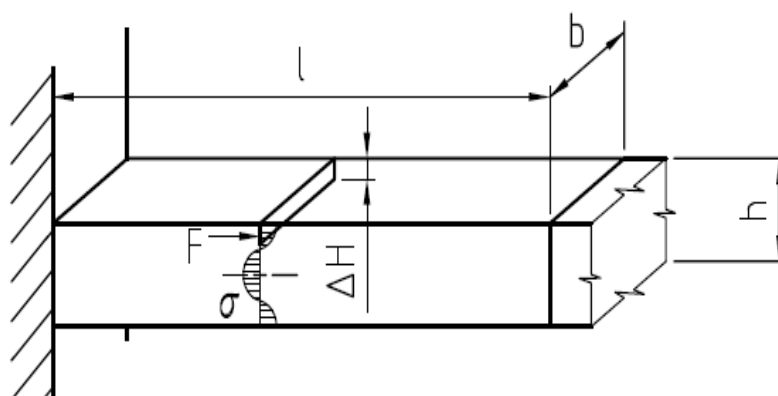
zkoušky se liší v případě individuálních vzorků minimálně. Pro ověření procesu a linearity rozpouštění je vhodné vykonat kalibrační zkoušku. Výstupem z měření je průběh deformace v čase $y(t)$. Po předpokládaném dosažení požadované hloubky, nebo požadované hodnoty deformace se zastaví přívod elektrického proudu, stojan se vyjme z lázně, důkladně opláchne, vzorek se odepne z přípravku, zcela očistí a určí se konečná tloušťka vzorku h_k . Konečnou tloušťku vzorku lze určit proměřením na více bodech, nebo jak již byl zmíněno výše váhovým úbytkem. Pro dosaženou hloubku leptání (celkovou tloušťku odleptané vrstvy) platí vztah $H = h_p - h_k$. Určením dosažené hloubky se uvede do vzájemné korelace hloubka pod povrchem a deformace v čase - hustota a délka záznamu je známa, leptaná ploška se proměří, leptání se považuje za rovnoměrné po vrstvách. Hloubka H se rozdělí na vrstvičky tloušťky ΔH . Pro ty se předpokládá konstantní napětí ve vrstvičce. [58], [59]

4.6. Výpočtové vztahy

Při výpočtu je uvažován vetknutý prizmatický nosník obdélníkového průřezu jako vzorek. Výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách vzorku vychází z klasických vztahů pružnosti a pevnosti. Pro stanovení napětí je třeba přijmout dva základní předpoklady:

- Ve vrstvičce tloušťky ΔH je zbytkové napětí $\sigma = \text{konstantní}$.
- Odebrání vrstvičky ΔH způsobí deformaci a indikuje zbytkové napětí takové, jaké by vyvolalo stejnou deformaci při působení vnější síly F na tuto vrstvičku:

$$F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma \quad (4.1)$$



Obr. 4.13: Schéma napětí v leptaném vzorku [58]

Pro odvození výpočtu napětí pro jednu odebranou vrstvu ΔH jsou zavedeny veličiny [60]:

a = délka měřicího třmenu (vzdálenost od leptané plošky po snímač)

φ = úhel pootočení koncového průřezu

Δy = měřená hodnota deformace

Δy_1 = průhyb nosníku (= měřená deformace od průhybu)

Δy_2 = natočení měřicího třmenu v rovině měření (= měřená deformace od natočení)

l = výška leptané plochy (rozměr ve směru napětí)

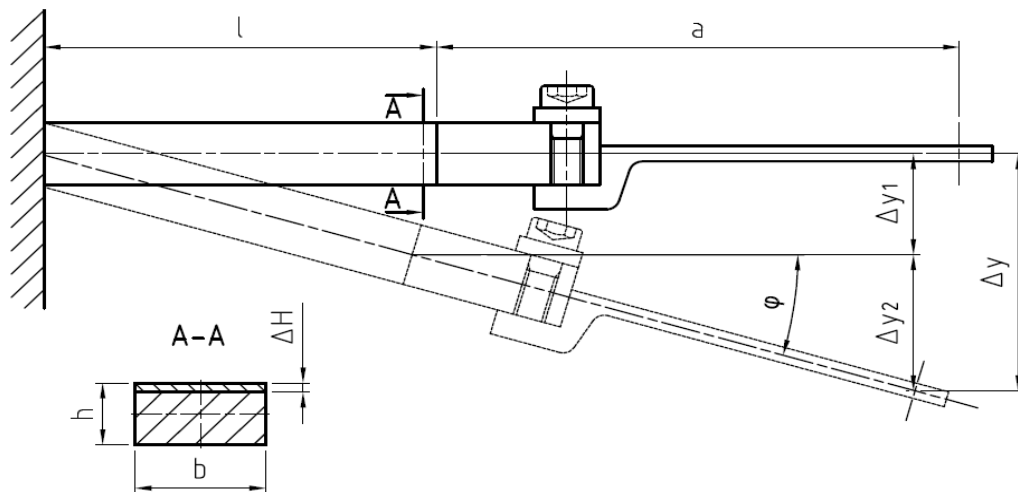
b = šířka leptané plochy

h = tloušťka vzorku

E = modul pružnosti v tahu

I = kvadratický moment průřezu (moment setrvačnosti průřezu)

M_o = ohybový moment



Obr. 4.14: Schéma pro výpočet zbytkového napětí ze snímané deformace

Pro jednotlivé složky měřené deformace lze zavést vztahy:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} \quad (4.2)$$

$$\Delta y_2 = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a \quad (4.3)$$

, kde pro prizmatický obdélníkový průřez a ohybový moment síly působící ve vrstvě platí:

$$M_o = F \cdot \frac{h}{2} = \sigma \cdot \Delta H \cdot b \cdot \frac{h}{2} \quad (4.4)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4.5)$$

Po dosazení platí pro celkovou měřenou deformaci nosníku obdélníkového průřezu:

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 = \frac{M_o \cdot l}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) \quad (4.6)$$

Z uvedeného vztahu lze úpravou vyjádřit vztah pro napětí:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot \left(\frac{l}{2} + a\right)} = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{E \cdot h^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (4.7)$$

Z důvodu opakovaného výpočtu v jednotlivých vrstvách je vhodné vztah uvést ve tvaru:

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot K \cdot h^2, \text{ kde } K = \frac{E}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (4.8)$$

V případě výpočtu zbytkových napětí v n-vrstvách se vypočtené napětí ve vrstvě σ_{vn} vypočítá v principu podobně:

Δy_n - deformace vzniklá odebráním vrstvy n, měřená v místě snímače

ΔH_n - tloušťka odebrané vrstvy n

h_n - tloušťka vzorku po odebrání vrstvy n

$$h_n = h_0 - \sum_1^n \Delta H_n \quad (4.9)$$

$$\sigma_{vn} = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot K \cdot h_n^2 \quad (4.10)$$

Takto vypočtené napětí nezohledňuje vypočtená napětí v předchozích vrstvách, nezohledňuje změnu průřezu a je nutno ho korigovat ponížením o sumu korekcí (menšitel v následujícím vztahu). Touto úpravou se obdrží skutečné napětí v n-té vrstvě σ_n , které je výstupem z výpočtu [60]:

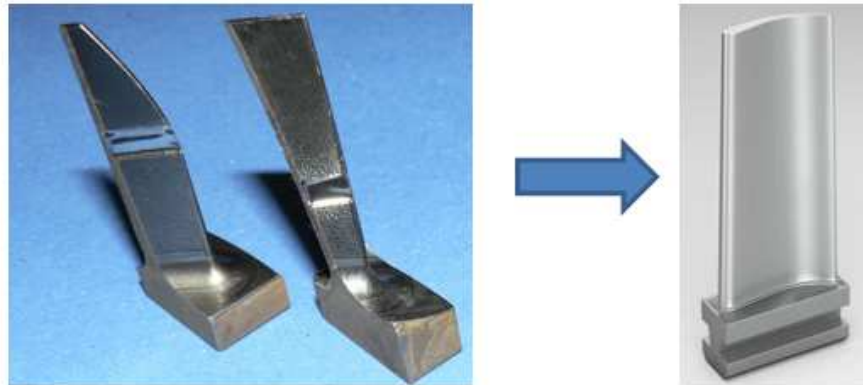
$$\sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_1^n \sigma_{v(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n} \quad (4.11)$$

4.7. Implementace CAD na neobdélníkové průřezy

V zásadě veškeré výsledky dosavadní publikační činnosti v oblasti mechanických metod (nikoliv RTG difrakce) uvádí měření na zkušebních vzorcích prizmatického obdélníkového průřezu.

U metody používané na FS ČVUT je aktuálně výpočtový program průběhu uzpůsoben pro měření prizmatických obdélníkových průřezů (destička, pásek, segment lopatky). V případě, že vzorek není obdélníkového průřezu, tak se tloušťka nahrazuje ekvivalentní tloušťkou prizmatického nosníku. Toto samo o sobě nevnaší do měření zásadní chybu, ale neprizmatický průřez se již nezohlední v kvadratickém momentu průřezu I k ose ohybu. Zároveň nelze tuto náhradu provést u všech aplikací. Z kapitoly 4.6 a Obr. 4.14 vychází, že výsledná měřená deformace (její přírůstky) je součtem průhyb nosníku Δy_1 a pootočení měřicího třmenu v rovině měření Δy_2 . Pro symetrické prizmatické neobdélníkové průřezy lze vyjít z rovnice 4.6,

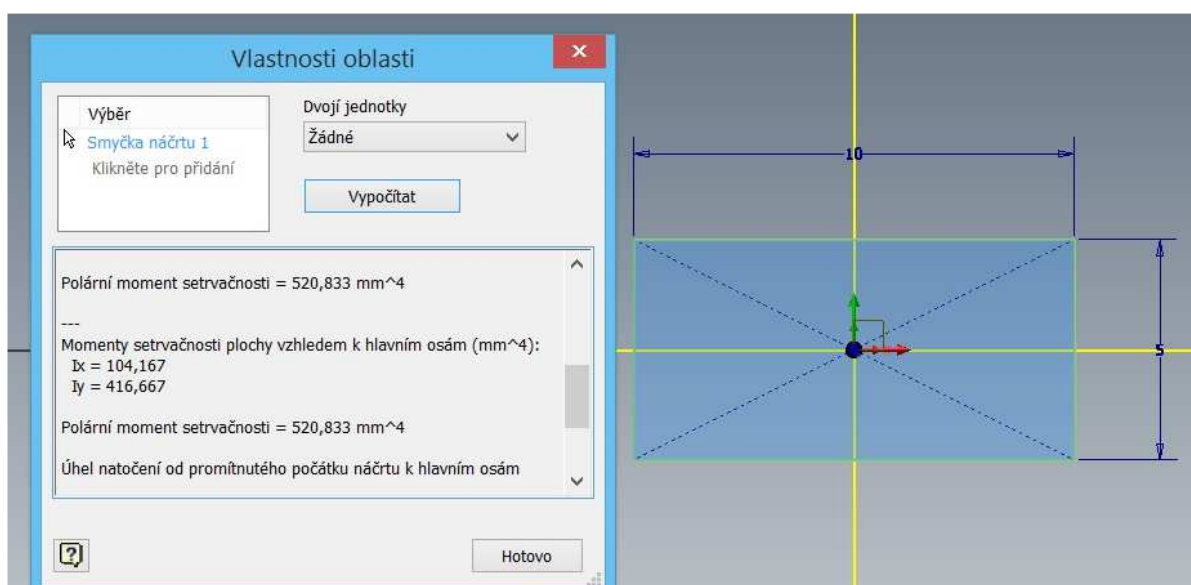
kvadratický moment průřezu I dále nerozepisovat a ponechat ho vytknutý před závorkou. V případě měření trubek v podélném směru a koryt lopatek lze předejít chybám způsobeným náhradním průřezem.



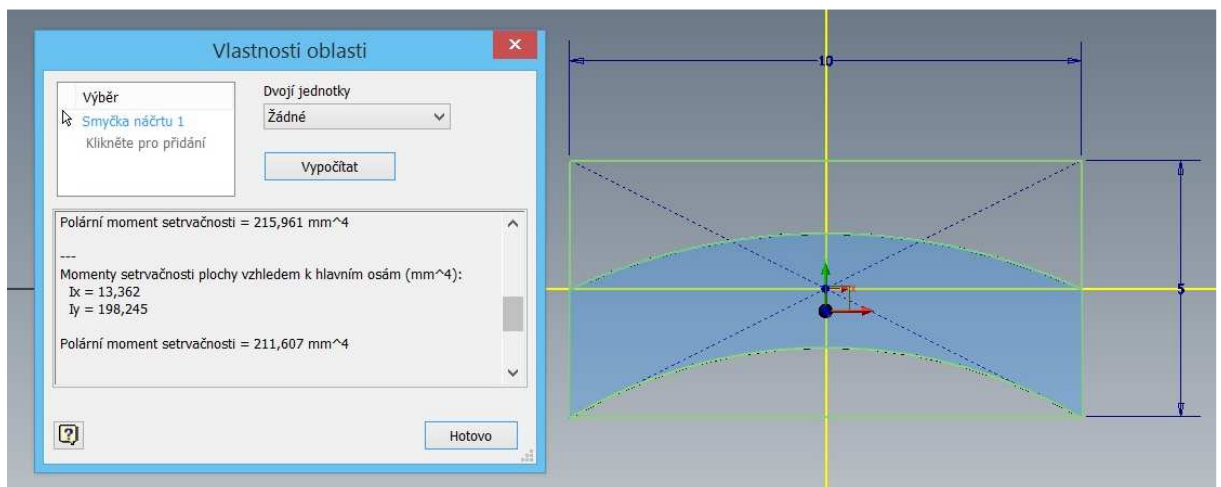
Obr. 4.15: Měření rovinných segmentů a tvarových symetrických průřezů

V případě dostupnosti CAD modelu vzorků lze ke stanovení průřezových charakteristik v místě měření využít téměř všechny CAD softwary. Po identifikaci a případné transformaci osy a roviny ohybu do souřadného systému lze kvadratický moment průřezu implementovat do výpočtu napětí.

Pro nesymetrické průřezy (např. typu trojúhelník) je samozřejmě zjištění taktéž možné, nicméně ve vztahu k výpočtu zbytkových napětí nebude vzhledem uvolnění deformace mimo rovinu snímání výpočet správný. Hlavní přínos tohoto řešení spočívá v možnosti korektního měření neobdélníkových průřezů. Následující obrázky ukazují export průřezových charakteristik CAD softwaru Autodesk Inventor.



Obr. 4.16: Výpočet kvadratického momentu průřezu k ose $I_x = bh^3/12 = 10 \times 5^3/12 = 104,167 \text{ mm}^4$



Obr. 4.17: Ukázka kvadratického momentu průřezu k ose $I_x = 13,62 \text{ mm}^4$ pro zakřivený symetrický prizmatický průřez

4.8. Ověřování metody měření

4.8.1. Použité vzorky pro ověřování

Variabilita u měření zbytkových napětí je obecně vyšší než u zjišťování přímých veličin a to napříč metodami. Problematika ověřování spočívá v obtížném rozdělení variability výsledků mezi měření a reálně vyšetřovaný vzorek. Obrábění i zpevňovací technologie jsou silně nestacionární procesy a je obtížné rozdíl mezi vzorky eliminovat. U obrábění lze vyjmenovat například opotřebení nástroje, tvorbu nestabilního nárůstku, nehomogenní tuhost obrobku, vibrace v soustavě stroj-nástroj-obrobek. Všechny tyto změny související s poddajností tělesa mají vliv na úroveň a objem vnesených napětí.

Ověřovací zkoušky byly provedeny na slitině Ti6Al4V, pro kterou byla metoda primárně optimalizována. Jako ověřovací sady byly vybrány 2 výrazně rozdílné technologie dokončení povrchu: řízené tryskání (shotpeening) a dokončovací 5D frézování. Rozdílnost vzorků spočívá jednak v očekávané hloubce zpevnění, ale také v tuhosti vzorků. Z pohledu technologických parametrů se jedná o dvě naprosto rozdílné skupiny vzorků. V rámci každé skupiny vzorků jsou shodné technologické parametry na všech vzorcích. U dokončovacího 5D frézování bylo snahou eliminovat i opotřebení nástroje a vyřezání zkušebních vzorků z lopatkového kola (22 lopatek) bylo přizpůsobeno intervalu výměny nástroje tak, aby byl zkušební vzorek obroben vždy nástrojem na začátku jeho trvanlivosti. Značení vzorků má význam pouze pro uchování vazby na původní díly. Z pohledu vyhodnocení sad jsou nevýznamné.

Tab. 4.1: Značení vzorků 1. a 2. ověřovací sady

Značení vzorků v grafech	Technologie	Proměnné ve značení
O1A, O1B, O2A, O2B, O3A	O – oboustranné tryskání	A/B – strana destičky
5os-1M, 5os-2M; 5os-4M; 5os-5M; 5os-11M; 5os-12M; 5os-16M; 5os-18M; 5os-21M	5os – dokončovací 5D frézování	1 až 22 – pořadové číslo lopatky M – „middle“ - měřeno v polovině výšky lopatky (Obr. 4.22)

Oboustranně tryskané vzorky – 1. ověřovací sada

První sada vzorků představuje řízeně tryskané technologické vzorky ve tvaru destiček 80x80x4 mm, jejichž povrch byl současně řízeně tryskán z obou stran. Z tohoto důvodu byly odebírány pouze vzorky ze středové části tak, aby vyšetřované plochy byly bezprostředně sousedící a krajové oblasti zůstaly nevyužity. Současné oboustranné tryskání eliminuje průhyb tenkostěnných zpěvňovaných dílů. Pro tryskání byly zvoleny následující procesní parametry:

- tryskací medium ASR170 (ocelové kuličky 0,5-0,85 mm; 45-52 HRC)
- průtok média 7 kg/min.
- tlak vzduchu.: 1,7 bar, příměs vody rozstříkem
- překrytí 200 %
- úhel trysky 90° vůči povrchu



Obr. 4.18: Pásky o rozměrech 80x5x4 mm odebrané se středu zpevňované destičky

Středová část destičky byla následně rozřezána na 5 mm široké segmenty představující zkušební vzorky k měření zbytkových napětí. První sada reprezentovala vzorky větších průřezů s hlubším profilem zbytkových napětí. Vzhledem k CNC řízení a dostatečnému překryvu by měly vzorky zajišťovat dostatečnou opakovatelnost měření.

Dokončovací 5D frézování – 2. ověřovací sada

Druhá sada představuje tenké segmenty lopatek kompresoru zhotovené 5D frézováním. Tyto vzorky reprezentují tenké součásti s malým objemem vložených napětí. Součást byla po hrubovacím frézování vyžhána ve vakuové peci na 650 °C po dobu 6 hodin. Toto zpracování by mělo vést k úplnému odstranění vnitřních napětí (např. od kování polotovaru) i zbytkových napětí v povrchu po předchozím hrubování. Uvolnění těchto napětí lze předpokládat podle deformací listů lopatek vyhodnocením odstupů bodu vůči CAD modelu. Následně byl díl opětovně upnut na 5-osé frézovací centrum a dokončení bylo provedeno ve dvou operačních úsecích. Nejprve bylo provedeno předdokončení s cílem vytvořit rovnoměrné přídatky na relaxovaných lopatkách a zanechání stabilního přídatku 0,05 mm na dokončení. Řezné podmínky dokončování monolitními nástroji jsou uvedeny v kapitole 6.2.2. Následné dokončení bylo provedeno s ostrými karbidovými kulovými nástroji, které byly měněny po každé trojici lopatek. Tento postup je z hlediska reálné výroby poměrně nákladný, nicméně byl zvolen z důvodu výrazného rozptylu měření u standardního postupu. Segmenty lopatek slouží jako zkušební vzorky (Obr. 4.22) a byly extrahovány pomocí elektroerozivního drátového řezání. Tloušťka segmentu v místě měření byla stanovena na 0,8 mm.

4.8.2. Způsob zpracování naměřených hodnot

V následujících kapitolách jsou prezentované typické průběhy zbytkových napětí v povrchu pro vybrané slitiny a vybrané technologie. Pro každou kombinaci materiálu a technologie byla měřena celá sada vzorků v počtu 5 až 12 vzorků. Průběhy jednotlivých vzorků jsou sestaveny z jednotlivých hodnot zbytkového napětí v kontrolních hloubkách: 3; 5; 7; 10; 15; 20; 25; 30; 50; 70; 100; 150; 200; 250; 300 mikrometrů pod povrchem. Čím hlouběji pod povrch, tím se intervaly odečtu zbytkových napětí zvětšují, jelikož se průběh spojitě vrací do vyrovnávacích hodnot v jádře vzorku a není důvod očekávat výrazné změny.

Ve snaze získané průběhy zobecnit byla tabulka doplněna o křivku sestavenou z průměrných hodnot na jednotlivých hloubkách, která je doplněna o výběrovou směrodatnou odchylku s_{σ} vynesenu v obou směrech prostřednictvím chybových úseček. Za předpokladu normálního rozložení se v intervalu chybové úsečky nachází asi 68 % měření. Podílem výběrové směrodatné odchylky a průměrné hodnoty je definován variační koeficient v_{σ} , který vyjadřuje rozptyl měření v procentech.

Pro zobrazení mezních průběhů jsou grafy doplněny o průběhy sestavené z minimálních a maximálních hodnot. Vzhledem k směrodatným odchylkám u jednotlivých skupin vzorků

(viz. další kapitoly) lze v prostoru mezi mezními průběhy očekávat průběhy u 80 až 90 % měření.

Průměrná hodnota napětí v příslušné hloubce (aritmetický průměr):

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (4.12)$$

Výběrová směrodatná odchylka:

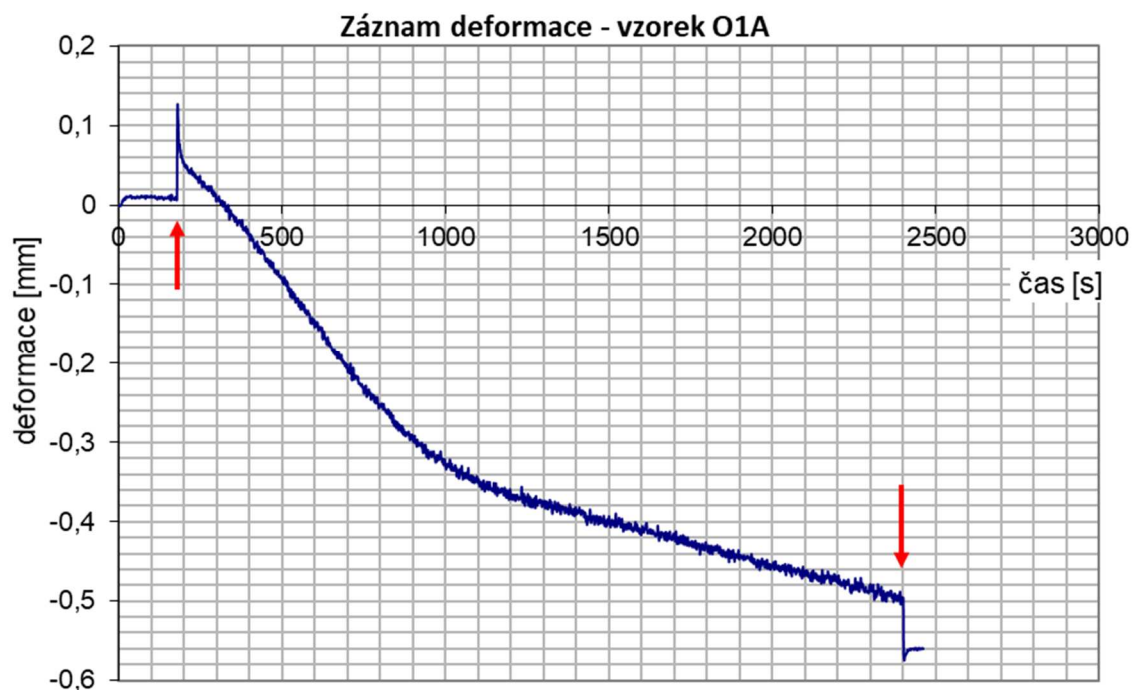
$$s_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2} \quad (4.13)$$

Variační koeficient:

$$v_{\sigma} = \frac{s_{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100 \quad (4.14)$$

4.8.3. 1. ověřovací sada – řízeně tryskané destičky, t=4 mm

U řízeně tryskaných destiček bylo nutné vzhledem k tuhosti (t=4 mm) vymezit větší výšku rozpouštěné plošky. Výška rozpouštěné plochy byla volena v rozmezí 5 až 6 mm. Při délce měřicího třmenu 245 mm bylo umožněno snímání deformace v rozmezí 0,4 až 0,6 mm.



Obr. 4.19: Záznam deformace z měření oboustranně tryskaného vzorku O1A, vyznačeny proudové nárazy

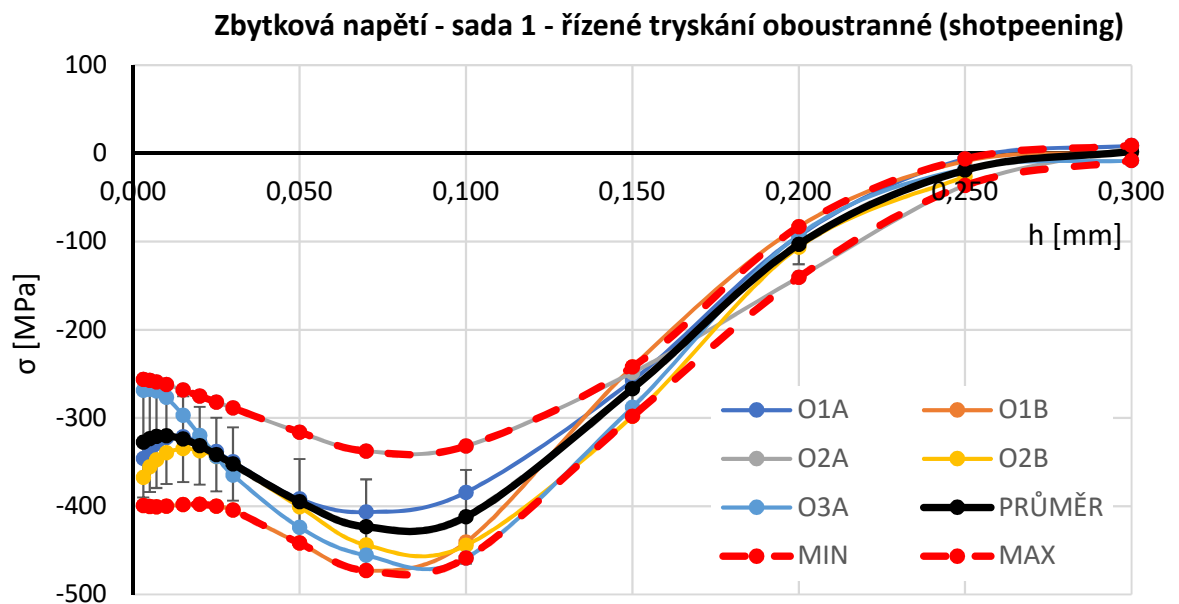
Záznam deformační křivky je spojitý a vzhledem k síle vzorku minimálně rozechvělý. Po umístění vzorku do lázně je na deformační křivce vzorku O1A patrné vyrovnávání teplot.

Přiložením napětí nastává proudový náraz deformace v důsledku magnetostrikčního jevu (Obr. 4.19), který odezní přibližně po 10 sekundách záznamu. Následuje bezprostřední reakce na rozpouštění povrchové vrstvy a přiklánění vzorku směrem k čidlu. Po přerušení elektrolytického rozpouštění vymizí i předpětí od magnetostrikčního jevu.

Tab. 4.2: Naměřená data pro jednotlivé vzorky (O1A až O3A) a zobecněné průběhy pro 1. ověřovací sadu – řízené tryskání

vz.	O1A	O1B	O2A	O2B	O3A	PRŮM	SMDCH	VAR	MIN	MAX
h [mm]	σ	σ	σ	σ	σ	$\bar{\sigma}$	S_{σ} [MPa]	V_{σ} [%]	σ	σ
0,003	-346	-399	-256	-367	-269	-328	62	19	-399	-256
0,005	-336	-400	-257	-355	-268	-323	60	19	-400	-257
0,007	-329	-401	-259	-347	-269	-321	58	18	-401	-259
0,010	-323	-400	-262	-339	-277	-320	55	17	-400	-262
0,015	-321	-398	-268	-335	-297	-324	49	15	-398	-268
0,020	-327	-398	-275	-337	-320	-331	44	13	-398	-275
0,025	-338	-400	-282	-344	-344	-341	42	12	-400	-282
0,030	-350	-405	-289	-353	-365	-352	42	12	-405	-289
0,050	-392	-442	-316	-401	-424	-395	48	12	-442	-316
0,070	-407	-473	-338	-444	-456	-423	54	13	-473	-338
0,100	-384	-441	-332	-444	-459	-412	53	13	-459	-332
0,150	-258	-242	-249	-298	-288	-267	25	9	-298	-242
0,200	-93	-83	-141	-106	-93	-103	22	-141	-141	-83
0,250	-6	-9	-36	-26	-17	-19	12	-36	-36	-6
0,300	9	1	7	#####	-8	2	8	-8	-8	9

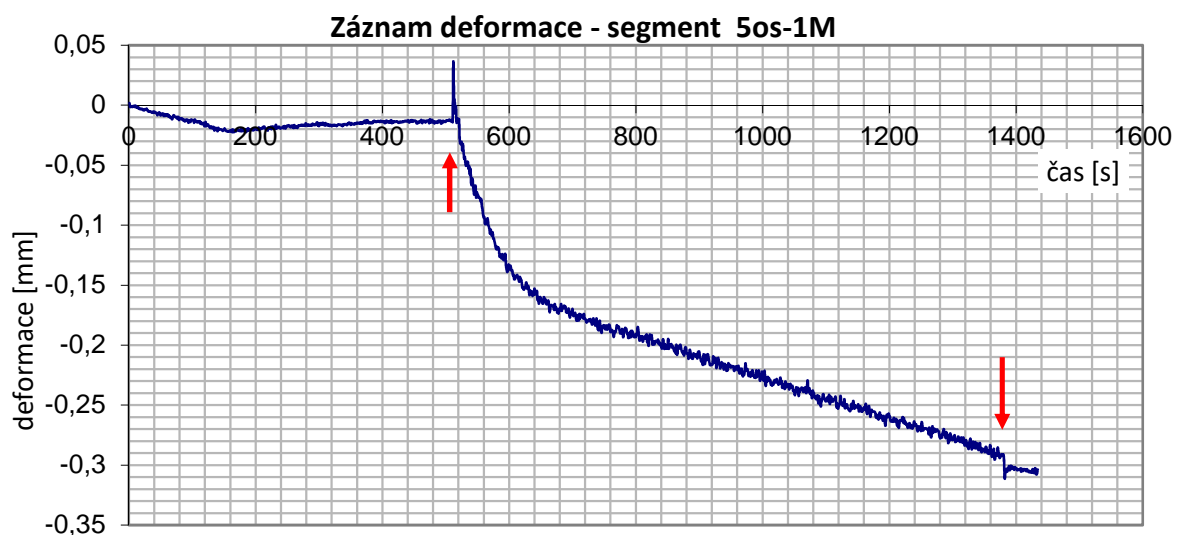
Všechny vzorky vykazují podle očekávání výrazně tlakový charakter zbytkových napětí. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo zjištěno tlakové napětí v rozmezí -400 až -257 MPa (průměrně -323 MPa). U všech průběhů byla nalezena výrazná tlaková špička v hloubce 0,07 až 0,08 mm pod povrchem s hodnotami -480 až -340 MPa (průměrně -30 MPa). S rostoucí vzdáleností od povrchu tlaková zbytková napětí postupně klesají a do vyrovnávacích tahových napětí přechází v hloubce 0,25 až 0,3 mm. Vzhledem k tloušťce destičky lze očekávat velmi nízká vyrovnávací tahová napětí v rozpětí více jednotek nebo velmi málo desítek. Stanovení vyrovnávacích napětí je u silnějších vzorků a použité výšce leptané plochy zatíženo větší relativní chybou, jelikož přírůstky deformace jsou poměrně malé ve srovnání s oblastmi výskytu tlakových zbytkových napětí. Metoda je velice citlivá ke stanovení polohy inflexního bodu křivky deformace a tím i ke stanovení hloubky přechodu. S vyloučením přechodové oblasti se variační koeficient pohybuje v rozmezí 10 až 20 %.



Obr. 4.20: Průběhy zbytkových napětí pro 1. ověřovací sadu – řízené tryskání

4.8.4. 2. ověřovací sada – 5D frézované segmenty lopatek, t=0,8 mm

U frézovaných segmentů lopatek byla výška rozpouštěné plochy vzhledem k očekávání nízké tloušťky tlakové vrstvy a především k síle lopatky v měřeném místě zvolena 2 mm. Při délce měřicího třmenu 240 mm bylo umožněno snímání deformace v rozmezí 0,2 až 0,4 mm. Jednotlivé fáze měření a jejich projev na záznamu deformace jsou totožné jako u předchozí sady vzorků



Obr. 4.21: Záznam deformace z měření 5D frézovaného segmentu 5os-1M, vyznačeny proudové nárazy

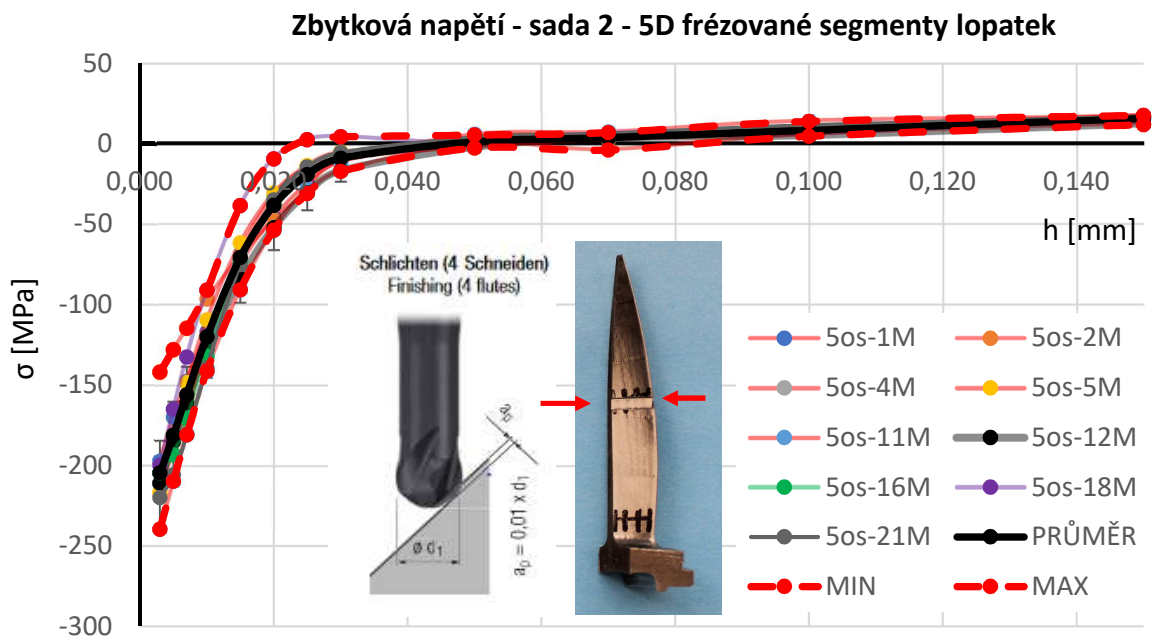
Tab. 4.3: Naměřená data pro jednotlivé vzorky pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování [58]

vz.	5os-1M	5os-2M	5os-4M	5os-5M	5os-11M	5os-12M	5os-16M	5os-18M	5os-21M
h [mm]	σ	σ	σ	σ	σ	σ	σ	σ	σ
0,003	-197	-142	-211	-217	-240	-211	-205	-200	-220
0,005	-170	-128	-192	-182	-210	-185	-193	-165	-206
0,007	-147	-115	-168	-148	-180	-161	-171	-133	-181
0,010	-117	-97	-126	-109	-141	-127	-132	-91	-139
0,015	-75	-70	-68	-62	-91	-84	-73	-38	-75
0,020	-46	-48	-32	-31	-54	-52	-38	-9	-35
0,025	-25	-30	-15	-14	-27	-31	-18	3	-14
0,030	-12	-17	-9	-5	-11	-17	-8	4	-5
0,050	4	0	-2	-1	6	-3	3	0	4
0,070	6	-4	3	3	7	3	6	6	7
0,100	10	6	9	6	14	5	9	7	12
0,150	18	13	17	17	17	12	-	16	17
0,200	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 4.4: Zobecněné průběhy a statistika pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování

vz.	PRŮMĚR	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA	VARIAČNÍ KOEFICIENT	MIN. KŘIVKA	MAX. KŘIVKA
h [mm]	$\bar{\sigma}$	s_{σ} [MPa]	v_{σ} [%]	σ	σ
0,003	-205	27	13	-240	-142
0,005	-181	25	14	-210	-128
0,007	-156	22	14	-181	-115
0,010	-120	18	15	-141	-91
0,015	-71	15	21	-91	-38
0,020	-38	14	36	-54	-9
0,025	-19	11	55	-31	3
0,030	-9	7	74	-17	4
0,050	1	3	238	-3	6
0,070	4	3	84	-4	7
0,100	8	3	36	5	14
0,150	16	2	14	12	18
0,200	-	-	-	-	-

Všechny vzorky vykazují tlakový charakter zbytkových napětí. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm bylo zjištěno tlakové napětí v rozmezí -210 až -128 MPa (průměrně -181 MPa). U žádného vzorku nebyla nalezena tlaková špička napětí. Tlaková napětí se vzdáleností od povrchu prudce klesají a do vyrovnávacích tahových napětí přecházejí v hloubce 0,022 až 0,06 mm (průměrně 0,05 mm). Hodnota vyrovnávacích tahových napětí v hloubce 0,150 mm byla zjištěna v rozmezí +12 až +18 MPa (průměrně +16 MPa).



Obr. 4.22: Průběhy zbytkových napětí pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování [58]

Vzhledem k tloušťce vzorků a detekci bodu přechodu v malé hloubce nebylo rozpouštění provedeno do větších hloubek. S rostoucí hloubkou rovnoměrnost odleštění materiálu klesá a měření by bylo zbytečně zatíženo další chybou.

4.8.5. Dílčí zhodnocení metody

Na ověřovacích sériích byla prokázána schopnost detekce průběhů zbytkových napětí jak na tenkých segmentech, tak na silnějších destičkách. Na tenkých segmentech s menší odleptanou hloubkou je patrná i schopnost detekce napětí v hloubkách velmi blízkých povrchu.

U tryskaných destiček s výrazně větší tloušťkou tlakové vrstvy byla prokázána schopnost detekovat větší úroveň zbytkových napětí a zároveň výrazně větší hloubky přechodu do vyrovnávacích tahových napětí. U tryskaných destiček byl variační koeficient v rozporu s očekáváním vyšší než u 5D frézovaných lopatek, což může být výrazně ovlivněno citlivostí měření. Při teoreticky shodných profilech zbytkových napětí v povrchové vrstvě je snímaná deformace přímo úměrná výšce rozpouštěné plochy. Aby se na silnějších destičkách docílilo shodné citlivosti, bylo by třeba použít výšku plochy $2/0,8 \times 4 = 10$ mm a vzít v úvahu veškerá omezení spojená s elektrolytickým rozpouštěním u současného zařízení popsanych v kapitole 4.4.4.

4.9. Porovnání výsledků s metodou rentgenové difrakce (XRD)

Z rešerše dostupných metod pro měření zbytkových napětí jednoznačně vyplývá, že jediná metoda umožňující vyšetřit hloubkový průběh zbytkových napětí je rentgenová difrakční tenzometrie (XRD) s postupným odlešťováním povrchu. Zároveň je tato metoda komerčně nejrozšířenější, nejdostupnější a nejpoužívanější. Vzhledem k využívání metod měření zbytkových napětí ve vývojových projektech zpevňovacích technologií bylo umožněno srovnání této standardní metody a metody vyvinuté na ČVUT na shodných typech vzorků. Kooperční měření bylo prováděno u velmi prestižní certifikované laboratoře Lambda Research, Cincinnati (Ohio) a doplňková měření byla také prováděna ve spolupráci s Ing. Ondřejem Řídkým z Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, TU v Liberci.

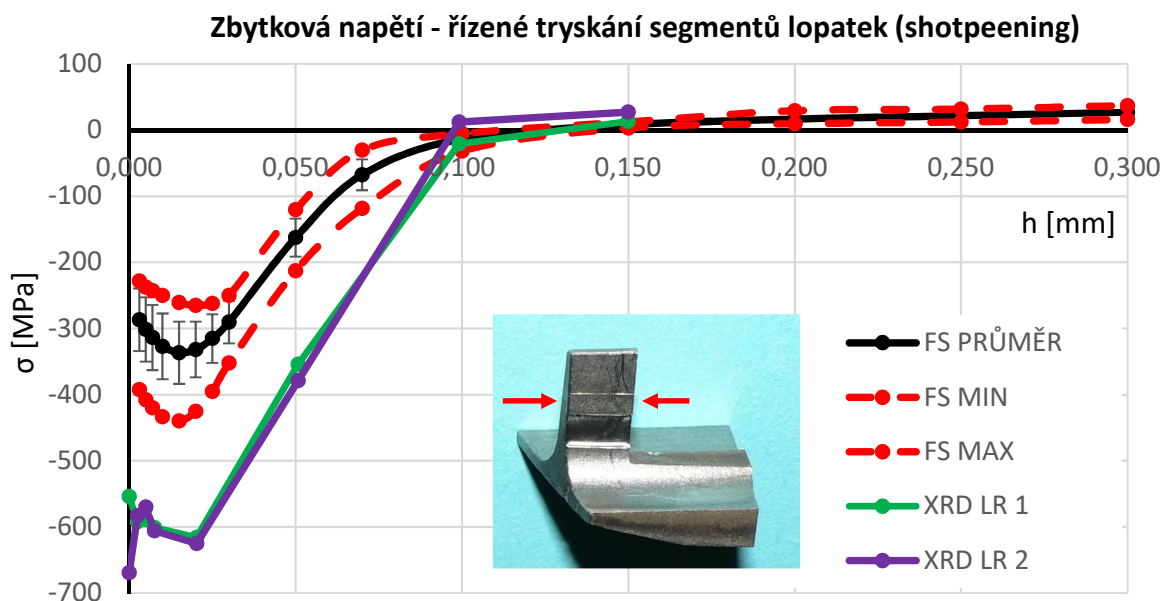
Stanovení hloubkových průběhů metodou rentgenové difrakce je poměrně pracné a nákladné. Cena stanovení hloubkového průběhu ze sedmi bodů byla v přepočtu 30 000 Kč bez DPH. Z tohoto důvodu je rozsah experimentu značně omezený a vzorky byly voleny tak, aby mohla být měření využita pro optimalizaci technologií dokončování titanových lopatek ve spolupráci s průmyslovým partnerem. Porovnání metod bylo umožněno v rámci 3 testovacích kampaní na vzorcích:

- řízeně tryskané segmenty lopatek (Lambda Research)
- vibračně zpevňované segmenty lopatek (Lambda Research)
- frézované segmenty lopatek (TU Liberec)

4.9.1. Srovnání výsledků na řízeně tryskaných vzorcích segmentů lopatek – Lamda Research

Testovací sada byla tvořena 14 ks segmentů lopatek ze slitiny Ti6Al4V. 12 vzorků bylo měřeno mechanickou metodou postupného elektrolytického rozpouštění na FS ČVUT a 2 segmenty byly poskytnuty ke kooperativnímu měření. Vzorky byly obráběny technologií 5- osého frézování s následným řízeným oboustranným tryskáním ocelovými kuličkami (shotpeening). Technologií elektroerozivního drátového řezání WEDM byly z lopatek extrahovány zkušební vzorky konstantní šířky 5 mm (Obr. 4.23). Tloušťka vzorku v místě měření dosahovala 1,4 mm a výška rozpouštěné plochy byla s ohledem na intenzivní podmínky tryskání volena 2 mm. Z pohledu upínání a přístupnosti vyšetřované plochy se jednalo o složitější geometrii a očekával se vyšší rozptyl naměřených hodnot ve srovnání s předchozími vzorky.

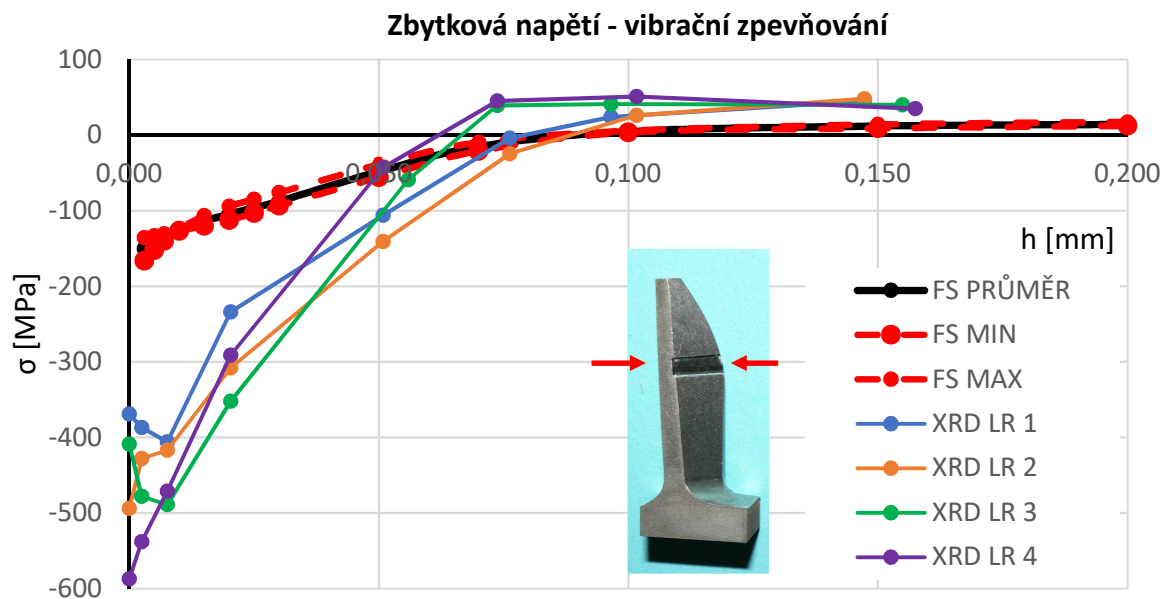
Měření rentgenovou difrakční tenzometrií bylo provedeno v konfiguraci $\sin^2\psi$, v souladu s normou SAE HS-784. Jako zdroj rentgenového záření byla zvolena měděná K-alfa rentgenka. Analyzovány byly difrakční roviny silně převládající hexagonální těsně středěné fáze $Ti\alpha \{213\}$. Geometrické podmínky měření byly nastaveny následovně: úhel incidence 0,4; konfigurace úhlu na točení ψ 10° a 50°; ozářená oblast 1,8x5,1 mm. K výpočtu zbytkových napětí byly přejaty empiricky dříve zjištěné elastické konstanty získané zatěžováním jednouchého zkušebního vzorku shodného materiálu 4-bodovým ohybem v souladu s normou ASTM E1426. Materiál zkušební vzorku byl totožné slitiny Ti6Al4V, nicméně shoda v parametrech velikosti zrn a zastoupením fází nebyla mezi měřenými vzorky a kalibračním vzorkem prokazována. Jednotlivé hloubky měření zbytkových napětí byly dosaženy elektrolytickým úběrem mezi jednotlivými měřeními. Měření byla následně zpracována a doplněna o korekce úběru předchozích vrstev.



Obr. 4.23: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD Lambda Research (2 ks) na segmentech lopatek po řízeném tryskání

4.9.2. Srovnání výsledků na vibračně zpevněných vzorcích segmentů lopatek – Lamda Research

V rámci vývoje technologie vibračního zpevnění bylo možné otestovat metodu měření na další sérii 10 vzorků, z nichž 6 ks bylo měřeno na FS ČVUT a 4 ks byly poskytnuty ke kooperačnímu měření. Příprava vzorků i nastavení metody měření rentgenovou difrakcí je téměř shodné s předchozími vzorky



Obr. 4.24: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 6 ks) a XRD Lambda Research (4 ks) na segmentech lopatek po vibračním zpevňování

4.9.3. Srovnání výsledků na frézovaných segmentů lopatek – TU Liberec

Na pracovišti TU v Liberci byla provedena analýza 4 ks frézovaných lopatek a bylo doplněna měřením 12 ks na FS ČVUT. Měření bylo provedeno na dvou typech vzorků –typ A viz. Obr. 4.29 a typ B 2 viz. Obr. 4.30, mezi něž byly vzorky rovnoměrně rozděleny. Vzorky byly připraveny technologií 5-osého frézování bez specifických opatření a zásahů do výrobního postupu. U vzorků byl očekáván velmi mělký profil zbytkových napětí a také větší rozptýl naměřených hodnot než u ověřovací série 2 - viz kapitola 4.8.4. Měření bylo provedeno v obou kolmých směrech σ_L a σ_T . Vzhledem k možnostem metody měření na FS ČVUT je uvedeno pouze měření v podélném směru σ_L .

Difrakční měření byla prováděna pomocí difraktometru *PROTO iXRD COMBO* v uspořádání pro měření zbytkového napětí se zářením rentgenky s měděnou anodou (Obr. 4.25) při napětí 24 kV a proudu 4 mA. Byly analyzovány difrakční roviny fáze $Ti\alpha \{213\}$, kterým při použitém záření $CuK\alpha$ odpovídají difrakční maxima $2\theta \approx 142^\circ$. Difrakční profily krystalografických rovin $\{213\}$ byly získány jako průměr z 30 opakování měření. Doba expozice byla 1 s. Postup lze považovat z pohledu techniky měření za totožný s postupem zahraniční laboratoře – viz. kapitola 4.9.1. Difraktované záření bylo zaznamenáváno dvěma lineárními detektory a zpracováno pomocí software *XRD Win 2000*.



Obr. 4.25: Difraktometr Proto iXRD COMBO

Při měření listů lopataček XRD LB6, XRD LB12; XRD LB27; XRD LB23 byl použit cylindrický kolimátor primárního záření o průměru 2 mm. V průběhu měření vykonávala rentgenka oscilace kolem své osy v rozsahu $\pm 3^\circ$.



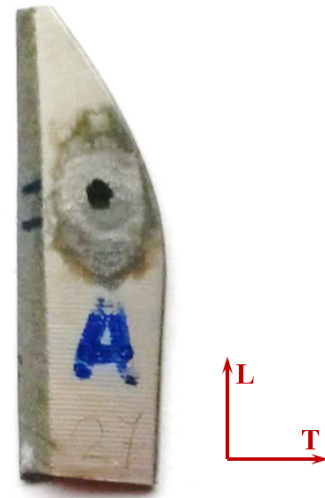
Obr. 4.26: Příklad pro elektrolytické leštění – příslušenství difraktometru.

Pro bezsilové odstranění vrstvy materiálu bylo použito profesionální odlešťovací zařízení od firmy PROTO (Obr. 4.26). Na zařízení bylo na základě předchozích zkušeností obsluhy nastaveno napětí 60 V, proudové omezení 2 A a pro odlešťovací masku s průměrem otvoru 5 mm maximální průtok elektrolytu. Uvedené parametry se ukázaly jako velmi intenzivní a průměrný minutový úběr z povrchu se pohyboval obvykle mezi 0,08 až 0,1 mm/min. Na základě těchto parametrů se hloubka odleštěné vrstvy řídila pomocí časovače. Reálně dosažená hloubka se následně ověřuje pomocí úchylkoměru s kuličkovým dotekem, který je upnutý v měřicím přípravku. Vzhledem k vysoké rychlosti rozpouštění (přibližně o řád vyšší než u metody na FS ČVUT) se nepodařilo průběh podpovrchových zbytkových napětí

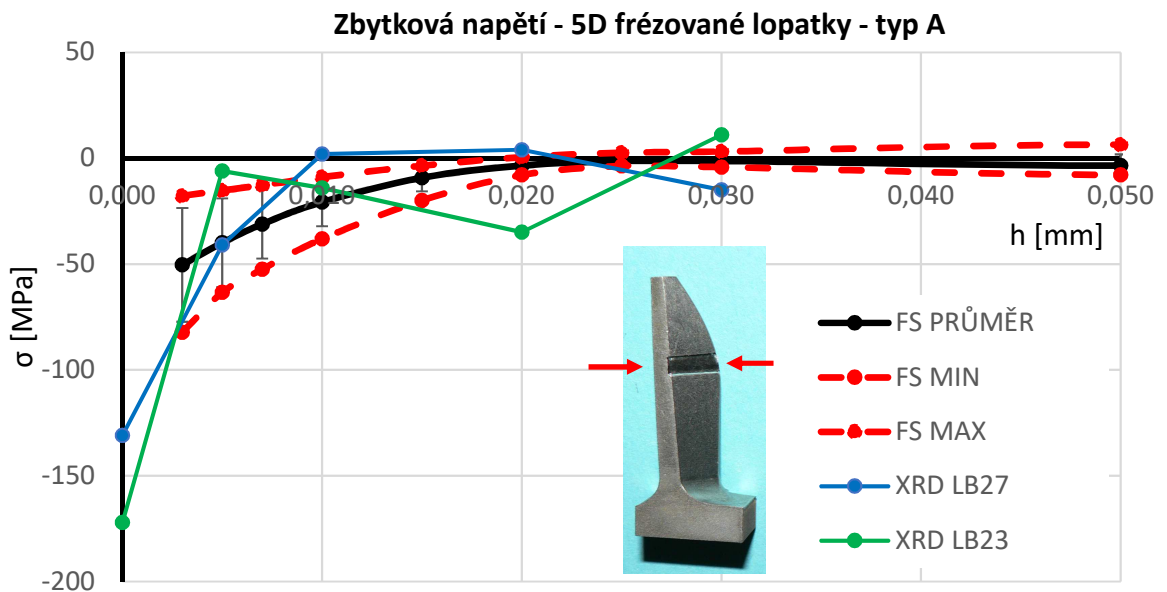
postihnout v dostatečném počtu bodů. Odleštěný povrch není ideálně rovinný a vizuálně neposkytuje hladký a odrazivý povrch.



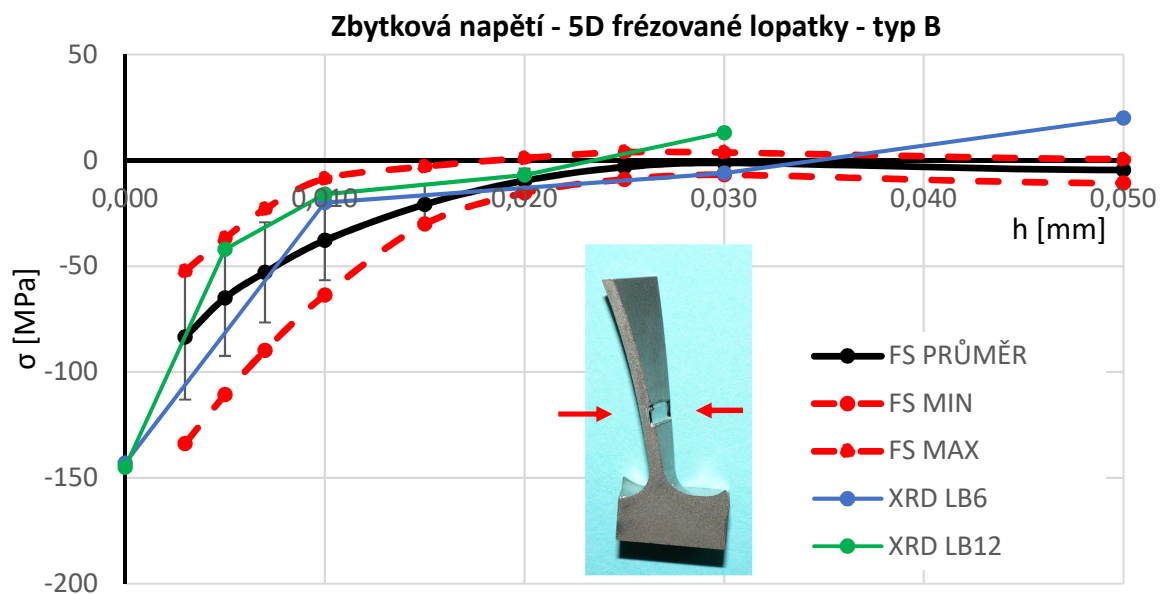
Obr. 4.27: Měření odleštěné vrstvy pomocí tisícínového digitálního úchylkoměru



Obr. 4.28: Vzhled leštěné plochy, orientace měření σ_L a σ_T



Obr. 4.29: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD TU Liberec (2 ks) na segmentech lopatek po dokončovacím 5D frézování – typ A



Obr. 4.30: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD TU Liberec (2 ks) na segmentech lopatek po dokončovacím 5D frézování – typ B

4.9.4. Dílčí závěry porovnání metod

Srovnání dosažení výsledků oběma metodami bylo provedeno na vzorcích s tlakovým charakterem napětí. U prvních dvou typů byl tento charakter napjatosti vyvolán intenzivními podmínkami zpevňovacích technologií, kdežto třetí typ umožňuje porovnání metod na velmi malé tloušťce vrstvy tlakových zbytkových napětí po dokončovacím 5D frézování.

Porovnání výsledků získaných oběma metodami je třeba hodnotit s ohledem na 4 základní aspekty:

- smysl detekovaných zbytkových napětí (tahová/tlaková)
- absolutní hodnoty napětí v těsné blízkosti povrchu
- tvaru průběhu zbytkových napětí
- stanovení hloubky přechodu

Metody jsou v absolutní shodě v určení smyslu zbytkových napětí. Z vlastních provedených měření lze toto tvrzení potvrdit ve spektru tlakových napětí. Neshodu ve spektru tahových napětí není důvod očekávat.

Absolutní hodnoty napětí v blízkosti povrchu a v podpovrchových vrstvách se u mechanické metody FS ČVUT a XRD značně liší. Metoda XRD uvádí 2 až 4 násobné absolutní hodnoty zbytkového napětí. Z provedených měření je patrný zvětšující se odstup v měřených hodnotách s objektivně vyšší absolutní hodnotou v povrchu u zpevňovaných

vzorků. Tento jev lze pozorovat právě porovnáním odstupů výsledků u technologií zpevňování (první dva typy vzorků, laboratoř Lambda Research - Obr. 4.23, Obr. 4.24) a u technologie 5D frézování (Obr. 4.29, Obr. 4.30), kde existují důvodné předpoklady k nižší úrovni zbytkové napjatosti. Tento předpoklad byl potvrzen oběma metodami. Je rozdílnosti měření je patrný i v hlubších vrstvách pod povrchem a mizí až v okolí hloubky přechodu do vyrovnávacích napětí. Z provedených měření nelze stanovit jednoznačnou převodní závislost (převodní křivku) pro přepočet hodnot napětí mezi metodami. Tento problém se netýká pouze prezentované metody, ale byl pozorován pro všechny mechanické metody - viz kapitola 2.10 a publikace [5], [43], [44], [45].

Tab. 4.5: Prognáání výsledků mechanické metody FS ČVUT a XRD v kontrolních hloubkových bodech

typ vzorku	metoda měření	povrch h = 0,005 mm [MPa]	podpovrchová hodnota h = 0,020 mm [MPa]	hloubky přechodu [mm]
řízené tryskání (shotpeening) kap. 4.9.1	FS ČVUT	-301±48	-332±42	0,14±0,01
	XRD LR	-570 / -589	-610 / -620	0,1 / 0,13
vibrační zpevňování kap. 4.9.2	FS ČVUT	-141±10	-105±9	0,08±0,01
	XRD LR	-400 až -500	-234 až -352	0,06 až 0,09
5D frézování (typ A) kap. 4.9.3	FS ČVUT	-50±27	-3±4	0,02±0,005
	XRD LB ^{*1)}	-41 / -6	4 / -35	0,006 až 0,01
5D frézování (typ B) kap. 4.9.3	FS ČVUT	-65±27	-10±6	0,03±0,01
	XRD LB ^{*1)}	-110 / -65	-7 / -10	0,023 až 0,033

**1) Hodnoty převzaty v konkrétních bodech měření bez proložení dat regresní křivkou.*

Zdroj rozdílů lze odvodit od samotné podstaty metod měření. Mechanické metody jsou založeny na přímém měření deformace (přímé snímání, tenzometrické měření) po narušení rovnováhy součásti geometricky definovaným úběrem. Narušení rovnováhy probíhá v makrooběmu materiálu, který zahrnuje celé fázové složení slitiny. Jedná se o zbytková napětí I. druhu (viz. kapitola 2.3). Ze znalosti deformace jsou v mezích Hookova zákona dopočítána napětí pomocí odvozených vztahů pružnosti a pevnosti. Postup je v zásadě inverzní k základním mechanickým zkouškám pevnostních vlastností – např. mez kluzu, mez pevnosti.

Rentgenová difrakce měří deformaci krystalové mřížky. Typ mřížky ve vázán na fázi vyskytující se ve slitině. Fáze se obvykle vyskytuje ve slitině v určitém objemu – například typické zastoupení α -fáze s hexagonální těsně uspořádanou mřížkou se u slitiny Ti6Al4V pohybuje v rozmezí 60 až 85 %. Zbytek truktury je tvořen β -fází s kubickou tělesově středěnou mřížkou. XRD měření nepostihuje (minimálně v rámci provedených měření) napětí minoritně zastoupené fáze, které nemusí být shodné co do velikosti, dokonce ani smyslu. Měření postihuje zbytková napětí mikroskopická – tzv. napětí II. druhu. Korelaci mikroskopických a makroskopických napětí užívaných v technické praxi zajišťují kalibrační zkoušky. Při těchto zkouškách je těleso zatěžováno vnějšími silami v mezích průžných deformací přímo v měřicím zařízení, čímž je umožněno získání elastických konstant pro tento přepočet.

Za velmi pozitivní lze považovat podobnost ve stanovení hloubky přechodu tlakových a tahových napětí. Přímé srovnání je obtížné z hlediska charakteru naměřených dat: FS ČVUT – kontinuální záznam deformace na větší sérii vzorků; kdežto XRD – nespojitě měření napjatosti v jednotlivých hloubkách a nízký počet vzorků stejného typu (2 až 4). Situace je navíc podpořena chybovostí obou metod v okolí hloubky přechodu v důsledku oploštění křivky a také chybami na straně stanovení hloubky. Chyby na straně stanovení hloubky se navíc do vykreslení průběhu propisují přímo posunem hodnoty podél vodorovné osy (hloubky). Rozdíly ve stanovení hloubky přechodu nepřesahují více než 25 % zjištěné hodnoty. U vzorků frézovaných lopatek měřených rentgenovou difrakcí je dosažení takto nízkého rozdílu podmíněno proložením jednotlivých měřených bodů spojnicí trendu.

5. Popis dalších použitých laboratorních metod a postupů

Následující kapitoly 6 až 9 jsou věnovány výzkumu integrity povrchu vybraných perspektivních materiálů. V těchto kapitolách jsou kromě aplikace vyvinuté mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí uvedené i komplexní výsledky dalších analytických postupů, které pomáhají popisu vlivu vybraných technologií na povrchovou vrstvu. Tato kapitola detailním způsobem popisuje použité analytické postupy. V rámci výše zmíněných kapitol byly použity následující analytické a detekční metody:

- Metalografie
- Měření mikrotvrdosti
- Kapilární zkoušky

5.1. Příprava metalografických vzorků

Výroba metalografických vzorků a vzorků pro měření mikrotvrdosti u povrchových vrstev, nástřiků a povlaků má svá specifika a obtíže ve srovnáním s přípravou vzorků pro plošné výbrusy základní struktury. Technologický postup výroby výbrusu je nutné volit tak, aby byla maximálně zachována ostrost přechodové hrany (rozhraní mezi pryskyřicí a zkoumaným povrchem) a zároveň, aby se podařilo z výbrusu odstranit veškeré rysky a struktura umožnila jasné čtení kontur hranic zrn, fází, povlaků a povrchových vrstev. Tyto dva cíle jdou prakticky vždy proti sobě. Příprava se sestává z řezání, odmaštění, zalití, broušení, leštění a leptání.

Vzorky byly zality za tepla do metalografických vzorků o průměru 30 mm. S ohledem na maximální tvrdost byla využita lisovací epoxydová hmota Struers DuroFast s tvrdým minerálním plnivem lisovaná pod tlakem 250 bar a za teploty 180 °C. S ostatními lisovacími hmotami nebylo dosaženo uspokojivých výsledků. Obzvláště u výroby šikmých výbrusů je vhodné úplně vyloučit celý segment lisovacích hmot na principu termosetů, které se při limitní tloušťce v blízkosti povrchu vylamují a celý výbrus destruuje. U kolmých výbrusů určených k analýze na skenovacím elektronovém mikroskopu byla využívána vodivá lisovací hmota Polyfast. Využitím preferované hmoty Durofast a následným vodivým propojením vyšetřované plochy však lze dosáhnout naprosto srovnatelných výsledků. Zaoblení hran tenkých součástí (plechů, lopatek) lze výrazně eliminovat obložením vzorky kousky kaleného materiálu (ideálně nerez), případně karbidovými destičkami.

V oblasti broušení a leštění byly postupy sériové a produktivní přípravy prezentované dodavateli rovněž výrazně přepracovány. Postupné broušení bylo prováděno ve více krocích

a s větší spotřebou spotřebního materiálu. Výrazně se zde odlišuje příprava titanových slitin a skupiny nerezů a niklu.

5.1.1. Metalografická příprava titanových slitin

V případě titanových slitin lze všechny kroky broušení realizovat brusivy na bázi diamantu vázaného v pevných discích, nebo s využitím klasických brusných folií (papírů) s brusivem SiC. Vzhledem k omezené nabídce diamantových podložek lze doporučit využití SiC programu, jelikož umožňuje provést broušení do nižších zrnitostí plátna, což je klíčové k eliminaci fáze leštění a tím k eliminaci zaoblování hrany. Hrubé a střední broušení je téměř necitlivé k procesním parametrům. U jemného broušení zrnitostí 1000 je nutné použít pro sadu vzorků vždy nové plátno. Doba broušení jedním plátnem je pro sadu 6 vzorků maximálně 2 minuty. Při eventuálním dalším broušení zrnitostí 2000 se z důvodu zanesení doba snižuje přibližně na polovinu. Pokud není zajištěn dostatečný výplach a ostrost plátna existuje vysoké nebezpečí k povrchové deformaci výbrusu, kterou již další kroky nejsou schopny odstranit.

Tab. 5.1: Použité parametry pro výrobu metalografických výbrusů Ti6Al4V

Krok	Abrazivum	Zrnitost	Otáčky/přítlak [N]	Čas [min]
Hrubé broušení	SiC	120	300/25	3
Střední broušení	SiC	320	300/15	3
Jemné broušení	SiC	1000/2000	300/15	2
Leštění 1	MD-DAC+Dia	6 μm	150/20	1
Leštění 2	MD CHEM +koloidní silika +10 % H ₂ O ₂	0,004 μm	150/25	max. 1,5

Krok Leštění 1 musí být vždy prováděn na rovném unášecím plátně s co nejnižší výškou plátna (filcu), a to navzdory horší schopnosti leštění. Unášecí plátno je syceno diamantovou pastou/suspencí/sprejem s velikostí částic 6 μm . Hrubší suspenze je kvalitou výbrusu a hloubkou stop již na úrovni předchozího kroku. Menší velikost částic (testováno 3 μm a 1 μm) se již zatlačují do měkkého povrchu výbrusu a ve struktuře zůstávají jako artefakty, které lze snadno a chybně interpretovat například jako precipitáty nebo karbidy. Finální leštění se provádí opět na podložce s nízkým vlasem a zvýšené savosti. Za snížených otáček se povrch plátna průběžně sítí směsí koloidní siliky s příměsí peroxidu H₂O₂ v objemu 10 %. Peroxid je

naprosto klíčovou pomůckou, jelikož odstraňuje z povrchu produkty leštění a povrch pro mechanické leštění aktivuje. Směs se připravuje bezprostředně čerstvá. Vyšší množství 20 až 30 % H_2O_2 zmiňované v literatuře a aplikačních návodech není vyloženě vhodné, jelikož se zvyšuje šance lehkého naleptání výbrusu při krajích, kde mohou být, a velmi často jsou, drobné prolákliny s kapilárním efektem vzniklé v důsledku expanze a smrštění lisovací hmoty. K napadení výbrusu je možné i pohyb setrváním výbrusu v prostředí leštící suspenze po ukončení broušení. Je proto vhodné ještě za pohybu vzorku a plátka provést výplach plátka vodou a po zastavení leštění vzorky umýt neprodleně. Délku finálního kroku leštění je vhodné minimalizovat a vzorek průběžně kontrolovat. V rámci experimentů nebyla pro fázi leštění 2 nikdy potřeba více než 1 minuta. Prodlužování této fáze má na zaoblení hrany výbrusu přímý a zásadní vliv.

Zviditelnění struktury jádra a povrchových vrstev proběhlo s pomocí chemického, případně elektrochemického leptání, u všech případů ponorem. Jeden typ materiálu lze zpravidla leptat více technikami a více leptadly podle účelu analýzy. Základním dokumentem pro výběr vhodné techniky jsou normy ASTM E340 (Standard Practice for Macro Etching Metals and Alloys) a ASTM E407 (Standard Practice for Micro Etching Metals and Alloys).

Pro leptání titanové slitiny bylo použito Krollovo leptadlo a roztok bifluoridu amonného (Weckovo leptadlo). Krollovo leptadlo ($100 \text{ ml H}_2\text{O} + 2 \text{ ml HF} + 5 \text{ ml HNO}_3$), které je jednoznačně nejpoužívanější a univerzální pro titanové slitiny. Umožňuje zviditelnění základní struktury, hranic zrna, rozlišení alfa/beta fáze a identifikaci nečistot. Při detekci alfatizovaných vrstev nedává spolehlivé výsledky. K detekci alfatizovaných a přetavených vrstev se ukázalo mnohem účinnější použít roztok vody a bifluoridu amonného ($100 \text{ ml H}_2\text{O} + 5 \text{ g NH}_4\text{HF}_2$). K efektivnímu zviditelnění alfatizované vrstvy je vhodné strukturu cíleně přeleptat. Podpovrchové vrstvy podléhají přepálení přibližně po 10 sekundách, kdežto bílé alfatizované vrstvy si zbarvení zachovávají podstatně delší čas.

5.1.2. Metalografická příprava nerezových ocelí a niklových slitin

Výroba metalografických výbrusů pro skupinu nerezových ocelí a niklových slitin je značně jednodušší. Nebezpečí deformace povrchu výbrusu i nebezpečí zatlačení zrn abrasiva je podstatně nižší. Materiály jsou v obecné rovině výrazně lépe lešitelné, lze používat vyšší přitlaky a není nutné peroxidem aktivované leštění. Postup pro docílení maximálně ostré hrany výbrusu představuje zavedení broušení jemnými SiC foliemi (papíry) a minimalizace časů leštění. Na závěr je zařazeno jemné doleštění roztokem plaveného oxidu hlinitého (alumina) za účelem čištění od residuí jemného diamantu.

Tab. 5.2: Použité parametry pro výrobu metalografických výbrusů nerezových ocelí a niklových slitin

Krok	Abrazivum	Zrnitost	Otáčky/přítlak [N]	Čas [min]
Hrubé broušení	SiC	120	300/30	3
Střední broušení	SiC	320	300/30	3
Jemné broušení	SiC	1000	300/30	3
Hrubé leštění	MD-Largo+Dia	9 μm	150/30	3
Střední leštění	MD Dac+Dia	3 μm	150/25	1
Jemné leštění	MD Dac+Dia	1 μm	150/25	1
Čištění	MD Chem+koloidní alumina	0,1 μm	150/20	max. 0,5

Vzorky z nerezových ocelí byly leptány elektrolyticky vodním roztokem kyseliny šťavelové (90 ml H₂O + 10 g C₂H₂O₄). Elektrolytické leštění bylo provedeno v improvizované sestavené aparatuře. Na napěťově stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí byla připojena měděná katoda. Na měděnou katodu byl položen vzorek vyšetřovanou plochou nahoru. Katoda se vzorkem se ponořila do plastové nádobky s kyselinou. Na kladný pól zdroje byla připojena elektroda v podobě rýsovací jehly. Dotekem s vyšetřovanou plochou pod hladinou leptadla dochází ke zviditelnění struktury. Při napětích 9 V je struktura plně naleptána přibližně po 30 sekundách. U vzorků z aditivně zhotovené austenitické oceli AISI 316L je vzhledem k potlačení kontrastu vhodné použít nižší napětí 7 V. Totéž platí při potřebě potlačení deformačních vláken u tvářených polotovarů. Pokud je žádoucí potlačení veškerých metalurgických entit s cílem maximálně zviditelnit hranice zrn (např. pro automatizované stanovení velikosti zrna, analýzu porezity) lze pro elektrolytické leptání použít vodní roztok kyseliny dusičné (50 % H₂O + 50 % HNO₃).

Lopatky z niklové superslitiny Inconel 713 LC byly primárně vyšetřovány na přítomnost brusných trhlin a popalů, jelikož z podstaty slitiny nebylo důvodné podezření na mikrostrukturní změny v povrchové vrstvě. Jedná se o slitiny určené k použití v dlouhodobé expozici vysokým teplotám agresivních spalin (až 700 °C) pod vysokým provozním napětím. Ke zviditelnění trhlin na povrchu lopatek a určení jejich charakteru (interkrystalický/transkrystalický) byly lopatky leptány ponorem do směsi kyseliny

chlorovodíkové a peroxidu v poměru přibližně 50/50 %. Příprava leptadla je provázena bouřlivou reakcí a varem. Vzhledem k agresivitě leptadla není vhodné leptadlo používat na leštěné metalografické výbrusy, proto bylo pro zviditelnění použito leptadlo Marbles (50 ml H₂O + 10 g CuSO₄ + 50 ml HCl).

5.2. Měření mikrotvrlosti

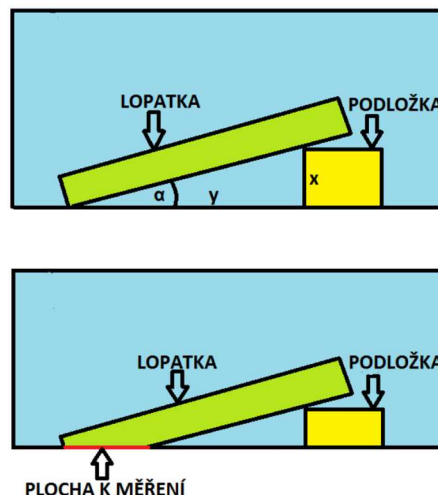
Rozdíl oproti zkouškám makrotvrlosti tkví v nižších zatěžujících silách. Zkoušky mikrotvrlosti jsou vhodné pro měření: tenkých součástí, povlaků, jednotlivých složek, fází, průběhů mikrotvrlosti v podpovrchových vrstvách a svarech. Norma ČSN EN ISO 6507-1 [7] definuje zatížení při zkouškách mikrotvrlosti v rozmezí $0,09807 \leq F \leq 1,961$ N, viz. Tab. 2.2.

Malé vtisky se obtížněji měří, a proto by povrch měl být zhotoven jako metalografický výbrus. Vtisky již nezachovávají geometrickou podobnost. Výsledná tvrdost je závislá na velikosti působící síly. Nelze plně porovnávat výsledné hodnoty měření mikrotvrlosti s klasickou zkouškou makrotvrlosti. Tloušťka měřené součásti musí být minimálně 1,5 násobek délky úhlopříčky. Součást či vzorek musí být ustavené na tuhé podložce. Indentor vniká kolmo k povrchu. Rychlost zatěžování nesmí překročit $0,2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a náběh zatížení probíhá v intervalu 2 s až 8 s. Vzorek je pod zatížením 10 s až 15 s. Mimo tento interval se k hodnotě mikrotvrlosti dopisují podmínky měření. Minimální hodnoty vzdálenosti vtisku od kraje výbrusu je 2,5 násobku délky úhlopříčky vtisku, mezi vpichy 4 násobky. Vlastní výpočet a značení mikrotvrlosti je podrobně popsáno v kapitole 2.2.4. [7]

Měření proběhlo na zařízení FUTURE-TECH FM100 (Obr. 5.1) s plně automatickým systémem zatěžování, pohonů, měření polohy, CCD kamerou a odečtem vpichů. Vzhledem k velikosti zkušebních vpichů a tloušťce vzorku bylo zvoleno maximální zatížení zatížení $100\text{g} = \text{HV } 0,1$ se standardní dobou zatěžování 10 s v souladu s normou. Provedení měření profilu mikrotvrlosti není z pohledu zajištění vzdáleností mezi vpichy a kraji možné na příčném výbrusu a bylo tedy zvoleno zhotovení na šikmém výbrusu (Obr. 5.2). Segmenty destiček, případně pásky lopatek byly podloženy páskem o tloušťce 1,5 až 2 mm, což v závislosti na délce vzorku představuje zešikmení okolo 5° . Sklon je třeba vyhodnocovat individuálně u každého vzorku.



Obr. 5.1: Mikrotvrdoměr Future Tech FM100



Obr. 5.2: Schéma zalití zešikmeného vzorku do zalévací hmoty a jeho zbroušení

Z výše uvedeného obrázku si lze úhel α zavést jako:

$$\tan \alpha = \frac{x}{y} \quad (5.1)$$

Vzálenost l od vnitřního rozhraní výbrusu (povrchu) odpovídá hloučce pod povrchem h podle vztahu:

$$h = l * \sin^{-1} \alpha \quad (5.2)$$

Vzorky na analýzu mikrotvrlosti byly zalité za tepla do pryskyřice se zvýšenou schopností udržení hrany. Povrch vzorku byl vyhotoven v kvalitě metalografického výbrusu podle postupu výše, nicméně z praktického hlediska by bylo možné provést značná zjednodušení. Následně se ze znalosti úhlu zvolil vhodný krok mezi vpichy na výbrusu a dopočítaly se reálné dosažené hloubky. Na každém výbrusu bylo zaměřeno rozhraní a následně se měřila matice, obvykle 3x15 (3 linie po 15 indentacích do hloubky). Jednotlivé body v grafech jsou průměrem ze 3 měření na jedné hloubce.

5.3. Kapilární metoda

Kapilární zkouška umožňuje identifikovat vady v povrchových vrstvách materiálu (např. póry, zápaly, studené spoje, trhliny). Metoda je z fyzikálního hlediska založena na tzv. kapilárních jevech (povrchové napětí, viskozita, krajový úhel, kapilární elevace a kapilární tlak) zkušebních penetrantů. Princip metody spočívá ve využití vzlínivosti a smáčivosti vhodných kapalin (penetrantů) a jejich barevnosti nebo fluorescence. Pokrývá se

jimi zkoušený povrch. Kapaliny vnikají do vad. Po odstranění přebytku penetrantu vzlíná zbytek na povrch, kde vytváří za pomoci vývojky barevnou nebo fluorescenční indikaci vady.

Metoda je velmi citlivá na přípravu zkoušeného povrchu - povrch nutno před zkouškou dobře očistit od mechanických nečistot, okují, rzi, nátěru, třísek, úsad a povrch musí být důkladně odmaštěn. Obecné zásady pro provádění zkoušek uvádí norma ČSN EN ISO 3452-1 „*Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady*“.

Kapilární zkouška byla provedena způsobem metody „*barevné indikace*“, kdy se vada označuje většinou červenou barvou, která dobře kontrastuje s jejím obvykle bílým okolím (červený penetrant a bílá vývojka) bez použití ultrafialového světla. Penetrant i vývojka byla nanášena postříkem.

Penetrant: Overchek Red - duální barevný a fluorescenční, biodegradabilní
- splňuje EN ISO 3452-3, vhodný pro letecký průmysl

Vývojka: Overcheck White - splňuje EN ISO 3452-3, EN 571-1

Lopatky byly před kapilární zkouškou důkladně očištěny technickým benzínem a následně prány v ultrazvukové pračce – 40 °C, cyklus 25 minut, náplň etanol.

6. Integrita povrchu titanových slitin - Ti6Al4V

6.1. Titanová slitina – Ti6Al4V

Ačkoli byl titan jako prvek objeven již v roce 1795 Williamem Gregorem v minerálu ilmenit, izolován byl až v roce 1910 [61]. Titan je relativně nový kov používaný od 60. let 20. století. Výrobní technologie byla vypracována prvně v SSSR a USA, později v Anglii, Japonsku, Německu a v 70. letech i Československu ve společnosti POLDI a MoraTi. Motivací zvládnutí technologie zpracování titanu a vývoj dalších titanových slitin byl primárně zbraňový a letecký průmysl z důvodu nejvyššího poměru mezi pevností a hustotou ze všech kovových materiálů. V době studené války prošly titanové slitiny zásadním rozvojem po stránce metalurgie. V současnosti se vývoj soustřeďuje především na technologie jejich zpracování.

Titan je polymorfní, měkký, paramagnetický kov šedé až stříbřitě bílé barvy zařazovaný do kategorie lehkých kovů s teplotou tavení $T_T = 1665 \text{ }^\circ\text{C}$, teplotou polymorfní přeměny ($\alpha \rightarrow \beta$) $T_P = 882 \text{ }^\circ\text{C}$, hustotou $\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$, nízkou lineární teplotní roztažností $\alpha = 8,41 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, velmi nízkou tepelnou vodivostí $\lambda = 11,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a modulem pružnosti v tahu $E = 113 \text{ GPa}$. Čistý titan není dobrý elektrický vodič ($\sigma_E = 3 \text{ \% IACS}$) Technický čistý titan má relativně nízkou pevnost v tahu $R_m 240 \text{ MPa}$. Uplatnění technicky čistého titanu je v technické praxi omezené [62], [63]. Naprosto převažující část titanové rudy je využívána k výrobě titanových slitin. Odhaduje se, že 45 % titanové rudy se používá k výrobě slitiny Ti6Al4V [63].

Tab. 6.1: Složení slitiny VT6 (Ti6Al4V) dle OST 1-90013-81 [63], [64]

Zák. komponenty [%]		Příměsi max. [%]						
Al	V	C	Fe	Si	Zr	O ₂	N ₂	H ₂
5,3-6,8	3,5-5,3	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2	0,05	0,015

Slitinu Ti6Al4V lze nalézt pod různými značeními: GOST - VT6 (BT6); DIN - Ti6Al4V; BS - TA10-13/TA28; AISI/SAE - R56400; W.Nr. 3.7164; ASTM - Titanium Grade 5.

Slitina Ti6Al4V je nejpoužívanější slitinou s největším technologickým know-how. Mikrostruktura se skládá ze dvou fází:

- alfa fáze s hexagonální těsně uspořádanou krystalickou mřížkou (HTU, HCP).
- beta s kubickou tělesově středěnou mřížkou (KTS, CCP).

Většina dostupných polotovarů je zhotovena tvářením za tepla v oblasti alfa+beta oblasti okolo $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (teplota přeměny $T_P = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$), což má přínosy v oblasti pevnostních

a únavových vlastností díky mikrostruktuře tvořené rovnoosými zrny alfa fáze a intergranulárně rozptýlenou beta fází (dříve lamelární nevhodné Widmanstattenovi struktury) [63].

Slitina je korozně velmi odolná a stálá jak v oxidačním, tak redukčním prostředí. Je určena především pro pevnostní aplikace při nižších a středních teplotách do 400 °C. Pro kryogenní aplikace je limitní teplota – 200 °C ve stavu ELI (extra low interstitial) [62]. Typické použití je na disky a lopatky turbokompresorů, blisky, součásti konstrukce draku letadel, protézy a implantáty. [61], [62], [63]

Tab. 6.2: Mechanické vlastnosti Ti6Al4V v žíhaném a vytvrzeném stavu [63]

Stav	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
Žíhání na měkko	945	1069	10
Vytvrzený	1103	1151	13

Přibližné mechanické vlastnosti při pokojové teplotě (v literatuře se velmi různí v závislosti na polotovaru) ukazuje Tab. 6.2. V Tab. 6.3 jsou uvedeny vybrané režimy TZ. Slitina Ti6Al4V je poměrně necitlivá k režimům tepelného zpracování a rozpouštěcí žíhání s následným vytvrzením nezvyšuje pevnostní vlastnosti o více než 10 %. Tvrdost se rovněž mění jen minimálně a to v intervalu 36 až 40 HRC [62], [65].

Tab. 6.3: Vybrané režimy TZ pro Ti6Al4V [63]

Druh TZ	Teplota [°C]	Doba výdrže (dle průřezu) [hod.]	Prostředí	Následuje
Žíhání ke snížení vnitřního pnutí	480 až 650	1 až 4	vak./Ag	Řízené ochlazování
Žíhání na měkko	705 až 790	1 až 4	vak./vzduch	Obrábění
Rozpouštěcí žíhání (+ kalení)	955 až 970	1	vak.	Pomalé chlazení na 760 °C, kalení do vody
Stárnutí (vytvrzení)	480 až 595	4 až 8	vak./Ag	-

Fyzikální vlastnosti slitiny Ti6Al4V – viz. Tab. 6.4 do jisté míry definují technologické vlastnosti slitiny. Titanové slitiny se obecně řadí do kategorie obtížně obrobitelných materiálů. Nízký modul pružnosti vyžaduje použité pozitivní řezné geometrie a větší úhly hřbetu (6 až 9°). Rovněž nelze z tohoto důvodu používat tak malé minimální hloubky řezu jako u oceli. Poměr R_{p02}/R_m je 0,8 až 0,9. Koeficient pěchování třísky se pohybuje v rozmezí 1,2 až 1,5 [4].

Ve srovnání s běžnou konstrukční ocelí je to hodnota poloviční. Rychlost odchodu třísky je v důsledku toho vysoká. Malá styková plocha mezi třískou a čelem bříty nástroje vede k vysokým teplotám a tlakům na čele bříty. Titan je velice špatně teplotně vodivý, a tak se množství tepla odvedené obrobkem soustřeďuje v minimálním okolí místa řezu. To je spolu s eliminací zadírání a chránění proti oxidaci za vyšších teplot další důvod pro dostatečný přívod procesních kapalin. Při obrábění hrozí nebezpečí vznícení a výbuchu titanových třísek. Proto musí být skladovány odděleně od ostatních třísek pod kapalinou nebo při omezeném přístupu vzdušného kyslíku. Obrábění musí probíhat za maximálního více směrového přívodu procesní kapaliny. Při řízeném tryskání (shotpeeningu) z tohoto důvodu hrozí nebezpečí výbuchu titanového prachu a titanové díly se velice často tlakovzdušně tryskají s příměsí vody.

Titan má vysokou afinitu ke kyslíku za zvýšených teplot, což komplikuje primárně dosažení kvalitních výsledků u broušení. U intenzivních podmínek broušení i ostatních obráběcích operací hrozí za vysokých teplot vznik alfatizované vrstvy tzv. alfa-case. U svařování titanu musí být používáno dostatečné argonové krytí a systémy vlečné ochrany. Tepelná zpracování musí být prováděna ve vakuových pecích s dostatečným stupněm vakua [63].

Tab. 6.4: Vybrané fyzikální vlastnosti Ti6Al4V [63], [66]

Relativní	Veličina		Hodnota	Jednotka
vysoká	teplota tavení	T_T	1665	°C
-	teplota překrytalizace ($\alpha \gg \beta$)	T_P	980-1000	°C
nízký	modul pružnosti v tahu	E	112,5	GPa
nízká	hustota	ρ	4420	kg/m ³
nízká	lin. teplotní roztažnost (20-100)	α	8,41.10-6	K ⁻¹
velmi malá	tepelná vodivost	λ	6,8	W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
nadprůměrná	měrná tepelná kapacita	c	526	J.kg ⁻¹ ·K ⁻¹

6.2. Vliv vybraných technologií na změny integrity povrchu

Výše uvedené analytické přístupy a především měření hloubkových profilů zbytkových napětí byly aplikovány na různé povrchy slitiny Ti6Al4V. Všechny vzorky v této kapitole byly tvořeny vyžíhanými destičkami 80x80x4 mm, na které byla ve středové části aplikována vybraná technologie. Vzorek byl následně dělen na pásy 80x5x4 mm vhodné pro měření zbytkových napětí, - viz. Obr. 4.18.

Některé povrchy reprezentují stav povrchu po tradičních technologiích opracování – čelní frézování a 5-osé frézování. Další technologie jsou typické pro oblasti průmyslu s vyšší přidanou hodnotou – energetika, kosmonautika, letectví, kde je snahou v povrchu součásti vyvodit vhodné rozložení tlakových zbytkových napětí, případně i zvýšit povrchovou tvrdost. Tyto dokončovací zpevňovací technologie reprezentuje řízené tryskání (shotpeening), laserpeening (LSP) a vibrační kuličkování. Zatímco tyto zpevňovací technologie nacházejí uplatnění primárně u rotačních dynamicky namáhaných dílů – např. kola radiálních a axiálních kompresorů, disky a samostatné kompresorové lopatky, elektroerozivní technologie v podobě drátového řezání (WEDM) a elektroerozivního hloubení se uplatňují při výrobě statorů, difuzorů a diafragem. Po elektroerozivních technologiích, stejně tak jako po zpevňovacích technologiích je obvykle potřeba povrch dále dokončovat za účelem dosažení nižších drsností a u elektroeroze je bezpodmínečně nutné odstranit residua přetavené vrstvy (recast layer) vyznačující se křehkostí.

6.2.1. Čelní frézování

Čelní frézování je nejčastěji využívané k výrobě rovinných ploch, případně k hrubovacím operacím. Experiment byl proveden na pětiosém svislém frézovacím centru Okuma MU-400V. Nástrojem pro obrábění byla zvolena čelní frézovací hlava Sandvik Coromant s vyměnitelnými kruhovými destičkami na obrábění titanu RCKT 12 04 M0-PM o průměru 12 mm. Tato kruhová destička má úhel hřbetu 7° , úhel čela $20,9^\circ$ a je povlakována metodou CVD z povlaku $\text{TiCrN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$. Destička byla osazena v hlavě, jejíž lůžka mají negativní úhel čela -7° . Výsledný úhel hřbetu v rovině ortogonální α_0 je i tak výrazných 14° a úhel čela v rovině ortogonální γ_0 činí $13,9^\circ$. Vzorky byly obráběny symetrickým záběrem v ose obrobku, jelikož šířka obrobku byla menší než průměr nástroje. V první polovině záběru destička pracovala nesousledně, v druhé části sousledně. Vzorky pro měření byly odebrány z osy obrobku a zbytkové napětí bylo měřeno ve směru posuvu. Pro experiment byly z důvodu eliminace projevu opotřebení voleny spíše konzervativní řezné podmínky a intenzivní chlazení: řezná rychlost $v_c = 50 \text{ m/min}$, posuv na zub $f_z = 0,1 \text{ mm/zub}$ a hloubka řezu $a_p = 1 \text{ mm}$.

6.2.2. Dokončovací frézování monolitními nástroji

Dokončovací frézování souvislým 5-osým frézováním bylo realizováno na stroji Okuma MU-400V II s využitím monolitních karbidových fréz na titanové slitiny Emuge-Franken s pozitivní geometrií. Obrábění bylo prováděno za intenzivního vysokotlakého přívodu chladicí emulze. Vzhledem k zachování trvanlivosti nástroje byly řezné podmínky voleny na spodní

hranici doporučených intervalů: rezná rychlost $v_c=70$ m/min, posuv na zub $f_z=0,025$ mm/z, hloubka řezu byla definována přídavkem na čisto $a_p=0,05$ mm. Před vlastním obráběním bylo provedeno žíhání na odstranění vnitřního pnutí. Frézované segmenty lopatek byly použity jako 2. ověřovací sada, o které pojednává kapitola 4.8.4.

Technologické vzorky v podobě destiček byly obráběny totožnými reznými podmínkami, nicméně vzhledem k charakteru rovinné plochy bylo provedeno pouze řádkování v naklonění 45° .

6.2.3. Shotpeening – jednostranné/simultální tryskání

Řízené tryskání (shotpeening) představuje nejpoužívanější technologii k povrchovému zpevňování. K množství aplikací přispívá fakt, že tryskací stroje jsou seriově vyráběná zařízení a tato technologie umožňuje jednoduchou procesní kontrolu skrze normovanou metodiku almen pásků.

Použit byl automatický tlakovzdušný stroj Rösler C2X4 SR. Stroj je vybaven dvěma pracovišti A a B, realizovanými otočnou stolicí. To umožňuje při procesu tryskání na jednom pracovišti připravovat (upínání a odebrání) součásti na otryskání na pracovišti druhém. V tryskací komoře je umístěno rameno robota Kuka KR 16, ke kterému jsou upevněny trysky s vnitřním průměrem 8 mm. Dále je stroj vybaven recirkulační jednotkou a separátorem kuliček, zajišťující stálý oběh média s oddělováním poškozených kuliček.

- tryskací medium ASR170 (ocelové kuličky 0,5-0,85 mm; 45-52 HRC)
- průtok média 7 kg/min.
- tlak vzduchu.: 1,7 bar, příměs vody rozstříkem
- rychlost pohybu trysky nad vzorkem 4200 mm/min
- překrytí 200 %
- úhel trysky 90° vůči povrchu

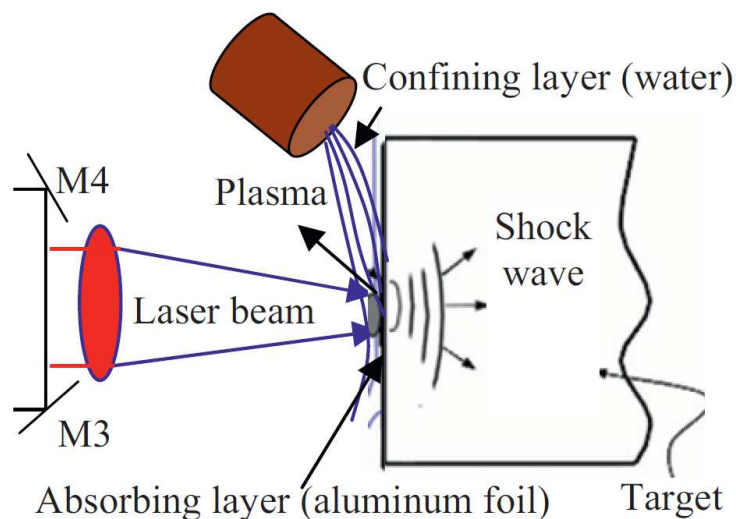
V rámci experimentu byl sledován vliv současného oboustranného tryskání, které eliminuje deformace (průhyby) vzorku při tryskáním jednostranném. Při oboustranném tryskání by měla destička vlivem zpevňování na protilehlé straně mít nižší poddajnost a měla by dosáhnout většího zpevnění. Příprava a geometrie vzorků je již zmíněna v kapitole 4.8.3.

6.2.4. Laserové zpevňování (Laser Shock Peening)

Laser Shock Peening (LSP), neboli vytvrzování povrchu materiálu rázovou vlnou vyvolanou laserem, je velmi moderní a progresivní technologií, která umožňuje výrazné

zvýšení únavové živostnosti cyklicky namáhaných součástí. Laserový paprsek generuje v povrchové vrstvě zpracovávaného materiálu tlaková zbytková napětí, která významně zlepšují únavové vlastnosti materiálu a omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin. Díky svým možnostem tato technologie nalézá praktického uplatnění ve velmi náročných aplikacích zejména v leteckém průmyslu a lze předpokládat její rozšíření i na další oblasti [67].

Při aplikaci laserového shock peeningu, se na povrchu součásti nachází dvě rozdílné vrstvy – průhledná a neprůhledná. Obě jsou nutné pro zvýšení účinnosti metody. První vrstva je neprůhledná a je přímo na povrchu součásti. Obvykle se jedná o hliníkovou folii nebo černou pásku, která absorbuje energii z laserového pulsu a generuje vysoké teploty plazmy o teplotě 10 000 °C. Druhá překryvná vrstva je transparentní pro laserový paprsek - typicky proud vody, působící jako tlumící mechanismus, který omezuje expanzi plazmy. Znárodnění způsobu je uvedeno níže [68]. Povrch součásti je chráněn od tepelného účinku plazmy první vrstvou. V průběhu dopadání laserového pulsu na první vrstvu, typicky méně než 30 nanosekund, není dostatek času pro prohoření první vrstvy a poškození či ovlivnění součásti. Voda nemá žádný vliv na chlazení vysoké teploty plazmy v průběhu tohoto krátkého pulzu. Voda se používá k zintenzivnění rázové vlny ztlumením expanze plazmy [69], [70]. Tím zvyšuje intenzitu rázové vlny a její délku - což umožňuje produkci hlubšího a intenzivnějšího pole zbytkového napětí.



Obr. 6.1: Princip technologie LSP [68]

Největší výhodou LSP oproti běžným mechanickým metodám je zejména možnost ovlivnit povrch do výrazně větší hloubky, vyšší přesnost (lokalizace místa na součásti) a flexibilita. Laserové zpevňování povrchů nachází uplatnění zejména při opracování součástí, které jsou během provozu extrémně namáhány a jejichž funkčnost je kritická pro činnost celého systému

(např. svary v leteckém průmyslu). Nevýhodou je naopak velmi omezená dostupnost technologie, propad ztuhlého povrchu při vysokých intenzitách a potřeba odstranění povrchové vrstvy pro funkční povrchy. Mezi základní parametry technologie patří: druh laseru, hustota energie, frekvence, vlnová délka, délka pulzu, plocha paprsku, ovlivněná hloubka a překrytí [71].

Tab. 6.5: Přehled procesních parametrů LSP vzorků pro měření zbytkových napětí

Energie pulzu [J]	Délka pulzu [ns]	Frekvence [Hz]	Průměr paprsku [mm]	Hustota pulzů [1/cm ²]	Hustota výkonu [GW/cm ²]
2,5	10	10	1,5	2500	14,15

Vzorky použité pro měření byly upraveny na technické univerzitě v Madridu laserem Laser Spectra Physics Quanta Ray PRO 350 (Nd:Yag; délka pulzu 8 – 12 ns; energie 2,5 J) pro potřeby disertační práce Ing. Brajera [72]. Laserový svazek byl doveden k součásti za pomoci soustavy zrcadel a čoček. Fokusační vzdálenost poslední čočky byla 500 mm a laserový svazek byl statický. K polohování byl používán průmyslový robot ABB IRB 120 s dovoleným zatížením 3 kg. Jako tlumicí vrstva byla použita voda o tloušťce přibližně 0,8 mm. Ovlivnění bylo provedeno bez absorbní vrstvy. Všechny vzorky byly ovlivněny parametry energie v pulzu 2,5 J při frekvenci 10 Hz a velikost laserového svazku na povrchu součásti byla 1,5 mm. Vzorky 1 a 2 byly ovlivněny za překryvu pulzů odpovídající 5000 pulzů/cm² a vzorky 3 a 4 s překryvem odpovídajícím 2500 pulzů/cm².

6.2.5. Elektroerozivní drátové řezání - WEDM

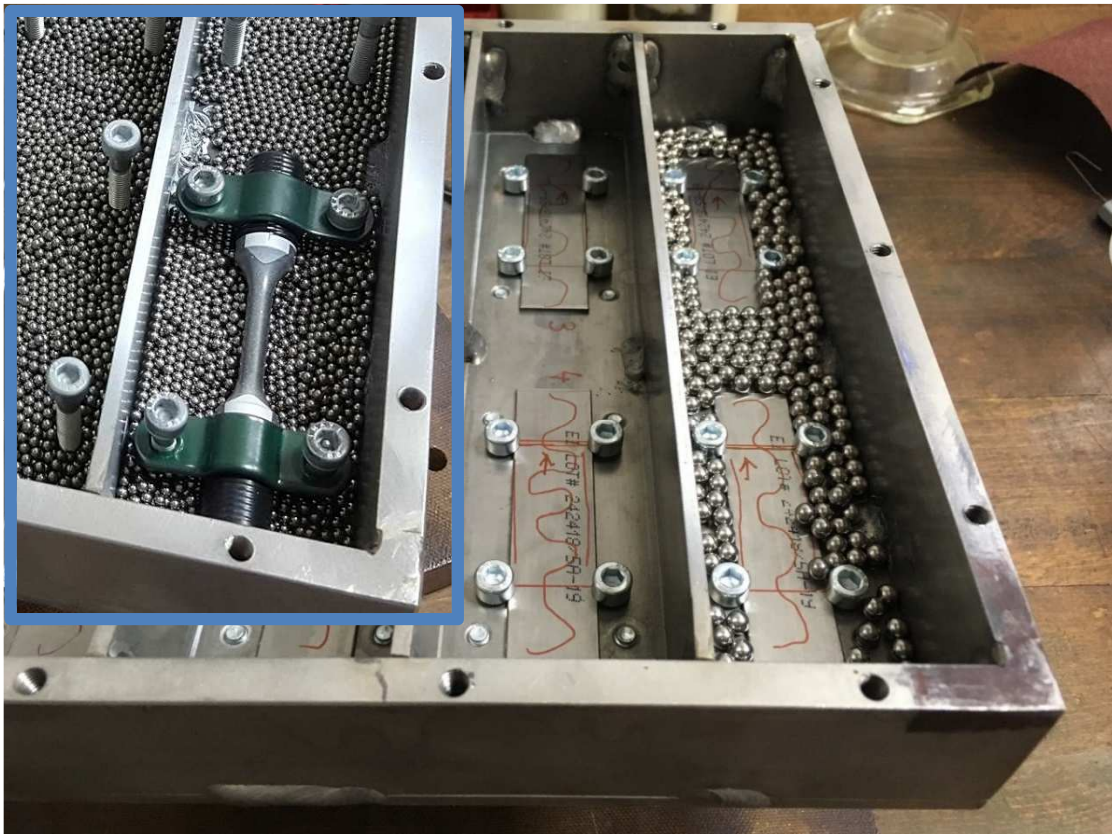
Při elektrojiskrovém obrábění dochází k úběru materiálu na elektrodách pomocí rychle se opakujících periodických impulsů jiskrového výboje způsobeného přivedením stejnosměrného proudu v pulzech, které mají obdélníkový průběh. Celý proces probíhá v prostředí dielektrika – resp. kapaliny s velmi vysokým odporem. Výboj mezi katodou a anodou je vytvořen jednosměrným napětím přivedeným do obvodu s odporem R a kapacitou kondenzátoru C. Velikost tohoto napětí je dána vzdáleností mezi elektrodami, vodivostí dielektrické kapaliny, znečištěním dielektrika. [73]

Jednou z elektrod je vodivý obrobek, k němuž je na vzdálenost 0,01 až 0,4 přiblížen nástroj. Následuje vznik jiskrové mezery. Odjiskřené mikročástice jsou odplavovány dielektrikem, které je dále filtrováno. Samotný vznik mikrotřísky je způsoben lokálním natavením materiálu obrobku a jeho vymrštěním do dielektrika [73]. Reálně na povrchu obrobku zůstává kráter profilu kulového vrchlíku. Vzhledem k množství a překryvu výbojů nejsou

jednotlivé krátery na povrchu jasně čitelné. Elektroerozivní obrábění se obecně prezentuje výrazným (negativním) ovlivněním povrchové vrstvy v několika úrovních s různými projevy – strukturními, chemickými i napjatostními. Nejzásadnější z projevů je formování přetavené vrstvy (recast layer) [72][73].

6.2.6. Vibrační kuličkování

Vibrační kuličkování využívá ke zpevnění kuličky výrazně větších průměrů níže řízené tryskání a jejich obvykle nižších rychlostí. Zpevňovaná součást je umístěna v přípravku do zásypu kuliček. Součást v přípravku je umístěna na vibrující rám, čímž dojde k vynucenému kmitání kuliček a všesměrovým dopadům na povrch součásti. Vzhledem k většímu průměru kuliček a jejich kulovému hladkému tvaru lze docílovat jak vnesení tlakových zbytkových napětí, tak snížení drsnosti povrchu po předchozích technologiích třískového obrábění, čímž se ve smyslu dosahovaných výsledků tato technologie odlišuje od technologie shotpeening. Aplikace vibračního kuličkování vyžaduje návrh a výrobu speciálních přípravků a optimalizaci procesních parametrů. Při návrhu technologie pro konkrétní součást je třeba vhodně volit množství, průměr a materiál kuliček, střední volnou dráhu kuličky vzdálenost odrazové plochy přípravku a dopadové plochy obrobku, rozkmit rámu a budící frekvenci.



Obr. 6.2: Prototyp vlastního přípravku pro kuličkování technologických vzorků a únavových těles

Technologie vibračního kuličkování pro kritické díly turbovrtulového motoru včetně návrhu prototypových i sériových přípravků je předmětem dokumentu Ověřená technologie TH01011405-V7 [74], která je předmětem smlouvy mezi FS ČVUT a GE Aviation Czech s.r.o. Pro vývoj technologických parametrů a ověřování účinku vibračního zpevňování byl navrhnout a vyroben přípravek pro ploché destičky, almen pásky a tělesa pro vysokocyklovou únavu (VCÚ).

6.2.7. Progresivní technologie leštění (SPM)

Výše uvedené výrobní a zpevňovací technologie mohou v povrchové vrstvě vyvozovat příznivý průběh zbytkových napětí, nicméně obvykle se jejich aplikací nedosahuje požadovaných nízkých drsností u lopatkových dílů (nejlépe hranice Ra 0,4 μm u vibračního kuličkování). Z toho důvodu jsou předmětem vývoje dokončovací technologie, které by drsnosti povrchu dále snižovaly, povrch nezatěžovaly tepelně ani mechanicky a vykazovaly minimální úběry příznivé tlakové vrstvy.

Jedna z potenciálně vhodných je progresivní technologie leštění SPM. Stroje pro progresivní strojní dokončování vyrábí firma S.P.M. Mould Polishing System s.r.l. se sídlem v italském Conneiglianu. FS ČVUT se podílela v roce 2019 na prvním transféru tohoto technologického zařízení do ČR. Primárně se jedná o omílací stroje vyvinuté pro čištění a leštění forem pro vyfukování skleněných lahví. Technologie je založena na buzení pracovní komory ve tvaru kvádrů uložené v rozích na pružinách vibračním motorem (asynchronní motor s nevyváhou). Rozpohybováním pracovní komory se vibrace přenáší na pracovní médium, které obtéká leštěný díl, který je pevně skrze elektromagnet spojen s pracovní komorou. Napříč uložený vibrační motor nutí pracovní médium, mimo vlastní vibrace, k pomalé cirkulaci v pracovní komoře okolo pomyslné osy, která je rovnoběžná s osou vibračního motoru. Motor je zavěšen pod pracovní komorou a je doplněn frekvenčním měničem v rozsahu 0 až 50 Hz. V průběhu procesu leštění dochází k programově definované reverzaci chodu a tím změně směru cirkulace média.

Skladba pracovního média:

- měděné třísky
- abrazivum na bázi Al₂O₃ a mastku SPM TRIAL 860G
- lubrikant SPM FAM 521
- smáčedla na bázi průmyslového saponátu SPM Lucibril A320R
- voda

Základem pracovního média jsou měděné třísky ve tvaru kosodélníků o straně 3,5x4,5 a tloušťce 1 mm, které jsou podstatou celé technologie. Měď plní funkci nosiče abraziva, kterým je směs korundového prášku a mastku. Abrazivo se zatlačí (ulpí) do povrchu mědi díky její relativně malé tvrdosti. Obtékáním pracovního média s abrazivem pak povrch dílu leští. Velikost i tvar média může být různý. Vysoká hustota mědi a tím i přítlak na povrch součásti násobně zvyšují účinek a rychlost leštění ve srovnání s rozšířenějšími technologiemi omílání tradičních výrobců (Rosler, Walter Throwal, OTEC, ISF a dalších).

V roce 2020 byl v této oblasti dokončen vývoj této technologie na kritické díly turbovrtulového motoru. Dokument „*Technologie progresivního dokončování kritických dílů kompresoru TH03010089-V001*“ [75] uvádí volbu procesních parametrů, anizotropie úběrů, zásady pro konstrukci přípravků, výkresovou dokumentaci a výrobní postupy realizovaných přípravků, ověřovací zkoušky (analýza integrity povrchu a zkoušky vysokocyklové únavy). Aktuálně je ověřená technologie [75] předmětem jednání o licenční smlouvě mezi GE Aviation Czech a FS ČVUT. Pro výrobu upínacích a maskovacích přípravků tvarově složitých lopatkových dílů je vhodné využít výhod aditivních technologií [76].



Obr. 6.3: Využití FDM technologie k výrobě krycích tvarových segmentů maskování lopatek

6.3. Hodnocení integrity povrchu – slitina Ti6Al4V

Následující kapitoly jsou zaměřené na hodnocení vybraných složek integrity povrchu charakterizující výše zmíněné výrobní technologie. Tab. 6.6 uvádí počty a charakter analyzovaných vzorků – použitých primárně pro měření hloubkových profilů zbytkových napětí.

Tab. 6.6: Přehled analyzovaných vzorků.

Technologie	Značení vzorků	Typ vzorku	Tloušťka [mm]	Počet
Čelní frézování	FR	technologický	4	7
5D frézování	5D	technologický	4	6
Shotpeening - jednostranný	SHP-J	technologický	4	5
Shotpeening - oboustranný	SHP-O	technologický	4	5
Laserpeening	LSP	technologický	4	6
Drátové řezání	WEDM	technologický	4	5
5D frézování os	5D	segment lopatky	1,4	9
5D frézování + vibrační kuličkování	5D+VK	segment lopatky	1,4	5
5D frézování + SPM leštění	5D+L	segment lopatky	1,4	5
5D frézování + vibrační kuličkování + SPM leštění	5D+VK+L	segment lopatky	1,4	5

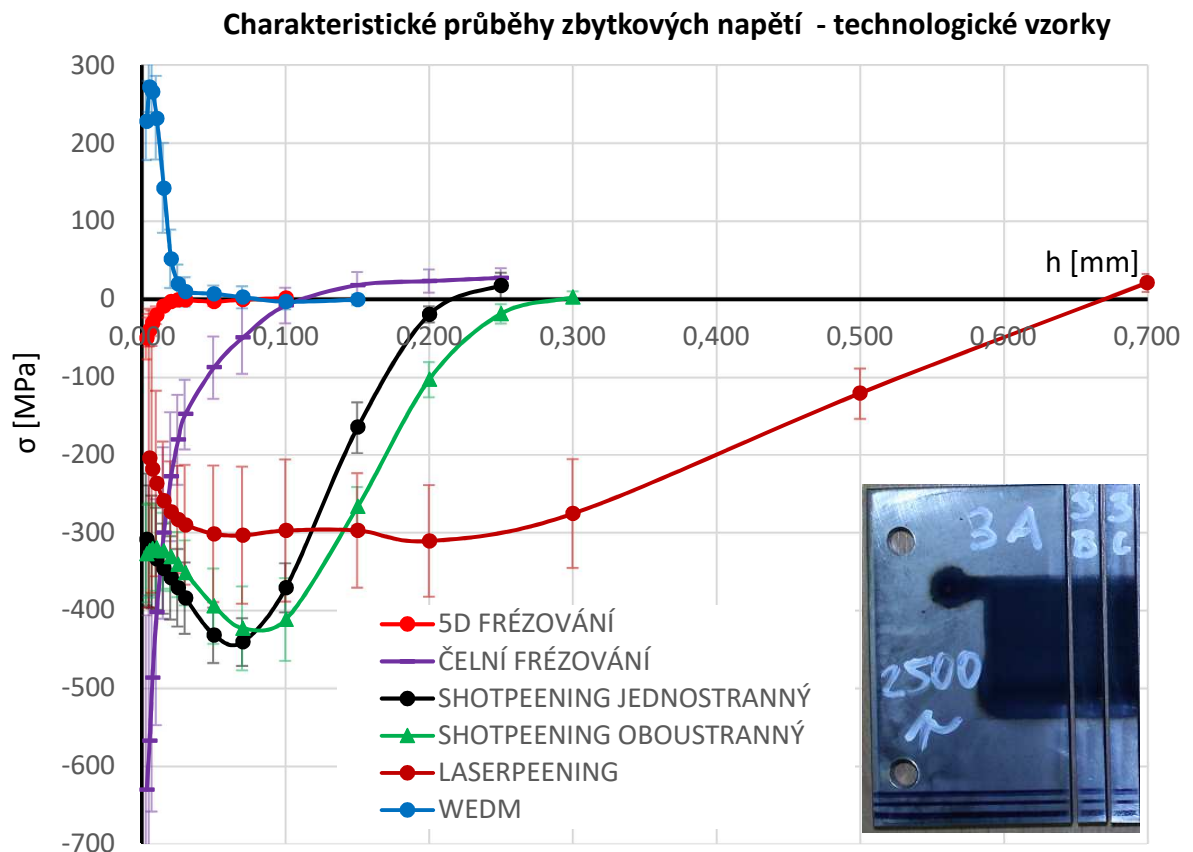
6.3.1. Reprezentativní průběhy zbytkových napětí

Vzhledem ke komplikované prezentaci výsledků celého souboru vzorků jednotlivě jsou uvedeny průběhy sestavené z hodnot průměrů na jednotlivých hladinách doplněné o směrodatné odchytky – statistické zpracování bylo popsáno v kapitole 4.8.2.

Čelní frézování – technologické vzorky

Čelní frézování v povrchu technologických vzorků vyvozuje tlakový charakter zbytkových napětí s velmi výrazným gradientem. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem bylo zjištěno tlakové napětí -568 ± 187 MPa. Z pohledu měření lze právě v povrchových vrstvách pozorovat výrazný rozptyl naměřených hodnot. Tlaková zbytková napětí s hloubkou strmě klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí stabilně

v hloubce 0,1 mm pod povrchem. Vyrovňovací tahová zbytková napětí jádra vzorku lze stanovit v hloubce 0,25 mm pod povrchem na $+27 \pm 13$ MPa. Celková tloušťka tlakové vrstvy nebyla na základě zkušenosti s běžnými uhlíkovými a chrom-molybdenovými oceli očekávána v takové hloubce. Vyšší hloubky lze pravděpodobně připisovat záběrovým poměrům, kde hloubka $a_p = 1$ mm snižuje efektivní úhel nastavení α_r a především nízkému modulu pružnosti.



Obr. 6.4: Charakteristické průběhy zbytkových napětí - technologické vzorky

Dokončovací 5D frézování monolitními nástroji – technologické vzorky

Dokončovací frézování monolitními nástroji ve srovnání s čelním frézováním vykazuje výrazně mělký profil zbytkových napětí i výrazně nižší absolutní hodnoty v bezprostřední blízkosti povrchu. Primárním zdrojem rozdílů je výrazně menší plocha řezu a odebíraný přírůstek, které mají za následek řádově nižší řezné síly ve všech směrech a tím nižší zatížení povrchu (i ve smyslu tepelného zatížení). V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem bylo zjištěno tlakové napětí -50 ± 27 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou strmě klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí v hloubce 0,02 až 0,03 mm pod povrchem. Vyrovňovací tahová zbytková napětí jádra vzorku lze z pohledu

metodiky zpracování dat stanovit v hloubce 0,1 mm pod povrchem na $+1\pm 2$ MPa. Vyrovnávací tahová napětí lze vzhledem k tloušťce vzorku a mělkému průběhu tlaků v povrchu očekávat opravdu na nízkých hodnotách, nicméně čistě z pohledu citlivosti metody (přírůstku deformace v čase) je přesné stanovení obtížné.

Shotpeening – jednostranný – technologické vzorky

Na souboru vzorků tryskaných jednostranně byl zjištěn výrazně tlakový charakter zbytkových napětí. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm byla zjištěna tlaková napětí o velikosti -318 ± 78 MPa. Hodnoty tlakových pnutí s houbkou narůstají a v hloubce 0,07 mm vytváří tlakovou špičku s napětím -441 ± 31 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí v hloubce 0,22 mm pod povrchem. Vyrovnávací tahová zbytková napětí jádra vzorku lze z pohledu metodiky zpracování dat stanovit v hloubce 0,25 mm pod povrchem na $+17\pm 16$ MPa.

Shotpeening oboustranný – technologické vzorky

Oboustranně současně tryskané vzorky vykazují velmi podobné průběhy. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm byla zjištěna tlaková napětí o velikosti -323 ± 60 MPa. Hodnoty tlakových pnutí s houbkou narůstají a v hloubce 0,08 mm vytváří tlakovou špičku s napětím -423 ± 54 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí v hloubce 0,3 mm pod povrchem. Vyrovnávací tahová zbytková napětí jádra vzorku nebylo možné stanovit z důvodu nedostatečného úběru. Při jednostranném a oboustranném tryskání nelze pozorovat výrazné změny v rozložení povrchové napjatosti. Teoretické předpoklady potvrzuje posun tlakové špičky i posun bodu přechodu do vyrovnávacích tahových napětí do větších hloubek u tryskání oboustranného. Absolutní povrchové hodnoty změněny prakticky nebyly.

Laserpeening – technologické vzorky

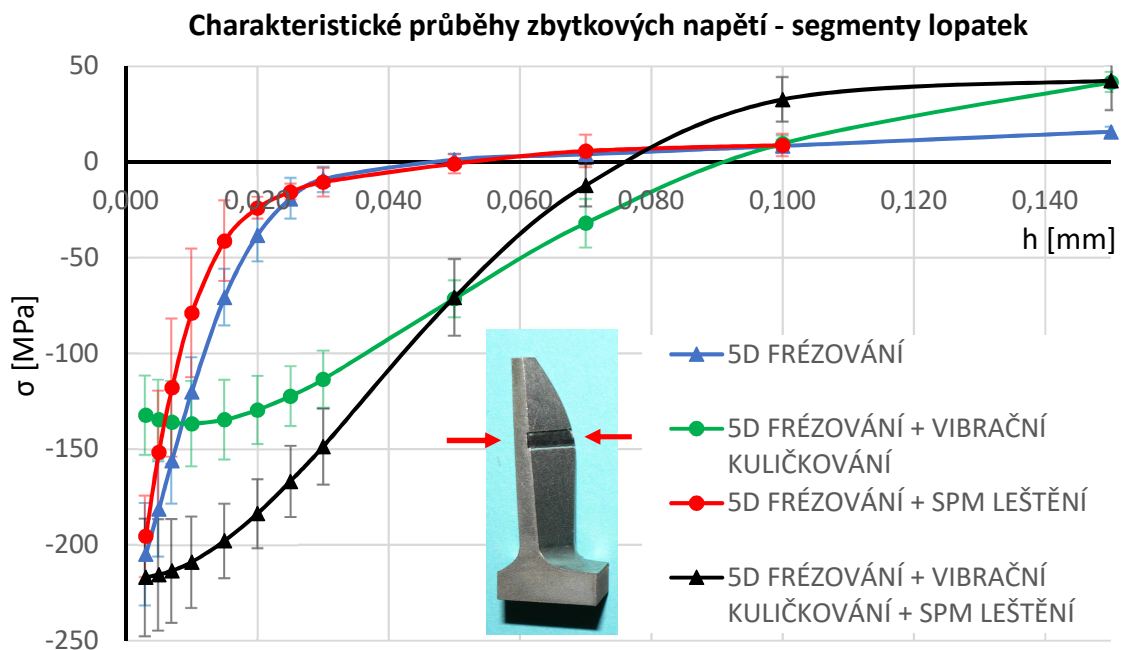
Laserové zpeňování povrchu se výrazně vymyká ostatním průběhům významnou hloubkou kompresní vrstvy. O výrazném zhutnění materiálu v ovlivněné oblasti svědčila i citelně propadlá místa v oblastech ovlivnění. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm byla zjištěna tlaková napětí o velikosti -205 ± 192 MPa. Hodnoty tlakových pnutí s houbkou narůstají až do hloubky 0,05 mm, kde zbytkové napětí dosahuje -302 ± 88 MPa. S rostoucí hloubkou pod povrchem se úroveň zbytkových napětí téměř nemění až do hloubky 0,2 mm. Od této hloubky nastává velmi pozvolný pokles tlakových pnutí až do hloubky 0,67 mm, kde zbytková napětí přechází do vyrovnávacích tahových napětí, jejichž úroveň nelze na základě dosažené hloubky 0,7 mm stanovit.

WEDM drátové řezání – technologické vzorky

Elektroerozivní drátové řezání stejně tak jako elektroerozivní hloubení ovlivňuje tenkou povrchovou vrstvou po stránce tepelného zatížení, strukturních i chemických mechanismů, což je důvodem poměrně komplikovaných průběhů zbytkových napětí. U hrubovacích parametrů hloubení byla pozorována ve velmi tenké povrchové vrstvě (typicky okolo 20 μm) vysoká tahová napětí, která s výrazným gradientem přecházela do výrazných tlaků a zpět do tahů. V rámci vyšetřovaného souboru vzorků byly průběhy relativně monotónní. V úplné blízkosti povrchu v hloubce 0,003 mm byla zjištěna tahová napětí o velikosti $+228 \pm 51$ MPa, která dále narůstají na do tahové špičky $+272 \pm 33$ MPa v hloubce 0,005 mm. Tahová zbytková napětí následně strmě klesají a v hloubce 0,03 mm dosahují hodnot $+9 \pm 19$ MPa, které z technického hlediska lze již považovat za vyrovnávací, ačkoli jsou záporné. Teoreticky nutných, vyrovnávacích hodnot je dosaženo až v hloubce 0,1 mm, kde bylo zjištěno -3 ± 10 MPa.

5D frézování – segmenty lopatek (5D)

V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem bylo zjištěno tlakové napětí -181 ± 25 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou strmě klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí v hloubce 0,03 až 0,05 mm pod povrchem. Vyrovnávací tahová zbytková napětí jádra vzorku lze z pohledu metodiky zpracování dat stanovit v hloubce 0,1 mm pod povrchem na $+8 \pm 3$ MPa.



Obr. 6.5: Charakteristické průběhy zbytkových napětí - segmenty lopatek

5D frézování + vibrační kuličkování – segmenty lopatek (5D+VK)

Frézovaný povrch podrobený vibračnímu kuličkování lze charakterizovat jako hloubkový a výrazně tlakový. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem vykazuje tlakové napětí -134 ± 21 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou velmi mírně narůstají a v hloubce 0,01 mm pod povrchem vytváří nepatrnou tlakovou špičku o hodnotách -137 ± 22 MPa. Následuje pozvolný pokles tlaků až do bodu přechodu v hloubce 0,085 mm. Vyrovnávací tahová napětí detekovaná v hloubce 0,15 mm dosahují $+42\pm 5$ MPa.

5D frézování + SPM leštění (5D+L)

Frézovaný povrch dokončený leštěním v bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem vykazuje tlakové napětí -152 ± 32 MPa. Tlaková zbytková napětí s hloubkou strmě klesají a do vyrovnávacích tahových pnutí přecházejí v hloubce 0,05 mm pod povrchem. Vyrovnávací tahová zbytková napětí jádra vzorku lze stanovit v hloubce 0,1 mm pod povrchem na $+9\pm 6$ MPa.

Frézovaný povrch dokončený leštěním by měl odstraněním části tlakové vrstvy teoreticky způsobit posun hloubky přechodu k nižším hodnotám a pokles povrchových hodnot v důsledku redistribuce napětí (oproti výchozímu frézovanému stavu). To by platilo pokud by bylo možno s jistotou vyloučit tepelné a mechanické zatížení povrchu při leštění. Z podstaty technologie lze vyloučit tepelné ovlivnění, avšak mechanické zcela vyloučit nelze, jelikož na povrch lopatek působí médium kmitavými pohyby a sloupec média vytváří vlivem gravitace zatížení poměrně značné. Z uvedených průběhů lze zejména v prvních 20 μm opravdu pozorovat posun křivky a tento posun je vzhledem ke směrnici prokazatelně detekovatelný, mnohem lépe než stanovení hloubky přechodu, která se posunula oproti očekávání o 0,01 mm hlouběji. K poklesu absolutních hodnot napětí v povrchu nedošlo v takové míře, jak by se dalo očekávat a existuje proto podezření, že technologie SPM leštění je schopna v tenké povrchové vrstvičce přispívat k příznivým tlakovým napětím. K přezkoumání tohoto jevu nemohlo dojít z důvodu nedostupnosti dalších vzorků.

5D frézování + vibrační kuličkování + SPM leštění (5D+VK+L)

Poslední soubor vzorků kombinuje použití zpevňovací technologie s následným leštěním. V bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm pod povrchem vykazuje tlakové napětí -216 ± 29 MPa. Tlaková zbytková napětí v tomto případě již nevytváří tlakovou špičku a pozvolna klesají až do bodu přechodu v hloubce 0,075 mm pod povrchem. Vyrovnávací tahová napětí detekovaná v hloubce 0,15 mm dosahují $+43\pm 15$ MPa. Posun bodu přechodu k nižším hloubkám koresponduje s detekovanými úběry z povrchu. Povrchové hodnoty však

oproti vzorkům 5D+VK výrazně narostly, což by potvrzovalo podezření z předchozího srovnání (5D vs. 5D+L) o tom, že SPM leštění může v povrchové vrstvě opravdu do povrchu vnášet tlaková zbytková napětí.

Konfrontace výsledků s mechanismy vzniku zbytkových napětí

Na segmentech lopatek byl sledován primárně vliv zpevňovací technologie – vibračního kuličkování, dokončovací technologie SPM leštění a jejich vzájemné interakce. Základním stavem bylo vždy 5-osé dokončovací frézování monolitní kulovou frézou. Vibrační zpevňování lze považovat za bezúběrovou dokončovací technologii a u SPM leštění se odebraný materiál z povrchu pohybuje mezi 0,005 až 0,01 mm. Frézovaný stav vykazoval na segmentech lopatek shodný tlakový trend jako u dokončovacího frézování technologických vzorků. V blízkosti povrchu však byly zjištěny vyšší absolutní hodnoty tlakových napětí.

Vzhledem ke konzervativním podmínkám obrábění a intenzivnímu chlazení byl na všech vzorcích detekován tlakový průběh zbytkových napětí. V souladu s teorií lze tvrdit, že se za daných podmínek neuplatňují mechanismy vzniku zbytkových napětí za působení zvýšené teploty a plně převažují mechanismy silové. U uvedených způsobů frézování se jako nejpravděpodobnější jeví natahování limitní povrchové vrstvy obrobku hřbetem nástroje až do stavu plastické deformace této vrstvy - natažení. Po odejmutí působícího zatížení je plasticky natažená vrstva brzděna jádrem nezměněné délky a v povrchu jsou vyvozeny zjištěné tlakové průběhy. Na shodném principu pracují i mechanické zpevňovací technologie – řízené tryskání a vibrační kuličkování.

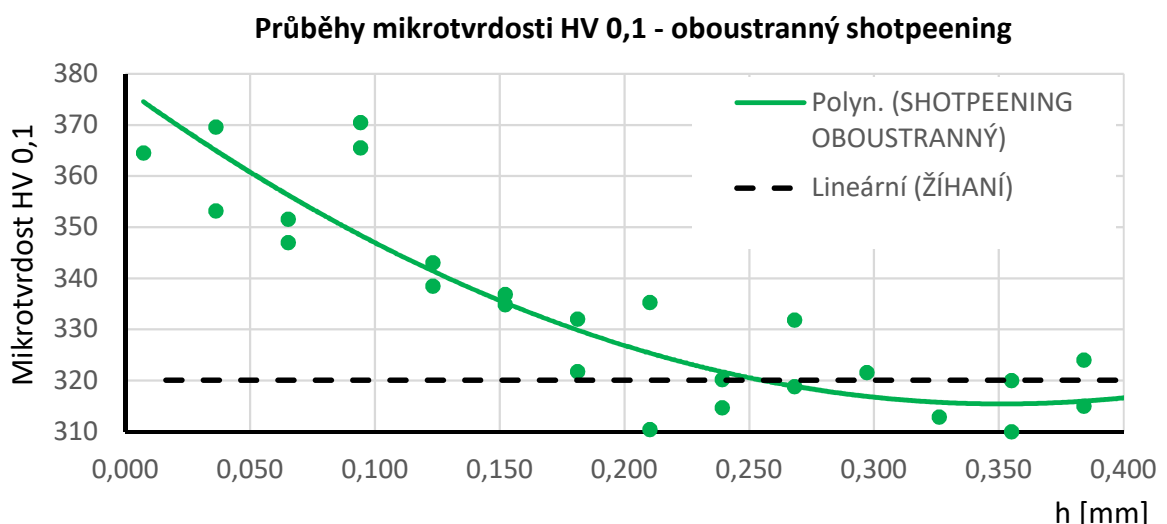
U elektroerozivního obrábění WEDM vykazujícího mělké průběhy tahových zbytkových napětí se mechanismus lokální plastické deformace z principu uplatňovat nemůže. Naopak se zde uplatňují mechanismy nerovnoměrného ohřevu a chlazení, deformace, nerovnoměrné strukturní transformace a absorpce prvků do povrchové vrstvy – viz. kapitola 2.4. Na relativně malé hloubce průběhu tahových zbytkových napětí lze pozorovat výrazně nižší schopnost uvedených mechanismů vzniku zbytkových napětí ovlivnit materiál do hloubky ve srovnání s mechanismem nerovnoměrné plastické deformace.

V případech progresivní technologie leštění SPM nejsou výsledky zcela jednoznačné. Na rozdíl od konvenčního mechanického leštění (ruční přešťování, oscilační leštění) se zde nemohou uplatňovat mechanismy nerovnoměrného ohřevu či chlazení. V návaznosti na nízkou teplotu procesu (20 až 70 °C) a trvání procesu (desítky minut až jednotky hodin) lze bezpečně vyloučit absorpci prvků do povrchu. U titanu, který netvoří metastabilní deformační fáze lze zároveň vyloučit i nerovnoměrné fázové transformace. Leštění při představě množství záběrů

abraziva, délce procesu a úběru jednotek mikrometrů prakticky vylučuje i mechanismus nerovnoměrné plastické deformace, respektive jeho měřitelný projev, ve spojení s vlastním otěrem (obtékáním povrchu abrazivem). Navzdory těmto skutečnostem průběhy po leštění nevykazují prostý úbytek tlakové vrstvy a redistribuci napětí. Jediné možné vysvětlení je působení mechanismu nerovnoměrné plastické deformace v povrchu nepřímo skrze vibrace přenášené zařízením na obtékající médium (měděné třísky se zachyceným abrazivem).

6.3.2. Mikrotvrdość

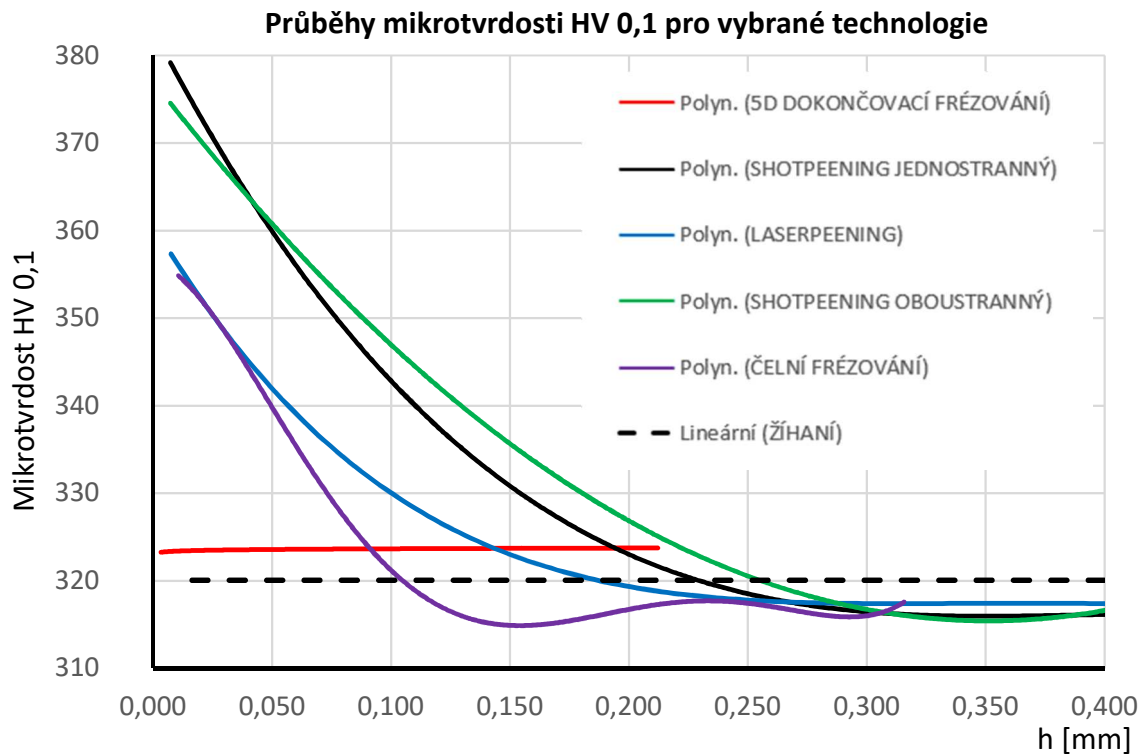
Měření mikrotvrdości v těsné blízkosti povrchu vyžaduje zhotovení šikmých výbrusů, pro které jsou vhodnější prizmatické obdélkové průřezy vzorků. Ty pak umožňují přímkový styk vzorku jak na podložce lisu, tak na podložce definující úhel. Z tohoto důvodu byla analýza zpevnění prováděna na skupině technologických vzorků rozšířené o vzorek frézovaný a následně žíhaný. Hlubší průběhy mikrotvrdości byly skládány z více matic vpichů (obdobné jako na Obr. 9.8) s různými roztečemi a posunem, aby bylo možno se přiblížit povrchu a zároveň zachovat podmínky normy ČSN EN ISO 6507-1 [7] na minimální vzdálenost od kraje (min. 2,5D) a minimální vzdálenost vpichů (min. 4D). V oblasti nízkých zatížení (zde HV 0,1) je obvyklá vysoká variabilita výsledků (Obr. 6.6). Jedním ze zdrojů variability je i orientace polohy vpichu vůči hranici zrna, případně fázové složení v místě vpichu. Presentované průběhy jsou proto proloženy vhodným typem regrese.



Obr. 6.6: Proložení naměřených hodnot profilu mikrotvrdości polynomem – shotpeening.

Zjištěné průběhy mikrotvrdości do jisté míry korelují s výsledky zbytkových napětí. I zde je s výjimkou 5D dokončovacího frézování prokazatelné ovlivnění povrchu zpevňovacími technologiemi.

V případě řízeného tryskání se v naprosto dominantní míře uplatňuje plastická deformace povrchu a tryskané vzorky v hloubce 0,01 mm dosahují tvrdostí 380 HV 0,1. Průběh mikrotvrdosti pozvolna klesá a hodnot základní tvrdosti jádra dosahuje v hloubce 0,3 mm. Hloubka zpevněné vrstvy je téměř shodná s hloubkou zjištěných tlakových zbytkových napětí.



Obr. 6.7: Výsledné profily mikrotvrdosti pro jednotlivé technologie

Vzorky po technologii laserpeening mají velmi podobný průběh, nicméně v těsné blízkosti povrchu v hloubce 0,01 mm dosahují nižší hodnoty mikrotvrdosti 355 HV 0,1. K hodnotám mikrotvrdosti jádra se průběh navrácí už v hloubce 0,25 mm, která s hloubkou přítomnosti tlakových zbytkových napětí ani vzdáleně nesouvisí, ačkoli bylo možno očekávat opak. Tuto rozdílnost lze částečně obhájit rozdílným mechanismem zpevňování.

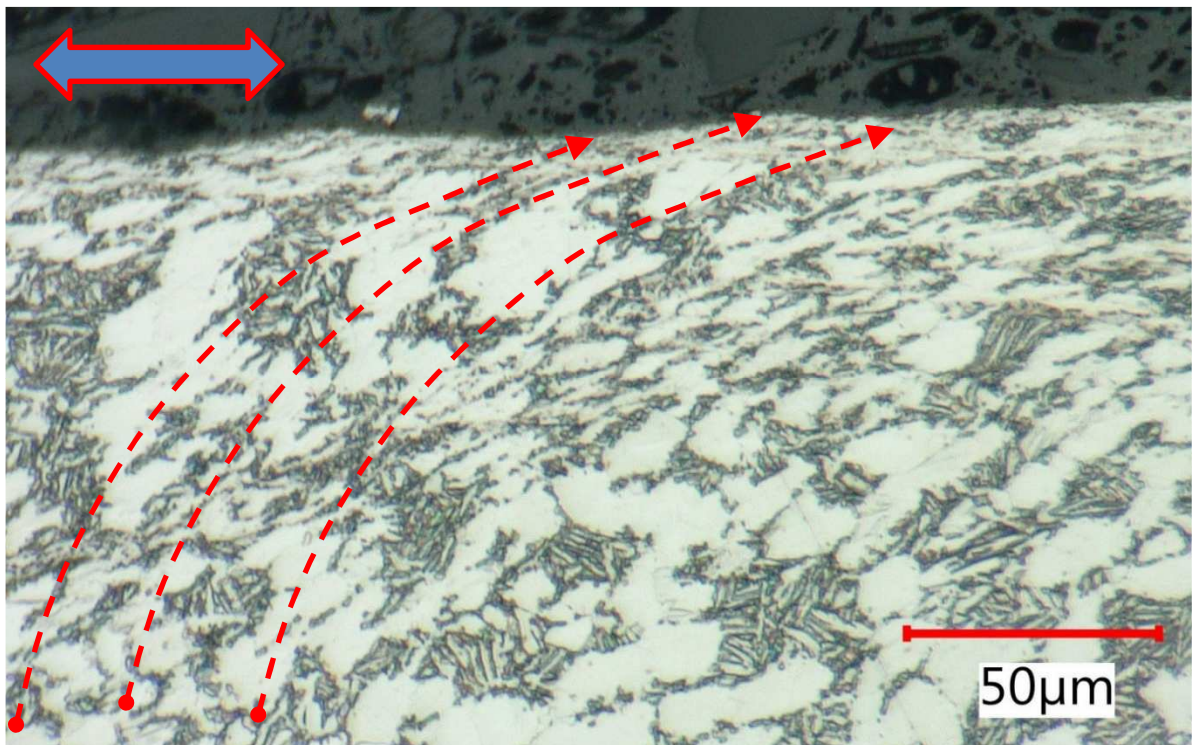
Frézované vzorky vykazují v blízkosti povrchu nárůst na 355 HV 0,1. V hloubce 0,1 mm pod povrchem se dostávají na základní tvrdost. V hloubce 0,1 až 0,2 mm lze detekovat velmi mírný a z technického hlediska nezajímavý pokles s následnou stabilizací mikrotvrdosti na hodnotách neovlivněného jádra.

U 5D dokončovacího frézování nebylo zpevnění povrchu vůbec pozorováno. I s ohledem na výsledky zbytkových napětí byla minimálně nižší úroveň zpevnění očekávána. Zpevňovací mechanismy - plastická deformace - se při odebrání přídavku a záběrových poměrech patrně neuplatňují v dostatečné míře.

Z provedených měření profilu mikrotvrdosti lze prokázat náchylnost slitiny Ti6Al4V k deformačnímu zpevnění povrchu. Na druhou stranu je potřeba uvést, že systematický záchyt tohoto zvýšení mikrotvrdosti je z pohledu analytických činností náročnější a méně jednoznačný než u běžných ocelí nebo austenitických nerezů. Maximální hodnoty v těsné blízkosti povrchu dosahují sotva 20% nárůstu oproti jádru vzorku i u těch neintenzivnějších procesů. Z pohledu výrobních technologií, především obrábění, deformační zpevnění povrchu nepředstavuje nějaké zásadní technologické problémy a ani si od něho nelze slibovat zvýšení odolnosti povrchu k mechanickému opotřebení.

6.3.3. Metalografická analýza

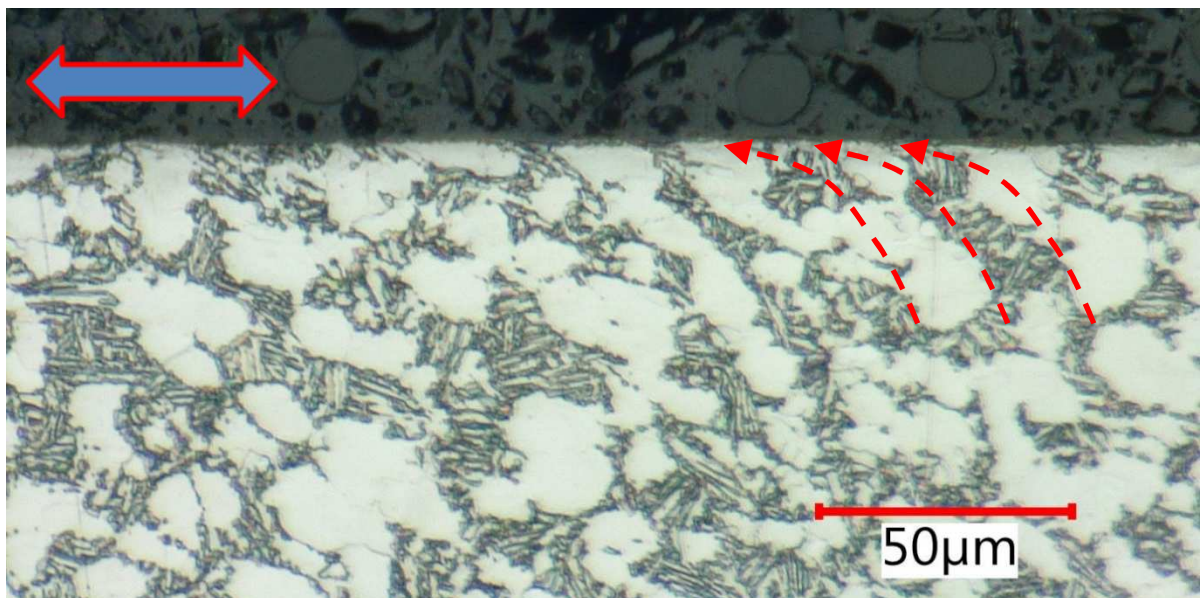
Při ohledání v leštěném stavu byla věnována pozornost především povrchové vrstvě a kontrolovala se přítomnost trhlin a mikrotrhlin po frézování, případně dalších technologiích. V leptaném stavu šlo primárně o zviditelnění jednotlivých fází a zviditelnění plastické deformace povrchu. Mikrostrukturu použitých vzorků tvoří rovnoosá zrna alfa fáze (bílá) v transformované beta matici (tmavá) obsahují acikulární alfa fázi (Obr. 6.8 – podpovrchové vrstvy). Vzhledem k odběru vzorků z výkovku tvářeného v alfa+beta oblasti a následné rekrytalizaci je struktura spíše jemnozrná s velikostmi zrna G6 až G8 dle ASTM E112.



Obr. 6.8: Deformace povrchové vrstvy Ti6Al4V při čelním frézování

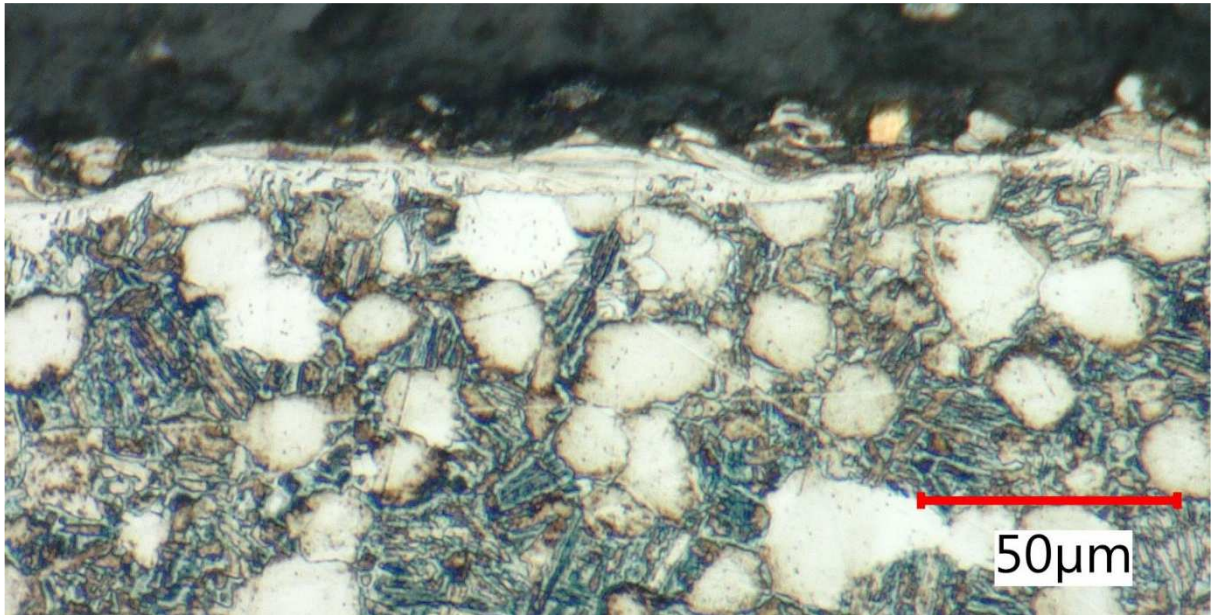
Prostřednictvím metalografie je deformace povrchové vrstvy poměrně obtížně detekovatelná. U technologie shotpeenig je zhutnění povrchu plošné a nevýrazné, kdežto u čelního frézování je deformace zrn ve směru odchodu třísky a ve směru tření hřbetu nástroje o povrch velmi dobře pozorovatelná. Dochází jak k deformaci beta fáze, tak k deformaci rovnoosých zrn fáze alfa. Natahování povrchu třením hřbetu prakticky znemožňuje rozlišení jednotlivých fází. Hranice rozlišitelnosti deformace a orientace zrn je přibližně 0,1 mm pod povrchem, což představuje jistou shodu mezi výsledky analýzy zbytkových napětí (hloubkou přechodu) a mikrotvrdostí.

U dokončovacího frézování dochází k plastické deformaci povrchu shodnými mechanismy, avšak ve výrazně menší míře. Orientace mikrostruktury po průchodu nástroje je patrná do hloubky přibližně 0,05 mm.



Obr. 6.9: Deformace povrchové vrstvy Ti6Al4V po 5D dokončovacím frézování

Vzorky po WEDM řezání byly záměrně výrazně přešleptány bifluoridem amonným (Obr. 6.10), který umožnil zviditelnění souvislé přetavené vrstvy nestabilní tloušky – 0,005 až 0,02 mm. Na povrchu této vrstvy lze nalézt redeponované částice odtaveného kovu po nedokonalém výplachu. S vysokou četností se izolovaně v přetavené vrstvě vyskytují mikrotrhliny, které neprorůstají do základního materiálu. Pod přetavenou vrstvou nelze pozorovat hrubnutí zrna. To je primárně způsobeno dostatečným výplachem a tím i velmi krátkodobé vystavení zvýšené teplotě. Tento jev je navíc podpořen nízkou tepelnou vodivostí titanových slitin. S ohledem na bezsilový úběr materiálu nelze pozorovat ani jakékoli deformace mikrostruktury.



Obr. 6.10: Přetavená vrstva po WEDM drátovém řezání – leptáno bifuoridem amonným

7. Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí

V rámci definice cílů disertační práce byly stanoveny dílčí cíle:

- Aplikace metody na pokročilé technické materiály a pokročilé technologie dokončování povrchu
- Katalogizace typických průběhů zbytkových napětí pro vybrané technologie doplněná o analýzu souvisejících složek integrity povrchu

Nerezové oceli běžného austenitického typu AISI 3xx (W.Nr. 1.43xx, ČSN 17 2xx) jsou vzhledem k nízkým pevnostním charakteristikám v letecké výrobě hojně využívány pro nekritické díly (příruby, šroubení, skříně, palivové systémy studené části). Níže uvedený experiment je směřován do oblasti soustružení, aby rozšířil spektrum analyzovaných technologií. Zároveň analyzovaný materiál – austenitická nerezová ocel AISI 304 disponuje výrazně odlišnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a tím vykazuje i rozdílné chování povrchové vrstvy. Nástrojová geometrie a záběrové poměry významným způsobem ovlivňují výsledný stav povrchu. Geometrie nástroje u takto plastického materiálu významným způsobem ovlivňuje velikost i polohu oblasti primární a terciální plastické deformace, čímž je přímo ovlivněna povrchová vrstva obrobené plochy, do které tyto oblasti přímo zasahují. Pro dokončovací nástroje je vhodné používat ostré pozitivní geometrie (kladný úhel čela). Vliv úhlu čela γ_0 na vybrané složky integrity povrchu při soustružení je předmětem experimentu.

7.1. Austenitická nerezová ocel – AISI 304

V experimentu vlivu úhlu čela soustružnického nože na vybrané složky integrity povrchu byla vybrána základní austenitická nerezová ocel AISI 304 (ekvivalentní označení ČSN 17 240, W. Nr. 1.4301) se směrným složením dle Tab. 7.1.

Tab. 7.1: Směrné složení oceli AISI 304

Zák. komponenty [%]		Příměsi max. [%]					
Cr	Ni	C	P	S	Si	N	Fe
18-20-	8-12	max. 0,08	max. 0,045	max. 0,03	max. 0,75	max. 0,1	základ

Ocel je v základním stavu nemagnetická, má vysoký sklon k deformačnímu zpevnění, v rámci skupiny nerezových ocelí dobrou obrobiteľnosť a vzhľadom k vysokému obsahu uhlíku má veľmi omezené možnosti tepelného zpracování a tendenci ke zcitlivění. Ocel není stabilizovaná titanem ani niobem. Na obrobky lze aplikovat pouze dva režimy žhání: žhání

na odstranění pnutí s teplotou 420 °C / 5 hodin s pomalým chladnutím v peci (použito v experimentu); rozpouštěcí žíhání s teplotou 1050-1070 °C / 0,5 až 2 hodiny s rychlým chlazením do vody [77]. Pro tyče do průměru 160 mm platí následující vlastnosti [78]:

Tab. 7.2: Vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti AISI 304 [78]

Relativní	Veličina		Hodnota	Jednotka
nízká	mez kluzu	$R_{p0,2}$	190	MPa
vyšší	mez pevnosti	R_m	500-700	MPa
vysoká	tažnost	A_{min}	45	%
nízká	tvrdost	HV	160-180	HV 30
vyšší	lin. teplotní roztažnost	α	$18 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
nízká	tepelná vodivost	λ	15	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
nadprůměrná	měrná tepelná kapacita	c	526	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

Vzhledem k nebezpečí opětovného objemového pnutí u silnější stěny trubky byl zvolen první režim – nízkoteplotní žíhání. Žíhání bylo provedeno v atmosférické peci, tudíž trubky měly znatelnou zlatavou barvu, což není na závadu a při následném obrábění došlo k odstranění této submikronové vrstvy v rámci přídatku.

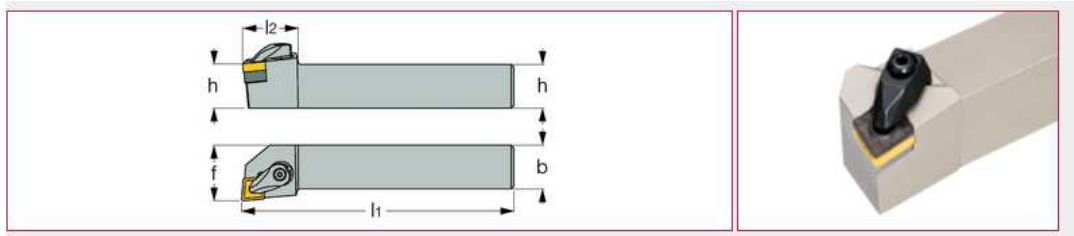
7.2. Návrh experimentu vlivu nástrojové geometrie při soustružení

Motivací k provedenému výzkumu byla omezená trvanlivost nástrojů pro dokončovací soustružení po hrubování. Jako důvod zvýšené spotřeby dokončovacích destiček byly identifikovány změny v povrchové vrstvě. S ohledem na toto zjištění byl proveden rozsáhlý experiment s proměnnými řeznými podmínky a s různou geometrií utvařeče. Cílem bylo identifikovat ty proměnné, které ztíženou obrobitelnost způsobují. V rámci disertační práce nelze publikovat veškerý rozsah ani kompletní výsledky, které jsou předmětem publikací [79], [80], [81]. Nejzásadnější proměnnou byla identifikována geometrie nástroje, a to především výsledného úhlu čela v ortogonální rovině γ_0 . Výsledný úhel čela je složen z úhlu čela lůžka držáku γ_{0D} (-6°) a z úhlu čela na funkční části utvařeče na vyměnitelné břitové destičce γ_{0VBD} .

Pro veškeré zkoušky obrábění byl použit jeden typ držáku s více typy vyměnitelných břitových destiček. Jednotlivé typy vyměnitelné břitové destičky s utvařeči, reprezentují proměnlivou geometrii břítu.

Technologické zkoušky byly prováděny s držáky Iscar ISOTURN - 2020K-12. Jedná se o nůž pro podélné soustružení, pravý. Vzhledem k odlehčení ho lze použít i na čelo. Je určen

pro kosočtverečnou destičku s vrcholovým úhlem špičky 80° . Úhel nastavení hlavního ostří je 95° , úhel nastavení vedlejšího ostří je 5° . Při použití kosočtverečné oboustranné destičky bez utvařeče má nástroj negativní úhel čela -6° a negativní úhel sklonu hlavního ostří -6° . Do držáku jsou určeny destičky typu CNMG.



Obr. 7.1: Držák vyměnitelných břitových destiček použitý při experimentech [82]

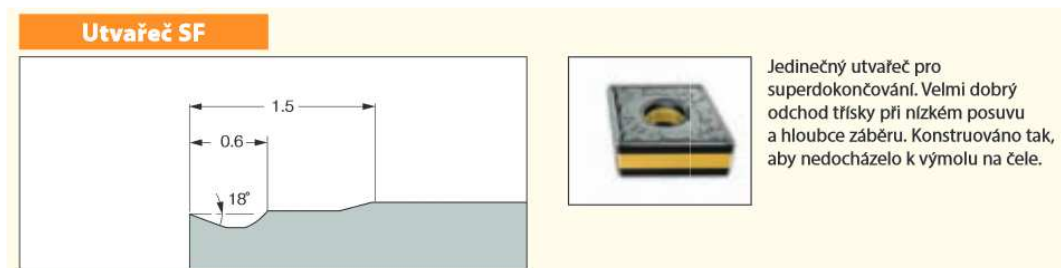
Do držáku bylo vybráno 6 typů vyměnitelných břitových destiček s různou geometrií utvařeče umožňující nastavení výsledného úhlu čela γ_{os} v rozsahu -6° až $+12^\circ$. Pro demonstrování vlivu úhlu čela γ_{os} jsou níže prezentovány okrajové typy utvařečů SF ($+12^\circ$) a F3M (-2°).

CNMG 120404-SF ($+12^\circ$)

Jedná se o oboustrannou 80° kosočtverečnou destičku pro dokončování za nízkých posuvů a hloubek záběru. S ohledem na diagram vhodného utváření třísky výrobce doporučuje posuv na otáčku $f_{ot} = 0,03$ až $0,2$ mm/ot a hloubku řezu $a_p = 0,3$ až 2 mm. Nástrojovou geometrií destičky v kombinaci s držákem uvádí Tab. 7.3.

Tab. 7.3: Nástrojová geometrie při použití destičky CNMG 120404-SF ($+12^\circ$)

Úhel	Značení	Hodnota
úhel čela	γ_o	$+18-6=+12^\circ$
úhel hřbetu	α_o	6°
úhel břitu	β_o	72°
poloměr zaoblení špičky	r_e	$0,4$ mm



Obr. 7.2: Geometrie utvařeče SF v rovině ortogonální [82]

CNMG 120404-NF (-2°)

Jedná se o oboustrannou 80° kosočtverečnou destičku pro dokončování a předfinální řez. Výrobce prezentuje, že díky velmi ostré řezné hraně (zřejmě malému poloměru ostří) a pozitivnímu úhlu čela by destička měla zajišťovat nízký řezný odpor. S ohledem na diagram vhodného utváření třísky výrobce doporučuje posuv na otáčku $f_{ot} = 0,07$ až $0,25$ mm/ot a hloubku řezu $a_p = 0,4$ až $3,5$ mm. Nástrojovou geometrii destičky v kombinaci s držákem uvádí Tab. 7.4.

Tab. 7.4: Nástrojová geometrie při použití destičky CNMG 120404-NF (-2°)

Úhel	Značení	Hodnota
úhel čela	γ_o	+4-6= -2°
úhel hřbetu	α_o	6°
úhel břitu	β_o	72°
poloměr zaoblení špičky	r_e	0,4 mm



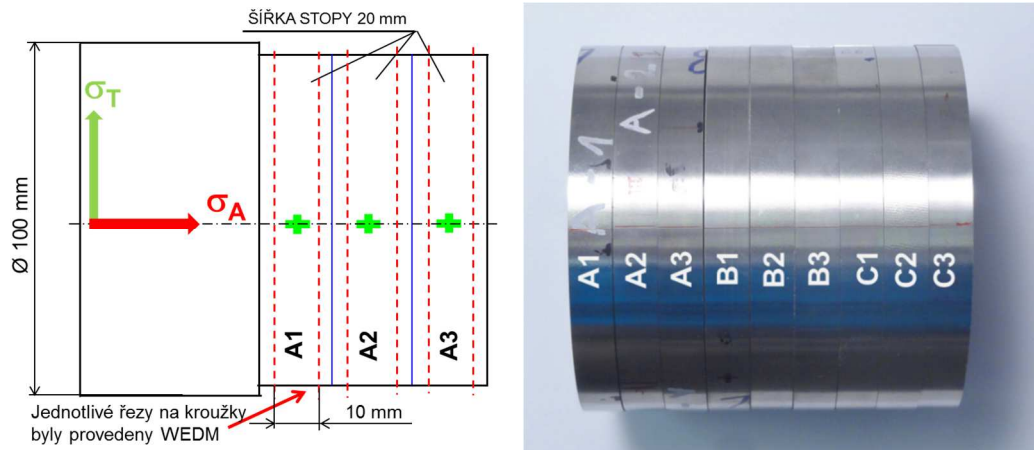
Obr. 7.3: Geometrie utvařeče NF v rovině ortogonální [82]

Posuv na otáčku menší než šířka fazety utvařeče (0,4 mm) umožňuje z pohledu vlivu geometrie na oblast primární plastické deformace považovat úhel čela na fazetě (+4°-6°= -2°) za úhel čela výsledný.

S ohledem na jednodušší provádění analýz, zejména odběru vzorků pro zkoušky zbytkových napětí byl experiment prováděn na silnostěnné trubce. Trubka byla obráběna na jedno upnutí. Na každé trubce byly 3 úseky po 20 mm obráběné jednou kombinací řezných podmínek, případně jedním utvařečem. Následně byly z trubek vyřezány technologii drátového řezání kroužky o šířce 10 mm (Obr. 7.4). Na kroužcích byly dále prováděny analytické činnosti. Obrábění probíhalo na moderním soustružnickém centru OKUMA Genos za intenzivního tlakového přívodu řezné kapaliny. Při testování vlivu geometrie byly zvoleny konstantní řezné podmínky:

- řezná rychlost $v_c = 140$ m/min
- posuv na otáčku $f_{ot} = 0,14$ mm/ot

- hloubka řezu $a_p = 2 \text{ mm}$



Obr. 7.4: Rozřezový plán trubek na jednotlivé kroužky (pro kroužek A)

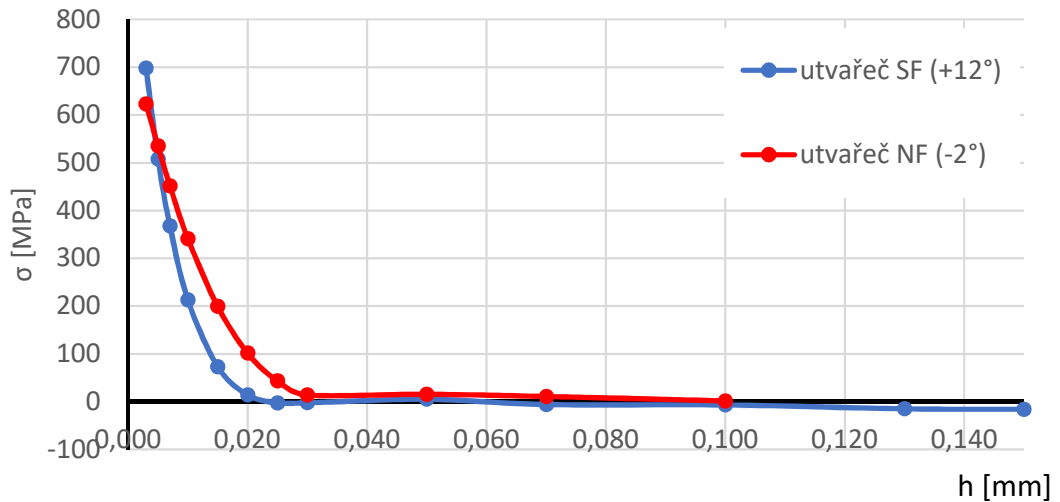
7.3. Hodnocení integrity povrchu – nerezové oceli

K hodnocení integrity povrchu bylo využito měření hloubkového průběhu zbytkových napětí vyvinutou mechanickou metodou s postupným elektrolytickým rozpouštěním, rentgenová difrakční tenzometrie, metalografická analýza a zkoušky mikrotvrdosti.

7.3.1. Reprezentativní průběhy zbytkových napětí

Na segmentech kroužků bylo provedeno měření hloubkového profilu zbytkových napětí, které opakovaně zjistilo přítomnost nepříznivých tahových napětí v těsné blízkosti povrchu. Tato tahová napětí dosahují v bezprostřední blízkosti povrchu v hloubce 0,005 mm vysokých hodnot 500 až 550 MPa. Navzdory vysokým hodnotám pravděpodobně ani lokálně nepřekračují mez pevnosti, jelikož fluorescenčně-petrační zkouška na žádném ze vzorků nedetekovala mikrotrhliny. Vysoká tahová napětí s výrazným gradientem klesají a v hloubce 0,02 až 0,03 mm náhle přechází do beznapětového stavu jádra. Ačkoli lze mezi průběhy zbytkových napětí od utvařeče SF (+12°) a od NF (-2°) pozorovat rozdíl ve vyšší hodnotě na povrchu i vyšší hloubce zásahu tahových napětí u utvařeče NF (-2°), rozdíly jsou velmi nevyrazné a z pohledu užitných vlastností nelze očekávat rozdíly.

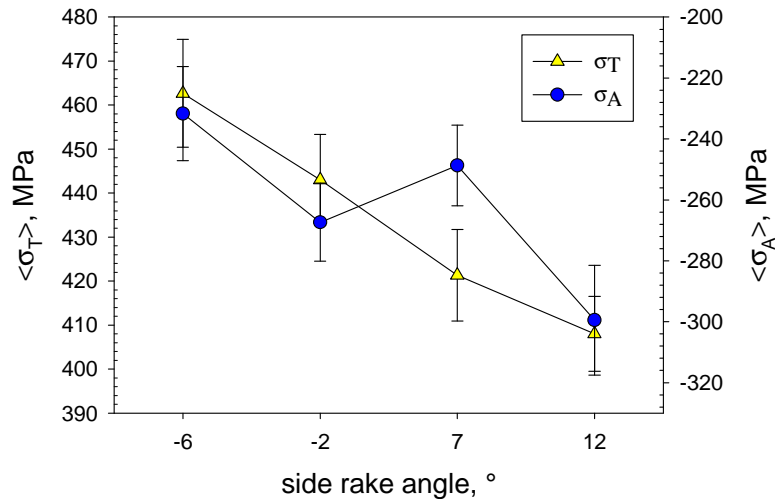
Vliv úhlu čela na profil zbytkové napjatosti v povrchu nerezové oceli AISI 304



Obr. 7.5: Průběh zbytkových napětí po soustružení nerezové oceli

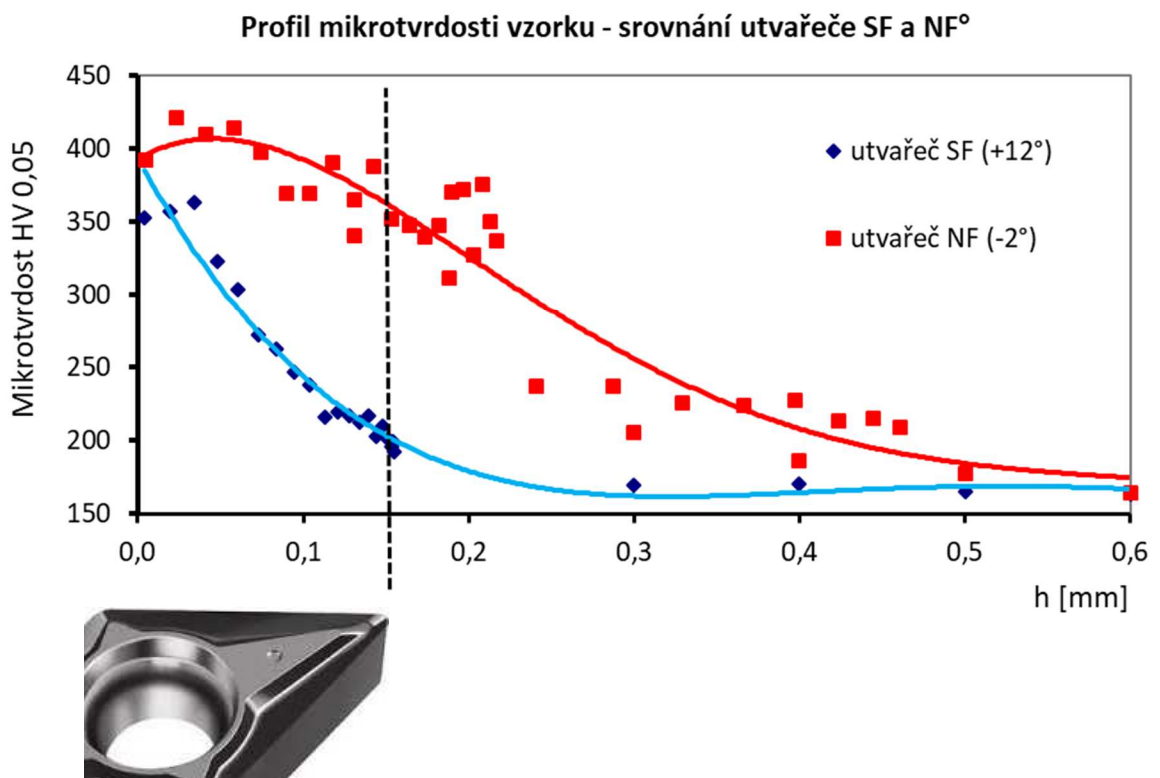
Určení povrchových hodnot zbytkového napětí pro různé geometrie bylo provedeno metodou rentgenové difrakce. Pro vybrané vzorky bylo provedeno i měření hloubkového profilu pomocí RTG difrakce prezentované v publikaci [80], [81]. Měření deformace krystalové mřížky pro stanovení zbytkových napětí bylo provedeno s pomocí zařízení X'Pert PRO MPD s manganovou rengenkou. Difrakční úhly $2\theta_{hkl}$ byly stanoveny z difrakčních maxim linií $K\alpha_1$ rovin {311}. K oddělení difrakčních linií $K\alpha_1$ and $K\alpha_2$ byla použita Rachingerova metoda. Separovaná difrakční linie $K\alpha_1$ byla proložena funkcí Pearson VII. Výpočet zbytkových napětí byl proveden Winholtz-Cohenovou metodou s následujícími elastickými konstantami: $\frac{1}{2}s_2 = 6.98 \text{ TPa}^{-1}$, $s_1 = -1.87 \text{ TPa}^{-1}$. Měření bylo prováděno v pravoúhlém systému σ_T (tečný, resp. podélný směr) a σ_A (příčný). Zbytková napětí ve směru σ_T lze srovnávat s hodnotami získanými z hloubkového profilu.

Ze srovnání je patrná shoda ve smyslu napjatosti i v absolutních hodnotách tahového napětí (maximální odchylka 110 MPa). S rostoucí pozitivitou řezné geometrie (větší úhly čela γ_{os}) lze pozorovat pokles tahových napětí v tečném směru.



Obr. 7.6: Povrchové hodnoty zbytkových napětí v tečném a kolmém směru v závislosti na úhlu čela γ_{os} , měřeno RTG difrakcí

7.3.2. Mikrotvrдость



Obr. 7.7: Profil mikrotvrđosti pro jednotlivé utvařeče, zobrazení polohy nástroje vůči zpevněné vrstvě

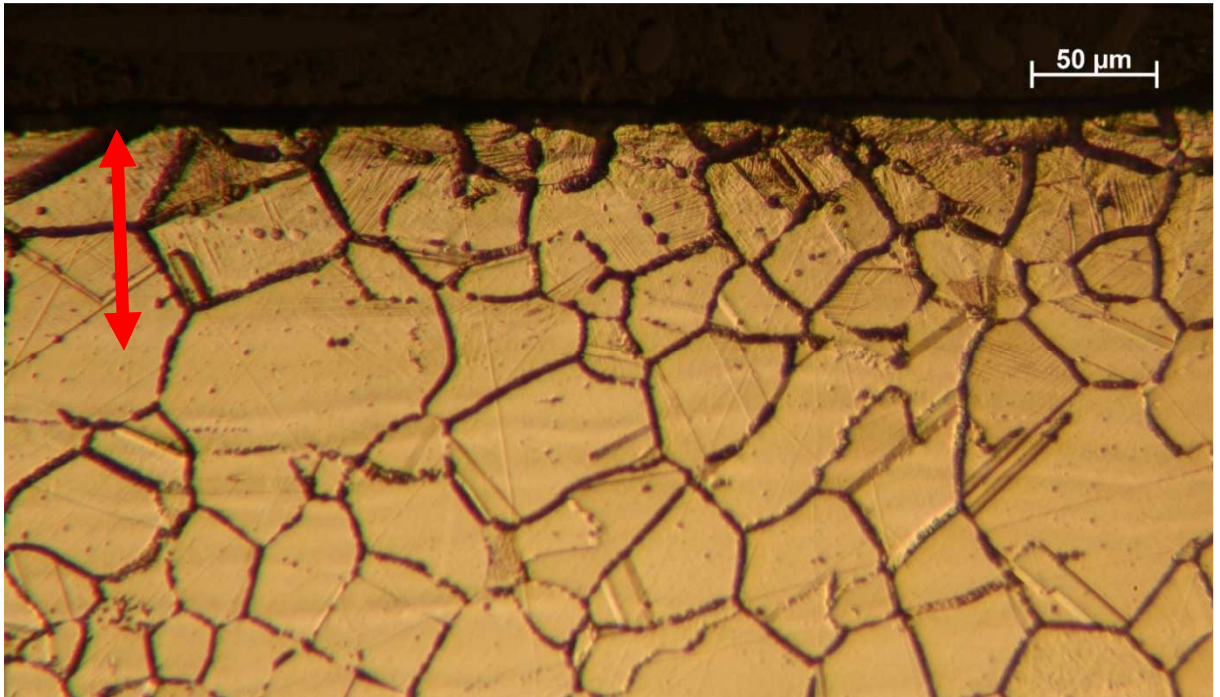
Měření profilu mikrotvrđosti bylo provedeno sníženým zatížením 50g – HV 0,05. Za základní tvrdost jádra lze považovat hodnotu 165 HV 0,05. U všech vyšetřovaných vzorků byla zjištěna zpevněná vrstva s výraznými nárůsty mikrotvrđosti až na 420 HV 0,05. Rozdílnost mezi vzorky je patrná především v průběhu mikrotvrđosti a hloubce zpevněné vrstvy.

U pozitivní řezné geometrie s utvařečem SF (+12°) dochází k výrazně rychlejšímu poklesu mikrotvrdosti a základní tvrdosti jádra se dosahuje v hloubce 0,2 mm. Negativní geometrie NF (-2°) vykazuje pomalejší pokles mikrotvrdosti a základní tvrdosti se dosahuje až v hloubce 0,5 mm.

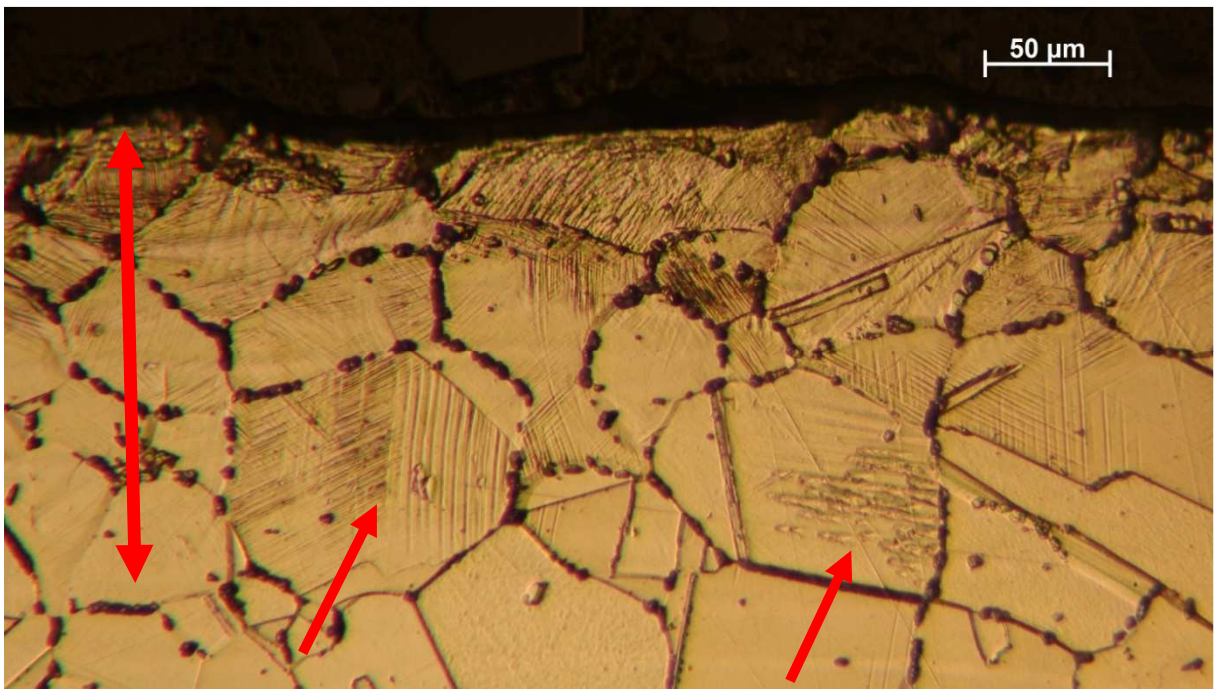
Na základě provedené analýzy lze učinit několik doporučení k volbě nástrojů, případně rozložení přídavek. V hloubce 0,15 mm pod povrchem zanechává utvařeč SF (+12°) materiál o tvrdosti přibližně 200 HV 0,05, kdežto utvařeč NF (-2°) materiál zpevněný na cca 370 HV 0,05. Pro špičku nástroje o poloměru $r_e = 0,2$ mm představuje toto zpevnění materiálu zásadní nárůst silového a pravděpodobně i tepelného zatížení, čímž lze objasnit omezené životnosti. Vhodné řešení problému je primárně použití hrubovací/střední destičky s pozitivní geometrií. Alternativní řešení představuje zvýšení hloubky řezu při soustružení na čisto tak, aby špička destičky odřezávala materiál s nižší tvrdostí, minimálně však 0,3 mm. V hloubce 0,3 mm pod povrchem je i po obrábění negativní hrubovací destičkou CNMG 120404-NF (-2°) dosahována tvrdost 250 HV0,05, která představuje hraniční hodnotu mezi jednotlivými podtřídami nerezových materiálů v rámci klasifikace výrobce nástroje.

7.3.3. Metalografie

Příprava výbrusů byla provedena postupem popsáním v kapitole 5.1.2. V naleptaném stavu byla na výbrusech zjištěna čistě austenitická struktura s množstvím žíhacích dvojčat typických pro provedené rozpouštěcí žíhání předcházející obrábění. Kontury hranic zrn po naleptání kyselinou šťavelovou jsou velmi dobře čitelné, prakticky na hraně zcitlivění. V povrchové vrstvě se u všech vzorků objevil metastabilní deformační martenzit, který se vyznačuje lamelární intragranulární strukturou (vrásky) uvnitř původních austenitických zrn. Deformační martenzit je označen červenými šipkami na Obr. 7.9. Množství deformačního martenzitu a hloubka jeho výskytu pod povrchem roste s přechodem pozitivních k negativním řezným geometriím – rozdíl je patrný i prostým porovnáním Obr. 7.8 a Obr. 7.9. Výskyt deformačního martenzitu zapříčiňuje lehkou magnetizaci povrchu jinak nemagnetické austenitické struktury.



Obr. 7.8: Mikrostruktura AISI 304 po soustružení utvařečem SF (+12°) – výskyt deformačního martenzitu do hloubky max. 70 μm



Obr. 7.9: Mikrostruktura AISI 304 po soustružení utvařečem NF (-2°) – výskyt deformačního martenzitu do hloubky max. 160 μm

7.4. Dílčí závěry

Povrch nerezové oceli AISI 304 je plasticky deformován, což ovlivňuje všechny vyhodnocované složky integrity povrchu. Průběhy zbytkových napětí po soustružení mají nepříznivý mělký tahový charakter. Vliv úhlu čela γ_{os} utvařečů SF (+12) a NF (-2°) na charakter i absolutní hodnoty zbytkového napětí nebyl prokázán.

V případě uvedeného experimentu se uplatňují 3 mechanismy a příčiny vzniku zbytkových napětí. Na základě výsledků měření mikrotvrdomosti a metalografie se zde prokazatelně uplatňuje nerovnoměrná plastická deformace povrchu, a to v podstatně větších objemech než mohlo být pozorováno u slitiny Ti6Al4V. Ve velkých objemech se zde také uplatňuje mechanismus nerovnoměrné fázové přeměny, která zapříčiňuje změnu objemu plasticky deformované vrstvy. Vzhledem k souvislému záběru a tím souvislé produkci tepla při soustružení lze rovněž brát v úvahu nerovnoměrný ohřev a chlazení povrchu. Pokud by první z uvedených mechanismů – plastická deformace – působil samostatně, bylo by možné očekávat tlakový charakter průběhů zbytkových napětí jako v případě titanové slitiny. Zbývající dva mechanismy však působí proti natahování povrchové vrstvy v oblasti terciální plastické deformace a podle naměřených výsledků převažují. Pravděpodobně zejména v důsledku fázové transformace povrchová vrstva zaujímá menší objem (chová se jako kratší) a je natahována odporem neovlivněného jádra.

Z porovnání výsledků mikrotvrdomosti a metalografie lze prokázat jednoznačnou souvislost mezi úhlem čela a parametry zpevněné vrstvy. Negativní řezná geometrie ovlivňuje skrze rozšiřování a naklápění oblasti primární plastické deformace směrem k obrobenému povrchu, respektive hlouběji pod povrch zpevnění povrchu. V povrchu ve větší míře zvyšuje hustotu dislokací a objem fázových přeměn s přímým dopadem na hodnoty mikrotvrdomosti v podpovrchových vrstvách.

8. Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713LC

Slitiny niklu si v průběhu 20. století získaly nezastupitelné postavení v sektoru letectví, energetiky a kosmického průmyslu vzhledem k jejich korozní odolnosti, žáruvzdornosti a pevnostním vlastnostem za vysokých teplot. Ruku v ruce s kvalitativními přínosy s sebou tyto superslitiny přinášejí značně komplikované zpracování různými technologiemi, především obráběním [83], [84]. Z důvodu ztížené obrobitelnosti a výrazné redukci životnosti nástrojů musí být velmi často tradiční výrobní metody jako například tvarové frézování nahrazováno hloubkovým broušením. Broušení u těchto slitin nelze považovat pouze za technologii dokončovací, ale pro vybrané prvky (závěsy a bandáže lopatek) za jedinou možnou.

Oblast použití těchto slitin definuje vysoké požadavky na kvalitu povrchu dynamicky i tepelně namáhaných lopatek. Typickým příkladem těchto součástí jsou lopatky výkonové turbíny z Inconelu 713 LC, které jsou předmětem návazných analytických činností.

8.1. Inconel 713 LC

Inconel 713 LC je nízkouhlíková verze niklové super slitiny 713 C (AMS 5391) určená primárně pro přesné lití komponent horkých sekcí plynových turbín. Jeho vysoká odolnost proti tečení a oxidaci za vysokých teplot činí tento materiál vhodným k použití na lopatky oběžných turbín ve spektru teplot 500 – 900 °C. Směrné chemické složení lze nalézt v Tab. 8.1. Ačkoliv se při vytvrzení (zpevnění) slitiny uplatňuje celá řada mechanismů a prvků (Fe, Cr, Nb, Mo), primární mechanismu je zpevnění intermetalickým precipitátem γ' jemně rozptýleným v γ matici. [85], [86]

Tab. 8.1: Směrné složení niklové superslitiny Inconel 713 LC

Zák. komponenty [%]							
Ni	Cr	Mo	Al	Nb	Ti	Fe	C
základ	12,5	4,2	6,1	2,0	0,8	max. 0,5	0,03-0,07

Vzhledem k obtížné obrobitelnosti, která je způsobena předně extrémně nízkou tepelnou vodivostí, zvýšenou tvrdostí (Tab. 8.2) a žárupevností je nutné při přesném lití volit minimální přídavky. Minimalizace přídavků klade vysoké nároky na krytí taveniny proti oxidaci a kvalitu skořepin. Tavení je prováděno výhradně ve vakuu, ale lití už je závislé na technologické

vyspělosti provozu. Charakter dílů – rozváděcí kola, lopatky obvykle tuhnou pomaleji z podstaty přítomnosti větších průřezů v oblasti zámků a přírub. Z tohoto důvodu jsou díly obvykle z pohledu makrostruktury hrubozrné s patrnou orientací makrozrna od tepelné osy k povrchu. Precipitace karbidů MC a $M_{23}C_6$ na hranicích zrna poskytuje slitině pevnost a houževnatost a blokuje pokluzy zrn. Další slitinové prvky (především Al, Cr) zásadním způsobem zvyšují korozní a oxidační odolnost tvorbou protektivních povrchových filmů Al_2O_3 a Cr_2O_3 . [86]

Mechanické zkoušky na odlitcích nebyly prováděny, dostupnost materiálových listů je velmi omezená a prezentované hodnoty jsou vždy závislé na výsledné struktuře a technologii lití. Pro představu o technologických vlastnostech jsou uváděny očekávatelné mechanické a fyzikální vlastnosti [87].

Tab. 8.2: Vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Inconel 713LC [87]

Relativní	Veličina		Hodnota	Jednotka
vysoká	mez kluzu	$R_{p0,2}$	730	MPa
vyšší	mez pevnosti	R_m	820	MPa
nízká	tažnost	A_{min}	8	%
vyšší	tvrdost	HRC	30 až 42	HRC
nízká	lin. teplotní roztažnost	α	$5,9 \cdot 10^{-6}$	K^{-1}
velmi nízká	tepečná vodivost	λ	9,8	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
nízká	teplota tavení	T_T	1260 až 1288	$^{\circ}C$

8.2. Návrh experimentu – ověřování hloubkového broušení

Motivací k analytickým aktivitám na oběžných lopatkách z Inconelu 713 LC byla primárně vysoká zmetkovitost obrobených lopatek. Lopatky byly vyřazovány primárně kapilární a fluorescenčně-penetrační zkouškou na přítomnost trhlin a ostatních povrchových defektů. Trhliny a mikrotrhliny v povrchové vrstvě jsou u oběžných lopatek nepřijatelné z důvodu vysoké pravděpodobnosti nástupu fáze šíření trhliny únavovým mechanismem ihned po uvedení do provozu. Smyslem analýzy byla identifikace příčin vzniku trhlin, posouzení integrity povrchu a následná optimalizace procesu hloubkového broušení. Polotovary lopatek byly zhotoveny metodou přesného lití s následným hloubkovým broušením zámků tvarovým kotoučem za pracovních podmínek uvedených níže. Hloubkové broušení představuje pro danou aplikaci nejproduktivnější a nejekonomičtější způsob výroby.

Frézování zámků by bylo čistě z technologického hlediska možné jak tvarovou stopkovou, tak kotoučovou frézou. Vzhledem k obrobitelnosti slitiny by se však dala očekávat velmi nízká

trvanlivost a vysoká spotřeba výhradně zakázkových karbidových nástrojů. Na rozdíl od hloubkového broušení by toto řešení vedlo k výrazné závislosti na dodavateli nástrojů. Při upnutí za list lopatky do přípravku by se pravděpodobně ani nepodařilo dosáhnout dostatečné tuhosti soustavy stroj-upínací přípravek-obrobek, což by mělo jistě negativní dopad na stav povrchu obráběné plochy. Nepochybně by také u frézování nebylo možné dosahovat takových přesností jako u technologie broušení.

Vzhledem k odebíranému přídávku přibližně 0,8 až 2,3 mm (rozdíl vrchol/dno zámku) je prakticky vyloučeno broušení oscilačním způsobem. Hrubovací hloubkové broušení je u této aplikace nejrychlejší způsob úběru většiny přídávku. Obnovení tvaru kotouče hnanou profilovou orovnávací kladkou umožňuje minimalizaci vedlejších časů mezi průchody. Plné CNC řízení orovnávací kladky by umožňovalo proces dále zrychlovat s využitím kontinuálního orovnávacího. Práce v režimu kontinuálního orovnávacího má velmi pozitivní vliv na snížení produkce tepla při broušení, jelikož si kotouč stále zachovává výbornou řezivost. Tento přístup je moderní, níže použitý kotouč ho umožňuje, nicméně nebyl v rámci experimentu testován. Pro záběrové poměry na zámcích lopatek by bylo potřeba pracovat s orovnávacími poměry okolo 1 μm /otáčku kotouče. Přínosy této technologie jsou vykoupeny vysokou spotřebou brusiva, dramaticky rychlejším opotřebením diamantových orovnávacích kladek a zvýšenými požadavky na filtraci procesních kapalin.

Broušení vzorků bylo provedeno za následujících pracovních podmínek:

- Hloubkové broušení v průchodech Hrubování 1 a Hrubování 2
- Předdokončení v průchodu Na čisto 1, dokončení v průchodu Na čisto 2
- stroj: 3-osá souvisle řízená CNC bruska Magerle MFP 125
- kotouč: Tyrolit Strato Ultra SU33A 702 GG 11 VB1 s počátečním průměrem 500 mm,
- kritérium pro vyřazení kotouče je minimální průměr 317 mm
- chladicí emulze: Quakerkol 042295DR0601 s cílovou koncentrací 3,5 %, tlak 10 bar
- orovnávací: rychlost přísuvu orovnávací kladky 1,5 μm /ot, rychlostní poměr 0,8, bez kontinuálního orovnávacího, orovnávací po 5 ks lopatek (ekv. broušená délka 25 mm), orovnávací o hodnotu 0,05 mm
- řezné podmínky jsou uvedeny v Tab. 8.3

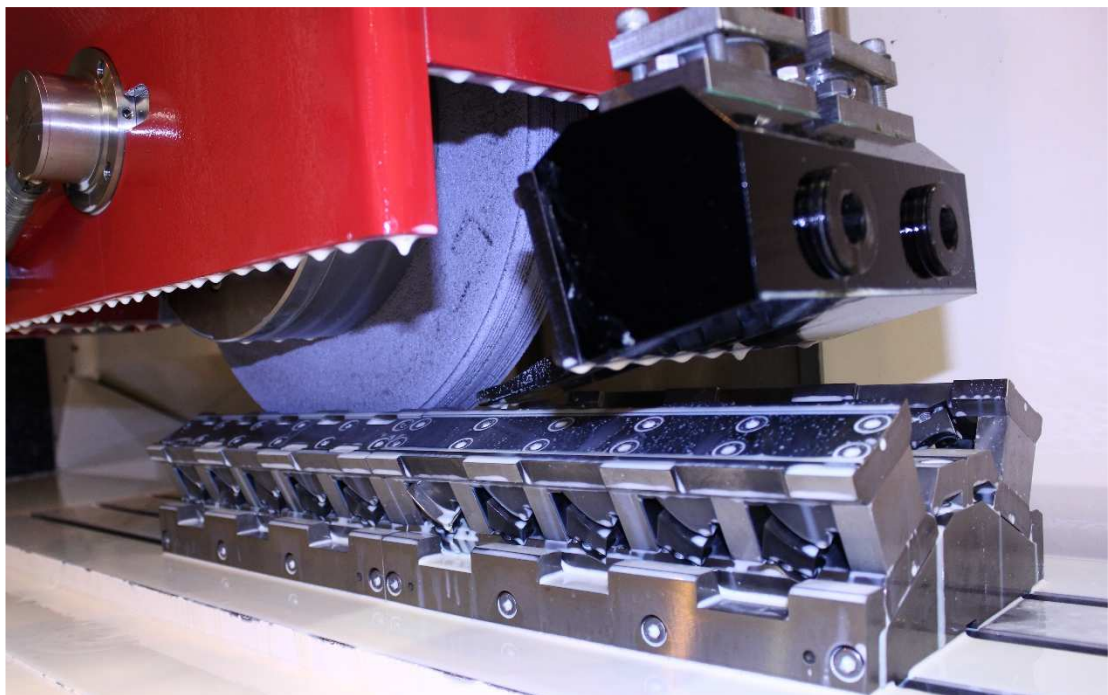
Volba kotouče na bázi syntetického korundu Tyrolit Strato ultra byla provedena na základě porovnávacích zkoušek, ve kterých byly testovány kotouče na bázi syntetického korundu:

- Norton Altos TGX 80D13VCF5 s červíkovitým orientovaným zrnem
- 3M Cubitron™ II 99% 99DA54/80 F15VPLF901W s trojúhelníkovými zrny

Provedené zkoušky prokázaly velmi dobrou schopnost kotouče Norton pojmout dostatečné množství chladicí emulze potřebné k efektivnímu chlazení obrobku po celé délce oblouku styku. Červíkovité zrno se však ukázalo jako velmi nevhodné z pohledu udržení profilu. Kotouč 3M byl v řezu z pohledu tvarové stability naopak velmi trvanlivý. Tendence ke vzniku popalů byla na srovnatelné úrovni jako u kotouče Tyrolit. Cena kotouče 3M se již velmi přibližuje třídě CBN programu a pro konkrétní aplikaci neposkytuje oproti výrazně levnějšímu kotouči Tyrolit zásadní výhody.

Tab. 8.3: Řezné podmínky broušení zámek lopatek

	v_c [m/s]	f [mm/min]	a_p [mm]	orování před
Hrubování 1	16	190	0 až 1,5	ANO
Hrubování 2	15	260	0.715	NE
Na čisto 1	22	600	0.055	ANO
Na čisto 2	22	600	0.03	ANO



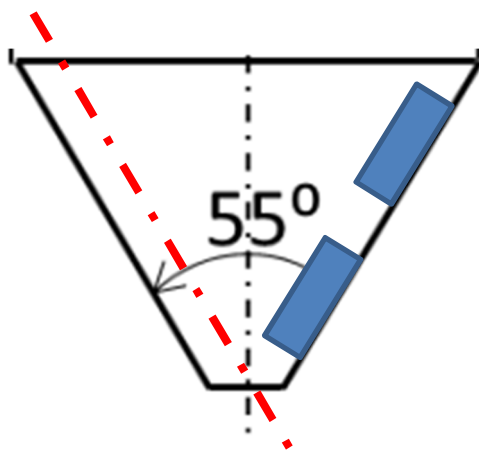
Obr. 8.1: Broušení zámek lopatek profilovým kotoučem

8.3. Hodnocení integrity povrchu – lopatky Inconel 713 LC

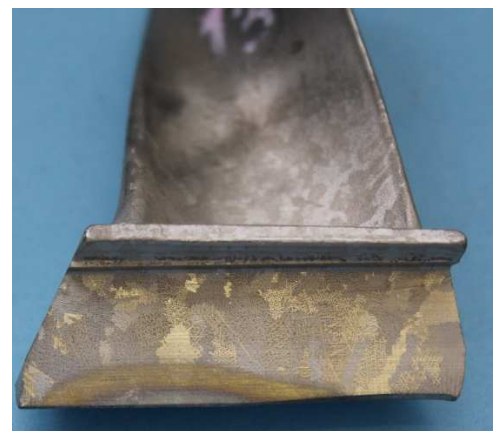
K hodnocení stavu povrchové vrstvy byla využita vyvinutá metoda měření hloubkových profilů zbytkového napětí. Dále bylo sledováno zpevnění povrchu a změny mikrostruktury. Metalografická analýza byla cíleně soustředěna do oblastí s výskytem brusných trhlin, které se podařilo detekovat kapilárními a fluorescenčně-penetračními zkouškami.

8.3.1. Reprezentativní průběhy zbytkových napětí

Vzhledem ke složité geometrii a vysoké tuhosti vzorku při odběru z tvarové plochy zámku byly zkušební lopatky zhotoveny shodnými podmínkami, ale s rovnými boky závěsu. Tyto technologické vzorky rovněž výrazně zjednodušily další činnosti – především kapilární zkoušky, hodnocení makrostruktury a také odběr prizmatických vzorků pro stanovení hloubkových průběhů zbytkových napětí po broušení (Obr. 8.4). Ke stanovení zbytkových napětí bylo opět přistoupeno jak z pohledu hloubkových průběhů, tak z pohledu nedestruktivní povrchové RTG difrakční tenzometrie. Úplné výsledky povrchového měření jsou prezentovány v publikaci [88].



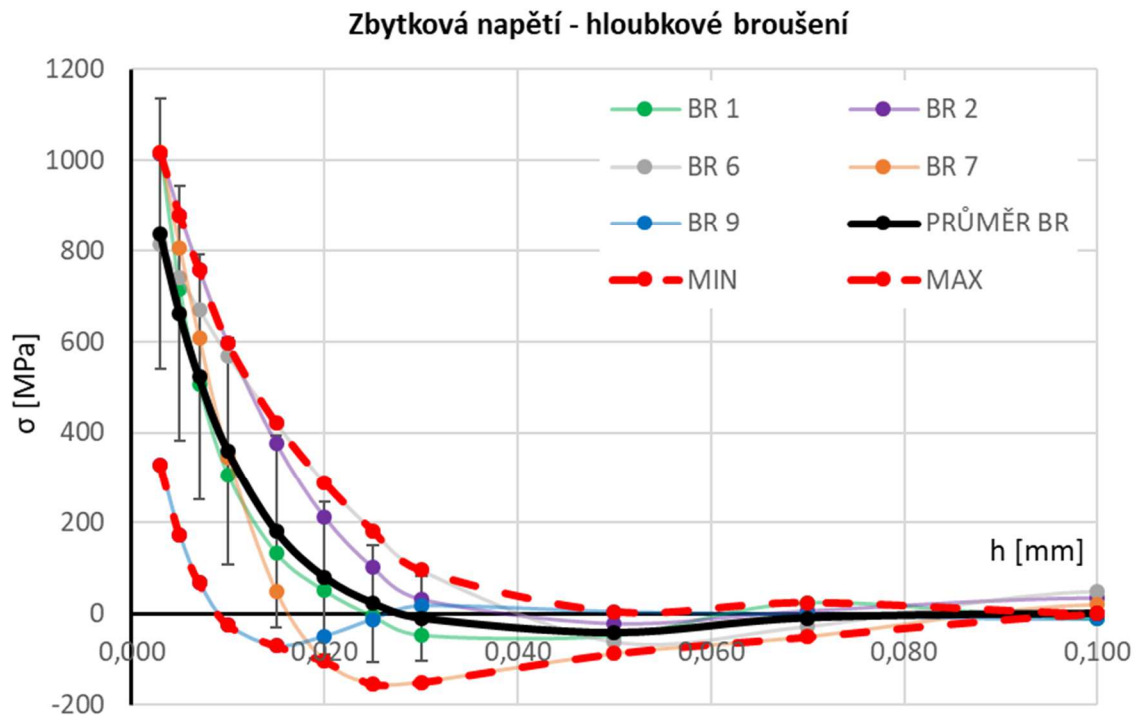
Obr. 8.2: Schéma odběru prizmatických vzorků pro měření zbytkových napětí



Obr. 8.3: Závěs se zviditelněním popalu po makroleptání

U všech vyšetřovaných vzorků byl zjištěn výrazně tahový charakter zbytkových napětí. Reakce na úběr materiálu elektrolytickým odleštěním byla okamžitá a už v bezprostřední blízkosti povrchu. V hloubce 0,003 mm byla zjištěna vysoká tahová napětí o velikosti $+837 \pm 297$ MPa. Napětí s vysokým gradientem klesají a v hloubce 0,010 mm již dosahují hodnot $+358 \pm 250$ MPa. Ke stavu bez napětí - napětí jádra se vzorky navrací průměrně v hloubce 0,03 mm (rozptyl vzorků 0,015 až 0,04 mm). Vzhledem k velmi tenké povrchové vrstvě tahových pnutí se v podpovrchových vrstvách neobjevuje systematicky a významně

vyrovnávací tlaková napětí. K potlačení tohoto jevu přispívá značný rozdíl v deformaci uvolněné v povrchových a v podpovrchových vrstvách. Vzhledem k ustálenému stavu hlouběji pod povrchem jsou průběhy vykresleny pouze do hloubky 0,1 mm.



Obr. 8.4: Charakteristické průběhy zbytkových napětí po hloubkovém broušení

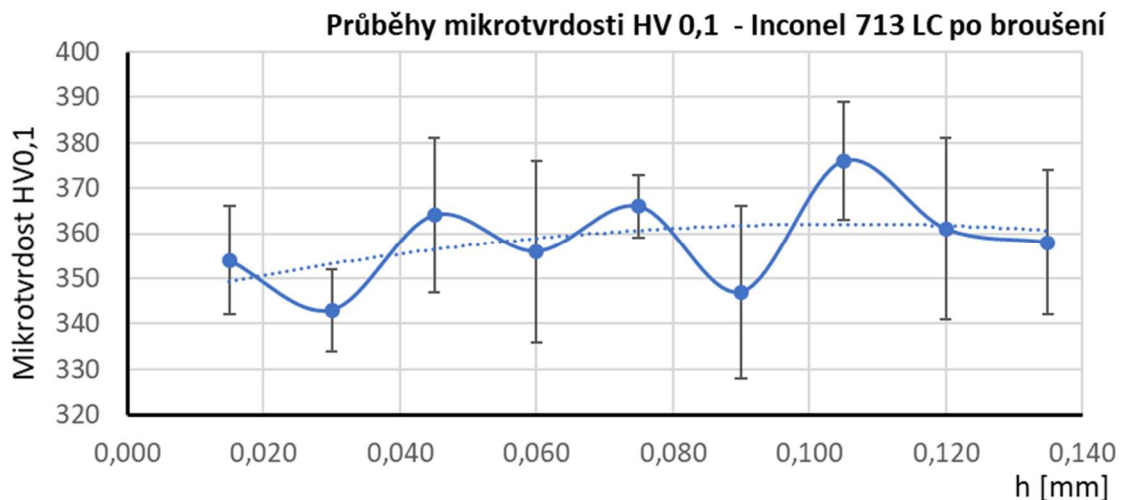
Vznik tahových zbytkových napětí při broušení je běžný, avšak v povrchu mohou zůstat i napětí tlaková. Vznik tlakových napětí je však podmíněn efektivním chlazením obrobku, které v uvedeném případě nebylo téměř jistě splněno. Efekt natahování povrchové vrstvy odíráním otupených zrn (resp. obecně zrn s velkým poloměrem ostří) s vyvozením tlakových zbytkových napětí v konkrétním případě nepřevažuje.

8.3.2. Mikrotvrdość

Z měření mikrotvrdości v jádře lopatky s náběhovými barvami byla stanovena průměrná hodnota mikrotvrdości $340 \pm 5,58$ HV 0,1. Následným měřením profilu mikrotvrdości v matici 10x10 vpichů byl stanoven profil mikrotvrdości. Ani v místech zviditelněných popalů nedochází na úrovni zatížení 100g k systematickému a technicky významnému nárůstu či poklesu.

Z metalurgického hlediska jsou možnosti změny povrchové mikrotvrdości velmi omezené. Matrice je tvořena stabilním austenitem, který nemá tendenci k tvorbě metastabilní deskové formy jako u austenitických nerezů. Další nárůst mikrotvrdości vlivem deformačního zpevnění

je navíc málo pravděpodobný, jelikož základní stav má již zvýšenou tvrdost porovnatelnou s deformačním martenzitem – viz kapitola 7.3.2. Odpevnění struktury by bylo hypoteticky možné očekávat při dlouhodobém působení vysokých teplot blízkých teplotě tavení způsobujících rozpuštění intermetalických vytvrzovacích fází.



Obr. 8.5: Profil mikrotvrlosti HV 0,1 po broušení Inconelu 713 LC

8.3.3. Metalografie a defektoskopie

Inconel 713 disponuje nízkou tepelnou vodivostí při pokojové teplotě cca 10 W/m.K (přibližně pětina v porovnání s běžnou uhlíkovou ocelí) [87]. To má za následek ztížený odvod tepla z místa řezu a hromadění tepla v povrchové vrstvě, což jednoznačně podporuje vznik náběhových barev (někdy se hovoří o tzv. popalech). V případě silnějších vrstev stabilních oxidů tyto zamezí zvýraznění zrn při makroleptání (Obr. 8.3). Náběhová barva je zpravidla způsobena vznikem submikronového povlaku. U kovů jako je titan a nerezové oceli slouží náběhové barvy ke zjištění rámcové teploty, které byla součástí lokálně (dokončovací operace) nebo jako celá součást (tepelné zpracování) vystavena. Stechiometrická kompozice oxidu je zpravidla závislá na teplotě vzniku a barva oxidu zase na jeho stechiometrickém složení.

Prakticky na všech lopatkách byly patrné náběhové barvy na čele lopatky (na vlastní broušené boční ploše pouze některé). Čelo na straně, kde kotouč zabíhal do řezu, mělo čistý kovový vzhled bez náběhové barvy. Čelo, u kterého kotouč vybíhal z řezu, mělo do hloubky až 2 mm náběhové barvy přecházející z fialové do zlatavé barvy. To mohlo být způsobeno například dostatečným přívodem chladicí kapaliny při náběhu do řezu a jeho nedostatkem, nebo spíš neschopností kapaliny dostat se do místa řezu při najetí do plné hloubky.

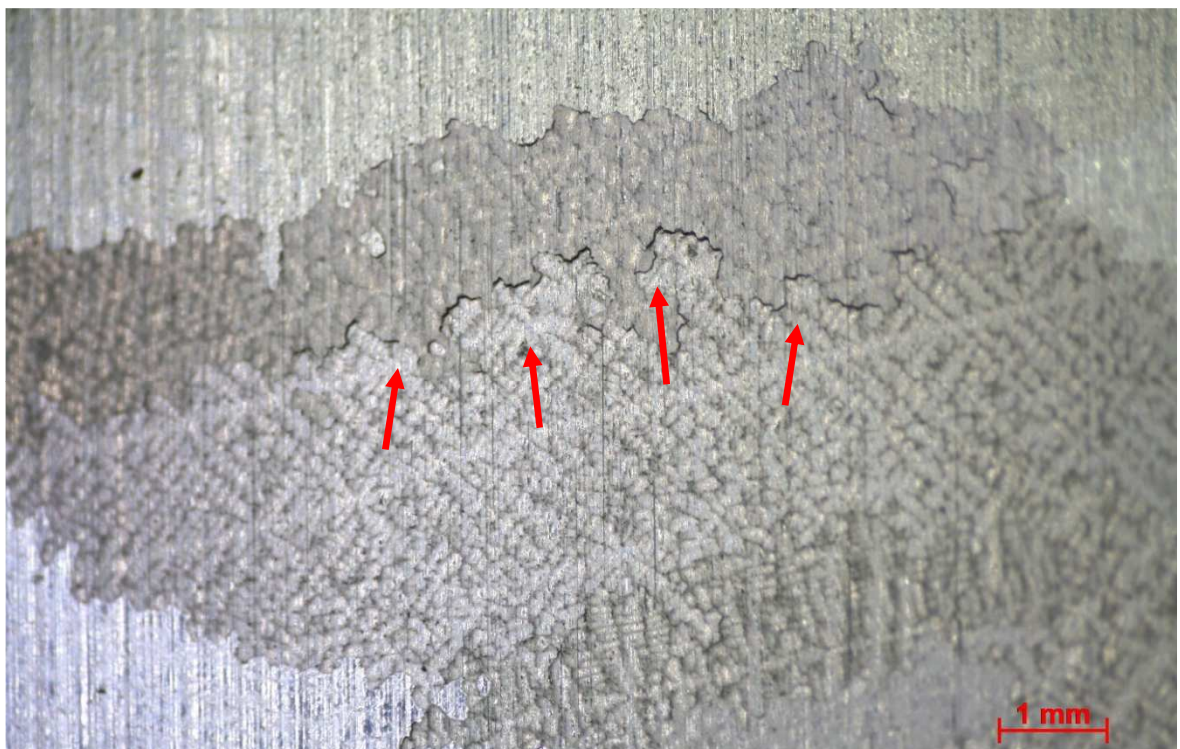


Obr. 8.6: Lineární indikace kolmé na směr broušení na rámečku lopatky



Obr. 8.7: Slabé liniové indikace na kapilární zkoušce

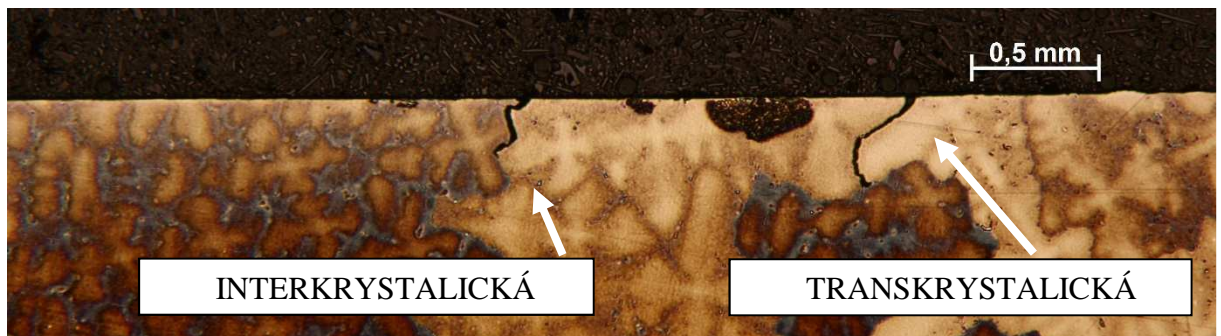
Ačkoliv následná kapilární a fluorescenčně-penetrační zkouška neprokázala vazbu mezi přítomností trhlin a místy náběhových barev, je nutné tento jev považovat za nevhodný. Obzvláště nebezpečný pak může být vznik popálených míst na reálných zámcích lopatek, které drží lopatku v disku.



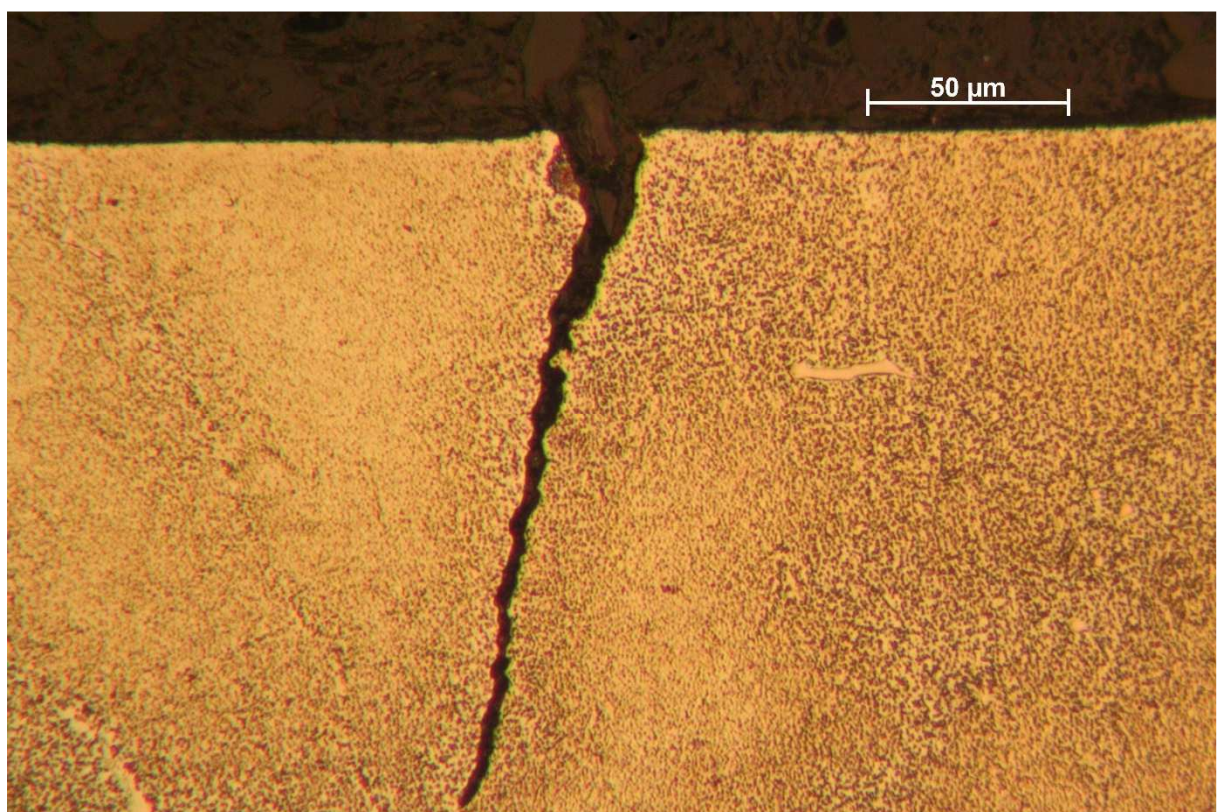
Obr. 8.8: Interkrystalická trhlina na broušené ploše – pohled na plochu lopatky 1B-T

Odhalené indikace byly jak čarového, tak bodového charakteru, přičemž ty čarové výrazně převažovaly. Tyto indikace se objevovaly výhradně kolmo ($\pm 20^\circ$) na směr broušení. Následené makroleptání celých lopatek umožnilo odhalit charakter trhlin. Trhliny jsou obojího typu – transkrystalické i interkrystalické (Obr. 8.9). Trhliny smíšeného typu pozorovány nebyly. Trhliny jsou jednoznačně napětově hnané – rozevírají se od povrchu. Obvyklé hloubky trhlin

se pohybují okolo 0,2 mm. Výjimečně byly zjištěny trhliny o hloubce 0,5 mm. Příčinu vzniku trhlín při broušení dále potvrzuje analýza zbytkových napětí. V bezprostřední blízkosti povrchu byla zjištěna napětí přesahující mez pevnosti materiálu a porušení soudržnosti povrchových vrstev lze tedy očekávat.



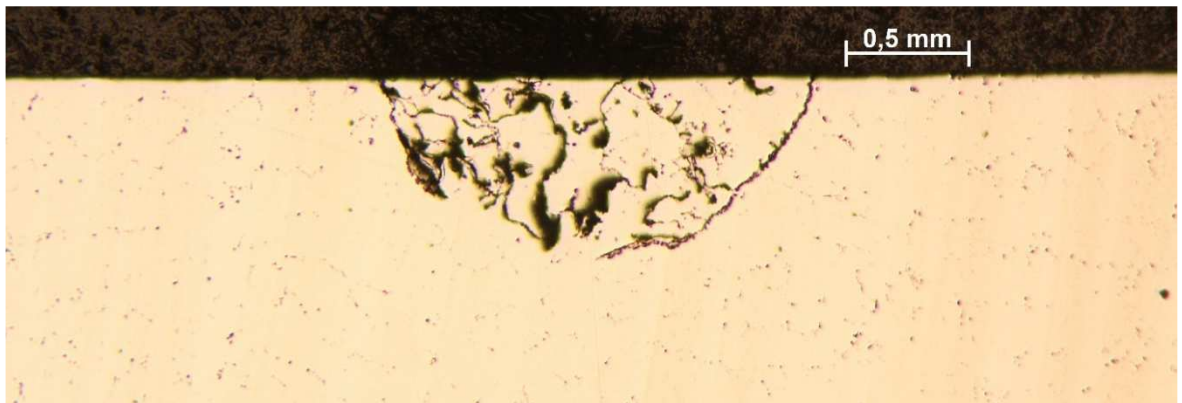
Obr. 8.9: Výbrus přes trhliny, 25x, leptáno Marble's – inter/transkrystalická trhlina



Obr. 8.10: Transkrystalická brusná trhlina lopatky 1B-T – leptáno Marble's, zvětšeno 400x

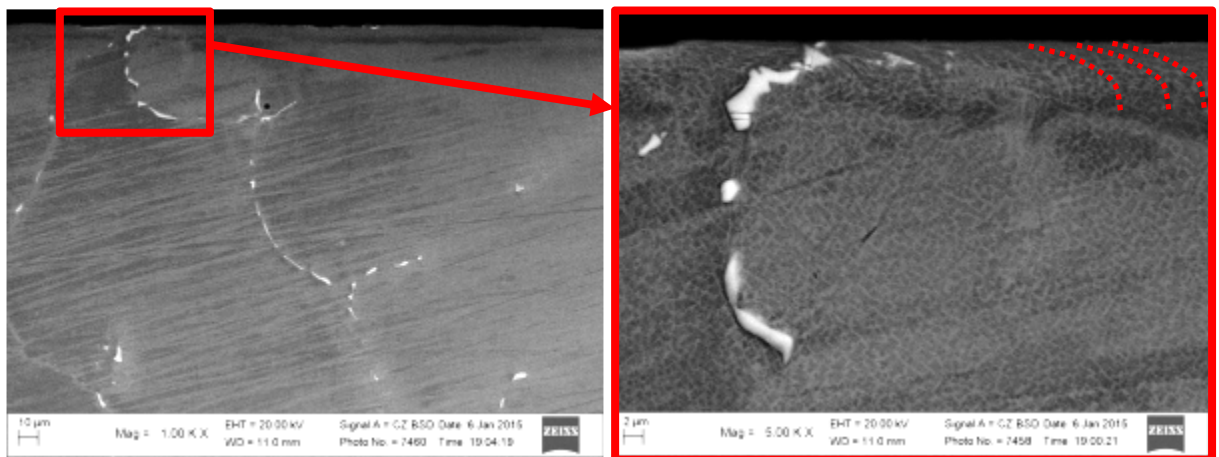
Na všech připravených vzorcích byla dobře patrná polykrystalická dendritická mikrostruktura. Velikost makrozrna je silně závislá na tloušťce materiálu a tím rychlosti chlazení, které zabraňuje růstu zrna. V listu lopatky se vyskytují zrna o velikosti jednotek desetin milimetru až po jednotky milimetrů v oblasti zámku.

Na metalografickém výbrusu byly pozorovány i další indikace obtížně specifikovaného tvaru o velikosti přesahující 1 mm. Tyto indikace představují oxidické pleny zachycené na stěně skořepiny. Svůj původ mají v nedostatečné ochraně licího kanálu při plnění skořepiny. Na povrchu toku taveniny dochází k oxidaci a vytváří se velmi tenké oxidické vrstvy (primárně chromu). Po vniknutí těchto oxidických vrstev do formy dochází k jejich „zamotání“ zvířením ve formě a k zachycení na stěně skořepiny. Oxidické pleny se již mezi sebou nespojí, při broušení dochází k jejich porušení, odkrytí a indikaci na kapilární zkoušce. Od brusných trhlin jsou jasně odlišitelné již na základě indikace z kapilární zkoušky. Odstranění tohoto problému je možné pouze volbou vyšších přísadků, nebo kvalitnější ochranou vtokové soustavy při plnění formy (ideálně lití ve vakuu).



Obr. 8.11: Shluk oxidických plen odkrytých broušením – leštěný stav, zvětšeno 25x

Příčný řez popaly neprokázal změnu mikrostruktury v blízkosti povrchu. Náběhové barvy jsou tedy opravdu tvořeny tenkými (pravděpodobně submikronovými) vrstvami oxidu. Nebyla nijak viditelně ovlivněna morfologie dendritických buněk ani síťoví karbidů.



Obr. 8.12: Povrchová deformace v tečném směru po broušení – SEM mikroskopie

Rovněž v mikrostruktuře materiálu v blízkosti broušené vrstvy, která mohla být ovlivněna samotným broušením nebyly při pozorování ve velkém zvětšení zjištěny žádné výrazné rozdíly.

V bezprostřední blízkosti povrchu byla místy pozorována deformace povrchové vrstvy do tloušťky cca 5 μm v extrémním případě, která se projevovala deformací kovové matrice a ojediněle praskáním karbidů (Obr. 8.12).

9. Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L

V posledním desetiletí nastal výrazný rozmach kovových aditivních technologií. Zejména v oblasti laserového spékání kovových prášku (LPBF – Laser Powder Bed Fusion) se na trh dostalo větší množství nabízených průmyslových řešení, primárně od firem Concept Laser, EOS, SLM a Renishaw. S rozmachem zařízení se rovněž zvyšuje paleta dostupných prášků a přicházejí reálné průmyslové aplikace.

Titanová slitina Ti6Al4V ELI, niklová slitina Inconel 718, hliníková slitina AlSi10Mg, kobalt-chromová slitina a nerezová ocel AISI 316L jsou aditivně zpracovávány slitiny s největším potenciálem nasazení v leteckém, zbraňovém, energetickém a kosmickém průmyslu. Součásti v těchto odvětvích prochází rozsáhlým certifikačním testováním. Analýza vzorků z nerezové oceli AISI 316L zahrnuje hodnocení stavu povrchu i základních mechanických vlastností.

9.1. Nerezová ocel AISI 316L

Ocel AISI 316L je nízkouhlíková austenitická nerezavějící ocel svými technologickými vlastnostmi podobná oceli AISI 304. Snížený obsah uhlíku neumožňuje oceli zcitlivění v kritickém pásu teplot 400 až 900 °C. V tuhém roztoku je tak málo uhlíku, že se neslučuje s chromem za tvorby karbidů chromu na hranicích zrn, čímž nedochází k ochuzení tuhého roztoku v jejich těsném okolí. Pokud by ocel zcitlivěla stala by se náchylná k mezikrystalové korozi. Nízký obsah uhlíku má pozitivní vliv na svařitelnost oceli a rovněž umožňuje provádět efektivnější režimy tepelného zpracování pro odstranění vnitřních pnutí.

Ocel 316L byla zhotovena z prášku CL20ES od výrobce Concept Laser GmbH. Jedná se o komerční označení oceli 316L, pod kterým firma Concept Laser prášek dodává pro svoje zařízení. Porovnání chemického složení ocelí je uvedeno v Tab. 9.1, porovnání mechanických vlastností pak uvádí Tab. 9.2

Tab. 9.1: Chemické složení oceli CL20ES a 316 L

(hm %)	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	C
CL20ES	základ	16.5–18.5	10–13	2–2.25	0–2	0–1	0–0.045	0–0.03	0–0.03
316L		16–18	10–14	2–3	0–2	0–0.075	0–0.045	0–0.03	0–0.03

Tab. 9.2: Provnání deklarovaných mechanických vlastností pro oceli 316L a CL20ES

Vlastnost	CL20ES [36]	Convent. 316L [37]
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	374	290
Mez pevnosti R_m [MPa]	650	627
Tažnost A [%]	65	55
Youngův modul pružnosti E [MPa]	200×10^3	193×10^3
Tepelná vodivost λ [W/mK]	15	16
Tvrдость	20 HRC	79 HRB

9.2. Popis experimentu – ověřování mechanických vlastností

Na oceli CL20ES byly v rámci experimentu prováděny pouze činnosti k ověření dosahovaných mechanických vlastností, úrovně porezity a identifikaci původu defektů ve struktuře. Mimo sadu vzorků zhotovených standardními parametry spékání (doporučené výrobcem zařízení) byla analyzována sada, u které byla sjednocena poloha hladiny spékání a hladina fokusace svazku (parametr Focus level = 0 mm). V rámci této sady byl prokázán pozitivní vliv na pevnostní vlastnosti a výsledky shrnuje samostatná publikace [91].

Zkušební paleta se vzorky byla vytištěna na stroji Concept Laser M2 Cusing s rozměrem pracovní komory 250x250x280 mm. K tisku byl použit záměrně pouze nový (nepřesetý) prášek. Proces lze popsat následujícími parametry:

- výška vrstvy prášku 30 μm
- rozsah velikosti částic prášku 10 – 40 μm
- expozice plochy (jádra) 200 W, rychlost 800 mm/s
- expozice kontury 180 W, rychlost 1600 mm/s
- průměr svazku 0,15 mm
- překryv stop 15 %
- strategie šachovnicových polí (chessboard pattern) 5x5 mm
- rotace laseru mezi vrstvami 90°
- inertní atmosféra dusíku
- parametr focus level: FL= -3 mm standardně, doplňková sada FL = 0 mm

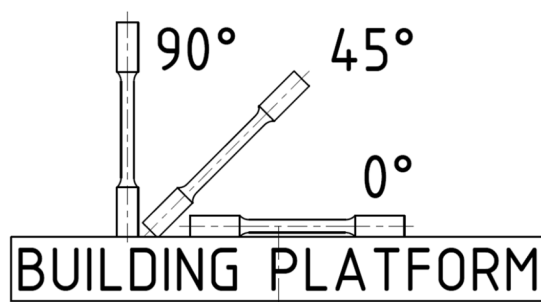
Všechny vzorky byly ihned po tisku podrobeny žíhání na odstranění vnitřních pnutí v elektrické komorové peci Nabertherm N31/H. Celá paleta byla ohřáta na teplotu 550 °C/3h rovnoměrným ohřevem s následnou prodlevou po dobu 6h. Chlazení probíhalo pomalu

tepelnou setrvačností pece, aby se úplně eliminovalo vnesení termálních pnutí. Odstranění vzorků od palety technologií drátového řezání bylo provedeno až po žíhání.

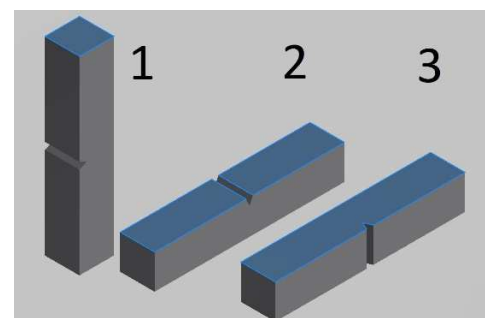
Zkušební paleta obsahovala 25 ks těles pro zkoušku tahem s geometrií podle ASTM E8/E8M a 20 ks těles pro zkoušku rázem v ohybu podle Charpyho dle normy ASTM E23-07a. Vzorky byly tištěny v různých orientacích a s různým parametrem focus level. Jejich kombinace popisuje Tab. 9.3:

Tab. 9.3: Přehled tištěných vzorků

Orientace	Typ vzorku	Focus level [mm]	Počet
vertikální	tahový	-3	5
horizontální	tahový	-3	5
skloněný 45°	tahový	-3	5
vertikální	tahový	0	5
vertikální	Charpy	-3	5
horizontální	Charpy	-3	10
vertikální	Charpy	0	5



Obr. 9.1: Lineární indikace kolmé na směr broušení na rámečku lopatky



Obr. 9.2: Schématické znázornění orientace tělesa a vrubu vůči stavební paletě

Tahové vzorky nebyly po tisku obráběny. Vzorky pro zkoušku rázem v ohybu musely být tištěny jako bloky 10x10x55 mm s přídatkem na broušení 0,3 mm na povrch, aby bylo možno následně splnit požadavky na geometrické specifikace povrchu podle ASTM E23-07a. Vzorky byly nedřívě broušeny ze všech stran na plocho na brusce Mikronex BRH 20CNC. Broušení bylo vždy prováděno s ohledem na minimální ovlivnění povrchu. Vruby ve třech různých orientacích byly vytvořeny za pomoci hloubkového profilovacího broušení s vysokotlakým přívodem chladicí kapaliny. Z důvodu trvanlivosti a stability tvaru vrubů byl upraven CBN kotouč o průměru 125 mm (Diatools 3V1/45° Progress PH C125; abrazivum B107, kovová vazba DEN9PH).

Vruby na vzorcích pro zkoušku rázem v ohybu byly zhotoveny ve 3 orientacích vůči hladině spékání:

- **Typ 1** – vertikální stavba, rovina symetrie vrubu identická s hladinou spékání
- **Typ 2** – horizontální stavba, rovina symetrie vrubu kolmá k hladině spékání
- **Typ 3** – horizontální stavba, rovina symetrie vrubu kolmá k hladinám spékání, dno vrubu prochází jednotlivými vrstvami po celé boční ploše vzorku

Zkoušky tahem byly prováděny na servo-hydraulickém trhacím stroji LabTest 5100 SP1 plně v souladu s nejběžněji používanou normou EN ISO 6892-1. Zkouška rázem v ohybu byla provedena na konvenční neinstrumentovaném stroji Matest H060N s kladivem 150 J a 300 J podle normy ISO 148-1.

9.3. Hodnocení integrity povrchu a mechanických vlastností

9.3.1. Mechanické vlastnosti

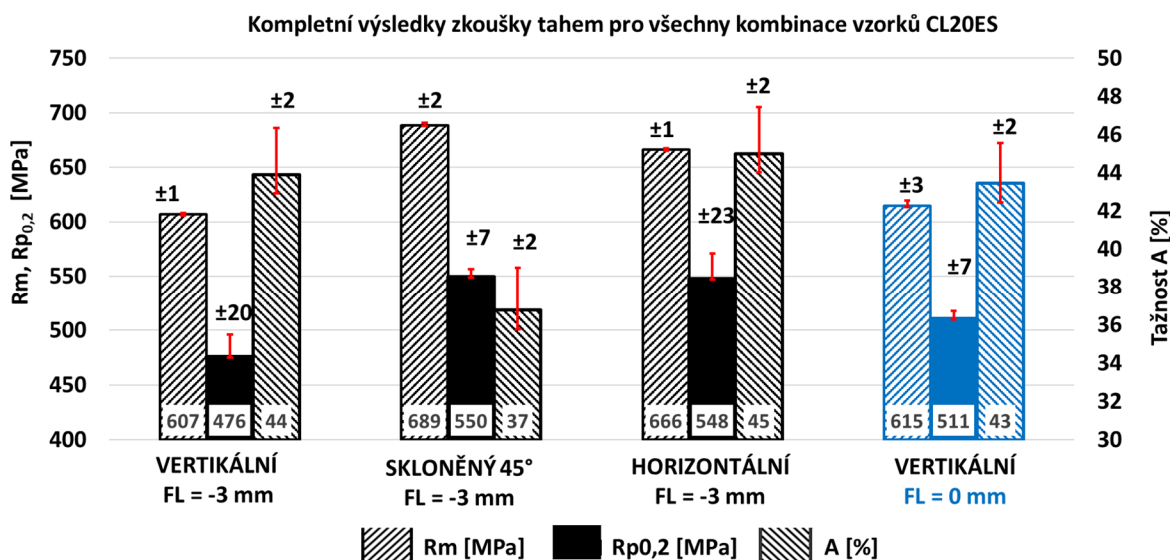
Zkouška tahem

Rozsah experimentu umožnil vyhodnotit anizotropii materiálů ve třech významných směrech – vertikálně, horizontálně a pod úhlem 45° vůči směru stavby. Za referenční hodnoty mechanických vlastností (Obr. 9.3 vlevo) lze pokládat vzorky vertikálně tištěné se standardními parametry FL= - 3 mm, jelikož právě tyto hodnoty jsou uváděny v materiálových listech a většině vědeckých publikací. Ze srovnání s ostatními směry lze jednoznačně prokázat anizotropii mechanických vlastností v závislosti na směru. Shrnutí výsledků popisuje Tab. 9.4, která je doplněna o vlastnosti prezentované výrobcem, vlastnosti konvenčního materiálu a vlastnosti dle evropské normy EN 10088-3.

Tab. 9.4: Přehled deklarovaných a naměřených mechanických vlastností

	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A (%)	Rm/Rp0,2 poměr	HBS	HV
CL 20 ES – dle výrobce	374	650	65	0.58	-	-
316L typické (po žíhání)	290	630	55	0.46	180	180
316L dle EN 10088-3	min 200	min 500	min 45	0.4	max 215	max 226
VERTIKÁLNÍ 90°, FL -3	476	607	46	0.78	217	230
POD ÚHLEM 45°, FL-3	550	689	37	0.8	217	230
HORIZONTÁLNÍ 0°, FL-3	548	666	45	0.82	217	230
VERTIKÁLNÍ 90°, FL 0	511	615	43	0.83	244	256

Vzorky tisknuté pod úhlem 45° vykazovaly znatelně vyšší pevnostní vlastnosti. V případě meze pevnosti R_m činil nárůst 14 % na 689 ± 2 MPa a mez kluzu vzrostla o 16 % na 550 ± 7 MPa. Nárůst pevnostních vlastností byl podle očekávání doprovázen poklesem tažnosti o výrazných 16 % na hodnotu 37 ± 2 %.



Obr. 9.3: Přehled výsledků zkoušky tahem – CL20ES

U horizontálních vzorků bylo pozorováno navýšení mechanických vlastností ve všech sledovaných parametrech, bez negativního dopadu na tažnost. Mez pevnosti R_m byla zjištěna vyšší o 10 % (666 ± 1 MPa), mez kluzu $R_{p0,2}$ o 15 % (548 ± 23 MPa) a Tažnost A o 2 % (45 ± 2 %). Ve všech orientacích byly nejmenší rozptyly naměřených hodnot zjištěny u meze pevnosti zatímco u stanovení meze kluzu a tažnosti lze pozorovat výrazně vyšší hodnoty rozptylu.

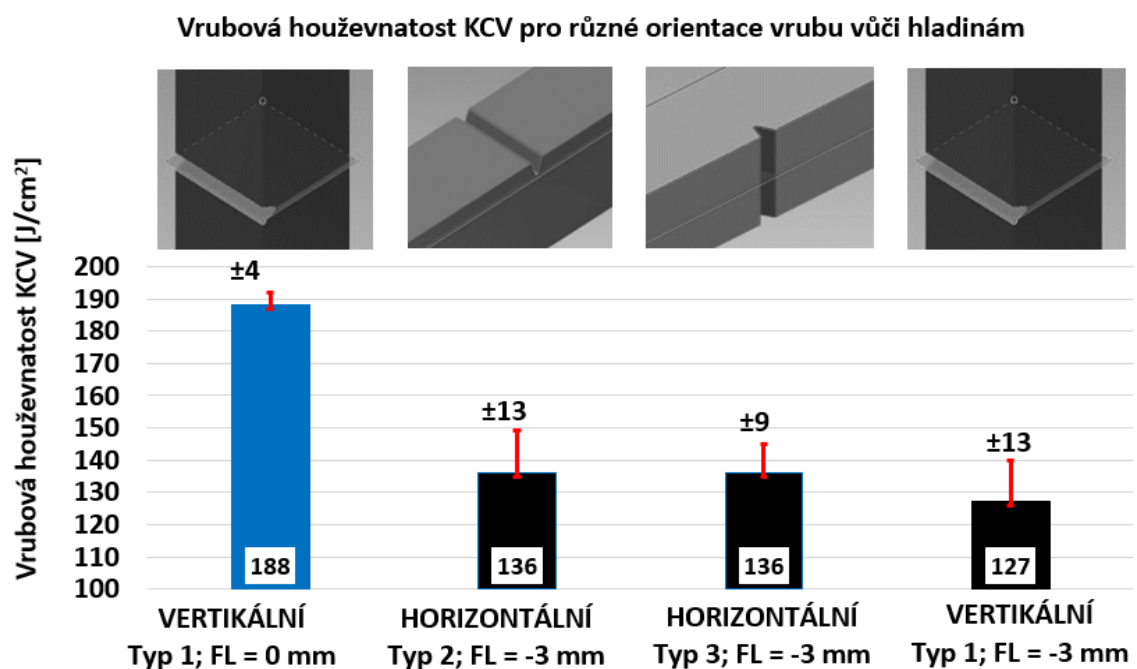
Změna parametru focus level (FL=0 mm) a tím posunutí fokusace laseru do hladiny spékání vedla k velmi nepatrnému zvýšení meze pevnosti R_m o 1,2 % na 615 ± 3 MPa, mírnému poklesu tažnosti A o 1,2 % na 43 %, avšak při citelném zvýšení meze kluzu o 7,3 % na 511 ± 7 MPa (Obr. 9.3 vpravo; Tab. 9.4 poslední řádek).

Napříč všemi skupinami vzorků lze pozorovat větší rozptyl výsledků u stanovení meze kluzu a tažnosti. Experimentálně zjištěné výsledky jsou částečně ve shodě s předními světovými publikacemi [92], [93], [94], [95], přičemž ani mezi sebou tyto zdroje nejsou plně konzistentní. Napříč publikacemi i vlastními naměřenými hodnotami jsou patrné vyšší meze pevnosti a meze kluzu ve směru zatěžování paralelním s hladinami spékání (v hladinách), těsně následované hodnotami pod úhlem 45° k hladinám. Publikace [92], [93], [94], [95] rovněž uvádějí výrazně nižší tažnosti 14 – 43 %, přičemž nižší hodnoty pocházejí z období okolo roku

2010 až 2012, kde lze z historického vývoje očekávat vyšší hodnoty porezity, než u analyzovaných vzorků.

Zkouška rázem v ohybu

Nárazová práce KV [J] a vrubová houževnatost KCV [J/cm²] byla stanovena na základě zkoušky rázem v ohybu podle Charpyho. Nejhorší výsledky vrubové houževnatosti byly zjištěny u vzorků typu 1 (vertikální stavba, rovina symetrie vrubu identická s hladinou spékání) 127 J/cm². V této orientaci vrubu teoreticky dochází k odtrhávání 2 sousedních hladin od sebe. Spojení těchto vrstev mezi sebou nemusí být plně koherentní a na jejich rozhraní se koncentrují vady (nespečený prášek, sférické póry, mikrosegregace), které získané výsledky podporují.



Obr. 9.4: Výsledky zkoušek rázem v ohybu – CL20ES

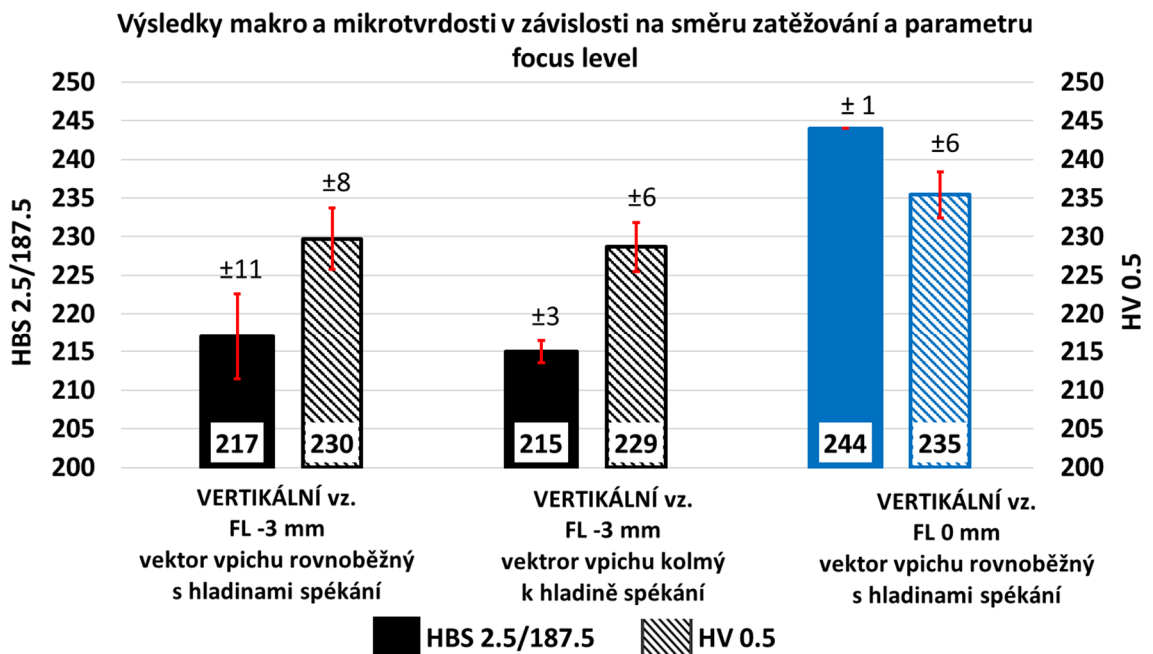
Efekt změny procesního parametru focus level na vrubovou houževnatost se ve srovnání s vlivem orientace jeví jako výrazně vyšší. V případě sjednocení polohy hladiny fokusace laseru s hladinou spékání došlo k nárůstu vrubové houževnatosti o 48 % na 188 J/cm². Teoreticky by se při této konfiguraci mělo koncentrovat více energie přímo v hladině spékání, což by se mělo projevit širší natavenou zónou na úkor její hloubky a na úkor protavení předchozích vrstev. Přímý důkaz této hypotézy měřením velikostí natavených oblastí (melpoolů) na metalografických vzorcích nebyl nalezen. Vyhodnocení výrazně komplikuje překryv natavených oblastí. Pro objektivní posouzení by bylo třeba nastavení experimentu zcela změnit, nebo experiment doplnit o vyhodnocení jednotlivých lineárních stop (návarů) podle metodiky uvedené v publikaci [96].

9.3.2. Mikrotvrdotost a makrotvrdotost

V návaznosti na výsledky zkoušek mechanických vlastností byla vyhodnocena makro i mikrotvrdotost ve vazbě na polohu vpichu vůči hladině spékání a hodnotu parametru focus level.

Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella byly téměř shodné v obou měřicích směrech: paralelně k hladinám spékání 215 ± 3 HBS 2.5/187.5 a kolmo k hladinám spékání 217 ± 11 HBS 2.5/187.5, viz. Obr. 9.5. Z pohledu mikrotvrdotosti rovněž nebyl ve vztahu k orientaci vpichu nalezen rozdíl.

Změna parametru focus level (FL=0 mm) a tím posunutí fokusace laseru do hladiny spékání se při měření makrotvrdotosti ve směru pralelním k hladinám spékání projevila nárůstem na hodnoty 244 ± 1 HBS 2.5/187.5, viz. Obr. 9.5 pravo.



Obr. 9.5: Výsledky makro a mikrotvrdotosti - CL20ES

Matice mikrotvrdotosti byla měřena na metalografických vzorcích k vyhodnocení rovnoměrnosti mikrotvrdotosti ve struktuře (Obr. 9.8). Z provedené analýzy vyplývá shoda mikrotvrdotosti v oblastech uvnitř natavených oblastí (meltpoolů) i na hranách solidifikační fronty. Jednotlivé skupiny vzorků se od sebe mikrotvrdotostí liší pouze minimálně bez ohledu na orientaci a hodnotu parametru focus level:

- FL-3 mm, vpich paralelně k hladinám spékání – 230 ± 8 HV 0,5
- FL-3 mm, vpich kolmo k hladinám spékání – 229 ± 6 HV 0,5
- FL-0 mm, vpich kolmo k hladinám spékání – 235 ± 6 HV 0,5

Minimální rozdíly v tvrdosti napříč skupinami lze zdůvodnit homogenním chemickým složením a neschopností materiálu být vytvrzen (kalen) jakýmkoli tepelným zpracováním. Materiál také není po procesu LPBF jakkoli deformován a lze vyloučit vznik deformačních fází. Hodnoty makro i mikrotvrdosti napříč všemi skupinami vzorků jsou vyšší (o 10 až 20 %) než u konvenčně vyráběné vyžíhané nerezové oceli AISI 316L.

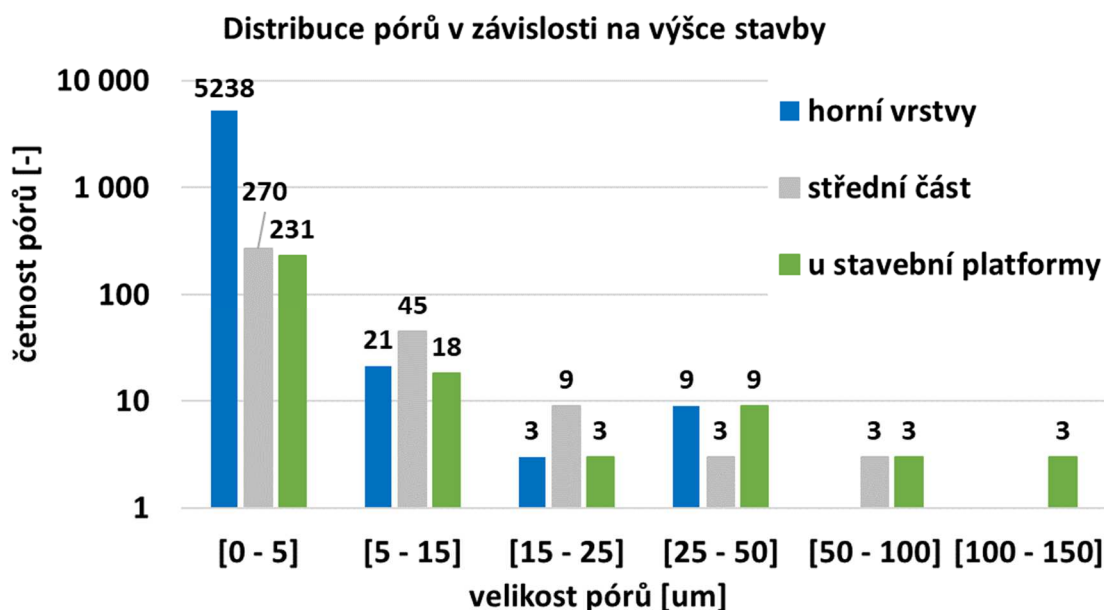
9.3.3. Metalografie a stav povrchu

Ačkoli jsou slitiny CL20ES a konvenční AISI 316L prakticky shodné po stránce obsahu slitinových prvků, rozhodně nejsou shodné po stránce metalografické a strukturní. Interpretace mikrostruktury LPBF tištěných je vždy obtížná z pohledu rozdílnosti při pohledu do hladiny ze směru stavby a z boku. Ve struktuře nejsou obsaženy typické entity a útvary, které jsou známy z konvenčních materiálů. Struktura zcela postrádá polygonální austenitická zrna se zřetelnými hranicemi. Ve struktuře se vůbec nevyskytují dvojčata (ani deformační, ani žíhací). I po deformaci (například v oblasti porušení tahového vzorku) nebyla zjištěna přítomnost deformačního martenzitu, na rozdíl od konvenční oceli AISI 304 v kapitole 7.3.3. Struktura podléhá nestandardně rychlému ohřevu i rychlému chlazení a způsobuje nerovnovážné stavy se značnými úrovněmi vnitřního objemového pnutí. V leštěném stavu metalografických vzorků byly zjištěny velmi nízké úrovně porezity v obou klíčových směrech (v hladině a kolmo na hladiny). Zároveň bylo možné pozorovat zvýšený výskyt ostrohranných pórů v těsné blízkosti povrchu v hloubkách přibližně 0,1 mm.

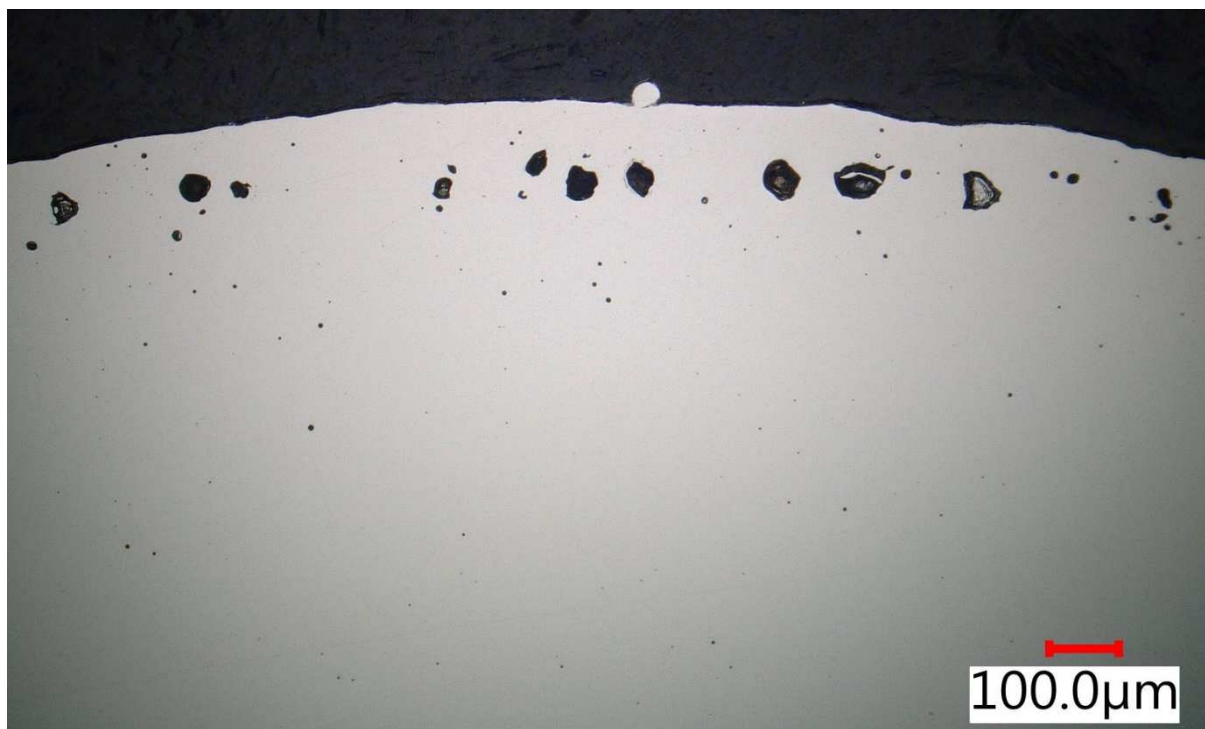
Zvýšený výskyt pórů pravděpodobně souvisí se strategií tisku různou expozicí jádra a expozicí kontury. Kontura je spékána vyšší rychlostí skenování. Větší ostrohranné póry (0,03 až 0,2 mm) se častěji soustředí v blízkosti povrchu (Obr. 9.7). Pokud se tyto póry vyskytují v jádře vzorku mají obvykle souvislost s degradací nanašeče, nebo hrubými částicemi prášku, které neumožní v důsledku hnutí se před nanašečem vytvořit celistvou srovnanou plochu. Výjimečně se ve větších pórech může držet nespečený prášek.

Malé sférické póry (0,005 až 0,02 mm) se vyskytují rovnoměrně ve struktuře a jsou primárně důsledkem přítomnosti plynu v prášku, případně zavlečením do taveniny (meltpoolu). V návaznosti na postupnou degradaci nanašeče a vyšší pravděpodobnost výskytu vrstevných vad by se měla teoreticky úroveň porezity s postupem stavby zvyšovat. V provedené analýze porezity se tato hypotéza jednoznačně nepotvrdila (Obr. 9.6). Z analýzy míst v blízkosti stavební palety, středu vzorků a horní upínací části není patrný zhoršující se trend v žádné z kategorií. Navzdory těmto výsledkům byla prostým součtem plochy pórů opravdu zjištěna

ve vrchních vrstvách stavby vyšší úroveň porezity 0,103 % oproti 0,036 % ve středové části a 0,089 % v blízkosti základny.



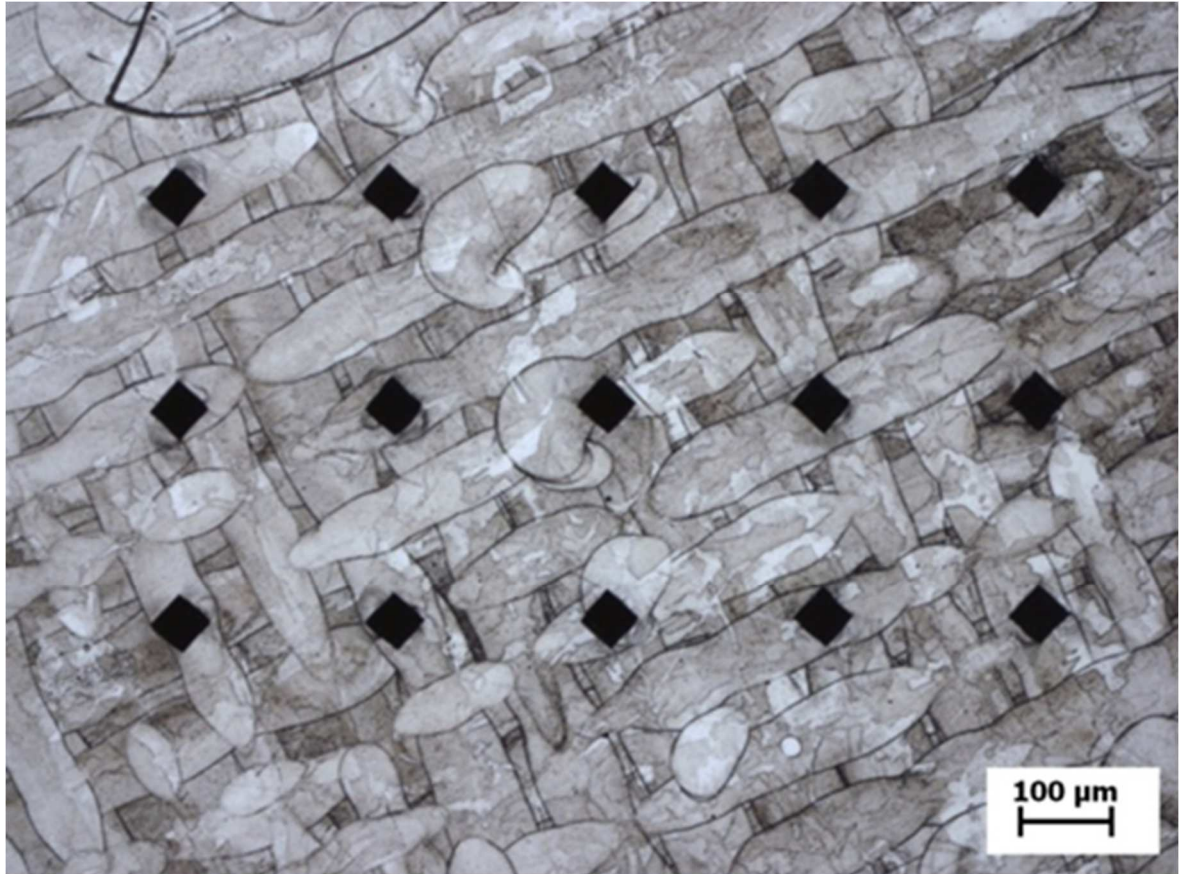
Obr. 9.6: Distribuce a klasifikace pórů v závislosti na výšce stavby



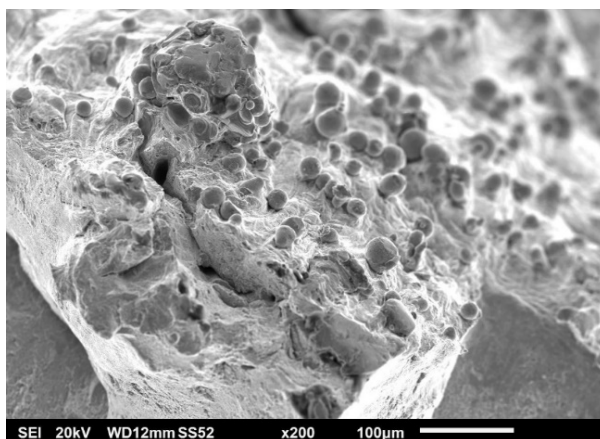
Obr. 9.7: Zvýšená přítomnost větších ostrohranných pórů v blízkosti povrchu vzorku

Po elektrolytickém naleptání kyselinou šťavelovou 10% došlo ke zviditelnění makro i mikrostruktury. Obzvláště v pohledu do hladiny jsou velmi dobře patrné rovnoběžné stopy po jednotlivých průchodech laseru (Obr. 9.8). Z bočního pohledu na hladiny jsou patrné

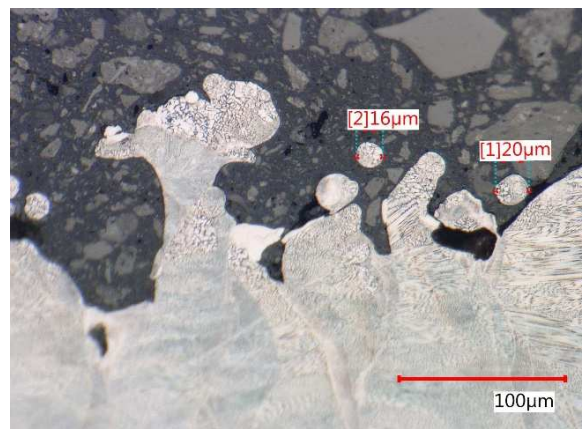
jednotlivé stopy (návary) půlkruhového tvaru s výraznými překryvy. Uvnitř jednotlivých stop převažuje epitaxiální kolumnární růst zrna s citelnou segregací na hranici natavené oblasti (melpoolu).



Obr. 9.8: Naleptaná struktura při pohledu do hladiny, mapa mikrotvrdosti



Obr. 9.9: Povrch tištěných vzorků se zachyceným práškem na povrchu – SEM



Obr. 9.10: Metalografický řez povrchem s nespečeným práškem

Na povrchu tištěných vzorků je zachycen částečně natavený prášek (Obr. 9.9, Obr. 9.10) odlišný vnitřní strukturou, který výrazným způsobem zvyšuje drsnost povrchu. Část těchto

částic se odstraní při otryskání, nicméně další částice na povrchu zůstanou a mohou se dále uvolňovat při provozu součástí. O vlivu částečně natavených částic prášku na parametry drsnosti povrchu svědčí i výrazný odstup zjištěné střední hloubky drsnosti $R_z = 80$ až $100 \mu\text{m}$ a střední aritmetické úchyly profilu $R_a = 11$ až $14 \mu\text{m}$. Poměr mezi těmito dvěma parametry je v případě LBPF kovového tisku 7 až 8, což představuje prakticky dvojnásobné hodnoty ve srovnání s běžnými technologiemi obrábění.

10. Důsledky pro vědu

V rámci disertační práce byla vyvinuta unikátní mechanická metoda měření hloubkových profilů zbytkových napětí vycházející z dříve užívané koncepce. Práce popisuje nejen její aktuální stav, ale i postup optimalizace, a tím dává možnost aplikace, případně individualizace, této metody pro měření dalších materiálů a dalších specifických úloh. Jelikož jsou v práci popsány výpočtové vztahy i samotné laboratorní úkony, mohou tuto metodu využít další výzkumná pracoviště s určitou základní odborností v oblasti analýzy integrity povrchu.

Z výsledků kapitoly 4.8 *Ověřování metody měření* vyplývá vhodnost metody ke stanovování průběhů zbytkových napětí primárně po obráběcích, dokončovacích a zpevňovacích operacích. Metoda se uspokojivě shoduje se standardizovanou metodou rentgenové difrakční tenzometrie ve stanovování smyslu napětí i hloubek přechodu, což vyvinutou metodu předurčuje k velmi efektivnímu nasazení v oblasti výzkumu vlivu jednotlivých technologií na zbytkovou napjatost. Měření průběhu zbytkových napětí do obvyklé hloubky 0,3 mm lze i s vyhodnocením provést během pouhých 2 až 3 hodin. Při vhodném návrhu experimentu a tvaru zkušebních vzorků je citlivost metody dostačující i pro hodnocení vlivu parametrů v rámci jedné konkrétní technologie.

V kapitole 6 *Integrita povrchu titanových slitin - Ti6Al4V* se podařilo zpracovat a detailně analyzovat 9 typů vzorků, z nichž 7 typů reprezentuje konkrétní technologii samostatně a 2 typy představují kombinace těchto technologií. Ve všech případech se jedná o výrobní technologie využitelné v pokročilých průmyslových odvětvích, zejména v letectví. Vzhledem k rozsahu a vzájemné porovnatelnosti průběhů zbytkových napětí (dané především shodnou metodou měření) práce představuje unikátní soubor poznatků a experimentálně získaných dat. Počet analyzovaných vzorků zároveň umožnil získané poznatky do jisté míry generalizovat a vymezit se vůči obecně známým mechanismům vzniku zbytkových napětí.

Můžeme říci, že uvedené poznatky jsou unikátní, nebyly nikde dosud publikovány a rozšiřují současné vědecké poznání. Prezentované výsledky jsou v porovnání s literaturou uvedenou v rešeršní části velmi komplexní. Výsledky měření zbytkových napětí jsou dány do úzké souvislosti s povrchovým zpevněním a změnami mikrostruktury. Dosažené výsledky výzkumu a analýzy značně rozšiřují teorii obrábění a její dosud známé závislosti a závěry.

11. Důsledky pro průmyslovou praxi

Na straně koncových uživatelů výsledků výzkumu (výrobních podniků) v pokročilých průmyslových odvětvích se nutně očekává i vlastní vývojová aktivita a přínosy pro praxi tím pádem velmi úzce souvisí s přínosy pro oblast vědy a výzkumu.

Vyvinutá metoda měření zbytkových napětí pravděpodobně nikdy nebude přímo využívána samotnou průmyslovou sférou ve smyslu vlastního provádění měření. Může však rozšířit spektrum vývojových zkoušek při optimalizaci výrobních postupů dynamicky namáhaných součástí, které si bude zajišťovat kooperačně skrze výzkumné instituce. Vypracovaná metodika může značně usnadnit a urychlit jinak obtížně stanovitelnou hodnotu zbytkových napětí po obrábění.

Analýzou technologií čelního frézování, dokončovacího 5D frézování, řízeného tryskání, laserpeeningu, drátového řezání WEDM, vibračního kuličkování a leštění se podařilo získat dostatek poznatků pro „katalogizaci“ typických stavů zbytkové napjatosti, mikrotvrdosti i struktury, které lze v povrchu součásti po těchto technologiích u slitiny Ti6Al4V očekávat – viz. kapitola 6.3.

V případě technologických vzorků zhotovených řízeným tryskáním (shotpeening) u průmyslového partnera vyrábějícího ovládací prvky dveřních systémů civilních dopravních letadel byly stanoveny hloubkové profily zbytkových napětí vůbec prvně. Výrobce do té doby používal pouze měření průhybu zkušebních almen pásků, které slouží primárně k nastavení a procesní kontrole zařízení. Provedenými zkouškami bylo možné vzájemně korelovat průhyby almen pásků s vyvozenými průběhy zbytkových napětí a tím technologií dále optimalizovat.

Zproduktivnění metody umožnilo nasazení technologie do vývojových zkoušek technologií zpevňování v rámci projektu *TH01011405 Zvyšování životnosti a možnosti oprav lopatkových dílů kompresoru z Ti6Al4V v turbovrtulových motorech*, kde je hlavním výstupem *Ověřená technologie TH01011405-V7 Ověření účinku technologie zpevňování na povrchovou vrstvu a zvýšení životnosti lopatek*.

Výzkum integrity povrchu po dokončovacích operacích součástí leteckých motorů pokračoval v letech 2018 až 2020 v rámci společného projektu FS ČVUT, GE Aviation Czech a SPM Italy. Bylo dosaženo výsledku *Ověřená technologie TH03010089-V001 Technologie progresivního dokončování kritických dílů kompresoru*, která je aktuálně předmětem jednání o licenční smlouvě mezi účastníky.

Od května 2019 je také laboratoř zbytkového napětí certifikována jako ověřený dodavatel vývojových zkoušek pro společnost GE Aviation.

12. Závěr

Disertační práce s názvem „Kvalita povrchové vrstvy: Výzkum vybraných parametrů integrity povrchu při obrábění materiálů leteckého průmyslu“ se komplexně zabývá problematikou integrity povrchu u materiálů a technologií, které se uplatňují v pokročilých odvětvích jako je letectví, energetika, medicínský a zbrojní průmysl. Těžištěm práce jsou zbytková napětí v povrchu součástí a možnosti jejich zjišťování. Práce uceleně přináší nové poznatky o vlivu vybraných technologií na stav povrchové vrstvy, z nichž některé byly získány prostřednictvím vyvinuté mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí pomocí postupného elektrolytického rozpouštění vrstev. Práce je sestavena do vzájemně navazujících kapitol.

Rešerši současného stavu poznání se věnuje kapitola 2 *Integrita povrchu*, která popisuje jednotlivé složky integrity, možnosti jejich zjišťování, metody měření zbytkových napětí i obecně známé mechanismy a příčiny vzniku těchto napětí.

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že vyvíjená mechanická metoda měření průběhů zbytkových napětí je jedinečnou koncepcí zařízení i zpracováním naměřených dat. V konfiguraci, která je předmětem kapitoly 4 *Vývoj metody měření zbytkových napětí*, nebyla dosud metoda publikována. Kapitola 4 detailně popisuje koncepci zařízení, potřebné přípravky, elektrolytické rozpouštění, výpočtové vztahy a postup měření. Zvláštní pozornost byla věnována ověřovacím zkouškám metody a jejímu porovnání se zavedenou a standardizovanou metodou měření pomocí rentgenové difrakce. Z ověřovacích zkoušek jednoznačně vyplynula způsobilost a dobrá opakovatelnost vyvinuté metody. Zjištěné průběhy zbytkových napětí se shodují v rámci porovnávacích zkoušek ve smyslu zbytkového napětí i ve stanovení hloubek přechodu z oblasti tlakových do tahových zbytkových napětí. Neshoda byla naopak zjištěna ve stanovení absolutních hodnot napětí. Příčiny této neshody byly diskutovány v kapitole 4.9.4 *Dílčí závěry porovnání metod*. V následujících kapitolách byla vyvinutá metoda aplikována na specifické výzkumné úkoly.

Kapitola 6 *Integrita povrchu titanových slitin - Ti6Al4V* je věnována výzkumu zbytkových napětí, profilů mikrotvrdosti a mikrostruktury uvedené slitiny v povrchu po technologiích čelního frézování, dokončovacím 5D frézování, řízeného tryskání, vibračního kuličkování laserpeeningu a strojního leštění. Získané dílčí poznatky jsou zobecněny a použity k popisu příčin a mechanismů vzniku zbytkových napětí u této slitiny.

V kapitole 7 *Integrita povrchu po soustružení nerezových ocelí* byla v experimentu soustružení s pozitivní a negativní geometrií soustružnického nože prokázána silná tendence

austenitických nerezových ocelí k deformačnímu zpevňování povrchové vrstvy. Ovlivnění povrchu bylo zjištěno, na rozdíl od slitiny Ti6Al4V, nejen prostřednictvím přítomnosti tahových zbytkových napětí v povrchu, ale i zvýšením mikrotvrdosti a zároveň tvorbou deformačního martenzitu.

Vliv nevhodných technologických podmínek broušení na integritu povrchu uvádí kapitola 8 *Integrita povrchu turbínových lopatek z Inconelu 713LC*. S využitím kapilárních defektoskopických metod byly po broušení zjištěny brusné trhliny. Příčinu vzniku trhlín při broušení dále podpořila analýza zbytkových napětí, jelikož v bezprostřední blízkosti povrchu byla zjištěna napětí přesahující mez pevnosti materiálu.

Výzkum integrity povrchu perspektivních materiálů v pokročilých průmyslových odvětvích je podpořen výzkumem vlastností aditivních materiálů v kapitole 9 *Integrita povrchu aditivně zpracované oceli AISI 316L*. Kromě vybraných parametrů povrchu kapitola uvádí výsledky výzkumu anisotropie základních mechanických vlastností tištěných materiálů, které jsou předmětem publikační činnosti z poslední doby [91].

13. Splnění cílů práce

Cílem disertační práce je systematické určení vlastností integrity povrchu v závislosti na použité technologii u perspektivních technických materiálů využitelných v pokročilých technických oborech jako je letectví, energetika, medicínský a zbrojní průmysl. V práci byly definovány dílčí cíle:

1. Vývoj mechanické metody měření hloubkových průběhů zbytkových napětí s využitím postupného elektrolytického odleptávání vrstev a její ověření porovnáním se standardizovanou měřicí metodou

Metoda byla vyvinuta primárně pro potřeby měření průběhů zbytkových napětí do hloubky několika desetin milimetru. Optimalizována byla pro analýzu titanových slitin, niklových slitin a nerezů, avšak s drobnými úpravami elektrolytického rozpouštění ji lze používat i na ostatní kovové materiály. O vývoji metody do aktuální podoby pojednávají kapitoly 4.1 až 4.7.

Dílčí cíl byl splněn.

2. Experimentální určení vlastností podstatných pro integritu povrchu vzorků s úpravami použitých experimentálních metod pro garantovanou opakovatelnost výsledků

V kapitolách 6 až 8 jsou uvedeny experimentálně zjištěné průběhy zbytkových napětí po celkem devíti výrobních technologiích a jejich dalších dvou kombinacích. Prezentovaná měření jsou doplněna analýzou mikrotvrdomosti a mikrostruktury. Technologie pokrývají celé spektrum obvyklých výrobních operací - od hrubovacích až po dokončovací. Jednotlivé skupiny vzorků se pojí s materiály Ti6Al4V (většina), nerezovou ocelí AISI 304 a niklovou slitinou Inconel 713LC. Prezentované výsledky experimentálních měření jsou dány do souvislosti s mechanickými a fyzikálními vlastnostmi jednotlivých, značně odlišných, materiálů.

Dílčí cíl byl splněn.

3. Určení vazeb mezi použitou technologií a dosaženými vlastnostmi integrity povrchu (zbytkovými napětími, mikrotvrdostí a lokálními změnami mikrostruktury) pro jednotlivé materiály

Výsledný stav zbytkových napětí, mikrotvrdosti a mikrostruktury je i v rámci jedné technologie závislý na konkrétních podmínkách, které do jisté míry definují mechanismy, jimiž se změny v povrchu vyvozují. V průběhu provádění experimentů bylo zjištěno, že tyto mechanismy jsou rovněž závislé na vlastnostech materiálu výrobku, jsou různé a jsou předmětem diskuze výsledků v kapitolách 6.3, 7.4 a 8.3.

Například u nerezových ocelí byla opakovaně prokázána technicky významná vazba mezi nárůstem mikrotvrdosti a tvorbou odlišné fáze (deformačního martenzitu) v povrchu, kdežto u titanových slitin se tato vazba prokazatelně nevyskytovala. Pozorována byla také rozdílnost převažujících mechanismů vzniku zbytkových pnutí (nerovnoměrná plastická deformace u Ti6Al4V, fázové změny u nerezové oceli). Stanovení zobecněných typických stavů povrchu – „katalogizaci“ - lze provádět pouze v mezích konkrétního materiálu. V těchto mezích byla zobecnění pro jednotlivé výrobní technologie provedena.

Dílčí cíl byl splněn.

Práce přináší nové dosud nepublikované výsledky a rozšiřuje současné vědecké poznatky především v oblasti integrity povrchu titanových slitin. **Hlavního cíle bylo dosaženo prostřednictvím splnění všech dílčích cílů.**

14. Seznam literatury

- [1] NECKÁŘ, Ferdinand a Ivo KVASNIČKA. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Vyd. 1. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1991, 88 s. ISBN 80-010-0696-4.
 - [2] KAFKA, J. *Vznik zbytkových pnutí ve strojních součástech a metodika jejich měření*. Praha, 1982. Zpráva o výzkumu. ČVUT Fakulta Strojní.
 - [3] BELLOWS, Guy a Dean TISCHLER. Introduction to surface integrity. *The Shot Peener magazine* [online]. 1970, **1970**(Pamphlet 1), 14 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1970007.pdf>
 - [4] KAFKA, Jindřich. *Ověření vlivu některých technologických procesů na kvalitu povrchové vrstvy u slitin titanu*. Praha, 1988. Kandidátská práce. Fakulta Strojní ČVUT.
 - [5] ULUTAN, Durul a Tugrul OZEL. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2011, **51**(3), 250-280 [cit. 2022-02-01]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003.
 - [6] KOLARÍK, Kamil. *Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění ocelí*. Praha, 2010. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Katedra inženýrství pevných látek. Vedoucí práce Nikolaj Ganjev a Jaroslav Barcal.
 - [7] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Aktuální vydání. Praha: Český normalizační institut, 2018.
 - [8] DING, Wenfeng, Liangchi ZHANG, Zheng LI, Yejun ZHU, Honghua SU a Jiuhua XU. Review on grinding-induced residual stresses in metallic materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2016, **2017**(88), 2939–2968 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8998-1>.
 - [9] HE, Baofeng, Cui'e WEI, Siyuan DING a Zhaoyao SHI. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. *Measurement* [online]. 2019, **2019**(134), 426-439 [cit. 2022-02-01]. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2018.10.093.
 - [10] SOHRABI, Mohammad Javad, Meysam NAGHIZADEH a Hamed MIRZADEH. Deformation-induced martensite in austenitic stainless steels: A review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2020, **20**(4), 124 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1644-9665. Dostupné z: doi:10.1007/s43452-020-00130-1.
-

- [11] DE, Amar K., David C. MURDOCK, Martin C. MATAYA, John G. SPEER a David K. MATLOCK. Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction. *Scripta Materialia* [online]. 2004, **50**(12), 1445-1449 [cit. 2022-02-01]. ISSN 13596462. Dostupné z: doi:10.1016/j.scriptamat.2004.03.011.
- [12] SCHAJER, Gary S., ed. *Practical Residual Stress Measurement Methods* [online]. 1. Chichester, UK: John Wiley, 2013 [cit. 2022-02-01]. ISBN 9781118402832. Dostupné z: doi:10.1002/9781118402832.
- [13] ROSSINI, N.S., M. DASSISTI, K.Y. BENYOUNIS a A.G. OLABI. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design* [online]. 2012, **2012**(vol. 35), 572-588 [cit. 2022-02-01]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2011.08.022.
- [14] BRINKSMEIER, E., D.A. LUCCA a A. WALTER. Chemical Aspects of Machining Processes. *CIRP Annals* [online]. 2004, **53**(2), 685-699 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/S0007-8506(07)60035-3.
- [15] YAKOVLEV, M. G., V. A. GORELOV, N. S. MERKULOVA a A. S. KUDROV. Study of the influence of residual stresses on the fatigue strength of samples made of titanium and nickel alloys. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* [online]. 2014, **43**(5), 389-392 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1052-6188. Dostupné z: doi:10.3103/S1052618814050203.
- [16] LI, Yu-Jia, Fu-Zhen XUAN, Zheng-Dong WANG a Shan-Tung TU. Effects of Residual Stresses on the High Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V. *ASME 2010 Pressure Vessels and Piping Conference: Volume 5* [online]. ASMEDC, 2010, 2010-01-01, **2010**(5), 397-401 [cit. 2022-02-01]. ISBN 978-0-7918-4924-8. Dostupné z: doi:10.1115/PVP2010-25364.
- [17] PAN, Xinlei, Xiang LI, Liucheng ZHOU, Xiaotai FENG, Sihai LUO a Weifeng HE. Effect of Residual Stress on S–N Curves and Fracture Morphology of Ti6Al4V Titanium Alloy after Laser Shock Peening without Protective Coating. *Materials* [online]. 2019, **12**(22), 3799 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12223799.
- [18] LAZOGLU, I., D. ULUTAN, B.E. ALACA, S. ENGIN a B. KAFTANOGLU. An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining. *CIRP*
-

- Annals* [online]. 2008, **57**(1), 81-84 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2008.03.060.
- [19] QI, Zhaoxu, Bin LI a Liangshan XIONG. Improved analytical model for residual stress prediction in orthogonal cutting. *Frontiers of Mechanical Engineering* [online]. 2014, **9**(3), 249-256 [cit. 2022-02-01]. ISSN 2095-0233. Dostupné z: doi:10.1007/s11465-014-0310-1.
- [20] TÖNISSEN, Stefan, Fritz KLOCKE, Björn FELDHAUS, Steffen BUCHHOLZ a Markus WEISS. Residual stress prediction in quick point grinding. *Production Engineering* [online]. 2012, **6**(3), 243-249 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-012-0382-x.
- [21] ULUTAN, D., B. ERDEM ALACA a I. LAZOGLU. Analytical modelling of residual stresses in machining. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2007, **183**(1), 77-87 [cit. 2022-02-01]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.032.
- [22] LIANG, S.Y. a J.-C. SU. Residual Stress Modeling in Orthogonal Machining. *CIRP Annals* [online]. 2007, **56**(1), 65-68 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2007.05.018.
- [23] MURAT, Deveci. Stresstech Bulletin 5: Grinding Quality Control of Camshafts. *Stresstech* [online]. Stresstech, a Nova Instruments company, 2017, 24.10.2017, **2017**(Bulletin 5), 3 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/stresstech-bulletin-5-grinding-quality-control-of-camshafts/>.
- [24] TARAPHDAR, P.K., J.G. THAKARE, Chandan PANDEY a M.M. MAHAPATRA. Novel residual stress measurement technique to evaluate through thickness residual stress fields. *Materials Letters* [online]. 2020, 15.10.2020, **277**(04), 42 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0167577X. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2020.128347.
- [25] GAUTAM, Nikhil, Anand S. KUMAR a Papa Rao MONDI. Evaluation methods for residual stress measurement in large components. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2021, **44**(6), 4239-4244 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.10.539.
- [26] NESLUŠAN, Miroslav, Martin ROSIPAL, Kamil KOLAŘÍK a Vladislav OCHODEK. Application of Barkhausen Noise for Analysis of Surface Integrity after Hard
-

- Turning. *Manufacturing Technology* [online]. 2012, **12**(1), 60-65 [cit. 2022-02-01]. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/x.2012/a/1213-2489/MT/12/1/60.
- [27] PACYNA, Jerzy a Adam KOKOSZA. Residual Stress Measurement in Steel Mill Rolls Using Magnetic Barkhausen Noise Analysis. *NDT.net* [online]. 1999, **Vol 4**(8), 7 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/v04n08/wojtas/wojtas.htm>.
- [28] SCHUSTER, Simone, Laura DERTINGER, Dominik DAPPRICH a Jens GIBMEIER. Application of magnetic Barkhausen noise for residual stress analysis – Consideration of the microstructure. *Materials Testing* [online]. 2018, **60**(6), 545-552 [cit. 2022-02-01]. ISSN 2195-8572. Dostupné z: doi:10.3139/120.111186.
- [29] KUDRYAVTSEV, Y a J KLEIMAN. Ultrasonic Technique and Device for Residual Stress Measurement. *SEM X International Congress & Exposition on Experimental and Applied Mechanics* [online]. 2004, **S04**(p03), 7 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <http://sem-proceedings.com/04s/sem.org-SEM-X-Int-Cong-s048p03-Ultrasonic-Technique-Device-Residual-Stress-Measurement.pdf>.
- [30] VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *EXPERIMENTÁLNÍ MECHANIKA* [online]. Brno, 2003, 147 s. [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf. Opory studia. VUT, Ústav Mechaniky těles, mechatroniky a biochemiky.
- [31] CIVÍN, A. *Komplexní teoretická analýza metody sloupku pro zjišťování zbytkových napětí*. Brno, 2012, 130 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. MILOŠ VLK, CSc..
- [32] X-ray diffraction – Bruker D8 Discover. In: KU LEUVEN - Experimental facilities [online]. Leuven, 18.08.2010 [cit. 2013-11-27]. Dostupné z: <http://fys.kuleuven.be/iks/nvsf/experimental-facilities/x-ray-diffraction-2013-bruker-d8-discover>
- [33] X-Ray Diffraction / Crystal Structure. Mechanical Engineering Blog [online]. [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <http://www.mechanicalengineeringblog.com/tag/x-ray-diffraction/>
- [34] GANEV, Nikolaj. *Poznání nehmotného světa zbytkových napětí* [online]. Praha, 2013 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: https://documen.site/download/zbytkova-napti-iii-druhu_pdf. Seminář. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
-

- [35] WITHERS, P.J., M. TURSKI, L. EDWARDS, P.J. BOUCHARD a D.J. BUTTLE. Recent advances in residual stress measurement. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2008, vol. 85, issue 3, s. 118-127 [cit. 2015-02-25]. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2007.10.007.
- [36] RAICU, Alexandra. Comparative Analysis of Different Methods in Residual Stress Measurement for Polymeric Parts. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **2013**(837), 175-178 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.837.175.
- [37] PAK, Seong Yeol, Seong Yun KIM, Sung Ho KIM a Jae Ryoun YOUN. Measurement of residual stresses in polymeric parts by indentation method. *Polymer Testing* [online]. 2013, **32**(5), 946-952 [cit. 2022-02-01]. ISSN 01429418. Dostupné z: doi:10.1016/j.polymertesting.2013.04.011.
- [38] JIANG, L.M., J. PENG, Y.G. LIAO, Y.C. ZHOU, J. LIANG, H.X. HAO a C. LU. A modified layer-removal method for residual stress measurement in electrodeposited nickel films. *Thin Solid Films* [online]. 2011, **519**(10), 3249-3253 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2011.01.260.
- [39] ZHU, RongHua, HuiMin XIE, JianGuo ZHU, YanJie LI, ZhiGang CHE a ShiKun ZOU. A micro-scale strain rosette for residual stress measurement by SEM Moiré method. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy* [online]. 2014, **57**(4), 716-722 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1674-7348. Dostupné z: doi:10.1007/s11433-014-5397-1.
- [40] HOSSEINZADEH, Foroogh, Muhammed BURAK TOPARLI a Peter JOHN BOUCHARD. Slitting and Contour Method Residual Stress Measurements in an Edge Welded Beam. *Journal of Pressure Vessel Technology* [online]. 2012, **134**(1), 6 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0094-9930. Dostupné z: doi:10.1115/1.4004626.
- [41] WONG, W. a M. R. HILL. Superposition and Destructive Residual Stress Measurements. *Experimental Mechanics* [online]. 2013, **53**(3), 339-344 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-012-9636-y.
- [42] XIN, Haohui, José A.F.O. CORREIA, Milan VELJKOVIC, Filippo BERTO a Lance MANUEL. Residual stress effects on fatigue life prediction using hardness measurements for butt-welded joints made of high strength steels. *International Journal of Fatigue* [online]. 2021, **147**(106175), 6 [cit. 2022-02-01]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijfatigue.2021.106175.
-

- [43] DREIER, Steven a Berend DENKENA. Determination of Residual Stresses in Plate Material by Layer Removal with Machine-integrated Measurement. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **2014**(24), 103-107 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2014.07.137.
- [44] GROVE, T., J. KÖHLER a B. DENKENA. Residual Stresses in Milled β -Annealed Ti6Al4V. *Procedia CIRP* [online]. 2014, **13**(2), 320-326 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2014.04.054.
- [45] KÖHLER, J., T. GROVE, O. MAISS a B. DENKENA. Residual Stresses in Milled Titanium Parts. *Procedia CIRP* [online]. 2012, **2**(1), 79-82 [cit. 2022-02-01]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2012.05.044.
- [46] CHE-HARON, C.H. a A. JAWAID. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy Ti-6% Al-4% V. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, **166**(2), 188-192 [cit. 2022-02-01]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.08.012.
- [47] HILL, M. R. a M. D. OLSON. Repeatability of the Contour Method for Residual Stress Measurement. *Experimental Mechanics* [online]. 2014, **54**(7), 1269-1277 [cit. 2022-02-01]. ISSN 0014-4851. Dostupné z: doi:10.1007/s11340-014-9867-1.
- [48] SAHIN, Fatih, Firat KAFKAS a Cetin KARATAS. An Electrochemical Machining Device for Residual Stresses Measurement in PM Parts by Layer Removal Method. *Materials Science Forum* [online]. 2011, **672**(1), 117-120 [cit. 2022-02-01]. ISSN 1662-9752. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.672.117.
- [49] BENDEK, E., I. LIRA, M. FRANÇOIS a C. VIAL. Uncertainty of residual stresses measurement by layer removal. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2006, **48**(12), 1429-1438 [cit. 2022-02-01]. ISSN 00207403. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmecsci.2006.07.002.
- [50] GAUTHIER, J., T.W. KRAUSE a D.L. ATHERTON. Measurement of residual stress in steel using the magnetic Barkhausen noise technique. *NDT* [online]. 1998, vol. 31, issue 1, s. 23-31 [cit. 2013-11-27]. DOI: 10.1016/S0963-8695(97)00023-6. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0963869597000236>
- [51] VÁCLAVÍK, J., BUNDA, Z., BOHDAN, P., WEINBERG, O. NDE for Safety / Defektoskopie 2012, 42nd International Conference , Oct 30 - Nov 1, 2012, Seč, Czech Republic. Aplikace vybraných metod pro měření zbytkových napětí. [Online]
-

2013. [cit. 2022-01-02.] Dostupné na World Wide Web:
http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf. ISSN 1435-4934.
- [52] MEJTA, Vladimír a BIELIK Josef. *Elektrochemické leštění titanu a titanových slitin*. Praha, 1990. Výzkumná zpráva. Vysoká škola chemicko-technologická.
- [53] HAN, Wei a Fengzhou FANG, 2019. Fundamental aspects and recent developments in electropolishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. **139**, 1-23 [cit. 2022-01-02]. ISSN 08906955. Dostupné z:
doi:10.1016/j.ijmachtools.2019.01.001
- [54] JUNG, Jae-Hyun, Hyung-Ki PARK, Byoung Soo LEE, Jaeho CHOI, Bosung SEO, Hyo Kyu KIM, Gun Hee KIM a Hyung Giun KIM, 2017. Study on surface shape control of pure Ti fabricated by electron beam melting using electrolytic polishing. *Surface and Coatings Technology* [online]. **324**, 106-110 [cit. 2022-01-02]. ISSN 02578972.
Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2017.05.061
- [55] KUHN, Anselm, 2004. The electropolishing of titanium and its alloys. *Metal Finishing* [online]. **102**(6), 80-86 [cit. 2022-01-02]. ISSN 00260576. Dostupné z:
doi:10.1016/S0026-0576(04)82510-8
- [56] ZHANG, Y. (2018). Electropolishing Mechanism of Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Selective Laser Melting. *International Journal of Electrochemical Science*, 4792–4807. <https://doi.org/10.20964/2018.05>.
- [57] About Electrolytic Preparation. *Struers* [online]. Cleveland: Struers Applications, 2021 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Knowledge/Electrolytic-preparation#>
- [58] PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V.; ŠIMOTA, J. Importance and Methods of Residual Stress Profile Measurement. *Manufacturing Technology*. 2016, 16(3), ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/590
- [59] BRAJER, J. ŠVÁBEK, R. ROSTOHAR, D. DIVOKÝ, M. LUCIANETTI, A. MÁDL, J. PITRMUC, Z. New possibilities for efficient laser surface treatment by diode-pumped kW-class lasers. *The Journal of Engineering*. 2015, 3(1), ISSN 2051-3305. DOI 10.1049/joe.2015.0094
- [60] BRAJER, J. MÁDL, J. PITRMUC, Z. ŠVÁBEK, R. ZEMAN, P. Application of laser shock processing. *Manufacturing Technology*. 2015, 15(3), 278-285. ISSN 1213-2489.
- [61] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.
-

- [62] LEYENS, Christoph. *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. 3rd edition, editor M. PETERS. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. ISBN 3-527-30534-3.
- [63] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: a technical guide*. 2nd ed. Materials Park: ASM International, 2004. ISBN 08-717-0686-5.
- [64] OCT 1-90013-81. Сплавы титановые. Марки. Москва: Евро-Азийский Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 01.07.1981
- [65] FÜRbacher, Ivan. Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: základní dílo aktuální stav duben 2004 - včetně 23. doplňku. Praha: Dashöfer, 1998.
- [66] WELSCH, Gerhard, Rodney BOYER a E.W. COLLINS. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. Michigan: ASM International, 1994. ISBN 978-0-87170-481-8.
- [67] Hilase: Laser Shock Peening LSP, 2022. *Hilase Produkty a Služby* [online]. Dolní Břežany [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/produkty/laser-shock-peening-lsp/>
- [68] FANG, Y.W., Y.H. LI, W.F. HE a P.Y. LI, 2013. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Materials Science and Engineering: A* [online]. **559**, 683-692 [cit. 2022-01-01]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2012.09.009
- [69] MONTROSS, C. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International Journal of Fatigue* [online]. **24**(10), 1021-1036 [cit. 2022-01-01]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-1123(02)00022-1
- [70] FABBRO, R., P. PEYRE, L. BERTHE a X. SCHERPEREEL, 1998. Physics and applications of laser-shock processing. *Journal of Laser Applications* [online]. **10**(6), 265-279 [cit. 2022-01-01]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: doi:10.2351/1.521861
- [71] Metal Improvement Company. Curtiss-wright surface technologies: Shot peening. [online]. Metal Improvement Company [cit. 2016-04-04] Dostupné z: Available online: <http://www.metalimprovement.com/>
- [72] BRAJER, Jan, 2018. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu*. Praha. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Jan Mádl.
- [73] BASAK, Animesh, Alokesh PRAMANIK, Chander PRAKASH, Subramaniam SHANKAR a Sujjan DEBNATH, 2022. Understanding the Micro-Mechanical Behaviour of Recast Layer Formed during WEDM of Titanium Alloy. *Metals*
-

- [online]. **12**(2) [cit. 2022-02-01]. ISSN 2075-4701. Dostupné z:
doi:10.3390/met12020188
- [74] PITRMUC, Zdeněk, Vítězslav RÁZEK, Jan ŠIMOTA a Libor BERÁNEK, 2018.
Ověření účinku technologie zpevňování na povrchovou vrstvu a zvýšení životnosti
lopatek: Ověřená technologie TH01011405-V7. Praha.
- [75] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Zdeněk PALA a Jan URBAN, 2021.
Technologie progresivního dokončování kritických dílů: Ověřená technologie
TH03010089-V001. Praha.
- [76] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Jan URBAN a Jiří SOMMER, 2020.
Technological forum 2020. In: KUDLÁČEK, Jan. Application of 3d printing for
production of camouflage jig for technological tests of polishing aircraft engine
components. Jaroměř: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 147-
150. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [77] DAVIS, J.R., ed., 1994. ASM Specialty Handbook:: Stainless steel. Michigan: ASM
International. ISBN 978-0-87170-503-7.
- [78] Product data bulletin AK steel: 304/304L Stainless steel, 2016. West Chester, OHIO.
Dostupné také z:
https://d1io3yog0oux5.cloudfront.net/_01c0c5fb6b6531f63a46ecaa72fb0e56/clevelandcliffs/db/1190/10510/file/CLF_ProductData_304-304LSS_052021.pdf
- [79] PITRMUC, Z., ČAPEK, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L. a Urban, J. Tool Geometry
Influence on Surface Integrity of Machined Austenite Stainless Steel. Manufacturing
Technology, 2016, vol. 16, iss. 2, p. 425-431.
- [80] ČAPEK, Jiří, Kamil KOLAŘÍK, Miroslav NESLUŠAN, et al., 2019. Surface Integrity
after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry. Transactions
of FAMENA [online]. 42(4), 1-14 [cit. 2022-03-21]. ISSN 13331124. Dostupné z:
doi:10.21278/TOF.42401
- [81] ČAPEK, J. et al. Residual Stress Determination of Duplex and Austenite Steels
Machined using Different Tool, Geometry. Materials Structure in Chemistry, Biology,
Physics and Technology. 2018, 25(2), 84-87. ISSN 1211-5894.
- [82] ISCAR: Katalog ISO soustružení, 2016. Plzeň. Dostupné také z:
<https://www.iscar.com/newarticles.aspx/lang/cs/newarticleid/2393>
- [83] JONŠTA, P., Z. JONŠTA, J. SOJKA, L. ČÍŽEK a A. HERNAS, 2007. Nickel super
alloy INCONEL 713LC:: Structural characteristics after heat treatment. Journal of
-

- Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2007(22), 7-13. ISSN 1734-8412.
- [84] SAUNDERS, N., Z. GUO, A.P. MIODOWNIK a J-Ph. SCHILLÉ, 2005. Modeling the Material Properties and Behavior of Ni-based Superalloys. *Superalloys 718, 625, 706 and Derivatives* [online]. The Minerals, Metals & Materials Society, 2005, 2005(10), 571-580 [cit. 2022-01-01]. Dostupné z:
https://www.tms.org/superalloys/10.7449/2005/superalloys_2005_571_580.pdf
- [85] DAVIS, J., R.: *ASM Speciality Handbook: Nickel, Cobalt and their Alloys*. ASM Ohio, USA, 2000. 421 s. ISBN 0-87170-685-7
- [86] KESHAVARZ, Mohsen K., Sylvain TURENNE a Ali BONAKDAR, 2018. Solidification behavior of inconel 713LC gas turbine blades during electron beam welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018(31), 232-239. ISSN 1526-6125. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmapro.2017.11.021
- [87] Engineering properties of Alloy 713C [online], 1990. USA: Nickel Institute [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: https://nickelinstitute.org/media/2487/alloys-713c_337.pdf
- [88] ČAPEK, J., KYNCL, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L., PITRMUC, Z., MEDŘICKÝ, J. a PALA, Z. Grinding of Inconel 713 Superalloy for Gas Turbines. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 1, p. 38-45.
- [89] CL20ES Stainless Steel Material Data Sheet: Material Data Sheet. Concept Laser: Metal Powder Materials. Germany. 2011. Available online:
https://www.laserproto.com/wp-content/uploads/2017/10/Stainless-Steel-111123_CL-20ES.pdf (accessed on 8 October 2021).
- [90] CL20ES Stainless Steel Material Data Sheet: Material Data Sheet. Concept Laser: Metal Powder Materials. Germany. 2011. Dostupné také z:
https://www.laserproto.com/wp-content/uploads/2017/10/Stainless-Steel-111123_CL-20ES.pdf (accessed on 8 October 2021).
- [91] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; MIKEŠ, P.; ANDRONOV, V.; SOMMER, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Mechanical and Microstructural Anisotropy of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel. *Materials* 2022, 15, 551.
<https://doi.org/10.3390/ma15020551>
- [92] MEIER, H. a Ch. HABERLAND, 2008. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* [online]. **39**(9), 665-670 [cit. 2022-01-01]. ISSN 09335137. Dostupné z: doi:10.1002/mawe.200800327
-

- [93] CASATI, R., J. LEMKE a M. VEDANI, 2016. Microstructure and Fracture Behavior of 316L Austenitic Stainless Steel Produced by Selective Laser Melting. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. **32**(8), 738-744 [cit. 2022-01-01]. ISSN 10050302. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmst.2016.06.016
- [94] TOLOSA, Itziar, Fermín GARCIANDÍA, Fidel ZUBIRI, Fidel ZAPIRAIN a Aritz ESNAOLA, 2010. Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by “selective laser melting”, following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 51(5-8), 639-647 [cit. 2022-01-01]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2631-5
- [95] BARTOLOMEU, F., M. BUCIUMEANU, E. PINTO, N. ALVES, O. CARVALHO, F.S. SILVA a G. MIRANDA, 2017. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior—A comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing* [online]. 16, 81-89 [cit. 2022-01-01]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2017.05.007
- [96] ANDRONOV, Vladislav, Jan ŠIMOTA, Libor BERÁNEK, Jiří BLAŽEK a Filip RUŠAR, 2021. Optimization of Process Parameters for Additively Produced Tool Steel 1.2709 with a Layer Thickness of 100 μm . *Materials* [online]. 14(11) [cit. 2022-02-02]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14112852

15. Publikace autora

15.1. Publikace přímo související s disertační prací

- [58] PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V.; ŠIMOTA, J. Importance and Methods of Residual Stress Profile Measurement. *Manufacturing Technology*. 2016, 16(3), ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/3/590
- [59] BRAJER, J. ŠVÁBEK, R. ROSTOHAR, D. DIVOKÝ, M. LUCIANETTI, A. MÁDL, J. PITRMUC, Z. New possibilities for efficient laser surface treatment by diode-pumped kW-class lasers. *The Journal of Engineering*. 2015, 3(1), ISSN 2051-3305. DOI 10.1049/joe.2015.0094
- [60] BRAJER, J. MÁDL, J. PITRMUC, Z. ŠVÁBEK, R. ZEMAN, P. Application of laser shock processing. *Manufacturing Technology*. 2015, 15(3), 278-285. ISSN 1213-2489.
- [74] PITRMUC, Zdeněk, Vítězslav RÁZEK, Jan ŠIMOTA a Libor BERÁNEK, 2018. Ověření účinku technologie zpevňování na povrchovou vrstvu a zvýšení životnosti lopatek: Ověřená technologie TH01011405-V7. Praha.
- [75] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Zdeněk PALA a Jan URBAN, 2021. Technologie progresivního dokončování kritických dílů: Ověřená technologie TH03010089-V001. Praha.
- [76] PITRMUC, Zdeněk, Libor BERÁNEK, Jan URBAN a Jiří SOMMER, 2020. Technological forum 2020. In: KUDLÁČEK, Jan. Application of 3d printing for production of camouflage jig for technological tests of polishing aircraft engine components. Jaroměř: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 147-150. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [79] PITRMUC, Z., ČAPEK, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L. a Urban, J. Tool Geometry Influence on Surface Integrity of Machined Austenite Stainless Steel. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 2, p. 425-431.
- [80] ČAPEK, Jiří, Kamil KOLAŘÍK, Miroslav NESLUŠAN, et al., 2019. Surface Integrity after Turning a Duplex Stainless Steel with Respect to Tool Geometry. *Transactions of FAMENA* [online]. 42(4), 1-14 [cit. 2022-03-21]. ISSN 13331124. Dostupné z: doi:10.21278/TOF.42401
-

- [81] ČAPEK, J. et al. Residual Stress Determination of Duplex and Austenite Steels Machined using Different Tool, Geometry. *Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology*. 2018, 25(2), 84-87. ISSN 1211-5894.
- [88] ČAPEK, J., KYNCL, J., KOLAŘÍK, K., BERÁNEK, L., PITRMUC, Z., MEDŘICKÝ, J. a PALA, Z. Grinding of Inconel 713 Superalloy for Gas Turbines. *Manufacturing Technology*, 2016, vol. 16, iss. 1, p. 38-45.
- [91] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; MIKEŠ, P.; ANDRONOV, V.; SOMMER, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Mechanical and Microstructural Anisotropy of Laser Powder Bed Fusion 316L Stainless Steel. *Materials* 2022, 15, 551. <https://doi.org/10.3390/ma15020551>

15.2. Ostatní publikace a tvůrčí činnost autora

15.2.1. Články

- [97] BARTOŠÁK, M.; PITRMUC, Z.; HORVÁTH, J.; HORVÁTHOVÁ, M.; Life assessment of a low-alloy martensitic steel under isothermal low-cycle fatigue-creep and thermo-mechanical fatigue-creep loading conditions. *International Journal of Fatigue*. 2021, 145. ISSN 0142-1123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.106092
- [98] KELLNER, T.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; KAŇÁK. Production process planning in Additive manufacturing and Conventional machining technology manufacturing system. *Manufacturing Technology*. 2019, 19.(2.), 232-237. ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/275.2019/a/1213-2489/mt/19/2/232
- [99] MIKEŠ, P.; BERÁNEK, L.; PITRMUC, Z. Analysis of material removal on radial compressor wheel of aircraftengine after finishing production operations using CMM. *MM Science Journal*. 2018, 4_2018(4), 2521-2525. ISSN 1805-0476. DOI 10.17973/MMSJ.2018_11_201818
- [100] BERÁNEK, L.; PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J. FOD experimental simulation and analysis of potential benefits of modified blisk geometry. *Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production*. 2017, 17(3), 287-291. ISSN 1213-2489. DOI 10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/3/287

15.2.2. Statě ve sborníku

- [101] ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; PELIKÁN, L.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J. Analysis of tool steel 1.2709 produced by metallic 3d printing. In:

- TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 7-13. ISBN 978- 80-87583-32-6.
- [102] ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; PELIKÁN, L.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J.
Verification of the accuracy of metallic 3d printing on a benchmark artifact made of alsi10mg powder. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 14-20. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [103] PELIKÁN, L.; ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J.
Evaluation of dimensional and surface quality of a part produced by the dmls method after machining. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 113-120. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [104] URBAN, J.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; SOMMER, J. Application of 3d printing for production of camouflage jig for technological tests of polishing aircraft engine components. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2020*. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 147-150. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [105] PELIKÁN, L.; ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; ŠIMOTA, J.
Precision and dimensional limits analysis of aluminium alloy artifacts produced on DMLS machine Concept laser M2 cusing. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 109-115. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [106] ANDRONOV, V.; PITRMUC, Z.; PELIKÁN, L.; BERÁNEK, L.; URBAN, J.
Comparison of mechanical properties of precipitation hardening tool steel 1.2709 - printed x conventionally produced. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 1-7. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [107] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; ŠTAJNOCHR, L.; BERÁNEK, L. Creep feed grinding optimization. In: *TECHNOLOGICAL FORUM 2019*. Veselý Kopec, 2019-06-18/2019-06-20. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. s. 138-142. ISBN 978-80-87583-30-2.
- [108] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; HOLEŠOVSKÝ, F. Utilization of new modified materials in creep-feed grinding. In: *Konference studentské tvůrčí činnosti. Studentská tvůrčí činnost 2018*, Praha, 2018-04-11. ČVUT v Praze, fakulta strojní, 2018. ISBN 978-80-01-06421-4.
- [109] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; KOPTIŠ, M. Evaluation of mechanical properties manufactured parts by DMLS technology. In: *Technological forum 2017*
-

- Book of proceedings. Technological forum 2017, Špindlerův mlýn, 2017-06-27/2017-06-29. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. s. 127-132. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [110] ČAPEK, J.; KOLŘÍK, K.; PITRMUC, Z.; BERÁNEK, L.; GANEV, N. Comparison of Parameters of Surface Integrity of Machined Duplex and Austenite Stainless Steels in Relation to Tool Geometry. In: Acta Polytechnica CTU Proceedings. *Šestá studentská vědecká konference fyziky pevných látek, Sedliště*, 2016-06-27/2016-07-01. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. s. 1-7. 9. ISSN 2336-5382. ISBN 978-80-01-06298-2. DOI 0.14311/APP.2017.9.0001
- [111] ČAPEK, J. et al. Grain orientation influence on residual stress distribution of ground surface of blade roots made of inconel 713LC. In: TREBUŇA, F et al., eds. *55th Conference on Experimental Stress Analysis 2017.*, Nový Smokovec, 2017-05-30/2017-06-01. Košice: Technical University of Kosice, 2017. s. 115-121. ISBN 978-80-553-3167-6.
- [112] ŠIMOTA, J.; PITRMUC, Z.; URBAN, J.; BERÁNEK, L. Anisotropy of parts produced using DMLS technology. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2017.* Praha, 2017-04-20. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/proc_d3.html
- [113] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; URBAN, J.; BERÁNEK, L. Influence of process parameters and part orientation on mechanical properties for DMLS manufactured Stainless steel AISI 316L. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2017.* Praha, 2017-04-20. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/proc_d3.html
- [114] PITRMUC, Z.; SAVINOV, A.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; RÁZEK, V. Investigation on residual stress profiles and microhardness on Ti6Al4V alloy. In: KUDLÁČEK, J. et al., eds. *Technological forum 2017 Book of proceedings.* Technological forum 2017, Špindlerův mlýn, 2017-06-27/2017-06-29. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing., 2017. s. 106-110. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [115] ČAPEK, J.; KOLAŘÍK, K.; BERÁNEK, L.; GANEV, N. Tool Geometry Influence on Residual Stresses of Machined Duplex and Austenite Stainless Steel. In: DRAGOUNOVÁ, K. et al., eds. *Sborník příspěvků 6. studentské vědecké konference fyziky pevných látek, Sedliště 2016. Šestá studentská vědecká konference fyziky pevných látek, Sedliště*, 2016-06-27/2016-07-01. Praha: ČVUT. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. s. 52-55. ISBN 978-80-01-06072-8.
-

- [116] ČAPEK, J. et al. Influence of Cutting Conditions on Surface Integrity after Progressive Grinding of Blade Roots from Inconel 713LC. In: *Experimental Stresss Analysis 2016*. 54. konference Experimentální Analýza Napětí, Srní, 2016-05-30/2016-06-02. Plzeň: Západočeská universita, Fakulta aplikovaných věd, 2016. ISBN 978-80-261-0624-1. Dostupné z: <https://www.scopus.com>
- [117] PITRMUC, Z. a M. VRABEC. Experimental methods of residual stress profile measurement. In: MORAVEC, J., ed. Studentská tvůrčí činnost 2016. *Konference studentské tvůrčí činnosti 2016*, Praha, 2016-04-19. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016. ISBN 978-80-01-05929-6. Dostupné z: http://stc.fs.cvut.cz/history/2016/sbornik/papers/pdf/6540.pdf?_=1460487178

15.2.3. Ověřené technologie a užité vzory

- [118] PITRMUC, Z. et al. REPAIR INTRO TO H80 COMPRESSOR AIRFOILS. [Ověřená technologie] 2017.
- [119] PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; VYSKOČIL, Z. Silové broušení tvarových ploch superslitin. [Ověřená technologie] 2016.
- [120] BERÁNEK, L.; KYNCL, J.; PITRMUC, Z.; ŠIMOTA, J.; VYSKOČIL, Z. Přípravek pro upínání lopatek pro letecký a energetický průmysl na rovinné brusky. Czech Republic. Utility Model CZ 30673. 2017-05-15.

15.2.4. Výzkumné zprávy evidované v databázi V3S

- [121] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [122] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu FV40133 za rok 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [123] PITRMUC, Z., J. SOMMER a M. SLANÝ. Optimalizace výroby nerezových trubiček v roce 2020. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
- [124] PITRMUC, Z. et al. Závěrečná zpráva o dosažených výsledcích projektu TH03010089. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2020.
-

- [125] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu TH03010089 za rok 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [126] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu FV40133 za rok 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [127] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [128] PITRMUC, Z., J. SOMMER a M. SLANÝ. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí v roce 2019. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2019.
- [129] PITRMUC, Z. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2018. [Výzkumná zpráva] 2018.
- [130] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018. [Výzkumná zpráva] 2018.
- [131] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích projektu TH03010089 za rok 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2018.
- [132] PITRMUC, Z. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2017. [Výzkumná zpráva] 2017.
- [133] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2017. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [134] PITRMUC, Z. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [135] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017. Zpráva č. TH01011405-PZ-2017.
- [136] BERÁNEK, L. et al. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017. [Výzkumná zpráva] Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš, 2017.
-

- [137] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [138] PITRMUC, Z. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí v roce 2018. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2017.
- [139] KYNCL, J. et al. Odborná zpráva o průběhu projektu za rok 2016. [Výzkumná zpráva] 2016.
- [140] PITRMUC, Z. a A. SAVINOV. Optimalizace laserového svařování nerezových ocelí. [Výzkumná zpráva] Attl a spol. s.r.o. Továrna na stroje, 2016.
- [141] PITRMUC, Z., V. RÁZEK a P. NOVÁK. Zpráva o měření zbytkových napětí 2016. [Výzkumná zpráva] GE Aviation, 2016.
- [142] RÁZEK, V., J. KAFKA a Z. PITRMUC. Zpráva o měření zbytkových napětí 2015. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2015.
- [143] PITRMUC, Z. et al. Zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2015. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2015.
- [144] PITRMUC, Z. et al. Zařízení pro vysokocyklové únavové zkoušky lopatek a Metodika testování lopatek blisku 1. stupně. [Výzkumná zpráva] Praha: GE Aviation Czech, 2015.
- [145] PITRMUC, Z. Výzkumná zpráva o možnostech odstranění HVOF nástřiků prostřednictvím elektrolytického rozpouštění. [Výzkumná zpráva] 2015.
- [146] RÁZEK, V., J. KAFKA a Z. PITRMUC. Zpráva o měření zbytkových napětí 2014. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2014.
- [147] BARCAL, J. et al. Analytické činnosti v oblasti integrity povrchu a měření zbytkových napětí. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT FS. Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie, 2014.

Seznam obrázků

Obr. 2.1: SEM Ti-6Al-4V - póry odkryté při obrábění	17
Obr. 2.2: SEM Ti-6Al-4V - zrna brusiva zaražená v základním materiálu	17
Obr. 2.3: SEM Ti-6Al-4V - vlasové trhliny, vertikálně stopy po broušení	18
Obr. 2.4: Typické průběhy mikrotvrdomosti v podpovrchových vrstvách [6]	19
Obr. 2.5: SEM + řez FIBem - trhliny v alfatizované vrstvě Ti6Al4V o tloušťce 7 μm	21
Obr. 2.6: Zbytková napětí po jednotlivých úsecích výrobního postupu lopatky turbokompresoru [1]	25
Obr. 2.7: Wöhlerovy křivky pro různá tahová zbytková napětí [1]	27
Obr. 2.8: Posun wohlerovy křivky (R=0,1) pro Ti6Al4V po zpevnění technologií LSP (modrá) vůči stavu bez zpevnění (červená) [17]	28
Obr. 2.9: Průběh zbytkových napětí únavových těles pro základní stav (modrá) a pro stav po LSP s výraznými tlakovými napětími (červená) [17]	28
Obr. 2.10: Přehled metod měření zbytkových napětí dle [25]	30
Obr. 2.11: Magnetizační křivka (hysterezní smyčka) ve feromagnetické látce s vyznačením Barkhausenova šumu. [23]	31
Obr. 2.12: Projev tlakového/tahového napětí na velikost amplitudy Barkhausenova šumu. [23], [26]	31
Obr. 2.13: Schéma metody otvoru (vlevo) a metody uvolňování sloupku (vpravo) [31]	33
Obr. 2.14: Interakce RTG záření s krystalografickými rovinami [32]	35
Obr. 2.15: Kuželová plocha při tzv. zpětném odrazu (vlevo) [33]	35
Obr. 2.16: Difrakční (Debey-Scherrerův) kroužek (vpravo) [34]	35
Obr. 2.17: Změna mezivrstevní vzdálenosti a difrakčního úhlu při RTG difrakci [34]	36
Obr. 2.18: Schéma pro měření zbytkových napětí FN-1 [2]	38
Obr. 2.19: Princip metody rozřezávání (slitting method), polohy tenzometrů [14]	41
Obr. 2.20: Rozdělení metod dle hloubky měření [51]	47
Obr. 4.1: Měřicí zařízení v konfiguraci pro měření lopatek	50
Obr. 4.2: Bezdotykový snímač vzdálenosti Mikroepsilon NCDT	51
Obr. 4.3: Prizmatické upínání svěráčku s kulisou pro měření segmentu koryta lopatky	51
Obr. 4.4: Měřicí ramena připevněná na vzorcích	52
Obr. 4.5: Zadávané geometrické charakteristiky výpočtu	55
Obr. 4.6: Záznam deformace proložený polynomem	55

Obr. 4.7: Teoretická závislost proudové hustoty na napětí s vyznačením oblasti C-D vhodné pro leštění [57].....	58
Obr. 4.8: Výšková mapa - selektivní leptání alfa fáze a nedotčené obálky beta fáze.....	58
Obr. 4.9: Experimentálně zjištěné závislosti proudové hustoty na napětí pro Ti6Al4V a AISI 304	59
Obr. 4.10: Experimentálně zjištěná závislost minutového úběru R_R na napětí U [V].....	60
Obr. 4.11: Závislost minutového úběru R_R na kumulativním množství rozpuštěného materiálu	61
Obr. 4.12: Porovnání vzhledu leptaných ploch před (vlevo) a po optimalizaci elektrolytického rozpouštění (vpravo).....	62
Obr. 4.13: Schéma napětí v leptaném vzorku [58]	63
Obr. 4.14: Schéma pro výpočet zbytkového napětí ze snímané deformace	64
Obr. 4.15: Měření rovinných segmentů a tvarových symetrických průřezů	66
Obr. 4.16: Výpočet kvadratického momentu průřezu k ose $I_x = bh^3/12 = 10 \times 5^3/12 =$ $104,167 \text{ mm}^4$	66
Obr. 4.17: Ukázka kvadratického momentu průřezu k ose $I_x = 13,62 \text{ mm}^4$ pro zakřivený symetrický prizmatický průřez	67
Obr. 4.18: Pásky o rozměrech 80x5x4 mm odebrané se středu zpevňované destičky	68
Obr. 4.19: Záznam deformace z měření oboustranně tryskaného vzorku O1A, vyznačeny proudové nárazy	70
Obr. 4.20: Průběhy zbytkových napětí pro 1. ověřovací sadu – řízené tryskání	72
Obr. 4.21: Záznam deformace z měření 5D frézovaného segmentu 5os-1M, vyznačeny proudové nárazy	72
Obr. 4.22: Průběhy zbytkových napětí pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování [58]	74
Obr. 4.23: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD Lambda Research (2 ks) na segmentech lopatek po řízeném tryskání	76
Obr. 4.24: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 6 ks) a XRD Lambda Research (4 ks) na segmentech lopatek po vibračním zpevňování.....	77
Obr. 4.25: Difraktometr Proto iXRD COMBO	78
Obr. 4.26: Přístroj pro elektrolytické leštění – příslušenství difraktometru.	78
Obr. 4.27: Měření odleštěné vrstvy pomocí tisícínového digitálního úchylkoměru	79
Obr. 4.28: Vzhled leštěné plochy, orientace měření σ_L a σ_T	79

Obr. 4.29: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD TU Liberec (2 ks) na segmentech lopatek po dokončovacím 5D frézování – typ A	79
Obr. 4.30: Porovnání metod FS ČVUT (průměr ze sady 12 ks) a XRD TU Liberec (2 ks) na segmentech lopatek po dokončovacím 5D frézování – typ B	80
Obr. 5.1: Mikrotvrdoměr Future Tech FM100	88
Obr. 5.2: Schéma zalití zešikmeného vzorku do zalévací hmoty a jeho zbroušení	88
Obr. 6.1: Princip technologie LSP [68]	95
Obr. 6.2: Prototyp vlastního přípravku pro kuličkování technologických vzorků a únavových těles	97
Obr. 6.3: Využití FDM technologie k výrobě krycích tvarových segmentů maskování lopatek	99
Obr. 6.4: Charakteristické průběhy zbytkových napětí - technologické vzorky	101
Obr. 6.5: Charakteristické průběhy zbytkových napětí - segmenty lopatek	103
Obr. 6.6: Proložení naměřených hodnot profilu mikrotvrdosti polynomem – shotpeening	106
Obr. 6.7: Výsledné profily mikrotvrdosti pro jednotlivé technologie	107
Obr. 6.8: Deformace povrchové vrstvy Ti6Al4V při čelním frézování	108
Obr. 6.9: Deformace povrchové vrstvy Ti6Al4V po 5D dokončovacím frézování	109
Obr. 6.10: Přetavená vrstva po WEDM drátovém řezání – leptáno bifuoridem amonným ...	110
Obr. 7.1: Držák vyměnitelných břitových destiček použitý při experimentech [82]	113
Obr. 7.2: Geometrie utvařeče SF v rovině ortogonální [82]	113
Obr. 7.3: Geometrie utvařeče NF v rovině ortogonální [82]	114
Obr. 7.4: Rozřezový plán trubek na jednotlivé kroužky (pro kroužek A)	115
Obr. 7.5: Průběh zbytkových napětí po soustružení nerezové oceli	116
Obr. 7.6: Povrchové hodnoty zbytkových napětí v tečném a kolmém směru v závislosti na úhlu čela γ_0 , měřeno RTG difrakcí	117
Obr. 7.7: Profil mikrotvrdosti pro jednotlivé utvařeče, zobrazení polohy nástroje vůči zpevněné vrstvě	117
Obr. 7.8: Mikrostruktura AISI 304 po soustružení utvařečem SF (+12°) – výskyt deformačního martenzitu do hloubky max. 70 μm	119
Obr. 7.9: Mikrostruktura AISI 304 po soustružení utvařečem NF (-2°) – výskyt deformačního martenzitu do hloubky max. 160 μm	119
Obr. 8.1: Broušení zámků lopatek profilovým kotoučem	124

Obr. 8.2: Schéma odběru prizmatických vzorků pro měření zbytkových napětí	125
Obr. 8.3: Závěs se zviditelněním popalu po makroleptání	125
Obr. 8.4: Charakteristické průběhy zbytkových napětí po hloubkovém broušení.....	126
Obr. 8.5: Profil mikrotvrlosti HV 0,1 po broušení Inconelu 713 LC.....	127
Obr. 8.6: Lineární indikace kolmé na směr broušení na rámečku lopatky	128
Obr. 8.7: Slabé liniové indikace na kapilární zkoušce.....	128
Obr. 8.8: Interkrystalická trhлина na broušené ploše – pohled na plochu lopatky 1B-T	128
Obr. 8.9: Výbrus přes trhliny, 25x, leptáno Marble's – inter/transkrystalická trhлина.....	129
Obr. 8.10: Transkrystalická brusná trhлина lopatky 1B-T – leptáno Marble's, zvětšeno 400x	129
Obr. 8.11: Shluk oxidických plen odkrytých broušením – leštěný stav, zvětšeno 25x	130
Obr. 8.12: Povrchová deformace v tečném směru po broušení – SEM mikroskopie.....	130
Obr. 9.1: Lineární indikace kolmé na směr broušení na rámečku lopatky	134
Obr. 9.2: Schématické znázornění orientace tělesa a vrubu vůči stavební paletě	134
Obr. 9.3: Přehled výsledků zkoušky tahem – CL20ES.....	136
Obr. 9.4: Výsledky zkoušek rázem v ohybu – CL20ES	137
Obr. 9.5: Výsledky makro a mikrotvrlosti - CL20ES	138
Obr. 9.6: Distribuce a klasifikace pórů v závislosti na výšce stavby.....	140
Obr. 9.7: Zvýšená přítomnost větších ostrohranných pórů v blízkosti povrchu vzorku.....	140
Obr. 9.8: Naleptaná struktura při pohledu do hladiny, mapa mikrotvrlosti.....	141
Obr. 9.9: Povrch tištěných vzorků se zachyceným práškem na povrchu – SEM	141
Obr. 9.10: Metalografický řez povrchem s nespečeným práškem.....	141

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Vlivy a účinky na povrchovou vrstvu [3].....	14
Tab. 2.2: Rozdělení zkoušek dle Vickerse [7]	19
Tab. 2.3: Označení naměřené mikrotvrlosti dle Vickerse [7]	20
Tab. 2.4: Hodnocení použitelnosti metod pro konkrétní aplikaci – Ti6Al4V	45
Tab. 4.1: Značení vzorků 1. a 2. ověřovací sady	68
Tab. 4.2: Naměřená data pro jednotlivé vzorky (O1A až O3A) a zobecněné průběhy pro 1. ověřovací sadu – řízené tryskání	71
Tab. 4.3: Naměřená data pro jednotlivé vzorky pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování [58]	73
Tab. 4.4: Zobecněné průběhy a statistika pro 2. ověřovací sadu – dokončovací 5D frézování	73
Tab. 4.5: Provnání výsledků mechanické metody FS ČVUT a XRD v kontrolních hloubkových bodech.....	81
Tab. 5.1: Použité parametry pro výrobu metalografických výbrusů Ti6Al4V.....	84
Tab. 5.2: Použité parametry pro výrobu metalografických výbrusů nerezových ocelí a niklových slitin	86
Tab. 6.1: Složení slitin VT6 (Ti6Al4V) dle OST 1-90013-81 [63], [64]	90
Tab. 6.2: Mechanické vlastnosti Ti6Al4V v žíhaném a vytvrzeném stavu [63]	91
Tab. 6.3: Vybrané režimy TZ pro Ti6Al4V [63].....	91
Tab. 6.4: Vybrané fyzikální vlastnosti Ti6Al4V [63], [66].....	92
Tab. 6.5: Přehled procesních parametrů LSP vzorků pro měření zbytkových napětí	96
Tab. 6.6: Přehled analyzovaných vzorků.....	100
Tab. 7.1: Směrné složení oceli AISI 304	111
Tab. 7.2: Vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti AISI 304 [78]	112
Tab. 7.3: Nástrojová geometrie při použití destičky CNMG 120404-SF (+12°)	113
Tab. 7.4: Nástrojová geometrie při použití destičky CNMG 120404-NF (-2°).....	114
Tab. 8.1: Směrné složení niklové superslitiny Inconel 713 LC.....	121
Tab. 8.2: Vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti slitiny Inconel 713LC [87].....	122
Tab. 8.3: Řezné podmínky broušení zámků lopatek.....	124
Tab. 9.1: Chemické složení oceli CL20ES a 316 L.....	132
Tab. 9.2: Provnání deklarovaných mechanických vlastností pro oceli 316L a CL20ES.....	133

Tab. 9.3: Přehled tištěných vzorků	134
Tab. 9.4: Přehled deklarovaných a naměřených mechanických vlastností.....	135

Seznam použitého software

- a) Microsoft Word 2016
- b) Microsoft Excel 2016
- c) Microsoft Powepoint 2016
- d) Autodesk Inventor Professional 2018
- e) MarWin
- f) Zeiss AxioVision