

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**KVALITA POVRCHOVÉ VRSTVY PO OBRÁBĚNÍ
TĚŽKO OBRÁBĚLÝCH A TITANOVÝCH SLITIN**

**QUALITY OF SURFACE LAYER AFTER MACHINING OF HARD
MACHINABLE AND TITANIUM ALLOYS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Bc. David Vítovec

Praha 2015

Vysoká škola: ČVUT v Praze
Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Davida Vítovce**

obor **Výrobní a materiálové inženýrství**

Název: **Kvalita povrchové vrstvy po obrábění těžkoobrobitelných a titanových slitin**

Název anglicky: **Quality of surface layer after machining of hard machinable and titanium alloys**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor zadané problematiky.
2. Integrita povrchu a její ovlivnění.
3. Experimentální měření.
4. Vyhodnocení a závěr.



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své diplomové práce Ing. Vítězslavu Rázkovi, CSc. za odborné vedení práce a věnovaný čas při jejím vypracování. Dále děkuji Ing. Zdeňku Pitrmucovi za konzultace při zpracování experimentální části.

Anotace

Jméno autora:	David Vítovec
Název Diplomové práce:	Kvalita povrchové vrstvy po obrábění těžkoobrobitelných a titanových slitin
Rozsah diplomové práce:	84 str.
Školní rok vyhotovení:	2015
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Využití:	Vyhodnocení zámků lopatek oběžného kola pomocné energetické jednotky. Posouzení vlivu metod opracování na velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě.
Klíčová slova:	Lopatky, integrita povrchu, drsnost, tvrdost, zbytková napětí,
Anotace:	Cílem diplomové práce je vyhodnocení kvality zámků lopatek, vyráběných technologií vytavitelného modelu na základě parametrů integrity povrchu. Dále posouzení vlivu metody opracování součásti (elektroerozivní drátové řezání, čelní frézování, frézování s tepelným zpracováním a dokončováním, laser peening) na velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě. Teoretická část obsahuje úvod do problematiky, probírá také složky integrity povrchu a v některých případech i metody jejich měření. Experimentální část je pak zaměřena na samotné měření parametrů, hodnocení kvality zámků vyráběných lopatek, měření a posouzení zbytkových napětí.

Annotation

Author name:	David Vítovec
Title of Thesis:	Quality of surface layer after machining of hard machinable and titanium alloys
Scope of diploma thesis:	84 p.
Academic year:	2015
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Machining, Process Planning and Metrology
Supervisor:	Ing. Vítězslav Rázek, CSc.
Application:	Evaluation of blade roots for auxiliary power unit. Assessment of influence of component processing method on residual stress profiles.
Key words:	Blades, surface integrity, roughness, hardness, residual stress,
Annotation:	The aim of this thesis is to evaluate the quality of blade roots, manufactured by technology of investment casting, based on the parameters of surface integrity. Further, the influence assessment of component processing method (wire electrical discharge machining, face milling, milling followed by heat treatment and finishing, laser peening) on the residual stress profile in the surface layer. In the theoretical part is introduction into the issue, this part also discusses the components of surface integrity and in some cases their methods of measuring. The experimental part focuses on the actual measurement of parameters, quality evaluation of manufactured blade roots, measurement and assessment of the residual stress.

Obsah

Prohlášení	1
Poděkování	2
Anotace	3
Annotation	4
Seznam značek a symbolů	7
1 Úvod	9
1.1 Historie	10
2 Integrita povrchu	11
2.1 Geometrické odchyšky tvaru	13
2.2 Mikrogeometrie	14
2.3 Tvrdost, mikrotvrdost a zpevnění povrchové vrstvy	17
2.3.1 Tvrdost	17
2.3.2 Mikrotvrdost	19
2.3.3 Zpevnění povrchové vrstvy	20
2.4 Zkoušky tvrdosti	24
2.4.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse	24
2.4.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse	25
2.5 Zbytková napětí	26
2.5.1 Vznik zbytkových napětí	27
2.5.2 Mechanicky zatížená povrchová vrstva	28
2.5.3 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva	30
2.5.4 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva se změnami struktury	31
2.5.5 Příklady vlivu jednotlivých technologických operací	32
2.5.6 Vliv zbytkových napětí na únavovou pevnost	33
2.6 Metody měření zbytkových napětí	34
2.6.1 Rentgenová difrakce	36
2.6.2 Rentgenová difrakce synchrotron	37
2.6.3 Neutronová difrakce	38
2.6.4 Magnetické metody	39
2.6.5 Ultrazvukové metody	40
2.6.6 Metoda odvtání otvoru	40
2.6.7 Metoda elektrolytického odleptání povrchových vrstev	43
2.7 Fyzikálně chemický stav povrchu	45
3 Experimentální část	46

3.1	Zámky lopatek	46
3.1.1	Kapilární zkouška	46
3.1.2	Kapilární zkouška na zámcích lopatek	47
3.1.3	Stereomikroskopie	50
3.1.4	Příprava metalografických vzorků	53
3.1.5	Metalografická analýza.....	56
3.1.6	Měření tvrdosti na zámcích lopatek	58
3.1.7	Měření drsnosti	66
3.2	Měření zbytkových napětí	68
3.2.1	Vzorky	68
3.2.2	Zařízení	69
3.2.3	Postup měření	71
3.2.4	Záznam měření	72
3.2.5	Výpočet.....	73
3.2.6	Zbytková napětí jednotlivých vzorků	75
4	Závěr.....	79
	Seznam obrázků.....	81
	Seznam tabulek.....	82
	Seznam citované literatury	83

Seznam značek a symbolů

Značka	Název	Jednotky
Z(x)	Hodnota závisle proměnné	[μm]
Z _p	Výška výstupku profilu	[μm]
Z _v	Hloubka prohlubně profilu	[μm]
Z _t	Výška prvku profilu	[μm]
X _s	Šířka prvku profilu	[μm]
P	P-parametr, parametr vypočítaný ze základního profilu	[-]
W	W-parametr, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti	[-]
R	R-parametr, parametr vypočítaný z profilu drsnosti	[-]
P _p , R _p , W _p	Největší výška výstupku profilu	[μm]
P _v , R _v , W _v	Největší hloubka prohlubně profilu	[μm]
P _z , R _z , W _z	Největší výška profilu	[μm]
P _c , R _c , W _c	Průměrná výška prvků profilu	[μm]
P _t , R _t , W _t	Celková výška profilu	[μm]
P _a , R _a , W _a	Průměrná aritmetická úchylka profilu	[μm]
HV _M	Mikrotvrдость dle Vickerse	[1]
h	Hloubka vrstvy	[mm]
σ , σ_n	Normálové napětí	[N·mm ⁻²], (MPa)
τ	Tangenciální napětí	[N·mm ⁻²], (MPa)
μ_v	Součinitel smykového tření	[1]
l ₁ , l ₂ , l ₃ , l _p	Tloušťka vrstvy	[mm]
a _{min} , a' _{min}	Tloušťka materiálu	[mm]
ρ	Poloměr řezné hrany nástroje	[mm]
h _z	Hloubka zpevněné vrstvy	[mm]
HM ₀	Mikrotvrдость nezpevněného materiálu	[1]
HM _Z	Mikrotvrдость zpevněného materiálu	[1]
K _z	Stupeň zpevnění	[%]
R _m	Smluvní mez pevnosti v tahu	[N·mm ⁻²], (MPa)
HB	Tvrдость dle Brinella	[1]
k	Koeficient materiálových vlastností	[1]

Značka	Název	Jednotky
α	Vrcholový úhel	[°]
HV	Tvrдость dle Vickerse	[1]
F	Síla	[N], [cN]
d_1, d_2	Velikost úhlopříčky vtisku	[mm], [μm]
d	Aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2	[mm]
g_n	Normální tíhové zrychlení (45° zeměpisné šířky)	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
a	Velikost hrany na vrcholu indentoru	[μm]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$	Teplota	[°C]
σ_a	Amplituda napětí	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
σ_{zb}	Zbytkové napětí	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	Složky tenzoru napětí	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
a	Vzdálenost od leptané plochy do středu čidla	[mm]
l	Výška leptané plochy	[mm]
b	Šířka leptané plochy	[mm]
h	Tloušťka vzorku	[mm]
φ	úhel natočení	[°], [rad]
Δy	Měřená deformace	[mm]
Δy_1	Deformace leptané plochy vzorku	[mm]
Δy_2	Posun způsobený natočením praporku v rovině měření	[mm]
Δy_n	Deformace vzniklá odebráním vrstvy n	[mm]
I	Kvadratický moment průřezu	[mm^4]
E	Modul pružnosti v tahu	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
ΔH	Tloušťka odleptané vrstvy	[mm]
ΔH_n	Tloušťka n-té odleptané vrstvy	[mm]
h_n	Tloušťka vzorku aktuální	[mm]
M_o	Ohybový moment	[$\text{N} \cdot \text{m}$]
x	Výpočtová vzdálenost	[mm]
σ_n	Napětí n-té vrstvy	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)
σ_{vn}	Výsledné napětí	[$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$], (MPa)

1 Úvod

Trend vývoje zvyšování produktivity ve strojírenství přináší vysoké požadavky na obráběcí stroje a nástroje. Při tomto vývoji je nutné sledovat vliv obráběcího procesu na jakost obráběné plochy.

V průběhu obrábění se důsledkem deformačního a teplotního pole mění mechanické vlastnosti v povrchové vrstvě, která značně ovlivňuje užité vlastnosti a životnost vyráběných součástí. Vývoj v některých případech může nepříznivě ovlivnit právě vlastnosti obrobených ploch. Například nové obráběcí stroje a řezné nástroje navržené pro dosažení vysokých řezných rychlostí významně ovlivňují teplotu řezání a silové poměry řezného procesu, což způsobuje kromě změny kvality povrchové vrstvy také rychlé opotřebení nástroje, tyto a další např. ekonomické vlivy jako je snižování nákladů anebo i ekologické vlivy, obrábění bez procesních kapalin vedoucích opět k ovlivnění teplotního pole je proto nutné sledovat. Důsledky nepříznivých vlivů při obrábění jsou např. zbytková tahová napětí, nežádoucí změna struktury povrchové vrstvy, vznik trhlin, apod. Integrita povrchu ve smyslu stavu obrobeného povrchu zahrnující zmíněné zbytkové napětí, strukturu povrchové vrstvy, trhliny, ale i drsnost povrchu, změny tvrdosti v povrchové vrstvě a další představuje jednu z nejvýznamnějších problematik v současné strojírenské výrobě. Výsledkem obráběcích procesů je tedy povrchová vrstva s rozdílnými vlastnostmi oproti zbytku obráběného materiálu a v případě negativních vlastností této vrstvy mohou nastat důsledky v podobě snížení životnosti, anebo destrukce součásti a celkové havárie zařízení.

Poznámka: dříve používaná jednotka síly na plochu MPa je v práci jednotně nahrazena současně používanou jednotkou N·mm⁻². Náhrada byla provedena i u převzatých obrázků ze starších literárních zdrojů.

Cíle práce:

Vyhodnocení zámků lopatek oběžného kola pomocné energetické jednotky vyráběných technologií vytavitelného modelu s dokončením pomocí broušení. Hodnocení povrchových vad, kvality obráběného povrchu včetně tvrdosti v povrchových vrstvách.

Posouzení vlivu metody opracování (elektroerozivní drátové řezání, čelní frézování, frézování kulovou frézou s tepelným zpracováním a dokončováním, laser peening) na velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě.

1.1 Historie

Stručná historie vedoucí k vědnímu oboru, který se zabývá zkoumáním povrchu materiálu, tak jak jej známe dnes.

Postupem času se měnil přístup k povrchům od významu pro dávné umělce až po názor řeckého filozofa Démokritose z Abdér, který věřil, že podstata věci se skrývá uvnitř objektu, zatímco zavádějící vjemové vlastnosti způsobuje právě povrch. Až od poloviny 19. Století se v umění, literatuře a vědě začíná obezřetně uznávat funkční hodnota povrchu. Následně dochází k připisování reálných pozitivních vlastností v široké škále. Ustálením tohoto procesu se usnadnil vývoj studia povrchů, vedený průkopníky jako je J.W. Gibbs (povrchová termodynamika) a I. Langmuir (adsorpce a tenké filmy). [1]

Roku 1877 J. William Gibbs položil matematické základy pro statickou mechaniku a pro termodynamiku, kde popsal termodynamiku povrchových fází. Později Irving Langmuir (laureát Nobelovy ceny za chemii, 1932), který významně přispěl ke znalostem v oblasti studia povrchů během práce v laboratořích General Electrics, provedl výzkum olejových filmů, biofilmů, lipidů a molekulárních monovrstev. Další, kteří přispěli k rozvoji, Heinrich Hertz poprvé popsal fotoelektrický jev, pro který poskytl Albert Einstein kvantové vysvětlení (laureát Nobelovy ceny ve fyzice, 1921). Clinton Davisson (Nobelova cena za fyziku 1937 s G.P. Thompsonem) a Lester Germer, kteří potvrdili Louis De Broglieovo tvrzení o vlnové

podstatě částic v kvantové mechanice. Následující doba přinesla intenzivní teoretický výzkum v této oblasti [1]. Na rozvoji, který ovlivnil úroveň poznání povrchů materiálu, se podílela celá řada dalších vědců, jenž tato práce nezmiňuje.

Po objevení atomu a elektronu byla věda zabývající se povrchy stále ve své počáteční fázi, teprve v 60. letech 20. století se věda o povrchu stává samostatnou vědní disciplínou, díky novým nástrojům pro analýzu povrchu a digitálnímu věku počítačů, které umožňovaly porovnání teorií a teoretických výpočtů s dostupnými a dostatečně kvalitními experimentálními daty. [1]

Do dnešní doby studium povrchů expandovalo a stalo se jedním z nejdůležitějších odvětví, jehož výsledky jsou využívány při výrobě každé kvalitní strojní součásti. [1]

2 Integrita povrchu

Užitné vlastnosti povrchu ovlivňují schopnost součásti plnit funkci, pro kterou byla v první řadě vytvořena a požadujeme, aby kvalitativně dosahovaly parametrů, jež jsme si stanovili v rámci reálných předpokladů. Integritu povrchu tvoří tedy řada složek, jejich definováním a hodnocením jsou popsány vlastnosti povrchu. Po vyhodnocení definovaných složek dostáváme vlastnosti určující vhodnost součásti pro určité aplikace v konkrétním prostředí [2]. Jinými slovy „souhrn všech charakteristik, kterými je možno hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jejím funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti se označuje jako integrita povrchu“ [3].

Obrábění obsahuje široké spektrum parametrů vstupujících do procesu tvorby nového povrchu. Obráběcí proces lze rozdělit základním způsobem na třískové, beztřískové a speciální (molekulární úroveň). Na třískovém obrábění, které dělíme dále na obrábění pomocí nástroje s geometricky definovaným břitem, a na obrábění s geometricky nedefinovaným nástrojem, lze jednoduše vysvětlit vztah metody obrábění k integritě povrchu.

Pomocí nástroje s geometricky definovaným břitem je výsledný tvar obrobku určen kinematikou obráběcího stroje a geometrií řezného nástroje. Vztahuje se např. na obrábění vnitřních i vnějších ploch, ploch rovinných i tvarových, na plochy kulové, kuželové a válcové (soustružení, frézování, vrtání apod.). Rozhodující při tomto obrábění je řezná rychlost, posuv, hloubka řezu, ale také druh a mikrostruktura obráběného materiálu. S malými hloubkami řezu nabývá na významu i samotná geometrie břitu spolu s velikostí a orientací zrn obráběného materiálu. Z uvedeného je zřejmý vliv na kvalitu výsledné povrchové vrstvy.

Obrábění geometricky nedefinovaným nástrojem se vztahuje na metody využívající abrazivo, kde abrazivo představuje materiál nepravidelného tvaru, kterým je od obrobku oddělována tříška, tzn. obrábění probíhá množstvím mnohabřitých nástrojů, jenž se od sebe geometricky liší. Abrazivo využíváme uložené v pojivu brusných kamenů a kotoučů, volně rozptýlené v suspenzi nebo v proudu vzduchu. Parametry abraziva společně s řeznými podmínkami určují kvalitu povrchové vrstvy podobným způsobem, jako při obrábění s geometricky definovaným břitem, avšak liší se silovými i tepelnými účinky při utváření třísky a proto získáváme jiné parametry obrobeného povrchu.

Obrobená plocha vytvořená např. zmíněným třískovým obráběním má konkrétní vlastnosti vztahující se k použité technologii, řezným podmínkám, řeznému prostředí a vlastnostem obráběného materiálu. Zmíněné je nutno uvažovat pro dosažení kvalitních parametrů integrity povrchu tak, abychom zajistili správnou funkci součásti a zamezili případné havárii [2]. Pochopení vztahu mezi mechanismem utváření povrchu a jeho vlastnostmi nám dává možnost zlepšit stávající proces a tím dosáhnout vyšší kvality jednotlivých složek integrity. [4]

Vlivy, které mohou vést k poškození součásti, jsou např. působení provozní zátěže a následný vznik trhlin, koroze a korozní praskání pod napětím, nadměrné tření důsledkem nedostatečného mazání ve spojitosti s drsností povrchu, vliv strukturních změn v povrchové vrstvě po obrábění. Mechanismus vzniku poškození v důsledku jednotlivých vlivů lze mnohdy spojit se složkou integrity, která daný mechanismus ovlivňuje nejvíce.

Nejvýznamnější a nejčastější složky integrity povrchu jsou: [5]

- makrogeometrie obrobené plochy – geometrické odchylky tvaru,
- mikrogeometrie obrobené plochy – profil povrchu obrobené plochy (drsnost),
- změny fyzikálně-mechanických vlastností povrchové vrstvy – zpevnění, tvrdost a mikrotvrdost,
- zbytková napětí v povrchové vrstvě,
- fyzikálně chemický stav povrchu.

Uvedené složky integrity mají vztah k odolnosti proti degradaci materiálu, opotřebení a únavové pevnosti vyrobené součásti. [5]

2.1 Geometrické odchylky tvaru

Makrogeometrie obrobené plochy se zabývá odchylkami tvaru součásti od jmenovitých rozměrů. Zahrnuje např. odchylku přímosti, rovinnosti, rovnoběžnosti, kolmosti, kruhovitosti, válcovitosti, apod.

Pro názornost. Rovinná plocha součásti je taková, jejíž skutečné body leží v tolerančním poli, které je vymezeno dvěma rovnoběžnými rovinami. Vzdálenost těchto rovin je charakterizována délkovým rozměrem, hodnotou tolerance rovinnosti. Z postupu určování rovinnosti vyplývá, že se její hodnota dá ovlivnit při měření, tzn. náhodné naměření bodů, které leží v toleranci rovinnosti, ovlivnění nepřesností metody měření anebo lidskou chybou. Přehlédneme-li nepřesnosti vzniklé při měření, pak se dostáváme k vlivům při samotné výrobě.

Geometrické odchylky tvaru obráběné plochy jsou ovlivňovány v soustavě stroj – nástroj – obrobek, kde vliv obrobku je dán obrobitelností. Obrobitelnost je souhrn vlastností materiálu vyjadřující schopnost materiálu být obráběn konkrétní metodou.

Nepřesnost obráběcího stroje: [5]

- geometrická nepřesnost, součásti stroje jsou vyrobeny některou možnou metodou výroby a stejně jako obráběná součást si nesou vlastní nepřesnosti,
- kinematická nepřesnost je dána postupným složením odchylek drah jednotlivých mechanismů potřebných pro vykonání pracovního pohybu,
- dynamická nepřesnost v důsledku působení řezných sil vychylujících pracovní soustavu.

Nepřesnost nástroje ovlivňuje: [5]

- tvar nástroje,
- řezná geometrie,
- nastavení nástroje vůči obrobku,
- deformace nástroje řeznými silami,
- opotřebení, atd.

Nepřesnost způsobená přípravky: [5]

- deformace obrobku upínacími silami
- deformace přípravky řeznými silami
- nepřesnost upnutí nástroje vzhledem k obrobku.

2.2 Mikrogeometrie

Tvar obrobené plochy je výsledkem dráhy řezné části nástroje vzhledem k obrobku. Např. při podélném soustružení válcové plochy se nástroj pohybuje (nastaví se) radiálně k rotační ose obrobku, tzn. ve směru hloubky řezu a_p , dále se pohybuje ve směru axiálním, tzn. ve směru posuvu f a obrobek vykonává pohyb rotační. Složením posuvu f a otáček obrobku n získáváme profil povrchu odpovídající šroubovici. Avšak skutečný vzhled profilu povrchu, který se výrazně liší od teoretického, v našem případě pro soustružení typického válce lze ovlivnit celou řadou řezných podmínek a není závislý pouze na nastavení hodnoty posuvu a otáček. Tímto principem vzniklý profil vyhodnocovaný nejčastěji parametrem drsnosti má ve velkém množství případů významný vliv na funkci součásti. [5]

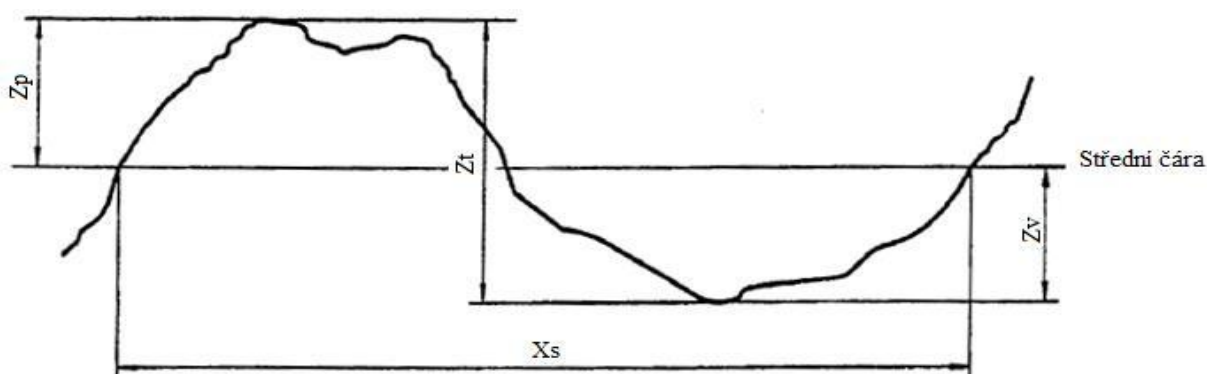
Vlivy ovlivňující výsledný tvar profilu povrchu: [5]

- řezný nástroj (tvar, řezná geometrie, opotřebení, materiál)
- materiál obrobku (utváření třísky)
- řezné podmínky
- stroj (přesnost pohonů, tlumení rázů apod.)

Podle roztečí nerovností profilu dělíme povrch pomocí filtrování na tři složky. Největší rozteč má základní profil, střední rozteč odpovídá vlnitosti a složka s nejmenší roztečí je drsnost. Norma ČSN EN ISO 4287 definuje názvy geometrických parametrů následovně: [6]

- **P – parametr**, parametr vypočítaný ze základního profilu,
- **W – parametr**, parametr vypočítaný z profilu vlnitosti,
- **R – parametr**, parametr vypočítaný z profilu drsnosti.

Definice parametrů profilu povrchu dle ČSN EN ISO 4287: [7]

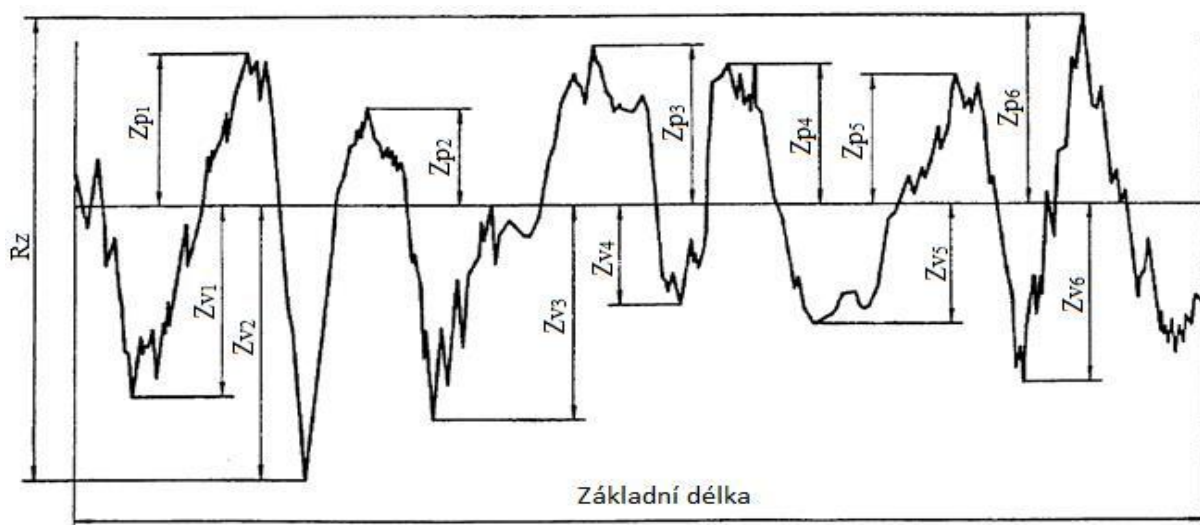


Obr. 1 Prvek profilu [7]

- hodnota závisle proměnné $Z(x)$ – výška profilu v místě x , hodnota $Z(x)$ se uvažuje kladná, leží-li nad osou nezávisle proměnné (střední čára) a záporná naopak,
- výška výstupku profilu Z_p – vzdálenost nejvyššího bodu výstupku profilu od osy nezávisle proměnné,
- hloubka prohlubně profilu Z_v – vzdálenost nejnižšího bodu prohlubně profilu od osy nezávisle proměnné,
- výška prvku profilu Z_t – součet Z_p a Z_v ,
- šířka prvku profilu X_s – délka úseku osy nezávisle proměnné protínající prvek profilu.

Vyhodnocované parametry

- největší výška výstupku profilu P_p , R_p , W_p – výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky,
- největší hloubka prohlubně profilu P_v , R_v , W_v – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky,
- největší výška profilu P_z , R_z , W_z – součet výšky největšího výstupku Z_p a hloubky nejnižší prohlubně Z_v v rozsahu základní délky, Obr. 2



Obr. 2 Největší výška profilu (profil drsnosti) [7]

- průměrná výška prvků profilu P_c , R_c , W_c – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky. Určení R_c vyžaduje omezení výšky a rozteče, zahrnuté výškové omezení není-li stanoveno jinak je 10% hodnoty P_z , R_z , W_z a omezení rozteče je 1% základní délky,

$$P_c, R_c, W_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (2.1)$$

- celková výška profilu P_t , R_t , W_t – součet výšky největšího výstupku Z_p a hloubky nejnižší prohlubně Z_v v rozsahu vyhodnocované délky.
- průměrná aritmetická úchylka profilu P_a , R_a , W_a – aritmetický průměr absolutních hodnot závisle proměnných $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

Uvedené parametry nejsou jedinými, které v souvislosti s profilem povrchu existují. Dalšími jsou např. průměrná kvadratická úchylka profilu, délkovým parametrem je průměrná šířka prvků profilu, tvarovým parametrem je průměrný kvadratický sklon profilu, v normě pak následují křivky a odpovídající parametry. Těmito se již práce nezabývá a lze je dohledat ve zmíněné normě ČSN EN ISO 4287.

2.3 Tvrdost, mikrotvrdost a zpevnění povrchové vrstvy

2.3.1 Tvrdost

Tvrdost lze definovat jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Princip zkoušek tvrdosti je jednoduchý a jejich provedení velmi rychlé, porušují pouze malý objem povrchové vrstvy na malé části zkušební vzorku a lze je uplatnit pro zkoušení malých i rozměrných součástí. Naměřené hodnoty tvrdosti je možné využít např. pro určení meze pevnosti. [8]

Rozdělení zkoušek tvrdosti dle principu: [9]

- vrypové – hodnocení vrypu vytvořeného na vyleštěném povrchu diamantovým tělesem stanoveného tvaru, zkouška dle Martense,
- vnikací – hodnotí velikost vzniklého vtisku na zkušebním vzorku, zkouškou je stanovena síla vnikání i tvar indentoru (vnikacího tělesa), zkouška dle Brinella, Vickerse, Rockwella,
- odrazové – zakládá se na hodnocení pružného odrazu, kdy z dané výšky padá závaží stanoveného tvaru na povrch zkušební vzorku, zkouška dle Shoreho,
- nárazové – hodnotí velikost vzniklého vtisku na zkušebním vzorku pomocí stanoveného zkušební tělesa, síla má charakter rázu, např. Poldiho kladívko.

Rozdělení zkoušek tvrdosti dle rychlosti působení síly: [9]

- statické – zkoušky se stálým, anebo plynule se zvětšujícím působením síly, zahrnuje princip zkoušek vrypový a vnikací,
- dynamické – zkoušky využívají rázové síly, zahrnuje princip odrazový a nárazový.

Rozdělení na makrotvrdost a mikrotvrdost: [8] [9]

- Makrotvrdost – hodnotí tvrdost materiálu jako celku, vhodnost použití zkoušky je určena závislostí velikosti vtisku a tloušťky materiálu a oproti mikrotvrdosti využívá velkých zátěžných sil indentoru,
- Mikrotvrdost – hodnotí tvrdost v případech, kdy nelze použít makrotvrdost anebo hodnotí tvrdost lokální (lze určit např. tvrdost vnitřků a hranic zrn, tvrdosti různých fází materiálu, apod.) využívá velmi malých sil (malé vtisky) a proto je měření vhodné pro tenké materiály (fólie, povlakové vrstvy, apod.)

Tvrdost nelze označit za fyzikální veličinu z důvodu její závislosti na řadě vlivů. Např. při měření tvrdosti pomocí vnikací zkoušky budou výslednou hodnotu ovlivňovat: [9] [10]

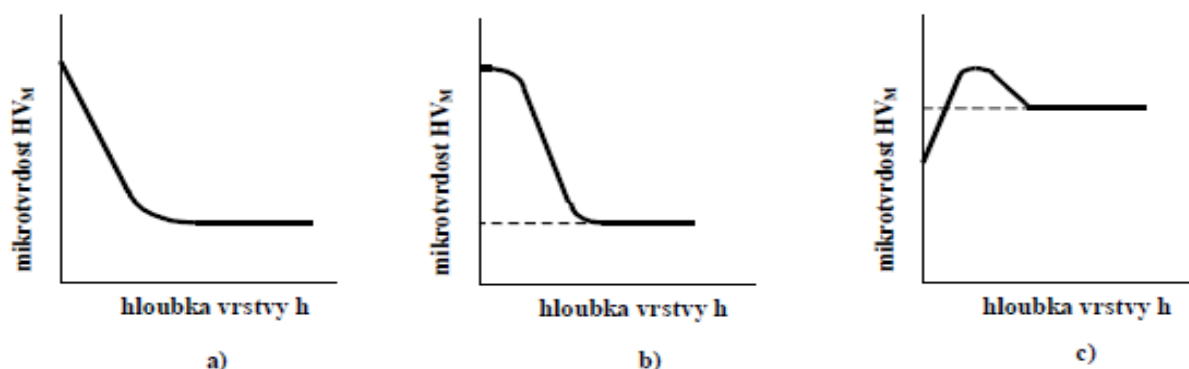
- elastické vlastnosti zkoušeného materiálu (především modul pružnosti v tahu a smyku),
- plastické vlastnosti zkoušeného materiálu (především mez kluzu, deformační zpevnění a rychlost deformačního zpevnění),
- velikost síly působící na indentor, rychlost zatížení a jeho doba působení,
- vlastnosti materiálu indentoru (tvar, rozměry, tvrdost a modul pružnosti),
- tření při vnikání indentoru do zkušební tělesa,
- teplota, za které probíhá zkouška (vliv tepelné roztažnosti, zkouška probíhá při 10 až 35°C),
- tloušťka zkušební tělesa (deformace v průběhu zkoušky),
- vzdálenost středu vtisku od okraje zkušební tělesa, vzdálenost mezi středy dvou sousedních vtisků,
- velikosti zrna (materiály s jemnozrnnou strukturou kladou vyšší odpor proti vnikání indentoru v důsledku většího počtu zrn a jejich hranic),
- příměsi (příměsi snižují schopnost materiálu se plasticky deformovat, výsledkem je vyšší tvrdost),
- vnitřní pnutí (např. vnitřní pnutí způsobené tvářením za studena zvyšuje tvrdost materiálu).

2.3.2 Mikrotvrdość

Jak již bylo zmíněno, měření mikrotvrdości vytváří malé vtisky nízkými zátěžnými silami. Naměřené hodnoty nelze srovnávat s hodnotami makrotvrdości vzhledem k výrazné závislosti na kvalitě povrchu (stejně zpracování jako pro metalografický výbrus) a velikosti zatížení (s klesající velikostí vtisku klesá i přesnost měření). [9]

Vhodnost použití metody: [10]

- měření malých anebo tenkých součástí,
- měření součástí z křehkých materiálů,
- měření lokální tvrdości,
- měření povrchové vrstvy po chemicko-tepelném zpracování,
- měření strukturních složek a jednotlivých fází,
- měření tvrdości povlaků,
- hodnocení svarových spojů, apod.



Obr. 3 Typy závislosti mikrotvrdości na hloubce povrchové vrstvy [5]

průběh a: [5]

- mikrotvrdość HV_M (mikrotvrdość dle Vickerse) v povrchové vrstvě klesá rovnoměrně s tloušťkou ve směru k základnímu materiálu. Přechod mezi mikrotvrdoścemi povrchové vrstvy a základního materiálu je pozvolný a má plynulý průběh. Z grafu vyplývá, že povrchová vrstva je pevně spojena se základním materiálem.

průběh b: [5]

- mikrotvrдость je nejprve v malé tloušťce povrchové vrstvy konstantní, následně klesá výrazněji než v prvním případě, přechod do základního materiálu je ostrý. Z grafu vyplývá, že spojení povrchové vrstvy a základního materiálu je slabé, hrozí odlupování povrchové vrstvy.

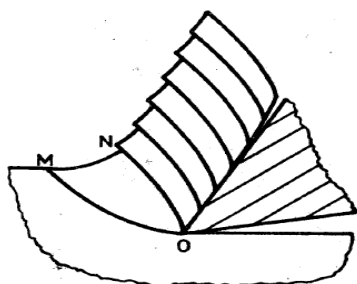
průběh c: [5]

- mikrotvrдость nejprve roste se zvětšující se hloubkou a následně klesá až na mikrotvrдость základního materiálu. Průběh grafu je charakteristický pro dokončování broušením, kde nárůst mikrotvrlosti představuje porušení povrchové vrstvy tvořené jemnými drážkami vytvořenými úběrem jednotlivých brusných zrn (doprovází zpravidla síť trhlinek). Pod porušenou vrstvou je vrstva deformačně zpevněná, která má vyšší mikrotvrдость, následně mikrotvrдость klesá až na hodnotu deformačně nezpevněného základního materiálu.

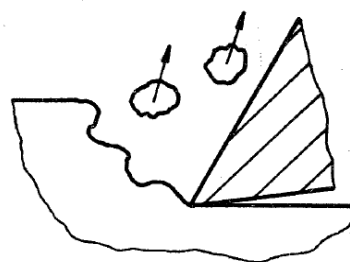
2.3.3 Zpevnění povrchové vrstvy

K pochopení této kapitoly je nutné vysvětlit, alespoň zjednodušeně vznik obrobené plochy metodami úběru materiálu, při nichž dochází k plastické deformaci. Tato plastická deformace je kromě způsobu obrábění také závislá na mechanických vlastnostech obráběného materiálu.

Obráběním většiny materiálů v technické praxi dochází k tvorbě třísky tvářené, typicky u kovů a to z důvodu vzniku plastické deformace v obráběném materiálu v těsné blízkosti břitu rezného nástroje viz oblast OMN Obr. 4. V případě, že nedochází k plastické deformaci při oddělování třísky od zbytku materiálu, vzniká tříska netvářená, např. při obrábění keramiky viz Obr. 5. [11]



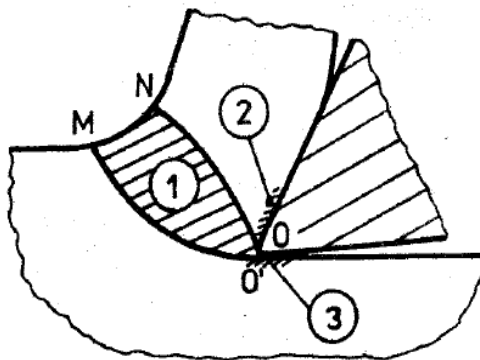
Obr. 4 Tříska tvářená [11]



Obr. 5 Tříska netvářená [11]

Vznik tvářené třísky

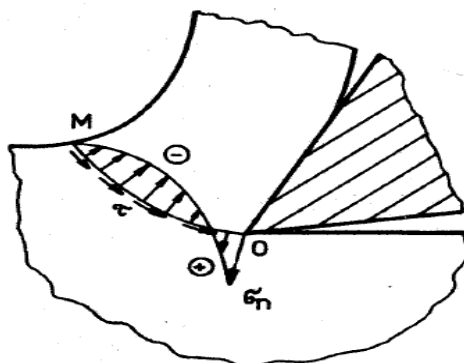
Plastickou deformaci během procesu obrábění lze rozdělit do tří oblastí. Oblast primární plastické deformace, oblast sekundární plastické deformace a oblast povrchové vrstvy obrobené plochy (plocha řezu). [11]



Obr. 6, 1. Oblast primární plastické deformace, 2. oblast sekundární plastické deformace, 3. plocha řezu [11]

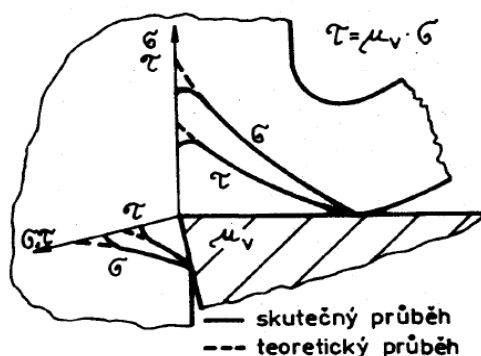
Oblast primární plastické deformace OMNO'. Tvar této oblasti ve smyslu hraničních bodů je ovlivňován zejména poloměrem hrany ostří, v případě malého až teoreticky nulového poloměru jsou body hranice O a O' totožné, pak označujeme oblast primární plastické deformace jako oblast MNO. Hranice MO je počátkem plastické deformace a hranice NO' je koncem kde většinou dochází ke kluzu. Zpevnění obráběného materiálu narůstá směrem k hranici NO'. [11]

„Při obrábění převládají v oblasti OMNO' deformace a napětí kluzová při současném působení všestranného stlačení. Výjimkou je oblast bezprostředně u ostří, kde většinou tlakové napětí přechází v tah, který může být příčinou vzniku trhlin před břitem“ [11]



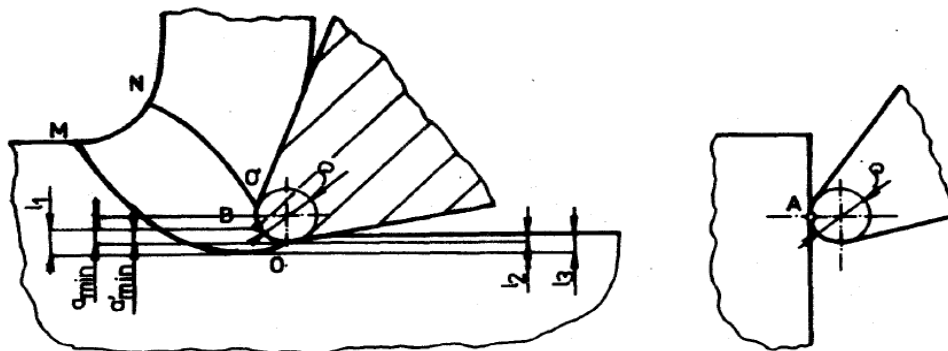
Obr. 7 Průběh napětí v oblasti primární plastické deformace [11]

Oblast sekundární plastické deformace. Po průchodu třísky primární oblastí plastické deformace dochází v sekundární oblasti k plastické deformaci na spodní straně třísky. Vlivem vysokých teplot dochází k odpevnění materiálu a tak je především tímto umožněna sekundární deformace. Touto oblastí je také ovlivněn charakter styku nástroje a obrobku vlivem rozložení působících napětí a teplotou na stykových plochách (styku mezi čelem a spodní stranou třísky a zároveň hřbetem a plochou řezu, rozeznáváme bodový a plošný styk). [11]



Obr. 8 Rozložení normálových a smykových napětí [11]

Povrchová vrstva obrobené plochy. Obrobená plocha je částí řezné plochy, která po obrábění zůstává na součásti. Během obrábění dochází k ovlivnění povrchové vrstvy plastickou deformací v důsledku poloměru řezné hrany nástroje a vlivem primární plastické deformace v případě zasahuje-li pod povrch obrobené plochy (tloušťka vrstvy l_1 a l_3). Poloměr řezné hrany má za následek dělení materiálu v úrovni odpovídající tloušťce materiálu a_{\min} a po vytvoření třísky v úrovni a'_{\min} (bod A místo dotyku v počátku obrábění, bod B místo největších napětí přesunutých z bodu A vlivem plastických deformací obrobku) viz Obr. 9. [11]



Obr. 9 Schématické zobrazení vlivu poloměru ostří na plochu řezu [11]

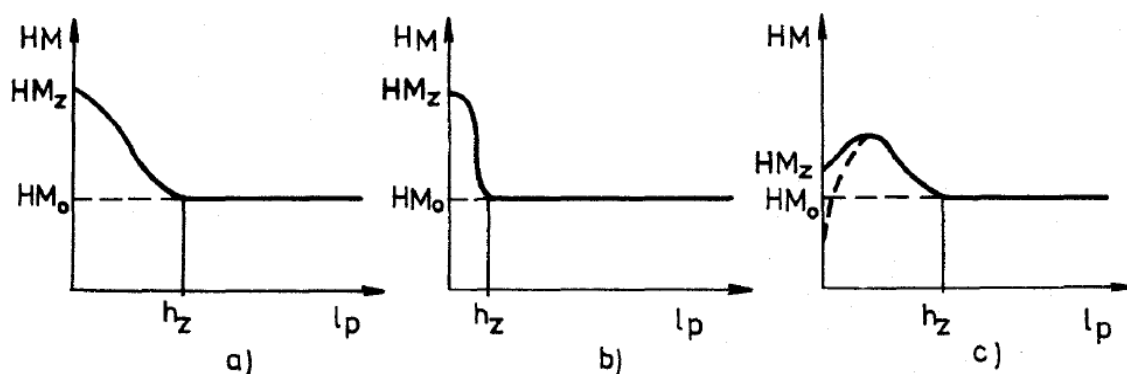
Materiál, který odchází pod tímto bodem, se deformuje plasticky (zpevňuje) a také elasticky (odpružení materiálu o tloušťku l_2). Tyto deformace případně vysoká teplota a strukturní změny mají za následek vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobenej součásti. [11]

Důsledkem výše zmíněného je změna mechanických vlastností povrchové vrstvy např. pevnost, houževnatost apod. Zpevnění se nejčastěji vyjadřuje mikrotvrdostí HM závislé na hloubce (vzdálenosti od povrchu součásti), velikostí hloubky zpevněné vrstvy h_z a stupněm zpevnění K_z . [11]

$$K_z = \frac{HM_z - HM_0}{HM_0} \cdot 100 [\%] \quad (2.2)$$

HM_z – mikrotvrdost zpevněného materiálu,

HM_0 – mikrotvrdost nezpevněného materiálu.



Obr. 10 Mikrotvrdost HM v závislosti na vzdálenosti od povrchu [11]

Naměřené hodnoty ze zkoušky tvrdosti lze využít k přibližnému stanovení i jiných mechanických vlastností zkoušeného materiálu. Vycházíme z podobnosti plastické deformace a zpevnění zkoušeného materiálu při vnikání indentoru a obdobnými charakteristikami téhož definující jiné mechanické vlastnosti. „Nejčastěji používaným převodem, který byl experimentálně potvrzen, je lineární vztah“: [8]

$$R_m = k \cdot HB [N \cdot mm^{-2}] \quad (2.3)$$

Koeficient k je funkcí materiálových vlastností (ocel 3,1 až 4,1) [8]

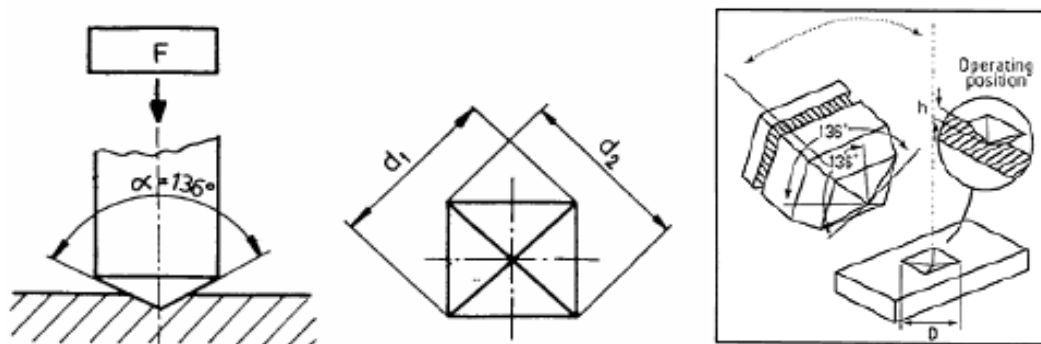
Důvodem přibližnosti v tomto konkrétním případě je, že měření tvrdosti se provádí do určité hloubky a jednotlivé vrstvy materiálu mohou dosahovat odlišných hodnot tvrdosti, oproti tomu zkouška tahem hodnotí průřez [9]

2.4 Zkoušky tvrdosti

V práci jsou uvedeny pouze podstatné metody vzhledem k experimentální části. Jedná se o měření tvrdosti a mikrotvrdosti dle Vickerse.

2.4.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Podstatou zkoušky je vlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu do materiálu (protilehlé stěny indentoru svírají vrcholový úhel $136 \pm 0,5^\circ$). Výsledná tvrdost (značena HV) je poměrem zatížení a plochy vtisku (pravidelný čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem rovným úhlu indentoru a měřenými úhlopříčkami základny d_1 ; d_2) nebo ji lze odečíst z tabulek na základě úhlopříčky čtvercové základny vtisku d . Úhlopříčky jsou měřeny pomocí mikroskopu. [9]



Obr. 11 Princip zkoušky dle Vickerse [10]

Výpočet tvrdosti: [10]

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.4)$$

$$\text{konstanta } 0,102 = \frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665}$$

F – zkušební zatížení [N],

d – aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1 , d_2 [mm].

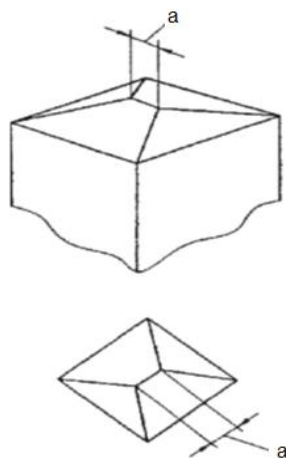
Podmínky pro správné provedení zkoušky udává norma ČSN EN ISO 6507-1.

Zkouška tvrdosti dle Vickerse má výhodu geometrické podobnosti vtisků a proto teoreticky nezávisí na velikosti zátěžné síly. Dále pak má stupnici tvrdosti od nejměkčích po nejtvrdší zkoušené materiály a poměr tvrdosti dvou různě tvrdých materiálů odpovídá poměru hodnot v HV, tzn. materiál dvakrát tvrdší bude mít dvakrát vyšší hodnotu HV. Výhodou zkoušky je také malé poškození zkoušeného povrchu vzhledem k malému vtisku, který je díky velkému vrcholovému úhlu mělký (výhodné pro měření tenkých zkušebních vzorků a součástí). Nevýhodou jsou vyšší nároky na povrchovou úpravu nejlépe povrch broušený nebo leštěný. Výsledky jsou závislé na homogenitě materiálu, důvodem je, že při zkoušení tvrdosti dle Vickerse může u heterogenních struktur vtisk zasahovat pouze zrno jedné fáze a naměřená tvrdost pak nebude odpovídat zkoušenému materiálu. Mezi nevýhody patří možný vznik deformací vtisku zpevněním materiálu. [9]

Zkouška je vhodná pro přesnější měření hlavně v laboratorním prostředí. [9]

2.4.2 Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Jak již bylo zmíněno výše, zkouška mikrotvrdosti se od makrotvrdosti liší zejména velikostí zátěžné síly, která je menší a tím vznikají i malé vtisky, jimiž jsme schopni vyhodnotit tvrdost jednotlivých fází, apod. Rozdíl ve zkoušce je také v požadavcích na indentor, který je stejného tvaru, tedy diamantový pravidelný čtyřboký jehlan, ale velikost hrany viz *Obr. 12* nesmí přesáhnout hodnotu $0,5\mu\text{m}$. [9] [10]



Obr. 12 Délka hrany a max. $0,5\mu\text{m}$ pro zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse [10]

Zkouška mikrotvrdomosti je závislá na velikosti zatížení a kvalitě povrchu a proto není možné přímé srovnání s tvrdostí ze zkoušky makrotvrdomosti dle Vickerse. [9]

Tvrdomost ze zkoušky lze získat výpočtem nebo odečtem z tabulek na základě úhlopříčky čtvercové základny vtisku d . [10]

Výpočet tvrdosti dle rovnice (2.4) nebo užitím vztahu dle [9]:

$$HV = \frac{1855 \cdot F}{d^2} \quad (2.5)$$

F – zkušební zatížení [cN],

d – aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1, d_2 [μm].

Podmínky pro správné provedení zkoušky udává norma ČSN EN ISO 6507-1.

2.5 Zbytková napětí

Zbytková napětí vznikají a mění se v součásti během procesu jejich výroby. Součást je ovlivněna technologií výroby zahrnující např. mechanické zpracování, chemicko-tepelné zpracování apod. Průběh zbytkových napětí se dále v součásti mění vlivem provozního zatížení. Z uvedeného vyplývá, že pro určení vlivu zbytkových napětí na životnost součásti je nutné se zabývat jejich průběhem závislým na historii součásti v kombinaci s provozním zatížením. [12]

Podle směru působení rozeznáváme napětí tahová (+) a tlaková (-). Dle příčiny, která napětí vyvolává, dělíme na napětí vložena a vnitřní. Vložena napětí jsou vyvolána působením vnějších sil nebo momentů na součást kdežto napětí vnitřní vznikají bez působení vnějšího zatížení a jsou v rovnováze. Další rozdělení lze provést z hlediska doby trvání a to na napětí okamžitá a zbytková. Okamžitá napětí zanikají společně s odstraněním příčin, které je vyvolávají, pod podmínkou, že napětí nepřesáhla mez kluzu, jedná se např. o napětí vzniklá nerovnoměrným rozložením teplot v součásti a tím rozdílnými objemovými změnami, která po vyrovnání teplot vymizí. Na druhé straně zbytková napětí po odstranění příčin, jež je vyvolaly, zůstávají. [5] [11]

Dělení vnitřních napětí podle objemu, ve kterém dosahují rovnováhy: [5] [11]

- napětí I. druhu (makroskopická) – napětí dosahují rovnováhy v celém objemu součásti nebo v relativně rozsáhlé oblasti. Narušením vnitřní rovnováhy např. odebráním části povrchové vrstvy zkušebního hranolu se projeví změnou makrogeometrie součásti,
- napětí II. druhu (mikroskopická) – napětí dosahují rovnováhy v objemu několika zrn, porušení rovnováhy nemusí vést ke změnám makrogeometrie,
- napětí III. Druhu (submikroskopická) – napětí dosahují rovnováhy v objemu několika atomových vzdáleností, porušení rovnováhy nevede ke změnám makrogeometrie.

Napětí I. až III. druhu se vyskytují zpravidla současně, ale v technické praxi se jako zbytková napětí nejčastěji uvádí především napětí I. druhu z důvodu výrazného vlivu na životnost a deformace součásti. [5] [11]

2.5.1 Vznik zbytkových napětí

V případě obrábění, kde převažuje plastická deformace nad tepelnými účinky, vzniká na povrchu součásti ve většině případů tlakové napětí, které je velice přínosné při vzniku zárodků trhlin, jež jsou tlakem uzavírány. [3] [13]

Současné působení mechanického a tepelného zatížení při obrábění způsobuje, že horní část povrchové vrstvy s nejvyšší teplotou je plasticky zúžena a při chladnutí následně vznikají tahová napětí, naopak od tlakového napětí, může docházet k tvorbě trhlin a vzniku únavových lomů. Působení mechanického a tepelného zatížení se může dále kombinovat se strukturními a chemickými změnami, které způsobují zvětšení nebo zmenšení určitého objemu materiálu (chemické změny, vznik sloučenin s odlišnou hustotou v důsledku difúze z rezného nástroje a prostředí). Dochází-li ke zvětšování objemu části materiálu, pak neovlivněná část zachovávající si svůj objem bude zvětšování bránit, to znamená, že tato část způsobí tlaková napětí ve zvětšující se části. Analogicky při zmenšování objemu části materiálu budou vznikat tahová napětí. [3] [13]

Shrnutí základních mechanismů vzniku zbytkových napětí: [3] [4] [13]

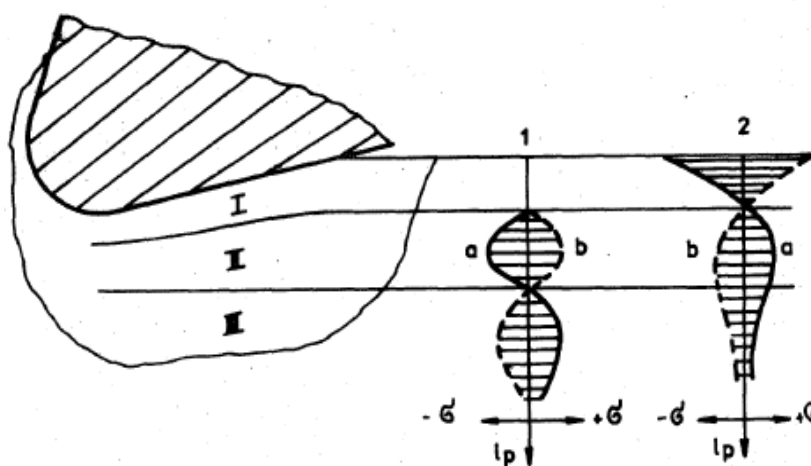
- nerovnoměrná plastická deformace,
- nerovnoměrný ohřev a ochlazování materiálu,
- strukturní změny,
- chemické procesy.

2.5.2 Mechanicky zatížená povrchová vrstva

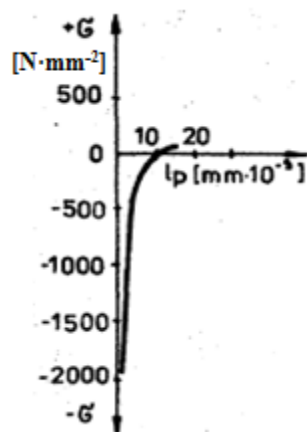
Při mechanickém zatížení povrchové vrstvy a nízkých teplotách dochází dle *Obr. 13* v I. vrstvě k plastické deformaci, v II. vrstvě k deformaci elastické a III. vrstva není deformací ovlivněna. [11]

Napětí vznikající v mechanicky zatížené vrstvě lze spojit s následujícími příčinami. Při obrábění např. kovu a jeho plastické deformaci dochází k nárůstu měrného objemu a poklesu hustoty materiálu (dáno nárůstem objemu dislokací). K tomuto vlivu se přidává prodloužení jednotlivých zrn materiálu, kde mohou nastat dva případy v závislosti na mechanických vlastnostech. [11]

První případ, poměr meze pevnosti a smluvní meze kluzu materiálu je menší než 1,25 ($R_m / R_{p0,2} < 1,25$). V důsledku tření mezi materiálem a hřbetem řezného nástroje a důsledkem prodloužení vrstvy I deformované pod břitem řezného nástroje dochází k prodloužení zrn ve směru řezu. Prodloužení zrn společně s objemovou změnou plastickou deformací vede k prodloužení vrstvy I, která je bez napětí právě vlivem plastické deformace. Vrstva II je elasticky deformována, prodloužena vlivem břitu a vrstva III je vrstva neovlivněná, nedeformovaná. Za působení břitu viz *Obr. 13* pozice 1, graf *a* vzniká ve vrstvě II tlak způsobený spojením s vrstvou III, ve které se napětí vyrovnává tahem. Pokud by vrstva II byla spojena pouze s vrstvou I vznikal by v ní tah. Po přejetí nástroje zanikne jeho vliv a vrstva II elasticky deformovaná se snaží vrátit do původního stavu, čemuž brání prodloužená plasticky deformovaná vrstva I, která si snaží zachovat svou délku. Vzniká tak na povrchu tlak a ve vrstvě II tah, který po dosažení svého maxima klesá směrem k vrstvě III, viz *Obr. 13* pozice 2, graf *a*. Příklad takovýchto zbytkových napětí z praxe je znázorněn na *Obr. 14*. [11]

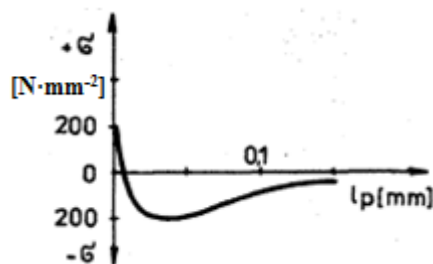


Obr. 13 Zbytková napětí mechanicky zatížené vrstvy [11]



Obr. 14 Superfinišování ložiskové oceli [11]

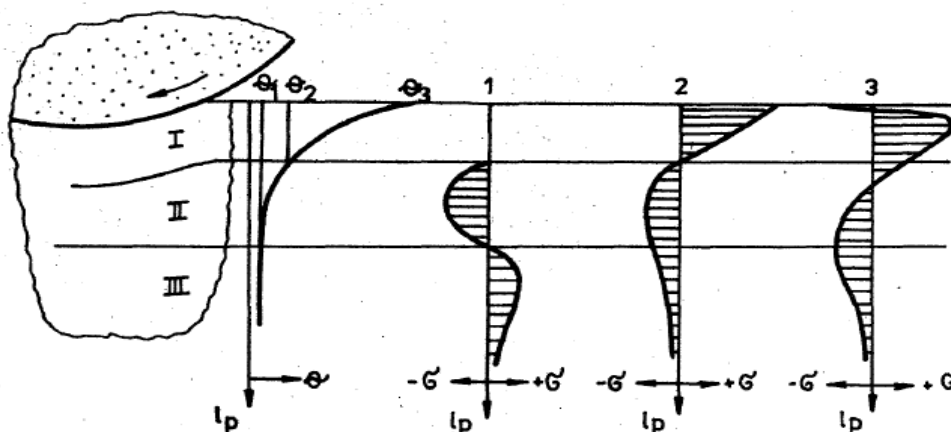
Druhý případ, houževnaté a plastické kovy a slitiny s poměrem přibližně ($R_m / R_{p0,2} > 1,25$). V tomto případě může dojít k prodloužení zrn v přibližně kolmém směru na směr řezu. Prodloužení většinou převáží změnu hustoty plastickou deformací a v důsledku toho je průběh zbytkových napětí v povrchových vrstvách zcela opačný viz Obr. 13 pozice 1 a 2, grafy b. Příklad takovýchto zbytkových napětí z praxe je znázorněn na Obr. 15. [11]



Obr. 15 Sousedně frézovaný povrch titanové slitiny [11]

2.5.3 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva

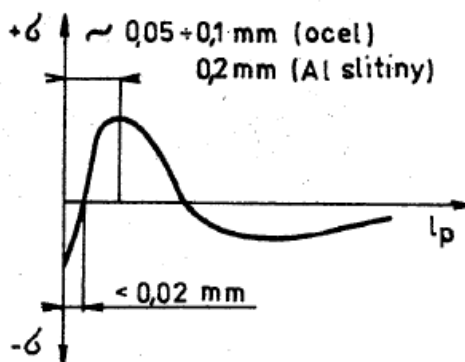
Při mechanickém zatížení povrchové vrstvy a vyšších teplotách, typicky při broušení, dochází k vzniku tahových napětí. Příkladem, v důsledku obrábění vysokou řeznou rychlostí narůstá teplota v obráběné povrchové vrstvě, viz *Obr. 16* průběh teplot Θ . Za působení břitu je při teplotě vyšší než Θ_2 povrchová vrstva I v plastickém stavu tzn. bez napětí. Jelikož je vrstva I bez napětí nepůsobí na vrstvu II, která má nižší teplotu než Θ_2 a je pružně deformována vlivem břitu nástroje, konečně vrstva III představuje vrstvu neovlivněnou deformací ani teplotou (tento případ představuje obdobu mechanicky zatížené vrstvy *Obr. 13* pozice 1, graf *a*, který můžeme porovnat s *Obr. 16* pozice 1). Po přejetí opět zaniká vliv nástroje a dochází k chladnutí ovlivněných vrstev. Postupem chladnutí při snížení teploty pod Θ_2 se vrstva I bude snažit zkrátit. Tomuto zkrácení brání vrstva II a III, kladený odpor způsobí vznik tahových napětí ve vrstvě I, která jsou vyrovnávána tlakovým napětím ve vrstvách II a III, viz *Obr. 16* pozice 2. [11]



Obr. 16 Zbytková napětí mechanicky a tepelně zatížené vrstvy [11]

Od popsaného průběhu z *Obr. 16* pozice 2 se však skutečný průběh zbytkových napětí při obrábění za vysokých teplot liší, viz *Obr. 16* pozice 3. Rozdíl mezi průběhy je zřejmě způsoben změnou struktury tenké povrchové vrstvy a vlivem difuze látek z řezného nástroje a prostředí. [11]

Na Obr. 17 je znázorněn přechod zbytkových napětí z Obr. 16 pozice 3. Z obrázku je patrné, že pokles tahových napětí a přechod v napětí tlaková probíhá v tenké povrchové vrstvě dle uvedených obvyklých hodnot pro ocel a hliníkové slitiny. [11]



Obr. 17 Přechod zbytkových napětí [11]

2.5.4 Mechanicky a tepelně zatížená povrchová vrstva se změnami struktury

Vlivem teploty se může k výše zmíněným mechanismům připojit mechanismus vzniku zbytkových napětí strukturními změnami. [11]

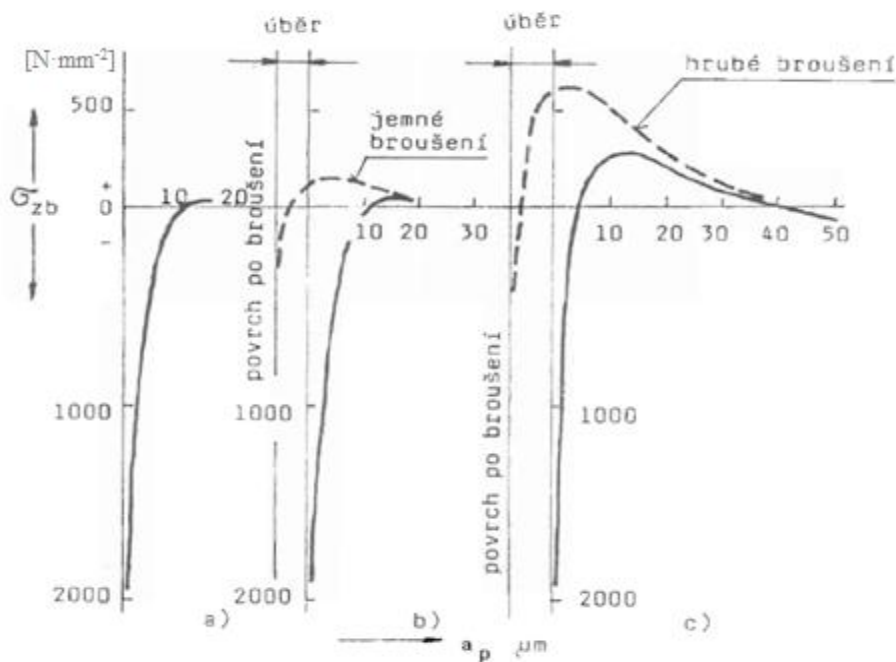
Příkladem, při přeměně kubické plošně středěné mřížky tuhého roztoku v železe γ na kubickou prostorově středěnou mřížku železa α během ochlazování oceli, dochází k výrazné objemové změně. Tato objemová změna má za následek vznik strukturních zbytkových napětí. Případem objemové změny, který může při obrábění také nastat, je změna zbytkového austenitu na martenzit za podmínky vysoké teploty povrchové vrstvy a takovýchto strukturních změn existuje celá řada. [11]

Dalším vlivem vysoké teploty obrábění na vznik strukturních zbytkových napětí je možné vyvolání absorpce nových látek do povrchové vrstvy z řezného prostředí a nástroje, kdy tento děj může být opět doprovázen vznikem zbytkových napětí, jak již bylo zmíněno u mechanicky a tepelně zatížené povrchové vrstvy. [11]

Zmíněné mechanismy vzniku zbytkových napětí se kombinují a tím vytváří různorodé závislosti zbytkových napětí na vzdálenosti od povrchu (hloubce povrchové vrstvy).

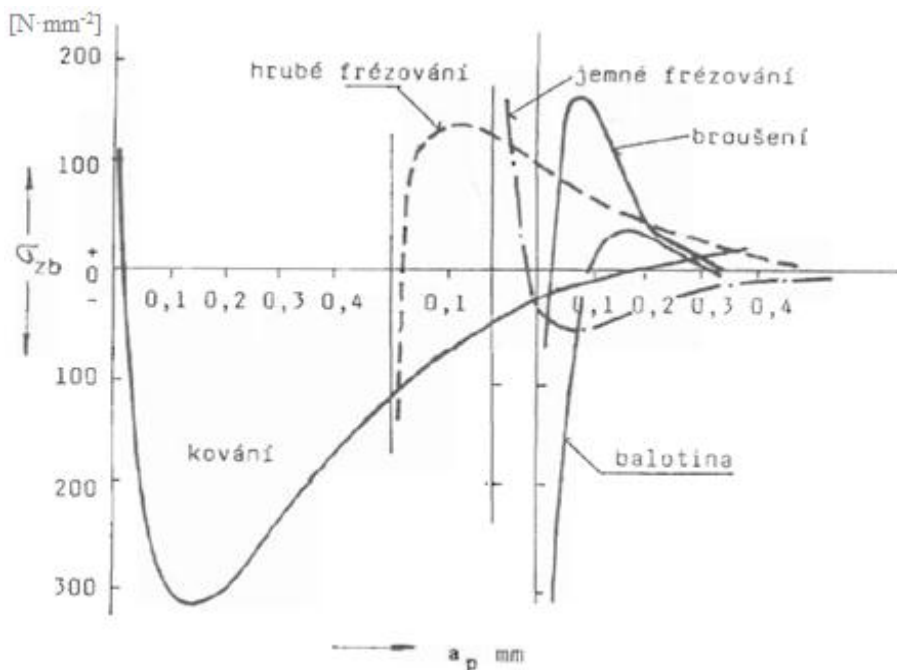
2.5.5 Příklady vlivu jednotlivých technologických operací

Obr. 18 je znázornění průběhu zbytkových napětí v kroužcích valivých ložisek po dokončovacích operacích broušení a superfinišování. Z obrázku vyplývá, že největší vliv na zbytková napětí v povrchové vrstvě má poslední operace avšak je také zřejmé, že na výsledný průběh může mít vliv i operace předchozí. Průběh a pouze superfinišování, výsledná zbytková napětí jsou tlaková až do hloubky přibližně 10 μ m, kde dochází k pozvolnému přechodu v tah. V průběhu b předchází superfinišování úběr malého přídavku jemným broušením a výsledný graf je velmi podobný průběhu a s rozdílem přechodu v tahová napětí o nepatrně vyšší hodnotě tzn. vliv jemného broušení je v podstatě zcela odstraněn následnou operací. U průběhu c hrubé broušení vyvolá výrazná tahová napětí s maximem v hloubce povrchové vrstvy přibližně 5 μ m a pozvolným klesáním směrem k základnímu materiálu, následným superfinišováním se již nepodaří odstranit vliv předchozí operace a výsledný graf má podobu tlakových napětí blíže povrchu s přechodem v napětí tahová o vyšší hodnotě než v předchozím případě [11]. Přitom povrchové vrstvy s různou velikostí i smyslem zbytkových napětí se můžou při měření např. tvrdosti a drsnosti zdát jako shodné. [4] [11]



Obr. 18 Stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek [3]

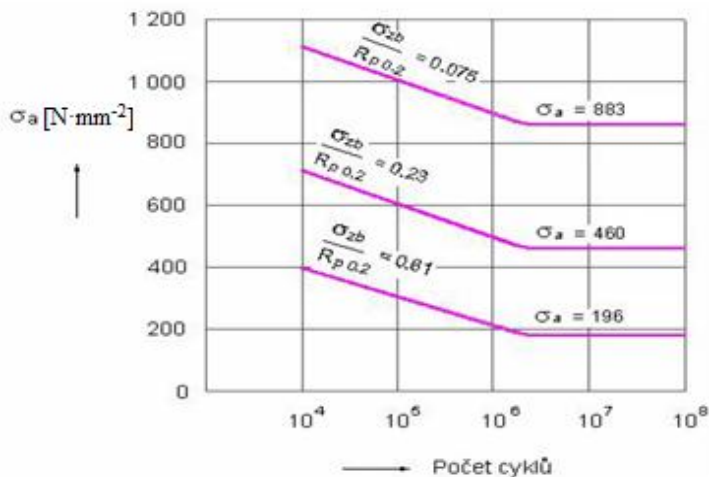
Obr. 19 je znázornění průběhu zbytkových napětí po jednotlivých operacích při výrobě lopatky turbokompresoru. [3]



Obr. 19 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru [3]

2.5.6 Vliv zbytkových napětí na únavovou pevnost

V předchozích odstavcích je pojednáno o vzniku zbytkových napětí, která mají tahový, nebo tlakový charakter a vyrovnávají se v určitém objemu materiálu. Vzhledem k únavové pevnosti je třeba působení zbytkových napětí ověřit jelikož nepůsobí stejnou měrou. Odborná literatura i praxe se shodují, že zbytková tahová napětí mají vliv na snížení únavové pevnosti, zatímco zbytková tlaková napětí únavovou pevnost zvyšují. [4]



Obr. 20 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu [4]

2.6 Metody měření zbytkových napětí

Měření zbytkových napětí je v dnešní době možné provádět velkým množstvím metod, které mají společnou charakteristiku a to sice, metody neměří přímo velikost zbytkových napětí, ale měří určitou veličinu vztaženou právě ke zbytkovým napětím např. měření deformace součásti nebo měření fyzikálních veličin jako je šíření vln, změny magnetismu a jiné viz *Tab. 1*. Jednotlivé metody lze kromě měřené veličiny rozdělit dle míry poškození měřené součásti na: [14] [15]

Destruktivní metody měření – dochází k poškození měřené součásti nebo vzorku. Destruktivní metody zahrnují většinu metod mechanických. Jejich podstatou je naměření velikosti deformace po odstranění určitého objemu materiálu (vrstev). [14] [15]

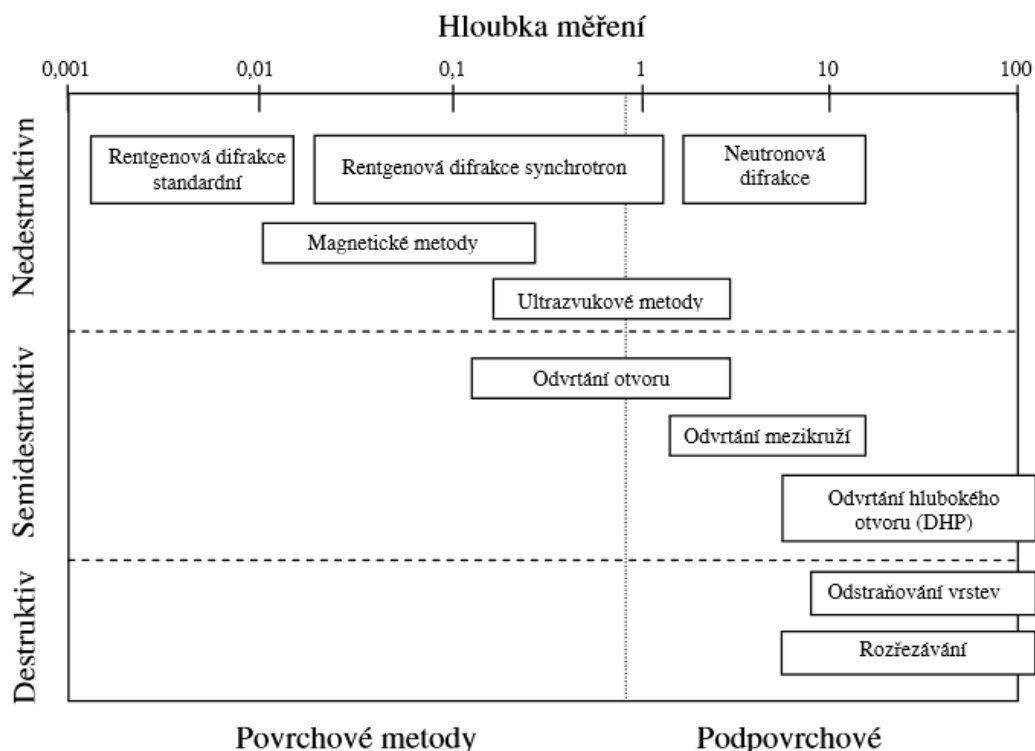
Polodestruktivní metody měření – měření se provádí na části materiálu, která je záměrně přidána na součást a po provedení měření se tato část odstraní. Nejčastěji uváděným příkladem tohoto měření je metoda vrtání otvoru, založená na přerozdělení napětí v povrchu části materiálu po odvrtání. [14] [15]

Nedestruktivní metody měření – nedochází k poškození měřené součásti nebo vzorku. Patří sem většina metod fyzikálních. Např. difrakční tenzometrická analýza. [14] [15]

Tab. 1 Metody zjišťování zbytkových napětí [15]

Metoda zjišťování zbytkových napětí	Tvar součásti	Způsob měření	
Mechanické	plochý tvar	deformace pásků	změna délky
			změna zakřivení
		vrtání děr	válcová díra
			mezikruží
	rotační tvar	změna rozměru válce	odstranění povrchové vrstvy
		trubka	rozříznutí trubky
			odstranění povrchové vrstvy
			odstranění vnitřní vrstvy
		kroužek	rozříznutí
			změna křivosti
	podélné pásy z kroužků		
	obecný tvar	metoda sítí	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
křehké modely		vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
	vnitřní tlumení		
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

V této práci jsou stručně popsány pouze některé z užívaných metod měření zbytkových napětí. Obr. 21 popisuje rozdělení metod a uvádí přibližné hodnoty dosahované hloubky měření (údaje se liší dle jednotlivých výrobců zařízení, laboratoří i v odborných textech).



Obr. 21 Metody pro měření zbytkových napětí v mm [12]

2.6.1 Rentgenová difrakce

Metoda rentgenové difrakční analýzy k měření zbytkových napětí využívá elastických deformací v krystalickém materiálu. Deformace způsobují změny v rozestupech rovin mřížky z jejich nezátížené hodnoty na hodnotu novou, která odpovídá velikosti aplikovaného napětí. Tato nová rozteč bude stejná u jakýchkoli podobně orientovaných rovin, s ohledem na působící napětí a krystalovou mřížku, proto tento účinek působí jako velmi malý tenzometr. [16] Zjednodušeně určíme rozdíl v rozestupech rovin krystalické mřížky materiálu bez zbytkových napětí a materiálu se zbytkovým napětím.

Postup měření je relativně jednoduchý. Při měření je vzorek ozáren vysokou energií rentgenového záření, které proniká povrchem. Roviny krystalové mřížky odchylují část tohoto záření a detektorem, který se pohybuje okolo vzorku, měříme jeho intenzitu. [16]

Výhody: [17]

- nedestruktivní metoda,
- umožňuje laboratorní měření i měření přímo na místě,
- měření dvojosého zbytkového napětí (např. σ_{xx} a σ_{yy}),
- vhodné pro měření gradientů povrchového napětí,
- lze měřit komplexní tvary,
- rychlý, jednoduchý proces a proto relativně levný
- měření makro i mikro zbytkových napětí,
- široce dostupná metoda,
- umožňuje stanovit mřížkové deformace na krystalech jednotlivých fází materiálu [18].

Nevýhody: [17]

- omezení na krystalické materiály nebo na krystalické fáze částečně amorfních materiálů [18],
- měření jednofázových materiálů je omezeno pouze na krystaly s určitou orientací, podobně u vícefázových materiálů je měření omezeno na jednu fázi a její jednotlivé krystaly z toho vyplývá, že naměřené výsledky budou ovlivněny elastickou anizotropií krystalů součásti [18],
- přesnost ovlivněna velikostí zrn a strukturou materiálu,
- nutná kvalitní povrchová úprava tzn. vysoké požadavky na přípravu.

2.6.2 Rentgenová difrakce synchrotron

Synchrotron je určitý druh urychlovače částic. Poskytuje velmi intenzivní vysokoenergetické rentgenové záření, které je schopné proniknout do větších hloubek než při konvenční rentgenové difrakci. Pomocí synchrotronu lze získat 3D napětíové mapy do milimetrových hloubek. [16]

Výhody: [17]

- nedestruktivní metoda, nicméně může nastat potřeba vzorku bez napětí nebo zajistit přístup svazku a tím může dojít k poškození součásti,
- měření trojosé napjatosti pomocí manipulace s měřenou součástí, vhodné pro měření gradientů,

- měření komplexních tvarů,
- měření nezávislé na povrchové úpravě,
- rychlý proces měření,
- měření makro i mikro zbytkových napětí.

Nevýhody: [17]

- laboratorní měření s rozměrovým a váhovým omezením měřené součásti,
- omezení na krystalické materiály,
- přesnost ovlivněna velikostí zrn a strukturou materiálu,
- velmi dlouhé čekací doby na možnost využití synchrotronu, pokud se nejedná o placené komerční využití.

2.6.3 Neutronová difrakce

Stejně jako metoda rentgenové difrakce využívá elastických deformací krystalové mřížky a změny vzdáleností rovin mřížky od nezátížené polohy. Samotné měření probíhá také stejným způsobem. [16]

Výhodou neutronové difrakce je vysoká hodnota penetrační hloubky neutronů, tzn. že je možné měřit v hloubkách blízkých povrchu přibližně od 0,2 mm až do hloubky materiálu 100 mm v hliníku nebo 25 mm v oceli. Díky vysokému prostorovému rozlišení neutronové difrakce spolu s aplikací rotačního a posuvného pohybu je tato metoda schopna vytvořit kompletní trojrozměrnou mapu zbytkových napětí. Nevýhodou metody je relativně vysoká cena a nízká dostupnost pracovišť s potřebným zařízením. [16]

Výhody: [17]

- nedestruktivní metoda, nicméně může nastat potřeba vzorku bez napětí nebo zajistit přístup svazku a tím může dojít k poškození součásti,
- měření trojosé napjatosti (např. σ_{xx} , σ_{yy} , a σ_{zz}),
- měření komplexních tvarů,
- měření nezávislé na povrchové úpravě,
- měření makro i mikro zbytkových napětí.

Nevýhody: [17]

- laboratorní měření ve speciálních zařízeních, rozměrové a váhové omezení součásti,
- omezení na krystalické materiály,
- přesnost ovlivněna velikostí zrn a strukturou materiálu,
- velmi dlouhé čekací doby na možnost měření, pokud se nejedná o placené komerční využití.

2.6.4 Magnetické metody

Feromagnetické vlastnosti ocelí a jiných feromagnetických materiálů jsou citlivé na vnitřní stav napjatosti z důvodu magnetostrikce a následného magnetoelastického efektu. Princip magnetostrikce spočívá ve změně rozměrů tělesa v magnetickém poli. [16]

Metoda funguje na principu zachycení Barkhausenova šumu, který vzniká díky působení magnetického pole a jeho úroveň je funkcí napětí v materiálu, mikrostruktury a tvrdosti. [12]

Heinrich George Barkhausen roku 1919 popsal šum vznikající přiblížením nebo oddálením magnetu od jádra na kterém je navinuta cívka, kde jako výstup slouží reproduktor (praskání či chrastění). [15]

Výhody:

- nedestruktivní metoda,
- rychlý proces měření,
- relativně vysoká přesnost.

Nevýhody:

- náročná kalibrace,
- omezení na feromagnetické materiály.

2.6.5 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody využívají citlivosti rychlosti ultrazvuku šířícího se materiálem na vnitřní napjatosti. Rychlost ultrazvukových vln je přímo ovlivněna velikostí a směrem zbytkových napětí. Protože změny rychlosti jsou malé a závislé na struktuře materiálu, měří se často spíše čas signálu. Z důvodu závislosti změn rychlosti na celé dráze ultrazvuku je prostorové rozlišení příliš nekvalitní, nicméně metoda měří v celém objemu a hodí se pro rutinní kontroly. [16]

Výhody:

- nedestruktivní metoda,
- rychlý proces měření.

Nevýhody:

- nízké rozlišení,
- velká závislost na struktuře materiálu.

2.6.6 Metoda odvrtání otvoru

Metoda odvrtání otvoru je jednou z nejpoužívanějších metod pro měření zbytkových napětí. Tato metoda je relativně jednoduchá, levná, rychlá a verzatilní. Zařízení potřebné k měření může být pevné laboratorní i přenosné. Metoda může být aplikována na širokou škálu materiálů a součástí. [16]

Princip metody spočívá v odvrtání malého otvoru do vzorku nebo součásti obsahující zbytková napětí a následné měření relaxace. Zbytková napětí pak lze vypočítat z této relaxace za použití výpočetních postupů získaných z experimentálních analýz a analýzy konečných prvků. V praxi to znamená, že je otvor vrtán v součásti ve středu speciální tenzometrické růžice [16].

Tato metoda trpí omezenou citlivostí a potenciálními chybami a nejistotami spojenými s rozměry otvoru (průměr, házení, kruhovitost, hloubka atd.), drsností povrchu, rovinností

a přípravou vzorku. Z předchozího vyplývá, že pro metodu odvrtání otvoru je nutná příprava, abychom dosáhli vyhovujícího spojení tenzometrů a měřené součásti, vzniká tak nutnost ohlídat úpravu povrchu součásti, tak aby nebylo odstraněno příliš materiálu, zejména pokud jsou předmětem zájmu zbytková napětí blízko povrchu. [16]

Výhody: [17]

- využívá se jako polodestruktivní metoda umožňující opakovaná měření v různých stádiích životnosti součásti,
- umožňuje laboratorní měření i měření přímo na místě,
- měření dvojosého napětí (např. σ_{xx} , σ_{yy} , a τ_{xy}),
- využití pro velkou škálu materiálů jak kovových, tak nekovových,
- nezávislé měření na struktuře materiálu,
- rychlý, jednoduchý proces a proto relativně levný,
- vhodné pro měření zbytkových napětí blízko povrchu.

Nevýhody: [17]

- je nutná úprava součásti po odvrtání a naměření (zaplnění díry, odstranění části pro měření nebo poskytnutí vzorku pro měření),
- nelze měřit σ_{zz} ,
- omezení pro komplexní tvary, je zapotřebí povrchová úprava s přiměřenou rovinností pro uchycení tenzometrické růžice,
- vysoká citlivost na nesoustřednost vrtané díry a tenzometrické růžice.

Kromě metody odvrtání otvoru (Surface-Hole Drilling nebo také Center-Hole Drilling) se k měření využívá metoda odvrtání mezikruží (Ring Core) anebo speciální varianta odvrtání hluboké díry (Deep-Hole Drilling). [12]

Odvrtání mezikruží. Metoda využívá měření relaxovaných deformací pomocí tenzometrické růžice umístěné na sloupku, který vznikne odstraněním okolního materiálu (mezikruží). Takto lze měřit napětí neovlivněná koncentrátorem napětí na rozdíl od metody odvrtání otvoru, důvodem toho je, že po odvrtání určité hloubky dochází k úplné relaxaci zbytkového napětí. [12]

Výhody: [17]

- využívá se jako polodestruktivní metoda umožňující opakovaná měření v různých stádiích životnosti součásti,
- umožňuje laboratorní měření i měření přímo na místě,
- měření dvojosého napětí (např. σ_{xx} , σ_{yy} , a τ_{xy}),
- využití pro velkou škálu materiálů jak kovových, tak nekovových,
- nezávislé měření na struktuře materiálu,
- cena vzhledem k hloubce měření,
- metoda není citlivá na nesoustřednost s tenzometrickou růžicí.

Nevýhody: [17]

- je nutná úprava součásti po odvrtání a naměření (zaplnění díry, odstranění části pro měření nebo poskytnutí vzorku pro měření),
- nelze měřit σ_{zz} ,
- omezení pro komplexní tvary, je zapotřebí povrchová úprava s přiměřenou rovinností pro uchycení tenzometrické růžice.

Odvrtání hluboké díry. Do součásti se vyvrtá nejprve malý otvor, který je změřen v celé své hloubce (měří se kruhovitost) a poté se odvrtá mezikruží, vznikne nám tak sloupec. Odvrtáním mezikruží dochází k relaxaci napětí a změně rozměrů otvoru, přičemž se měří změna kruhovitosti otvoru opět v celé hloubce. [12] [16]

Výhody: [17]

- využívá se jako polodestruktivní metoda umožňující opakovaná měření v různých stádiích životnosti součásti,
- umožňuje laboratorní měření i měření přímo na místě,
- měření dvojosého napětí (např. σ_{xx} , σ_{yy} , a τ_{xy}), lze měřit σ_{zz} , ale s větší náročností a sníženou přesností,
- využití pro jednoduché i komplexní tvary součástí,
- využití pro velkou škálu materiálů jak kovových, tak nekovových,
- nezávislé měření na struktuře materiálu,
- nezávislé na povrchové úpravě.

Nevýhody: [17]

- je nutná úprava součásti po odvrtání a naměření (zaplnění díry, odstranění části pro měření nebo poskytnutí vzorku pro měření),
- nepoužitelné pro součásti s tloušťkou menší než 6 mm.

2.6.7 Metoda elektrolytického odleptání povrchových vrstev

Odstraněním povrchové vrstvy zkoumaného vzorku, ve kterém je obsaženo zbytkové napětí po předchozím zpracování, dochází k jeho nerovnováze. Představíme-li si zkušební vzorek ve formě ploché obdélníkové tyče, pak po odebrání povrchové vrstvy na jedné straně vzorku dochází k vyrovnávání napěťové nerovnováhy a vzorek se deformuje (ohne se). Velikost deformace závisí na velikosti napětí obsaženém v odebrané povrchové vrstvě a elastických vlastnostech materiálu. Měření se provádí opakovaným odebíráním vrstvy, po němž je možné vyhodnotit rozložení napětí v původním vzorku. [16]

Deformace vzorku lze vyhodnotit různými metodami. Např. pomocí optického mikroskopu, laserovým skenováním, profilovým měřením [16]. Technika měření výrazně ovlivňuje postup celého procesu. Pro měření zbytkových napětí v experimentální části je použito právě elektrolytické odleptání povrchové vrstvy s indukčním snímačem.

Metoda elektrolytického odleptávání povrchové vrstvy je jedním z nejvhodnějších procesů pro odstranění zmiňované povrchové vrstvy ze zkušebního vzorku, především proto, že nedochází k vnášení dodatečného napětí do vzorku. [19]

Pro měření v kontinuálním režimu touto metodou byla snaha použít tenzometry, avšak tyto je velmi obtížné ochránit před nepříznivým vlivem prostředí elektrolytu. Nepříznivou vlastností tohoto uspořádání je možnost posílení měřeného vzorku nanesenými tenzometry. Navíc je nutné měřit a hlídat teplotu během procesu, tak aby se zabránilo vlivu na tenzometr. Při tomto postupu se předpokládá kontinuální průběh měření úběru materiálu. Velikost úběru materiálu lze vyjádřit pomocí vztahu k průchodu elektrického náboje. Získání takového vztahu navýší pracnost celého měření, protože každý materiál má vlastní charakteristiky elektrochemického úběru a bylo by zapotřebí využít kalibrační křivky pro konkrétní materiál. Navíc, každá strukturální nebo metalurgická změna měřeného vzorku vlivem povrchové

úpravy nebo obrábění pozmění elektrochemické úběrové charakteristiky. Z tohoto důvodu přestává úběr mít lineární charakteristiku předpokládanou ke kontinuálnímu průběhu měření, a proto jej nešlo uskutečnit. Nasnadě je nahradit tenzometry některou metodou přímého měření, která nebude trpět na nedostatky tenzometrů. Pak probíhá odebrání povrchové vrstvy nespojitě a po každé odebrané vrstvě je měřena deformace a tloušťka vzorku mimo elektrolytickou lázeň. Tímto způsobem lze získat hodnoty s požadovanou přesností závislé na měřicí technice a normálním okolním prostředí. Časová náročnost samotného měření je vyšší, než by byla u kontinuálního měření, ale není potřeba kalibračních křivek a velikost elektrochemického úběru nepřidává na složitosti metody. [19]

Metoda elektrolytického odleptání povrchové vrstvy vyvinutá doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. na ČVUT v Praze umožňuje kontinuální měření deformace. Tato metoda dále vyvíjena doc. Ing. Jindřichem Kafkou, Csc. je blíže popsána v experimentální části práce.

Výhody:

- metoda, která nevnáší další napětí do součásti,
- kontinuální měření napětí (na jedno upnutí tzn. méně chyb) nebo při nespojitém měření určení napětí ve vrstvách s malou vzájemnou vzdáleností,
- relativně rychlá metoda.

Nevýhody:

- destruktivní metoda,
- měření pouze makro zbytkových napětí,
- laboratorní měření,
- rozměrové a váhové omezení měřené součásti,
- elektrolyt dle materiálu, agresivní prostředí,
- pouze pro elektricky vodivé materiály,
- měření jednoosé napjatosti.

2.7 Fyzikálně chemický stav povrchu

Při obrábění vysokými řeznými rychlostmi např. při broušení nebo některými nekonvenčními technologiemi může docházet k fázovým změnám v povrchové vrstvě, oproti tomu za použití nižších řezných rychlostí a tedy při nižším tepelném ovlivnění např. vrtání, protahování, hoblování, apod. k takovým výrazným změnám nedochází. Obráběním vznikají různé strukturální stavy povrchových vrstev a všechny nejsou dosud prozkoumány. [5]

Příkladem, při broušení oceli mohou v závislosti na řezných podmínkách vznikat v povrchových vrstvách následující zóny: [5] [20]

- I. zóna – za nadkritických rychlostí obrábění (nadkritických teplot) vzniká těžce leptatelná austeniticko-martenzitická zóna,
- II. zóna – jedná se o přechodnou zónu obsahující popuštěný martenzit nebo ferit, austenit a malé množství sekundárního martenzitu,
- III. zóna – dobře leptatelná zóna tvořená feritem a karbidy,
- IV. zóna – obsahuje martenzit a do hloubky rozptýlený austenit. Jedná se o přechodovou zónu, přechod struktury z popuštění k základnímu tepelnému zpracování.

Vysoké řezné parametry vedou ke vzniku všech uvedených zón, zatímco při nízkých vzniká zóna IV nebo III a IV [5]. Intenzita zpevnění a hloubka ovlivněné povrchové vrstvy jsou funkcí vlastností obráběného materiálu [20].

3 Experimentální část

3.1 Zámky lopatek

Vyhodnocení je provedeno na zámčích lopatek oběžného kola pomocné energetické jednotky (auxiliary power unit). Jedná se o zařízení, které slouží hlavně jako zdroj stlačeného vzduchu pro startovací turbíny v hlavním motoru. Pracovní teplota zařízení dosahuje až 950 °C. Lopatky jsou vyrobeny jako přesné odlitky z niklové slitiny inconel 713LC metodou vytavitelného modelu.

3.1.1 Kapilární zkouška

Tato zkouška někdy nazývaná také jako zkouška penetrační patří mezi nedestruktivní metody indikace vad např. trhlin v povrchové vrstvě materiálu. Princip metody je založen na vztlínivosti penetrantu (barevný nebo fluorescenční) a smáčivosti vývojky. Z toho vyplývá, že je nutné pečlivě připravit zkušební vzorek, tak abychom z jeho povrchu odstranili veškeré nečistoty např. okuje, rez, strusku, mastnotu apod. Materiál kontrolované součásti by měl být netečný k použitým chemikáliím např. k čističi povrchu a měl by být také neporézní, aby se zabránilo průniku penetrantu v celé kontrolované ploše a následné nesprávné indikaci vad.

Postup při zkoušce s barevným penetrantem:

1. Očištění zkušební vzorku od nečistot s následným osušením.
2. Nanesení penetrantu po celém vyhodnocovaném povrchu, 20 minut působení.
3. Důkladné odstranění penetrantu. Na povrchu vzorku nesmí zůstat žádný viditelný zbytek penetrantu.
4. Nanesení vývojky, 20 minut působení.
5. Vyhodnocení zkoušky

3.1.2 Kapilární zkouška na zámčích lopatek

Lopatky byly před provedením zkoušky čištěny v lihu v ultrazvukové pračce. Principem procesu je odstranění organických i neorganických nečistot pomocí kavitace. Základem kavitačního děje je vznik bublinek v čisticím médiu, toho se dosáhne přeměnou energie o vysoké frekvenci z ultrazvukového zdroje na akusticko-mechanické kmitání piezoelektrickými měniči (zahřívání média za současného působení střídavého tlaku).

Na zámčích lopatek byla provedena zkouška s využitím červeného penetrantu a bílé vývojky. Nanesení penetrantu i vývojky bylo provedeno formou postřiku. Vyhodnocované místa lopatky 1 až 5. strana koryta, hřbetu a také oblast rámečku.

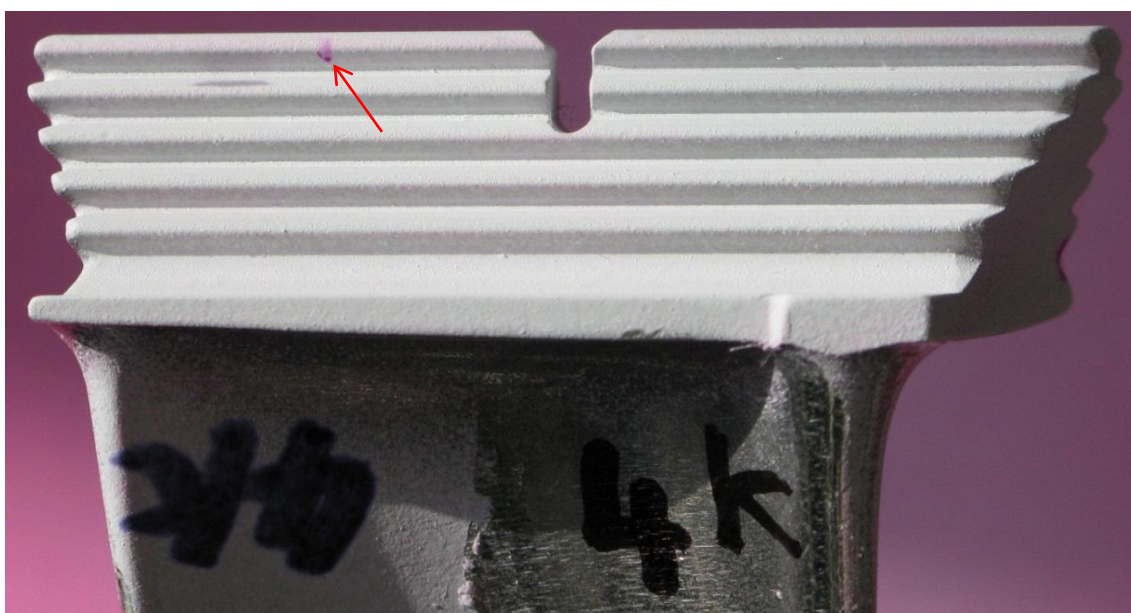
Penetrant: Overcheck Red, pod novým názvem Checkmor 300. (Chemetall)

- červený penetrant, fluorescenční za použití UV zdroje světla.

Vývojka: Overcheck White, pod novým názvem LD9. (Chemetall)

- inertní bílý prášek v rychleschnoucím médiu.

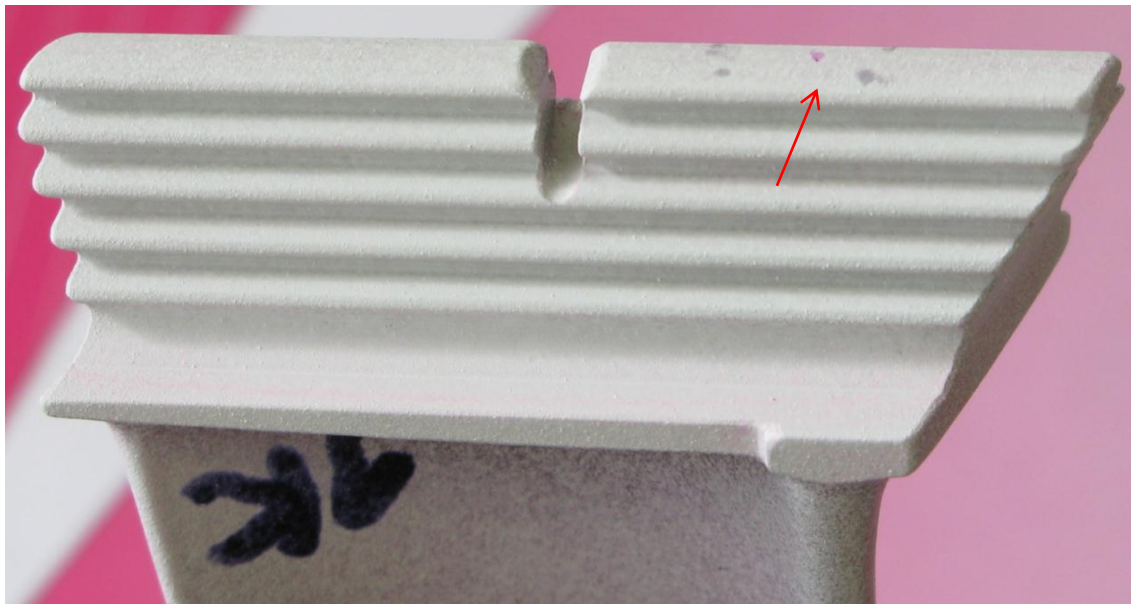
Kapilární zkouškou byly zjištěny indikace na zámčích lopatek ze strany koryta a čela. Lopatka č. 4 indikovala na prvním zubu zámku, avšak po leptání na zviditelnění makrostruktury a stereomikroskopii viz 3.1.3 nebyla zjištěna žádná vada.



Obr. 22 Lopatka č. 4, falešná indikace ze strany koryta lopatky

Lopatka č. 1.

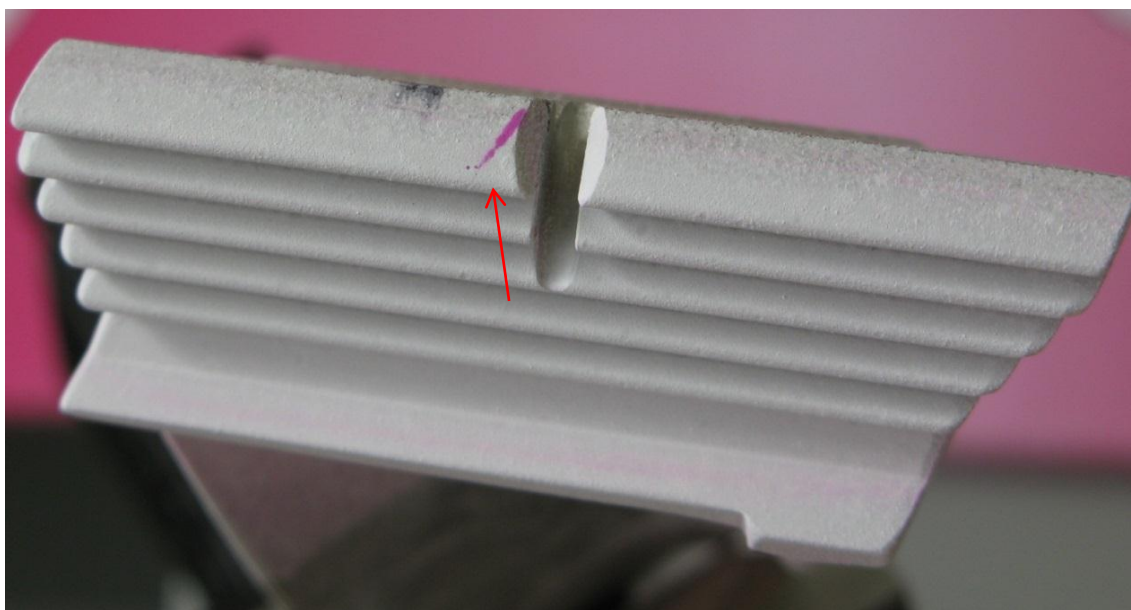
Na lopatce byla nalezena indikace ze strany čela zámku spíše plošného charakteru.



Obr. 23 Lopatka č. 1, indikace ze strany čela zámku lopatky

Lopatka č. 2.

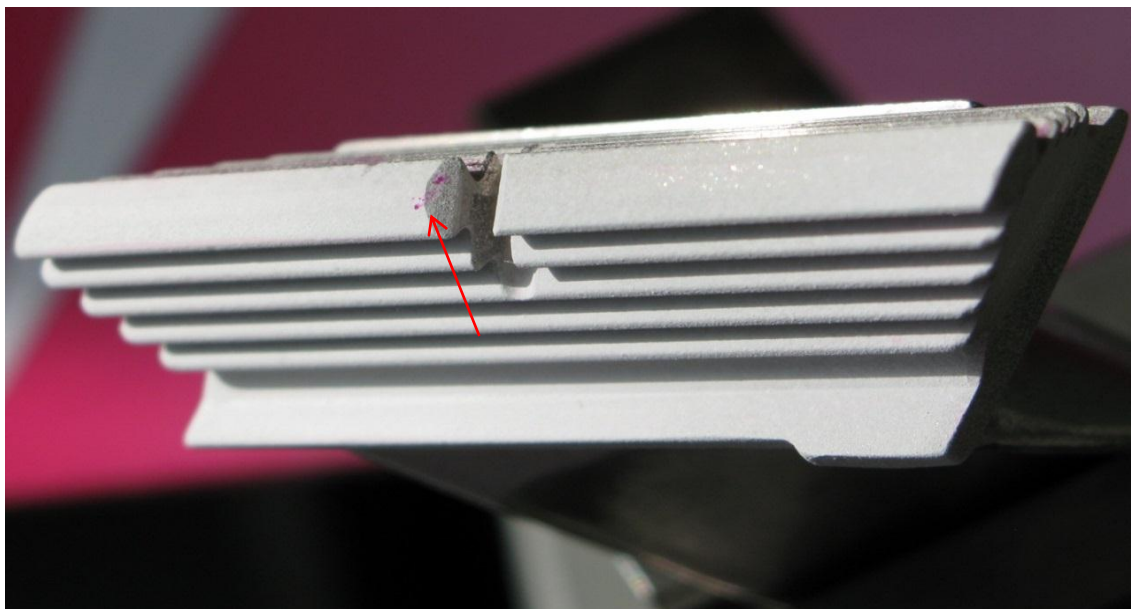
Na lopatce byla nalezena výrazná indikace ze strany čela zámku v těsné blízkosti drážky. Indikace byla čárového charakteru naznačující trhlinu.



Obr. 24 Lopatka č. 2, indikace ze strany čela zámku lopatky

Lopatka č. 3

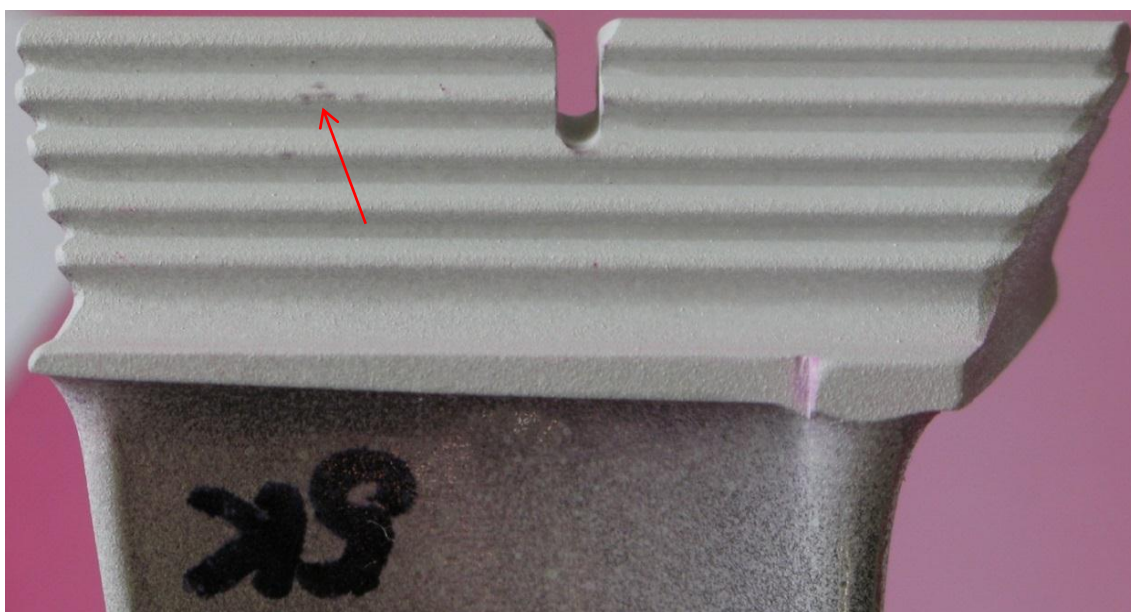
Na lopatce byla nalezena méně výrazná indikace ze strany čela zámku než u lopatky č. 2. Indikace zasahovala do drážky zámku a byla roztroušená.



Obr. 25 Lopatka č. 3, indikace ze strany čela zámku lopatky

Lopatka č. 5

Na lopatce byla nalezena nevýrazná indikace ze strany koryta lopatky. Indikace se nachází na vrcholu druhého zubu zámku.



Obr. 26 Lopatka č. 5, indikace ze strany koryta lopatky

Provedením kapilární zkoušky se podařilo indikovat vady na lopatkách, převážně ze strany čela zámku. Indikace se jeví spíše jako nevýrazné bodové a soustředěné kolem specifického místa. Výjimkou je lopatka č. 3, která sice nemá spojitý charakter indikace stejně jako u ostatních, ale rozložení je čárového charakteru a lopatka č. 2. s jasně spojitou čárovou indikací v blízkosti drážky zámku.

3.1.3 Stereomikroskopie

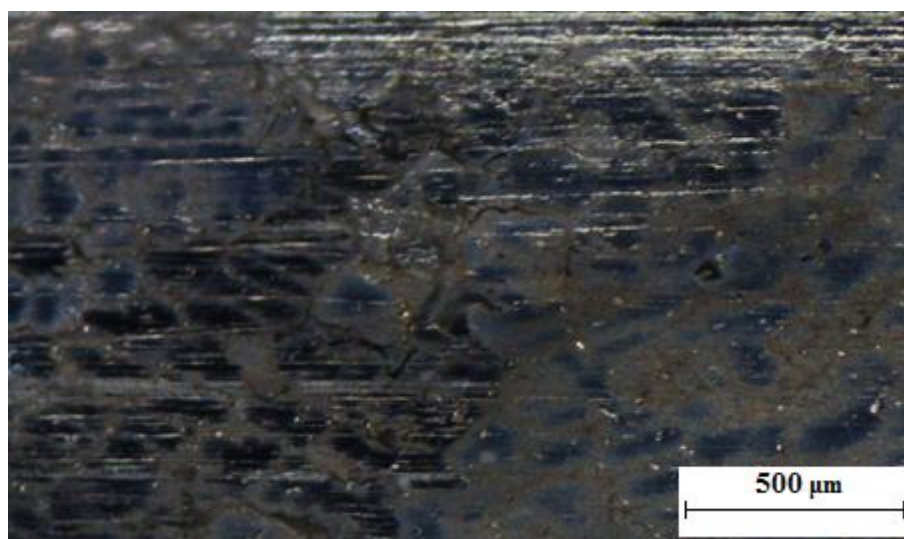
Pro stereomikroskopii bylo provedeno leptání zámků lopatek z důvodu zvýšení viditelnosti vady a její dokumentaci. Před samotným leptáním je lopatka vždy očištěna od vývojky a penetrantu v místech indikace.

Pro leptání bylo použito 100 ml kyseliny dusičné (HNO_3) a 100 ml peroxidu (30%). Doba leptání přibližně 20s.

Následuje dokumentace vad při zvětšení:

Lopatka č. 1.

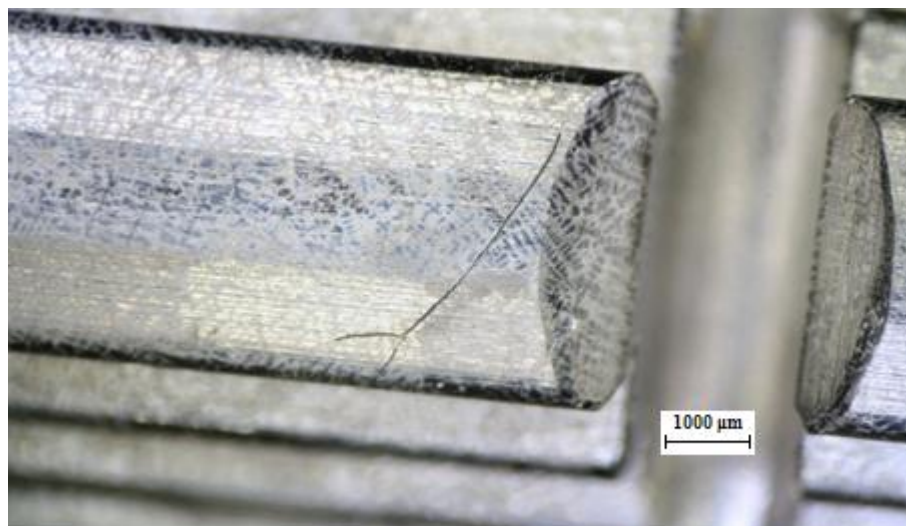
Na lopatce byla potvrzena indikace ze strany čela zámku nalezením vady plošného charakteru.



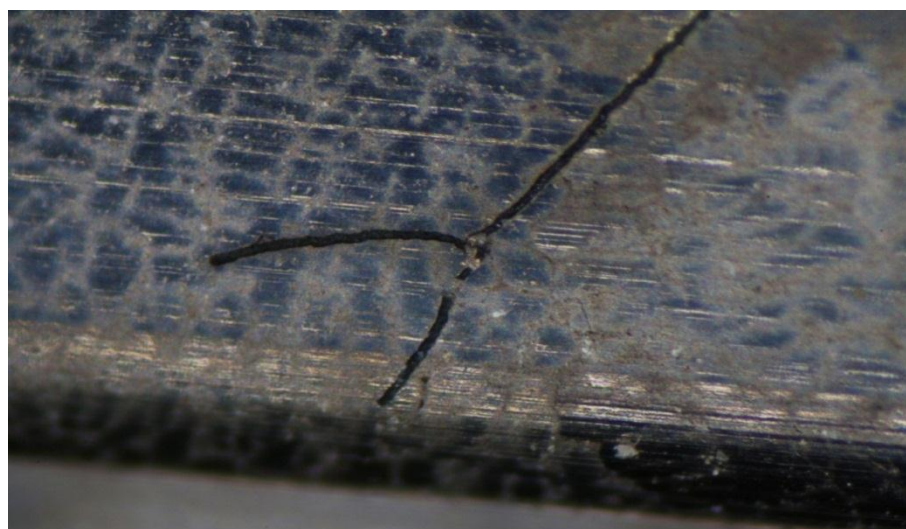
Obr. 27 Lopatka č. 1, zvětšení 50x

Lopatka č. 2.

Na lopatce byla potvrzena výrazná indikace ze strany čela zámku v těsné blízkosti drážky. Vada čárového charakteru rozvětvená na jednom konci, v místě rozvětvení má přerušovaný průběh.



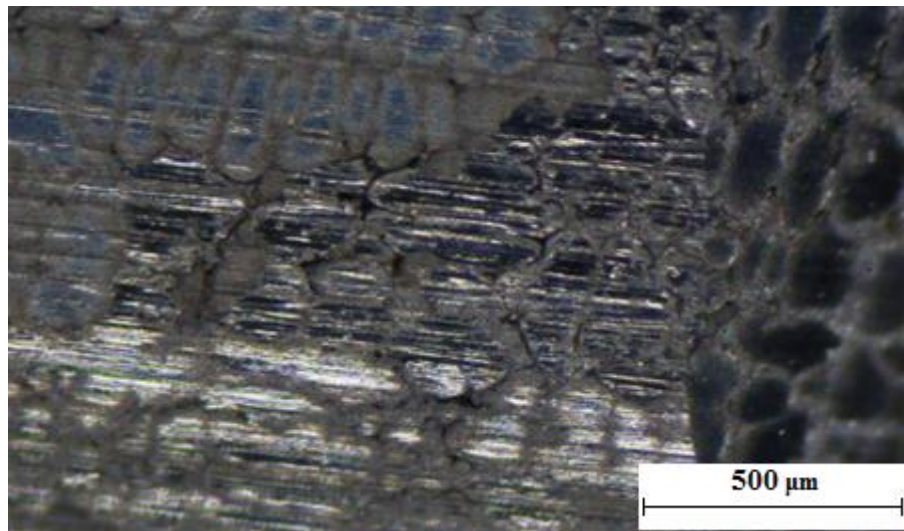
Obr. 28 Lopatka č. 2, zvětšení 12,5x



Obr. 29 Lopatka č. 2, zvětšení 50x

Lopatka č. 3

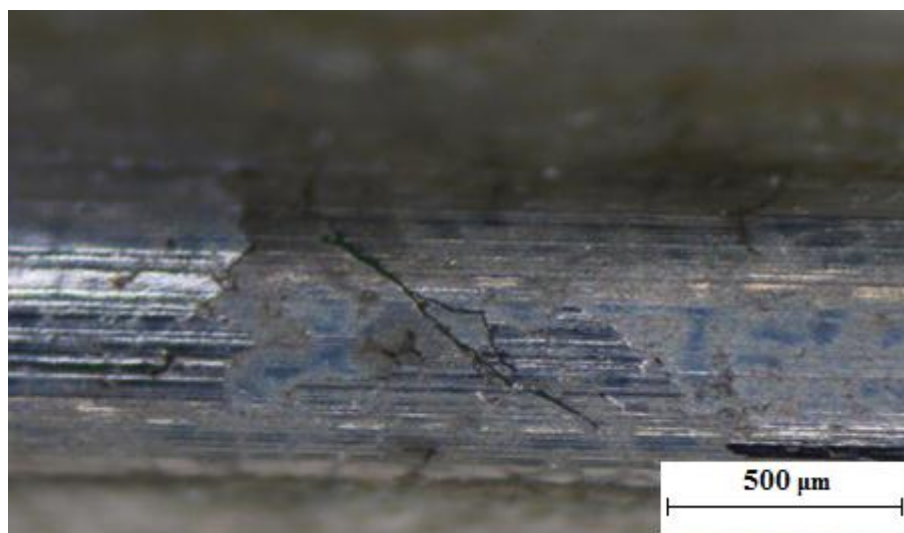
Na lopatce byla potvrzena indikace ze strany čela zámku podobná indikaci na lopatce č. 1. Nepotvrdil se tak čárový charakter z kapilární zkoušky.



Obr. 30 Lopatka č. 3, zvětšení 50x

Lopatka č. 5

Oproti kapilární zkoušce s roztroušenou a nevýraznou indikací byla po leptání zaznamenána vada čárového charakteru v místě odloupnuté tenké povrchové vrstvy.



Obr. 31 Lopatka č. 5, zvětšení 50x

Stereomikroskopií leptaných zámků lopatek byl potvrzen výskyt vad na zámcích, kromě lopatky č. 4, kde nebyla nalezena žádná vada. Muselo dojít k nedostatečnému odstranění penetrantu a to vedlo k falešné indikaci.

3.1.4 Příprava metalografických vzorků

Řezání vzorků provedeno rozbrušovací pilou Labotom-3 (Struers) *Obr. 32*. Řezané lopatky byly č. 1,3 a 5 (lopatka č. 4, falešná indikace, lopatka 2 byla vyhodnocována v rámci projektu, do kterého tato práce nezasahovala, a proto není dále uváděna). Řez byl proveden kolmo na zámky lopatek s malou přitlačnou silou na kotouč a vydatným chlazením tak, aby došlo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění. Místo řezu bylo zvoleno ve vzdálenosti od vady 1,5 až 2mm (přídavek na odbroušení tepelně ovlivněné vrstvy a leštění vzorku).



Obr. 32 Rozbrušovací pila Labotom-3 (Struers)

Zalisování do metalografických vzorků. Zařízení pro lisování za tepla CitoPress-10 (Struers) *Obr. 33*. Použité lisovací hmoty společnosti Struers, název Durofast a Multifast.

Durofast – epoxidová pryskyřice pro zalévání za tepla s vysokým podílem minerálního plniva, užívaná pro tvrdé materiály,

Multifast – Bakelitová (fenolformaldehydový polykondenzát) pryskyřice. Jedná se o běžnější reaktoplast v různých barvách pro identifikaci metalografických vzorků.

Postup lisování, vzorek je vložen do zalévacího válce na dosedací plochu, která je poprášena separátorem. Dalším krokem je přisypání jedné odměrky Durofastu a jedné odměrky Multifastu. Následuje uzavření zalévacího válce a lisování za teploty 180 °C s lisovacím tlakem 250 bar po dobu 5 min, konečnou fází je chlazení vodou za stálého tlaku.



Obr. 33 Metalografický lis CitoPress-10 (Struers)

Leštění vzorků pomocí preparačního systému Tegramin-25 (Struers) Obr. 34. Použité spotřební materiály od společnosti Struers.

SiC fólie – fólie karbidu křemíku, na pevném PET filmu, přes který je fólie připevněna na fixační disk MD-Gekko.

MD-Gekko – fixační disk pro fixaci všech nelepících brusných a leštících povrchů, lze použít i pro všechny běžné samolepící spotřební materiály,

MD-Disc – nosný kotouč pro všechny preparační povrchy, kotouč je vyroben s vysokou rovinností a je opatřen magnetickou vrstvou, jenž udrží všechny preparační povrchy,

MD-Allegro – kompozitní kotouč určený pro jemné broušení materiálů o vyšší pevnosti než 150 HV při použití diamantové leštící suspenze nebo spreje,

MD-Dac – diamantové leštící sukno, slouží pro odstranění deformací po jemném broušení,

1. Broušení fólií SiC 80 – parametry cyklu: zatížení na vzorek $F = 35 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot/min}$, čas = 2 až 4 min dle vizuální kontroly, chlazení vodou,
2. Broušení fólií SiC 120 – parametry cyklu: zatížení na vzorek $F = 30 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot/min}$, čas = 3 min, chlazení vodou,
3. Broušení fólií SiC 320 – parametry cyklu: zatížení na vzorek $F = 30 \text{ N}$, otáčky $n = 300 \text{ ot/min}$, čas = 3 min, chlazení vodou,
4. Jemné broušení kompozitním kotoučem MD-Allegro při použití diamantové suspenze $9 \mu\text{m}$ – parametry cyklu: zatížení na vzorek $F = 25 \text{ N}$, otáčky $n = 150 \text{ ot/min}$, čas = 3 min 30 s,
5. Leštění leštícím sukнем MD-Dac při použití diamantové suspenze $3 \mu\text{m}$ – parametry cyklu: zatížení na vzorek $F = 25 \text{ N}$, otáčky $n = 150 \text{ ot/min}$, čas = 3 min 30 s,



Obr. 34 Preparační systém Tegramin-25 (Struers)

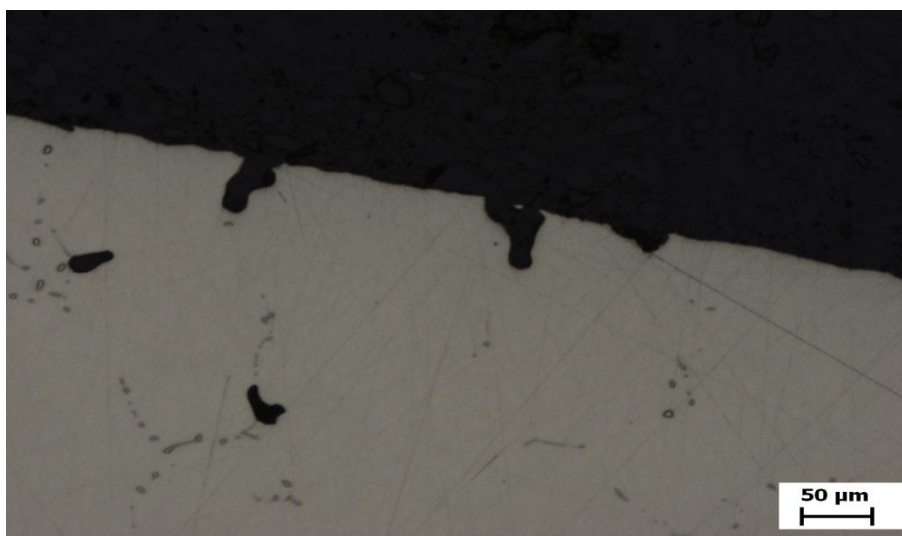


Obr. 35 Hotové metalografické vzorky

Výsledkem přípravy metalografických vzorků bylo vytvoření zalisovaných řezů lopatek přes vadu a jejich naleštění pro hodnocení na metalografickém mikroskopu a měření tvrdosti v povrchových vrstvách.

3.1.5 Metalografická analýza

Při analýze řezu přes vadu lopatky č. 1 bylo zaznamenáno několik vad ústících na povrch lopatky. Nejsou hluboké a jejich okraje jsou hladké stejně jako u těch vad, které se nacházejí uvnitř materiálu, viz *Obr. 36*. Dokumentované vady připomínají vady slévárenské, charakteru bublin, které mohou vznikat vlivem nedostatečného odplynění nebo vývinem plynů z formovací směsi.



Obr. 36 Lopatka č. 1, metalografický vzorek, zvětšení 100x

Analýzou řezu lopatky č. 3 bylo dosaženo stejných výsledků jako v případě lopatky č. 1.



Obr. 37 Lopatka č. 3, metalografický vzorek, zvětšení 25x



Obr. 38 Lopatka č. 3, metalografický vzorek, zvětšení 100x

Lopatka č. 5 přinesla rozdílné výsledky od předchozích. Vady v materiálu nemají hladké okraje, ale spíše nepravidelné. Takovéto charakteristiky mohou vznikat při oxidaci taveniny. Potvrzení by bylo možné provedením rozboru chemického složení.



Obr. 39 Lopatka č. 5, metalografický vzorek, zvětšení 50x

Metalografickou analýzou byl zjištěn výskyt vad nejen povrchových, ale i podpovrchových. Jejich vzhled nasvědčuje, že by se mohlo jednat o slévárenské vady.

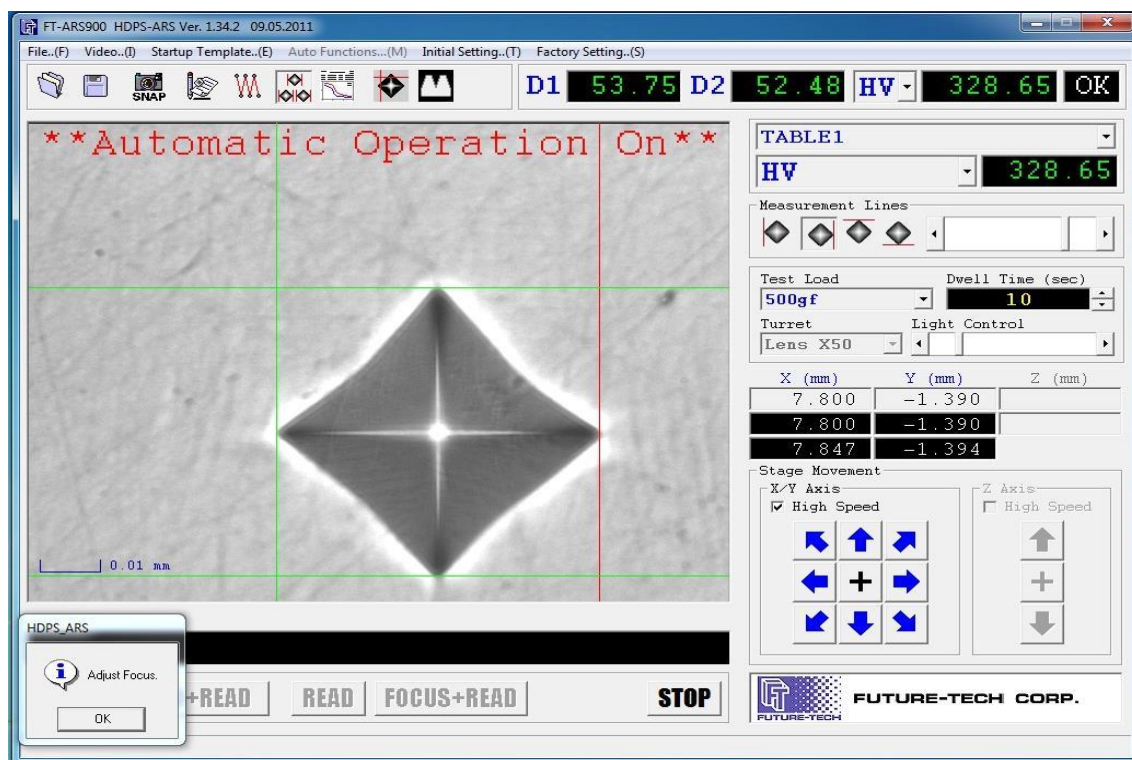
3.1.6 Měření tvrdosti na zámčích lopatek

Měření provedeno na mikrotvrdoměru FUTURE-TECH FM-100 *Obr. 40*.



Obr. 40 Mikrotvrdoměr FM-100 (FUTURE-TECH)

Zkouška tvrdosti na mikrotvrdoměru FM-100 byla řízena v softwarovém prostředí, viz *Obr. 41*. Při zatížení 500g (zatížení přibližně $F = 4,903 \text{ N}$, HV 0,5 dle *Tab. 2*), doba působení zkušebního zatížení 10s.

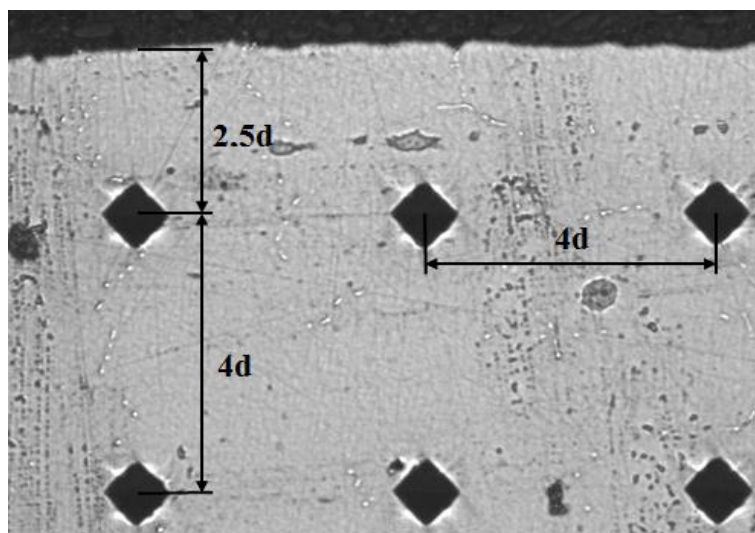


Obr. 41 Softwarové prostředí pro měření tvrdosti

Zkoušený vzorek byl pevně upnut v mikrotvrdoměru, aby se zabránilo pohybu při zatěžování. Strategie měření zvolena s ohledem na požadavek minimální vzdálenosti středu vtisku od okraje zkoušeného vzorku ($2,5d$) a minimální vzdálenosti středů dvou sousedních vtisků ($4d$) podle *Obr. 42*.

Tab. 2 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [10]

Zkouška tvrdosti		Zkouška tvrdosti při nízkém zatížení		Zkouška mikrotvrdosti	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]	Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2942
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807



Obr. 42 Rozložení vtisků ve vzorku

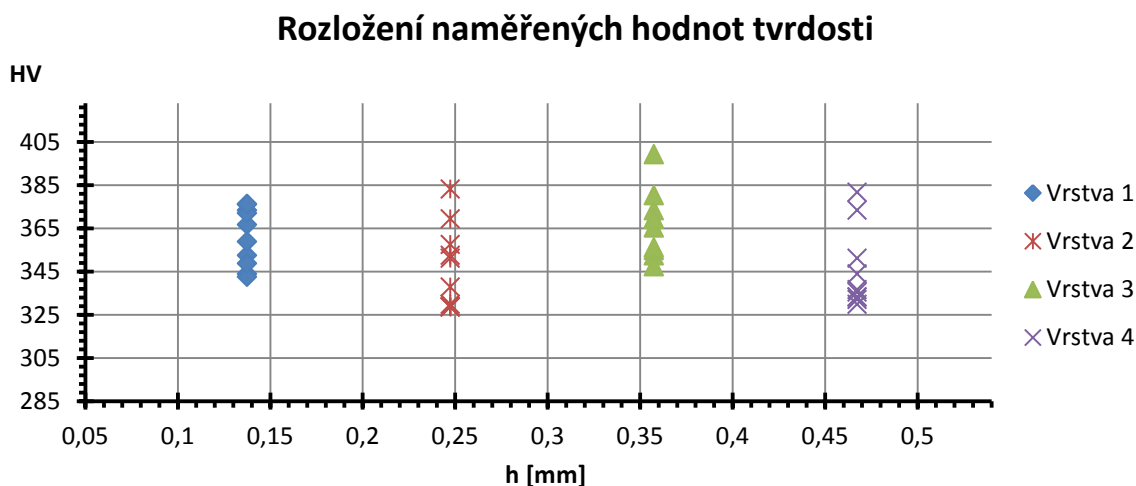
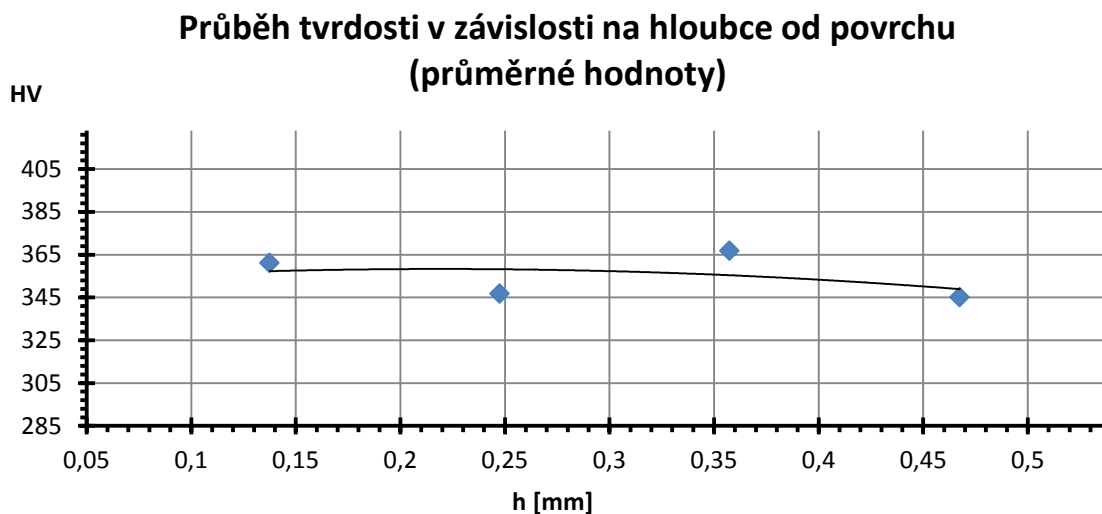
Počet měřených vtisků na jednu vrstvu byl zvolen deset. Takový počet vzhledem k rozměru měřené plochy nebylo možné umístit na jeden zub zámku, a proto se přistoupilo k měření pěti vtisků na jednom zubu zámku, tzn. jedna měřená vrstva je rozdělena na dva zuby, s přihlédnutím ke stejné povrchové úpravě všech zubů je řešení vhodné. Dodržením rozměru $4d$ mezi vtisky by plánované čtyři vrstvy byly od sebe příliš vzdáleny. Řešením se stalo rozšíření měření o další dva zuby. Toto řešení umožnilo měření na dvou zubech po pěti vtiscích ve vzdálenosti od kraje $2,5d$ a mezi vtisky $4d$, zatímco na zbývajících dvou ve vzdálenostech $4,5d$ od kraje a $4d$ od této řady vtisků (výsledné rozmístění jednotlivých řad vtisků pak je $2,5d$; $4,5d$; $6,5d$ a $8,5d$, konkrétní hodnoty hloubky měření jsou např. v *Tab. 3*.

Lopatka č. 1

Tab. 3 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 1

Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Hloubka od povrchu [mm]	0,1375									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	52,10	50,82	52,65	50,27	52,47	50,09	50,46	49,73	51,37	49,36
	Úhlopříčka d_2 [μm]	50,48	49,75	51,21	49,38	51,57	49,75	51,21	49,57	51,75	49,93
	Tvrdość [1]	352,45	366,67	343,84	373,42	342,64	372,06	358,84	376,18	348,74	376,19
	Ø Tvrdość [1]	361,10									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Hloubka od povrchu [mm]	0,2475									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	53,75	51,01	51,74	48,99	52,29	51,01	52,65	53,38	53,75	53,75
	Úhlopříčka d_2 [μm]	52,48	50,84	50,84	49,38	50,48	49,20	52,12	52,85	52,30	52,48
	Tvrdość [1]	328,65	357,54	352,46	383,2	351,2	369,34	337,88	328,66	329,78	328,65
	Ø Tvrdość [1]	346,74									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Hloubka od povrchu [mm]	0,3575									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	51,92	51,74	51,01	50,64	51,92	49,18	50,27	51,37	48,26	49,91
	Úhlopříčka d_2 [μm]	50,66	50,48	49,20	49,02	50,11	49,57	50,48	51,94	48,11	50,30
	Tvrdość [1]	352,46	354,98	369,34	373,41	356,24	380,37	365,36	347,51	399,32	369,37
	Ø Tvrdość [1]	366,84									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Hloubka od povrchu [mm]	0,4675									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	53,56	52,65	53,75	52,30	53,38	51,55	50,27	49,91	53,02	53,38
	Úhlopříčka d_2 [μm]	52,12	51,21	52,30	52,30	51,75	51,21	49,38	48,66	51,94	52,12
	Tvrdość [1]	332,06	343,84	329,78	333,22	335,53	351,22	373,42	381,76	336,7	333,21
	Ø Tvrdość [1]	345,07									

Vyhodnocení tvrdosti lopatky č. 1:



Naměřená tvrdost v první vrstvě dle grafu odpovídá průměrné hodnotě 361 HV 0,5, poté průměrná hodnota mírně klesne, což může být způsobeno nehomogenitou materiálu po lití a umístěním vtisků v měkčích oblastech. V třetí vrstvě dochází k nárůstu tvrdosti na maximální průměrnou hodnotu 367 HV 0,5, po dosažení maxima tvrdost klesá směrem k základnímu materiálu.

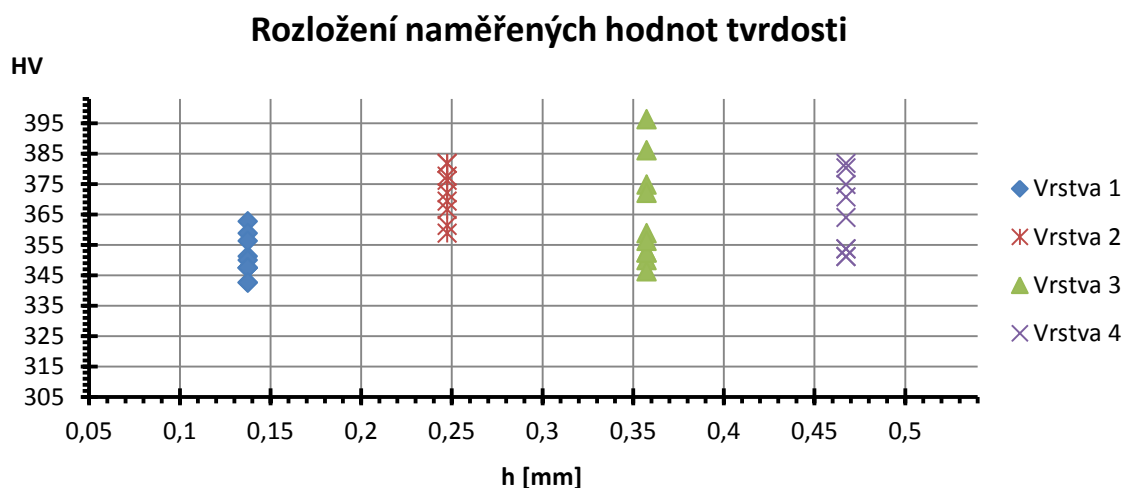
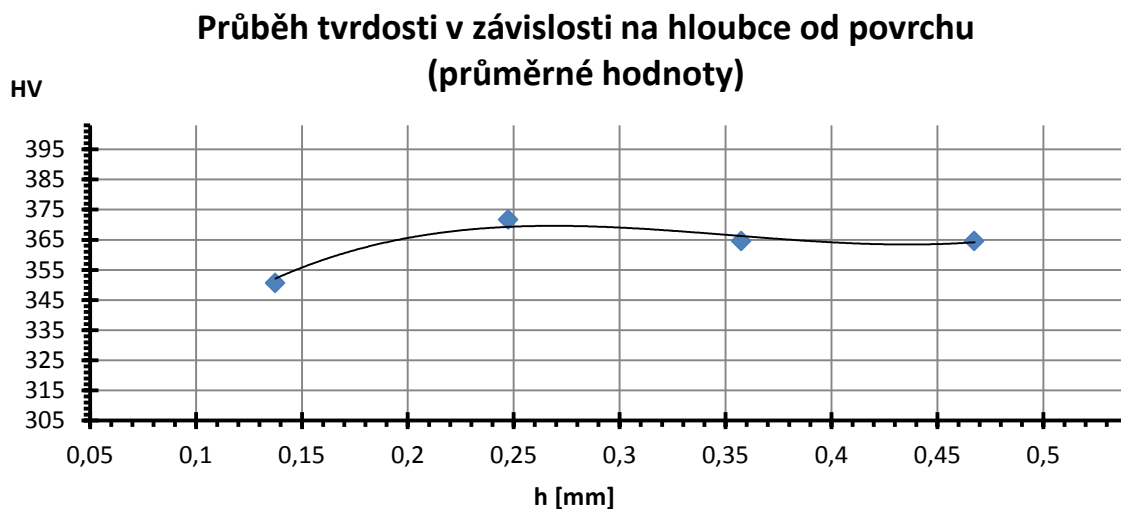
- z průběhu tvrdosti na zámku lopatky č. 1, není zřetelný výrazný vliv broušení na první měřenou vrstvu,
- hodnoty jednotlivých vrstev se liší velmi málo, povrchová vrstva má tak téměř konstantní tvrdost v celé měřené hloubce.

Lopatka č. 3

Tab. 4 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 3

Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Hloubka od povrchu [mm]	0,1375									
	Úhlopříčka d ₁ [μm]	51,37	51,19	51,19	52,10	51,92	51,19	51,74	51,92	51,19	52,10
	Úhlopříčka d ₂ [μm]	49,75	51,57	50,48	51,94	51,39	51,75	51,57	51,39	50,84	51,94
	Tvrdost [1]	362,71	351,22	358,82	342,64	347,5	349,98	347,51	347,5	356,26	342,64
	Ø Tvrdost [1]	350,68									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Hloubka od povrchu [mm]	0,2475									
	Úhlopříčka d ₁ [μm]	49,73	51,37	50,46	50,46	51,19	53,02	49,73	51,19	51,74	50,82
	Úhlopříčka d ₂ [μm]	48,84	49,93	48,84	48,66	49,02	51,75	48,84	49,38	49,93	49,02
	Tvrdost [1]	381,77	361,4	376,16	377,55	369,34	337,87	381,77	366,66	358,81	372,05
	Ø Tvrdost [1]	371,72									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Hloubka od povrchu [mm]	0,3575									
	Úhlopříčka d ₁ [μm]	51,74	49,36	51,01	51,19	50,09	51,19	49,91	49,18	51,37	52,29
	Úhlopříčka d ₂ [μm]	51,21	50,11	51,57	50,48	50,11	51,39	49,93	48,84	50,66	51,21
	Tvrdost [1]	349,97	374,81	352,48	358,82	396,36	352,47	372,07	386,05	356,26	346,27
	Ø Tvrdost [1]	364,56									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Hloubka od povrchu [mm]	0,4675									
	Úhlopříčka d ₁ [μm]	52,10	51,01	49,91	52,10	51,01	59,78	50,46	50,27	52,10	52,47
	Úhlopříčka d ₂ [μm]	50,66	49,02	48,66	50,66	49,93	59,95	49,02	48,47	50,30	49,93
	Tvrdost [1]	351,2	370,69	381,76	351,2	364,03	258,7	374,79	380,34	353,71	353,7
	Ø Tvrdost [1]	364,60									

Vyhodnocení tvrdosti lopatky č. 3:



Během měření tvrdosti na zámku lopatky č. 3, došlo k vytvoření dvou viditelně větších vtisků sousedících s vadami v materiálu, tyto dva vtisky viz *Tab. 4*, nacházející se v druhé a čtvrté vrstvě s číslem vtisku šest v obou případech, byly vyřazeny ze zpracování. Naměřená tvrdost v první vrstvě podle grafu odpovídá průměrné hodnotě 351 HV 0,5, v druhé vrstvě dochází k nárůstu tvrdosti na maximální naměřenou průměrnou hodnotu 372 HV 0,5, následně ve dvou zbývajících vrstvách tvrdost klesne na průměrnou hodnotu 365 HV 0,5.

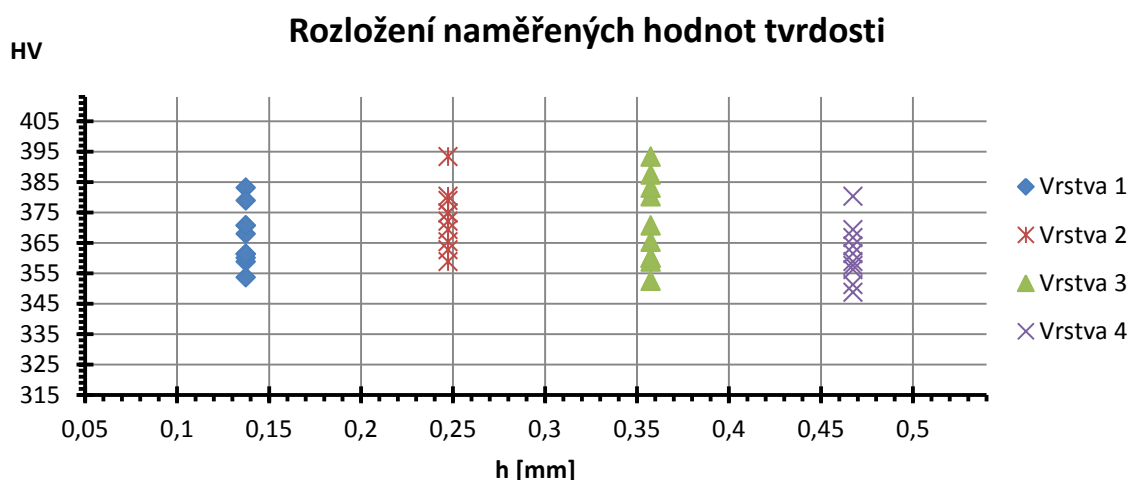
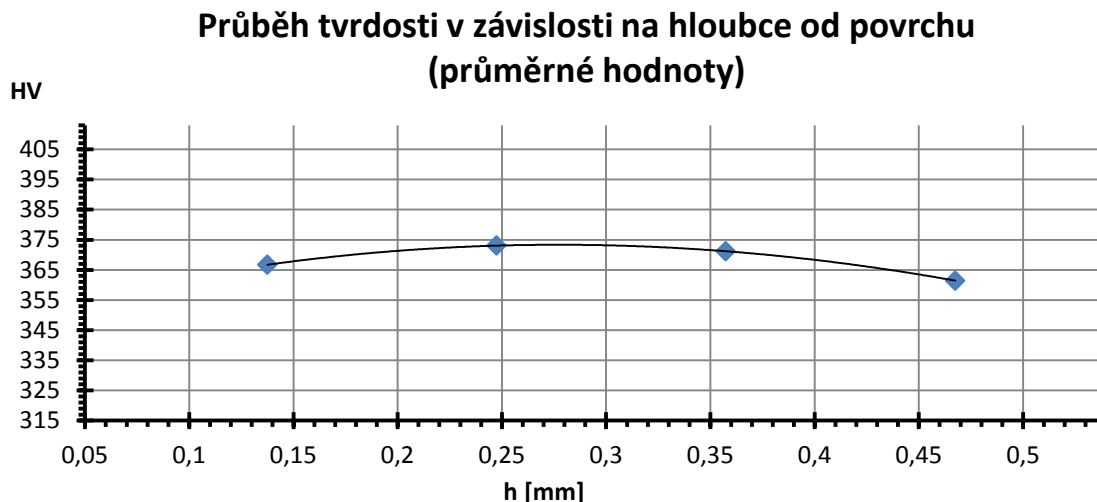
- z průběhu tvrdosti na zámku lopatky č. 3, je již zřetelný vliv broušení, kdy vrstva nejbližší povrchu má nejnižší hodnotu tvrdosti vlivem narušení jemnými drážkami po dráze jednotlivých zrn. Následuje tvrdší deformačně zpevněná vrstva, od které tvrdost opět klesá směrem k základnímu materiálu.

Lopatka č. 5

Tab. 5 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 5

Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Hloubka od povrchu [mm]	0,1375									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	50,64	49,54	49,91	51,19	51,19	51,19	50,46	51,01	50,46	51,74
	Úhlopříčka d_2 [μm]	49,38	48,84	49,02	50,48	50,11	50,30	49,93	50,30	49,57	50,66
	Tvrdość [1]	370,7	383,19	378,95	358,82	361,41	360,11	368,01	361,41	370,7	353,72
	∅ Tvrdość [1]	366,70									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Hloubka od povrchu [mm]	0,2475									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	50,64	51,19	49,54	50,82	50,27	51,19	48,63	49,54	50,09	50,27
	Úhlopříčka d_2 [μm]	49,20	49,93	49,20	50,84	49,20	49,57	48,47	50,66	49,38	48,66
	Tvrdość [1]	372,05	362,71	380,36	358,83	374,79	365,34	393,34	369,37	374,79	378,94
	∅ Tvrdość [1]	373,05									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Hloubka od povrchu [mm]	0,3575									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	50,09	49,54	49,54	49,18	51,19	51,55	51,19	50,27	51,74	50,82
	Úhlopříčka d_2 [μm]	48,66	48,84	48,29	47,93	50,48	51,03	50,30	49,75	49,75	49,93
	Tvrdość [1]	380,35	383,19	387,48	393,33	358,82	352,47	360,11	370,7	360,1	365,35
	∅ Tvrdość [1]	371,19									
Č. vrstvy	Č. vtisku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Hloubka od povrchu [mm]	0,4675									
	Úhlopříčka d_1 [μm]	51,74	51,37	49,73	50,64	50,82	52,29	51,37	51,74	50,27	49,73
	Úhlopříčka d_2 [μm]	51,03	50,48	49,02	49,93	50,11	50,84	50,30	50,30	49,93	51,57
	Tvrdość [1]	351,21	357,53	380,36	366,68	364,03	348,72	358,82	356,25	369,36	361,44
	∅ Tvrdość [1]	361,44									

Vyhodnocení tvrdosti lopatky č. 5:



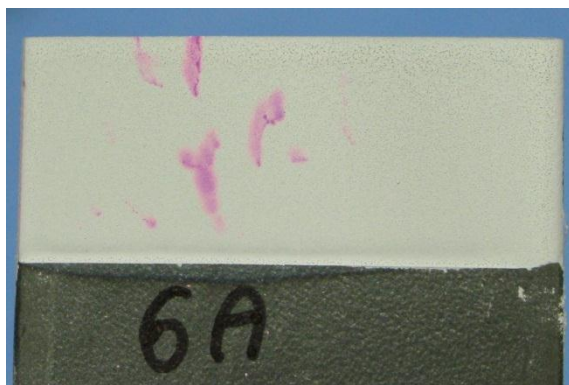
Naměřená tvrdost v první vrstvě dle grafu odpovídá průměrné hodnotě 367 HV 0,5, v druhé vrstvě dochází k nárůstu tvrdosti na maximální naměřenou průměrnou hodnotu 373 HV 0,5 a až do třetí vrstvy se hodnoty drží nad 370 HV 0,5 s následným poklesem tvrdosti směrem do základního materiálu. Avšak tvrdost ve čtvrté vrstvě je nižší než tvrdost první měřené vrstvy což nasvědčuje, že povrchová vrstva nebyla poškozena v takové míře jako u lopatky č. 3, a proto je výraznější vliv zpevnění.

- Průběh tvrdosti je obdobný jako u lopatky č. 3 s tím rozdílem, že poslední měřená vrstva má hodnotu tvrdosti nižší než vrstva první.

3.1.7 Měření drsnosti

Měření bylo provedeno v měrovém a školicím středisku Carl Zeiss, České učení technické v Praze. Měřicí zařízení MarSurf XCR 20.

Pro snazší měření drsnosti na zámcích lopatky byly vytvořeny vzorky ve formě hranolu, které se dají lépe upnout. *Obr. 43* vzorek odpovídající rovinným broušeným plochám (rámeček lopatky), *Obr. 44* hranol pro měření drsnosti na zubech. Na všech hranolech bylo provedeno měření na dvou plochách a na každé z nich změřeny tři profily.



Obr. 43 Hranol rovinný



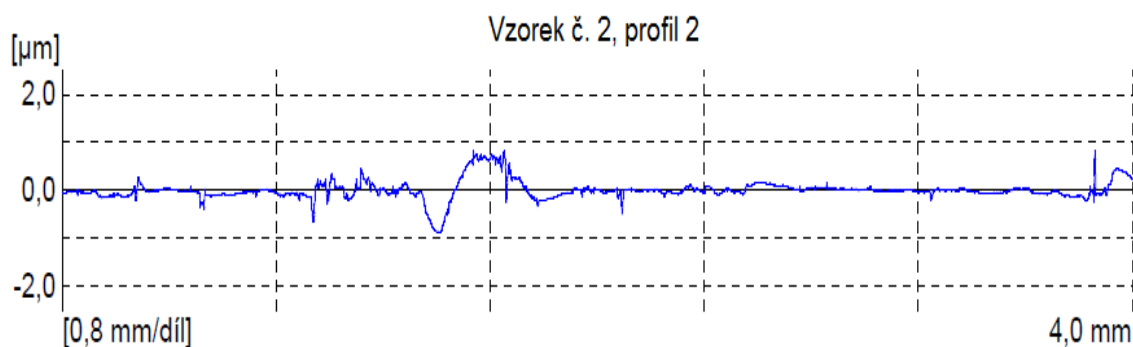
Obr. 44 Hranol tvarový

Tab. 6 Identifikace vzorků pro měření drsnosti

Č. vzorku	Dokončení povrchu	Druh hranolu	Označení měřené plochy
1	Hrubovacím kotoučem	Rovinný	A, B
2	Hrubovacím kotoučem	Tvarový	Drážka, hřbet
3	Hrubovacím kotoučem a kotoučem na čisto	Rovinný	A, B
4	Hrubovacím kotoučem a kotoučem na čisto	Tvarový	Drážka, hřbet
5	Kotoučem na čisto bez hrubování	Rovinný	A, B
6	Kotoučem na čisto bez hrubování	Rovinný	A, B

Práce obsahuje pouze část měření z celkového projektu z ilustračních důvodů a zaměřuje se především na měření zubů zámek (hranol tvarový).

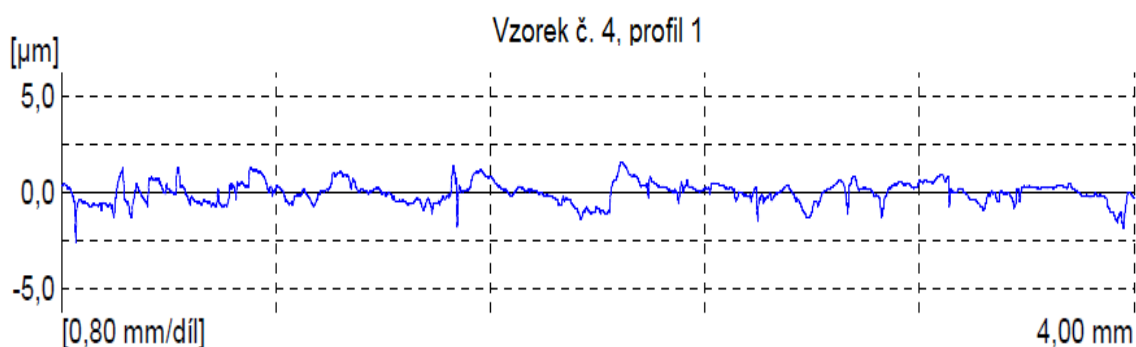
Měření drsnosti vzorku č. 2, drážka zubů zámku



Tab. 7 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti vzorku č. 2, drážka

Č. profilu	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]
1	0,134	1,927	5,04	1,5
2	0,114	1,001	1,71	0,58
3	0,104	1,349	3,45	1,02

Měření drsnosti vzorku č. 4, hřbet zubů zámku



Tab. 8 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti vzorku č. 4, hřbet

Č. profilu	Ra [μm]	Rz [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]
1	0,437	3,057	4,21	1,21
2	0,469	4,321	8,69	2,78
3	0,155	1,47	2,2	0,56

V celkovém projektu se drsnost drážky tvarového hranolu pohybuje v rozmezí hodnot Ra 0,104 – 0,134 μm vzorek č. 2 a 0,153 – 0,49 μm vzorek č. 4. Hodnota největší výšky profilu Rz pak v rozmezí 1,001 – 1,927 μm vzorek č. 2 a 1,643 – 4,827 μm vzorek č. 4. Kvalita povrchu hřbetu dosahuje u vzorku č. 2 horších hodnot Ra až 0,709 μm a Rz až 7,104 zatímco vzorek č. 4 má hodnoty srovnatelné s měřením v drážce.

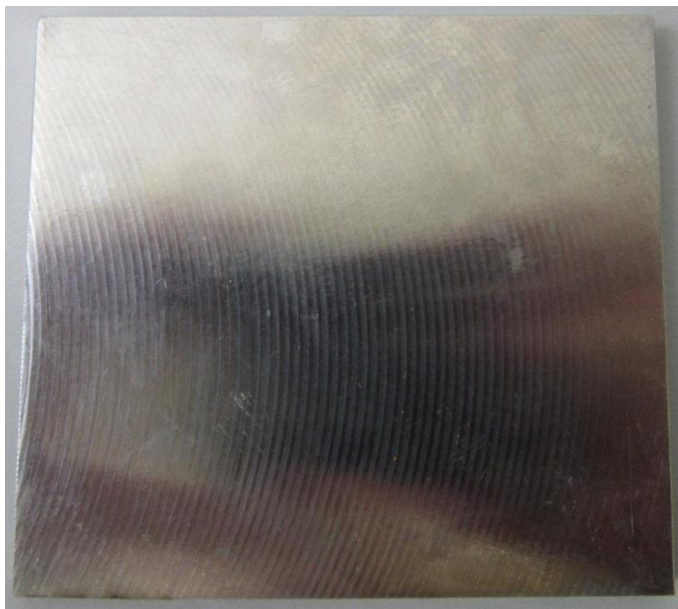
3.2 Měření zbytkových napětí

3.2.1 Vzorky

Zbytková napětí byla určována na vzorcích z materiálu Ti-6Al-4V:

1. vzorek drátově řezaný (technologie WEDM),
2. vzorek čelně frézovaný,
3. vzorek frézovaný kulovou frézou, následně žíhaný na odstranění vnitřních pnutí, kuličkovaný a dokončovaný elektrolytickým leštěním,
4. vzorek dokončovaný pomocí laser-peeningu.

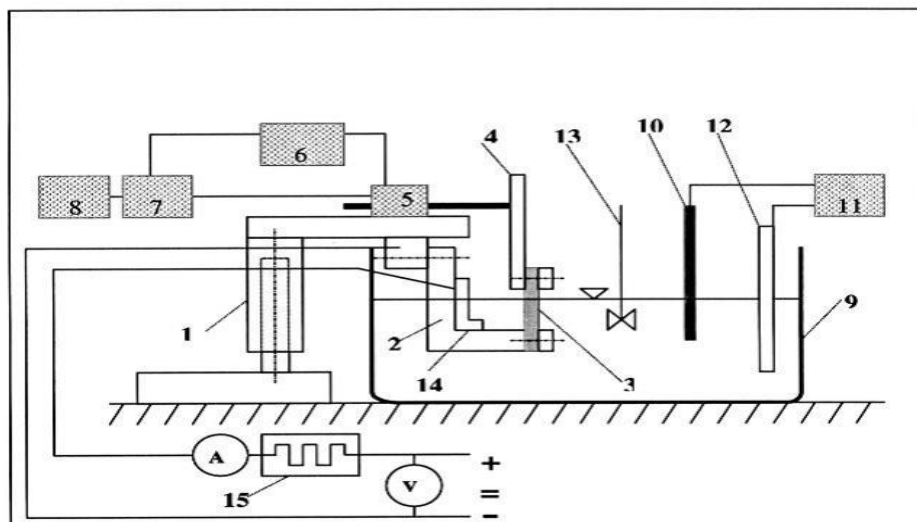
Vzorky byly připraveny z dodaných destiček *Obr. 45*. Jako nejvhodnější technologie dělení se jeví drátové řezání z důvodu malé ovlivněné hloubky viz 3.2.6 vyhodnocení vzorku č. 1. Velikost vzorků nemusí odpovídat předem stanoveným rozměrům, jelikož jednotlivé rozměry vstupují do výpočtu zbytkového napětí.



Obr. 45 Čelně frézovaná titanová destička

3.2.2 Zařízení

Měření provedeno pomocí metody elektrolytického odleptávání povrchových vrstev. Schéma metody *Obr. 46*.



Obr. 46 Schéma měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání [14]

1 – nosný stojan, 2 – upínací přípravek, 3 – leptané těleso, 4 – měřicí praporek, 5 – indukční snímač, 6 – napájení, 7 – obvod nastavení polohy snímače, 8 – registrační zařízení, 9 – nádoba obsahující elektrolyt, 10 – teploměr, 11 – spínací obvod (relé), 12 – topné těleso, 13 – míchání elektrolytu, 14 – pracovní elektroda, 15 – měnič.

Reálné zařízení pro měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání umístěné v laboratoři ČVUT v Praze viz *Obr. 47*.



Obr. 47 Zařízení pro měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání

Elektrolyt zvolen v závislosti na leptaném materiálu, přičemž pro slitiny titanu se během let praktických zkušeností s elektrolytickým leptáním na ČVUT v Praze osvědčil elektrolyt na základě složení od společnosti Struers s hlavním podílem kyseliny octové (CH_3COOH), malým podílem kyseliny chlorovodíkové (HCl) a fluorovodíkové (HF). Kyselina octová silně zapáchá a často se nahrazuje lihem. Kyselina fluorovodíková leptá sklo, proto je nádoba s lázní elektrolytu vyrobena z odolného plastu. Při měření je lázeň míchána (magnetickým míchadlem) a je udržována teplota v rozmezí 18 až 25 °C.

Vzorek na jednom konci pevně upnutý v přípravku je vodivě spojen s pracovní elektrodou a na druhém konci je připevněn měřicí praporek. Měřicí praporek musí být dostatečně tuhý a mít minimální hmotnost tak, aby se sám nedeformoval nebo svou vahou nedeformoval tenké vzorky. Měřicí snímač (citlivost 0,1 μm) zachycuje deformaci vzorku z pohybu praporku, který je nastaven kolmo ke snímači (jedná se o průhyb konce vetknutého nosníku). Veškeré plochy, kromě plochy leptané je třeba izolovat, aby docházelo k leptání pouze na požadovaném místě vzorku a abychom ochránili zařízení před účinky elektrolytu. Ochranným materiálem používaným v laboratoři ČVUT v Praze je směs vosků (včelí a lyžařské), důvodem pro použití směsi vosků jsou příznivé vlastnosti, izoluje el. proud, chrání před elektrolytem a je pružný tzn. nepopraská při deformaci vzorku.

Pro metodu je důležitá správná vzdálenost elektrod, na níž nelineárně závisí intenzita úběru. Dalším parametrem je nastavení proudové hustoty, kde při správné hodnotě je velikost úběru téměř konstantní (lze ověřit kalibrační křivkou). Řízení procesu bylo provedeno pomocí proudové stabilizace, při němž kolísání napětí indikuje zda dochází k leptání (lze využít i napěťové stabilizace).

3.2.3 Postup měření

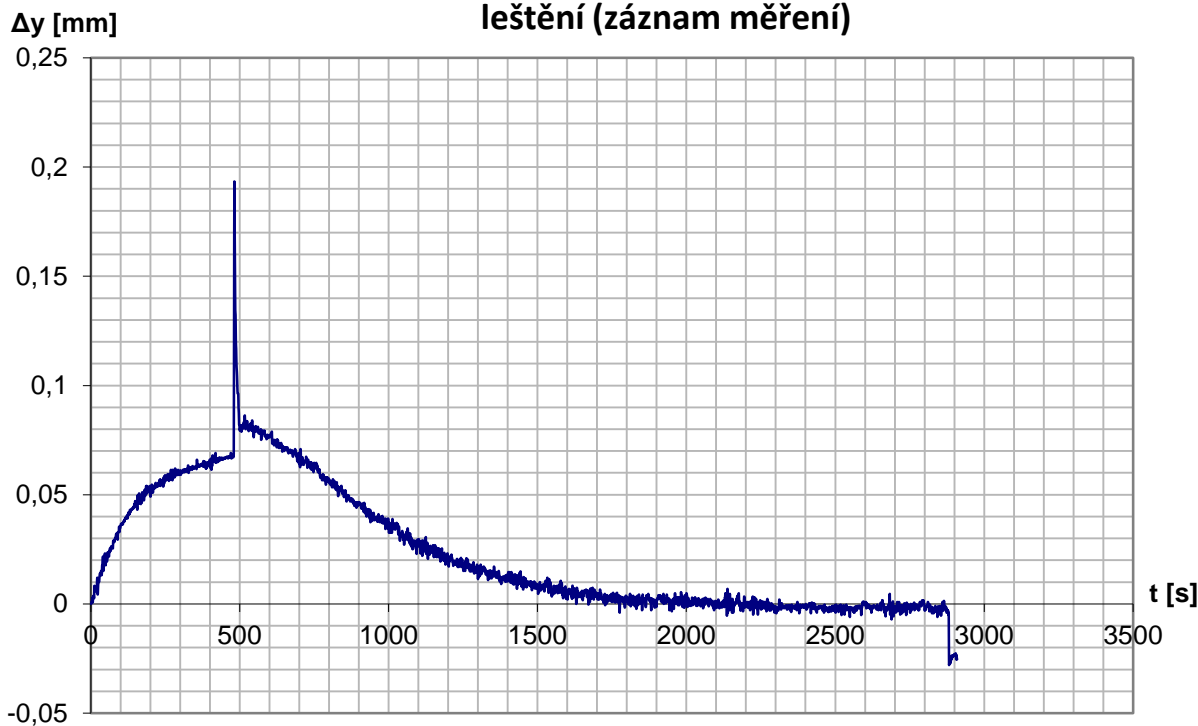
1. Zvážení vzorku – odleptáním části materiálu dochází k váhovému úbytku a tento úbytek slouží k určení odleptané tloušťky vrstvy,
2. Změření tloušťky a šířky vzorku,
3. Změření vzdálenosti od leptané plochy do středu čidla,
4. Izolování vzorku pomocí lepicí pásky – vzorek je pečlivě oblepen páskou kromě konce, který je určen k vodivému spojení a druhého konce, na který je připevněn měřicí praporek. Vytvořením otvoru v zalepené části vznikne leptaná plocha (lepicí páska je použita, protože při nanášení vosku v těsné blízkosti leptané plochy hrozí její znečištění a tím znehodnocení měření),
5. Připevnění měřicího praporku na vzorek,
6. Zavoskování vrchní části vzorku a části připevněného praporku, která bude zasažena elektrolytem,
7. Upnutí vzorku s praporkem do přípravku,
8. Nastavení čidla do takové vzdálenosti od praporku, aby se praporek nacházel přibližně uprostřed měřicího rozsahu (mezera přibližně 1,5 mm),
9. Zavoskování spodní části vzorku a přípravku ponořením do voskové lázně, (nyní je vše kromě leptané plošky a části praporku, který není zasažen lázní elektrolytu odizolováno),
10. Ponoření do nádoby s elektrolytem – nosný stojan se nadzvedne, otočí a zaizolované části se ponoří do lázně položením stojanu,
11. Zapnutí záznamu deformace – indukční snímač je připojen na počítač,
12. Vyrovnání teplot – rozdíl teploty vzorku a lázně se projeví na záznamu deformací v čase, při $dy/dt=0$ je teplota vyrovnána,
13. Sepnutí obvodu el. proudu a zaznamenání počátku měření,
14. Deformace je po celou dobu leptání zaznamenávána na počítači (závislost deformace v čase),
15. Vypnutí proudu – po uplynutí času, který odpovídá požadované hloubce leptání,
16. Vyjmutí stojanu z lázně a očištění,
17. Vyjmutí vzorku a očištění,
18. Určení tloušťky odleptané vrstvy – zvážením a poté pomocí váhového úbytku anebo proměřením vzorku na více místech,

19. Změření výšky leptané plochy,
20. Zpracování – ze zkušenosti lze úběr v případě leptání vzorků z materiálu Ti-6Al-4V považovat za konstantní, zpracování dává do souvislosti deformaci v čase s hloubkou leptané vrstvy.

3.2.4 Záznam měření

Snímač měří Δy v čase t . Ze záznamu níže je vidět proudový náraz (velká výchylka Δy) a výchylka po vypnutí proudu na konci záznamu. Pro vyhodnocování zbytkových napětí je třeba tyto odstranit a pohybovat se pouze uvnitř intervalu po proudovém nárazu a před vypnutím proudu. Interval před proudovým nárazem je vyrovnávání teploty vzorku a elektrolytické lázně ($\Delta y/\Delta t=0$). Následně je záznam převeden na výpočetní data na základě experimentálně ověřené podmínky konstantní rychlosti úběru materiálu. Můžeme tedy přiřadit velikost odleptané tloušťky materiálu k příslušnému času záznamu, získáme tak údaje potřebné pro výpočet zbytkového napětí.

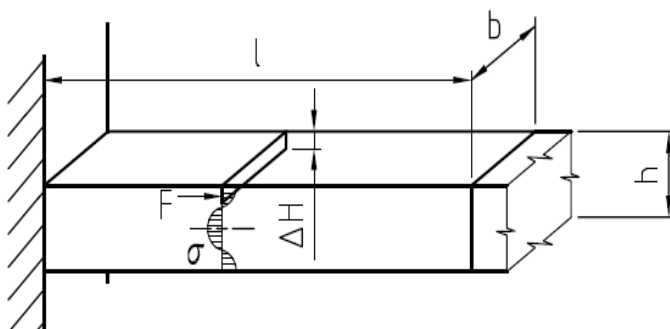
Vzorek č. 3, frézování, žíhání, kuličkování, elektrolytické leštění (záznam měření)



3.2.5 Výpočet

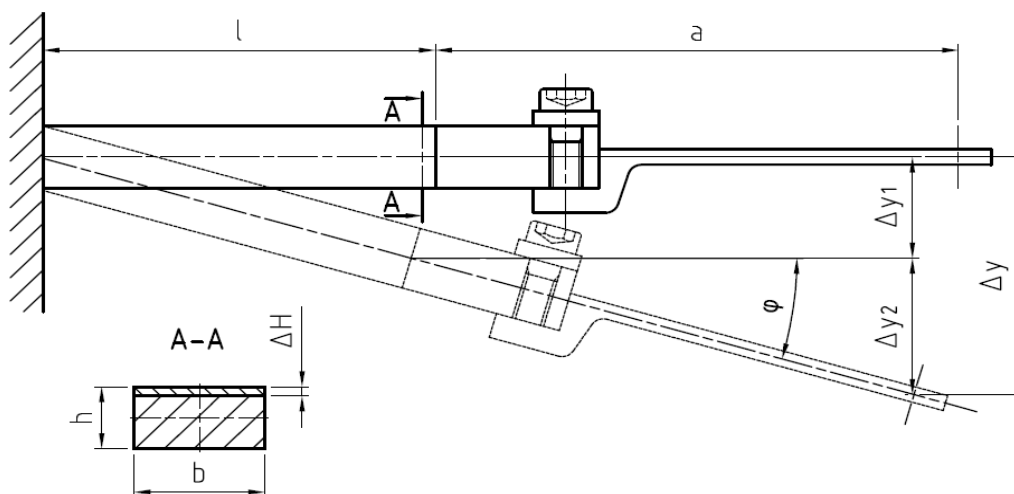
Výpočet je založen na úvaze, kde se k vzorku přistupuje jako k vetknutému nosníku s dvěma předpoklady. Za prvé, v jedné odleptávané vrstvě tloušťky ΔH je zbytkové napětí σ rovno konstantě a za druhé, odstranění vrstvy $\Delta H \cdot b$ se projeví deformací, tato deformace odpovídá působení napětí jenž by bylo vyvoláno silou F na vrstvu $\Delta H \cdot b$.

$$\sigma = \frac{F}{\Delta H \cdot b} \quad (3.1)$$



Obr. 48 Schéma napětí v leptaném vzorku

ΔH – tloušťka odleptané vrstvy, b – šířka leptané plochy, l – výška leptané plochy, h – tloušťka vzorku, σ – napětí ve vrstvě $\Delta H \cdot b$, F – síla působící na plochu $\Delta H \cdot b$,



Obr. 49 Výchozí schéma pro výpočet zbytkových napětí

a – vzdálenost od leptané plochy do středu čidla, x – výpočtová vzdálenost, ϕ – úhel natočení, Δy – deformace (měřená), Δy_1 – deformace leptané plochy vzorku, Δy_2 – posun způsobený natočením praporku v rovině měření, M_0 – ohybový moment, I – kvadratický moment průřezu, E – modul pružnosti v tahu.

Postup výpočtu:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} \quad (3.2)$$

$$\Delta y_2 = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a \quad (3.3)$$

$$M_o = F \cdot \frac{h}{2} = \sigma \cdot \Delta H \cdot b \cdot \frac{h}{2} \quad (3.4)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.5)$$

$$\Delta y = \Delta y_1 + \Delta y_2 = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} + \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a = \quad (3.6)$$

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

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right)} = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{E \cdot h^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (3.7)$$

Výpočet napětí ve vrstvě n:

$$h_n = h_0 - \sum_1^n \Delta H_n \quad (3.8)$$

$$\sigma_n = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot \frac{E \cdot h_n^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (3.9)$$

Δy_n – deformace vzniklá odebráním vrstvy n, ΔH_n – tloušťka odebírané vrstvy n, h_n – tloušťka vzorku aktuální, σ_n – napětí n-té vrstvy.

Vypočtené napětí je třeba upravit uvažováním napětí v předešle odebraných vrstvách dle vztahu (3.10).

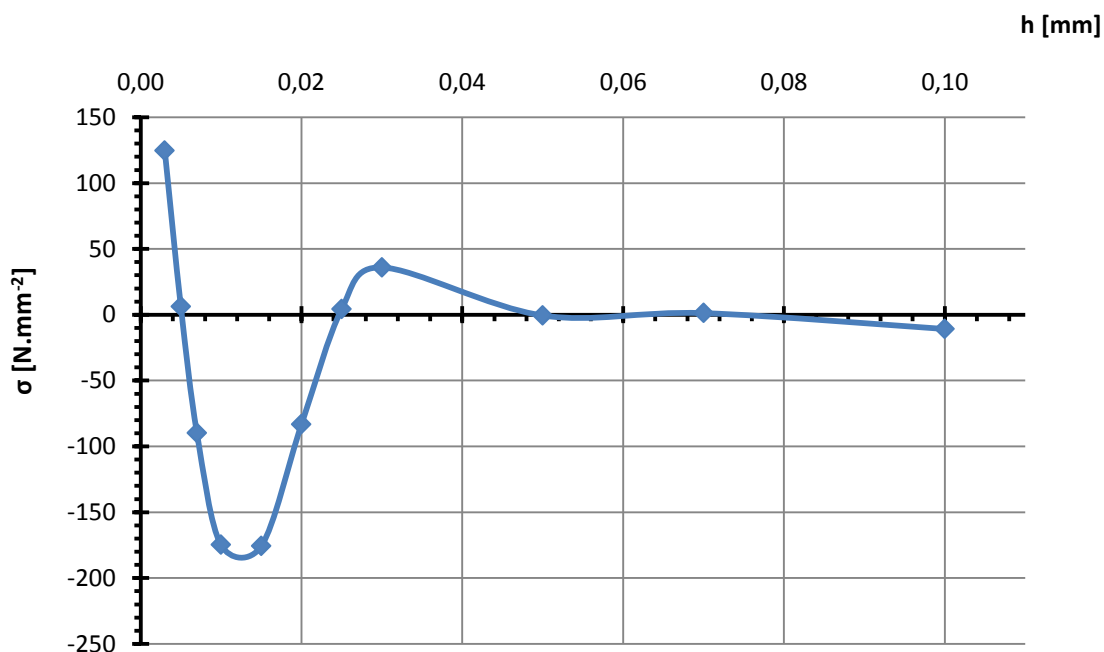
$$\sigma_{vn} = \sigma_n - \sum_1^n \sigma_{(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n} \quad (3.10)$$

σ_{vn} - výsledné napětí.

3.2.6 Zbytková napětí jednotlivých vzorků

Vyhodnocení vzorku č. 1:

Vzorek č. 1, drátové řezání (WEDM)

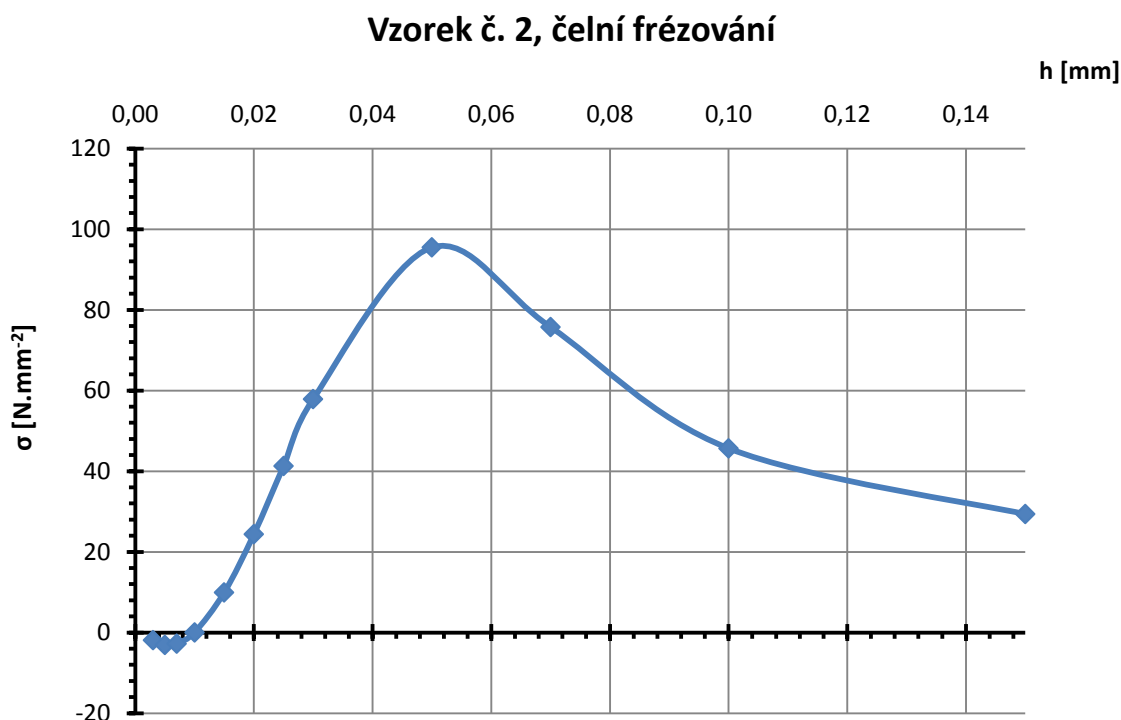


Vzorek po drátovém řezání vykazuje tahové napětí $130 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ do hloubky přibližně $5 \mu\text{m}$ pod povrchem vzorku, kde následně přechází v tlakové napětí. Tlakové napětí má své maximum $185 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v hloubce $0,01 \text{ mm}$ a za maximem velkým gradientem přechází opět v napětí tahové. Směrem k základnímu materiálu pak dochází k vyrovnání. Odchylka od rovnovážného stavu v hloubce $0,07 \text{ mm}$ může být způsobena technologií výroby vzorku.

Tato technologie je výhodná k přípravě vzorků pro měření zbytkových napětí s ohledem na ovlivnění nepatrného množství materiálu na krajích vzorku (měření je tak ovlivněno

minimálně a hodnoty po jednotlivých technologiích se tak blíží více skutečnosti než v případě řezání na rozbrušovací pile, při kterém dochází k tepelnému ovlivnění do značné hloubky i přes vydatné chlazení).

Vyhodnocení vzorku č. 2:

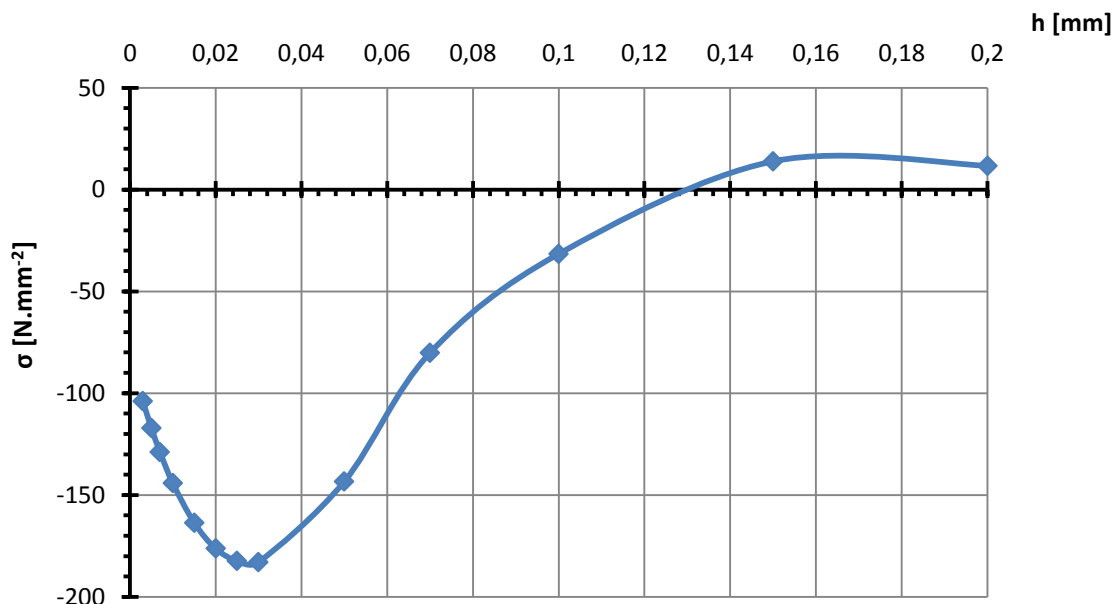


Čelní frézování dle grafu způsobí ve vzorku tlakové napětí do hloubky 0,01 mm, ale jeho velikost je vzhledem k možným nepřesnostem měření (např. vibrace) zanedbatelná. Zcela výrazným je nárůst tahového napětí v rozmezí hloubky 0,01 mm až do maxima 0,05 mm, kde dosahuje hodnoty 90 N·mm⁻². Ze svého maxima směrem k základnímu materiálu pozvolně klesá, přičemž hloubky vyrovnání zbytkového napětí nebylo dosaženo.

Vzorek obsahuje nevyhovující zbytkové napětí na rozdíl od technologie s vhodně zvoleným dokončením viz dále vzorek obráběný kulovou frézou s následným tepelným zpracováním, kuličkováním a elektrolytickým leštěním.

Vyhodnocení vzorku č. 3:

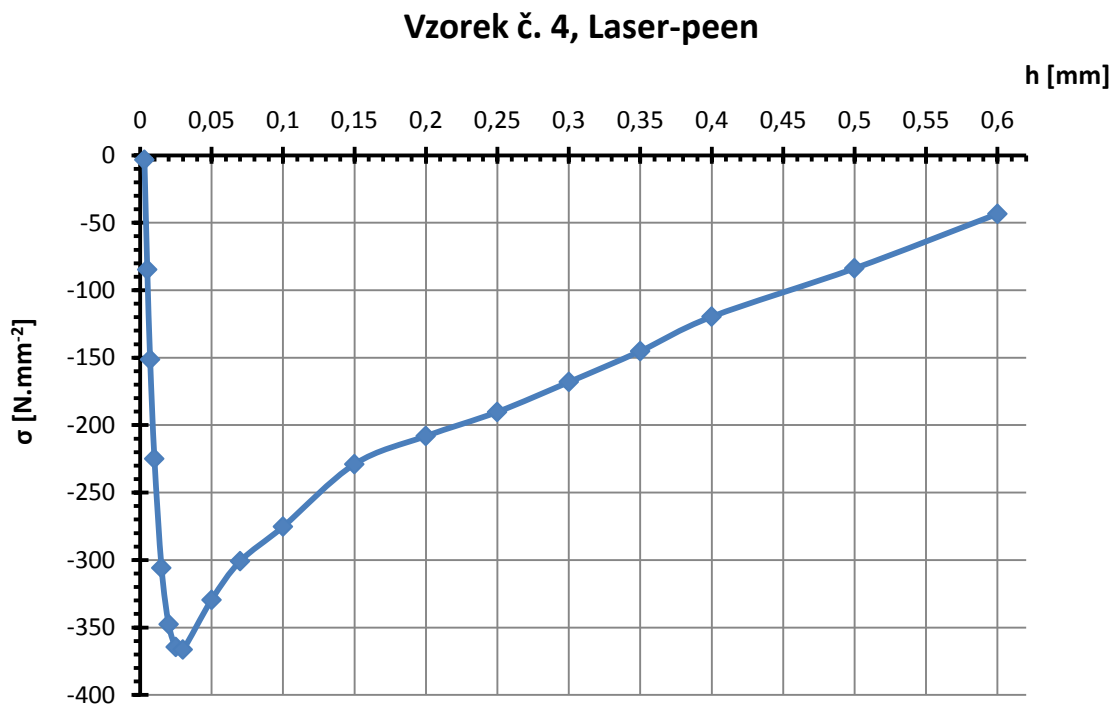
**Vzorek č. 3, frézování, žihání, kuličkování, elektrolytické
leštění**



Vzorek č. 3 v měřené vrstvě nejbliže povrchu obsahuje značné tlakové napětí $100 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, pozvolně jeho hodnota stoupá na maximum $185 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ odpovídající hloubce $0,03 \text{ mm}$. Po dosažení maxima tlakové napětí plynule klesá až do hloubky $0,13 \text{ mm}$, kde přechází v tah.

Vliv frézování je odstraněn pomocí žihání na odstranění vnitřních pnutí a následným kuličkováním je do vzorku vneseno příznivé tlakové napětí, které zasahuje do značné hloubky. Elektrolytické leštění pak do materiálu žádná další zbytková napětí nevnáší.

Vyhodnocení vzorku č. 4:



Napětí ve vzorku po laser-peeningu je v celé měřené hloubce tzn. až do 0,6 mm tlakové. Od povrchu do hloubky přibližně 0,03 mm narůstá velkým gradientem, až dosáhne maximální hodnoty $370 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Následně dochází k strmému poklesu napětí do hloubky 0,15 mm, na strmý průběh navazuje pokles téměř lineární.

Technologie laser-peeningu dosahuje největších zbytkových tlakových napětí z posuzovaných technologií a to do velké hloubky pod povrchem součásti, více než 0,6 mm.

4 Závěr

Tato práce je zaměřena na vyhodnocení lopatek oběžného kola pomocné energetické jednotky, na základě některých složek integrity povrchu a dále posouzení vlivu metod opracování na velikost zbytkových napětí v povrchové vrstvě. Za tímto účelem byl proveden teoretický rozbor složek integrity povrchu a vypracována experimentální část zahrnující výše zmíněné.

Na zámcích lopatek byly pomocí kapilární zkoušky indikovány povrchové vady, převážně v oblasti čela. Následnou stereomikroskopií leptaných zámků se zviditelněnou makrostrukturou byla pořízena fotodokumentace a určeno místo řezu pro vytvoření metalografických vzorků. Metalografickou analýzou pak byl zjištěn výskyt vad i v podpovrchových oblastech. Jejich vzhled nasvědčuje, že by se mohlo jednat o vady slévárenské. Dalším cílem bylo určení tvrdosti v povrchových vrstvách, která se pohybuje v rozmezí hodnot jednotlivých vtisků 328 až 399 HV 0,5. Průměrné hodnoty ve čtyřech měřených vrstvách do hloubky přibližně 0,47 mm se pak pohybují od 345 do 373 HV 0,5. Posledním ve vyhodnocení lopatek bylo měření drsnosti, které je provedeno na hranolech s tvarovou plochou pro lepší upnutí při měření. Nejvyšší hodnota průměrné aritmetické úchytky R_a 0,709 μm a největší výška profilu R_z 7,104 μm byla naměřena na hřbetu tvarové plochy. Naměřené hodnoty se v rámci jednotlivých profilů výrazně liší. Výsledným doporučením je, provést rozbor chemického složení pro určení přesné příčiny vad ve struktuře lopatky a upravení řezných parametrů broušení.

Měřením zbytkových napětí ve vzorcích metodou elektrolytického odleptávání byl zjištěn profil zbytkových napětí jednotlivých metod umožňující jejich posouzení. U drátově řezaného vzorku byla zjištěna tenká vrstva ovlivněná zbytkovým tahovým napětím přecházejícím velkým gradientem v napětí tlakové s maximální hodnotou $185 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v hloubce 0,01 mm. Vzhledem k průběhu je tato technologie vhodná pro dělení materiálu při minimálním ovlivnění povrchové vrstvy. Vzorek čelně frézovaný obsahuje v povrchové vrstvě nevýhodné tahové napětí do hloubky větší než 0,14 mm s maximem $90 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ nacházející se v hloubce 0,05 mm. V tomto případě by bylo výhodné odstranit vliv frézování podobným způsobem jako u následujícího vzorku. Frézování kulovou frézou, žihání na odstranění vnitřních pnutí,

kuličkování a elektrolytické leštění zanechává zcela odlišnou charakteristiku. Vliv frézování je odstraněn žiháním, následným kuličkováním je do vzorku vneseno zbytkové tlakové napětí přibližně do hloubky 0,13 mm dosahující maximální hodnoty $185 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v hloubce 0,03 mm, elektrolytické leštění pak už žádná zbytková napětí nevnáší. Poslední technologií je laser-peening, který překonává předešlé jak v maximální hodnotě zbytkového tlakového napětí $370 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tak i v hloubce, ve které je příznivé zbytkové napětí obsaženo a to do více než 0,6 mm. Tato technologie dosahuje nejlepších výsledků, je proto vhodná pro součásti s vysokými nároky na zbytková napětí v povrchové vrstvě.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Prvek profilu [7]</i>	15
<i>Obr. 2 Největší výška profilu (profil drsnosti) [7]</i>	16
<i>Obr. 3 Typy závislosti mikrotvrlosti na hloubce povrchové vrstvy [5]</i>	19
<i>Obr. 4 Tříška tvářená [11]</i>	20
<i>Obr. 5 Tříška netvářená [11]</i>	20
<i>Obr. 6, 1. Oblast primární plastické deformace, 2. oblast sekundární plastické deformace, 3. plocha řezu [11]</i>	21
<i>Obr. 7 Průběh napětí v oblasti primární plastické deformace [11]</i>	21
<i>Obr. 8 Rozložení normálových a smykových napětí [11]</i>	22
<i>Obr. 9 Schématické zobrazení vlivu poloměru ostří na plochu řezu [11]</i>	22
<i>Obr. 10 Mikrotvrlost HM v závislosti na vzdálenosti od povrchu [11]</i>	23
<i>Obr. 11 Princip zkoušky dle Vickerse [10]</i>	24
<i>Obr. 12 Délka hrany a max. 0,5μm pro zkoušku mikrotvrlosti dle Vickerse [10]</i>	25
<i>Obr. 13 Zbytková napětí mechanicky zatížené vrstvy [11]</i>	29
<i>Obr. 14 Superfinašování ložiskové oceli [11]</i>	29
<i>Obr. 15 Soudlně frézovaný povrch titanové slitiny [11]</i>	29
<i>Obr. 16 Zbytková napětí mechanicky a tepelně zatížené vrstvy [11]</i>	30
<i>Obr. 17 Přejít zbytkových napětí [11]</i>	31
<i>Obr. 18 Stav napjatosti v povrchové vrstvě kroužků valivých ložisek [3]</i>	32
<i>Obr. 19 Průběh zbytkových napětí v povrchové vrstvě lopatky turbokompresoru [3]</i>	33
<i>Obr. 20 Závislost velikosti zbytkových napětí na mezi únavy v ohybu [4]</i>	33
<i>Obr. 21 Metody pro měření zbytkových napětí v mm [12]</i>	36
<i>Obr. 22 Lopatka č. 4, falešná indikace ze strany koryta lopatky</i>	47
<i>Obr. 23 Lopatka č. 1, indikace ze strany čela zámku lopatky</i>	48
<i>Obr. 24 Lopatka č. 2, indikace ze strany čela zámku lopatky</i>	48
<i>Obr. 25 Lopatka č. 3, indikace ze strany čela zámku lopatky</i>	49
<i>Obr. 26 Lopatka č. 5, indikace ze strany koryta lopatky</i>	49
<i>Obr. 27 Lopatka č. 1, zvětšení 50x</i>	50
<i>Obr. 28 Lopatka č. 2, zvětšení 12,5x</i>	51
<i>Obr. 29 Lopatka č. 2, zvětšení 50x</i>	51
<i>Obr. 30 Lopatka č. 3, zvětšení 50x</i>	52
<i>Obr. 31 Lopatka č. 5, zvětšení 50x</i>	52
<i>Obr. 32 Rozbrušovací pila Labotom-3 (Struers)</i>	53
<i>Obr. 33 Metalografický lis CitoPress-10 (Struers)</i>	54
<i>Obr. 34 Preparační systém Tegramin-25(Struers)</i>	55
<i>Obr. 35 Hotové metalografické vzorky</i>	55
<i>Obr. 36 Lopatka č. 1, metalografický vzorek, zvětšení 100x</i>	56
<i>Obr. 37 Lopatka č. 3, metalografický vzorek, zvětšení 25x</i>	56
<i>Obr. 38 Lopatka č. 3, metalografický vzorek, zvětšení 100x</i>	57
<i>Obr. 39 Lopatka č. 5, metalografický vzorek, zvětšení 50x</i>	57
<i>Obr. 40 Mikrotvrdoměr FM-100 (FUTURE-TECH)</i>	58
<i>Obr. 41 Softwarové prostředí pro měření tvrdosti</i>	58
<i>Obr. 42 Rozložení vtisků ve vzorku</i>	59
<i>Obr. 43 Hranol rovinný</i>	66
<i>Obr. 44 Hranol tvarový</i>	66
<i>Obr. 45 Čelně frézovaná titanová destička</i>	68
<i>Obr. 46 Schéma měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání [14]</i>	69

Obr. 47 Zařízení pro měření zbytkových napětí metodou elektrolytického odleptávání..... 69
Obr. 48 Schéma napětí v leptaném vzorku..... 73
Obr. 49 Výchozí schéma pro výpočet zbytkových napětí 73

Seznam tabulek

Tab. 1 Metody zjišťování zbytkových napětí [15] 35
Tab. 2 Zkušební zatížení pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [10] 59
Tab. 3 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 1 60
Tab. 4 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 3 62
Tab. 5 Naměřené hodnoty tvrdosti pro lopatku č. 5 64
Tab. 6 Identifikace vzorků pro měření drsnosti 66
Tab. 7 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti vzorku č. 2, drážka 67
Tab. 8 Naměřené hodnoty parametrů drsnosti vzorku č. 4, hřbet 67

Seznam citované literatury

- [1]. **Davim, J. Paulo.** *Surface Integrity in Machining*. London : Springer, 2009. str. 222. ISBN 978-1-84882-873-5.
- [2]. **Novák, M., Holešovský, F.** *Studium integrity broušeného povrchu*. Prešov, Slovenská Republika : 9. Mezinárodní vědecká konference, Nové smery vo výrobných technológiách, 2008. stránky 11-13. ISBN 978-80-553-0044-3.
- [3]. **Mádl, J., Kafka, J., Vrabec, M., Dvořák, R.** *Technologie obrábění 1. díl*. Praha : ČVUT, 2007. str. 79. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [4]. **Bumbálek, B.** *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. Brno : CERM Brno, 2003. stránky 95-102. Sv. Frézování III. ISBN 80-214-2436-2.
- [5]. **Tichá, Š.** *Strojírenská metrologie. Část 2, Základy řízení jakosti*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2006. str. 86. ISBN 80-248-1209-6.
- [6]. **Tichá, Š.** *Strojírenská metrologie. Část 1*. Ostrava : VŠB - Technická univerzita, 2004. str. 110. ISBN 80-248-0671-1.
- [7]. **ČSN EN ISO, 4287.** *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. str. 22.
- [8]. **Macek, K., Zuna, P. a kolektiv.** *Nauka o materiálu*. Praha : ČVUT, 1999. str. 209. ISBN 80-01-01507-6.
- [9]. **Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V.** *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2005. str. 178. ISBN 80-7043-417-1.
- [10]. **Doležal, P., Pacal, B.** Vysoké učení technické v Brně. *Hodnocení mikrotvrdomosti struktur materiálů*. [Online] 20. 2 2007. [Citace: 5. 5 2015.]
Dostupné na World Wide Web: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>.
- [11]. **Mádl, J.** *Teorie obrábění*. Praha : ČVUT, 1990. str. 156. Číslo publikace 7068.
- [12]. **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. [Citace: 5. 5 2015.]
Dostupné na World Wide Web:
http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf. ISSN 1435-4934.
- [13]. **Humár, A.** Vysoké učení technické v Brně. Odbor technologie obrábění - studijní opory. *Technologie I - Technologie obrábění - 1. část*. [Online] 2003. [Citace: 5. 5 2015.]
Dostupné na World Wide Web: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf.

- [14]. **Kolařík, K., Ganev, N.** Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology - Bulletin of the Czech and Slovak Crystallographic Association. *Difrakční a tenzometrická analýza povrchů ocelí po nekonvenčních metodách obrábění.* [Online] 2006. [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: <http://www.xray.cz/ms/bul2006-2/kolarik.pdf>. ISSN 1211-5894 (Print), ISSN 1805-4382 (Online).
- [15]. **Čep, R., Petruš, J.** *Experimentální metody v obrábění.* Ostrava : Ediční středisko VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011. str. 143. ISBN 978–80–248–2533–5.
- [16]. **F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, P. V. Grant.** NPL - National Physical Laboratory. *A Review of Residual Stress Measurement Methods - A Guide to Technique Selection.* [Online] 2001. [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/matc4.pdf. ISSN 1473-2734.
- [17]. **VEQTER.** VEQTER Residual Stress Experts. *Residual Stress Measurement.* [Online] [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: <http://www.veqter.co.uk/residual-stress-measurement/overview>.
- [18]. **Ganev, N., Kraus, I.** Materials Structure in Chemistry, Biology, Physics and Technology - Bulletin of the Czech and Slovak Crystallographic Association. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí.* [Online] 2002. [Citace: 5. 5 2015.] <http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf>. ISSN 1211-5894 (Print), ISSN 1805-4382 (Online).
- [19]. **B. Ekmekçi, N. Ekmekçi, A. E. Tekkaya, A. Erden.** ResearchGate. *Residual Stress Measurement with Layer Removal Method.* [Online] 2004. [Citace: 5. 5 2015.] Dostupné na World Wide Web: http://www.researchgate.net/publication/228533123_Residual_Stress_Measurement_with_Layer_Removal_Method.
- [20]. **Karol, V.** *Analytická teória trieskového obrábania.* Prešov : Fakulta výrobných technológií TU v Košiciach, 2007. str. 481. ISBN 978-80-8073-759-7.