

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Technologie dokončování součástí letecké
výroby**

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

Fakulta: strojní
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Bc. Miroslava Novotného**

obor Výrobní a materiálové inženýrství

Název: Technologie dokončování součástí letecké výroby

Název anglicky: Surface finishing technologies of aircraft production components

Zásady pro vypracování:

1. Technologické možnosti dokončování
2. Kvalitativní parametry dokončování
3. Provedení experimentálních zkoušek
4. Vyhodnocení jednotlivých technologií na experimentálních vzorcích

ANOTAČNÍ KARTA

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12 134 Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí ústavu:	Ing. Libor Beránek, Ph.D.
Téma diplomové práce:	Technologie dokončování součástí letecké výroby
Akademický rok:	2015/2016
Studijní obor:	Výrobní a materiálové inženýrství
Autor:	Bc. Miroslav Novotný
Vedoucí práce:	Ing. Zdeněk Pitrmuc
Klíčová slova:	Integrita povrchu, titanová slitina, Ti6Al4V, zbytkové napětí, shot peening, laser peening, tryskání, mikrotvrдость
Abstrakt:	Diplomová práce je zaměřena na povrchovou vrstvu součástí letecké výroby. Popisuje integritu povrchu a technologie dokončování povrchu z pohledu jeho zpevňování a zbytkových napětí. Experimentální část je zaměřena na vzorky z titanové slitiny s třemi druhy dokončení. Zjišťuje zbytkové napětí, mikrotvrдость, drsnost a rozměrové deformace.

Rozsah práce:

Počet stran: 97

Počet obrázků 73

Počet tabulek: 13

Počet příloh: 0

ANNOTATION CARD

University: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12 134 Department of machining, process planning and metrology

Head of the department: Ing. Libor Beránek, Ph.D.

Diploma thesis topic: Surface finishing technologies of aircraft production components

Academic year: 2015/2016

Branch of study: Production and Materials Engineering

Author: Bc. Miroslav Novotný

Supervisor: Ing. Zdeněk Pitrmuc

Keywords: Surface integrity, titanium alloy, Ti6Al4V, residual stress, shotpeening, laserpeening,

Abstract: The diploma thesis is focused on the surface layer of part of aircraft production. It describes the surface integrity and surface finishing technology from the perspective of hardening and residual stresses. The experimental part is focused on samples from titanium alloy with three types of surface finishing. It detects residual stresses, micro-hardness, roughness and shape deviations.

Scope of work:

Number of pages: 97

Number of pictures: 73

Number of tables: 13

Number of enclosures: 0

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ:

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma "*Technologie dokončování součástí letecké výroby*" jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Pitrmuce. Veškerou použitou literaturu a další prameny jsem řádně označil a uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne 23. června 2016

vlastnoruční podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří především vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Pitrmucovi, který mi dané téma navrhl a po celou dobu práce mne pozitivně motivoval k jeho, snad úspěšnému, zvládnutí. Díky patří i mé rodině a přítelkyni, kteří mne podporovali od začátku do konce této práce.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	SLITINA TITANU Ti6Al4V	12
2.1	Chemické složení	12
2.2	Mechanické vlastnosti	12
2.3	Fyzikální vlastnosti	13
2.4	Tepelné zpracování a mikrostruktura	13
3	INTEGRITA POVRCHU	16
3.1	Mikro a makro geometrie obráběné povrchové vrstvy	17
3.1.1	Tvarové odchylky	17
3.1.2	Mikrogeometrie	18
3.1.2.1	Vybrané parametry drsnosti pro experimentální část	20
3.2	Fyzikálně mechanické parametry povrchové vrstvy	23
3.2.1	Tvrдость	23
3.2.2	Mikrotvrдость	24
3.2.3	Měření mikrotvrđosti v experimentální části práce	25
3.2.4	Zpevnění povrchové vrstvy	28
3.3	Zbytkové napětí v povrchové vrstvě	29
3.3.1	Základní dělení zbytkových napětí	30
3.3.2	Mechanismy a příčiny zanesení zbytkových napětí do součástí	30
3.3.3	Vliv technologií na zbytková napětí	33
3.3.4	Vliv zbytkových napětí na vlastnosti součástí	35
3.3.5	Měření zbytkových napětí	35
3.3.6	Volba metody pro experimentální část práce	38
4	TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ SE ZPEVNĚNÍM POVRCHOVÉ VRSTVY	39
4.1	Dokončování úběrem materiálu se zpevněním povrchové vrstvy	40
4.1.1	Frézování	41

4.1.1.1	Zbytková napětí a mikrotvrdość frézované slitiny titanu	41
4.1.2	Tryskání	45
4.1.2.1	Zbytková napětí a mikrotvrdość tryskané slitiny titanu	48
4.1.3	Omílání	51
4.2	Dokončování bez úběru materiálu se zpevněním povrchové vrstvy	51
4.2.1	Laser peening	52
4.2.1.1	Zbytková napětí a mikrotvrdość laser peenované slitiny titanu	58
4.2.2	Vyhlazování	60
4.2.3	Válečkování	61
4.2.4	Kalibrování	62
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	63
5.1	Popis vzorků z Ti6Al4V	63
5.1.1	Frézované vzorky	63
5.1.2	Tryskané destičky	64
5.1.2.1	Výrobní zařízení	64
5.1.2.2	Parametry tryskacího procesu	65
5.1.3	Laser peenované destičky	66
5.1.3.1	Výrobní zařízení	66
5.1.3.2	Parametry laser peeningu	67
5.2	Měření tvarových odchylek a drsnosti	67
5.2.1	Tvarové odchylky laser peenovaných vzorků	68
5.2.2	Drsnost frézovaných vzorků	68
5.2.3	Drsnost tryskaných vzorků	69
5.2.4	Drsnost laser peenovaných vzorků	70
5.2.5	Porovnání drsností	70
5.3	Měření mikrotvrdości	71
5.3.1	Příprava vzorků	71
5.3.2	Metodika měření mikrotvrdości	73

5.3.3	Mikrotvrdost jednotlivých vzorků	73
5.3.3.1	Mikrotvrdost frézovaných vzorků	73
5.3.3.2	Mikrotvrdost tryskaných vzorků	74
5.3.3.3	Mikrotvrdost laser peenovaných vzorků	75
5.3.4	Porovnání mikrotvrdostí vzorků	76
5.4	Měření zbytkových napětí	76
5.4.1	Zařízení pro měření zbytkových napětí	77
5.4.2	Postup měření	80
5.4.3	Výpočet	81
5.4.4	Zbytkové napětí ve vzorcích	84
5.4.4.1	Zbytkové napětí frézovaných vzorků	84
5.4.4.2	Zbytkové napětí tryskaných vzorků	85
5.4.4.3	Zbytkové napětí laser peenovaných vzorků	86
5.4.5	Porovnání zbytkových napětí	87
6	ZÁVĚR	88
	Seznam použité literatury	90
	Seznam obrázků	94
	Seznam tabulek	97

1 ÚVOD

V leteckém průmyslu je kvalita dokončovaného povrchu jedním z hlavních parametrů, který ovlivňuje jak výslednou dynamickou pevnost, tak životnost součástí. Povrchová vrstva součástí je nejexponovanější a na jejích vlastnostech často závisí použitelnost dílu.

Tato diplomová práce se zabývá vlastnostmi povrchové vrstvy titanové slitiny Ti6Al4V, která je v letectví stále nejvíce používaná. Vzorky pro experimentální část vznikly ve spolupráci vedoucího této diplomové práce Ing. Zdeňka Pitrmuce s firmou GE Aviation Czech, která s Ústavem technologie obrábění, projektování a metrologie dlouhodobě spolupracuje.

Teoretická část této práce se skládá z charakteristiky titanové slitiny Ti6AL4V, integrity povrchu a dále shrnuje možnosti dokončování povrchu s ohledem na jeho zpevnění a zanesení tlakových zbytkových napětí, uvádí výsledky převážně zahraničních experimentů prezentované v odborných člancích. Následuje popis použitých metod pro zjištění parametrů dokončovaného povrchu, jako elektrolytické odleptávání povrchové vrstvy, měření mikrotvrdosti, drsnosti a profilu.

Experimentální část této práce se zabývá třemi vzorky slitiny titanu Ti6Al4V, frézované, tryskané a laser peenované. Zjišťuje parametry integrity povrchu a porovnává je s výsledky experimentů z odborných článků.

2 Slitina titanu Ti6Al4V

Z uvedeného materiálu jsou vyrobeny vzorky pro experimentální část práce. Vzorky jsou dodány v podobě destiček, které jsou dále nařezány metodou WEDM (drátem).

Jedná se slitinu s α a β fázemi, označovanou též jako Titanium Grade 5, Ti 6-4. Je to nejvíce používaná slitina titanu, díky optimální kombinaci pevnosti, tvařitelnosti, obrobitelnosti, svařitelnosti a korozní odolnosti. Slitinu je možné tepelně zpracovávat, je korozně odolná a stabilní až do 400°C. V současnosti je hojně využívána jako materiál pro velmi namáhané části leteckých motorů. Polotovary či konečné výrobky lze vyrábět tvářením, odléváním či práškovou metalurgií. [1]

2.1 Chemické složení

Slitin Ti6Al4V je více druhů. Standardní chemické složení uvádím v tabulce níže. Využívá se také slitina s příponou ELI, což značí snížený obsah intersticiálních prvků a slitina s příponou Pd, která značí přídavek Paladia pro zvýšení korozní odolnosti. [2]

Tab. 2.1 Chemické složení [hm. %] slitiny Ti-6Al-4V [1]

Chemické složení [hm. %] slitiny Ti-6Al-4V							
Al	V	N	C	H	Fe	O	Ti
5,5-6,75	3,5-4,5	Max. 0,05	Max. 0,08	Max. 0,01	Max. 0,3	Max. 0,2	zbytek

2.2 Mechanické vlastnosti

Titanové slitiny mají výborný poměr pevnosti a měrné hmotnosti. V leteckém průmyslu nahrazují ocel a slitiny niklu kvůli významné úspoře hmotnosti i u velmi namáhaných součástí při teplotách do 350°C. V leteckém průmyslu se používají například ve spalovacích turbínách (kompresorová část).

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti dle TZ [3]

Stav	R_m [N·mm ⁻²]	$R_{p0,2}$ [N·mm ⁻²]	A_5 [%]	E [GPa]	HV [-]
žíhaný	990	900	30	100	319
kalený	1050-1200	750-1000	2-25	90-110	350
vytvrzovaný	1100-1250	1025-1150	2-5	110-115	390

Slitiny titanu pokrývají široké spektrum poměru lomové houževnatosti a pevnosti, což umožňuje volbu slitiny dle požadavku konkrétní součásti. Vysoká únavová pevnost titanových slitin je v leteckém průmyslu jedním z hlavních parametrů. [3]

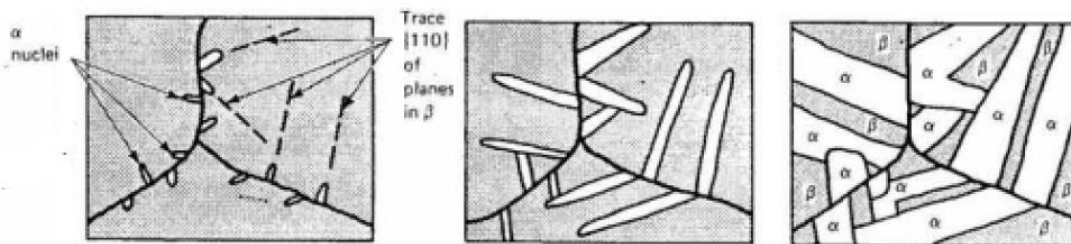
2.3 Fyzikální vlastnosti

Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [1]

Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V				
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ_t [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Konduktivita λ_e [MS·m ⁻¹]	Maximální provozní teplota T_{max} [°C]
4430	$9,2 \cdot 10^{-6}$ (20-300°C)	7	6	400

2.4 Tepelné zpracování a mikrostruktura

Mikrostruktura titanové slitiny Ti6Al4V závisí na průběhu tepelného zpracování (obr. 2.4.2 a tab. 2.4). Při ochlazování nízkou rychlostí začínají pod křivkou β -přechodu (980 °C) nukleovat zárodky α -fáze. Tyto zárodky rostou do tvaru desek na určitých krystalografických rovinách. Desky mají krystalografický vztah s původní β -fází. Takto vytvořená struktura se nazývá Windmanstättenova (Obr 2.4.1). Při rychlém ochlazení dochází k martenzitické reakci.

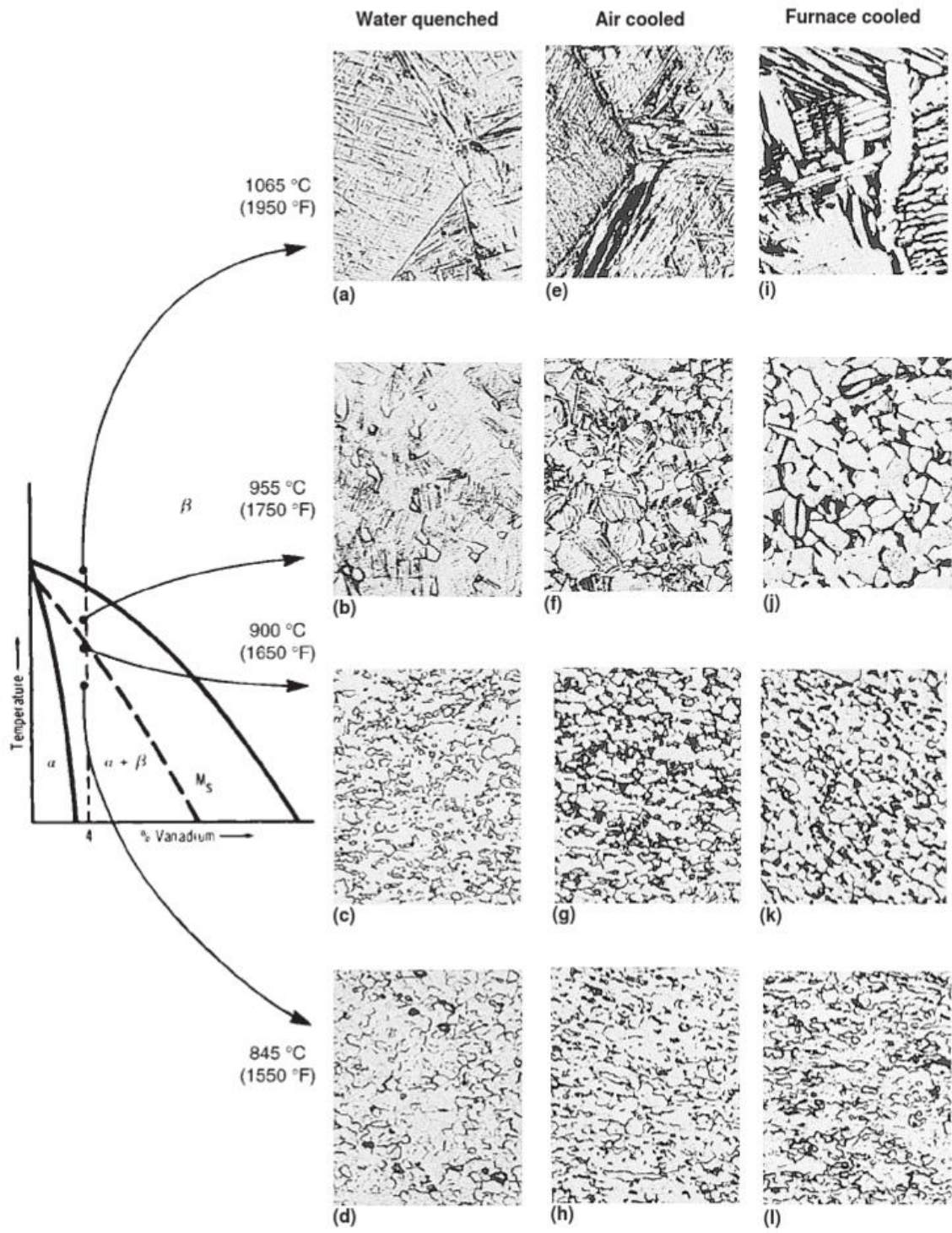


Obr 2.4.1 Průběh růstu Windmanstättenovy struktury [1]

V závislosti na chemickém složení a kalící teplotě mohou vznikat různé typy martenzitu - hexagonální α' nebo ortorombický α'' . Při kalení z oblasti β -fáze je struktura zcela martenzitická pouze se zbytkovým obsahem β -fáze. Přítomnost β -fáze se vysvětluje tím, že vanad obsažený v této slitině je β -stabilizátor a snižuje teplotu konce martenzitické transformace M_f pod pokojovou teplotu. [1]

Tab. 2.4 Tepelné zpracování Ti6Al4V [1]

Tepelné zpracování	Teplota [°C]	Prostředí a doba	Dále
žihání ke snížení zbytkových napětí	480-650	1 až 4 hod. / vakuum či Ag	Ochlazování (řízené)
žihání na měkko	705-790	1 až 4 hod. / vakuum	Obrábění
kalení	955-970	1 hod. / vakuum	Z 760°C kalení do vody
zpevňující popouštění (vytvrzování)	480-595	4 až 8 hod. / vakuum či Ag	-



Obr. 2.4.2 Vliv druhu chlazení na mikrostrukturu Ti6Al4V [1]

3 INTEGRITA POVRCHU

Integrita povrchu je řada vlastností povrchové vrstvy součásti. Literatura definuje integritu povrchu následovně: „*Souhrn všech charakteristik, kterými je možno hodnotit kvalitu povrchové vrstvy ve vztahu k jejím funkčním vlastnostem a provozní spolehlivosti se označuje jako integrita povrchu*“ [4]

Vzhledem k tomu, že povrch je zpravidla nejvíce namáhaný z celé součásti, obzvlášť to platí při namáhání ohybem a krutem. Povrchová vrstva je navíc v kontaktu s okolním prostředím a tak udává součásti její výsledné vlastnosti. Z toho vyplývá, že se musí součást navrhovat s předpokladem konkrétní integrity povrchu, je to tudíž neoddělitelný prvek návrhu součásti. Důležitost provázání komunikace mezi konstruktérem a technologem zde má velkou roli. Konstruktér neznalý toho, jak se přibližně bude jím konstruovaná součást vyrábět, jak bude ovlivněn výrobou povrch, je nucen součást předimenzovat. Znalost vazby technologie – povrch do průmyslu vnáší větší efektivitu, životnost a tím i ekonomičnost. Zkouškami jde zjistit, jaká technologie a její provedení má na povrch kladný, žádaný vliv a konstruktér s ní může při návrhu již počítat.

Složky charakteristiky integrity povrchu se různí s ohledem na použití součásti, způsobu namáhání, technologii výroby či atmosférickým podmínkám. V leteckém průmyslu se sledují parametry povrchu uvedené níže:

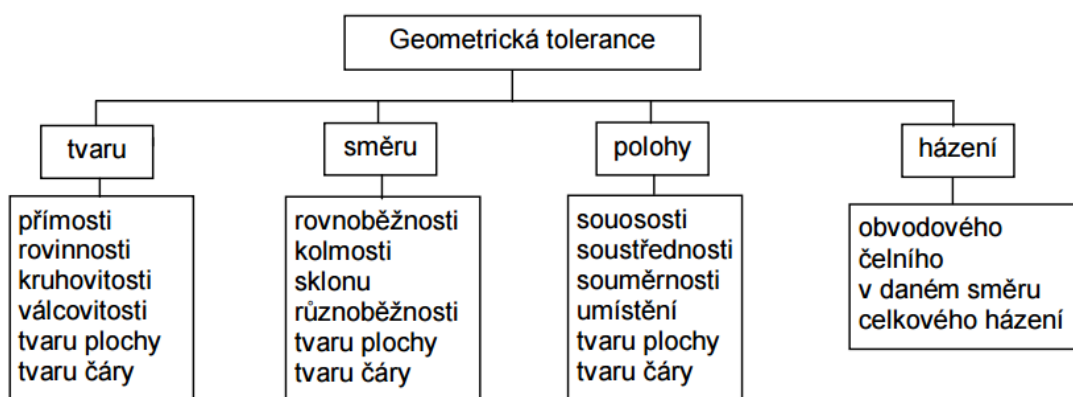
- Mikro a makro geometrie obráběné povrchové vrstvy
 - Tvarové odchylky, drsnost
- Fyzikálně mechanické parametry povrchové vrstvy
 - Zpevnění, tvrdost a mikrotvrdost
- Zbytkové napětí v povrchové vrstvě
- Fyzikálně chemický stav povrchové vrstvy [5]

3.1 Mikro a makro geometrie obráběné povrchové vrstvy

Tyto parametry vznikají při obrábění součástí v závislosti na vlastnostech stroje, druhu řezného nástroje a řezných podmínkách, obrobitelnosti materiálu a podobně. Následující kapitoly rozebírají makro a mikro geometrii povrchu zvlášť.

3.1.1 Tvarové odchylky

Tvarovými odchylkami součástí od jmenovitých rozměrů se zabývá makrogeometrie. Jedná se například o odchylku kruhovitosti, válcovitosti, rovinnosti, rovnoběžnosti a další.



Obr. 3.1.1 Klasifikace geometrických tolerancí [5]

Odchylka geometrického tvaru je hodnota vychýlení skutečného profilu součásti od jeho jmenovitého profilu. Odchylka geometrického tvaru je největší odchylka bodů skutečné plochy, určená ve směru normály k jmenovité ploše v rozsahu vztažného úseku. Pro hodnocení tvarové přesnosti je normou určeno kritérium obalových prvků (čar na profilu nebo ploch na tělese).

Obalový prvek (čára nebo plocha):

- má jmenovitý tvar
- dotýká se hodnoceného prvku (profilu, plochy)
- dotýká se hodnoceného prvku vně materiálu [5]

Geometrické odchylky povrchu součásti jsou dány soustavou stroj nástroj obrobek. Konkrétně například tuhostmi stroje a obrobku či deformacemi od upínacích sil.

3.1.2 Mikrogeometrie

Mikrogeometrie povrchové vrstvy je závislá na dráze obráběcího nástroje, jeho řezné části – břítu vůči obrobku – součásti. Obrobená plocha se tedy tvoří jako obalová plocha trajektorie pracovního pohybu řezné hrany nástroje. To znamená, že se od základních geometrických ploch zadaných výkresem, tedy od roviny, válcové plochy apod. zásadně liší. Například podélně soustružená plocha je šroubovitá, čelně soustružená spirálová, hoblovaná žlábkovitá. Avšak i takové pojetí obrobené plochy je idealizací jejího skutečného stavu. Geometrický sled postupných poloh řezné hrany je přetvořený v závislosti na jednotlivých fyzikálních procesech, které zákonitě provázejí obrábění. Jejich výčet je níže. [6]

Faktory s vlivem na mikrogeometrii povrchu:

- řezný nástroj
 - materiál, tvar, geometrie břítu, opotřebení
 - obráběný materiál, obrobitelnost
 - pružná a plastická deformace v průběhu tvoření třísky
 - obráběcí stroj
 - dynamické jevy (kmitání technologické soustavy), přesnost
- [6]

Vliv plastické deformace na skutečný obrobený povrch se zakládá zejména na adhezních silách mezi obrobkem a nástrojem a na tvoření nárůstku. Nárůstek se odděluje od ploch řezného nástroje, přilepuje se na obrobený povrch a vytváří na něm vyvýšeniny. Ty se mohou v procesu řezání odtrhávat a na povrchu se objeví vytrhané plošky.

Při obrábění litiny a kovů v křehkém stavu nevzniká „čisté“ řezání. V důsledku napjatosti se některá zrna odtrhávají od základního materiálu, čím vznikají odchylky od teoretického povrchu ve tvaru nepravidelných prohloubení.

Vliv kmitání se projevuje tím, že narůstá teoretický sled pohybů řezné hrany. Také má vliv na oddělování nárůstku od ploch nástroje.

Vliv tření hřbetu nože o obrobek se projevuje i tím, že nerovnosti řezné hrany se kopírují na obráběný povrch. [6]

Vzhledem k složitosti vytvořeného povrchu, různých hodnot v jednotlivých směrech, se mikrogeometrie hodnotí pomocí drsnosti.

Mikrogeometrie povrchu je členěna na jednotlivé složky podle rozteče příslušných nerovností. Jde o složku s nejmenší roztečí tvořící drsnost povrchu, dále složku nazvanou vlnitost a složku s největší roztečí nerovnosti určenou základním profilem. Norma ČSN EN ISO 4287 definuje tyto geometrické parametry: [7]

Pt – Hloubka profilu

- nejmenší vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými mezními přímkami z nefiltrovaného profilu povrchu uvnitř měřené délky l_n
- Pt je silně závislý na délce měřené délky l_n
- Pt slouží k vyhodnocování jednotlivých chyb povrchu

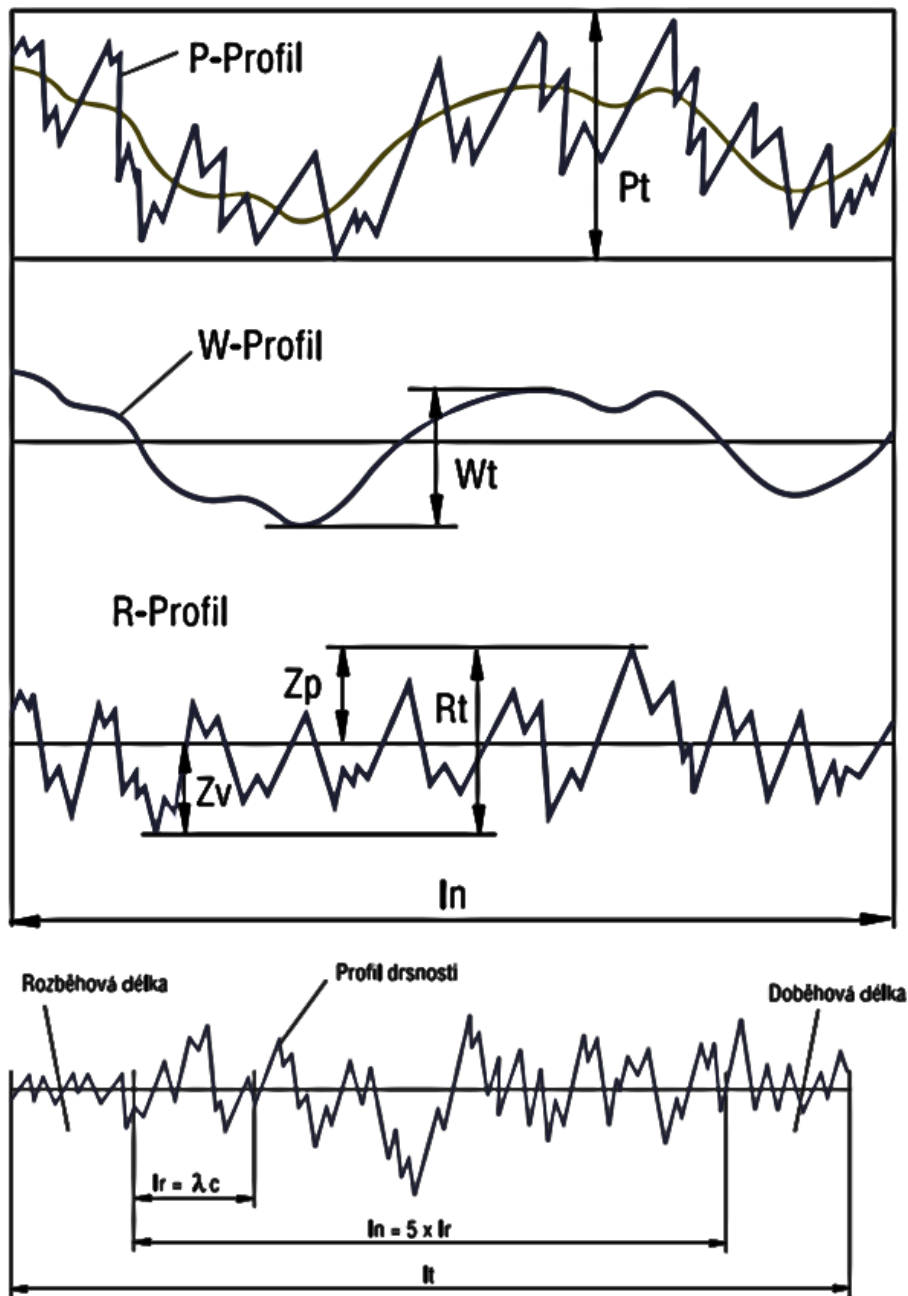
Wt – Hloubka vln

- vzdálenost mezi nejvyšším a nejhlubším bodem vyrovnaného profilu vlnitosti (drsnost odfiltrována) uvnitř měřené délky l_n
- značka Wt se používá ke kontrole výrobního postupu, u kterého vlnitost představuje funkční kritérium

Rt – Největší hloubka drsnosti

- svislá vzdálenost od nejvyšší špičky k nejhlubší rýze filtrovaného profilu drsnosti uvnitř měřené délky l_n [7]

Vztažnou čarou pro definici parametrů je uvnitř základní délky l_p , l_r , l_w střední čára. Pokud není stanoveno jinak, je dovoleno měření pro zjištění parametrů drsnosti a vlnitosti přes $l_n = 5 l_r$ resp. $l_n = 5 l_w$ (l_p). [8]



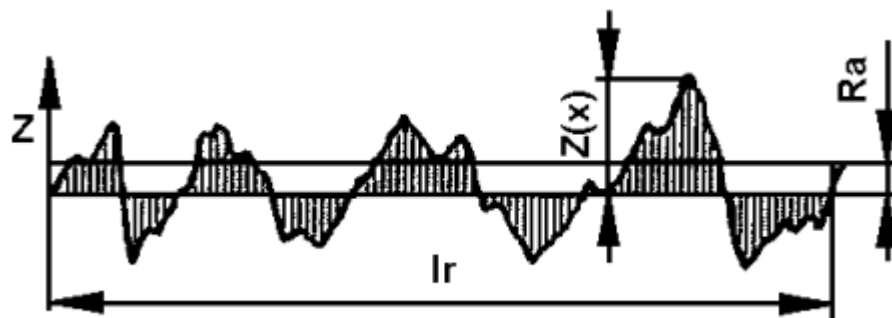
Obr. 3.1.2 Znáornění Pt, Rt, a Wt [8]

3.1.2.1 Vybrané parametry drsnosti pro experimentální část

Volba parametrů drsnosti pro měření vzorků v experimentální části práce vznikla po zvážení důležitosti, použití v praxi a všeobecné znalosti odborné veřejnosti.

Střední aritmetická úchylka profilu Ra – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r (obr. 3.1.2.1). Vypovídací schopnost parametru Ra je nízká, Ra nereaguje citlivě na extrémní výšky výstupků profilu a hloubky rýh profilu. [5]

$$Ra = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \quad (3.1.2.1)$$

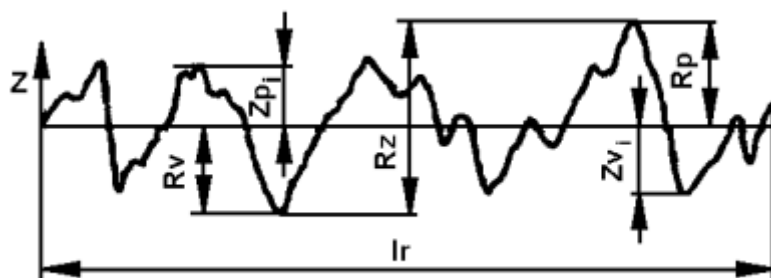


Obr. 3.1.2.1 Parametr Ra [5]

Největší výška profilu Rz – součet výšky R_p největšího výstupku a hloubky R_v nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky l_r (obr. 3.1.2.2).

Největší výška výstupku profilu Rp – výška Z_p největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 3.1.2.2)

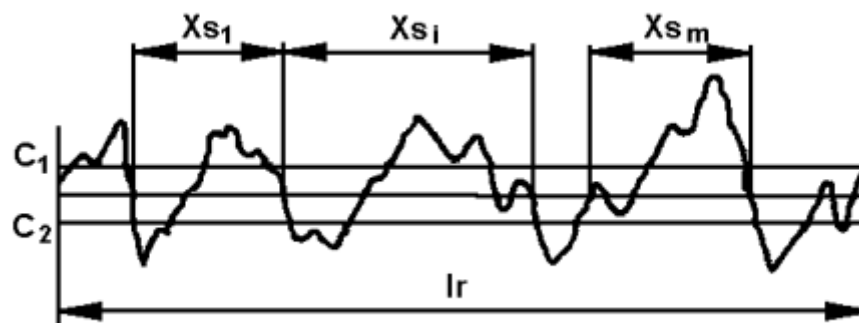
Největší hloubka prohlubně profilu Rv – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 3.1.2.2)



Obr. 3.1.2.2 Parametr Rz, Rp a Rv [5]

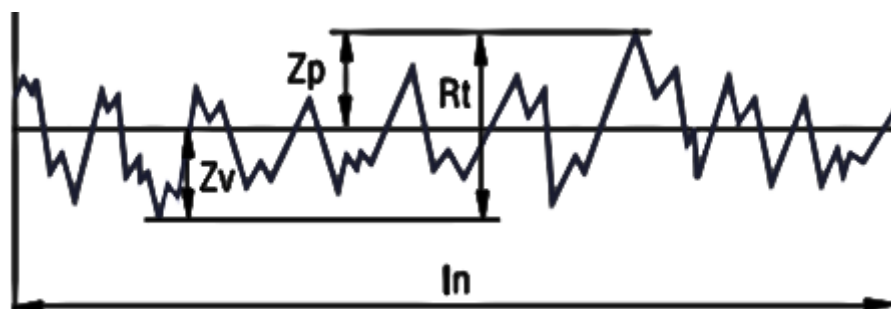
Průměrná vzdálenost prvků profilu RSm – průměrná hodnota šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky l_r (obr. 3.1.2.3). Vyhodnocení vyžaduje zadání hladiny řezu C1, C2.

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (3.1.2.2)$$



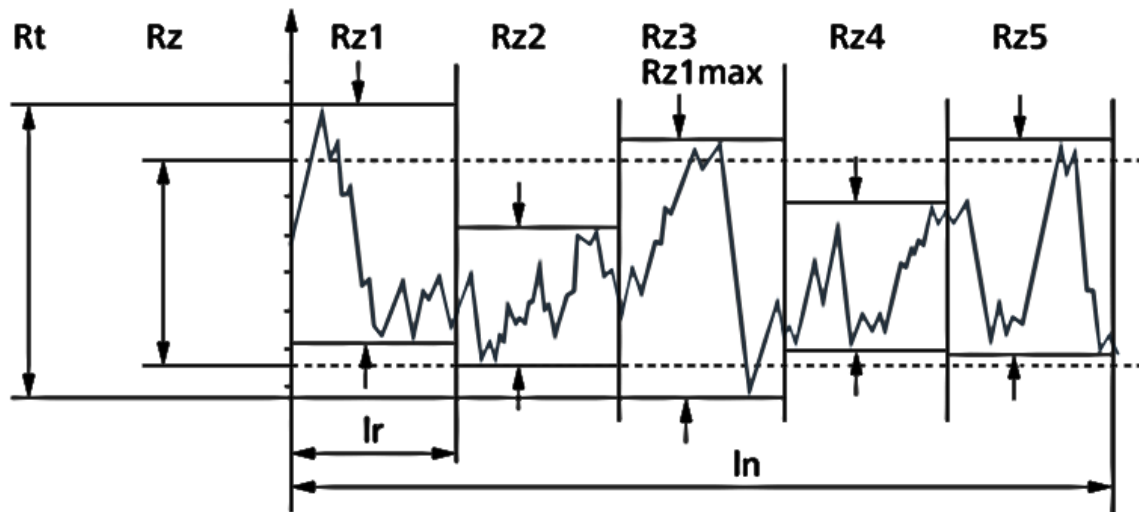
Obr. 3.1.2.3 Parametr Rsm [5]

Celková výška profilu drsnosti Rt - je vertikální vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na měřené délce l_n (celá vyhodnocovaná délka). (obr. 3.1.2.4)



Obr. 3.1.2.4 Parametr Rt [5]

Maximální hloubka drsnosti Rz1max - největší hodnota Rz z pěti základních délek l_r (obr. 3.1.2.5). (v protokolech z měření drsnosti značená jako **Rmax**) [8]



Obr. 3.1.2.5 Parametr Rz1max (Rmax) [8]

3.2 Fyzikálně mechanické parametry povrchové vrstvy

Fyzikálně mechanické parametry povrchu jsou ovlivněny převážně obráběcím procesem a případnou dokončovací technologií (podrobněji v kapitole Dokončování povrchu s ohledem na jeho zpevnění).

3.2.1 Tvrdost

Tvrdost je významnou mechanickou vlastností materiálů, jejich povrchové vrstvy. Hlavní předností zkoušek tvrdosti je jejich relativní jednoduchost, opakovatelnost a dále také skutečnost, že v mnoha případech lze měření provádět buď přímo na výrobku či jeho polotovarech a vzorcích.

Tvrdost lze definovat jako odolnost materiálu či povrchu materiálu v měřené lokalitě proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (vnikajícím tělesem - indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení. [9]

Zkoušky tvrdosti lze dělit podle různých hledisek:

Podle rychlosti působení zátěžné síly dělíme zkoušky tvrdosti na:

- Statické
 - metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoop

- dynamické
 - prováděny Kladívkem Poldi nebo Baumanovým kladívkem

Podle principu rozeznáváme zkoušky:

- vrypové
 - Dnes se vrypová zkouška používá už jen pro tvrdé a křehké materiály. V technické praxi se používá zkouška podle Martense.
- vnikací
 - Nejpoužívanější statická zkouška tvrdosti je charakteristická tím, že vnikající těleso tvrdoměru je vtlačováno do povrchu zkušebního vzorku lineárně se zvyšující silou do dosažení předepsaného zatížení, které je pak udržováno na konstantní úrovni po určitou stanovenou dobu. Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopu [9]
- nárazové
 - Je to zkouška vnikací, u níž je avšak klidné zatěžování nahrazeno rázem. Zkoušky jsou prováděny pomocí Kladívka Poldi nebo Baumanova kladívka.
- odrazové
 - Zkouška založená na principu měření velikosti odrazu indentoru spuštěného na zkoušený vzorek určitou energií. Dynamické odrazové jsou prováděny pomocí Shoreho skleroskopu či Duroskopem. [10]

3.2.2 Mikrotvrdot

Vzhledem k nutnosti měřit tvrdost povrchových vrstev, které v řezech mají rozměry menší, než by byl vtisk indentoru tvrdoměru, tak se aplikuje metoda měření mikrotvrdoti. Nevýhodou je, že mikrotvrdot nemůžeme porovnávat se standardní tvrdostí, takzvanou makrotvrdotí.

Při měření tvrdosti se používá vtlačování Knoopova či Vickersova jehlanu. Jehlan je zpravidla z diamantu. Makrotvrdot je měřena se zatížením

obvykle od 10 do 1200 Newtonů, mikrotvrdość je tedy v oblasti pod těmito zatíženími. To znamená od 1 gramu do kilogramu, což odpovídá 0,0981 až 9,81 Newtonů.

Nevýhodou nízkých zatížení je ale menší vtisk, což má za následek sníženou přesnost měření vlivem nepřesnosti odečtu velikosti vtisku.

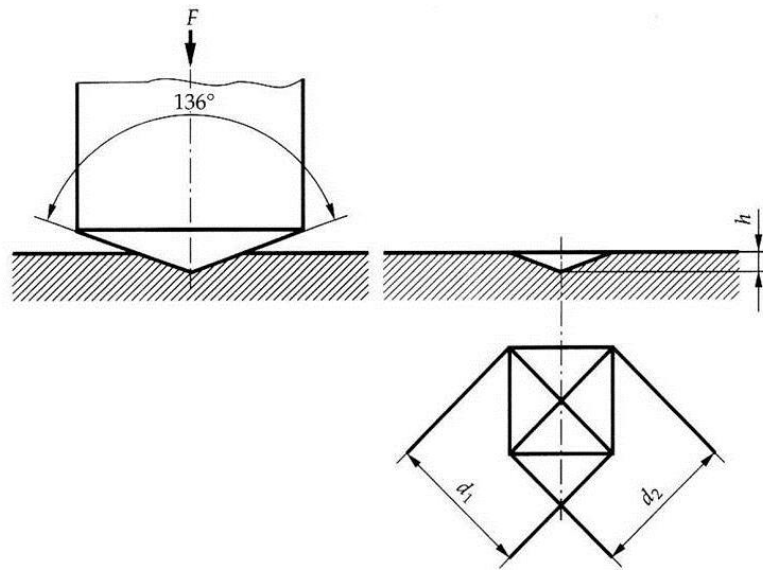
Malých vtisků se dá využít například v následujících případech:

- malé nebo tenké součásti;
- měření tvrdosti malých, vybraných oblastí zkušebního vzorku;
- měření mikrotvrdości fází a strukturních složek;
- hodnocení vrstev po chemicko-tepelném zpracování;
- měření tvrdosti velmi tenkých kovových a jiných anorganických povlaků;
- hodnocení svarových spojů;
- pro hodnocení oduhličujících procesů;
- studium difúzních pochodů;
- měření křehkých materiálů; [9]

3.2.3 Měření mikrotvrdości v experimentální části práce

Pro měření mikrotvrdości v experimentální části této práce byla použita metoda dle Vickerse, dále značená jako HV. Vickersova metoda je pro měření mikrotvrdości nejčastěji využívána. Přístupnost tohoto stroje byla v laboratoři Ústavu obrábění, projektování a metrologie.

V kapitole 3.2.1 je zařazena tato zkouška do kategorie statické a vnikací. Vnikajícím tělesem je diamantový jehlan, který je pravidelný a čtyřboký. Vrcholový úhel protilehlých stěn je $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Všechny čtyři stěny se musí protínat v jednom bodě.



Obr. 3.2.3 Zkouška dle Vickerse [11]

Tvrdość dle Vickerse definuje norma ČSN EN ISO 6507-1 následovně:

Tab. 3.2.3.1 Norma tvrdość dle Vickerse [9]

ČSN EN ISO 6507-1			
	Zkouška tvrdość dle Vickerse	Zkouška tvrdość dle Vickerse při nízkém zatížení	Zkouška mikrotvrdość dle Vickerse
Symbol tvrdość	$\geq \text{HV } 5$	$\text{HV } 0,2 \text{ až } < \text{HV } 5$	$\text{HV } 0,01 \text{ až } < \text{HV } 0,2$
Oblast zkušebního zatížení, F [N]	$F \geq 49,03$	$1,961 \leq F < 49,03$	$0,09807 \leq F < 1,961$

Zkušební těleso

Základem kvalitních výsledků měření mikrotvrdość dle Vickerse je přesné měření úhlopříček vtisku. Z toho plyne nutnost dokonalého povrchu zkoušeného vzorku. Ideální je příprava vzorku jako metalografický výbrus, při kterém nedochází k ovlivnění povrchu. Tloušťka zkoušeného tělesa či vrstvy musí být minimálně 1,5 násobek úhlopříčky vtisku.

Výpočet tvrdosti

Tvrdoost dle Vickerse je vyjádřená jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku. Ten se uvažuje jako pravidelný čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a s vrcholovým úhlem rovnajícím se úhlu vnikajícího tělesa (136°):

$HV = \text{konstanta} \cdot (\text{zkušební zatížení} / \text{plocha povrchu vtisku})$

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3.2.3.1)$$

Kde d je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček d_1 a d_2 v mm (Obr. 3.3.3), F je zkušební zatížení (viz tab. 3.3.3.2) v Newtonech a konstanta je:

$$\frac{1}{g_n} = \frac{1}{9,80665} = 0,102 \quad (3.2.3.2)$$

Kde g_n je gravitační zrychlení. [9]

Tab. 3.2.3.2 Zatížení pro zkoušku mikrotvrdoosti dle Vickerse (6)

Zkouška mikrotvrdoosti dle Vickerse	
Symbol tvrdosti	Nominální hodnota zkušebního zatížení F [N]
HV 0,01	0,09807
HV 0,015	0,147
HV 0,02	0,1961
HV 0,025	0,2452
HV 0,05	0,4903
HV 0,1	0,9807

Provedení zkoušky

Zkoušený vzorek je zafixován na tuhé podložce, což musí zabránit jakémukoliv pohybu. Vnikající těleso se vlačuje do vzorku zatížením směřujícím kolmo k jeho povrchu (Obr. 3.3.3). Doba od počátku zatěžování až do jeho plné hodnoty nesmí překročit 10 s a současně nesmí rychlost zatěžování překročit

rychlost 0,2 mm/s. Doba plného zkušebního zatížení musí být v rozmezí 10 až 15 s. Umístění vtisků musí respektovat požadavek na minimální vzdálenost mezi středy vtisků rovnající se 3 násobku průměrné velikosti úhlopříček. U lehkých kovů je tato vzdálenost dvojnásobná. Dále platí pravidlo vzdálenosti středu vtisku 2,5 násobku úhlopříčky od okraje vzorku, či 3 násobku pro lehké kovy. [9]

Označování

Znakem tvrdosti dle Vickerse je již zmíněná zkratka HV (Hardness Vickers). Za tímto znakem následuje číslo definující zatížení a případně ještě čas ve vteřinách, pokud zatížení bylo aplikováno jinak, než určuje norma, to znamená 10 až 15 vteřin.

Příklad označení:

330 HV 0,1 = Mikrotvrdomost dle Vickerse 330, změřená zatížením 0,9807 Newtonů, doba zátěže 10 až 15 vteřin

330 HV 0,1/20 = Mikrotvrdomost dle Vickerse 330, změřená zatížením 0,9807 Newtonů, doba zátěže 20 vteřin [9]

3.2.4 Zpevnění povrchové vrstvy

V přechodných kapitolách uváděná tvrdost ale většinou není v celém průřezu součásti stejná. Povrchová vrstva má tvrdost většinou odlišnou od zbytku součásti. Je to následek jejího vzniku, který provázely vlivy mechanické, tepelné či chemické. V povrchové vrstvě dochází vlivem plastické deformace k lokálnímu zvýšení hustoty dislokací a to má za následek zpevnění materiálu. Tvrdost, případně mikrotvrdomost je vodítkem, jak změny vlastností povrchu identifikovat. Tloušťka takové vrstvy je různá, je tak nezbytné hodnotit mikrotvrdomost individuálně v různé hloubce. Podle tloušťky vrstvy se zhotovují řezy vzorků. Pokud je vrstva tenčí a nebylo by možné provést dostatečné množství měření, provádí se řez pod úhlem. Řez musí být dokonalý, výbrus by měl být ekvivalentní jako pro metalografii. Mezi dobře použitelné vnikací zkoušky se zde řadí Vickersova a Koopova. [12] [13]

Poměr mikrotvrdosti zpevněného a nezpevněného materiálu vyjadřuje následující vzorec stupně zpevnění: [12]

$$K_Z = \frac{HM_Z - HM_0}{HM_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.2.4)$$

Jednotlivé způsoby dokončování součástí letecké výroby, jejich vliv na zpevnění a modely jeho vzniku jsou uvedeny v následujících kapitolách.

3.3 Zbytkové napětí v povrchové vrstvě

Zbytkové napětí je důležitou součástí integrity povrchu. Jeho vliv na únavovou životnost je značný a nemělo by být zanedbáváno.

Působením vnějších sil či momentů na součást v ní vyvolává napětí, která označujeme jako vložená. Zbytková napětí jsou opakem. Aniž by na součást působily vnější síly či momenty, stále v součásti zůstávají. Z toho plyne možnost rozdělení napětí na okamžitá a trvalá. Okamžitá zanikají (působí pod mezí kluzu) po odejmutí jejich zdrojů – zátěžných sil či momentů. Součást s trvalými, zbytkovými napětí je silově či momentově v rovnováze. Rovnovážná situace se ale změní, pokud do součásti zasáhneme. Dojde k přerozdělení zbytkových napětí a k zdeformování součásti.

Vznik zbytkového napětí je podmíněn plastickou deformací, překročením meze kluzu povrchové vrstvy.

Ideální stav zbytkového napětí je pro každou aplikaci individuální. Například pro dynamicky namáhané součásti je vhodné tlakové zbytkové napětí, jelikož brání šíření trhlin, mikrotrhlin z povrchu a významně tak zvyšuje únavovou pevnost materiálu. Vliv zbytkového napětí na únavové vlastnosti je popsán v následujících kapitolách.

Příčiny vzniku zbytkových napětí jsou popsány níže (více v kap. 3.3.2):

- Nerovnoměrná plastická deformace vyvolaná vnějšími silami, například silový účinek řezných sil.

- Nerovnoměrný ohřev neboli nerovnoměrné rozložení teplot v součásti.
- Nerovnoměrné strukturní změny v materiálu součásti, které jsou zároveň změnou objemovou.
- Chemické procesy jako absorpce látek do povrchu. [12]

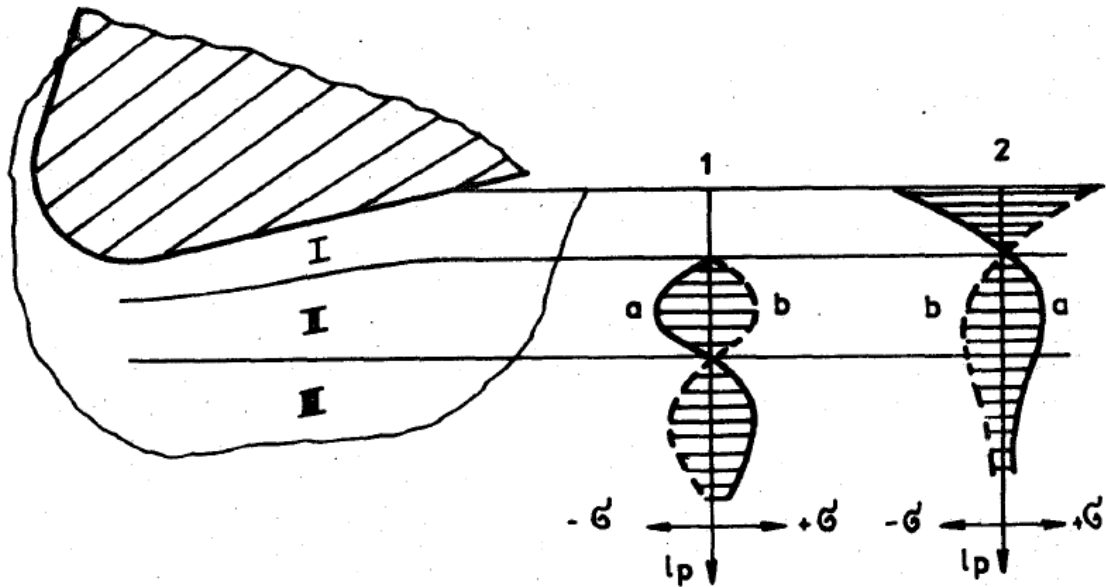
3.3.1 Základní dělení zbytkových napětí

Základní dělení zbytkových pnutí je odvozeno z objemu, ve kterém je dosaženo rovnováhy. Jedná se o zbytková napětí I., II. a III. druhu:

- Zbytková napětí I. druhu:
 - Makroskopické napětí, které dosahuje rovnováhy v relativně velké oblasti – makroobjemu. Změna rovnováhy vyvolává deformaci celé součásti.
- Zbytková napětí II. druhu:
 - Mikroskopické napětí, které je v rovnováze v oblasti několika sousedních zrn, krystalů. Změna rovnováhy nemusí vyvolat deformaci součásti.
- Zbytková napětí III. druhu:
 - Submikroskopická napětí, která jsou v rovnováze v oblasti atomů. Jsou zdrojem napěťových polí v krystalech. Narušení jejich rovnováhy nevede k deformaci součásti. [12]

3.3.2 Mechanismy a příčiny zanesení zbytkových napětí do součásti

Je-li povrchová vrstva zatížena mechanicky, působí na ní tedy mechanické zatížení, například při nízkých teplotách obrábění, probíhá v povrchu plastická deformace. Pod tímto povrchem je materiál namáhán jen elasticky, viz obr 3.3.2. [12]



Obr. 3.3.2 Mechanicky zatížená vrstva a průběhy napětí [12]

Příčiny vzniku napětí jsou následující. Při plastické deformaci dochází k snížení jeho hustoty a zvýšení měrného objemu. S tímto vlivem se spojuje další a to deformace jednotlivých zrn materiálu, respektive jejich prodloužení. Nastávají zde dva případy podle materiálu a jeho poměrem meze kluzu a meze pevnosti:

1) $R_m/R_p0,2 < 1,25$

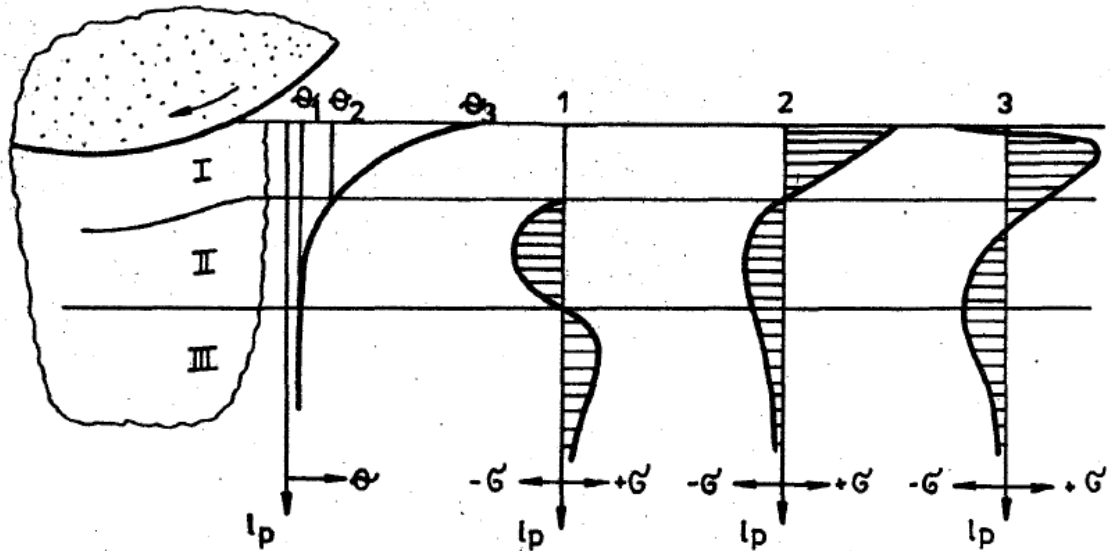
U tohoto materiálu se zrna deformují ve směru vzniku povrchu. Jde o důsledek tření hřbetu nástroje a prodloužení vrstvy I na obr. 3.3.2 pod břitem nástroje. Toto prodloužení je následkem růstu objemu materiálu vlivem plastické deformace. Působení těchto činitelů dochází k celkovému prodloužení vrstvy I. Ve vrstvě II je deformace elastická, je prodloužena vlivem břitu a vrstva III je vrstva neovlivněná, nedeformovaná. Při působení břitu viz obr. 3.3.2 graf 1 křivka a, vzniká ve vrstvě II tlak, který je následkem 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 přjetí nástroje opadne jeho vliv a vrstva II s elastickou deformací má snahu dosáhnout základního

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. 3.3.2 graf 2 křivka a. [12]

2) $R_m/R_{p0,2} > 1,25$

Při obrábění těchto houževnatých kovů a jejich slitin dochází k protažení zrn v povrchu až do kolmého směru na povrch. To má za následek zkrácení této vrstvy. Tento jev většinou převáží vliv plastické deformace a její změnu hustoty materiálu. V tomto případě nastává opačný případ napětí v povrchu, kterému odpovídají křivky b v grafech obr. 3.3.2. [12]

Je-li povrchová vrstva zatížena mechanicky i tepelně, což je například u broušení, vzniká napětí v povrchu následovně. Vlivem vysokých řezných rychlostí dojde k ohřevu povrchu součásti pod nástrojem. Obr. 3.3.2.2 a graf Θ znázorňuje předpokládaný průběh teploty v povrchu součásti. Pokud teplota přesáhne Θ_2 , je předpoklad, že je vrstva I v plastickém stavu, takže bez napětí a vlivu na vrstvu II. Ta se prodlužuje elasticky a vrstva III není ovlivněna. Následně po přejetí nástroje povrch chladne. Jakmile ale teplota klesne pod Θ_2 , materiál přestane být v plastickém stavu a chce se smrštít. V tom mu brání ale vrstvy II a III, to má za následek vznik tahového napětí v povrchové vrstvě I a tlakového napětí ve vrstvách II a III, viz obr. 3.3.2.2 graf 2. V praxi ale průběh zbytkových pnutí neodpovídá přesně grafu 2. Pokles napětí v povrchu je nejspíše dán změnami struktury a chemického složení absorpcí dalších prvků do povrchu viz obr. 3.3.2.2 graf 3. [12]



Obr. 3.3.2.2 Povrchová vrstva s mechanickým a tepelným zatížením [12]

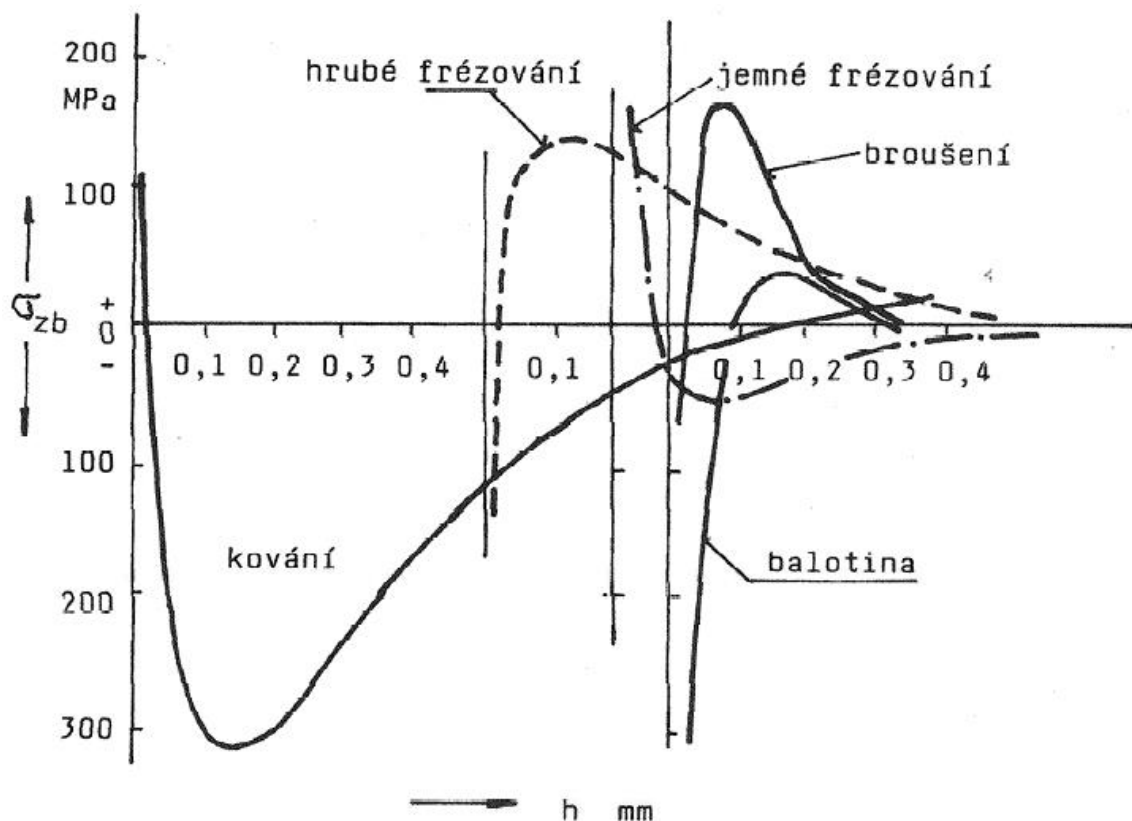
Je-li povrchová vrstva zatížena mechanicky, tepelně a probíhají změny struktury, které mají vazbu s teplotou. Ty mohou mít také jako následek změnu napětí. Je to dáno tím, že různé struktury mají různý objem. Příkladem může být ochlazování oceli a tím na změnu plošně středěné kubické mřížky na prostorově středěnou mřížku, což s sebou nese výraznou změnu objemu s následkem zbytkových pnutí. Další změny struktur probíhají například při zahřátí kalené oceli broušením či obráběním. Mimo to je taky průvodním jevem vysoké teploty povrchu absorpce látek z okolí, to znamená z rezného prostředí. Jako následek může být opět změna struktury a vznik zbytkových pnutí. [12]

3.3.3 Vliv technologií na zbytková napětí

Z předchozích kapitol je možné usuzovat, jaká technologická činnost bude mít svá zbytková napětí. Minimální úběry materiálu ovlivňují a zahřívají povrch málo a zbytková napětí jsou zde tlaková. Patří mezi ně lapování, honování a superfinišování. Mezi metody bez úběru materiálu patří válečkování, kuličkování, hlazení, balotínování a další. Ty ovlivňují povrchovou vrstvu plastickou deformací za relativně nízkých teplot, což opět umožňuje tvorbu tlakových zbytkových napětí. Nekonvenční technologie jako elektrochemické obrábění či elektroerozivní obrábění odebírají materiál bez mechanického

zatížení s relativně nízkým tepelným ovlivněním, což vede většinou k nulovému zbytkovému napětí. Podrobnou specifikací metod pro zpevnění a zanesení tlakového zbytkového pnutí se zabývá kapitola 4.

Výrobní postup většiny součástí je složen z několika technologií, která má každá vliv na zbytková napětí. Vždy následující technologie pozměňuje zbytková napětí vytvořená tou předchozí. Průběh zbytkových napětí a jejich postupnou změnu zobrazuje obr. 3.3.3.1. Jedná se o lopatku turbokompresoru z materiálu 10Ch17N2. Graf začíná stavem polotovaru, což je výkovek a zbytková napětí jsou tlaková. Následuje frézování na hrubo s celkovým úběrem 0,5 mm a výsledným takovým napětím. Jemné frézování s úběrem 0,2 mm napětí překlápá, ale finální broušení s úběrem 0,05 mm zanáší do povrchu tahové napětí. Tahové zbytkové napětí pro lopatku turbokompresoru je velmi nevhodné (viz kapitola 3.3.4), proto se aplikuje ještě dokončení balotínováním, čímž se tahové napětí z většiny eliminuje a do hloubky přibližně 0,1 mm vyvolá zbytkové napětí tlakové. [13]



Obr. 3.3.3.1 Průběh zbytkových napětí při výrobě lopatky turbokompresoru [13]

3.3.4 Vliv zbytkových napětí na vlastnosti součástí

Zbytková napětí mohou komplikovat výrobu součástí, které jsou relativně tenké, žebrované a tak podobně. Typickým příkladem jsou již výše zmíněné lopatky motorů.

Vliv zbytkových napětí mimo výrobní část života obrobku nelze jednoduše určit. Jsou proto nezbytné zkoušky, většinou destruktivní, které ověří vlastnost určitého zbytkového napětí v povrchové vrstvě.

Statická pevnost je zbytkovým napětím ovlivněna různě. Pokud budeme aplikovat standardní rozdělení napětí do celého průřezu materiálu, bude zbytkové napětí v povrchu bráno jako předepnutí materiálu. Největší vliv na statickou pevnost mají zbytková napětí od objemového tváření, odlévání a tepelných zpracování. O dokončování, kterým se tato práce nejvíce zabývá, to říci rozhodně nelze. Ovlivňuje povrch do hloubek v řádu desetin milimetru, a aby mělo vliv na statickou pevnost, muselo by se jednat o součást s velmi malým průřezem.

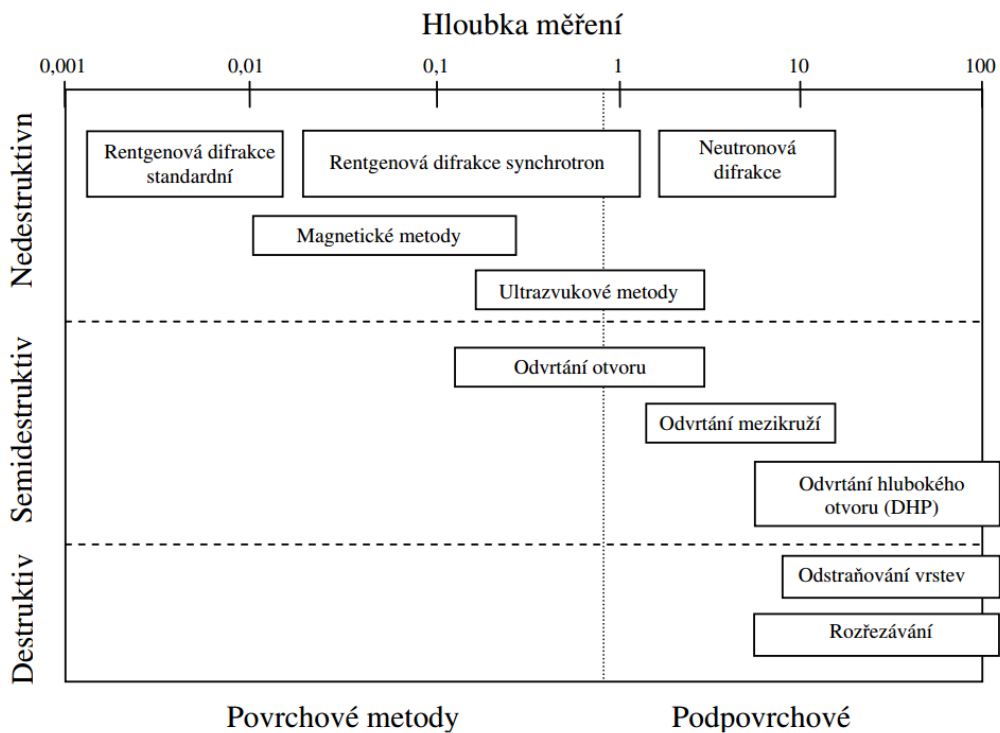
Únavová pevnost, významná u dynamicky namáhaných dílů, je zbytkovým napětím velmi ovlivněna. Obzvláště to platí u součástí namáhaných na ohyb a krut, jelikož je u těchto druhů namáhání nejvíce exponovaná povrchová vrstva. Ta obsahuje často vruby, koncentrátory napětí, vrypy a mikrotrhliny či vměstky. V těchto místech je obvykle iniciována trhлина. Tlaková zbytková napětí tuto iniciaci zpomalují či jí úplně zamezují. To potvrzují i zkušenosti z praxe a výsledky experimentálních výzkumů, že tlaková napětí únavovou pevnost zvyšují a tahová snižují (ale ne rovnocenně). V dalších kapitolách této práce jsou uvedeny výsledky pro některé kombinace technologií, napětí a únavové pevnosti. [13]

3.3.5 Měření zbytkových napětí

V dnešní době se používá mnoho metod pro zjištění velikosti zbytkového napětí v povrchu i průřezu materiálu. Volba použité metody závisí na mnoha skutečnostech, jako typ zkoumané součásti, její materiál, rozměry, hmotnost, zkoumané místo, hloubka měření, finanční náklady a dostupnost

metody. Metody neměří přímo zbytkové napětí, ale veličinu, podle které lze zbytkové napětí dopočítat, jako například deformaci či změnu magnetismu. Základem je tuto veličinu přesně změřit, jelikož je určující pro výsledek. Z toho plyne nutnost dodržet veškeré náležitosti metody a zanést do měření minimum chyb. Základní rozdělení metod měření zbytkového napětí je podle ovlivnění zkoumané součásti či vzorku:

- **Destruktivní metody** – jedná se o metody, které mají za následek zničení součásti. Podstatou metod je měření deformace při odebrání povrchových vrstev součásti s předpokládaným zbytkovým napětím.
- **Semidestruktivní metody** – jedná se o metody, u kterých dojde k lokálnímu poškození součásti či její části, která byla k tomuto účelu určena. Možná metoda je například vrtání otvoru.
- **Nedestruktivní metody** – jedná se o metody, u kterých nedochází k ovlivnění měřené součásti. Jde o většinu metod využívající fyzikální principy. Například rentgenová difrakce či ultrazvuk.



Obr. 3.3.5.1 Rozdělení metod pro měření zbytkového napětí [14]

Ve velkém množství metod pro zjišťování zbytkových pnutí nám usnadní orientaci i tabulka tab. 3.3.5. Je v ní uveden tvar, pro který je daná metoda vhodná a způsob měření i s měřenou veličinou, pomocí které je následně napětí dopočítáno.

Tab. 3.3.5 Principy metod měření 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		difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk	obecný tvar	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

3.3.6 Volba metody pro experimentální část práce

Vzhledem k vzorkům titanové slitiny Ti6Al4V dodaným ve tvaru nařezané desky, které mají rozměry přibližně 70 mm na délku, 10 mm na šířku a 5 mm na tloušťku a možností využít laboratoře Ústavu obrábění, projektování a metrologie, byla zvolena metoda mechanická a to elektrolytického odleptávání vrstev, známou také jako metoda vetknutého nosníku či metoda postupného elektrolytického rozpouštění vrstev.

Jedná se o metodu vypracovanou doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc. na Fakultě strojní ČVUT v Praze a dále vyvinutou doc. Ing. Jindřichem Kafkou, CSc.

Metoda využívá deformace součásti obsahující zbytkové napětí po té, co je odleptána povrchová vrstva. Při vyhodnocování například vzorku s obdélníkovým průřezem, pokud dojde k odstranění vrstvy se zbytkovým napětím, musí dojít k vyrovnání vzniklého nerovnovážného stavu – a to deformací, ohnutím. Leptání a měření deformace probíhá kontinuálně. Deformace lze měřit několika způsoby, důležitá je však jejich přesnost. V experimentální části je využita metoda měření deformace bezdotykovým indukčním snímačem.

Klady metody elektrolytického odleptávání

- Přesné určení orientace zbytkového napětí
- Kontinuální snímání deformace při odleptávání
- Relativně časově nenáročná metoda (záleží na materiálu a hloubce odleptané vrstvy)

Zápory metody elektrolytického odleptávání

- Destrukce součásti či vzorku
- Nutnost laboratorních podmínek
- Práce s chemikáliemi
- Rozměrové omezení zkoumané součásti či vzorku

V experimentální části této práce je metoda a konkrétní zařízení popsáno podrobněji.

4 TECHNOLOGIE DOKONČOVÁNÍ SE ZPEVNĚNÍM POVRCHOVÉ VRSTVY

Dokončování součástí se zpevněním povrchových vrstev je v leteckém průmyslu důležitou technologií. Má již zmíněný velký vliv na životnost součástí. Dokončování se zpevněním dodává součastem přidanou hodnotu. Zvýšení životnosti zpevněním může mít náklady jak zanedbatelné, tak velmi významné. Zpevněná součást může být tak nákladná, že je výhodnější využít nezpevněnou s nižší životností a tu měnit. Toto rozhodnutí je na ekonomech firem.

Dokončování = poslední operace s cíli:

- Konečná přesnost rozměru, tvaru a polohy
 - IT, kruhovitost, rovinnost a další
- Mikrogeometrie povrchu
 - Parametry drsnosti, profilu a další
- Mechanických a fyzikálních vlastností povrchové vrstvy
 - Tvrdost, odolnost korozi a další
- Kvalita povrchové vrstvy
 - Struktura, zbytkové napětí, vady a další
- Vzhled povrchu – morfologie
 - Lesk, mat a další [16]

Žádanou povrchovou vrstvou – integritu povrchu, je možné dosáhnout pomocí základních dvou principů uvedených níže.

Dokončování lze rozdělit následovně:

- **S úběrem materiálu** - odebráním přídavku

Předpokladem pro aplikaci těchto metod dokončení je dostatečný přídavek na dokončení. Ten bude odebrán jemnými podmínkami s minimální tepelnou zátěží povrchové vrstvy. Přídavek musí být tak velký, aby dokončení zajistilo odebrání nežádoucích složek integrity povrchu (tahová zbytková napětí, trhlinky, vady, nepřesnosti a

podobně). Jako výkon těchto operací se nebere odebraný objem materiálu, ale plocha o žádané kvalitě za jednotku času. [16]

- **Bez úběru materiálu** – přetvořením povrchové vrstvy

Jedná se úpravy povrchové vrstvy plastickou deformací. Základem je průběh za studena, čímž dochází ke zpevnění a tvorbě tlakových zbytkových napětí. Dále dochází většinou k úpravě drsnosti vlivem deformace vrcholů nerovností. Zlepšení mechanických vlastností je následkem tlakových zbytkových napětí zanesených do větší hloubky a tím eliminovaných případných nepříznivých vlivů předchozích operací. Mezi zlepšené parametry patří únavová pevnost, tvrdost, odolnost korozi a otěru. Důležité je, vyhnout se plastickým deformacím za tepla, které sice dávají většinou lepší povrch, co se týká vzhledu (lesk), ale vzniklá tlaková zbytková napětí zvyšují možnost vzniku trhlin a celkové snížení životnosti součástí. [16]

Tato kapitola se věnuje dokončování se zpevněním. V této kapitole je výčet standardních i moderních metod zpevňování povrchu a vkládání tlakových zbytkových napětí. Metody použité na vzorcích pro experimentální část jsou rozpracovány podrobněji a práce uvádí i výsledky experimentů z tuzemska a zahraničí. Vyhledány byly experimenty týkající se konkrétně zkoušené slitiny titanu Ti6Al4V. Některé uvádí i jejich vliv na únavovou pevnost.

4.1 Dokončování úběrem materiálu se zpevněním povrchové vrstvy

Tato kapitola obsahuje výběr dokončovacích technologií s úběrem materiálu, které se vyznačují zpevňováním povrchu a zanášením tlakových zbytkových napětí. Největší pozornost je věnována technologiím, které jsou využity pro vzorky v experimentální části práce. U nich jsou uvedeny i dosažené parametry experimentů z vědeckých článků. Důvodem je následná možnost porovnání s výsledky experimentální části práce.

4.1.1 Frézování

Frézování není typickou dokončovací technologií. Dnešní moderní frézovací stroje, CNC centra s kvalitními nástroji dokáží udělat povrchovou vrstvu o dostatečné kvalitě pro mnoho aplikací.

Do této kapitoly je zařazeno hlavně kvůli tomu, že je to ***základní stav materiálu v experimentální části*** práce.

Zbytkové napětí povrchové vrstvy je u frézování různé. Ovlivňuje ho několik parametrů jako řezná rychlost, úhel čela, chlazení a další, viz kapitola 3.4.2.

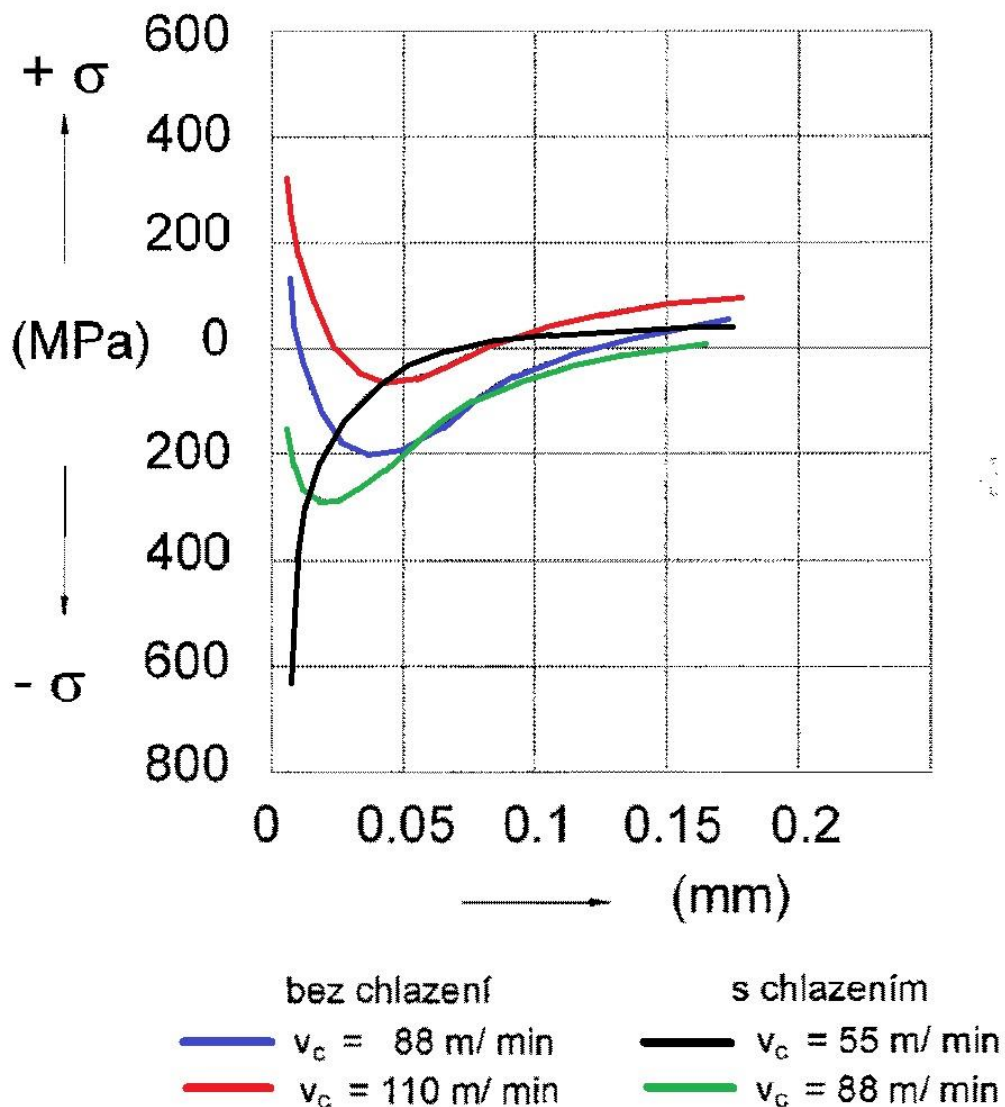
4.1.1.1 Zbytková napětí a mikrotvrdost frézované slitiny titanu

Zbytková napětí v povrchové vrstvě titanu a jeho slitin jsou velmi ovlivnitelná teplotou řezného procesu. Titan a jeho slitiny vedou totiž špatně teplo. Slitina Ti6Al4V má tepelnou vodivost λ rovnu 6,6 W/m.K při 20°C a 13 W/m.K při 400°C (ocel s 0,2%C má $\lambda=50$ W/m.K [17]). Obráběči přirovnávají tuto slitinu ke korozivzdorné oceli AISI 316 ($\lambda=16,2$ W/m.K při 20°C [18]). Doporučený postup zahrnuje vysoký přísun chladicího média, nízké otáčky a relativně vysoké posuvové rychlosti. Jako materiál nástroje je vhodné použít wolfram karbidové nástroje nebo nástroje na bázi kobaltu. [19]

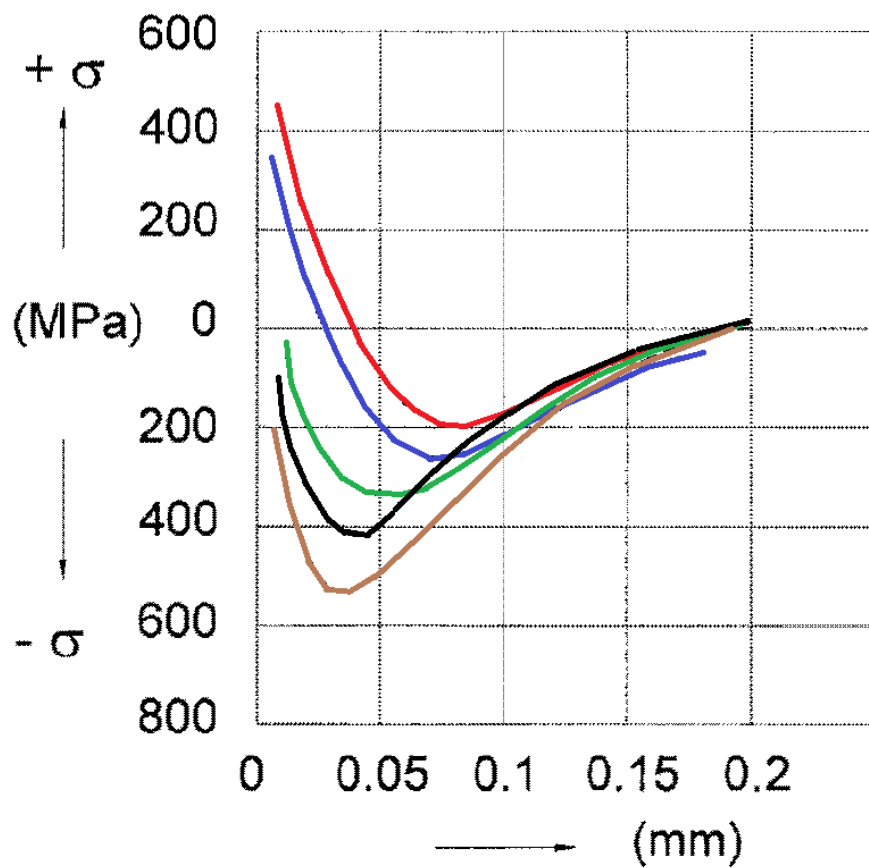
Zdroj [20] uvádí zbytková napětí v obr. 4.1.1.1. Je použito frézování čelní frézovací hlavou o průměru 125 mm osazenou destičkami ze slinutých karbidů třídy K. Úhel čela je pozitivní a řezné rychlosti jsou od 55 do 110 m/min (více parametrů zdroj neuvádí). Posuv na zub f_z odhaduji dle obr. 4.1.1.2 na $f_z = 0,045$ mm/zub. Z obrázku je zjevné, že chlazení je základním parametrem pro získání tlakového zbytkového napětí – viz plná čára, křivka. Zvyšující se rychlost a tím i teplota má za následek vznik tahového zbytkového napětí. V obr. 4.1.1.2 uvádí průběhy zbytkových napětí po frézování stejnými podmínkami, ale s negativním úhlem čela nástroje. Hlavním následkem této změny je zhruba dvounásobná hloubka maxim a hloubka přechodu přibližně o čtvrtinu větší. Dále na obr. 4.1.1.3 je uvedena únavová pevnost vzorků různě dokončených

povrchových vrstev. Parametry jednotlivých dokončovacích operací autor neuvádí. Nejlepších hodnot dosahuje čelní frézování a frézování s následným balotínováním.

Zdroj [21] uvádí u frézované slitiny Ti6Al4V průběh mikrotvrdosti HV 0,3/20 v průřezu povrchové vrstvy. Udává řeznou rychlost 78 m/min, posuv na otáčku $f = 0,133$ mm/ot a hloubka řezu 1,65 a 2,35 mm. Řezný nástroj ze slinutých karbidů (P20 – P40) s povlakem PVD na bázi TiAlN, s kladným úhlem čela. Na obr 4.1.1.4 je výsledek pro rozdílné hloubky řezu.

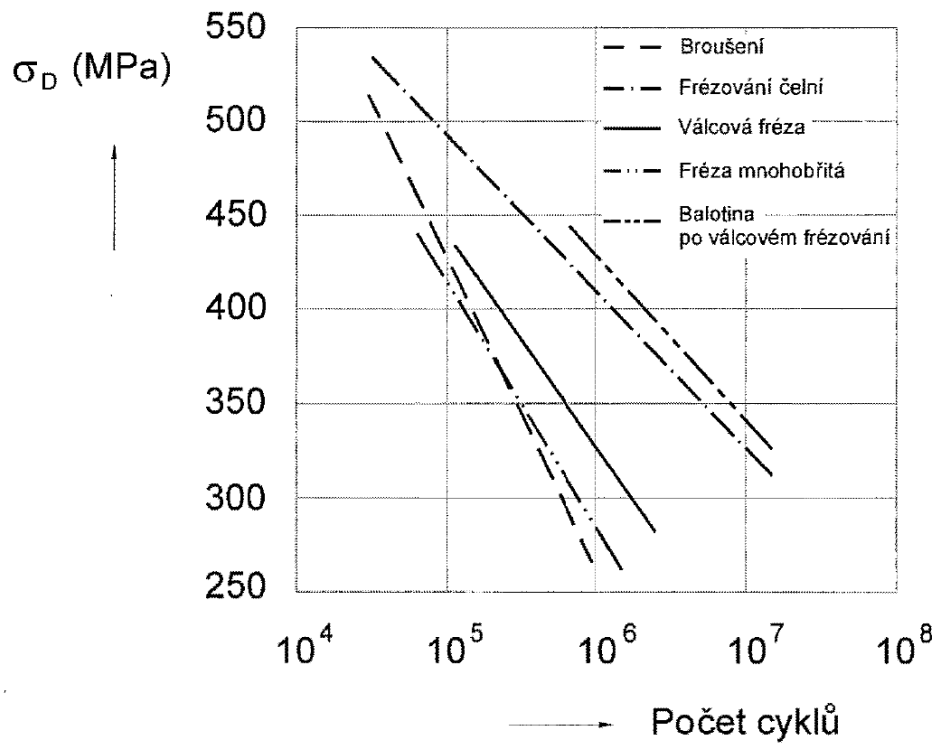


Obr. 4.1.1.1 Zbytková napětí frézované slitiny titanu, pozitivní úhel čela (graf dobarven pro větší zřetelnost) [20]

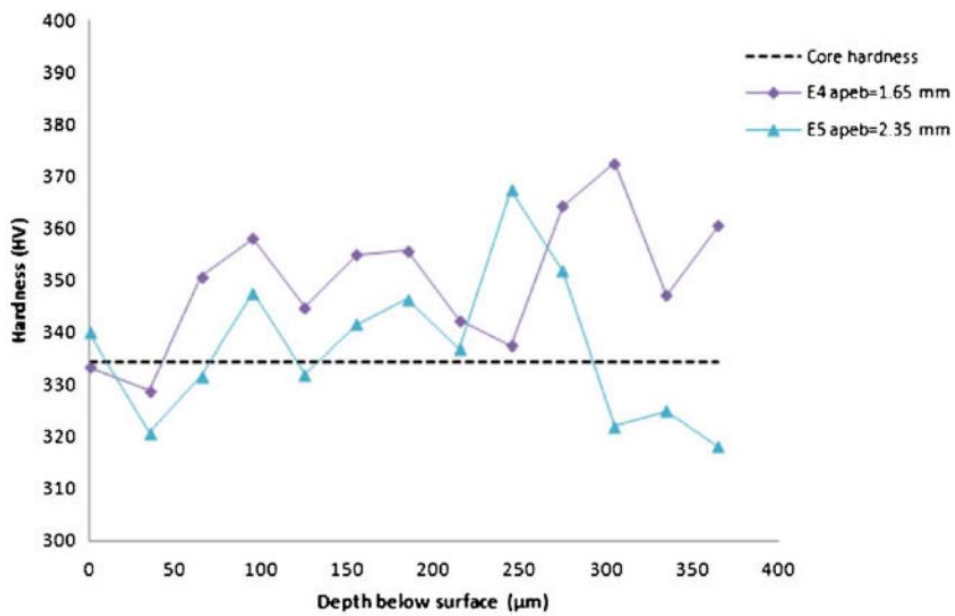


- | bez chlazení | | s chlazením | |
|-------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--|
| — | $v_c = 88$ m/ min | — | $v_c = 88$ m/ min |
| — | $v_c = 110$ m/ min | — | $v_c = 88$ m/ min ($f_z = 0.015$ mm/ zub) |
| | | — | $v_c = 88$ m/ min ($f_z = 0.03$ mm/ zub) |

Obr. 4.1.1.2 Zbytková napětí frézované slitiny titanu, negativní úhel čela (graf dobarven pro větší zřetelnost) [20]



Obr. 4.1.1.3 Průběh únavové pevnosti různě dokončených vzorků [20]

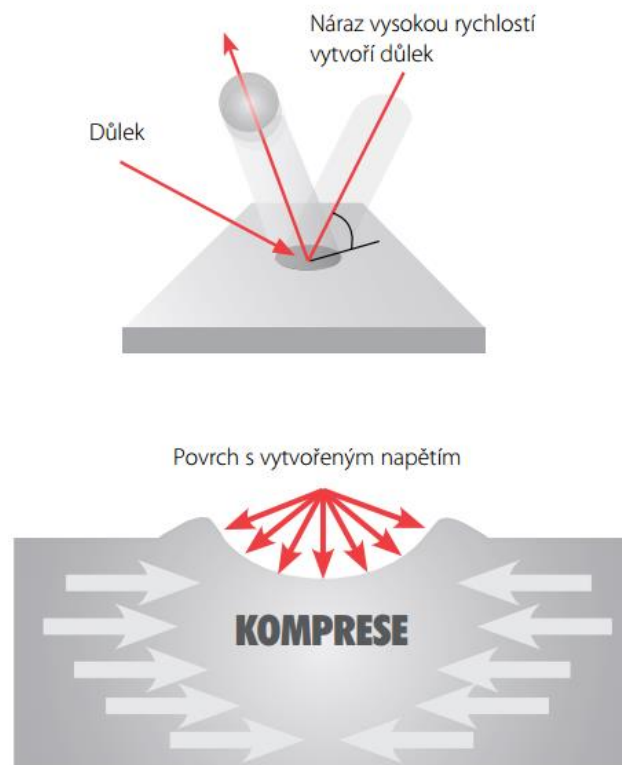


(b) $V=78$ m/min, $f=0.133$ mm/rev

Obr. 4.1.1.4 Mikrotvrdość HV 0,3/20 frézované slitiny Ti6Al4V [21]

4.1.2 Tryskání

Jedná se o metodu, kde dochází k dopadání částic vysokou rychlostí na upravovanou povrchovou vrstvu (viz obr. 4.1.2.1). Částice mohou být hnány plynným či kapalným médiem, nebo metány pomocí metacích kol. Jestli se jedná o metodu s úběrem či bez úběru materiálu závisí na mnoha faktorech, ale vzhledem k tomu, že se jedná o metodu vycházející principiálně z úběrové, řadím ji do kapitoly 4.1. Tryskání dokáže ovlivnit povrchovou vrstvu například v drsnosti a zanést zbytkové tlakové napětí (až do hloubky 0,5 mm), čímž může ovlivnit tvary součásti a jejich přesnost. [16]



Obr. 4.1.2.1 Proces tryskání [22]

Charakter tryskání lze ovlivnit následujícími parametry:

- Tlakem nosného média (0,1 – 2 MPa)
- Vzdáleností a úhlem trysky od povrchu (10° - 45° pro úběr, 50° - 80° pro minimální úběr)
- Časem působení, počtem průchodů a překrytí
- Použitým trykacím médiem

- **Pro úběr**
 - Křemičitý písek – pískování, zrna abrazivních materiálů – broušení a lapování proudem brusiva, kovové částice – litinová zrna či ocelová drť
- **Pro zpevnění (úběr minimální)**
 - Ocelové kuličky – kuličkování, litinové kuličky – brokování, omílaný sekaný ocelový drát – patentování, skleněné kuličky – balotínování [16]

Pro tyto metody se většinou využívají speciální komory, ve kterých probíhá celý cyklus s ručním naváděním či automatizovaným pohybem trysky nebo upravované součásti, často i s CNC řízením. Uvedenými metodami lze upravovat jednoduché i tvarově složité povrchy velkého počtu rozmanitých strojních součástí - ozubených kol, podvozkových náprav, spojovacích a hnacích hřídelí, spojovacích tyčí, klikových a vačkových hřídelů, pístů, motorových bloků, ventilů, turbínových disků, lopatek a hřídelů, hlav válců a další. [23]

Řízení procesu

Pro zajištění spolehlivosti a reprodukovatelnosti procesu musí být proměnné parametry procesu kuličkování přesně a reprodukovatelně řízené. Technologie řízeného kuličkování se liší od většiny výrobních procesů v tom, že pro ověření toho, zda byla provedena podle správných specifikací, neexistuje žádná nedestruktivní metoda. Aby bylo možné zajistit, že pro jednotlivé výrobní dávky budou splněné specifikace kuličkování, musí být zachovány následující prvky řízení: intenzita media, pokrytí, směr tryskání a opakování. Zařízení může být mechanizované, aby se zajistil plynulý pohyb dílu do proudu tryskajících částic - odtud také pojem řízené kuličkování. [22]

Řízení média

Řízení tvaru a velikosti tryskacího prostředku zajistí vytvoření reziduálního napětí v tlaku na povrchu s konstantní velikostí a hloubkou. Nedokonalý tvar a velikost tryskacího prostředku by měl za následek vytvoření

nepravidelného profilu reziduálního napětí, nadměrné porušení povrchu a potenciální nadměrné koncentrace napětí. [22]

Řízení pokrytí

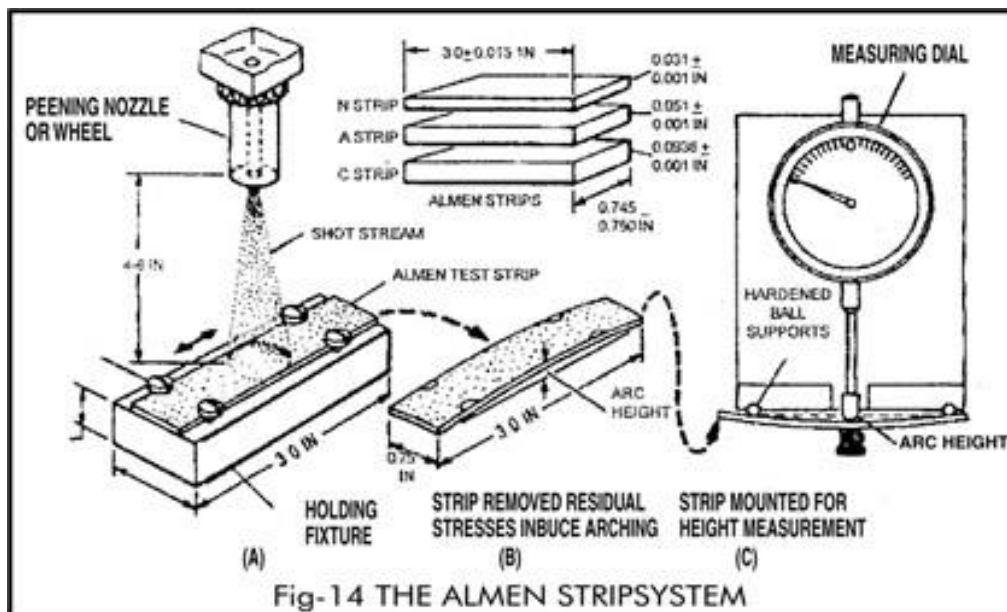
Pro provedení vysoce kvalitního kuličkování má rozhodující význam, aby byl pokrytý celý povrch určený pro toto zpracování. Mírou pokrytí se rozumí velikost původní plochy povrchu, která byla pokryta dýlkou z tryskacího prostředku. Hodnota pokrytí nesmí být nikdy menší než 100 % (též značeno jako 1), protože na jakékoliv neošetřené ploše, která není uzavřena reziduálním napětím v tlaku, může dojít ke vzniku únavy materiálu a koroznímu praskání. [22]

Řízení intenzity

Mírou intenzity kuličkování je energie tryskání. Je to jeden ze základních prostředků pro zajištění reprodukovatelnosti procesu. Energie tryskání je přímo úměrná napětí v tlaku vyvolaného v dílu. Intenzitu lze zvýšit použitím těžších částic nebo zvýšením rychlosti proudu tryskání (rychlost částic dosahuje až 150 m/s). Ostatní proměnné zahrnují úhel dopadu a typ tryskacího média. Tlak nosného média je 0,1 až 2 MPa. [22] [16]

Měření intenzity

Usuzovat míru zpevnění povrchu lze podle množství vnesené deformační energie do povrchu zpevňované součásti. Měření a ověření procesu tryskání se provádí pomocí Almen pásků, což jsou ocelové pásky s rozměry $76 \pm 0,2 \times 19 \pm 0,1$ mm a tloušťkami $0,8 \pm 0,02$ mm, $1,3 \pm 0,22$ mm a $2,4 \pm 0,02$ mm, které jsou umístěny u tryskané součásti či v její maketě. Měřenou hodnotou je potom průhyb pásku v palcích. Průhyb je způsoben zanesením tlakového zbytkového napětí do povrchu pásku, postup na obr. 4.1.2.2. [22]



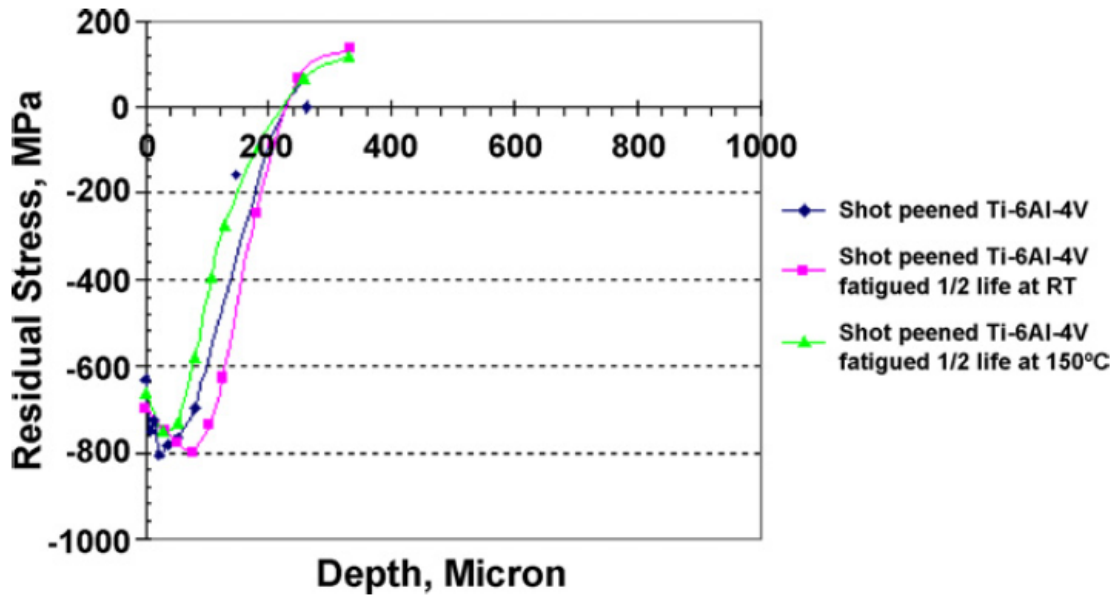
Obr. 4.1.2.2 Měření intenzity tryskání pomocí Almen pásků [24]

4.1.2.1 Zbytková napětí a mikrotvrдость tryskané slitiny titanu

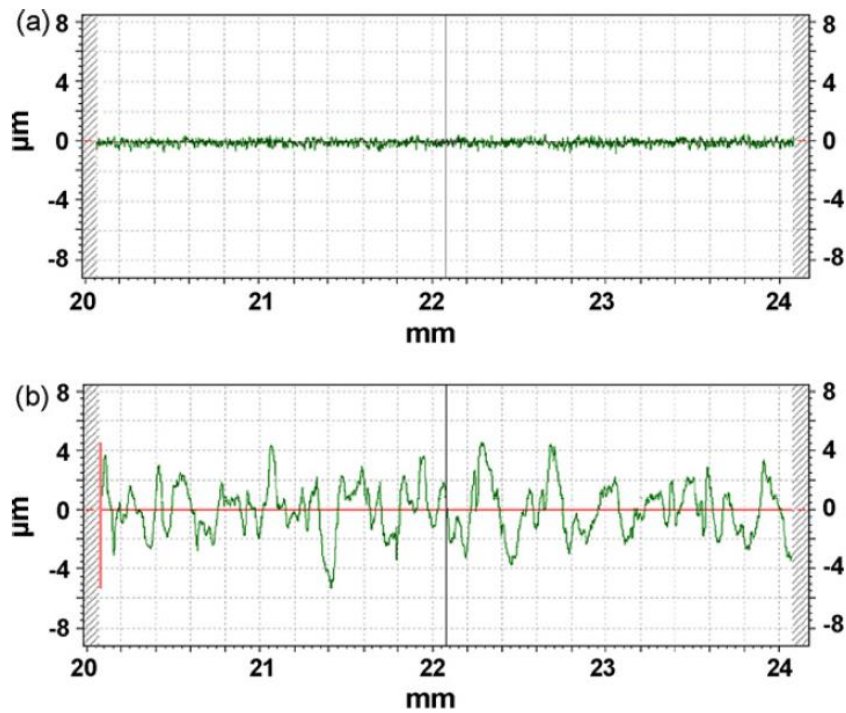
Zpevňování povrchu tryskáním, v zahraniční odborné literatuře známé jako shot peening, je velmi efektivní úpravou součástí. Náklady na tuto úpravu závisí na složitosti dílu a použitém médiu a stroji. Při využití měření pomocí Almen pásků jde ověřovat výsledek technologie nedestrukčně (samozřejmě musí být znám poměr deformace pásku a ovlivnění daného materiálu).

Touto metodou je upravena část vzorků v experimentální části této práce.

Zdroj [25] uvádí hodnoty zbytkového napětí pro titanovou slitinu Ti6Al4V tryskanou intenzitou 0,006 – 0,008 A (průhyb Almen pásku tloušťky A v palcích) litinovými kuličkami MI-170-R s překryvem 1,25 na obr. 4.1.2.3. Zbytkové tlakové napětí dosahuje maxima v hloubce okolo 0,06 mm. Dále je vidět relaxace zbytkového napětí při vyšší teplotě. Hloubka přechodu 0,22 mm se ale nemění. Zdroj dále uvádí změnu drsnosti z $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ na $1,3 \mu\text{m}$. Z obr. 4.1.2.4 je rozdíl mezi drsnostmi jasný.



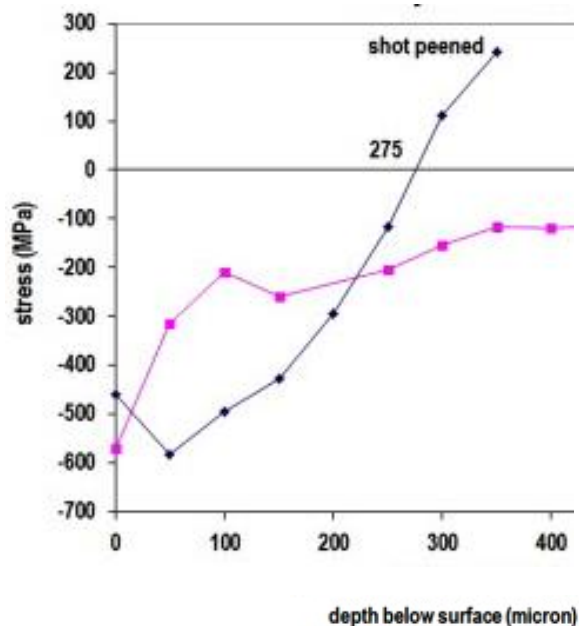
Obr. 4.1.2.3 Zbytkové napětí v průběhu životnosti [25]



Obr. 4.1.2.4 Drsnost R_a před a po tryskání [25]

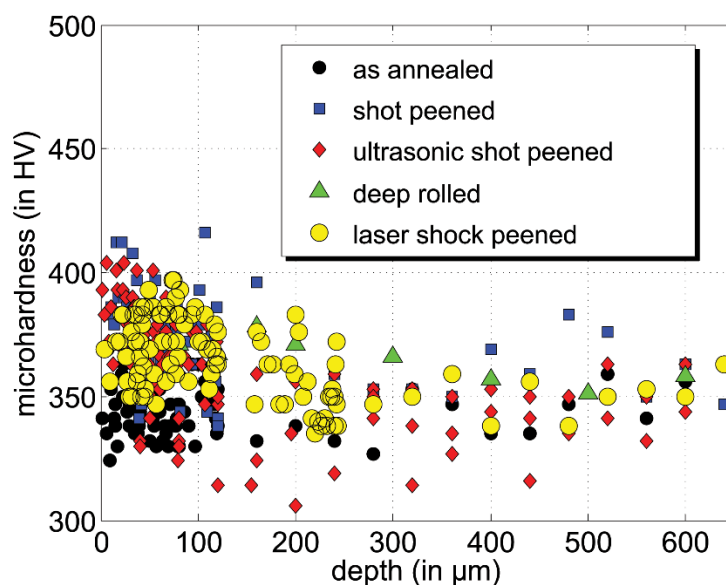
Zdroj [26] uvádí výsledky shot peeningu při intenzitě 0,012 – 0,014 A ocelovými kuličkami o průměru 0,8 mm na obr. 4.1.2.5 (modrá křivka). Takové zbytkové napětí dosahuje při výše uvedených podmínkách maxima v hloubce

0,05 mm a napětí $-590 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Zdroj dále uvádí zvýšení drsnosti R_a z 1,13 na $3,86 \mu\text{m}$.



Obr. 4.1.2.5 Zbytkové napětí, shot peenované modře [26]

Zdroj [27] uvádí změnu mikrotvrlosti HV 0,025 po dvoufázovém shot peeningu při parametrech: 1. fáze 0,012 A ocelovými korozivzdornými kuličkami o velikosti 0,4 mm, 2. fáze 0,006 A skleněnými kuličkami 0,06 – 0,15 mm (obr. 4.1.2.6 – modré čtverce). Mikrotvrdot v první desetíně milimetru dosahuje 340 až 420 HV 0,025.



Obr. 4.1.2.6 Mikrotvrdot HV 0,025, shot peenované modře [27]

4.1.3 Omílání

Omílání součástí může být procesem s úběrem tak i bez úběru (či minimálním) materiálu. Jedná se velmi produktivní metodu pro úpravu povrchu většího množství menších součástí. Metoda pouze upravuje vzhled, drsnost a případně zbytkové napětí. Podstatou procesu je vzájemný pohyb a kontakt omílaných součástí s abrazivními či neabrazivními částicemi v prostoru omílacího bubnu. Průběh omílání závisí na tvaru a pohybu bubnu, tvaru a pohybu omílaných součástí a částic, vlastnostech materiálu součástí, jejich hmotností a podobně. Omílací buben může mít mnoho tvarů, válcový vodorovný, kruhový svislý, kuželový a další. Pohyb bubnu je také různý, může být rotační, osový, excentrický, sférický... Tento základní pohyb může být plynulý či přerušovaný či doplněný rázy. Cílem kombinace tvaru bubnu a jeho pohybu je dosažení rovnoměrného ovlivnění povrchu omílaných součástí a času k tomu potřebného. Omílání může být suché či mokré, kapaliny mohou být antikorozivní. Proces má trvání i několik hodin. [16]

Fáze omílání:

- čištění
- broušení
- leštění
- doleštění
- zpevnění
 - o Jedná se o takzvaný „**tvrdý proces omílání**“. Jako médium ovlivňující povrch se používají kovová tělíska s oblými hranami, nebo také kuličky [16]

4.2 Dokončování bez úběru materiálu se zpevněním povrchové vrstvy

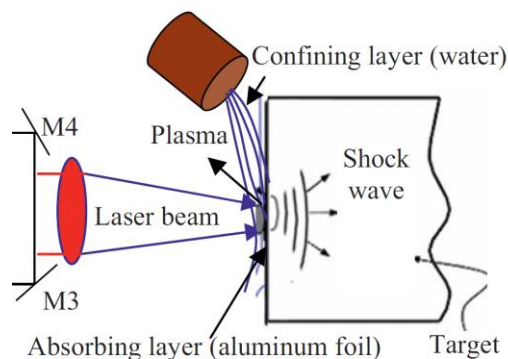
Tato kapitola obsahuje výběr dokončovacích technologií bez úběru materiálu, které se vyznačují zpevněním povrchu a zanášením tlakových zbytkových napětí. Největší pozornost je věnována technologii, která je využita

pro vzorky v experimentální části práce. U ní jsou uvedeny i dosažené parametry experimentů z vědeckých článků. Důvodem je následná možnost porovnání s výsledky experimentální části práce.

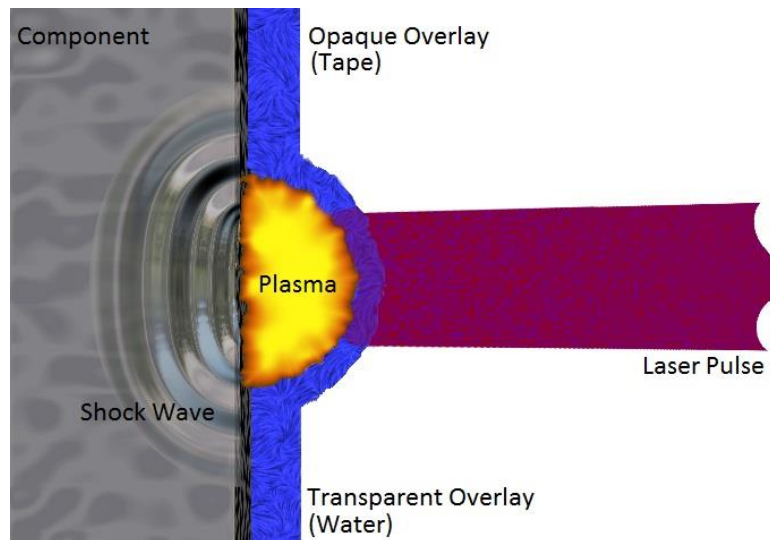
4.2.1 Laser peening

V tomto technologickém procesu (Laser peening či Laser Shock Peening) je povrch materiálu upravován rázovou vlnou vyvolanou intenzivním pulzním laserovým zářením. Rázová vlna v povrchové vrstvě materiálu vyvolává tlaková zbytková pnutí, která významně zlepšují únavové vlastnosti materiálu, omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin a zvyšují tvrdost povrchu. Nejedná se tedy o tepelné působení, ale o tvorbu plastických deformací.

Při aplikaci laserového shock peeningu se na povrchu součásti nachází dvě rozdílné vrstvy – průhledná a neprůhledná. Obě jsou zde za účelem zvýšení účinnosti metody. První vrstva, přímo na povrchu součásti, je neprůhledná, obvykle se jedná o hliníkovou folii nebo černou pásku, částečně chránící povrch upravované součásti a také absorbující energii z laserového pulsu a generující vysoké teploty plazmy o teplotě až 10 000°C. Druhá překryvná vrstva je transparentní pro laserový paprsek, typicky proud vody, působící jako tlumící mechanismus, který omezuje expanzi plazmy. Znázornění způsobu je uvedeno níže na obr. 4.2.1.1 a obr. 4.2.1.2. [28]



Obr. 4.2.1.1 Schéma laser peeningu (absorbing layer = absorbní vrstva; laser beam = laserový paprsek; confining layer = tlumící vrstva; shock wave = rázová vlna; target = cíl, součást) [29]



Obr. 4.2.1.2 Schéma laser peeningu (opaque overlay = absorbní vrstva; laser pulse = laserový puls; transparent overlay = tlumící vrstva; shock wave = rázová vlna; component = cíl, součást) [28]

Povrch součásti je chráněn od tepelného účinku plazmy první vrstvou. V průběhu dopadání laserového pulsu na první vrstvu, typicky méně než 30 nanosekund, není dostatek času pro prohoření první vrstvy a poškození či ovlivnění součásti. Voda nemá žádný vliv na chlazení vysoké teploty plazmy v průběhu tohoto krátkého pulzu, spíše kontinuálně chladí upravovanou součást. Voda se používá k zintenzivnění rázové vlny ztlumením expanze plazmy. Tím zvyšuje intenzitu rázové vlny a její délku - což umožňuje produkci hlubšího a intenzivnějšího pole zbytkového napětí. [28]

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

Parametry:

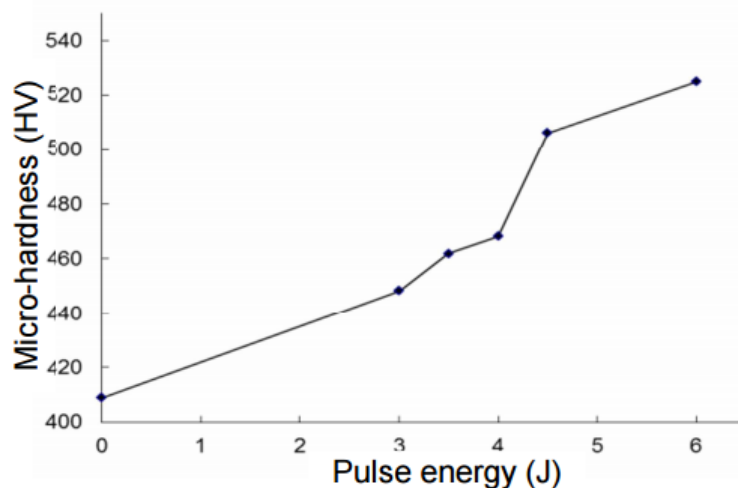
Druh laseru, energie, frekvence, vlnová délka, délka pulzu, plocha paprsku, překrytí.

Druh laseru

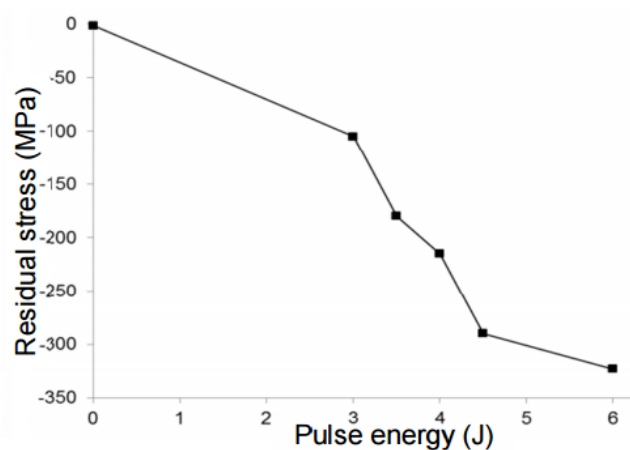
Nejčastěji používán je Nd:glass, ND: YAG,

Energie

Energie pulzu se udává v joulech, využívá se energie až desítky joule. Setkat se můžeme také s udáním ve watttech na centimetr čtvereční. Jeden joule je roven wattsekundě. Vzhledem k trvání pulzu v řádu nanosekund vychází dodaný výkon v řádu gigawatt na centimetr čtvereční. Zdroj [30] uvádí pro délku pulzu 12 ns laseru ND: YAG, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, absorpční vrstva 0,1 mm a tlumící vrstva 1,8 mm vody následující závislosti: závislost hustoty energie na zpevnění povrchu ukazuje obr. 4.2.1.3, závislost hustoty energie na zanesení tlakových zbytkových napětí ukazuje obr. 4.2.1.4. Obě pro slitinu Ti6Al4V. Materiál před úpravou měl mikrotvrdot 411 HV 0,01 a zbytkové napětí $0,36 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.



Obr. 4.2.1.3 Závislost hustoty energie na mikrotvrdot HV 0,01 [30]



Obr. 4.2.1.4 Závislost hustoty energie na zbytkovém napětí [30]

Frekvence

Jedná se o frekvenci pulzů laseru. Je ovlivněna konstrukcí laseru a polohovacím zařízením. Je v řádu jednotek Hz

Vlnová délka

Dle použitého laseru. Nd:glass má vlnovou délku 1054 či 1062 nm, ND:YAG má vlnovou délku 1064 nm.

Délka pulzu

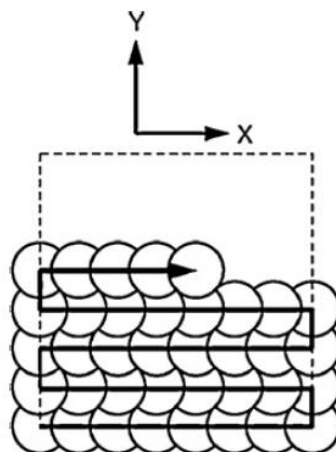
V řádu nanosekund. Tlakový impulz vyvolaný reakcí laserového paprsku s povrchem má délku 2 až 2,5 krát delší. [31]

Plocha paprsku

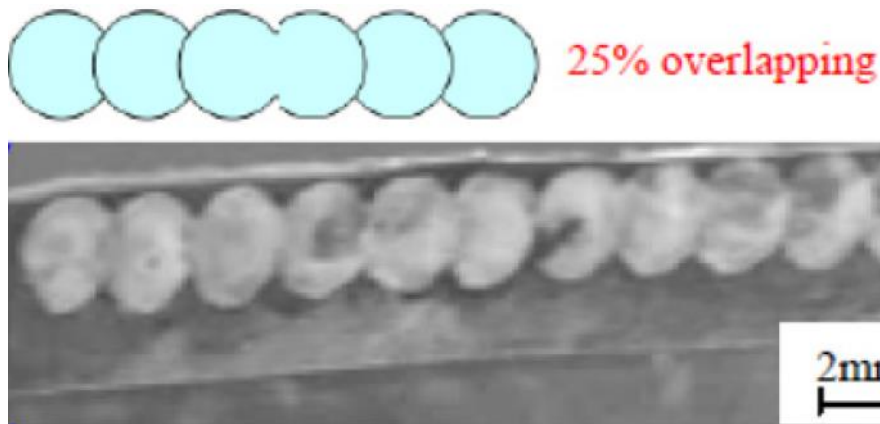
Paprsek má většinou kruhový průřez a jeho plocha je v řádu jednotek až desítek mm². K úpravě paprsku se používají speciální optické čočky.

Překrytí

Překrytím je myšleno celkové pokrytí součásti plochou laserového paprsku. Jako minimum je 100% pokrytí. Méně má za následek zanesení do povrchu oblasti s nízkým (původním) a vysokým napětím, což šíření trhlin může naopak podpořit. Stoprocentní pokrytí se ale nejde využít vzhledem ke kruhovému průřezu laserového paprsku (viz obr. 4.2.1.5). Jako minimum je pak přibližně 125% (1,25) (viz obr. 4.2.1.6).



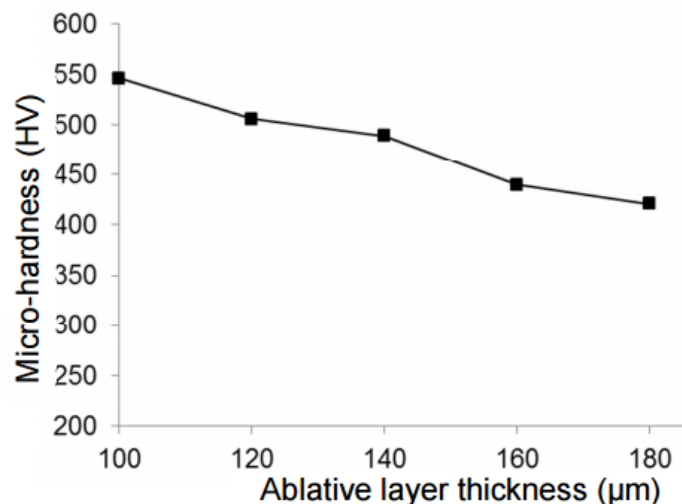
Obr. 4.2.1.5 Pokrytí plochy laserem [32]



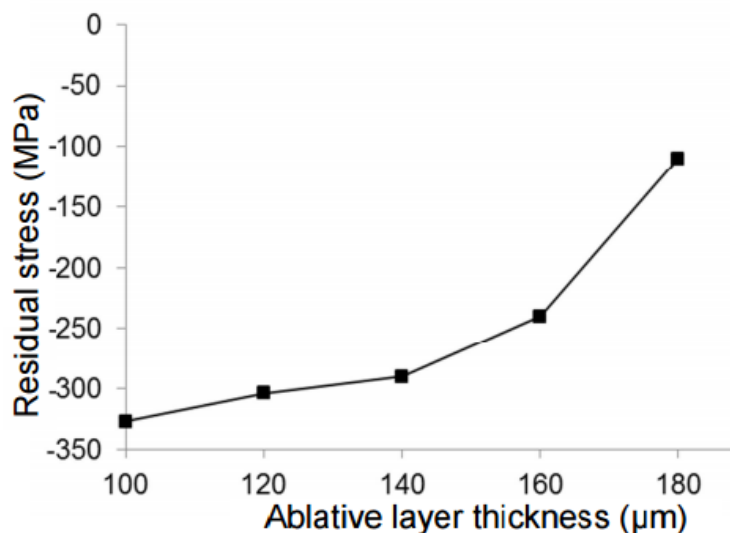
Obr. 4.2.1.6 Detail pokrytí plochy laserem [29]

Tloušťka a materiál absorpční vrstvy

Jako první vrstva se používá nátěr, fólie či páska. Její tloušťka je kompromisem mezi ochranou součásti před plazmatem a absorpcí rázové vlny. Jako ideální se jeví tloušťka okolo 0,1 mm. Zdroj [30] uvádí pro délku pulzu 12 ns a energii 6 J, laser ND: YAG, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, tlumící vrstva 1,8 mm vody závislosti mikrotvrdosti (obr. 4.2.1.7) a zbytkového napětí (obr. 4.2.1.8) na tloušťce absorpční první vrstvy. Obě pro slitinu Ti6Al4V. Materiál před úpravou měl mikrotvrdost 411 HV 0,01 a zbytkové napětí 0,36 N·mm⁻².



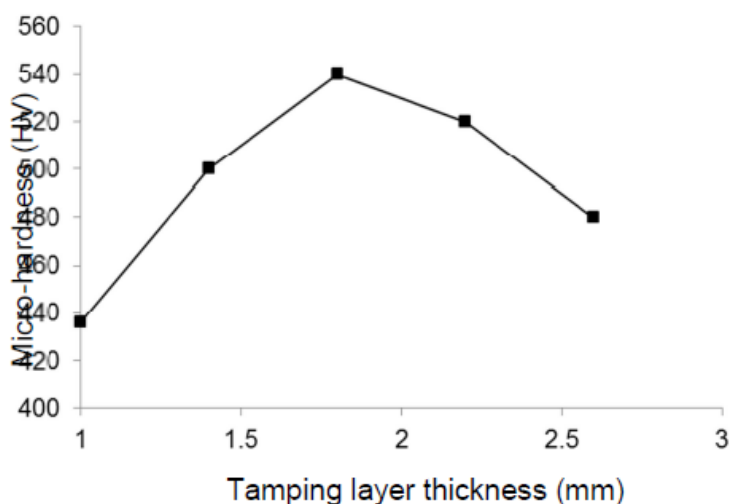
Obr. 4.2.1.7 Závislost mikrotvrdosti HV 0,01 na tloušťce absorpční první vrstvy [30]



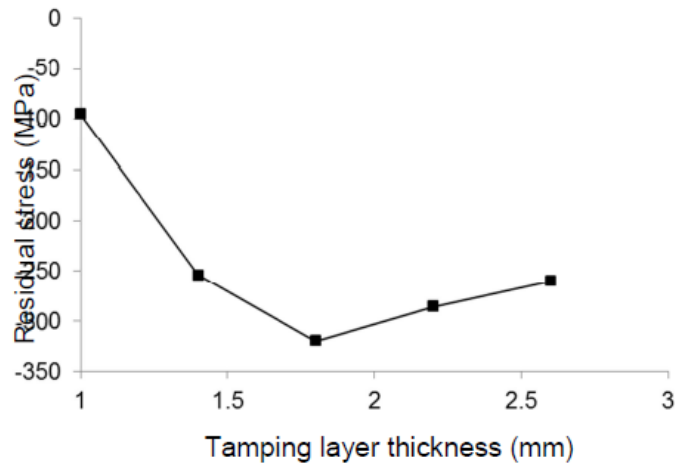
Obr. 4.2.1.8 Závislost zbytkového napětí na tloušťce absorpční první vrstvy [30]

Tloušťka tlumící vrstvy

Jako druhá vrstva tlumící expanzi plazmy se používá nejčastěji voda. Její hloubka na povrchu také ovlivňuje velikost vnesené energie. Zdroj [30] uvádí pro délku pulzu 12 ns a energii 6 J, laser ND: YAG, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, absorpční vrstva 0,1 mm závislosti mikrotvrdomosti (obr. 4.2.1.9) a zbytkového napětí (obr. 4.2.1.10) na tloušťce tlumící vrstvy vody. Obě pro slitinu Ti6Al4V. Materiál před úpravou měl mikrotvrdomost 411 HV 0,01 a zbytkové napětí 0,36 N·mm⁻².



Obr. 4.2.1.9 Závislost mikrotvrdomosti HV 0,01 na tloušťce tlumící vrstvy vody (špatně čitelná svíslá osa obsahuje hodnoty 400 až 560 HV 0,01 odstupňované po 20 HV 0,01) [30]



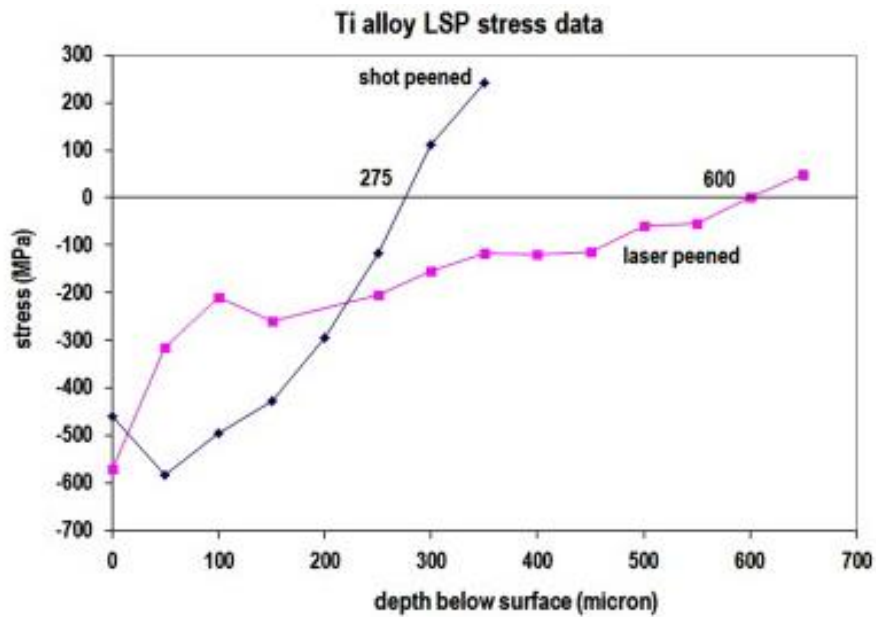
Obr. 4.2.1.10 Závislost zbytkového napětí na tloušťce tlumící vrstvy vody (špatně čitelná svislá osa obsahuje hodnoty 0 až $-350 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ odstupňované po $50 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$) [30]

4.2.1.1 Zbytková napětí a mikrotvrдость laser peenované slitiny titanu

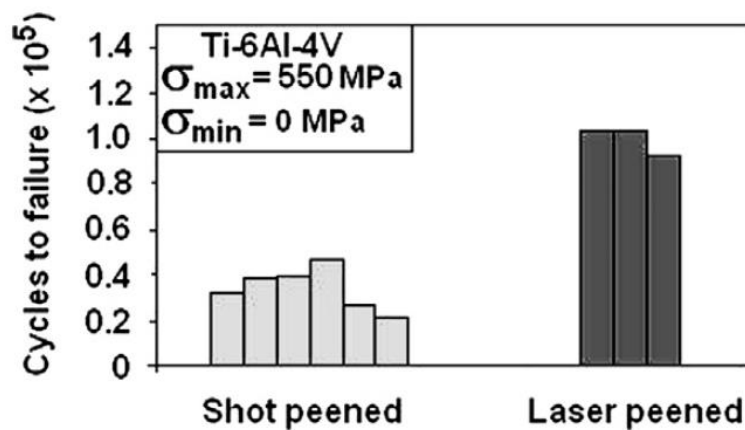
Úprava povrchové vrstvy součásti laser peeningem je moderní technologií, kterou umožnil pokrok laserové techniky. Tato technologie je finančně náročná a její použití musí mít opodstatnění. Důvod k použití této metody je až u cílových hloubek zpevnění a zbytkových napětí přesahující možnosti tryskání.

Touto metodou je upravena část vzorků v experimentální části této práce.

Zdroj [26] uvádí naměřené hodnoty zbytkového napětí pro parametry laser peeningu: délka pulzu 7 ns a energii 1,5 J, laser ND: YAG, průměr paprsku 1,5 mm, překrytí 50%, frekvence 2 Hz, absorpční vrstva 0,125 mm na obr. 4.2.1.11. Ovlivněná hloubka je 0,6 mm a zbytkové napětí na povrchu dosahuje $-580 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Zdroj dále uvádí změnu drsnosti R_a z $1,13 \mu\text{m}$ na $1,06 \mu\text{m}$. Na obr. 4.2.1.12 je znázorněna únavová pevnost pro tryskaný vzorek popsany v 4.1.2.1 (třetí odstavec) a pro laser peenovaný. Počet cyklů do porušení je dvojnásobný. Je zde tedy nápadná spojitost ovlivněné hloubky s únavovou pevností.

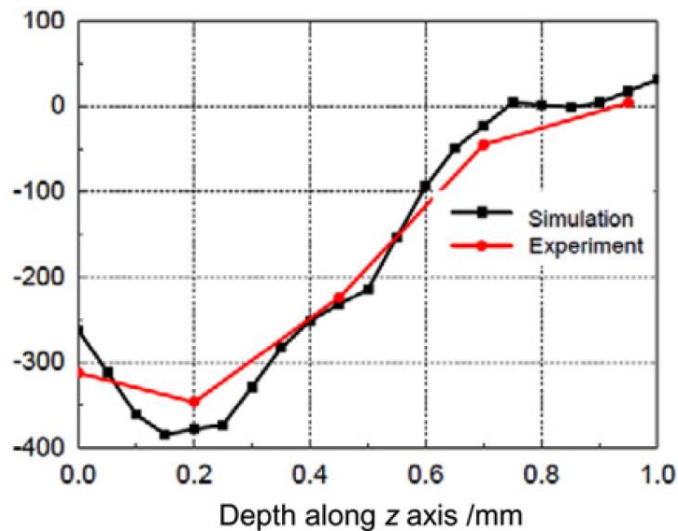


Obr. 4.2.1.11 Zbytkové napětí po laser peeningu – růžově [26]



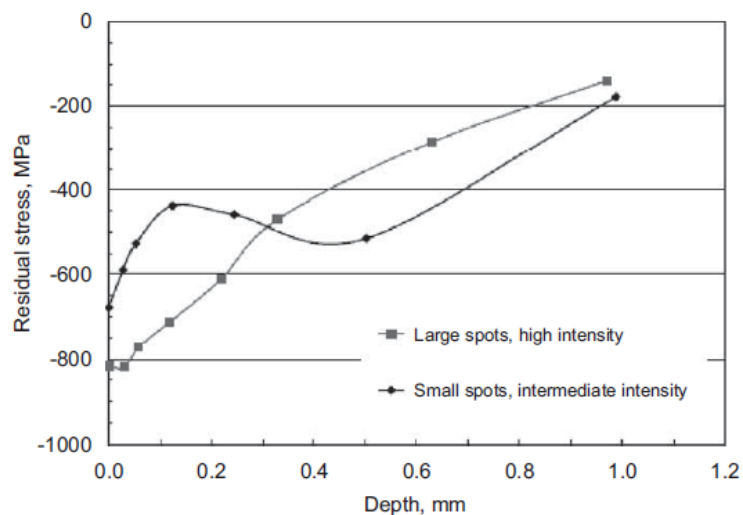
Obr. 4.2.1.12 Únavová pevnost [26]

Zdroj [29] uvádí naměřené hodnoty zbytkového napětí pro parametry laser peeningu: délka pulzu 20 ns a hustotu energie 1,79 GW.cm⁻² (tzn 4,5 J), laser ND: YAG, průměr paprsku 4 mm, překrytí 25 %, frekvence 1 Hz, absorpční vrstva hliníková fólie (bez udané tloušťky), vrstva tlumící vody 1 – 3 mm, na obr. 4.2.1.13.



Obr. 4.2.1.13 Zbytkové napětí - červeně [29]

Zdroj [33] uvádí výsledky zbytkového napětí pro parametry: délka pulzu 20 ns a hustotu energie $9 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (tzn 44 J), laser ND: YAG, průměr paprsku 5,6 mm, tři vrstvy s překrytím 33 %, frekvence neudána, absorpční vrstva neudána, vrstva tlumící vody neudána, na obr. 4.2.1.14 (křivka s čtverci). Ovlivněná hloubka je přibližně 1,2 mm a zbytkové napětí na povrchu dosahuje $-820 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$.

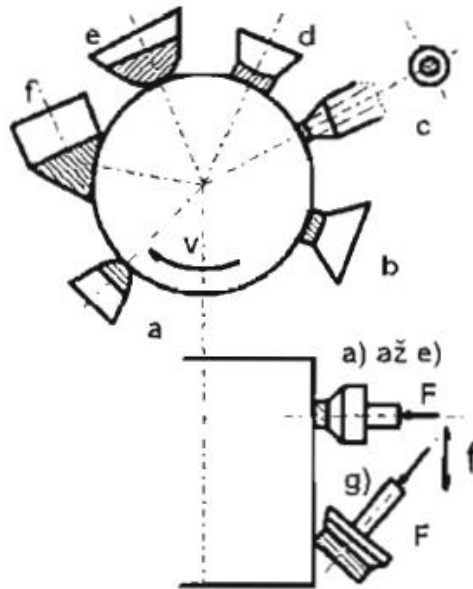


Obr. 4.2.1.14 Zbytkové napětí [33]

4.2.2 Vyhlazování

Vyhlazování je jednoduchý způsob úpravy povrchu součástí. Principem je přitlačování (přítlačná síla až 1000 N) tvářecího nástroje k upravované součásti při vzájemném pohybu (až 100 m/min). Nástrojem jsou vhodná tvarová tělesa z kalené oceli, slinutých karbidů, spékány korund a podobně. Pro zanesení

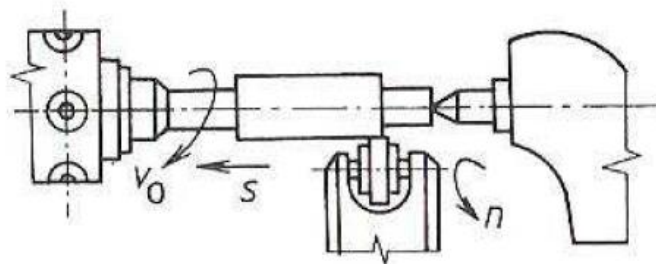
tlakového zbytkového napětí je nezbytné intenzivní chlazení, jelikož třením vzniká velké množství tepla. Hloubka ovlivnění dosahuje 0,1 až 0,5 mm a je závislá na počtu přejezdů nástroje a jeho přítlačné síle. Metoda také významně snižuje drsnost povrchu (až na $R_a = 0,1 \mu\text{m}$). [16]



Obr. 4.2.2 Vyhlazování [16]

4.2.3 Válečkování

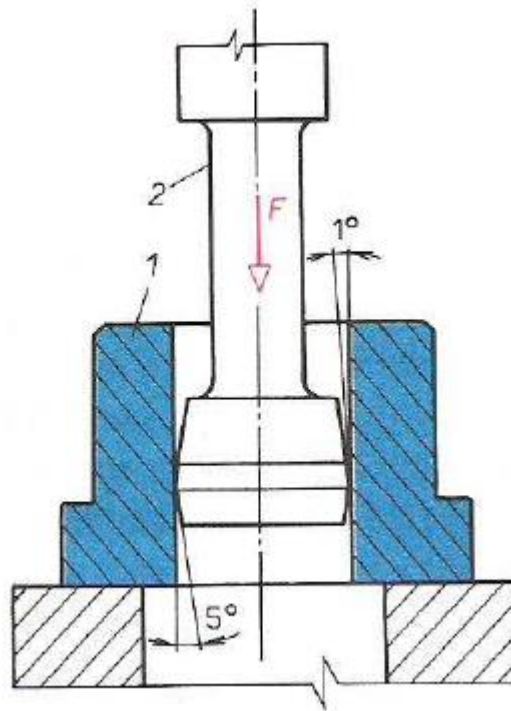
Válečkování je založeno na valení otočného tvářecího tělesa po upravovaném povrchu při přítlaku. Dochází tak k plastické deformaci povrchu zasahující do velkých hloubek. Zlepšuje se též mikrogeometrie a vzhled povrchu. Válečkováním lze upravovat většinu ploch. Metoda dosahuje drsností R_a 0,4 až 0,005 μm , přesností IT 7 až 4 a hloubky zpevnění povrchu 0,1 až 10 mm. [16]



Obr. 4.2.3 Válečkování [34]

4.2.4 Kalibrování

Tato technologie vyvolává plastickou deformaci přímočarým pohybem tvářecích elementů, které jsou větší než vnitřní rozměry či menší než vnější rozměry součástí. Operace může být odstupňována velikostmi elementu. Jako tvářecí element může být například kulička či trn (obr. 4.2.4). Metoda dosahuje zpřesnění rozměrů – kalibraci, na IT 6 až 4, úprava drsnosti na R_a 0,4 až 0,005 μm a zpevnění do hloubky 0,05 až 0,2 mm. [16]



Obr. 4.2.4 Trn pro kalibraci vnitřních rozměrů (1 = kalibrovaná součást; 2 = kalibrační trn) [34]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá hodnocením integrity povrchu vzorků ze slitiny titanu Ti6Al4V. Popisuje konkrétní způsob použité technologie dokončení a měření. Výsledky měření porovnává s daty získanými z odborných článků a prací v kapitole 4.

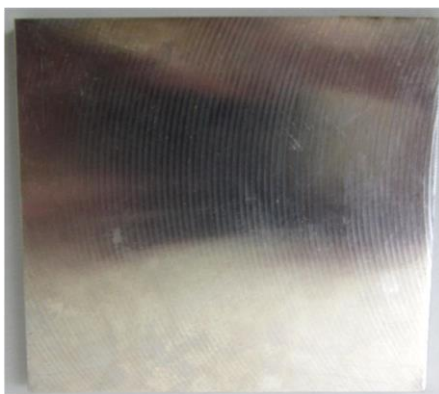
Mezi zjišťované parametry integrity povrchu byly zařazeny následující: drsnost a profil povrchu, mikrotvrдость povrchové vrstvy a zbytková napětí.

5.1 Popis vzorků z Ti6Al4V

Vzorky ze slitiny titanu Ti6Al4V byly dodány ve třech dokončeních, ze kterých jedno bylo výchozí pro další dvě. Slitina Ti6Al4V je blíže popsána v kapitole 2. Vzorky v podobě destiček 76 x 85 mm a tloušťce 4 mm byly dodány jako frézované, frézované s úpravou tryskáním a frézované s úpravou laser peeningem. Následovalo nařezání na menší kusy pomocí drátového řezání WEDM.

5.1.1 Frézované vzorky

Jak bylo již výše zmíněno, frézovaný stav byl výchozí pro následné tryskání a laser peening. Z dostupných parametrů frézování je známé pouze použití čelní frézy. Díky rešerším v kapitole 4 bude možné parametry frézování odhadnout z naměřených hodnot. Na obr. 5.1.1.1 je dodaná destička před nařezáním a na obr. 5.1.1.2 je destička nařezána pomocí WEDM na vhodné rozměry pro následující měření. Frézovaných destiček bylo k dispozici tři kusy.



Obr. 5.1.1.1 Frézovaná destička před nařezáním



Obr. 5.1.1.2 Nařezané a označené frézované destičky (již elektrolyticky leptané)

5.1.2 Tryskané destičky

Výchozí stav pro tryskané vzorky bylo výše uvedené frézování v kapitole 5.1.1.

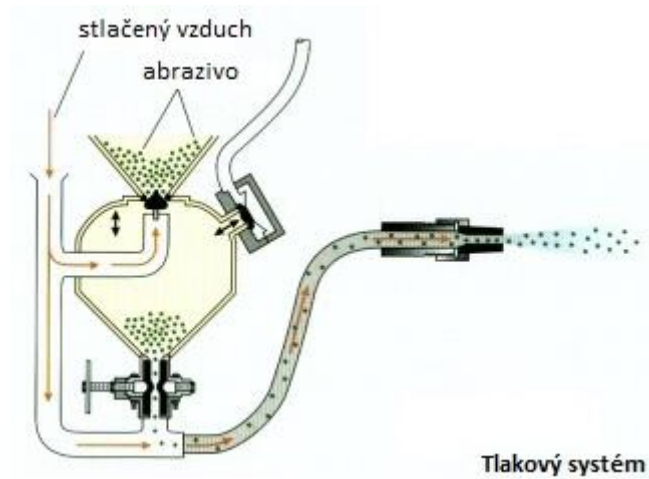


Obr. 5.1.2 Nařezané a označené tryskané destičky (již elektrolyticky leptané)

5.1.2.1 Výrobní zařízení

Úprava tryskáním byla provedena na stroji Rösler C2X4 SR. Jedná se o automatický tryskací stroj pracující na tlakovzdušném principu (obr. 5.1.2.1). Stroj má jeden otočný stůl a dvě pracovní komory, což

umožňuje obsluhu vyložení a založení upravovaných součástí během operace v sousední komoře. Samotné tryskání obstarává rameno robota Kuka KR 16 s dvěma tryskami. Oběh tryskacího média je nepřetržitý s cirkulací a tříděním poškozených částic média.



Obr. 5.1.2.1 Princip tlakovzdušného tryskání [35]

5.1.2.2 Parametry tryskacího procesu

U tlakovzdušného tryskání se sleduje šest základních parametrů, které mají na výsledek zásadní vliv. Jedná se o tryskací médium a jeho průtok, tlak hnacího vzduchu, vzdálenost a úhel trysky od upravovaného povrchu a překrytí. Shrnutí je v tab. 5.1.2.2

Tab. 5.1.2.2 Parametry tryskacího procesu

Parametry tryskacího procesu	
Tryskací médium	ASR 170 (ocelové kuličky 0,5 – 0,85 mm; 45 – 52 HRC)
Průtok média	7 kg/min
Tlak vzduchu	1,7 Bar
Pokrytí	200 %
Vzdálenost trysky od povrchu	118 mm
Úhel trysky od povrchu	90°
Průhyb Almen pásku	0,006 A

5.1.3 Laser peenované destičky

Výchozí stav pro laser peenované vzorky bylo výše uvedené frézování v kapitole 5.1.1.



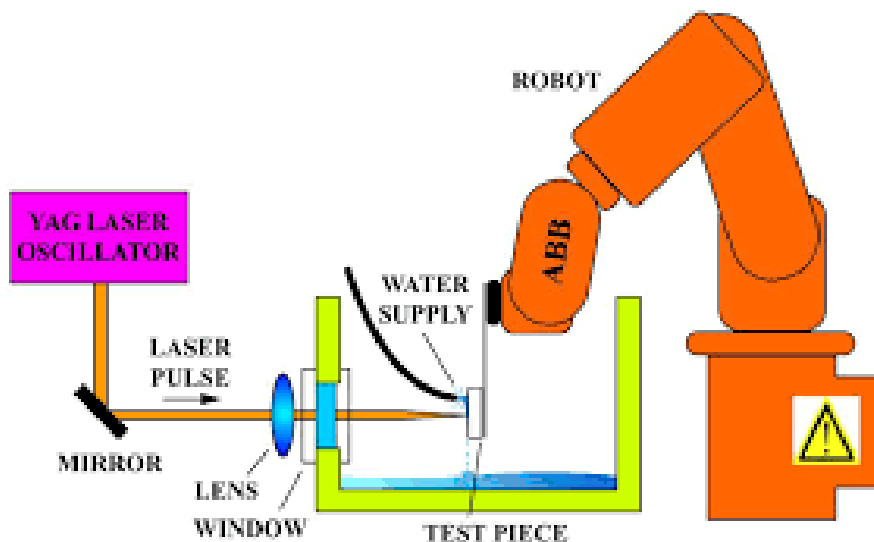
Obr. 5.1.3 Laser peenované vzorky

5.1.3.1 Výrobní zařízení

Vzorky byly upraveny na technické univerzitě v Madridu laserem Laser Spectra Physics Quanta Ray PRO 350 na obr. 5.1.3.1.1 (Nd:Yag; délka pulzu 8 – 12 ns; energie 2,5 J). Laser je statický a manipulováno je upravovanou součástí. K polohování je využit průmyslový robot ABB IRB 120 s dovoleným zatížením 3 kg. Schéma celého zařízení je na obr. 5.1.3.1.2



Obr. 5.1.3.1.1 Laser Spectra Physics Quanta Ray PRO 350 [36]



Obr. 5.1.3.1.2 Schéma zařízení [36]

5.1.3.2 Parametry laser peeningu

Jednotlivé parametry a jejich vliv na výsledek jsou popsány v kapitole 4.2.1. Při zpracování vzorků pro experimentální část byly aplikovány parametry, které uvádí tab. 5.1.3.2. Tloušťka absorpční a tlumící vrstvy jsou neznámé. Jako tlumící vrstva byla použita voda. Těmito parametry byly ovlivněny dvě destičky, které jsou dále značeny jako LSP3 a LSP4.

Tab. 5.1.3.2 Parametry laser peeningu vzorků LSP3 a LSP4

Energie pulzu [J]	Délka pulzu [ns]	Frekvence [Hz]	Průměr paprsku [mm]	Překrytí	Hustota pulzů [1/cm ²]
2,5	10	10	1,5	1,87	2500

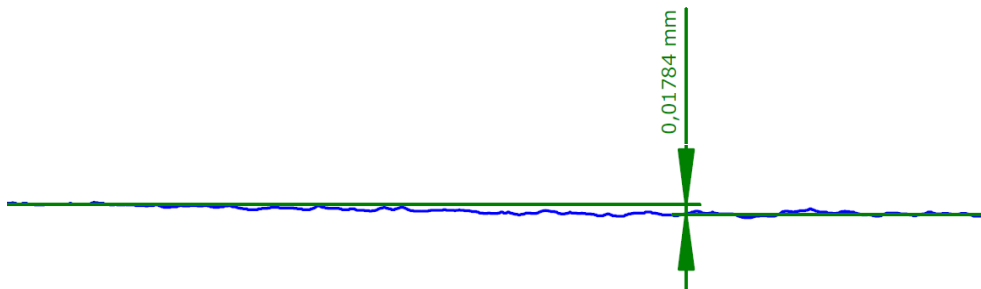
5.2 Měření tvarových odchylek a drsnosti

Měření vybraných parametrů drsnosti, které jsou vybrány a popsány v kapitole 3.2.1 a tvarových odchylek, popsanych v kapitole 3.1.1, proběhlo v laboratoři Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie na konturografu MarSurf XCR 20.

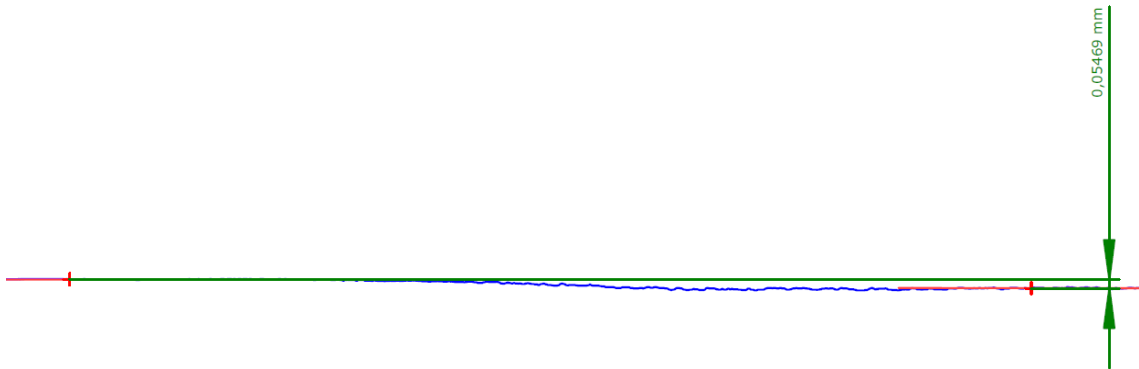
Nařezané vzorky byly jednotlivě upnuty do přesného svěráku a následně školenou obsluhou změřeny.

5.2.1 Tvarové odchytky laser peenovaných vzorků

Na vzorku LSP3 byla naměřena deformace povrchu, vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným laser peeningem je 0,0178 mm, viz obr. 5.2.1.1. U vzorku LSP4 byla odchytka 0,0547 mm, viz obr. 5.2.1.2.



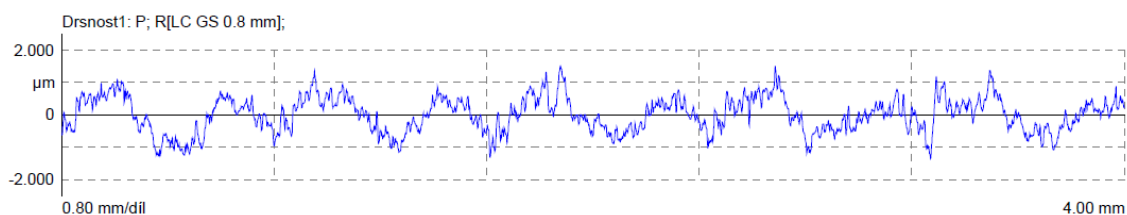
Obr. 5.2.1.1 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP3



Obr. 5.2.1.2 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP4

5.2.2 Drsnost frézovaných vzorků

Na obr. 5.2.2.1. je pro názornost povrch frézovaného vzorku F2. Dále v tab. 5.2.2.1 jsou naměřené hodnoty tří frézovaných vzorků. Základní délka 0,8 mm a vyhodnocovaná byla 4,0 mm.



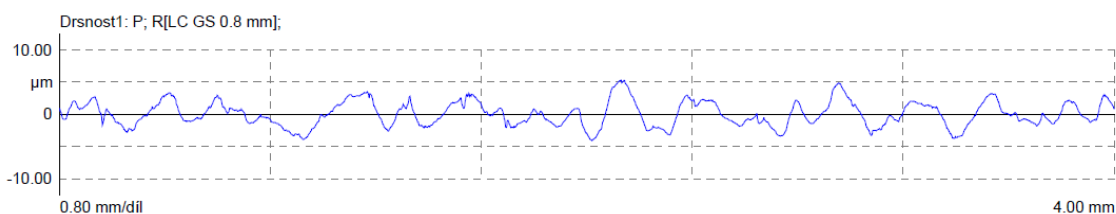
Obr. 5.2.2.1. Povrch frézovaného vzorku F2

Tab. 5.2.2.1 Naměřené hodnoty tří frézovaných vzorků

Vzorek		Drsnost						
		Ra [µm]	Rz [µm]	Rmax [µm]	Rt [µm]	Rp [µm]	Rv [µm]	Rsm [µm]
Frézované	F1	0,389	2,56	3,36	4,08	1,29	1,28	113,44
	F2	0,44	2,63	2,82	2,88	1,37	1,27	270,14
	F3	0,44	2,43	3,06	3,15	1,15	1,29	170,4
	průměr	0,423	2,54	3,08	3,37	1,27	1,28	184,66

5.2.3 Drsnost tryskaných vzorků

Na obr. 5.2.3.1 je pro názornost povrch tryskaného vzorku SPJ1. Dále v tab. 5.2.3.1 jsou naměřené hodnoty tří tryskaných vzorků. Základní délka 0,8 mm a vyhodnocovaná byla 4,0 mm.



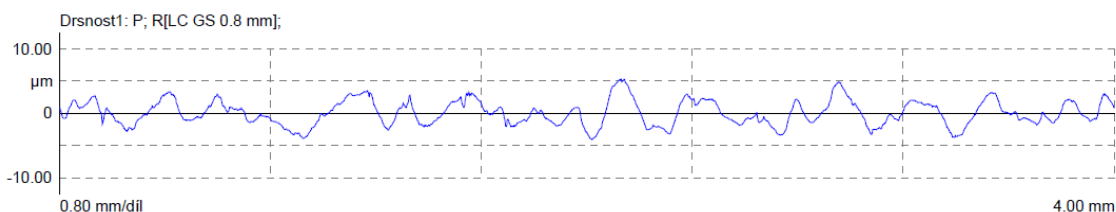
Obr. 5.2.3.1 Povrch tryskaného vzorku SPJ1

Tab. 5.2.3.1 Naměřené hodnoty tří tryskaných vzorků

Vzorek		Drsnost						
		Ra [µm]	Rz [µm]	Rmax [µm]	Rt [µm]	Rp [µm]	Rv [µm]	Rsm [µm]
Tryskané	SP1	1,57	7,64	9,43	9,43	4,04	3,6	260,47
	SP2	1,74	8,08	9,07	9,44	4,29	3,79	256,04
	SP3	1,85	8,79	12,1	12,26	4,51	4,27	290,8
	průměr	1,72	8,17	10,2	10,38	4,28	3,89	269,10

5.2.4 Drsnost laser peenovaných vzorků

Na obr. 5.2.4.1 je pro názornost povrch laser peenovaného vzorku LSP3. Dále v tab. 5.2.4.1 jsou naměřené hodnoty dvou laser peenovaných vzorků. Základní délka 0,8 mm a vyhodnocovaná byla 4,0 mm.



Obr. 5.2.4.1 Povrch laser peenovaného vzorku LSP3

Tab. 5.2.4.1 Naměřené hodnoty dvou laser peenovaných vzorků

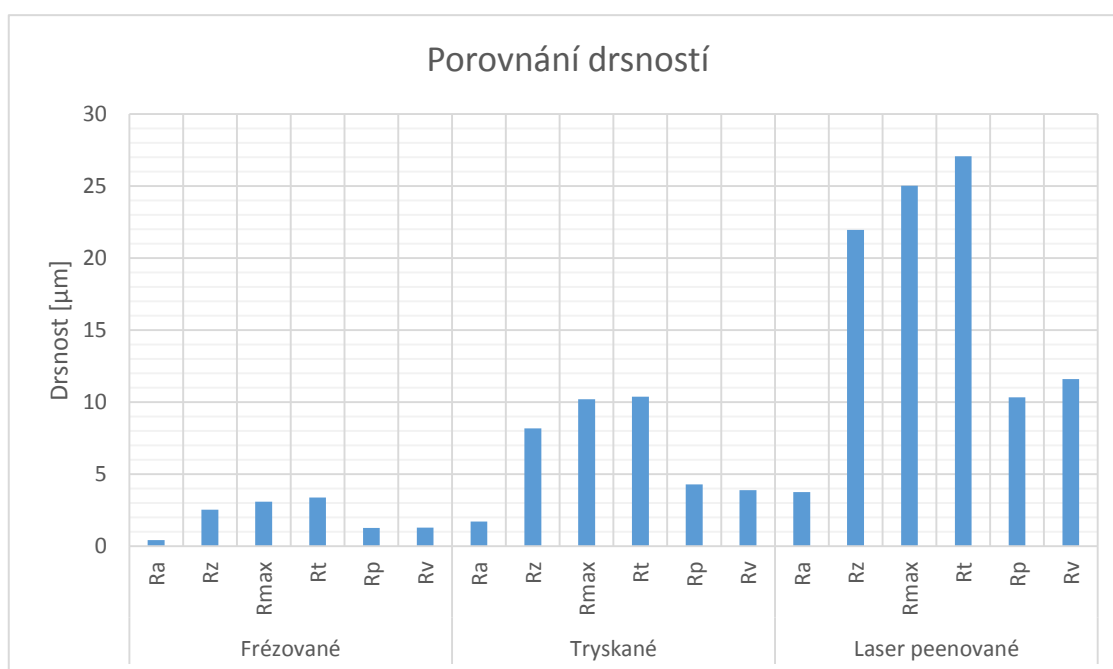
Vzorek		Drsnost						
		Ra [µm]	Rz [µm]	Rmax [µm]	Rt [µm]	Rp [µm]	Rv [µm]	Rsm [µm]
Laser peenované	LSP3	3,2	19,8	23,8	23,8	8,71	11,05	127,23
	LSP4	4,3	24,13	26,27	30,34	11,97	12,16	185,98
	průměr	3,75	21,97	25,04	27,07	10,34	11,61	156,61

5.2.5 Porovnání drsností

Z naměřených hodnot vyplývá, že frézované povrchy jsou ve všech hodnotách drsnosti nejlepší, hůře jsou na tom tryskané vzorky a nejhůře laser peenované. Průměrné hodnoty uvádí tab. 5.2.5 a také je znázorňuje graf na obr. 5.2.5 (hodnota Rsm v grafu chybí, jelikož by snížila rozlišení hodnot). Drsnosti u tryskaných vzorků odpovídají nalezeným v odborných člancích v kapitole 4.1.2.1 (pro 0,006 – 0,008 A byla $R_a = 1,3 \mu\text{m}$, pro dvounásobnou intenzitu 0,012 – 0,014 A byla $R_a = 3,86 \mu\text{m}$). Extrémní změna drsnosti u laser peenovaných vzorků neodpovídá předpokládaným hodnotám nalezených v odborných člancích v kapitole 4.2.1.1. Autor má k dispozici video průběhu laser peeningu u součástí LSP3 a LSP4 a domnívá se, že nebyla použita absorpční vrstva na součásti. Jako absorpční vrstva tak sloužil povrch součásti a díky tomu jsou změny drsnosti k horšímu.

Tab. 5.2.5 Průměrné hodnoty drsností

Vzorek		Drsnost						Rsm [μm]
		Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	
Frézované	průměr	0,42	2,54	3,08	3,37	1,27	1,28	184,66
Tryskané	průměr	1,72	8,17	10,20	10,38	4,28	3,89	269,10
Laser peenované	průměr	3,75	21,97	25,04	27,07	10,34	11,61	156,61



Obr. 5.2.5 Grafické znázornění drsností

5.3 Měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti povrchové vrstvy byly podrobeny všechny tři typy vzorků.

5.3.1 Příprava vzorků

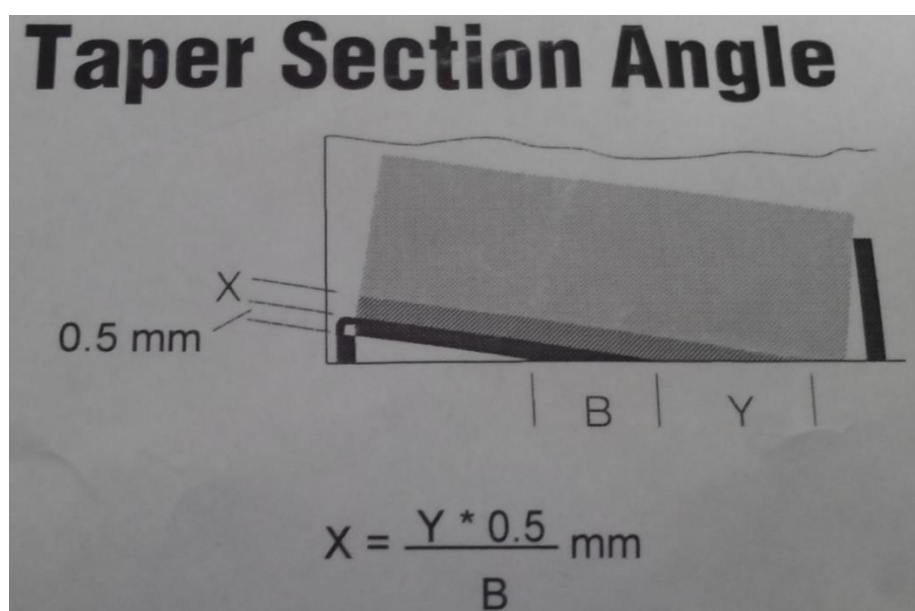
Vzorky byly nařezány na menší kusy, aby bylo možné je zalít do puků. Řezání proběhlo na rozbrušovací pile Struers Lobotom 3, minimálním přtlakem na kotouč a dostatečným chlazením, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků.

Zalisování do puků pomocí lisování za tepla na stroji Struers CitoPress 10 nedalo správný výsledek, jelikož došlo k destrukci podložky zaručující zalisování pod úhlem. Náhradní metoda byla zalití do dvousložkové pryskyřice, kde na úhlovací podložku nemělo účinek žádné zatížení.

Pro pokud možno maximální rozšíření povrchové vrstvy bylo zvoleno už výše zmíněné zalití vzorků pod úhlem. Pomocná úhlovací podložka o jasně definované tloušťce nám ve výbrusu dovolí pomocí metody rovnosti trojúhelníků dopočítat relativně přesně hloubku měření. Uložení vzorku v podložce je na obr. 5.3.1.1 a nákres s rovností trojúhelníků je na obr. 5.3.1.2.



Obr. 5.3.1.1 Uložení vzorku v podložce



Obr. 5.3.1.2 Využití úhlovací podložky

Broušení a leštění zalitých vzorků proběhlo na preparačním systému Struers Tegramin 25 v několika fázích až do vyleštění pomocí diamantové suspenze 3 μm .

5.3.2 Metodika měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti dle Vickerse proběhlo na mikrotvrdoměru Future - Tech FM-100. Vzorky byly pevně zafixovány v mikrotvrdoměru proti pohybu. Strategie měření je patrná na obr. 5.3.2. V tomto případě jsou od sebe místa měření vzdálena 0,1 a 0,4 mm. Vzdálenost 0,4 mm v tomto konkrétním výbrusu pod úhlem je rovna hloubce od povrchu 29 μm . Cílem bylo se s měřením mikrotvrdosti dostat až na neovlivněný materiál. Zatížení bylo zvoleno na 100 gramů po dobu 10 vteřin, kterému odpovídá symbol mikrotvrdosti HV 0,1 (více v kapitole 3.3.3).



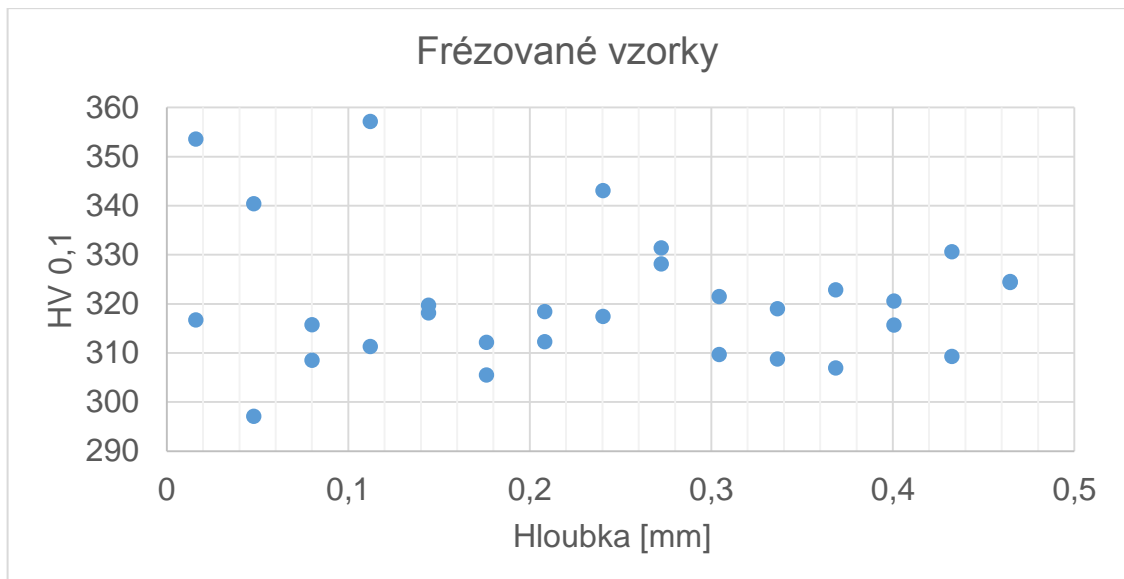
Obr. 5.3.2 Rozložení měření

5.3.3 Mikrotvrdost jednotlivých vzorků

Mikrotvrdost byla změřena na všech druzích vzorků. Výsledky jsou v následujících kapitolách.

5.3.3.1 Mikrotvrdost frézovaných vzorků

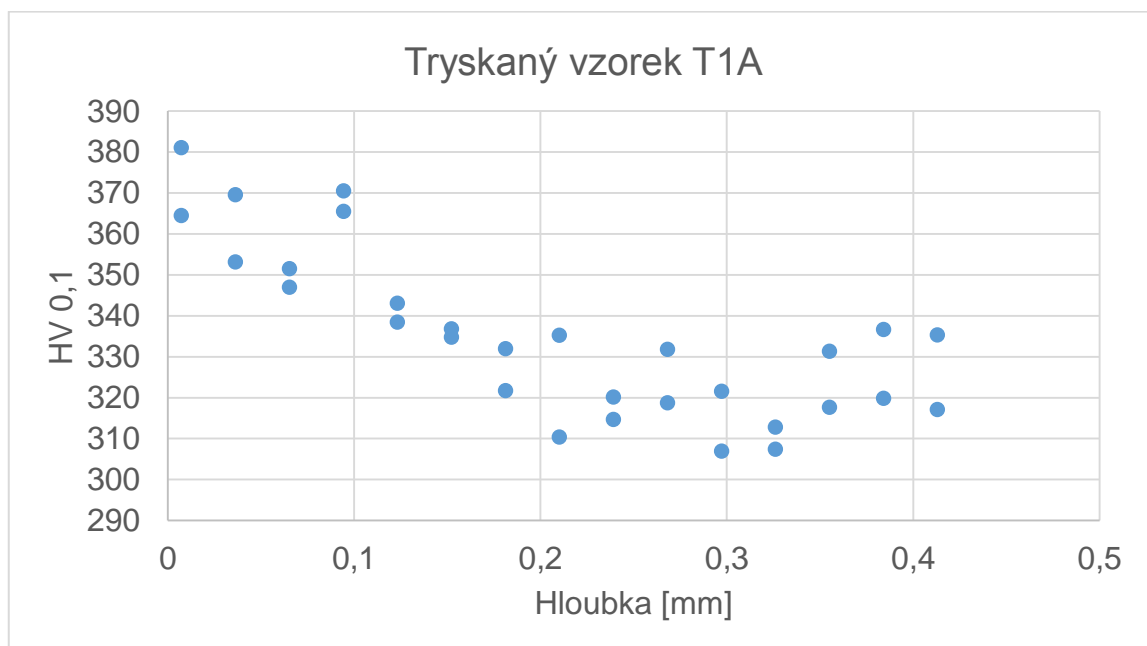
U frézovaných vzorků byla zvolena mapa vtisků 2 x 15 ve dvou sloupcích po kroku 0,2 mm. Měření v tomto případě postupovalo v hloubce po 32 μm . V grafu na obr. 5.3.3.1 jsou znázorněny mikrotvrdosti v závislosti na hloubce od povrchu.



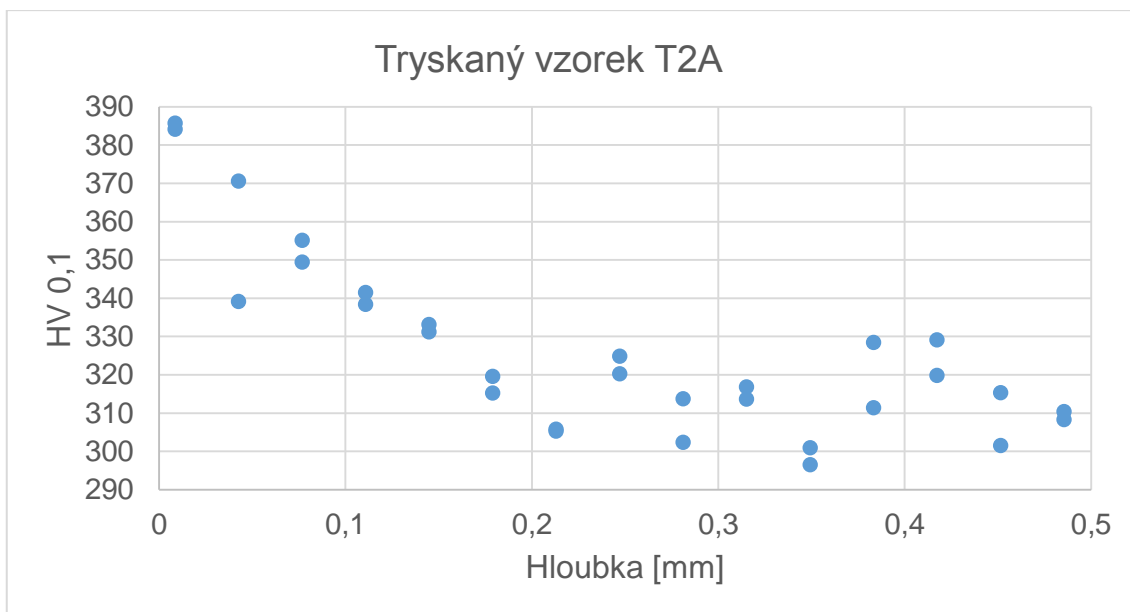
Obr. 5.3.3.1 Průběh mikrotvrdosti u frézovaných vzorků

5.3.3.2 Mikrotvrdost tryskaných vzorků

U tryskaných vzorků byla zvolena mapa vtisků 2 x 15 ve dvou sloupcích po kroku 0,4 mm. Měření v tomto případě postupovalo v hloubce po 29 μm u výbrusu vzorku T1A a 34 μm u T2A. V grafu na obr. 5.3.3.2.1 a 5.3.3.2.2 jsou znázorněny mikrotvrdosti v závislosti na hloubce od povrchu.



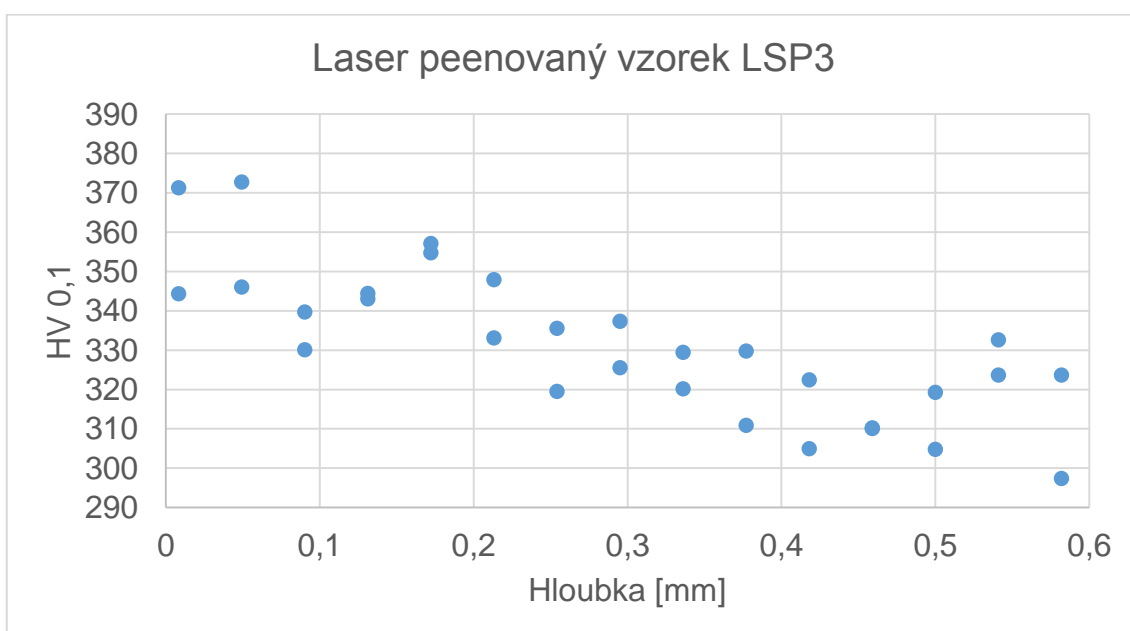
Obr. 5.3.3.2.1 Průběh mikrotvrdosti u tryskaného vzorku T1A



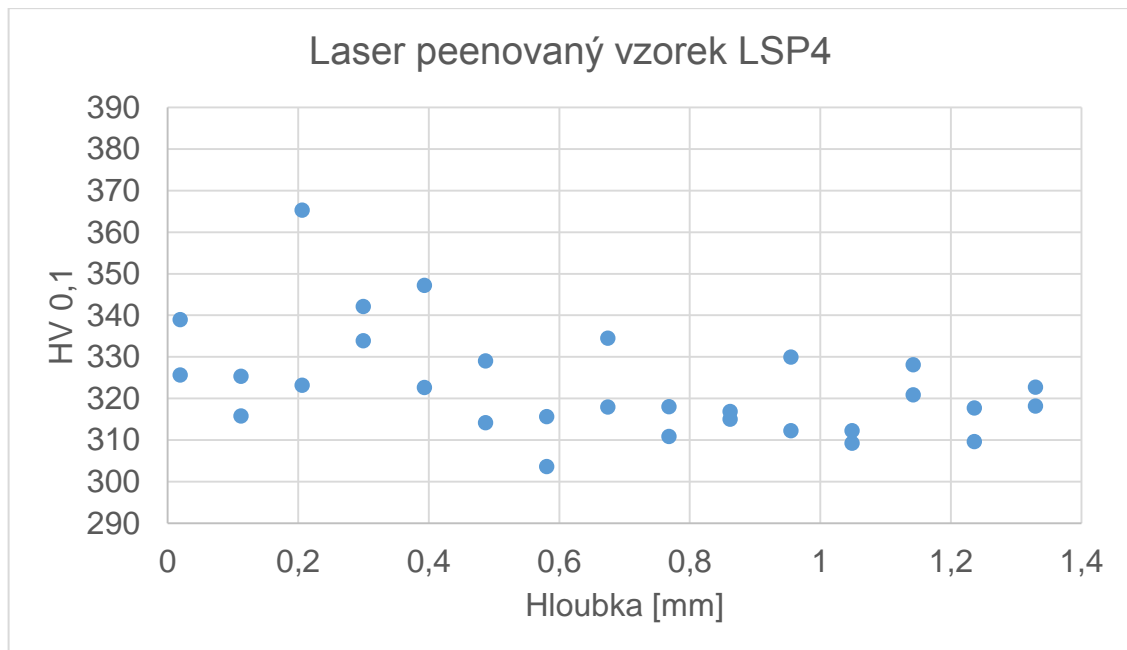
Obr. 5.3.3.2 Průběh mikrotvrdosti u trysaného vzorku T2A

5.3.3.3 Mikrotvrdost laser peenovaných vzorků

U laser peenovaných vzorků byla zvolena mapa vtisků 2 x 15 ve dvou sloupcích po kroku 0,5 mm. Měření v tomto případě postupovalo v hloubce po 41 μm u výbrusu vzorku LSP3 a 94 μm u LSP4. V grafu na obr. 5.3.3.3.1 a 5.3.3.3.2 jsou znázorněny mikrotvrdosti v závislosti na hloubce od povrchu.



Obr. 5.3.3.3.1 Průběh mikrotvrdosti u laser peenovaného vzorku LSP3



Obr. 5.3.3.3.2 Průběh mikrotvrdosti u laser peenovaného vzorku LSP4

5.3.4 Porovnání mikrotvrdostí vzorků

Z měření vyplývá, že zpevnění povrchu není u tryskaného a laser peenovaného vzorku podobné. Frézovaný povrch nevykazuje jednoznačné zpevnění, hodnoty mikrotvrdosti jsou několikrát ve stejné hloubce v rozptylu až o 40 HV 0,1. Tento rozptyl je pozoruhodný, jelikož u vzorků tryskaných a laser peenovaných byl takový rozptyl vzácnější. Jasně zpevnění vykazují tryskané vzorky, kde mikrotvrdost klesá od povrchu z hodnot až 389 HV 0,1 téměř konstantně do hloubky 0,2 mm na hodnoty okolo 320 HV 0,1. Laser peenované vzorky vykazují zpevnění menší, u povrchu přibližně 371 HV 0,1, ale na hodnotu okolo 320 HV 0,1 klesají až v hloubce 0,4 až 0,5 mm. Naměřené hodnoty jsou podobné těm udávaným v odborných člancích, o kterých je kapitola 4.1.2.1.

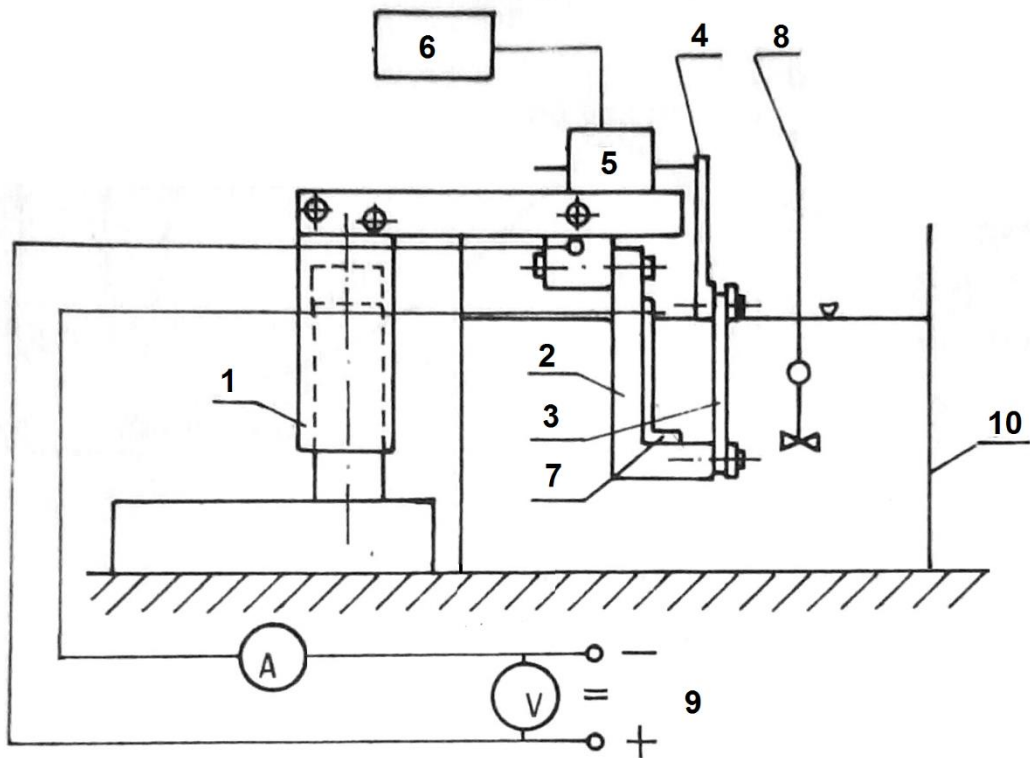
5.4 Měření zbytkových napětí

Volba metody měření zbytkových napětí je vysvětlena v kapitole 3.4.6. Jedná se o metodu elektrolytického rozpouštění povrchových vrstev, při kterém je zároveň měřena deformace vzorku. Bezsilový úběr s nulovým tepelným

ovlivněním vzorku dává spolehlivé výsledky průběhu napětí v hloubkách přibližně do 1 mm (záleží na konkrétním materiálu a jeho tvaru).

5.4.1 Zařízení pro měření zbytkových napětí

V laboratoři Ústavu obrábění, projektování a metrologie je zařízení pro elektrolytické odleptávání vrstev vlastní konstrukce. Probíhá na něm průběžný vývoj, v poslední době například inovace v použití bezkontaktního indukčního odměřování (citlivost až 0,1 μm). Schéma zařízení je na obr. 5.4.1.1 a reálný vzhled je na obr. 5.4.1.2. Vzhledem k práci s kyselinami a tvorbě výparů při leptání je celé zařízení v digestoři s masivním odtahem.



Obr. 5.4.1.1 Schéma zařízení (1 – stojan; 2 – držák s upínacím třmenem; 3 – zkoušený vzorek; 4 – třmen s ramenem; 5 – snímač vzdálenosti; 6 – zaznamenávání (PC); 7 – katoda; 8 – míchadlo; 9 – regulovatelný zdroj napětí; 10 – nádoba s elektrolytem) [13]
(schéma autorem upraveno na aktuální stav)



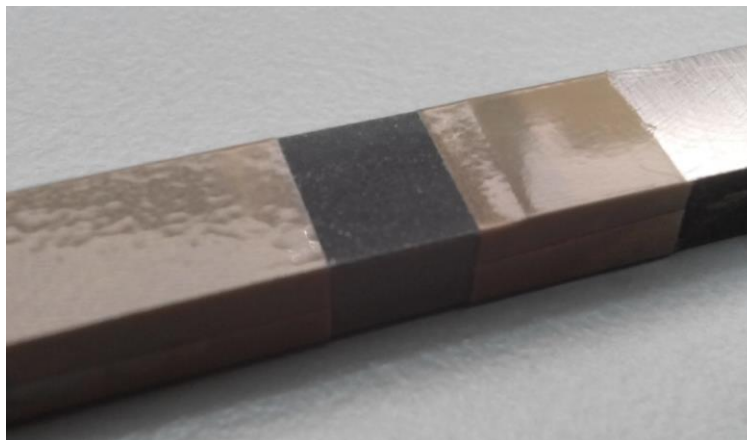
Obr. 5.4.1.2 Reálný vzhled zařízení

Jak již bylo zmíněno, pro úběr materiálu je využito odleptávání elektrolytické. Každý materiál má svůj vhodný elektrolyt. Jako elektrolyt pro zkoušenou slitinu titanu Ti6Al4V se použila kombinace lihu, kyseliny chlorovodíkové a fluorovodíkové. Je tedy nutné dodržovat zásady práce s kyselinami, tedy používat ochranné pomůcky, vše řádně oplachovat a využívat odvětrání digestoří. Lázeň je míchána magnetickým míchadlem a udržována na přibližně pokojové teplotě.

Prodloužení vzorku, na obr. 5.4.1.1 pozice 4, tedy třmen s ramenem, musí být co nejtěžší a zároveň nejlehčí, aby nebylo měření ovlivněno. Uchycení vzorku ke stojanu musí splnit maximální elektrickou vodivost, tuhost, nastavení rovnoběžnosti vzorku s katodou a tím tedy měření deformace kolmé k leptané ploše.

Vzhledem k cíli leptat pouze určenou plochu, musí být zbytek součásti, třmenů a držáků před leptáním ochráněn. Pro ochranu součásti se osvědčila plastová lepicí páska (obr. 5.4.1.3), která umožňuje relativně přesné vymezení

leptané plochy. Pro zakrytí ostatních komponent se použil vosk. Sestava připravená k leptání je na obr. 5.4.1.4.



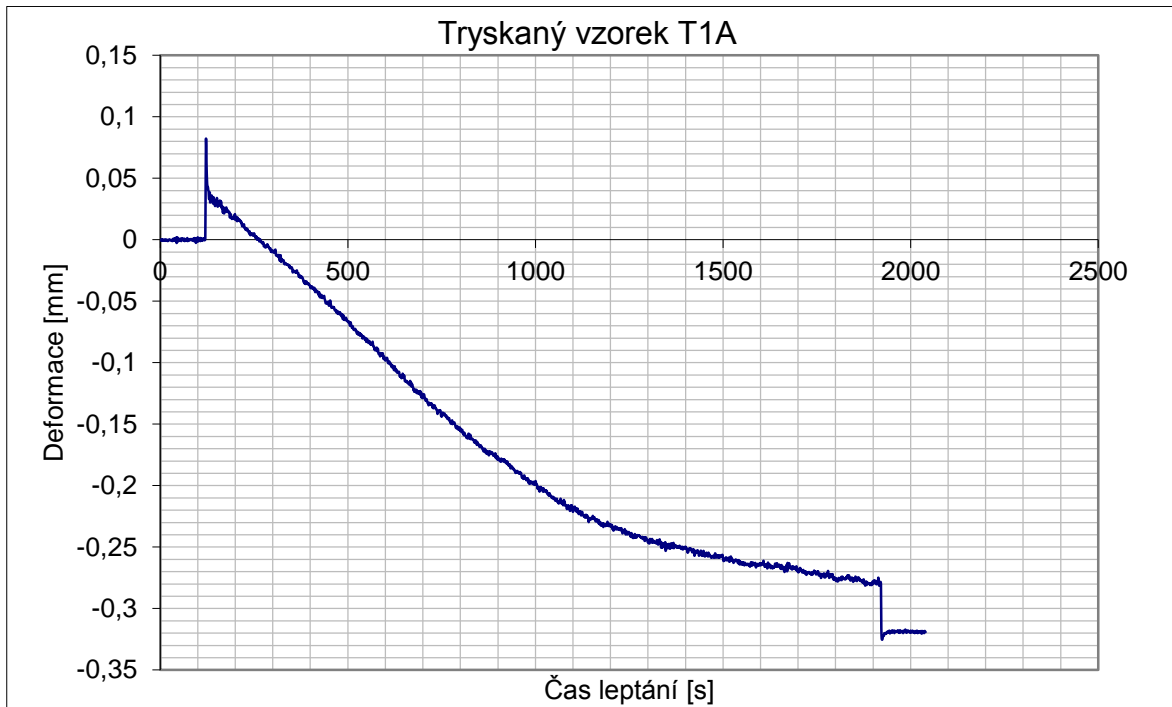
Obr. 5.4.1.3 Páskou vymezená plocha pro leptání



Obr. 5.4.1.4 Sestava připravená k leptání

Na obr. 5.4.1.3 lze vidět i katodu (deska na kterou je přiveden modrý vodič). Její plocha je násobně větší než ta leptaná. Materiálem katody pro leptání slitin titanu se používá titan. Vzdálenost katody a anody (součásti) je parametrem, který intenzitu leptání ovlivňuje nelineárně. Nastavením proudové hustoty je pro lineární úběr materiálu důležitým parametrem. Řízení procesu bylo řešeno napěťovou stabilizací.

Měření deformace je realizováno zmíněným indukčním snímačem. Měření probíhá v reálném čase a jeho průběh je vykreslován na počítači, takže má obsluha přehled o průběhu procesu, viz obr. 5.4.1.5.



Obr. 5.4.1.5 Záznam měření deformace

5.4.2 Postup měření

1. Zvážení součásti. Rozdíl hmotností původního a leptaného vzorku slouží k výpočtu hloubky leptání.
2. Změření rozměrů součásti – tloušťku a šířku.
3. Vymezení leptané plochy páskou (viz obr. 5.4.1.3).
4. Uchycení třmenů na součást (mimo lepicí pásku).
5. Zalití sestavy voskem (zvlášť spoj součásti s extenzí a zvlášť spodní třmen).
6. Uchycení ke stojanu.
7. Změření osové vzdálenosti – mezi středem leptané plochy a indukčním čidlem.
8. Zalití zbylých ploch voskem (ponořením), výsledek na obr. 5.4.1.4.
9. Chlazení na pokojovou teplotu (vosk o teplotě 80°C sestavu zahřeje a vnáší tak velké nepřesnosti do měření).

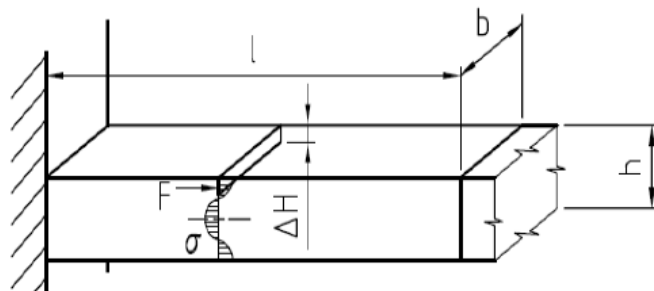
10. Nastavení indukčního čidla do vzdálenosti 1,5 mm od extenze.
11. Ponoření sestavy do elektrolytu.
12. Zapnutí míchání na vhodné otáčky.
13. Zavření digestoře.
14. Zapnutí záznamu na PC a vyčkání dokud se záznam nestabilizuje (vyrovnání teplot = deformace se stabilizuje)
15. Nastavení napětí na zdroji a jeho zapnutí.
16. Sledování záznamu a proudu.
17. Po uplynutí doby pro žádanou hloubku vypnout zdroj.
18. Vypnout záznam deformace.
19. Vyjmutí stojanu z elektrolytu a opláchnutí několika ponořeními do vody.
20. Odpojení sestavy od stojanu, opláchnutí a odstranění ochranných vrstev.
21. Změření výsledné výšky leptané plochy (je většinou vyšší než původní) a zvažení.
22. Zaznamenání všech hodnot a zpracování výsledků.

5.4.3 Výpočet

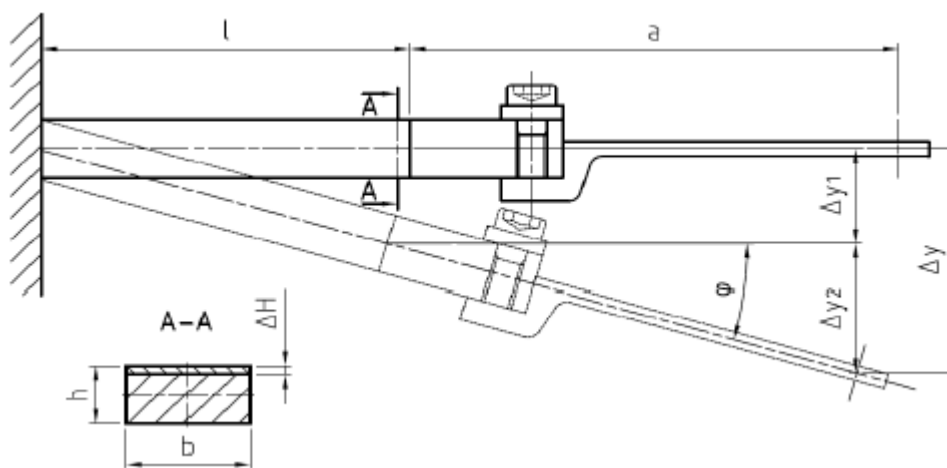
Vzorek je pro výpočet brán jako vetknutý nosník. Vztahy pružnosti a pevnosti umožňují výpočet zbytkových napětí, pokud přijmeme předpoklady, že v odleptané vrstvičce ΔH je zbytkové napětí konstantní a že odleptání vrstvičky ΔH generuje deformaci, která je projevem zbytkového napětí. Toto zbytkové napětí je rovno mechanickému napětí, které by bylo způsobeno působením vnějšího zatížení silou F na tuto vrstvičku (na plochu průřezu této vrstvy):

$$F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma \quad (5.4.3.1)$$

Znázornění je na obr. 5.4.3.1.



Obr. 5.4.3.1 Znázornění definice výpočtu [37]



Obr. 5.4.3.2 Schéma pro výpočet zbytkového napětí z deformace [37]

Zavedené veličiny pro výpočet:

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

φ = úhel pootočení koncového průřezu

Δy = měřená hodnota deformace

$\Delta y'$ = průhyb nosníku

$\Delta y''$ = pootočení měřicího třmenu v rovině měření

l = délka leptané plochy

b = šířka leptané plochy

h = tloušťka vzorku

E = modul pružnosti v tahu

I = kvadratický moment průřezu (moment setrvačnosti průřezu)

M_o = ohybový moment

Postup výpočtu:

$$\Delta y_1 = \frac{1}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot x \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} \quad (5.4.3.2)$$

$$\Delta y_2 = a \cdot \Delta \varphi = \frac{a}{E \cdot I} \int_0^l M_o \cdot dx = \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a \quad (5.4.3.3)$$

$$M_o = F \cdot \frac{h}{2} = \sigma \cdot \Delta H \cdot b \cdot \frac{h}{2} \quad (5.4.3.4)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (5.4.3.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y_1 + \Delta y_2 = \frac{1}{E \cdot I} \cdot \frac{M_o \cdot l^2}{2} + \frac{1}{E \cdot I} \cdot M_o \cdot l \cdot a = \\ &= \frac{M_o \cdot l}{E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{2 \cdot E \cdot I} \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right) \end{aligned} \quad (5.4.3.6)$$

$$\sigma = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{12 \cdot b \cdot l \cdot h \cdot \left(\frac{l}{2} + a \right)} = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{E \cdot h^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (5.4.3.7)$$

Při výpočtu zbytkových napětí v n – vrstvě

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

ΔH_n - tloušťka odebrané vrstvy n

h_n - tloušťka vzorku po odebrání vrstvy n

$$h_n = h_0 - \sum_1^n \Delta H_n \quad (5.4.3.8)$$

$$\sigma_n = \frac{\Delta y_n}{\Delta H_n} \cdot \frac{E \cdot h_n^2}{3 \cdot l \cdot (l + 2a)} \quad (5.4.3.9)$$

Toto vypočtené napětí je bez vztahu k předchozím vrstvám. **Skutečné napětí** dostaneme výpočtem dle:

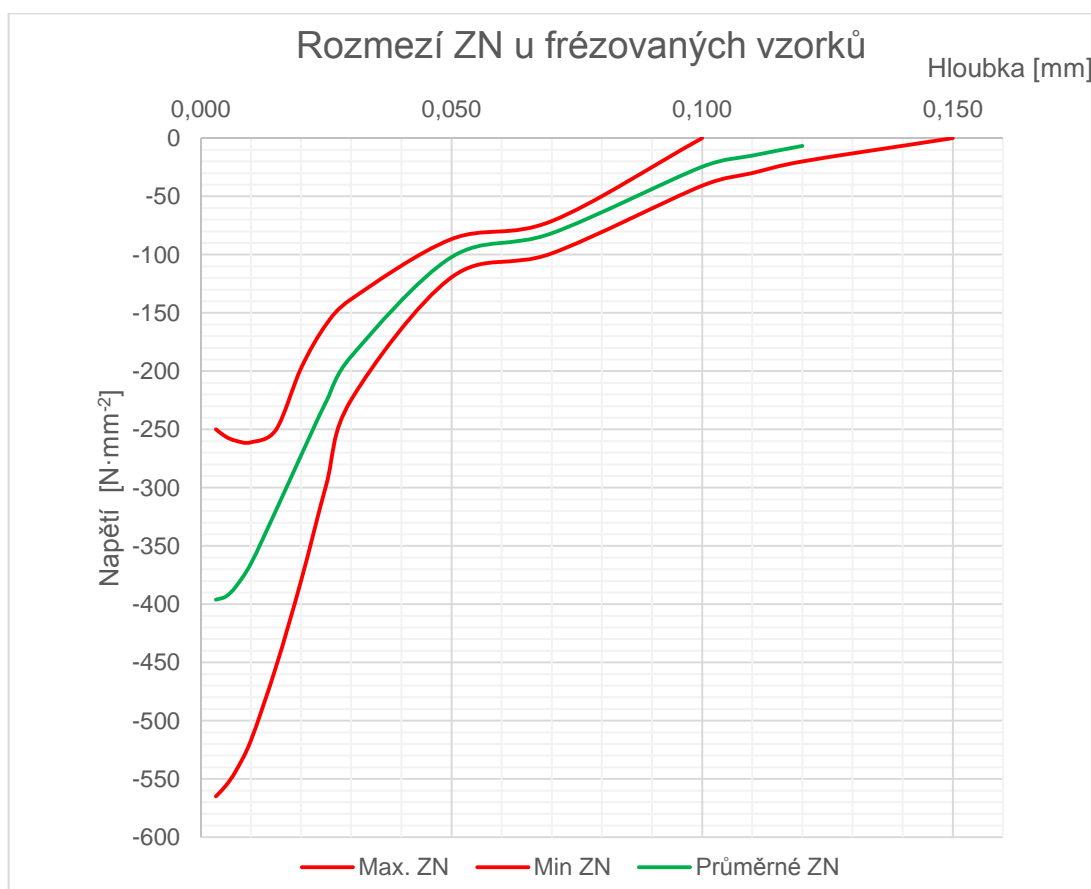
$$\sigma_{vn} = \sigma_n - \sum_1^n \sigma_{(n-1)} \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_n}{h_n} \quad (5.4.3.10)$$

5.4.4 Zbytkové napětí ve vzorcích

Zbytkové pnutí bylo měřeno na všech druzích vzorků.

5.4.4.1 Zbytkové napětí frézovaných vzorků

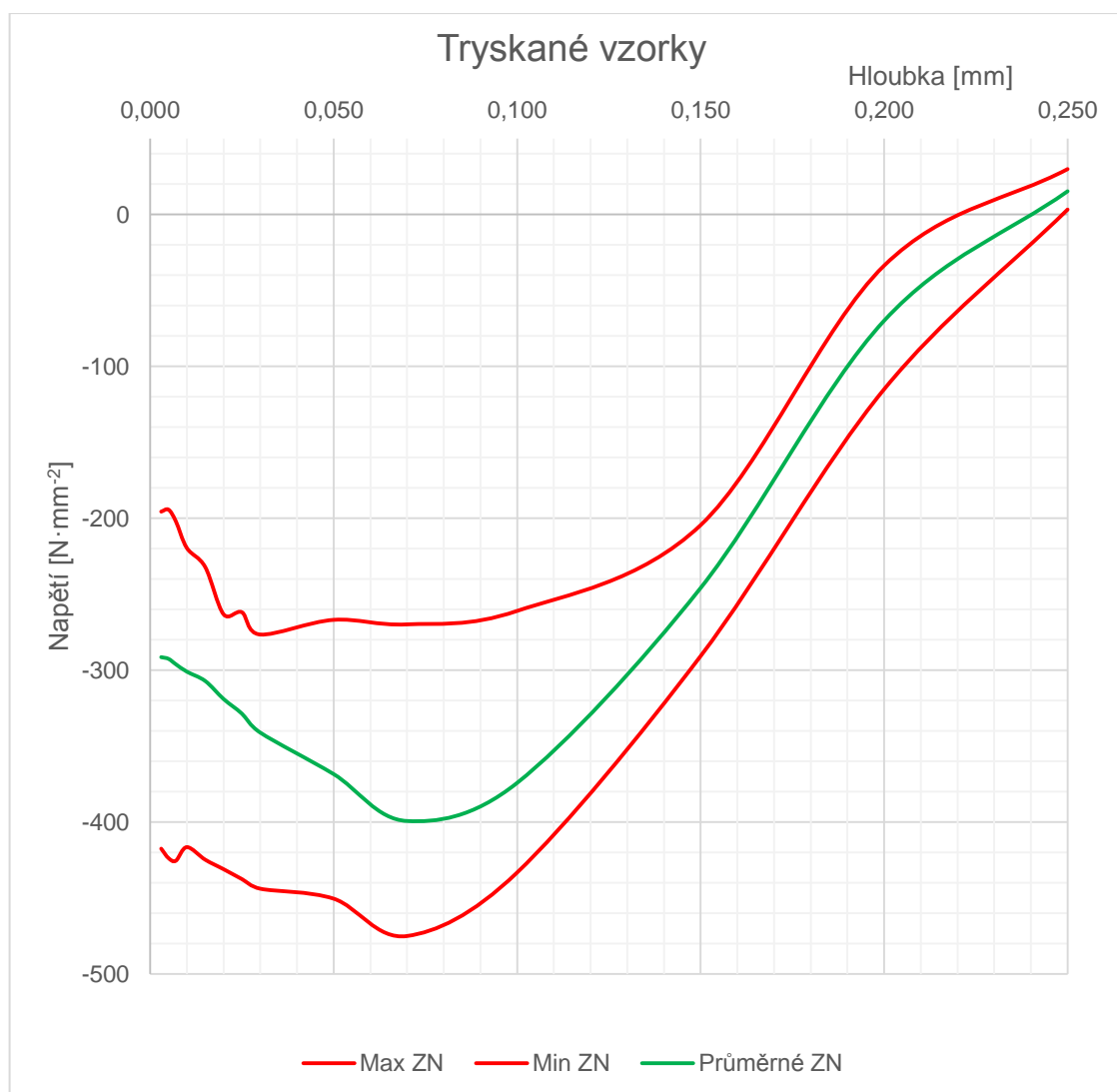
Dle kapitoly 3.4.2 můžeme zbytková napětí u frézovaných vzorků očekávat jak tahová, tak tlaková. Navíc, pokud máme o vzorcích minimum informací (kapitola 5.1.1). Měření na obr. 5.4.4.1 vykazuje tlakové zbytkové napětí, což znamená dle kapitoly 4.1.1.1, že bylo použito dobré chlazení obráběcího procesu. Dále z této kapitoly můžeme odhadnout parametry obrábění, které nebyly známy. Charakter křivky odpovídá pozitivnímu úhlu čela nástroje a hloubka zanesení zbytkových napětí odpovídá řezné rychlosti mezi 55 a 88 m/min a posuvu na zub $f_z = 0,045$ mm/zub. Zbytkové napětí v povrchu do 20 μm má rozptyl od průměrné hodnoty přibližně $150 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, od této hloubky je rozptyl malý a pokračuje tak až do hloubky přechodu, která je od 0,1 do 0,15 mm, průměrně 0,12 mm.



Obr. 5.4.4.1 Zbytková napětí frézovaných vzorků

5.4.4.2 Zbytkové napětí tryskaných vzorků

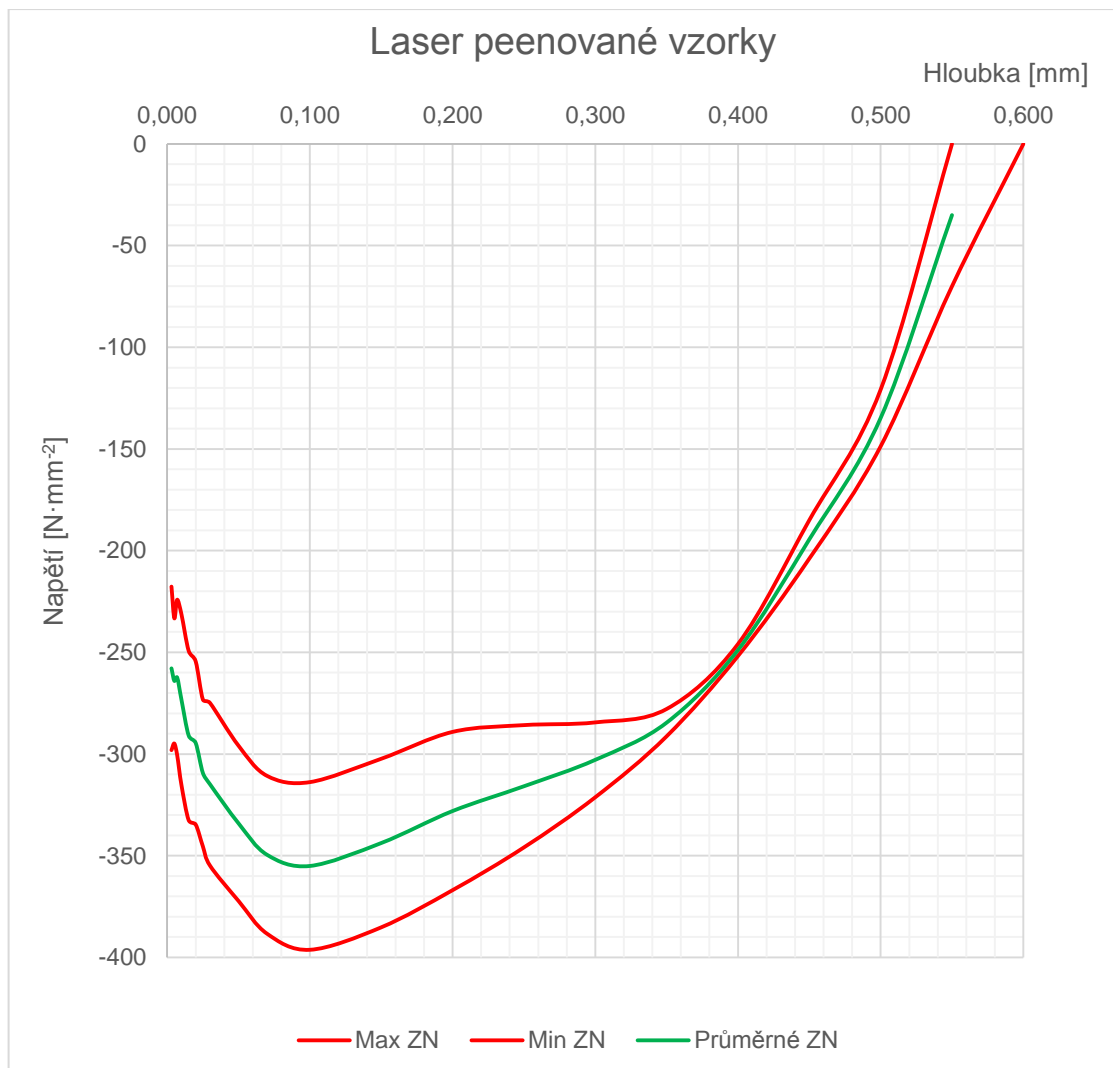
Dle kapitoly 4.1.2.1 můžeme zbytková napětí u tryskaných vzorků očekávat tlaková. Dle obr. 5.4.4.2 je na povrchu dosaženo průměrného napětí $-300 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, které pak do hloubky $70 \mu\text{m}$ stoupá na průměrných $-400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$. Zbytkové napětí v povrchu do $80 \mu\text{m}$ má rozptyl od průměrné hodnoty přibližně $100 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, od této hloubky je rozptyl nižší a pokračuje tak až do hloubky přechodu, která je od $0,22$ do $0,25 \text{ mm}$, průměrně $0,24 \text{ mm}$. Hloubka zanesení zbytkových pnutí odpovídá předpokladům z kapitoly 4.1.2.1. Velikosti zbytkových napětí jsou nižší než předpoklad, ale jelikož nejsou známy všechny parametry měření z kapitoly 4.1.2.1, nemůžeme tato měření přímo srovnávat.



Obr. 5.4.4.2 Zbytková napětí tryskaných vzorků

5.4.4.3 Zbytkové napětí laser peenovaných vzorků

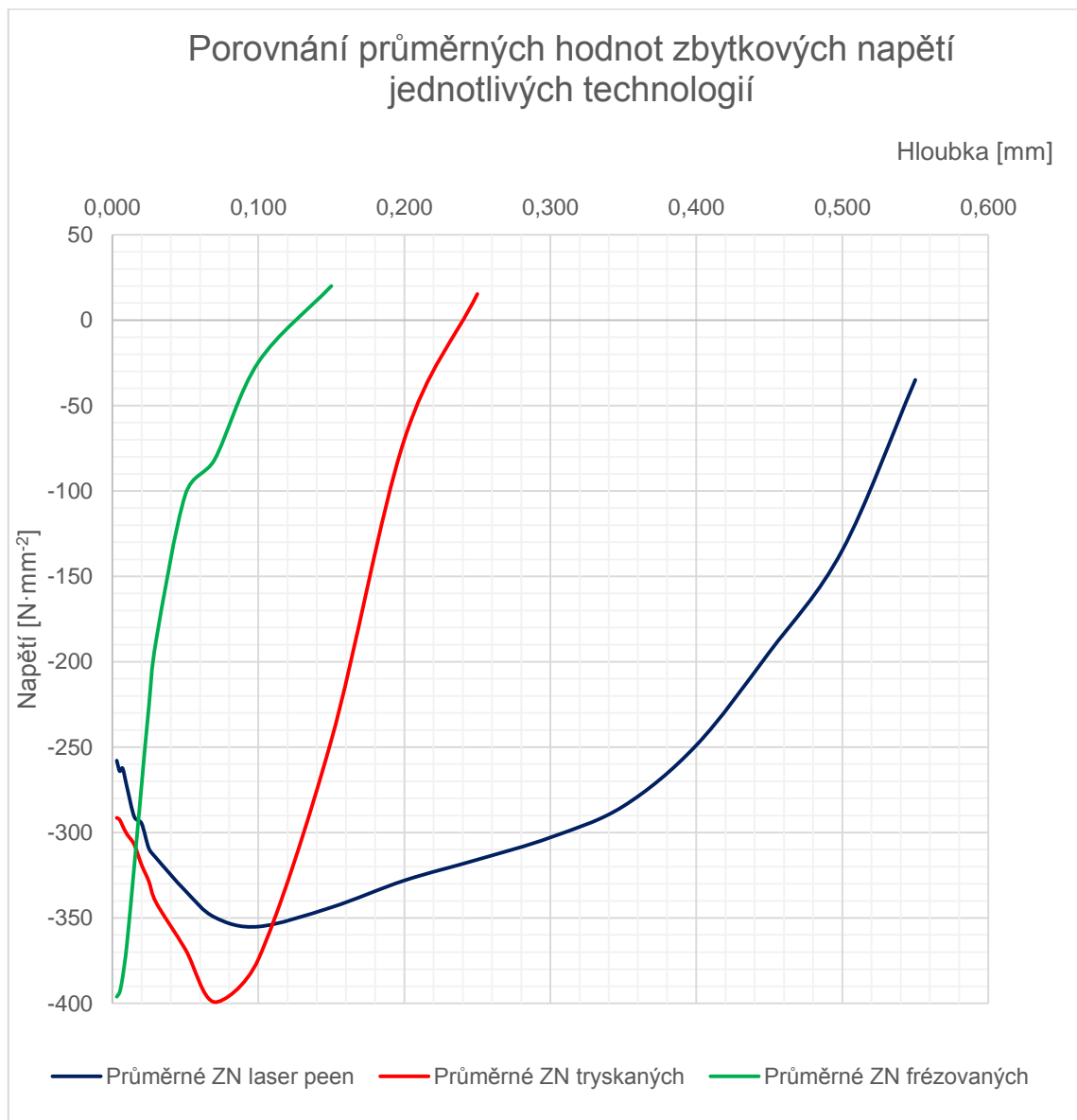
Dle kapitoly 4.2.1 můžeme zbytková napětí u laser peenovaných vzorků očekávat tlaková. Dle obr. 5.4.4.3 je na povrchu dosaženo průměrného napětí – 260 N·mm⁻², které pak do hloubky 100 μm stoupá na průměrných – 360 N·mm⁻². Zbytkové napětí v povrchu do 200 μm má rozptyl od průměrné hodnoty přibližně 40 N·mm⁻², od této hloubky je rozptyl nižší až od 0,37 mm, kde je minimální. Tak pokračuje až do hloubky přechodu, která je od 0,55 do 0,6 mm, průměrně 0,57 mm. Hloubka zanesení zbytkových pnutí odpovídá předpokladům z kapitoly 4.2.1, konkrétně obr.4.2.1.11. Velikosti zbytkových napětí jsou vyšší než u obr.4.2.1.11, což odpovídá vyšší hustotě energie a délce pulzu laserového paprsku.



Obr. 5.4.4.3 Zbytková napětí laser peenovaných vzorků

5.4.5 Porovnání zbytkových napětí

Pro jasné porovnání byly do grafu na obr. 5.4.5 vneseny jen křivky pro průměrné hodnoty jednotlivých technologií. Maximální napětí hned u povrchu zanáší frézování a to přibližně $-400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tryskání má podobnou maximální hodnotu, ale v hloubce přibližně $0,08 \text{ mm}$. Laser peening má maximální hodnoty mírně nižší, přibližně $-360 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a to v hloubce okolo $0,1 \text{ mm}$. Ovlivněná hloubka je u frézování okolo $0,12 \text{ mm}$, u tryskání okolo $0,24 \text{ mm}$ a laser peeningu okolo $0,57 \text{ mm}$.



Obr. 5.4.5 Průměrné hodnoty zbytkových napětí

6 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na technologie dokončování a podrobněji rozpracovává technologie dokončování s potenciálem ke zvýšení životnosti komponent. U těchto technologií identifikuje klíčové parametry procesů. V experimentální části analyzuje vybrané technologie z pohledu integrity povrchu.

Teoretická část obsahuje v první řadě popis konkrétní, v leteckém průmyslu hojně využívanou, slitinu titanu. Tato slitina je také použita v experimentální části práce jako materiál pro vzorky. Teoretická část se dále věnuje integritě povrchové vrstvy. Popisuje jednotlivé parametry integrity a více se zabývá parametry zjišťovanými v experimentální části práce. Dále se teoretická část zaměřuje na způsoby dokončování a vybírá z nich a popisuje ty, které zpevňují povrch a zanáší do něho tlaková zbytková napětí. U vybraných způsobů dokončování jsou uvedeny výsledky převážně zahraničních experimentů, které byly zveřejněny v odborných časopisech či jiných publikacích.

Experimentální část se věnuje zjišťování parametrů integrity povrchu u vzorků ze slitiny titanu, na kterých byly provedeny tři druhy dokončení, a to frézování, tryskání a laser peening. Prvním z měřených parametrů integrity je tvar, konkrétně vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným, která byla u laser peenovaných vzorků od 0,0178 mm do 0,0547 mm. Druhým měřeným parametrem byla drsnost. Měření drsnosti povrchu prokázalo u obou technologií zhoršení parametrů drsnosti oproti základnímu frézovanému stavu. U tryskaných to bylo z $R_a = 0,423 \mu\text{m}$ na $R_a = 1,72 \mu\text{m}$. U laser peenovaných došlo k zásadnějšímu zhoršení na $R_a = 3,75 \mu\text{m}$. Pro určité aplikace by tedy zřejmě mělo být zařazeno následné bezsilové leštění pro snížení drsnosti. Třetím měřeným parametrem byla mikrotvrdost povrchové vrstvy, která byla u frézovaných vzorků přibližně konstantní okolo 320 HV 0,1. Jasně zpevnění vykazují tryskané vzorky, kde mikrotvrdost klesá od povrchu z hodnot až 389 HV 0,1 téměř konstantně do hloubky 0,2 mm na hodnoty okolo 320 HV 0,1. Laser peenované vzorky vykazují zpevnění menší, u povrchu přibližně 371 HV 0,1, ale na hodnotu okolo 320 HV 0,1 klesají až v hloubce 0,4 až 0,5 mm. Čtvrtým měřeným a velice významným

parametrem byla zbytková napětí v povrchové vrstvě. Maximální napětí hned u povrchu zanáší frézování a to přibližně $-400 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, tryskání má podobnou maximální hodnotu, ale zanesenou v hloubce přibližně 0,08 mm. Laser peening má maximální hodnoty mírně nižší a to $-360 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ v ještě větší hloubce okolo 0,1 mm. Hloubka přechodu do nízkých tahových napětí se pohybuje u frézování okolo 0,12 mm, u tryskání 0,24 mm a laser peeningu 0,57 mm.

Vybrané technologické vzorky byly podrobně zanalyzovány z pohledu integrity povrchu. Na jejich základě je možné prvotně posuzovat vhodnost aplikace těchto technologií na reálné výrobky. Výsledky experimentální části jsou porovnány s výsledky experimentů uvedených v teoretické části ze zahraničních zdrojů. Naměřené hodnoty u jednotlivých experimentů ve většině odpovídají očekávaným výsledkům z teoretické části.

Seznam použité literatury

- [1] DONACHIE, Matthew J. *Titanium: A Technical Guide (2nd Edition)*. 2000. ISBN 0871706865.
- [2] FÜRbacher, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity : základní dílo : aktuální stav říjen 2001 - včetně 13. doplňků*. Praha: Odborné nakladatelství technické literatury, 2001. ISBN 8086229025.
- [3] *Aerospace metals* [online]. b.r. [cit. 2016-06-03]. Dostupné z: <http://www.aerospacemetals.com/titanium-ti-6al-4v-ams-4911.html>
- [4] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 9788001037522.
- [5] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 8024812096.
- [6] *VLIV PARAMETRŮ NA TEORETICKOU A SKUTEČNOU DRSNOST POVRCHU* [online]. b.r. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_13.pdf
- [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.
- [8] *Systém měření drsnosti - parametry drsnosti* [online]. JENOPTIK, b.r. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: http://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf
- [9] DOLEŽAL, P a B PACAL. *HODNOCENÍ MIKROTVRĐOSTI STRUKTUR MATERIÁLŮ* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [10] *Zkoušky tvrdosti* [online]. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, fakulta strojní, b.r. [cit. 2016-06-04]. Dostupné z: www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrđosti.pdf
- [11] *Vickers Hardness Test PRINCIPLE* [online]. b.r. [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>

- [12] MÁDL, Jan. *Teorie obrábění*. Praha: České vysoké učení technické, 1989.
- [13] NECKÁŘ, Ferdinand. *Vybrané statě z úběru materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1991.
- [14] VÁCLAVÍK, J, Z BUNDA, P BOHDAN a O WEINBERG. APLIKACE VYBRANÝCH METOD PRO MĚŘENÍ ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ. *NDE for Safety / Defektoskopie 2012* [online]. b.r., 2012 [cit. 2016-06-06]. ISSN ISSN 1435-4934. Dostupné z: http://www.ndt.net/article/defektoskopie2012/papers/271_p.pdf
- [15] ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 9788024825335.
- [16] MÁDL, J., J. KAFKA, M. VRABEC a R. DVOŘÁK *Technologie obrábění: 3. díl*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 8001020916.
- [17] *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných kovů* [online]. b.r. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/37-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-kovu>
- [18] *Stainless steel AISI 316* [online]. b.r. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=stainless_steel_aisi_316
- [19] *Titan Grade 5 Slitina titanu s prvky 6Al-4V* [online]. b.r. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: <http://www.inkosas.cz/download/titanove-slitiny-grade/titan-grade-5.pdf>
- [20] BUMBÁLEK, B. *INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI* [online]. b.r. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf
- [21] MOUSSAOUI, Kamel, Michel MOUSSEIGNE, Johanna SENATORE, Rémy CHIERAGATTI a Frédéric MONIES. Influence of milling on surface integrity of Ti6Al4V—study of the metallurgical characteristics: microstructure and microhardness. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2013, 67(5-8), 1477-1489 [cit. 2016-06-06]. DOI: 10.1007/s00170-012-4582-5. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-012-4582-5>

- [22] *Řízené kuličkování - prevence vzniku vad materiálu* [online]. Metal Improvement Company, b.r. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <http://www.cwst.co.uk/wp-content/uploads/2015/08/czech-shot-peening.pdf>
- [23] *Technologie II - 2. díl* [online]. Ostrava: VŠB TUO, b.r. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_2dil.pdf
- [24] *Shot peening increases fatigue life of auto components* [online]. b.r. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <http://www.pshotblast.com/shot-peening-increases-fatigue-life-of-auto-components-page-4.php>
- [25] JIANG, X.P., C.-S. MAN, M.J. SHEPARD a T. ZHAI Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2007, 468-470, 137-143 [cit. 2016-06-07]. DOI: 10.1016/j.msea.2007.01.156. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509307003012>
- [26] PANT, B.K., R. SUNDAR, Harish KUMAR et al. Studies towards development of laser peening technology for martensitic stainless steel and titanium alloys for steam turbine applications. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, 587, 352-358 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2013.08.074. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509313009611>
- [27] Fatigue Performance of Medical Ti6Al4V Alloy after Mechanical Surface Treatments. *PLoS One* [online]. Public Library of Science, 2010, 10(3) [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1371/journal.pone.0121963. ISSN 1932-6203.
- [28] *TRANSPARENT OVERLAY FOR LASER PEENING* [online]. b.r. [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://www.lspstechnologies.com/transparent-overlay-for-laser-peening/>
- [29] FANG, Y.W., Y.H. LI, W.F. HE a P.Y. LI Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2013, 559, 683-692 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2012.09.009. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509312013214>

- [30] QIAO, Hong Chao, Ji Bin ZHAO, Yi Xiang ZHAO a Lun LI. Effect of Laser Peening on Residual Stress and Micro-Hardness of TC4 Titanium Alloy. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2013, 341-342, 246-250 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.246. ISSN 16627482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.341-342.246>
- [31] *HOW LASER PEENING WORKS* [online]. b.r. [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <http://www.lspstechnologies.com/how-laser-peening-works.php>
- [32] MAAWAD, E., Y. SANO, L. WAGNER, H.-G. BROKMEIER a Ch. GENZEL Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2012, 536, 82-91 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1016/j.msea.2011.12.072. ISSN 09215093. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509311014535>
- [33] SRINIVASAN, S., D.B. GARCIA, M.C. GEAN, H. MURTHY a T.N. FARRIS Fretting fatigue of laser shock peened Ti-6Al-4V. *Tribology International* [online]. 2009, 42(9), 1324-1329 [cit. 2016-06-08]. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.04.014. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X09000917>
- [34] *Dokončovací metody obrábění* [online]. Kolín: Střední průmyslová škola strojírenská, b.r. [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: http://www.sps-ko.cz/documents/STT_obeslova/Dokon%C4%8Dovac%C3%AD%20metody%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.pdf
- [35] *Co je pískování? čím se pískuje?* [online]. b.r. [cit. 2016-06-11]. Dostupné z: <http://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje>
- [36] BRAJER, J. *Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu*. Praha, 2016. Disertační práce. ČVUT Fakulta strojní.
- [37] VÍTOVEC, D. *KVALITA POVRCHOVÉ VRSTVY PO OBRÁBĚNÍ TĚŽKO OBROBITELNÝCH A TITANOVÝCH SLITIN*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Vítězslav Rázek, CSc.

Seznam obrázků

Obr 2.4.1 Průběh růstu Windmanstättenovy struktury [1]	13
Obr. 2.4.2 Vliv druhu chlazení na mikrostrukturu Ti6Al4V [1]	15
Obr. 3.1.1 Klasifikace geometrických tolerancí [5]	17
Obr. 3.1.2 Znázornění Pt, Rt, a Wt [8]	20
Obr. 3.1.2.1 Parametr Ra [5]	21
Obr. 3.1.2.2 Parametr Rz, Rp a Rv [5]	21
Obr. 3.1.2.3 Parametr Rsm [5]	22
Obr. 3.1.2.4 Parametr Rt [5]	22
Obr. 3.1.2.5 Parametr Rz1max (Rmax) [8]	23
Obr. 3.2.3 Zkouška dle Vickerse [11]	26
Obr. 3.3.2 Mechanicky zatížená vrstva a průběhy napětí [12]	31
Obr. 3.3.2.2 Povrchová vrstva s mechanickým a tepelným zatížením [12]	33
Obr. 3.3.3.1 Průběh zbytkových napětí při výrobě lopatky turbokompresoru [13]	34
Obr. 3.3.5.1 Rozdělení metod pro měření zbytkového napětí [14]	36
Obr. 4.1.1.1 Zbytková napětí frézované slitiny titanu, pozitivní úhel čela [20]	42
Obr. 4.1.1.2 Zbytková napětí frézované slitiny titanu, negativní úhel čela [20]	43
Obr. 4.1.1.3 Průběh únavové pevnosti různě dokončených vzorků [20]	44
Obr. 4.1.1.4 Mikrotvrdot HV 0,3/20 frézované slitiny Ti6Al4V [21]	44
Obr. 4.1.2.1 Proces tryskání [22]	45
Obr. 4.1.2.2 Měření intenzity tryskání pomocí Almen pásků [24]	48
Obr. 4.1.2.3 Zbytkové napětí v průběhu životnosti [25]	49
Obr. 4.1.2.4 Drsnost Ra před a po tryskání [25]	49
Obr. 4.1.2.5 Zbytkové napětí, shot peenované modře [26]	50
Obr. 4.1.2.6 Mikrotvrdot HV 0,025, shot peenované modře [27]	50

Obr. 4.2.1.1 Schéma laser peeningu [29]	52
Obr. 4.2.1.2 Schéma laser peeningu [28]	53
Obr. 4.2.1.3 Závislost hustoty energie na mikrotrvdost HV 0,01 [30]	54
Obr. 4.2.1.4 Závislost hustoty energie na zbytkovém napětí [30]	54
Obr. 4.2.1.5 Pokrytí plochy laserem [33]	55
Obr. 4.2.1.6 Detail pokrytí plochy laserem [29]	56
Obr. 4.2.1.7 Závislost mikrotrvdosti HV 0,01 na tloušťce absorpční první vrstvy [30]	56
Obr. 4.2.1.8 Závislost zbytkového napětí na tloušťce absorpční první vrstvy [30]	57
Obr. 4.2.1.9 Závislost mikrotrvdosti HV 0,01 na tloušťce tlumící vrstvy vody [30]	57
Obr. 4.2.1.10 Závislost zbytkového napětí na tloušťce tlumící vrstvy vody [30]	58
Obr. 4.2.1.11 Zbytkové napětí po laser peeningu – růžově [26]	59
Obr. 4.2.1.12 Únavová pevnost [26]	59
Obr. 4.2.1.13 Zbytkové napětí - červeně [29]	60
Obr. 4.2.1.14 Zbytkové napětí [34]	60
Obr. 4.2.2 Vyhlazování [16]	61
Obr. 4.2.3 Válečkování [35]	61
Obr. 4.2.4 Trn pro kalibraci vnitřních rozměrů [35]	62
Obr. 5.1.1.1 Frézovaná destička před nařezáním	63
Obr. 5.1.1.2 Nařezané a označené frézované destičky	64
Obr. 5.1.2 Nařezané a označené tryskané destičky	64
Obr. 5.1.2.1 Princip tlakovzdušného tryskání [36]	65
Obr. 5.1.3 Laser peenované vzorky	66
Obr. 5.1.3.1.1 Laser Spectra Physics Quanta Ray PRO 350 [37]	66
Obr. 5.1.3.1.2 Schéma zařízení [37]	67

Obr. 5.2.1.1 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP3	68
Obr. 5.2.1.2 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP4	68
Obr. 5.2.2.1. Povrch frézovaného vzorku F2	69
Obr. 5.2.2.2 Povrch tryskaného vzorku SPJ1	69
Obr. 5.2.2.3 Povrch laser peenovaného vzorku LSP3	70
Obr. 5.2.3 Grafické znázornění drsností	71
Obr. 5.3.1.1 Uložení vzorku v podložce	72
Obr. 5.3.1.2 Využití úhlovací podložky	72
Obr. 5.3.2 Rozložení měření	73
Obr. 5.3.3.1 Průběh mikrotvrdosti u frézovaných vzorků	74
Obr. 5.3.3.2.1 Průběh mikrotvrdosti u tryskaného vzorku T1A	74
Obr. 5.3.3.2.2 Průběh mikrotvrdosti u tryskaného vzorku T2A	75
Obr. 5.3.3.3.1 Průběh mikrotvrdosti u laser peenovaného vzorku LSP3	75
Obr. 5.3.3.3.2 Průběh mikrotvrdosti u laser peenovaného vzorku LSP4	76
Obr. 5.4.1.1 Schéma zařízení [13]	77
Obr. 5.4.1.2 Reálný vzhled zařízení	78
Obr. 5.4.1.3 Páskou vymezená plocha pro leptání	79
Obr. 5.4.1.4 Sestava připravená k leptání	79
Obr. 5.4.1.5 Záznam měření deformace	80
Obr. 5.4.3.1 Znázornění definice výpočtu [38]	81
Obr. 5.4.3.2 Schéma pro výpočet zbytkového napětí z deformace [38]	82
Obr. 5.4.4.1 Zbytková napětí frézovaných vzorků	84
Obr. 5.4.4.2 Zbytková napětí tryskaných vzorků	85
Obr. 5.4.4.3 Zbytková napětí laser peenovaných vzorků	86
Obr. 5.4.5 Průměrné hodnoty zbytkových napětí	87

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Chemické složení [hm. %] slitiny Ti-6Al-4V [1]	12
Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti dle TZ [3]	13
Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [1]	13
Tab. 2.4 Tepelné zpracování Ti6Al4V [1]	14
Tab. 3.2.3.1 Norma tvrdost dle Vickerse [9]	26
Tab. 3.2.3.2 Zatížení pro zkoušku mikrotvrdosti dle Vickerse [6]	27
Tab. 3.3.5 Principy metod měření zbytkových napětí [15]	37
Tab. 5.1.2.2 Parametry tryskacího procesu	65
Tab. 5.1.3.2 Parametry laser peeningu vzorků LSP3 a LSP4	67
Tab. 5.2.2.1 Naměřené hodnoty tří frézovaných vzorků	69
Tab. 5.2.3.1 Naměřené hodnoty tří tryskaných vzorků	69
Tab. 5.2.4.1 Naměřené hodnoty dvou laser peenovaných vzorků	70
Tab. 5.2.5 Průměrné hodnoty drsností	71