

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vliv metody laser shock peening na vybrané materiálové  
vlastnosti**

**Effect of Laser shock peening method on selected material  
properties**

**AUTOR: Filip Štefaník**

**STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství**

**VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jan Brajer, Ph.D.**

**PRAHA 2020**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štefaník** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **473566**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Vliv metody laser shock peening na vybrané materiálové vlastnosti**

Název bakalářské práce anglicky:

**Effect of Laser shock peening method on selected material properties**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešeršní činnost - interakce laserového záření s materiálem, průmyslové technologie dokončování, použití laseru při zpracování materiálu rázovou vlnou.
- 2) Seznámení s experimentálním zařízením HiLASE, Fyzikální ústav Akademie věd.
- 3) Sestavení experimentu, příprava vzorků, zajištění zpracování vzorků.
- 4) Experimentální práce - Měření zbytkového napětí v povrchové vrstvě, metalografická studie struktury a měření tvrdosti povrchové vrstvy.
- 5) Zpracování získaných výsledků a jejich diskuse.
- 6) Závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] 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.  
[2] PEYRE, R., SCHERPEREEL, P., BERTHE, X., FABBRO, L. Current trends in laser shock processing. Surf. Eng. 1998, 14, 377–380.  
[3] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Brajer, Ph.D., HiLASE centrum, Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.**

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


**doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Jan Brajer, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

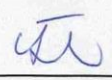
  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
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.

4/16/2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## **Prohlášení**

**Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.**

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

**V Praze dne: .....**

.....

**Podpis**



## Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Brajerovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce, cenné rady, připomínky k jejímu vypracování a za umožnění měření v laboratořích HiLASE. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Ladislavu Cvrčkovi, Ph. D. za pomoc s organizací experimentální části v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní ČVUT v Praze, za pomoc s přípravou vzorku a s vyhodnocením snímků struktury. Také bych chtěl poděkovat Saninu Zuličovi, MSc. za pomoc s měřením zbytkového napětí, Ing. Eleně Čižmárové, Ph. D. za pomoc s přípravou vzorku, Ing. Janu Krčilovi a Ing. Vladimíru Márovi za pomoc s experimentální částí. Nakonec bych chtěl poděkovat svým rodičům za jejich podporu během studia.



## Anotace

<b>Autor:</b>	Filip Štefaník
<b>Název:</b>	Vliv metody laser shock peening na vybrané materiálové vlastnosti
<b>Rozsah práce:</b>	44 str., 33 obr., 5 tab.
<b>Akademický rok vyhotovení:</b>	2019/2020
<b>Škola:</b>	ČVUT v Praze – Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	Ú12132 – Ústav materiálového inženýrství
<b>Vedoucí bakalářské práce:</b>	Ing. Jan Brajer, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.
<b>Klíčová slova:</b>	laser, dokončovací metody, materiálové vlastnosti, laser shock peening
<b>Anotace:</b>	Práce se zabývá metodou úpravy povrchu laser shock peening a jejím vlivem na vybrané materiálové vlastnosti. Teoretická část pojednává o laseru, běžných metodách úpravy povrchu, integritě materiálu a metodě laser shock peening. V rámci experimentální části byla provedena měření zbytkového napětí, tvrdosti povrchové vrstvy a zdokumentována struktura povrchu upraveném metodou laser shock peening.



# Annotation

<b>Author:</b>	<b>Filip Štefaník</b>
<b>Title of bachelor dissertation:</b>	<b>Effect of Laser shock peening method on selected material properties</b>
<b>Extent:</b>	<b>44 p., 33 fig., 5 tab.</b>
<b>Academic year:</b>	<b>2019/2020</b>
<b>University:</b>	<b>CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering</b>
<b>Department:</b>	<b>Ú12132 – The Department of Materials Engineering</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Ing. Jan Brajer, Ph.D.</b>
<b>Consultant:</b>	<b>doc. Ing. Ladislav Cvrček, Ph.D.</b>
<b>Key words:</b>	<b>laser, finishing methods, material properties, Laser shock peening</b>
<b>Annotation:</b>	<b>Thesis deals with the method of surface improvement Laser shock peening and its influence on selected material properties. A theoretical part deals with laser, casual finishing methods, material integrity and method Laser shock peening. In experimental part was performed measurement of residual stress, hardness of surface layer and documented surface structure influenced by method Laser shock peening.</b>



# Obsah

1	Úvod.....	10
2	Laser.....	11
2.1	Princip funkce laseru.....	11
2.2	Využití laseru.....	12
3	Metody dokončování povrchu.....	13
3.1	Metody s úběrem materiálu.....	13
3.1.1	Broušení.....	13
3.1.2	Jemné obrábění.....	13
3.1.3	Honování.....	14
3.1.4	Superfinašování.....	14
3.1.5	Lapování.....	15
3.1.6	Leštění.....	15
3.1.7	Tryskání.....	15
3.1.8	Omílání.....	16
3.2	Metody bez úběru materiálu.....	16
3.2.1	Hlazení.....	17
3.2.2	Válečkování.....	17
3.2.3	Kalibrování.....	18
3.2.4	Tryskání.....	18
3.2.5	Vibrační zpevnění.....	19
4	Integrita povrchu materiálu.....	20
4.1	Zbytkové napětí.....	20
4.1.1	Rentgenová difrakce.....	20
4.1.2	Odvrtávání.....	21
4.1.3	Odleptávání.....	22
4.1.4	Neutronová difrakce.....	22
4.2	Tvrдость.....	22
4.2.1	Metoda podle Vickerse.....	22
4.2.2	Metoda podle Rockwella.....	23
4.2.3	Metoda podle Brinella.....	24
5	Materiál – AISI 304 (X5CrNi18–10, 17 240).....	25
6	Laser shock peening.....	26



6.1	Princip metody.....	26
6.2	Výsledné vlastnosti upraveného materiálu .....	27
6.3	Použití metody LSP .....	27
7	Experimentální část .....	28
7.1	Měřený vzorek.....	28
7.2	Měření zbytkového napětí.....	28
7.2.1	Postup měření zbytkového napětí .....	28
7.2.2	Změřené hodnoty zbytkového napětí .....	30
7.3	Měření průběhu tvrdosti .....	31
7.3.1	Postup měření tvrdosti .....	31
7.3.2	Změřené hodnoty tvrdosti .....	33
7.4	Zobrazení struktury.....	34
8	Vyhodnocení výsledků .....	37
8.1	Zbytkové napětí.....	37
8.2	Tvrdost.....	37
8.3	Struktura .....	38
9	Závěr .....	39
	Seznam obrázků .....	40
	Seznam tabulek .....	41
	Bibliografie .....	41





## Seznam použitých symbolů a zkratk

LSP .....	laser shock peening
IT .....	stupeň přesnosti
Ra .....	střední aritmetická úchylnka povrchu
Ø .....	průměr
Rm .....	mez pevnosti v tahu
Rp 0,2 .....	smluvní mez kluzu v tahu
A .....	tažnost



# 1 Úvod

Kvalita povrchu má velký vliv na výsledné vlastnosti součásti, ať už se jedná o čistě estetickou záležitost, nebo odolnost součásti proti cyklickému namáhání, které nejčastěji způsobuje její selhání. K ovlivnění vlastností povrchu se používají dokončovací metody. Mezi běžně používané patří například honování, leštění, válečkování či tryskání. Kromě těchto konvenčních existují rovněž metody, které i přes své příznivé vlastnosti nejsou široce uplatněné, a to především z ekonomických a technologických důvodů.

Mezi tyto neobvyklé metody patří i laser shock peening (dále LSP). Při využití této metody je k úpravě povrchu použit laserový paprsek o vysoké energii a je jím dosaženo účinku podobného jako například při konvenční metodě kuličkování. Součást upravená LSP se stává odolnější proti cyklickému namáhání, kavitaci, korozi pod napětím a opotřebením. Zatím se uplatňuje především v letectví a jaderném průmyslu, ale pomalu začíná pronikat i do dalších oblastí výroby strojních součástí.

Malá známost metody byla jedním z hlavních důvodů, proč jsem si toto téma vybral pro svojí bakalářskou práci, dále to bylo kvůli touze pracovat na něčem novém a možnosti spolupráce s laserovým centrem HiLASE, které je součástí Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.

Cílem bakalářské práce je seznámit čtenáře s metodou LSP, a to s jejím principem, celkovým ovlivněním povrchu a současnými aplikacemi metody. Dále teoretická část pojednává o laseru, konvenčních metodách dokončování povrchu, integritě povrchu a kratší kapitola je rovněž věnována korozivzdorné oceli AISI 304 (X5CrNi18–10, ČSN 17 240), na níž byla metoda LSP aplikována.

Dalším cílem bakalářské práce je změřit vybrané vlastnosti povrchu zpracovaném metodou LSP, konkrétně zbytkové napětí a tvrdost, a zaznamenat strukturu ovlivněného povrchu a následně výsledky patřičně vyhodnotit a vyvodit z nich závěry.

## 2 Laser

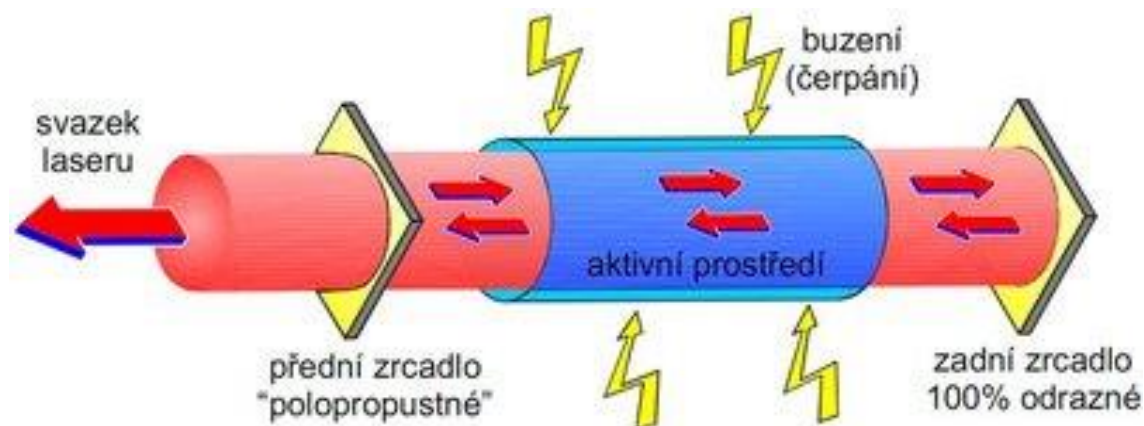
Za teoretický základ funkce laseru je považována teorie stimulované emise fotonů Alberta Einsteina z roku 1916, ale až na konci 50. let přišlo hned několik vědců (**Charles Hard Townes**, Arthur Leonard Schawlow, **Genadijevič Basov**, **Alexandr Michajlovič Prochorov** a Gordon Gould) s konceptem laseru. Tři z nich (zvýrazněni) dostali za tento objev v roce 1964 Nobelovu cenu. První funkční prototyp zkonstruoval v roce 1960 americký vědec a inženýr Theodore Harold Maiman. Od té doby se laserové technologie začaly prudce rozvíjet a dnes patří mezi jednu z nejrychleji se rozvíjejících oblastí [1].

### 2.1 Princip funkce laseru

Laser funguje na principu stimulované emise fotonů, ke které dochází v aktivním prostředí, to může být pevného, kapalného nebo plynného skupenství. Elektrony atomů a molekul aktivního prostředí (Obrázek 1) jsou buzeny na vyšší energetickou hladinu a při opětovném sestoupení na nižší energetickou hladinu vyzáří foton o určité vlnové délce [1; 2].

Tyto vyzářené fotony jsou shromažďovány mezi dvěma zrcadly (Obrázek 1), kde prochází aktivním prostředím, čímž dochází ke vzniku dalších fotonů, jejichž počet exponenciálně roste. Jedno zrcadlo je dokonale odrazivé a druhé je polopropustné, to při dosažení určité energie fotonů propustí elektromagnetické záření. Vyzářené záření je koherentní (má stejnou frekvenci, stejný směr kmitání a stejnou fázi) a monochromatické (má jednu vlnovou délku) [1; 2].

Při zapnutí laseru musí dojít k původnímu vybuzení elektronů aktivního prostředí, čehož se dosahuje elektricky, chemicky, opticky, expanzí horkého plynu, bombardováním elektronového svazku a dalšími metodami [1].



Obrázek 1 – Schéma principu funkce laseru [2]



## 2.2 Využití laseru

Pro jejich příznivé vlastnosti, jako je stabilní a přesně definované parametry vyřazovaného paprsku a schopnost soustředit velké množství energie na malé ploše, mají laserové technologie široké uplatnění. Ve strojírenství se lasery používají, například ke svařování, řezání, vrtání, soustružení, frézování, značení, povrchovému kalení a gravírování. Dále se laserů hojně využívá v medicíně, například k operaci očí, hemeroidů, prostaty, ledvinových kamenů, kožních nádorů, mateřských znamének dále se používají ve stomatologii a při rehabilitacích. Další velkou oblastí využití laserů je v elektrotechnice, kde se používají například pro zápis informací (CD, DVD, Blue-ray), výrobu polovodičů, měření vzdáleností, čtení čárových kódů a vojenské účely (zaměření cílů) [2; 3; 4; 5].

## 3 Metody dokončování povrchu

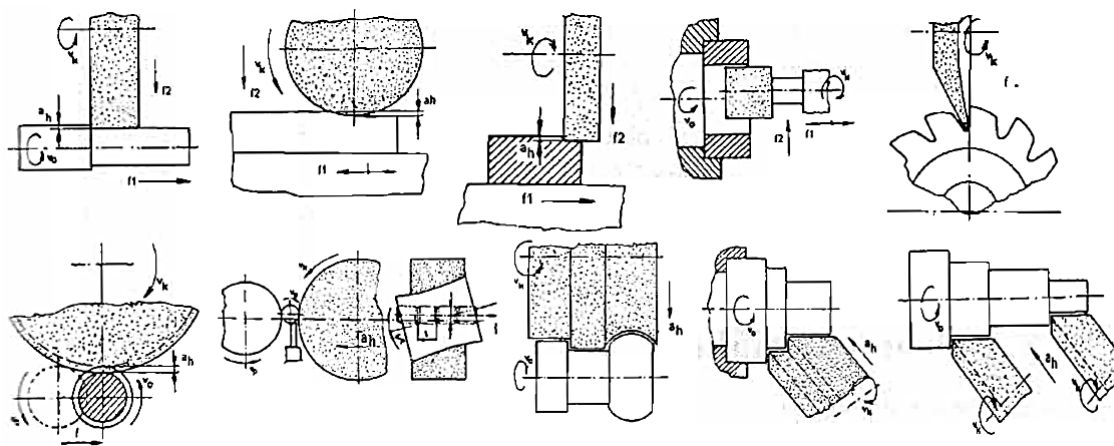
Tyto metody jsou poslední obráběcími operacemi, při nichž dosahujeme požadovaných vlastností výrobku, například rozměrové a geometrické tolerance, drsnosti, povrchové parametry (tvrdost, odolnost proti únavě atd.), kvality povrchu a vzhledu. Neexistuje univerzální metoda, a proto je musíme kombinovat, pokud chceme dosáhnout požadovaných vlastností. Tyto metody můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, a to na metody s úběrem materiálu a na metody bez úběru materiálu [3].

### 3.1 Metody s úběrem materiálu

Základním principem metod s úběrem materiálu je odebrání povrchové vrstvy materiálu, která bývá nevyhovující po předchozím technologickém zpracování (trhlínky, změny struktury, tvarové a rozměrové nepřesnosti vzniklé tepelným zpracováním a další). Z toho důvodu je potřeba počítat s přídatkem na obrábění [3].

#### 3.1.1 Broušení

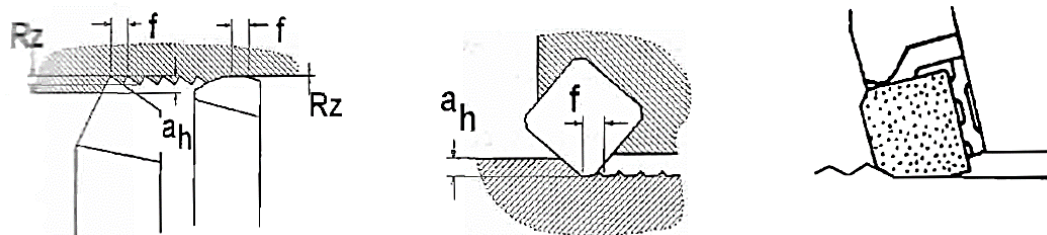
Broušení je jednou z nejstarších a nepoužívanějších metod úpravy povrchu, která se může použít jako základní předúprava před dalšími metodami dokončování povrchu nebo i jako finální metoda. Vyznačuje se velkou řeznou rychlostí ( $20\text{--}200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), velkým úhlem řezu a třískami malých průřezů, z čehož vyplývají vysoké teploty v místě záběru ( $300\text{--}1000\text{ °C}$ ), a proto je většinou nezbytné použití řezné kapaliny. Broušení je velice variabilní metoda (Obrázek 2) s širokou škálou brousících kotoučů různých tvarů celistvých i složených z několika částí, případně je možné použít brousící pás [3; 6].



Obrázek 2 – Schémata příkladů broušení [3]

#### 3.1.2 Jemné obrábění

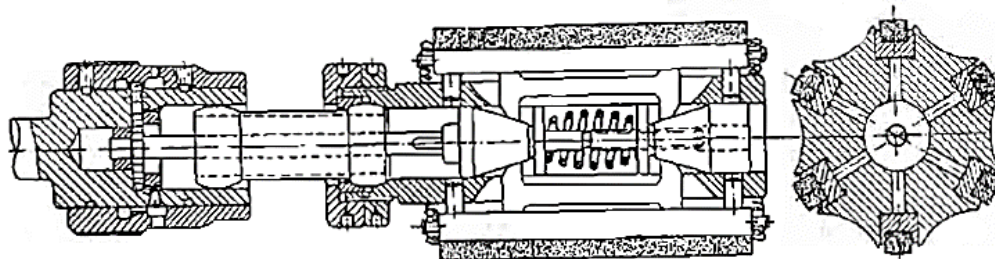
Při jemném obrábění je odebrána tříska o malém průřezu, nebo je použit nástroj s malým úhlem nastavení vedlejšího ostří ( $1^\circ\text{--}2^\circ$ ), či s velkým poloměrem špičky (Obrázek 3) a kvalitním břitem. Dosahované hodnoty povrchu jsou  $R_a = 0,4\text{--}0,8\text{ }\mu\text{m}$  a IT 5–6 [3; 6].



Obrázek 3 – Schéma jemného obrábění [3]

### 3.1.3 Honování

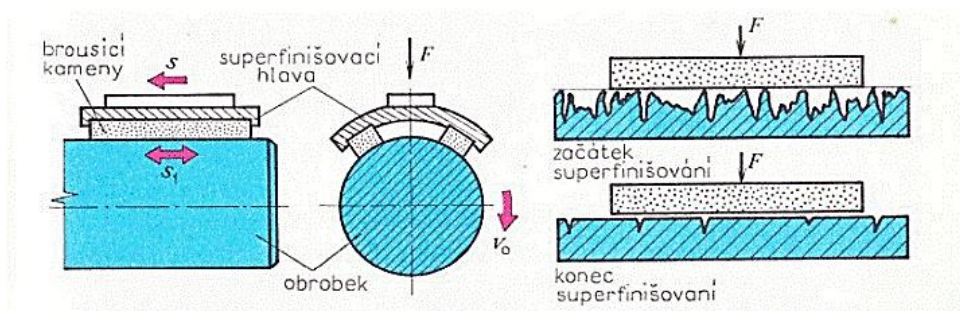
K obrábění se využívají honovací kameny (Obrázek 4), které vykonávají zároveň rotační a vratný posuvný pohyb. Honováním je možné opravit ovalitu, kuželovitost a osovou křivost děr. Dosahované parametry jsou  $R_a = 0,025\text{--}0,5\ \mu\text{m}$  a IT 3–5. Využívá se především k dokončování vnitřních i vnějších válcových ploch, například válce spalovacích motorů, hydraulické prvky, vedení ventilů a šoupátek [3; 6].



Obrázek 4 – Schéma honovací hlavy [3]

### 3.1.4 Superfinašování

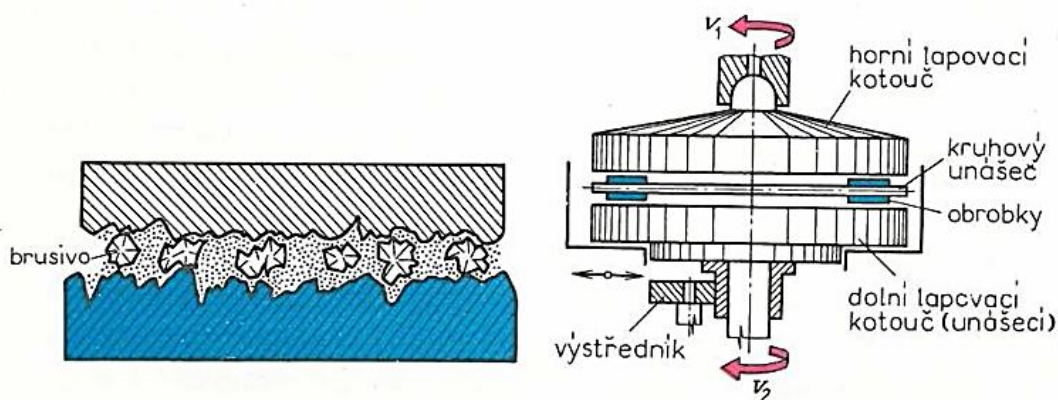
Materiál je odebrán superfinašovacími kameny (Obrázek 5), které kmitají v desítkách Hz a amplitudě 2–6 mm. Obráběná součást koná rotační pohyb, jehož osa rotace je kolmá na pohyb kamenů, pod něž je přiváděná rezná kapalina – většinou olej nebo petrolej, případně jejich směs. Kameny jsou vyráběny z korundu, kubického nitridu bóru či diamantového prášku a jejich tvar je určen podle tvaru obráběné plochy. Superfinašováním lze dosáhnout  $R_a = 0,05\text{--}0,1\ \mu\text{m}$  a vlnitosti menší než  $0,1\ \mu\text{m}$ . Takto obráběny jsou hřídele, klikové hřídele, pístní čepy, dříky ventilů, oběžné dráhy kroužků ložisek a další [3; 6].



Obrázek 5 – Schéma superfinašování [6]

### 3.1.5 Lapování

Materiál obrábí zrna volného brusiva (Obrázek 6), která jsou obsažena v kapalině (petrolej) nebo pastě, přítomné mezi obrobkem a nástrojem, který zrny pohybuje po povrchu, při čemž dochází k odřezávání mikronerovností, či jejich plastické deformaci. Nástroje jsou převážně z perlitické litiny, mědi, olova, plastické hmoty nebo jiného měkkého materiálu, do něhož se zrna mohou dobře zamáčknot. Při velmi jemném lapování se používá nástroj tvrdě chromovaný nebo kalený. Tvar nástroje odpovídá negativu obráběného povrchu. Brusivo bývá nejčastěji umělý korund, dále se používá karbid křemíku, karbid bóru, diamantový prášek, kubický nitrid bóru a pro velmi jemné lapování oxid chromitý, oxid železitý nebo vídeňské vápno. Výsledná kvalita povrchu se pohybuje v rozmezí IT 1–6 a  $R_a = 0,005–0,4 \mu\text{m}$  [3; 6].



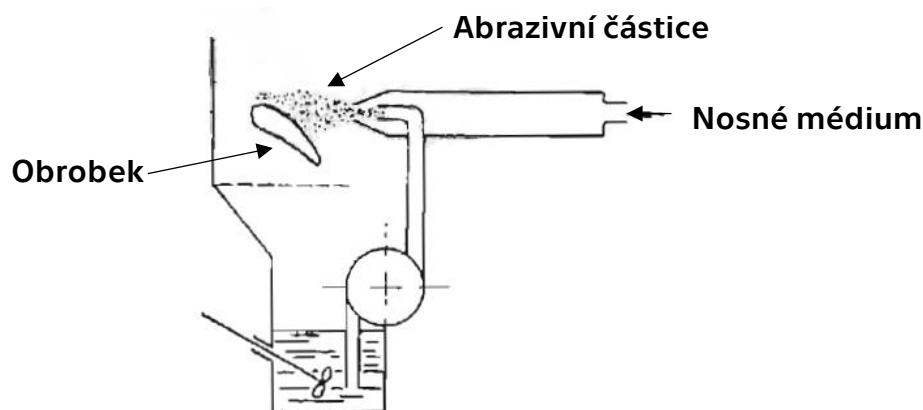
Obrázek 6–Schéma lapování [6]

### 3.1.6 Leštění

Tato metoda se používá v případech, kdy jsou malé požadavky na přesnost rozměrů, ale důležitým parametrem je lesklý povrch. Cílem operace je odstranění stop po předchozích operacích s minimálním materiálovým úběrem, kdy v prvních fázích povrch obrábí brousící zrna o velké zrnitosti (80–600) a na závěr jsou vrcholky nerovností pomocí tepla a tlaku plasticky deformovány [3; 6].

### 3.1.7 Tryskání

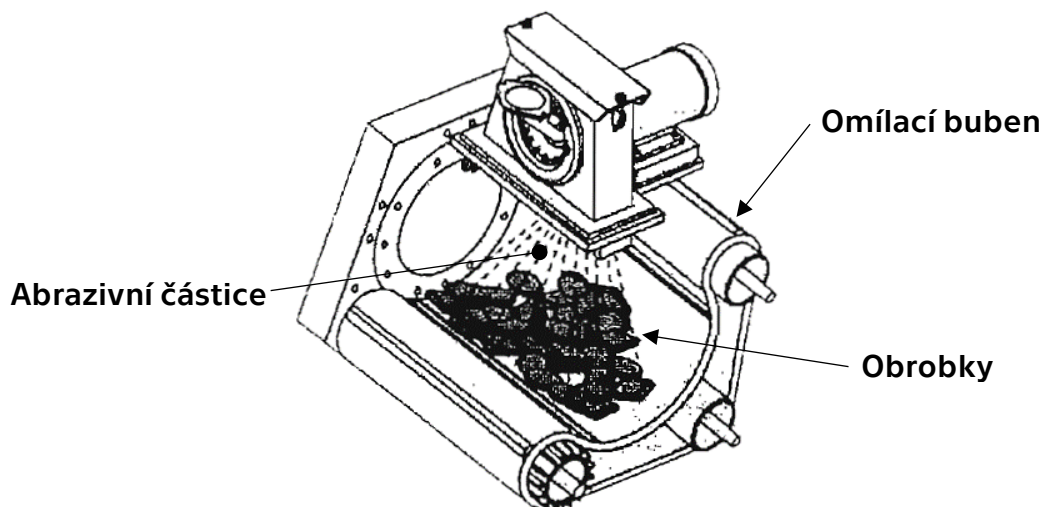
Úběr materiálu způsobují dopadající částice s vysokou rychlostí (Obrázek 7), čímž dojde ke zlepšení vzhledu, drsnosti  $R_a = 0,1–0,8 \mu\text{m}$  a dále k mírnému zpevnění povrchu bez jeho tepelného ovlivnění. Pro dopravu částic (křemičitý písek, zrna brousících materiálů nebo kovové částice) se používá nosné médium převážně stlačený vzduch nebo kapalina. [3; 6].



Obrázek 7–Schéma tryskání [3]

### 3.1.8 Omílání

Obrobek je obráběn pohybem abrazivních částic v omílacím bubnu (Obrázek 8). Tato metoda je velice produktivní a hodí se pro menší součástky bez požadavku na přesnost. Výsledné parametry povrchu jsou závislé na zvolených parametrech jako například pohybu bubnu a jeho tvaru, typu částic, tvaru součástky a dalších. V některých případech (malé obrobky – matice, podložky ...) nejsou abrazivní částice potřeba [3; 6].



Obrázek 8–Omílací buben [3]

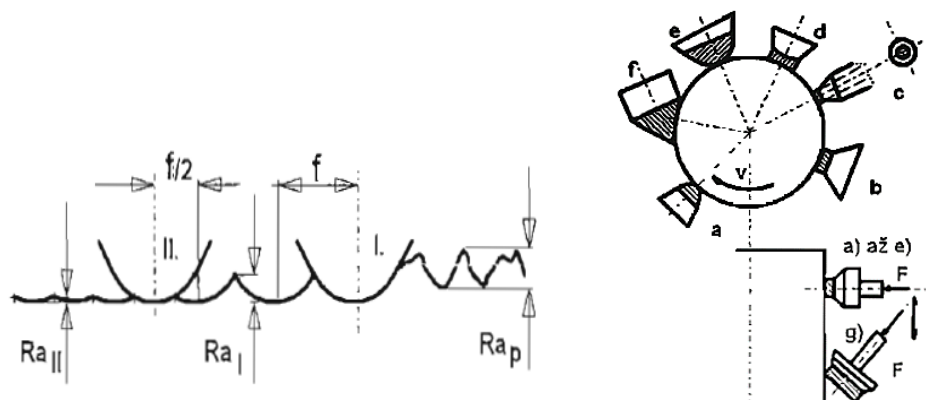
## 3.2 Metody bez úběru materiálu

Při těchto metodách je povrch upravován plastickou deformací, pokud je prováděna za studena dochází ke zlepšení kvality povrchu, například k jeho zpevnění, zmenšení jeho drsnosti a ke vnesení tlakového zbytkového pnutí, které odstraňuje nepříznivé účinky předchozích operací, zvyšuje odolnost proti únavě, otěru, korozi a též zvyšuje tvrdost povrchu [3].



### 3.2.1 Hlazení

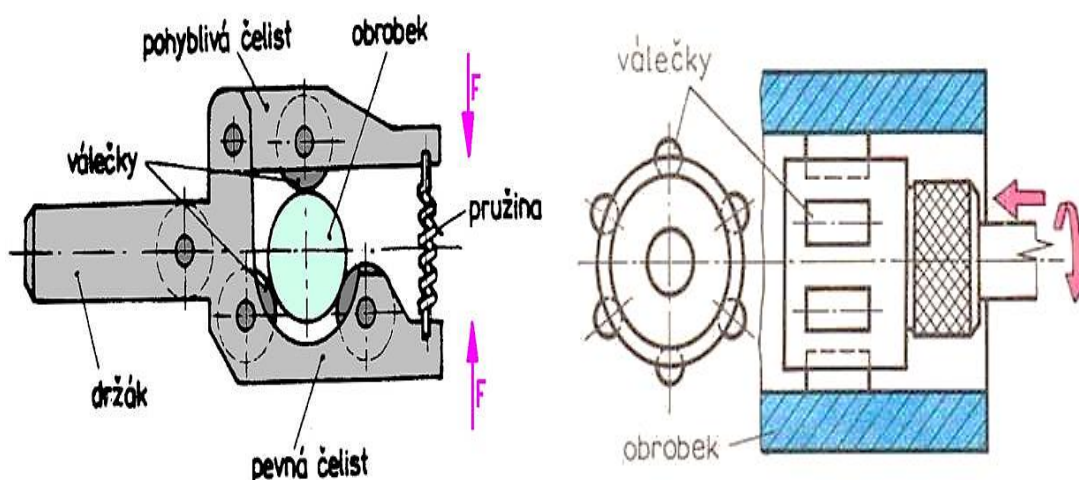
Na obráběnou součást je přitlačováno tvářecí tělísko (Obrázek 9) a zároveň dochází k vzájemnému pohybu, čímž je docíleno plastické deformace povrchu. Tělísko bývá z kalené oceli, slinutého karbidu, spékaného korundu, kubického nitridu bóru či syntetického diamantu. Povrch je nutné chladit kvůli teple vznikajícího třením. Dosahovaná drsnost je  $Ra = 0,1-0,4 \mu\text{m}$  a zpevněná vrstva má tloušťku  $0,1-0,5 \mu\text{m}$  [3].



Obrázek 9–Schéma hlazení [3]

### 3.2.2 Válečkování

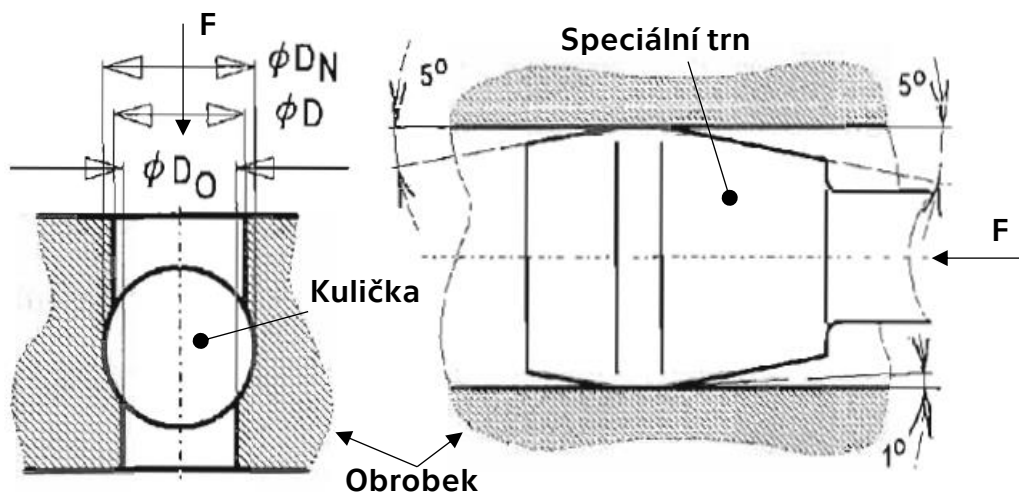
Po povrchu součástky je valeno otočné tvářecí tělísko (Obrázek 10), které způsobuje tvářecí síly až 400 000 N. Výsledkem je plastická deformace povrchu do hloubky až 10 mm, drsnost  $Ra = 0,005-0,4 \mu\text{m}$  a IT 4–7. Tato metoda se používá na rotační plochy, rovinné plochy, zápichy, drážky, závity a další. Tvářecí tělíska bývají z podobných materiálu jako tělíska pro vyhlazování [3; 6].



Obrázek 10–Schéma vnějšího a vnitřního válečkování [6]

### 3.2.3 Kalibrování

Plastická deformace je způsobena pohybem tvářecího elementu, který je větší než obráběný vnitřní rozměr. Při obrábění vnějších ploch se používá tvářecí element menší než obráběný rozměr. Jako tvářecí element se používá kulička (Obrázek 11), speciální trn (Obrázek 11), objímka nebo hladicí zuby protahovacího nástroje. Operace má za následek zpřesnění rozměrů IT 4–6, zlepšení drsnosti  $R_a = 0,005–0,4 \mu\text{m}$  a ke zpevnění do hloubky 0,05–0,2 mm [3; 6].



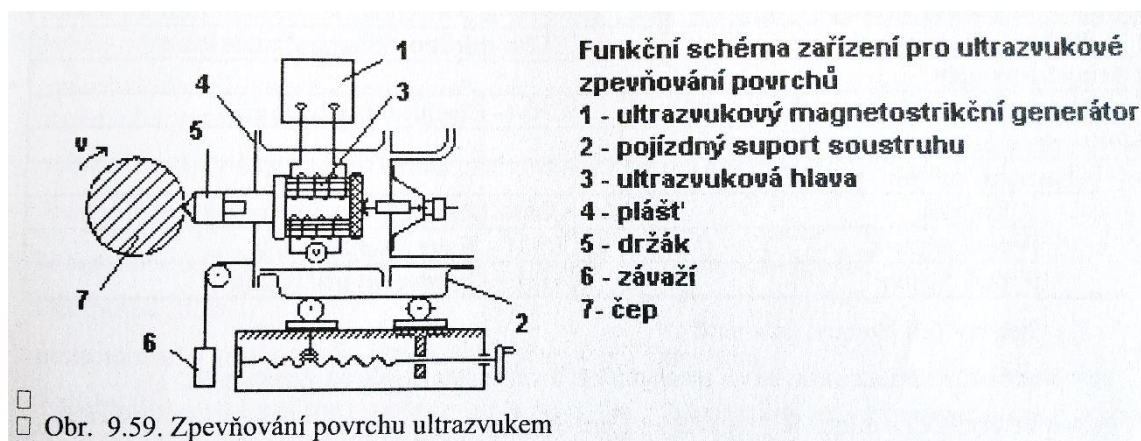
Obrázek 11–Schéma kalibrování kuličkou a speciálním trnem [3]

### 3.2.4 Tryskání

Plastickou deformaci vyvolávají dopadající kulovité částice, které dopadají pod velkým úhlem ( $50^\circ–80^\circ$ ), díky čemuž téměř neodebírají žádný materiál, ale pouze zpevňují povrch, a to do hloubky 0,05–0,5 mm. Výsledné  $R_a$  povrchu se pohybuje v rozmezí 0,4–0,8  $\mu\text{m}$ , ale v případě postupného zvětšování částic a snižování tlaku můžeme dosáhnout  $R_a$  až 0,1  $\mu\text{m}$ . Nejčastěji používané jsou kuličky o  $\varnothing$  0,3–5 mm z oceli (kuličkování) nebo z cementitické tvrzené litiny (brokování), další možností je sekaný ocelový drát (patentování) nebo skleněné kuličky o  $\varnothing$  0,03–0,8 mm (balotinování) [3; 6].

### 3.2.5 Vibrační zpevnění

Povrch materiálu je plasticky deformován pomocí vibrací, a to mechanicky nebo ultrazvukem (Obrázek 12). Mechanický způsob je podobný omílání s tím rozdílem, že částice nemají abrazivní účinek a měli by mít co největší hmotnost, proto se používají ocelové nebo litinové kuličky. Při ultrazvukovém vibračním zpevnění se používají vibrace o vysoké frekvenci (až 30 kHz), které vykonává buď to pevný nástroj, anebo ocelové kuličky, které přenáší vibrace [3].



Obrázek 12 – Schéma ultrazvukového zpevnění [3]

## 4 Integrita povrchu materiálu

Do integrity povrchu patří velké množství vlastností, které ovlivňují výslednou kvalitu povrchu. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny nejen aktuálním stavem povrchu, který je způsobený používáním součástky, ale berou v potaz i předchozí technologické operace. Jelikož 90 % poškození součástí je způsobeno cyklickým namáháním, při kterém vznikají trhliny nejčastěji v povrchové vrstvě, je výsledný stav povrchu velice důležitý [7; 8].

Minimální soubor dat by měl obsahovat informace o materiálu, jeho tvrdosti a metalografickém stavu, parametry procesu, drsnost povrchu Ra, snímek povrchu a průběh příčné tvrdosti. Standardní soubor dat by měl dále obsahovat průběh profilu zbytkového napětí, vysokocyklovou Wöhlerovu křivku a základní mez únavy [8].

### 4.1 Zbytkové napětí

Zbytková napětí vznikají v materiálu v případě, že dojde k jeho plastické deformaci. Ta může být způsobena jednak silovým působením na materiál (namáhání součástky, technologické operace, ...), anebo teplotním působením. Napětí zůstávají v materiálu i po skončení příčiny deformace, dokud nejsou uvolněna (porušení materiálu, žíhání, ...). Zbytková napětí mohou být tlaková, která při správné aplikaci mohou například zlepšovat únavové vlastnosti a jsou do materiálu úmyslně vnášena, například kuličkováním (strana 18) či metodou Laser shock peening (strana 26). Naproti tomu tahová zbytková napětí jsou nežádoucí, jelikož mohou iniciovat vznik trhlin, způsobovat korozi pod napětím a zhoršují únavové vlastnosti materiálu. Z těchto důvodů je třeba měřit průběhy zbytkových napětí, k čemuž se využívá několik metod [7; 9].

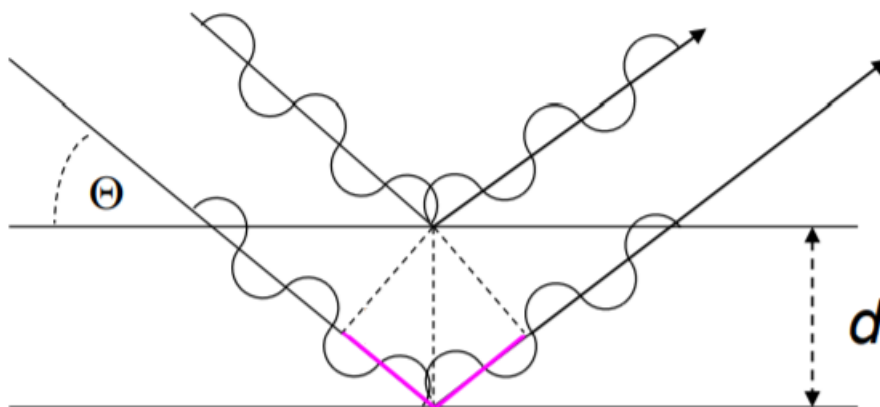
#### 4.1.1 Rentgenová difrakce

Působením zbytkového napětí se mění vzdálenost atomových mřížkových rovin. K měření se používá monochromatický zdroj rentgenového záření a mění se úhel dopadajícího záření. Pro takové úhly dopadu splňující Braggovu rovnici:

$$2d \sin \theta = n\lambda,$$

kde  $d$  je vzdálenost atomových mřížkových rovin (Obrázek 13),  $\theta$  je úhel dopadu (Obrázek 13),  $n$  je celé číslo a  $\lambda$  je vlnová délka rentgenového záření, dojde k interferenci záření. Následně je možné určit zbytková napětí v materiálu [10; 11; 12].

Výhodou této metody je, že povrch před měřením není potřeba nijak speciálně upravit. Jelikož kovové materiály hodně absorbují vyzařované záření, je možné změřit zbytkové napětí pouze v povrchové vrstvě. Pro měření hlouběji pod povrchem je potřeba postupně odstraňovat povrchové vrstvy, například odleptáváním [10; 11].

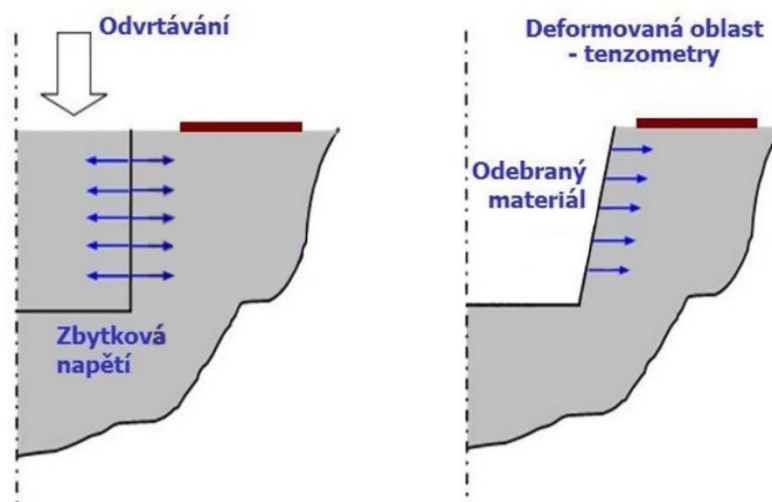


Obrázek 13–Princip rentgenové difrakce na atomové mřížce [12]

#### 4.1.2 Odvrtávání

Při této metodě je v materiálu odvrtán malý otvor (Obrázek 14), k čemuž se nejčastěji používá malá fréza, případně je možné využít abrazivní trysku, laserový paprsek či elektrojiskrové odvrtávání. V místě otvoru se uvolní zbytkové napětí, které způsobí jeho deformaci (Obrázek 14). Deformace je poté zaznamenána pomocí tenzometrické růžice nebo optickou metodou. Ze zjištěných deformací jsou poté za použití kalibračních koeficientů dopočítána zbytková napětí. Kalibrační koeficienty je možné odvodit, ale jelikož ve většině praktických aplikacích nejsou splněny základní předpoklady odvození, musí se určit experimentálně nebo nejčastěji numericky [13].

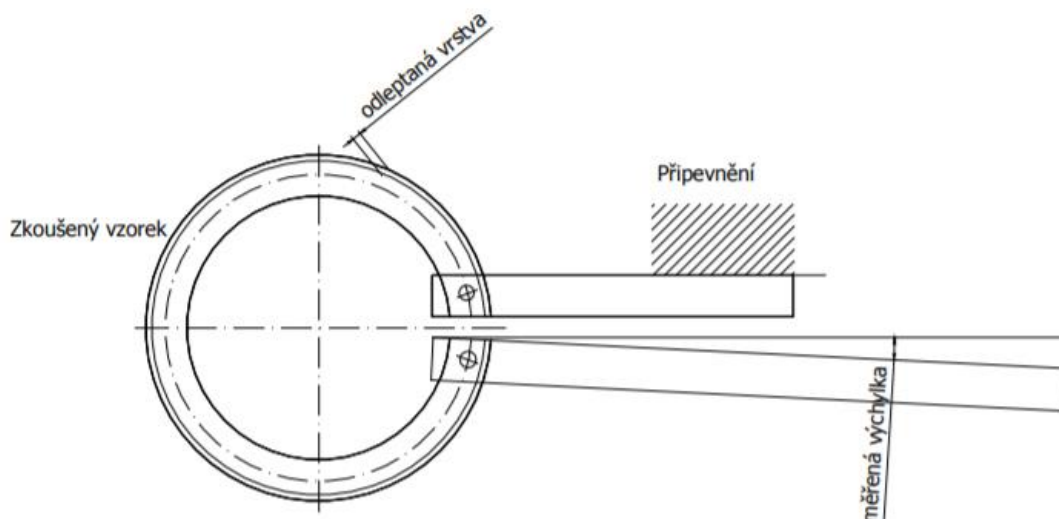
Běžně se měří do hloubky 1–2 mm, jelikož pro větší hloubky klesá přesnost měření. Výhodou této metody je její rychlost a jednoduchost. Dalšími výhodami je minimální poškození měřeného povrchu a široké uplatnění metody, například po tepelném zpracování, úpravě povrchu, svařování, obrábění, tvorbě povlaků, vrstvených kompozitů a v další případech [13].



Obrázek 14–Princip odvrtávací metody [13]

### 4.1.3 Odleptávání

Povrchová vrstva materiálu je odleptána (Obrázek 15), čímž se uvolní zbytkové napětí, které způsobí deformaci měřené součásti (Obrázek 15). Napětí je poté spočítáno z pružnostní teorie křivého prutu. Výhodami metody jsou její jednoduchost, dostupnost a nízká cena, nevýhodou je nižší přesnost oproti jiným metodám [11].



Obrázek 15–Schéma odleptávací metodou [11]

### 4.1.4 Neutronová difrakce

Materiál je bombardován neutronovým svazkem, při dopadu na krystalovou mřížku dochází k difrakci neutronů, z čehož se dá podobně jako u rentgenové difrakce určit zbytkové napětí. Díky své velké hmotnosti jsou neutrony schopné oproti rentgenovému záření pronikat do velkých hloubek materiálu, běžně 15 mm u hliníkových slitin až 50 mm. Další výhodou této metody je možnost zkoumat větší plochu materiálu najednou. Nevýhodami jsou nižší přesnost z důvodu velkého rozptylu neutronů, obtížné měření menších vzorků a složité získávání neutronů, jelikož jejich zdrojem jsou jaderné reaktory a urychlovače částic [11].

## 4.2 Tvrdost

Tvrdost je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Nelze jednoznačně definovat, jelikož závisí na použité metodě a na podmínkách měření. Výhodami měření tvrdosti jsou jejich rychlost, nízká cena a minimální ovlivnění materiálu, a proto je možné jejich provedení již na hotových výrobcích. Mezi nejvíce používané patří metody podle Vickerse, Rockwella a Brinella, při kterých je vtlačováno předepsané těleso (indentor) do materiálu [14].

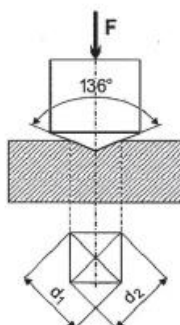
### 4.2.1 Metoda podle Vickerse

U této metody je jako indentor použit pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$  (Obrázek 16), který je do materiálu vtlačen

předepsanou zátěžnou silou po dobu 10–15 s. Po odlehčení jsou změřeny úhlopříčky vtisku (Obrázek 16), spočítána jejich průměrná hodnota a dosazena do vztahu:

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2},$$

kde  $d$  [mm] je průměrná délka uhlopříček a  $F$  [N] je zátěžná síla. Vypočtená hodnota se zapisuje ve tvaru například 220 HV 0,1/25, což znamená, že tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,1 kp (1 kilopond = 9,81 N) při zatížení po dobu 25 s (udává se, pokud je doba zatěžování jiná než 10–15 s) je 220 [14; 15].



Obrázek 16–Princip metody podle Vickerse [14]

#### 4.2.2 Metoda podle Rockwella

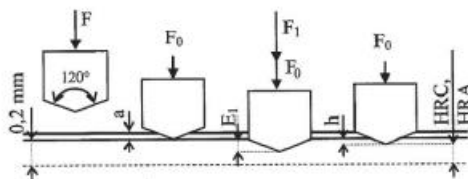
Tato metoda má 15 stupnic, které si liší indentorem a použitým zatížením (příklady Tabulka 1), principiálně jsou ale stejné (Obrázek 17). Nejprve je indentor vtlačován předběžným zatížením  $F_0$  [N], čímž je potlačen vliv povrchové vrstvy. Následně se zvýší zátěž o přídavné zatížení  $F_1$  [N], takže na indentor působí celkové zatížení  $F$  [N] ( $F = F_0 + F_1$ ). Po ustálení indentoru se sníží zatížení na hodnotu přídavného a po ustálení se určí hloubka vtisku  $h_3$  [mm]. Výsledná tvrdost se poté určí ze vztahu:

$$HR = E - h_3,$$

kde  $E$  je konstanta závislá na použité stupnici a  $h_3$  [mm] je změřená hloubka vtisku. Tvrdost se poté zapisuje ve tvaru výsledná hodnota HR a typ stupnice například 76 HRB [14; 15].

Tabulka 1–Stupnice tvrdosti dle Rockwella [14; 15]

Stupnice tvrdosti	Indentor	Zatížení			Konstanta E
		Předběžné $F_0$ [N]	Přídavné $F_1$ [N]	Celkové $F$ [N]	
A	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	100
B	kulička 1,587 mm	98,07	882,6	980,7	130
C	diamantový kužel	98,07	1 373	1 471	100
D	diamantový kužel	98,07	882,6	980,7	100



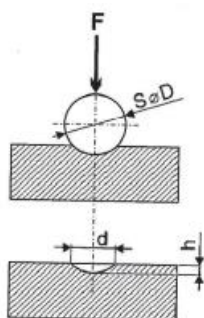
Obrázek 17–Princip metody podle Rockwella [14]

### 4.2.3 Metoda podle Brinella

Jedna z nejstarších metod měření tvrdosti, která se dodnes používá. Jako indentor se používá kulička o průměrech 1; 2,5; 5 a přednostně 10 mm pro tvrdé materiály především ze slinutých karbidů (HBW), pro měkké materiály z kalené nebo normální oceli. Princip metody (Obrázek 18) spočívá ve vtlačování kuličky po dobu nejčastěji 10–15 s předepsaným zatížením, aby se průměr vtisku nacházel v rozmezí 0,24–0,6 průměru indentoru. Po odlehčení se změří průměr vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech, z nichž se určí průměrná hodnota. Výsledná tvrdost se poté určí ze vztahu:

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

kde  $F$  [N] je předepsané zatížení,  $D$  [mm] je průměr indentoru a  $d$  [mm] je průměrný průměr vtisku. V zápisu se poté udává kromě samotné tvrdosti ještě průměr indentoru, zatížení v kilopondech a délka zatěžování, pokud je jiná než 10–15 s například 550 HBW 5/700/25 (průměr 5 mm, zatížení 700 kp a délka 25 s) [14; 15].



Obrázek 18–Princip metody podle Brinella [14]



## 5 Materiál – AISI 304 (X5CrNi18–10, 17 240)

Korozivzdorná austenitická ocel AISI 304 je jednou z nejběžnějších a nejpoužívanější ocelí tohoto typu. Vyznačuje se dobrou svařitelností, tažností za studena, ale je hůře obrobitelná. Odolává vodě, vodní páře, slabým kyselinám a povětrnostním podmínkám kromě přímořského prostředí. V oblasti svaru je náchylná k mezikrystalové korozi. Materiál je tepelně zpracován rozpouštěcím žháním při teplotách 1000–1100 °C, čímž se rozpustí karbidy, které vznikly při odlévání a následných tvářecích operacích a které zhoršovali odolnost oceli proti korozi, a poté je ochlazen ve vodě či rychle na vzduchu [16; 17; 18; 19].

Běžně se využívá na kuchyňské nádobí, vnější svařované konstrukce, zdravotnická zařízení a nástroje, v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu a dalších oblastech [16].

Tabulka 2–Složení oceli AISI 304 [20]

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
%	≤0,07	≤1	≤2	≤0,045	≤0,03	18	9

Tabulka 3–Základní mechanické vlastnosti oceli AISI 304 [17]

Rm [MPa]	Rp 0,2 min. [MPa]	A min. [%]
520–720	210	45

## 6 Laser shock peening

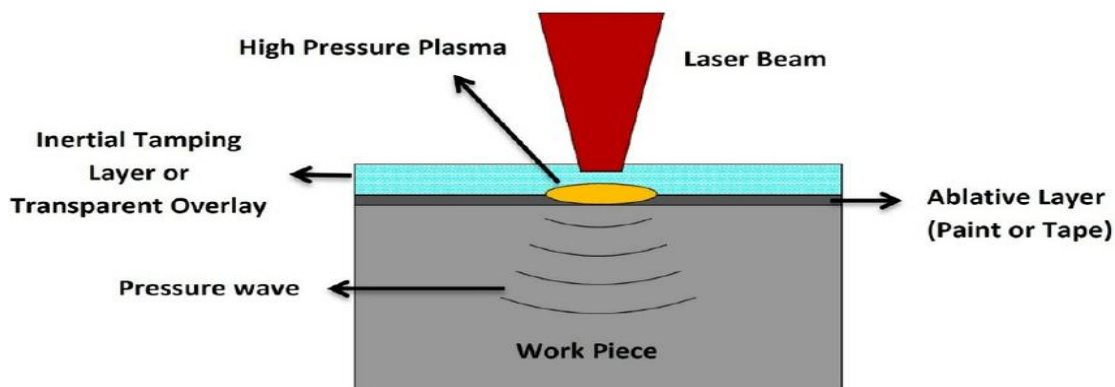
Laser shock peening (dále LSP) je jedna z aktuálně nejprogresivnějších metod dokončování povrchu bez úběru materiálu. K úpravě povrchu je využíván laser (strana 11) o velké energii pulsu, ale s velice krátkou dobou pulsu (desítky ns). Do povrchu materiálu je vneseno tlakové zbytkové napětí (strana 20), čímž dochází ke zvýšení odolnosti proti únavě, korozi pod napětím, kavitaci a dalším, podobný účinek mají i jiné konvenční metody, například kuličkování (strana 18), ale oproti němu je hloubka zpevnění až desetinásobná. Touto metodou lze zpracovat slitiny železa, hliníku, titanu, niklu a mnohé další [21; 22].

### 6.1 Princip metody

Před samotnou metodou se pro zvýšení účinnosti na povrch nanese dvě vrstvy (Obrázek 19) – ablační vrstva (hliník, měď, zinek, černá páska nebo barva a další), která lépe absorbuje dopadající puls a chrání materiál před poškozením, a transparentní vrstva (nejčastěji voda, případně křemen, sklo, plexisklo a další). Pokud mírné poškození materiálu nevádí, ablační vrstva se nemusí použít [22; 23; 24].

Na povrch materiálu se nechá dopadat laserový puls (Obrázek 19), který prochází transparentní vrstvou, dopadá na ablační vrstvu nebo samotný materiál a část ho odpaří. Zbytek energie pulsu přemění odpařenou látku na plazma (Obrázek 19) o vysokém tlaku a teplotě, které v materiálu vyvolá tlakovou vlnu (Obrázek 19). Transparentní vrstva zabrání plazmatu v rozptýlení se do okolí a tím zvýší její účinek na materiál [22; 23].

Tlaková vlna se materiálem šíří a plasticky ho deformuje, dokud její amplituda neklesne pod hodnotu dynamické meze kluzu materiálu. Plastická deformace způsobí nárůst deformačního zpevnění a tlakového zbytkového napětí v povrchové vrstvě [22; 23].



Obrázek 19–Schéma principu metody Laser shock peening [23]<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laser Beam – laserový paprsek, High Pressure Plasma – vysokotlaká plazma, Inertial Tamping Layer or Transparent Overlay – transparentní vrstva, Ablative Layer – ablační vrstva, Pressure wave – tlaková vlna, Work Piece – obrobek

## 6.2 Výsledné vlastnosti upraveného materiálu

Vnesené tlakové zbytkové napětí způsobí, že povrchové mikroskopické trhliny, které vznikly při předchozích operacích nebo během namáhání součásti, se zavírají, čímž se součást stává odolnější proti únavě a korozi pod napětím. Tento efekt společně s deformačním zpevněním dále brání poškození materiálu kavitací a opotřebením. Po úpravě metodou LSP se může snížit drsnost povrchu, zvýší se jeho tvrdost a může se zjemnit jeho struktura při minimální tepelné ovlivnění materiálu [22; 23; 24; 25; 26].

## 6.3 Použití metody LSP

Povrch po úpravě LSP má velice příznivé vlastnosti, ale nevýhodou metody je zatím její vysoká cena, zejména náklady spojené s laserovým vybavením, a proto je využití metody omezené pouze na špičkové aplikace a je vhodná na malé oblasti, kde dochází k největšímu namáhání. Jednou z prvních oblastí, kde se začalo LSP uplatňovat je letectví a kosmonautika. V těchto oblastech se používá především na nosné konstrukce letadel a části motorů (například lopatky turbín), nejprve u vojenských letadel, například u stíhaček F-16 a F-18, později i u civilních letadel, například motory od firem Boeing a Airbus. Další oblastí použití metody jsou lopatky parních a plynových turbín. Díky zlepšení odolnosti proti kavitaci se dá použít na úpravu lopatek vodních turbín a čerpadel nebo na lodní šrouby. Obráběcí nože s povrchem upraveným LSP mají delší životnost a je u nich možné i pomocí LSP jejich oprava. Jako poslední příklad bych uvedl úpravu lékařských implantátů, ale existuje ještě řada dalších uplatnění a s dalšími se teprve experimentuje [22; 23].

## 7 Experimentální část

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo změřit vybrané materiálové vlastnosti vzorku zpracovaného metodou LSP, a to průběhy zbytkového napětí (strana 20) a tvrdosti povrchové vrstvy (strana 22). Po provedení měření byly ještě pořízeny snímky řezu materiálem pod metalografickým mikroskopem, kvůli zdokumentování struktury zpracovaného povrchu.

### 7.1 Měřený vzorek

K experimentální části byl použit válec o průměru 50 mm a výšce 11 mm z nerezové oceli AISI 304 (X5CrNi18–10, ČSN 17 240), který byl z jedné strany zpracován metodou LSP v laboratořích HiLASE v Dolních Břežanech. Zpracovaná oblast byla čtvercová o straně 20 mm.

### 7.2 Měření zbytkového napětí

První měření bylo provedeno v laboratořích HiLASE. Před měřením bylo třeba vzorek nastříkat bílou barvu (Obrázek 20), jelikož ke změření deformací byl použit laser a bylo třeba, aby byl vrtaný otvor oproti povrchu kontrastní.



Obrázek 20–Vzorek AISI 304 po ovlivnění technologií LSP před měřením zbytkového napětí

#### 7.2.1 Postup měření zbytkového napětí

Po zaschnutí barvy byl vzorek upnut do měřicího přístroje Prism od firmy Stresstech (Obrázek 21). Před každým měřením musela být zaostřena kamera, nastavena správná intenzita laserového paprsku a pomocí frézy odstraněna barva z místa měření, poté se fréza zasunula mimo záběr kamery a přístroj byl připraven k měření.

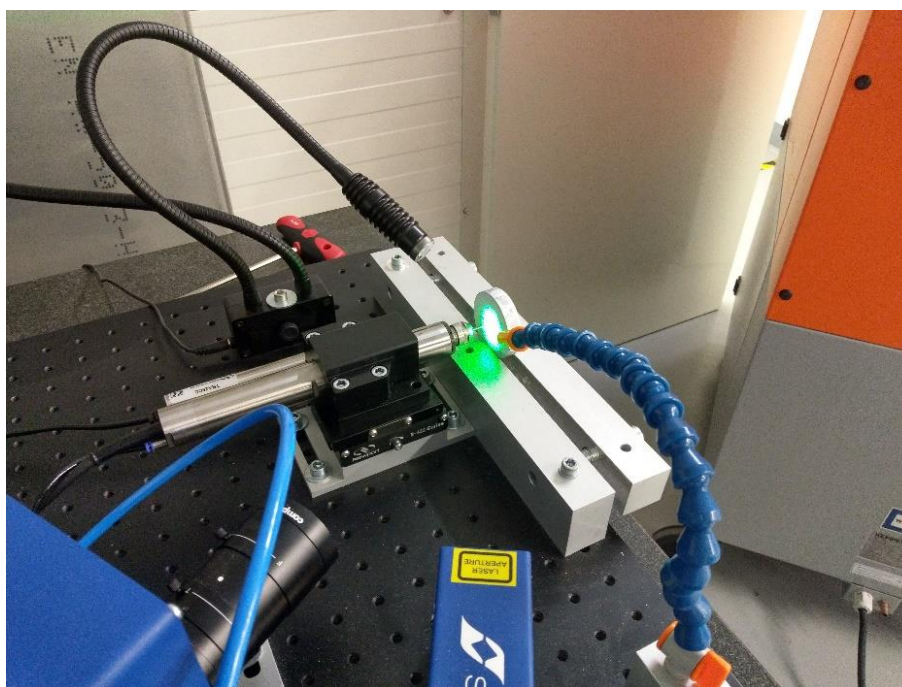
Měření (Obrázek 22) probíhalo plně automaticky. Nejprve byl vyfrézován otvor o nastavené hloubce, fréza se zasunula mimo záběr kamery, byl

zaznamenán otvor zdeformovaný uvolněnými zbytkovými napětími a poté se pokračovalo další nastavenou hloubkou. První hloubka otvoru byla nastavena na 0,05 mm, druhá 0,1 mm a další poté s krokem 0,1 mm až do hloubky 1 mm. Po dokončení frézování bylo určeno, kde na snímcích se nachází frézované otvory, a následně byla dopočítána zbytková napětí.

Jelikož z principu metody samotné není možné změřit hodnotu zbytkového napětí přímo na povrchu, byla povrchová hodnota změřena pomocí metody rentgenové difrakce též v laboratořích HiLASE.



Obrázek 21–Přístroj Prism od firmy Stresstech

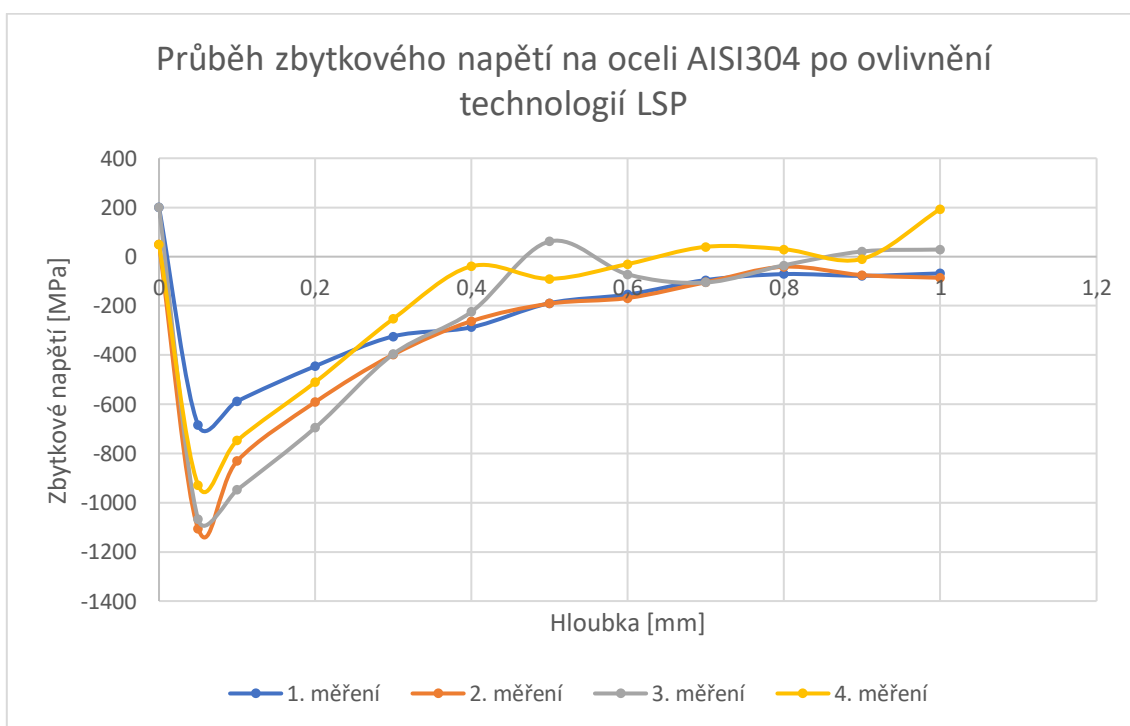


Obrázek 22–Detail měření zbytkového napětí

## 7.2.2 Změřené hodnoty zbytkového napětí

Tabulka 4–Naměřené hodnoty zbytkového napětí na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

Hloubka [mm]	Zbytkové napětí [MPa]			
	1. měření	2. měření	3. měření	4. měření
0	200	50	200	50
0,05	-684	-1105	-1067	-928
0,1	-588	-831	-948	-748
0,2	-445	-591	-695	-510
0,3	-324	-398	-396	-252
0,4	-287	-262	-224	-39
0,5	-189	-191	62	-90
0,6	-154	-168	-72	-30
0,7	-95	-104	-105	40
0,8	-71	-41	-35	30
0,9	-78	-75	21	-91
1	-68	-86	29	194

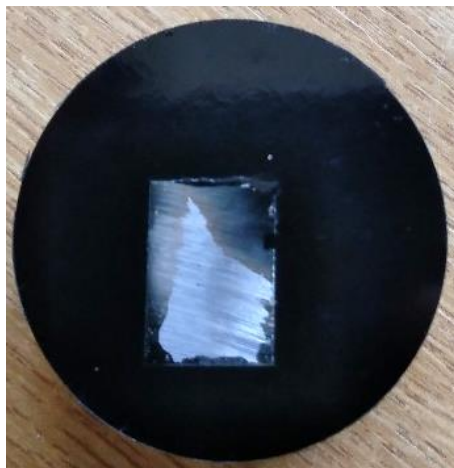


Obrázek 23–Naměřený průběh zbytkového napětí na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

Povrchová zbytková napětí zjištěná rentgenovou difrakcí byla pro všechna měření určena tahová (kladná) v intervalu  $<50,200>$  MPa. V hloubce 0,05 mm byla naměřena největší tlaková (záporná) zbytková napětí v intervalu  $<-1105,-684>$  MPa. Hlouběji do materiálu napětí klesají (Obrázek 23) a v hloubce přibližně 0,8 mm už jsou zanedbatelná.

## 7.3 Měření průběhu tvrdosti

Druhé měření se uskutečnilo v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství Fakulty strojní ČVUT v Praze. Před samotným měřením musel být vzorek připraven, nejprve byl rozřezán a následně zalisován do lisovací hmoty na bázi fenolové pryskyřice (Obrázek 24). Potom byl vzorek vybroušen a vyleštěn.



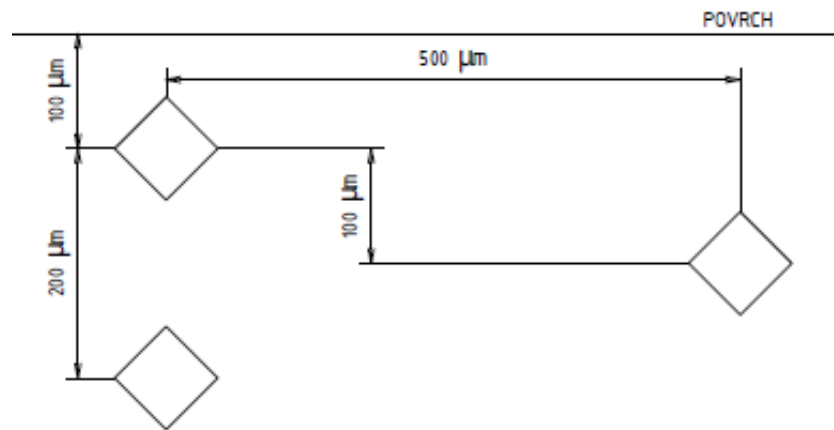
Obrázek 24–Vzorek oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP v lisovací hmotě před broušením a leštěním

### 7.3.1 Postup měření tvrdosti

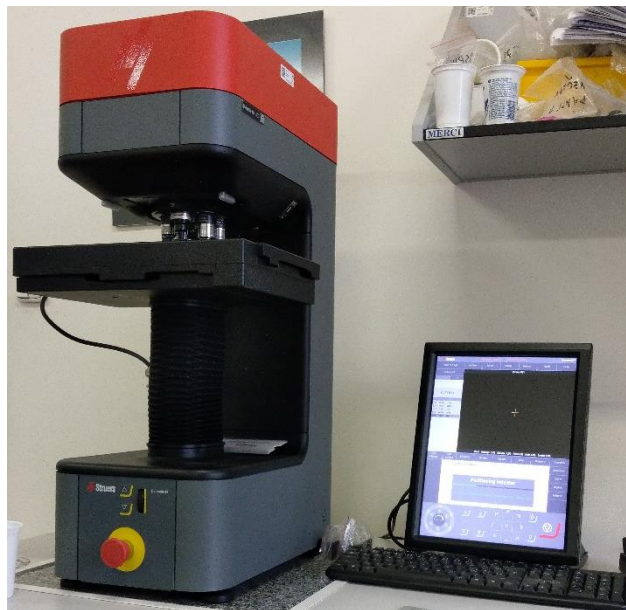
Vzorek byl umístěn do přístroje Duramin-40 od firmy Struers (Obrázek 26), který slouží k automatickému měření tvrdosti pomocí metod podle Vickerse (strana 22), Knoop a Brinella (strana 24). Pro měření byla zvolena metoda podle Vickerse při zatížení 1kp (9,81 N). Nejprve bylo potřeba nastavit rozložení vtisků (Obrázek 25), aby se navzájem neovlivňovali a nedocházelo tím ke vnesení nepřesnosti do výsledných hodnot.

Měření poté probíhalo automaticky. Indentor (čtyřboký pravidelný jehlan) byl zatížením 1 kp vtlačen do vzorku, poté se na tomto zatížení udrželo 15 s a po vytažení indentoru z materiálu byl vzniklý vtisk vyfotografován. Následně se pokračovalo dalším vtiskem a celkem bylo uděláno 20 vtisků.

Poté bylo třeba na fotografiích určit rohy vtisků, z čehož se vypočítala výsledná tvrdost. Celkem byla provedena čtyři měření při zatížení 1kp (HV1), tři na povrchu upraveném metodou LSP a jedno referenční na neupravené straně vzorku.



Obrázek 25–Schéma rozložení vtisků HV1



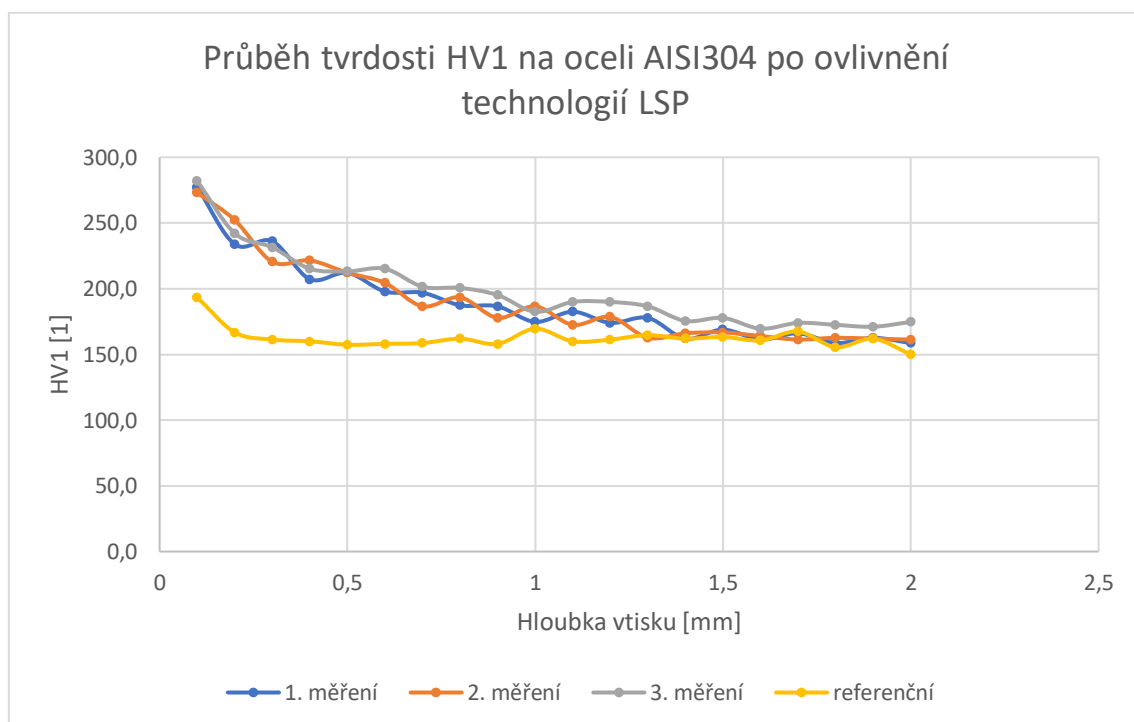
Obrázek 26– Automatický tvrdoměr Duramin 40 od firmy Struers určený k měření tvrdosti podle Vickerse, Knoop a Brinella



### 7.3.2 Změřené hodnoty tvrdosti

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty tvrdost HV1 na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

Hloubka vtisku [mm]	Tvrdost HV1 [1]			
	1. měření	2. měření	3. měření	referenční
0,1	277,4	273,0	282,1	193,4
0,2	233,8	252,2	242,2	166,8
0,3	236,1	220,4	231,5	161,3
0,4	207,2	221,5	215,2	160,0
0,5	212,2	212,2	213,2	157,4
0,6	197,9	204,3	215,2	158,0
0,7	197,0	186,6	201,5	158,7
0,8	187,4	193,4	200,6	162,0
0,9	186,6	177,8	195,2	158,0
1	174,8	186,6	182,4	169,6
1,1	182,5	172,5	190,0	160,0
1,2	174,0	178,5	189,9	161,3
1,3	177,8	162,6	186,6	164,7
1,4	162,0	166,1	175,5	162,0
1,5	168,9	166,8	177,8	163,3
1,6	161,3	164,0	169,6	160,6
1,7	166,1	161,3	174,0	167,5
1,8	158,7	162,6	172,5	155,5
1,9	162,6	162,0	171,1	162,0
2	158,7	161,3	174,7	149,9



Obrázek 27 – Naměřený průběh tvrdosti HV1 na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

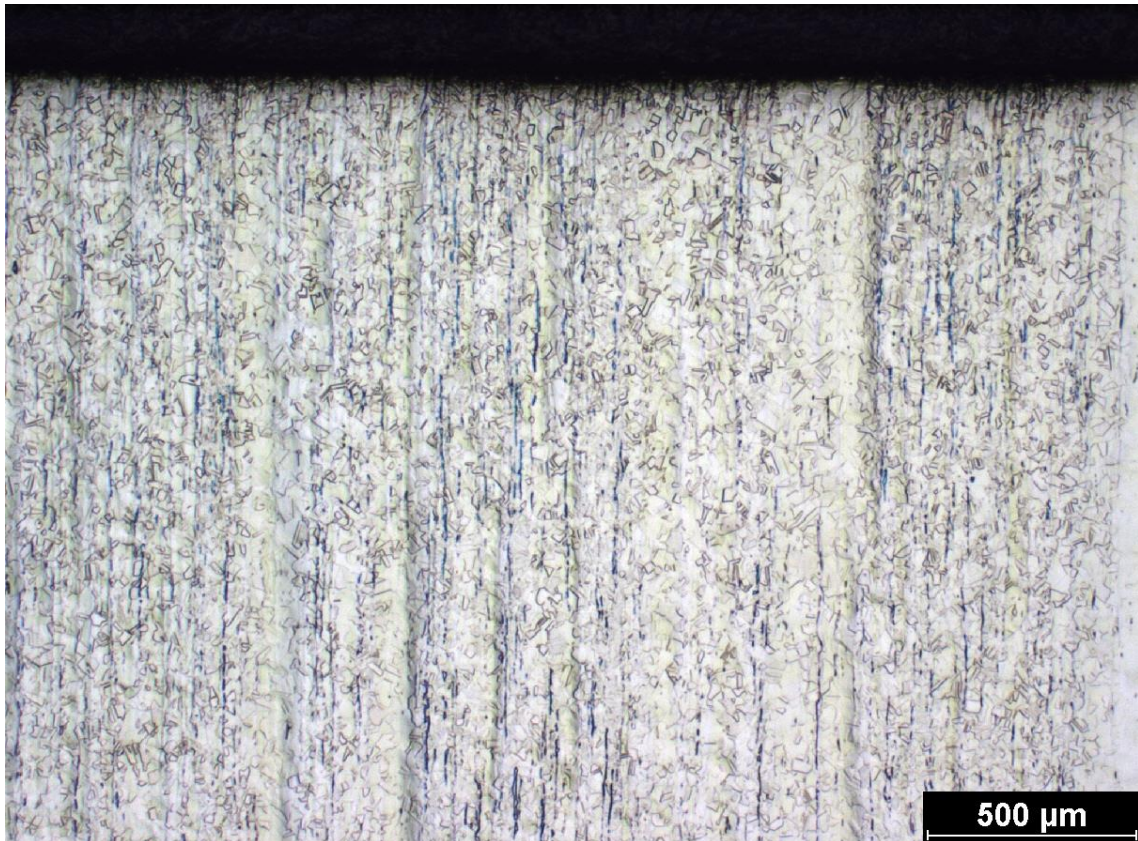
Maximální tvrdost byla změřena v hloubce 0,1 mm pod povrchem v intervalu  $\langle 273,282 \rangle$  HV1 a poté průběhy (Obrázek 27) klesají až přibližně do hloubky 1,4 mm, kde protínají referenční průběh. V hloubce 0,1 mm byla naměřena maximální referenční tvrdost 193,4 HV1, ale ostatní naměřené referenční hodnoty už se pohybují přibližně kolem 161 HV1.

## 7.4 Zobrazení struktury

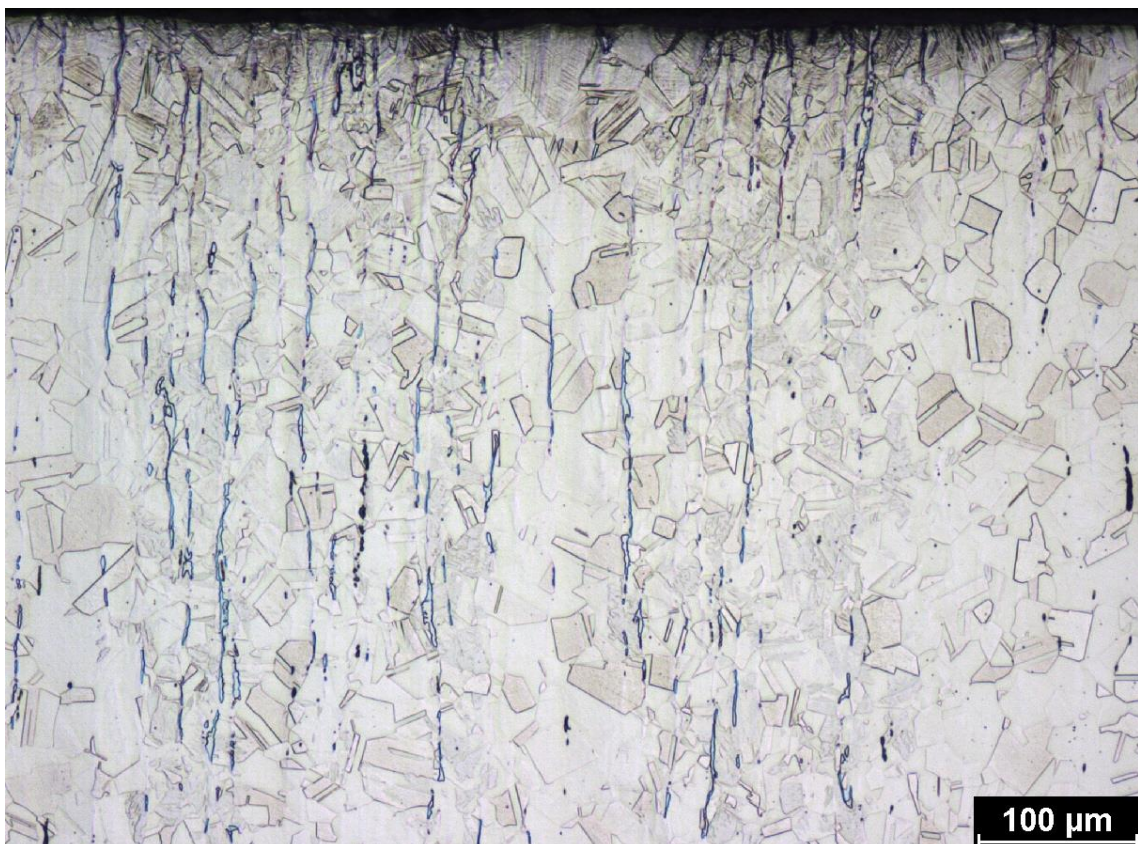
Následně byli pořízeny snímky struktury v metalografickém mikroskopu (Obrázek 28) při zvětšení 20x (Obrázek 29), 100x (Obrázek 30) a 200x (Obrázek 31). Pro zviditelnění struktury byl povrch naleptán leptadlem Nital.



Obrázek 28–Metalografický mikroskop NEOPHOT 32



**Obrázek 29**–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 20x



**Obrázek 30**–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 100x



*Obrázek 31–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 200x*

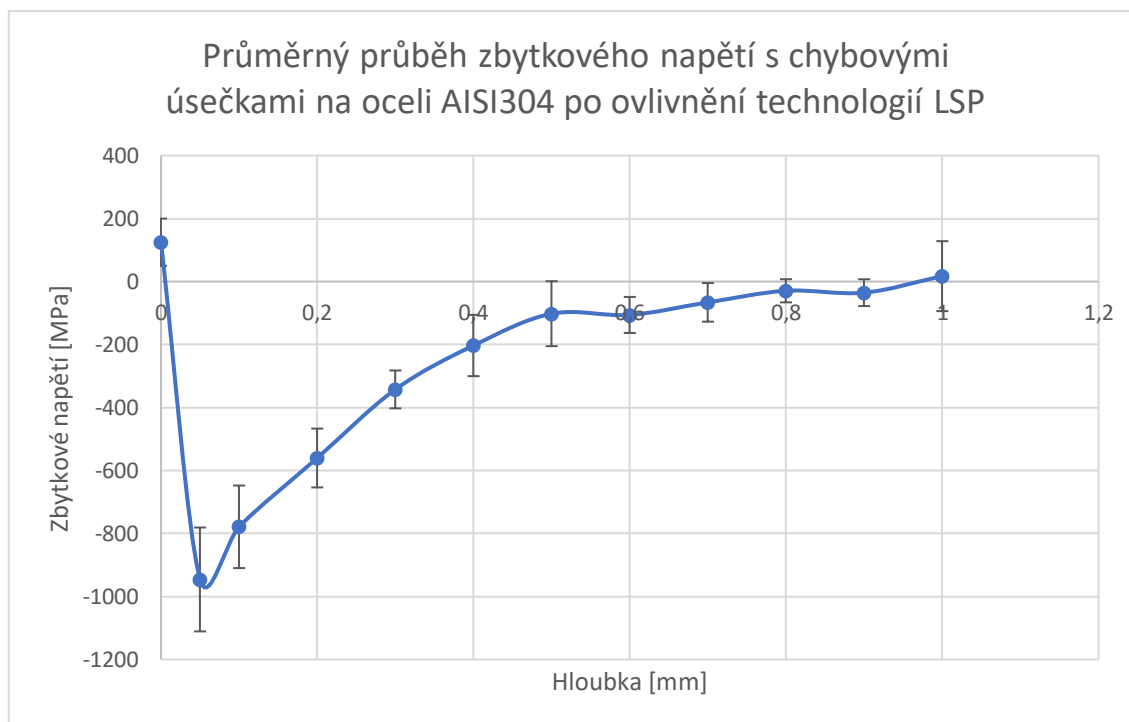
Všechny pořízené snímky oceli AISI 304 po ovlivnění metodou LSP jsou čitelné a struktura materiálu je na nich dobře viditelná. Ze snímku s 200x zvětšením (Obrázek 31) je vidět, že v povrchové vrstvě došlo ke strukturním změnám.

## 8 Vyhodnocení výsledků

### 8.1 Zbytkové napětí

Naměřené průběhy zbytkového napětí byli zprůměrovány a doplněny o chybové úsečky zobrazující směrodatné odchylky. Ze směrodatných odchylek je patrné, že měření zbytkového napětí nebylo zcela konzistentní, jelikož v některých případech jsou směrodatné odchylky větší než 150 MPa (více než 10 % maximální naměřené hodnoty). Z průměrného průběhu zbytkového napětí (Obrázek 32) je vidět, že maximální tahové napětí ( $-946 \pm 165$ ) MPa bylo naměřeno 0,05 mm pod povrchem, poté napětí rychle klesá a přibližně 0,8 mm pod povrchem je už téměř nulové. Povrchové tahové napětí ( $125 \pm 75$ ) MPa je pravděpodobně způsobeno relaxací materiálu, které by na výsledné vlastnosti povrchu nemělo mít větší vliv.

Maximální naměřená hodnota zbytkového napětí je větší než udávaná mez pevnosti materiálu AISI 304  $R_m = 520-720$  MPa, která ovšem platí pro nijak neupravený materiál. Z grafu průměrného průběhu tvrdosti (Obrázek 33) je vidět, že v místě extrému napětí je tvrdost téměř dvojnásobná oproti neovlivněnému materiálu, a jelikož tvrdost souvisí s mezí pevnosti, dá se předpokládat, že mez pevnosti v místě extrému bude rovněž větší, než jaká je udávána v materiálovém listu.



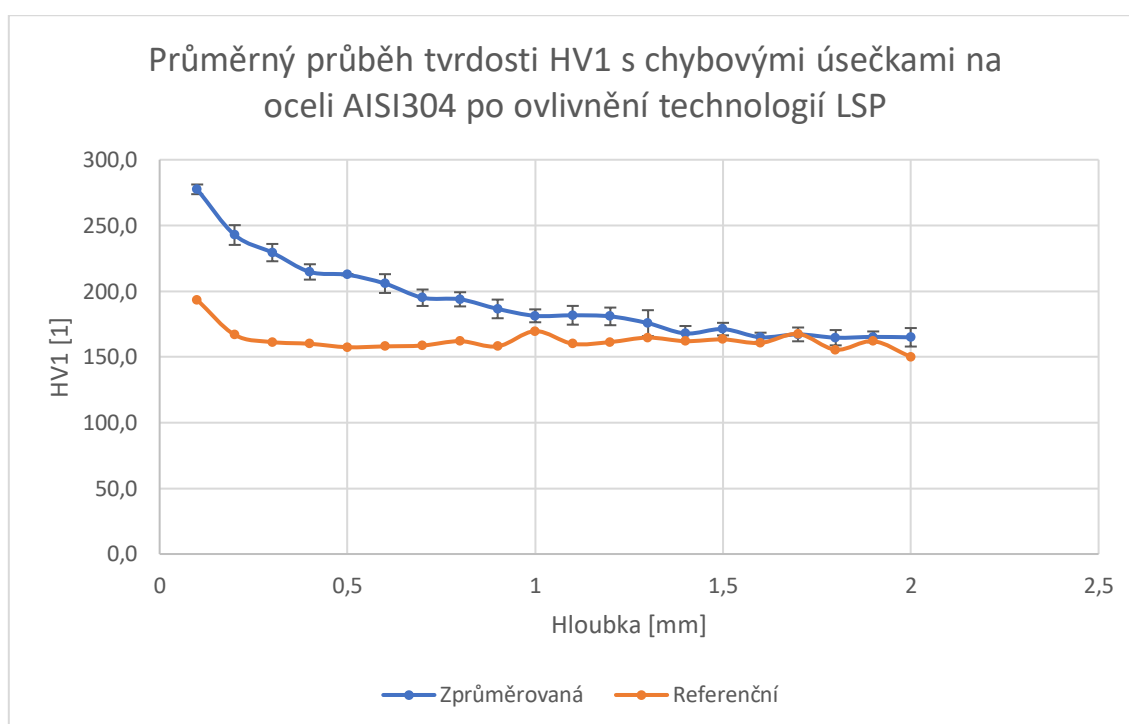
Obrázek 32–Průměrný průběh zbytkového napětí s chybovými úsečkami na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

### 8.2 Tvrdost

Naměřené průběhy tvrdosti byly zprůměrovány, doplněny o chybové úsečky zobrazující směrodatné odchylky a průměrný průběh byl vynes

do společného grafu s referenční tvrdostí, která byla změřena na nezpracovaném povrchu. Ze směrodatných odchylek je patrné, že měření tvrdosti bylo konzistentní, jelikož největší směrodatná odchylka je menší než 10 HV1 (míň než 4 % maximální naměřené hodnoty). Z průměrného průběhu tvrdosti (Obrázek 33) je patrné, že maximální tvrdost (**277,5±3,7**) HV1 je v hloubce 0,1 mm a směrem do hloubky klesá.

Přibližně 1,4 mm pod povrchem dochází ke splynutí průměrného a referenčního průběhu a dál od povrchu už tedy není tvrdost materiálu přibližně **161 HV1** ovlivněna metodou LSP. Zvýšení referenční povrchové tvrdosti **193,4 HV1** je nejspíš způsobeno předchozími technologickými operacemi, například dělením vzorku z většího polotovaru materiálu či úpravou povrchu vzorku, například jeho broušením.



Obrázek 33–Průměrný průběh tvrdosti HV1 s chybovými úsečkami na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP

### 8.3 Struktura

Pro vyhodnocení struktury materiálu je nejvhodnější snímek s 200x zvětšením (Obrázek 31). V hlubších vrstvách, kde už není materiál metodou LSP ovlivněn, je dobře patrný Austenit. V povrchové vrstvě ovšem došlo k jeho přeměně v martenzit, který vznikl zahřátím povrchu plazmatem a poté jeho prudkým zchlazením vodou použitou jako transparentní vrstva (strana 26). Martenzit je viditelný přibližně do hloubky 0,2 mm, což má za následek výrazný nárůst tvrdosti pozorovatelný na jejím průběhu (Obrázek 33).

## 9 Závěr

V této bakalářské práci byla studována metoda dokončování povrchu laser shock peening, její princip, vlastnosti upraveného povrchu a příklady použití. Dále se práce zabývá lasery, běžně používanými metodami dokončování povrchu, integritou povrchu a materiálem AISI 304 (X5CrNi18–10, ČSN 17 240).

V rámci experimentální části byla změřena zbytková napětí vzorku z oceli AISI 304 s povrchem ovlivněným metodou LSP, změřené hodnoty byly vyneseny do grafu a následně zanalyzovány. Maximální zbytkové napětí bylo změřeno v hloubce 0,05 mm pod povrchem a dosáhlo velikosti **(-946±165) MPa**. Tlakové zbytkové napětí ovlivňuje vlastnosti materiálu přibližně do hloubky 0,8 mm, poté je již prakticky zanedbatelné.

Dále byla provedena měření tvrdosti povrchové vrstvy vzorku zpracovaného i nezpracovaného a následně byly porovnány. Změřená data byla vynesena do grafu a zanalyzována. Maximální tvrdost byla změřena v prvním kroku měření nejbližší povrchu v hloubce 0,1 mm a dosahovala hodnoty **(277,5±3,7) HV1**. Dále bylo zjištěno, že tvrdost materiálu je ovlivněna metodou LSP přibližně do hloubky 1,4 mm.

Na závěr byly pořízeny snímky struktury upraveného povrchu při zvětšení 20x, 100x a 200x. Ze snímků je patrné, že v povrchové vrstvě přibližně do hloubky 0,2 mm došlo k přeměně austenitu v martenzit. Všechna naplánovaná měření byla provedena a zadání práce bylo splněno.

## Seznam obrázků

Obrázek 1–Schéma principu funkce laseru [2] .....	11
Obrázek 2–Schémata příkladů broušení [3] .....	13
Obrázek 3–Schéma jemného obrábění [3] .....	14
Obrázek 4–Schéma honovací hlavy [3].....	14
Obrázek 5–Schéma superfinišování [6].....	14
Obrázek 6–Schéma lapování [6] .....	15
Obrázek 7–Schéma tryskání [3] .....	16
Obrázek 8–Omílací buben [3].....	16
Obrázek 9–Schéma hlazení [3].....	17
Obrázek 10–Schéma vnějšího a vnitřního válečkování [6].....	17
Obrázek 11–Schéma kalibrování kuličkou a speciálním trnem [3].....	18
Obrázek 12–Schéma ultrazvukového zpevnění [3] .....	19
Obrázek 13–Princip rentgenové difrakce na atomové mřížce [12] .....	21
Obrázek 14–Princip odvrtávací metody [13].....	21
Obrázek 15–Schéma odleptávací metodou [11] .....	22
Obrázek 16–Princip metody podle Vickerse [14] .....	23
Obrázek 17–Princip metody podle Rockwella [14].....	24
Obrázek 18–Princip metody podle Brinella [14].....	24
Obrázek 19–Schéma principu metody Laser shock peening [23] .....	26
Obrázek 20–Vzorek AISI 304 po ovlivnění technologií LSP před měřením zbytkového napětí .....	28
Obrázek 21–Přístroj Prism od firmy Stresstech.....	29
Obrázek 22–Detail měření zbytkového napětí.....	29
Obrázek 23–Naměřený průběh zbytkového napětí na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP .....	30
Obrázek 24–Vzorek oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP v lisovací hmotě před broušením a leštěním.....	31
Obrázek 25–Schéma rozložení vtisků HV1 .....	32
Obrázek 26– Automatický tvrdoměr Duramin 40 od firmy Struers určený k měření tvrdosti podle Vickerse, Knoop a Brinella.....	32
Obrázek 27– Naměřený průběh tvrdosti HV1 na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP.....	33
Obrázek 28–Metalografický mikroskop NEOPHOT 32 .....	34
Obrázek 29–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 20x.....	35
Obrázek 30–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 100x .....	35
Obrázek 31–Struktura vzorku oceli AISI304 ovlivněné technologií LSP při zvětšení 200x .....	36
Obrázek 32–Průměrný průběh zbytkového napětí s chybovými úsečkami na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP.....	37
Obrázek 33–Průměrný průběh tvrdosti HV1 s chybovými úsečkami na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP .....	38





## Seznam tabulek

Tabulka 1–Stupnice tvrdosti dle Rockwella [14; 15].....	23
Tabulka 2–Složení oceli AISI 304 [20] .....	25
Tabulka 3–Základní mechanické vlastnosti oceli AISI 304 [17].....	25
Tabulka 4–Naměřené hodnoty zbytkového napětí na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP .....	30
Tabulka 5–Naměřené hodnoty tvrdost HV1na oceli AISI304 po ovlivnění technologií LSP.....	33

## Bibliografie

- [1] MOCEK, Tomáš. *Laser: supernástroj člověka 21. století*. Praha: Academia, 2017. ISBN 978-80-200-2691-0.
- [2] NOVÁK, Miroslav. SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ. *LAO: Lasery a Optika* [online]. Praha: LAO, 2011 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [3] MÁDL, Jan. *Technologie obrábění*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1999. ISBN 978-80-01-03752-2.
- [4] BERNARD, Vladan. LASER a jeho aplikace v medicíně. In: *Informační systém Masarykovy univerzity* [online]. Brno: Masarykova univerzita, 2017 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1411/jaro2018/MPPT081/um/laser.pdf>
- [5] KACHTÍK, Lukáš. Využití laserů. *Laser a vše o něm* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/vyuziti.html>
- [6] *Elektronická učebnice* [online]. Olomouc: Olomoucký kraj [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/>
- [7] BUMBÁLEK, Bohumil. INTEGRITA POVRCHU A JEJÍ VÝZNAM PRO POSOUZENÍ VHODNOSTI DANÉ PLOCHY PRO JEJÍ FUNKCI. In: *Kvalita a Geometrické specifikace produktů* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)
- [8] KŘÍŽ, Antonín. Integrita povrchu. In: *OPVK Integrita* [online]. Plzeň: ZCU, c2011-2014 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: [https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/plzen\\_prez1.pdf](https://www.integrita.zcu.cz/download/skola2/plzen_prez1.pdf)
- [9] LIČKOVÁ, Dagmar. Zbytková napětí. In: *Ing.Mgr. Dagmar Ličková - stránky* [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2003 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~lic098/files/9.cviceni\\_VZM.pdf](http://homel.vsb.cz/~lic098/files/9.cviceni_VZM.pdf)
- [10] KOLAŘÍK, Kamil, Nikolaj GANEV, Zdeněk PALA a Totka BAKALOVA. Rtg difrakční diagnostika povrchových vrstev obrobených strojních součástí. In: *Digitální knihovna Západočeské univerzity v Plzni* [online]. Plzeň: ZCU [cit. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16429/1/Kolarik.pdf>
- [11] ŠIMEČEK, Jiří. Integrita povrchu a její význam v praktickém využití: Možnosti měření a měřicí metody. In: *Oddělení povrchového*



- inženýrství* [online]. Plzeň: ZCU [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/integrita\\_\\_Simecek2.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/integrita__Simecek2.pdf)
- [12] KNÍŽEK, Karel. Difrakce záření. In: *Fyzikální ústav Akademie věd České republiky* [online]. Praha: FZU, c1998-2020 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/~knizek/prednaska/Diffraction.pdf>
- [13] Odvrtávací metoda (metoda otvoru). *Termomechanika technologických procesů* [online]. Plzeň: ZCU, c2000-2020 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://ttp.zcu.cz/cz/laboratore/zbytkovana-peti/details-metody>
- [14] ČIŽMÁROVÁ, Elena a Jana SOBOTOVÁ. *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [15] HANYKO Praha s.r.o.: *Vše pro zkoušení materiálů* [online]. Praha: HANYKO, 2016 [cit. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/>
- [16] CHARAKTERISTIKA KOROZIVZDORNÝCH MATERIÁLŮ A ZÁKLADNÍ INFORMACE O POUŽITÍ, ZPRACOVÁNÍ, SVAŘOVÁNÍ A MOŽNÉ KOROZI. *Italinox: partner, který nerezaví* [online]. Praha: Italinox, 2020 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
- [17] NEREZOVÁ OCEL 1.4301. *INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL* [online]. Praha: INOX, 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
- [18] 1.4301: Cr-Ni austenitická ocel odolná korozi. *TECHportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, c1997-2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TM\\_iBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXIrODF32bS3UULnzi00RA9x7p75N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TM_iBFGAgUc6BzY5pKR4a__RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXIrODF32bS3UULnzi00RA9x7p75N8MGgz73w)
- [19] Rozpouštěcí žíhání. *MEDUNA* [online]. Pardubice: Meduna Kalirna, 2018 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.kalirna.cz/cz/sluzby/12-rozpousteci-zihani.html>
- [20] CHEMICKÉ SLOŽENÍ KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ. *Italinox: partner, který nerezaví* [online]. Praha: Italinox, 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/prehled-rozmeru-a-povrchu/chemicke-slozeni>



- [21] Laser Shock Peening. *HiLASE* [online]. Dolní Břežany: HiLASE, 2020 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/nabizime/sluzby/laser-shock-peening/>
- [22] CLAUER, Allan. Laser shock peening for fatigue resistance. *Surface performance of titanium: proceedings of a Symposium on Surface Performance of Titanium sponsored by the Titanium Committee of TMS, held at the 1996 Fall TMS Meeting in Cincinnati, Ohio, October 7-9, 1996*. Warrendale, Pa.: Tms, 1996, s. 217–230. ISBN 087339402X.
- [23] GUJBA, Abdullahi a Mamoun MEDRAJ. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials* [online]. 2014, **7**(12), 7925-7974 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.3390/ma7127925. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/7/12/7925>
- [24] BRAJER, J., R. SVABEK, D. ROSTOHAR, M. DIVOKY, A. LUCIANETTI, T. MOCEK, J. MADL a Z. PITRMUC. New possibilities for efficient laser surface treatment by diode-pumped kW-class lasers. *The Journal of Engineering* [online]. 2015, **2015**(13), 158-160 [cit. 2020-07-10]. DOI: 10.1049/joe.2015.0094. ISSN 2051-3305. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/joe.2015.0094>
- [25] DEWALD, Adrian. Compressive residual stress. *Hill Engineering* [online]. Rancho Cordova: Hill Engineering, 2017 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://hill-engineering.com/general-interest/compressive-residual-stress/>
- [26] ZHANG, Lei, Yue-Hua LIU, Kai-Yu LUO, Yong-Kang ZHANG, Yong ZHAO, Jian-Yun HUANG, Xu-Dong WU a Chuang ZHOU. Tensile Property of ANSI 304 Stainless Steel Weldments Subjected to Cavitation Erosion Based on Treatment of Laser Shock Processing. *Materials* [online]. 2018, **11**(5) [cit. 2020-04-17]. DOI: 10.3390/ma11050805. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1944/11/5/805>