

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie

**Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu**

Disertační práce

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: prof. Ing. Jan Mádl, CSc.

Školitel specialista: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

**Ing. Jan Brajer**

Praha, 2018



## Anotace

Práce je zaměřena na parametrický model, který byl vyvinut k určení nejvhodnější metody charakterizace vybraných vlastností zpracovaného povrchu metodou Laser shock processing. Stále se zvyšující tlak na užité vlastnosti součástí dává možnost rozvoji nekonvenčních metod zpracování. Se změnou metodiky zpracování je nutné vyvíjet a ověřovat možnosti měření vzniklých povrchových vlastností materiálu.

Experimentální část se soustřeďuje na srovnání různých metod měření zbytkového napětí. Posuzuje se spolehlivost a použitelnost každé vybrané metody při různých podmínkách zpracování. Výsledkem je možnost rychlého zhodnocení a vyhodnocení vhodnosti použité metody. V úvahu je brána také ekonomická náročnost měření a cena ovlivnění metodou LSP. Komplexní řešení pomáhá využitelnosti metody laserového opracování pro širší spektrum výrobků, než tomu bylo doposud.



## Abstract

The thesis is focused on a parametric model which has been developed to determine the most suitable measurement method for surface characteristics reached by Laser shock processing method. Constant increasment of requirements on the part properties allows the possibility of development unconventional processing methods. When the processing methodology is changed the next step is to develop and verify possible measuring methodology.

The experimental part of the thesis describes comparison of various methods for residual stress measurements. The reliability and applicability of each measuring method at different treatment conditions was evaluated. The economic demands of the measurement and the cost of the LSP technology are also considered. A comprehensive solution helps the use of the laser treatment method for a wider range of products than has been used before.



## Prohlášení

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

Nemám závažný důvod pro použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. 6. 2018

.....

podpis





## Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Janu Mádlovi, CSc. za odborné vedení během postgraduálního studia, za rady a připomínky při vypracování této práce. Stejně tak děkuji Ing. Pavlovi Zemanovi, Ph.D. a Dr. Danijele Rostohar. Děkuji Ing. Liborovi Beránkovi, Ph.D., Ing. kamilu Kolaříkovi Ph.D. a Ing. Zdeňkovi Pitrmucovi, za cenné diskuze problematiky zbytkového napětí. Děkuji také ostatním kolegům z Výzkumného centra pro strojírenskou výrobní techniku a technologii a Fyzikálního ústavu akademii věd za odborné rady a podporu. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a přátelům za jejich důvěru a velkou podporu při studiu a vypracování disertační práce.

Tato práce vznikala za podpory několika projektů: „Zvyšování kvality výrobního procesu SGS13/188/OHK2/3T/12; Tato práce získala také podporu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky na projekty HiLASE (CZ.1.05 / 2.1.00 / 01.0027) a DPSS Lasery (CZ.1.07 / 2.3.00 / 20.0143) spolufinancované z Evropského fondu pro regionální rozvoj.



## Obsah

1	Úvod .....	13
2	Stav problematiky měření vlastností po zpracování LSP .....	15
2.1	Význam integrity povrchu .....	15
2.1.1	Mikro a makro geometrie povrchové vrstvy .....	15
2.1.2	Zpevnění povrchové vrstvy .....	16
2.1.3	Strukturní a fázové změny .....	17
2.1.4	Smysl, velikost a hloubkový profil napětí v materiálu .....	17
2.2	Měření vybraných vlastností integrity povrchu .....	19
2.2.1	Metody měření tvrdosti .....	19
2.2.2	Metody měření geometrie povrchu .....	21
2.2.3	Metody určování metalografické struktury .....	22
2.3	Měření zbytkových napětí .....	23
2.3.1	Mechanické metody .....	24
2.3.2	Měření tenzometry .....	24
2.3.3	Metoda postupného elektrolytického rozpouštění (vetknutý nosník) .....	24
2.3.4	Metoda postupného odvrtávání .....	27
2.3.5	Rentgenová difrakční tenzometrie (metoda jedné expozice a $\sin^2\psi$ ) .....	31
2.3.6	Neutronová difrakce – měření v urychlovači částic .....	35
2.3.7	Optické metody .....	35
2.3.8	Ultrazvukové metody .....	36
2.3.9	Akustické metody .....	36
2.3.10	Magnetické metody .....	37
2.4	Metody teoretického určení zbytkových napětí .....	37
2.4.1	Predikce únavové životnosti na základě nominálních napětí .....	39
2.4.2	Predikce únavové životnosti na základě (tvarových) hot-spot napětí .....	40
2.4.3	Predikce únavové životnosti na základě vrubových elastických napětí ....	40
2.4.4	Využití metod teoretického určení zbytkových napětí pro LSP ovlivnění	41
3	Metody dokončování pro zlepšení vybraných vlastností povrchu .....	43
3.1	Dokončování s úběrem materiálu .....	43
3.1.1	Jemné obrábění .....	43
3.1.2	Broušení .....	43
3.1.3	Honování .....	44
3.1.4	Lapování .....	44
3.1.5	Superfínišování .....	45
3.1.6	Leštění .....	45
3.1.7	Elektrolytické leštění .....	46
3.1.8	Omílání .....	46
3.2	Dokončování bez úběru materiálu .....	47
3.2.1	Válečkování .....	47
3.2.2	Vyhlazování povrchu diamantem .....	47
3.2.3	Kalibrování .....	48



3.2.4	Kuličkování .....	48
3.2.5	Vibrační zpevňování.....	49
3.2.6	Ultrasonic impact treatment.....	49
3.2.7	Machine hammer peening .....	50
3.2.8	Laser shock processing .....	50
3.3	Technologie Laser Shock Peening .....	51
3.3.1	Historie LSP .....	51
3.3.2	Podstata technologie LSP .....	51
3.3.3	Procesní parametry .....	52
3.3.4	Ovlivňovaný materiál a typicky používaná měření.....	54
3.3.5	Oblast použití LSP.....	55
3.3.6	Vliv Laser Shock Peening na zbytkové napětí .....	56
3.3.7	Vliv Laser Shock Peening na drsnost povrchu .....	64
3.3.8	Vliv Laser Shock Peening na mikrostrukturu.....	65
3.3.9	Vliv Laser Shock Peening na mechanické vlastnosti .....	66
3.3.10	Vliv Laser Shock Peening na korozní vlastnosti a korozi pod napětím ...	70
3.3.11	Vliv Laser Shock Peening na relaxaci zbytkových napětí a stabilitu .....	70
3.4	Přínos volby vhodné měřicí metody zbytkového napětí po LSP .....	71
3.5	Shrnutí a dílčí závěry teoretické části.....	72
3.5.1	Metody ovlivnění povrchové vrstvy.....	73
3.5.2	Vliv metody LSP na integritu povrchu.....	73
3.5.3	Vybrané metody měření .....	73
3.5.4	Porovnání jednotlivých metod měření.....	74
3.6	Cíle disertační práce .....	75
3.7	Metody dosažení cílů.....	75
3.8	Ověření dosažení cílů .....	76
4	Výběr metody měření povrchových zbytkových napětí pro metodu LSP	77
4.1	Výpočetní model zbytkových napětí .....	78
4.1.1	Modelace tlaku vyvolaného plazmatem .....	80
4.1.2	Modelace šíření tlaku materiálem .....	81
4.1.3	Modelace výsledných vlastností materiálu.....	84
4.2	Testovaný materiál – Ti-6Al-4V .....	87
4.2.1	Vlastnosti titanových slitin .....	87
4.2.2	Použití materiálu Ti-6Al-4V.....	87
4.2.3	Chemické složení Ti-6Al-4V .....	88
4.2.4	Mechanické a fyzikální vlastnosti Ti-6Al-4V .....	88
4.2.5	Zpracování slitiny Ti 6Al-4V .....	89
4.3	Měření zbytkových napětí .....	90
4.3.1	Parametry ovlivnění vzorků.....	90
4.3.2	Ověřovací měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí.....	91
4.3.3	Měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií.....	94
4.3.4	Měření zbytkových napětí metodou postupného odvrtávání.....	95
4.3.5	Ověřovací měření zbytkových napětí elektrolytického rozpouštění .....	98



4.3.6	Porovnávací měření zbytkových napětí elektrolytického rozpouštění ....	100
4.3.7	Diskuze k tenzometrickým analytickým metodám .....	102
4.4	Porovnání výpočetního modelu a měření zbytkových napětí.....	104
4.5	Měření dalších vlastností povrchu .....	108
4.5.1	Měření drsnosti .....	108
4.5.2	Měření tvrdosti .....	108
4.5.3	Měření úchylek tvaru a polohy .....	110
4.6	Vztah zbytkových napětí s ostatními vlastnostmi povrchu .....	111
5	Aplikace metodiky .....	113
5.1	Důvody aplikace .....	113
5.2	Přínos pro vědu a praxi .....	115
5.3	Využitelnost predikce vlastností povrchu.....	116
5.4	Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí ...	118
5.5	Ekonomické zhodnocení použití technologie LSP .....	120
6	Důsledky pro vědu a praxi .....	126
6.1	Důsledky velké produktivity laserů nové generace .....	126
6.2	Důsledky metodiky výběru měřicí metody po ovlivnění LSP .....	128
7	Závěr .....	130
7.1	Splnění cílů disertační práce.....	130
7.2	Shrnutí teoretické části .....	130
7.3	Rozbor výsledků měření .....	131
7.4	Ekonomické hodnocení .....	132
7.4.1	Ekonomické hodnocení LSP .....	132
7.4.2	Ekonomické hodnocení měření zbytkových napětí.....	132
7.5	Určení vhodné metody měření zbytkového napětí .....	133
7.6	Výstavba vlastní stanice .....	134
8	Seznamy .....	136
8.1	Seznam obrázků.....	136
8.1	Seznam tabulek.....	141
9	Použitá literatura.....	142
9.1	Publikace autora prezentující výsledky disertace .....	158
9.2	Ostatní publikace autora .....	159
9.3	Ostatní výzkumné zprávy .....	160
9.4	Ostatní ověřené technologie .....	162
9.5	Nepublikované přednášky .....	162
9.6	Oponentní posudky a vedení prací .....	163
10	Přílohy .....	164
10.1.1	Výsledky měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií	164
10.1.2	Výsledky měření zbytkových napětí metodou odvrátání .....	164
10.1.3	Výsledky měření zbytkových napětí metodou odleptávání .....	164
10.1.4	Výsledky měření tvrdosti.....	164
10.1.5	Model výpočtu zbytkových napětí po rázové vlně vyvolené LSP.....	164
10.1.6	Application of laser shock processing .....	164



10.1.7	Development of experimental station for laser shock peening at HiLASE .....	164
10.1.8	HiLASE center: Development of Laser Shock Processing facility and validation of post-processing characterization methods.....	164
10.1.9	Validation of post-process characterization methods for Laser Shock Peened Materials.....	164



## Seznam použitých symbolů, veličin a jednotek

$\sigma$	Napětí	[MPa]
$F$	Síla při zkušebním zatížení měření tvrdosti	[N]
$d$	Délka měřené úsečky	[ $\mu\text{m}$ ]
$Ra$	Střední aritmetická úchylnost profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Z(x)$	Absolutní hodnota úchylnosti profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$lr$	Délka základního profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Zp$	Výška výstupku	[ $\mu\text{m}$ ]
$Zv$	Hloubka prohlubně	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rp$	Výška největšího výstupku	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rv$	Hloubka nejnižší prohlubně	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rz$	Největší výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$RSm$	Průměrná hodnota šířek prvků profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Xs$	Hodnota šířky prvku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$Rt$	Vertikální vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na měřené délce $ln$ je největší hodnota $Rz$ z pěti základních délek $lr$	[ $\mu\text{m}$ ]
$RzI_{max}$	(značená jako $R_{max}$ )	[ $\mu\text{m}$ ]
$\varepsilon$	Deformace vzorku	[%]
$\varepsilon(t)$	Časový průběh deformace	[%]
$\varepsilon(z)$	Závislost deformace vůči vzdálenosti od povrchu	[%]
$\Delta H$	Tloušťka odebírané vrstvy	[mm]
$H$	Celková odleptaná hloubka	[mm]
$F$	Vnější síla	[N]
$b$	Šířka odleptávaného vzorku	[mm]
$h$	Původní tloušťka odleptávaného vzorku	[mm]
$E$	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
$I$	Moment setrvačnosti průřezu	[mm <sup>4</sup> ]
$a$	Délka pomocného třmenu	[mm]
$l$	Délka rozpouštění vzorku	[mm]
$\varphi_1$	Úhel pootočení koncového průřezu	[°]
$\Delta y$	Měřená hodnota deformace	[mm]
$y'$	Průhyb nosníku	[mm]
$y''$	Pootočení měřícího třmenu v rovině měření	[mm]
$r_0$	Poloměr vrtaného otvoru při odvrtávání	[mm]
$\rho, \varphi$	Polární souřadnice systému napjatosti	[-]
$\varepsilon_\rho$	Radiální deformace	[%]
$\varepsilon_n$	Tangenciální deformace	[%]
$A$	Konstanta plošné napjatosti	[-]



$B$	Konstanta plošné napjatosti	[-]
$C$	Konstanta plošné napjatosti	[-]
$\sigma_x, \sigma_y$	Hlavní napětí	[MPa]
$\varphi$	Úhel směru napětí $\sigma_\varphi$ vzhledem k ose $x_{11}$	[°]
$\psi$	Úhel mezi osou $x_{33}$ a směrem deformace $\varepsilon_{\varphi\psi}$	[°]
$P$	Napětí rovnoběžné na směr měření	[MPa]
$Q(z)$	Transformované napětí kolmé na směr měření	[MPa]
$T(z)$	Transformované tangenciální napětí	[MPa]
$z$	Vzdálenost od povrchu	[mm]
$q(z)$	Transformovaná deformace kolmá na směr měření	[%]
$t(z)$	Transformovaná tangenciální deformace	[%]
$\theta$	Úhlová poloha měření	[°]
$d$	Vzdálenost sousedních rovin typu ( $hkl$ )	[mm]
$\theta_0$	Úhlová poloha odpovídající nenapjatému krystalu	[°]
$\varepsilon_{\varphi\psi}$	Mřížková deformace v libovolném směru $\varphi\psi$	[%]
$\sigma_\varphi$	Rentgenografická složka	[MPa]
$\theta_{\varphi\psi}$	Úhlové poloha interferenčních linií	[°]
$K$	Konstanta difrakce	[-]
$\Delta^{hkl}$	Excentricita vrtaného otvoru	[mm]
$I_e$	Hustota zářivého toku	[W/m <sup>2</sup> ]
$t$	Délka pulsu	[ns]
$E_p$	Energie v pulzu	[J]
$f$	Frekvence	[Hz]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_m$	Měz pevnosti	[MPa]
$h_z$	Hloubka zpevnění	[mm]
$P_{avg}$	Průměrný výstupní výkon	[W]
$P$	Průměrný tlak v plazmatu	[GPa]
$Z$	Impedance tlaku při procesu	[g/cm <sup>2</sup> s]
$Z_1$	Impedance pro materiál vzorku	[g/cm <sup>2</sup> s]
$Z_2$	Impedance pro materiál příkrývacího media	[g/cm <sup>2</sup> s]
$\tau(x, t)$	Normálové napětí ve směru $x$	[MPa]
$\tau_z$	Zbytkové napětí	[MPa]
$x, r$	Vzdálenost od povrchu	[mm]
$C_{el}$	Elastická rychlost deformace v základním materiálu	[m/s]
$C_{pl}$	Plastická rychlost deformace v základním materiálu	[m/s]
$D$	Průměr svazku	[mm]
$\rho_p$	Hustota pulzů	[1/cm <sup>2</sup> ]
$U_r$	Napětí generátoru rentgenu	[kV]
$I_r$	Proud generátoru rentgenu	[mA]



$T_{\check{c}}$	Čítací čas	[s]
$s_1$	Rentgenografické elastické konstanty	[TPa <sup>-1</sup> ]
$2\theta$	Náklony jednotlivých rovin detektoru rentgenu	[°]
$z$	Hloubka měření	[mm]
HV0,1	Tvrдость	[Vickers]
PC	Požizovací cena	[mil. Kč]
Nn	Fixní náklady	[Kč]
Nz	Variabilní náklady	[Kč/hod]
$t_r$	Doba měření v závislosti na hloubce	[hod/mm]
Nc	Celkové náklady na měření	[Kč]
$I_{peak}$	Hustota výkonu	[GW/cm <sup>2</sup> ]
Ovr	Překryv jednotlivých pulzů	[%]
$S_{beam}$	Plocha svazku	[mm <sup>2</sup> ]
$P_{rs}$	Produktivita za sekundu	[mm <sup>2</sup> /s]
$P_{rm}$	Produktivita za minutu	[mm <sup>2</sup> /min]
$P_{rh}$	Produktivita za hodinu	[mm <sup>2</sup> /hod]
$T_m$	Doba ovlivnění 1 m <sup>2</sup>	[hod/m <sup>2</sup> ]
$C_s$	Cena stroje	[Kč]
$Z_s$	Životnost stroje	[let]
$C_f$	Časový fond směny	[hod]
$s_m$	Směnnost	[-]
$\tau$	Koeficient využití stroje	[-]
$M_d$	Mzdový tarif obsluhy stroje	[Kč/hod]
$M_p$	Mzdový tarif programátora	[Kč/hod]
$k_s$	Koeficient seřizování stroje	[-]
$k_p$	Koeficient programování	[-]
$C_{cfs}$	Časový fond stroje	[hod/rok]
$N_{hs}$	Náklady na hodinu stroje	[Kč/hod]
$N_{lz}$	Náklady na lidské zdroje	[Kč/hod]
$N_{ch}$	Celkové náklady na hodinu procesu	[Kč/hod]
$t_s$	Délka směny	[min]
$P_z$	Velikost zakázky	[ks]
$S_d$	Velikost ovlivňované plochy na dílci	[mm <sup>2</sup> /ks]
$T_{AV}$	Jednotkový čas vedlejší	[min]
$T_{VN}$	Čas na kontrolu nastavení	[min]
$Z_v$	Počet kontrol za směnu	[-]
$T_B$	Dávkový čas	[min]
$k_c$	Přirážka měnového času	[-]





$N_{RN}$	Nepřiraditelné režijní náklady	[%]
$T_{AS}$	Jednotkový čas strojní	[min]
$T_A$	Jednotkový čas	[min]
$T_{AC}$	Jednotkový čas s přírážkou	[min]
$T_{BC}$	Směnový čas s přírážkou	[min]
$T_Z$	Doba plnění zakázky	[min]
$T_k$	Doba zpracování jednoho kusu	[min]
$T_s$	Potřebný počet směn na zakázku	[směn]
$N_{CZ}$	Celkové náklady na zakázku	[Kč]
$N_{CK}$	Celkové náklady na jeden kus	[Kč]



## 1 Úvod

Rozvoj techniky a lidského poznání je doprovázen stále rostoucími nároky na užité vlastnosti výrobků, a to zejména v oblastech dopravní techniky a energetiky. Růst nároků na spolehlivost a bezpečnost výrobků přímo souvisí s možnostmi nových technologických postupů výroby a také následnými možnostmi úpravy povrchu [1]. Současné principy výroby pro vytvoření konečného tvaru a vlastností součásti jsou často technicky a energeticky velmi náročné. Nové progresivní metody výroby zahrnují výrobu co nejpřesnějšího tvaru polotvaru (přesné lití, tváření, rapid manufacturing) a následně pokročilé způsoby obrábění a dokončování povrchu [2]. Zvláštní pozornosti si vyžadují výrobní postupy při výrobě složitých tvarových ploch, jako jsou dutiny forem, zápustek, otvory střížných a tvářecích nástrojů, tvarové plochy tepelných turbín a proudových motorů a ostatní cyklicky namáhané součásti [2][3].

Ve velké řadě případů je po obrábění zařazena operace pro úpravu povrchových vlastností. Z důvodu přesnosti rozměrů a geometrické charakteristiky je stále nejpoužívanější metodou povrchové úpravy broušení, které však má nepříznivý vliv na vlastnosti přímo související s provozními parametry. Proto lze volit možnost ponechání povrchu bez dokončovací úpravy po obrábění. Příkladem je obrábění vysokopevnostních materiálů v rozsahu tvrdostí 48 – 58 HRC při mezi pevnosti obvykle do 2 000 MPa, kde je přínosem stav napjatosti podpovrchové vrstvy při vyhovující kvalitě obrobeného povrchu [1][3]. Dokončovací operace často nebývá zařazena ani po elektroerozivním obrábění. Pro namáhané součásti jsou aplikovány metody zlepšující vlastnosti povrchové vrstvy [3][6]. Tyto metody umožňují výrazné zlepšení jednotlivých charakteristik integrity povrchu. Jedná se o metody jemného obrábění, honování, lapování, superfinišování, leštění, omílání, tryskání, válečkování nebo protahování. Ze speciálních metod je možné použití kuličkování, které se dle použitého média dá rozdělit na prosté kuličkování, brokování, balotínování a patentování. Z nekonvenčních metod zpevňování povrchu lze použít zpevňování ultrazvukem, Machine hammer peening (MHP) [8] nebo metody Laser shock peening (LSP) [1][7]. Výběr vhodné technologie výroby a následného dokončení součásti má velký vliv na životnost součásti a s tím spojenou užitnou hodnotu [1][2][3][8].

Zlepšení vlastností povrchů materiálů se stalo nedílnou součástí výroby průmyslových součástí a to většinou z důvodů zlepšení mechanických vlastností jako je únavová životnost, odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebení nebo erozi [1][9][10]. V nynější době se mezi pokročilejší technologie povrchových úprav začíná zařazovat Laser shock peening (LSP). Historie LSP sahá již do konce 60. a počátku 70. let [1][11][12][13][14], kdy byl popsán „studený“ pracovní laserový proces. Jedná se o impuls s velmi vysokou intenzitou, který ve velmi krátkém čase narazí na povrch a tím je generována rázová vlna [15][16][7].

Právě technologie LSP umožňuje velmi rovnoměrné zvýšení tlakových napětí v povrchu součásti, které má za následek zvýšení životnosti součásti. Úpravou metodou LSP díky prodloužení životnosti se může zlepšit ekonomická výhodnost vyráběné součásti. Tato technologie je ovšem díky použití velmi výkonného laseru velmi nákladná a je jí tedy možná aplikace pouze pro velmi drahé součásti, kde je poměr mezi náklady



na technologii LSP a samotnými náklady na součást nižší než v případě levnějších součástí. Právě z ekonomických důvodů byla tato technologie výhradně používána pro ovlivňování součástí leteckých motorů. V roce 2015 se skokově zvýšil výkon laserů dostupných pro tuto průmyslovou aplikaci [243], dá se tedy předpokládat, že tento nárůst se projeví v produktivitě technologie a tím i v možnostech jejího použití [248].

S ovlivněním povrchových vlastností je spojena jejich validace, která je obzvláště pro letecký průmysl žádaná [16][7]. Měření některých složek integrity povrchu, jako například geometrická přesnost, je neměnná již řadu let a výsledné hodnoty jsou mezi sebou dobře porovnatelné. Oproti tomu zbytkové napětí v povrchu materiálu je stále obtížné měřit a o to více obtížné porovnávat. Celosvětově existuje velká řada měřicích metod zbytkových napětí a několik všeobecně používaných, které mají různé výhody použití. Každá technika měření je ale vhodná pro rozdílnou míru a hlavně hloubku ovlivnění. Navíc použití velkých výkonů, právě vyvíjených laserů pro technologii zpevňování, bude mít výrazně odlišné důsledky na vlastnosti vrstvy a její homogenitu [247]. Z tohoto důvodu je velmi výhodná příprava metodiky měření a volba nejvhodnějších technik pro technologii LSP za použití velkých výkonů. S dosaženými vlastnostmi úzce souvisí i ekonomická výhodnost použité technologie [248]. Nově vyvinuté laserové zdroje mají výrazně vyšší průměrný výkon, kvalitu svazku a možnosti práce s energií. Z tohoto důvodu by produktivita technologie měla mít markantní nárůst oproti doposud používaným parametrům. A právě se zvyšující se produktivitou vzniká tlak i na zvýšení rychlosti a spolehlivosti predikce výsledků [243].



## 2 Stav problematiky měření vlastností po zpracování LSP

Měření vlastností po zpracování povrchu metodou Laser shock peening je mírně odlišné od ostatní metod dokončování. Hlavní rozdílem je potřeba měření velké hloubky zbytkových napětí. Tlaková zbytková napětí mohou dosahovat hloubky až několika milimetrů, proto nelze použít povrchové metody měření. Povrchové metody měření zbytkového napětí lze použít pouze v kombinaci s postupným odebráním materiálu. Dalším rozdílem je požadavek na spolehlivost měření, protože technologie LSP je často využívána v leteckém nebo jaderném průmyslu, požadavek na přesné určení dosažení předepsaných zbytkových napětí je velmi žádoucí a to i ve velkých hloubkách měření.

Celková integrita povrchu (zbytková napětí, povrchová drsnost, úchylnky tvaru a rozměru) tak musí odpovídat provozním podmínkám, pro zajištění bezproblémového provozu opracovaných součástí.

### 2.1 Význam integrity povrchu

Pro soubor vlastností povrchové vrstvy se používá termín „integrita povrchu“. Povrch se definuje jako geometrická entita povrchu a povrchová vrstva [6][17]. Jedná se o soubor charakteristik popisujících vliv povrchové vrstvy na funkční vlastnosti součástí. Tento soubor může být rozdílný nejen s ohledem na použité výrobní technologie, ale i na způsob zatěžování součástí v provozu. Je třeba brát zřetel i na technické možnosti a ekonomické aspekty kontroly jakosti [18][19][20].

Integritu povrchu lze chápat jako volný soubor vlastností povrchové plochy a povrchové vrstvy, které jsou vytvořeny nebo ovlivněny technologickými procesy a u kterých se předpokládá vliv na funkční vlastnosti součástí. Vlastnosti materiálu a jeho povrchu je celá řada. V nynější době je možné určit přes 200 unikátních vlastností, kde velkou měrou zastupují například magnetické nebo elektrické vlastnosti [221]. Dále jsou definovány tzv. minimální a standardní soubory dat. Jako nejvýznamnější a nejčastěji analyzované faktory, které charakterizují integritu povrchu po obrábění, jsou geometrie obrobeného povrchu a stupeň a hloubka zpevnění. [22] Dále pak strukturní fázové změny a smysl, velikost a hloubkový profil zbytkových napětí. V neposlední řadě do integrity povrchu patří i fyzikálně chemický stav povrchové vrstvy [22][20].

Sledováním závislosti provozních vlastností součástí na integritě povrchu je umožněno optimalizovat způsoby výroby z hlediska požadované spolehlivosti a životnosti [6]. Široký soubor experimentálních dat může napomoci zjištění o vlivu technologických procesů na integritu povrchu [3]. Finální vlastnosti součástí jsou významně ovlivňovány vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. Objem lomů při provozu součástí v současnosti tvoří více než z 90% únavové poškození. Toto poškození má v naprosté většině případů iniciační místo na povrchu součástí [3][23][24].

#### 2.1.1 Mikro a makro geometrie povrchové vrstvy

Geometrie povrchu se rozděluje dle velikosti neshod s ideálním povrchem na makrogeometrii a mikrogeometrii. Makrogeometrie popisuje odchylky tvaru, mikrogeometrie popisuje povrch z hlediska drsnosti a jejího rozdělení [22].

Makrogeometrie popisuje odchylky skutečného tvaru od jeho jmenovitého profilu, jako je rovnoběžnost, kolmost, soustřednost nebo kruhovitost. Makrogeometrie může ovlivňovat životnost součásti z hlediska možnosti výskytů rázů, nežádoucího pohybu nebo tření součástí zapříčiněnými nedodržením požadovaných tolerancí při výrobě součásti [25]. Pro hodnocení tvarové přesnosti je určeno kritérium obalových čar na profilu nebo ploch na tělese [25][26].

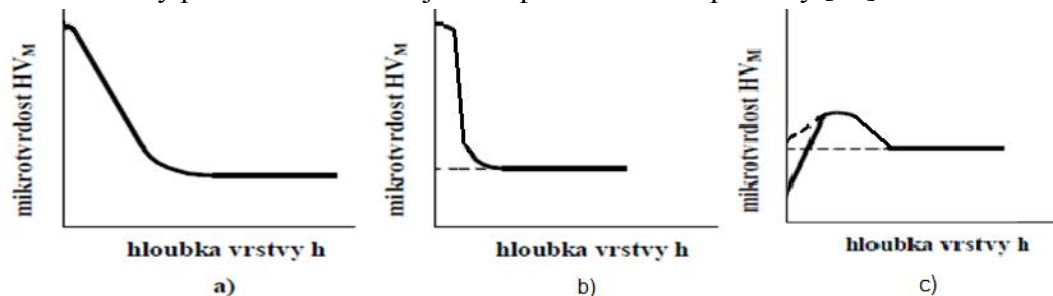
Pro kvalitativní i kvantitativní hodnocení mikrogeometrie povrchu jsou primárně využívány výškové charakteristiky drsnosti povrchu. V některých případech jsou využívány tvarové charakteristiky profilu [27]. Mikrogeometrie je členěna na jednotlivé složky, a to dle rozteče nerovností. Složka s nejmenší roztečí tvoří drsnost povrchu, dále složka vlnitosti a složka s největší roztečí je základní profil. Ze základních charakteristik je to hloubka profilu  $P_t$ , Hloubka vln  $W_t$  a největší hloubka drsnosti  $R_t$ . Vyhodnocován je například také stupeň plnosti profilu, maximální hodnota, šikmost a špičatost funkce hustoty pravděpodobnosti a další [28].

### 2.1.2 Zpevnění povrchové vrstvy

Zpevnění je vnější projev plastické deformace. Zpevnění je charakterizováno jako zvýšený odpor proti pohybu dislokací jako nositelů plastické deformace. Všechny jevy, které brání pohybu dislokací (hranice zrn, precipitáty, jiné dislokace, apod.), zvyšují zpevnění. Řezný klín břitu není nikdy ideálně ostrý, ale přechodová část je definována poloměrem zaoblení ostří řezného nástroje a z tohoto důvodu dochází k deformaci povrchu [24][29].

Téměř všechny technologické procesy ovlivňují mechanické vlastnosti nově vzniklého povrchu. Změny v povrchu mají vliv na výslednou jakost zejména pak na tribologické a únavové vlastnosti. Charakteristiky povrchové vrstvy se dají posoudit podle změn tvrdosti, jak znázorňuje Obrázek 1[9][30][31][32].

Pokud mikrotvrdost povrchové vrstvy postupně klesá směrem do materiálu, jedná se o pevné spojení povrchové vrstvy se základním materiálem [32]. Druhá možnost průběhu tvrdosti je prudký přechod mezi zpevněnou povrchovou vrstvou a základním materiálem. Strmá změna tvrdosti není žádoucí, protože je známkou slabého spojení povrchové vrstvy se základním materiálem, navíc hrozí možnost odloupení tvrdé vrstvy [32]. Třetím případem je průběh mikrotvrdosti, který nejprve vzrůstá a až po dosažení maxima klesá na hodnotu tvrdosti základního materiálu. Tento průběh reprezentuje porušenou krystalickou mřížku. Tento průběh může být způsoben vlivem teploty (odpevněním) nebo se na povrchu může nacházet síť trhlinek. Tento průběh je charakteristický pro broušené nebo jinak tepelně zatížené povrchy [32].



Obrázek 1 Základní druhy změny tvrdosti povrchu po obrábění [32]



### 2.1.3 Strukturní a fázové změny

Každá změna struktury u kovů v tuhém stavu je zapříčiněna změnou uspořádání atomů. Pohyb atomů v krystalové mřížce se mnohem snadněji uskutečňuje za přítomnosti poruch krystalové mřížky a je velmi závislý na teplotě. Při pohybu musí atom překonat potenciální bariéru tvořenou meziatomovými silami. Síly působí mezi pohybujícími se atomem a skupinou sousedních atomů. Pouze ty atomy s dostatečnou aktivační energií, mají možnost překonat bariéru a zaujmout novou polohu. Aktivační energii získává atom při zahřívání či ochlazení soustavy [32]. Po dosažení teploty rekrystalizace probíhají fázové změny nejprve stádiem nukleace, následně koalescence a růstem zrn a následně po překročení kritické teploty převažují růstové pochody [31].

Strukturní stavy povrchových vrstev po obrábění jsou různorodé. Při soustružení, frézování, hoblování, vrtání nebo protahování (při použití nízkých až středních řezných rychlostí) v povrchových vrstvách nedochází k výrazným fázovým změnám. V povrchových vrstvách broušených ploch (při vysokých řezných rychlostech) ve většině případů dochází k fázovým změnám [33]. V těchto případech dochází ke změně struktury, která se projeví změnou mechanických vlastností povrchové vrstvy materiálu. Ve většině případů dojde ke změně krystalové mřížky a s ní spojeným změnám měrného objemu, který má za následek vznik napjatosti v jednotlivých vrstvách [33]. Např. martenzitická přeměna probíhá rychlostí, která je blízká rychlosti šíření zvuku v oceli a uskutečňuje se i přes tuto značnou rychlost mechanismem tvorby zárodků a jejich následným růstem. Je to umožněno nedokonalostí původní struktury, v dokonalých krystalech je martenzitická přeměna nemožná. Překročení teploty MS (martenzit start) o více jak cca 200 °C při současné plastické deformaci má za následek přeměnu martenzitu v původní fázi – austenit [23].

### 2.1.4 Smysl, velikost a hloubkový profil napětí v materiálu

Působením vnějších sil na soustavu vznikají vložena napětí. Zatímco vnitřní napětí jsou v systému již obsažena, aniž by působilo vnější zatížení. Soustava zatížena vnitřními napětími je navenek v rovnováze. Pokud však dojde k porušení rovnováhy, vnitřní napětí se uvolní a projeví ve formě deformace [3][34].

Podle doby působení lze rozlišovat dva druhy vnitřních napětí [3]. Prvním druhem jsou napětí vložena, které vznikají při vnějším silovém působení na těleso. Pokud je působením vnějších sil vyvolána elastická deformace, pak stav napjatosti v tělese bude existovat po dobu jejich působení. Druhým druhem jsou napětí zbytková. Tato napětí zůstávají i po odstranění příčin vyvolávajících napětí. Pro jejich vznik musí vložena napětí překročit mez kluzu zatěžovaného materiálu.

Zbytková napětí se dále mohou dělit do kategorií, které se řídí několika kritérii. Nejčastější dělení je podle velikosti objemu, v kterém dosahují rovnováhy [3] na zbytková napětí I., II. a III. Druhu. Zbytková napětí I. druhu (makroskopická) jsou přibližně homogenní ve velkých oblastech. V celém objemu objektu dosahují zbytková napětí I. druhu rovnováhy a mají přibližně konstantní směr. Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická) jsou homogenní v objemu několika krystalků. Ve vícefázových soustavách mohou být krystalky různých fází napjaty opačně. Zbytková napětí III. druhu





(submikroskopická) – projevují se v rozsahu několika meziatomových vzdáleností a doprovázejí mřížkové poruchy v reálných krystalech [5].

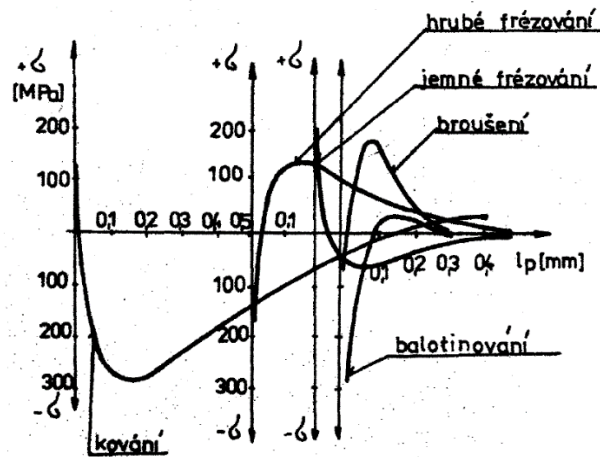
Zbytková napětí všech druhů často působí v součásti současně. Jejich existence se projevuje řadou efektů. Významné jsou geometrické důsledky zásahu do napěťové rovnováhy, které se projeví rozměrovými a tvarovými změnami. Dále pak vliv zbytkových napětí na životnost, odolnost cyklickému namáhání a korozní odolnost strojních komponent. Tlaková zbytková napětí vyvolaná některými způsoby úpravy povrchu cyklicky namáhaných součástí vedou k výraznému prodloužení jejich životnosti. Naopak tahová zbytková napětí podporují vznik a propagaci únavových trhlin nebo napěťovou korozi. Příkladem negativního vlivu tahových napětí je vznik trhlin v okolí svarových spojů při chladnutí a fázových transformacích bez působení vnějších sil [3][34].

Příčin vzniku zbytkových napětí je velké množství. Vznikají v materiálu při jeho nehomogenní plastické deformaci. Podmínkou pro vznik zbytkových napětí je překročení meze kluzu. V souvislosti s procesy probíhajícími během technologických operací jsou jako hlavní příčiny zbytkových napětí označovány [3]:

- 1) *Nerovnoměrné plastické deformace* – vyvolané mechanickými silami a momenty – silový účinek.
- 2) *Nerovnoměrný ohřev a ochlazování* – způsobují nerovnoměrné roztažení či smršťování materiálu – tepelná napětí.
- 3) *Nerovnoměrné změny struktury* – pokud dochází k rozdílu měrných objemů původní a nově vzniklé struktury – strukturální napětí.
- 4) *Chemické procesy* – zejména absorpce, difuze a s nimi spojené chemické reakce pronikajících částic cizích látek a plynů.

Při technologických operacích působí různé kombinace příčin vzniku zbytkových napětí zároveň. Pokud nedochází k výraznému zvýšení teploty při vytváření nového povrchu součásti (Obrázek 2), působí silový účinek na povrchovou vrstvu tak, že ji plasticky deformuje, čímž vyvolává reakci v elastickém jádru součásti [34]. Na povrchu vznikají tlaková napětí, proti nim však tahová uvnitř součásti. Jejich velikost a rozložení po hloubce je ovlivněno stupněm a hloubkou přetvoření povrchové vrstvy. Z vlastností materiálu hraje v tomto procesu dominantní roli hlavně poměr meze kluzu a pevnosti materiálu, houževnatost, tažnost a tvárnost [35]. Ke vzniku zbytkových napětí dojde, pokud byla plasticky deformována pouze povrchová vrstva a dostatečně tuhé jádro svůj rozměr nezmění [34].

Vznik technologických zbytkových napětí lze přirovnat k pružně-plastickému ohybu nosníku, kde jádro je namáháno elasticky, zatímco krajní vlákna jsou podrobena plastické deformaci, takže po odlehčení dojde k vytvoření zbytkových napětí [4].



Obrázek 2 Příklad průběhu napětí v součásti během výroby jednotlivými technologiemi [25]

Další příčinou vzniku zbytkových napětí je nerovnoměrný ohřev nebo ochlazení součásti. Velikost tepelných napětí je ovlivněna především způsobem ohřátí nebo ochlazením, ale také tepelnou roztažností materiálu, mechanickými vlastnostmi materiálu a jejich změnami vlivem teploty [20].

Zbytkové napětí může mít vliv na statickou pevnost. Při rovnoměrném rozdělení napětí do celého průřezu materiálu je zbytkové napětí bráno jako předpětí. Na statickou pevnost mají zbytková napětí největší vliv od objemového tváření, odlévání a tepelných zpracování. V případě dokončování se jedná pouze o zpracování tenké povrchové vrstvy, která má pouze malý objem v porovnání se zbytkem součásti, proto i vliv na statickou pevnost je malý [20].

Vliv zbytkových napětí na únavovou pevnost, je významná u dynamicky namáhaných dílů. Obzvláště to platí u součástí namáhaných na ohyb a krut. U těchto druhů namáhání je nejvíce namáhaná povrchová vrstva. Všechny vruby, vrypy a mikrotrhliny, vměstky i drsnost porchu působí jako koncentrátoři napětí a právě v těchto místech se obvykle iniciuje trhlinka. Tlaková zbytková napětí tuto iniciaci zpomalují či jí úplně zamezují [20].

## 2.2 Měření vybraných vlastností integrity povrchu

Integrita povrchu se skládá ze spousty vlastností a je velmi důležité se zaměřit na vlastnosti, které mají největší vliv na provoz součásti v daných podmínkách. U součástí, které jsou vystaveny namáhání (ovzvláště cyklickému) lze určit několik základních vlastností porchu. Většinou se jedná o tvrdost, geometrickou přesnost, metalografickou strukturu a zbytková napětí.

### 2.2.1 Metody měření tvrdosti

Tvrdost je významnou mechanickou vlastností materiálů, jejich povrchové vrstvy. Tvrdost lze definovat jako odolnost materiálu či povrchu materiálu v měřené lokalitě proti místní deformaci vyvozené konkrétním zatěžovacím tělesem (indentorem) přesného geometrického tvaru působením přesně definovaného zatížení [36].





Podle rychlosti působení zátěžné síly se mohou zkoušky tvrdosti dělit na statické a dynamické. Zkoušky se mohou dělit i podle jejich principu na vrypové, vnikací, nárazové a odrazové [36].

Vrypové zkoušky se používají pro tvrdé a křehké materiály. V technické praxi se používá zkouška podle Martense (scratch test). Svě místo nalézají i při měření tenkých vrstev. Nejpoužívanější jsou vnikající statické zkoušky tvrdosti, jsou založeny na principu, tělesa tvrdoměru vtlačovaného do povrchu vzorku postupně se zvyšující silou do dosažení předepsaného zatížení. Toto zatížení je pak udržováno na konstantní úrovni po stanovenou dobu [36].

Nejčastějšími metodami měření tvrdosti jsou statické metody podle Brinella, Rockwella, Vickerse a Knoopa. Nárazové zkoušky jsou také vnikací za pomoci rázu. Zkoušky jsou prováděny pomocí Kladívka Poldi nebo Baumanova kladívka. U těchto zkoušek se poměřuje velikost vtisku [36].

Odrasové zkoušky jsou založeny na principu měření míry odrazu indentoru vyslaného na vzorek definovanou energií (pružinou). Jsou prováděny pomocí Shoreho skleroskopu či Durosokopem [236].

Nejrozšířenější metodou měření tvrdosti je měření podle Vickerse, značená jako HV. Vickersova metoda je nejčastěji využívaná i pro měření mikrotvrdosti. 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.

Tvrdost dle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše vtisku násobená konstantou.

$$(2.1) \quad HV = 0,189 \cdot (F / d^2)$$

Povrchové vrstvy mají často malé rozměry, z tohoto důvodu je nutné volit metody měření povrchu, které mají velmi malý vtisk indentoru tvrdoměru. Zde lze aplikovat metoda měření mikrotvrdosti nebo tvrdosti při nízkém zatížení (Tabulka 1).

Tabulka 1 Přehled velikosti zatížení při měření tvrdosti dle Vickerse [36]

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

Při použití menšího vtisku má za následek sníženou přesnost měření vlivem nepřesnosti odečtu velikosti vtisku.

### 2.2.2 Metody měření geometrie povrchu

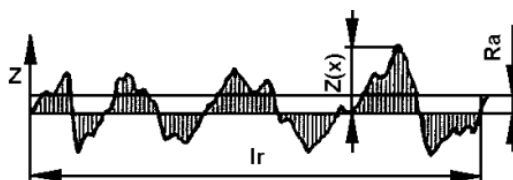
Pro měření makrogeometrie povrchu lze použít konvenční měřidla jako je posuvné měřítko nebo mikrometr, pro úchylky tvarů poté úhelníky nebo úhломěry.

Pro měření mikrogeometrie povrchu je vhodné použití drsnoměru nebo profiloměru. Celkový přehled mikrogeometrie lze získat skenováním povrchu například konfokálním mikroskopem [37][40].

Komplexní přehled makrogeometrie nejjednodušeji získáme souřadnicovým měřicím strojem. Charakteristiky mikrogeometrie, které jsou obvykle používány v praxi, nepopisují dostatečně chování obrobeného povrchu. Je nutné nalezení souvislosti mezi charakteristikami mikrogeometrie povrchu a sledovanou vlastností povrchu pro jeho funkci [20].

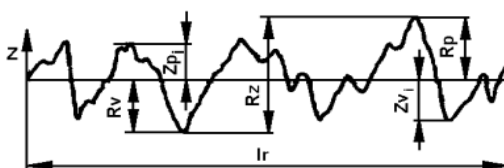
Střední aritmetická úchylka profilu  $R_a$  je aritmetický průměr absolutních hodnot  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l_r$ .  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky výstupků profilu a hloubky rýh profilu (Obrázek 3) [38].

$$(2.2) \quad R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx$$



Obrázek 3 Znárodnění parametru  $R_a$  [38]

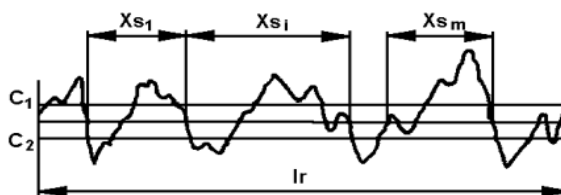
Největší výška výstupku profilu  $R_p$  je výška  $Z_p$  největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (Obrázek 4). Největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$  je hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky  $l_r$ . Největší výška profilu  $R_z$  je součet výšky největšího výstupku  $R_p$  a hloubky nejnižší prohlubně  $R_v$  v rozsahu základní délky  $l_r$  [38].



Obrázek 4 Znárodnění parametru  $R_v$ ,  $R_p$  a  $R_z$  [38]

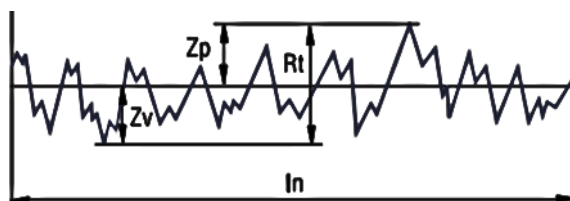
Průměrná vzdálenost prvků profilu  $R_{Sm}$  je průměrná hodnota šířek  $X_{s_i}$  prvků profilu v rozsahu základní délky  $l_r$  (Obrázek 5) [38].

$$(2.3) \quad R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i}$$



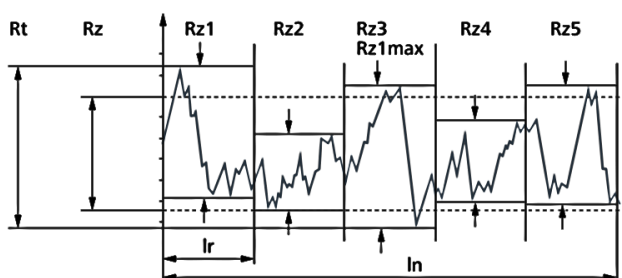
Obrázek 5 Znárodnění parametru  $R_{Sm}$  [38]

Celková výška profilu drsnosti  $R_t$  je vertikální vzdálenost mezi nejvyšším a nejnižším bodem profilu na měřené délce  $l_n$  (celá vyhodnocovaná délka), (Obrázek 6) [38].



Obrázek 6 Znárodnění parametru  $R_t$  [38]

Maximální hloubka drsnosti  $Rz1_{max}$  je největší hodnota  $Rz$  z pěti základních délek  $l_r$  (značená jako  $R_{max}$ ), (Obrázek 7) [39].



Obrázek 7 Znárodnění parametru  $Rz1_{max}$  ( $R_{max}$ ) [39]

### 2.2.3 Metody určování metalografické struktury

Určení metalografické struktury lze pomocí metalografických výbrusů a světelné mikroskopie. Největší nevýhodou je subjektivnost měření. Rozpoznání změn závisí na zkušenostech metalografa a má orientační charakter [40].

Přesnější metoda je pozorování povrchu za pomoci elektronové mikroskopie. Elektron primárního svazku po dopadu na vzorek vyrazí elektron z některé vnitřní hladiny atomu vzorku. Vzniklá elektronová vakance se zaplní přeskokem elektronu z vyšší energetické hladiny. Rozdíl energií se vyzáří v podobě rtg. kvanta, jehož energie odpovídá rozdílu energií obou energetických hladin. Tato energie je dána druhem atomu, a proto ji lze použít k identifikaci prvku, z něhož byla uvolněna [40].

Uvedený jev využívá konstrukce elektronové mikrosondy pro stanovení chemického složení vzorku. Elektronová mikrosonda představuje kombinaci elektronového mikroskopu a spektrometru rentgenova záření [3].

Další využívanou metodou je rentgenová fluorescenční analýza. Tato metoda je založena na měření sekundárního (fluorescenčního) rentgenového záření, které vzorek emituje. Analyzovaný vzorek je ozářen vysokoenergetickým rentgenovým spektrem. Rentgenové záření vybudí elektrony z vnitřních elektronových hladin a při zaplnění vakantních pozic jsou vyzářena kvanta energie, která odpovídají přítomným prvkům. Měřením záření lze vykreslit rentgenové emisní spektrum, ve kterém jsou obsaženy charakteristické čáry každého prvku obsaženého ve vzorku [3].



### 2.3 Měření zbytkových napětí

V nynější době je používána celá řada experimentálních metod pro měření zbytkových napětí. Tyto metody však stále nejsou zcela rozšířené jako metody pro zjišťování jiných vlastností materiálů [3]. Metody jsou popsány v Tabulka 2 [28][29].

Měření zbytkových napětí může být provedeno metodami destruktivními (poškození zkoumané součásti nebo vzorku) nebo nedestruktivními (bez porušení povrchové vrstvy zkoumané součásti). Metody se dají také dělit dle použitého fyzikálního principu nebo způsobu měření [25].

Tabulka 2 Metody zjišťování zbytkových napětí [28][29]

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 sítě	deformace sítě
křehké laky		vznik trhlin	
křehké modely		vznik trhlin	
Fyzikální RTG	obecný tvar	difrakce	vzdálenost meziatomových rovin
Fyzikální ultrazvuk		šíření vln	změna rychlosti
			odraz vln
			vnitřní tlumení
Elektrické	obecný tvar	změna proudu	změna potenciálu procházejícího proudu
			změna velikosti vířivých proudů
			změna indukčního toku
Magnetické	obecný tvar	změny magnetismu	magnetická indukce
			zbytkový magnetismus
Akustické	obecný tvar	prozvučitelnost	četnost akustických emisí
Chemické	obecný tvar	difuze vodíku	trhliny na povrchu
		změna chemické aktivity	změna struktury

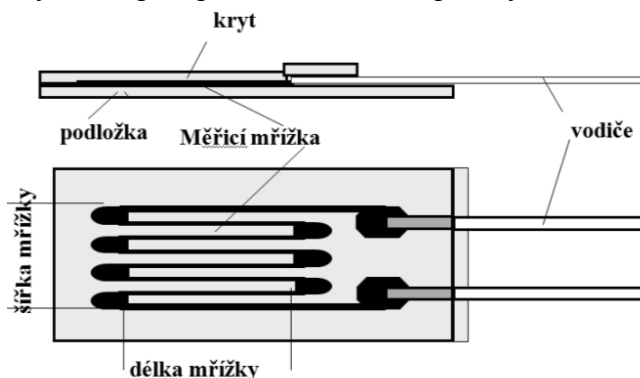
### 2.3.1 Mechanické metody

Jako u všech ostatních metod měření zbytkového napětí není možné měření přímo požadované veličiny. Mechanické metody určování zbytkových napětí jsou pouze destruktivní. Jsou založené na měření deformací vyvolaných porušením napěťové rovnováhy při odstranění části povrchu zkoumaného vzorku. Po odstranění části vzorku a následné deformaci se těleso dostane opět do rovnováhy. Hlavní nevýhodou mechanických metod je, že nimi lze určit pouze napětí I. druhu. Navíc jsou schopny určit pouze průměrnou velikost zbytkového napětí po celém průřezu a délce odebírané vrstvy. [40].

Pro určení deformace a následně správné určení zbytkového napětí je potřeba zvolit správnou metodu. Existuje několik metod, jak měřit tyto deformace, které jsou často i velmi malé. [25].

### 2.3.2 Měření tenzometry

Nejrozšířenější jsou tenzometry snímající změny elektrického odporu, kapacity nebo jiných elektrických vlastností. Velmi používané jsou tenzometrické snímače, které jsou založeny na snímání deformace prutu nebo membrány, pomocí tenzometrů. Tenzometry mohou být odporové, kovové nebo polovodičové. Tenzometry měří přetvoření  $\varepsilon$ , ale lze je využít např. i pro snímání změn polohy (Obrázek 8) [22].



Obrázek 8: Schéma tenzometru

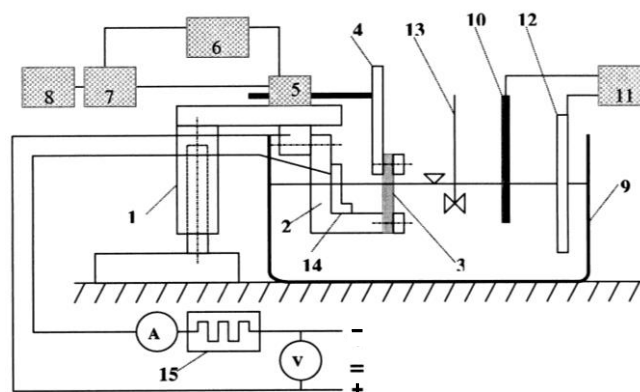
Tyto jednoduché tenzometry určené pro měření pouze jednoosé napjatosti lze zapojit do kříže nebo do růžice čímž se dá měřit dvouosá napjatost.

Starším přístrojem pro měření napětí jsou tenzometry pneumatické. Jedná se o princip založený na snímání polohy trysky a klapky. Změna jejich vzájemné polohy vyvolá změnu tlaku vzduchu před tryskou, která je snímána a následně přepočítána na napětí, které bylo potřeba k vychýlení trysky oproti klapce [22].

### 2.3.3 Metoda postupného elektrolytického rozpouštění (vetknutý nosník)

Metoda postupného elektrolytického rozpouštění je založena na mechanice průhybu nosníku při odebírání části jeho povrchu. Tato metoda byla vyvinuta v Laboratoři obrábění FS ČVUT v Praze doc. Ing. Ferdinandem Neckářem, CSc a dále vylepšena doc. Ing. Jindřichem Kafkou, CSc [6].

Měření umožňuje poměrně snadným způsobem zjišťovat průběhy zbytkových napětí v závislosti na hloubce pod povrchem. Výhoda je nahrazení mechanického nebo chemického odstraňování povrchových vrstev materiálu elektrolytickým (anodovým) rozpouštěním (Obrázek 9) [3]. Elektrolytickým rozpouštěním dochází k úběru materiálu, přičemž je registrována změna polohy konce nosníku v měřicím třmenu. Při měření vzorku dojde k odstranění vrstvy se zbytkovým napětím, následně musí dojít k vyrovnání vzniklého nerovnovážného stavu deformací (ohnutím). Leptání a měření deformace probíhá kontinuálně. Deformace lze měřit několika způsoby, dotykově nebo bezdotykově s relativně vysokou přesností. Mezi klady metody elektrolytického odleptávání patří přesné určení orientace zbytkového napětí, kontinuální snímání deformace, a relativně krátký čas měření. Mezi zápory naopak patří nutná destrukce vzorku, práce s chemikáliemi a rozměrové omezení součásti či vzorku.



Obrázek 9: Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí; 1 – stojan, 2 – upínací třmen, 3 – zkušební vzorek, 4 – měřicí třmen, 5 – indukční snímač, 6 – napájecí obvody, 7 – obvod pro el. nastavení polohy snímače, 8 – registrační počítač, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – kontaktní teploměr, 11 – automatické spínací relé, 12 – topné tělísko, 13 – míchadlo, 14 – katoda, 15 – variátor [6]

Vzorek je nejprve změřen a zvážen a poté upnut do třmenů měřícího zařízení. Plochy vzorku, které nejsou elektrochemicky rozpouštěny, jsou pokryty ochranným voskem. Část povrchu, na kterém je zjišťován průběh zbytkových napětí, je očištěn a odmaštěn. Takto připravený vzorek je ponořen do lázně a po vyrovnání teplot vzorku a lázně je elektrochemicky rozpouštěn. K zajištění časově rovnoměrného úběru je lázeň temperována a promíchávána, napájecí proud je stabilizován a spolu s napětím průběžně kontrolován.

Deformace vzorku  $\varepsilon$  vznikající odstraňováním vrstev je ze snímače přenášena na zapisovač. Získaný časový průběh deformace  $\varepsilon(t)$  lze převést na závislost deformace vůči vzdálenosti od povrchu  $\varepsilon(z)$ . Za předpokladu rovnoměrného časového úběru je možno rozpuštěnou hloubku určit z váhového úbytku a její závislost na čase považovat za lineární [3][6][34].

Výpočet zbytkových napětí v jednotlivých vrstvách plochého vzorku obdélníkového průřezu vychází ze vztahů pružnosti a pevnosti. Základem výpočtu je předpoklad, že ve vrstvičce tloušťky  $\Delta H$  je zbytkové napětí  $\sigma = \text{konst.}$  Odebráním vrstvičky  $\Delta H$  u plochého vzorku způsobí zbytkové napětí stejnou deformaci, jako by na něj působila vnější síla  $F$  (Obrázek 10) [35]:



$$(2.4) \quad F = \Delta H \cdot b \cdot \sigma.$$

Průhyb vzorku (vetknutého nosníku) je

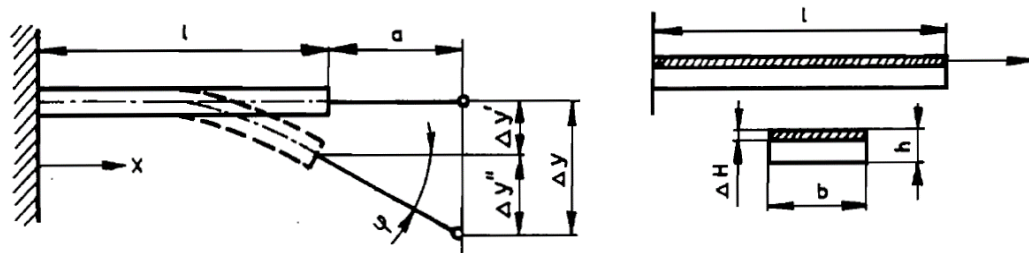
$$(2.5) \quad y = \frac{1}{EI} \int_0^l M \cdot x \cdot dx,$$

kde

$$(2.6) \quad I = \frac{bh^3}{12},$$

je moment setrvačnosti průřezu

V našem případě dle obr. 2.11 po odebrání vrstvičky  $\Delta H$ :



Obrázek 10: Znázornění měřených hodnot na zkušebním vzorku, kde  $a$  – je délka pomocného třmenu,  $\phi_1$  - úhel pootočení koncového průřezu,  $\Delta y$  - měřená hodnota deformace,  $y'$  - průhyb nosníku,  $y''$  - pootočení měřícího třmenu v rovině měření [35]

$$(2.7) \quad \Delta y = \Delta y' + \Delta y'',$$

$$(2.8) \quad \Delta y' = \frac{1}{EI} \int_0^l M \cdot x \cdot dx = \frac{Ml^2}{2 \cdot EI},$$

$$(2.9) \quad \Delta y'' = a \cdot \Delta \phi = a \cdot \frac{1}{EI} \int_0^l M \cdot dx = \frac{Mla}{EI},$$

kde

$$(2.10) \quad M = \sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot \frac{h}{2},$$

to znamená, že:

$$(2.11) \quad \Delta y = \frac{\sigma \cdot b \cdot \Delta H \cdot h \cdot l}{2 \cdot EI} \left( \frac{1}{2} + a \right)$$

a pro napětí plyne

$$(2.12) \quad \sigma_{vn} = \frac{\Delta y}{\Delta H} \cdot \frac{E}{3 \cdot l(l + 2a)} \cdot h^2.$$

$\Delta y$  - přírůstek deformace,

$l$  - délka rozpouštění,

$E$  - modul pružnosti,

$H$  - celková odleptaná hloubka,

$\Delta H$  - přírůstek tloušťky vrstvy (rozpuštěné),

$h$  - původní tloušťka vzorku,

Skutečné zbytkové napětí v  $n$ -té vrstvě pod povrchem je dáno vztahem:

$$(2.13) \quad \sigma_n = \sigma_{vn} - \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_1 \cdot \frac{4 \cdot \Delta H_1}{h_i},$$

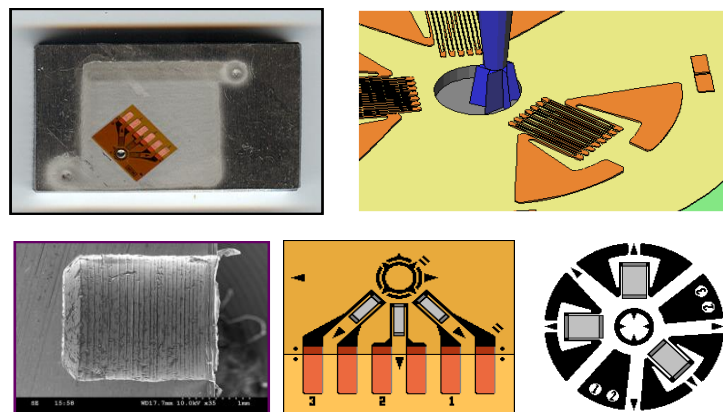
$$(2.14) \quad h_i = h_o - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta H_i.$$

### 2.3.4 Metoda postupného odvrtávání

Druhou mechanickou a zároveň velmi rozšířenou metodou je měření povrchového napětí pomocí postupného odvrtávání. Metoda se někdy označuje jako Matharova metoda v souladu se jménem autora, který ji v roce 1934 poprvé publikoval. Tato metoda je založena na vyvrtání otvoru malého průměru (obvykle 1 až 4 mm) do hloubky odpovídající přibližně průměru otvoru [3][22].

Odebíráním materiálu dojde k přerozdělení a částečnému uvolnění zbytkových napětí. Následně jsou změřeny příslušné deformace na povrchu tělesa a na základě teoreticky nebo experimentálně zjištěných kalibračních koeficientů se určí velikosti a směry hlavních zbytkových napětí.

Měření se provádí pomocí odvrtávacího zařízení. Nejprve se do místa, v němž je požadováno měření zbytkové napjatosti nainstaluje speciální tenzometrická růžice, která se připojí k tenzometrické aparatuře. Nad růžicí se upevní vrtací zařízení umožňující vrtání otvoru ve středu tenzometrické růžice, to vše s maximálními nároky na minimální úchyly tvaru a polohy (Obrázek 11) [41].



Obrázek 11: Schéma uspořádání tenzometrů kolem vrtaného otvoru [41]

Využití metody je založeno na předpokladech, že v oblasti tenzometrické růžice je homogenní rovinná zbytková napjatost. Dále hlavní zbytkové napětí kolmé k povrchu je ve všech hloubkách nulové a z hlediska teorie pružnosti se tedy jedná o těleso typu stěny. Dále je důležitý předpoklad, že jak před, tak i po vyvrtání otvoru, je v tělese lineárně elastická napjatost [41].

Při vyvrtání otvoru o poloměru  $r_0$  dojde k uvolnění napětí. Systém je určen polárními souřadnicemi  $(\rho, \varphi)$ . Velikost napětí lze získat porovnáním napjatosti místě



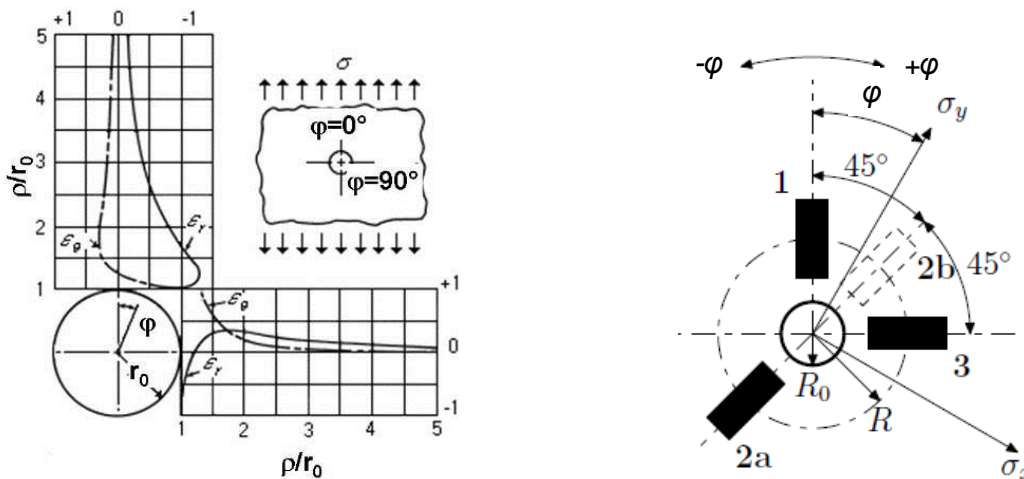
před a po vyvrtání otvoru. Při předpokladu homogenity a izotropie lze dosadit do Hookova zákona. Pro určení deformace radiální  $\varepsilon_\rho$  a tangenciální  $\varepsilon_n$  platí vztahy[42]:

$$(2.24) \quad \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \sigma(A + B \cos 2\varphi), \\ \varepsilon_n &= \sigma(-A + C \cos 2\varphi), \end{aligned}$$

pro určení konstant  $A, B, C$  platí:

$$(2.25) \quad A = -\frac{1+\mu}{2E} \left( \frac{r_0^2}{\rho^2} \right), \quad B = -\frac{1+\mu}{2E} \left[ \left( \frac{4}{1+\mu} \right) \frac{r_0^2}{\rho^2} - \frac{3r_0^4}{\rho^4} \right], \quad C = -\frac{1+\mu}{2E} \left[ \left( -\frac{4\mu}{1+\mu} \right) \frac{r_0^2}{\rho^2} - \frac{3r_0^4}{\rho^4} \right].$$

Z průběhů radiálních a tangenciálních deformací plyne, že nevhodnější polohou pro měření deformací je oblast, kde  $\rho/r_0 \in (2,2; 3,4)$ , Vždy se jedná o měření radiálních deformací, protože jsou několikásobně větší než deformace tangenciální (Obrázek 12) [42][43].



Obrázek 12: (vlevo) Radiální a tangenciální deformace v závislosti na vzdálenosti od odvrtného otvoru pro tenkou desku ve stavu jednoosé napjatosti, (vpravo) schéma odporové tenzometrické růžice pro určení zbytkových napětí [43].

Předpoklad elastického materiálu umožňuje využití principu superpozice. Od jednoduchého případu jednoosé napjatosti lze přejít ke dvousému. Deformace v radiálním směru[42][235]:

$$(2.26) \quad \varepsilon_\rho = \sigma_x(A + B \cos 2\varphi) + \sigma_y(A - B \cos 2\varphi) = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi = \varepsilon_\rho(\sigma_x, \sigma_y, \varphi)$$

Po získání hodnoty radiální deformace ve třech nezávislých směrech lze vypočítat hlavní napětí  $\sigma_x, \sigma_y$  a úhel  $\varphi$ . Na tenzometrické růžici tři měřicí mřížky s natočením  $0^\circ / 45^\circ / 90^\circ$  respektive  $0^\circ / 225^\circ / 90^\circ$  kolem středu aby bylo možno tato hlavní napětí a úhel vypočítat. Na obrázku 7 je znázorněno uspořádání mřížek na tenzometrické růžici, která byla použita v experimentu [42].



Deformace, které měří jednotlivé vinutí označené 1, 2, 3, jsou rovny [42]:

$$(2.27) \quad \begin{aligned} \varepsilon_1 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi, \\ \varepsilon_2 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\varphi + 45^\circ), \\ \varepsilon_3 &= A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2(\varphi + 90^\circ), \end{aligned}$$

Řešení těchto rovnic:

$$(2.28) \quad \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}, \\ \sigma_{\min} &= \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{\sqrt{2}}{4B} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}, \\ \tan 2\varphi &= \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}. \end{aligned}$$

Úhel  $\varphi$  je kladný ve směru od tenzometru 1 k tenzometru 3:

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 > \varepsilon_1 &\dots\dots\dots \varphi \text{ je vztažen k } \sigma_{\max}, \\ \varepsilon_3 < \varepsilon_1 &\dots\dots\dots \varphi \text{ je vztažen k } \sigma_{\min}, \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_1 &\dots\dots \varepsilon_2 < \varepsilon_1 \dots\dots\dots \sigma_{\max} \text{ je v } \varphi = 45^\circ, \\ &\dots\dots \varepsilon_2 > \varepsilon_1 \dots\dots\dots \sigma_{\max} \text{ je v } \varphi = -45^\circ. \end{aligned}$$

Těmito rovnicemi jsou určeny velikosti i směry hlavních napětí. Vztahy jsou odvozeny za předpokladů dvojsového stavu napjatosti lineárně elastické, izotropní a homogenní desky [43]. Není počítáno s gradientem napětí do hloubky a je předpokládáno vyvrtání průchozího otvoru o malém průměru [43].

Odvrtávací metoda může být použita pro stanovení gradientu zbytkového napětí materiálu s dvouosým stavem napjatosti. Mezi nejpoužívanější postupy patří: přírůstková metoda, metoda průměrných napětí, integrální metoda a metoda mocninné řady. Metoda mocninné řady s použitím velkého počtu malých vrtacích kroků je vhodnější v případě hladkého průběhu napětí, zatímco integrální metoda lépe vystihuje skutečný průběh, pokud průběh obsahuje náhlé změny. Velkou nevýhodou integrální metody je ovšem použití dat z malého počtu vrtacích kroků [35]. Přibližná metoda mocninné řady je založena na výpočtu koeficientů, které odpovídají uvolněným deformacím při vrtání otvoru do pole zbytkového napětí. Toto pole je proloženo mocninnou řadou, kde proměnná je vzdálenost od povrchu  $z$ . Obvykle se volí kombinace napětí [42]

$$(2.29) \quad P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, \quad Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}, \quad T = \frac{\tau_{xy}}{2},$$

na které je aplikována metoda nejmenších čtverců.



Transformované napětí  $P(z)$  se vypočítá z transformované deformace  $p(z)$  [42]:

$$(2.30) \quad \begin{bmatrix} \sum^0 \bar{a}(z)^0 \bar{a}(z) & \sum^0 \bar{a}(z)^1 \bar{a}(z) \\ \sum^1 \bar{a}(z)^0 \bar{a}(z) & \sum^1 \bar{a}(z)^1 \bar{a}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0 P \\ {}^1 P \end{bmatrix} = \frac{E}{1+\mu} \begin{bmatrix} \sum^0 \bar{a}(z)^0 p(z) \\ \sum^1 \bar{a}(z)^0 p(z) \end{bmatrix},$$

$$(2.31) \quad P(z) = {}^0 P + {}^1 P \cdot z.$$

Další výpočty se provedou pro transformovaná napětí  $Q(z)$  a  $T(z)$  z transformovaných deformací  $q(z)$  a  $t(z)$  a koeficientů  $b(z)$ .

Podstata integrální metody vychází z úvahy, že deformace naměřená na povrchu v důsledku odvrtní s celkovou hloubkou  $z$  je integrální hodnotou nekonečně malých deformací od zbytkových napětí působících v hloubkách  $Z$ , kde  $0 \leq Z \leq z$ . Pro uvolněnou deformaci po vyvrtání otvoru z nulové hloubky do hloubky  $z$  lze zapsat:

$$(2.32) \quad \varepsilon_{\rho}(z) = \frac{1}{2E} \int_0^z \left\{ (1+\mu) \hat{A}(Z, z) [\sigma_x(Z) + \sigma_y(Z)] + \hat{B}(Z, z) [\sigma_x(Z) - \sigma_y(Z)] \right\} dZ,$$

Lze převést na  $j$ -tou vrstvu.

$$(2.33) \quad \varepsilon_{\rho_j}(z) = \frac{1}{2E} \sum_{i=1}^j \bar{a}_{ji} (1+\mu) (\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) + \bar{b}_{ji} (\sigma_{xi} - \sigma_{yi}),$$

Koeficienty  $a_{ji}$  a  $b_{ji}$  se získají kalibrací. Pro různici se třemi tenzometry se pro zjednodušení výpočtu požadovaných hodnot  $\sigma_{max}$  a  $\sigma_{min}$  vypočítají kombinace deformací a napětí [42]:

$$(2.34) \quad p_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j}}{2}, \quad q_j = \frac{\varepsilon_{3j} - \varepsilon_{1j}}{2}, \quad t_j = \frac{\varepsilon_{3j} + \varepsilon_{1j} - 2\varepsilon_{2j}}{2},$$

$$(2.35) \quad P_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j}}{2}, \quad Q_j = \frac{\sigma_{3j} - \sigma_{1j}}{2}, \quad T_j = \frac{\sigma_{3j} + \sigma_{1j} - \sigma_{2j}}{2}.$$

Po dosazení vztahů (2.31 a 2.32) do rovnice (2.30) se získá vyjádření pro kombinace napětí odpovídajících  $j$ -té vrstvě:

$$(2.36)$$

$$P_j = \frac{1}{\bar{a}_{jj}} \left[ \frac{E p_j}{(1+\mu)} - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{a}_{ji} P_i \right], \quad Q_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[ E q_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} Q_i \right], \quad T_j = \frac{1}{\bar{b}_{jj}} \left[ E t_j - \sum_{i=1}^{j-1} \bar{b}_{ji} T_i \right],$$

Následně se přímo vypočítá napětí  $\sigma_{max}$  a  $\sigma_{min}$  v  $j$ -té vrstvě:

$$(2.37) \quad \sigma_{\min j}^{\max j} = P_j \pm \sqrt{Q_j^2 + T_j^2}.$$

### 2.3.5 Rentgenová difrakční tenzometrie (metoda jedné expozice a $\sin^2\psi$ )

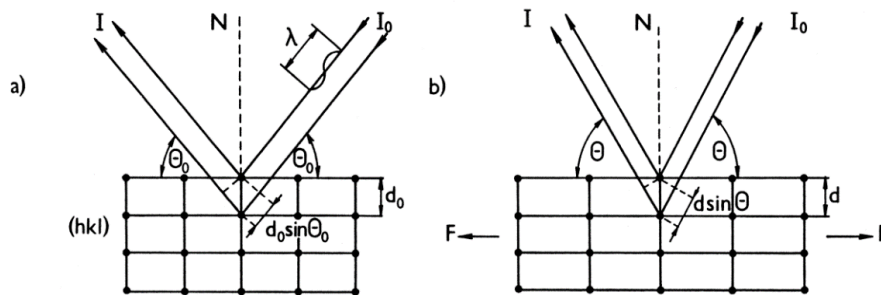
Podstatou rentgenové tenzometrie je využití difrakce rentgenových paprsků na krystalech k měření změn vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných napětím. Rozptyl záření na sousedních mřížkových rovinách vede ke vzniku interferenčního maxima ve směru  $\theta$ . Pro tento předpoklad musí platit, že rozdíl drah obou paprsků je celočíselným násobkem vlnové délky použitého záření, tj. platí-li Braggova podmínka formulována v roce 1912[44]

$$(2.38) \quad n\lambda = 2d \sin \theta,$$

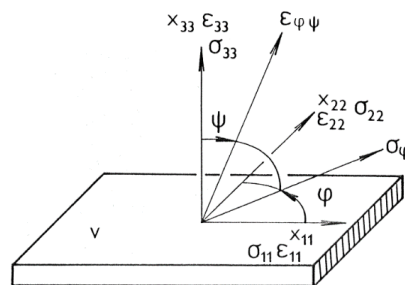
kde  $d$  je vzdálenost sousedních rovin typu  $(hkl)$ . Působením mechanického napětí se změní mezivrstevná vzdálenost  $d$ , a tím i úhlová poloha  $\theta$  a vlnová délka záření se nemění. Diferencováním dostaneme vztah:

$$(2.39) \quad \varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = -\cot g \theta_0 (\theta - \theta_0)$$

Mezi mřížkovou deformací  $\varepsilon$  v napjatém krystalu a úhlovým posunem interferenčního maxima  $(\theta - \theta_0)$ ;  $d_0$  a  $\theta_0$  jsou hodnoty odpovídající nenapjatému krystalu (Obrázek 13) [44].



Obrázek 13: Deformace vzdáleností mřížkových rovin  $(hkl)$ , tím způsobené změny úhlové polohy interferenčního maxima;  $I_0$  a  $I$  jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou  $F$  [44]



Obrázek 14: Systém souřadnic napětí a deformací spojený se vzorkem [44]

Při úvaze soustavy souřadnic napětí a deformací spojenou se vzorkem, složky tenzoru napětí působícího na objemový element vzorku  $\sigma_{ij}$ , který splňuje podmínky lineární teorie elasticity, lze mřížkovou deformaci  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  v libovolném směru  $\varphi\psi$  (Obrázek 14) vyjádřit vztahem [44]

$$(2.40) \quad \varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi - \sigma_{33}) \sin^2 \psi + \frac{\nu+1}{E} (\sigma_{13} \cos \varphi + \sigma_{23} \sin \varphi) \sin 2\psi + \frac{1}{E} \sigma_{33} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) .$$

Úhel  $\varphi$  charakterizuje směr napětí  $\sigma_{\varphi}$  vzhledem k ose  $x_{11}$ ,  $\psi$  je úhel mezi osou  $x_{33}$  (normálou k povrchu) a směrem deformace  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ .

Za předpokladu dvojosého stavu napjatosti, kdy  $\sigma_{i3} = 0, i = 1, 2, 3$  a po substituci

$$(2.41) \quad \sigma_{\varphi} = (\sigma_{11} \cos^2 \varphi + \sigma_{12} \sin 2\varphi + \sigma_{22} \sin^2 \varphi)$$

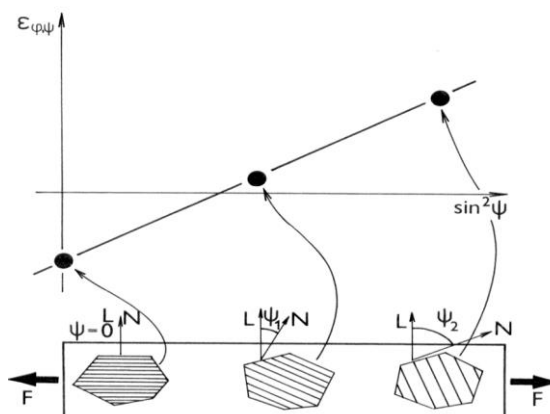
bude vztah (6.3) lineární závislostí mezi mřížkovou deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$  a  $\sin^2 \psi$ :

$$(2.42) \quad \varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{\nu-1}{E} (\sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22})) .$$

Derivací (6.4) podle  $\sin^2 \psi$  dostáváme:

$$(2.43) \quad \frac{\partial \varepsilon_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi} = \frac{\nu+1}{E} \sigma_{\varphi} ,$$

tj. směrnice přímky  $\varepsilon_{\varphi\psi}(\sin^2 \psi)$  je dána elastickými konstantami  $E, \nu$  a působícím napětím  $\sigma_{\varphi}$ .



Obrázek 15: Princip měření napětí metodou „ $\sin^2 \psi$ “ [44]

Proložíme-li mřížkovou deformaci  $\varepsilon$  deformací  $\varepsilon_{\varphi\psi}$ , dostaneme základní rovnici rentgenografického měření napětí podle tzv. metody „ $\sin^2 \psi$ “ (Obrázek 15) [44]:

$$(2.44) \quad \varepsilon_{\varphi\psi} = \cot g \theta_0 (\theta - \theta_0) = \frac{\nu+1}{E} \sigma_{\varphi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) .$$



Ze vztahů (2.35) a (2.40) získáme výraz pro výpočet složky napětí  $\sigma_\varphi$ :

$$(2.45) \quad \sigma_\varphi = -\frac{E}{\nu+1} \cot g\theta_0 \frac{\partial \theta_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi}.$$

Rentgenografické stanovení složky  $\sigma_\varphi$  metodou „ $\sin^2\psi$ “ tedy vyžaduje dostatečně přesné určení úhlové polohy  $\theta_{\varphi\psi}$  interferenčních linií získaných difrakcí záření na vhodných systémech  $\{hkl\}$  v azimutální rovině  $\varphi = \text{konst.}$  při různých hodnotách úhlu  $\psi$ . Princip metody „ $\sin^2\psi$ “ je schematicky znázorněn na obr. 6.3 [44].

Veličiny jsou rentgenografické elastické konstanty pro daný systém rovin ( $hkl$ ).

$$(2.46) \quad \frac{1}{2} s_2^{hkl} = \left( \frac{\nu+1}{E} \right)_{\text{rtg}}, \quad s_1^{hkl} = \left( -\frac{\nu}{E} \right)_{\text{rtg}},$$

Pro rentgenografickou tenzometrická metodu „jedné expozice“ jsou potřeba následující kroky.

Nejprve se sestrojí lineární závislost  $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$ , z níž lze vypočítat napětí  $\sigma_\varphi, \sigma_{11} + \sigma_{22}$ . K výpočtu jsou potřebné experimentální hodnoty  $\varepsilon_{\varphi,\psi}$  alespoň ze dvou měření provedených při různých úhlech  $\psi$ .

Dosažením do vztahu (2.41)  $\psi_1 \neq \psi_2 \neq 0$  a po odečtení  $\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}$  vyjde závislost

$$(2.47) \quad \sigma_\varphi = \frac{1}{\frac{1}{2} S_2} \frac{\varepsilon_{\varphi,\psi_1} - \varepsilon_{\varphi,\psi_2}}{\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2} \cot g\theta_0 \frac{\partial \theta_{\varphi\psi}}{\partial \sin^2 \psi}.$$

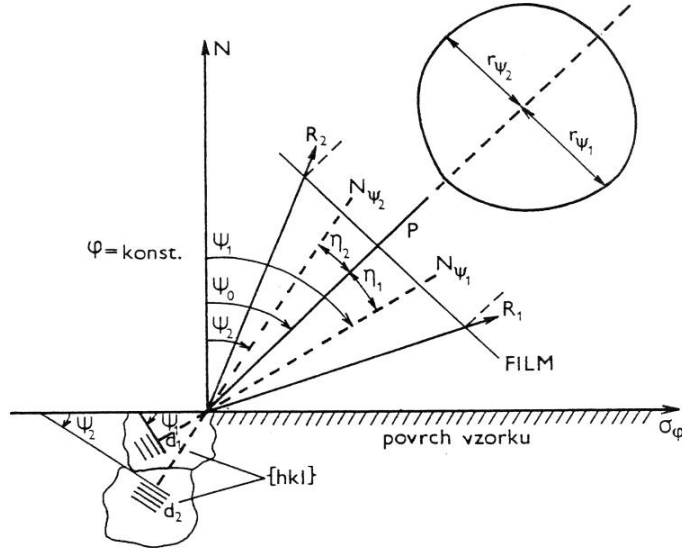
Výraz (2.44) je v rentgenové tenzometrii používán k výpočtu napětí  $\sigma_\varphi$  metodou „jedné expozice“ [44]. Při uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody s registrací difraktovaného záření na zobrazovací plate detektor lze hodnoty  $\varepsilon_{\varphi,\psi_1}, \varepsilon_{\varphi,\psi_2}$  určit z jednoho rentgenogramu.

Tento experimentální postup se nevyznačuje vysokou přesností určení  $\sigma_\varphi$ , neboť při sestrojení závislosti  $\varepsilon_{\varphi,\psi}(\sin^2\psi)$  se zde vychází pouze ze dvou zjištěných hodnot  $\varepsilon_{\varphi,\psi}$ .

Dále pak chyby stanovení Braggova difrakčního úhlu jsou při detekci na paměťovou fólii zpravidla větší, než při měření na rentgenovém difraktometru s počítačovou registrací difraktovaného záření [44].

Pro praxi mají smysl hlavně ty rentgenografické metody měření zbytkového napětí, které dávají rychlou informaci a zároveň jsou nezávislé na tvaru a rozměrech zkoumaných objektů. Tyto požadavky splňuje metoda „jedné expozice“.

Debyeovo-Scherrerovo uspořádání na zpětný odraz předpokládá úzce kolimovaný svazek záření. Ozářená plocha má zpravidla menší rozměry než při měření na difraktometru. Tuto skutečnost lze v rtg tenzometrii s výhodou použít pro mapování povrchů studovaných vzorků (Obrázek 16)[44].

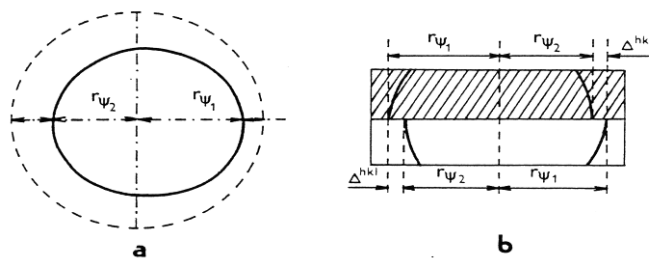


Obrázek 16: Schéma metody zpětného odrazu při šikmém dopadu primárního svazku P na povrch vzorku. Vzorek je vystaven tahovému napětí  $\sigma_\varphi$ ; R1 a R2 jsou body interferenčního kužele studované látky v azimutální rovině  $\sigma_\varphi$  [44]

Při uvedeném uspořádání Debyeovy-Scherrerovy metody je na snímku dosaženo interferenční linie napjatého materiálu excentrické vzhledem k ose primárního svazku, která určuje střed fólie image plate, tj.  $r_{\psi_1} \neq r_{\psi_2}$ . Asymetrie rentgenogramů je důsledkem difrakce paprsku P na soustavách rovin (hkl) různě orientovaných ke směru působícího napětí. Dle orientace lze zjistit různá deformace. Pokud primární svazek záření dopadá na povrch zkoumaného vzorku pod úhlem  $\psi_0 = 45^\circ$ , lze na základě (6.8) odvodit vztah:

$$(2.48) \quad \sigma_\varphi = \frac{\cot g \theta_0}{\frac{1}{2} s_2} \frac{\cos^2 2\theta_0}{2 \sin 2\eta} \frac{r_{\psi_1} - r_{\psi_2}}{D},$$

$\theta_0$  je Braggův úhel reflexe (hkl) odpovídající materiálu bez napětí,  $\eta = 90^\circ - \theta_0$ , D je vzdálenost vzorku od filmu a veličiny (Obrázek 17)  $r_{\psi_1}$ ,  $r_{\psi_2}$



Obrázek 17: Schéma difrakčního obrazu získaného metodou „jedné expozice“ [44]





Zavedeme-li označení:

$$(2.49) \quad \Delta^{hkl} = r_{\psi_1} - r_{\psi_2}; \quad K = \frac{\cot g\theta_0 \cos^2 2\theta_0}{\frac{1}{2}s_2 \cdot 2\sin 2\eta},$$

pak bude:

$$(2.50) \quad \sigma_\varphi = K \frac{\Delta^{hkl}}{D}.$$

Veličina  $K$  je při sledování linie  $\{hkl\}$  svazku  $P$  dopadajícího pod úhlem  $\psi_0 = 45^\circ$  na daný materiál vždy kladnou konstantou. Předpokládáme-li navíc neměnnou vzdálenost  $D$  je velikost povrchové složky napětí  $\sigma_\varphi$  úměrná excentricitě  $\Delta^{hkl}$  a  $\text{sgn}(\sigma_\varphi) = \text{sgn}(\Delta^{hkl})$ [44].

### 2.3.6 Neutronová difrakce - měření v urychlovači částic

Měření je založeno na proudu neutronů  $0.1\text{Å} - 30\text{Å}$  dopadající na vzorek a procházející skrz něj. Neutrony jsou rozptýlovány na atomových jádrech. Neutron má hmotnost, spin  $1/2$  a magnetický moment. Energie částic určuje hloubku prozáření, která může, dle zkoumaného materiálu dosahovat až několik centimetrů [45]. Prozářením materiálu neutronovým svazkem lze studovat magnetické struktury, nebo přesně měřit meziatomové vzdálenosti. Právě měření meziatomových vzdáleností je využíváno při určování zbytkových napětí v materiálu. Tato metoda navíc umožňuje lepší viditelnost lehkých atomů oproti rentgenové difrakční tenzometrii.

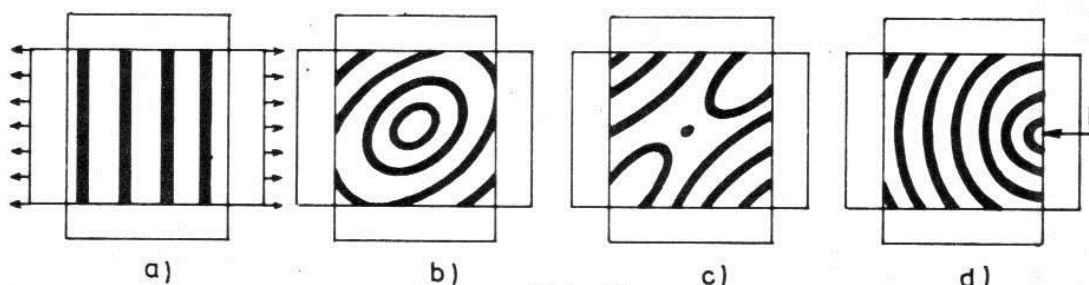
Dále je umožněno snímat ve vysokém prostorovém rozlišení gradienty zbytkových napětí. Velkou výhodou je že tato nedestruktivní metoda může snímat, jak napětí v jednotlivých zrnech, tak vydat ucelený obraz o průměrném napětí specifické pozorované fáze[45].

### 2.3.7 Optické metody

V případě optických metod se jedná o nedestruktivní metody. Tyto metody jsou relativně jednoduše aplikovatelné, ale velmi často pouze metody komparační, kde není možné odečíst přímo hodnotu zbytkového napětí, ale pouze určit gradienty napětí a jejich smysl.

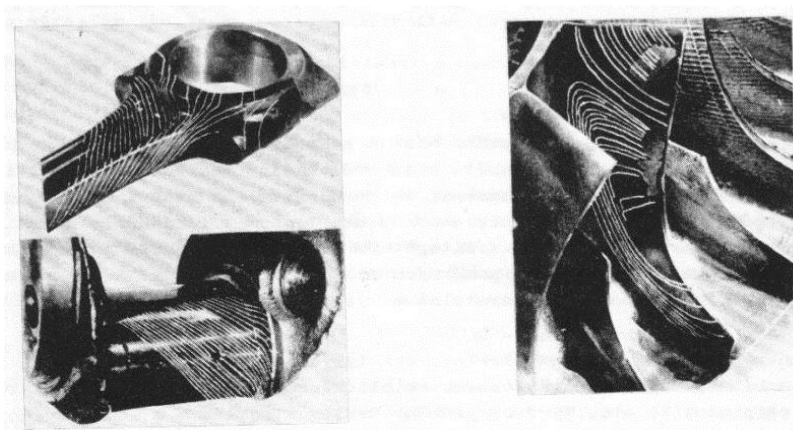
První metodou je fotoelasticimetrie, kdy je vytvořen průhledný model a využitím polarizovaného světla lze zjistit zbytkové napětí. Využívá fotoelasticimetrického jevu, kdy se některé průhledné materiály při zatížení mění na opticky anizotropní. Tato metoda se používá při zjišťování zbytkového napětí u pastových součástí po vstřikování (kryty mobilních telefonů)[46]. Další metoda je moiré, tato metoda je založena na překrytí referenční a měřicí mřížky, kde se následně na stínítku zobrazí rozdíl mezi jednotlivými mřížkami (Obrázek 18) [22].





Obrázek 18: Příklady jednotlivých moiré pruhů, a) rovnoměrný jednoosý tah, b) lokální maximum, c) lokální minimum, d) zatížení osamělou silou[22].

Dalším zástupcem optických metod je aplikace křehkých laků. Tato metoda je založena na prakticky nulové tažnosti některých pryskyřic. Tento lak pak praská při určité hodnotě přetvoření, a jedná se o metodu vhodnou pro určení nebezpečných míst a směrů hlavních napětí. Na obrázku (Obrázek 19) je patrné praskání naneseného křehkého laku při určitém druhu namáhání součásti. K podobnému popraskání laku dojde při relaxaci napětí [22].



Obrázek 19: Ojnice, klikový hřídel a oběžné kolo kompresoru s naneseným a následně popraskaným křehkým lakem [22].

### 2.3.8 Ultrazvukové metody

Ultrazvukové metody se předně využívají v oblasti nedestruktivní defektoskopie. Lze je ale též využít např. pro měření tloušťek materiálu, vzdáleností nebo zbytkových napětí a elastických konstant materiálu. V případě zbytkových napětí vycházejí ze vztahu mezi napětím a rychlostí ultrazvukových vln, metody umožňují zjistit zbytkové napětí I, II, III druhu [47].

### 2.3.9 Akustické metody

Princip metody je sledování nevratných změn ve struktuře zkoumaného tělesa, která se šíří materiálem v podobě tzv. napět'ových vln. K jejich vybuzení se musí dodat tělesu určitá energie (napjatost tělesa). Energie se uvolňuje skokově např. při tvorbě mikrotrhliny. Následně jsou tyto změny detekovány v podobě akustických vln. Iniciátory akustické emise jsou tedy mikrodefekty, fázové přeměny materiálu, plastická deformace spolu s vznikem skluzových pásů a u kompozitů přetrhávání vyztužujících vláken, odtrhávání od matrice apod.[47].



### 2.3.10 Magnetické metody

Tyto metody vycházejí ze vztahu mezi napětím a magnetickými charakteristikami, hodnotí se např. amplituda Barkhausenova šumu a umožňuje zjistit zbytkové napětí I, II, III druhu [34]. Tento způsob měření je založen na principu přibližujícího se a oddalujícího se magnetu. Po přiblížení magnetu k jádru, je v reproduktoru slyšitelné šumění nebo praskání. Tento šum souvisí s procesem magnetizace feromagnetických materiálů. Intenzita šumu závisí na magnetické tvrdosti ocelového jádra. Feromagnetické materiály lze znázornit jako materiály skládající se z malých magnetických oblastí tvaru tyčových magnetů. Tyto oblasti se nazývají domény. Každá doména se magnetuje podél svého krystalograficky vyznačeného směru. Domény jsou odděleny hranicemi, které se nazývají doménové stěny. Vnější magnetické pole pak způsobuje pohyb doménových stěn, k tomu je za potřebí, aby se na jedné straně doména zvětšila a na druhé smrštila. Tím se změní celková magnetizace vzorku. Pokud je cívka z vodivého drátu umístěna v blízkosti vzorku ve chvíli, kdy se doménová stěna pohybuje, indikuje se v cívce magnetický puls. Posloupnost těchto pulsů lze sledovat a následně určit zbytkové napětí v povrchu materiálu. Útlum signálu určuje použitelnou hloubku, ze které lze získat data. Při běžné aplikaci se tato hloubka pohybuje od 0,1 mm do 1,5 mm [47].

## 2.4 Metody teoretického určení zbytkových napětí

K určení zbytkové napjatosti výpočtem se používá zejména metoda konečných prvků. Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda sloužící k simulaci a výpočtu průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na základě zadaných okrajových podmínek modelu. Její princip spočívá v rozdělení kontinua do předem určeného množství prvků a zjišťované parametry jsou určovány vždy v uzlových bodech vytvořené sítě [48]. MKP je užívána nejčastěji pro stanovení kritického místa konstrukce nebo součásti. Principy MKP jsou známy již dlouhou dobu, ale k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem výpočetní techniky [50]. Metoda konečných prvků může být použita k odhadu distribuce napětí a deformace, ale také pro identifikaci fyzických parametrů, které se vyskytují v průběhu výrobních procesů jako je například Laser shock peening [48][50][51].

V oblasti materiálové vědy v 80. letech došlo k vývoji řady elasto-plastických konstitučních rovnic popisujících mechanické chování materiálu vyvinuté různými výzkumnými týmy po celém světě. I když většina těchto konstitučních rovnic popisuje chování napětí, velmi dobře popisují i zatížení cyklickým napětím, zatížení při tečení a smykové a torzní zatížení. Od 90. let je mnoho MKP kódů, které mají robustní algoritmy, vyvinuté různými výzkumnými institucemi nebo komerčními organizacemi. Abaqus, ANSYS, MARC, NASTRAN, COMSOL atd. jsou společnosti zabývající se softwarovými nástroji MKP. Některé freewary MKP jsou však vyvinuty veřejnými výzkumnými středisky nebo soukromými společnostmi. Samozřejmě jsou zpravidla bezplatné pro akademické účely: Code\_Aster vyvinutý firmou Electricité de France (EDF, hlavní francouzský ústav pro energetiku a provozovatel elektráren), CAST3M vyvinutý Komisí (CEA, Francouzský institut pro atomový a jaderný výzkum a vývoj),



Zebulon vyvinutý francouzskou univerzitou MinesParisTech, atd. Vědecká komunita má tedy nyní přístup k silným číselným nástrojům, které charakterizují mechanismy řídicí nevratnou deformaci spojenou s některými druhy koroze, ozařováním, nebo například multifyzikálními jevy jako LSP. Ale také konstruktéři mohou stejné nástroje využít k provádění analýzy napětí, cyklické únavy a předvídání životnosti průmyslové části a optimalizaci konstrukce podle technických specifikací[48][49][51].

V případě LSP jsou laserové impulzy tak rychlé, že některá experimentální měření a pozorování je velmi obtížné provádět. Příkladem jsou hustota energie v plazmatu, časová diskretizace plazmových a šokových vln, elastické a viskózní energie procházející přes zpracovaný vzorek. Ale také rychlost a špičková hodnota napětí rázových vln, která je důležitá pro popsání celého procesu. V minulých letech byla provedena velká spousta experimentů na určení energie absorbované součásti, ovšem díky krátkým časům byla řada z nich použita pouze jako komparační měření. Díky MKP je možné část těchto fyzikálních jevů hodnotit jednodušeji než experimentálním měřením a následně odhadnout váhu každého fyzikálního jevu a jeho vlivu na zbytková napětí. Abychom však získali věrohodné číselné výsledky, je třeba výpočty porovnávat s experimentálními výsledky měření zbytkového napětí, ale také s vývojem mikrostruktury[51].

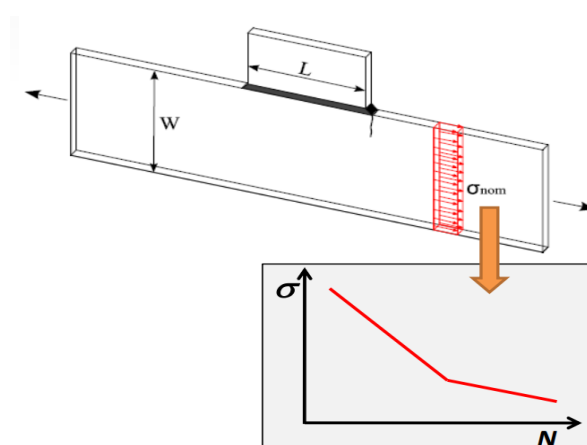
V případě cyklického namáhání a zbytkových napětí je využívána variabilita výpočtu a jeho možnost popisu děje dle známých vlastností materiálu a procesu zatěžování. Příkladem výpočtu zbytkového napětí za pomoci MKP jsou svarové spoje. Právě svarové spoje je výhodné ovlivňovat metodou LSP z mnoha důvodů [53]. Svary mají často nevýhody nehomogenního materiálu, díky kterým obsahují dutiny, neprůvary, přeložky nebo mikrotrhliny. Díky tepelnému procesu výroby v oblasti svaru mohou dosahovat zbytková napětí až meze kluzu a následně dochází k jejich prudkému poklesu v tepelně ovlivněné oblasti. Navíc geometrie svaru působí často jako samostatný vrub, tento vliv se musí zohlednit při testování vzorků a jeho poměřování s reálnou svařovanou konstrukcí. MKP modelování pro svarové spoje lze provádět s různým detailem výpočtu. Predikce únavového poškození lze provádět dle standardů ČSN 05 0120 (Výpočet svarových spojů strojních konstrukcí), nebo dle ČSN 73 1401 (Navrhování ocelových konstrukcí), dále pak dle ČSN EN 1993-1 (Navrhování ocelových konstrukcí) a IIW (International Institute of Welding) a další. Standardy jsou poté uplatněny pro speciální metodiky posuzování. Jedná se například o metodiku "Volvo", metodiku Rupp, Störzel and Grubisic a metodiku Radaj, Seeger, Olivier[50][51].

Všeobecně MKP modelování svařovaných konstrukcí lze rozdělit na několik druhů. Jedná se o nosníkové modely, které jsou vhodné pouze pro výpočty nominálních napětí (silových účinků). Nominální přístupy se používají například pro příhradové konstrukce. Druhou skupinou jsou skořepinové modely, které jsou vhodné pro výpočet hot-spot napětí. U modelování svarů lze popisovat pouze konec svaru, modelovat celý svar nebo provádět modelování svaru pomocí tuhých vazeb, či využít modelování svaru zvýšením tuhosti příslušných skořepinových elementů. Poslední rozšířenou skupinou přístupů pro výpočet zbytkové napjatosti ve svarech jsou objemové metody [48]. Tyto metody jsou vhodné pro výpočty lokálních napětí, kde je využito vrubových napětí a lokálních elastických napětí. Méně přesné modely s hrubou výpočetní sítí je možné využít pro

výpočet hot-spot napětí, oproti tomu modely s jemnou výpočetní sítí je možné použít pro výpočet vrubových napětí v patě svaru a jeho okolí. Díky tomu je možné hodnotit kumulaci únavového poškození v rámci standardních únavových postprocesorů (ANSYS Fatigue module, nCode, PragTic, apod.) Výpočet metodou FIN-K vyžaduje speciální metody a postupy[48][51].

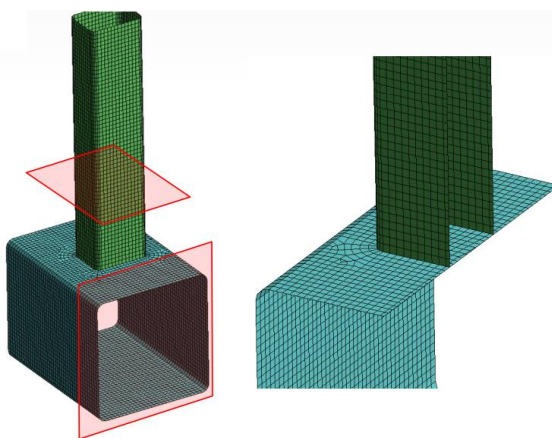
#### 2.4.1 Predikce únavové životnosti na základě nominálních napětí

Výpočet životnosti lze provést na základě analytických vztahů nebo pomocí MKP. Odolnost součásti proti cyklickému namáhání popisují křivky závislosti napětí na počtu cyklů (S-N křivky). Tyto křivky pro svařované konstrukce zahrnují vlivu koncentrace napětí od makrogeometrie konstrukčního uzlu. Důležitá je i koncentrace napětí od tvaru svaru, směr působení nominálních napětí. [48][51].



Obrázek 20 Predikce únavové životnosti na základě nominální napětí[51]

Predikce únavové životnosti probíhá podle S-N křivek pro jednotlivé třídy konstrukce FAT. Pro různá napětí při cyklickém zatěžování může být řešena kumulace únavového poškození pomocí Palmgen-Minerova sumačního pravidla [51].

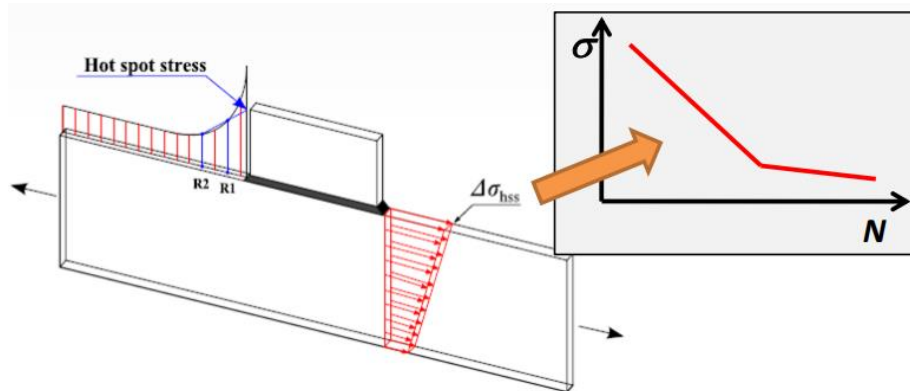


Obrázek 21 Stanovení nominálních napětí MKP modely neobsahují svarové detaily (objemové, skořepinové a nosníkové modely) [51]



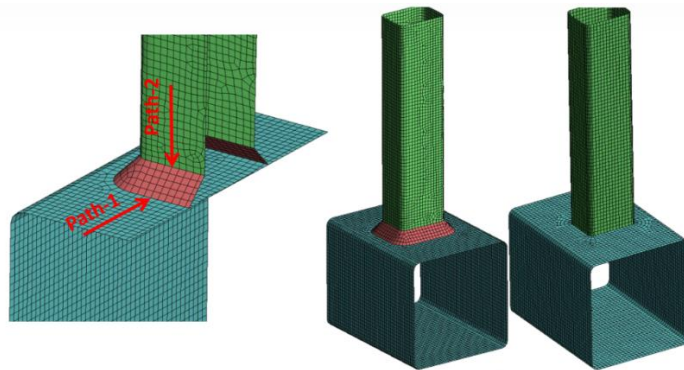
### 2.4.2 Predikce únavové životnosti na základě (tvarových) hot-spot napětí

U predikce únavové životnosti na základě tvarových napětí se předpokládá, že únavová trhлина bude iniciována právě na konci svaru. Přístup dle “Niemiho” umožňuje zahrnout geometrii svaru i jeho tuhost. Lze uvažovat s provařením paty svaru a tloušťka svarových elementů by měla odpovídat tloušťce svaru. Přístup dle “Fayarda” uvažuje s neprovařením kořenu svaru a hot-spot napětí je možné odečítat přímo v těžišti přilehlých elementů. Přístup dle Niemi-Erikssona uvažuje, že tuhost styčnicku má větší význam než geometrický tvar svaru. U přeplátování je kolmé spojení realizováno tuhou vazbou [51].



Obrázek 22 Predikce únavové životnosti na základě hot-spot napětí[51]

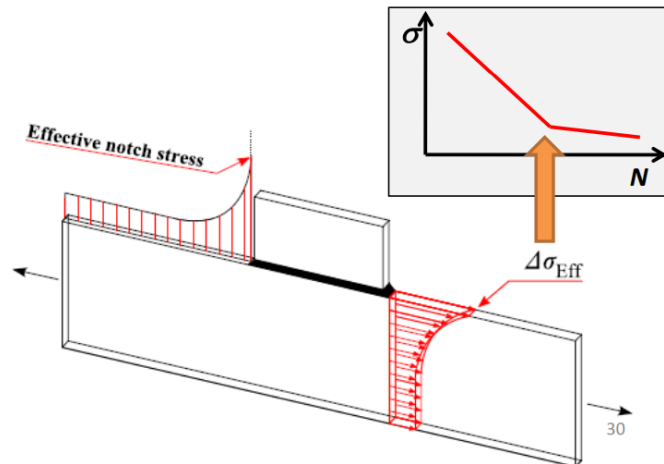
Je předpokládán výskyt iniciace trhliny právě na konci svaru.



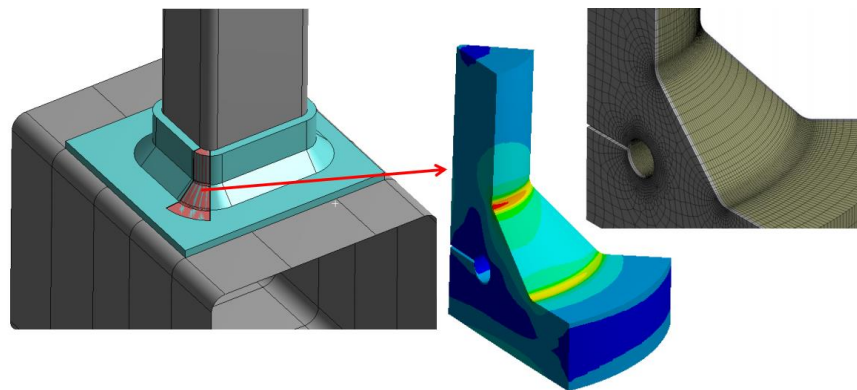
Obrázek 23 MKP modely (ne)obsahují svarové detaily (objemové, skořepinové modely)[51]

### 2.4.3 Predikce únavové životnosti na základě vrubových elastických napětí

Při predikci únavového poškození se předpokládá, že únavová trhлина je iniciována v patě nebo v kořenu svaru. Do výpočtu lze zahrnout další významné geometrické úchyly a imperfekce pomocí MKP modelování [51].



Obrázek 24 Predikce únavové životnosti na základě vrubových elastických napětí v kořeni/patě svaru[51]



Obrázek 25 MKP modelování – submodeling (požadavek jemné MKP sítě)[51]

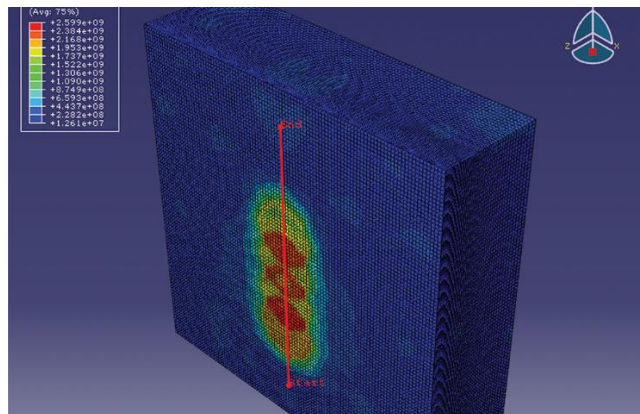
#### 2.4.4 Využití metod teoretického určení zbytkových napětí pro LSP ovlivnění

Teoretické metody určení zbytkových napětí se běžně používají pro metodu LSP. Největší výhodou je možnost optimalizace procesu na základě teoretického výpočtu. Pokročilé zkušenosti s modelováním zbytkových napětí v materiálu po ovlivnění technologií LSP má skupina UPM (Universidad Politécnica de Madrid) Laser center. Dále pak skupina prof. Fabro v Paříži a v neposlední řadě Department of Mechanical and Materials Engineering, Wright State University, Dayton. Velkým přínosem je spolupráce Akademie věd se zmíněnými institucemi na validaci procesu LSP a možnostech predikce dosažených vlastností.

Metoda MKP se v nynější době jeví jako nejslibnější možnost jak přesně určovat zbytková napětí, obzvláště pak před ovlivněním složitých nebo drahých dílců. Výpočet také může pomoci při návrhu parametrů technologie i při tvorbě samotné strategie ovlivňování. Jedinou nevýhodou metody MKP je její složitost. Pro modelování je potřeba velkého výpočetního výkonu a obzvláště v případě LSP je nutné postihnout i další fyzikální jevy technologie a tím jsou zvýšené i nároky na výpočtáře[51][53].

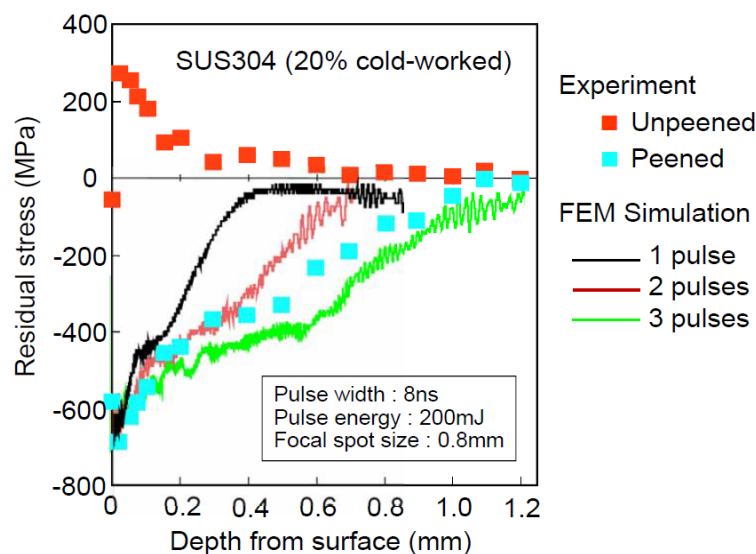
Po světě je hned několik skupin zabývajících se modelováním zbytkových napětí po metodě LSP. Nejznámější skupinou je The Dayton Area Defense Contractors

Association (DaytonDefense), která se zabývá použitím LSP v letectví a pro vojenské účely. V Austrálii se simulacemi LSP zabývají na Defence Science and Technology Group která je část Australského Department of Defence, kde také byla vydána shrnující kniha Laser shock peening Performance and process simulation. Simulacemi se také zabývá firma Toshiba, která používá lasery pro proces LSP v průmyslu téměř 20 let. V Evropě se simulacím do nedávna věnovaly pouze dvě skupiny, na technické univerzitě v Madridu a na technické univerzitě v Parmě. Nově se zavádějí simulace LSP procesu i v České republice v HiLASE centru ve spolupráci s ČVUT v Praze. Po spuštění technologie v roce 2017 byla viditelná potřeba simulovat proces pro možnost návrhu parametrů ovlivnění. V nynější době je se spolupracuje na simulacích se zmíněnými světovými institucemi [53][87][306].



Obrázek 26 Příklad modelování zbytkového napětí metodou MKP[52]

Pro predikci zbytkových napětí vyvolaných metodou LSP se již používá metoda MKP. Použití je relativně přesné a dává velmi hodnotné informace o stavu povrchové vrstvy. Zbytkové napětí lze metodou MKP predikovat s malou odchylkou proti experimentálnímu měření jak je vidět na (Obrázek 27).



Obrázek 27 Průběh zbytkového napětí oceli AISI 304 bez ovlivnění, s ovlivněním metodou LSP a porovnání se simulací MKP [237]





## 3 Metody dokončování pro zlepšení vybraných vlastností povrchu

Technologie dokončování se vždy provádí z důvodů změny vlastností povrchu součásti. Při některých procesech dokončování je dosahováno konečné přesnosti rozměrů, tvarů, polohy a mikrogeometrie povrchu, jiné jsou zaměřeny na změnu mechanických a fyzikálních vlastností povrchové vrstvy a celkovou kvalitu nebo vzhled povrchu. Zařazení dokončovací operace do procesu výroby ve většině případů výhodné a to z hlediska zlepšení provozních vlastností nebo životnosti natolik, že přidaná hodnota je větší než cena dokončovací technologie. Dokončování lze rozdělit na technologie s úběrem a bez úběru materiálu [17].

### 3.1 Dokončování s úběrem materiálu

Předpokladem pro obrábění s úběrem materiálu je ponechání dostatečného přídavku na dokončení. Velikost přídavku je odvozena od dokončovací technologie a musí zaručit odebrání nežádoucích složek integrity povrchu (zbytková napětí, trhlinky, vady, nepřesnost nebo zpevněnou vrstvu). Produktivita dokončování je vztažena na plochu o dané kvalitě za jednotku času [17].

#### 3.1.1 Jemné obrábění

Jemné obrábění se liší od běžného obrábění hloubkou řezu, posuvem a řeznou rychlostí. Zatím co posuv hloubka řezu jsou výrazně nižší, řezná rychlost je naopak zvýšena. Při jemném obrábění je dosahováno velmi dobré drsnosti a přesnosti výroby Ra 0,1 - 0,8 a IT 4 – 6. Většinou se jedná o jemné soustružení, jemné frézování (slnutými karbidy, cermety, PKNB, PKD – velké řezné rychlosti). Jemné obrábění má ve většině případů pozitivní vliv na vznik tlakových zbytkových napětí. Lze dosáhnout výhodných vlastností pro cyklicky namáhané součásti [17].

#### 3.1.2 Broušení

Při broušení dochází k úběru materiálu nástrojem s nedefinovanou geometrií ostří, kde nástroj vykonává hlavní rotační pohyb [55]. Řezná rychlost u broušení se pohybuje v rozmezí 30 až 100 m.s<sup>-1</sup> a to při velmi malých průřezech třísky ( $10^{-3}$  až  $10^{-5}$  mm<sup>2</sup>) [57]. Hlavní odlišností od klasických metod obrábění je různorodý tvar broušících zrn a jejich nepravidelné rozmístění na ploše broušícího nástroje. Díky malé soudržnosti broušících zrn ve vazbě kotouče dochází k jeho samoostření. V důsledku velkých plastických deformací a tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo rovnou shoří [55]. Broušící zrna mají velmi často negativní čela  $\gamma_n$  úhel. Řezná rychlost má vliv na kvalitu procesu [56].

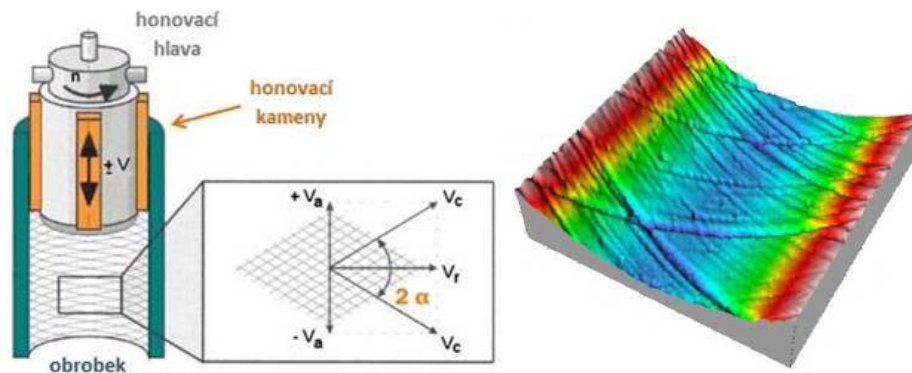
Broušením lze obrábět rovinné plochy, rotační (vnitřní, vnější), závit, ozubená kola i tvarové plochy. Přesnost technologie se pohybuje v rozmezí pro hrubovací broušení IT 9 – IT 11 a jakost povrchu Ra 0,8 - 3,2  $\mu$ m. A pro jemné broušení IT 3 – IT 5 Ra 0,05 – 0,4  $\mu$ m [48].

Z pohledu integrity povrchu je technologie broušení specifickou operací, při které vzniká za mechanického zatížení povrchu nástrojem i značné množství tepla. Kombinace

mechanického zatížení a vneseného tepla ovlivňuje samotnou strukturu povrchové vrstvy, její topografii, drsnost povrchu a jeho profil, geometrickou přesnost, vznik tepelných změn, iniciace trhlin, vznik a průběh zbytkových napětí. Míra ovlivnění povrchu závisí především na druhu brusného kotouče, řezné rychlosti, přísuvu a procesní kapalině [25].

### 3.1.3 Honování

Technologie honování je založena na podstatě broušení malou rychlostí honovacími kameny. Tyto kameny jsou upnuty v honovací hlavě a přitlačovány definovanou silou na plochu obrobku. Honováním lze dokončovat vnitřní i vnější plochy obrobku. Dříve se před honování musí připravit jemným vyvrtáním nebo broušením. Honovací hlavy mají většinou 3 - 12 brousících kamenů. Při honování je vykonáván otáčivý a přímočarý vratný pohyb honovací hlavou (Obrázek 28). Rozpínací kužely slouží k nastavení rozměru a velikosti přitlačné síly. Přitlačný tlak na kameny se pohybuje v rozmezí 0,2 – 1,5 MPa. Přesnost tvaru dosažitelná honováním je obvykle od 2 do 5  $\mu\text{m}$  [55]. Vlivem složeného pohybu vznikají na povrchu charakteristické křížové stopy, které svírají úhel  $2\alpha$  (větší úhel = nižší drsnost). Hodnota úhlu  $\alpha$  je závislá na otáčivém a přímočarém pohybu, jako je například vidět ve válcích motoru [5][56][48].



Obrázek 28 Princip honování (vlevo) a ukázka plochy po honování (vpravo) [58]

Rozlišujeme dva druhy honování podle použité rychlosti pohybů. Honování s dlouhým zdvihem pro zlepšení válcovitosti, nebo s krátkým zdvihem pro zlepšení válcovitosti i kruhovitosti [55]. Honování je proces náchylný na vznik tepla, proto je zde zapotřebí intenzivní chlazení. Uplatnění si honování nachází především při dokončování vnitřních válcových ploch, válců spalovacích motorů, vedení ventilů, šoupátek a dalších hydraulických prvků. Speciální druhy honování jsou honování elektrolytické, vibrační a laserovým paprskem [48][58].

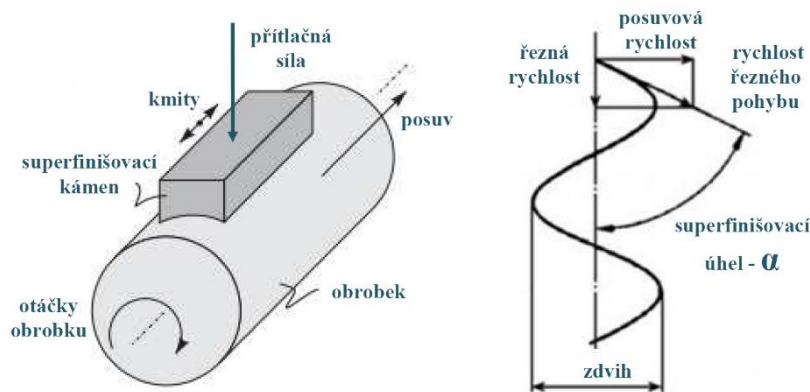
### 3.1.4 Lapování

Lapování je dokončovací metoda založena na pohybu volně rozptýleného brusiva v kapalině nebo brusné pastě. K lapování se používá lapovací nástroj, který unáší i brusná zrna. Tento nástroj má tvar negativu dokončované plochy a koná nepravidelný pohyb vůči dokončované ploše. Zrna se nepohybují po stejných drahách a tím zanikají stopy po předchozích průchodech. Lapování je technologie vhodná pro dosažení vysoké kvality povrchu, extrémně vysokých přesností tvaru, úzkých rozměrových tolerancí

a minimálních vůlí. Lapování se používá zejména jako dokončovací operace při výrobě kluzných a valivých ložisek, měřidel a závitů[5][55]. Lapováním lze dosáhnout přesnosti IT 1 – IT 3 a drsnosti povrchu  $R_a$  0,02 – 0,15  $\mu\text{m}$ [59].

### 3.1.5 Superfinašování

Superfinašování je vysoce produktivní metoda dokončování jak rotačních i rovinných, vnějších i vnitřních ploch. Vrcholky nerovností povrchu jsou odřezávány jemnými zrnny superfinašovacími kameny a zbytek povrchu je vtlačován sám do sebe (Obrázek 29). Při superfinašování jsou používány relativně malé řezné rychlosti, kde kmitavým pohybem superfinašovací hlavy se postupně obrábí dokončovaná plocha [48].



Obrázek 29 Schéma superfinašování [60].

Řezný pohyb vzniká složeným pohybem rotace obrobku o rychlosti (10 až 80  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ) a kmitavého pohybu nástroje o frekvenci 10 až 50 Hz. Amplituda kmitání obvykle je 0,1 až 10 mm. Rychlost kmitavého pohybu se volí 2 až 15  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Kameny jsou hydraulicky nebo mechanicky přitlačovány tlakem 0,1 až 0,4 MPa na celkovou plochu. Zvětšováním nosného podílu profilu poklesne tlak natolik tak, že kameny začnou „plavat“ na vrstvě procesní kapaliny [55]. Největšího úběru je dosaženo, když je superfinašovací úhel  $\alpha = 40^\circ$  až  $60^\circ$ . Při největším úběru je obrobený povrch matný. Naopak při úhlech  $\alpha < 40^\circ$  je snížena řezivost kamene a povrch je lesklý [55]. Superfinašují se hřídele, klikové hřídele, pístní čepy a kluzná uložení [59]. Před superfinašováním je nejčastěji zařazeno broušení. Přídavek se volí v rozmezí od 2 – 12  $\mu\text{m}$  dle požadované drsnosti. Superfinašováním je dosažena přesnost IT 2 – IT 4 a drsnost povrchu  $R_a$  0,025 – 0,4  $\mu\text{m}$  [5].

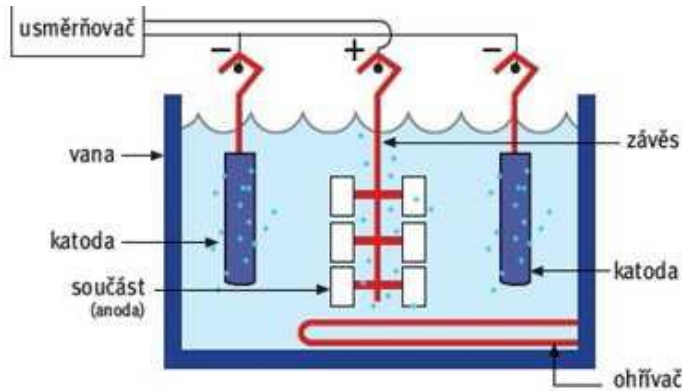
### 3.1.6 Leštění

Princip spočívá v odebrání materiálu, při kterém se odstraňují pouze stopy po předchozích operacích. Zlepšuje se vzhled povrchu, dochází k odstranění nečistot, vrstev oxidů a chemických sloučenin, ale základní rozměry se nemění [60].

Nástroje pro leštění jsou textilní nebo plstěné kotouče a nedílnou součástí procesu je i lešticí pasta obsahující velmi jemné brusivo [60]. Při leštění může docházet k zahřívání povrchu a změně vlastností povrchové vrstvy. Leštění může mít pozitivní vliv na chování součásti při cyklickém namáhání díky odstranění vrubů v povrchu materiálu.

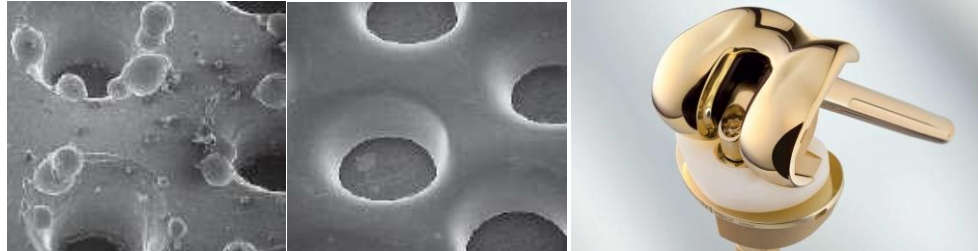
### 3.1.7 Elektrolytické leštění

Princip metody je opak galvanického pokovování, kde dochází k nanášení kovu. U elektrolytického leštění dochází k odebrání kovu z povrchu a ve formě iontů kov přechází do roztoku (Obrázek 30) [61].



Obrázek 30 Schéma elektrolytického leštění [61].

Doba leštění je 2 až 20 minut. Elektrolytické leštění je velmi účinná metoda k odstranění otřepů, zvláště pak na nesnadno přístupných místech jako jsou dutiny, nebo velmi jemné tvary. Součást není vystavena tepelnému účinku. Využití nachází především u součástí z korozivzdorných ocelí obzvláště pak u zdravotních pomůcek a implantátů (Obrázek 31) [61].



Obrázek 31 Povrch před a po el. leštění (vlevo) a příklad použití (vpravo) [61][62].

### 3.1.8 Omílání

Omílání je nejproduktivnější metoda úpravy povrchů velkého množství dílců. Při omílání se obrobek, leštící prostředek a aktivní kapalina dostávají do vzájemného pohybu. Využití je zejména u drobných dílců k odstranění ostrých hran či otřepů bez nároku na přesnost [5].

Velmi často se používá rotační omílání, které je využíváno především pro menší díly a velké série. K omílání jsou použity omílací bubny, jejichž obvodová rychlost se pohybuje v rozmezí 1 až 1,5 m.s<sup>-1</sup>. Druhou možností je vibrační omílání, při kterém jsou výrobky ve vaně umožňující vibrační pohyb. Dalším druhem je odstředivé omílání, které je ze všech možností nejproduktivnější. Jedná se o planetový pohyb navzájem spojených bubnů a je využíváno pro hrubší omílání menších dílů. V průmyslu se také používá tryskácké omílání, jehož základem je hlava, která vystřeluje částice na dílec a podáváč dopravující částice do hlavy [63].

## 3.2 Dokončování bez úběru materiálu

Metody dokončování bez úběru materiálu ve většině případů vyvolávají plastickou deformaci povrchu. Základním předpokladem je přetvoření povrchu za studena, díky tomu dochází ke zpevnění povrchu a tvorbě tlakových zbytkových napětí, velmi často se jedná o eliminaci případných nepříznivých vlivů vnesených při předchozích operacích. Mezi zlepšované parametry patří nejčastěji únavová pevnost, tvrdost, odolnost korozi a otěru. Dále může docházet i ke změně drsnosti vlivem deformace vrcholků nerovností [17].

### 3.2.1 Válečkování

Působením odvalujícího se tělíska na povrch dochází k plastické deformaci. Plastickou deformací dochází k vnášení tlakových zbytkových napětí a ke snižování vrcholků mikronerovností. Dochází ke změnám struktury v povrchu materiálu a ke zpevnění, což má za následek pokles tažnosti a vrubové houževnatosti. Po zpracování naopak vzrůstá tvrdost, pevnost, mez kluzu, korozní odolnost o odolnost cyklickému namáhání. Přesnost dokončování se je dosažena IT 4 – IT 7 a hodnota drsnosti Ra je 0,005 – 0,4  $\mu\text{m}$  [5][68]. Válečkování může být statické (pouze odvalem) a platí závislost, čím menší průměr válečku, tím vyšší zpevnění a zároveň Ra. Používají se kuličky, válečky nebo zaoblené kotouče. Nebo může být válečkování dynamické, při kterém nástroj není v neustálém kontaktu s povrchem součásti, ale je dynamicky přitlačován do materiálu a uvolňován. Tento druh válečkování dosahujeme velké hloubky zpevnění (Obrázek 32) [69].



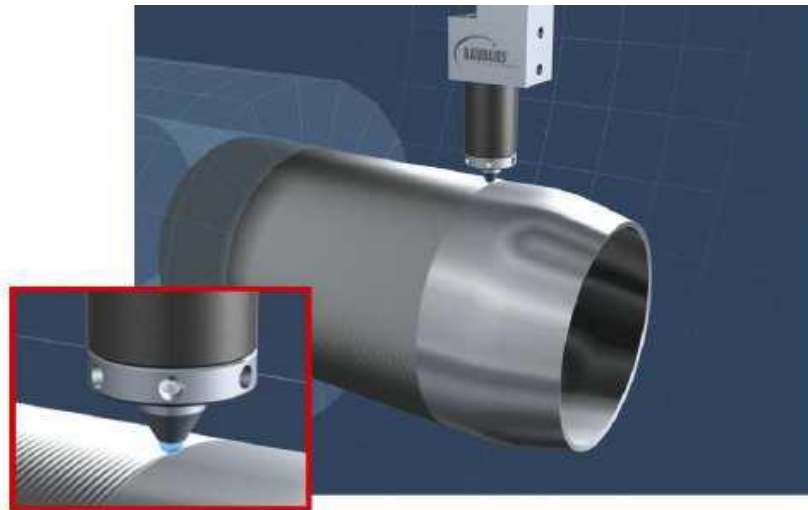
Obrázek 32 Statické vnější válečkování (vlevo) a nástroj pro dynamické vnitřní válečkování (vpravo) [94][95].

### 3.2.2 Vyhlazování povrchu diamantem

U této technologie nedochází k odvalování nástroje, ale statický diamant se přitlačuje na povrch součásti (Obrázek 33). Ve většině případů předchází vyhlazování diamantem soustružení. Na povrchu dílce dochází k plastické deformaci. Špičky vrcholů „zatékají“ do prohlubní a tím dochází ke zlepšení drsnosti, zpevnění povrchu, dále povrchové tvrdosti a meze únavy. U této metody je velmi malá kontaktní plocha a tím je dosaženo plastické deformace při použití nízké přitlačné síly. Diamantové nástroje



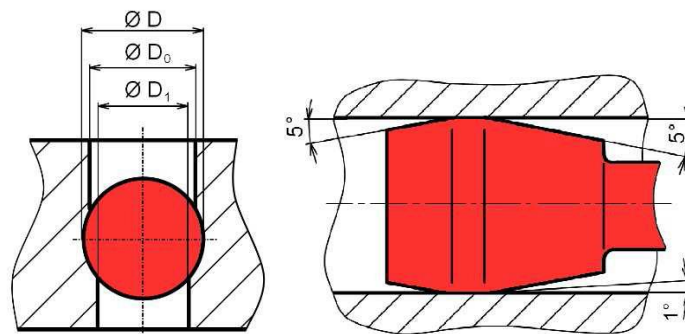
umožňují vyhlazovat ocel s tvrdostí až 65 HRC. Touto metodou lze dosáhnout drsnosti povrchu  $Ra\ 0,1 - 0,4\ \mu\text{m}$  a hloubky zpevnění  $0,1 - 0,5\ \text{mm}$  [5][64].



Obrázek 33 Ukázka vnějšího hlazení diamantem [64].

### 3.2.3 Kalibrování

Touto metodou dokončování dochází k vyvolání plastické deformace přímočarým pohybem tvářecích elementů (Obrázek 34). Elementy jsou vždy větší v případě tváření vnitřních ploch a v případě vnějších ploch menší. Proces probíhá jedním nástrojem nebo více postupně se zvětšujícími elementy. Dochází ke zpřesnění rozměrů IT 4 – 6, dále dochází k vyhlazení povrchu na  $Ra = 0,005 - 0,4\ \mu\text{m}$  a zpevnění povrchu do hloubky  $0,05 - 0,2\ \text{mm}$  [5].



Obrázek 34 Schéma kalibrovacích nástrojů (kulička, trn) [5].

### 3.2.4 Kuličkování

Tváření povrchové vrstvy otryskáváním kulovitými částicemi tryskačního prostředku je známé pod názvem kuličkování nebo brokování (anglicky shot-peening). Metoda spočívá ve vrhání částic vysokou rychlostí na povrch dílce a tím je vyvolána deformace. Částice nemají abrazivní účinek, jako tomu je u tryskání (Obrázek 35) [63][231].



Obrázek 35 Princip metody a ukázka komprese dokončeného materiálu [233].

Úhel dopadu částic je 50 až 80 °. Pracovní tlak média unášejícího částice se volí 0,1 až 2 MPa (rychlost až 60 m.s<sup>-1</sup>) s ohledem na velikost elementů, vzdáleností trysky od součásti a požadovaného účinku [5]. Nejlepších výsledků povrchové drsnosti je dosaženo tryskáním částic větších rozměrů nebo postupným snižováním tlaku média. Technologií je dosahována drsnost Ra = 0,4 – 1,6 μm a hloubka zpevnění se pohybuje 0,05 až 0,5 mm. Při správném provedení je přesnost rozměrů dána předchozí operací [5].

Tato technologie dokončování je vhodná zejména pro tvarově složité dílce, kde nelze použít jiný způsob. Příkladem použití jsou ozubená kola, lopatky turbín, ale také listové pružiny, torzní tyče, klikové hřídele a jiné [5][17]. Kuličkování zajišťuje při minimálních nákladech podstatné zvýšení některých mechanických, ale i korozních vlastností materiálu. Zlepšení může být dosaženo u vrubové houževnatosti, odolnosti proti únavě, opotřebení, mezikrystalové koroze apod. Kuličkování se rovněž používá k tvarování částí nebo celých dílů, k odstraňování pórovitosti apod. [17].

### 3.2.5 Vibrační zpevňování

Vibrační zpevňování také slouží k dokončování tvarově složitějších součástí. Plastické deformace, stejně jako v případě kuličkování, vznikají v důsledku dopadu pohybujících se částic [5]. Vibrace urychlují částice a to buďto mechanicky nebo ultrazvukem. Při mechanickém urychlování speciálním zařízením je částicím udělován kmitavý pohyb ve jedné, dvou nebo třech osách. Dokončování se realizuje dopady částic kolmo na obráběnou plochu. Částice ve formě litinových nebo ocelových kuliček by měly mít co nejvyšší hmotnost pro efektivitu procesu, ale jejich průměr je limitován poloměrem přechodů a detaily zpevňované součásti [5].

Při buzení částic ultrazvukem pevný nástroj vytváří ultrazvukové kmity a opírá se o upravovaný povrch, tím dochází k vyhlazování povrchu. Pevně upnutý obrobek je zasypán ocelovými kuličkami, které přenášejí vibrace ze stěn zařízení. Vibrace dosahují frekvence až 30 kHz [5].

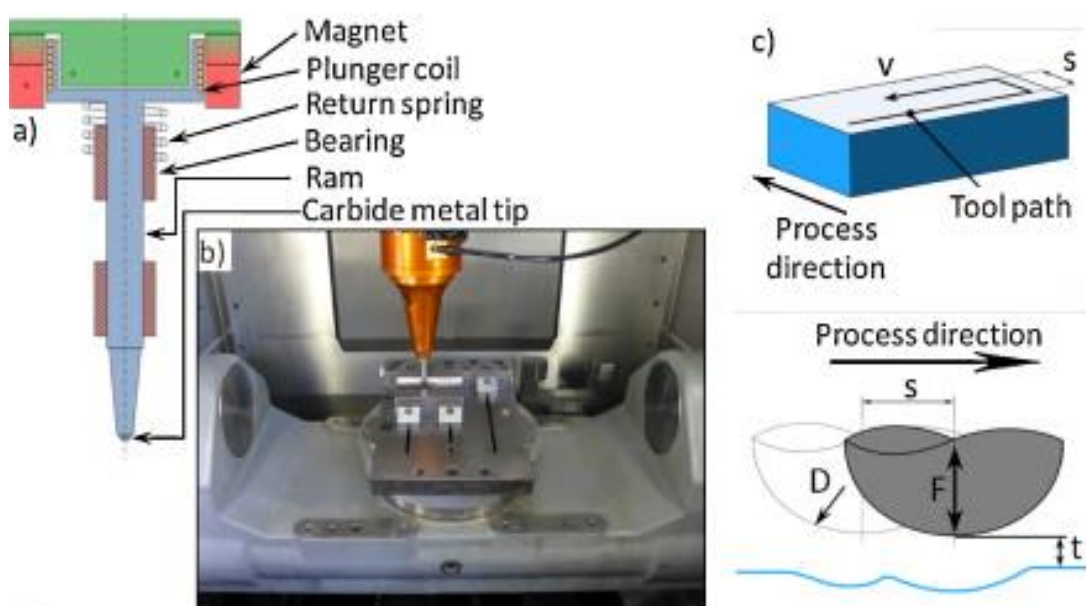
### 3.2.6 Ultrasonic impact treatment

Metoda ultrasonic impact treatment je založena na zpevňování povrchu materiálu za pomoci ultrazvuku. Tohoto efektu je dosaženo pomocí elektro-mechanické metody, kdy jsou vytvořené v materiálu napěťové vlny a tím se plasticky deformuje povrch [65][66][70]. UIP se používá na svarové spoje, aby se snížila tahová zbytková napětí vyvolaná svařováním, čímž se zvyšuje únavová životnost [71][72][73].



### 3.2.7 Machine hammer peening

Metoda zpevňování povrchu Machine hammer peening (nebo také Ultrasonic Impact treatment UIT) je založena na pohybu kalené nebo karbidové kuličky směrem proti materiálu (Obrázek 36). Kulička je připevněna na tělo nástroje, který kmitá v osovém směru frekvencí 50-500 Hz a zdvih je obvykle menší než 1 mm. Při těchto parametrech dosahuje kulička rychlostí nárazu několika metrů za minutu. Tyto nárazy mají za následek lokální zpevnění povrchu, kde povrchové napětí může dosahovat až 1000 MPa do hloubky několika desetin milimetru. Nástroj je obvykle polohován robotickým ramenem nebo CNC řízeným strojem. Využitelnost této technologie nachází například ve zpracování povrchů forem pro vstřikování plastů nebo tažníků a tažnic pro lisování plechů [8].



Obrázek 36 Technologie machine hammer peening (a) Základní konstrukce elektromagnetického pohonu. (b) umístění ve stroji (pohon připojený k 5-osému obráběcímu centru Hermle). (c) důležité procesních parametrů [8].

### 3.2.8 Laser shock processing

Technický termín Laser shock processing popisuje zpracování povrchu za pomoci tlaku vyvolaného laserem. Laser shock processing se dále dá dělit na jednotlivé podskupiny dle oblasti použití. První a největší skupinou je technologie Laser shock peening, která je založena na vnášení zbytkových napětí za účelem zvyšování životnosti součástí. Další skupinou je technologie Laser shock bending jejíž základem je ohýbání materiálu stejně jako je tomu při použití mechanických metod. Podlešní oblastí je Laser shock drawing. Za pomoci laserového tažení je možné vytvořit přesné tvary bez pomoci tažníku. Jednotlivé technologie laser shock processing lze mezi sebou kombinovat a tím lze dosáhnout vytvoření definovaného tvaru součásti s požadovanými povrchovými vlastnostmi [170].

### 3.3 Technologie Laser Shock Peening

Laser Shock Peening (LSP), neboli vytvrzování povrchu materiálu rázovou vlnou vyvolanou laserem, je velmi moderní a progresivní technologií, která umožňuje výrazné zvýšení únavové životnosti cyklicky namáhaných součástí. Laserový paprsek generuje v povrchové vrstvě zpracovávaného materiálu tlaková zbytková napětí, která významně zlepšují únavové vlastnosti materiálu a omezují vznik a rozvoj povrchových trhlin. Díky svým možnostem tato technologie nalézá praktického uplatnění ve velmi náročných aplikacích zejména v leteckém průmyslu a lze předpokládat její rozšíření i na další oblasti [67].

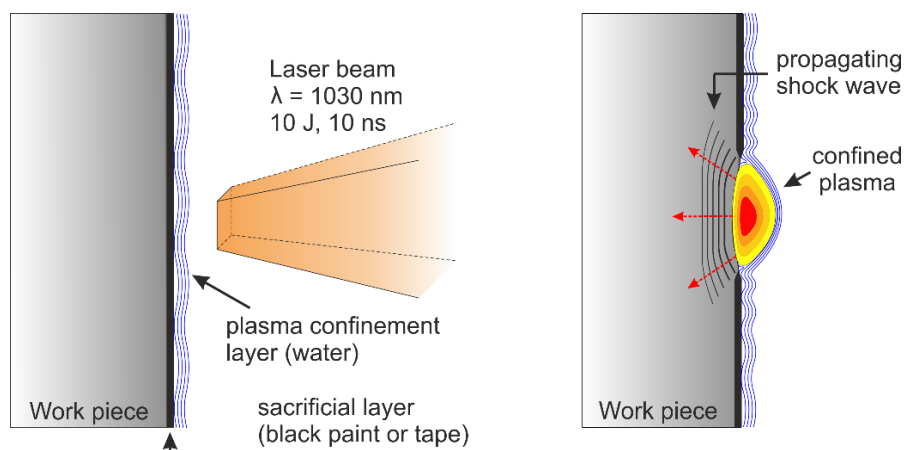
#### 3.3.1 Historie LSP

První experimenty využití pulsního laseru na povrch materiálu byly provedeny na Battelle institutu (Columbus, OH, USA) roku 1968 [15][16]. Do roku 1981 pak byly provedeny výzkumné práce na hliníkových slitinách a ocelích pro letecké aplikace [16]. Následně se byly prováděny pokusy v laboratořích Evropských institutů CLFA (Cooperation Laser Franco-Allemande-Arcueil Cedex), LALP (Laboratoire d'Application des Lasers de Puissance-Arcueil Cedex) a LULI (Laboratoire d'Utilisation des Lasers Intenses-Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex), z důvodů dalšího výzkumu využitelnosti procesu LSP v průmyslu [15].

Tento proces se stal známým v průmyslu prostřednictvím dvou klíčových patentů. První patent byl registrován se spojených státech společností Industrial Materials Limited v roce 1973. Druhý patent byl registrován Americkou společností armádního výzkumu v roce 1983. Následně v letech 1996 až 2001 bylo připsáno dalších 23 amerických patentů týkajících se LSP společnosti General Electric [15][16][7][74][75].

#### 3.3.2 Podstata technologie LSP

LSP je mechanický proces (tváření za studena), při kterém pulsy laseru o vysoké energii naráží na povrch a tím jsou generovány rázové vlny [15][16][76][77]. Tyto vlny plasticky deformují povrch a tlaková napětí jsou přenášena do vrstev pod povrchem [78][79][80][81]. Toto dynamické napětí je nejvyšší na povrchu zpracovávané součásti a snižuje se směrem do materiálu (Obrázek 37) [82].



Obrázek 37 Princip technologie LSP



Pro generování rázové vlny laserem musí být splněno několik požadavků. Tím nejdůležitějším je, že cílový povrch je pokryt absorpčním povlakem, který je určen ke zničení (k ablaci dochází pouze z absorpční vrstvy). Tato vrstva se působením laseru odpařuje a vytváří plazma na povrchu a tím i tlak po dobu působení laseru a krátce po něm. Absorpční vrstva zabraňuje tavení a laserové ablaci základního materiálu [13][15], díky tomu dochází k zachování vysoké kvality povrchu. Technologie lze použít i bez absorpční vrstvy, ale nedochází k efektivní přeměně energie laseru na rázovou vlnu procházející materiálem [15] a povrch materiálu nese známky poškození plazmatem. Existují aplikace, kde není použití absorpční vrstvy nutné, ale jedná se spíše o výjimky [41]. Tato vrstva může být z hliníku [77][84][85][86], mědi [87], olova [14], vinylové pásky [88][89][93], zinku [86] nebo nanесena jako černá barva [15][90][78]. Skupina prof. Honga [88] experimentálně prokázala, že vrstva černé barvy má nejlepší schopnost absorpce laserového záření. Téměř 100 % energie laseru absorbuje černá barva ve srovnání s 80% absorpcí hliníku. Pokud je součást zpracovávána za použití pásky nebo barvy, téměř 100 % intenzity laseru je tedy využito na generování plazmatu.

Další nutnou podmínkou je použití transparentní překrývající (těsnicí) vrstvy, aby se zabránilo expanzi plazmatu pryč z povrchu materiálu. Udržení plazmatu na povrchu výrazně zvyšuje intenzitu rázové vlny. Tyta překrývající vrstva, také známá jako bonding médium, může být voda [90][91][77][78][89], křemen [14][10][88][98] nebo sklo [88][92][99]. Další bonding média mohou být borosilikátová skla [100], olovnatá skla [88], plexiskla nebo silikonové pryže [88]. Volba bonding média závisí na aplikaci, podkladovém materiálu, hustotě a akustické rychlosti, kterou udává takzvaný "vliv akustické impedance". Když velikost tlaku na povrchu materiálu překročí pevnost (dynamickou pevnost na mezi kluzu) kovu, dojde k plastické deformaci [15][7][105][77][101].

### 3.3.3 Procesní parametry

Efektivita Laser Shock peeningu je závislá na materiálu zpracovávané součásti, parametrech laseru i vlastnostech absorpční a těsnicí vrstvy. Typickými požadavky pro použití technologie je Q-spínaný laserový systém na bázi neodymu nebo yterbia (Nd: glass, Nd: YAG, Nd: YVO4 nebo Yb: YAG). Použity mohou být různé vlnové délky laseru, například 1064 nm (infra-červená), 532 nm (zelená) a 355 nm (ultrafialová). Doba trvání tlaku rázové vlny (délka pulsu laseru) se obvykle pohybuje v rozmezí od 10 do 100 ns [15][91] s energií většinou 1-10 J v pulsu a velikost spotu (průměr) laserového svazku dopadajícího na součást je 1-6 mm, [15]. Profil svazku může být kruhový [14][90][89][101][102], eliptický [102][103], obdélníkový [103] více úhelníkový [102][106], ale jako nejlepší se ukázalo použití čtvercového tvaru, který vykazuje lepší rovnoměrnost intenzity a dobrou možnost překrývání jednotlivých pulsů [102]. Pro technologii je nutné použití frekvencí nižších než 1 kHz a intenzita výkonu  $I$  v rozmezí 0,1-106 GW / cm<sup>2</sup> (dle aplikace technologie) [15].

Typické procesní parametry jsou hustota zářivého toku  $I_e$  (intenzita), délka pulsu  $t$ , absorpční vrstva a transparentní překrytí. Výběr parametrů zpracování je výhradně omezena na typ laseru, stav podkladu a cílovou aplikaci

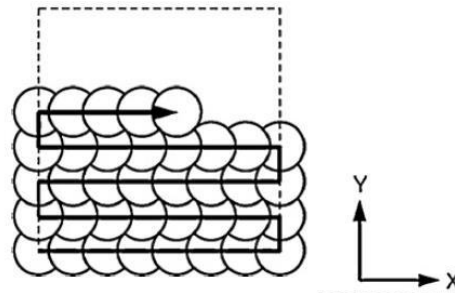


Na základě dosažených poznatků různých výzkumných institucí byla institucí Society of Automotive Engineers (SAE) vytvořena databáze s parametry pro zpracování obvyklých kovů a jejich slitin metodou laser shock peening [115]. V (Tabulka 3) jsou obsaženy příklady typických procesních parametrů a materiálů.

*Tabulka 3 ukazuje některé z procesních parametrů technologie LSP s poznámkami k dosaženým výsledkům [115].*

<b>Material (Zdroj)</b>	<b>Hustota výkonu (GW/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Délka pulzu (ns)</b>	<b>Absorpční povlak</b>	<b>Trans. prostředí</b>	<b>Poznámky</b>
Ti-6Al-4V [77]	5	10	Al Foil	Voda	Únavová životnost se zvýšila o 22,2% a 41,7% pro jeden a dva po sobě jdoucí průchody laseru ve srovnání s neovlivněným vzorkem.
Ti-17 [107]	3, 6, 9	9, 27	Al	Voda	Parametry měly vliv na profil zbytkového napětí. LSP nemělo žádný vliv na drsnost, malý vliv na zpevňování a velký vliv na tvrdost v důsledku tlakových napětí.
AA2195 [84]	5	18	Al	Voda	Tempo růstu únavové trhliny ze svarového spoje bylo redukováno použitím LSP ve srovnání s SP. Rychlost růstu trhliny byla srovnatelná s nesvařeným materiálem.
Al2024 T3 [108]	5	18	Černá barva	Voda	LSP vzorek prokázal odolnost vůči růstu únavových trhlin pro různé geometrie vrubů v porovnání s neovlivněným vzorkem.
316 L SS [110]	2.5	10	Bez ochrany	Voda	Došlo ke zlepšení korozního potenciálu (Ecorr) a korozní proudové hustoty (Icorr) se zvýšením hustoty laserového pulsu. Došlo k 30%-40% zvýšení mikrotvrdosti.
2204 Duplex SS [111]	900, 1600, 2500 (pulsů/cm <sup>2</sup> )	8	Bez ochrany	Voda	Větší ZN bylo pozorováno s vyšší hustotou pulzů. Byl prokázán nárůst lomové houževnatosti.
Alloy 22 [113]	10	25	Al	Voda	Byl pozorován vztah mezi parametry LSP a ZN na plochých vzorcích.
Inconel 600 [114]	10 (J/cm <sup>2</sup> )	12	-	Voda	V důsledku pohybu laseru po povrchu materiálu byla pozorována povrchová mikrotextura. Kvůli laserové ablaci byly pozorovány sférické nanočástice o průměru 60 nm.

Mezi velmi důležité parametry patří i překrytí (overlap) jednotlivých pulzů a strategie jejich kladení (Obrázek 38).



Obrázek 38 Strategie zpracování vzorku kruhovým paprskem s překrytím jednotlivých pulzů [133].

### 3.3.4 Ovlivňovaný materiál a typicky používaná měření

Typicky se studie zkoumající vliv LSP procesu zabývají problematikou vnitřního napětí, mikrostrukturou, změnou mechanických vlastností, únavovými vlastnostmi, korozními vlastnostmi nebo korozi při napětí. Nedávné studie LSP prokázaly, že technologie laserového zpevňování může být použita i pro tváření [115] nebo kontrolu nanesených vrstev [116]. Mezi materiály zpracovávané laserem patří titanové slitiny [90][106][77][78][79][89], slitiny hliníku [13][10][84][85][86], oceli pro různé použití [7][93][99][100][117][118], slitiny mědi [119][120][121], zinku [98] slitiny na bázi niklu [122][123][124], superslitiny [125][126], mosazi [146], slitiny hořčíku [116][127][128], kovová skla [129] a další materiály [14][87][130][131][132]. Tato široká škála materiálů je v současné době převážně zpracovávána technikou UIP (Ultrasonic impact treatment) nebo dalšími rentabilními metodami. Právě speciální technologie jsou potřeba pro zpracování například manganové oceli [136][137], AISI 304SS [138], AISI 316 SS [139], Inconel 718 [140], Al7075-T6511 [141], AlSi11Mg [72], Al2024-T351 [145], Al maticí kompozitní vyztužený AlCuFe nebo slitin titanu [142].

Při procesu zpevňování laserem je v důsledku vysokých rychlostí deformace dosahujících až  $10^6 \text{ s}^{-1}$  [144] obvykle způsobena změna mikrostruktury a mechanických vlastností materiálu (kalení a zpevňování). I přes vysokou míru deformace v průběhu LSP je celkové indukované napětí mnohem menší než v případě kuličkování. Tyto mikrostrukturní změny jsou obvykle charakterizovány a zkoumány pomocí TEM a SEM. TEM technika typicky odhalí dislokační struktury [90][117][146][134][135], propletení dislokací [13][147][143], dislokační pásmo [99] a vysrážené struktury [146][147]. SEM technika se na druhé straně zaměřuje na povrchové a podpovrchové struktury jako jsou povrchové mikrotrhliny [107][108], makrotrhliny [149], „fretting“ trhliny [101], mírné prohlubně [150] tající v důsledku ablace [152] a další povrchové nepravidlosti [78].

Měření zbytkového tlakového napětí je důležitým ukazatelem účinku LSP procesu. Vzhledem k tomu, že zbytková napětí nelze měřit přímo, jedná se většinou o měření deformace součásti při relaxaci, nebo měření meziatomové vzdálenosti [153]. Pro kvantifikaci průběhu zbytkového napětí v materiálech se používá několik metod. Patří sem rentgenová difrakce  $\sin^2\psi$  [110][153][154][155], odvrtávací metoda





[110][157][150][156], další destruktivní metody (odleptávání) [111][122], neutronová difrakce [123] a konturové metody [84][85] [151][158].

Nejčastěji používanou metodou měření zbytkových napětí po technologii LSP je pak rentgenová difrakce  $\sin^2\psi$ . Druhou nejpoužívanější metodou je metoda postupného odvtávání, u které se variace napětí měří jako funkce hloubky ve vyvrtané díře [15][159]. Další metody jsou zastoupeny méně často z důvodu nižší přesnosti a časové nebo finanční náročnosti procesu.

Technikou LSP se mění i povrchová drsnost zpracovávaného materiálu. Měření drsnosti povrchu po LSP se provádí pomocí povrchových profilometrů. Jako výsledek se potom uvádí aritmetický průměr měření [7][144][111][160]. Zvýšená drsnost povrchu může znamenat výskyt oblastí koncentrace napětí a začínajících trhlinek, což má nepříznivý vliv na únavovou životnost součástek.

Stejně tak se měří i mikrotvrдость [78][86][107][152][160] a nanotvrдость [161][162][119][130] zpracovaného povrchu. Zvýšení naměřené tvrdosti je přičítáno plastické deformaci, což vede k násobení a pohybu dislokací [163][144][110][121]. Všechny tyto techniky zprostředkovávají náhled do změn dějících se v materiálu po LSP zpracování.

Obecné zlepšení lze potom dále kvantifikovat po sérii mechanických testů v závislosti na typu aplikace. Jedná se o testy únavové odolnosti, odolnosti proti opotřebení, korozi pod napětím a odolnosti proti kavitaci. Účinek LSP procesu může mít příznivé účinky na profil zbytkového napětí, mikrostrukturu, mechanické vlastnosti, napěťové korozní praskání a korozní chování.

### 3.3.5 Oblast použití LSP

LSP je univerzální proces se schopností modifikovat různé materiály, jako jsou kovy i se zvýšenou pevností a tvrdostí, lehké slitiny ale i tenké vrstvy. Tato technologie je považována jako potenciální náhrada konvenčního kuličkování (SP) z důvodu dosahovaných hlubších zbytkových napětí v povrchu materiálu [90]. Při optimalizaci procesu lze dosáhnout až 4-5 krát hlubší ovlivnění povrchu při výrazně vyšší homogenitě povrchu [15]. Kromě toho LSP ve srovnání s SP poskytuje lepší rozměrovou stálost a drsnost povrchu. Z tohoto důvodu je možné v některých případech vynechat dokončování broušením obzvláště pro aplikace se zvýšenými požadavky na odolnost proti opotřebení nebo zatížené cyklickým namáháním [105][106]. Dalším z rozdílů je, že tvary jako jsou drážky nebo prohlubně není možné běžně opracovávat kuličkováním, ale díky možnostem polohování laseru je lze opracovávat pomocí LSP [177][170]. LSP může být navíc srovnáváno s metodami jako je kuličkování (SP), vibrační zpevňování (UIP) [142] nebo ultrasonic impact treatment (UIT) [141], která mají stále značné zastoupení v průmyslových aplikacích, a to díky své schopnosti indukovat dostatečné zbytkové tlakové napětí v povrchu materiálu při nižší ceně než procesu zpracování LSP.

Aplikace LSP umožňuje zlepšení odolnosti proti korozi a korozi při napětí a odolnosti proti opotřebení [164][165][166]. Dále LSP tak i UIP je používáno pro zlepšování únavové životnosti [138][141][142][168][222], únavové pevnosti

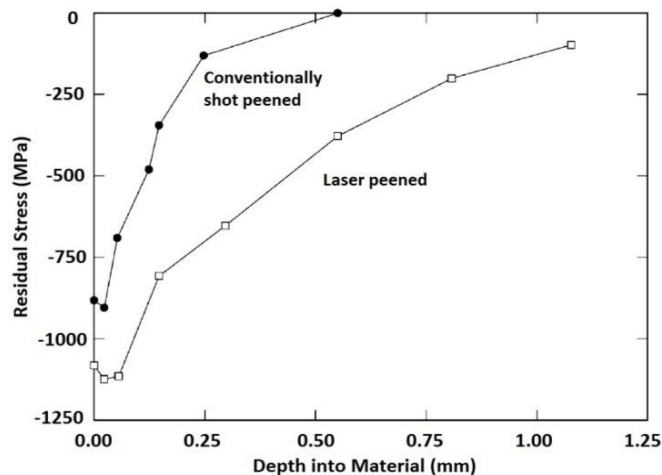
[136][71][169][72][73], zjemnění mikrostruktury [171][139][187][145][167][168] a zlepšení mechanických vlastností, jako je například tvrdost [171][172][167].

Další aplikací LSP je zlepšení povrchových vlastností součástek s tenkými vrstvami, jak uvádí Vaccari [74], Dane a kol. [105] a Mannava a kol. [174][175]. Tento proces může být potenciálně integrován do výrobní linky s vysokým stupněm automatizace [170]. LSP se také osvědčilo u opracování součástek se složitou geometrií [115] díky možnosti vedení laserového svazku na povrch součásti [176], zatímco při použití UIP nebo dalších metod může být ovlivnění složitého tvaru obtížné [173][66].

Další publikace se zabývají vlivem LSP na vlastnosti povrchu zpracovávané součásti [15][16][74][163][76][178][91]. Například Fabbro a kol. [178] a Peyre [16] hodnotili fyzikální podstatu procesu laserového zpracování. Clauer [76] popsal efekt opracování na odolnost proti únavě a Montross a kol. [15] hodnotili proces LSP s důrazem na jeho vliv na mikrostrukturu a změnu vlastností kovových slitin.

### 3.3.6 Vliv Laser Shock Peening na zbytkové napětí

Hlavním výstupem LSP stejně jako konvenční SP a UIP techniky je vnášení tlakového zbytkového napětí do povrchu součásti. Výhody LSP nad SP byly diskutovány řadou výzkumníků, kteří se shodují, že obě metody mají příznivý účinek. Příznivé účinky LSP převažují v oblasti hloubky a velikosti indukovaných zbytkových napětí. Dane et al. [179] srovnávali napětí ve slitině Inconel 718 vyvolané pomocí LSP a SP. Obrázek 39 znázorňuje, že technologií LSP bylo dosaženo hloubky napětí.



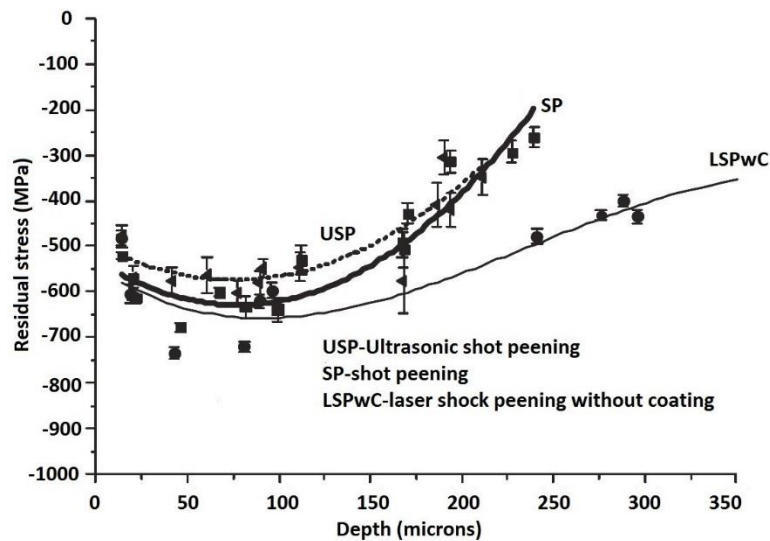
Obrázek 39: Profil zbytkových napětí ve slitině Inconel 718 po ošetření LSP a SP [179].

Bylo provedeno srovnání účinku UIP, SP a LSP bez povlaku (LSPwC) na zbytkové napětí profilu. LSP a LSPwC pracují na stejném principu [110]. LSPwC však ve srovnání s LSP využívá často komerčně dostupný laserový systém s nižším průměrným výkonem a energií v pulzu 0,05-0,1 J [182]. Dále byly srovnány účinky UIP a LSPwC a překrývacího média na profil zbytkového napětí v blízkosti povrchové vrstvy u oceli AISI321. UIP a LSP způsobily zbytkové napětí o velikosti -480, resp. -80 MPa. Nižší naměřená hodnota u LSPwC mohla být způsobena menší intenzitou tlakové vlny, která je vytvořena bez pýchovací vrstvy. Výzkumem Maawada et al. [133] o účincích UIP, SP



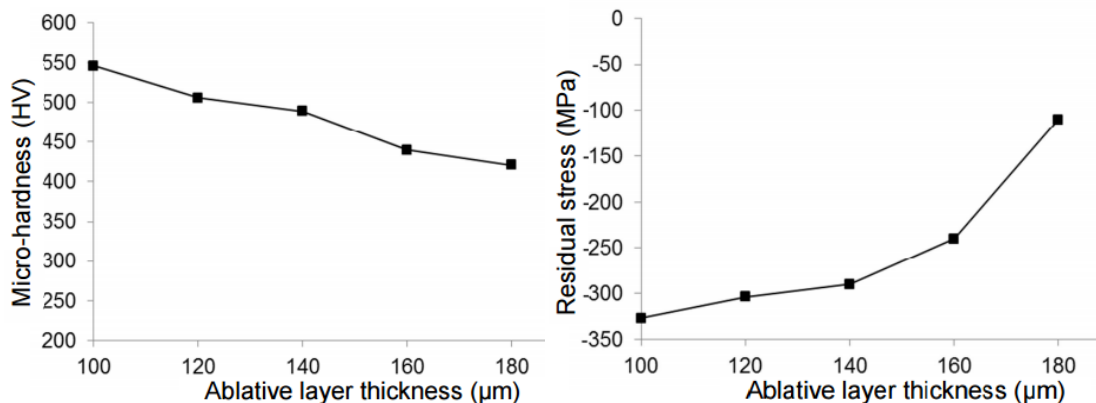
a LSPwC na Ti-2.5Cu bylo prokázáno vyšší a hlubší tlakové zbytkové napětí po LSPwC ve srovnání s UIP a SP (Obrázek 40).

Profily napětí rovněž závisí na stavu povrchu, mikrostruktuře, vlastnostech materiálu, parametrech LSP stejně tak jako na měřicí technice. Obecně je přijímáno, že tlaková zbytková napětí jsou největší na povrchu a zmenšují se směrem do materiálu [82]. Volba techniky měření zbytkových napětí záleží na geometrii vzorku a požadovaném profilu napětí. Například měření zbytkových napětí u vzorku se složitou geometrií lze nejlépe dosáhnout pomocí konturové metody [113]. Určit, který z parametrů technologie má na optimální zbytkové napětí největší vliv není jednoduché. Z tohoto důvodu je nutná optimalizace LSP procesu pro zlepšení vlastností pro každý materiál.



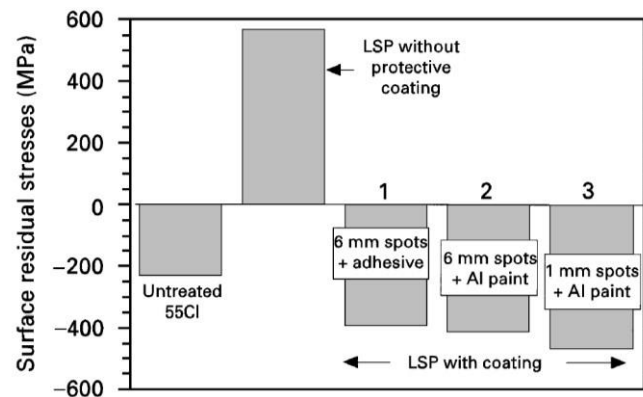
Obrázek 40: Hloubkové profily zbytkových napětí pro alfa fázi Ti-2.5Cu po LPwC, SP a ultrazvukového SP (USP) [133].

Důležitým parametrem technologie je tloušťka ablační vrstvy, která je často kompromisem mezi dostatečnou ochranou součásti před plazmatem a netlumením rázové vlny. Ideální tloušťka ablační vrstvy je pro většinu druhů zpracovávaných materiálů i procesních parametrů okolo 0,1 mm (Obrázek 41) [180].



Obrázek 41 Závislost mikrotvrlosti (vlevo) a zbytkového napětí (v pravo) na tloušťce ablační vrstvy při použitých parametrech délku pulzu 12 ns, energii 6 J, vlnová délka 1064 nm, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, transparentní tlumící vrstva 1,8 mm [180]

Ablační vrstva (povlak) má přímý vliv na indukovaná zbytková napětí. Různí autoři uvádějí různé použité vrstvy (povlaky) na různých materiálech. Je možné LSP provádět i bez této vrstvy (LPwC) [117][200][157][160][181], ale indukovaná zbytková napětí v materiálu nedosahují stejné účinnosti jako v případě s ablativní vrstvou [15][132][182]. Důvodem je to, že intenzita zpracování je v případě bez povlaku podstatně snížena [185]. Dalším znakem LSP bez ablativní vrstvy je, že v důsledku tavení mohou být do povrchové vrstvy materiálu vnesena tažná zbytková napětí [81][183]. Peyre a kol. [184] se zabýval účinky ablativní vrstvy na zbytková napětí v oceli 55C1 s vodní pěchovací vrstvou. Bylo zjištěno, že vzorky s povlakem vykazovaly největší tlaková zbytková napětí, zatímco u vzorků bez ochranného povlaku vedlo LSP dokonce k tahovým napětím (Obrázek 42).

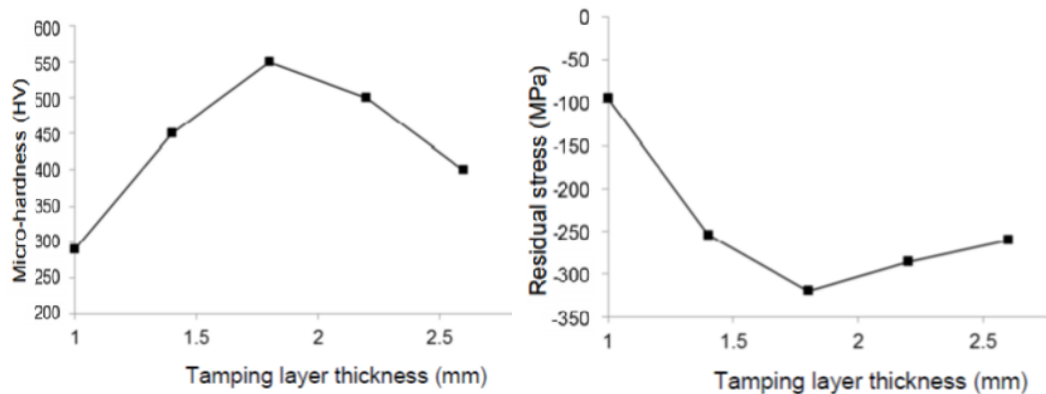


Obrázek 42: Průměrné hodnoty zbytkového napětí na povrchu vzorků s různými ablativními vrstvami a různou velikostí laserové stopy. Intenzita laseru byla ve všech případech  $5 \text{ GW/cm}^2$  [148].

Gonzalez a kol. [81] studovali vliv absorpční vrstvy (černé barvy) na zbytková napětí způsobených LSP u hliníkové slitiny 6061-T6 Al. U kovových povrchů s povlakem bylo tepelným efektům zabráněno jak v kolmém, tak rovnoběžném směru skenování. U vzorků bez ochranného povlaku byly pozorovány tepelné účinky, které vedly k napětím v tahu [81]. Toto pozorování je v souladu s tím, co uvádí Peyre a kol. [184]. Jelikož je LSP mechanický proces, je nezbytné všechny tepelné efekty eliminovat za pomoci vhodného povlaku pro konkrétních LSP a materiálových parametrů. Optimálního efektu lze dosáhnout pomocí experimentů a simulací, jež by měly dále pomoci lépe porozumět vlivu povrchových podmínek v materiálu.

Funkcí pěchovací vrstvy (transparentní překrytí) je zabránit plazmatu, vytvořeném v důsledku odpaření ablační vrstvy, aby se šířilo volně do prostoru. Pěchovací (Confining) vrstva tak zvyšuje intenzitu vzniklých šokových vln, což vede k větší deformaci materiálu. Dříve používané sklo a křemen jsou nyní nahrazeny vodou. Důvodem je hustota a rychlost šíření zvuku (impedance), která je kompatibilní s většinou materiálů. Voda je navíc vhodná pro zpracování vzorků se složitou geometrií, ale nevyhovuje při zpracování se zvýšenou teplotou kvůli vypařování. Obecně platí, že výběr pěchovacího média závisí na hustotě a rychlosti zvuku v substrátu (vzorku), která souvisí s omezenou akustickou impedancí. Studie Honga a kol. [88] ukázala, že vzniklý špičkový tlak souvisí s pěchovacím médiem a ablační vrstvou, ale není zjištěno, jakým způsobem jsou ovlivněny profily zbytkového napětí.

Jako transparentní vrstva tlumící expanzi plazmy se používá nejčastěji voda. Její hloubka na povrchu také ovlivňuje velikost vnesené energie [180]. Tloušťka vrstvy vody se nejčastěji pohybuje od 1 mm do 2 mm. Ale existují i aplikace LSP pod vodou, jako je zpevňování svarů jaderného reaktoru při jeho plánovaných pravidelných odstávkách [133][237]. Aplikace pod větší vrstvou vody má nevýhodu velké ztráty energie ve vodě, kvůli relativně vysoké absorpci používané vlnové délky (Obrázek 43). Pro zlepšení průchodu laseru tlustou vrstvou vody je nutné použít například druhou harmonickou vlnovou délku běžně používaných laserů.



Obrázek 43 Závislost mikrotvrlosti (vlevo) a zbytkového napětí (vpravo) na tloušťce překryvací transparentní vrstvy při použitých parametrech délku pulzu 12 ns, energii 6 J, vlnová délka 1064 nm, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, absorpční vrstva 0,1 mm [180]

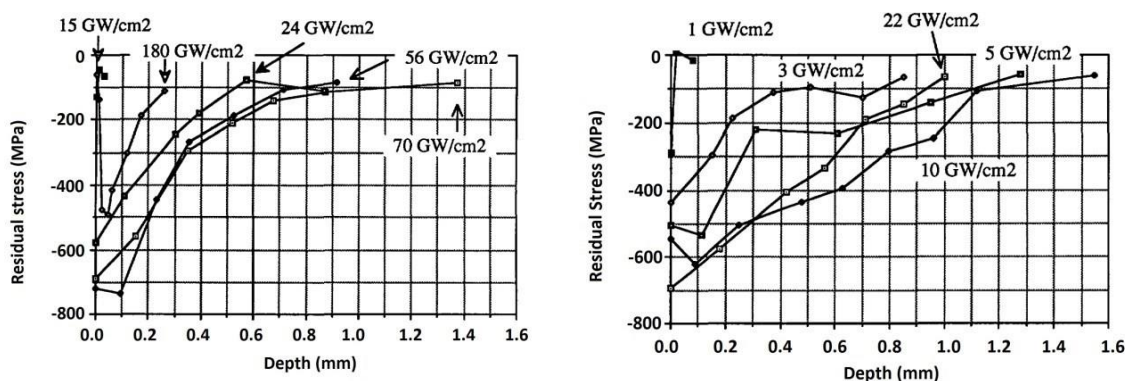
Velikost a tvar laserové stopy je dalším důležitým parametrem v peening procesu. Většinou se používají stopy s kruhovým průřezem [90][111][146][162] nicméně studie [106][102][184][123] ukázaly, že čtvercový průřez dosahuje lepších výsledků. Velikost stopy lze obecně měnit, což je spojeno se zvoleným výkonem a jeho hustotou [15]. Změna velikosti stopy má konečný efekt na šíření rázové vlny a následně na míru útlumu. Montross a kol. [15] poukázal na to, že pro menší průměr stopy je expanze tlakové vlny sférická a útlum činil  $1/r^2$ , zatímco rovinná expanze a útlumu byla  $1/r$ , které byly pozorovány u většího průměru stopy. Menší útlum u většího průměru stopy tak způsobuje šíření vlny hlouběji do materiálu. Vyšší zbytková napětí se navíc očekávají u menších stop při stejném výkonu vzhledem k nepřímé úměře mezi velikostí stopy a intenzitou. Trdan a kol. [186] zkoumali zbytkové napětí indukované ve slitině AW 6082 s použitím laserové stopy o průměru 1,5, 2,0 a 2,5 mm. Pro všechny experimenty byla použita hustota pulzů 900 pulzů/cm<sup>2</sup>. Výsledky uvedené v Tabulka 4 ukazují, že pro průměr stopy 1,5 mm bylo vygenerováno vyšší napětí ve srovnání se stopami o větším průměru. To je přičítáno mechanickému vlivu vln, což vede k vyššímu zpevnění s vyšší hustotou pulzů. K podobným výsledkům u hliníkových slitin došli i Sánchez-Santana a kol. [188] a Kalainathan a kol. [189].

*Tabulka 4 Podpovrchové zbytkové napětí v hloubce 33  $\mu\text{m}$  pod povrchem [102].*

Vzorek	Průměr svazku (mm)	$\delta_{\min}$ (MPa)	$\delta_{\max}$ (MPa)
1	(Před ovlivněním)	$22 \pm 17$	$45 \pm 22$
2	1.5	$-362 \pm 31$	$-199 \pm 27$
3	2.0	$-347 \pm 28$	$-142 \pm 23$
4	2.5	$-258 \pm 24$	$-138 \pm 22$

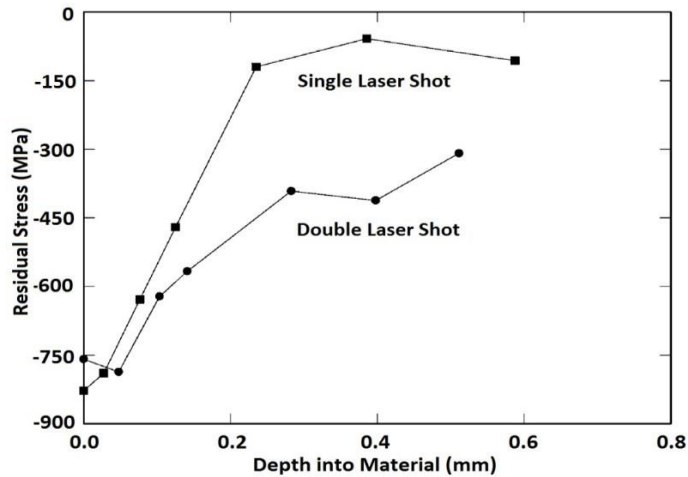
Velikost zbytkových napětí závisí na hustotě použitého výkonu. Se zvyšujícím se tlakem se zvyšuje velikost i hloubka zbytkových napětí v povrchu. Proto lze říci, že velikost a hloubka tlakových ZN je závislá na hustotě energie. Dále existuje kritická hustota energie, při jejímž překročení se mohou objevit vady, jako například mikrotrhliny. Mikrotrhliny byly po opracování laserem pozorovány [181] pod povrchem materiálu u hliníkové slitiny AW 7050. Vznik těchto vad byl připisován právě překročení výkonové hustotě. Bylo pozorováno, že vysoká hustota energie je jedním z hlavních faktorů při formování vnitřní trhliny po zpracování technologií LSP. Rozložení zbytkového napětí v závislosti na hloubce, měřeno za použití metody X-ray  $\sin^2\Psi$  je znázorněno (Obrázek 44). Jak je znázorněno (Obrázek 44) větší hloubky bylo dosaženo s delší dobou impulzu, který odpovídá snížení hustoty výkonu [190] LSP proces s  $10 \text{ GW/cm}^2$  a  $25 \text{ ns}$  ukazuje největší hloubku zbytkového napětí [120].

Zvýšením hustoty výkonu bylo zvýšeno i zbytkové napětí na povrchové ploše. Například Obrázek 44 (vpravo) zobrazuje povrchové zbytkové napětí  $-500 \text{ MPa}$ ,  $-550 \text{ MPa}$  a  $-700 \text{ MPa}$  při hustotách výkonu  $22$ ,  $10$  a  $5 \text{ GW/cm}^2$  (Obrázek 44 vlevo). Podobné trendy zbytkových napětí byly měřeny i u hliníkových slitin (7075, A112 a A356), duplexní korozivzdorné oceli AISI 2204 [111] a titanové slitiny Ti-6Al-4V.


*Obrázek 44 Profil zbytkových napětí při použití různé hustoty výkonu pro  $2,5 \text{ ns}$  (vlevo) a  $25 \text{ ns}$  (vpravo) [120].*

Při technologii laserového zpracování byl prokázán velký vliv několikanásobného průchodu laseru nebo překrývání jednotlivých pulzů [15]. Větší míra zpevnění je způsobena tím, že čím vyšší je počet rázů, tím větší je dosaženo indukované plastické deformace, až do hodnoty jejího nasycení [191].

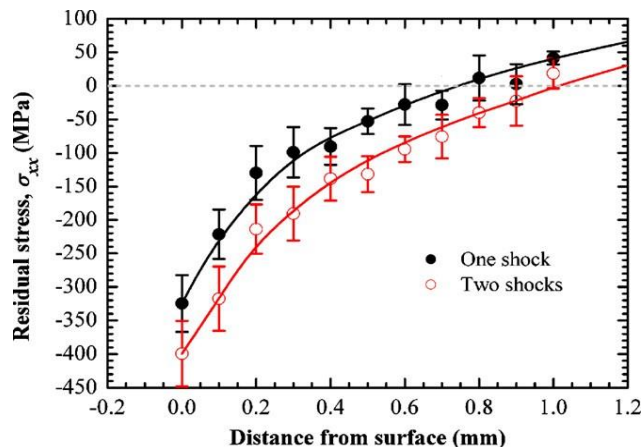
Zásadním poznatkem je, že překrývající se oblasti vykazují relativně rovnoměrné rozložení tlakových zbytkových napětí [90][144][159][192]. Bylo srovnáno zbytkové napětí vyvolané jedním nebo dvěma po sobě jdoucími přejezdy na titanové slitině Ti-6Al-4V při použitých parametrech  $200 \text{ J / cm}^2$  a délce pulzu 30 ns. V případě více přejezdů bylo pozorováno větší zbytkové napětí (Obrázek 45) [179].



Obrázek 45 Hloubka tlakových zbytkových napětí při použití jednoho nebo dvou přejezdů laseru u slitiny Ti-6Al-4V [179].

Také byl zkoumán vliv počtu přejezdů na zbytkové napětí u slitiny Ti-6Al-4V se 40% překryvem jednotlivých pulzů laseru. Zbytková napětí byla měřena za použití rentgenové difrakční metody  $\sin 2\psi$ . Větší hloubka zbytkových napětí lze přičíst plasticke deformaci, která vytvořila větší pohyb dislokací [179][77]. Důvodem pro změny v profilu zbytkových napětí může být změna procesních parametrů jako je například rychlost pohybu paprsku po povrchu a tedy i překryv jednotlivých pulzů [77].

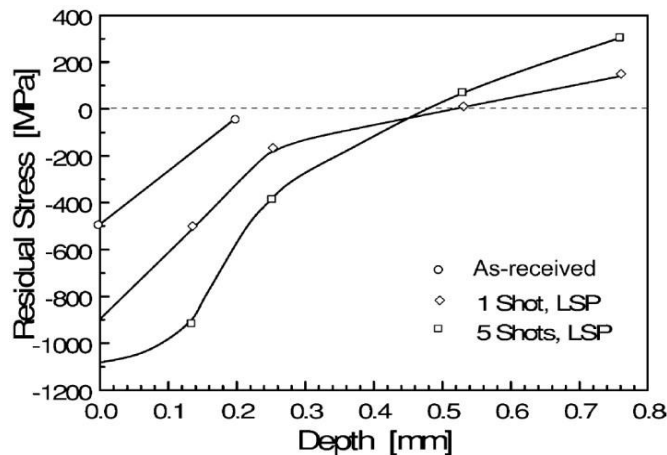
Zbytková napětí na povrchu (Obrázek 46) byla nižší u použití dvou pulzů, zatímco pro jeden pulz byla větší. To lze vysvětlit jako dosažení bodu nasycení napětí (-800 MPa), kterého bylo dosaženo za použití již jediného laserového šoku [93]. Kromě toho absorpční (ablační) vrstva může být zničena během prvního šoku.



Obrázek 46 Profil zbytkových napětí při použití jednoho a dvou přejezdů laseru s 40% překryvem jednotlivých bodů změřený na slitině Ti-6Al-4V [77].



LSP může být aplikováno na tenko i silnostěnné součásti. Nejlepších výsledků je ale dosahováno při použití na takové součásti, kde tvoří hloubka zpevnění do 10 % z tloušťky vzorku, důvodem tohoto omezení je zabránění deformace součásti [198]. U tenkých součástí, jako jsou lopatky plynové turbíny kompresoru, se vyžaduje pečlivý výběr parametrů zpracování a zaměření na strmější profil zbytkových napětí v povrchu součásti [198]. Při aplikaci LSP na tenké materiály bylo zjištěno, že nárůst počtu šoků z 1 na 5 neměl za následek nárůst hloubky, ale pouze se významně zvýšila velikost napětí na povrchu (Obrázek 47) [193].



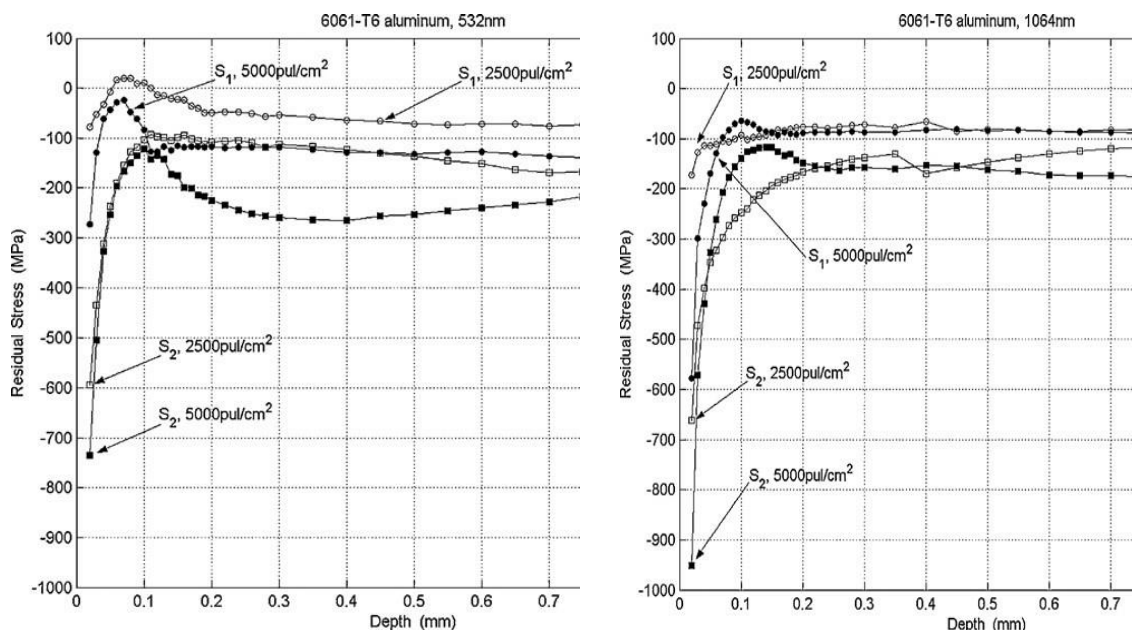
Obrázek 47 Zbytkové napětí ve vzorku o tloušťce 1,5 mm vyrobeného z oceli 1.4340 při použití 1 a 5 pulzů [193].

Při malé tloušťce vzorku navíc může odražená vlna od spodního povrchu způsobovat tahová zbytková napětí. Z tohoto důvodu může být použito zpracování z obou stran najednou a obě vlny pohybující se hluboko do materiálu se navzájem vyruší [89]. Zpracování může být provedeno buď současně z obou stran, nebo postupně. Pro nepravidelné geometrie, kuličkování z obou stran nemusí být vhodné.

Na výsledné vlastnosti povrchu materiálu může mít vliv i použitá vlnová délka laseru. U většiny studií zabývajících se LSP je použita vlnová délka 355 nm [87][98][107][195][119][120], 532 nm [93][112][118][118][196][184] a 1064 nm [77][78][86][93][102][157][152].

Byla provedena studie [162] vlivu LSP na hliníkovou slitinu Al6061 za použití 1,2 J v pulzu pro 1064 nm, a 0,9 J v pulzu pro 532 nm při délce pulzu 8 ns s frekvencí 10 Hz. Dále byly použity 2500 a 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> pro obě vlnové délky.

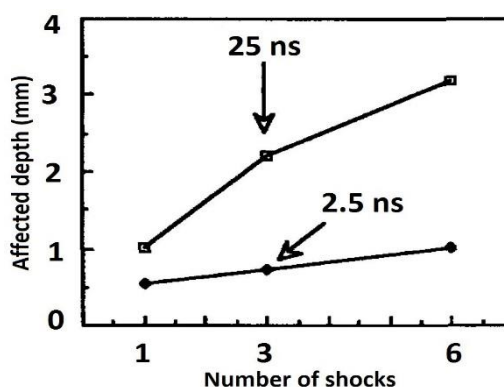
Je patrné, že použití vyšší pulzní energie a vlnové délky za následek vysoké zbytkové napětí na povrchu. Napětí na povrchu dosahovalo -950 a -750 MPa pro 1064 nm a 532 nm pro vlnové délky (Obrázek 48).



Obrázek 48 Zbytková napětí při použití různé vlnové délky (vlevo) 532 nm and (vpravo) 1064 nm vlnové délky [162].

Výsledné zbytkové napětí v materiálu může být závislé na délce impulsu, který je obvykle v nanosekundách (ns), se kterým je spojený tlak rázové vlny generované v povrchu [83]. Krátký pulz nemusí vygenerovat dostatek tlaku potřebný pro zpevnění, zatímco příliš dlouhý pulz může mít za následek tavení a poškození povrchu [15].

Při hustotě výkonu 5-10 GW / cm<sup>2</sup> s krátkou dobou trvání (jednotky ns), je dosaženo ablace velmi rychle a je vytvořen vysoký tlak plazmatu. Obrázek 49 je znázorňuje efekt použití 2,5 ns a 25 ns délky trvání impulsu [120].



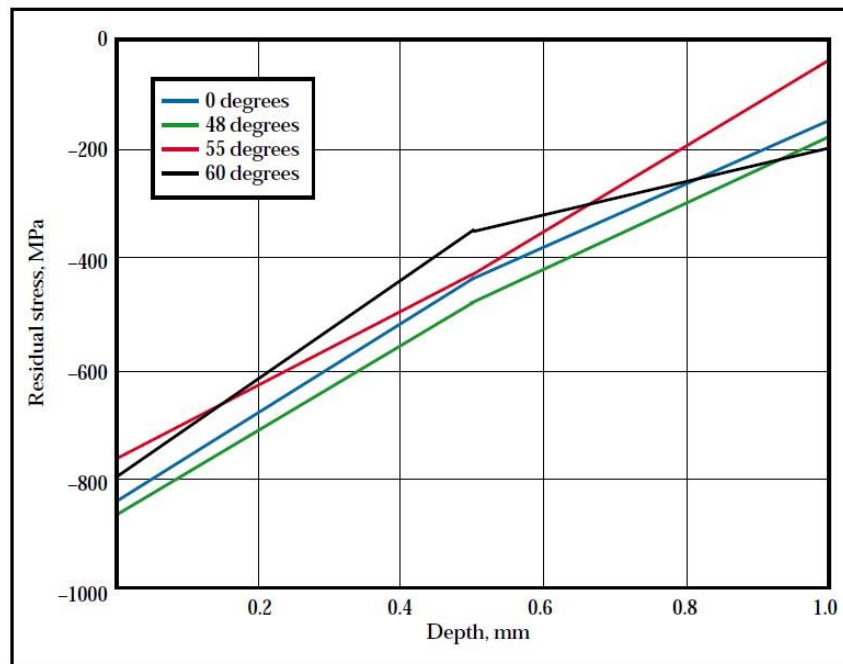
Obrázek 49 Zbytkové napětí jako funkce délky pulzu [120].

Experiment ukázal, že při použití pulzu dlouhého 25 ns, bylo dosaženo větší hloubky zpevnění než při použití 2,5 ns. Nicméně, jiné parametry zpracování, jako je hustota výkonu, mohly hrát významnější roli [90][106][77][78][79]. Pokud to technické podmínky provozu laseru dovolují, volba trvání pulsu musí být optimalizována, protože při použití jiného materiálu, chování povrchové vrstvy může být zcela rozdílné. [89][93][101][102][107].



Na zbytkové napětí má významný vliv i geometrie zpracovávaného povrchu. Mnoho studií LSP bylo provedeno na jednoduchých geometrických tvarech. Přes velkou rovnoměrnost zpracování technologie LSP je stále nejasný její přesný vliv u složitých geometrických tvarů. Z tohoto důvodu byl navržen nelineární přístup pro studium složitých tvarů [197].

V některých případech mohou rozdíly ve zbytkovém napětí vést k rozdílům v požadovaných vlastnostech. Proměnlivost a umístění zbytkových napětí ve složitých geometrických prvcích jsou stále ještě ne zcela objasněné a jsou předmětem dalších výzkumů [199].



Obrázek 50 Závislost zbytkového napětí změřeného na slitině Ti-6Al-4V na úhlu dopadu [199].

Účinek laserového paprsku dopadajícího pod úhlem na zbytková napětí je stále ještě neprobádané, ale přitom velmi aktuální téma. Byl studován vliv úhlu dopadu laseru na zbytkové napětí profilu u slitiny Ti-6Al-4V. Úhly dopadajícího paprsku byly v rozmezí od 0° do 60° od normály k povrchu. V grafu jsou prezentovány výsledky povrchového napětí závislého na úhlu dopadu (Obrázek 50). Byl pozorován pouze velmi malý vliv úhlu dopadu na výsledné vlastnosti povrchové vrstvy. Na základě výše uvedených výsledků může být technologie LSP aplikována i při relativně velkých úhlech dopadu, čímž může být usnadněno zpracování složitých tvarů. [199][197].

### 3.3.7 Vliv Laser Shock Peening na drsnost povrchu

Drsnost povrchu má významný vliv při mechanickém zkoušení jako je únavová životnost při cyklickém namáhání [77]. Například vysoká drsnost povrchu má za následek více iniciačních míst trhlin, které mají nepříznivý vliv právě na únavovou životnost, korozi pod napětím [110] i odolnost proti opotřebení [226][227]. Při porovnání účinku LSP a SP na hliníkové slitiny, ve vztahu k drsnosti výsledného povrchu bylo dosaženo lepších vlastností při použití ablační vrstvy u technologie LSP. Pravděpodobně



je to způsobeno vyvolávaným tlakem 0-6 GPa a 3-10 GPa pro LSP a SP [144]. Ve většině případů platí, že bez ohledu na metodu povrchové úpravy drsnost povrchu se zvyšuje v porovnání s výchozím materiálem. Tabulka 5 porovnává hodnoty drsnosti povrchu Ra pro nezpracované, laserované a kuličkované vzorky [7][144][111]. Nejvyšší drsnost byla pozorována po kuličkování ve srovnání s LSP a výchozím materiálem.

Kromě toho, vzhledem k dosahované hlubší vrstvě tlakového napětí u zpracování LSP, může být drsnost povrchu ještě snížena při dosažení stejných výsledků jako v případě SP (Tabulka 5).

Tabulka 5 hodnoty drsnosti povrchu Ra před zpracování a po LSP a SP zpracování

	Nezpracovaný	LSP	SP	Zdroj
A356	0.70	1.10	5.80	Peyre <i>et al.</i> [144][76]
AA7075	0.60	1.30	5.70	Peyre <i>et al.</i> [144][76]
316L SS	0.05	1.15	1.40	Peyre <i>et al.</i> [7][8]
Ti-6Al-4V	0.04	0.20	1.40	Liu and Hill [161][96]

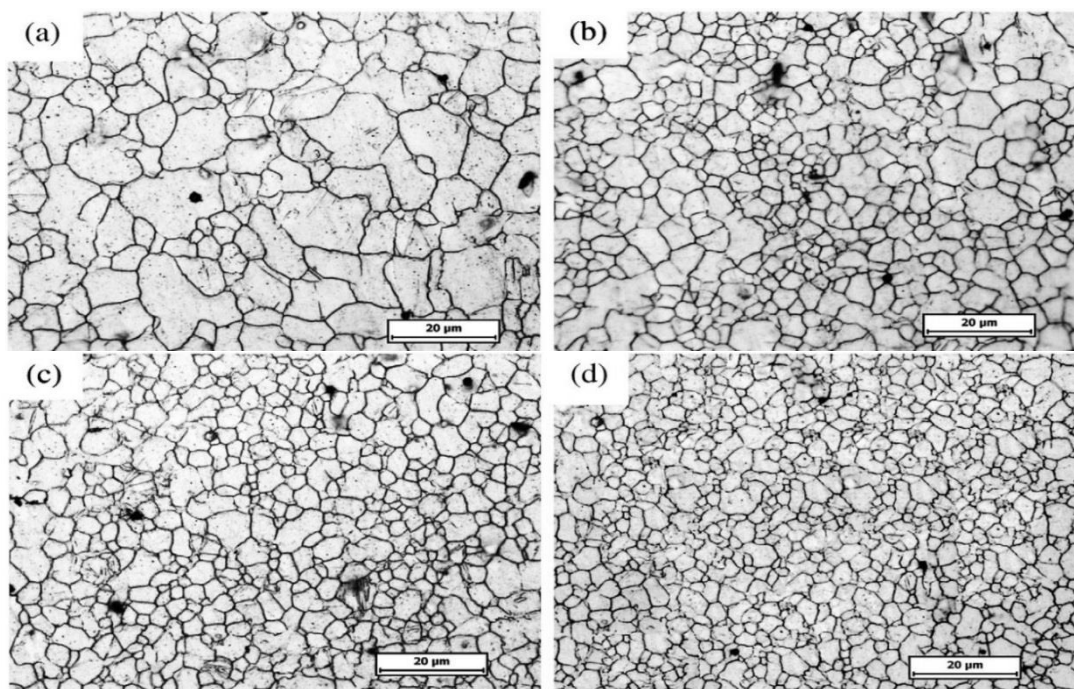
Na povrchu zatěžovaném třením, kde drsnost povrchu je důležitá, je LSP proces příznivý, protože velký podíl stlačené vrstvy je zachován i po opotřebení povrchu, zatímco pro SP vysoká drsnost povrchu způsobuje, že dochází k výrazně rychlejšímu opotřebení [15]. Při nanášení barvy SP proces vykazuje lepší přilnavost nátěru k podkladu než LSP. To lze přičíst vyšší drsnosti produkované během procesu SP. Při tváření komponentů, hlubším napětím z LSP lze vytvořit poloměrem zakřivení 3 až 8 krát menší a povrch 6 krát hladší než SP [83]. Přesto lze tvrdit, že oba procesy mají své výhody a nevýhody.

### 3.3.8 Vliv Laser Shock Peening na mikrostrukturu

V LSP ovlivněném materiálu dochází k vysoké rychlosti deformace  $10^6 \text{ s}^{-1}$  [156] v důsledku plastické deformace, což má za následek změny mikrostruktury v blízkosti povrchu součásti [77]. To má za následek zjemnění zrn [165], což je spojeno s vyššími užitnými vlastnostmi materiálu, jako je povrchová tvrdost [159], který se promítá do zvýšení únavové pevnosti [90], pevnost v tahu [13] a odolnosti proti opotřebení [165].

Zjemnění mikrostruktury je také jev pozorován u UIP ovlivněných materiálů [171][139][140][187][145] čímž se zlepšuje vlastnosti materiálu. Zhang a kol. [167][168][77] uvádí, že výsledná mikrostruktura je závislá na parametrech zpracování LSP.

Byl zkoumán vliv jedno, dvou a čtyř dopadů laseru na mikrostrukturu slitiny AZ31B Mg. Z výsledků (Obrázek 51) je zřejmé, že zvýšení počtu pulzů má za následek další plastické deformace a tím další zjemňování zrna [200]. Tento typ zjemněné mikrostruktury má vliv na šíření trhlin a prevenci koroznímu praskání. Například žádné negativní účinky nebyly pozorovány pomocí SEM v pracích [90][201] zatímco vady, jako mikrotrhlin [150], krátery a díry byly pozorovány [152].

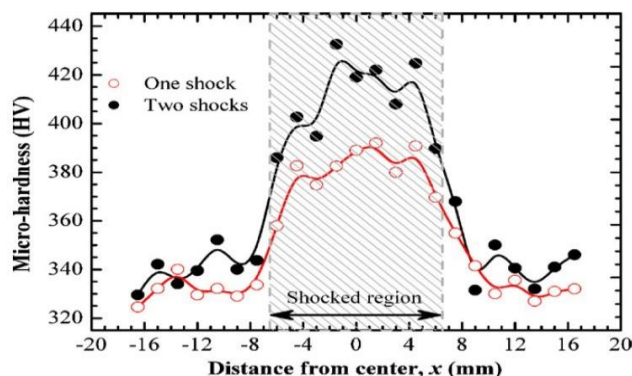


Obrázek 51 Metalografický výbrus slitiny AZ31B Mg (a) před LSP; (b) jeden pulz; (c) dva pulzy; a (d) čtyři pulzy [200].

### 3.3.9 Vliv Laser Shock Peening na mechanické vlastnosti

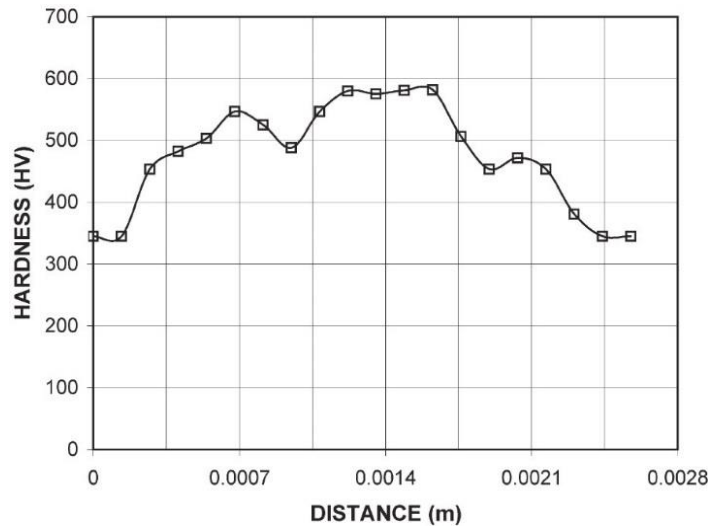
LSP proces se zvyšuje povrchovou tvrdost (nanotvrdost nebo mikrotvrdost) zpracované vrstvy [110][183][202] a tento efekt se snižuje s hloubkou směrem do materiálu [161][203][127]. Žádný vliv na změnu tvrdosti nebyl pozorován u duplexní nerezové oceli, [111], tento fakt byl přičítán nedostatečné energii LSP. Obecně lze říci, že zvýšení tvrdosti závisí na parametrech, jako je hustota energie [127][188], počet dopadů laseru [77][203], tlak na povrchu materiálu [147][204] a původním stavu podkladu.

Při experimentech byl změřen nárůst mikrotvrdosti o 15 % a 24 % pro jeden a dva přejezdy na materiálu Ti-6Al-4V s překryvem jednotlivých bodů 40 %. Z grafu (Obrázek 52) je zřejmé, že dochází ke znatelnému zvýšení mikrotvrdosti v oblasti zpracování [107]. Rozdíl mezi maximem pro jeden a dva rázy byl přibližně HV 30 [77].



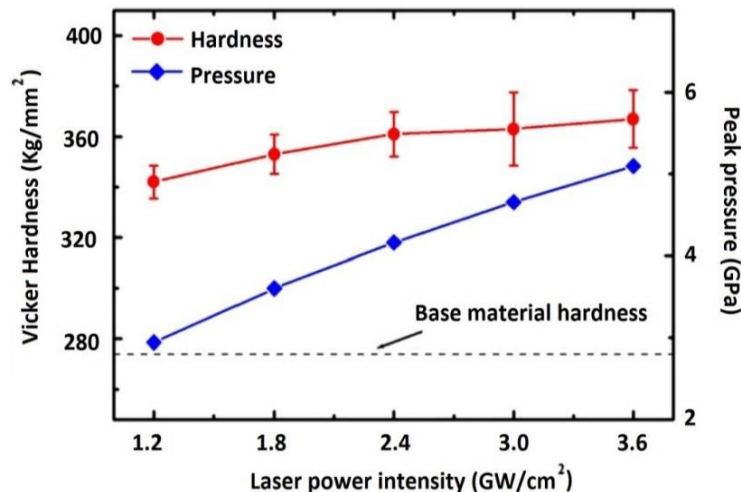
Obrázek 52 Průběh mikrotvrdosti na povrchu slitiny Ti-6Al-4V vzorek byl zpracován s překryvem jednotlivých pulzů 40 % [77].

Také bylo zjištěno, že mikrotvrdość materiálu Ti-6Al-4V po LSP byla zvýšena až 1,5x (Obrázek 53). Tento nárůst tvrdosti byl přičítán zvýšení hustoty dislokací [163][144][110][121] navíc při oboustranném zpracování [107][161].



Obrázek 53 Průběh mikrotvrdości směrem do materiálu u slitiny Ti-6Al-4V [150].

Podobné trendy byly pozorovány u laserem zpracovaných vzorků z Al2024 [159], OFHC Cu [159] korozivzdorné oceli 304SS [159] a Al6082-T651 [147]. Tvrdość se zvyšuje se zvýšeným tlakem na povrchu materiálu a hustotou energie laseru (Obrázek 54). Z tohoto obrázku je také zřejmé, že nejvyšší tvrdost byla v 2,4 GW/cm<sup>2</sup> a tlaku 4 GPa, při dalším zvyšování tlaku již nebylo pozorováno žádné další znatelné zvýšení tvrdosti [109].



Obrázek 54 Povrchová tvrdost po zpracování LSP za tepla (WLSP) při různých intenzitách výkonu souvisejících s tlakem na povrchu materiálu [109].

Podobně jako tvrdost je technologií LSP ovlivněna i mez kluzu [10], tento vliv byl zkoumán na hliníkových slitinách (AW2024, AW7075). [10][5] Výrazný nárůst meze kluzu byl pozorován v případě slitiny AW7075 a k výrazně menšímu nárůstu pak došlo v případě AW2024.



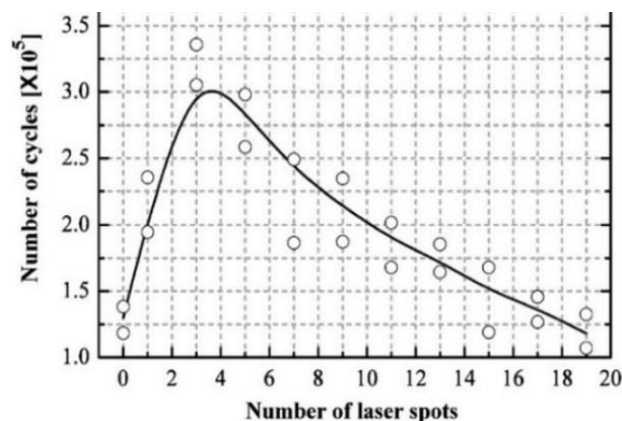
Možné důvody pro zachování mezi kluzu v případě slitiny AW2024 lze přičíst menšímu tepelnému zpracování než je tomu například v případě slitiny AW7075. Kromě toho studie aplikace LSP po frikčním svařování (FSW) materiálu AW2195 ukázala, že LSP po TSP zvýšila mez kluzu o 60% ve srovnání s klasickým SP po TSP [205]. Podobná měření na svarech AW5086 a AW6061 [13][3] ukázala, že v tahu mez kluzu svařovaných 5086 byla zvýšena, zatímco u AW6061 zůstala nezměněna.

Modul pružnosti je další důležitou vlastností materiálu, která také závisí na procesních podmínkách LSP. Například, LSP studie korozivzdorného materiálu AISI 304[203], Fe-Ni slitiny [130] a LY2 Al [158] ukázala zvýšení v modulu pružnosti, zatímco studie [85] zaměřená na AW2011-T3 prokázala snížení modulu pružnosti po LSP.

Vliv LSP na zlepšení únavové životnosti komponentů je hlavní důvod jeho aplikace. V počáteční fázi procesu zatěžování je oddálen vznik trhlin a posléze je zpomaleno jejich následné šíření materiálem [15][90][79][80][182][206][211]. Čím vyšší je hloubka tlakových zbytkových napětí vnesená technologií LSP, tím vyšší je i vliv na únavovou životnost [90][207][112][113][200][195][208].

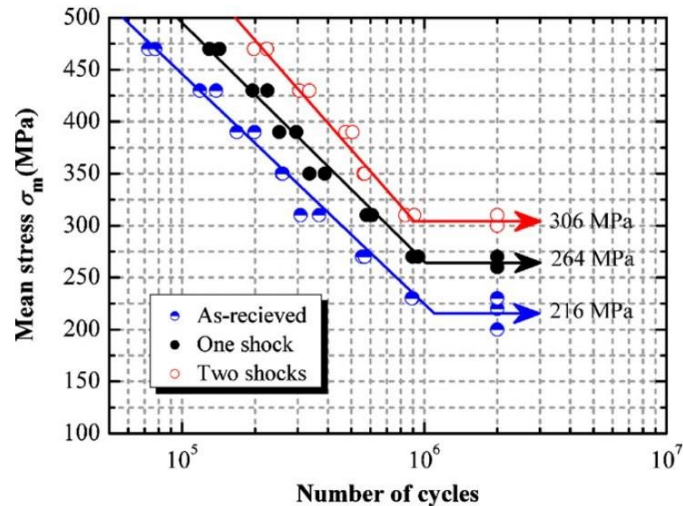
Odolnost proti cyklickému namáhání ovlivňují i další faktory, jako je například drsnost povrchu [120][209][210], která může být příčinou buď zvýšení nebo snížení únavové životnosti v závislosti na podmínkách zpracování LSP [77]. Z tohoto důvodu bylo zkoumáno zlepšení únavové životnosti zpracováním laserem slitiny Ti-6Al-4V pomocí jednoho nebo dvou přejezdů s 40% překryvem jednotlivých bodů. Pro testování únavy, byl použit poměr zatížení 0,3 [77].

Bylo zjištěno, že únavová životnost se zvyšuje a následně klesá se zvyšujícím se počtem přejezdů (Obrázek 55). Nejvyšší únavová životnost byla dosažena při třech přejezdech. Důvody snížení únavové životnosti lze připsat zničení absorpční vrstvy, koncentraci napětí nebo zvýšení drsnosti v důsledku spálení povrchu laserem [196].



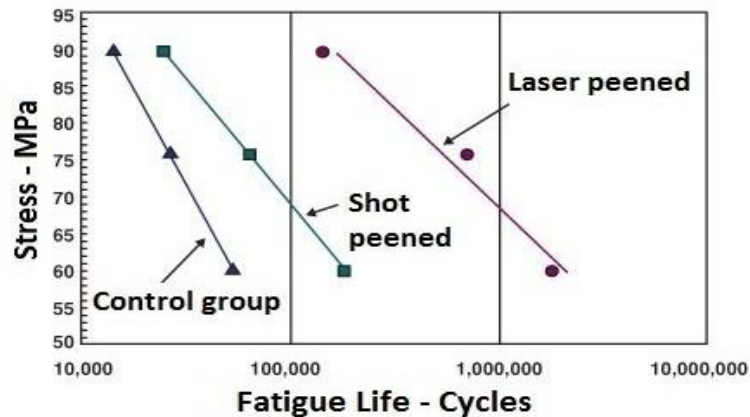
Obrázek 55 Závislost počtu cyklů při napětí 370 MPa na počtu laserových průchodů po materiálu (40% překryv v každé vrstvě) [77].

Obrázek 56 znázorňuje, že použití dokončování metodou LSP má za následek zvýšení únavové životnosti. Z porovnání zpracovaných a nezpracovaných vzorků je patrné, že únavová životnost se zvýšila o 22,2 % a 41,7 % pro jeden a dva průchody laseru.



Obrázek 56 Fatigue lives of laser-peened and as-received Ti-6Al-4V at different applied stress levels [77].

Společností Metal Improvement Company (MIC) [115], která pracuje na vývoji technologie LSP, byla měřena únavová životnost vzorků svarů materiálu AW6061-T6 zpracovaného LSP a SP. Únavová životnost (počet cyklů do lomu) byla zlepšena až 10 krát po zpracování LSP oproti SP (Obrázek 57). Toto zlepšení bylo přičítáno hlubší vrstvě tlakového zbytkového napětí s minimálním teplotním ovlivněním z procesu LSP [212]. Hluboká vrstva zpracování nemusí být vždy prospěšná pro nízkocyklovou únavu a při velmi vysokých zatíženích. Navíc při použití vysoké provozní teploty mohou být zbytková napětí uvolněna a zcela pomine účinek LSP zpracování [143].



Obrázek 57 Únavová životnost materiálu 6061-T6 po LSP and SP [155].

Experimentálně byl studován vliv LSP na rychlost růstu trhliny. Skupinou prof. Hatamleha [84] a bylo prokázáno, že rychlost růstu únavové trhliny ve svarovém spoji materiálu AA2195 byla výrazně snížena zpracováním LSP ve srovnání se zpracováním SP. Růst únavové trhliny byl po LSP srovnatelný s nesvařeným materiálem. Zpomalení růstu trhlín lze přičíst účinku tlakových zbytkových napětí indukovaných prostřednictvím LSP [155].



### 3.3.10 Vliv Laser Shock Peening na korozní vlastnosti a korozi pod napětím

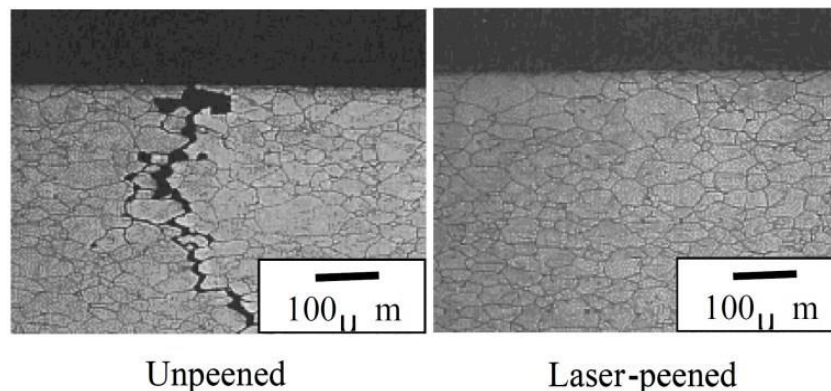
Vzhledem k účinnosti LSP i na mikrostrukturu materiálu, může být zlepšeno i jeho korozní chování.

Studie ukázaly, že změna korozních vlastností závisí na procesu LSP, vlastnostech materiálu a prostředí, ve kterém se součást používá.

Zpracováním oceli AISI 316 SS se prokázalo zlepšení v korozního potenciálu při zvyšování hustoty energie v pulzu laseru [110]. Změna korozního chování byla sledována také v případě hliníkové slitiny AA2050-T8. Ovlivněný vzorek nevykazoval mezikrystalovou korozi. Oproti tomu neovlivněný vzorek ve stejném prostředí a při stejném zatížení vykazoval korozní praskání [142].

Korozní praskání pod napětím (SCC) je zapříčiněno růstem trhliny v důsledku agresivního prostředí a namáhání (často cyklického) v tahu. V nynější době se pro díly namáhané tímto druhem namáhání začíná používat LSP. Výhodou je hlavně indukce tlakových zbytkových napětí, které mají za následek zjemnění zrna a částečné zastavení trhlin [200].

Profesorem Scherpereelem [213] bylo zkoumáno chování SCC austenitické a martenzitické nerezové oceli v 1 % roztoku NaCl + 1 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Vzorky zpracované LSP vykazovaly zlepšenou odolnost proti SCC snížením proudového potenciálu a zvýšením tlakových zbytkových napětí v povrchu. U slitiny AISI 304SS a niklových slitin bylo také prokázáno zvýšení odolnosti proti SCC [214]. Výsledky ukázaly, že všechny nezpracované vzorky měly trhliny, zatímco zpracované vzorky nevykazovaly žádné trhliny (SCC), (Obrázek 58) [182].



Obrázek 58 Mikrostruktura příčného řezu vzorku AISI 304SS zatíženého SCC [182]

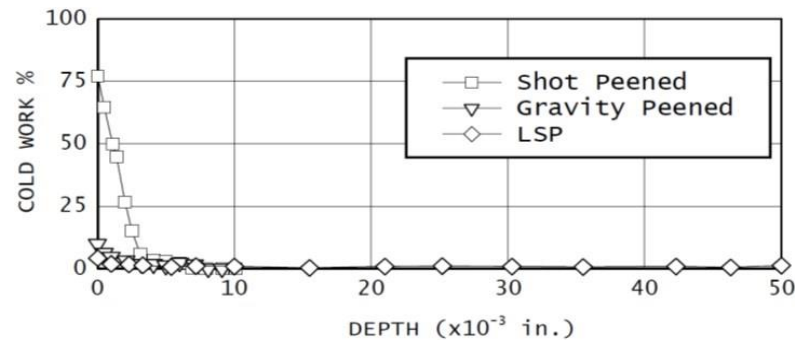
LSP může být řešením proti SCC pro různé materiály v díky vnášení zbytkových tlakových napětí do povrchové vrstvy [215][216].

### 3.3.11 Vliv Laser Shock Peening na relaxaci zbytkových napětí a stabilitu

Uvolnění zbytkových napětí je předmětem zájmu například u lopatek kompresoru, [217]. Relaxace může mít za důsledek buď přímé přerozdělování, nebo uvolnění indukovaných napětí. Existují tři mechanismy primární příčiny relaxace napětí [217], jedná se o přesažení statického tlaku, cyklické zatížení blízko nebo nad limitem nízkocyklické únavy nebo tepelná expozice. Testování při velmi vysoké úrovni napětí uvolňuje zbytková napětí vyvolané LSP [115].

Měření na AISI 304 ukázala, že nárůst teploty při provozu vedl k větší relaxaci zbytkového napětí [89].

Prof. Prevey [217] se zabýval relaxací indukovaných tlakových zbytkových napětí vyvolaných SP a LSP v materiálu Ti-6Al-4V a Inconel 718 při zvýšených teplotách. Bylo ověřeno, že relaxace napětí je přímo úměrná vyšší hustotě dislokací a vnitřní energii materiálu. Zpracované vzorky Ti-6Al-4V metodou SP vykazovaly pouze malou relaxaci při 475 ° C a žádnou relaxaci při LSP u materiálu Inconel 718 při 670 ° C [217]. Tento jev byl přičítán především nízké úrovni tváření za studena z LSP procesu [217].



Obrázek 59 Profil tváření za studena slitiny Ti-6Al-4V při rřech různých zpracováních [217].

Obrázek 59 ukazuje procento tváření za studena indukované SP a LSP procesem na materiálu Ti-6Al-4V. Z tohoto obrázku je zřejmé, že SP indukuje 75% pro tváření za studena ve srovnání s pouze asi 5% z LSP. Při teplotě v rozmezí 400 až 500 ° C. Z tohoto důvodu přibližně polovina tlaku ve vrstvě relaxuje u materiálu Ti-6Al-4V i IN718 [217].

Relaxace napětí může být dále ve vzorku snížena, pokud byly vzorky zpracovány při zvýšených teplotách. Tento přístup se osvědčil při stabilizaci tlakových napětí uzamčením cestujících dislokací [99][146][147].

Stability indukovaných zbytkových napětí může být také dosaženo kombinací laserového slinování (přetavování), (LS) a LSP. Tato metoda byla použita na ocel AISI 4140, kde za pomoci LS byly na povrchu vytvořeny supertvrde nanočástice, zatímco LSP rázovou vlnou spojilo povrchovou vrstvu s podkladem.

Kombinace LS + LSP vykazovala lepší vlastnosti únavové životnosti ve srovnání se samotným LSP. To bylo přičítáno zvýšenému namáhání a pevnostní stabilitě [218][109].

### 3.4 Přínos volby vhodné měřicí metody zbytkového napětí po LSP

Technologie LSP je ve světě relativně známou a používanou technologií. Každé pracoviště zabývající se touto technologií používá k validaci výsledků zbytkových napětí většinou jednu metodu měření. Ve většině případů je touto metodou odvrtávání nebo měření za pomoci rentgenu. Některé instituce posílají vzorky na prozáření v urychlovači, jako referenci k jejich laboratornímu měření. Měření v urychlovači je velmi nákladné díky vysoké ceně zařízení a často i velmi zdlouhavé, protože pro sadu měření musí být dopředu zarezervovaný čas. Probíhá tedy i porovnání mezi jednotlivými metodami, ale stále panují neshody o tom, která metoda může být považována za spolehlivou pro danou hloubku ovlivnění.



Navíc s rozvojem laserových zdrojů rostou i možnosti zpracování a narůstá i počet aplikací pro dokončovací technologii laser shock peening. Díky stále se zvyšujícím parametrům laserů výrazně roste i rychlost ovlivnění. V minulosti byla metoda LSP používána pouze pro velmi náročné aplikace (lopatky motoru bojových letounů). Vývoj dokončovací operace pro takto složitou součást mohl trvat i několik let. Dnes postupně přechází tato technologie i k ovlivňování lopatek motorů dopravních letadel, rámců letadel, cyklicky namáhaných konstrukcí, svarů jaderných reaktorů nebo menších součástí [223]. Rostou tedy i nároky na rychlost validace dosažených vlastností.

Většina institucí se zabývá dosažením co nejpřesnějšího modelu zbytkových napětí v materiálu. V řadě případů se provádí modelování za pomoci MKP, ale zatím chybí nástroj pro jednoduché určení vhodné metody měření. Pro průmyslové aplikace (obzvláště letecký průmysl) jsou ale rozhodující výsledky měření zbytkových napětí.

Pro letecké aplikace nyní je validovaná metoda měření za pomoci rentgenového záření. Rentgenová metoda je založena na měření změny meziatomární vzdálenosti. Z rozdílu změřené meziatomární vzdálenosti oproti ideálnímu stavu materiálu je možné spočítat zbytková napětí ve všech směrech. Dochází však k separátnímu měření zbytkových napětí jednotlivých fází vícefázového materiálu. Každá z těchto fází může obsahovat rozdílná zbytková napětí a dostáváme tak obraz i nestability uvnitř materiálu. Destruktivní metody, jako je například metoda odvtávání nebo odleptávání, dávají ucelenou informaci o makroskopickém chování celého povrchu vůči okolnímu prostředí. Tento pohled je v řadě případů důležitější, než znalost rozdílů uvnitř materiálu.

Pro budoucí vývoj metody LSP ale i ostatních dokončovacích metod by byla vhodná validace dalších metod měření zbytkových napětí. Například firma General Electric používá pro měření zbytkových napětí na lopatkách oběžných kol leteckých motorů rentgen, a jako referenční metodu používá metodu odleptávání (vetknutého nosníku). Navzdory rozdílným principům měřicích metod existují již první výzkumy, které porovnávají jejich výsledky. Žádná literatura se zatím nezabývá určením měřicí metody v závislosti na predikované hloubce ovlivnění. Pro zrychlení celého procesu měření a ověření měřených výsledků by bylo vhodné se také věnovat vzájemnému porovnávání metod měření a zvážit možnost jejich validace.

Ve výsledku o použitelnosti technologie rozhodují celkové náklady na proces ovlivnění, kde část vytyčená na měření zbytkové napjatosti není zanedbatelná. Pokud se tedy podaří určit spolehlivou metodu měření na základě vstupních parametrů, může se jednat i o rozhodující faktor, který určí, zda technologie LSP bude nebo nebude použita.

### 3.5 Shrnutí a dílčí závěry teoretické části

V teoretické části byly popsány metody ovlivnění povrchové vrstvy a podrobně metoda ovlivnění Laser shock peening. U metody Laser shock peening byly podrobně rozebrány jednotlivé parametry a jejich vliv na integritu povrchu. V podléšné kapitole byly popsány metody měření vhodné pro povrchy ovlivněné technologií Laser shock peening.



### 3.5.1 Metody ovlivnění povrchové vrstvy

Existuje celá řada metod pro ovlivnění povrchové vrstvy výrobku. Hlavní rozdíly jsou v dosahované míře zbytkových napětí, ovlivnění ostatních přidružených vlastností, přesnosti cílení na povrch a všeobecné aplikovatelnosti dle tvaru a velikosti součásti. Dokončování pro vnášení tlakových zbytkových napětí je ve většině případů spojeno se snižováním drsnosti povrchu a změnou dalších vlastností. Při válečkování, kalibrování nebo superfinišování je využíváno efektu síly působící na povrch jak pro zlepšení drsnosti, tak i pro vnesení zbytkových napětí. Dokončování povrchové vrstvy má významný vliv na únosnost cyklické únavy. Nejlépe na cyklickou únavu působí kombinace zvyšování tlakových zbytkových napětí a snižování drsnosti.

### 3.5.2 Vliv metody LSP na integritu povrchu

Metoda LSP velmi ovlivňuje integritu povrchu zpracovávané součásti. Hlavním důvodem jejího použití je vnášení tlakových zbytkových napětí z důvodu zabránění šíření a iniciaci únavových trhlin. Ovlivňovány jsou i další vlastnosti povrchu. Po zpracování mírně vzrůstá tvrdost a mění se i struktura povrchové a podpovrchové vrstvy. Dále dochází ke změně drsnosti, která je ovšem velmi závislá na použití ochranné ablační vrstvy.

Největší výhodou technologie LSP je možnost velké hloubky vnesených zbytkových napětí a jejich přesné zacílení na povrch. Opracováním je dosaženo i výrazného zlepšení odolnosti povrchu proti kavitaci a korozního praskání při napětí.

Největší nevýhodou je nízká produktivita zpracování a tedy i jeho cena. S vývojem laserových zdrojů však dochází k postupnému zrychlování a zlevňování technologie.

Aplikace LSP začala být komerčně využívána pro zpracování lopatek rotoru leteckého motoru bojových letounů. Za několik posledních let se laseru začalo využívat i pro zpracování běžných leteckých motorů. LSP si nyní nalézá své místo i při výrobě vodních turbín pro zvýšení odolnosti proti kavitaci. Speciální aplikace je pro ovlivnění opláštění jaderného reaktoru. Se snižující se cenou a zvyšující rychlostí, začíná být rázová vlna vyvolaná laserem používána na konstrukce letadel a očekává se, že během několika let přejde do dalších průmyslových odvětví.

### 3.5.3 Vybrané metody měření

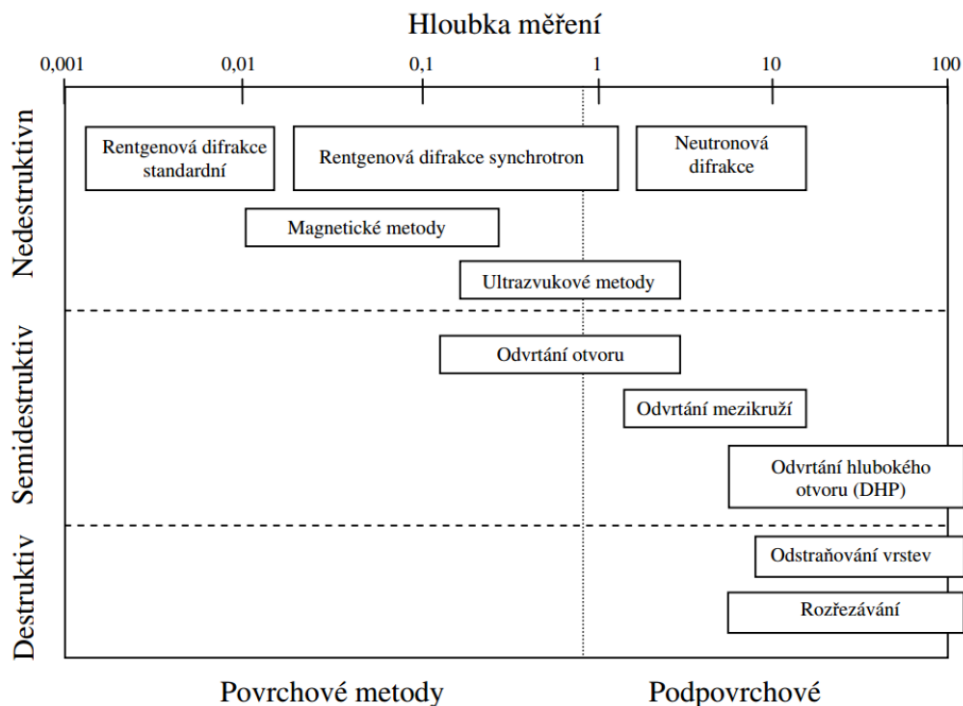
Pro měření zbytkových napětí byly vybrány metody měření. Tyto metody byly vybrány na základě jejich dostupnosti a četnosti používání pro měření zbytkových napětí. Velmi hojně je používána metoda měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií. Metoda měření rentgenem je hodnocena jako referenční metoda, jejíž výsledky jsou směrodatné a mohou být použity i pro letecký průmysl. Stejně tak tomu je i v případě metody měření odvrtáváním. Odvrtávání je ovšem založeno na principu měření deformace povrchu.

Metoda odleptávání (vetknutého nosníku) je používána v České republice přednostně pro rychlé zjišťování napětí především titanových dílců. Výhodou metody elektroerozivního odleptávání je aplikace na stejné dílce ze stejných materiálů, které jsou ovlivňovány metodou LSP. Oproti metodě odvrtávání nevadí zvýšená tvrdost povrchu.

Měření ostatních vlastností povrchu součásti bylo realizováno základními metodami. Tvrdost byla měřena dle Vickerse, drsnost profilometrem a úchytky tvaru a polohy souřadnicovým měřicím strojem.

### 3.5.4 Porovnání jednotlivých metod měření

Literatura zaměřená na rozdílné metody měření a metodu ovlivnění LSP popisuje rozdílné výsledky při měření povrchových napětí různými metodami. V drtivé většině případů se jedná o popsání změřených výsledků zbytkových napětí a jejich vztahu k dalším provozním vlastnostem součásti. Část literatury se zabývá porovnáním jednotlivých metod. Existuje hrubé rozdělení jejich použitelnosti v závislosti na hloubce měření. Toto rozdělení však neobsahuje míru přesnosti v závislosti na hloubce a případné doporučení kombinace zvolených metod (Obrázek 60).



Obrázek 60 Doporučení vhodné metody měření závislé na hloubce ovlivnění[3]

Se stále se zvyšující rychlostí rozvoje technologie LSP je vhodné predikovat přibližnou hloubku ovlivnění pro zvolené parametry a na jejím základě doporučit vhodnou měřicí metodu zbytkového napětí.

Technologie LSP ovlivňuje povrch do hloubky od 0,1 mm až přes 1 mm, tato oblast se nachází ve střední oblasti grafu (Obrázek 60). K měření středních hloubek ovlivnění se nejčastěji používá metoda odvrtávání, nebo metoda rentgenové difrakce v kombinaci s odleptáváním povrchu. Dále lze využít ultrazvukové metody, které již nejsou běžné, nebo metodu rentgenové difrakce synchrotronem. Porovnáním výsledků metod měření se zjistí rozptyl naměřených hodnot a celková spolehlivost měření při použití různých metod měření. Všechny Výsledky měření budou porovnány s vytvořeným teoretickým modelem, který bude tímto porovnáním verifikován. Budou dány do souvislosti vybrané parametry technologie ovlivnění s výsledky měření a hodnotami modelu.





### 3.6 Cíle disertační práce

Prvním cílem doktorské práce je na základě teoretických poznatků specifikovat technologii Laser shock peening, závislost velikosti zbytkového napětí na technologických parametrech a určit možnosti a omezení technologie. Následně popsat konvenční i nekonvenční metody zpracování povrchu součástí pro možnost porovnání využitelnosti technologie Laser shock peening.

Druhým cílem práce je určit vhodné metody měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou LSP v závislosti na předpokládané hloubce ovlivnění. U měření zbytkových napětí v povrchu i u dalších vlastností lze předpokládat rozdílné výsledky oproti konvenčním metodám dokončování. Rozdíly při určování měřicí metody lze předpokládat hlavně z důvodu větší hloubky ovlivnění a tím změně přesnosti měření a to hlavně hluboko pod povrchem. Výběr metody můžou ovlivnit také rozdílné náklady na měření kvůli potřebě vytváření hloubkového profilu vlastností dosahujícího až několik milimetrů.

Posledním cílem práce je provést ekonomickou analýzu LSP procesu a použitých metod měření. Bude vyjádřena závislost nákladů na míře a hloubce ovlivnění zpracovávaného povrchu.

### 3.7 Metody dosažení cílů

Problematika metody Laser Shock Processing je popsána s důrazem na dosažitelné vlastnosti, procesní parametry a možnosti jejich měření. V praktické části bude vytvořen model zbytkových napětí. Model bude sestaven na základě průchodu tlaku v poloprostoru stejnorodým materiálem. Jedná se o průchod tlakové vlny homogenním a izotropním elastickým materiálem. Model bude řešen bez zpětných odrazů od povrchu. Při průchodu materiálem za sebou elasticky se propagující vlna zanechává plastickou deformaci ohraničenou maximálním možným zatížením materiálu.

V druhé fázi bude změřeno zbytkové napětí na vzorcích ovlivněných metodou LSP. Měření bude provedeno třemi různými metodami a výsledky budou mezi sebou porovnány. Následně bude provedeno porovnání měření s teoretickým modelem. Bude určena shoda modelu s reálným měřením. Na základě porovnání bude vytvořena rozhodovací analýza použitelnosti metod pro různé vstupní parametry laseru a materiálové vlastnosti. Model bude verifikován měřením, kde v první fázi budou porovnány vypočtené hodnoty s hodnotami z původních měření a následná rozhodující analýza bude sloužit nejen pro určení používaných metod, ale také pro možnost využitelnosti a predikce základních parametrů.

Jako součást disertační práce bude provedena ekonomická analýza procesu LSP za použití velkého průměrného výkonu. Také bude vytvořen příklad zakázky ovlivnění metodou LSP a vypracována rozvaha měření zbytkových napětí pro tento typ ovlivnění. Při realizaci disertační práce vznikne LSP stanice, vhodná pro prototypové ovlivňování vzorků. Tato stanice by měla sloužit pro zjišťování vhodných a limitních parametrů ovlivnění povrchu, jak z pohledu dosažitelného zbytkového napětí pro zvýšení únavové životnosti, tak z pohledu ekonomických aspektů technologie (příznivý efekt ovlivnění / produktivita / náklady na výrobu).





### 3.8 Ověření dosažení cílů

Ověření cílů je potřeba rozdělit do dvou samostatných kroků. Prvním krokem bude postupné porovnávání naměřených hodnot s vytvořeným modelem a určení oblasti shody pro jednotlivé metody po celém průběhu zbytkového napětí. V druhém kroku bude metoda rychlé validace aplikována na ovlivněný vzorek, který bude změřený vybranou metodou. Bude vyhodnocena shoda s teoretickým modelem. Na základě shody bude vyhodnocena spolehlivost predikce. Při dobré shodě bude možné brát model jako směrodatný a na jeho základě vybrat vhodnou měřicí metodu, která bude určena na základě porovnání velikosti shody každé metody v dané hloubce zpevnění.

Dále bude následovat ověření pro různé druhy materiálu, jejichž materiálové vlastnosti vstupují do výpočtového modelu a stejným způsobem se projeví i při samotném ovlivnění a ověření velikosti a hloubky zbytkových napětí. Právě z důvodu různorodosti ovlivňovaných materiálů je výběr vhodné metody velmi důležitý. V nynější době je největší zájem o metodu ovlivňování z jaderného průmyslu. Kde jsou značné rozdíly vlastností používaných materiálů. Navíc každá součást může být řízeně ovlivňována do různé hloubky, neznamená tedy, že při nalezení vhodného ovlivnění určitého materiálu jsou jasně definované všechny parametry výsledného povrchu. Výpočet zbytkových napětí pomocí modelu je tedy pro další typy ovlivnění velmi potřebnou a zároveň jednoduchou možností predikce zbytkového napětí a doporučení vhodné metody měření.

Jako součást práce bude vytvořena ekonomická analýza zpevnění povrchu při použití vybraných procesních parametrů a budou vypracovány závislosti nákladů na těchto parametrech. Dále bude zhodnocena i ekonomická náročnost jednotlivých metod měření, která především při malosériové výrobě může proces ovlivnění značně prodražovat.

Výsledky disertační práce poslouží pro praktické účely zavádění metody laser shock peening pro další průmyslové oblasti. Vhodným způsobem ověření cílů disertační práce je aplikace postupu zjištění vhodné metody na nově ovlivňovaný materiál, odhadu výsledných parametrů a určení celkové ceny ovlivnění. Navíc díky podrobnému souhrnnému popisu problematiky je možné vysvětlit jednotlivé vlivy parametrů technologie konečným uživatelům.



## 4 Výběr metody měření povrchových zbytkových napětí pro metodu LSP

Disertační práce pojednává podrobněji o LSP procesu s důrazem na generování rázových vln, procesní parametry, charakteristiky laserem zpracovaných vzorků, současných i budoucích aplikací, jakož i výzvy pro proces LSP. Aplikace LSP přímo souvisí s možností dosahovaných výsledků na zbytková napětí, mikrostrukturu, drsnost povrchu a mechanické vlastnosti. Nedílnou součástí jakékoli aplikace progresivních technologií je proces ověřování dosahovaných vlastností a jejich validace. S rozvojem metody LSP prudce roste rychlost ovlivňování, je tedy velký tlak na urychlení procesu validace vlastností zpracovaného dílce.

Data průběhů zbytkových napětí a dalších vlastností byla naměřena na definovaných vzorcích převážně na pracovištích ČVUT. Další data byla naměřena na Fyzikálním ústavu akademie věd nebo na pracovištích, které mají podepsané s FZÚ memorandum of understanding. Zbylá data byla převzata z literatury. Kromě doporučení vhodné metody měření zbytkových napětí jsou doporučeny i metody měření ostatních vybraných vlastností povrchu materiálu.

Jako dílčí cíl disertační práce byla zpracována studie aplikovatelnosti technologie na nové okruhy dílců. Součástí studie je i ekonomický model obsahující porovnání dosud používaných technologií. Pro měření zbytkových napětí je řada metod, které mají rozdílné charakteristiky a výhody při různých způsobech použití. Tyto metody se primárně liší v možnostech měření hloubky zbytkových napětí pod povrchem. Dále pak v možné rychlosti měření, dostupnosti měření nebo přesnosti měření.

V úvahu připadaly metody, které jsou schopny a to jak přímo, tak nepřímo zjistit zbytková napětí v hloubce větší než 1 mm a zároveň jsou univerzální ve smyslu možnosti použití na různé druhy kovových i nekovových materiálů. Metoda LSP má navíc již své využití v letectví, proto existují metody, které jsou validovány pro použití na ovlivněné součásti letadel. Jedná se o metodu rentgenové difrakce a metodu odvtávání. Rentgenová difrakce se používá v kombinaci s postupným odebráním povrchu právě pro možnost zjišťování zbytkových napětí ve vrstvách pod povrchem až do hloubky více než 1 mm. Oproti tomu metoda odvtávání dává přímo ucelenou informaci o profilu zbytkového napětí na jeden průchod a používá se jak pro hliníkové slitiny, tak i pro nerezové oceli nebo titanové slitiny. Obě tyto metody byly vybrány pro porovnání s modelem zbytkových napětí. Jako třetí metoda měření pro možnost porovnání s modelem byla vybrána metoda vetknutého nosníku (postupného elektrolytického rozpouštění). A to hlavně z důvodu dostupnosti této metody. Jak již bylo popsáno, právě tato metoda je vybranými výrobci leteckých komponent používána jako poměřovací k rentgenové difrakci, případně odvtávání. Tím, že je metoda vetknutého nosníku, stejně jako odvtávací metoda, založena na snímání deformace závislé na odebrání povrchu materiálu může se mezi nimi provádět i velmi jednoduché porovnání.

Další alternativou by mohla být metoda měření zbytkových napětí prozařování v urychlovači (neutronová difrakce). Tato metoda je velmi časově i finančně náročná, z tohoto důvodu nebylo možné jí do testů zařadit. Na termín experimentu v urychlovači je potřeba se přihlašovat s ročním předstihem a ani poté není jistota, zda bude přidělen,



protože se pro tento druh experimentů přiděluje na základě komisního posouzení nebo losování. Pro experiment měření zbytkového napětí touto metodou jsou vzorky zpracované LSP již přihlášeny, ale předpokládáme jejich měření příští nebo následující rok. Vyčkat s měřením je v nynější době výhodné, z důvodu získání času na popsání vlastností vzorků ostatními metodami. Pečlivou přípravou je možná redukce počtu měření vzorků v urychlovači. Tato metoda ovšem není vhodná pro posuzování rozhodovací analýzou, která je vhodná právě pro rychlou validaci a tedy možnost okamžitého rozhodování pro danou metodu. Pro využití urychlovače je spíše vhodné simulovat zbytkové napětí metodou konečných prvků, kde získáme relativně přesný teoretický výsledek a můžeme následně porovnávat i další jevy, jako je chování povrchové vrstvy ovlivněné součástí.

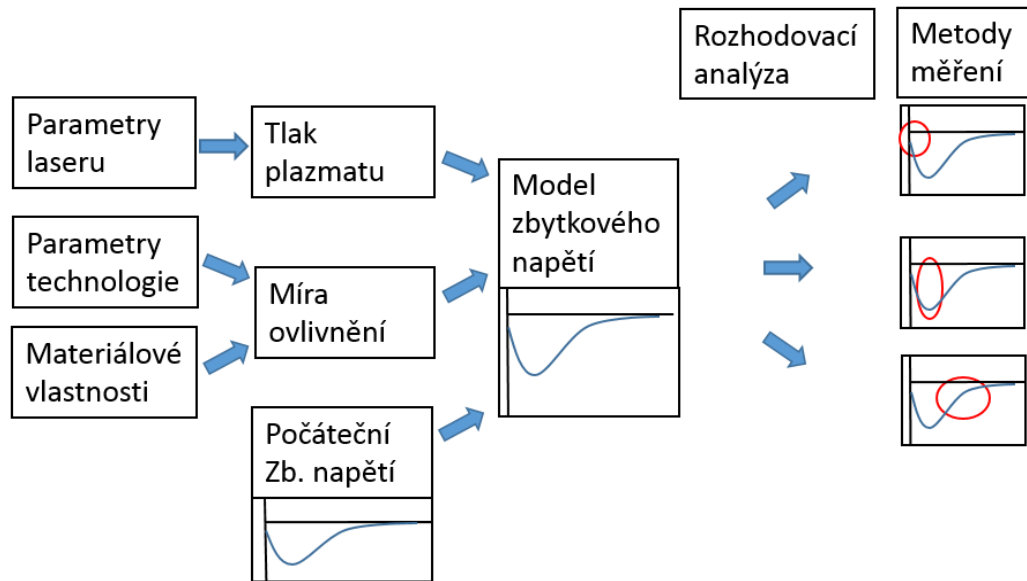
#### 4.1 Výpočetní model zbytkových napětí

Existuje řada, často i velmi složitých, modelů řešení problematiky zbytkových napětí v materiálu vyvolaných metodou LSP. V řadě případů se instituce, které provádí výzkum ovlivňování touto technologií, zabývají modelací dosažených vlastností. Jedná se o výzkumný tým z Madridu pod vedením prof. Ocany, dále pak skupinu v Cincinnati pod vedením prof. Mannavy. Další významné skupiny pracující na technologii LSP působí v Itálii, Francii a Číně.

Ve většině případů se jedná o dosažení co nejpřesnějšího modelu popisujícího realitu. Těchto modelů lze dosáhnout pomocí metody konečných prvků nebo empirickým odvozením závislostí z hodnot získaných měření.

V případě navržené metodiky v této práci se ovšem jedná o základní, ale propracovanou a ucelenou rozhodovací analýzu pro volbu vhodné metodiky měření. Model slouží pro zjištění maximální hloubky zpevnění, maximální velikosti zpevnění a hloubky této maximální velikosti. Každá metoda měření je vhodná pro jinou hloubku zpevnění a hloubku bodu zvratu. Na základě této predikce je možné vybrat vhodnou metodiku měření.

Metodami měření zbytkového napětí byly změřeny vzorky ovlivněné metodou LSP při různých parametrech. Dílce zpracované metodou LSP jsou v drtivé většině podrobeny měření zbytkových napětí, proto stačí odhad se sníženou přesností, ale rychlými výsledky, který rozhodne o metodice měření. Tím lze ušetřit náklady a čas potřebný na komplexní analýzu zbytkových napětí. Rozhodovací analýza má zvětšující se význam s možností použití větší energie v pulzu a tím zrychlení celého procesu ovlivňování. V nynější době lasery používané pro ovlivňování metodou LSP mají desetkrát vyšší výkon, než tomu bylo před několika lety[248].



Obrázek 61 Schéma modelu pro rozhodnutí použití vhodné měřicí metody zbytkového napětí

Do modelu vstupují parametry laseru, které ohraničují možnosti technologie a udávají možnosti tvorby tlaku plazmatu na povrchu. Z parametrů laseru jsou nejdůležitější jeho vlnová délka, na které přímo závisí průchod krycím médiem a interakce s ablační vrstvou. Dále pak délka pulzu, která se přímo podílí na rozvoji plazmatu a tím i tlaku plazmatu dosaženém na povrchu součásti. Laser pracuje při neměnné frekvenci 10 Hz, která lineárně ovlivňuje produktivitu. Důležitým faktorem je i profil a kvalita svazku, pro dosažení homogenity ovlivnění. Parametry laseru částečně s parametry technologie určují výsledný tlak plazmatu na povrchu materiálu, který je rozhodující pro počáteční podmínky šíření rázové vlny[242].

Technologické parametry laserového zpracování, jako je intenzita výkonu, velikost spotu na povrchu součásti, překryv jednotlivých pulzů v řádce nebo ploše ovlivňují výsledné vlastnosti zpracovávaného povrchu, tak i produktivitu procesu. Výsledné vlastnosti jako je například drsnost, nebo textura povrchu je přímo závislá na hloubce jednotlivých ovlivnění a na jejich překryvu v jednotlivých osách.

Materiálové vlastnosti jako jsou absorpce materiálu dané vlnové délky laseru, mez pevnosti, modul pružnosti nebo i rychlost zvuku v materiálu určují chování materiálu při zasažení rázovou vlnou (Obrázek 61). Materiálové vlastnosti společně s parametry technologie stanoví jaké velké a do jaké hloubky bude výsledné zbytkové napětí dosahovat. Při známých veličinách laseru, technologie i materiálových vlastnostech je možné vytvořit model zbytkového napětí. Tento model může být ještě obohacen o zadávání výchozích vlastností povrchové vrstvy, které se sečte s napětím vyvolaným technologií[242][244][252].

S použitelností technologie LSP pro nové aplikace úzce souvisí nejen její následná validace ale i ekonomická analýza. Hlavním ukazatelem použitelnosti metody je její ekonomická výhodnost, která je popsána, faktory příznivého přínosu technologie na součást a nákladů potřebných pro její zpracování. Byla zhotovena ekonomická analýza, pomocí které jsou odhadovány hodinové náklady a citlivost těchto nákladů na jednotlivé parametry technologie nebo fixní či variabilní náklady[252].



#### 4.1.1 Modelace tlaku vyvolaného plazmatem

Pro modelaci tlaku na povrchu materiálu vyvolaného plazmatem je potřeba určit intenzitu energie. Intenzita energie je vyjádřena jako funkce frekvence, doby pulzu, výkonu a velikosti spotu, jak je uvedeno v rovnici (4.1). Ostatní parametry jsou absorpce energie laseru, jak je uvedeno v rovnici (4.2), zatížení nebo tlak ( $P$ ), který musí být větší než dynamická mez kluzu pro zaručení plastické deformace,

Intenzita [78]:

$$(4.1) \quad I \left( \frac{GW}{cm^2} \right) = \frac{P_{avg}}{f (pt) a}$$

kde,  $I$  je hustota výkonu laseru v  $GW / cm^2$ ,  $P_{avg}$  je průměrný výstupní výkon ve  $W$ ,  $f$  je laserová frekvence v  $Hz$ ,  $pt$  je doba impulsu v  $ns$ , a  $a$  je laserová stopa plocha v  $cm^2$ . Fluence laseru [78]:

$$(4.2) \quad Fluence \left( \frac{J}{cm^2} \right) = \frac{Laser \ pulse \ energy \ (J)}{focal \ spot \ area \ (cm^2)}$$

Rovnice (4.3) obsahuje konstanty na základě experimentálních pozorování. Velká rozmanitost konstant je přičítána typu ablační vrstvy [16], příkrývacího média [207] a vlastnosti cílového materiálu [144][197]. Tento model je popisován dle rovnice (4.3). Tlak na povrchu materiálu [16][102][207][144][197][117]:

$$(4.3) \quad P(GPa) = 0.01 \left( \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} I^{1/2}$$

Kde  $\alpha$  je poměr tepelné k vnitřní energii,  $Z$  je redukovaná impedance cílového materiálu a překrývacího média,  $\theta$  je Poissonův poměr.

Rovnice (4.4) ukazuje sníženou velikost impedance tlaku při procesu ( $Z$ ), kde materiál vzorku ( $Z_1$ ) a příkrývacího media ( $Z_2$ ) se vztahuje k hustotě a rychlosti zvuku v materiálu. Redukovaná Impedance [77]:

$$(4.4) \quad \frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

Hugoniot Elastický Limit ( $HEL$ ) [197]:

$$(4.5) \quad HEL = \frac{1 - \theta}{1 - 2\theta} \sigma_y^{dyn}$$

Rovnice (4.5) ukazuje mez pružnosti ( $HEL$ ), neboli nejvyšší napětí, které materiál může vydržet v tlaku, aniž by došlo k jeho plastické deformaci [224]. Proces optimalizace technologie může být velmi složitý, zejména pokud se jedná o mnoho parametrů. Jeden z nejdůležitějších parametrů je stejnorodost tlaku v místě ovlivnění. Tabulka 6 uvádí typické hodnoty akustické impedance pulzu pro různá příkrývací média a materiály ovlivňovaného vzorku.

*Tabulka 6 Typické hodnoty  $Z_1$  a  $Z_2$  pro různé materiály.*

<b>Materiál</b>	<b><math>Z_1 \times 10^6</math> (g/cm<sup>2</sup>s)</b>	<b>Krycí medium</b>	<b><math>Z_2 \times 10^6</math> (g/cm<sup>2</sup>s)</b>
Ti-6Al-4V	2.75 [89][65]	Water	0.17 [89][65]
AA7050-T7451	1.50 [197][77]	Perpex	0.32 [88][64]
SS304	3.61 [92][68]	Silicon rubber	0.47 [88][64]
Mg-Ca	0.88 [117][79]	K9 Glass	1.14 [88], 1.5 [92]
AISI 4140	3.96 [99][69]	Quartz Glass	1.31 [88][64]
Cu	0.16 [80]	Pb Glass	1.54 [88][64]
SS321	4.00 [185][81]	BK Glass	1.44 [99][69]

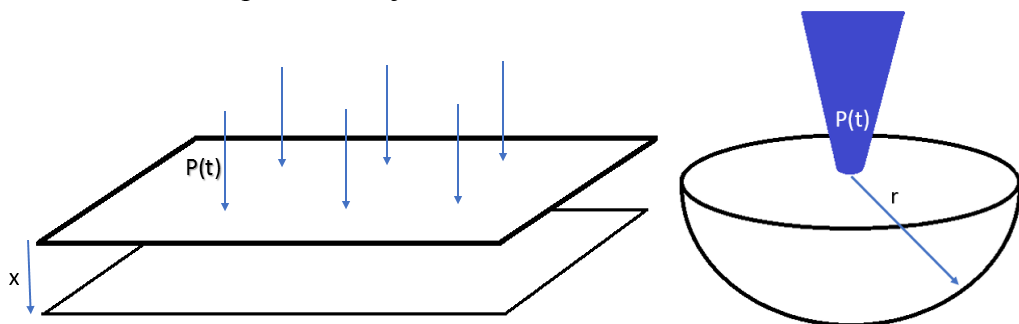
Výběr nejučinnějších parametrů technologie je velmi důležitý a to jak z důvodu výsledných vlastností zpracované vrstvy, tak i z důvodu produktivity celého procesu. Výběru vhodných parametrů může být nejlépe dosaženo experimentální prací podpořenou simulací.

#### 4.1.2 Modelace šíření tlaku materiálem

Vypočtený tlak v plazmatu na povrchu materiálu byl použit pro výpočet šíření tlaku materiálem. Průběh tlaku byl vypočítán pomocí Half-space modelu za předpokladu rovnoměrné trakce povrchu. Tento model je založen na lineární propagaci pomíjivých vln tlaku v materiálu.

Pohyb vlny se generuje na povrchu, homogenně, izotropně elasticky v jednostranném vzorku. V modelu se předpokládá použití prostorově rovnoměrné povrchové tlaku  $p(t)$  s maximální úrovní definovanou obecným vzorcem (4.11).

Budeme-li předpokládat, že jednostranný vzorek je definován  $x \geq 0$  ( $s \ x = 0$  na povrchu vzorku) a normálové napětí ve směru  $x$  je  $\tau(x, t)$ , zbytkové napětí  $\tau_z$  je pak odvození normálového napětí  $\tau$  ve stejném směru (Obrázek 62) [225][252].



Obrázek 62 Výpočet zbytkového napětí na základě povrchového tlaku, času a vzdálenosti od povrchu pro rovinný nebo bodový tlak.

Šíření vlny prostorem ve sférických souřadnicích pak popisuje následující rovnice

$$(4.6) \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad , \quad u = u(r, t) \text{ pro poloprostor [225]}$$





Využitím Fourierovy transformace lze z parciální diferenciální rovnice v časové doméně, přejít k obyčejné diferenciální rovnici ve frekvenční doméně. Tato rovnice pak má tvar:

$$(4.7) \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U(r, \omega)}{\partial r} \right) = -\frac{\omega^2}{c^2} U$$

Šíření vlny je pak popsáno ve frekvenční doméně funkcí  $U(r, \omega)$ . Řešením rovnice (4.7) ve frekvenční doméně lze vyjádřit ve tvaru:

$$(4.8) \quad U(r, \omega) = \frac{C1(t)e^{\frac{irv}{c}}}{r} + \frac{CR(t)e^{\frac{ir\omega}{c}} e^{-\frac{2ir\omega}{c}}}{2r\omega} i$$

Vztah mezi deformací a napětím je daný rovnicí:

$$(4.9) \quad \tau(r, t) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \omega}{\partial r} [225]$$

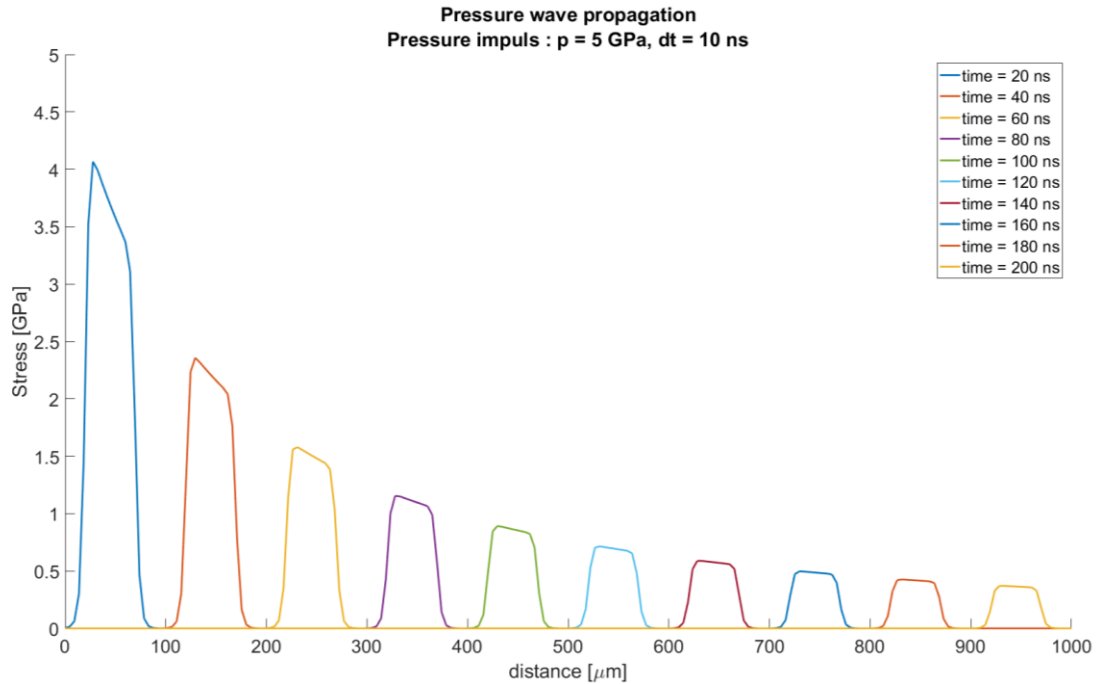
S okrajovou podmínkou:

$$(4.10) \quad \tau(0, t) = -p(t) [225][120]$$

Dosazením inverzní Fourierovi transformace rovnice (4.8) do rovnice (4.9) a využitím okrajové podmínky (4.10) lze napětí vyjádřit ve tvaru [225][252]:

$$(4.11) \quad \tau(r, t) = D \frac{p\left(t - \frac{r}{c}\right)}{r^{\frac{3}{2}}}$$

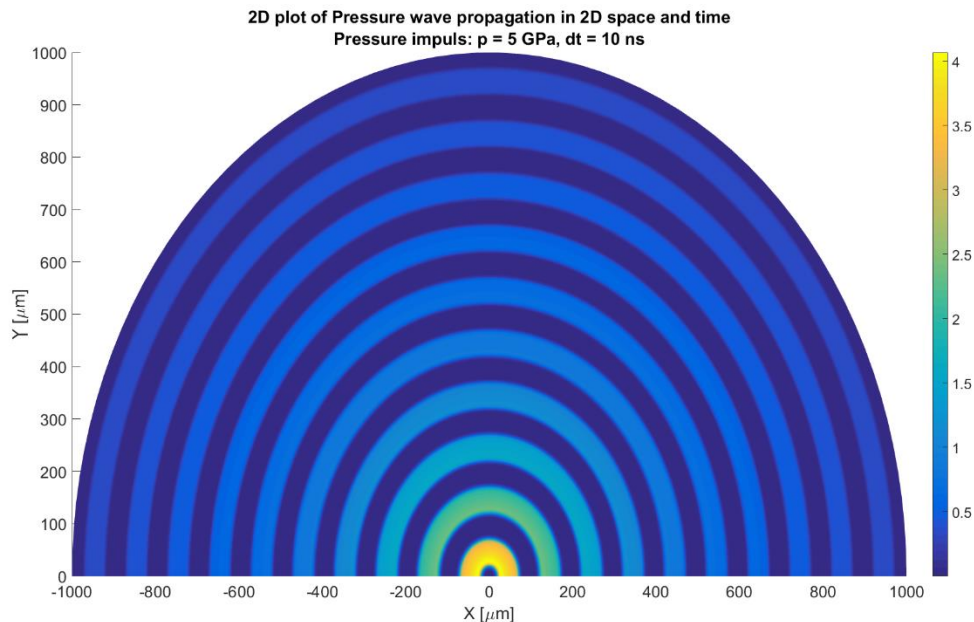
Při dosazení tlaků a časů do rovnice, vznikne graf závislosti napětí na vzdálenosti od povrchu materiálu. Propagace rázové vlny jde od maximálního tlaku dosaženého na povrchu za pomoci plazmatu směrem do materiálu, kde je postupně absorbována. Vzhledem k velmi malé délce pulzu při prostupu směrem do materiálu povrchový tlak postupně vymizí. Je velmi složité dokonale popsat dynamiku plazmatu na povrchu materiálu, kde dochází nejprve k postupnému nárůstu tlaku, až do jeho maxima a následné ztrátě tlaku expanzí plazmatu směrem od materiálu. Část tlaku na povrchu materiálu zůstává i po odeznění působení laseru. Tyto jevy byly zanedbány a bylo použito zjednodušení při uvažování maximálního tlaku po dobu působení laseru. V simulaci je uvažováno s maximálním tlakem  $p$  odpovídajícím 5 GPa a dobou interakce laseru s povrchem materiálu 10 ns (Obrázek 63). Tyto parametry odpovídají procesním parametrům zpracování titanových slitin při použití laseru Bivoj ve výzkumném centru HiLASE v Dolních Břežanech [248][252].



Obrázek 63 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns[252].

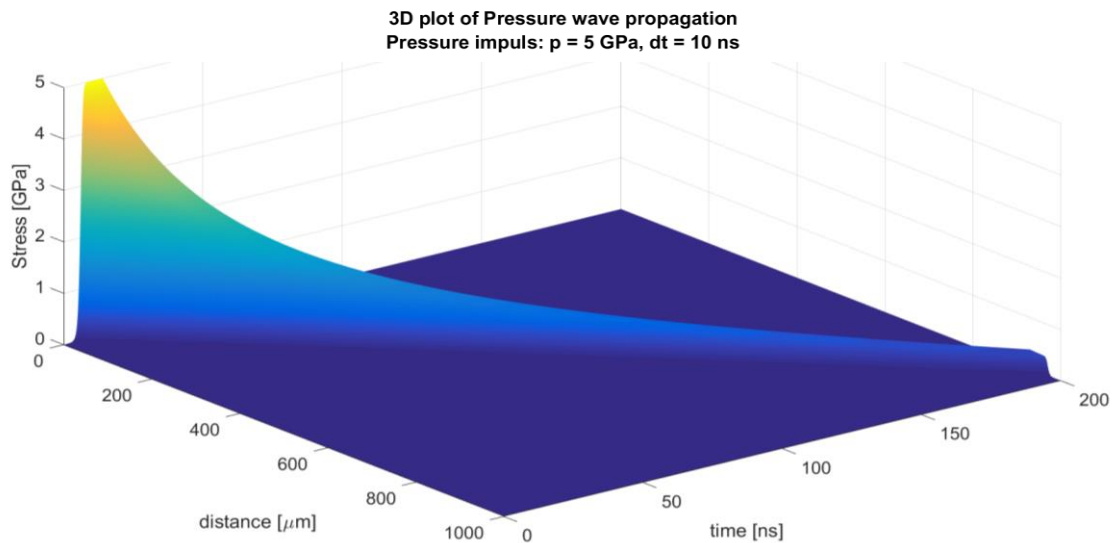
V grafu jednotlivé špičky znázorňují pohyb tlaku v určitém čase po působení laserového pulzu.

Při úvaze bodového zatížení (bod o malém definovaném průměru) a použití polárních souřadnic, lze pozorovat průběh napětí materiálem všemi směry. Ekvidistanty v grafu znázorňují průběh tlaku materiálem v čase s přírůstkem 10 ns (Obrázek 64).



Obrázek 64 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns v polárních souřadnicích.

Interpretace tlaku rázové vlny postupující materiálem může být zobrazena v prostorové závislosti na vzdálenosti od povrchu a uplynulém čase od laserového pulzu (Obrázek 65).



Obrázek 65 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu a čase uplynulém od výstřelu laseru při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns.

Simulací rázové vlny prostupující materiálem dochází k určení gradientu jejího útlumu. Útlum napětí je na povrchu velmi rychlý a následně s postupně do materiálu přechází v pozvolný.

Tlak v povrchu materiálu několikanásobně překračuje pevnost ovlivňovaného materiálu, proto lze předpokládat malý útlum rázové vlny a tím i velkou hloubku zpevnění při limitní velikosti zbytkového napětí v povrchové vrstvě. Hloubka ztlačně ovlivněné vrstvy přesahuje pro zvolené parametry 1 mm.

#### 4.1.3 Modelace výsledných vlastností materiálu

Pro provoz součástí jsou důležité výsledné vlastnosti materiálu v podobě zbytkových napětí. Zbytkové napětí lze určit z průběhu tlakové vlny procházející materiálem.

Zbytkové napětí je derivací tlaku procházejícího materiálem.

$$(4.12) \quad \tau_z = \tau'$$

Z rovnice (4.11) tedy plyne:

$$(4.13) \quad \tau_z(x, t) = -pD \frac{\frac{x}{c} + \frac{2}{3} \left( t - \frac{x}{c} \right)}{x^2}$$

Tato závislost však neplatí v celé hloubce materiálu, protože při překročení meze plasticity materiálu se nemůže vytvořit větší zbytkové napětí než je jeho teoretické maximum.

Vzdálenost, která odpovídá zlomu křivky, kde se protíná obálka maximálního zbytkového napětí a derivace tlakové vlny lze odvodit ze vztahu (Obrázek 66):

$$(4.14) \quad L = \frac{C_{el}C_{pl}\tau}{C_{el}-C_{pl}} \left[ \frac{P-(\sigma_Y-\sigma_0)(1+\lambda/2\mu)}{2\sigma_Y(1+\lambda/2\mu)} \right] [120]$$

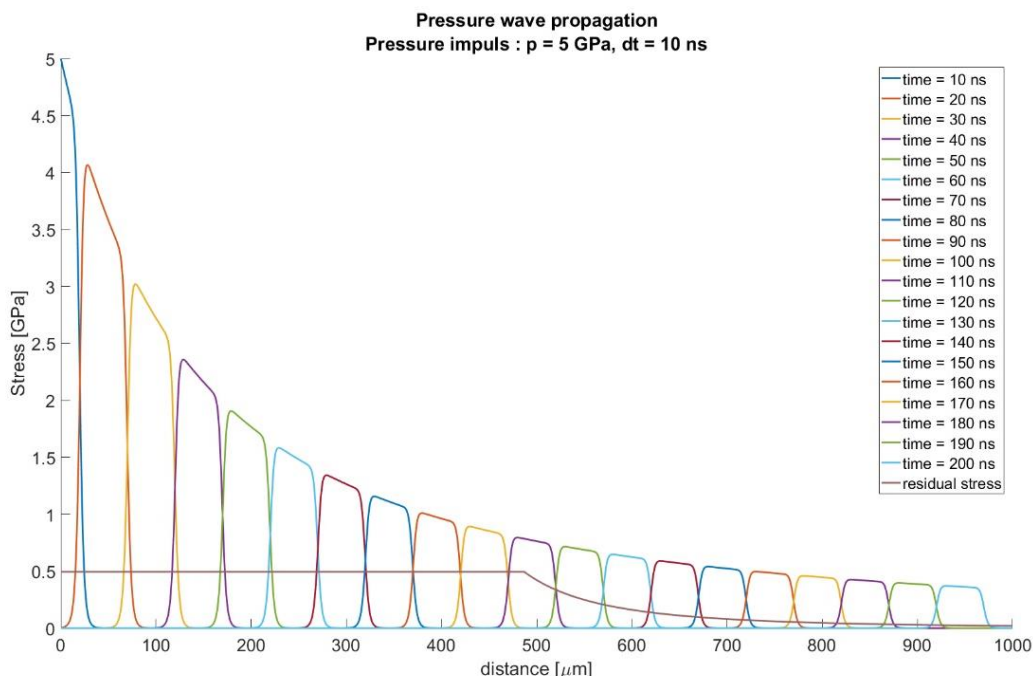
Do závislosti vstupují konstanty  $C_{el}$  a  $C_{pl}$ , respektive elastická a plastická rychlost deformace v základním materiálu.

V elastickoplastickém poloprostoru je hodnota zbytkového napětí v lineární části.

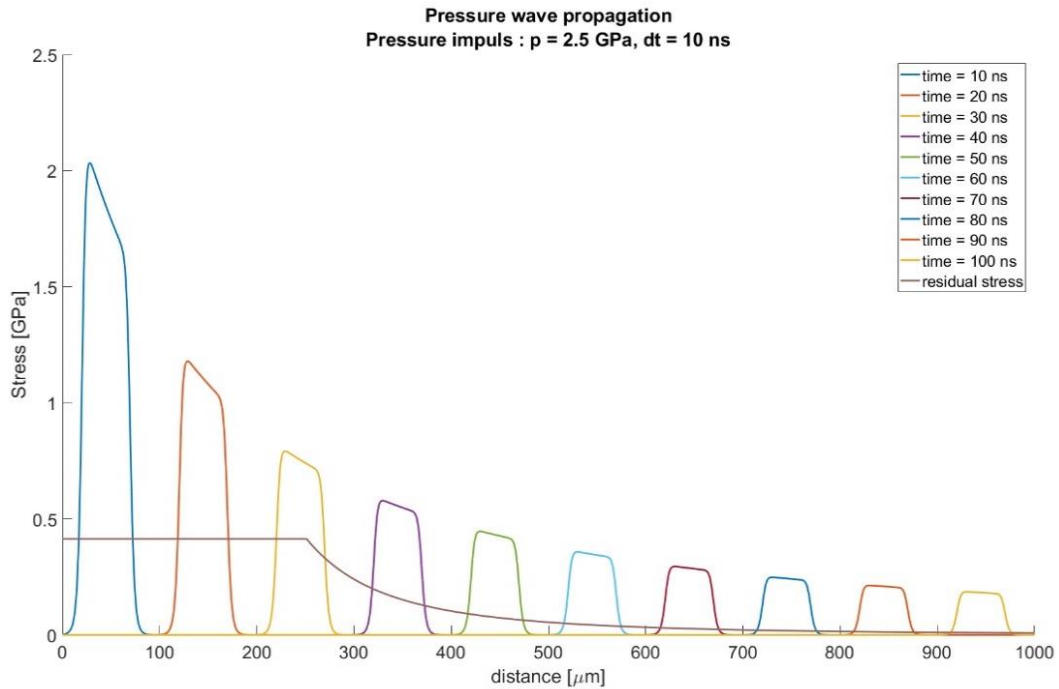
$$(4.15) \quad \sigma_{res} = \sigma_0 + \mu \varepsilon^P \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \left[ 1 - \frac{4(2)^{1/2}}{\pi} (1+\nu) \frac{L}{a} \right] [120]$$

kde  $\nu$  je Poissonůvo číslo materiálu a veličina  $a$  je velikost čtvercové plochy pod laserem. Veličina maximálního zbytkového napětí odpovídá počátečnímu tlaku 5 GPa, který je také znázorněn (Obrázek 66).

Obecně platí, že zbytkové napětí uvnitř materiálu lze rozdělit do tří kategorií. Zbytkové napětí dále od povrchu (derivace tlakové vlny), konstantní část, kde je dosaženo maximálního reziduálního napětí a zbytkové napětí naměřené na povrchu. Poslední oblast je ovlivněna relaxačními procesy, kdy zbytkový stres přichází zpět do rovnováhy. Tento efekt není zahrnut v tomto zjednodušeném matematickém modelu. Po dosažení hodnot vlastností materiálu procesních parametrů, je získána závislost zbytkového napětí na posuzované hloubce (Obrázek 66 a Obrázek 67).



Obrázek 66 Závislost velikosti napětí procházející materiálem a zbytkového napětí na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns[252].



Obrázek 67 Závislost velikosti napětí procházející materiálem a zbytkového napětí na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 2,5 GPa a délce pulzu 10 ns[252].

Zbytkové napětí v povrchu materiálu lze rozdělit do 3 částí. První těsně podpovrchová část je ovlivněná relaxací a zbytková napětí se vrací zpět k rovnovážnému stavu. Míra relaxace je velmi závislá na dosažené povrchové teplotě při procesu zpracování. Při použití technologie LSP s ablační vrstvou je změna teploty ovlivňovaného povrchu zanedbatelná. Při použití nastavení pro LSPwC (bez ablační vrstvy) bylo by vhodné tento faktor v modelu zohlednit. Zjednodušený model není schopen tuto relaxaci obsáhnout [147].

Druhá část zbytkového napětí dosahuje maxima a u různých technologií má rozdílný průběh. Technologie LSP má výhodu malého gradientu zbytkového napětí v druhé části, kde oblast velkých zbytkových napětí dosahuje zároveň velké hloubky v porovnání s konvenčními technologiemi zpracování.

Třetí oblastí je postupný útlum zbytkového napětí až k rovnovážné hranici. Tato část bývá, u většiny technologií zpracování povrchu pro zlepšení únavových vlastností, nejdelší.

Všechny tři oblasti přispívají tlakovým napětím proti šíření a iniciaci trhlin. Problematické jsou přechody do tahového napětí v důsledku špatného provedení technologie, nevhodnosti materiálu nebo špatně zvolených procesních parametrů. V takovém případě může dojít k vytvoření tenké vrstvy na povrchu materiálu se zbytkovým tahovým napětím, které naopak podporuje vytvoření a rozvoj trhliny.

Nebezpečný je i přechod za třetí oblastí do tahových zbytkových napětí, který může zapříčinit naopak rozvoj podpovrchových trhlin a vad. Právě mechanismem rozvoje podpovrchových trhlin dochází k porušení součástí při ultravysokocyklové únavě ( $10^8$  –  $10^9$  cyklů)[148][249][252].



## 4.2 Testovaný materiál – Ti-6Al-4V

Pro testy byla použita výhradně slitina titanu Ti 6Al4V. Díky svým vlastnostem při zvýšené teplotě je velmi používána pro namáhané součásti v leteckém průmyslu a proto je tato slitina nejpoužívanějším materiálem, který je ovlivňován metodou LSP. Díky ekonomickým aspektům výroby není nyní možné používat technologii LSP na levnější materiály, kde by přidaná hodnota technologie nepřevýšila její cenu.

### 4.2.1 Vlastnosti titanových slitin

Praktické využití titanu a jeho slitin vyplývá především z jeho mimořádné chemické odolnosti a malé hustoty.

Čistý titan prochází alotropní transformací z hexagonální těsně uspořádané alfa fáze do kubické fáze beta při teplotě 882 °C. Legovací prvky přispívají ke stabilizaci buď alfa, nebo beta fáze. Přes použití legovacích příměsí, fáze beta může být dostatečně stabilizovaná vyskytovat se společně s alfa fází i při pokojové teplotě. Titanové slitiny mohou být z tohoto důvodu vytvrzeny tepelným zpracováním.

Slitiny titanu jsou obecně rozděleny do tří hlavních kategorií. Alfa slitiny, které obsahují neutrální legující prvky (jako je Sn) nebo alfa stabilizátory (jako je Al, O), tyto slitiny nejsou tepelně zpracovatelné. Druhou kategorií jsou alfa + beta slitiny, které obvykle obsahují kombinaci alfa a beta stabilizátorů a jsou tepelně zpracovatelné v různé míře. Třetí kategorií jsou beta slitiny, které jsou metastabilní a obsahují dostatečné množství beta-stabilizátorů (jako Mo, V) pro kompletní zachování beta fáze za pomoci tepelného zpracování [219].

Titanové slitiny můžeme rozdělit do skupin takzvaných Gradů (Tabulka 7). Se zvyšujícím se číslem postupně roste pevnost materiálu a klesá jeho tažnost. Grade číselované dvojcíslím jsou speciální slitiny, u nichž toto pravidlo neplatí.

Tabulka 7 Mechanické vlastnosti vybraných slitin titanu [219].

	<b>Rp0.2</b>	<b>Rm</b>	<b>A</b>	<b>E</b>
	(MPa)	(MPa)	(%)	(GPa)
<b>Ti Grade 1</b>	170	240	24	102.7
<b>Ti Grade 2</b>	275	345	20	102.7
<b>Ti Grade 3</b>	380	450	18	103.4
<b>Ti Grade 4</b>	483	550	15	104.1
<b>Ti Grade 5</b>	828	895	10	110-114
<b>Ti Grade 23</b>	775	948	16.4	

Ti-6Al-4V je nejběžnější slitina titanu. Jedná se o alfa + beta slitin, která je tepelně zpracovatelná pro dosažení nárůstu pevnosti [219].

### 4.2.2 Použití materiálu Ti-6Al-4V

Ti-6Al-4V odpovídá americkému označení Grade 5 a může být použit pro v jakoukoli aplikaci, kde jsou požadované kombinace vysoké pevnosti při nízkých až mírných teplotách, nízká hmotnost a vynikající odolnost proti korozi. Některé z mnoha aplikací, kde se tato slitina používá, jsou letadlové komponenty turbínových motorů,





letecké konstrukční prvky, vysoce výkonné díly pro automobilový průmysl, námořní aplikace, zdravotnické prostředky a sportovní vybavení[220].

Ti-6Al-4V je vysoce odolný vůči obecné korozi ve vodných roztocích, včetně mořské vody, stejně jako v oxidačních kyselin, chloridy (v přítomnosti vody), raketová paliva a louhů. Podmínky, za kterých Ti-6Al-4V je citlivý na všeobecné korozi jsou v přítomnosti redukčních kyselin nebo suchý plynný chlor[219].

Koroze při napětí a štěrbinová koroze se může objevovat v prostředí obsahujícím chloridy nebo jiné halogenidové ionty. Z tohoto důvodu se při zpracování titanu nepoužívají chlorovaná rozpouštědla [220].

Titan a jeho slitiny, včetně Ti-6Al-4V, jsou náchylné k vodíkové křehkosti. Plynný nebo katodický vodík může difundovat do kovu. Je důležité, aby bylo minimalizován styk titanu s vodíkem během zpracování zejména pak tepelném zpracování. Specifikace pro výrobky ze slitiny Ti-6Al-4V mají obvykle maximální limit vodíku 150 ppm [220].

#### 4.2.3 Chemické složení Ti-6Al-4V

Standardní chemické složení je uvedeno v Tabulka 8. Název také může obsahovat příponu ELI, která značí snížený obsah intersticiálních prvků, nebo slitina s příponou Pd, značí přídavek paladia pro zvýšení odolnosti proti korozi [221].

Tabulka 8 Chemické složení Ti 6Al-4V [221]

Uhlík (Maximum)	0.10	%	Titan	Zbytek	
Hliník	5.50 až 6.75	%	Vanad	3.50 až 4.50	%
Dusík	0.05	%	Železo (Maximum)	0.40	%
Kyslík (Maximum)	0.020	%	Vodík (Maximum)	0.015	%
Ostatní, Celkem (Maximum)	0.40	%			

#### 4.2.4 Mechanické a fyzikální vlastnosti Ti-6Al-4V

Hlavním důvodem použití titanových slitin je výborný poměr pevnosti a měrné hmotnosti. Další výhodou je velký rozptyl pevností a tažností podle chemického složení a tepelného zpracování slitiny (Tabulka 9). V leteckém průmyslu nalézají své uplatnění při náhradě oceli a slitin niklu kvůli úspoře hmotnosti a to i u velmi namáhaných součástí při teplotách do 350°C. V leteckém průmyslu se používají hlavně v kompresorové části motoru [221].



Tabulka 9 Vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [220][221]

Hustota	4430 kg/m <sup>3</sup>	
Tvrдость, Brinell	326	Přepočtená z Rockwell C
Tvrдость, Knoop	354	Přepočtená z Rockwell C
Tvrдость, Rockwell C	35	
Tvrдость, Vickers	341	Přepočtená z Rockwell C
Mez pevnosti	860 MPa	
Mez kluzu	790 MPa	
Tažnost	2, 15, 30 %	Vytvrzený, kalený, žíhaný
Modul pružnosti	113.8 GPa	
Mez pevnosti v tlaku	860 MPa	
Mez pevnosti v tahu	1170 MPa	K <sub>t</sub> (Faktor stresové koncentrace) = 3.5
Poissonovo číslo	0.342	
Rázová energie	24 J	V-vrub
Únavová pevnost	140 MPa	1E+7 cyklů. K <sub>t</sub> (Faktor stresové koncentrace) = 3.1
Únavová pevnost	300 MPa	1E+7 cyklů
lomová houževnatost	100 MPa*m <sup>1/2</sup>	K <sub>IC</sub>
Modul pružnosti ve smyku	44 GPa	
Pevnost ve smyku	550 MPa	Nejvyšší pevnost ve smyku
CTE, lineární 20°C	8,6 μm/m°C	20-100°C
CTE, lineární 250°C	9,2 μm/m°C	Průměr v rozsahu 20-315 °C
CTE, lineární 500°C	9,7 μm/m°C	Průměr v rozsahu 20-650 °C
Měrná tepelná kapacita	0,5263 J/g°C	
Tepelná vodivost	6,7 W/mK	
Teplota tavení	1 604 – 1 660 °C	

#### 4.2.5 Zpracování slitiny Ti 6Al-4V

Ti 6Al-4V může být zpracována za tepla standardními metodami, jako je válcování nebo kování. Typicky, za tepla se provádí pracovní vysoko v teplotním rozmezí alfa/beta, při přibližně 870-980 °C. Je třeba dbát, aby se zabránilo nadměrné tvorbě fáze alfa, protože fáze alfa by musela být následně po tváření odstraněna dodatečným tepelným zpracováním. Tváření plechu se obvykle provádí při teplotách okolo 650 °C. Ti 6Al-4V bylo také úspěšně zpracováno superplastickým tvářením, kterým se dá dosahovat velmi vysoké tažnosti, za použití teplot vyšších než 850 °C [221].

Mez kluzu Ti 6Al-4V klesá rychle s teplotou, z tohoto důvodu je snadno tvarovatelná při středních teplotách. Zahřátí na teplotu 427 °C, má za následek přibližně 40% snížení meze kluzu. Tváření za tepla se používá ve velké míře při výrobě namáhaných výrobků, letadlových celků a zdravotnických prostředků [221].

Ti 6Al-4V může být tažen za studena, přestože zpracovatelnost této slitiny za studena je do určité míry omezená. Tváření za studena je někdy používáno pro díly, jako jsou držáky nebo upínky [221].

### 4.3 Měření zbytkových napětí

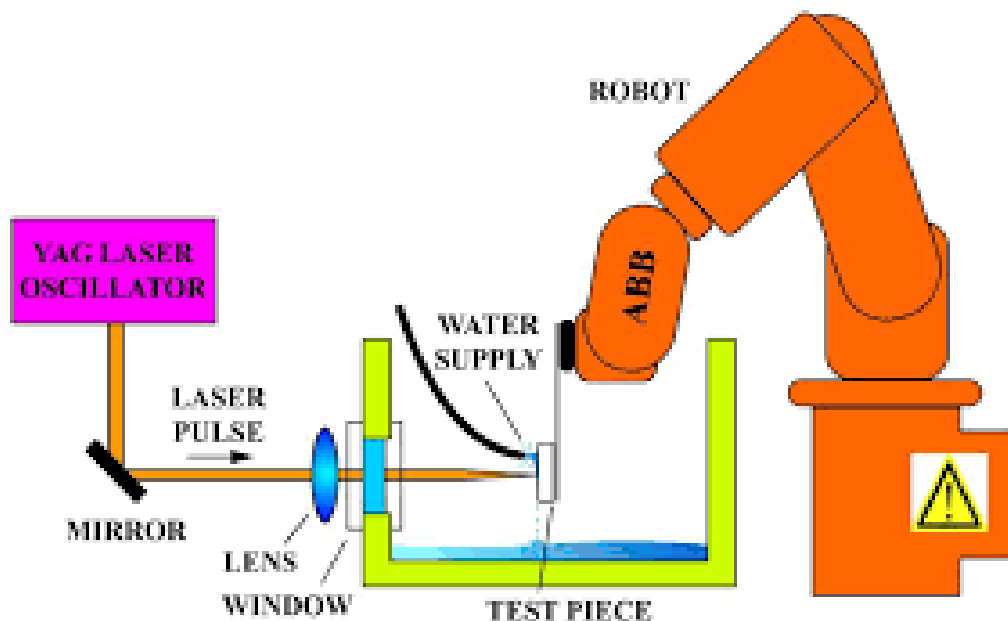
Pro ověření správné funkce modelu, je potřeba jeho výsledky porovnat s měřením. Kromě validace modelu, souží měření i ke vzájemnému porovnání výsledků. Tyto výsledky jsou rozhodující pro další rozhodování o přesnosti a použitelnosti konkrétní měřicí metody.

Vzorky pro všechny druhy měření byly vyrobeny z titanové slitiny Ti-6Al-4V o rozměrech 70 mm x 75 mm x 5 mm.

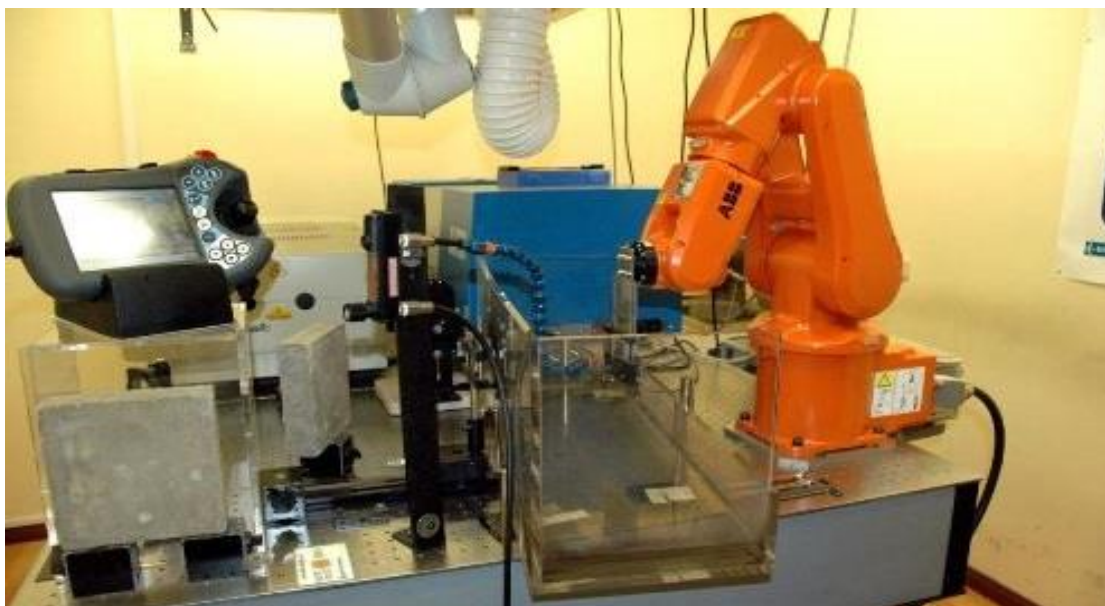
Byly vybrány 3 měřicí metody. První metodou je měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií, druhá je metoda postupného odvrtávání a třetí metoda elektrolytického rozpouštění (metoda vetknutého nosníku). Tyto metody byly vybrány z důvodů možnosti porovnání výsledků s již vydanými publikacemi. Další metoda vhodná pro měření zbytkových napětí v povrchu ovlivněných vzorků s možností porovnání je měření elektronovou difrakcí v urychlovači částic, toto měření je ovšem velmi časově a finančně náročné. Z tohoto důvodu proto byla z návrhu měření vyřazena.

#### 4.3.1 Parametry ovlivnění vzorků

Vzorky byly upraveny na technické univerzitě v Madridu laserem Laser Spectra Physics Quanta Ray PRO 350 (Nd:Yag; délka pulzu 8 – 12 ns; energie 2,5 J). Laserový svazek je doveden k součásti za pomoci soustavy zrcadel a čoček. Fokusační vzdálenost poslední čočky byla 500 mm a laserový svazek byl statický. K polohování byl používán průmyslový robot ABB IRB 120 s dovoleným zatížením 3 kg (Obrázek 68, Obrázek 69).



Obrázek 68 Schéma experimentálního setupu pro LSP ovlivnění vzorků na Technické univerzitě v Madridu



Obrázek 69 Fotografie zařízení pro LSP ovlivnění vzorků na Technické univerzitě v Madridu

Jako tlumící vrstva byla použita voda o tloušťce přibližně 0,8 mm. Ovlivnění bylo provedeno bez absorpční vrstvy. Všechny vzorky byly ovlivněny parametry energie v pulzu 2,5 J při frekvenci 10 Hz a velikost laserového svazku na povrchu součásti byla 1,5 mm. Vzorky 1 a 2 byly ovlivněny za překryvu pulzů odpovídající 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> a vzorky 3 a 4 s překryvem odpovídajícím 2500 pulzů/cm<sup>2</sup> (Tabulka 10).

Tabulka 10 Parametry LSP použité pro ovlivnění vzorků

Vzorek	Energie pulzu [J]	Délka pulzu [ns]	Frekvence [Hz]	Průměr paprsku [mm]	Hustota pulzů [1/cm <sup>2</sup> ]	Hustota výkonu [GW/cm <sup>2</sup> ]
1 a 2	2,5	10	10	1,5	5000	14,15
3 a 4	2,5	10	10	1,5	2500	14,15

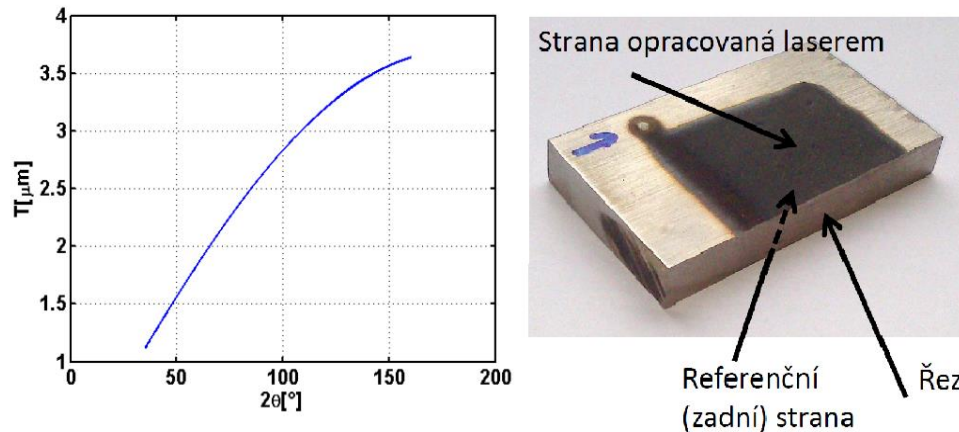
#### 4.3.2 Ověřovací měření zbytkových napětí rentgenovou difrakcí

Nejprve bylo provedeno měření rentgenem, pro zjištění měřitelnosti zbytkových napětí pro vzorek z titanové slitiny zvolenými parametry ovlivnění. Měření bylo provedeno v laboratoři strukturní rentgenografie na Katedře inženýrství pevných látek fakulty jaderné za použití stacionárního Braggova – Brentanova fokusačního uspořádání. K měření bylo použito  $\omega$  - goniometru Siemens se zářením rentgenky s chromovou anodou. Hodnoty mřížkových deformací byly interpretovány napětím za předpokladu dvojsového stavu zbytkové napjatosti z experimentálně stanovených závislostí difrakčního úhlu  $2\theta$  ( $\sin^2\psi$ ), kde  $\psi$  je úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími atomovými mřížkovými rovinami.

Před zahájením měření hloubkových profilů zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ byly ze všech studovaných povrchů pořízeny debyeogramy. Experimentální uspořádání

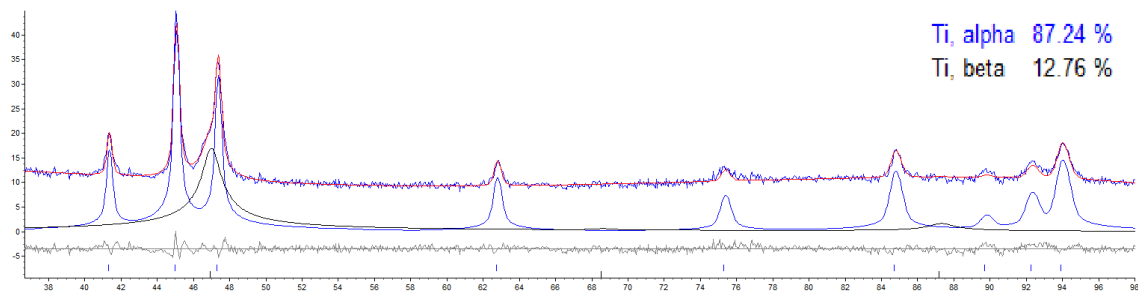
na zpětný odraz RTG bylo provedeno na zařízení ISO-DEBYEFLEX 3003 s detekcí difraktovaného záření na paměťové fólii.

Spojitý charakter difrakčních linií {220} vypovídá kvalitativně o jemnozrnném izotropním polykrystalickém materiálu povrchových vrstev o tloušťce cca 2 až 4  $\mu\text{m}$ , odpovídající efektivní hloubce vnikání použitého RTG záření do materiálů na bázi titanu (Obrázek 70).



Obrázek 70 (vlevo) Závislost hloubky měření na úhlu snímání, (v pravo) měřený vzorek rentgenovou difrakční tenzometrií.

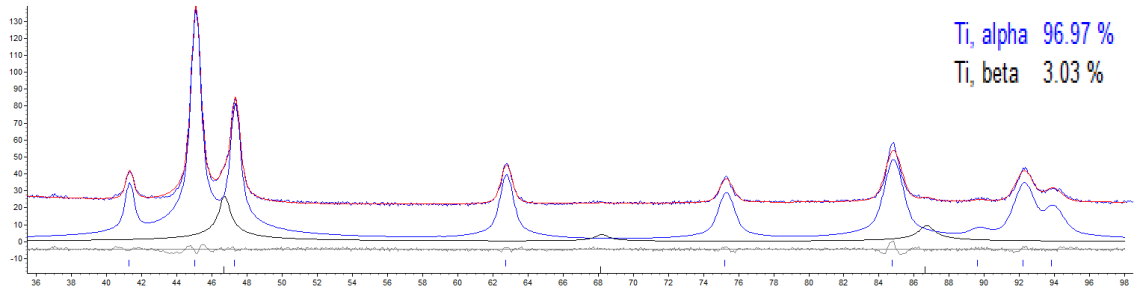
Povrchová vrstva byla měřena  $\text{CoK}\alpha$  zářením s divergenční clonou  $1^\circ$ . Byla aplikována maska 5 mm pro řez a 10 mm pro stranu opracovanou laserem. Rozsah měření  $2\theta$  byl  $35\text{--}160^\circ$  po kroku  $0,05^\circ$   $2\theta$  se čítací časem 100 s. Pro všechna povrchová měření byly vyhotoveny difraktogramy za pomoci Rietveldovy analýzy v programu TOPAS 4.2. Uvažována byla pouze alfa (modrý parciální difraktogram) a beta (černý parciální difraktogram) fáze titanu v poměru přibližně 87 : 13 hm. %. Parametr shody mezi naměřenými daty a strukturálním modelem  $R_{\text{wp}} = 9,37$ ; rozdíly jsou také patrné na šedé diferenční křivce ve spodní části obrázku (Obrázek 71).



Obrázek 71 Parciální difraktogram závislosti intenzity na úhlu  $2\theta$  na povrchu

Při měření referenční (zadní) strany byla také uvažována pouze alfa fáze (modrý parciální difraktogram) a beta fáze (černý parciální difraktogram) titanu. Výsledný poměr alfa : beta byl přibližně 97 : 3 hm. %. Parametr shody mezi naměřenými daty a strukturálním modelem je  $R_{\text{wp}} = 5,21$ . Rozdíly jsou také patrné na šedé diferenční křivce ve spodní části obrázku (Obrázek 72).

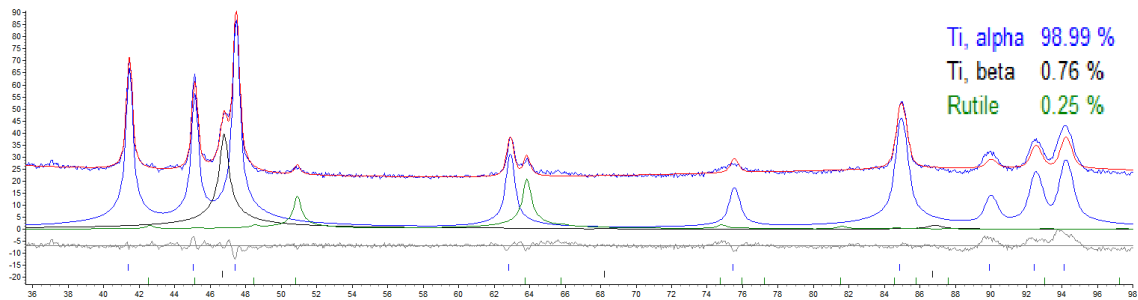




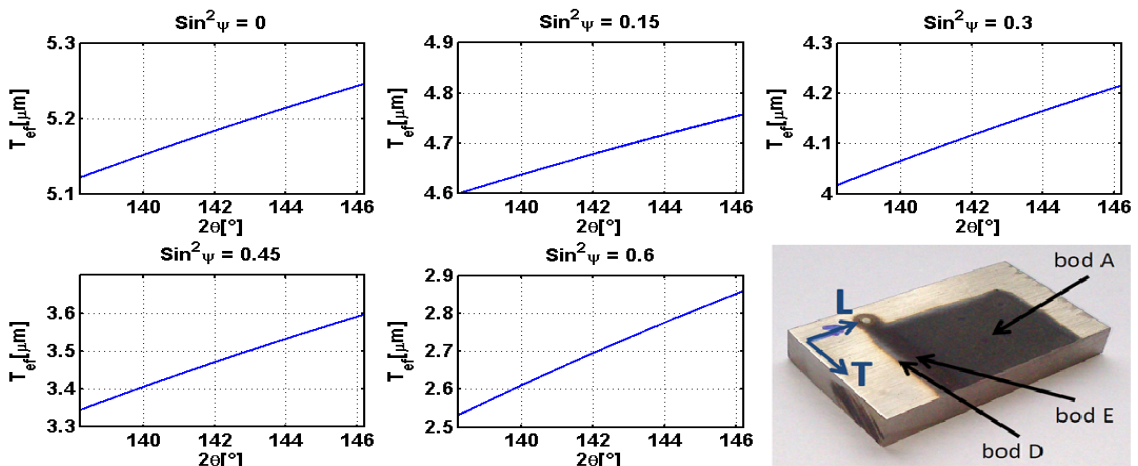
Obrázek 72 Parcialni difraktogram závislosti intenzity na uhlu  $2\theta$  na zadni straně.

Na straně opracované laserem bylo uvažováno alfa Ti (modrý parcialni difraktogram), beta (černý parcialni difraktogram) Ti arutil (zelený p. d.). Výsledek měření alfa : beta : rutil bylo přibližně 99 : 0.7 : 0.3 hm. %.

Parametr shody mezi naměřenými daty a strukturním modelem je  $R_{wp} = 8,74$ . Rozdíly jsou také patrné na šedé diferenční křivce ve spodní části obrázku (Obrázek 73).



Obrázek 73 Parcialni difraktogram závislosti intenzity na uhlu  $2\theta$  na LSP zpracování



Obrázek 74 Závislost hloubky snímání na uhlu  $2\theta$  při různém nastavení  $\sin^2\psi$ , (v pravo dole) pohled na měřený vzorek.

Povrchová vrstva byla měřena  $CoK\alpha$  zářením s křížovou clonou  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  (bod A),  $2 \times 0,5 \text{ mm}^2$  (v bodě D a E) Rozsah pro měření byl zvolený  $142,2 \pm 4^\circ 2\theta$  a krok  $0,2^\circ 2\theta$  s čítacím časem 5 s (bod A) a 25 s (bod D a E). Závislosti  $2\theta$  220 ( $\sin^2\psi$ ) byly měřeny ve dvou azimutech  $\sigma T$  a  $\sigma L$ . Difrakční úhel  $2\theta$  220 byl stanoven jako těžiště difraktovaného dubletu  $CrK\alpha$ .



Chyba uvedená u jednotlivých naměřených hodnot je směrodatnou odchylkou výpočtu zbytkových napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “. Směr  $\sigma_L$  je kolmý na řádkování laserem a směr  $\sigma_T$  je shodný s řádkováním laserem. Pro jednotlivé body bylo zjištěno povrchové napětí v obou směrech. Ve směru řezu bylo napětí na povrchu  $-212 \pm 25$  MPa v místě ovlivnění laserem. V místě neovlivněného materiálu a na kraji ovlivnění pak byla naměřeny hodnoty  $61 \pm 3$  MPa a  $-68 \pm 21$  MPa. Ve směru kolmém na řez blo naměřeno v místě ovlivnění  $-149 \pm 28$  MPa a v místě neovlivněného vzorku a na kraji ovlivnění  $-137 \pm 8$  MPa a  $14 \pm 37$  MPa (Tabulka 11).

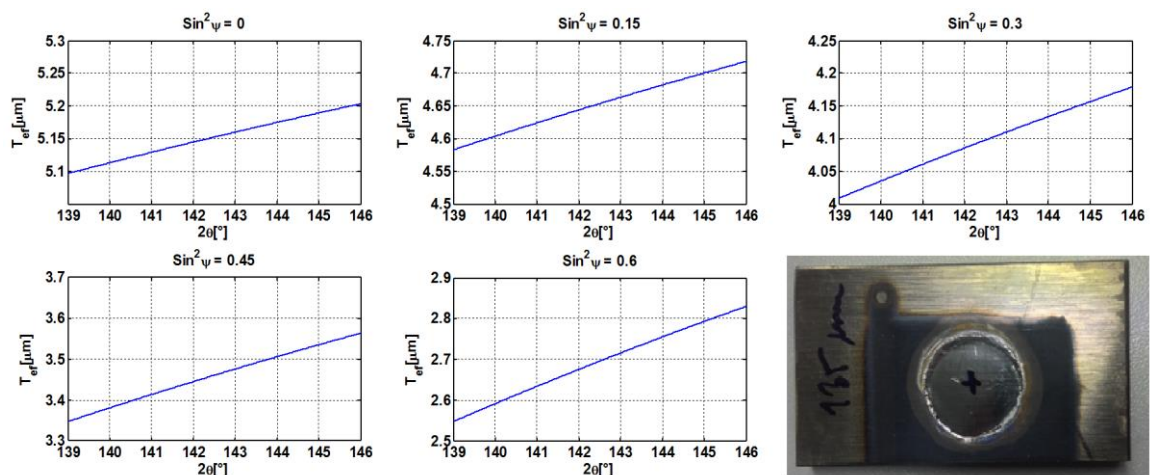
Tabulka 11 Napětí na povrchu vzorku změřené rentgenovou difrakční tenzometrií

$\sigma \pm \Delta\sigma$ , MPa	bod A	bod D	bod E
Směr L	$-212 \pm 25$	$61 \pm 3$	$-68 \pm 21$
Směr T	$-149 \pm 28$	$-137 \pm 8$	$14 \pm 37$

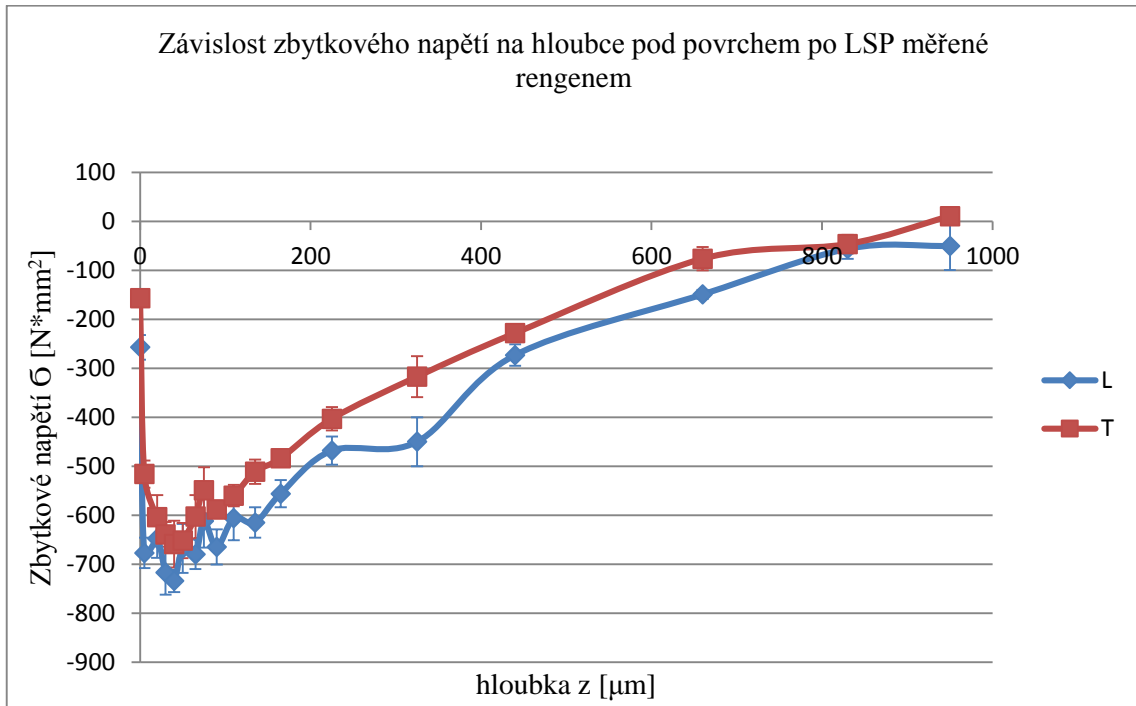
#### 4.3.3 Měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií

Profil zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií byl měřen stejným způsobem jako v případě ověřovacího měření, pouze mezi každým měřením byla odebrána definovaná vrstva materiálu za pomoci elektrolytického odleptávání. Odleptávání je bez silový úběr materiálu a nevnaší do povrchu další zbytková napětí.

Zbytkové napětí bylo změřeno s krokem 5-170  $\mu\text{m}$  do hloubky 950  $\mu\text{m}$ . Napětí generátoru rentgenů bylo 40 kV a použitý proud 30 mA. Ohnisko paprsku bylo zvoleno bodové. Použitá rentgenka je vyrobena z mědi ( $\lambda = 0,15419$  nm). Rovina zkoumaná měřením je {213}. Rentgenografické elastické konstanty byly nastaveny na  $s_1 = -2,85$  TPa $^{-1}$  a  $\frac{1}{2}s_2 = 11,74$  TPa $^{-1}$ . Náklony jednotlivých rovin  $\psi$  byly nastavovány na 0; 0,15; 0,3; 0,45; 0,6. Oblast měření náklonu  $2\theta$  byla 139-146° a jeho krok 0,2°. Čítací čas každého posuvu odpovídal 5 s. Křížové clony zvolené pro měření byly 2×2 mm a křemíková monokrystalická destička má průměr 4,4 mm. Na zvolených parametrech je závislá efektivní hloubka měření (Obrázek 75).



Obrázek 75 Závislost efektivní hloubky na úhlu  $2\theta$  při různém nastavení  $\sin^2\psi$ , (vpravo dole) vzorek s odleptaným středem pro měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií hluboko pod povrchem.

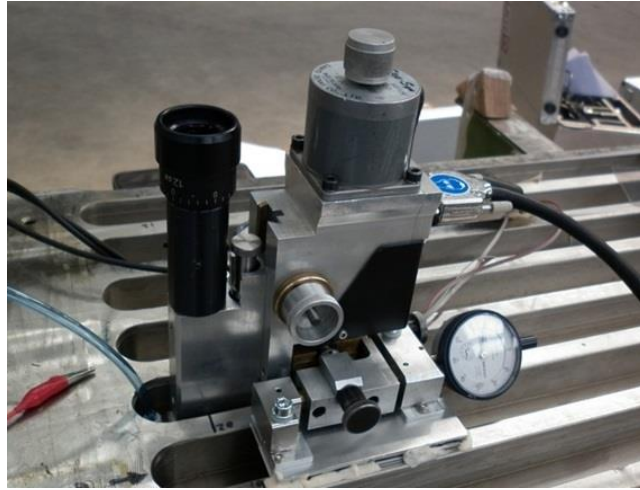


Obrázek 76 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou rentgenové difrakce na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)

Měřením byl zjištěn průběh zbytkového napětí u vzorků ovlivněných metodou LSP zvolenými parametry (Obrázek 76). Na povrchu je znatelná relaxace materiálu, kterou lze přisoudit vlivu teploty při použití LSPwC. Tlakové zbytkové napětí dosahuje velmi velké hodnoty v podpovrchové vrstvě. Toto napětí se pohybuje kolem 700 MPa a sahá do hloubky přibližně 0,1 mm. Směrem do materiálu dochází k postupnému poklesu zbytkového napětí až do hloubky 1 mm pod povrchem, kde napětí dosahuje nulové hodnoty. Rozptyl hodnot měření je relativně malý a v podpovrchové vrstvě se napětí ve směru podélném a kolmém od sebe liší velmi málo. V hloubce kolem 0,5 mm je od sebe napětí ve vzájemně kolmých směrech liší přibližně o 100 MPa, tento rozdíl lze přisoudit strategii řádkování při ovlivňování vzorků.

#### 4.3.4 Měření zbytkových napětí metodou postupného odvrtávání

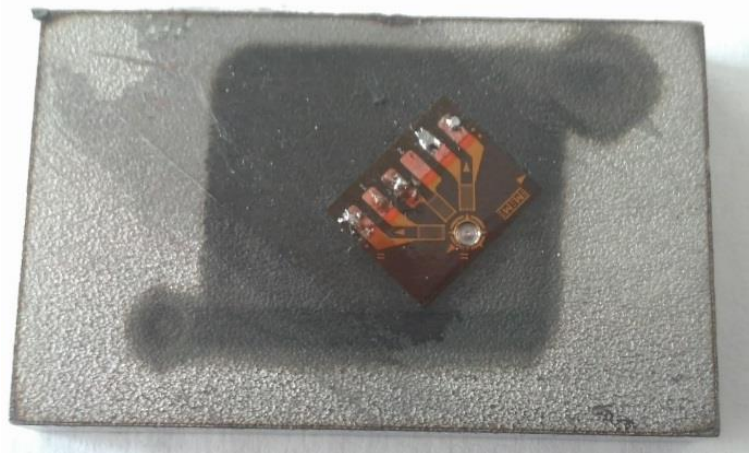
Měření metodou odvrtávání bylo realizováno na technické univerzitě v Madridu v laserovém centru. Hloubková distribuce zbytkových napětí byla získána pomocí vysokorychlostního odvrtávacího zařízení HBM SINT MTS 3000 (Obrázek 77). Toto zařízení umožňuje přesné odvrtání otvoru pomocí čelní válcové frézy poháněné vzduchovou turbínou (až 300 000 ot/min.).



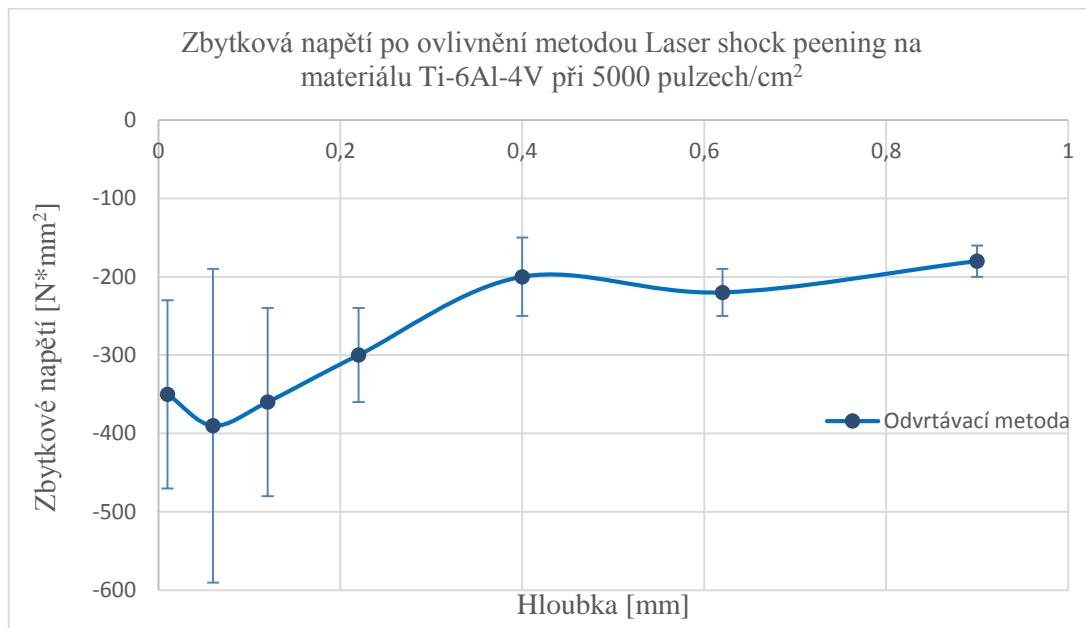
Obrázek 77 Odvrtávací zařízení HBM SINT MTS 3000

Poloha otvoru byla stanovena pomocí vestavěného mikroskopu s přesností na 0,001 mm, hloubka otvoru byla řízena pomocí krokového motoru s přesností na jednotky  $\mu\text{m}$ . Vrtání bylo prováděno postupně po krocích. Mezi jednotlivými měřeními byla prodleva, aby měření uvolněných deformací nebylo ovlivněno teplotním zatížením od obrábění. Pro odvrtání vzorků byly zvoleny frézy *SINTB* o průměru 1,6 mm. Pro měření uvolněných deformací byly použity  $45^\circ$  tenzometrické růžice se třemi elementy *HBM 1,5/120RY61S* s velikostí středního poloměru 2,55 mm, délka měřicího elementu 1,5 mm a nominální odpor měřicího elementu 120  $\Omega$ .

Měřené uvolněné deformace byly aproximovány polynomem 4. a 5. stupně pro vyhlazení dat, vlastní vyhodnocení bylo provedeno pomocí numericky získaných kalibračních koeficientů integrální metodou a metodou mocninné řady. Zbytkové napětí měřeného vzorku (Obrázek 78) bylo vyhodnoceno v intervalu hloubek od 10  $\mu\text{m}$  do 900  $\mu\text{m}$ .

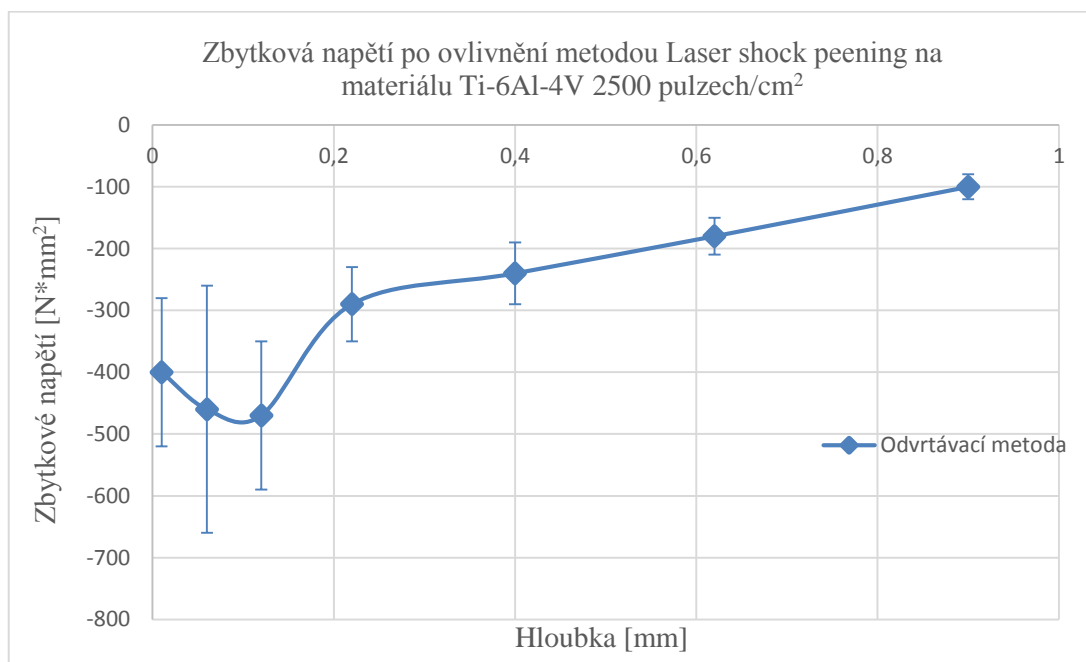


Obrázek 78 Vzorek ovlivněný metodou LSP po měření metodou postupného odvrtávání



Obrázek 79 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou postupného odvrtávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)

Měřením vzorku ovlivněného 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> nebyla zjištěna relaxace povrchové vrstvy, vzhledem k tomu, že prvním měření bylo provedeno v hloubce 10  $\mu$ m, lze předpokládat, že hloubka relaxované (spálené) vrstvy má menší tloušťku (Obrázek 79). Hloubka maximálního napětí byla změřena do 0,12 mm, kde napětí dosahovalo 350 MPa až 400 MPa, měření však bylo zatíženo velkým rozptylem. Při jednotlivých měřeních bylo naměřeno napětí maximálně 600 MPa a minimálně jen 200 MPa. Od maximální hodnoty zbytkového napětí toto napětí postupně klesá směrem do materiálu. Klesá až k hodnotě 1 mm, kde se předpokládá rovnováha zbytkových napětí.



Obrázek 80 Závislost zbytkových napětí na hloubce měřena metodou postupného odvrtávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>)



Vzorek ovlivněný laserem při hustotě pulzů 2500 pulzů/cm<sup>2</sup> vykazoval podobné hodnoty, jako tomu bylo u předešlého vzorku (Obrázek 80). V povrchové vrstvě metodou odvtávání nebyla zjištěna výrazná relaxace. Podpovrchové napětí dosahovalo svého maxima od 400 do 480 MPa do hloubky 0,12 mm. Následně dochází k postupnému snižování zbytkového napětí až k nulové hranici, která se nachází v hloubce kolem 1 mm.

#### 4.3.5 Ověřovací měření zbytkových napětí elektrolytického rozpouštění

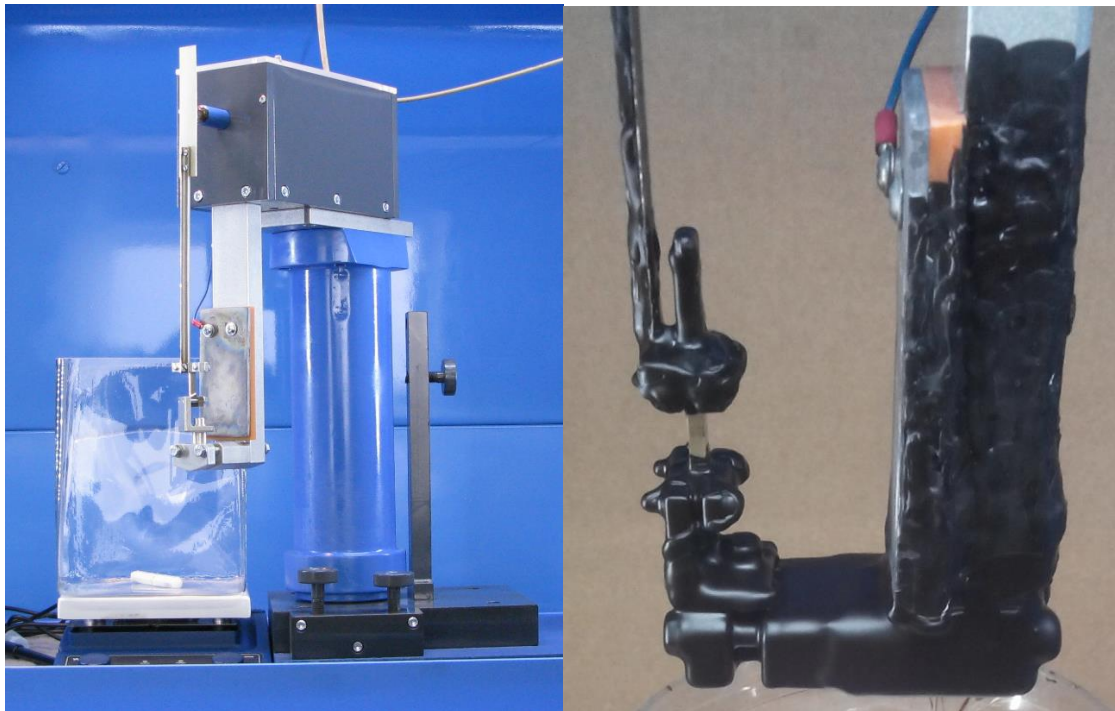
V první fázi byla metodou elektroerozivního odleptávání vrstev změřena první sada 4 vzorků ovlivněných metodou LPS. Protože tato metoda měření nebyla, dle dostupné literatury, nikým aplikována na vzorky ovlivněné metodou LSP, bylo kromě zjištění výsledků důležité i ověření možnosti její aplikace.

Nejprve byly vzorky připraveny na požadovanou velikost elektroerozivním řezáním drátem, aby nedošlo k dalšímu mechanickému ovlivňování nebo zvýšení teploty. Následně byly vzorky řádně očištěny a odmaštěny, rozměrově proměřeny, zváženy a doplněny o identifikační písmeno "N-nahoře", "D-dole".

Pro ochranu neměřených částí vzorku byla použita plastová lepicí páska a zbytek zařízení, těmenů a držáků před leptáním ochráněn nanesenou vrstvou vosku.

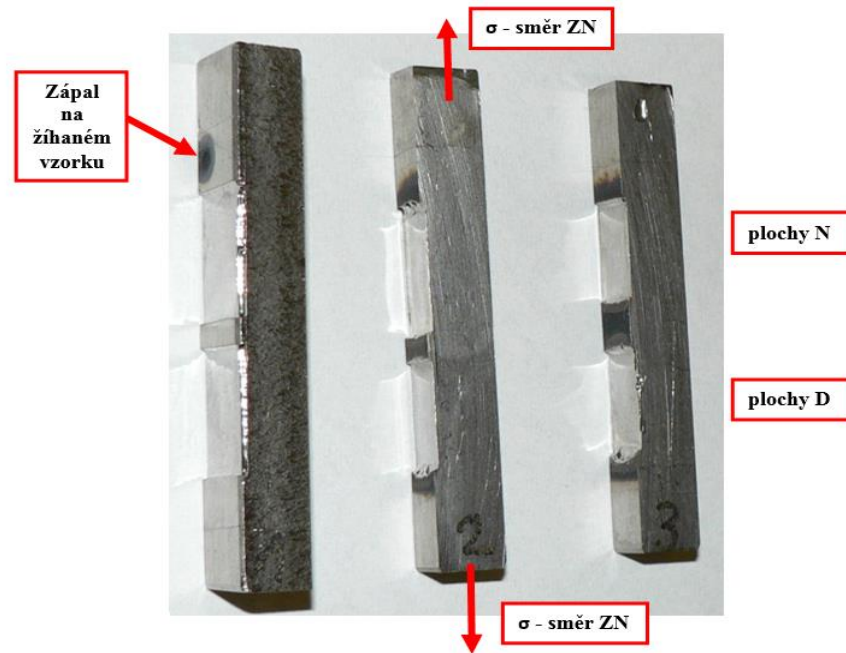
Měření deformací pro stanovení zbytkových napětí bylo realizováno na experimentálním zařízení sestaveném v laboratoři Katedry obrábění na Fakultě strojní ČVUT v Praze (Obrázek 81). Nosník o rozměrech 70 x 6 x 5 mm byl vyříznut z původních vzorků pouze pro měření deformací ve směru  $\sigma_L$  (směr kolmý na přejezdy laseru).

Pro slitinu titanu Ti-6Al-4V byl použit elektrolyt kombinace lihu, kyseliny chlorovodíkové a fluorovodíkové. Proudová hustota byla 0,790 – 1,590 A·cm<sup>-2</sup> při vzdálenosti 20 mm mezi katodou a vzorkem.



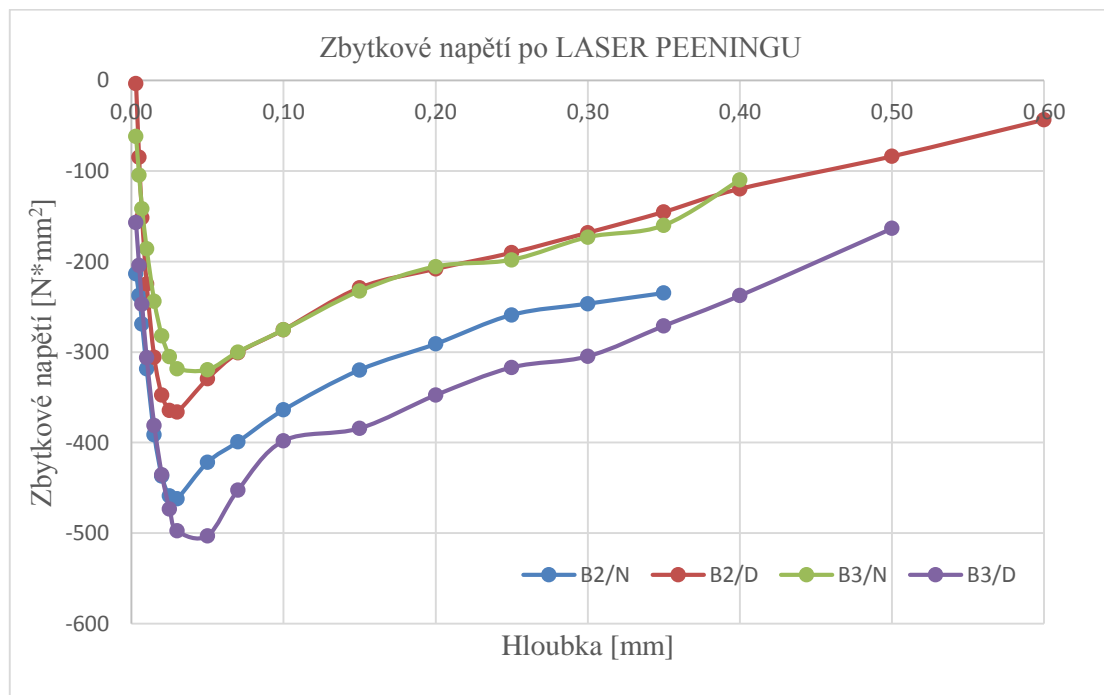
Obrázek 81 Odleptávací zařízení (vlevo), držák se vzorkem pokrytý voskem (vpravo)

Na každém vzorku byly odleptány dvě plochy s velkou výškou leptání. Po ukončení měření byly vzorky důkladně očištěny a zváženy. Výpočet celkové dosažené hloubky byl proveden na základě měření váhového úbytku a rozměru leptané plochy (Obrázek 82).



Obrázek 82 Vzorek ovlivněný metodou LSP po měření metodou elektrolytického rozpouštění

Výpočet zbytkových napětí byl proveden na základě měření a znalosti hustoty  $\rho$  a modulu pružnosti v tahu  $E$  pro slitinu Ti-6Al-4V dle postupu popsáno v teoretické části.



Obrázek 83 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>)



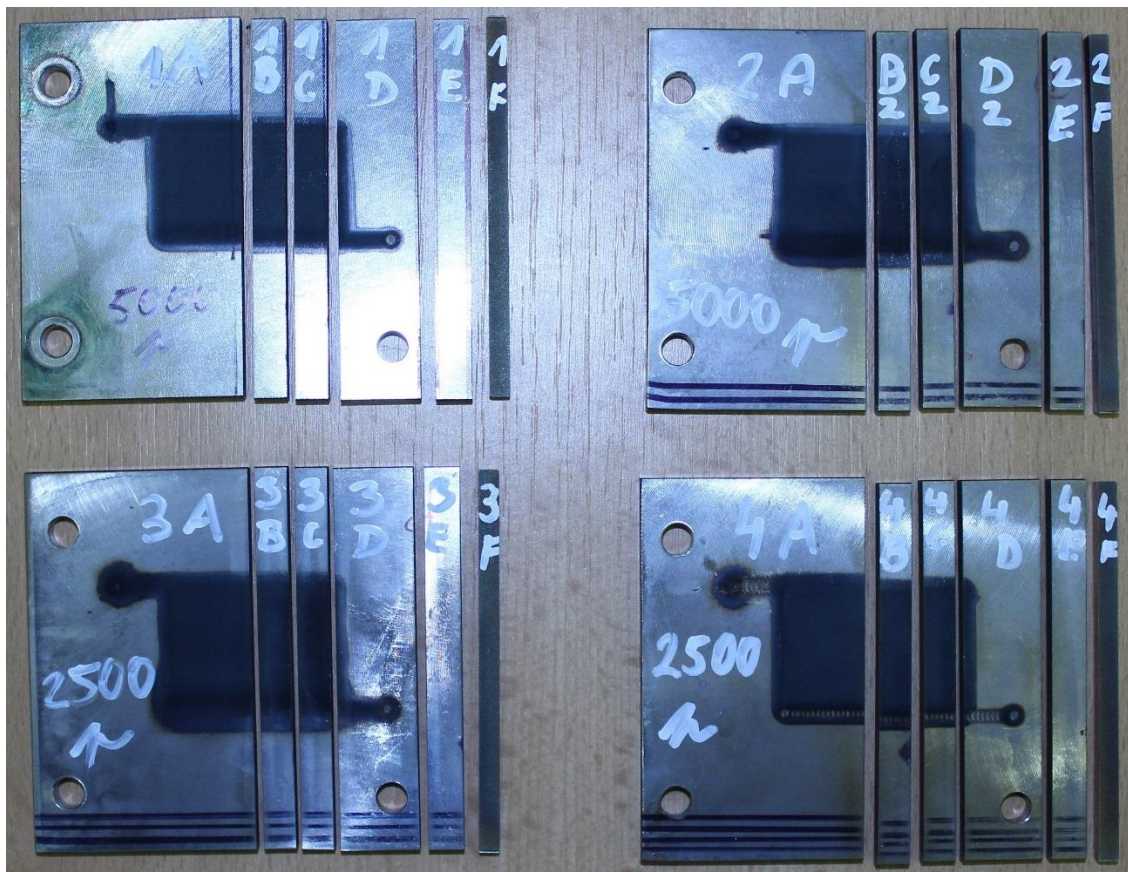
V neovlivněné, a pouze vyžíhané části vzorku bylo zjištěno tlakové zbytkové napětí. Toto tlakové zbytkové bylo ve větší míře detekováno na ploše těsně vedle zpracování až do velikosti -304 MPa.

U všech vzorků dokončených technologií laser shock peening byl zjištěn výrazně tlakový charakter zbytkového napětí (Obrázek 83). Všechny vzorky vykazují tlakovou špičku (-325 až -514 MPa) v hloubce 0,03 až 0,05 mm pod povrchem. Tlaková zbytková napětí se s rostoucí hloubkou snižují. K přechodu do vyrovnávacích napětí tahových by s velkou pravděpodobností docházelo v hloubkách větších než 0,7 mm pod povrchem.

#### 4.3.6 Porovnávací měření zbytkových napětí elektrolytického rozpouštění

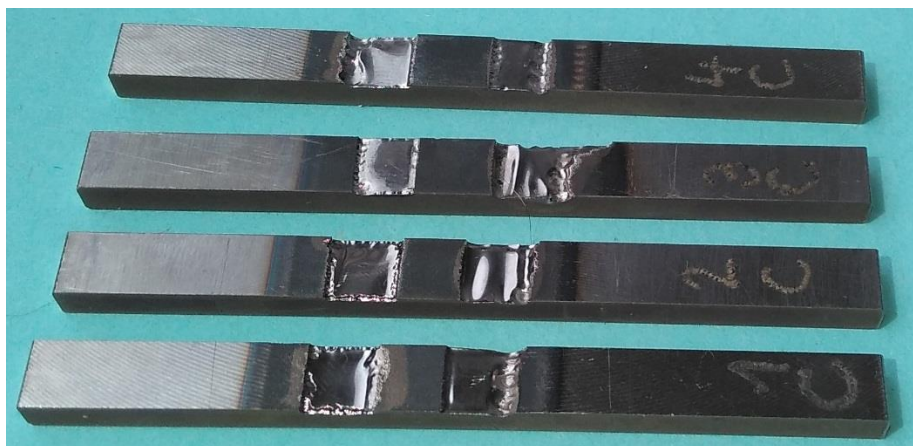
Po provedení ověřovacího měření byly metodou elektroerozivního rozpouštění změřeny vzorky při různých parametrech ovlivnění. Vzorky byly ovlivňovány rozdílným počtem pulzů na  $\text{cm}^2$ . Celkem bylo v tomto kroku provedeno 12 měření.

Vzorky byly připraveny na požadovanou velikost elektroerozivním řezáním drátem, aby nedošlo k dalšímu mechanickému ovlivňování nebo zvýšení teploty (Obrázek 84). Následně byly vzorky řádně očištěny a odmaštěny, rozměrově proměřeny, zváženy a doplněny o identifikační číslo.

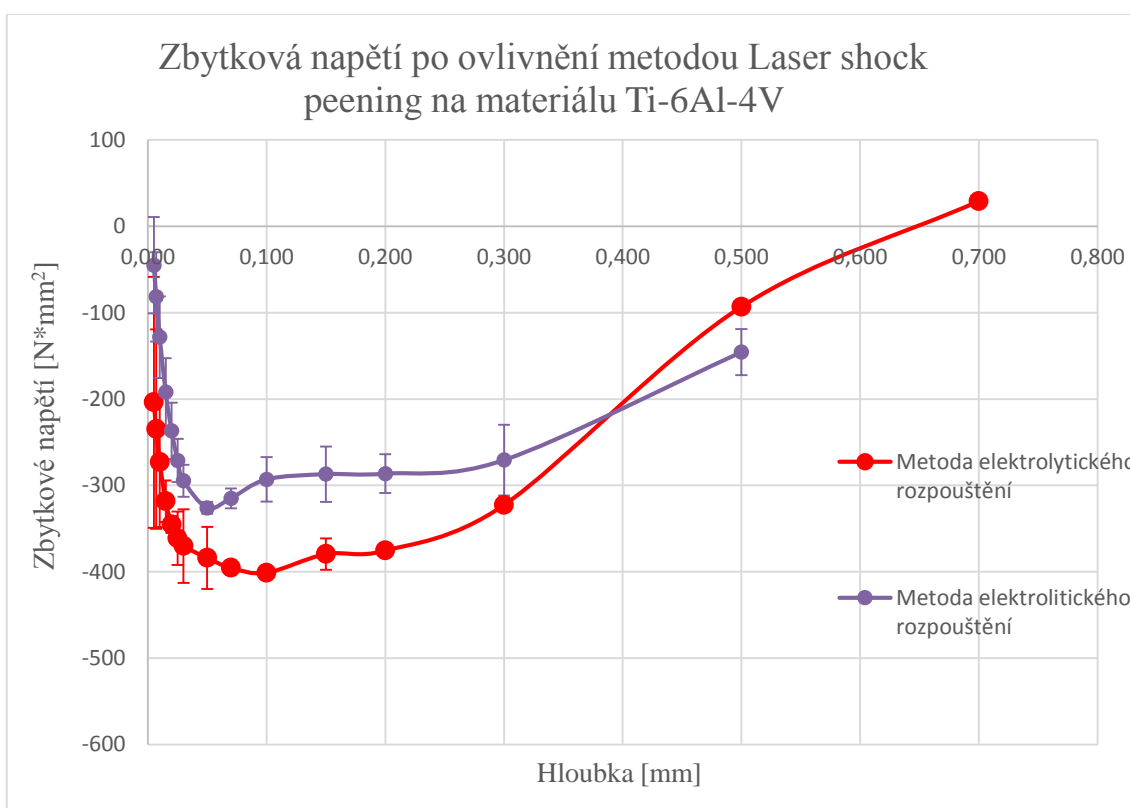


Obrázek 84 Vzorky připravené pro měření elektrolytickým rozpouštěním

U každého ze 4 vzorků bylo změřeno třikrát zbytkové napětí, vypočítán aritmetický průměr a určena směrodatná odchylka (Obrázek 85).

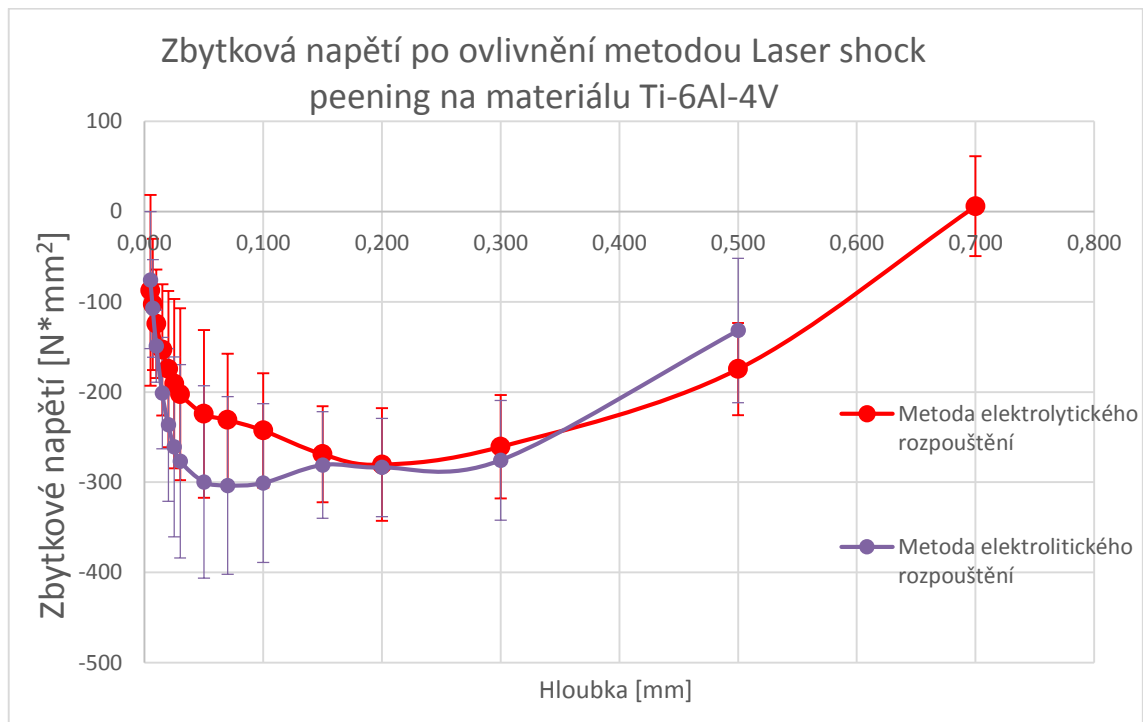


Obrázek 85 Vzorky ovlivněné metodou LSP po měření metodou elektrolytického rozpouštění



Obrázek 86 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)

Měřením metodou elektrolytického odleptávání vzorky ovlivněné 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> byla zjištěna relaxace povrchové vrstvy (Obrázek 86). Napětí v povrchové vrstvě dosahuje výrazně snížených hodnot oproti maximální hodnotě změřeného napětí. Hloubka maximálního napětí byla změřena od 0,04 mm do 0,2 mm, kde napětí dosahovalo 280 MPa až 400 MPa, měření odleptáváním mělo proti odvrtávání velmi malý rozptyl naměřených hodnot u jednotlivých vzorků. Od maximální hodnoty zbytkového napětí toto napětí postupně klesá směrem do materiálu. Klesá až do hloubky 0,65 mm, kde se dosahuje nulové hodnoty zbytkového napětí a přechází v tah.

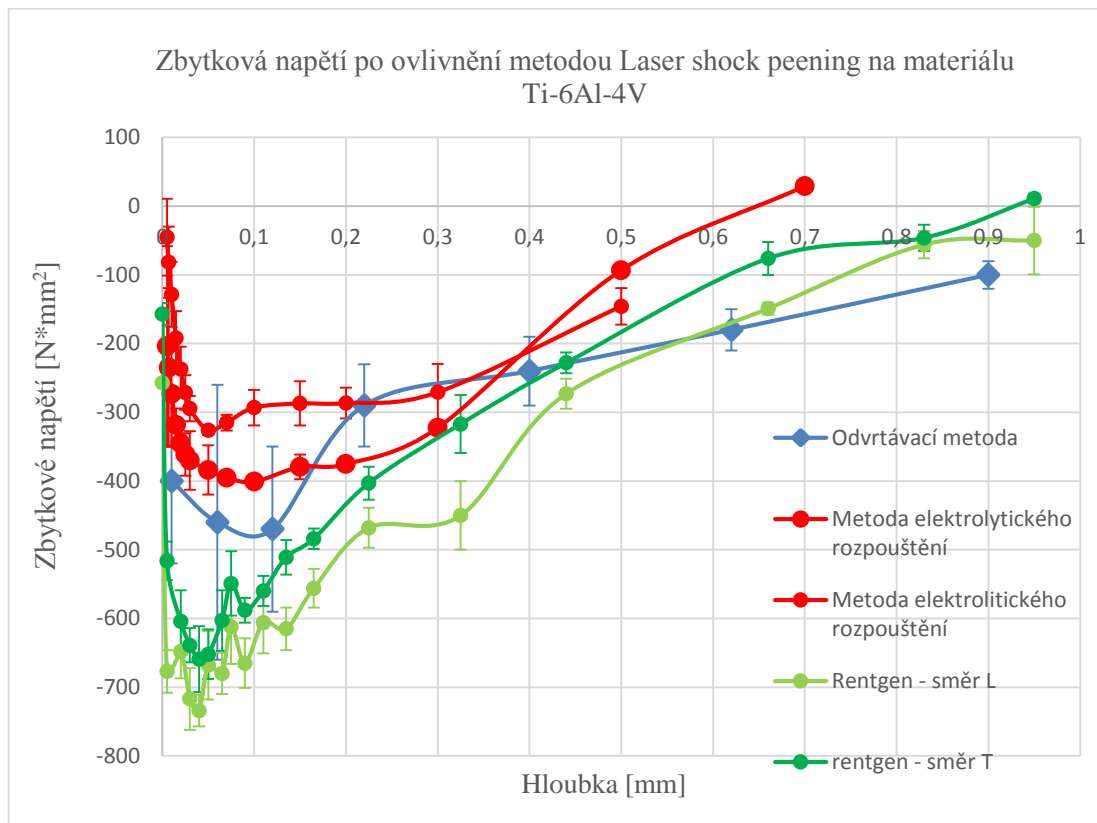


Obrázek 87 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>)

U vzorků ovlivněných 2500 pulzů/cm<sup>2</sup> a změřených metodou elektrolytického odleptávání byla zjištěna relaxace povrchové vrstvy (Obrázek 87). Napětí v povrchové vrstvě dosahuje výrazně snížených a blíží se nulové hodnotě zbytkového napětí. Hloubka maximálního napětí byla změřena od 0,04 mm do 0,3 mm, kde napětí dosahovalo 220 MPa až 310 MPa, měření odleptáváním mělo proti odvrtávání velmi malý rozptyl naměřených hodnot u jednotlivých vzorků. Od maximální hodnoty zbytkového napětí toto napětí postupně klesá směrem do materiálu. Klesá až do hloubky 0,7 mm, kde se dosahuje nulové hodnoty zbytkového napětí.

#### 4.3.7 Diskuze k tenzometrickým analytickým metodám

Aplikované metody zjišťování zbytkové napjatosti, jak rtg difrakční metoda „sin<sup>2</sup>ψ“, tak i metoda vetknutého nosníku a odvrtávací metoda, jsou založeny na zcela odlišných principech a nejsou tedy navzájem zaměnitelné. Porovnat lze hodnoty změřené těmito metodami nikoli však přímo vyvodit rozdílnou závislost cyklického chování materiálu na základě těchto měření. Mechanické metody jako je odvrtávání a metoda vetknutého nosníku (odleptávací metoda) jsou založeny na zjišťování průměrného zbytkového napětí. Z tohoto důvodu tyto dvě metody lépe popisují provozní chování součásti, protože je pohlíženo na součást jako na celek v ohledu makroskopických zbytkových napětí na povrchu. Rentgenová difrakční metoda zjišťuje zbytková napětí prvního druhu, která jsou vztahována na celkové chování součásti, z tohoto důvodu lze hůře odhadnout chování součásti změřené pouze touto metodou, protože vypovídající hodnota je snížena o tento vztah. Oproti tomu metoda měření rentgenovou difrakční tenzometrií je zcela exaktní ve smyslu popisu deformace a předpětí materiálu na atomové úrovni.



Obrázek 88 Porovnání různých metod měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)

Porovnání metod je znázorněno v grafu závislosti zbytkového napětí na hloubce ovlivnění (Obrázek 88). Je vidět podobný trend, kde v povrchové vrstvě dochází u všech metod k zachycení prudkého nárůstu tlakového zbytkového napětí. Tento nárůst je zcela v souladu s literaturou, kde LSPwC (bez ablační vrstvy) dosahuje zbytkových napětí na povrchu blízkých nule a postupně směrem do materiálu dosahuje maximální hodnoty [110][182].

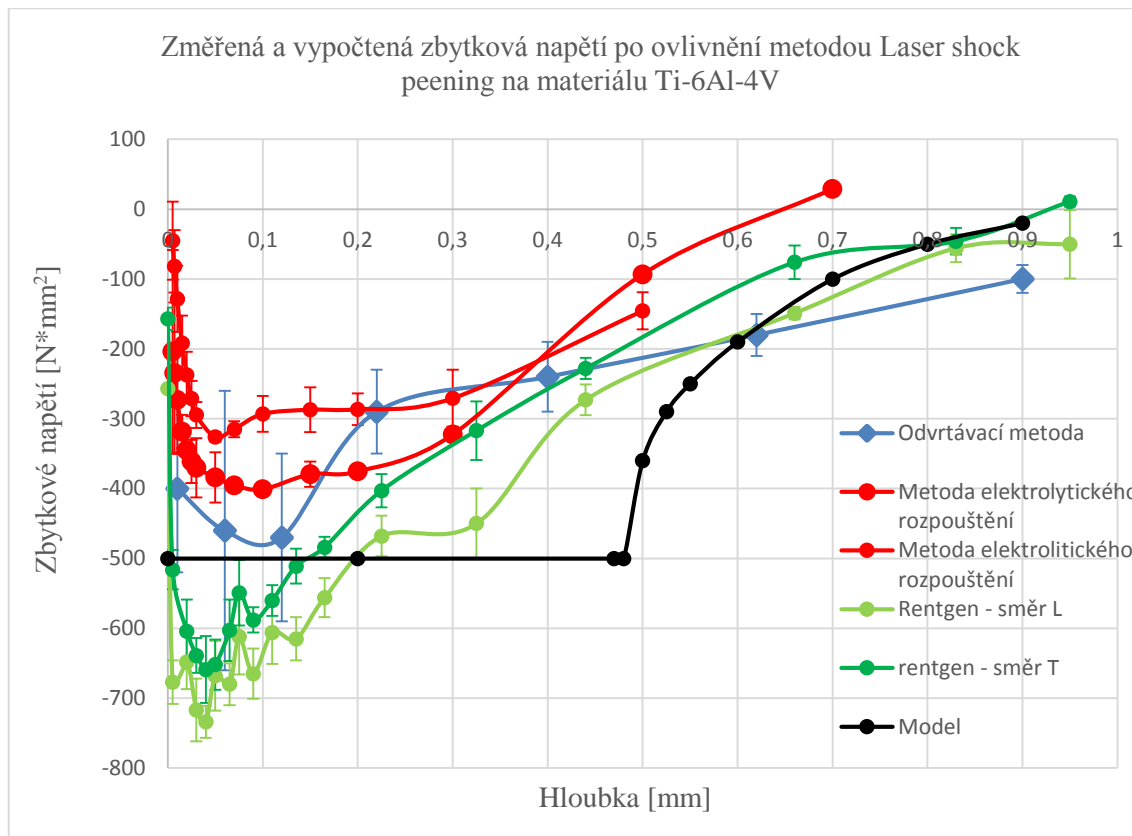
Druhou částí je lineární průběh zbytkového napětí, u kterého je důležitá jeho velikost a hloubka. Hloubka lze uvažovat podobná u všech měření přibližně 0,3 až 0,4 mm, ale velikost zbytkového napětí se již dle zvolené metody značně liší. U metody vetknutého nosníku (elektrolytického rozpouštění) je zbytkové napětí 300 až 400 MPa, zatímco u metody měření rentgenovou difrakční tenzometrií se pohybuje okolo 600 MPa. Odvrtávací metodou bylo změřeno zbytkové napětí od 300 do 500 MPa.

Ve větší hloubce materiálu (nad 0,4 mm) dohází k postupnému snižování zbytkového napětí až na nulovou hodnotu. Všemi metodami byl naměřen podobný trend závislosti zbytkového napětí na hloubce. Odvrtávací metodou bylo změřeno protnutí nulové osy přibližně v 0,65 mm z důvodu nižší počáteční hodnoty zbytkového napětí. Metodou rentgenové difrakce bylo změřeno protnutí nulové osy přibližně v 0,95 mm pod povrchem a odvrtávací metodou tento průnik nebyl změřen, ale dle trendu ho lze předpokládat v hloubce 1,2 mm.



#### 4.4 Porovnání výpočetního modelu a měření zbytkových napětí

Do jednoho grafu byl vynesena zjednodušený model závislosti zbytkového napětí na hloubce a závislosti zbytkových napětí na hloubce změřené různými metodami (Obrázek 89).

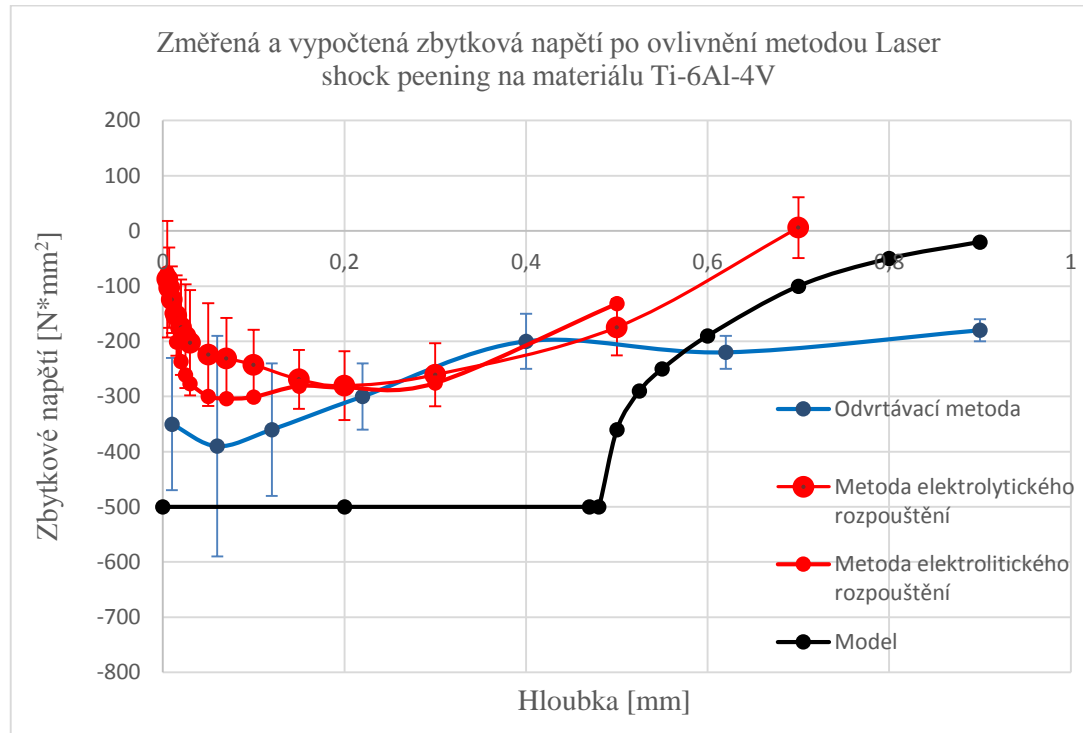


Obrázek 89 Porovnání změřeného a vypočteného zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)[247]

Model nepočítá s tenkou povrchovou vrstvou, která dochází v důsledku spálení povrchu laserem a následnou relaxací zbytkového napětí, případně mohou vznikat krátery na povrchu při nepoužití ablační vrstvy [133][147]. Technologii je výhodné používat za použití ablační vrstvy, která zabrání nežádoucímu tepelnému efektu laseru. Součásti ovlivněné technologií LSP, za použití barvy nebo pásky sloužící k ochraně povrchu, nebudou mít povrchovou vrstvu o menším zbytkovém napětí, než je napětí materiálu ve větší hloubce. Bez použití ablační vrstvy dochází k poklesu napětí v hloubce několika mikrometrů až několika desítek mikrometrů [110][182][247].

V hloubce větší než 50  $\mu\text{m}$  lze předpokládat lineární průběh zbytkového napětí [110]. Pomocí modelu byla spočítána hloubka lineárního zbytkového napětí 0,48 mm, měřením byla zjištěna tato hloubka 0,3 až 0,4 mm. Tento rozdíl může být způsobený několika faktory. Menší změřená hloubka může být způsobena menším dosaženým tlakem generovaného plazmatu, zapříčiněné nepoužitím ablační vrstvy. Při jejím použití lze předpokládat zvýšení tlaku a tím i zvýšení jak velikosti, tak hloubky zbytkového napětí. Druhým důvodem může být zjednodušení modelu, které nepočítá se všemi procesními parametry [247].

Velikost zbytkového napětí vypočteného modelem odpovídá měření v oblasti největší velikosti zbytkového napětí (pod povrchem) a v oblasti hluboko pod povrchem kde se napětí blíží k nule. Hodnoty maximální hloubky ovlivnění a maximální velikosti zbytkového napětí jsou nejdůležitější i z ohledu odolnosti součásti proti šíření cyklických trhlin.

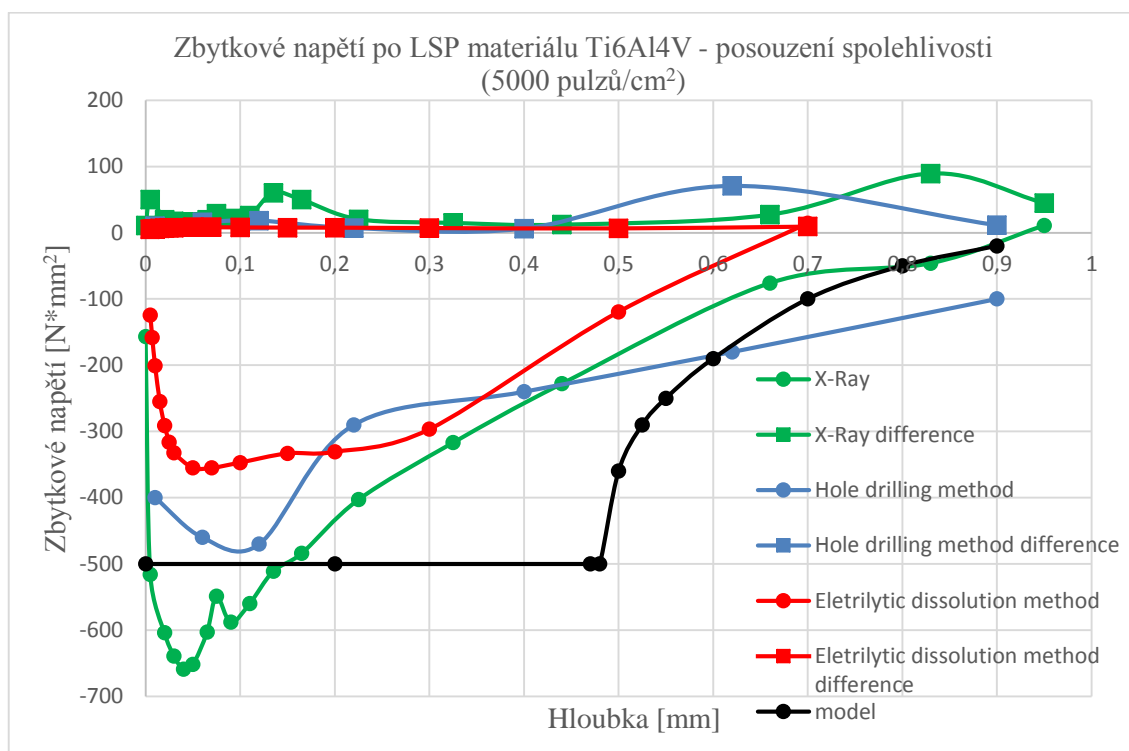


Obrázek 90 Porovnání změřeného a vypočteného zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>) [247]

Model reprezentuje dobře tvar zbytkového napětí v porovnání s měřením. Lineární část zbytkového napětí má podobný charakter, naměřena byla o 40 % menší hodnota oproti modelu (Obrázek 90). U nelineární části dochází k lepší shodě, kde se v některých případech dokonce protínají křivky měření s křivkou modelu. Model nepostihuje počet pulzů na cm<sup>2</sup>, tento faktor se ukázal jako zásadní pro dosažení maximálního zbytkového napětí [247].

Pro popsání shody modelu s měřením a pro vytvoření rozhodovacího mezníku bylo zvoleno grafické znázornění. Toto grafické znázornění vychází z převrácené hodnoty podílu modelu s měřením. Čím více se blíží model hodnotám naměřeným některou z metod, hodnota popisující změnu vynesena ve křivce je větší. Při malé shodě je velmi blízko nulové hodnotě. Křivky jednotlivých měření a křivky popisující shodu jsou vyobrazeny stejnou barvou pro snazší identifikaci (Obrázek 91) [247].





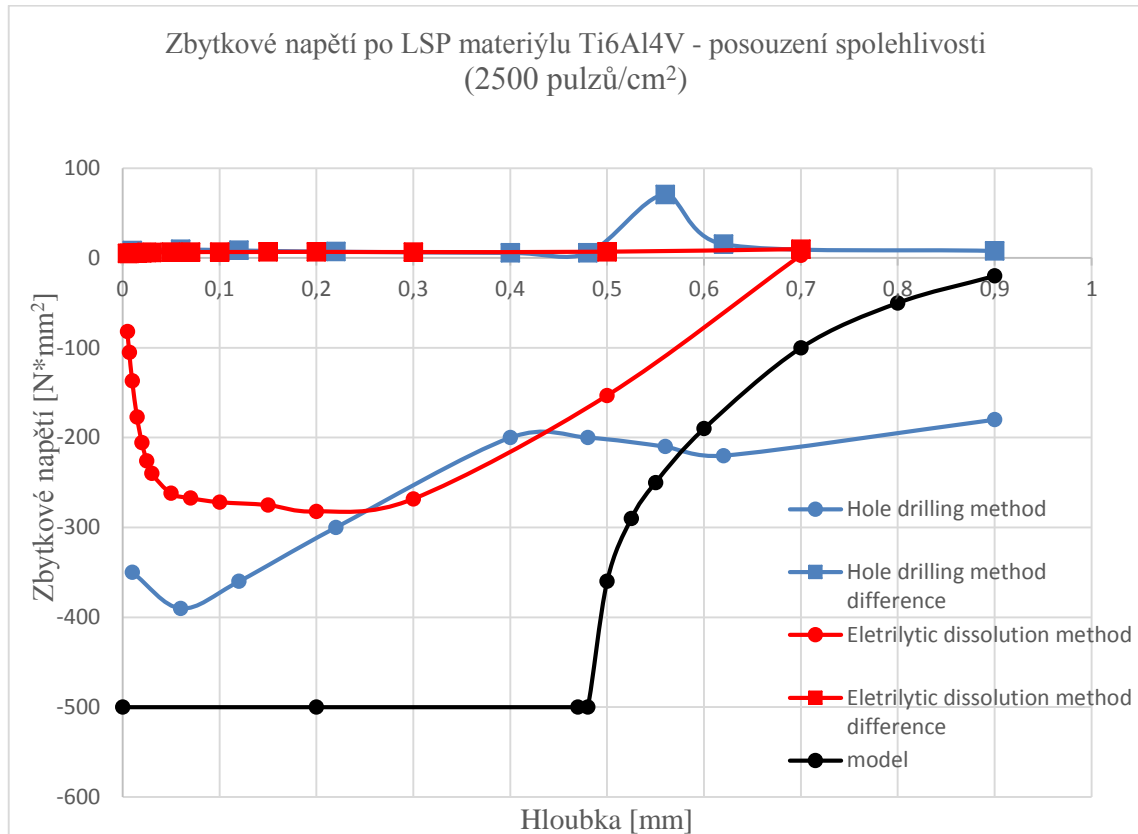
Obrázek 91 Zobrazení shody naměřených hodnot za pomoci jednotlivých měřicích metod s modelem na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)

Z křivek shody je patrné, že k první shodě dochází v místě 0,1 mm až 0,2 mm pod povrchem pro metodu měření rentgenovou difrakcí s modelem. Měření metodou rentgenové difrakce velice věrně kopíruje teoreticky určený průběh zbytkového napětí v hloubce 0,8 mm pod povrchem.

K další shodě dochází v případě odvrtávání v hloubce přibližně 0,6 mm. Křivka zbytkového napětí změřena metodou odvrtávání se již blížila k teoretické hodnotě okolo 0,1 mm, ale k jejímu úplnému protnutí dochází až hluboko pod povrchem.

Hodnoty naměřené metodou elektrolytického odleptávání jsou vzdáleny od teoretického modelu nejvíce. Oproti tomu tvar křivky modelu je velmi podobný tvaru křivky získanému právě metodou elektrolytického odleptávání. V úvahu přichází několik variant interpretace naměřených a vypočtených hodnot. Při předpokladu správnosti měření metodou elektrolytického odleptávání je nutné hodnoty zbytkového napětí vypočtené modelováním vynásobit koeficientem, vypočteným z většího množství měření. Při tomto předpokladu všem musíme počítat s větší chybou ostatních metod měření. Při předpokladu správnosti modelu, je nutné brát v úvahu systematickou nepřesnost měření elektrolytickým odleptáváním [252].

V některých místech může docházet ke shodě modelu s vícero druhy měření, tento jev signalizuje správnost modelu v daném místě.



Obrázek 92 Zobrazení shody naměřených hodnot za pomoci jednotlivých měřicích metod s modelem na materiálu Ti-6Al-4V (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>)

V případě vzorků ovlivněných metodou LSP s hustotou 2500 pulzů/cm<sup>2</sup> bylo provedeno měření pouze metodami postupného elektrolytického odleptávání a odvrtávání. Metodou odvrtávání bylo v podvrchové vrstvě změřeno napětí 400 MPa, což je 80 % velikosti napětí predikované modelem (Obrázek 92). K průtoku křivek modelu a měření odvrtáváním došlo v hloubce 0,57 mm, následně bylo změřeno výrazně větší zbytkové napětí touto metodou, než predikuje model. Ve srovnání modelu s křivkou získanou měření elektrolytickým odleptáváním je patrné, že hodnoty získané měření jsou menší přibližně o 40 %, ale tvar obou grafů je velmi podobný. Stejně jako v případě použití větší hustoty pulzů při předpokladu správnosti měření metodou elektrolytického odleptávání je nutné hodnoty zbytkového napětí vypočtené modelováním vynásobit koeficientem nebo při předpokladu správnosti modelu, je nutné brát v úvahu systematickou nepřesnost měření elektrolytickým odleptáváním.

Křivky shody reflektují reciproce přesnosti modelu k jednotlivým měřením při předpokladu správnosti měření. Stejně jako při srovnání měření k modelu jsou viditelné oblasti větší a menší shody modelu s měřením.



## 4.5 Měření dalších vlastností povrchu

Měření dalších vlastností je důležité v určení vztahu ke zbytkovým napětím, nebo možnosti predikce zbytkových napětí, či únavového chování z jiných charakteristik povrchu materiálu.

Měření vybraných vlastností povrchu již bylo zpracováno zároveň v rámci diplomové práce, která se zabývala porovnáním vlastností povrchu materiálu dosažených při použití různých dokončovacích metod [231].

### 4.5.1 Měření drsnosti

Měření drsnosti bylo provedeno na drsnoměru/profiloměru Taylor Hobson. Pro dostatečný popis vlastností povrchu materiálu byly měřeny a vyhodnocovány charakteristiky drsnosti Ra, Rz, Rmax, Rt, Rp, Rv a Rsm (Tabulka 12).

Drsnost povrchu byla měřena u frézovaného vzorku i na vzorcích ovlivněných metodou LSP (vzorek číslo 1 a 2 - 5000 pulzů/cm<sup>2</sup>) a (vzorek 3 a 4 - 2500 pulzů/cm<sup>2</sup>). Každé měření drsnosti bylo provedeno v pěti opakováních. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřených charakteristik.

Tabulka 12 Parametry drsnosti ovlivněných a neovlivněných vzorků

Vzorek	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax [μm]	Rt [μm]	Rp [μm]	Rv [μm]	Rsm [μm]
Po frézování	0,4	2,5	3,1	3,4	1,3	1,3	184,7
LSP 1 a 2	3,2	19,8	23,8	23,8	8,7	11,1	127,2
LSP 3 a 4	4,3	24,1	26,3	30,3	12,0	12,2	186,0

Střední aritmetická úchylka profilu Ra byla v případě frézovaných vzorků 0,4 um. U zpracovaných vzorků se zvýšila drsnost na Ra 3,2 (v případě 5000 pulzů/cm<sup>2</sup>) a Ra 4,3 (v případě 2500 pulzů/cm<sup>2</sup>). Tento velký nárůst byl pravděpodobně způsoben faktem, že vzorky byly ovlivněny technologií LSP bez použití ablační vrstvy. Materiál pro ablací plazmatu sloužil povrch vzorku. Při použití ablační vrstvy dochází pouze k mírné změně drsnosti, která může být jak negativní tak i pozitivní. Největší výška profilu, která je velmi důležitá v ohledu povrchových vlastností, se zvýšila z hodnoty na Rz 2,5 na Rz 19,8 respektive Rz 24,1. Takto velká změna parametru Rz může mít za následek změnu chování materiálu při cyklickém namáhání. Ostatní parametry drsnosti také úměrně vzrostly.

Větší nárůst drsnosti byl u vzorku zpracovaného 2500 pulzy/cm<sup>2</sup>. Tento nárůst byl pravděpodobně způsoben malým překryvem jednotlivých pulzů, a tím i nehomogenním zdrsněním povrchu. U vzorku ovlivněného 5000 pulzy/cm<sup>2</sup> byl nárůst drsnosti menší, díky velkému překryvu jednotlivých pulzů a tím zahlazení nerovností mezi jednotlivými pulzy.

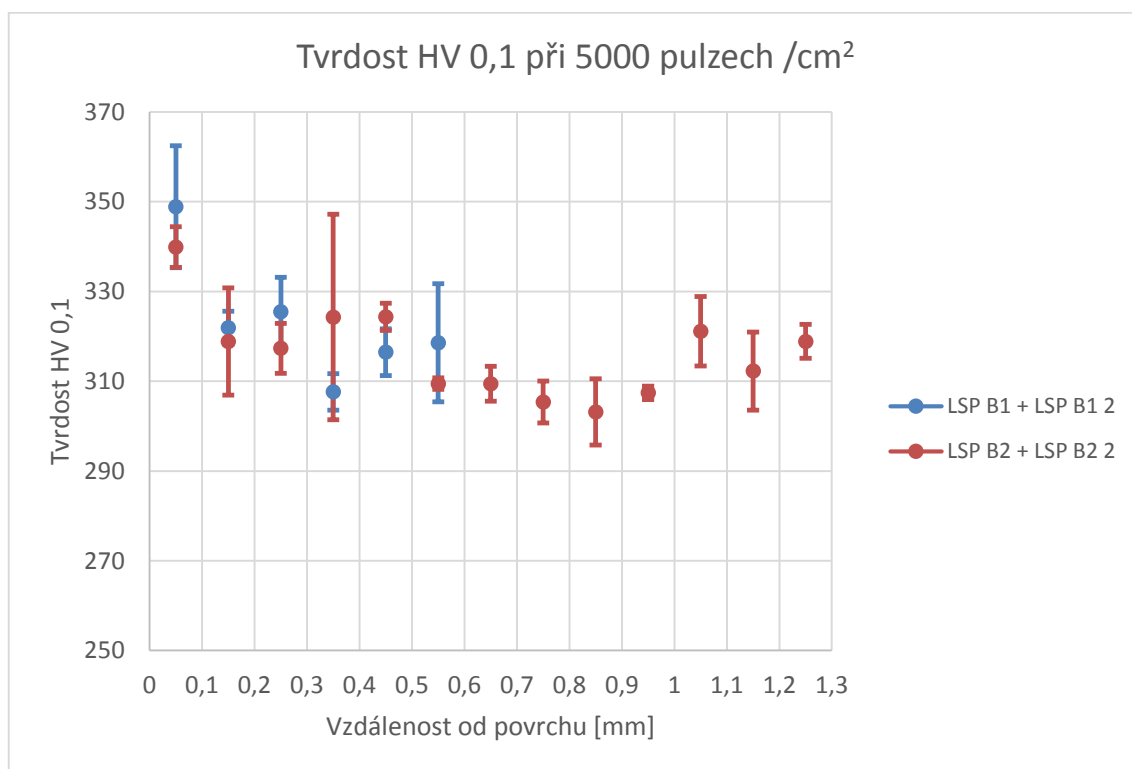
### 4.5.2 Měření tvrdosti

Tvrdost byla změřena v laboratoři Ústavu obrábění, projektování a metrologie: pro měření byl použit mikrotvrdměr značky Future Tech (Obrázek 93).

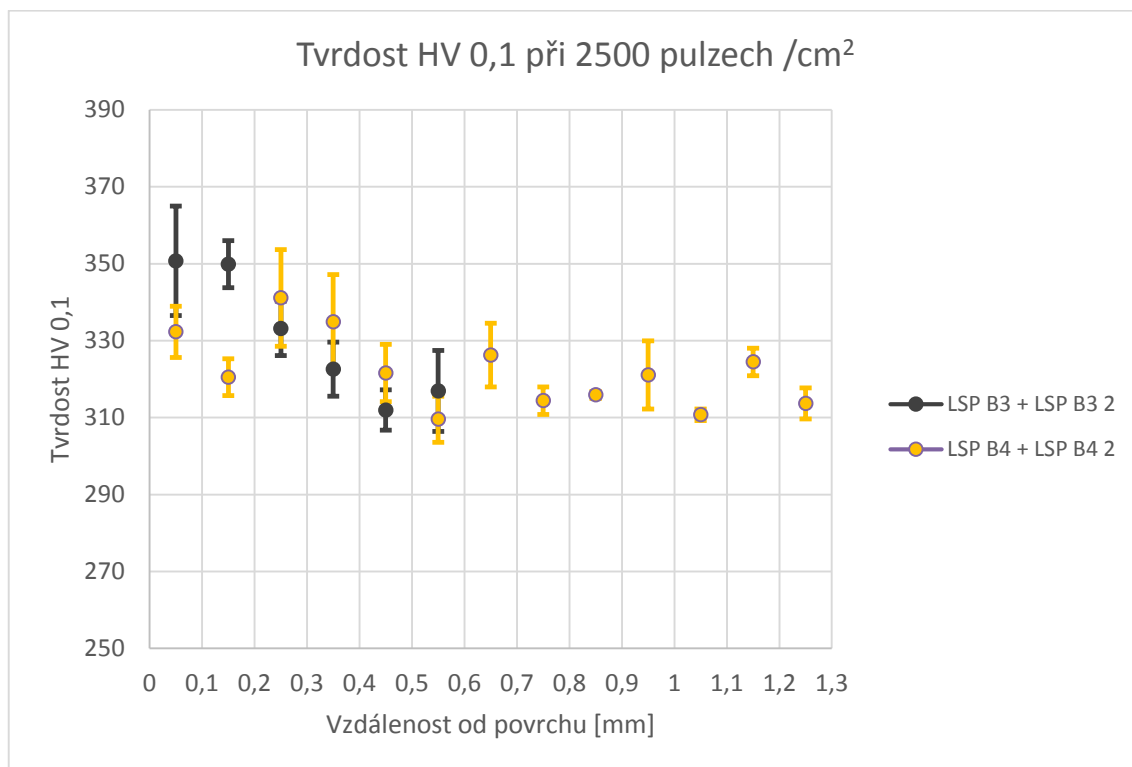


Obrázek 93 Mikrotvrdoměr Future Tech FM100 s měřením polohy, automatickým zatěžováním, CCD kamerou a odečtem vpichu

Tvrdość byla změřena na šikmém řezu materiálem, aby bylo možné zachytit i malé změny tvrdosti od povrchu směrem do materiálu. Tvrdość byla měřena na vzorcích 1 a 2 ovlivněných 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> (Obrázek 94) a na vzorcích 3 a 4 ovlivněných 2500 pulzů/cm<sup>2</sup> (Obrázek 95). Každá hodnota se skládá z průměru 5 naměřených hodnot v dané hloubce. Z naměřených hodnot v každé hloubce byl vypočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Měření tvrdosti bylo provedeno na každém ovlivněném vzorku (jak 5000 pulzů/cm<sup>2</sup> tak i 2500 pulzů/cm<sup>2</sup>).



Obrázek 94 Závislost tvrdosti materiálu HV 0,1 na vzdálenosti od povrchu zpracovaného technologií LSP (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)



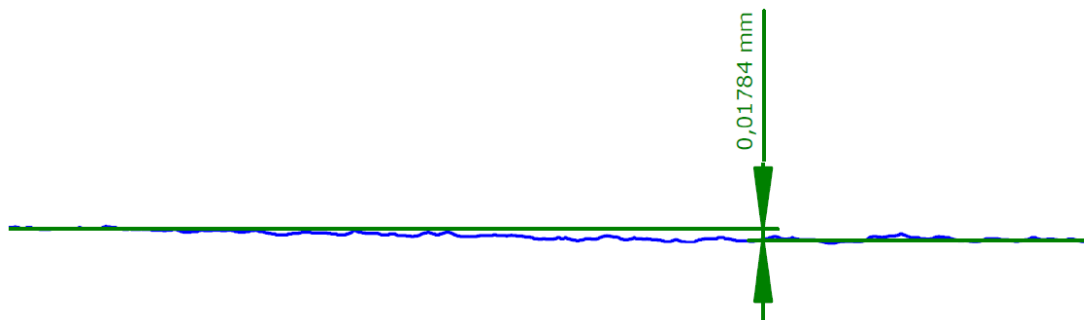
Obrázek 95 Závislost tvrdosti materiálu HV 0,1 na vzdálenosti od povrchu zpracovaného technologií LSP (2500 pulzů/cm<sup>2</sup>)

V obou případech ovlivnění byl změřen nárůst tvrdosti v povrchové vrstvě. Zvýšení tvrdosti přibližně odpovídalo 10 % z celkové tvrdosti a dosahovalo do hloubky 0,3 až 0,4 mm.

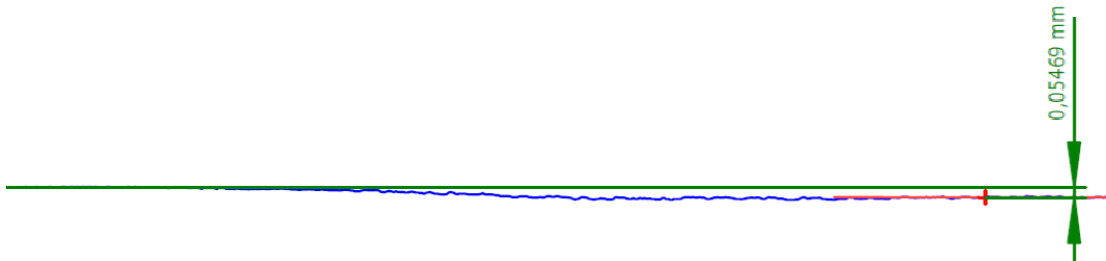
V porovnání s hloubkou zbytkového napětí, která dosahovala až 0,6 mm, nelze dát do souvislosti tyto dvě měřené veličiny. Navíc velikost chyby měření v některých případech odpovídá velikosti změny tvrdosti. Proto nelze s jistotou určit míru a hloubku ovlivnění součásti.

#### 4.5.3 Měření úchylek tvaru a polohy

Na vzorcích ovlivněných metodou LSP byly změřeny úchylnosti tvaru a polohy. Měření bylo provedeno na souřadnicovém měřicím stroji, kde byla měřena průměrná vzdálenost mezi rovinou teoretického, neovlivněného povrchu a povrchu ovlivněného metodou LSP (Obrázek 96 a Obrázek 97).



Obrázek 96 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP3



Obrázek 97 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP4

Na vzorcích byla změřena změna tvaru a polohy povrchu. Na vzorku číslo 3 byla změřena průměrná úchylka od původního tvaru 0,0178 mm. Na vzorku číslo 4 byla tato úchylka 0,055 mm.

Na měřených vzorcích bylo viditelné i zvýšení drsnosti povrchu, tento jev byl zapříčiněn nastavením samotné technologie. Tím, že se ovlivnění provádělo bez použití ochranné ablační vrstvy, došlo k částečnému spálení a tím i zdrsnění povrchu. Efekt změny drsnosti se projevuje i v případě použití ablační vrstvy s tímto nastavením je však možnost lepšího řízení procesu a povrch je pouze deformován a nedochází k jeho spálení a částečnému okujení.

#### 4.6 Vztah zbytkových napětí s ostatními vlastnostmi povrchu

Vztah změřených zbytkových napětí k naměřeným hodnotám tvrdosti nelze určit. Všeobecně lze potvrdit, že se zvyšujícím se zbytkovým napětím vzrůstá i drsnost povrchu z důvodu větší míry interakce laseru s povrchem materiálu. Tento efekt byl však pozorován pouze u LSP bez použití ablační vrstvy. Při tomto nastavení dochází k ovlivnění povrchu jak tlakem plazmatu, tak i k poničení povrchové vrstvy vysokou teplotou. Při použití ablační vrstvy bude efekt LSP na změnu tvrdosti pravděpodobně výrazně nižší. Popis vztahu dosažené drsnosti a zbytkových napětí je méně přesný z důvodu malé změny drsnosti a její variabilitě při použití různé hustoty pulzů pro ovlivnění. Čím vyšší hustota pulzů tím vyšší zbytkové napětí, ale ve vztahu k výsledné drsnosti záleží spíše na distribuci a překrytí jednotlivých pulzů. To znamená, že při vyšší hustotě pulzů může mít menší drsnost a naopak.

Vztah zbytkových napětí s tvrdostí nebyl jednoznačně prokázán. Měřením byl zjištěn nárůst tvrdosti na povrchu součásti, který zasahoval do hloubky 0,3 až 0,4 mm. Tlaková zbytková napětí dosahovala přibližně do dvojnásobné hloubky 0,7 mm. Nevýhodou vztahu mezi tvrdostí a zbytkovým napětím je obtížné určení míry zbytkových napětí v povrchu.

Při popisu zbytkového napětí za pomoci měření úchylek tvaru a polohy lze vycházet z jednoduchého vztahu závislosti deformace na napětí.

$$(4.16) \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

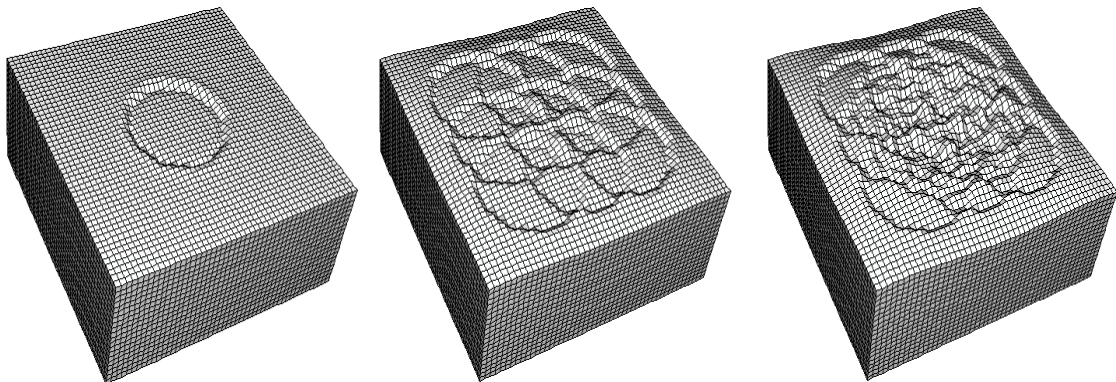
Kde  $\varepsilon$  je deformace vyjádřená v procentech,  $\sigma$  je napětí a  $E$  je modul pružnosti v tahu. Velikost prohlubně vytvořené laserem by měla odpovídat velikosti plochy pod křivkou závislosti zbytkového napětí na hloubce podělené Youngovým modulem pružnosti zpracované titanové slitiny.



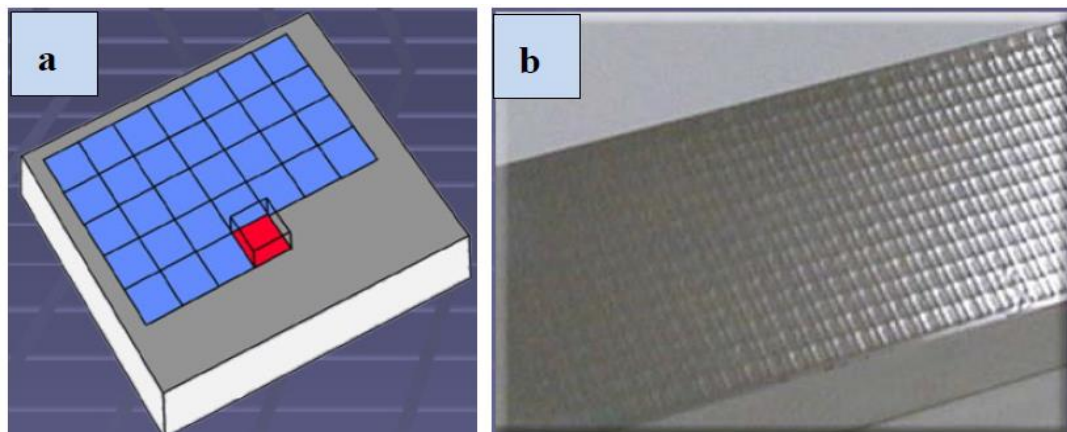
$$(4.17) \quad x = \int_0^h \frac{\sigma h}{E} dh$$

Plocha pod křivkou při aplikovaném ovlivnění mohla dosáhnout maximální hodnoty 500 MPa\*mm a Youngův modul pružnosti Ti-6Al-4V je 114 GPa. Po vzájemném podělení těchto dvou hodnot vychází teoretické prohloubení součásti o 0,0044 mm. Tato hodnota je přibližně 4 x menší než bylo naměřeno u vzorku číslo 3 (0,0178 mm) a více než 12 krát menší než bylo naměřeno u vzorku číslo 4 (0,055 mm).

Přesnost měření značně ovlivňuje drsnost ovlivněného povrchu, která dosahuje desítek procent změny polohy povrchu. Zmenšení drsnosti, a tedy i zpřesnění měření změny polohy, by bylo možné dosáhnout při použití ablační vrstvy. Jak bylo vysvětleno, ablační vrstva výrazně ovlivňuje povrchovou vrstvu zpracovávaného materiálu a to jak v ohledu zbytkových napětí, tak i z hlediska výsledné drsnosti. Při nepoužití ablační vrstvy (LSPwC) dochází vlivem teploty k relaxaci povrchu a tím i k jeho deformaci. Navíc povrchová vrstva ovlivněná vysokou teplotou plazmatu vykazuje výrazně vyšší drsnost. Při použití ablační vrstvy je možné vhodnou strategií docílit výrazného snížení drsnosti. Při použití kruhového svazku je tato úloha ještě složitější a výsledná drsnost se skládá z průniku jednotlivých ovlivnění, které nejsou rovnoměrné na celém povrchu.



Obrázek 98 Deformace povrchu při použití 1, 9 nebo 25 pulzů na stejně velké oblasti [41]



Obrázek 99 Simulace kladení čtvercových pulzů (a), výsledný povrch (b) [155]



## 5 Aplikace metodiky

Prodlužování životnosti cyklicky namáhaných součástí je velmi důležitý faktor rozvoje strojírenské výroby. Díky tomu, že většina mezních stavů součástí je zapříčiněna únavovými lomy, je účelné hledání nových a efektivnějších metod pro oddalování těchto lomů. Technologie LSP patří prokazatelně k velmi vhodným metodám pro zvyšování životnosti součástí. Se zvyšujícím se výkonem laserů se zvyšují i možnosti laserových technologií. V případě LSP je určitý požadavek na intenzitu laserového záření (hustota výkonu) přibližně  $10 \text{ GW/cm}^2$  a při zvýšení průměrného výkonu laseru při zachování parametrů přímo úměrně stoupá produktivita procesu.

S produktivitou technologie a náklady na zpracování je úzce spojena i její aplikace. Díky novým možnostem zařízení je technologie dostupná novým aplikacím, kde pomalu začíná pronikat z leteckého a jaderného průmyslu i do jiných odvětví. Metodika testování byla doposud velmi striktní a to hlavně z důvodů oblastí aplikace metody LSP. V nynější době je potřeba přehodnotit zavedené postupy testování, protože výrobci strojních součástí, kolejových vozidel nebo dalších dostupných oblastí mají různé nároky na přesnost a kvalitu výroby než výrobci leteckých motorů. Před ovlivněním součásti je ovšem stále vhodné používat výpočet nebo simulaci zbytkových napětí. Metodika volby měřicí metody může pomoci s návrhem procesu ovlivnění. Díky ní je možné podle předpokládané hloubky a míry ovlivnění určit i přibližné procesní parametry.

Práce je zaměřena na modelování zpevnění povrchu. Toto modelování vycházelo z experimentů měření zbytkových napětí různými technologiemi. Šlo o metody měření zbytkového napětí pomocí rentgenu, odvtávání a metodou vetknutého nosníku. Na základě teoretického výpočtu chování materiálu byl sestaven model zbytkového napětí po ovlivnění laserem. Teoretické a experimentální hodnoty byly porovnány a model byl ověřen díky sadě měření.

Model je ve shodě v různém rozsahu pracovních parametrů a míry ovlivnění pro jednotlivé metody. Na základě této shody byly určeny oblasti využitelnosti jednotlivých metod měření po ovlivnění LSP. Díky výpočtu je možné zvolit metodu měření na základě předpokládaných vlastností ovlivněné povrchové vrstvy. Tato volba je možná díky predikci výsledné hloubky ovlivnění. Model určuje i přibližnou hodnotu zbytkového napětí na povrchu a pro technologii LSP s ablační vrstvou je možné predikovat tyto hodnoty s určitou chybou. Modelem není možné určovat celý průběh zbytkového napětí v materiálu, protože dle porovnání s experimentem byla chyba (odchylka měření a modelu) ve středních hloubkách (0,5 mm) velmi velká (více než 50 %).

### 5.1 Důvody aplikace

Doposud byla největší překážkou masového nasazení metody LSP produktivita. Při použití průmyslu dostupných laserů s parametry 2,5 J, 10 Hz, je při běžné intenzitě ( $10 \text{ GW/cm}^2$ ) a překryvem pulzů (80 %) potřebná doba pro ovlivnění  $1 \text{ m}^2$  přibližně 50 hodin. Laser vyvinutý v centru HiLASE dovoluje díky své energii v pulzu 100 J při zachované frekvenci 10 Hz ovlivnit plochu  $1 \text{ m}^2$  za stejných procesních parametrů přibližně za 1,5 hodiny. Tento vzrůst produktivity má za následek možnost aplikace LSP na celou řadu nových oblastí. Nejedná se pouze o velké dílce, ale také o velkosériovou

výrobu, kde součást může být ovlivněna pouze několika pulzy. Právě díky novým možnostem LSP může dojít k rozšíření z jednotek aplikací na tisíce různých uplatnění pro cyklicky namáhané součásti. Možný nárůst aplikací je podpořen skutečností, že prodloužení životnosti součásti po ovlivnění laserem může být až několikanásobně vyšší než běžnými technologiemi používanými pro zvyšování zbytkových napětí. Tento příznivý efekt je způsoben hlavně větší hloubkou ovlivnění a jeho rovnoměrností (Obrázek 100).



Obrázek 100 Porovnání dosahovaných zbytkových napětí při aplikaci různých dokončovacích metod

Při rozšíření technologie na „běžné aplikace“ (bez vysokých nároků na spolehlivost), kde vlivem poškozené součásti nedochází k ohrožení života (jako je tomu například v leteckém průmyslu) bude nutné zrychlit a také zlevnit již zažitou metodiku testování součástí po procesu LSP.

Ve vývoji laserů musíme počítat s exponenciálním nárůstem výkonových parametrů, oproti klasickým konvenčním technologiím, kde dochází k posunu inovací pouze o jednotky, případně desítky procent. V prosinci roku 2016 bylo dosaženo pomyslného milníku překonáním 1 kW průměrného výkonu laseru s nanosekundovými pulzy a vysokou energií v pulzu, který je mimo jiné využíván pro technologii LSP (Obrázek 101). Až do nynějšího dne drží tento systém světové prvenství v dosažených parametrech [251]. Tento systém má možnosti rozšíření, díky kterým byl navržen plán dalšího zvýšení na 2 kW průměrného výkonu. Právě průměrný výkon laseru výrazně zvyšuje produktivitu technologie a tím i možnosti jejího použití [251].



Obrázek 101 Bivoj laser v centru HiLASE s 1 kW průměrného výkonu [251]

Komerčně nabízejí ovlivňování technologií LSP dvě průmyslové společnosti a přibližně 10 výzkumných skupin po celém světě, z nichž je 5 v Asii. Většinou jsou používány lasery o průměrném výkonu od 25 W do 100 W (nejsilnější komerčně dostupný laser má výkon 200 W od firmy LSP Technologies). Při rozšíření technologie díky vývoji laserů, je nutné volit i vhodné měřicí metody s ohledem na oblast materiálů, kterou chce uživatel laseru zpracovávat. Při pořízení laseru je téměř nezbytně nutná investice do měřicího zařízení.

V současné době běžně dostupné lasery, které jsou používány pro technologii LSP, jsou velmi spolehlivé a není problém je zařadit do nepřetržitého provozu [251].

## 5.2 Přínos pro vědu a praxi

V současné době jsou všechna ovlivnění metodou LSP předem simulována metodou konečných prvků a měřena na zjištění velikosti vneseného zbytkového napětí. Simulace, testování a následná validace je nutná z důvodu požadavků průmyslového segmentu, ve kterém se LSP používá (letecký a jaderný průmysl). S rostoucím počtem aplikací a snižováním průměrné ceny ovlivněné součásti je nutné snižování počtu nezbytných testů pro validaci procesu. Při snížení počtu nezbytných měření musí však stále zůstat jejich dostatečná vypovídající hodnota.

Komplexní simulací MKP modelováním nebo zjednodušeným modelem je přibližně určena hloubka a míra ovlivnění a na základě těchto hodnot může být rozhodnuto o měřicí metodě. Experimentálně byla zjištěna shoda modelu s měřeními a tím určena přibližná přesnost jednotlivých metod.

Navržená metodika výběru měřicí metody má za následek zkrácení času prototypové výroby při hledání vhodných parametrů ovlivnění. Může mít také zásadní vliv při validaci vyráběného prototypového dílce nebo menší série. U malosériové nebo kusové výroby (hledání vhodných parametrů technologie pro materiál a aplikaci) má použití metodiky za následek rychlejší validaci při redukci počtu měření.

U velkosériové výroby by byl vliv této metodiky výběru výrazně zmenšen, protože musí být podrobně vypracována metodika testování a nastaveny počty testů nezbytných pro správnou validaci procesu velkého počtu kusů. Na stanoveném počtu měření při již probíhající velkosériové výrobě nemá model ani metodika volby vhodné metody zásadní vliv.

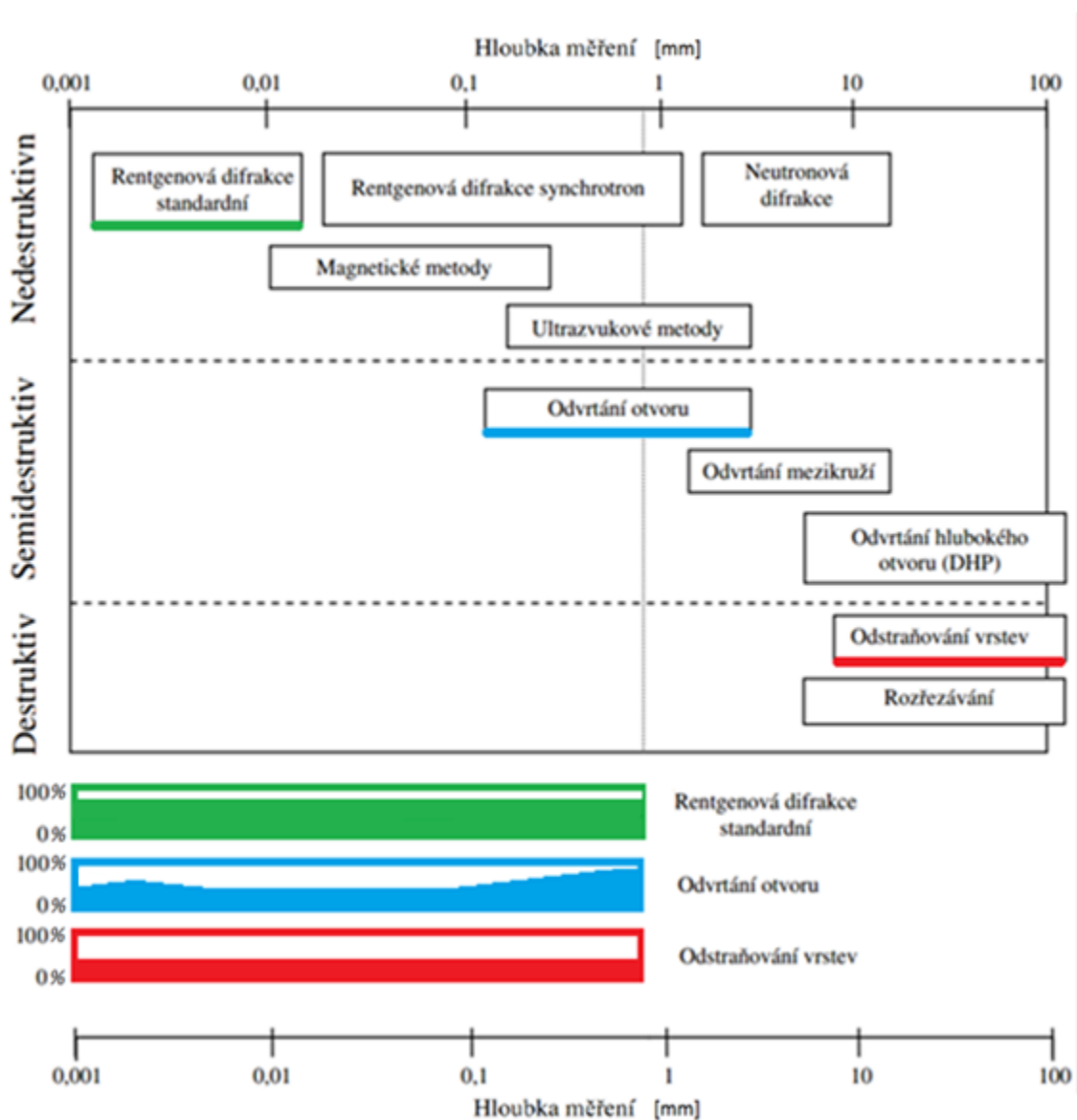


### 5.3 Využitelnost predikce vlastností povrchu

V závislosti na vyvíjené metodice určení vhodné měřicí metody pro kombinaci technologických parametrů a zpracovávaného materiálu je možné určit přibližnou důvěryhodnost ve změřené oblasti [252].

Při návrhu LSP stanice, je nutné počítat i s následným měřením zbytkového napětí a dalších vlastností povrchu. Výběr zařízení pro měření zbytkových napětí může být provedený na základě navržené metodiky stejným způsobem jako při volbě vhodné měřicí metody [252][307].

Při porovnání účinné hloubky měření jednotlivých metod byla zanesena jejich spolehlivost do grafu. Na obrázku je barevně znázorněna využitelnost jednotlivých metod oproti dosavadním znalostem použitelnosti metod v horní části obrázku (Obrázek 102).

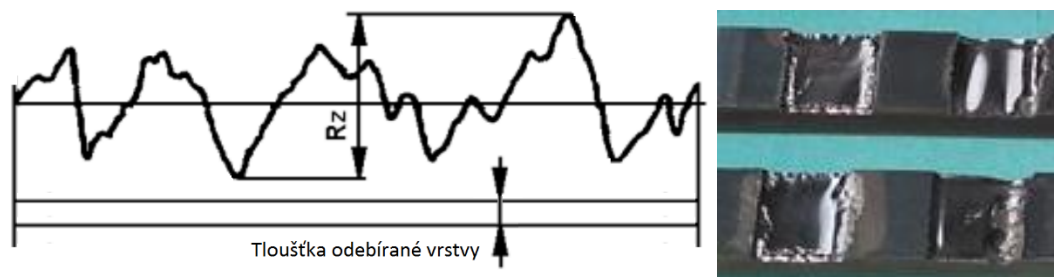


Obrázek 102 Použitelná hloubka měření jednotlivými metodami pro zjišťování zbytkových napětí.

Spolehlivost měření rentgenovou difrakcí je velmi vysoká, i směrodatná odchylka měření je v tomto případě velmi nízká, proto je výhodné vztahovat k ní možnosti jednotlivých metod i modelu zbytkových napětí. Největší chyba měření v případě rentgenové difrakce vzniká nedokonalostmi při odebrání materiálu leptáním [249][307].

Metoda odvrtávání je těsně pod povrchem (0,1 mm) materiálu dostatečně přesná, protože nástroj není opotřebovaný a vzdálenost k tenzometrické růžici je také malá. Odvrtáváním není možné zachytit přímo povrchové zbytkové napětí (do 0,02 mm), protože funguje na přírůstkovém principu porovnávání mezi vrstvami. Další nevýhodou jsou nepřesnosti ve střední hloubce měření (0,2 mm až 0,5 mm) kde většinou dochází k velkému rozptylu hodnot. Metodou odvrtáváním se dá relativně přesně určit hloubka, kde zbytkové napětí z tlaku přechází do tahu (0,5 mm až 1,5 mm) [249][307].

Metoda měření zbytkových napětí za pomoci elektrolytického rozpouštění dobře reflektuje trend zbytkového napětí, ale stejně jako metoda odvrtávání není schopna zachytit zbytkové napětí v povrchové vrstvě. Dále při postupném odebrání povrchu může docházet relativně k velké chybě nestejným úběrem materiálu. Díky těmto jevům může být nesprávně určena i hloubka vrstvy kde přechází tlakové napětí do tahového.



Obrázek 103 Znárodnění nerovnoměrnosti odleptávání a možného vlivu na přesnost měření.

Následně lze tedy předpokládat, že přesnost (využitelnost) metody Rentgenové difrakce se s přibývajícím hloubkou bude snižovat, a to hlavně díky nerovnoměrnému odebrání vrstev. Oproti tomu přesnost (využitelnost) metody postupného odstraňování vrstev se s přibývajícím měřenou hloubkou může zvyšovat díky kumulativnímu efektu deformace. Využitelná hloubka měření metodou odvrtávání je dána díky omezení normou a při hloubce blízké se maximální hloubce je přesnost metody velmi dobrá.

Využitelnost predikce může být dvojí, pro laboratoře a pro komerční provoz. V případě laboratoří je důležité predikovat dosažitelné parametry a mít možnost jejich ověření. Laboratoře mají často přístup k různým měřicím metodám. Ve většině případu se může jednat o redukci času od zadání výzkumného požadavku k výslednému ovlivnění a prokázání splněných parametrů.

U společností zabývajících se komerčním nabízením LSP technologie, lze vytipovat segment součástí a jejich požadavků na ovlivnění. Na základě analýzy je následně možné investice do zařízení s nejmenší chybou v předpokládané oblasti měření nebo je možné s vnesenou chybou počítat.

V ekonomické analýze procesu je zahrnutý čas potřebný na zpracování součástí a hodinové náklady na provoz zařízení. Cena ovlivnění součástí je tak dána náročností zpracování a provozními náklady. Nyní cena výroby dosahuje až několikanásobku a to





z důvodu nutného testování součásti, zda byl proces ovlivnění proveden správně a také z důvodu ověření opakovatelnosti výroby. Právě proto, že cena testování je výrazná, je nutné dobře zvážit metodu a rozsah měření.

## 5.4 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí

Cena měření a archivování hodnot ovlivnění zvyšuje výslednou cenu výroby. Ekonomická analýza ceny technologie LSP nepočítá náklady na měření, ale měření může výrazně prodlužovat proces výroby a společně s náklady na ukládání procesních dat navyšovat cenu až několikanásobně. Dle použité metody měření se velmi liší nároky na časovou náročnost a celkovou cenu validace. Cena měření může dosahovat až několika desítek tisíc korun v případě měření profilu zbytkových napětí za pomoci difrakční analýzy. Redukcí nezbytného počtu měření pro validaci je tak možno ušetřit nejen velké množství času, ale i tyto náklady.

Cena zařízení pro měření rengenové difrakce se může pohybovat od 3 milionů korun (Stresstech) až po desítky milionů. Dále je potřeba připočítat zařízení pro debírání vrstev mezi měřeními, cena tohoto zařízení se pohybuje kolem 300 000 Kč (Struers). Následně je potřeba změřit průběh zbytkového napětí od povrchu do hloubky materiálu, které se skládá minimálně z 10 měření. Změření průběhu zbytkového napětí na jednom vzorku, při započtení všech potřebných časů, je tedy otázkou jednoho dne. Čas měření lze zkrátit na polovinu při měření dvou vzorků najednou, protože doba leptání může být velmi podobná době samotného měření, tak lze vzorky vzájemně střídát. Komerční cena jednoho měření je přibližně 15 000 až 20 000 Kč.

Cena zařízení pro měření zbytkového napětí odvrtáváním se pohybuje od 1,2 do 2,5 milionu korun. Levnější varianta zařízení je založena na odvrtávání a měření za pomoci tenzometrické růžice. Cena vrtáku se pohybuje kolem 500 Kč a tenzometrické růžice 600 až 800 Kč. Doba měření a přípravy jednoho vzorku je přibližně 1,5 hodiny. Výsledná cena měření dosahuje hodnoty 5 000 Kč. Při použití dražší verze zařízení (Stresstech), založeného na měření posunu povrchu za pomoci difrakce, odpadá lepení tenzometrické růžice na povrch. Spotřební materiál se tedy skládá pouze z vrtáku a čas na přípravu a měření se může zkrátit na 30 minut. Výsledná cena měření může být tedy při vrtání velkého počtu vzorků a dostatečném využití odvrtávačky až 2 000 Kč za vzorek.

Cena zařízení elektrolitického rozpouštění může dosahovat až jednoho milionu korun. Na leptání jsou potřeba speciální podmínky v laboratoři, které jsou zahrnuty do ceny. Spotřební materiál je vosk, který je recyklovatelný, a kyselina pro leptání. Výsledná cena měření jednoho vzorku se pohybuje mezi 2 000 a 5 000 Kč.

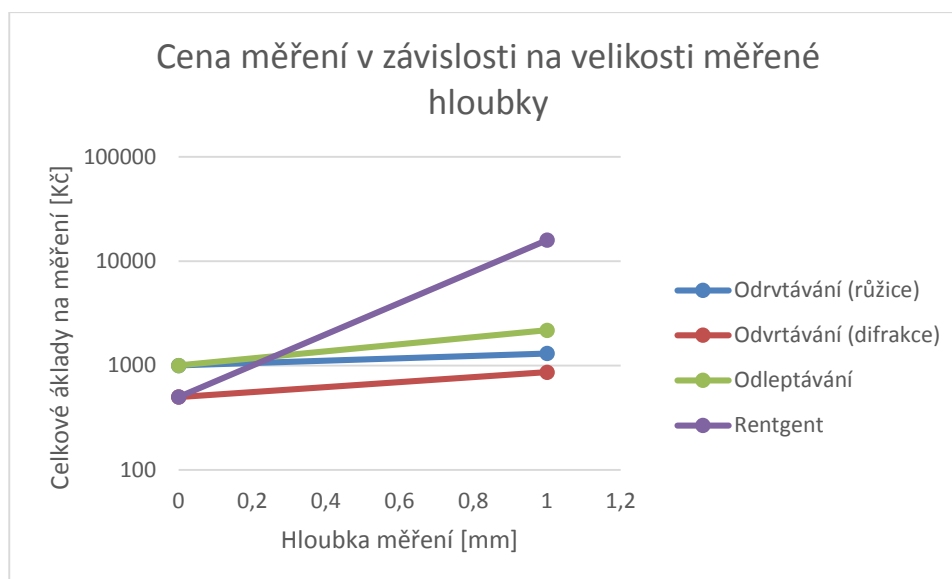
Měření zbytkového napětí v urychlovači je velmi nákladné, často jsou s ním spojeny další náklady jako jsou například výdaje na služební cestu. Samotný čas urychlovače může být vysoutěžen pro vědecké účely zdarma, ale pro komerční účely může stát prozáření jednoho vzorku od 10 000 do 30 000 Kč.

Tím, že se na základě výpočtu předem určí vhodná metoda měření lze ušetřit nemalé náklady vynaložené na testování vhodnosti vybrané metody.

*Tabulka 13 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí*

	PC	Nn	Nz	$t_r$	Nc
	[mil. Kč]	[Kč]	[Kč/hod]	[hod/mm]	[Kč]
<b>Odvrtávání r.</b>	1,2	1 000	1 216	0,25	1 304
<b>Odvrtávání d.</b>	2,5	500	1 450	0,25	863
<b>Odleptávání</b>	1	1 000	1 180	1	2 180
<b>Rentgen</b>	3	500	1 541	10	15 905

V tabulce a vynesném grafu PC jsou pořizovací náklady zařízení. Nn jsou fixní náklady potřebné pro samotnou přípravu vzorku, tyto náklady jsou vynaložené na každý vzorek bez ohledu, do jaké hloubky se měří. Variabilní náklady Nz jsou vztaženy k jednotce času (hodině měření) a obsahují odpisy zařízení, mzdu operátora a spotřební materiál spotřebováván během měření. Čas  $t_r$  je doba měření potřebná pro zjištění zbytkových napětí v hloubce 1 mm. Celkové náklady Nc zahrnují všechny náklady spojené s měřením zbytkového napětí do hloubky 1 mm.


*Obrázek 104 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí*

Ze závislosti ceny měření na velikosti měření hloubky zbytkového napětí vyplývá, že na měření povrchové vrstvy do 0,2 mm pro všechny měření jsou podobné náklady. Metoda odvrtávání vykazuje velmi pozvolný nárůst nákladů s hloubkou měření. U této metody je nejobtížnější příprava měření a to jak v případě tenzometrické růžice, tak i v případě difrakční alternativy. Náklady na měření odleptáváním jsou přibližně dvojnásobné pro hloubku 1 mm oproti měření v povrchové vrstvě. Měření rentgenem má velmi výraznou závislost nákladů na hloubce měření, tento fakt je zapříčiněn hlavně díky časové náročnosti měření. Dle výpočtu náklady na měření zbytkového napětí v hloubce 1 mm rentgenovou metodou dosahují téměř 16 000 Kč. Reálná cena měření odpovídá těmto hodnotám, z toho lze usoudit, že výpočet odpovídá realitě.



### 5.5 Ekonomické zhodnocení použití technologie LSP

Nedílnou součástí je zhodnocení možností metody LSP za použití nově použitých výkonů laseru a návrh nových aplikací na základě vypočtené produktivity a ekonomické výhodnosti. V případě řešení nové technologie se může odhad nákladů na zakázku lišit o desítky procent.

Pro Ekonomický model bylo vycházeno z reálných intenzit a rychlostí technologie ovlivňování a z potřebného překryvu pro dostatečnou účinnost.

Tabulka 14 Parametry technologie LSP vstupující do ekonomického modelu.

Parametry technologie:						
Energie v pulzu						
Epulse	10	J				
Délka pulzu						
t	10	ns				
Hustota výkonu			$S_{beam} = \frac{E_{pulse}}{t_{pulse} * I_{peak}}$	Plocha svazku		
Ipeak	10	GW/cm <sup>2</sup>		S <sub>beam</sub>	0,1	cm <sup>2</sup>
Frekvence						
f	10	Hz		S <sub>beam</sub>	10	mm <sup>2</sup>
Překryv jednotlivých pulzů				Produktivita - za sekundu		
Ovr	80	%	$P_{rs} = S_{beam} * f * (100 - Ovr)/100$	P <sub>rs</sub>	20	mm <sup>2</sup> /s
				Produktivita - za minutu		
			$P_{rm} = S_{beam} * f * (100 - Ovr)100*60$	P <sub>rm</sub>	1 200	mm <sup>2</sup> /min
				Produktivita - za hodinu		
			$P_{rh} = S_{beam} * f * (100 - Ovr)/100*3600$	P <sub>rh</sub>	72 000	mm <sup>2</sup> /hod
				Doba potřebná pro ovlivnění 1 m <sup>2</sup>		
				T <sub>m</sub>	13,889	hod/m <sup>2</sup>

Cena zařízení byla určena podle prodejní ceny podobného zařízení od firmy LSP-Technologies. Cena laseru s parametry 10 J, 20 Hz, 10 ns je nyní určena na 1,2 mil. Euro. Laser vyvinutý firmou STFC ve spolupráci s centrem HiLASE (100 J, 10 Hz, 10 ns) dosahoval výrazně vyšší ceny (280 mil. Kč). Bez finální amplifikace na 100 J by cena tohoto laseru (10 J, 10 Hz, 10 ns) vycházela na stejnou částku jako v případě firmy LSP-Technologies. K provozu laseru je potřeba zajistit čisté prostředí a chladící medium ve formě kapalného dusíku. Dále je zapotřebí pohybu vzorku vůči paprsku. Tento pohyb je ve většině případů LSP stanic řešen robotickým ramenem. Celková cena zařízení pro LSP technologii byla určena na 38 mil. Kč pro parametry 10 J, 10 Hz a 10 ns.

Ostatní ekonomické aspekty technologie jsou odhadovány podle podobných laserových procesů. Ostatní fixní náklady jsou rozpočítány na náklady na prostory, údržbu a pojištění. Náklady na prostory se mohou velmi lišit, v našem případě je počítáno s 500 tisíc Kč za rok. Náklady na údržbu dosahují 250 tisíc za rok a náklady na pojištění



jsou rovny 1,5 % z ceny stroje tj. 570 tisíc Kč. Celkové ostatní náklady jsou určeny na 1 320 000 Kč

Tabulka 15 Ekonomické aspekty technologie LSP

<b>Ekonomické aspekty technologie:</b>						
Cena stroje						
C <sub>s</sub>	38	mil. Kč				
Životnost stroje						
Z <sub>s</sub>	6	let				
Časový fond směny						
C <sub>f</sub>	1 850	hod				
				Celkový časový fond stroje		
Směnnost			$C_{cfs} = C_f * sm$	C <sub>cfs</sub>	1850 hod/rok	
s <sub>m</sub>	1	-	$N_{hs} = \frac{C_s}{Z_s * C_{cfs} * \tau}$	Náklady na hodinu stroje		
Koeficient využití stroje				N <sub>hs</sub>	4279,3	Kč/hod
τ	0,8	-				
Náklady na obsluhu						
Mzdový tarif obsluhy stroje						
M <sub>d</sub>	300	Kč/hod				
Mzdový tarif seřizovače stroje						
M <sub>s</sub>	400	Kč/hod				
Mzdový tarif programátora						
M <sub>p</sub>	500	Kč/hod				
Koeficient seřizování troje						
k <sub>s</sub>	0,5	-				
Koeficient programování				Náklady na lidské zdroje		
k <sub>p</sub>	0,5	-	$N_{lz} = M_d + M_s * k_s + M_p * k_p$	N <sub>lz</sub>	750 Kč/hod	
Ostatní fixní náklady				Celkové náklady na hodinu procesu		
	1 320 000			N <sub>ch</sub>	5742,8 Kč/hod	

Většina cyklicky namáhaných dílců vhodných pro ovlivnění metodou LSP vyžaduje ovlivnění pouze části svého povrchu. U turbínových kol se jedná o náběžné hrany, případně o paty lopatek nebo spodní části kanálů. U hřídelí je nejvíce namáhána plocha přechodů průměrů nebo drážek. Větší plochy mohou být ovlivňovány na lopatkách kol vodních elektráren pro zabránění kavitace. Plocha dílce vyžadující ovlivnění pro běžné aplikace nepřesahuje 1 000 mm<sup>2</sup>.



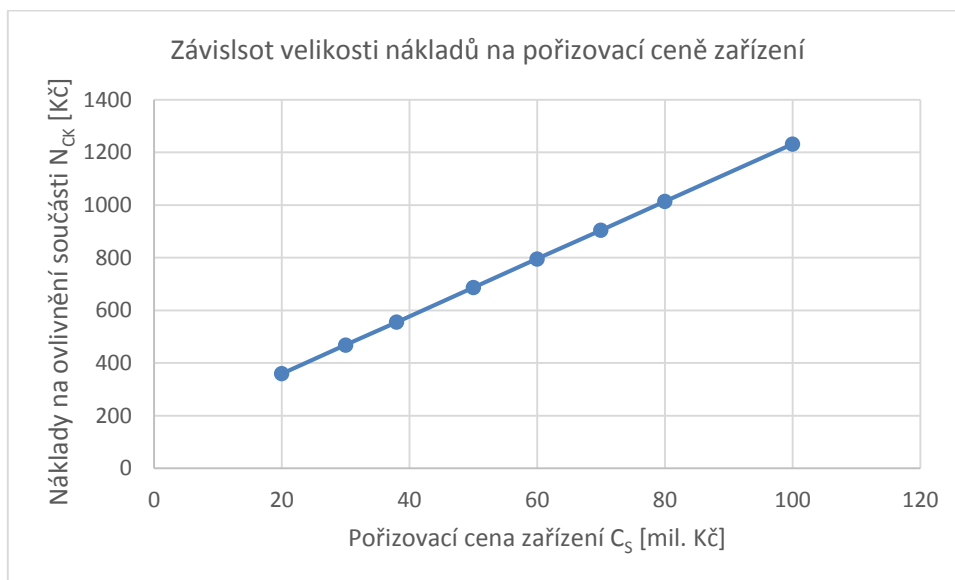
Tabulka 16 Příklad výpočtu celkových nákladů na zakázku

<b>Příklad:</b>					
délka směny					
$t_s$	480	min			
Velikost zakázky					
$P_z$	1 000	ks			
Velikost ovlivňované plochy na dílci					
$S_d$	1 000	mm <sup>2</sup> /ks			
Produktivita - za minutu			$T_{AS} = \frac{S_d}{P_{rm}}$	Jednotkový čas strojný	
$P_{rm}$	1 200	mm <sup>2</sup> /min		$T_{AS}$	0,83
Jednotkový čas vedlejší					
$T_{AV}$	3	min	$T_A = T_{AS} + T_{AV} * \left( 1 + \left( \frac{T_{VN} * Z_v}{t_s - T_{VN} * Z_v} \right) \right)$		
Čas na kontrolu nastavení					
$T_{vn}$	30	min			
Počet kontrol za směnu				Jednotkový čas TA	
$Z_v$	1	směna <sup>-1</sup>		$T_A$	4,09 min
Dávkový čas					
$T_B$	120	min	$T_{AC} = T_A * k_c$	$T_{AC}$	4,70 min
Přirážka směnového času					
$k_c$	1,15	-	$T_{BC} = T_B * k_c$	$T_{BC}$	138 min
				Doba plnění zakázky	
			$T_z = T_{AC} * P + T_{BC}$	$T_z$	4840,2 min
Celkové náklady na proces				Doba zpracování jednoho ks	
$N_{ch}$	5 742,8	Kč/hod	$T_k = \frac{T_z}{P}$	$T_k$	4,84 min
				Počet směn na zakázku	
			$T_s = \frac{T_z}{t_s}$	$T_s$	10,08 směn
Nepřiraditelné režijní náklady				Celkové náklady na zakázku	
$N_{RN}$	20	%	$N_{CZ} = (1 + N_{RN}) \frac{T_z}{60} * N_{ch}$	$N_{CZ}$	555 928 Kč
				Náklady na jeden kus	
			$N_{CK} = (1 + N_{RN}) \frac{N_{CZ}}{P}$	$N_{CK}$	555,9 Kč

Jako příspěvek na úhradu je započítáno 20 % nepřidělitelných položek souvisejících s řízením provozu, s koordinací nebo s vystavováním zakázky. Modelový příklad počítá s větším provozem, kde jeden stroj bude generovat zisk pouze pro část managementu. Pro lepší analýzu je dobré zahrnout poměr velikosti managementu vůči výrobním stanicím a zahrnout náklady potřebné na ostatní náklady spojené se získáváním zakázek nebo jejich administrativní zátěží.

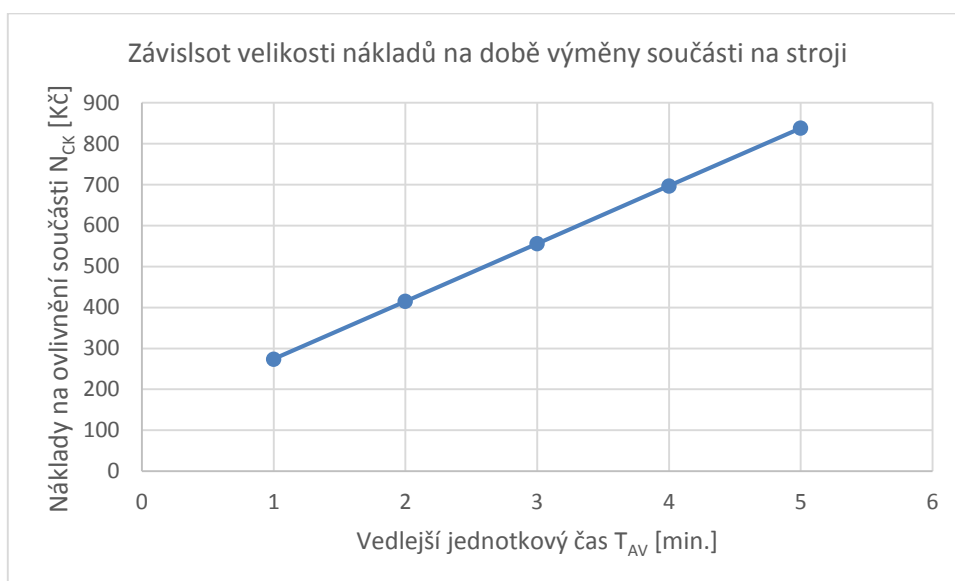
Model nákladů na zakázku je sestavován pro potenciálního zájemce instalace systému v provozu, protože hodnoty nákladů na jednotlivé úkony jsou na vědecké instituci velmi obtížně rozepsatelné.

Ekonomickým modelem byla provedena citlivostní analýza na jednotlivé technologické a ekonomické parametry.



Obrázek 105 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na pořizovací ceně zařízení

Závislost nákladů na ovlivnění příkladového výrobku na pořizovací ceně zařízení lineárně stoupá (Obrázek 106). Při snížení pořizovací ceny zařízení na minimum by se cena výrobku pohybovala pod částkou 600 Kč. Naopak při zvýšení pořizovací ceny by se cena výrobku vyšplhala přes 1 000 Kč za kus.



Obrázek 106 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na době výměny součásti na stroji

Náklady na ovlivnění výrobku výrazně stoupají při zvyšování času upínání součásti. Při upínání 3 minuty je cena výroby vyšší než 700 Kč. Naopak při zkrácení upínacího



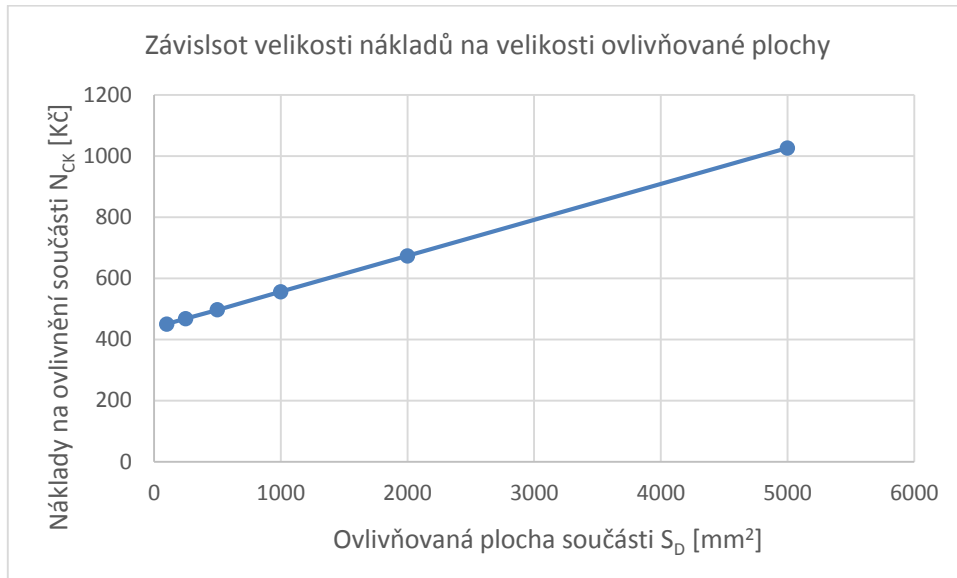
času se můžou náklady pohybovat i pod částkou 400 Kč/kus. Z této závislosti vychází, že je potřeba se zaměřit na upínací přípravek a ostatní přípravné práce. Upínání tvoří největší část potřebného času pro výrobu a jeho efekt se zpracováváním malých součástí ještě roste. Lépe zpracovaným přípravkem, který například pomocí rychloupínání, je možné snížit upínací čas na polovinu.

Závislost nákladů na ovlivnění součásti na technologickém parametru překryvu jednotlivých stop má exponenciální charakter (Obrázek 107). Při velmi vysokém překryvu (nad 90 %) stoupají výrazně náklady na ovlivnění součástí. Při malém překryvu je vliv tohoto parametru nevýrazný a náklady na tuto technologii jsou závislé na jiných faktorech.



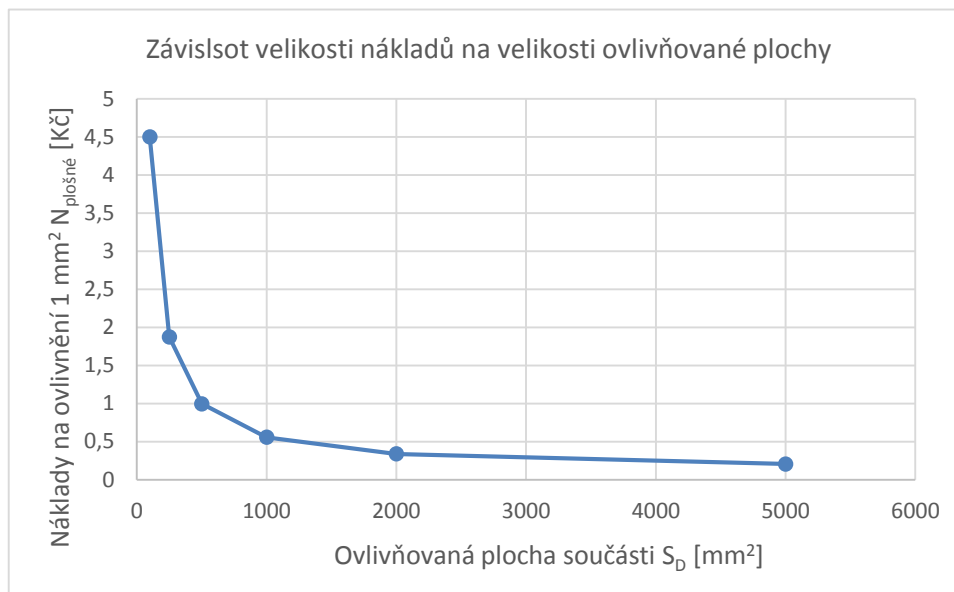
Obrázek 107 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na překryvu jednotlivých stop laseru

Náklady na ovlivnění plochy mají lineární průběh (Obrázek 108). Na upnutí součásti je počítáno s jednotným časem, z tohoto důvodu jsou nezávislé na velikosti ovlivňované plochy náklady 440 Kč pro nastavené parametry. Poměr nákladů na ovlivnění součásti se nerovná poměru velikostí ovlivňovaných ploch.



Obrázek 108 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na velikosti ovlivňované plochy

Náklady na ovlivnění 1 mm<sup>2</sup> jsou tedy velmi silně závislé na celkové ploše ovlivnění (Obrázek 109). Pro malé plochy dosahují náklady na ovlivnění několika korun na 1 mm<sup>2</sup>. Při ovlivňování velkých ploch jsou náklady na ovlivnění 1 mm<sup>2</sup> desetiny koruny.



Obrázek 109 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění 1 mm<sup>2</sup> na velikosti ovlivňované plochy

Jednotlivé parametry technologie ovlivňují jak výsledné vlastnosti povrchu, tak i cenu zpracování součásti.



## 6 Důsledky pro vědu a praxi

Důsledky pro vědu a praxi jsou rozděleny do dvou oblastí. V první části, která se zabývá stále se zvyšující produktivitou laseru, jsou popsány důsledky rozšiřování laserových technologií a jejich možnost zásahu do oblastí ve kterých to dříve nebylo možné a to hlavně z ekonomických důvodů. Druhá část popisuje důsledek využívání metodiky určování vhodné měřicí metody zbytkových napětí po ovlivnění součástí technologií LSP.

### 6.1 Důsledky velké produktivity laserů nové generace

Výrazný nárůst produktivity LSP procesu má tři hlavní směry s dalšími důsledky. První směr je ovlivňování velkých součástí, jako jsou lodní šrouby nebo turbíny vodních elektráren, protože LSP zpracování je velmi vhodné pro zabraňování erozivního působení kavitace. Použití laseru pro zpracování takto velkých dílců dosud bránila nízká produktivita. Ovlivnění plochy lodního šroubu by trvalo týdny, což je velmi náročné pro zajištění stability celého procesu. Při použití laseru operujícího na kilowattové bázi by toto ovlivnění trvalo několik hodin. Na stejnou problematiku nyní naráží výrobci leteckých motorů. Největším producentem LSP ovlivňování je firma Rolls Royce, která na dokončování rotorových lopatek používá 12 strojů (25 W – 200 W), které pracují téměř na plný výkon. Pro navýšení kapacity by bylo nutné investovat do dalších strojních zařízení. Laser na kilowattové úrovni je schopen rychlosti ovlivnění srovnatelné s používanými 12 stroji. [228][229] První letadlo, které má křídla zpracovaná technologií LSP je Airbus A320, kde byl laser použit na dotvarování horní části křídla. Letecký průmysl nyní testuje technologii LSP pro aplikace na části draku letadla, kde by mohla v místech největšího namáhání pomoci s odolností proti cyklickému namáhání.

Druhý směr je použití LSP ve velkosériové výrobě. Tato výroba je často velmi náročná na požadavky zkracování času výroby. Optimalizují se procesní technologie, mezioperační časy i logistické uspořádání z důvodu redukce času a navyšování produkce. Technologii LSP je možné použít jen na vytipované plochy, které jsou náchylné na praskání při cyklickém namáhání. Takové plochy mohou být náběžné hrany u turbín, svarové spoje konstrukcí nebo přechody mezi průměry. V závislosti na velikosti této plochy, její komplikovanosti a hlavně na počtu vyráběných kusů je vytyčen čas, za který součást musí být zpracována. Při použití laseru (100 J, 10 Hz) je při dostatečné intenzitě možné zpracovat až několik centimetrů čtverečních za sekundu. Taková produktivita je již zajímavá pro automobilový průmysl [243].

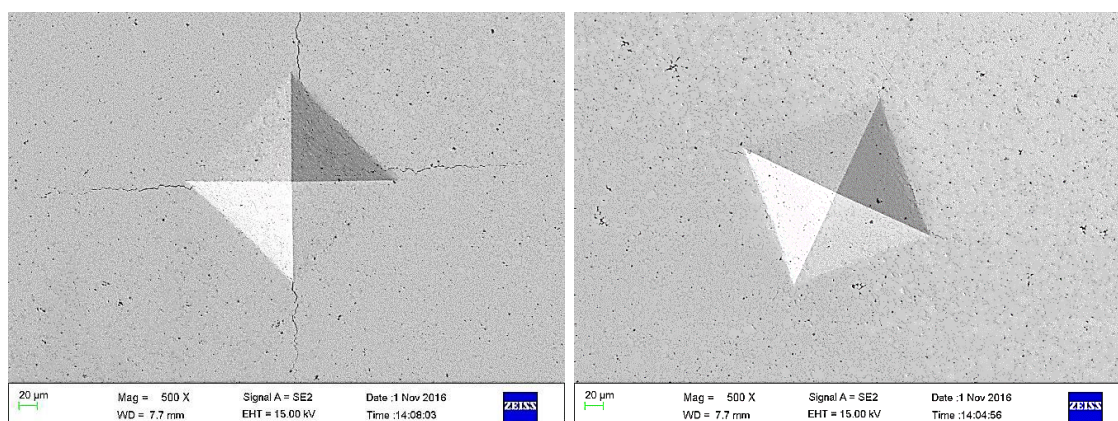
Posledním směrem je použití LSP na nové materiály, nebo vylepšování stávajících procesů. Při velké ploše svazku je dosaženo lepší homogenity zpracovávaného povrchu. Při dostatečném výkonu může být dosaženo jiných parametrů procesu, tím je možné použít proces LSP na kompozitní materiály nebo na cementační oceli. Právě výrobky z cementační oceli jsou velmi velkou oblastí strojních součástí, často namáhaných cyklickým namáháním [245][308].

Další, zcela novou oblastí, je použití technologie LSP na nástroje a to jak obráběcí, tak tvářecí. V případě obráběcích nástrojů, dokončovaných převážně broušením, může být povrchová vrstva zatížena tahovým zbytkovým napětím. Po zpracování se mohou

zbytková napětí vyrušit nebo přejít do tlakových, to následně může mít pozitivní vliv především u nástrojů náchylných k vytváření trhlin. Do této skupiny patří nástroje vhodné pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů, u kterých není největší problém abraze nebo další mechanismy opotřebení, ale trhliny vlivem vysoké teploty a působení sil. Díky tomu, že se používá velká škála materiálů používaných pro tento segment obrábění, je nutnost testování parametrů povrchu klíčová ve zjišťování vhodnosti úpravy povrchu pro tyto materiály.

U materiálů používaných pro tvářecí nástroje je tento problém obdobný jako u nástrojových materiálů pro obrábění. Pouze pro tváření nedosahují materiály tak vysoké tvrdosti, ale eliminace tahového zbytkového napětí především u dokončování broušením má velký význam pro trvanlivost nástroje.

Dalším velkým problémem moderního průmyslu je závislost na slitinách kobaltu, protože Demokratická republika Kongo vlastní většinový podíl v celosvětové produkci a druhým největším producentem je Čína [240]. Pokud by došlo k pozastavení vývozu kobaltu, výroba těžkoobrobitelných materiálů by měla vážné problémy, protože tyto nástroje jsou založeny právě na kobaltovém základě. Nyní se pracuje na náhradě kobaltu niobem [240]. Tyto materiály mají dobré vlastnosti jako je řezivost, nebo otěruvzdornost. Při jejich použití na obrábění těžkoobrobitelných materiálů nedosahují však vlastností jako materiály na bázi kobaltu. Niobové karbidy praskají a to hlavně při přetížení silou řezání, která dosahuje pro tento typ obrábění vysokých hodnot [240][241]. Snižování síly řezání lze řešit za pomoci utvařeče třísky na čele břitu, tento utvařeč je možné doplnit mikro texturou, která může mít přídavný pozitivní vliv na sílu řezání a trvanlivost nástroje. Pro zajištění tlakového napětí v povrchové vrstvě je možné zpracovat materiál technologií LSP. První výsledky jsou publikovány tento rok univerzitou WITS z Jihoafrické republiky, kde je jasně patrné, že LSP použité na břitových destičkách na bázi niobu zastavuje rozvoj povrchových trhlin [240][241]. Kombinací laserových technologií bude možné komplexně vylepšit vlastnosti nástrojů a to nejen na bázi niobu, ale i pro stávající nástrojové materiály [240][287].



Obrázek 110 Materiál na bázi NbC vyrobený sintrováním (vlevo) dlouhé radiální trhliny před LSP (vpravo) mnohem kratší radiální trhliny po LSP [240]

Chemicko-tepelně zpevněná povrchová vrstva brání plnému účinku tlaku vyvolanému laserem. Při cementování není možné vytvářet nejprve zbytková tlaková



napětí a následně chemickou změnu materiálu, z důvodu relaxace zbytkových napětí při vysokých teplotách procesu. Jedinou možností aplikace LSP je optimalizace parametrů a pravděpodobné použití větší hustoty výkonu laseru dopadajícího na povrch součásti [204][240][241].

Kompozitní materiály mohou být zhuťovány po obrábění a může být dosaženo výrazně menší delaminace okrajů. Při ovlivňování kompozitních materiálů je velmi tenká linie mezi příznivým efektem a naopak vytvářením dodatečných trhlin v povrchu materiálu. Zpevňování kompozitních materiálů se testuje i pro možnosti opravárenství v leteckém průmyslu [171][218][230].

Postupným rozšiřováním technologie je důkazem zpráva firmy LSP Technologies s.r.o., která v letošním roce na svých strojích úspěšně ovlivnila padesátitisící lopatku turbíny [238]. I díky tomu je vidět, že se technologie stává spolehlivou a čím dál tím více proniká do průmyslových aplikací.

## 6.2 Důsledky metodiky výběru měřicí metody po ovlivnění LSP

Vzhledem k velké časové náročnosti a nejistotě měření zbytkových napětí je velmi vhodné využívání predikce těchto vlastností pomocí modelování. Modelováním lze zjistit vhodné parametry technologie pro dosažení optimálního ovlivnění. Parametry technologie a výsledné vlastnosti se již modelují metodami MKP, ale jejich využívání vyžaduje značnou znalost software a velmi často velký výpočetní výkon. Zjednodušeným modelem můžeme nasimulovat parametry technologie, zjistit, zda nebyl překročen limit pro poničení povrchu součásti, zjistit do jaké hloubky bude materiál ovlivněn a jaké bude maximální vyvolané zbytkové napětí. Výpočet nevyžaduje speciální výpočetní výkon ani není náročný na obsluhu software. Největší výhodou je, že uživatel po dosažení všech parametrů získává ucelenou informaci chování materiálu a může být využito také ekonomické analýzy, kde bude odhadnuta cena zakázky ovlivnění technologií LSP [246][252].

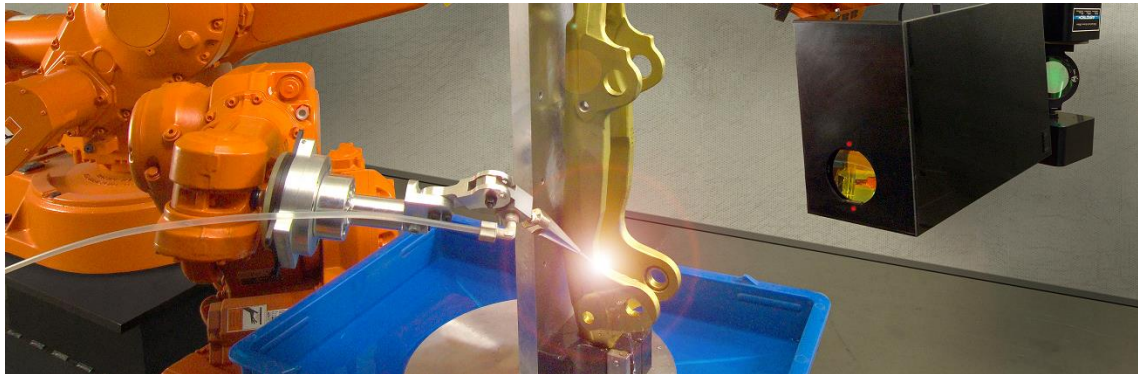
Díky zjednodušenému modelu může dojít k propojení ekonomické analýzy s doporučením vhodné měřicí metody a zároveň i kalkulaci celkových nákladů na zakázku. Cena zpracování se odvíjí od materiálových vlastností, požadavků na zpracování, nákladů na zařízení a požadavků na následnou validaci výsledků. Všechny tyto faktory určují aplikovatelnost technologie na danou sérii výrobků. Díky vývoji laserů a zvyšujícím se požadavkům na výrobky je možné ovlivňovat touto technologií stále více druhů výrobků. Při úvaze ovlivňování několika málo druhů materiálů, například pro letecký průmysl, by rozhodování se mezi měřicími metodami nemělo tak velký dopad, jako má při možnosti využití ovlivnění laserem pro další materiály jako jsou různé druhy nerezových ocelí, keramiky nebo kompozitní materiály. Právě v začátcích ovlivňování je metodika výběru vhodné metody nejvíce potřebná. Jak se ukázalo z prvních testů ovlivňování pro průmysl, je velký rozdíl již v nerezových ocelích. Zatímco austenitickou ocel X6CrNiTi1810 díky své nízké mezi kluzu ( $R_{p0,2}=270$  MPa) bylo možné ovlivnit již při nízké intenzitě (6J při svazku o velikosti  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup>), tak martenzitická nerezová ocel X11CrNi Mo12 s výrazně vyšší mezi kluzu (přes  $R_{p0,2}=800$  MPa) potřebovala pro svoje zpracování intenzitu (6J při svazku o velikosti  $2 \times 2$  mm<sup>2</sup>). Díky předběžnému zájmu



průmyslu se ukázala aplikace LSP pro nerezové oceli velmi slibná a to hlavně v oblasti svařovaných dílců. Pro tuto oblast jsou vhodné všechny porovnávané metody měření, o to důležitější je aplikaci metodiky výběru měřicí metody použít [247][301][303].

Efekt výběru vhodné metodiky je zanedbatelný při použití v jaderném průmyslu nebo pro velkosériovou výrobu. V obou případech musí být proces velmi dobře definován a prostor pro testování parametrů je velmi malý. Obzvláště v jaderném průmyslu je ovlivnění podpořeno co nejpřesnější simulací za pomoci MKP, protože v tomto případě není rozhodující rychlost rozhodování nebo čas testování. Pro použití na zcela nové materiály je však metodika velmi vhodná a na její ověření v případě směsí karbidů nebo kompozitních materiálů se teprve čeká.

Pro dílce jako jsou například svařence, je možnost aplikace této technologie velmi výhodná. Při uvažování ovlivňování svarů různých velikostí je možné přepočítat velmi jednoduše intenzitu pro vznik požadovaných zbytkových napětí.



*Obrázek 111 Příklad ovlivňování složité součásti metodou LSP [239]*





## 7 Závěr

Závěr disertační práce je rozdělen do jednotlivých kapitol. První částí je shrnutí splnění cílů disertační práce. Následně rozbor výsledků měření a ekonomické zhodnocení použitých metod a samotné technologie. Na jejich základě je pak popsáno určení vhodné měřicí metody. Díky pracem na této problematice bylo možné vybudování vlastní laboratoře pro ovlivnění metodou LSP a s možnostmi měření zbytkových napětí po ovlivnění. Výstavba stanice je popsána v poslední kapitole závěru disertační práce.

### 7.1 Splnění cílů disertační práce

Na základě teoretických poznatků byla specifikována technologie Laser shock peening a závislost velikosti zbytkového napětí na technologických parametrech. Následně byly popsány konvenční i nekonvenční metody zpracování povrchu součásti, zaměřené na změnu zbytkového napětí, pro možnost porovnání využitelnosti technologie Laser shock peening.

Dále byla určena vhodná metoda měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou LSP v závislosti na předpokládané hloubce ovlivnění. U měření zbytkových napětí v povrchu i dalších vlastností byly potvrzeny rozdílné přístupy k měření oproti konvenčním metodám dokončování. Pro správné určení byl sestaven matematický model zbytkového napětí v povrchu součásti po ovlivnění metodou LSP. Na základě sestaveného modelu byly určeny vlastnosti povrchu ovlivněného metodou Laser shock processing v závislosti na procesních parametrech za použití velkého výkonu laseru. Byl proveden rozbor výsledů měření a přesnosti metod pro stanovení průběhů zbytkových napětí a jejich porovnání s modelem.

Na základě poznatků celého procesu, vznikla ekonomická analýza LSP procesu a použitých metod měření v závislosti na míru a hloubku ovlivnění.

Rozdíly při určování vhodné měřicí metody, oproti konvenčním metodám ovlivňování, lze předpokládat hlavně z důvodu větší hloubky ovlivnění a tím rozdílným přesnostem měření a rozdílným nákladům na měření.

### 7.2 Shrnutí teoretické části

Existuje celá řada metod pro ovlivnění povrchové vrstvy výrobku. Hlavní rozdíly jsou v dosahované míře zbytkových napětí, ovlivnění ostatních přidružených vlastností, přesnosti cílení na povrch a všeobecné aplikovatelnosti dle tvaru a velikosti součásti. Dokončování pro vnášení tlakových zbytkových napětí je ve většině případů spojeno se snižováním drsnosti povrchu a změnou další vlastností.

Metoda LSP velmi ovlivňuje integritu povrchu zpracovávané součásti. Hlavním důvodem jejího použití je vnášení tlakových zbytkových napětí pro zabránění šíření a iniciaci únavových trhlin. Ovlivňovány jsou i další vlastnosti povrchu. Po zpracování mírně vzrůstá tvrdost a mění se i struktura povrchové a podpovrchové vrstvy. Dále dochází ke změně drsnosti, která je ovšem velmi závislá na použití ablační vrstvy. Největší výhodou technologie LSP je možnost velké hloubky vnesených zbytkových napětí a jejich přesné zacílení na povrch. Opracováním je dosaženo i výrazného zlepšení odolnosti povrchu proti kavitaci a korozního praskání při napětí. Největší nevýhodou je



nízká produktivita zpracování a tedy i jeho cena. S vývojem laserových zdrojů však dochází k postupnému zrychlování a zlevňování technologie.

Na základě rešerše byly vybrány 3 metody měření zbytkových napětí. Velmi hojně je používána metoda měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií. Metoda měření rentgenem je hodnocena jako referenční metoda, jejíž výsledky jsou směrodatné a mohou být použity i pro letecký průmysl. Stejně tak tomu je i v případě metody měření odvrtáváním. Odvrtávání je ovšem založeno na principu měření deformace povrchu. Metoda odleptávání (vetknutého nosníku) je používána v České republice přednostně pro rychlé zjišťování napětí především titanových dílců. Oproti metodě odvrtávání nevádí zvýšená tvrdost povrchu.

### 7.3 Rozbor výsledků měření

Aplikované metody zjišťování zbytkové napjatosti, jak rtg difrakční metoda „ $\sin^2\psi$ “, tak i metoda vetknutého nosníku a odvrtávací metoda, jsou založeny na zcela odlišných principech a nejsou tedy navzájem zaměnitelné [242]. Mechanické metody jako je odvrtávání a metoda vetknutého nosníku (odleptávací metoda) jsou založeny na zjišťování průměrného zbytkového napětí. Z tohoto důvodu tyto dvě metody lépe popisují provozní chování součásti, protože je pohlíženo na součást jako na celek v ohledu na makroskopické zbytkové napětí v povrchu [242][243]. Rentgenová difrakční metoda zjišťuje zbytková napětí prvního druhu, která jsou vztahována na celkové chování součásti, z tohoto důvodu lze hůře odhadnout chování součásti změřené pouze touto metodou, protože vypovídající hodnota je snížena o tento vztah. Metoda měření rentgenovou difrakční tenzometrií je ale zcela exaktní ve smyslu popisu deformace a předpětí materiálu na atomové úrovni [242][243].

Z porovnání metod je zřejmý podobný trend, kde v povrchové vrstvě dochází u všech metod k zachycení prudkého nárůstu tlakového zbytkového napětí. LSPwC (bez ablační vrstvy) dosahuje zbytkových napětí na povrchu blízkých nule a postupně směrem do materiálu dosahuje maximální hodnoty [244].

Druhou částí je lineární průběh zbytkového napětí, u kterého je důležitá jeho velikost a hloubka. Tato lineární část se u jednotlivých metod liší velikostí zbytkového napětí a u všech metod měření dosahuje do hloubky přibližně 0,3 až 0,4 mm [249].

U metody vetknutého nosníku (elektrolytického rozpouštění) je zbytkové napětí 300 až 400 MPa, zatímco u metody měření rentgenovou difrakční tenzometrií se pohybuje okolo 600 MPa. Odvrtávací metodou bylo změřeno zbytkové napětí od 300 do 500 MPa [249][252].

Ve větší hloubce materiálu (nad 0,4 mm) dohází k postupnému snižování zbytkového napětí až na nulovou hodnotu. Všemi metodami byl naměřen podobný trend závislosti zbytkového napětí na hloubce. Odvrtávací metodou bylo změřeno proutnutí nulové osy napětí přibližně v 0,65 mm z důvodu nižší počáteční hodnoty zbytkového napětí. Metodou rentgenové difrakce bylo změřeno proutnutí nulové osy zbytkového napětí přibližně v 0,95 mm pod povrchem a odvrtávací metodou tento průnik nebyl změřen, ale dle trendu ho lze předpokládat v hloubce 1,2 mm [252][249].



## 7.4 Ekonomické hodnocení

Technologie LSP je známá více než 40 let a první průmyslová aplikace od společnosti General Electrics byla zavedena před více než dvaceti lety. Masovému rozvoji tohoto zpracování však do nedávna bránily vysoké pořizovací a provozní náklady. Z tohoto důvodu jedním z cílů disertační práce bylo ekonomické zhodnocení procesu a následné validace dosažených vlastností materiálu. Díky popsání ekonomických nákladů a produktivity můžeme velmi dobře rozhodnout, zda je aplikace metody LSP pro danou problematiku vhodná. Navíc za posledních deset let udělala technologie laserových zdrojů výrazný posun, a aplikace laserů se díky své efektivitě a výhodnosti dostává do výroby, kam by se dříve dostat nemohla.

### 7.4.1 Ekonomické hodnocení LSP

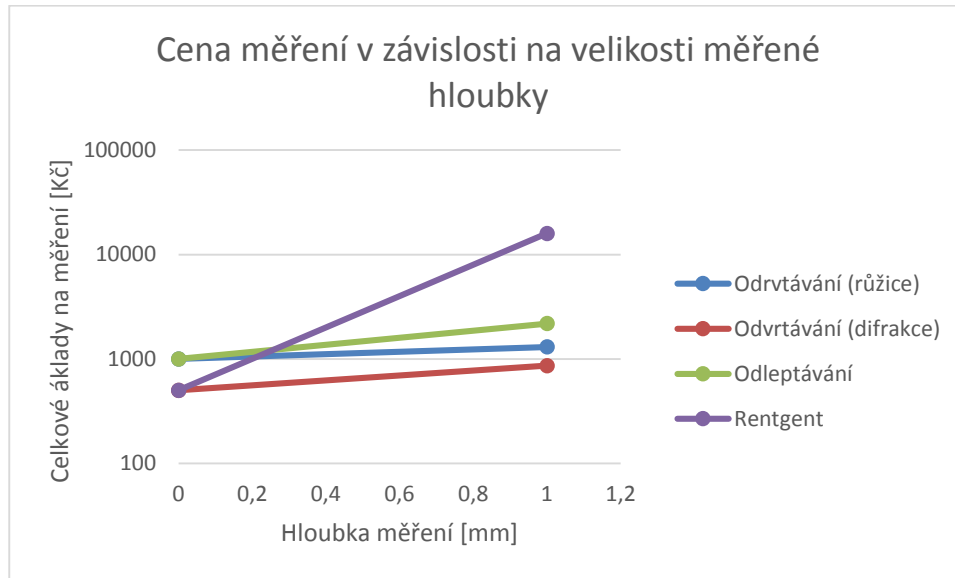
V případě technologie LSP se u menších laserových systémů dostat na hodinové náklady v řádech několika málo tisíc korun. U velkého systému jako je český Bivoj, nebo zařízení od společnosti SLP-Technologies instalované v německém Hamburku se provozní náklady mohou vyšplhat až k částce 10 000 Kč/hodinu. Takto výkonný laser má ale velkou produktivitu a s opakovací frekvencí 10 Hz tedy vystřelí na součást až 36 000 pulzů za hodinu. Cena jednoho pulzu může být menší než 0,30 Kč. Když se vezme v potaz velikost svazku v řádech několika milimetrů, je možné malé součásti opracovat na několik pulzů tedy za méně než sekundu pracovního času. Při zabudování laseru do linky a využití pro masovou výrobu lze tuto technologii pro správnou aplikaci využít i pro velmi levné součásti [250].

Firma CURTISS-WRIGHT divize metal improvement company používá technologii LSP hlavně pro povrchové zpracování lopatek turbín, nebo pro speciální aplikace jako je zpracování povrchu kontejneru pro vyhořelé jaderné palivo. Technologie LSP si ale již nachází svoje uplatnění u menších součástí, jako jsou implantáty, nebo dokonce u zpracování drážky pro stavěcí šroub v ložiskách používaných v letadlech [115][216].

Modelový příklad zpracovaný v práci ukazuje, že cena ovlivnění v sériové výrobě může vycházet pro středně velkou oblast ovlivnění součásti několik set korun. Protože se jedná o velmi drahý proces, náklady se mohou výrazně snížit a zkrácením vedlejších a přípravných časů [250][303][304][305]. V příkladu je počítáno s plochou ovlivnění na součást 1000 mm<sup>2</sup>/ks v dávce 1000 kusů. Náklady na ovlivnění pak dosahují pro modelový stroj, produktivitu a výsledek 555 Kč na ovlivněný dílec [250][303].

### 7.4.2 Ekonomické hodnocení měření zbytkových napětí

Analýzou nákladů na měření zbytkového napětí bylo zjištěno, že se velmi liší pro různé hloubky měření. Zatímco u konvenčních technologií dosahujeme hloubky zpevněného povrchu několik desetin milimetru u technologie LSP musí být počítáno s hloubkami přesahujícími jeden milimetr. Pro konvenční metody dle analýzy vycházejí náklady na měření pro jednotlivé metody velmi podobně. Při požadavku měření větší hloubky se začínají výrazně lišit náklady na jednotlivá měření.



Obrázek 112 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí

Na logaritmické stupnici celkových nákladů je zřetelné, že měření rentgenem je velmi drahou metodou zjišťování zbytkových napětí ve velkých hloubkách. Oproti tomu metoda odvtávání je málo citlivá na hloubku měření (Obrázek 112). Metoda odvtávání je limitována normou, dle velikosti vrtáku, na měření do hloubky 1 mm nebo 2 mm. Metoda odleptávání je také velmi málo citlivá na hloubku měření. Jak metoda odvtávání, tak i metoda odleptávání jsou náročnější na přípravu, ale následné měření je výrazně jednodušší. Měření rentgenem vyžaduje přípravu mezi každým krokem měření a záleží jen na hustotě měřených bodů, jak bude zjištění hloubkového profilu zbytkových napětí náročné [250].

## 7.5 Určení vhodné metody měření zbytkového napětí

Měření rentgenem bylo shledáno jako nepřesnější metoda zjišťování zbytkových napětí jak na povrchu, tak i ve velké hloubce. Metoda odvtávání je vhodná pro zjištění napětí v hloubkách do 0,2 mm a následně se díky ní velmi dobře určí vzdálenost od povrchu, kde tlak přechází v tah. Metoda odleptávání není pro součásti ovlivněné technologií LSP dostatečně přesná. Odleptávání lze použít u speciálních případů, jako jsou například zakřivené tvary, nebo malé rozměry.

Největší rozdíl aplikace metod pramení z nákladů na měření. Při použití konvenčních metod ovlivnění povrchu, kde se dosahuje hloubka zpevnění okolo 0,2 mm, je z ekonomického pohledu v podstatě jedno, která měřicí metoda bude použita, protože náklady se budou pohybovat kolem 1 000 Kč za měření (Obrázek 112). Náklady se odvíjejí od časové náročnosti měření. Dle vlastní zkušenosti s různými metodami lze zvládnout měření zbytkového napětí do hloubky 0,2 mm maximálně 10 vzorků za den. Při měření zbytkového napětí do jednoho milimetru se již počet zvládnutelných měření pro každou metodu značně liší. Metodou odvtávání lze stále zvládnout 8 nebo maximálně 10 měření. Metodou odleptávání 5 měření a metodou rentgenové difrakce měření 2. Od doby měření se neodvozuje pouze jeho cena, ale i možnost opakovatelnosti měření a tedy jeho věrohodnost.

Na základě predikce hloubky zbytkového napětí, výsledků měření a jeho ceny by byla doporučena pro většinu ovlivněných vzorků metoda odvrtávání. Metoda odvrtávání má v hloubce kolem 1 mm dostatečnou přesnost a velmi nízké náklady na jedno měření. Dle aplikace je samozřejmá možnost ověření zbytkového napětí dalšími metodami jako je například rentgenová difrakce [249][252].

Pro menší hloubky ovlivnění je vhodné jako první volbu použít měření rentgenovou difrakcí. Pro střední hloubky do jednoho milimetru je možné použít metodu odvrtávání se sadou vrtáků o průměru 1,6 mm. Pro větší hloubky přesahující 1 mm je při aplikaci odvrtávání použít větší sadu vrtáků o průměru 3,2 mm. Za pomoci této změny je možné měřit hloubku ovlivnění až 2 mm. Ovlivnění metodou LSP může dosahovat hloubky dosahující až 5 mm, pro zjištění zbytkového napětí v takto velké hloubce musí být použity speciální metody měření jako například neutronová difrakce.

## 7.6 Výstavba vlastní stanice

Kromě návrhu modelu, ovlivnění vzorků a změření jejich vlastností vznikla LSP stanice vhodná pro ovlivňování vzorků za pomoci velkého výkonu laseru (Obrázek 113) [251]. Stanice vznikla na základě zkušeností z krátkodobých stáží v laboratořích zabývajících se ovlivňováním metodou LSP [308]. Navštívené laboratoře byly laserové výzkumné centrum technické univerzity ve Španělském Madridu, dále laboratoř laserových technologií CNRS a University of the Witwatersrand v Jihoafrické republice a ústavu aplikovaných věd na univerzitě v Cincinnati [251][308].



Obrázek 113 LSP stanice v Dolních březanech v centru HiLASE [251]

Stanice je vytvořena tak, aby ji bylo možné ovládat z venku. Robotické rameno Fanuc i20 lze ovládat přes dálkové ovládání nebo za pomoci počítačů, vedle stanice. Mechanicko optické prvky je možné ovládat pomocí programu v počítači, nebo pomocí dálkového ovládání robota přímo z NC programu ovládajícího pohyby robota [251].

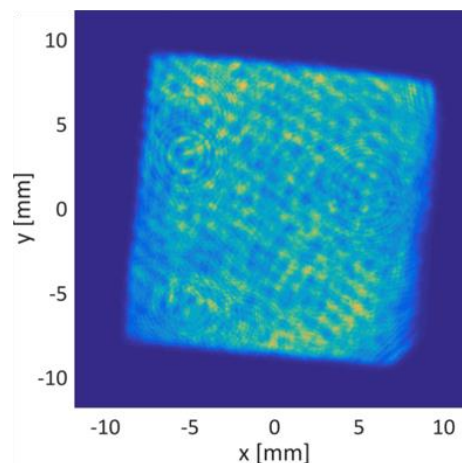


Pro uvedení do chodu technologie LSP bylo nutné vybudovat další nezbytné prvky. Kromě funkčního laseru a LSP stanice byl vybudován laserový distribuční systém (LBDS), který má za úkol dopravit svazek od laseru na optický stůl LSP stanice. LBDS obsahuje zrcadla pro vedení svazku a čočky pro zachování optických parametrů svazku. LSP stanice je v jiné laboratoři o patro výše nad laserem. Celková vzdálenost stanice od laseru je 18 m. Potrubí systému je vakuováno na nízký stupeň vakua ( $10^{-2}$  až  $10^{-3}$  mbar)[249].

Laserový svazek na velkou vzdálenost je velmi náchylný na vibrace optické soustavy. Laser i distribuční soustava jsou proto odstíněny od vnějších vibrací dvojitou podlahou s tlumením. Vibrace podlahy mají velmi malou amplitudu menší než 1  $\mu\text{m}$ . Vibrace celé soustavy (laser, LBDS, LSP stanice) byly změřeny a amplituda nepřesahuje 20  $\mu\text{m}$ . Při technologii LSP je největším zdrojem vibrací pohyb robota, který se nepřenáší na optickou soustavu, ale dochází k vibracím ovlivňovaného vzorku. Tyto vibrace nepřesahují maximální hodnotu amplitudy 50  $\mu\text{m}$ . Vibrace v tomto měřítku nemají na technologii LSP vliv, protože přesnost polohování a zaměření svazku na povrch součásti přesahuje několikanásobně hodnotu vibrací.

Na optickém stole je zaměřovací optická soustava pro snadné určení polohy svazku na součásti. Samotný procesní svazek je kontrolován u laseru a následně před dopadem na součást [249][251]. Je zjišťován jeho tvar (změna tvaru po průchodu distribučním systémem) a energie v každém pulzu. Tyto hodnoty jsou ukládány na datové úložiště, pro možnost zpětného prokázání provedení procesu [306].

Dvě kamery ve stanici zajišťují bezpečné pozorování pohybu robota a jedna kamera snímá přímo povrch zpracovávané součásti, pro možnost úpravy procesu a prokázání zpracování příslušné plochy (Obrázek 114)[251].



Obrázek 114 Profil svazku laseru Bivoj při testovacích parametrech 10 ns, 10 J a 10 Hz. [251]

Dalšími plány do budoucna jsou vybudování multifunkční stanice pro technologii LSP, stavba laseru s energií v pulzu 2 J za účelem rutinního testování vzorků a další vylepšení jako je například možnost použití druhé harmonické vlnové délky pro možnost testů LSP pod vodou. Neméně důležité je pochopení celého procesu a vytvoření materiálové databáze parametrů ovlivnění a to jak na základě teoretických poznatků, tak i na základě vlastního měření [308].



## 8 Seznamy

### 8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Základní druhy změny tvrdosti povrchu po obrábění [32].....	16
Obrázek 2 Příklad průběhu napětí v součásti během výroby jednotlivými technologiemi [25].....	19
Obrázek 3 Znázornění parametru Ra [38] .....	21
Obrázek 4 Znázornění parametru Rv, Rp a Rz [38] .....	21
Obrázek 5 Znázornění parametru RSm [38].....	21
Obrázek 6 Znázornění parametru Rt [38].....	22
Obrázek 7 Znázornění parametru Rz1max (Rmax) [39] .....	22
Obrázek 8: Schéma tenzometru .....	24
Obrázek 9: Schéma zařízení pro měření zbytkových napětí; 1 – stojan, 2 – upínací třmen, 3 – zkušební vzorek, 4 – měřící třmen, 5 – indukční snímač, 6 – napájecí obvody, 7 – obvod pro el. nastavení polohy snímače, 8 – registrační počítač, 9 – nádoba s elektrolytem, 10 – kontaktní teploměr, 11 - automatické spínací relé, 12 – topné tělísko, 13 – míchadlo, 14 – katoda, 15 – variátor [6].....	25
Obrázek 10: Znázornění měřených hodnot na zkušebním vzorku, kde a – je délka pomocného třmenu, $\varphi_1$ - úhel pootočení koncového průřezu, $\Delta y$ - měřená hodnota deformace, $y'$ - průhyb nosníku, $y''$ - pootočení měřícího třmenu v rovině měření [35] .....	26
Obrázek 11: Schéma uspořádání tenzometrů kolem vrtaného otvoru [41] .....	27
Obrázek 12: (vlevo) Radiální a tangenciální deformace v závislosti na vzdálenosti od odvrtného otvoru pro tenkou desku ve stavu jednoosé napjatosti, (vpravo) schéma odporové tenzometrické růžice pro určení zbytkových napětí [43]. .....	28
Obrázek 13: Deformace vzdáleností mřížkových rovin (hkl), tím způsobené změny úhlové polohy interferenčního maxima; $I_0$ a $I$ jsou intenzity dopadajícího a difraktovaného svazku rentgenového záření; a) nenapjatý stav, b) změny vyvolané silou F [44].....	31
Obrázek 14: Systém souřadnic napětí a deformací spojený se vzorkem [44] .....	31
Obrázek 15: Princip měření napětí metodou „ $\sin^2\psi$ “ [44].....	32
Obrázek 16: Schéma metody zpětného odrazu při šikmém dopadu primárního svazku P na povrch vzorku. Vzorek je vystaven tahovému napětí $\sigma\varphi$ ; R1 a R2 jsou body interferenčního kužele studované látky v azimutální rovině $\sigma\varphi$ [44].....	34
Obrázek 17: Schéma difrakčního obrazu získaného metodou „jedné expozice“ [44].....	34
Obrázek 18: Příklady jednotlivých moire pruhů, a) rovnoměrný jednoosý tah, b) lokální maximum, c) lokální minimum, d) zatížení osamělou silou [22]. .....	36
Obrázek 19: Ojnice, klikový hřídel a oběžné kolo kompresoru s naneseným a následně popraskaným křehkým lakem [22]. .....	36
Obrázek 20 Predikce únavové životnosti na základě nominální napětí [51].....	39
Obrázek 21 Stanovení nominálních napětí MKP modely neobsahují svarové detaily (objemové, skořepinové a nosníkové modely) [51].....	39
Obrázek 22 Predikce únavové životnosti na základě hot-spot napětí [51] .....	40



Obrázek 23 MKP modely (ne)obsahují svarové detaily (objemové, skořepinové modely)[51] .....	40
Obrázek 24 Predikce únavové životnosti na základě vrubových elastických napětí v kořeni/patě svaru[51] .....	41
Obrázek 25 MKP modelování – submodeling (požadavek jemné MKP sítě)[51] .....	41
Obrázek 26 Příklad modelování zbytkového napětí metodou MKP[52].....	42
Obrázek 27 Průběh zbytkového napětí oceli AISI 304 bez ovlivnění, s ovlivněním metodou LSP a porovnání se simulací MKP [237] .....	42
Obrázek 28 Princip honování (vlevo) a ukázka plochy po honování (vpravo) [58].....	44
Obrázek 29 Schéma superfinišování [60]. .....	45
Obrázek 30 Schéma elektrolytického leštění [61]. .....	46
Obrázek 31 Povrch před a po el. leštění (vlevo) a příklad použití (vpravo) [61][62]. ...	46
Obrázek 32 Statické vnější válečkování (vlevo) a nástroj pro dynamické vnitřní válečkování (vpravo) [94][95]. .....	47
Obrázek 33 Ukázka vnějšího hlazení diamantem [64]. .....	48
Obrázek 34 Schéma kalibrovacích nástrojů (kulička, trn) [5]. .....	48
Obrázek 35 Princip metody a ukázka komprese dokončeného materiálu [233].....	49
Obrázek 36 Technologie machine hammer peening (a) Základní konstrukce elektromagnetického pohonu. (b) umístění ve stroji (pohon připojený k 5-osému obráběcímu centru Hermle). (c) důležité procesních parametrů [8]. .....	50
Obrázek 37 Princip technologie LSP .....	51
Obrázek 38 Strategie zpracování vzorku kruhovým paprskem s překrytím jednotlivých pulzů [133]. .....	54
Obrázek 39: Profil zbytkových napětí ve slitině Inconel 718 po ošetření LSP a SP [179]. .....	56
Obrázek 40: Hlubkové profily zbytkových napětí pro alfa fázi Ti-2.5Cu po LPwC, SP a ultrazvukového SP (USP) [133]. .....	57
Obrázek 41 Závislost mikrotvrdosti (vlevo) a zbytkového napětí (vpravo) na tloušťce ablační vrstvy při použitých parametrech délku pulzu 12 ns, energii 6 J, vlnová délka 1064 nm, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, transparentní tlumící vrstva 1,8 mm [180]. .....	57
Obrázek 42: Průměrné hodnoty zbytkového napětí na povrchu vzorků s různými ablativními vrstvami a různou velikostí laserové stopy. Intenzita laseru byla ve všech případech 5 GW/cm <sup>2</sup> [148]. .....	58
Obrázek 43 Závislost mikrotvrdosti (vlevo) a zbytkového napětí (vpravo) na tloušťce překrývací transparentní vrstvy při použitých parametrech délku pulzu 12 ns, energii 6 J, vlnová délka 1064 nm, průměr paprsku 3 mm, překrytí 40%, frekvence 2 Hz, absorpční vrstva 0,1 mm [180]. .....	59
Obrázek 44 Profil zbytkových napětí při použití různé hustoty výkonu pro 2,5 ns (vlevo) a 25 ns (vpravo) [120]. .....	60
Obrázek 45 Hloubka tlakových zbytkových napětí při použití jednoho nebo dvou přejezdů laseru u slitiny Ti-6Al-4V [179]. .....	61



Obrázek 46 Profil zbytkových napětí při použití jednoho a dvou přejezdů laseru s 40% překryvem jednotlivých bodů změřený na slitině Ti-6Al-4V [77].	61
Obrázek 47 Zbytkové napětí ve vzorku o tloušťce 1,5 mm vyrobeného z oceli 1.4340 při použití 1 a 5 pulzů [193].	62
Obrázek 48 Zbytková napětí při použití různé vlnové délky (vlevo) 532 nm and (vpravo) 1064 nm vlnové délky [162].	63
Obrázek 49 Zbytkové napětí jako funkce délky pulzu [120].	63
Obrázek 50 Závislost zbytkového napětí změřeného na slitině Ti-6Al-4V na úhlu dopadu [199].	64
Obrázek 51 Metalografický výbrus slitiny AZ31B Mg (a) před LSP; (b) jeden pulz; (c) dva pulzy; a (d) čtyři pulzy [200].	66
Obrázek 52 Průběh mikrotvrdomosti na povrchu slitiny Ti-6Al-4V vzorek byl zpracován s překryvem jednotlivých pulzů 40 % [77].	66
Obrázek 53 Průběh mikrotvrdomosti směrem do materiálu u slitiny Ti-6Al-4V [150].	67
Obrázek 54 Povrchová tvrdost po zpracování LSP za tepla (WLSP) při různých intenzitách výkonu souvisejících s tlakem na povrchu materiálu [109].	67
Obrázek 55 Závislost počtu cyklů při napětí 370 MPa na počtu laserových průchodů po materiálu (40% překryv v každé vrstvě) [77].	68
Obrázek 56 Fatigue lives of laser-peened and as-received Ti-6Al-4V at different applied stress levels [77].	69
Obrázek 57 Únavová životnost materiálu 6061-T6 po LSP and SP [155].	69
Obrázek 58 Mikrostruktura příčného řezu vzorku AISI 304SS zatíženého SCC [182].	70
Obrázek 59 Profil tváření za studena slitiny Ti-6Al-4V při rtech různých zpracováních [217].	71
Obrázek 60 Doporučení vhodné metody měření závislé na hloubce ovlivnění [3].	74
Obrázek 61 Schéma modelu pro rozhodnutí použití vhodné měřicí metody zbytkového napětí.	79
Obrázek 62 Výpočet zbytkového napětí na základě povrchového tlaku, času a vzdálenosti od povrchu pro rovinný nebo bodový tlak.	81
Obrázek 63 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns [252].	83
Obrázek 64 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns v polárních souřadnicích.	83
Obrázek 65 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu a čase uplynulém od výstřelu laseru při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns.	84
Obrázek 66 Závislost velikosti napětí procházející materiálem a zbytkového napětí na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns [252].	85
Obrázek 67 Závislost velikosti napětí procházející materiálem a zbytkového napětí na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 2,5 GPa a délce pulzu 10 ns [252].	86
Obrázek 68 Schéma experimentálního setupu pro LSP ovlivnění vzorků na Tecnické univerzitě v Madridu.	90
Obrázek 69 Fotografie zařízení pro LSP ovlivnění vzorků na Tecnické univerzitě v Madridu.	91



Obrázek 70 (vlevo) Závislost hloubky měření na úhlu snímání, (v pravo) měřený vzorek rentgenovou difrakční tenzometrií.....	92
Obrázek 71 Parciální difraktogram závislosti intenzity na úhlu $2\theta$ na povrchu.....	92
Obrázek 72 Parciální difraktogram závislosti intenzity na úhlu $2\theta$ na zadní straně.....	93
Obrázek 73 Parciální difraktogram závislosti intenzity na úhlu $2\theta$ na LSP zpracování.....	93
Obrázek 74 Závislost hloubky snímání na úhlu $2\theta$ při různém nastavení $\sin^2\psi$ , (v pravo dole) pohled na měřený vzorek.....	93
Obrázek 75 Závislost efektivní hloubky na úhlu $2\theta$ při různém nastavení $\sin^2\psi$ , (vpravo dole) vzorek s odleptaným středem pro měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií hluboko pod povrchem.....	94
Obrázek 76 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou rentgenové difrakce na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	95
Obrázek 77 Odvrtávací zařízení HBM SINT MTS 3000.....	96
Obrázek 78 Vzorek ovlivněný metodou LSP po měření metodou postupného odvrtávání.....	96
Obrázek 79 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou postupného odvrtávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	97
Obrázek 80 Závislost zbytkových napětí na hloubce měřena metodou postupného odvrtávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	97
Obrázek 81 Odleptávací zařízení (vlevo), držák se vzorkem pokrytý voskem (vpravo).....	98
Obrázek 82 Vzorek ovlivněný metodou LSP po měření metodou elektrolytického rozpouštění.....	99
Obrázek 83 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	99
Obrázek 84 Vzorky připravené pro měření elektrolytickým rozpouštěním.....	100
Obrázek 85 Vzorky ovlivněné metodou LSP po měření metodou elektrolytického rozpouštění.....	101
Obrázek 86 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	101
Obrázek 87 Závislost zbytkových napětí na hloubce změřena metodou elektrolytického odleptávání na vzorku Ti-6Al-4V ovlivněného metodou LSP (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	102
Obrázek 88 Porovnání různých metod měření zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	103
Obrázek 89 Porovnání změřeného a vypočteného zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> )[247].....	104
Obrázek 90 Porovnání změřeného a vypočteného zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> )[247].....	105
Obrázek 91 Zobrazení shody naměřených hodnot za pomoci jednotlivých měřicích metod s modelem na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	106
Obrázek 92 Zobrazení shody naměřených hodnot za pomoci jednotlivých měřicích metod s modelem na materiálu Ti-6Al-4V (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	107
Obrázek 93 Mikrotvrdoměr Future Tech FM100 s měřením polohy, automatickým zatěžováním, CCD kamerou a odečtem vpichu.....	109



Obrázek 94 Závislost tvrdosti materiálu HV 0,1 na vzdálenosti od povrchu zpracovaného technologií LSP (5000 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	109
Obrázek 95 Závislost tvrdosti materiálu HV 0,1 na vzdálenosti od povrchu zpracovaného technologií LSP (2500 pulzů/cm <sup>2</sup> ).....	110
Obrázek 96 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP3.....	110
Obrázek 97 Vzdálenost přímek proložených základním povrchem a upraveným u vzorku LSP4.....	111
Obrázek 98 Deformace povrchu při použití 1, 9 nebo 25 pulzů na stejně velké oblasti [41].....	112
Obrázek 99 Simulace kladení čtvercových pulzů (a), výsledný povrch (b) [155].....	112
Obrázek 100 Porovnání dosahovaných zbytkových napětí při aplikaci různých dokončovacích metod .....	114
Obrázek 101 Bivoj laser v centru HiLASE s 1 kW průměrného výkonu [251] .....	115
Obrázek 102 Použitelná hloubka měření jednotlivými metodami pro zjišťování zbytkových napětí. ....	116
Obrázek 103 Znázornění nerovnoměrnosti odleptávání a možného vlivu na přesnost měření. ....	117
Obrázek 104 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí... ..	119
Obrázek 105 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na pořizovací ceně zařízení.....	123
Obrázek 106 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na době výměny součásti na stroji .....	123
Obrázek 107 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na překryvu jednotlivých stop laseru .....	124
Obrázek 108 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na velikosti ovlivňované plochy.....	125
Obrázek 109 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění 1 mm <sup>2</sup> na velikosti ovlivňované plochy.....	125
Obrázek 110 Materiál na bázi NbC vyrobený sintrováním (vlevo) dlouhé radiální trhliny před LSP (vpravo) mnohem kratší radiální trhliny po LSP [240] .....	127
Obrázek 111 Příklad ovlivňování složité součásti metodou LSP [239] .....	129
Obrázek 112 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí... ..	133
Obrázek 113 LSP stanice v Dolních březanech v centru HiLASE [251] .....	134
Obrázek 114 Profil svazku laseru Bivoj při testovacích parametrech 10 ns, 10 J a 10 Hz. [251].....	135



## 8.1 Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled velikosti zatížení při měření tvrdosti dle Vickerse [36] .....	20
Tabulka 2 Metody zjišťování zbytkových napětí [28][29] .....	23
Tabulka 3 ukazuje některé z procesních parametrů technologie LSP s poznámkami k dosaženým výsledkům [115]. .....	53
Tabulka 4 Podpovrchové zbytkové napětí v hloubce 33 $\mu\text{m}$ pod povrchem [102]. .....	60
Tabulka 5 hodnoty drsnosti povrchu $R_a$ před zpracování a po LSP a SP zpracování ....	65
Tabulka 6 Typické hodnoty $Z_1$ a $Z_2$ pro různé materiály. ....	81
Tabulka 7 Mechanické vlastnosti vybraných slitin titanu [219]. .....	87
Tabulka 8 Chemické složení Ti 6Al-4V [221] .....	88
Tabulka 9 Vlastnosti slitiny Ti-6Al-4V [220][221]. .....	89
Tabulka 10 Parametry LSP použité pro ovlivnění vzorků.....	91
Tabulka 11 Napětí na povrchu vzorku změřené rentgenovou difrakční tenzometrií .....	94
Tabulka 12 Parametry drsnosti ovlivněných a neovlivněných vzorků .....	108
Tabulka 13 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí .....	119
Tabulka 14 Parametry technologie LSP vstupující do ekonomického modelu. ....	120
Tabulka 15 Ekonomické aspekty technologie LSP .....	121
Tabulka 16 Příklad výpočtu celkových nákladů na zakázku .....	122





## 9 Použitá literatura

- [1] BELLOWS, G., FIELD, M., KOLHS, J. B. Influence of material and its metallurgical state on surface integrity: *Influence of metallurgy on machinability*. Cincinnati, ASM, 1975, p. 272 – 295.
- [2] YOUTSOS, A. G. *Residual stress and its effect on fracture and fatigue*. 1st ed., Netherlands : Springer 2006. 234. s. ISBN-10: 1402053282.
- [3] KOLAŘÍK, K. *Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění ocelí* [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2010. 140 s.
- [4] TURKOVICH, B. F., FIELD, M. Survey on materialbehaviour in machining. *Anal. of the CIRP*, 1981, vol. 30, no. 2, p. 533 – 540.
- [5] MÁDL, J., KAFKA, J., VRABEC, M., DVOŘÁK, R. *Technologie obrábění. 3. díl. České vysoké učení technické v Praze*. Vydavatelství ČVUT, 2000, 81 s
- [6] MADL, J., RAZEK, V., KOUTNY, V., KAFKA, J. *Surface Integrity in Notches Machining*. Manufacturing Technology, 2013, Vol. 14, No. 1, pp.17-23. ISSN 1213-2489. Czech Republic.
- [7] PEYRE, P., SCHERPEREEL, X., BERTHE, L., CARBONI, C., FABBRO, R., BÉRANGER, G., LEMAITRE, C. *Surface modifications induced in 316 L steel by laser peening and shot-peening. Influence on pitting corrosion resistance*. Mater. Sci. Eng. A 2000, 280, 294–302.
- [8] BLEICHER, F., LECHNER, C., HABERSOHN, C., KOZESCHNIK, E., ADJASSOHO, B., KAMINSKI, H. *Mechanism of surface modification using machine hammer peening technology*. 2012. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Vol. 61, No. 1, pp. 375-378.
- [9] ŘEHOŘ, J. *Teoretické a experimentální studium problematiky HSC obrábění ocelí vysoké pevnosti a tvrdosti*. [Disertační práce]. Plzeň: ZČU Fakulta strojní, 2004. 109 s. 21 příl..
- [10] FAIRAND, A. H., CLAUER, B. P. Interaction of laser-induced stress waves with metals. *Proceedings of the ASM Conference Applications of Lasers in Materials Processing*, Washington, DC, USA, 18–20 April 1979; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1979.
- [11] FAIRAND, B. P., CLAUER, A. H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.* 1979, 50, 1497–1502.
- [12] FAIRAND, B. P., WILCOX, B. A., GALLAGHER, W. J., WILLIAMS, D. N. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum. *J. Appl. Phys.* 1972, 43, 3893–3895.
- [13] CLAUER, A. H., FAIRAND, B. P., WILCOX, B. A. Laser shock hardening of weld zones in aluminum alloys. *Metall. Trans. A* 1977, 8, 1871–1876.
- [14] CLAUER, A. H., FAIRAND, B. P., WILCOX, B. A. Pulsed laser induced deformation in an Fe-3%wt Si alloy. *Metall. Trans. A* 1977, 8, 119–125.



- [15] MONTROSS, C., WEI, T., YE, L., CLARK, G., MAI, Y. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review. *Int. J. Fatigue* 2006, 24, 1021–1036.
- [16] PEYRE, P., FABBARO, R. Laser shock processing: A review of the physics and applications. *Opt. Quant. Electron.* 1995, 27, 1213–1229.
- [17] MÁDL, J., AJ. Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl. Praha. Vydavatelství ČVUT 2000. 3. sv. 246 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [18] TURKOVICH, B. F. – FIELD, M. Survey on material behaviour in machining. *Anal. of the CIRP*, 1981, vol. 30, no. 2, p. 533 – 540.
- [19] BELLOWS, G. – FIELD, M. – KOLHS, J. B. Influence of material and its metallurgical state on surface integrity. In *Influence of metallurgy on machinability*. Cincinnati, ASM, 1975, p. 272 – 295.
- [20] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. Vybrané statě z úběru materiálu. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1991. ISBN 80-01-00696-4.
- [21] GRUM, J. – ZUPANCIC, M – BOZIC, S. Analysis of surface residual stress occurring under different quenching a conditions. In *4th Inteternational conference on quenching and control of distribution* , 2003, p 301-306.
- [22] MÁDL, J. Integrita povrchu po obrábění. *Manufacturing Engineering - Výrobné inžinierstvo*. Roč. 6, 2008, č. 2. s. 17 – 20. ISSN 1335-7972.
- [23] SALLMAN, R. E. *Moderní nauka o kovech*. 1 vyd., Praha: SNTL 1964. 317 s.
- [24] KŘÍŽ, A. Integrita povrchu [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z [http://integrita.zcu.cz/download/skola2/plzen\\_prez1.pdf](http://integrita.zcu.cz/download/skola2/plzen_prez1.pdf)
- [25] MÁDL, J., HOLEŠOVSKÝ, F. Integrita obrobených povrchů z hlediska funkčních vlastností. *Rec. K. Kocman, K. Jandečka*. 1. vyd. Ústí nad Labem: UJEP, FVTM, 2008. 230 s. ISBN 978-80-7414-095-2
- [26] TÖNSHOFF, B. et. al. Characterizing the HSC-Range-Material Behaviour and Residual Stress. In *Scientific Fundamental of HSC*. München: C. Hanser V., 2001, p. 103-111. ISBN. 3-466-21799-1.
- [27] SLANEC, K. *Konstruování: geometrická přesnost výrobků* 1. a 2. díl. 1 vyd., Praha: ČVUT, 2006. 160 s. ISBN 80-01-02864-X.
- [28] BUMBÁLEK, L., BUMBÁLEK, B., MAZAL, P. a LIŠKUTÍN, P. *Vlastnosti povrchové vrstvy a jejich vliv na únavu*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-7204-373-0.
- [29] BUMBÁLEK, Bohumil. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. [online]. [vid. 2011-10-21]. VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)
- [30] COTELL C. M., J. A. SPRAGUE and F. A. SMIDT. *ASM Handbook-Volume 5: Surface Engineering*. ASM International, 1994. ISBN 978-0871703842.
- [31] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ.P. *Nauka o materiálu I, 1; I, 2*. 1 vyd., Praha Akademia, 1966. 634 s. 1968. 1002 s.



- [32] VASILKO, K. MÁDL, J. *Teorie obrábění*. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem. Fakulta výrobních technologií a managementu. Díl 1. IBSN 9788074144592, 2012. 298 s.
- [33] MACEK, K. et al. *Nauka o materiálu*. 1 vyd., Praha: ČVUT, 1999. 209 s. IBSN 80-01-1507-6
- [34] KAFKA, J.: *Ověření vlivu některých technologických procesů na kvalitu povrchové vrstvy u slitin titanu*. [Kandidátská disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 1988. 110 s.
- [35] KAFKA, J. et al. *Vznik zbytkových pnutí ve strojních součástech a metodika jejich měření* [Zpráva o výzkumu]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 1982.
- [36] DOLEŽAL, P., PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů* [online]. Brno: VUT, 2007 [cit. 2016-08-07]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/hmsm/index.htm>
- [37] VALENTA, F. aj. *Pružnost pevnost III*. 2 vyd., Praha : ČVUT, 2002. 293 s. IBSN 80-01-1278.
- [38] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. IBSN 8024812096.
- [39] JENOPTIK : *Systém měření drsnosti - parametry drsnosti* [online]. JENOPTIK, b.r. [cit. 2016-08-04]. Dostupné z: [http://www.hommel-etamic.cz/files/094\\_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf](http://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf)
- [40] MÁDL, J. *Teorie obrábění*. Fakulta strojní, ČVUT Praha, 1990. 156 s. IBSN
- [41] OCANA OCAÑA, J. L., MOLPECERES, C., PORRO, J.A., GÓMEZ, G., MORALES, M. Experimental assessment of the influence of irradiation parameters on surface deformation and residual stresses in laser shock processed metallic alloys. *Appl. Surf. Sci.* 2004, 238, 501–505.
- [42] SCHAJER, G. S. Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I. Stress Calculation Procedures. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1988, vol. 110, no. 4, p. 338-343.
- [43] DOUBRAVA, K. *Excentricita otvoru a její zohlednění při vyšetřování zbytkových napětí pomocí odvrtávací metody*. [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 2006. 76 s
- [44] KRAUS, I. – GANEV, N. *Technické aplikace difrakční analýzy*. 1 vyd., Praha: ČVUT, 2004. 171 s. IBSN 80-01-03099-7.
- [45] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Development and Applications of Residual Stress Measurements Using Neutron Beams* STI/DOC/010/477; (ISBN:978-92-0-113313-7); Vienna, Austria 158 pp
- [46] KOBAYASHI, A.S. (ED.): *Handbook on Experimental Mechanics*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1987
- [47] KŘÍŽ, A.: *Integrita povrchu v oblasti tepelného zpracování*, Hofmeister s.r.o. cit. [2016-10-04]. Dostupné z: [http://opi.zcu.cz/download/Integrita\\_prednaskaTZ.pdf](http://opi.zcu.cz/download/Integrita_prednaskaTZ.pdf)
- [48] BROŽOVSKÝ, J., MATERNA, A.: *Metoda konečných prvků*, [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/brozovsky/mkp.html>



- [49] VOOTHALURU, R., RICHARD, LIU, C., CHENG, G. J. Finite Element Analysis of the Variation in Residual Stress Distribution in Laser Shock Peening of Steels, *J. Manuf. Sci. Eng* 134(6), 061010, 2012, 8, doi:10.1115/1.4007780
- [50] MILAN, R. *Únavová pevnost a pevnost a životnostivotnost - výpočtové metody* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z <http://oprلز.iss.fd.cvut.cz/dokumenty/070309UnavovaPevnostAZivotnost.pdf>
- [51] JURENKA, J. *Hodnocení únavové odolnosti svařovaných konstrukcí*, Odbor pružnosti a pevnosti Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulta strojní, ČVUT v Praze, TechSoft Engineering, spol. s r.o. [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z [jurenka@techsoft-eng.cz](mailto:jurenka@techsoft-eng.cz)
- [52] AYGÜL, M. *Fatigue Analysis of Welded Structures Using the Finite Element Method*, Chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden 2012
- [53] SAKINO, Y., SANO, Y., SUMIA, R., KIM, Y. *Fatigue life enhancment of filled and butt welded joins after laser peening*. Transaction of Joining and Welding Research Institute Osaka University, Vol 41., Japan, 2012
- [54] DING, K., YE, L. *Laser Shock Peening, Performance and Process Simulation*, ISBN: 9781855739291, January 2006, Australia, 172 s.
- [55] KOCMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění. 2. Vydání*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
- [56] ČEP, R. *Technologie II. : 2. díl*. VŠB Ostrava. 2012.
- [57] HUMÁR, A. *Technologie I, Technologie obrábění - 3. část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. 2005. 57 s.
- [58] SABRI, L., MANSORI, M. E. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. *Surf. Coat. Technol.* [online]. 2009, vol. 204, no. 6-7 [cited 2016-03-13], p. 1046–1050. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.05.013. ISSN 0257-8972.
- [59] TSCHÄTSCH, H. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, 2009, XVII, 398 s. ISBN 978-3-642-01007-1.
- [60] MARINOV, V. *Manufacturing Technology: Finishing Processes*. [online]. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://me.emu.edu.tr/me364/ME364abrasivefinishing.pdf>
- [61] KOSMAČ, A. *Elektrolytické leštění korozivzdorných ocelí* [online]. [cit. 2016-03-13]. ISBN 978-2-87997-319-7. Dostupné z: [http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/Electropolishing\\_CZ.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Electropolishing_CZ.pdf)
- [62] Braunoviny. *EnduRo - rotační závěsná endoprotéza kolenního kloubu* [online]. Braunoviny [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://braunoviny.bbraun.cz/clanky/enduro-endoproteza-kolenniho-kloubu/>
- [63] Strojírna Vodrlind. *Povrchová úprava hliníkových a železných částí balotinou* [online]. Strojírna Vodrlind [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://strojvo.eu/povrchova-uprava.html>
- [64] Alba precision, *Vyhlazování diamantem*, [online]. Alba precision spol s.r.o. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.albaprecision.cz/baublies.php>



- [65] STATNIKOV, E. S., KOROLKOV, O. V. Vityazev, V. N. Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics* 2006, 44, 533–538.
- [66] LSP Technologies. *Surface enhancement technologies* [online]. LSP Technologies [cit. 2016-05-15]. <http://www.lsp technologies.com>
- [67] HiLASE: Nové lasery pro průmysl a výzkum [online]. HiLASE [vid. 2016-04-11] <http://www.hilase.cz/nabizime-2/zpevnovani-povrchu-materialu-razovou-vlnou-laser-shock-peening-lsp/>
- [68] VAJSKEBR, J., ŠPETA, Z. *Dokončování a zpeňování povrchu strojních součástí válečkováním*. Praha: SNTL 1984.
- [69] PÍŠKA, M. et al. *Speciální technologie obrábění. 1*. Brno: CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- [70] SINTEC. *structural integrity technologies inc.* [online]. SINTEC. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z <http://www.sintec.ca/>
- [71] ABDULLAH, A., MALAKI, M., ESKANDARI, A. Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening. *Mater. Des.* 2012, 38, 7–18.
- [72] BERG-POLLACK, A., VOELLMECKE, F. J., SONSINO, C. M. Fatigue strength improvement by ultrasonic impact treatment of highly stressed spokes of cast aluminium wheels. *Int. J. Fatigue* 2011, 33, 513–518.
- [73] LIHAVAINEN, V. M., MARQUIS, G., STATNIKOV, E. S. Fatigue strength of a longitudinal attachment improved by ultrasonic impact treatment. *Weld. World* 2004, 48, 67–73.
- [74] PEYRE, R., SCHERPEREEL, P., BERTHE, X., FABBRO, L. Current trends in laser shock processing. *Surf. Eng.* 1998, 14, 377–380.
- [75] CLAUER, A. A historical perspective on laser shock peening. *Met. Finish. News* 2009, 10, 5–6.
- [76] CLAUER, A. H. Laser shock of peening for fatigue resistance. In *Surface Performance of Titanium*; The Minerals, Metals and Materials Society (TMS): Warrendale, PA, USA, 1996; pp. 217–230.
- [77] ZHANG, X. C., ZHANG, Y. K., LU, J. Z., XUAN, F. Z., WANG, Z. D., TU, S. T. Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening. *Mater. Sci. Eng. A* 2010, 527, 3411–3415.
- [78] GUO, Y., CASLARU, R. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti-6Al-4V surfaces. *J. Mater. Process. Technol.* 2011, 211, 729–736.
- [79] BRAR, N. S., HOPKINS, A., LABER, M. W. Laser shock peening of titanium 6–4 alloy. *AIP Conf. Proc.* 2000, 505, 435–438.
- [80] TANI, G., ORAZI, L., FORTUNATO, A., ASCARI, A., CAMPANA, G. Warm laser shock peening - New developments and process optimization. *CIRP Ann. Manuf. Tech.* 2011, 60, 219–222.
- [81] RUBIO-GONZÁLEZ, C., GOMEZ-ROSAS, G., OCAÑA, J., MOLPECERES, C., BANDERAS, A., PORRO, J., MORALES, M. Effect of an absorbent overlay on the residual stress field induced by laser shock processing on aluminum samples. *Appl. Surf. Sci.* 2006, 252, 6201–6205.





- [82] GOLDEN, J., HUTSON, A., SUNDARAM, V., ARPS, J. Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6Al-4V. *Int. J. Fatigue* 2007, 29, 1302–1310.
- [83] CHEN, H., CLAUDET, A., ZALESKI, T., DANE, C., LANE, L., HACKEL, L., HARRIS, F., HALPIN, J. Laser process form thick, curved metal parts. *Sci. Technol. Rev.* 2003, 10, 16–17.
- [84] HATAMLEH, O. A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints. *Int. J. Fatigue* 2009, 31, 974–988.
- [85] HATAMLEH, O., DEWALD, A. An investigation of the peening effects on the residual stresses in friction stir welded 2195 and 7075 aluminum alloy joints. *J. Mater. Process. Technol.* 2009, 209, 4822–4829.
- [86] MONTROSS, C., FLOREA, V., SWAIN, M. The influence of coatings on subsurface mechanical properties of laser peened 2011-T3 aluminum. *J. Mater. Sci.* 2011, 36, 1801–1807.
- [87] CHENG, G. J., SHEHADEH, M. A. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening—A multiscale simulation approach. *Scripta Mater.* 2005, 53, 1013–1018.
- [88] HONG, X., WANG, S., GUO, D., WU, H., WANG, J., DAI, Y., XIA, X., XIE, Y. Confining medium and absorptive overlay: Their effects on a laser-induced shock wave. *Opt. Lasers Eng.* 1998, 29, 447–455.
- [89] ZHOU, Z., BHAMARE, S., RAMAKRISHNAN, G., MANNAVA, S. R., LANGER, K., WEN, Y., QIAN, D., VASUDEVAN, V. K. Thermal relaxation of residual stress in laser shock peened Ti-6Al-4V alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2012, 206, 4619–4627.
- [90] RUSCHAU, J., JOHN, R., THOMPSON, S. R., NICHOLAS, T. Fatigue crack nucleation and growth rate behavior of laser shock peened titanium. *Int. J. Fatigue* 1999, 21, 199–209.
- [91] KRUUSING, A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1 general features, steam cleaning and shock processing. *Opt. Lasers Eng.* 2004, 41, 307–327.
- [92] LING, X., PENG, W., MA, G. Influence of laser peening parameters on residual stress field of 304 stainless steel. *J. Press. Vessel Technol.* 2008, 130, 021201. doi:10.1115/1.2891914.
- [93] CAO, Y., SHIN, Y., WU, B. Parametric study on single shot and overlapping laser shock peening on various metals via modeling and experiments. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2010, 132, 061010–061017.
- [94] Ege Takim. *Upínače a nástroje*. [online]. Ege Takim. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: <http://www.egotakim.com.tr/>
- [95] Baublies AG. *Optimized Surfaces by roller burnishing* [online]. Baublies AG [cit. 2016-03-13] Dostupné z: <http://www.baublies.com/en/index.html>
- [96] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. 1999.





- [97] GANEV, N., FRYDRÝŠEK, K., KOLAŘÍK, K. Possibilities of FEM for Verification of X-Ray Measurement of Residual Stresses Depth Distribution. In *9<sup>th</sup> Applied Mechanics 2007. Malenovice 16-19 April, 2007*. Edit. Karel
- [98] THAREJA, R., SHUKLA, S. Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles by laser ablation of zinc in liquid. *Appl. Surf. Sci.* 2007, 253, 8889–8895.
- [99] YE, C., SUSLOV, S., KIM, B. J., STACH, E. A., CHENG, G. J. Fatigue performance improvement in AISI 4140 steel by dynamic strain aging and dynamic precipitation during warm laser shock peening. *Acta Mater.* 2011, 59, 1014–1025.
- [100] JIANG, Y., HUANG, Y., JIN, H., GU, Y., REN, A., HUANG, L., QIAN, X. Research on precision control of sheet metal forming by laser shock waves with semi-die. *Opt. Lasers Eng.* 2013, 45, 598–604.
- [101] SRINIVASAN, S., GARCIA, D. B., GEAN, M. C., MURTHY, H., FARRIS, T. N. Fretting fatigue of laser shock peened Ti-6Al-4V. *Tribol. Int.* 2009, 42, 1324–1329.
- [102] CAO, Z., CHE, Z., ZOU, S., FEI, Q. Numerical simulation of residual stress field induced by laser shock processing with square spot. *J. Shanghai Univ.* 2011, 15, 553–556.
- [103] KIM, J. H., KIM, Y. J., KIM, J. S. Effects of laser source geometry on laser shock peening residual stress. *Korean Soc. Mech. Eng.* 2012, 36, 609–615.
- [104] FRYDRÝŠEK ET. AL. Ostrava: Faculty of Mechanical Engineering, 2007, p. 85–86. ISBN 978-80-248-1389-9.
- [105] MARTINEZ, S. A., SATHISH, S., BLODGETT, M. P., SHEPARD, M. J. Residual stress distribution on surface-treated Ti-6Al-4V by X-ray diffraction. *Exp. Mech.* 2003, 43, 141–147.
- [106] CAO, Z., XU, H., ZOU, S., CHE, Z. Investigation of surface integrity on TC17 titanium alloy treated by square-spot laser shock peening. *Chin. J. Aeronaut.* 2012, 25, 650–656.
- [107] CELLARD, C., RETRAINT, D., FRANÇOIS, M., ROUHAUD, E., LE SAUNIER, D. Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: Influence of process parameters. *Mater. Sci. Eng. A* 2012, 532, 362–372.
- [108] TAN, Y., WU, G., YANG, J., PAN, T. Laser shock peening on fatigue crack growth behaviour. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2004, 27, 649–656.
- [109] LIAO, Y., SUSLOV, S., YE, C., CHENG, G. The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance. *Acta Mater.* 2012, 60, 4997–5009.
- [110] KALAINATHAN, S., SATHYAJITH, S., SWAROOP, S. Effect of laser shot peening without coating on the surface properties and corrosion behavior of 316 L steel. *Opt. Lasers Eng.* 2012, 50, 1740–1745.
- [111] RUBIO-GONZÁLEZ, C., FELIX-MARTINEZ, C., GOMEZ-ROSAS, G., OCAÑA, J. L., MORALES, M., PORRO, J.A. Effect of laser shock processing



- on fatigue crack growth of duplex stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A* 2011, 528, 914–919.
- [112] CHENG, G. J., PIRZADA, D., MING, Z. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming. *J. Appl. Phys.* 2007, 101, 063108:1–063108:7.
- [113] HILL, M. R., DEWALD, A.T., RANKIN, J.E., LEE, M.J. Measurement of laser peening residual stresses. *J. Mater. Sci. Technol.* 2005, 21, 3–9.
- [114] BUGAYEV, A. A., GUPTA, M. C., PAYNE, R. Laser processing of inconel 600 and surface structure. *Opt. Lasers Eng.* 2006, 44, 102–111.
- [115] Metal Improvement Company. *Curtiss-wright surface technologies: Shot peening*. [online]. Metal Improvement Company [cit. 2016-04-04] Dostupné z: Available online: <http://www.metalimprovement.com/>
- [116] BOLIS, C., BERTHE, L., BOUSTIE, M., ARRIGONI, M., BARRADAS, S., JEANDIN, M. Physical approach to adhesion testing using laser-driven shock waves. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2007, 40, 3155–3163.
- [117] SEALY, M. P., GUO, Y. B. Surface integrity and process mechanics of laser shock peening of novel biodegradable magnesium-calcium (Mg-Ca) alloy. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2010, 3, 488–496.
- [118] ALTENBERGER, I., NALLA, R. K., SANO, Y., WAGNER, L., RITCHIE, R. O. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C. *Int. J. Fatigue* 2012, 44, 292–302.
- [119] SANO, Y., MUKAI, N., OKAZAKI, K., OBATA, M. Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 1997, 121, 432–436.
- [120] FOUINIER, J., BALLARD, P., MERIEN, P., BARRALIS, J., CASTEX, L., FABBRO, R. Mechanical effects induced by shock waves generated by high energy laser pulses. *J. Phys.* 1991, 1, 1467–1480.
- [121] YOSHIHIRO, S., YUJI, S., RIE, S., YOUCHUL, K. Fatigue life enhancement of fillet and butt welded joints after laser peening. *Trans. Join. Weld. Res. Inst. (JWRI)* 2012, 41, 71–76.
- [122] CHU, J., RIGSBEE, J., BANAS, G., LAWRENCE, F., ELSAYED-ALI, H. Effects of laser-shock processing on the microstructure and surface mechanical properties of Hadfield manganese steel. *Metall. Mater. Trans. A* 1995, 26, 1507–1517.
- [123] GAGLIARDI, M. A., SENCER, B.H., HUNT, A.W., MALOY, S.A., GRAY, G.T. Relative defect density measurements of laser shock peened 316 L stainless steel using positron annihilation spectroscopy. *J. Nondestruct. Eval.* 2011, 30, 221–224.
- [124] GERLAND, M., HALLOUIN, M. Effect of pressure on the microstructure of an austenitic stainless steel shock loaded by very short laser pulses. *J. Mater. Sci.* 1994, 29, 345–351.



- [125] ZHANG, W., YAO, Y. L., NOYAN, I. C. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: High spatial resolution material characterization. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2004, *126*, 18–24.
- [126] WANG, Y., FAN, Y., VUKELIC, S., YAO, Y. L. Energy-level effects on the deformation mechanism in microscale laser peen forming. *J. Manuf. Process.* 2007, *9*, 1–12.
- [127] DEWALD, A. T., RANKIN, J.E., HILL, M.R., LEE, M.J., CHEN, H.L. Assessment of tensile residual stress mitigation in alloy 22 welds due to laser peening. *J. Eng. Mater. Technol.* 2004, *126*, 465–473.
- [128] GILL, A.S., ZHOU, Z., LIENERT, U., ALMER, J., LAHRMAN, D. F., MANNAVA, S.R., QIAN, D., VASUDEVAN, V.K. High spatial resolution, high energy synchrotron X-ray diffraction characterization of residual strains and stresses in laser shock peened Inconel 718SPF alloy. *J. Appl. Phys.* 2012, *111*, 084904:1–084904:12.
- [129] FU, J., ZHU, Y., ZHENG, C., LIU, R., JI, Z. Effect of laser shock peening on mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass. *Appl. Surf. Sci.* 2014, *313*, 692–697.
- [130] LU, J. Z., ZHANG, L., FENG, A. X., JIANG, Y. F., CHENG, G. G. Effects of laser shock processing on mechanical properties of Fe–Ni alloy. *Mater. Des.* 2009, *30*, 3673–3678.
- [131] LEJIA, L., ZHONG, J., ZHENFENG, R., CHAO, Z., REN, L. Laser shock forming of thin film Fe<sub>78</sub>Si<sub>9</sub>B<sub>13</sub> metallic. *Chin. Sci. Pap.* 1986, 1–7.
- [132] GREVEY, D., MAIFFREDY, L., VANNES, A. Laser shock on a TRIP alloy: Mechanical and metallurgical consequences. *J. Mater. Sci.* 1992, *27*, 2110–2116.
- [133] MAAWAD, E., SANO, Y., WAGNER, L., BROKMEIER, H. G., GENZEL, C. Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys. *Mater. Sci. Eng. A* 2012, *536*, 82–91.
- [134] CHEN, X., WANG, J., FANG, Y., MADIGAN, B., XU, G., ZHOU, J. Investigation of microstructures and residual stresses in laser peened Incoloy 800 H weldments. *Opt. Lasers Technol.* 2014, *57*, 159–164.
- [135] CHENG, G. J., CAI, M., PIRZADA, D., GUINEL, M.J.F., NORTON, M.G. Plastic Deformation in silicon crystal induced by heat-assisted laser shock peening. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2008, *130*, 011008:1–011008:5.
- [136] HOU, L., WANG, D., ZHANG, Y. Investigation of the fatigue behaviour of the welded joints treated by TIG dressing and ultrasonic peening under variable-amplitude load. *Int. J. Fatigue* 2005, *27*, 95–101.
- [137] XING, Y. M., LU, J. An experimental study of residual stress induced by ultrasonic shot peening. *J. Mater. Process. Technol.* 2004, *152*, 56–61.
- [138] YANG, X., LING, X., ZHOU, J. Optimization of the fatigue resistance of AISI304 stainless steel by ultrasonic impact treatment. *Int. J. Fatigue* 2014, *61*, 28–38.
- [139] LIU, G., LU, J., LU, K. Surface nanocrystallization of 316 L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. *Mater. Sci. Eng. A* 2000, *286*, 91–95.



- [140] SANDÁ, A., GARCÍA NAVAS, V., GONZALO, O. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample. *Mater. Des.* 2011, 32, 2213–2220.
- [141] LIAO, M., CHEN, W. R., BELLINGER, N. C. Effects of ultrasonic impact treatment on fatigue behavior of naturally exfoliated aluminum alloys. *Int. J. Fatigue* 2008, 30, 717–726.
- [142] MORDYUK, B. N., PROKOPENKO, G. I. Fatigue life improvement of  $\alpha$ -titanium by novel ultrasonically assisted technique. *Mater. Sci. Eng. A* 2006, 437, 396–405.
- [143] NALLA, R., ALTENBERGER, I., NOSTER, U., LIU, G., SCHOLTES, B., RITCHIE, R. On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures. *Mater. Sci. Eng. A* 2003, 355, 216–230.
- [144] PEYRE, P., FABBRO, R., MERRIEN, P., LIEURADE, H. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour. *Mater. Sci. Eng. A* 1996, 210, 102–113.
- [145] AN, X., RODOPOULOS, C. A., STATNIKOV, E. S., VITAZEV, V. N., KOROLKOV, O. V. Study of the surface nanocrystallization induced by the esonix ultrasonic impact treatment on the near-surface of 2024-T351 aluminum alloy. *J. Mater. Eng. Perform.* 2006, 15, 355–364.
- [146] WANG, F., YAO, Z., DENG, Q. Experimental study on laser shock processing of brass. *J. Univ. Sci. Technol. Beijing Miner. Metall. Mater.* 2007, 14, 529–532.
- [147] TRDAN, U., PORRO, J. A., OCAÑA, J. L., GRUM, J. Laser shock peening without absorbent coating (LSPwC) effect on 3D surface topography and mechanical properties of 6082-T651 Al alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2012, 208, 109–116.
- [148] STANZL, S., TSCHEGG, E., MAYER, H. Lifetime measurements for random loading in the very high cycle fatigue range. *Int. J. Fatigue* 1986, 8, 195–200.
- [149] LAVENDER, C. A., HONG, S. T., SMITH, M. T., JOHNSON, R. T., LAHRMAN, D. The effect of laser shock peening on the life and failure mode of a cold pilger die. *J. Mater. Process. Technol.* 2008, 204, 486–491.
- [150] YILBAS, B. S., GONDAL, M. A., ARIF, A. M., SHUJA, S. Z. Laser shock processing of Ti-6Al-4V alloy. *Proc. Instn. Mech. Eng.* 2004, 218, 473–483.
- [151] ZABEEN, S., PREUSS, M., WITHERS, P. J. Residual stresses caused by head-on and 45° foreign object damage for a laser shock peened Ti-6Al-4V alloy aerofoil. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, 560, 518–527.
- [152] ROZMUS-GÓRNIKOWSKA, M. Surface modifications of a Ti-6Al-4V alloy by a laser shock processing. *Acta Phys. Pol. A* 2010, 117, 808–811.
- [153] PREVÉY, P.S. X-ray diffraction residual stress techniques. In *Metals Handbook, No. 513*; American Society for Metals: Metals Park, OH, USA, 1986; pp. 380–392.



- [154] PREVÉY, P.S. Problems with Non-Destructive surface X-Ray diffraction residual stress measurement. *Pract. Appl. Residual Stress Technol.* 1991, 513, 47–54.
- [155] PREVÉY, P.S. The use of pearson VII distribution functions in X-Ray diffraction residual stress measurement. *Pract. Appl. Residual Stress Technol.* 1986, 29, 103–111.
- [156] PEYRE, P., SOLLIER, A., CHAIEB, I., BERTHE, L., BARTNICKI, E., BRAHAM, C., FABBRO, R. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2003, 88, 83–88.
- [157] FORGET, P., STRUDEL, J. L., JEANDIN, M., LU, J., CASTEX, L. Laser shock surface treatment of Ni-based superalloys. *Mater. Manuf. Process.* 1990, 5, 501–528.
- [158] LUO, K., LU, J., ZHANG, L., ZHONG, J., GUAN, H., QIAN, X. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing. *Mater. Des.* 2010, 31, 2599–2603.
- [159] LI, K., HU, Y., YAO, Z. Experimental study of micro dimple fabrication based on laser shock processing. *Opt. Laser Technol.* 2013, 48, 216–225.
- [160] AMAR, H., VIGNAL, V., KRAWIEC, H., JOSSE, C., PEYRE, P., DA SILVA, S. N., DICK, L. F. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behaviour of the AA2050-T8 aluminium alloy. *Corros. Sci.* 2011, 53, 3215–3221.
- [161] LIU, K. K., HILL, M. R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons. *Tribol. Int.* 2009, 42, 1250–1262.
- [162] GOMEZ-ROSAS, G., RUBIO-GONZALEZ, C., OCAÑA, J. L., MOLPECERES, C., PORRO, J. A., MORALES, M., CASILLAS, F. J. Laser shock processing of 6061-T6 Al alloy with 1064 nm and 532 nm wavelengths. *Appl. Surf. Sci.* 2010, 256, 5828–5831.
- [163] CLAUER, A. H., HOLBROOK, J. H., FAIRAND, B. P. Effects of laser induced shock waves on metals. In *Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals*; Plenum Publishing Corporation: New York, NY, USA, 1981; pp. 675–703.
- [164] MANNAVA, S., Cowie, W. D. Technique to Prevent or Divert Cracks-General Electric Company. U.S. Patent 5,569,018, 29 October 1996.
- [165] LUO, K. Y., WANG, C.Y., LI, Y.M., LUO, M., HUANG, S., HUA, X.J., LU, J.Z. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing. *Appl. Surf. Sci.* 2014, 313, 600–606.
- [166] DANE, C., HACKEL, L., DALY, J., HARIRSON, J. Laser peening of metals enabling laser technology. *Adv. Mater. Process.* 1997, 13–27.
- [167] FAN, Z., XU, H., LI, D., ZHANG, L., LIAO, L. Surface nanocrystallization of 35# type carbon steel induced by ultrasonic impact treatment (UIT). *Procedia Eng.* 2012, 27, 1718–1722.





- [168] GALTIER, A., STATNIKOV, E. S. The influence of ultrasonic impact treatment on fatigue behaviour of welded joints in high-strength steel. *Weld. World* 2004, 48, 61–66.
- [169] ROY, S., FISHER, J. Enhancing fatigue strength by ultrasonic impact treatment. *Steel Struct.* 2005, 5, 241–252.
- [170] MANNAVA, S. On the Fly Laser Shock Peening-General Electric Company. U.S. Patent 5,756,965, 26 May 1998.
- [171] MORDYUK, B. N., IEFIMOV, M. O., PROKOPENKO, G. I., GOLUB, T. V., DANYLENKO, M. I. Structure, microhardness and damping characteristics of Al matrix composite reinforced with AlCuFe or Ti using ultrasonic impact peening. *Surf. Coat. Technol.* 2010, 204, 1590–1598.
- [172] ABRAMOV, V. O., ABRAMOV, O. V., SOMMER, F., GRADOV, O. M., SMIRNOV, O. M. Surface hardening of metals by ultrasonically accelerated small metal balls. *Ultrasonics* 1998, 36, 1013–1019.
- [173] GÜNTHER, H., KUHLMANN, U., DURR, A. Rehabilitation of welded joints by ultrasonic impact treatment (UIT). In Proceedings of the IABSE Symposium Report, Lisbon, Portugal, 14–17 September 2005; International Association for Bridge and Structural Engineering: Lisbon, Portugal, 2005; pp. 1–7.
- [174] MANNAVA, S., FERRIGNO, S. Laser Shock Peening for Gas Turbine Engine Vane Repair-General Electric Company. U.S. Patent 5,675,892, 14 October 1997.
- [175] MANNAVA, S., FERRIGNO, S., COWIE, W. D. Laser Shock Peening for Gas Turbine Engine Weld Repair-General Electric Company. U.S. Patent 5,846,057, 8 December 1998.
- [176] DANE, C. B., HARRIS, F., LAO, E., RANKIN, J., HURD, R. Advanced beam delivery for mobile laser peening. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Laser Peening*, San Francisco, Metal Improvement Company: Paramus, NJ, USA, 2010.
- [177] VACCARI, J. Laser shocking extends fatigue life. *Am. Mach.* 1992, 6, 21–23.
- [178] FABBRO, R., PEYRE, P., BERTHE, L., SCHERPEREEL, X. Physics and applications of laser-shock processing. *J. Laser Appl.* 1998, 10, 265–279.
- [179] DANE, C., HACKEL, L., DALY, J. Shot peening with laser. *Adv. Mater. Process.* 1998, 153, 37–48.
- [180] 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. 2016-07-05]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.341-342.246. ISSN 16627482. Dostupné z: <http://www.scientific.net/AMM.341-342.246>
- [181] LIU, Q., DING, K., YE, L., REY, C., BARTER, S.A., SHARP, P.K., CLARK, G. Spallation-like phenomenon induced by laser shock peening surface treatment on 7050 aluminum alloy. In Proceedings of the Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04), The University of Queensland: Brisbane, Australia, 2004; pp. 235–240.





- [182] SANO, Y., OBATA, M., KUBO, T., MUKAI, N., YODA, M., MASAKI, K., OCHI, Y. Retardation of crack initiation and growth in austenitic stainless steels by laser peening without protective coating. *Mater. Sci. Eng. A* 2006, 417, 334–340.
- [183] ZHAO, Y. *Effects of Laser Shock Peening on Residual Stress, Texture and Deformation Microstructure of Ti-6Al-4V Alloy*. Ph.D. Thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, OH, USA, 2012.
- [184] PEYRE, P., BERTHE, L., SCHERPEREEL, X., FABBRO, R. Laser-shock processing of aluminium-coated 55C1 steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behaviour. *J. Mater. Sci.* 1998, 3, 1421–1429.
- [185] MORDYUK, B. N., MILMAN, Y. V., IEFIMOV, M. O., PROKOPENKO, G. I., SILBERSCHMIDT, V. V., DANYLENKO, M. I., KOTKO, A. V. Characterization of ultrasonically peened and laser shock peened surface layers of AISI 321 stainless steel. *Surf. Coat. Technol.* 2008, 202, 4875–4883.
- [186] TRDAN, U., GRUM, J. Evaluation of corrosion resistance of AA6082-T651 aluminium alloy after laser shock peening by means of cyclic polarisation and EIS methods. *Corros. Sci.* 2012, 59, 324–333.
- [187] TAO, N., SUI, M., LU, J., LUA, K. Surface nanocrystallization of iron induced by ultrasonic shot peening. *Nanostruct. Mater.* 1999, 11, 433–440.
- [188] SÁNCHEZ-SANTANA, U., RUBIO-GONZÁLEZ, C., GOMEZ-ROSAS, G., OCAÑA, J. L., Molpeceres, C., Porro, J., Morales M. Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing. *Wear* 2006, 260, 847–854.
- [189] KALAINATHAN, S., SATHYAJITH, S., SWAROOP, S. Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser. *Opt. Lasers Eng.* 2012, 50, 345–348.
- [190] OCATIA, L., MORALES, M., MOLPECERES, C., PORRO, J. A., ABASCAL, J. G., ZUPANEIC, M. Laser shock processing as a method for surface properties modification of metallic materials. In Proceedings of the 9th International Conference on Shot Peening, Paris, France, 2005; The Shot Peening-Blast Cleaning Library: Mishawaka, IN, USA, 2005; pp. 466–471.
- [191] HU, Y., YAO, Z., HU, J. 3-D FEM simulation of laser shock processing. *Surf. Coat. Technol.* 2006, 201, 1426–1435.
- [192] CLAUER, J. R., KOUCKY, A. H. Laser shock processing increases the fatigue life of metal parts. *J. Mater. Process.* 1991, 6, 3–5.
- [193] MASSE, G., BARREAU, J. Surface modification by laser induced shock waves. *Surf. Eng.* 1995, 11, 131–132.
- [194] CHEN, H., KYSAR, J. W., YAO, Y. L. Characterization of plastic deformation induced by microscale laser shock peening. *J. Appl. Mech.* 2004, 71, 713–723.
- [195] WAGNER, L., MHAEDE, M., WOLLMANN, M., ALTENBERGER, I., SANO, Y. Surface layer properties and fatigue behavior in Al 7075-T73 and Ti-6Al-4V: Comparing results after laser peening, shot peening and ball-burnishing. *Int. J. Struct. Integr.* 2011, 2, 185–199.



- [196] YE, C., LIAO, Y., CHENG, G. J. Warm laser shock peening driven nanostructures and their effects on fatigue performance in aluminium alloy 6160. *Adv. Eng. Mater.* 2010, 12, 291–297.
- [197] YANG, C., HODGSON, P. D., LIU, Q., YE, L. Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening. *J. Mater. Process. Technol.* 2008, 201, 303–309.
- [198] HAMMERSLEY, G., HACKEL, L., HARRIS, F. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening. *Opt. Lasers Eng.* 2000, 34, 327–337.
- [199] HILL, M., DEWALD, A., DEMMA, A., HACKEL, L., CHEN, H., DANE, C., SPECHT, R., HARRIS, F. Laser peening technology. *ASM Int.* 2003, 161, 2–4.
- [200] ZHANG, Y., YOU, J., LU, J., CUI, C., JIANG, Y., REN, X. Effects of laser shock processing on stress corrosion cracking susceptibility of AZ31B magnesium alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2010, 204, 3947–3953.
- [201] VUKELIĆ, S., KYSAR, J. W., YAO, Y. L. Grain boundary response of aluminum bicrystal under micro scale laser shock peening. *Int. J. Solids Struct.* 2009, 46, 3323–3335.
- [202] ROULEAU, B., PEYRE, P., BREUILS, J., PELLETIER, H., BAUDIN, T., BRISSET, F. Characterization at a local scale of a laser-shock peened aluminum alloy surface. *Appl. Surf. Sci.* 2011, 257, 7195–7203.
- [203] LUO, K. Y., LU, J. Z., ZHANG, Y. K., ZHOU, J. Z., ZHANG, L. F., DAI, F. Z., ZHANG, L., ZHONG, J. W., CUI, C. Y. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A* 2011, 528, 4783–4788.
- [204] CHU, J. P., RIGSBEE, J. M., BANAS, G., ELSAYED-ALI, H. E. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel. *Mater. Sci. Eng. A* 1999, 260, 260–268.
- [205] HATAMLEH, O. Effects of peening on mechanical properties in friction stir welded 2195 aluminum alloy joints. *Mater. Sci. Eng. A* 2008, 492, 168–176.
- [206] GOMEZ-ROSAS, G., RUBIO-GONZALEZ, C., OCAÑA, J., MOLPECERES, C., PORRO, J. A., CHI-MORENO, W., MORALES, M. High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing. *Appl. Surf. Sci.* 2005, 252, 883–887.
- [207] HONG, Z., CHENGYE, Y. Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 1998, 257, 322–327.
- [208] YANG, J. M., HER, Y. C., HAN, N., CLAUER, A. Laser shock peening on fatigue behavior of 2024-T3 Al alloy with fastener holes and stopholes. *Mater. Sci. Eng. A* 2001, 298, 296–299.
- [209] LUONG, H., HILL, M. R. The effects of laser peening on high-cycle fatigue in 7085-T7651 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 2008, 477, 208–216.
- [210] HECKENBERGER, U. C., HOMBERGSMEIER, E., HOLZINGER, V., VON BESTENBOSTEL, W. Laser shock peening to improve the fatigue resistance of AA7050 components. *Int. J. Struct. Integr.* 2011, 2, 22–33.



- [211] CHAHARDEHI, A., BRENNAN, F. P., STEUWER, A. The effect of residual stresses arising from laser shock peening on fatigue crack growth. *Eng. Fract. Mech.* 2010, 77, 2033–2039.
- [212] GAO, Y. K. Improvement of fatigue property in 7050-T7451 aluminum alloy by laser peening and shot peening. *Mater. Sci. Eng. A* 2011, 528, 3823–3828.
- [213] SCHERPEREEL, N., PEYRE, P., FABBRO, R., LEDERER, G., CELATI, N. Modifications of mechanical and electrochemical properties of stainless steel surfaces by laser shock processing. *Proc. SPIE* 1997, 3097, 546–557.
- [214] SANO, Y., AKITA, K., MASAKI, K., OCHI, Y., ALTENBERGER, I., SCHOLTES, B. Laser peening without coating as a surface enhancement technology. *J. Laser Micro/Nano Eng.* 2006, 1, 161–166.
- [215] HATAMLEH, O., SINGH, P. M., GARMESTANI, H. Stress corrosion cracking behavior of peened friction stir welded 2195 aluminum alloy joints. *J. Mater. Eng. Perform.* 2008, 18, 406–413.
- [216] HACKEL, L., RANKIN, J., DANE, C. B., HARRIS, F. Mitigation of Stress corrosion cracking and cavitation erosion in ship structures and systems by laser peening. In *Curtiss Wright Surface Technologies*; Metal Improvement Company: Paramus, NJ, USA; 2012; pp. 1–4.
- [217] PREVÉY, P., HORNBAACH, D., MASON, P. Thermal residual stress relaxation and distortion in surface enhanced gas turbine engine components. In *Proceedings of the 17th Heat Treating Society Conference and Exposition and the 1st International Induction Heat Treating Symposium*; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1998; pp. 3–12.
- [218] LIN, D., YE, C., LIAO, Y., SUSLOV, S., LIU, R., CHENG, G. J. Mechanism of fatigue performance enhancement in a laser sintered superhard nanoparticles reinforced nanocomposite followed by laser shock peening. *J. Appl. Phys.* 2013, 113, 133509:1–133509:10.
- [219] SANDVIK INTELLECTUAL PROPERTY AB, *Method of producing a nanotwinned titanium material by casting*. Inventors: Guocai Chai. European patent application. EP2655682 A1. 21.12.2011.
- [220] Mechanical Properties Data Center Traverse City Mich. *Aerospace Structural Metals Handbook*, [online]. Volume 4, CINDAS/Purdue University, 1998 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/AD737970.xhtml>
- [221] FÜRBAACHER, I., MACEK, K., STEIDL, J. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: kovy, plasty, keramika, kompozity, včetně 13. doplňků*. Praha: Odborné nakladatelství technické literatury, 2001. ISBN 8086229025.
- [222] YIN, D., WANG, D., JING, H., HUO, L. The effects of ultrasonic peening treatment on the ultra-long life fatigue behavior of welded joints. *Mater. Des.* 2010, 31, 3299–3307.
- [223] Hill Engineering. Extending Life of Fighter Airframes [online]. Hill Engineering [cit. 2016-08-19]. Dostupné z <http://hill-engineering.com/case-study/extending-life-fighter-airframes/>



- [224] RHODE, R., JOHNSON, J. Dynamic deformation twinning in shock loaded iron. *J. Appl. Phys.* 1971, 42, 4171–4182.
- [225] J. D. ACHENBACH., Wave Propagation in Elastic Solids: *North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics*, Elsevier, 2016, ISBN 1483163733, s. 440
- [226] HATAMLEH, O., SMITH, J., COHEN, D., BRADLEY, R. Surface roughness and friction coefficient in peened friction stir welded 2195 aluminum alloy. *Appl. Surf. Sci.* 2009, 255, 7414–7426.
- [227] CHANDRASEKARAN, K. On the roughness dependence of wear of steels: A new approach. *J. Mater. Sci. Lett.* 1993, 12, 952–954.
- [228] LSP Technologies. Turbine blades with laser peening [online]. LSP Technologies [cit. 2016-03-13]. Dostupné z <http://www.lsptechnologies.com/turbine-blades-with-laser-peening/>
- [229] Phys.org. Brits, Czechs claim world's most powerful 'super laser' [online]. Phys.org. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z <https://phys.org/news/2017-01-brits-czechs-world-powerful-super.html>
- [230] YU, C., GAO, H., YU, H., JIANG, H., CHENG, G. J. Laser dynamic forming of functional materials laminated composites on patterned three-dimensional surfaces with applications on flexible microelectromechanical systems. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95, 091108:1–091108:3.
- [231] NOVOTNÝ, M. *Technologie dokončování součástí letecké výroby* [Diplomová práce]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 2016. 97 s
- [232] ZEMAN, P. *Experimentální a simulační výzkum vlivu řezné rychlosti na proces tvorby třísky se zaměřením na plastické deformace obráběného materiálu.* [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta Strojní, 2005. 118 s.
- [233] Challenge. *Ozubené převody* [online]. [232]Challenge. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://www.challengept.cz/sortiment/ozubena-kola-soukoli-hrebeny/>
- [234] BOYER, R. COLLINGS, E. W. WELSCH. G. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, 1994, 1169, ISBN: 978-0-87170-481-8
- [235] SCHAJER, G. S. Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1981, vol. 103, no. 2, p. 157-163.
- [236] Zkoušky tvrdosti [online]. Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, fakulta strojní, b.r. [cit. 2016-08-08]. Dostupné z: [www.ateam.zcu.cz/Zkousky\\_tvrlosti.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf)
- [237] SANO, Y., KIMURA, M., SATO, K., OBATA, M. SUDO, A. et al. *Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8)*, Baltimore, (2000). ISBN 0791835006
- [238] LSP technologies. LSP technologies celebrates production laser peening milestone [online]. LSP technologies. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z <https://www.lsptechnologies.com/lsp-technologies-production-laser-peening-milestone/>
- [239] The University of Manchester. Laser peening extends the lifetime of Rolls-Royce fan blades [online]. The University of Manchester. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z <http://www.materials.manchester.ac.uk/our-research/research-mpact/aeroengine-fan-blades/>



- [240] GENGA, R. M., GLASER, D., WOYDT, M., POLESE, C., CORNISH, L.A. Mechanical and Machining Properties of Laser Peened NbC Cermets during Face-Milling of Grey Cast Iron, University of the Witwatersrand, South Africa [cit. 2018-07-13]. Dostupné z <http://www.lsp2018.com/wordpress/wp-content/themes/lsp2018-theme/doc/LSP%202018%20Prog%20timetable.pdf>
- [241] GENGA, R. Laser Shock Peening of NbC-based Cermets for Improved Face-milling of GCI, [cit. 2018-05-13]. Dostupné z [https://www.eiseverywhere.com/file\\_uploads/59274ef1aedb09bc5d0880efaed0b11b\\_6thICLPRPFinalProgram.pdf](https://www.eiseverywhere.com/file_uploads/59274ef1aedb09bc5d0880efaed0b11b_6thICLPRPFinalProgram.pdf)

### 9.1 Publikace autora prezentující výsledky disertace

- [242] MÁČA, O., BRAJER, J. Vliv řezných podmínek na integritu povrchu a možnosti jejího zjišťování, *Technológia Europea 2013*, MAGNANIMITAS, s 96-99, ISBN 978-80-87952-01-6.
- [243] BRAJER, J., BIČIŠŤOVÁ, R., ŠVÁBEK, R., ROSTOHAR, D., MÁDL, J., ZEMAN, P. Laser applications transferred to industry, *Laser Engineering of Surfaces and Coatings*, Isola di San Servolo, Venice, Italy, 2014
- [244] BRAJER, J. Application of laser shock peening, *Stunedtská tvůrčí činnost*, Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ČVUT v Praze, D3, s. 15, ISBN 978-80-01-05484-0, 2014
- [245] BRAJER, J. *Application of laser shock peening*, Student conference, Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc., Technická univerzita Krakow, Polsko, 2014
- [246] BULGAKOVA N. M., ZHUKOV V. P., MESHCHERYAKOV Y. P., GEMINI L., BRAJER J., ROSTOHAR D., MOCEK T. Pulsed laser modification of transparent dielectrics: what can be foreseen and predicted by numerical simulations?, *Journal of the Optical Society of America B*, pp. C8-C14, ISSN: 0740-3224, 2014
- [247] BRAJER, J., MÁDL, J., ŠVÁBEK, R., PITRMUC, Z., ROSTOHAR, D., ZEMAN, P., OCAÑA, J., L. Application of laser shock processing, *Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 278-285, ISSN 1213-2489, Czech Republic, 2015
- [248] SVABEK, R., J. MADL, A. LUCIANETTI, D. ROSTOHAR, Z. PITRMUC, T. MOCEK, J. BRAJER a M. DIVOKY. New possibilities for efficient laser surface treatment by diode-pumped kW-class lasers. *The Journal of Engineering*, Volume 2015, Issue 13, p. 158–160, DOI: 10.1049/joe.2015.0094. ISSN 2051-3305.
- [249] BRAJER, J. New possibilities of efficient peening by using diode-pumped kW-class lasers, *Stunedtská tvůrčí činnost*, Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc., ČVUT v Praze, D3, s.13, ISBN 978-80-01-05484-0, 2015
- [250] BRAJER, J. - MÁDL, J., - KAUFMAN, J. PRODUCTIVE LASER SHOCK PROCESSING Multioborová konference LASER57. Třešť, Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v. v. i.. 2017, s. 10. ISBN 978-80-87441-21-3. Dostupné z: <http://invenio.nusl.cz/record/369678>
- [251] ROSTOHAR, D., BÖHM, M., BRAJER, J., KAUFMAN, J., ZULIĆ, S., MOCEK, T. Development of experimental station for laser shock peening at





HiLASE, *Proc. SPIE 10523, Laser 3D Manufacturing V*, 105230K, doi: 10.1117/12.2297092, February 2018

- [252] BRAJER, J., MÁDL, J., KAUFMAN, J., ROSTOHAR, D., PITRMUC, MOCEK, T. Validation of post-process characterization methods for Laser Shock Peened Materials, 2018 in proceeding

## 9.2 Ostatní publikace autora

- [253] JURČI, P., CEJP, J., BRAJER, J. Metallurgical Aspects of Laser Surface Processing of PM Cr-V Ledeburitic Steel, *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2011, ISSN: 1687-8434, Article ID 563410, s. 8, 2011
- [254] BRAJER, J. Svařování obtížně svařitelných materiálů laserem. *Využití laseru v průmyslu 2011*, Plzeň, Matex-PM, s. 36-41, ISBN 978-80-7399-379-5, 2011
- [255] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., CEJP, J., JURČI, P. Struktura a vlastnosti povrchu oceli typu Vanadis 6 po laserovém tepelném přepracování. *Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů*, ČVUT FS CPS, 2011, ISBN 978-80-01-04822-1, 2011
- [256] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., ANDRLÍK, V. Návrh a optimalizace laserových technologií ve VCSVTT, *Konference LASER52*, ISBN 978-80-87441-08-4, ÚPT AV ČR, Třešť, 2012
- [257] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., BIČIŠŤOVÁ, R., ZEMAN, P. Návrh a optimalizace laserových technologií ve VCSVTT, *Konference LASER53*, ISBN 978-80-87441-08-4, ÚPT AV ČR, Třešť, 2013
- [258] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., BIČIŠŤOVÁ, R., ZEMAN, P. Návrh a optimalizace laserových technologií, *Strojárstvo*, Žilina, ISSN 1335-2938, 2013
- [259] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R., BIČIŠŤOVÁ, R., ZEMAN, P. Návrh a optimalizace laserových technologií ve VCSVTT, *Konference LASER54*, ISBN 978-80-87441-08-4, ÚPT AV ČR, Třešť, 2014
- [260] MORÁVEK, M., BURIAN, D., BRAJER, J., VYROUBAL, J. Milling tool deformation caused by heating during the cutting process, *Journal of Machine Engineering*, Wroclaw, ISSN 1895-7595, r. 2., s. 81-92, 2014
- [261] BRAJER, J., SMOLIK, J., PESEK, J., DIVIS, I., KOUBEK, J., VAVRUSKA, P. Laserové navařování s přídavným drátem, *Využití laseru v průmyslu 2015*, Plzeň, Matex-PM, ISBN 978-80-7399-379-5, 2015
- [262] BRAJER, J., ZEMAN, P., STUHLIK, J. Laserové technologie na ČVUT v Praze, *Konference LASER55*, ISBN 978-80-87441-08-4, ÚPT AV ČR, Třešť, 2015
- [263] BRAJER, J. HiLASE - superlasery pro skutečný svět, *MM Průmyslové spektrum*, 160129, v rubrice Monotematická příloha Spojování a dělení, Strana 88 [cit. 2016-04-13]. Dostupný z <https://www.mmspektrum.com/clanek/hilase-superlasery-pro-skutecny-svet.html>
- [264] BRAJER, J., ZEMAN, P., STUHLIK, J. Laserové technologie na ČVUT v Praze, *Konference LASER56*, ISBN 978-80-87441-19-0, ÚPT AV ČR, Třešť, 2016



- [265] BRAJER, J., ZEMAN, P., STUHLIK, J. Laserové technologie na ČVUT v Praze, *Konference LASER57*, ISBN ISBN 978-80-87441-21-3, ÚPT AV ČR, Třešť, 2017
- [266] BRAJER, J., KAUFMAN, J., BÖHM, M., ZULIC, S., ARNOULT, X., ROSTOHAR, D., MÁDL, J., MOCEK T., Productive laser shock processing, *Konference LASER57*, ISBN ISBN 978-80-87441-21-3, ÚPT AV ČR, Třešť, 2017
- [267] BRAJER, J. 3D technologie letem světem, MM Průmyslové spektrum, v rubrice Trendy / 3D technologie, s. 49, 180455, 2018, ISSN 1212-2572 Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/3d-technologie-letem-svetem.html>
- [268] BRAJER, J., SMOLIK, J., PESEK, J., DIVIS, I., KOUBEK, J. Nejlevnější technologie additive manufacturing pro výrobu dílců z kovu vyvinuta v České republice, *Využití laserů v průmyslu 2017*, Plzeň, Raptech, 2017
- [269] Kolář, P., Burian, D., Hornych, J., Novotný, L., Horejš, O., Mareš, M., Brajer, J., a kol. Hlavní trendy EMO Hannover 2017 očima výzkumníků, MM Průmyslové spektrum. 2017, 17(11), s. 26-28. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hlavni-trendy-emo-hannover-2017-ocima-vyzkumniku.html>

### 9.3 Ostatní výzkumné zprávy

- [270] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R. *Výzkum laserových návarů odolných proti abrazivnímu opotřebení*, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, [Výzkumná zpráva V-11-047], 2011
- [271] BRAJER, J., ZEMAN, P. *Testy svařování chirurgických nástrojů určených pro operaci ramene vyrobených z korozivzdorné martenzitické oceli*, [Výzkumná zpráva V-12-031], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012
- [272] BRAJER, J. *Svařování různorodých materiálů laserem pro vývoj nové koncepce autobaterie*, [Výzkumná zpráva V-12-044], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012
- [273] ZEMAN, P., BRAJER, J., KOVALČÍK, J., MÁCA, O., MALÝ, J., MAŠEK, P., SMOLÍK, J. *Problematika obrábění těžkoobrobitelných, kompozitních, případně dalších materiálů a návrh způsobu hodnocení produktivity a hospodárnosti obrábění*, [Výzkumná zpráva V-12-037], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 123, 2012
- [274] BRAJER, J., FOJTŮ, P., FORNŮSEK, T., VAVRUŠKA, P., ZEMAN, P., SMOLÍK, J. *Studie možností a výhod doplnění NC kódu generováním posuvů ve 4. a 5. rotační ose a analýza možnosti aplikace modelů pro zvyšování stability*, [Výzkumná zpráva V-12-043], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 54, 2012
- [275] BRAJER, J., MALÝ, J. *Aplikace metodiky testování pevnosti laserových svarů pro prototypovou výrobu*, ČVUT v Praze [Výzkumná zpráva V-12-048], 2012
- [276] BRAJER, J., ZEMAN, P. *Vrtání otvorů do výparníků automobilové klimatizace*, [Výzkumná zpráva V-13-055], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013



- [277] ZEMAN, P., BRAJER, J. *Testování životnosti frézovacích břitových destiček a Testy na soustružení korozivzdorné oceli*, [Výzkumná zpráva VZP-SMV13-SHM], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013
- [278] ZEMAN, P., BRAJER, J., RYBÍN, J., FORNŮSEK, T., LOMIČKA, J. *Řezání laserem a Sada dílů pro nastavení kamery*, [Výzkumná zpráva VZP-SMV13-MARECAM], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013
- [279] FALTA, J., FOJTŮ, P., BRAJER, J., SULITKA, M., SMOLÍK, J. *Ověřený model řezných sil pro obrábění zapichovacím soustružením pomocí přímých a tvarových nožů*, [Výzkumná zpráva V-13-057], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, s. 47, 2013
- [280] ZEMAN, P., BRAJER, J., MALÝ, J., ČERVENKA, J. *Laserové vrtání mikrootvorů do slinutého karbidu*, [Výzkumná zpráva V-14-057], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2014
- [281] ZEMAN, P., BRAJER, J., MALÝ, J., MÁCA, O., BUREŠ, J., CHVOJKA, P. *BARUM: souhrnná odborná výzkumná zpráva popisující návrh a realizaci QR kódu pomocí laseru a vrtání hlubokých děr* [Výzkumná zpráva VZP-14-SMV15-BARUM], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2014
- [282] ZEMAN, P., BRAJER, J., MALÝ, J., MÁCA, O. *SHM: souhrnná odborná výzkumná zpráva na téma: testy frézováním, řezné zkoušky* [Výzkumná zpráva VZP-14-SMV15-SHM], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2014
- [283] ZEMAN, P., MALÝ, J., BRAJER, J., SUŠEŇ, J., SULITKA, M. *PRAMET: souhrnná odborná výzkumná zpráva popisující spolupráci v oblasti testování technologií* [Výzkumná zpráva VZP-14-SMV15-PRAMET], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2014
- [284] FORNŮSEK, T., BRAJER, J., VAVRUŠKA, P., DIVIŠ, I. *E1/U1 - zkušební kusy*, [Výzkumná zpráva V-15-023], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015
- [285] BRAJER, J., ZEMAN, P., MALÝ, J., STUHLÍK, J. *Technologie výřezů v plošných dílcích laserem*, [Výzkumná zpráva V-15-052], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015
- [286] BRAJER, J., ZEMAN, P., MALÝ, J., STUHLÍK, J. *Laserové vrtání mikrootvorů do nástrojů ze slinutého karbidu a nerezové trubičky*, [Výzkumná zpráva V-15-066], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2015
- [287] BRAJER, J., ZEMAN, P., MALÝ, J., STUHLÍK, J. *Technologie laserového obrábění komplexních 3D tvarů*, [Výzkumná zpráva V-16-042], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016
- [288] BRAJER, J., ZEMAN, P., STUHLÍK, J., GARG, A., MALÝ, J., KOLÁŘ, P. *Laser Machining Of Cutting Materials*, [Výzkumná zpráva V-16-074], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016
- [289] BRAJER, J., ZEMAN, P., MALÝ, J., STUHLÍK, J. *Testy funkčnosti vzorků opracovaných laserem*, [Výzkumná zpráva V-16-078], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016



- [290] SOVA, J., BRAJER, J., TATÍČEK, F. *Rešerše technologických možností výroby LED osvětlení* [Výzkumná zpráva V-16-020], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016
- [291] BRAJER, J., ZEMAN, P., SEIDL, L., DIVIŠ, I. *Úprava laserového zařízení pro možnost navařování drátem* [Výzkumná zpráva V-16-041], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2016
- [292] VAVRUŠKA, P., MALÝ, J., STEJSKAL, M., SEIDL, L., BRAJER, J. *Metodika hybridní výroby dílců se zpevněným povrchem* [Výzkumná zpráva V-17-009], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017
- [293] DIVIŠ, I., BRAJER, J., FORNŮSEK, T., VAVRUŠKA, P., SMOLÍK, J. *Projekt HM E1-U2 ve vazbě na smlouvu SOD/KMAS/2014-HM* [Výzkumná zpráva V-17-018], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017
- [294] ZEMAN, P., BRAJER, J., MALÝ, J., STUHLÍK, J. *Technologie mikrostrukturování laserem* [Výzkumná zpráva V-17-069], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017

#### 9.4 Ostatní ověřené technologie

- [295] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R.: *Navařování otěruvzdorných povlaků laserem*, číslo U12242 - 04/2011, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, [ověřená technologie V-11-047], 2011
- [296] BRAJER, J., MALÝ, J., ZEMAN P., ŠVÁBEK, R.: *Vývoj technologického procesu laserového svařování plastových součástí mechanismu automobilového pásu*, [Ověřená technologie, Výzkumné zprávy V-12-032, V-12-033, V-12-034, V-12-035, V-12-036], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012
- [297] BRAJER, J., ZEMAN, P.: *Vrtání malých otvorů do korozivzdorné oceli*, [Ověřená technologie:2013/1], České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2013

#### 9.5 Nepublikované přednášky

- [298] BRAJER, J., ROSTOHAR, D.: *HiLASE Projekt: Nová laboratoř pro vývoj laserů a jejich aplikaci*, [Nepublikovaná přednáška], Trumpf, dny pro veřejnost, 2013-11-27.
- [299] BRAJER, J.: *Presentation of technological possibilities RCMT*, [Nepublikovaná přednáška], Honeywell Aerospace Olomouc s.r.o., Brno, 2014-09-25.
- [300] BRAJER, J.: *3D tiskárny – aditivní výroba*, [Nepublikovaná přednáška], Svaz strojírenské technologie, Strojírny ŽĎAS, Žďár nad Sázavou, 2014-11-20.
- [301] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R.: *Residual stress measurement Laser applications at CTU and HiLASE centre* [Nepublikovaná přednáška], Technical University of Madrid, Spain, 2014-12-18.
- [302] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R.: *Laser applications at CTU and HiLASE centre* [Nepublikovaná přednáška], University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 2015-04-20.



- [303] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R.: *Residual stress measurement* [Nepublikovaná přednáška], CSIR - Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa, 2015-04-22.
- [304] BRAJER, J., ROSTOHAR, D., ŠVÁBEK, R.: *Laser applications at HiLASE centre* [Nepublikovaná přednáška], University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio, United states of America, 2015-04-22.
- [305] BRAJER, J., KAUFMAN, J. Laser shock processing of materials for nuclear industry. *The 1st Annual HiLASE Workshop* [Nepublikovaná přednáška], October 10 – 12, 2016 in Stirin, Central Bohemia Czech Republic
- [306] BRAJER, J., KAUFMAN, J. Application of Laser Shock Processing on new field of production. *The 2st HiLASE Workshop* [Nepublikovaná přednáška], October 24 – 26, 2017 in Stirin, Central Bohemia Czech Republic
- [307] BRAJER, J., ROSTOHAR, D.: *Validation of post-process characterization methods for Laser Shock Peened Materials* [Nepublikovaná přednáška], University of Modena, Modena, Italy, 2017-09-12. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065927
- [308] BRAJER, J., ROSTOHAR, D.: Development and Status of Laser Shock Peening Station at HiLASE Facility [Nepublikovaná přednáška], *OSA Laser Congress*, Nagoya, Japan, 2017-10-03.
- [309] BRAJER, J., ŽÁKOVÁ, M. Aplikace laserů ve všedním i nevšedním životě. Týden vědy a techniky, 2017 Akademi Věd, Národní [cit. 2017-11-07]. Dostupné z <https://youtu.be/IVzxxSn1YQY>

## 9.6 Oponentní posudky a vedení prací

V letech 2012 – 2018 bylo provedeno 9 oponentních posudků diplomových a bakalářských prací pro Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie a Ústav výrobních strojů a zařízení FS - ČVUT v Praze.

V letech 2012 – 2017 bylo vedeno celkem 6 prací na pozici jak konzultanta tak vedoucího B/D práce v oblasti laserových technologií.





## **10 Přílohy**

- 10.1.1 **Výsledky měření zbytkových napětí rentgenovou difrakční tenzometrií**
- 10.1.2 **Výsledky měření zbytkových napětí metodou odvrtávání**
- 10.1.3 **Výsledky měření zbytkových napětí metodou odleptávání**
- 10.1.4 **Výsledky měření tvrdosti**
- 10.1.5 **Model výpočtu zbytkových napětí po rázové vlně vyvolené LSP**
- 10.1.6 **Application of laser shock processing**
- 10.1.7 **Development of experimental station for laser shock peening at HiLASE**
- 10.1.8 **HiLASE center: Development of Laser Shock Processing facility and validation of post-processing characterization methods**
- 10.1.9 **Validation of post-process characterization methods for Laser Shock Peened Materials**