ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústavu technologie obrábění, projektování a metrologie

Bakalářská práce

Analýza vlastností povrchů zpracovaných laserem

Jan Štros

Vedoucí práce: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Studijní program: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Obor: Výroba a ekonomika ve strojírenství

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štros** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **438582**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**

Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza vlastností povrchů zpracovaných laserem

Název bakalářské práce anglicky:

An analysis of surfaces processed by a laser beam

Pokyny pro vypracování:

1. Přehled metod laserového zpracování s ovlivněním vlastností povrchu materiálu
2. Popis ovlivnitelných materiálových charakteristik a jejich chování
3. Metody pro vyhodnocení vybraných materiálových vlastností
4. Dílčí experimenty měření ovlivnění povrchu materiálu

Seznam doporučené literatury:

Doporučená literatura

[1] Barcal J.: Nekonvenční metody obrábění. Vydavatelství ČVUT, skripta ČVUT, Praha 1989
[2] MADL, 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
[3] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) ? Struktura povrchu. Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
Další dílčí vědecké články na vyžádání u vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce | Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

.27.4.2017

Datum převzetí zadání | Podpis studenta

CVUT-CZ-ZBP-2015.1

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za použití podkladů uvedených v přiloženém seznamu citované literatury.

V ……. Dne ……

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D za vedení této práce, jeho ochotu a pomoc při jejím vypracování. Zároveň bych také chtěl poděkovat svým rodičům za jejich trpělivost a podporu při studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá zpracováním povrchu pomocí laseru a následným zbytkovým napětím, vyvolaným tímto zpracováním. Cílem práce bylo zjištění vlivu metody Laser Shock Peening (LSP) na zbytková napětí v povrchové vrstvě materiálu metodou odvrtávání, pomocí systémů RESTAN MST3000 a PRISM, následné vyhodnocení získaných dat, porovnání obou systémů a určení, který z použitých systémů je vhodnější pro naše využití. Laser shock peening je progresivní metodou vytvrzování povrchové vrstvy materiálu, která umožňuje výrazné zvýšení únavové životnosti cyklicky namáhaných součástí. Testování bylo provedeno na vzorcích z titanové slitiny Ti6-Al4-V.

Klíčová slova

Laser Shock Peening, odvrtávací metoda, zbytková napětí

Abstract

This bachelor thesis deals with surface treatment with laser and consequent residual stress caused by this processing. The aim of the work was to determine the effect of Laser Shock Peening (LSP) on the residual stresses in the surface layer of the material by means of drilling, RESTAN MST3000 and PRISM systems, to evaluate the obtained data, to compare both systems and to determine which of the systems used is more suitable for our use. Laser shock peening is a progressive method of curing the surface layer of the material, which allows a significant increase in fatigue life of cyclically stressed components. Testing was carried out on titanium Ti6-Al4-V titanium alloys.

Keywords

Laser Shock Peening, hole drilling method, residual stresses

Obsah

1 Úvod ... 13

2 Zpracování povrchu laserem ... 14

2.1 Princip laseru ... 14

2.2 Interakce laserového svazku s materiálem ... 16

2.3 Druhy laserů ... 17

2.4 Laserové technologie úpravy povrchu ... 18

2.4.1 Texturování laserem ... 19

2.4.2 Popisování laserem ... 20

2.4.3 Tepelné zpracování (laserové kalení) ... 21

2.4.4 Laser Shock Peening ... 22

3 Zbytková napětí ... 24

3.1 Význam zbytkových napětí v povrchu materiálu ... 24

3.2 Metody měření zbytkových napětí ... 24

3.2.1 Odvrtávací metoda ... 25

3.2.2 Rentgenová metoda ... 27

3.2.3 Metoda odleptávání ... 28

3.2.4 Ostatní metody ... 29

4 Experimentální část ... 31

4.1 Zkoumaný materiál Ti-6Al-4V ... 31

4.2 Parametry použitých vzorků ... 32

4.3 Měření pomocí systému MST3000 - RESTAN ... 33

4.3.1 Princip měření systémem RESTAN ... 35

4.3.2 Parametry měření ... 37

4.4 Měření pomocí systému PRISM ... 38

4.4.1 Princip metody ESPI ... 38

4.4.2 Parametry měření ... 40

4.5 Vyhodnocení výsledků ... 41

4.6 Porovnání obou systémů z ekonomického hlediska ... 43

5 Závěr ... 45

6 Přílohy 46

7 Citovaná literatura 46

Seznam obrázků

Obr. 1 Proces stimulované emise v aktivním prostředí [2] *16*
Obr. 2 Absorpce paprsku různé vlnové délky pro základní kovové materiály [4] *17*
Obr. 3 Princip Nd:YAG laseru [2] *18*
Obr. 4 Příklad popisování laserem do dřeva *20*
Obr. 5 Porovnání metody kuličkování a LSP [13] *23*
Obr. 6 Princip měření zbytkových napětí odvrtávací metodou [17] *26*
Obr. 7 Princip měření zbytkových napětí metodou odleptávání [20] *28*
Obr. 8 Metody měření zbytkových napětí a jejich rozdělení [20] *30*
Obr. 9 Mechanické vlastnosti vybraných slitin titanu *32*
Obr. 10 Schéma experimentálního set-upu pro LSP *33*
Obr. 11 Systém RESTAN MST3000 [23] *34*
Obr. 12 Specifikace systému RESTAN MST3000 [24] *35*
Obr. 13 Systém Restan MST3000 s připravenou frézou [24] *36*
Obr. 14 Kompletní řetězec měření [24] *37*
Obr. 15 Zkoumané vzorky 1A (vlevo) a 2A (vpravo) *38*
Obr. 16 Schéma systému PRISM [26] *39*
Obr. 17 Odvrtávací systém PRISM pro měření zbytkových napětí [27] *40*
Obr. 18 Testovaný vzorek 1 ..... *41*
Obr. 19 Graf č. 1 znázorňující průběh S_{max} *42*
Obr. 20 Graf č. 2 znázorňující průběh S_{min} *42*
Obr. 21 Graf č. 3 zobrazující porovnání napětí na ploše ovlivněné a neovlivněné pomocí LSP *43*
Obr. 22 Graf č. 4 určení mezní dávky *44*

1 Úvod

S rostoucím technologickým pokrokem se neustále zvyšují nároky na výrobní procesy, technologie a také na výsledné vlastnosti používaných materiálů. Díky tomu se v posledních letech velmi rozšířilo využití laserových technologií. Ty nabízejí výbornou kvalitu, možnost vysoké míry automatizace, velmi dobrou opakovatelnost a ve většině případů také vysokou procesní rychlost. Všechny tyto aspekty v poslední době převažují nevýhodu vysokých pořizovacích nákladů a laserové technologie nacházejí uplatnění tam, kde dosud dominovaly konvenční technologie.

Čím dál častěji je nutné upravovat povrch součásti pro splnění vysokých nároků, které jsou kladeny na správnou funkci dílce. Jednou z možností pro dosažení správné funkčnosti povrchu je použití právě laserové úpravy. Mezi nejběžnější metody úpravy povrchu laserem patří povrchové kalení, texturování, leštění nebo vytvrzování. Jednou z pokročilých technologií použití laserů je Laser Shock Peening (LSP). Tato metoda je progresivní alternativou kuličkování a využívá se především k vytvrzování povrchové vrstvy materiálu a prodloužení životnosti vysoce cyklicky namáhaných součástí. Touto technologií se zabývá Fyzikální Ústav Akademie věd ČR, pod jehož záštitou bylo vybudováno supermoderní centrum laserových technologií HiLASE v Dolních Břežanech. Tato práce byla vypracována na základě dat získaných v centru HiLASE ve spolupráci s výzkumným centrem pro strojírenskou a výrobní techniku fakulty strojní ČVUT.

Cílem této práce bylo zjistit zbytková napětí v materiálu vyvolaná metodou LSP a porovnání dvou systémů (RESTAN MST3000 a PRISM) pro měření těchto napětí. V návaznosti na tento cíl bylo nutné provést měření oběma systémy a následně porovnat získané hodnoty mezi sebou a také s hodnotami získanými měřením na neovlivněné části povrchu materiálu. Vzájemné porovnání mezi jednotlivými metodami, jejich přesností, pořizovacími náklady, náklady na měření a uživatelskou přívětivostí, povede k doporučení pořízení vhodného měřicího zařízení.

2 Zpracování povrchu laserem

Díky schopnosti laserového svazku být soustřeďován na velmi malý průměr je laser zdrojem záření s vysokou plošnou hustotou výkonu. Interakce tohoto záření s látkou se začalo využívat již v druhé polovině šedesátých let, tedy krátce po sestrojení vůbec prvního laseru. Laserové technologie povrchového zpracování využívají energie laseru k modifikaci povrchové struktury materiálu. Charakter laserového záření spolu s dalšími parametry je rozhodující pro výsledný efekt. Laserovým paprskem lze povrch prudce zahřát, přičemž rychlý odvod tepla do okolního materiálu způsobí jeho zakalení v tenké povrchové vrstvě. Větší vnesená energie může způsobit natavení povrchové vrstvy materiálu, která po ztuhnutí může změnit své vlastnosti. Přidáním materiálu za současného tavení lze povrchovou vrstvu legovat, implantovat do ní cizí částice nebo vytvořit souvislý povlak. Materiál povrchu lze naopak i odstranit v malém, přesně definovaném objemu a vytvořit tak na povrchu požadovanou texturu.

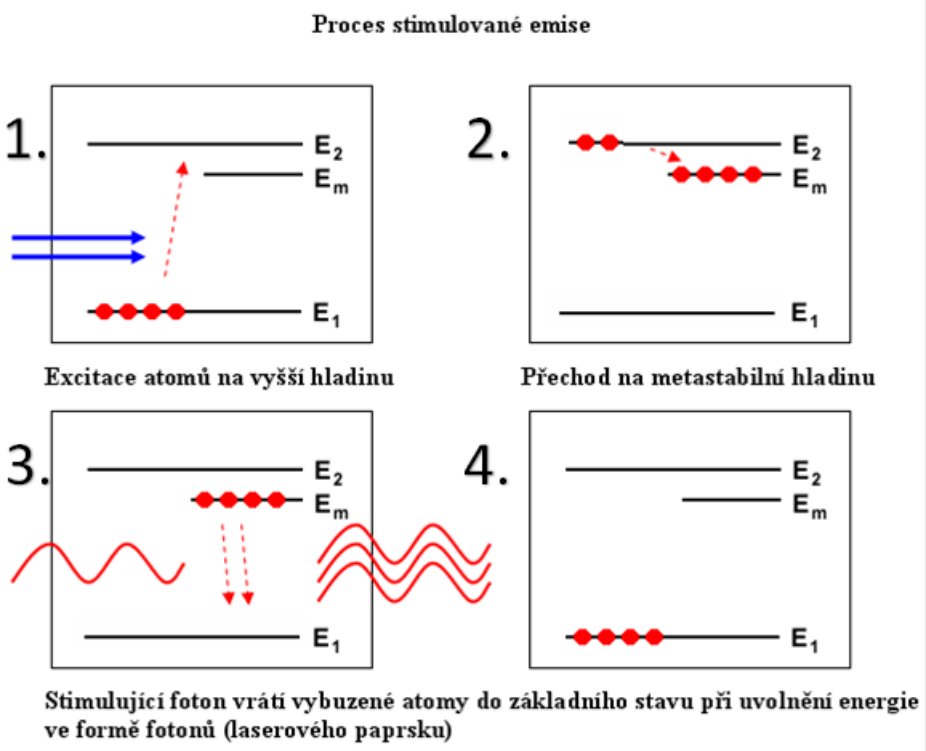
Laser se postupem času stal nepostradatelným nástrojem v oblasti vrtání, řezání, svařování nebo úpravy povrchů součástí díky vysoké kvalitě opracování bez mechanického kontaktu, schopnosti zpracovávat materiály, které jsou konvenčními technologiemi jen obtížně zpracovatelné, navíc s možností automatizace a s vysokou opakovatelností, větší flexibilitou umožňující kusovou výrobu a v řadě případů i s nižšími náklady. [1] [2]

2.1 Princip laseru

Od první zmínky, že by za vhodných podmínek mohlo vzniknout záření neobvyklých vlastností, uběhlo téměř 40 let, než se povedlo sestrojit zařízení, které by toto záření dokázalo vyvolat. Jedním z prvních, kdo se tímto tématem zabýval, byl Albert Einstein, když formuloval základní princip kvantové elektroniky, a to již v roce 1917. Od té doby však pokračoval vývoj laseru velmi rychle a postupně se rozšířil z laboratoří fyziků, přes průmysl až do každodenního života. Slovo „LASER“ pochází z angličtiny a je zkratkou pro „Light Amplification by Stimulated Emission of

Radiation“ což je v podstatě popis principu fungování laseru a v překladu do češtiny znamená „zesilování světla pomocí stimulované emise záření“.

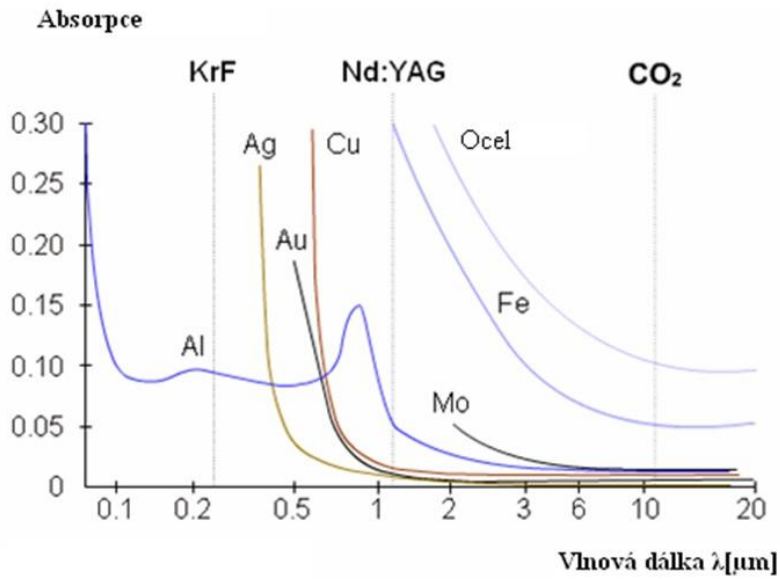
Tato stimulovaná emise však ke svému vzniku vyžaduje vnější podnět. Tímto podnětem je dodání energie například elektrickým proudem nebo výbojkou, které způsobí vybuzení elektronů a umožní tak jejich přestup na vyšší energetickou hladinu, do tzv. excitovaného stavu. Takto vybuzené elektrony vydrží v excitovaném stavu jen po velmi krátkou dobu (1ns = 0,000000001 s), proto se u laserů využívá aktivního prostředí, které obsahuje prvky s tzv. metastabilní hladinou, na které elektrony vydrží až stotisíckrát déle. Aktivní prostředí je tvořeno aktivní látkou, která je u pevnolátkových laserů ve formě přesných geometrických tvarů, nebo v plynem naplněných trubicích u plynových laserů. Atomy se stejně jako ostatní systémy v přírodě snaží zaujmout stav, v němž mají nejmenší možnou energii, a proto elektrony přestupují zpět na původní energetickou hladinu. Při tomto přestupu se z elektronu uvolňuje energie v podobě fotonu. Elektrony se na metastabilní hladině mohou uskupit (tzn. nemusí tam být pouze jeden) tyto uskupené elektrony jsou k přestupu na nižší hladinu buzeny stimulujícím fotonem, který může přiletět odkudkoliv a poté se už elektrony budí navzájem. To způsobuje tzv. lavinový přestup, při kterém každý přestupující elektron vyloučí jeden foton. Všechny tyto fotony se následně spojí dohromady v jednu vlnu s mnohem větší amplitudou. Taková vlna však nemá potřebný směr, proto se používá systém dvou zrcadel, tzv. rezonátor, kde jedno zrcadlo je až z 99,9% odrazivé a druhé polopropustné. Tato zrcadla jsou navzájem rovnoběžná a kolmá k ose laseru, mohou být rovinná, konkávní nebo konvexní. Stabilita záření v rezonátoru je závislá na poloměru křivosti zrcadel, proto je v řadě případů použití konvexních či konkávních zrcadel lepší než použití klasických rovinných. Některé lasery však v aktivním prostředí dosahují dostatečně velkého zesílení a proto mohou fungovat i bez rezonátoru, pracují takzvaně superradiačně. Fotony letící rovnoběžně s osou laseru se odráží od stěn zrcadel a postupně na sebe „nabalují“ další fotony, fotony neletící rovnoběžně s osou laseru buďto zanikají nebo jsou strhávány rovnoběžně letícími fotony. V okamžiku, kdy foton dosáhne určité intenzity, je vypuštěn polopropustným zrcadlem ven a vznikne laserový paprsek. Tento děj probíhá na každém atomu aktivního prostředí a odehrává se v řádech milisekund. [1] [2] [3]



Obr. 1 Proces stimulované emise v aktivním prostředí [2]

2.2 Interakce laserového svazku s materiálem

Interakce neboli vzájemné působení laserového svazku a materiálu je závislé na řadě faktorů, jako je například charakter opracovávaného materiálu (jeho fyzikální vlastnosti, struktura, apod.), délka interakce laserového paprsku s materiálem nebo parametry použitého laseru. Při dopadu laserového svazku na materiál se část záření odrazí, část projde skrz materiál a část je absorbována. A právě část, která je absorbována, má z hlediska obrábění materiálů největší význam. Tato část laserového svazku totiž způsobuje zahřátí materiálu, jeho tavení nebo odpaření. Výsledek této interakce závisí na tzv. součiniteli absorpce laserového paprsku v materiálu, přičemž platí, že s rostoucí teplotou součinitel absorpce roste. Různé materiály mají různě velké součinitele absorpce, určené druhem materiálu, jeho povrchem a teplotou. Změnou vlnové délky laseru, teploty materiálu nebo úpravou jeho povrchu můžeme velikost absorpce zvyšovat, popřípadě snižovat. Další důležitou vlastností je tepelná vodivost materiálu, kdy velká tepelná vodivost minimalizuje vypařování materiálu a naopak malá tepelná vodivost umožňuje dosažení vysoké teploty v místě interakce laserového svazku s materiálem. [3]

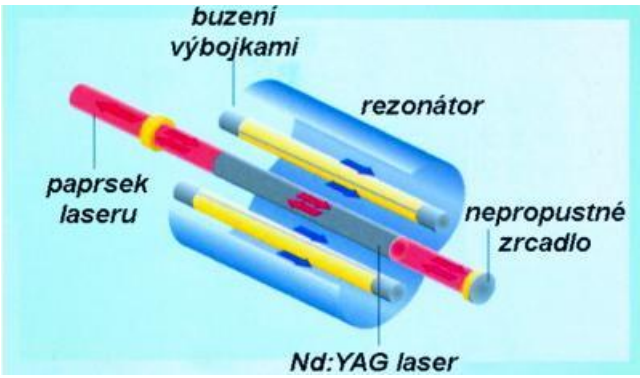


Obr. 2 Absorpce paprsku různé vlnové délky pro základní kovové materiály [4]

2.3 Druhy laserů

I když všechny lasery pracují na stejném základu (stimulované emisi), liší se velmi výrazně svou konstrukcí i vlastnostmi a lze je dělit do mnoha skupin. Jedním z možných dělení je rozdělení podle skupenství aktivního prostředí a to na pevnolátkové, plynové, polovodičové a další.

Mezi pevnolátkové patří například Nd: YAG laser, který je v současnosti nejvíce používaným typem pevnolátkového laseru. Jako aktivní prostředí zde používá izotropní krystal yttrium aluminium granátu. Tento laser se využívá především průmyslu, kde nachází uplatnění především při svařování, řezání, vrtání nebo tepelném ovlivňování materiálu, jeho maximální výkon se pohybuje okolo 15 kW. Dále se pak využívá také v lékařství (chirurgický skalpel, oční mikrochirurgie), ve spektroskopii nebo v radarové technice.



Obr. 3 Princip Nd:YAG laseru [2]

Z plynových laserů je nejvyužívanější CO_2 laser. Zde jako aktivní prostředí slouží směs plynů CO_2, N_2 a He, avšak ke stimulované emisi dochází pouze v molekulách CO_2. Využívá se především k řezání, svařování materiálů a laserovému kalení. Jeho výkon dosahuje až 40 kW.

Velmi perspektivní jsou dnes polovodičové lasery, zejména pak vysokovýkonné diodové lasery, které vynikají vysokou elektrickou účinností (až okolo 50%) a příznivou vlnovou délkou emitovaného záření (780-980 nm). U diodových laserů funguje jako aktivní prostředí blok polovodičů, jejich výkon se pohybuje okolo 20 kW a využívají se především ke kalení, svařování, pájení, lepení, popisování a mnoha dalším technologiím. Nevýhodou těchto laserů je velká divergence laserového svazku a nižší provozní životnost, naopak jejich výhodou je kompaktnost, nenáročnost údržby a snadná integrace do stávajících systémů.

Dalším způsobem rozdělení je rozdělení podle frekvenční oblasti, ve které se generuje laserové záření a to na lasery submilimetrové, infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenové. Lasery je pak dále také možno dělit například podle prostorové struktury laserového svazku. [2] [5] [4]

2.4 Laserové technologie úpravy povrchu

Využití laserové technologie v průmyslu bylo zpočátku považováno za velmi obtížné a nákladné. S potupným pokrokem a rozvojem však nacházejí laserové technologie čím dál širší uplatnění a to nejen ve strojírenství, ale také ve stavebnictví,

v elektrotechnice, textilním průmyslu, lékařství a mnoha dalších odvětvích. Mezi hlavní výhody laserových technologií patří především špičková kvalita a přesnost, dále pak také reprodukovatelnost, vysoká procesní rychlost, flexibilita, bezkontaktní a čisté zpracování, anebo možnost použití pro téměř jakýkoliv materiál. Pomocí laserových technologií tak lze dosáhnout zefektivnění řady procesů a tím i snížení výrobních nákladů. V současnosti používané laserové systémy jsou považovány za nejstabilnější prvky výrobních linek a jsou prakticky bezporuchové.

Pomocí laserových technologií je možné dosahovat široké škály změn vlastností povrchu obráběného materiálu. Mezi tyto změny patří například změna tvrdosti při laserovém kalení, ke které dochází díky tzv. samo-ochlazovacímu efektu, při kterém vzniká jemnozrnná martenzitická struktura o vysoké tvrdosti. Tento proces tak umožňuje dosáhnout toho, že daná součást je houževnatá a zároveň dobře odolává opotřebení. Další změnou je dosažení hydrofobie povrchu materiálu při texturování laserem nebo změna optických vlastností materiálu při popisování laserem, při kterém se na povrchu materiálu vytváří trvalé grafické či jiné motivy. Velmi významnou změnou, které lze pomocí laseru dosáhnout, je vytvrzování povrchové vrstvy matriálu pomocí metody laser shock peeningu, při které dochází k vyvolání zbytkových napětí v materiálu a tím zlepšení únavových vlastností materiálu, omezení vzniku a šíření povrchových trhlin a zvýšení tvrdosti povrchu. Právě zbytková napětí jsou jedním z parametrů určujících celkový stav materiálu. Mají vliv na mechanické chování materiálů především při cyklickém namáhání. [6]

2.4.1 Texturování laserem

Texturování povrchu laserem je založeno na principu absorpce laserového paprsku a následném odpaření materiálu, díky čemuž lze texturovat téměř všechny typy materiálů. Tato metoda je využívána především pro úpravu smáčivosti povrchu materiálů. Oproti chemickým metodám je laserové texturování výhodné zejména díky rychlosti celého procesu. Té je dosaženo omezením potřeby použití povlaků před nebo po samotném texturování. Další výhodou je bezkontaktní a čisté zpracování - výsledný povrch neobsahuje kontaminující látky a nedochází k objemovým změnám materiálu. Textury vytvořené laserovým paprskem vykazují významné mechanické, optické nebo elektromagnetické vlastnosti jako je hydrofobie, korozivzdornost, nebo snížení tření.

Díky těmto vlastnostem je texturování laserem využíváno například při výrobě kovových zápustek, plastových vstřikovacích forem nebo také zubních a ortopedických implantátů. [7] [8]

2.4.2 Popisování laserem

Pomocí laserového paprsku lze také na povrchu materiálu vytvářet trvalé grafické či jiné motivy a to na téměř jakémkoliv materiálu, tato technologie se nazývá laserové popisování. K vytvoření těchto motivů dochází působením laserového svazku, který buď odstraňuje vrstvu materiálu, nebo povrchově kalí daný materiál a tím vytváří vizuální efekt. Hlavním přínosem je vysoká kvalita, ostrost hran, rychlost, přesnost a bezkontaktní čisté zpracování. Popisovaný povrch může mít libovolnou povrchovou úpravu a lze popisovat rovinné, válcové i jinak zakřivené plochy, a to i na málo přístupných místech. Laserové popisování díky svým vlastnostem nahrazuje konveční metody jako je sítotisk nebo mechanické rytí a ražení. K popisování laserem se využívají především vláknové a CO_2 lasery. Vláknové lasery se používají především pro kovy, plasty a keramiku, zatímco CO_2 lasery se využívají pro sklo, dřevo a kůži. Uplatnění tato metoda nachází zejména při značení dílů, polotovarů, nástrojů, kalibrů měřidel aj. [9]

Obr. 4 Příklad popisování laserem do dřeva

2.4.3 Tepelné zpracování (laserové kalení)

Laserové kalení je jednou z možností, jak u strojních součástí jako jsou například hřídele, ozubená kola nebo čepy dosáhnout toho, aby byly houževnaté a zároveň dobře odolávaly opotřebení. Oproti klasickým metodám indukčního kalení a povrchového kalení plamenem má laserové kalení řadu výhod, mezi nejvýznamnější z nich patří absence chladícího média. K dalším výhodám patří minimální potřeba následného opracování součásti, možnost lokálního kalení přesně do požadovaného místa, malé tepelné deformace materiálu a vysoká procesní rychlost, efektivita a stabilita celého procesu.

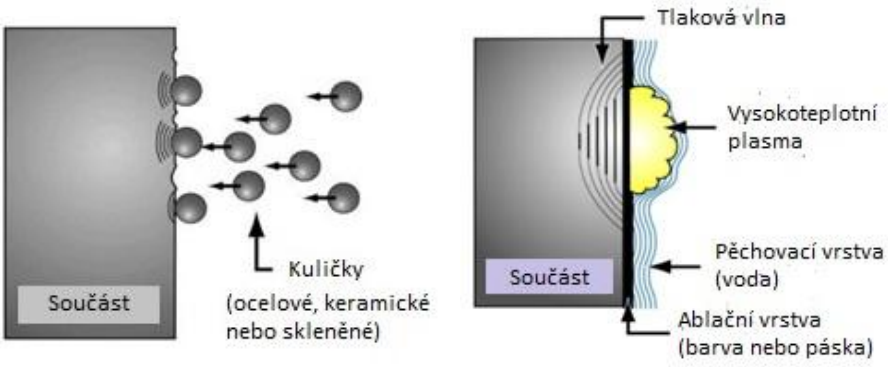
Kalení je cyklus velmi rychlého ohřívání a chladnutí materiálu. Při laserovém kalení paprsek intenzivně zahřívá pouze povrchové vrstvy materiálu, zatímco okolní materiál zůstává na teplotě prostředí. K následnému chladnutí dochází tzv. samo-ochlazovacím efektem materiálu, při kterém vzniká jemnozrnná martenzitická struktura o vysoké tvrdosti, jádro součásti si však zachovává svou houževnatost.

Širšímu použití této metody brání především popouštěcí efekt, ke kterému dochází u větších součástí opakovaným přejížděním laseru, obtížné vyhodnocování zbytkového pnutí u mechanických součástí se složitou geometrií, a vysoké pořizovací náklady laserového zařízení. Vzniku popouštěcího efektu se nejčastěji předchází použitím diodových laserů s obdélníkovým paprskem větším, než je obráběný povrch součásti nebo rychlým přejetím a vyjetím laserem mimo součást. Pro vyhodnocování zbytkového pnutí a distribuce tepla u specifických komponentů jsou vyvíjeny analytické a numerické metody, které výrazně snižují náklady na výzkum ve srovnání s experimentálními zkouškami. Laserové kalení se nejčastěji využívá pro selektivní zpracování ozubených kol, obráběcích nástrojů, pístních kroužků nebo střižných a ohýbacích nástrojů. [10] [11]

2.4.4 Laser Shock Peening

Laser Shock Peening (LSP) je moderní, progresivní alternativa kuličkování, při které je povrch součásti vytvrzován rázovou vlnou vyvolanou laserovým zářením. Laserové paprsky s velkou energetickou hodnotou (GW/cm^2) a krátkou vlnovou délkou (ns) působí na absorpční vrstvu – vodu, na povrchu součásti. Vlivem působení laserového záření se voda začne odpařovat do vysokotlaké plasmy, která rychle expanduje a vyvolá tak vysokotlakou rázovou vlnu, která se šíří do obrobku. Při dosažení limitu elasticity vrcholu vlny dochází k plastické deformaci materiálu a vyvolání zbytkového tlakového napětí. Tímto způsobem se dosáhne zlepšení únavových vlastností materiálu, omezení vzniku a šíření povrchových trhlin a také zvýšení tvrdosti povrchu. Ve srovnání s klasickými metodami jako je kuličkování nebo hloubkové válcování, dokáže LSP vyvolat tlaková pnutí do větších hloubek povrchových vrstev materiálu (1-2mm) výraznější mikrostrukturální změny při snížení nerovnosti povrchu (za určitých podmínek). Tato metoda nachází uplatnění především při opracování součástí, které jsou během provozu extrémně namáhány a jejichž funkčnost je pro činnost celého systému kritická – součásti v leteckém průmyslu.

Díky širokému využití titanových slitin ve strojírenství je zkoumání únavových trhlin nezbytné a to především kvůli bezpečnosti důležitých součástí. Kuličkování je běžnou technikou ke zlepšení únavových vlastností materiálu, avšak drsnost povrchu po použití této metody je vysoká a amplituda stlačeného zbytkového napětí naopak nízká. Proto byly vyvinuty nové, progresivní metody jako je LSP, které řeší tyto nedostatky a týmy odborníků zkoumaly účinky různých parametrů LSP na výsledné únavové vlastnosti, především na růst a šíření trhlin. Výsledky týmu profesora J. Z. Zhou ukázaly, že velikosti zbytkových napětí u vzorků ovlivněných pomocí LSP jsou několikanásobné oproti neovlivněným vzorkům. U vzorků, u kterých nebylo použito LSP dosahovalo výsledné zbytkové napětí hodnot okolo 50MPa, zatímco u vzorků ovlivněných metodou LSP nabývalo zbytkové napětí hodnot od -298 do -361 MPa na začátku trhliny a postupně směrem od začátku trhliny se zvyšovalo až na hodnoty od -330 do -400 MPa. Výsledky dále také ukázaly, že hloubka, ve které působí zbytková napětí, roste se zvyšující se mírou pokrytí LSP. [12] [13] [14]



Obr. 5 Porovnání metody kuličkování a LSP [13]

3 Zbytková napětí

Zbytková napětí jsou mechanická napětí, která se vyskytují v materiálu bez působení vnějších sil (vnitřní pnutí). Vznikají technologickým postupem výroby i dalším zpracováním materiálu a je jim vystaven téměř každý materiál – pevné látky bez zbytkových napětí principálně neexistují. Jejich vznik je spojen s výskytem plastických deformací. Průměrná hodnota zbytkových napětí na celém systému je nulová. Podle lokální prostorové změny lze vnitřní napětí rozdělit na makroskopická (I. druhu), mikroskopická (II. druhu) a submikroskopická (III. druhu). [11] [15]

3.1 Význam zbytkových napětí v povrchu materiálu

Zbytková napětí jsou jedním z parametrů určujících celkový stav materiálu. Mají vliv na mechanické chování materiálů a mohou způsobit jeho narušení. Tahová zbytková napětí mohou omezit únavovou životnost a způsobit korozní praskání a šíření trhlin v materiálu. Oproti tomu, tlaková pnutí mají pozitivní účinky. Tím nejvýznamnějším je schopnost zabránit vzniku a šíření trhlin, dále pak také zlepšují únavové vlastnosti materiálu, pevnost a tvrdost povrchu nebo ochranu proti opotřebení a únavě materiálu. [16] [17] [18]

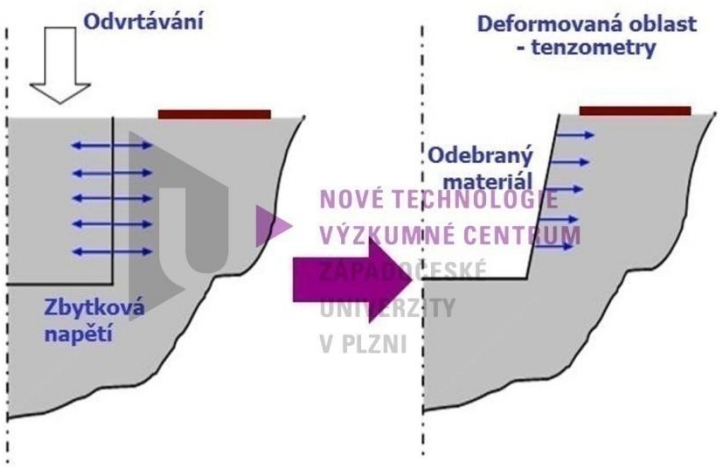
3.2 Metody měření zbytkových napětí

Chceme-li zjistit integritu povrchu, je nutné zhodnotit účinky zbytkových napětí, a protože je obtížnější předpovědět zbytková napětí než provozní napětí, od kterých se odvíjejí, je důležité mít spolehlivé metody pro jejich měření. V současné době se pro zjištění zbytkových napětí používají nejčastěji experimentální metody, ty umožňují jejich měření přímo nebo nepřímo. Tyto metody mohou být rozděleny do tří skupin, na destruktivní, semidestruktivní a nedestruktivní. Princip měření destruktivními metodami spočívá v uvolnění původních zbytkových napětí porušením materiálu a následným vyhodnocením odezvy, tyto odezvy bývají nejčastěji ve formě deformací. Do této skupiny patří většina mechanických metod, například měření mikrotvrdosti, založených na měření deformací při odstraňování vrstev materiálu. U

semidestruktivních metod je měření prováděno na přidané části povrchu, který se po měření odstraní nebo na jen velmi malé části zkoumaného vzorku. Porušená část se následně opraví a vrátí do původního stavu. Patří sem například odvrtávací metoda, která je jednou z nejčastěji používaných metod pro měření zbytkových napětí. Mezi nedestruktivní metody patří většina fyzikálních metod, při kterých nedochází k poškození součásti ani její případné úpravě po dokončení měření. [17] [19]

3.2.1 Odvrtávací metoda

Odvrtávací metoda, někdy také nazývaná jako metoda otvoru, je jednou z nejčastěji využívaných metod k měření zbytkových napětí. Princip této metody *(obr. 6)* spočívá v odvrtání malé části matriálu z povrchu zkoumané součásti, což způsobí uvolnění zbytkových napětí a s tím i deformace v okolí otvoru. Na základě uvolněných deformací měřených minimálně ve třech na sobě nezávislých směrech v okolí otvoru, je pomocí tzv. kalibračních koeficientů zpětně vyhodnoceno původní zbytkové napětí v materiálu. Tyto tzv. kalibrační koeficienty představují převodník mezi původním zbytkovým napětím v materiálu a uvolněnými deformacemi. Takto odvozené koeficient jsou závislé pouze na materiálových vlastnostech, vzdálenosti od otvoru a poloměru otvoru. Splnit tyto podmínky se v praxi však téměř nikdy nepodaří a proto se využívají koeficienty, zahrnující skutečné aspekty měření. Stanovení těchto koeficientů je možné buď experimentální kalibrací nebo v současné době téměř výhradně numerickým výpočtem pomocí metody konečných nebo hraničních prvků. Tyto „koeficienty" vyjadřují vztah mezi uvolněnými deformacemi a zbytkovými napětími v závislosti na velikosti otvoru, hloubce otvoru, tvaru tenzometrické růžice, materiálu apod. Otvor je většinou odvrtáván čelní válcovou frézou, avšak může být použito i alternativních technik jako sou speciální tvarové frézy či laserové paprsky). Deformace je měřena nejčastěji tenzometry (tenzometrickými růžicemi), avšak v současnosti jsou již vyvíjeny optické metody pro bezkontaktní měření deformací.



Obr. 6 Princip měření zbytkových napětí odvrtávací metodou [17]

Nezbytnou součástí odvrtávací metody je vyhodnocení zbytkových napětí, což představuje postup jejich výpočtu z naměřených uvolněných deformací. Všechny tyto postupy vyhodnocení vycházejí ze základních principů, mohou se však lišit předpoklady použití, nároky na stanovení kalibračních koeficientů nebo i možnostmi zahrnutí různých vlivů. Nejzákladnějším způsobem vyhodnocení vnitřních napětí je metodou ekvivalentních homogenních napětí, která vychází z náhrady obecně nehomogenních napětí odpovídajícími homogenními napětími. Kalibrační koeficienty v tomto případě tvoří vektory, kde každá hodnota odpovídá dané hloubce otvoru a napětí je vyhodnoceno jako vážený průměr ze všech kroků do dané hloubky. Tato metoda je vhodná pro konstantní nebo slabě se měnící napětí po hloubce, její použití však může vést ke značnému zkreslení výsledků.

Za nejobecnější metodu z hlediska přístupu se považuje integrální metoda, ta uvažuje vliv uvolněného vnitřního napětí v daném místě, které se mění s celkovou hloubkou otvoru. Kalibrační koeficienty jsou dvourozměrnou funkcí celkové hloubky otvoru a uvažované hloubky působení uvolněného napětí. Integrální metoda pak představuje obecnou diskretizaci, kde jsou kalibrační koeficienty vyjádřeny jako trojúhelníkové matice. Vstupem je vektor uvolněných deformací v různých hloubkách a řešení vede na soustavu rovnic, jejímž výsledkem je vektor zbytkových napětí v dané hloubce otvoru. Při použití této metody dochází k nejmenšímu zkreslení dat, celý proces vyhodnocení je však časově náročný a klade vysoké nároky na výpočetní techniku a programové vybavení. I přes veškeré nedostatky se tato metoda však jeví jako jedna

z nejlepších a to především v případech výrazných změn zbytkových napětí po hloubce. Její hlavní výhodou je, že je zahrnuta v normě ASTM E837.

Mezi další metody vyhodnocení, které nekladou tak vysoké nároky na stanovení kalibračních koeficientů ani na vlastní proces vyhodnocení patří například metoda průměrného napětí nebo metoda přírůstku deformace. Další modifikací integrální metody je metoda mocninných řad a spline metoda. Ostatní metody jsou navržené pro speciální případy, jako je např. přímý výpočet pomocí MKP nebo použití nestandardních typů tenzometrických růžic. K méně často používaným patří např. Kockelmanova metoda nebo metoda derivace signálu.

Pomocí metody otvoru je možné měřit dvouosou napjatost v rovině povrchu materiálu a to až do hloubky cca 1-2 mm. Minimální velikost analyzované oblasti se pohybuje zhruba okolo 1 mm^2. Vzhledem k tomu, že porušení zkoumané součásti bývá minimální tato metoda označována jako semidestruktivní. Nachází uplatnění v mnoha průmyslových technologiích výroby a zpracování materiálu. K nejvýznamnějším z nich patří především tepelné zpracování materiálů, mechanická a tepelná úprava povrchu materiálů, obrábění, svařování, povlaky nebo výroba kompozitních materiálů. Odvrtávací metoda je poměrně snadná, rychlá a měřicí zařízení bývá většinou přenosné. Mezi nevýhody patří její částečně destruktivní povaha, omezené rozlišení a nižší přesnost vyhodnocení v případě nerovnoměrných napětí nebo nehomogenních materiálových vlastností. [17]

3.2.2 Rentgenová metoda

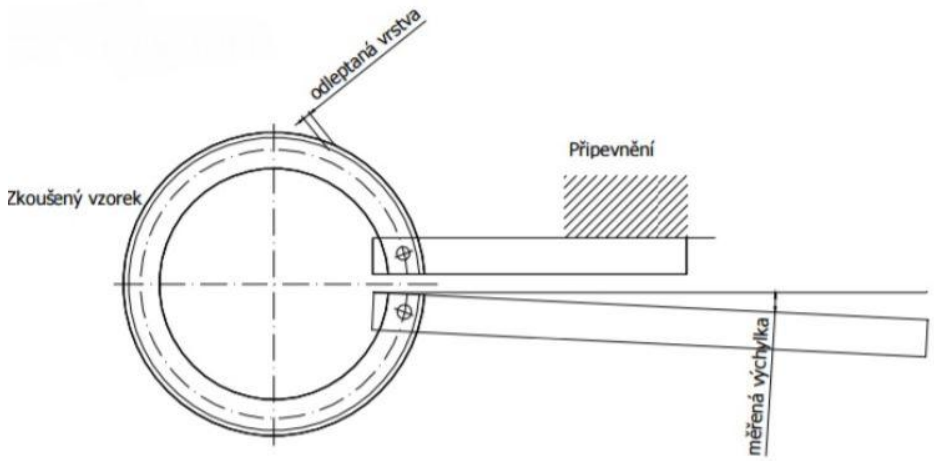
Rentgenová metoda patří mezi nedestruktivní, fyzikální metody měření zbytkových napětí. Je založena na principu rozptylu rentgenových paprsků na krystalech materiálů, kterým měříme mezirovinnou vzdálenost d, kterou porovnáme s mezirovinnou vzdáleností nedeformované mřížky -$\varepsilon = \frac{\Delta d}{\mathrm{d}_0}$. Velikost napětí zjistíme porovnáním mřížkových deformací, určených ze změn difrakčního úhlu rentgenového paprsku, s deformacemi, které se při daném stavu napjatosti dají očekávat podle teorie napjatosti.

Pro rentgenografická měření zbytkových makroskopických napětí se užívají jak stacionární a přenosné aparatury s fotografickou detekcí záření, tak difraktometry v uspořádání „ω“, „ψ“a s paralelním svazkem. V provozních podmínkách má největší perspektivu mobilní aparatura s polohově citlivými detektory.

Při užití rentgenové metody není třeba před samotným měřením povrch součásti nijak upravovat, což patří mezi její hlavní výhody. Tato metoda také umožňuje měřit napětí I., II. i III. druhu, distorzi z několika směrů, stanovit napětí na jednotlivých fázích a lze při ní měřit z plošného obsahu v řádech mm^2. Mezi nevýhody patří možnost měření pouze ve velice tenkých vrstvách (10^{-2} – 10^{-3} mm) nebo také možnost měření pouze elastických deformací. [15] [20] [21]

3.2.3 Metoda odleptávání

Tato metoda patří mezi mechanické metody měření zbytkového napětí. Její princip *(obr. 7)* spočívá v měření deformace zkušebního tělesa, ke kterému dochází při postupném odleptávání jeho povrchových vrstev. Měřený vzorek pak počítáme podle teorie pružnosti jako křivý prut. Při odleptávání se napětí uvolňují postupným odstraňováním povrchové vrstvy materiálu. Její výhodou je nízká cena a dostupnost, nevýhodou je naopak nízká přesnost měření. [20]



Obr. 7 Princip měření zbytkových napětí metodou odleptávání [20]

3.2.4 Ostatní metody

V současnosti existuje množství zejména experimentálních metod pro zjišťování zbytkových napětí *(obr. 8)*. Jednou z nich je metoda měření pomocí magnetického pole, která využívá principu tzv. Barkhausenova šumu. Barkhausenův šum byl poprvé popsán v roce 1919 profesorem Heinrichem Georgem Barkhausenem. Přiblížíme či vzdálíme-li magnet od jádra, je v reproduktoru slyšitelné chrastění či praskání. Tento šum, jak ukázal paralelní vývoj kvantové mechaniky, souvisí s nespojitostmi v procesu magnetizace feromagnetického materiálu. Později se ukázalo, že efekt závisí na tvrdosti ocelového jádra v cívce (s rostoucí tvrdosti intenzita praskání klesá). Změna magnetizace vzorku indukuje elektrický puls v cívce umístěné v blízkosti vzorku. Posloupnost těchto pulsů se zobrazí na monitoru počítače v tzv. Hysterzní křivce, z jejíž deformace můžeme vypočítat zbytková pnutí v povrchu materiálu. Tato metoda je rychlá, nedestruktivní a velmi přesná, avšak vyžaduje složitou kalibraci a lze ji použít pouze pro feromagnetické materiály.

Další metodou je měření pomocí ultrazvuku, tato metoda je založena na změně rychlosti ultrazvukových vln, způsobené odrazy od překážek, v prostředí s přítomností napětí. V případě, že napětí působí ve směru pohybu vln, se rychlost šíření zvyšuje a naopak. Díky tomu je možné najít spojitost mezi šířením vln v elastickém materiálu a vlastnostmi jako je tvrdost, napětí, čistota apod.

Mezi nepřímé metody měření patří například metoda křehkého nátěru, při které je povrch potřen pryskyřičným nátěrem s praskající vrstvou. Působením deformací tato vrstva po zaschnutí popraská ve směru kolmém k maximální dilataci. Tato metoda je rychlá a operativní, ale málo přesná, je často ovlivněna okolními vliv jako je teplota nebo vlhkost a vyžaduje zkušené pracovníky. [19] [20]

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

Obr. 8 Metody měření zbytkových napětí a jejich rozdělení [20]

4 Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části je vyhodnocení a porovnání výsledků měření systémem RESTAN MST3000 s výsledky naměřenými pomocí systému PRISM, jejich analýza, porovnání a následné určení, která z použitých metod je vhodnější pro zkoumané vzorky. Druhým cílem je porovnat výsledky naměřené na ploše ovlivněné pomocí LSP s výsledky naměřenými na neovlivněné ploše a vyhodnotit přínos metody LSP. Obrázky a hodnoty použité pro grafy a výpočty byly převzaty z přiložených příloh.

4.1 Zkoumaný materiál Ti-6Al-4V

Pro testy byla použita slitina titanu Ti-6Al-4V, tato slitina je nejpoužívanějším materiálem, který je ovlivňován metodou LSP. Praktické využití titanu a jeho slitin vyplývá především z jeho mimořádné chemické odolnosti, malé hustoty a výborného poměru pevnosti a měrné hmotnosti. Další výhodou je velký rozptyl pevností a tažností podle chemického složení a tepelného zpracování slitiny.

Slitiny titanu jsou obecně rozděleny do tří hlavních kategorií. Alfa slitiny, které obsahují neutrální legující prvky (jako je Sn) nebo alfa stabilizátory (jako je AI, 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. Titanové slitiny můžeme rozdělit do skupin takzvaných Gradů. Se zvyšujícím se číslem postupně roste pevnost materiálu a klesá jeho tažnost. Grade číslované dvojčíslím jsou speciální slitiny, u nichž toto pravidlo neplatí. Ti-6Al-4V je alfa + beta slitina a odpovídá americkému označení Grade 5.

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

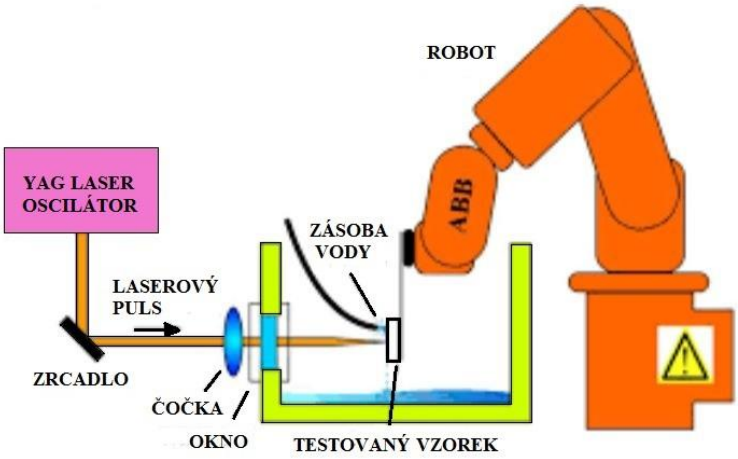
Obr. 9 Mechanické vlastnosti vybraných slitin titanu

Díky svým vlastnostem při zvýšené teplotě je slitina Ti-6Al-4V velmi používána pro namáhané součásti především v leteckém průmyslu při náhradě oceli a slitin niklu kvůli úspoře hmotnosti a to i u velmi namáhaných součástí při teplotách do 350°C. Nejčastěji se využívá pro komponenty turbínových motorů a různé konstrukční prvky. Dále se pak používá také v automobilovém průmyslu, zdravotnictví nebo ve sportovních potřebách. [22]

4.2 Parametry použitých vzorků

Zkoumané vzorky byly vyrobeny z materiálu Ti-6Al-4V a byly žíhány pro dosažení nulových zbytkových napětí. Vorky byly o rozměrech 70 mm x 75 mm x 5 mm. Po ovlivnění povrchu byly vzorky přeříznuty elektrovyjiskřováním na půl.

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 použit průmyslový robot ABB IRB 120 s dovoleným zatížením 3 kg.



Obr. 10 Schéma experimentálního set-upu pro LSP

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 byly ovlivněny za překryvu pulzů odpovídající 5000 pulzů/cm.

Vzorek	Energie pulzu [J]	Délka pulzu [ns]	Frekvence [Hz]	Průměr paprsku [mm]	Hustota pulzů [1/cm²]	Hustota výkonu [GW/cm²]
1 a 2	2,5	10	10	1,5	5000	14,15

V následující tabulce jsou popsány další vlastnosti zkoumaných vzorků

Tab. 1 Parametry použitých vzorků

Parametr	Velikost
Materiál	Ti6-Al4-V
Poissonův koeficient	0,342
Youngův modul	113800

4.3 Měření pomocí systému MST3000 - RESTAN

Systém MST3000 zvaný také RESTAN (Residual Stress Analyzer – Analyzátor zbytkového napětí) je automatický systém pro měření zbytkového napětí pomocí odvrtávací metody vyvinutý a patentovaný firmou SINT Technology. Celý systém se skládá z pěti prvků. Mezi tyto prvky patří opticko-mechanický systém (zarovnání osy vrtání s centrem růžice), vysokorychlostní systém vrtání pomocí vzduchové turbíny

(samotné vytvoření otvoru), elektronická řídicí jednotka (která řídí systém vrtání a měření pomocí analogových zesilovačů), software pro ovládání a řízení vrtání otvorů (povolení / zastavení automatického vrtání) a software pro zpracování získaných dat (umožňující stanovení a výpočet zbytkového napětí různými metodami).

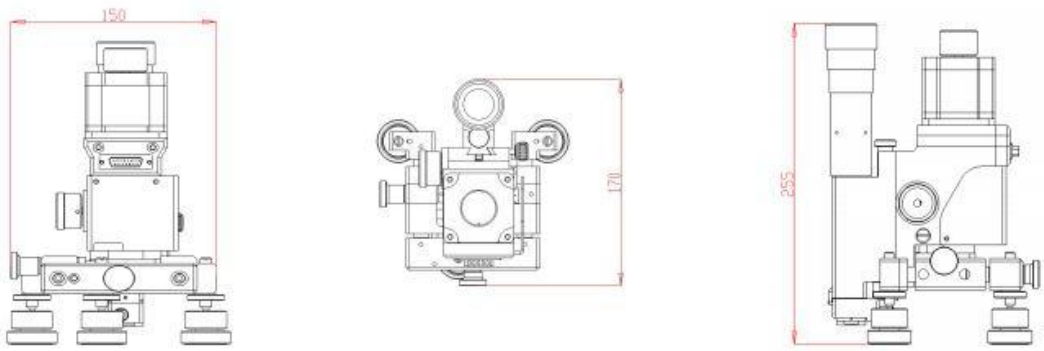
Obr. 11 Systém RESTAN MST3000 [23]

Základem systému je zařízení pro odvrtávání, které se používá k odvrtávání otvoru a zarovnávání frézy se středem tenzometrické růžice pomocí křížové mřížky v okuláru. Na konci měření se tato část využívá také pro zjištění průměru otvoru. Pohyb na horizontální rovině x-y se provádí pomocí nastavení mikrometru, vertikální pohyby mohou být uskutečněny dvěma způsoby, manuálním posunutím vrtací hlavy pomocí nastavovacího knoflíku nebo jemným polohováním automaticky řízeným krokovým motorem. Všechny kroky odvrtávání lze provádět s rozlišením 1 μm a rychlostí posuvu od 0,03 do 1 mm / min. Detekce nulové hloubky se provádí automaticky na vodivých materiálech pomocí elektrického kontaktního systému. Díky magnetickým nohám a

konstrukci přesahů je možné tento systém využít jak na klasické vzorky ve tvaru destiček, tak na vzorky zaoblené (trubky, tyče, atp.).

Tab. 2 Parametry systému RESTAN MST3000

Parametr	Jednotky	Velikost
Rozměry (výška, šířka, délka)	mm	270x160x175
Váha	kg	4,6
Maximální rychlost turbíny	Ot/min	400 000
Akustická emise	dBA	76
Maximální tlak napájení turbíny	bar	5
Rozlišení vrtání	µm	5
Rozsah rychlosti vrtání	mm/min	0,03-1
Vertikální zdvih (rychlý / manuální)	mm	60
Vertikální zdvih (pomalý s motorem)	mm	6
Horizontální pohyb (x; y)	mm	7-10
Výškové přizpůsobení nohou	mm	60

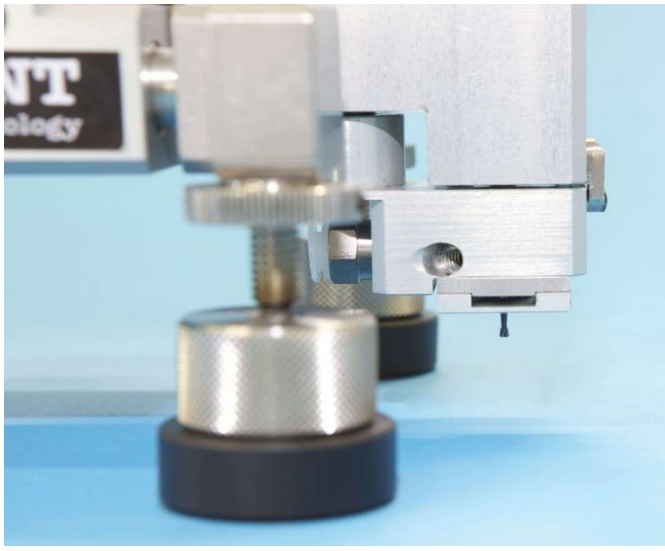


Obr. 12 Specifikace systému RESTAN MST3000 [24]

4.3.1 Princip měření systémem RESTAN

Celý proces probíhá v několika krocích, přičemž odvrtávání a měření je plně automatické, avšak zbylé úkony musí provést obsluha přístroje ručně. Prvním krokem je nalepení tenzometrické růžice na zkoumaný vzorek a připájení kabelů k tenzometrické růžici. Vzorek musí být důkladně očištěn, aby nedocházelo ke zkreslení výsledků. Dalším krokem je umístění vrtacího zařízení nad střed tenzometrické růžice pomocí mikroskopu, nahrazení mikroskopu odvrtáváním nástrojem a následné nastavení podmínek odvrtávání pomocí softwaru RSM. Tento systém umožňuje nastavit například maximální hloubku, velikost přírůstků hloubky vrtání, jejich distribuci (lineární,

polynomickou nebo lineární v sekcích), počet vrtacích kroků, typ tenzometrické růžice a její parametry, rychlost posuvu, specifikace zkoumaného vzorku a další. Po dokončení odvrtávání je nutné vyměnit nástroj zpět za mikroskop a změřit průměr odvrtaného otvoru a jeho excentricitu. Posledním krokem je pak pracování a vyhodnocení získaných dat pomocí softwaru EVAL, jehož výpočetní systém využívá k vyhodnocení integrální metodu, Schwarz – Kockelmannonvou metodu, HDM metodu a metodu ASTM E 837-13a pro rovnoměrné i nerovnoměrné napětí.



Obr. 13 Systém Restan MST3000 s připravenou frézou **[24]**

Pro měření zbytkových napětí touto metodou je dále nezbytný elektronický řídicí systém, do kterého je přiváděn vzduch, tento systém pohání a automaticky řídí odvrtávací proces. Stejně tak je nezbytný počítač, přes který probíhá veškeré nastavení podmínek a vyhodnocování výsledků. Dále je možné použít digitální tenzometrický zesilovač, který zvyšuje citlivost tenzometru. Při našem měření byl použit zesilovač QuantumX MX440A od firmy HBM. [24] [23] [25]

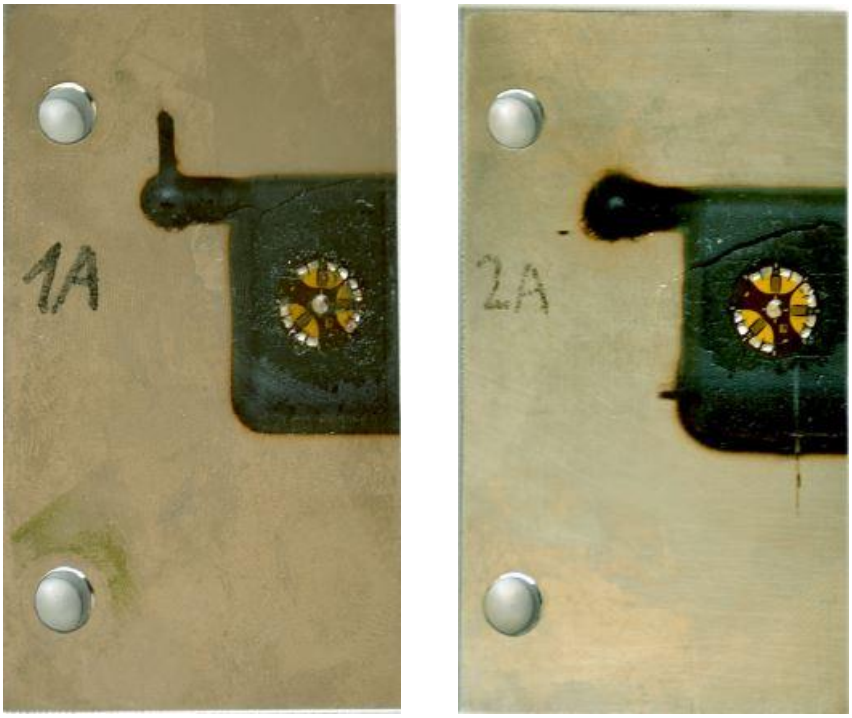
Obr. 14 Kompletní řetězec měření [24]

4.3.2 Parametry měření

Měření pomocí systému RESTAN bylo provedeno v laboratoři experimentálních strojírenských metod fakulty strojní na Západočeské univerzitě v Plzni.

Tab. 3 Parametry měření pomocí systému RESTAN

Parametr	Jednotky	Vzorek 1A	Vzorek 2A
Počet kroků	-	20	20
Kroky	-	Konstantní	Konstantní
Celková hloubka	mm	1	1
Průměr otvoru	mm	1,94	2,17
Průměr frézy	mm	1,8	1,8



Obr. 15 Zkoumané vzorky 1A (vlevo) a 2A (vpravo)

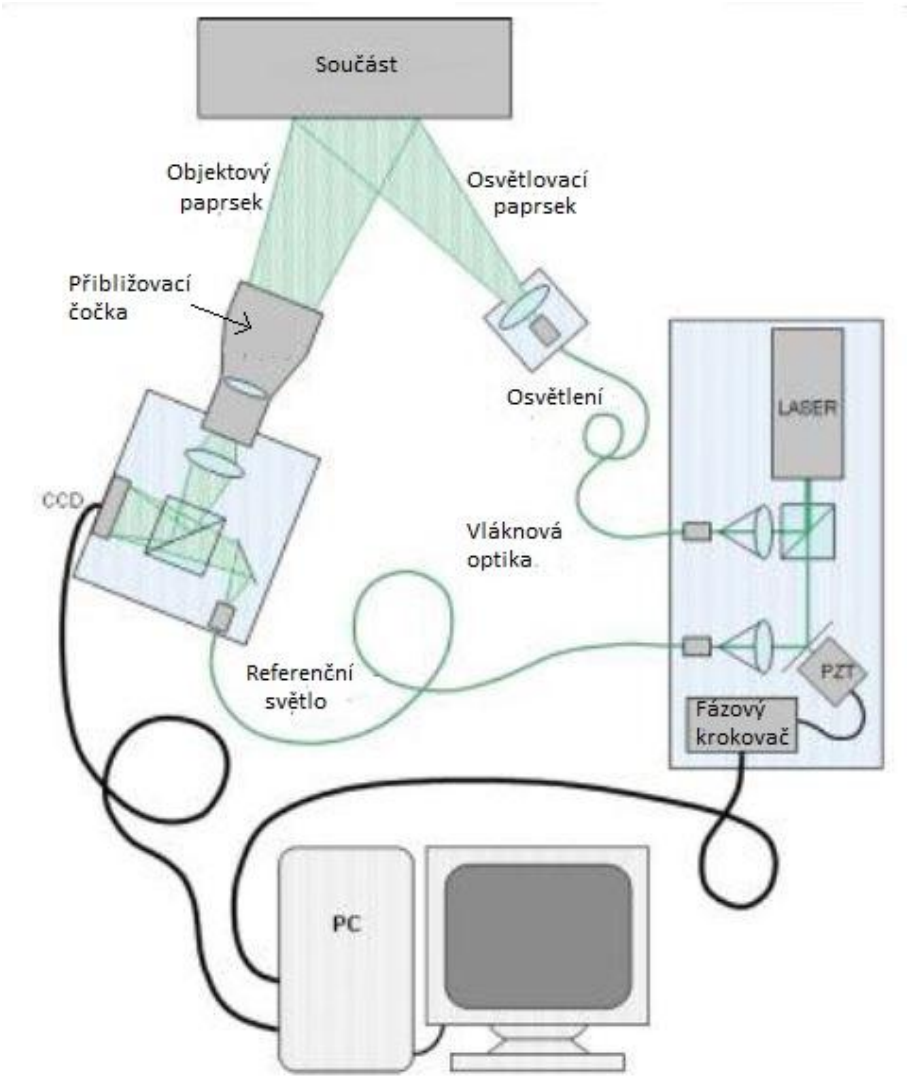
4.4 Měření pomocí systému PRISM

Systém PRISM je pokročilý odvrtávací systém, který umožňuje rychlé a přesné měření zbytkového napětí ve srovnání s klasickými metodami. Stejně jako běžné systémy pro odvrtávací metodu, systém PRISM měří změny v povrchu vzorku způsobené odvrtáváním otvoru a zjišťuje původní zbytková napětí. Avšak nedochází zde k často časově náročné aplikaci tenzometrů a nejsou zde analyzovány průměry z několika oblastí, ale plocha kolem odvrtaného otvoru. Měření povrchového zakřivení se provádí pomocí tzv. interferometrie elektronického spektrálního vzoru (ESPI).

4.4.1 Princip metody ESPI

Tato metoda porovnává obrázky před vrtáním s jednotlivými obrázky po každém odvrtávacím kroku. Každý stav je popsán sadou čtyř snímků, pořízených referenčním paprskem, fázově posunutým o různou hodnotu: 0°, 90°, 180°a 270°. Osvětlovací paprsek interferuje s objektovým paprskem na CCD *(obr. 16)* což umožňuje měřit změny v povrchu jako fázové změny. Analýza dat zahrnuje

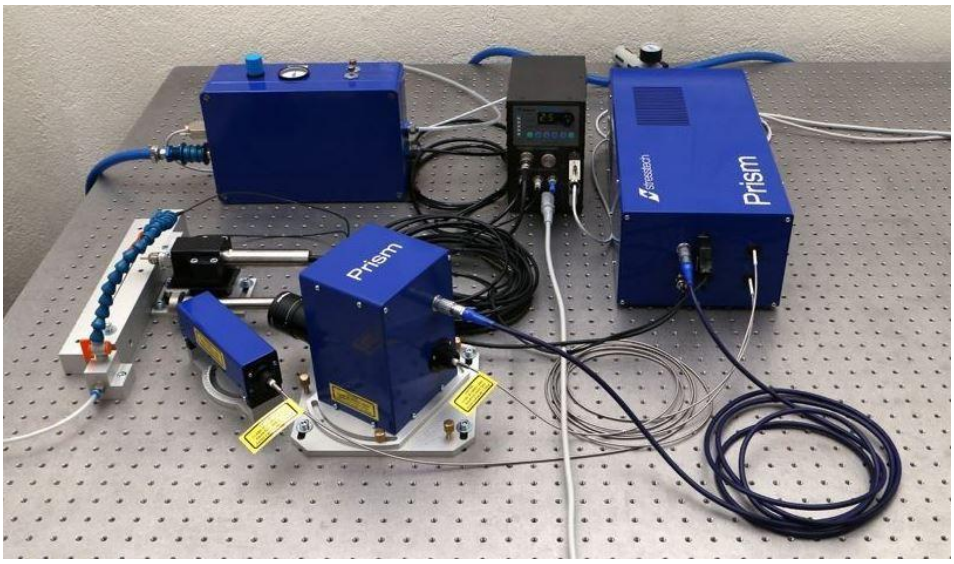
všechny obrazové body ve tvaru prstence kolem otvoru, popsané vnitřním a vnějším integračním poloměrem. Tyto poloměry bývají obvykle násobkem poloměru vyvrtaného otvoru, vnitřní dvojnásobkem a vnější čtyřnásobkem. Oblast bezprostředně kolem hrany otvoru se do analýzy nevyužívá, protože proces vrtání vždy naruší tuto část povrchu a ta tak neposkytuje užitečné informace. Analyzovaná oblast může být upravena pomocí softwaru.



Obr. 16 Schéma systému PRISM [26]

Standardní systém PRISM se skládá z hlavní jednotky s ovladači, napájecím zdrojem, elektronickými uzávěry a zdrojem laserového paprsku, video hlavice, osvětlovacího stojanu, vysoce přesného a vysokorychlostního vřetenového systému (vzduchem chlazená elektrická fréza), pneumatického regulátoru vzduchu, počítače a softwaru pro měření a výpočet zbytkových napětí pomocí integrální metody. Mezi

hlavní výhody toho systému patří nutnost minimální přípravy povrchu vzorku, schopnost měření bez použití tenzometru, rychlost celého procesu a uživatelsky přívětivý software uzpůsobený pro systém Windows. [26] [27]



Obr. 17 Odvrtávací systém PRISM pro měření zbytkových napětí [27]

4.4.2 Parametry měření

Měření pomocí systému PRISM bylo provedeno v laboratořích firmy Stresstech GmbH v Německu.

Tab. 4 Parametry měření pomocí systému PRISM

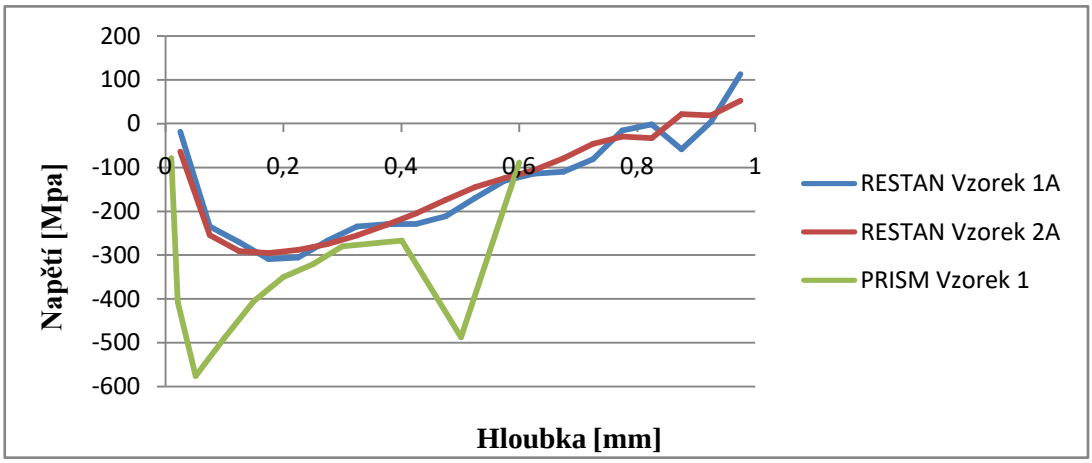
Parametr	Jednotky	Vzorek 1
Řezná rychlost	ot/min	50.000
Posuv	mm/s	0,01
Celková hloubka	mm	0,6
Průměr frézy	mm	0,8 (1/32)

Obr. 18 Testovaný vzorek 1

4.5 Vyhodnocení výsledků

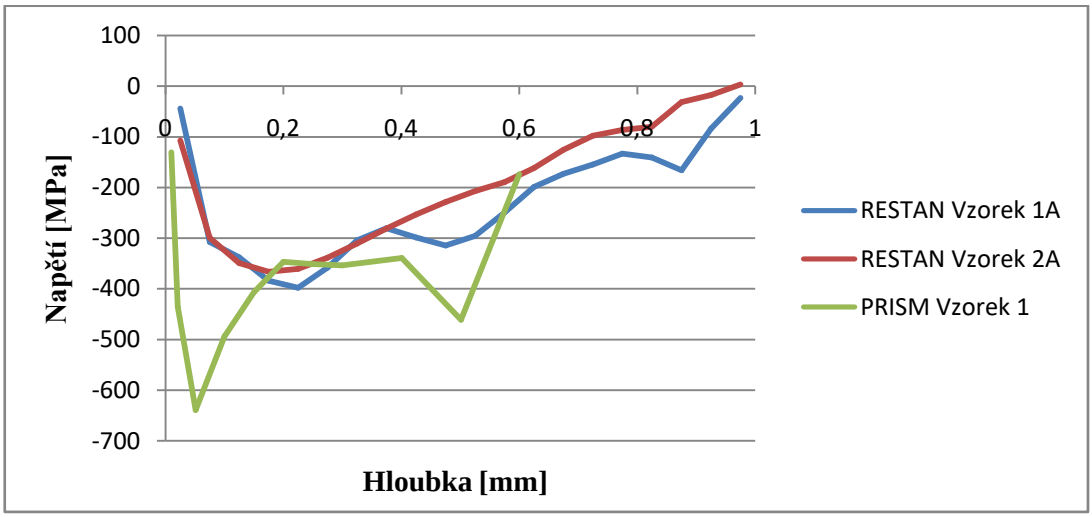
Výsledky byly vyhodnoceny na základě naměřených hodnot maximálního (S_{max}) a minimálního (S_{min}) napětí sigma v závislosti na hloubce odvrtaného otvoru. Měření prováděné systémem RESTAN MST3000 bylo prováděno do hloubky 1 mm, zatímco měření pomocí systému PRISM bylo provedeno pouze do hloubky 0,6 mm. Proto je výsledky možné porovnávat pouze do této hloubky. Z grafů znázorňujících porovnání měření na jednotlivých vzorcích je vidět, že vzorky měřené systémem RESTAN vykazují víceméně stejný průběh, měření tímto systémem je tedy dobře opakovatelné, vzorek měřený systémem PRISM vykazuje na hloubce od 0 do 0,2 mm a od 0,4 do 0,6 mm hodnoty napětí vyšší v řádu až několika stovek MPa. Na intervalu od 0,2 do 0,4 mm jsou naměřené hodnoty srovnatelné s hodnotami naměřenými systémem RESTAN.

Srovnání maximálních hodnot napětí sigma je zobrazeno na *Grafu č. 1*. Při tomto srovnání se průběh napětí u vzorků 1A a 2A lišil jen velmi nepatrně, největší rozdíl je zhruba 80 MPa a to v hloubce 0,875 mm. Oproti tomu největší rozdíl mezi vzorky 1A , 2A a vzorkem 1 byl přibližně 433 MPa v hloubce 0,125 mm. U vzorků RESTAN bylo maximální dosažené napětí přibližně -309 MPa v hloubce 0,175mm, poté se napětí s drobnými odchylkami zmenšovalo, až se opět vrátilo k nulové hodnotě a zhruba od hloubky 0,875 mm bylo dosaženo kladných hodnot. U vzorku PRISM bylo dosaženo hodnoty -576 MPa a to v hloubce 0,051 mm. Rozdíl byl měřen mezi PRISM vzorkem 1 a průměrnou hodnotou vzorků RESTAN 1A a 2A.



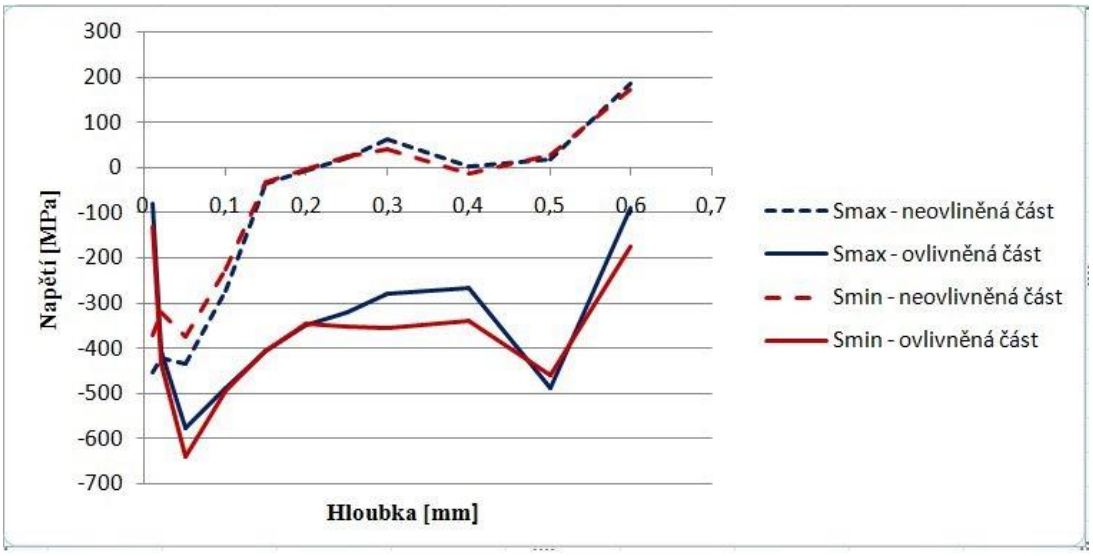
Obr. 19 Graf č. 1 znázorňující průběh S_{max}

Hodnoty minimálního napětí sigma byly porovnány v *Grafu č. 2.* Zde byl rozdíl mezi vzorky 1A a 2A větší, avšak můžeme tuto metodu stále považovat za velmi dobře opakovatelnou – maximální rozdíl byl přibližně 134 MPa a to v hloubce 0,875 mm, stejně jako v *Grafu č. 1*. Maximální rozdíl mezi vzorky 1A, 2A a vzorkem 1 byl přibližně 449 MPa. U vzorků RESTAN bylo maximální dosažené napětí přibližně -398 MPa v hloubce 0,225 mm, poté se napětí s drobnými odchylkami zmenšovalo, až se opět vrátilo k nulové hodnotě. Oproti tomu u vzorku PRISM bylo dosaženo maximální hodnoty -639 MPa a to v hloubce 0,051 mm. Rozdíl byl opět měřen mezi průměrnou hodnotou vzorků RESTAN 1A a 2A a PRISM vzorkem 1.



Obr. 20 Graf č. 2 znázorňující průběh S_{min}

Graf č. 3 porovnává hodnoty napětí naměřené na ploše ovlivněné pomocí LSP a na ploše neovlivněné na PRISM vzorku 1. Rozdíl ve velikosti naměřeného napětí sigma mezi ovlivněnou a neovlivněnou plochou se začíná projevovat už od hloubky 0,021 mm, kde naměřený rozdíl je 113 MPa a to u hodnot S_{min}, největší rozdíl byl naopak naměřen u hodnot S_{max} a to v hloubce 0,501 mm, kde byl rozdíl okolo 505 MPa. Na neovlivněné části povrchu bylo dosaženo maximálního napětí u hodnot S_{max} a to -455 MPa v hloubce 0,01mm, zatímco v ovlivněné části povrchu bylo naměřeno maximální napětí u hodnot S_{min} a to -639 MPa v hloubce 0,051.



Obr. 21 Graf č. 3 zobrazující porovnání napětí na ploše ovlivněné a neovlivněné pomocí LSP

4.6 Porovnání obou systémů z ekonomického hlediska

Při porovnávání jednotlivých systémů z hlediska ekonomické výhodnosti jde především o náklady spojené s pořízením daného systému, náklady na jednotlivá měření a časovou náročnost jednotlivých měření. Výběr vhodného stroje z daných variant bylo provedeno pomocí tzv. mezní dávky (*Graf č. 4*). Porovnání obou systémů z pohledu celkových nákladů v závislosti na počtu měření se počítá podle vzorce:

$$N_C = N_n + N_z d \ ,$$

kde $\mathbf{N_C}$ jsou celkové náklady na daný počet měření v Kč, $\mathbf{N_n}$ náklady nezávislé na počtu kusů v dávce – pořizovací cena, u systému PRISM je pořizovací cena 2 miliony

Kč a u systému RESTAN 1 milion Kč, $\mathbf{N_z}$ jsou náklady závislé na počtu měření – u systému PRISM je na jedno měření potřebná jedna fréza, jejíž cena se pohybuje od 15 do 25 € za kus, což je zhruba 390 až 650 Kč (počítáno s kurzem 1EUR=26 Kč), pro výpočet byla použita střední hodnota 20 €, tedy 520 Kč, u systému RESTAN je na jedno měření potřeba jedna fréza a jedna tenzometrická růžice, jejíž cena je 20 €, tedy 650 Kč a d je počet měření. Provedení jednoho měření trvá přibližně 20 minut pomocí systému PRISM a 40 minut pomocí systému RESTAN.

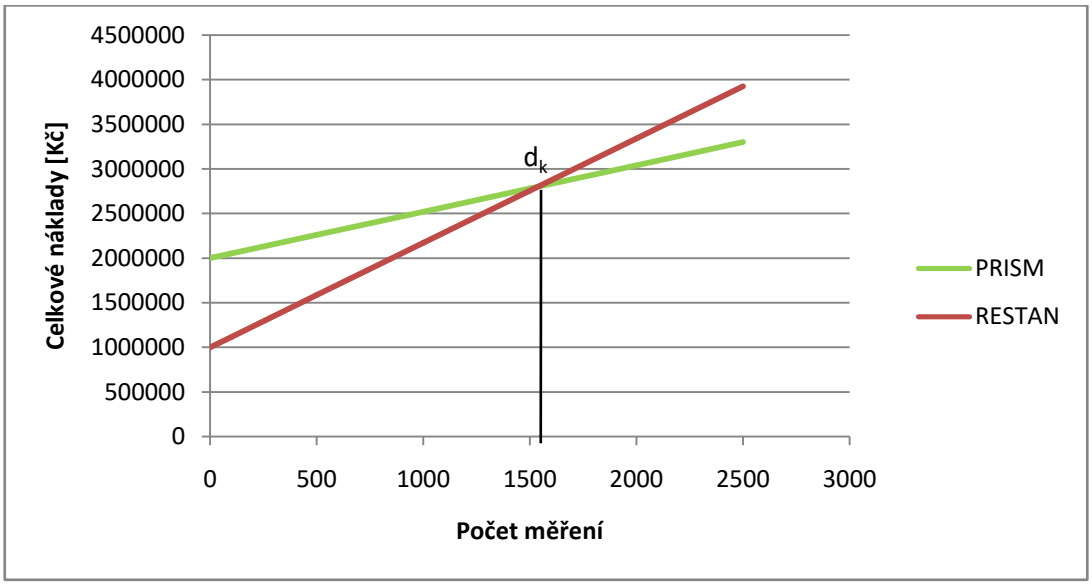
Pro určení mezní dávky je nutné použít vzorec:

$$d_K = \frac{N_{n2} - N_{n1}}{N_{z1} - N_{z2}}$$

Kde N_{n2} jsou pořizovací náklady systému PRISM, N_{n1} jsou pořizovací náklady systému RESTAN, N_{z1} jsou náklady spojené s jedním měřením systémem RESTAN a N_{z2} jsou náklady spojené s jedním měřením systémem PRISM.

$$d_K = \frac{2000000 - 1000000}{(520 + 650) - 520} = 1539$$

Dosazením do tohoto vzorce zjistíme, že mezní dávka, od které je systém PRISM finančně výhodnější než systém RESTAN je 1539 měření.



Obr. 22 Graf č. 4 určení mezní dávky

5 Závěr

Porovnáním výsledků naměřených na části povrchu, který nebyl ovlivněn metodou LSP s výsledky získanými na části povrchu ovlivněném pomocí LSP potvrdily přínosnost této metody při vytvrzování povrchové vrstvy materiálu.

Měření pomocí systému RESTAN se ukázalo jako dobře opakovatelné a bez větších výkyvů. Avšak kvůli nutnosti aplikace tenzometrické růžice pro každé měření je použití toho systému náročné na čas a v případě většího počtu měření se i přes svoji nižší pořizovací cenu stává finančně nevýhodným.

Systém PRISM vyhodnocuje výsledná zbytková napětí pomocí porovnávání obrázků před vrtáním s jednotlivými obrázky po každém odvrtávacím kroku, díky čemuž zde není potřeba aplikovat tenzometrické růžice a proto ani není zapotřebí tak důkladná předúprava povrchu zkoumaného vzorku jako u systému RESTAN. Výsledný čas jednoho měření se díky tomu zkrátí až na polovinu a celkové náklady na měření tak s rostoucím počtem měření kompenzují vyšší pořizovací náklady.

Na základě porovnání výsledků měření pomocí jednotlivých metod, nebylo možné jednoznačně určit, který z použitých systémů je pro naše využití lepší, proto bylo nutné tyto systémy porovnat také z hlediska ekonomického. Výsledkem tohoto srovnání bylo zjištění, že systém PRISM, je oproti systému RESTAN rychlejší, jednodušší na přípravu zkoumaného vzorku a při předpokladu, že bude provedeno minimálně 1500 měření pomocí vybraného systému i finančně výhodnější.

Na základě dosažených výsledků bylo doporučeno pořízení systému PRISM a systém byl objednán a čeká se na jeho doručení na příslušné pracoviště.

6 Přílohy

Příloha č. 1 – Protokol měření systémem RESTAN

Příloha č. 2 – Protokol měření systémem PRISM

7 Citovaná literatura

[1] **KACHTÍK, L.** Laser a vše o něm. *Princip laseru.* [Online] http://lasery.wz.cz.

[2] **KUSALA, J.** Lasery kolem nás. *Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE.* [Online] 2004. https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm.

[3] **VRBOVÁ, M, JELÍNKOVÁ, H a GAVRILOV, P.** *Úvod do laserové techniky.* PRAHA : ČVUT, 1998.

[4] **AMBROŽ, P.** Optimalizace parametrů tepelného zpracování laserem vybraných typů ocelí. *Diplomová práce.* Praha : ČVUT, 2008.

[5] **ŠVÁBEK, R.** Optimalizace parametrů tepelného zpracování laserem u vybraných typůocelí. *Diplomová práce.* Praha : ČVUT, 2008.

[6] **LINTECH, s.r.o.** lintech.cz. *Co je laserová technologie?* [Online] [Citace: 20. 06. 2017.] http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie.

[7] **CHANTADA, A, a další.** Increasing the hydrophobicity degree of stonework by means of laser surface texturing: An application on Zimbabwe black granites. *Applied Surface Science.* [Online] 2017. [Citace: 23. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433216329282. 01694332.

[8] **JIANG, M, a další.** Large scale layering laser surface texturing system based on high speed optical scanners and gantry machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.* [Online] 2017. [Citace: 23. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584516302800. 07365845.

[9] **LINTECH, s.r.o.** lintech.cz. *Laserové popisování.* [Online] [Citace: 15. 06. 2017.] http://www.lintech.cz/laserove-popisovani.

[10] **LASER, Therm.** lasertherm.cz. *Laserové kalení.* [Online] 2017. [Citace: 08. 03. 2017.] http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/.

[11] **LIVERANI, E, a další.** A complete residual stress model for laser surface hardening of complex medium carbon steel copomnents. *Surface and Coatings Technology.* [Online] 2016. [Citace: 04. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0257897216304509. 02578972.

[12] **GE, Mao-Zhong a XIANG, Jian-Yub.** Effect of laser shock peening on microstructure and fatigue crack growth rate of AZ31B magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology.* [Online] 2016. [Citace: 04. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838816311586. 09258388.

[13] **HILASE.** hilase.cz. *Laser Shock Peening.* [Online] 2016. http://www.hilase.cz/nabizime-2/zpevnovani-povrchu-materialu-razovou-vlnou-laser-shock-peening-lsp/.

[14] **ZHOU, J.Z., a další.** Effects of laser peening on residual stresses and fatigue crack growth properties of Ti–6Al–4V titanium alloy. *Optics and Lasers in Engineering.* [Online] 2014. [Citace: 23. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816613001978. 01438166.

[15] **GANEV, N a KRAUS, I.** xray.cz. *Rentgenová difrakční technika měření makroskopických zbytkových napětí.* [Online] 2002. http://www.xray.cz/ms/bul2002-2/ganev.pdf.

[16] **SILVERSTEIN, R a ELIEZER, D.** Effects of residual stresses on hydrogen trapping in duplex stainless steels. *Materials Science and Engineering: A.* [Online] 2017. [Citace: 04. 06. 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509316315301. 09215093.

[17] **ODBOR, Termomechaniky technologických procesů.** Termomechanika technologických procesů. *Odvrtávací metoda (metoda otvoru).* [Online] ZČU Plzeň, 2000-2015. https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkova-napeti/detaily-metody.

[18] **MAHMOUDI, A.H. a SAEI, A.** Influence of asymmetrical cuts in measuring residual stresses using contour method. *InternalJournal of Pressure Vessels and Pipings.* [Online] 2015. [Citace: 4. Červen 2017.] http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308016115000824. 03080161.

[19] **doc. Ing. ČEP, R Ph.D.** Speciální a experimentální metody v obrábění. *Zbytková povrchová napětí po obrábění.* [Online] http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_12.pdf.

[20] **ŠIMEČEK, J.** Oddělení povrchového inženýrství. *Integrita povrchu a její význam v praktickém využití - Možnosti měření a měřící metody.* [Online] https://www.opi.zcu.cz/download/integrita_Simecek2.pdf.

[21] **Ing. Zemčík, O.** vutium.vutbr.cz. *Změna vlastností oběžných drh valivých ložisek po aplikaci válečkování.* [Online] http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2131-2.pdf.

[22] **Doc. Dr. Ing. KŘÍŽ, A.** Oddělení povrchového inženýrství. *Strojírenské materiály.* [Online] https://www.opi.zcu.cz/Nikl_titan.pdf.

[23] **SINT, Technology.** residualstressmeasurement.com. *Residual Stressmeasurment - MTS300 Restan.* [Online] http://www.residualstressmeasurement.com/files/63-Restan_MTS3000_2014.pdf?t=1423152880863.

[24] —. sint-technology.com. *MTS 3000.* [Online] http://sint-technology.com/mts-3000/#av_section_2.

[25] **HBM.** hbm.com. *Experimental residual stress analysisusing the hole-drilling method on plastic materials.* [Online] https://www.hbm.com/en/4359/tips-and-tricks-experimental-residual-stress-analysis-using-the-hole-drilling-method-on-plastic-materials/.

[26] **STRESSTECH, Group.** stresstech.com. *PRISM Equipment.* [Online] http://www.stresstech.com/en-fi/products/espi-hole-drilling-equipment/prism-equipment/#.

[27] —. Ast.stresstechgroup.com/. *Prism - Residual stress measurement based on hole-drilling and ESPI.* [Online]http://ast.stresstechgroup.com/content/94567/en/1034/1460/1460.html.