

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV *Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie*

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

*Vliv metody laser shock processing na integritu  
povrchu*

*Ing. Jan Brajer*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: *Strojírenská technologie*

Školitel: *prof. Ing. Jan Mádl, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."



Název anglicky: *Effect of laser shock processing technology on surface integrity*

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu *Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie* Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Jan Brajer*

*Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice*

Školitel: *prof. Ing. Jan Mádl, CSc.*

*Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice*

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

*Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice*

Oponenti:

prof. Dr. Ing. Ivan Mrkvica

prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

prof. Ing. Andrej Czán, PhD.

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru *Strojírenská technologie*.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

předseda oborové rady oboru *Strojírenská technologie*

Fakulta strojní ČVUT v Praze



# Obsah

1	Současný stav problematiky .....	3
1.1	Význam integrity povrchu .....	4
1.2	Technologie laser shock peening.....	5
1.3	Metody teoretického určení zbytkových napětí.....	6
1.4	Ekonomické zhodnocení technologie LSP a metod měření .....	7
2	Cíle disertační práce .....	8
3	Metody zpracování .....	9
3.1	Ověření cílů .....	9
3.2	Výpočetní model zbytkových napětí .....	10
3.2.1	Modelace tlaku vyvolaného plazmatem .....	12
3.2.2	Modelace šíření tlaku materiálem.....	13
3.2.3	Modelace výsledných vlastností materiálu .....	16
4	Výsledky .....	19
4.1	Diskuze k tenzometrickým analytickým metodám.....	19
4.2	Porovnání výpočetního modelu a měření zbytkových napětí .....	21
4.3	Využitelnost predikce vlastností povrchu.....	22
4.4	Ekonomické hodnocení použitých metod měření.....	29
4.5	Ekonomické hodnocení technologie LSP.....	25
5	Závěr .....	31
5.1	Splnění cílů disertační práce.....	31
5.2	Shrnutí teoretické části .....	31
5.3	Rozbor výsledků měření.....	32
5.4	Ekonomické hodnocení .....	33
5.5	Ekonomické hodnocení LSP .....	33
5.6	Ekonomické hodnocení měření zbytkových napětí .....	34
5.7	Určení vhodné metody měření zbytkového napětí .....	35
5.8	Výstavba vlastní LSP stanice .....	36
6	Použitá literatura .....	37
6.1	Publikace autora související s tématem disertace.....	37
6.2	Seznam použité literatury v tezích .....	38





# 1 Současný stav problematiky

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[13][14]. 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 [14][16][17][18], 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[19][20][21].

Právě technologie LSP umožňuje velmi rovnoměrné zvýšení tlakových napětí v povrchu součástí, které má za následek zvýšení životnosti součástí. 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 [2], dá se tedy předpokládat, že tento nárůst se projeví v produktivitě technologie a tím i v možnostech jejího použití [7].

S ovlivněním povrchových vlastností je spojena jejich validace, která je obzvláště pro letecký průmysl žádaná [20][21]. 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 měřících 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 zpevnování, bude mít výrazně odlišné důsledky na vlastnosti vrstvy a její homogenitu [6]. Z tohoto důvodu je velmi výhodná příprava metodiky měření a volba nevhodnějších technik pro technologii LSP za použití velkých výkonů. S dosaženými vlastnostmi úzce souvisí i ekonomická výhodnost použité technologie [7]. 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 [2].

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, úchytky tvaru a rozměru) tak musí odpovídat provozním podmínkám, pro zajištění bezproblémového provozu opracovaných součástí.

## 1.1 Význam integrity povrchu

Pro soubor vlastností povrchové vrstvy se používá termín „integrita povrchu“. Povrch se definuje jako geometrická entita povrchu a povrchová vrstva [23][24]. 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 [25][26][27].

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 [28]. Dále jsou definovány tzv. minimální a standardní soubory dat. Jako nejvýznamnější a nejčastěji analyzované faktory, které charakterizují integritu povrchu po obrábění, jsou geometrie obrobeneho povrchu a stupeň a hloubka zpevnění. [29] 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 [29][27].

Sledováním závislosti provozních vlastností součástí na integritě povrchu je umožněno optimalizovat způsoby výroby z hlediska požadované spolehlivosti

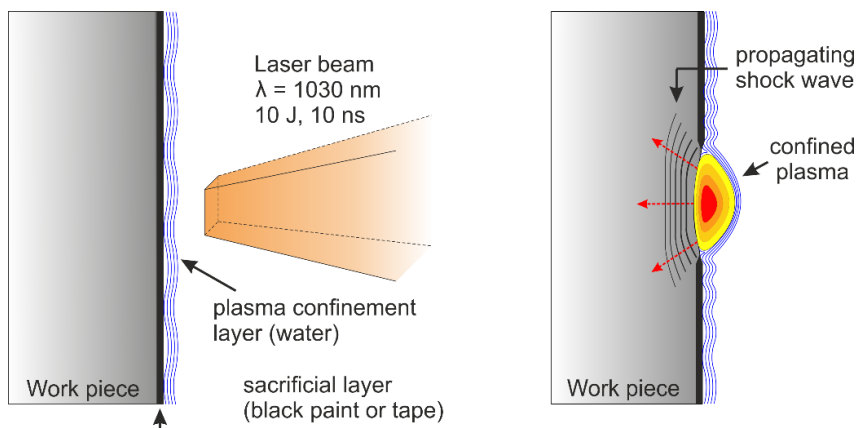
a životnosti [23]. Široký soubor experimentálních dat může napomoci zjištění o vlivu technologických procesů na integritu povrchu [22]. Finální vlastnosti součásti jsou významně ovlivňovány vlastnostmi povrchových a podpovrchových vrstev. Objem lomů při provozu součásti v současnosti tvoří více než z 90% únavové poškození. Toto poškození má v naprosté většině případů iniciační místo na povrchu součásti [22][30][31].

## 1.2 Technologie laser shock peening

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 součásti. Další skupinou je technologie Laser shock bending jejíž základem je ohýbání materiálu stejně jako je tomu při použití mechanických metod. Podlejší 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.

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.

LSP je mechanický proces (tváření za studena), při kterém impulsy laseru o vysoké energii naráží na povrch a tím jsou generovány rázové vlny [19][20][35][36]. Tyto vlny plasticky deformují povrch a tlaková napětí jsou přenášena do vrstev pod povrchem [37][38][39][40]. Toto dynamické napětí je nejvyšší na povrchu zpracovávané součásti a snižuje se směrem do materiálu (Obrázek 1) [41].



Obrázek 1 Princip technologie LSP

První experimenty využití pulsního laseru na povrch materiálu byly provedeny na Battelle institutu (Columbus, OH, USA) roku 1968 [19][20]. Do roku 1981 pak byly provedeny výzkumné práce na hliníkových slitinách a ocelích pro letecké aplikace [20]. 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 [19].

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 [19][20][21][33][34].

### 1.3 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 [42]. 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 [44]. 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 [42][44][45].

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 [42][43][45].

V případě LSP jsou laserové pulzy 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 součástí, 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[45].

## **1.4 Ekonomické zhodnocení technologie LSP a metod měření**

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.

## **2 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 Metody zpracování**

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).

#### **3.1 Ověření 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 vhodné 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 vysvětlovat jednotlivé vlivy parametrů technologie konečným uživatelům.

### **3.2 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 měřeními.

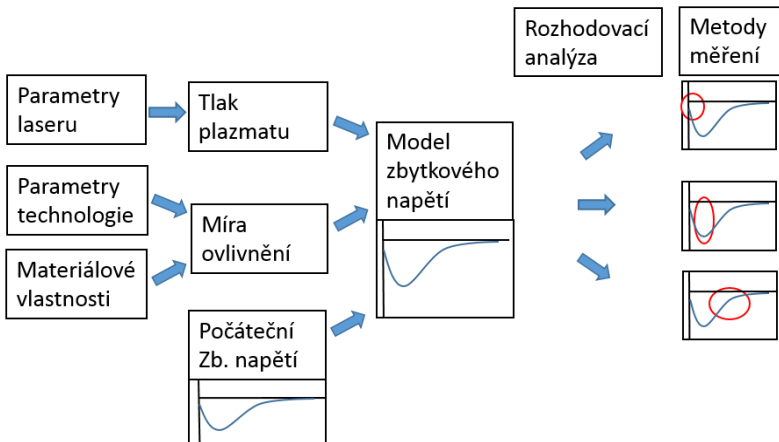
V případě navržené metodiky v této práci se ovšem jedná o základní, ale zpracovanou a ucelenou rozhodovací analýzu pro volbu vhodné metodiky



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 drtivě 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 zvěšující 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 [7].



Obrázek 2 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 médium

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[1].

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 délkou laseru, mez pevnosti, modul pružnosti nebo i rychlost zvuku v materiálu určují chování materiálu při zasažení rázovou vlnou (Obrázek 2). 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[1][3][11].

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[11].

### 3.2.1 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 (3.1). Ostatní parametry jsou absorpce energie laseru, jak je uvedeno v rovnici (3.2), zatížení nebo tlak (P), který musí být větší než dynamická mez kluzu pro zaručení plastické deformace,

Intenzita [37]:

$$(3.1) \quad I \left( \frac{GW}{cm^2} \right) = \frac{P_{avg}}{f (pt) a}$$

kde,  $I$  je hustota výkonu laseru v  $\text{GW} / \text{cm}^2$ ,  $P_{avg}$  je průměrný výstupní výkon ve  $\text{W}$ ,  $f$  je laserová frekvence v  $\text{Hz}$ ,  $pt$  je doba impulsu v  $\text{ns}$ , a je laserová stopa plocha v  $\text{cm}^2$ . Fluence laseru [37]:

$$(3.2) \quad \text{Fluence} \left( \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{\text{Laser pulse energy (J)}}{\text{focal spot area (cm}^2\text{)}}$$

Rovnice (3.3) obsahuje konstanty na základě experimentálních pozorování. Velká rozmanitost konstant je přičítána typu ablační vrstvy [20], příkrývacího média [48]

a vlastností cílového materiálu [49][50]. Tento model je popisován dle rovnice (3.3). Tlak na povrchu materiálu [20][47][48][49][50][51]:

$$(3.3) \quad P(\text{GPa}) = 0.01 \left( \frac{\alpha}{2\alpha + 3} \right)^{1/2} Z^{1/2} I^{1/2}$$

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

Rovnice (3.4) 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]:

$$(3.4) \quad \frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$$

Hugoniot Elastický Limit (*HEL*) [50]:

$$(3.5) \quad \text{HEL} = \frac{1 - \theta}{1 - 2\theta} \sigma_y^{\text{dyn}}$$

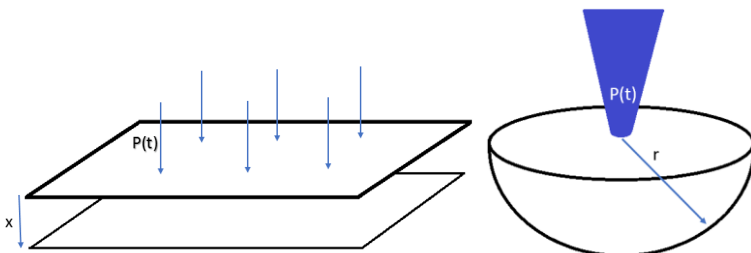
Rovnice (3.5) ukazuje mez pružnosti (*HEL*), neboli nejvyšší napětí, které materiál může vydržet v tlaku, aniž by došlo k jeho plastické deformaci.

### 3.2.2 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 (3.11).

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 3) [52][11].



Obrázek 3 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

$$(3.6) \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad u = u(r, t) \text{ pro poloprostor [52]}$$

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

$$(3.7) \quad \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial U(r, \omega)}{\partial r} \right) = -\frac{\omega^2}{c^2} U$$

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

$$(3.8) \quad U(r, \omega) = \frac{C1(t) e^{\frac{irv}{c}}}{r} + \frac{CR(t) e^{\frac{ir\omega}{c}} e^{-\frac{2ir\omega}{c}}}{2r\omega} i$$

Vztah mezi deformací a napětím je daný rovnicí:

$$(3.9) \quad \tau(r, t) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial \omega}{\partial r} [52]$$

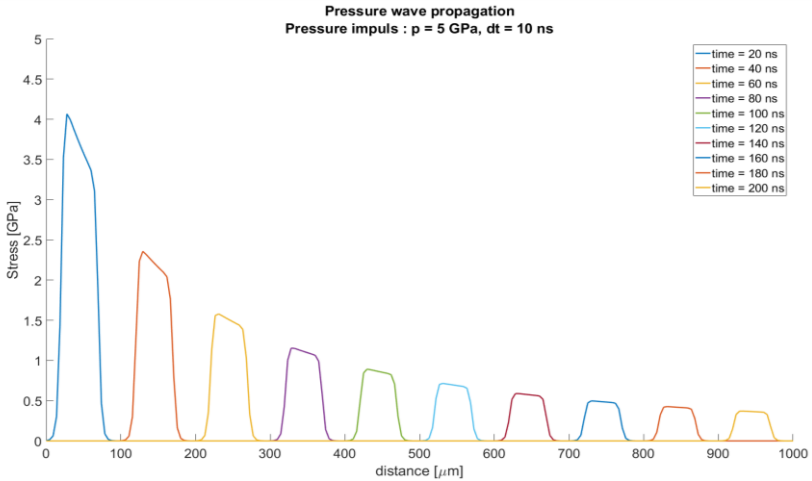
S okrajovou podmínkou:

$$(3.10) \quad \tau(0, t) = -p(t) [52]$$

Dosazením inverzní Fourierovi transformace rovnice (3.8) do rovnice (3.9) a využitím okrajové podmínky (3.10) lze napětí vyjádřit ve tvaru [52][11]:

$$(3.11) \quad \tau(r, t) = D \frac{p\left(\frac{t-r}{c}\right)}{r^2}$$

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 následně 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 4). Tyto parametry odpovídají procesním parametrům zpracování titanových slitin při použití laseru Bivoj ve výzkumném centru HiLASE v Dolních Břežanech [7][11].



Obrázek 4 Závislost velikosti napětí procházející materiálem na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns [11].

### 3.2.3 Modelace výsledných vlastností materiálu

Pro provoz součásti 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.

$$(3.12) \quad \tau_z = \tau'$$

Z rovnice (4.11) tedy plyne:

$$(3.13) \quad \tau_z(x, t) = -pD \frac{\frac{x}{c} + \frac{2}{3} \left( t - \frac{x}{c} \right)}{\frac{5}{x^2}}$$

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 5):

$$(3.14) \quad L = \frac{C_{el} C_{pl} \tau}{C_{el} - C_{pl}} \left[ \frac{P - (\sigma_Y - \sigma_0)(1 + \lambda/2\mu)}{2\sigma_Y(1 + \lambda/2\mu)} \right] [63]$$

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

V elasticoplastickém poloprostoru je hodnota zbytkového napětí v lineární části.

$$(3.15) \quad \sigma_{res} = \sigma_0 + \mu \varepsilon^p \left( \frac{1+\nu}{1-\nu} \right) \left[ 1 - \frac{4(2)^{1/2}}{\pi} (1+\nu) \frac{L}{a} \right] [63]$$

kde  $\nu$  je Poissonůvo číslo materiálu a veličina  $a$  je velikost čtvercové plochy pod laserem.

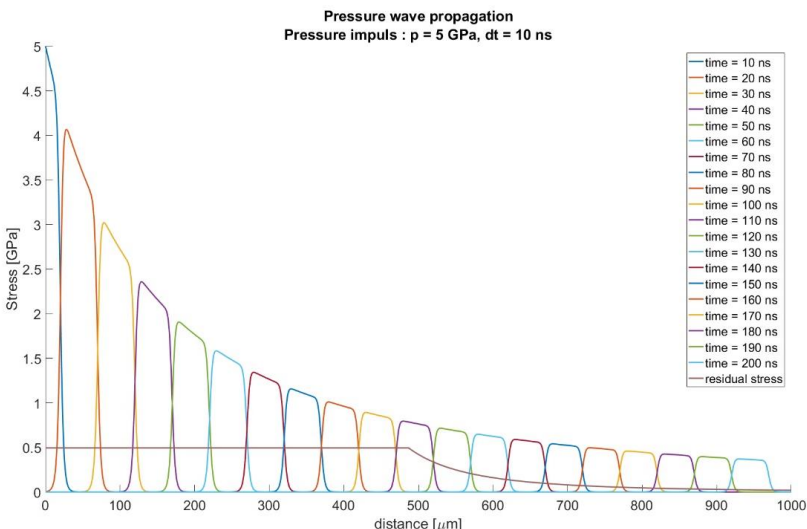
Veličina maximálního zbytkového napětí odpovídá počátečnímu tlaku 5 GPa, který je také znázorněn (Obrázek 5).

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 dosazení hodnot vlastností materiálu procesních parametrů, je získána závislost zbytkového napětí na posuzované hloubce (Obrázek 5).

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 [61].

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 nejdelší u většiny povrchů zpracovaných technologiemi pro zlepšení únavových vlastností.



*Obrázek 5 Závislost velikosti napětí procházející materiálem a zbytkového napětí na vzdálenosti od povrchu při povrchovém tlaku 5 GPa a délce pulzu 10 ns[11].*

Všechny tři oblasti přispívají tlakovým napětí 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 oblasti 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) [8][11].



## 4 Výsledky

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.

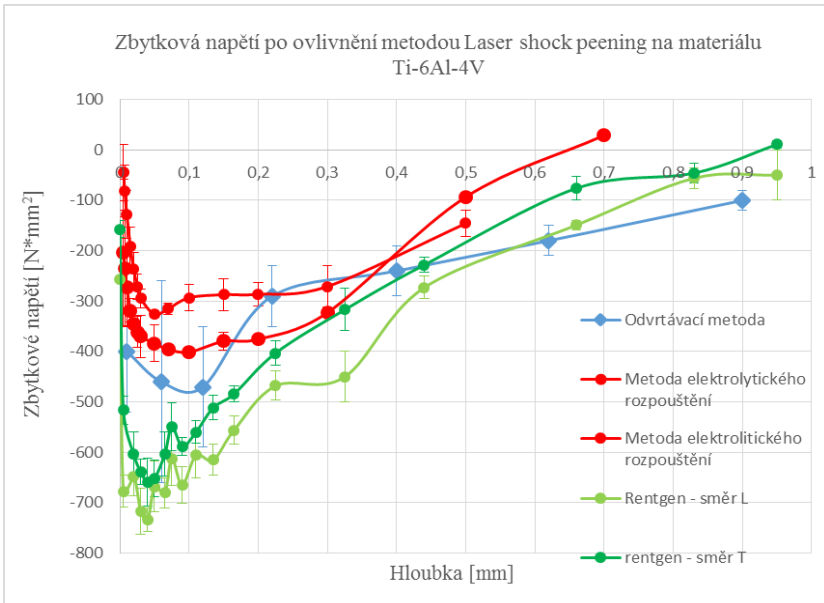
Navržená metodika výběru měřicí metody má za následek zkrácení času prototypové výroby při hledání vhodných parametrů ovlivnění. Může mít také zásadní vliv při validaci vyráběného prototypového dílce nebo menší série. U malosériové nebo kusové výroby (hledání vhodných parametrů technologie pro materiál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

### 4.1 Diskuze k tenzometrickým analytickým metodám

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

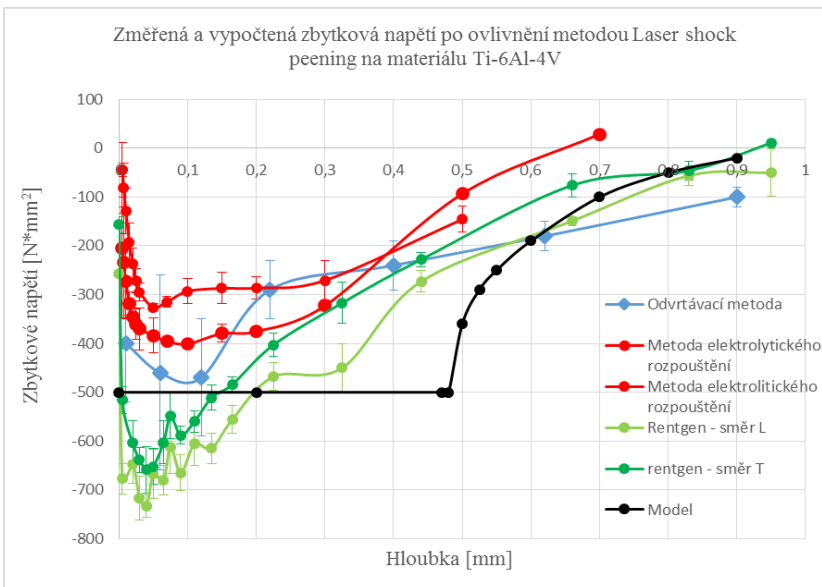
Porovnání metod je znázorněno v grafu závislosti zbytkového napětí na hloubce ovlivnění (Obrázek 6). Je vidět podobný trend, kde v povrchové vrstvě dochází u všech metod k zachycení prudkého nárůstu tlakového zbytkového napětí. Tento nárůst je zcela v souladu s literaturou, kde LSPwC (bez ablační vrstvy) dosahuje zbytkových napětí na povrchu blízkých nule a postupně směrem do materiálu dosahuje maximální hodnoty [59][62].

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. Všechny 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.

## 4.2 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 z různých metod měření (Obrázek 7).



Obrázek 7 Porovnání změřeného a vypočteného zbytkového napětí po ovlivnění metodou Laser shock peening na materiálu Ti-6Al-4V (5000 pulzů/cm<sup>2</sup>)[6]

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 [60][61]. Technologii je výhodné používat za použití ablační vrstvy, která zabrání nežádoucímu tepelnému efektu laseru. Součástí ovlivněné technologie 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 [59][62][6].

V hloubce větší než 50  $\mu\text{m}$  lze předpokládat lineární průběh zbytkového napětí [59]. 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 způsoben 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 [6].

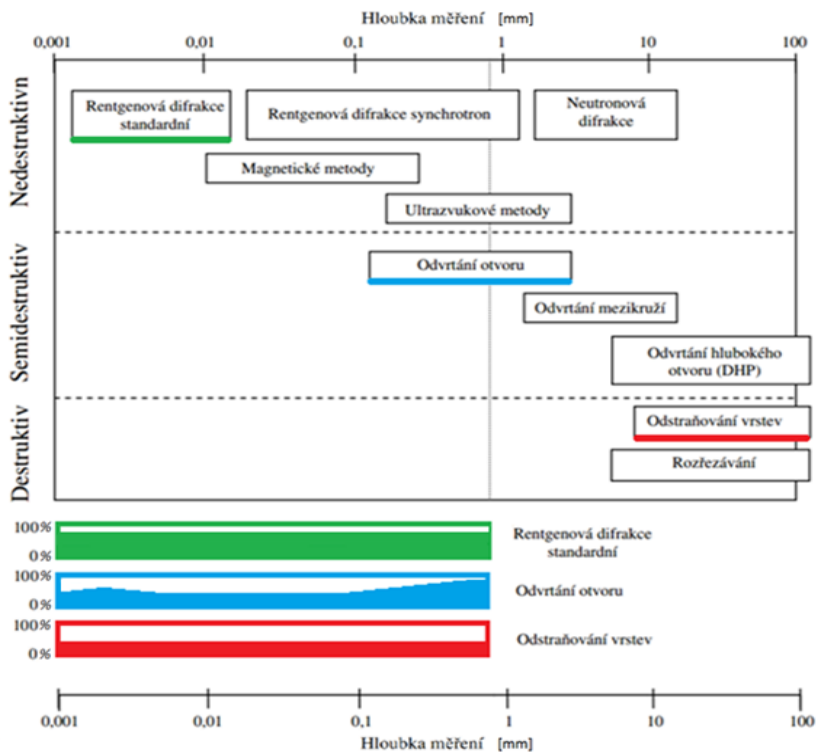
Velikost zbytkového napětí vypočteného modelem odpovídá měření v oblasti největší velikosti zbytkového napětí (pod povrchem) a v oblasti hluboko pod povrchem kde se napětí blíží k nule. Hodnoty maximální hloubky ovlivnění a maximální velikosti zbytkového napětí jsou nejdůležitější i z ohledu odolnosti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

### **4.3 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 v měřené oblasti [11].

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[11][53].

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 8).

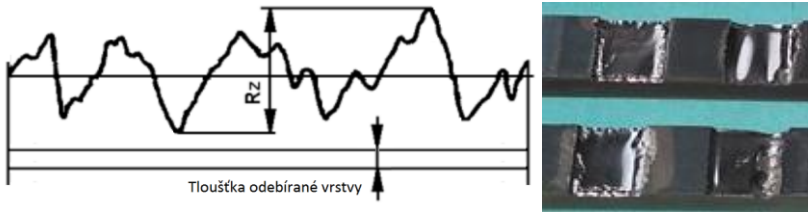


Obrázek 8 Použitelná hloubka měření jednotlivými metodami pro zjišťování zbytkových napětí.

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 [8][53].

Metoda odvrtávání je těsně pod povrchem (0,1 mm) materiálu 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) [8][53].

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 nestejnorodým úběrem materiálu. Díky těmto jevům může být nesprávně určena i hloubka vrstvy kde přechází tlakové napětí do tahového.



*Obrázek 9 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 dvojnásobná, 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 případů 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 součástí, 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.

#### 4.4 Ekonomické hodnocení 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.

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 chladicí 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.

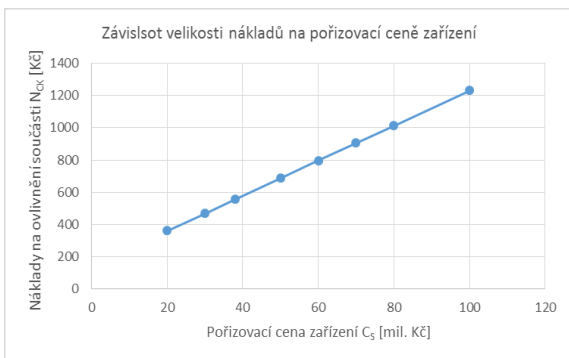
Ostatní ekonomické aspekty technologie jsou odhadovány podle podobných laserových procesů. Ostatní fixní náklady jsou rozpočítány na náklady na prostory, údržbu a pojištění. Náklady na prostory se mohou velmi lišit, v našem případě je počítáno s 500 tisíc Kč za rok. Náklady na údržbu dosahují 250 tisíc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

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>.

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 potencionálního 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 10 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na pořizovací ceně zařízení*

Závislost nákladů na ovlivnění příkladového výrobku na pořizovací ceně zařízení lineárně stoupá (Obrázek 11). 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.

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





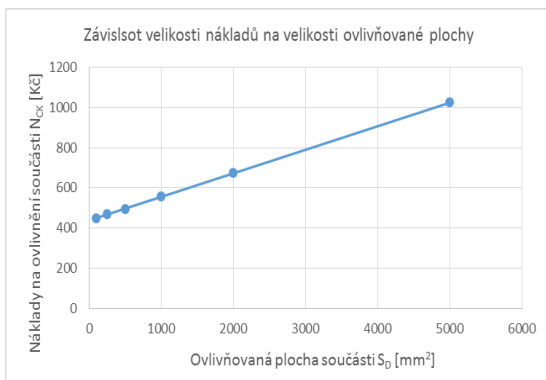
Obrázek 11 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na době výměny součásti na stroji

Závislost nákladů na ovlivnění součásti na technologickém parametru překryvu jednotlivých stop má exponenciální charakter (Obrázek 12). Při velmi vysokém překryvu (nad 90 %) stoupají výrazně náklady na ovlivnění součásti. Při malém překryvu je vliv tohoto parametru nevýrazný a náklady na tuto technologii jsou závislé na jiných faktorech.



Obrázek 12 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na překryvu jednotlivých stop laseru

Náklady na ovlivnění plochy mají lineární průběh (Obrázek 13). 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 13 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění výrobku na velikosti ovlivňované plochy

Náklady na ovlivnění  $1 \text{ mm}^2$  jsou tedy velmi silně závislé na celkové ploše ovlivnění (Obrázek 14). Pro malé plochy dosahují náklady na ovlivnění několika korun na  $1 \text{ mm}^2$ . Při ovlivňování velkých ploch jsou náklady na ovlivnění  $1 \text{ mm}^2$  desetiny koruny.



Obrázek 14 Závislost velikosti nákladů na ovlivnění  $1 \text{ mm}^2$  na velikosti ovlivňované plochy

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

## 4.5 Ekonomické hodnocení použitých metod měření

Cena měření a archivování hodnot ovlivnění zvyšuje výslednou cenu výroby. Ekonomická analýza ceny technologie LSP nepočítá s náklady na měření. 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 elektrolytického 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.

Tab. 1 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 vztaheny 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.

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 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 provedené práci na tomto tématu bylo možné vybudování vlastní laboratoře pro ovlivnění metodou LSP.

### **5.1 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 výsledků 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.

### **5.2 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.

### 5.3 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 [1]. 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 [1][2]. 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 [1][2].

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 [3].

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 [8].

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 [8][11].

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 napětí přibližně v 0,65 mm z důvodu nižší počáteční hodnoty zbytkového napětí. Metodou rentgenové difrakce bylo změřeno protnutí 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 [11][8].

## **5.4 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.

## **5.5 Ekonomické hodnocení technologie 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 [9].

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 zpravování drážky pro stavěcí šroub v ložiskách používaných v letadlech [54][55].

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

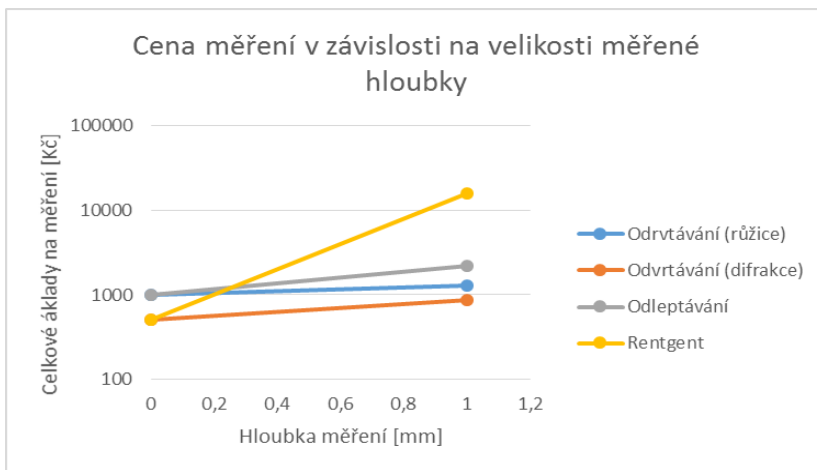
a přípravných časů [9][56][57][58]. V příkladu je počítáno s plochou ovlivnění na součást 1000 mm<sup>2</sup>/ks v dávce 1000 kusů. Náklady na ovlivnění pak dosahují pro modelový stroj, produktivitu a výsledek 555 Kč na ovlivněný dílec [9][56].

## 5.6 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.

Na logaritmické stupnici celkových nákladů je zřetelné, že měření rentgenem je velmi drahou metodou zjišťování zbytkových napětí ve velkých hloubkách. Oproti tomu metoda odvrťování je málo citlivá na hloubku měření (Obrázek 15). Metoda odvrťování 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 odvrťování, 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 [9].





Obrázek 15 Ekonomické zhodnocení použitých metod měření zbytkového napětí

## 5.7 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 15). 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[8][11].

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 použit 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.

## 5.8 Výstavba vlastní LSP stanice

Kromě návrhu modelu, ovlivnění vzorků a změření jejich vlastností vznikla LSP stanice vhodná pro ovlivňování vzorků za pomoci velkého výkonu laseru (Obrázek 16) [10]. Stanice vznikla na základě zkušeností z krátkodobých stáží v laboratořích zabývajících se ovlivňováním metodou LSP. 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 [10]



Obrázek 16 LSP stanice v Dolních březanech v centru HiLASE [10]

## 6 Použitá literatura

### 6.1 Publikace autora související s tématem disertace

- [1] MÁCA, 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.
- [2] 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
- [3] 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
- [4] BRAJER, J. *Application of laser shock peening*, Student conference, Vedoucí práce prof. Ing. Jan Mádl, CSc., Technická univerzita Krakow, Polsko, 2014
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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>
- [10] ROSTOHAR, D., BÖHM, M., BRAJER, J., KAUFMAN, J., ZULÍČ, 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

- [11] 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

## 6.2 Seznam použité literatury v tezích

- [12] 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.
- [13] 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..
- [14] 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.
- [15] FAIRAND, B. P., CLAUER, A. H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials. *J. Appl. Phys.* 1979, 50, 1497–1502.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] PEYRE, P., FABBARO, R. Laser shock processing: A review of the physics and applications. *Opt. Quant. Electron.* 1995, 27, 1213–1229.
- [21] 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.
- [22] KOLAŘÍK, K. *Difrakční studium fyzikálních technologií obrábění ocelí* [Disertační práce]. Praha: ČVUT Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2010. 140 s.
- [23] 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.

- [24] MÁDL, J., AJ. Technologie obrábění - 1., 2., 3. díl. Praha. Vydavatelství ČVUT 2000. 3. sv. 246 s. ISBN 80-01-02091-6.
- [25] TURKOVICH, B. F. – FIELD, M. Survey on material behaviour in machining. *Anal. of the CIRP*, 1981, vol. 30, no. 2, p. 533 – 540.
- [26] 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.
- [27] NECKÁŘ, F., KVASNIČKA, I. Vybrané statě z úběru materiálu. *Fakulta strojní, ČVUT Praha*, 1991. ISBN 80-01-00696-4.
- [28] 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.
- [29] MÁDL, J. Integrita povrchu po obrábění. *Manufacturing Engineering - Výrobné inženýrstvo*. Roč. 6, 2008, č. 2. s. 17 – 20. ISSN 1335-7972.
- [30] SALLMAN, R. E. *Moderní nauka o kovech*. 1 vyd., Praha: SNTL 1964. 317 s.
- [31] 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)
- [32] 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/>
- [33] PEYRE, R., SCHERPEREEL, P., BERTHE, X., FABBRO, L. Current trends in laser shock processing. *Surf. Eng.* 1998, 14, 377–380.
- [34] CLAUER, A. A historical perspective on laser shock peening. *Met. Finish. News* 2009, 10, 5–6.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] BRAR, N. S., HOPKINS, A., LABER, M. W. Laser shock peening of titanium 6–4 alloy. *AIP Conf. Proc.* 2000, 505, 435–438.
- [39] 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.

- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] BROŽOVSKÝ, J., MATERNA, A.: *Metoda konečných prvků*, [cit. 2016-10-04]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/brozovsky/mkp.html>
- [43] 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
- [44] MILAN, R. *Únavová pevnost a pevnost a životnost ivotnost - výpočtové metody* [online]. [cit. 2017-03-13]. Dostupné z <http://oprلز.lss.fd.cvut.cz/dokumenty/070309UnavovaPevnostAZivotnost.pdf>
- [45] 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)
- [46] 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
- [47] 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.
- [48] HONG, Z., CHENGYE, Y. Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 1998, 257, 322–327.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] J. D. ACHENBACH., *Wave Propagation in Elastic Solids: North-Holland Series in Applied Mathematics and Mechanics*, Elsevier, 2016, ISBN 1483163733, s. 440

- [53] 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
- [54] 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/>
- [55] 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.
- [56] BRAJER, J., ŠVÁBEK, R.: *Residual stress measurement* [Nepublikovaná přednáška], CSIR - Council for Scientific and Industrial Research, Pretoria, South Africa, 2015-04-22.
- [57] 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.
- [58] 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
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.

## **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 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 dopsud.

## **Summary**

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.



