

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kombinace technologie laserového kalení a laser shock peeningu pro zlepšení životnosti
turbínových lopatek

Autor: Bc. Nikol Kuncová
Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D., IWE

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Nikol KUNCOVÁ**
Osobní číslo: **S21N0013K**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Kombinace technologie laserového kalení a laser shock peening pro zlepšení životnosti turbinových lopatek**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Laser shock peening
2. Kalení povrchu laserem
3. Lopatkové materiály
4. Zbytková napětí v povrchových vrstvách
5. Tribologie
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Matěj Jakubec: Influence of laser hardening in combination with laser shock peening technology on Böhler W360 tool steel, diplomová práce ČVUT Praha 2021.

Sanin Zulić, Danijela Rostohar, Jan Kaufman, Sunil Pathak, Jaromir Kopeček, Marek Böhm, Jan Brajer a Tomáš Mocek (2022) Fatigue life enhancement of additive manufactured 316L stainless steel by LSP using a DPSS laser system, Surface Engineering, 38:2, 183-190, DOI:10.1080/02670844.2022.2060463.

K. Ding, L. Ye, 2 – Physical and mechanical mechanisms of laser shock peening, Editor(s): K. Ding, L. Ye, Laser Shock Peening, Woodhead Publishing, 2006, Pages 7-46, ISBN 9781855739291, <https://doi.org/10.1533/9781845691097.7>.

Arvi Kruusing, Chapter Three – Shock Processing, Editor(s): Arvi Kruusing, Handbook of Liquids-Assisted Laser Processing, Elsevier, 2008, Pages 69-142, ISBN 9780080444987, <https://doi.org/10.1016/B978-008044498-7.50004-2>.

S. Bonß, 11 – Laser transformation hardening of steel, Editor(s): J. Lawrence, J. Pou, D.K.Y. Low, E. Toyserkani, Advances in Laser Materials Processing, Woodhead Publishing, 2010, Pages 291-326, ISBN 9781845694746, <https://doi.org/10.1533/9781845699819.4.291>.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Stanislav Němeček, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Brajer, Ph.D.**
Centrum HiLASE Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

Datum zadání diplomové práce: **18. května 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tento prostor chci využít pro poděkování doc. Ing. Stanislavu Němečkovi, Ph.D., IWE za odborné vedení a pomoc při zpracování celé diplomové práce. Velké poděkování patří též centru HiLASE, které propůjčilo jak vybavení pro provedení laser shock peeningu, tak odborné znalosti pro jeho správné vyhotovení. Zejména děkuji kolegům Ing. Janu Šmausovi a Ing. Janu Kaufmanovi, Ph.D. Rovněž velice děkuji výzkumné společnosti COMTES FHT, a.s., ve které bylo provedeno měření zbytkového pnutí. Jmenovitě pak děkuji Ing. Pavlovi Salvetrovi, Ph.D., za jeho čas, předané rady a zkušenosti, které mi značnou měrou pomohli k interpretaci výsledků měření. Díky patří i Západočeské univerzitě za celý průběh studia a taktéž poskytnutí vybavení pro realizaci experimentu diplomové práce. V neposlední řadě děkuji své rodině za jejich bezmeznou pomoc.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kuncová	Jméno Nicol	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení doc. Ing. Němeček, Ph.D., IWE	Jméno Stanislav	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Kombinace technologie laserového kalení a laser shock peening pro zlepšení životnosti turbínových lopatek		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	56	TEXTOVÁ ČÁST	50	GRAFICKÁ ČÁST	6
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	Cílem práce je zhodnotit vliv laserového kalení, laser shock peeningu a jejich kombinace na chrom-molybdenové oceli z hlediska únavy a tribologických vlastností.
KLÍČOVÁ SLOVA	Laserové kalení, laser shock peening, zpevňování povrchu, zbytkové napětí, únava, tribologie.

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kuncová	Name Nicol
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Němeček, Ph.D., IWE	Name Stanislav
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Combination of laser hardening and laser shock peening for improvement durability of turbine vanes.	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	56	TEXT PART	50	GRAPHICAL PART	6
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	The aim of the thesis is to evaluate the effect of laser hardening, laser shock peening and their combination on chromium molybdenum steel in terms of fatigue and tribological properties.
KEY WORDS	Laser hardening, laser shock peening, surface hardening, residual stress, fatigue, tribology.

Obsah

Obsah	8
Přehled použitých zkratk a symbolů	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek a grafů	12
1. Úvod	13
2. Teoretická část	14
2.1. Laser	14
2.1.1. Druhy laserů dle aktivního prostředí	17
2.2. Zpevňování plastickou deformací	20
2.2.1. Tryskání	20
2.2.2. Válečkování	21
2.2.3. Laser shock peening	21
2.3. Povrchové kalení	23
2.3.1. Kalení plamenem	23
2.3.2. Indukční kalení	24
2.3.3. Laserové kalení	24
2.4. Materiály turbínových lopatek	25
2.5. Zbytkové pnutí	27
2.5.1. Rentgenová difrakční analýza	27
2.6. Tribologie	28
2.6.1. Pin on disc test	28
3. Experimentální část	29
3.1. Technologie	30
3.2. Zkoušky	32
3.2.1. Zbytkové pnutí	33
3.2.2. Metalografie	34
3.2.3. Tvrdost	34
3.2.4. Tribologie	35
4. Výsledky a jejich diskuze	36
5. Závěry	47
Seznam použitých zdrojů	48
Přílohy	51

Přehled použitých zkratek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
R_e min.	Mez kluzu	[MPa]
R_m min.	Pevnost v tahu	[MPa]
A min.	Tažnost	[%]
Z min.	Kontrakce	[%]
HRC	Hodnota tvrdosti dle Rockwella	[-]
HV	Hodnota tvrdosti dle Vickerse	[-]
Φ	Beam size (velikost paprsku)	[mm]
BPP	Beam parametr product (rozbíhavost paprsku)	$[\frac{mm}{mrad}]$
F	Síla	[N]
d	Délka uhlopříčky vtisku	[mm]
\bar{x}	Aritmetický průměr	[-]
x_i	i-tá hodnota	[-]
n	Počet hodnot	[-]
Yb:YAG	Laser s aktivním prostředím yttrito-hlinitého granátu s přídavkem iontů ytterbia	[-]
Nd:YVO4	Laser s aktivním prostředím yttrium vanadátu dopovaným ionty neodymu	[-]
Nd:YAG	Laser s aktivním prostředím yttrito-hlinitého granátu s přídavkem iontů neodymu	[-]
CW	Continuous wave (kontinuální vlny)	[-]
+U	Materiál v nezpracovaném stavu	[-]
+QT	Materiál v zušlechtném stavu	[-]
J	Práce	$[N * m]$
U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
LSP	Laser shock peening	[-]

Popis	Jednotka
Mikrometr	[μm]
Nanosekunda	[ns]
Watt	[W]
Kilowatt	[kW]
Procento	[%]
Úhlový stupeň	[$^{\circ}$]
Milimetr	[mm]
Stupeň Celsia	[$^{\circ}\text{C}$]
Úhel théta	[θ]
Milimetr za sekundu	[mm/s]
Gigawatt na centimetr čtverečný	[GW/cm ²]
Bar	[bar]
Otáčky za minutu	[r/min]
Prvek/Sloučenina	Popis
Cr	Chrom
Mo	Molybden
He	Helium
N	Dusík
C	Uhlík
Si	Křemík
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Síra
Sn	Cín
Pb	Olovo
V	Vanad
Ti	Titan
W	Wolfram
CO ₂	Oxid uhličitý
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý

Seznam obrázků

Obr. 1 - Grafické znázornění vzniku fotonu [6].	15
Obr. 2 - Vznik laserového záření [8].	16
Obr. 3 - Rozdíl mezi laserovým zářením a světelným zdrojem [9].	16
Obr. 4 - CO ₂ laser [12].	17
Obr. 5 - Typy pevnolátkových laserů [11].	18
Obr. 6 - Laser shock peening [22].	22
Obr. 7 - Strategie překrytí pulzů [22].	22
Obr. 8 - Výkres vzorku použitý pro experiment.	29
Obr. 9 - Postup kalení vzorku.	30
Obr. 10 - Ukázky povrchu po LSP, vlevo vzorek S, vpravo vzorek LS.	32
Obr. 11 - Difraktometr.	33
Obr. 12 - Vzorek S, zvětšení 25x, vrstva.	37
Obr. 13 - Vzorek S, zvětšení 500x, struktura vrstvy.	38
Obr. 14 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura ve středu vzorku, tzn. struktura ZM.	38
Obr. 15 - Vzorek L-S, zvětšení 25x, vrstva.	39
Obr. 16 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura vrstvy.	39
Obr. 17 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu.	40
Obr. 18 - Vzorek L, zvětšení 25x, vrstva.	40
Obr. 19 - Vzorek L, zvětšení 500x, struktura vrstvy.	41
Obr. 20 - Vzorek L, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu.	41
Obr. 21 - Vzorek S-L, zvětšení 25x, vrstva.	42
Obr. 22 - Vzorek S-L, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu.	42
Obr. 23 - Vzorek S-L, zvětšení 500x, struktura vrstvy.	43
Obr. 24 - Stopa na povrchu vzorků po analýze pin on disc.	46

Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1 - Porovnání vybraných typů laseru [11].	19
Tabulka 2 - Výhody a nevýhody vybraných typů povrchového kalení [25], [26], [27].	25
Tabulka 3 - Chemické složení oceli 42CrMo4 [30].	26
Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti oceli 42CrMo4 [30].	26
Tabulka 5 - Značení vzorků dle provedené technologie.	30
Tabulka 6 - Parametry laserového kalení.	31
Tabulka 7 - Parametry provedeného laser shock peeningu.	31
Tabulka 8 - Hodnoty maximální přípustné chyby [35].	34
Graf 1 - Hodnoty zbytkového pnutí v povrchové a podpovrchové vrstvě.	36
Graf 2 - Průběhy tvrdosti.	44
Graf 3 - Míra opotřebení.	45

1. Úvod

Tato diplomová práce je zaměřena na získání informací o vlivu technologie laserového kalení, laser shock peeningu, a jejich kombinace na chrom-molybdenové oceli. Laserové aplikace jsou ve velkém rozmachu, spektrum jejich využití se neustále rozšiřuje a kvalita laserových nástrojů se zdokonaluje. V dostupné literatuře lze již najít články o vlivu laserového kalení nebo shock peeningu, o jejich kombinaci se však odborné články nezmiňují. Z těchto důvodů je diplomová práce založena na experimentu, ve kterém jsou využity zmíněné technologie jednotlivě i kombinovaně, a to i v různém pořadí jejich použití. Tato práce si klade za cíl stanovit hloubku technologiemi ovlivněné vrstvy, změřit a porovnat výsledné hodnoty tvrdosti včetně jejich průběhu a popsat rozdíly ve struktuře po různém zpracování. Dalším cílem je zjistit jaký vliv mají technologie na výskyt a rozložení zbytkového pnutí, zhodnotit vliv technologií na výsledné tribologické vlastnosti a stanovit zda-li je možná synergie těchto technologií. Motivací pro vznik této práce je prozkoumání možného nového způsobu zvýšení životnosti materiálů, které jsou často využívány jako turbínové lopatky a obvykle u nich dochází k poruchám na základě opotřebení, nebo dosažení meze únavy.

2. Teoretická část

V této kapitole jsou uvedeny základní teoretické informace, vztahující se k tématům práce. V následujících odstavcích je pojednáváno o laserech a jeho aplikacích a pro přehled jsou dále uvedeny i konvenční alternativy těchto technologií. Dále je zde zmínka o vybraném materiálu a rovněž krátké seznámení s materiály používanými pro lopatky. V závěru teoretické části jsou popsány metody měření zkoumaných vlastností. Vzhledem k všeobecně známým způsobům měření tvrdosti je zde pojednáno pouze o difrakční analýze využitě pro měření zbytkového pnutí a metodě “pin on disc”, díky které jsou získány informace o tribologických vlastnostech.

2.1. Laser

Sestavení prvního laseru se datuje k roku 1960, byť myšlenka na zesílení světelné vlny stimulací atomů předchází teorie zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření¹, která vznikla mnohem dříve. Již v roce 1917 popsal A. Einstein stimulovanou emisi [1]. O pár let později R. Ch. Tolman konstatoval, že pokud by atomy měly větší obsazení ve vyšší energetické hladině došlo by k záporné absorpci a bez jakéhokoliv experimentu, kterým by své tvrzení podložil dále konstatoval, že pak by ona stimulovaná emise byla koherentní [2]. Díky navazujícím myšlenkám N. G. Bassova a A. N. Prochorova, J. Webera a C. H. Townese, kteří se věnovali mikrovlnné spektroskopii molekul, byly položeny základy pro vznik laseru [3].

Lasery od těchto prvních myšlenek velmi pokročily a dnes existuje již několik typů. Například je lze dělit podle aktivního prostředí na:

- pevnolátkové,
- polovodičové,
- plynové,
- kapalinové,
- plazmové,
- lasery s volnými elektrony.

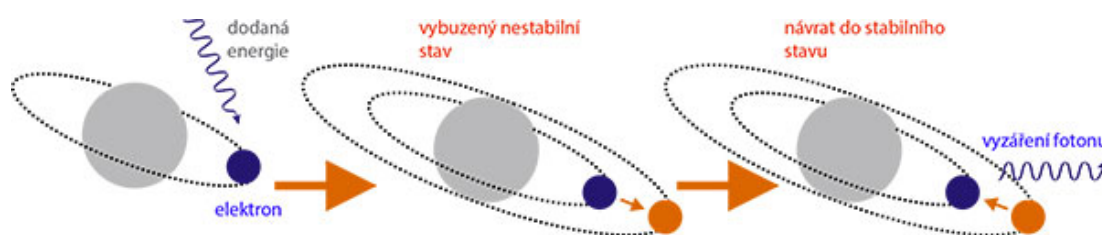
Další způsob rozdělení je možný dle časového režimu provozu, a to na:

- kontinuální, které nepřetržitě generují záření,
- impulzní, ve kterém je záření ve formě pulsů,
- kvazikontinuální, kde je záření ve formě pulzů delších než 200 ns.

¹ Znamé jako “maser”.

Podstatou laserového záření je již zmíněná stimulovaná emise. Elektrony v atomu jsou rozmístěny v energetických hladinách a dodáním energie do aktivního prostředí dojde k buzení, díky kterému nastane excitace² atomu. O optickém buzení mluvíme pokud je dodaná energie ve formě světelného záblesku. V případě, kdy je do aktivního prostředí dodána energie ve formě elektrického výboje jedná se o buzení elektrickým polem. Případně lze využít buzení chemickou excitací u které dochází k čerpání energie exotermickými chemickými reakcemi [4], [5].

Jelikož se atomy snaží být ve stavu rovnovážném, dojde emisí (samovolnou, nebo stimulovanou) k přesunu elektronu zpět do základní hladiny. Při přesunu se uvolní energie ve formě fotonu. Takto vyzářená energie se projeví jako světlo, které známe jako laserové záření. Tento proces je znázorněn na *Obrázku 1* viz níže [6].

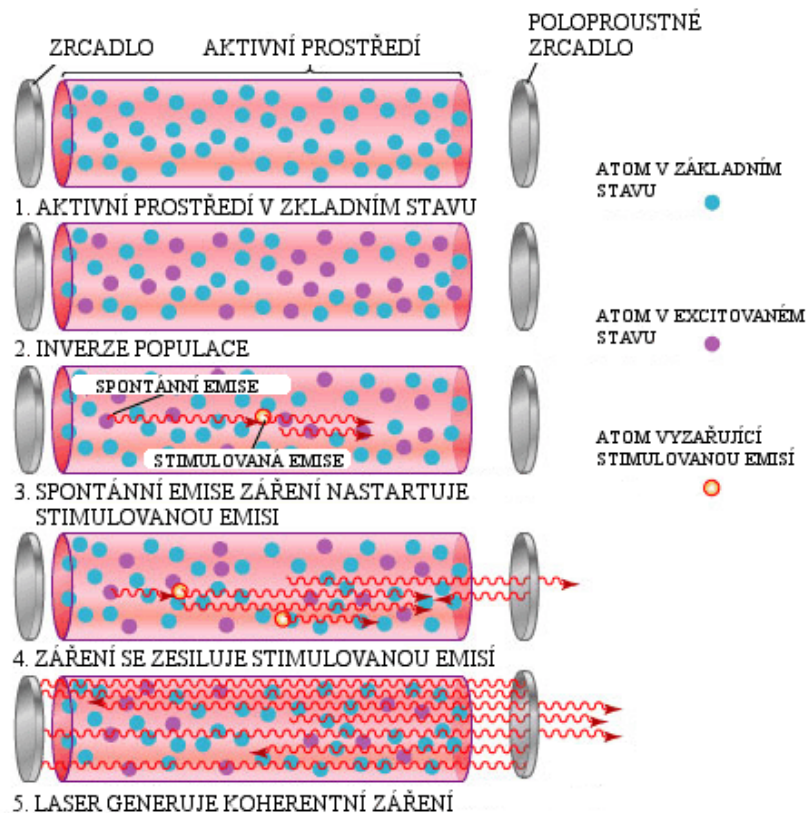


Obrázek 1 - Grafické znázornění vzniku fotonu [6].

Pro sestavení funkčního laseru je tedy zapotřebí aktivní prostředí a zdroj záření neboli buzení. Aktivním prostředím se rozumí látka ve které jsou odděleny energetické hladiny a elektrony tak mohou přeskakovat z nižších energetických hladin do vyšších a naopak. Jak již bylo zmíněno, lasery jsou často děleny podle aktivního prostředí, proto jsou v následující kapitole “2.1.1. Druhy laserů dle aktivního prostředí” více popsány. Další nezbytností je zesílení světla, kterého se dosahuje pomocí rezonátorů, dvěma rovnoběžnými zrcadly, která jsou kolmá na osu laseru, přičemž jedno musí být nepropustné a druhé polopropustné. U diodových laserů jako nepropustné zrcadlo slouží pouze rozhraní aktivního prostředí se vzduchem, v ostatních případech se používá dielektrické zrcadlo, nebo leštěný kov. Dále se využívá chladič laseru, různé systémy k měření výkonu a kalibrační přístroje [7].

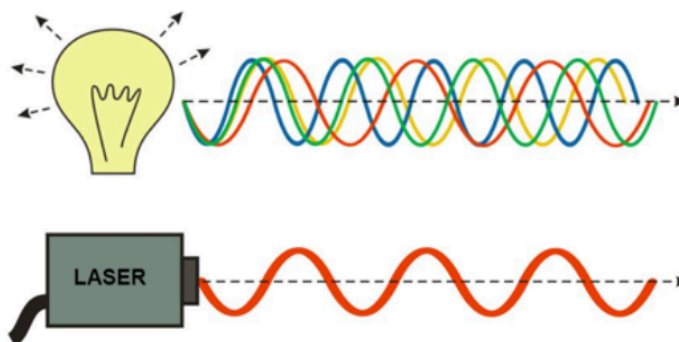
Na následujícím *Obrázku 2* je možné vidět rezonátor ve formě polopropustného a propustného zrcadla, aktivní prostředí s atomy, které postupně mění své stavy a vyzářený koherentní paprsek neboli laserové záření, které znázorňují červené šipky.

² Excitace atomu označuje přesun elektronů do vyšší energetické hladiny.



Obrázek 2 - Vznik laserového záření [8].

Vyzářený laserový paprsek se od jiných zdrojů světla odlišuje ve dvou základních vlastnostech, je monochromatický a koherentní. Jedná se tedy o paprsek o jedné vlnové délce a jedné vlnoploše, ve které je stejná frekvence vlnění a stejná fáze. Názorně to ukazuje *Obrázek 3*, kde v horní část znázorňuje bílé světlo žárovky, či slunce, které obsahuje všechny barvy čili vlnové délky. Dolní část obrázku zobrazuje právě monochromatické a koherentní laserové záření.



Obrázek 3 - Rozdíl mezi laserovým zářením a světelným zdrojem [9]. Upraveno.

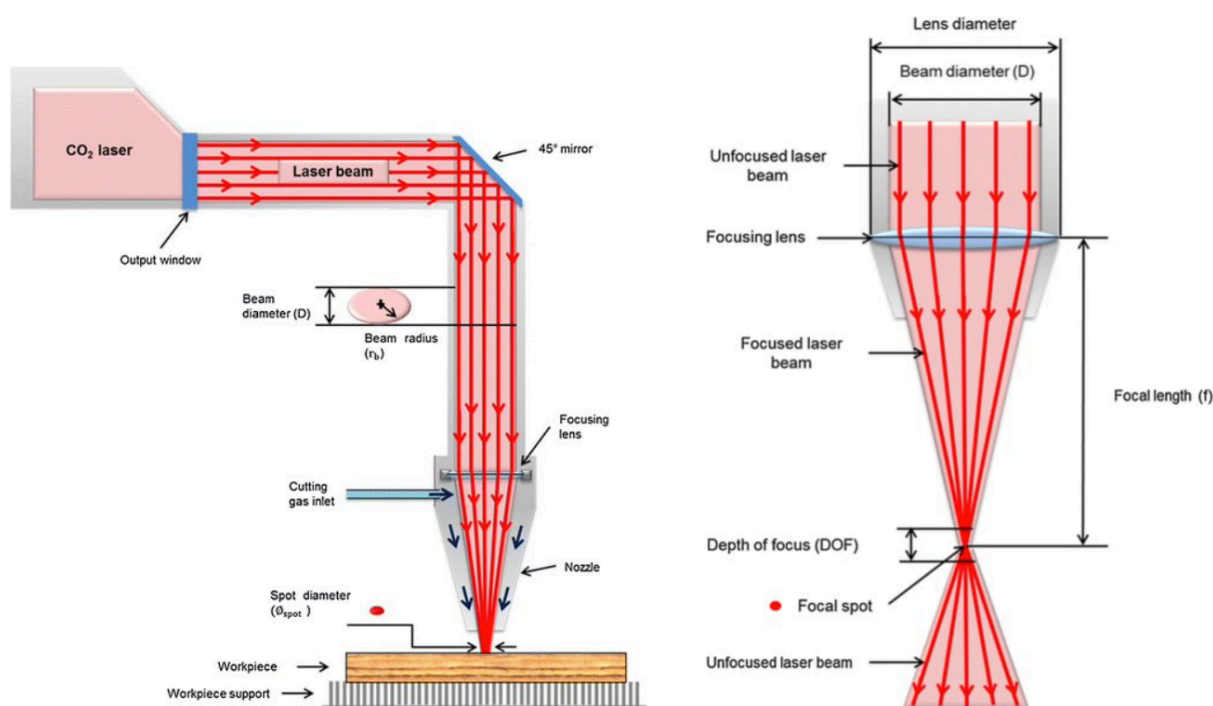
2.1.1. Druhy laserů dle aktivního prostředí

Jak již bylo uvedeno výše, lasery lze dělit podle aktivního prostředí. V následujících odstavcích jsou podrobněji popsány lasery plynové, pevnolátkové a polovodičové, vzhledem k tomu, že tyto jsou nejvyužívanější.

- Plynové lasery

Z názvu plyne, že aktivním prostředím je plyn. K buzení se obvykle využívá vysokonapěťový doutnavý elektrický výboj, výjimkou je například argonový laser, který se budí elektrickým proudem o malém napětí. Kvůli vysokým teplotám, které se při buzení generují, je nebytné chlazení, k čemuž se využívá voda, olej, nebo jiné roztoky. Mezi plynové lasery lze zařadit již zmíněný argonový, dusíkový, nebo například jódový. Vysoce využívaným je CO₂ laser, a to i přes jeho relativně vysokou pořizovací cenu. CO₂ lasery mají jako aktivní prostředí oxid uhličitý, nebo směs plynů CO₂, He a N v různém poměru. Tyto plynové lasery jsou dostupné v širokém rozsahu výkonu (10 W - 20 kW). Vzhledem k tomu, že pro každý materiál je vhodnější jiná vlnová délka, je výhodou možnost nastavení tohoto parametru, a to v rozsahu 9,3 a 11,0 μm. Například pro polymery je to právě zmíněná vlnová délka 9,3 μm, pro zpracování keramiky je vhodná vlnová délka 10,6 μm. Podstatným rozdílem oproti laserům s jiným aktivním prostředím je, že časem u plynových laserů dojde k vyčerpání plynu. Nicméně po dobu své životnosti vykazují plynové lasery vysokou účinnost, která je přes 25 % [5], [10], [11].

Na *Obrázku 4* je znázorněn CO₂ laser, na kterém je vidět tok laserového paprsku z plynového zásobníku pomocí zrcadel přes zaostřující čočku. V pravé části obrázku lze vidět nezaostřený paprsek, který průchodem čočky ("Focusing lens") zaostří v požadované vzdálenosti (Focal length). Na obrázku je dále znázorněn "DOF" ("Depth of focus"), neboli hloubka ostrosti, jinak vzdálenost mezi nejbližším a nejvzdálenějším bodem, který je ještě v toleranci ostrosti a je stále považován za zaostřený.



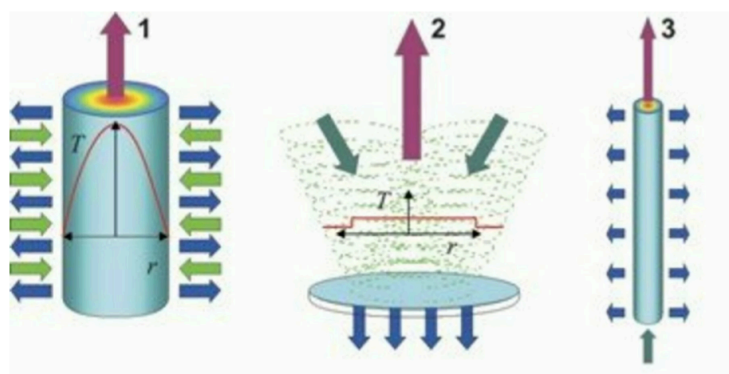
Obrázek 4 - CO₂ laser [12]. Upraveno.

Vysoká vlnová délka a nízká rozbíhavost paprsku (BPP) je vhodná pro řezání, značení nebo gravírování, ale i pro svařování, kde je využito vysokého výkonu. Oproti vláknovým laserům, které vedou záření po optickém vlákne, musí být pro vedení svazku použita zrcadla, což proces komplikuje. Optická dráha je zde složitější na nastavení, zkalibrování a zvyšuje i požadavky na údržbu a čistotu. Tyto a další důležité parametry jsou přehledně znázorněny v *Tabulce 1*, která porovnává vybrané vlastnosti CO₂, diodového a Nd:YAG laseru [11].

• Pevnolátkové lasery

První funkční laser byl právě pevnolátkový s rubínem jako aktivním prostředím. Laser s krystalem, nebo amorfními izolanty s příměsí vhodných iontů umožňuje vysoké výkony, avšak jen v krátkých pulzech. Jako buzení slouží obvykle xenonové výbojky³. Nejpoužívanějším typem pevnolátkového laseru je Nd:YAG, jehož název vychází z aktivního prostředí, kterým je kubický, bezbarvý, izotropní krystal yttrito-hlinitého granátu s přidávkem iontů neodymu ve tvaru tyčinky, pro který je typická vlnová délka 1,0641 μm. Nevýhodou je na druhou stranu nízká účinnost, velké nároky na chlazení, vysoké provozní náklady a krátká životnost [5], [11].

Mezi pevnolátkové lasery se řadí i tzv. vláknové lasery, které jsou mezi pevnolátkovými nejmodernější. Jak již bylo zmíněno, záření je zde vedeno pomocí flexibilního optického vlákna. Další výhodou je vysoká účinnost, velmi vysoká životnost, nízké provozní náklady a téměř nulové nároky na údržbu [11]. Pro tento experiment je důležitý diskový laser, jakožto modifikace Nd:YAG laseru (a dalších, jako například Yb:YAG, nebo Nd:YVO₄). Základem je aktivní prostředí ve formě disku, viz *Obrázek 5*, který má obvykle průměr v řádech desítek milimetrů a tloušťku desetín milimetru. Díky tomuto tvaru je dosaženo velmi přesného chlazení a kvalitního laserového svazku [13]. *Obrázek 5* dále zobrazuje základní typy pevnolátkových laserů. Modré šipky na obrázku představují chlazení, zelené pak buzení. Fialové šipky značí svazek laserového paprsku. Číslem 1 je označen Nd:YAG laser, kde je naznačen parabolický profil průběhu teplot. Číslo 2 označuje diskový laser, který je chlazen přes spodní část a teplotní profil je rovný. Pod číslem 3 je znázorněn vláknový laser, který je, stejně jako Nd:YAG, chlazený přes laterální povrch, ale narozdíl od něj, je buzen přes spodní část, nikoli přes boční povrch.



Obrázek 5 - Typy pevnolátkových laserů [11].

³ Jako výbojka se označuje trubice naplněna parami a plyny s elektrodami, které přemění elektrickou energii na světlo

• Polovodičové lasery

V případě polovodičových laserů je aktivním materiálem vlastní polovodič, ve kterém jsou aktivní částice ve formě nerovnovážných elektronů jako volné nosiče náboje, které lze injektovat. Tyto lasery jsou obvykle buzeny pomocí elektrického proudu, dosahují vysoké účinnosti (až 60 %) a plusem je možnost spektrálního přelazení, tedy změna vlnových délek v rozmezí 0,3 - 30 μm [5]. Typické polovodičové lasery jsou diodové, které jsou buzeny přímo v polovodiči průchodem elektrického proudu. Jako aktivní prostředí je často využíván galium arsenid, kadmium sulfid, nebo kadmium selen. Diodové lasery jsou sestaveny z několika milimetrové řady mikroskopických emitorů⁴, které se následně vrství do sloupců, čímž dosáhnou diodové lasery výkonu v řádech jednotek kilowattů. Svazek u diodových laserů nelze zaostřit do malého bodu, kvůli velké rozbíhavosti paprsku (BPP⁵), na druhou stranu jeho účinnost je vysoká. Z těchto důvodů se diodové lasery hodí pro povrchové aplikace, jako je právě kalení, nebo svařování.

V následující *Tabulce 1* jsou zaznamenány vybrané parametry již zmíněných druhů laserů (Nd:YAG, CO₂ a diskový) pro přehledné porovnání [5], [11].

Tabulka 1 - Porovnání vybraných typů laseru [11]. Vlastní.⁶

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení ^{a)}	Účinnost [%]	Režim ^{b)}	Výkon ^{c)} [kW]	Aplikace ^{d)}	Životnost [h]
Nd:YAG	1064	LD*	~7	CW *	až 6	Ř, S	~10 000
				Pulzní	0,1*	Z, G	
		lampy	~3	Pulzní	0,6*	S	~1 000
CO ₂	10 600	RF*	~10	CW * / pulzní	až 0,25	Z, G, Ř _{nek}	~20 000
					až 5	Ř, S	
		el.*	~25		až 20	Ř, S	-
Diskový	1070	LD	~30	CW*	Až 16	Ř, S	~10 000

⁴ světelných zářičů

⁵ Beam Parametr Product

⁶ Poznámky k *Tabulce 1*:

a) LD = buzení pomocí laserové diody, RF = radiofrekvenční buzení, el. = buzení elekt. výbojem / proudem

b) CW = kontinuální

c) U pulsních režimů je udáván střední výkon

d) Ř = řezání, S = svařování, Z = značení, G = gravírování, Ř_{nek} = řezání nekovových materiálů,

2.2. Zpevňování plastickou deformací

Důvodem pro zpevňování materiálu plastickou deformací je zvýšení jemnozrnnosti struktury pro získání více menších zrn, tzn. většího počtu hranic zrn, které fungují jako překážky v pohybu dislokací. Ve struktuře s vysokou hustotou zrn, je zapotřebí vyšší energie k překonání poruchy, tím je zajištěna zvýšená pevnost, tvrdost a větší korozní odolnost, za předpokladu, že proces zpevňování proběhl tzv. za studena. Naopak plastická deformace za tepla vyvolává tahové pnutí, případně strukturní změny, a tím roste pravděpodobnost vzniku trhlin a s tím související klesající životnost součástí. Plastická deformace za studena vyvolá tlakové zbytkové pnutí, zvýšení meze únavy, odolnosti proti otěru a korozi, tvrdosti, pevnosti a delší životnost.

Zpevňování materiálu plastickou deformací lze označit jako dokončovací metodu, která většinou udává konečnou přesnost rozměrů a tvarů, mikrogeometrii, kvalitu, vlastnosti a vzhled povrchové vrstvy. Každý z výše uvedených parametrů ovlivňují odlišné dokončovací metody, a to v různé míře. Z toho důvodu je důležité volit metodu, nebo kombinaci metod, dle kladených požadavků na výslednou součást. Dokončovací metody mohou být s úběrem materiálu (omílání, leštění) nebo bez úběru materiálu (válečkování, kuličkování). Pro přehled a možnost porovnání jsou v následujících kapitolách krátce zmíněné konvenční metody tryskání a válečkování. Mimo zmíněné se využívají další metody jako vyhlazování, vibrační zpevňování, ultrasonic peening treatment, pískování a další [14], [15], [16].

2.2.1. Tryskání

Plastická deformace je při tryskání vyvolána dopadem jemných⁷ sférických částic, které jsou přenášeny v nosném médiu na upravovaný povrch. Nosným médiem, které dodává abrazivu kinetickou energii, je obvykle stlačený vzduch nebo kapalina. Tato metoda lze využít i jako dokončovací metoda s úběrem materiálu, pokud mají částice abrazivní účinek a úhel dopadu částic není v rozmezí 50 - 80°. Od tvaru pracovních tělísek se odvozuje přesný název operace. Pokud je při operaci použito ocelových kuliček jedná se o tzv. kuličkování, v případě použití kuliček z bíle tvrzené litiny tzv. "broků" jedná se o brokování a v případě využití skleněných kuliček se bavíme o balotínování. Hloubka zpevnění se při využití tryskání pohybuje v rozmezí 0,05 - 0,5 mm. Tryskání neovlivňuje přesnost rozměrů ani tvar obráběné součásti. Výhodou tryskání je snadná robotizace procesu a mobilita, a tím možnost použití i u složitých tvarů. Otryskáváním dojde, kromě vnesení plastické deformaci, i k odstranění nečistot, rzi, okují, apod. [15], [17].

⁷ Částice při tryskání mají průměry v rozmezí 0,03 - 1 mm.

2.2.2. Válečkování

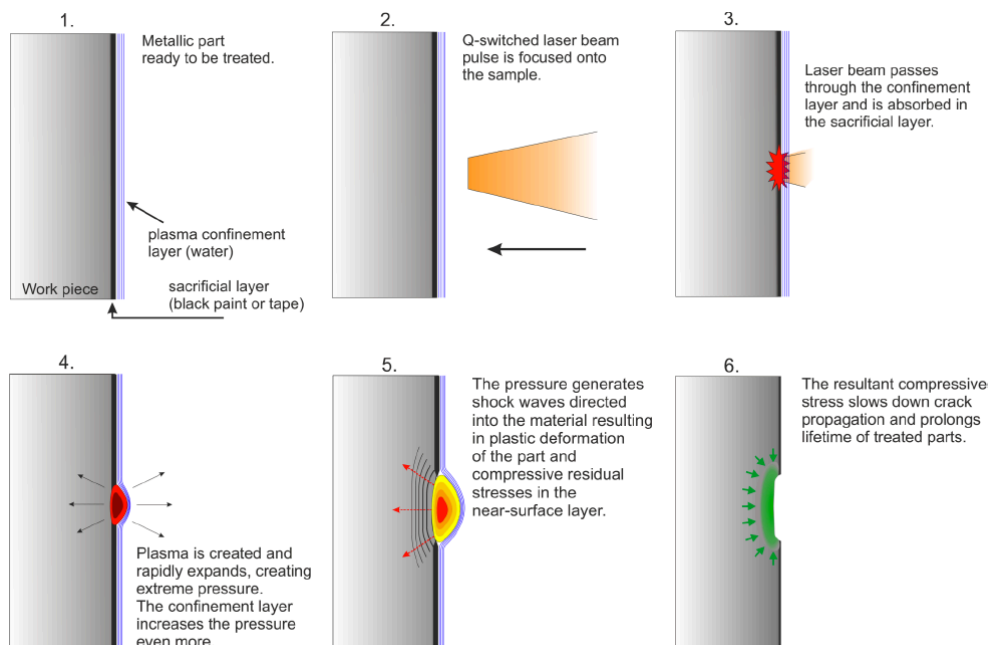
Zpevňování povrchu je při válečkování vyvoláno tlakem otočného tvářecího tělesa, které se odvaluje po upravovaném povrchu. Válečkování zlepšuje mikrogeometrii, přesnost rozměrů i výsledný vzhled. Tato metoda se nejvíce využívá pro zpevnění povrchu a jeho vyhlazení. Plastická deformace se po válečkování projeví do hloubky několika milimetrů, ve které jsou výrazně ovlivněny mechanické vlastnosti. Zvýšením tvrdosti, pevnosti a rozložením vneseného vnitřního tlakového pnutí v povrchové vrstvě dochází ke zvýšení únavové pevnosti opracované součásti. Tímto způsobem je také zvýšena odolnost proti korozi a vzniku trhlin. Válečkováním lze upravit vnější i vnitřní rotační plochy, závitů i rovinné tvarové plochy [15], [18].

2.2.3. Laser shock peening

Laser shock peening je metoda tváření, při které je využito laserových výbojů o velké pulsní energii po velmi krátkou dobu. Rázová vlna vyvolaná při dopadu laserového pulzu na povrch tvářeného materiálu vyvolá plastickou deformaci povrchu, čímž je do materiálu vneseno zbytkové tlakové napětí, které zlepšuje únavové vlastnosti, tedy odolnost vůči cyklickému namáhání [19]. Pro správný průběh je nutné splnit několik podmínek. První podmínkou je přítomnost absorpční vrstvy, jinak obětované vrstvy, která se vypařuje, a tím na povrchu vznikne plazma s krátkodobým pulzním tlakem. Absorpční vrstva zabraňuje tavení a laserové ablaci⁸ při zachování vysoké kvality povrchu. Bez této vrstvy nelze efektivně modifikovat tlakovou energii na požadovanou rázovou energii. Jako obětovaného povlaku je obvykle využíváno vinylové pásky nebo černé barvy, kterou lze snadno aplikovat i odstranit po konci procesu. Mimo jiné lze využít i hliník, měď, nebo olovo. Empiricky bylo zjištěno, že nejlepší absorpční schopnost je vykazována při použití černé barvy, kde téměř 100 % tlakové energie je využito k vytvoření plazmatu [20]. Další podmínkou je použití transparentního překryvu, který zvyšuje intenzitu rázové vlny, neboť tento brání vytvořenému plazmatu v příliš rychlé expanzi od povrchu, tím je dodáno do materiálu více rázové energie a je zajištěna delší interakce rázové vlny s povrchem materiálu. Jako průhledné překrytí, transparentní vrstvu, nebo omezující médium lze použít vodu, plexisklo, gumu nebo sklo mj.. K plastické deformaci dochází, pokud je napětím rázové vlny překonána mez pevnosti daného kovu. Tyto kroky je nutné splnit v pořadí, ve kterém zde byly popsány [19], [20], [21], [22].

Obrázek 6 znázorňuje dopad laserového paprsku do transparentního překryvu (plasma confinement laser - water) a její náraz na obětovanou vrstvu (sacrificial layer - black paint or tape), jejíž povrch se okamžitě začne odpařovat. Tato vzniklá pára je zachycena mezi obětovaným a transparentním překryvem. Pulzní energie se snaží proniknout dál, velmi rychle zahřívá a ionizuje páru, a tím jí mění v rychle se expandující plazma (4.). Zahříváním plazmatu je generován prudký nárůst tlaku na povrchu materiálu, čímž je vyvolána rázová vlna s vysokou amplitudou, která se šíří dál do materiálu (5.) [22].

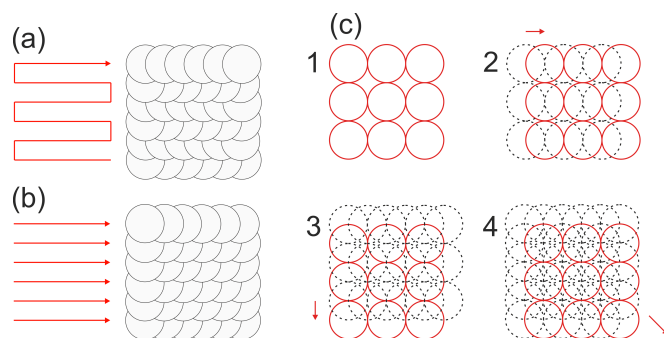
⁸ Lze chápat jako odtavování.



Obrázek 6 - Laser shock peening [22].

Laserový paprsek, který dopadá na vzorek je ve tvaru kruhu, nicméně studie poukazují na fakt, že kruhový bod v jediném nárazu způsobuje pokles tlaku uprostřed tohoto kruhového nárazu, tzn. nerovnoměrné rozprostření zbytkového pnutí. Proto je vhodné provést více nárazů, které jsou posunuté o konkrétní vzdálenost nebo úhel. Způsobů tohoto vzorování je více a jsou znázorněny na Obrázku 7 viz dále.

Pod označením (a) je vidět prostý “cik-cak” vzor, kde se překrývají pulzy posunuté o polovinu jejich délky nad sebou a vedle sebe. Vzor (b) je předchozímu velmi podobný, ale k překrytí dochází stále ve stejném směru, takže ohraničení pulzu při posunu po ose x je stále ve stejném místě, tento způsob je pomalejší, ale při správném nastavení je zaručeno, že každý řádek bude přímo nad předchozím, narozdíl od strategie (a). Třetí způsob (c) byl využit při tomto experimentu. Jednotlivé sekvence mají velmi malé překrytí, díky tomu se zabráňuje porušení absorpční vrstvy a dosahuje se optimálního rozprostření zbytkového pnutí [22].



Obrázek 7 - Strategie překrytí pulzů. [22].

Hlavním záměrem využití LSP je ovlivnění velikosti zbytkového pnutí. Zvýšením tlakového pnutí v ovlivněné oblasti se dosahuje zvýšení meze únavy, odolnosti povrchu materiálu ke korozi pod napětím a zlepšení tribologických vlastností. Dle článku [20] bylo prokázáno zvýšení korozivzdornosti a zvýšení tvrdosti. Článek [20] se též odkazuje na experiment provedený na materiálu "Ti-2.5Cu", kde bylo dosaženo zvýšení zbytkového pnutí, což vedlo ke zvýšení únavové životnosti materiálu. V porovnání s konvenčními metodami, kdy je plastická deformace vyvolaná dopadem tělísek na povrch, dosahuje u LSP zbytkové pnutí pod povrchem materiálu mnohem vyšší hodnoty (až 2 mm), oproti konvenčním metodám, kde je dosahováno jen okolo 0,5 mm. Výhodou LSP je kvalitnější povrch po opracování, který neobsahuje stopy po vržených tělískách [20], [23].

2.3. Povrchové kalení

Kalením se mění mikrostruktura, což v ideálním případě vede ke zvýšení tvrdosti. Cílem je vytvoření částečné, nebo zcela nerovnovážené struktury, čehož se u konvenčních způsobu dosahuje ochlazením nadkritickou rychlostí, a tím vytvoření bainitické nebo martenzitické struktury. To je obecně platné pro konvenční kalení, ať už celé součásti, nebo jen povrchové vrstvy. Ve většině průmyslových aplikacích je dosahováno mezního stavu⁹ opotřebení na povrchu součásti, nikoli v celém objemu. Proto je snaha o vytvrzení pouze těchto kritických míst a přitom zvýšení životnosti celé součásti. Povrchovým kalením se dosahuje zvýšení tvrdosti pouze v povrchové vrstvě při zachování měkkého a houževnatého jádra. Tato práce se zaměřuje na nové možnosti zvýšení životnosti turbínových lopatek u kterých dochází k opotřebení na nejzatěžovanějších místech a proto jednou ze zkoumaných technologií bude povrchové kalení laserem, kterému je dále v textu věnováno více prostoru, pro porovnatelnost jsou dále uvedeny i příklady konvenčních způsobů povrchového kalení [24].

2.3.1. Kalení plamenem

Kalení plamenem je prováděno kyslíko-acetylenovým hořákem. Z důvodu vysoké teploty plamene a nízké teploty kaleného materiálu vzniká velký teplotní rozdíl. Teplo se hromadí v materiálu a jeho odvod není dostatečně rychlý do celého průřezu, zahřívá se tedy jen povrchová vrstva v určité hloubce. Pro zaručení rovnoměrnosti prokalené vrstvy se kalení provádí autogenním hořákem. Při nepřetržitém kalení se sprcha (kalící médium) pohybuje ihned za hořákem. V případě přetržitého kalení se povrch zahřeje a po odklopení hořáku se sprchou ochladí celý povrch najednou. Výhodou kalení plamenem jsou nízké náklady a možnost kalení velkých výrobků, naopak záporem je nízká přesnost a výrazné tepelné ovlivnění. Shrnutí výhod a nevýhod je v *Tabulce 2* společně s výhodami a nevýhodami indukčního a laserového povrchového kalení [25].

⁹ Změna funkčně přípustného opotřebení na nepřípustné.

2.3.2. Indukční kalení

Jak název napovídá, ohřev zajišťuje indukce, tedy působení elektrického proudu o vysoké, případně středně vysoké frekvenci. Pokud prochází střídavý proud vodičem, který je obvykle ve tvaru smyčky nebo spirály, indukuje se na povrchu vodivého kovu, umístěného uvnitř této smyčky, proud o stejné frekvenci. Účinek indukovaného proudu se projeví velmi rychle ve formě tepla, které ohřeje povrchové vrstvy kovu. Tento způsob kalení se nehodí pro velké předměty a zároveň není vhodný pro málokusové výrobky, neboť induktor musí být vždy přesně přizpůsoben kalené součásti. I zde, jako v předchozím případě, je možné rozlišit kalení postupné, pohybuje-li se sprcha za smyčkou, nebo kalení přetržité, kde se po ohřevu automaticky vypne proud a spustí se na ohřátý povrch sprcha [25].

2.3.3. Laserové kalení

Povrchové kalení laserem patří mezi moderní metody tepelného zpracování. Přenos tepla zde zajišťuje laserový paprsek. Absorbce laserového záření materiálem je na základě interakce elektromagnetického vlnění s elektronovým plynem daného kovu. Laserové kalení přináší mnoho výhod, jednou z nich je rychlost ohřevu, která je nad 1000 °C/s. Hlavní rozdíl této metody oproti výše popsaným je způsob ochlazování, kde kalícím prostředím je vzduch. Železné materiály jsou dobrými tepelnými vodiči, proto vysoké tepelné toky z laserových paprsků jsou vhodné k zahřátí povrchu a následnému samokalení, které je dostatečně rychlé. Výsledkem je tvrdá martenzitická struktura na povrchu při zachování původního, předpokládejme, houževnatého jádra a vyšší odolnost proti opotřebení. Odvod tepla je tedy oproti výše popsaným způsobům intenzivnější. Materiál pod povrchovou vrstvou absorbuje teplo, které dále odvádí pryč z rozhraní místo z teplého povrchu, čímž je snížen gradient napětí a materiál je tak odolnější proti vzniku trhlin.

Množství dodané energie laserem je možné přesně kontrolovat, a to v kombinaci s pyrometrem zaručuje neměnnou hloubku prokalení a tedy rovnoměrnou tvrdost v celém obsahu kaleného povrchu. Příkon energie je regulován podle pohltivosti materiálu. Poměr absorbování laserového záření k odraženému se odvíjí od vlnové délky, obecně platí, že větší část záření se od povrchu odrazí, zatímco menší je absorbována. Pro představu, pohltivost oceli je tím lepší, čím je vlnová délka kratší. Názorně tedy vlnová délka laseru Nd:YAG je pro ocelové kalení výhodnější, než-li vlnová délka laserového paprsku CO₂. Vzhledem k tomu, že laser je drahým zdrojem energie, je využíván jen v případech, kdy to je technologicky, technicky nebo ekonomicky odůvodněné. Jako příklad lze uvést kalení ozubení, kde díky nastavitelnému úhlu dopadu laserového svazku dochází k rovnoměrnému zakalení. Kladem je možnost použití pro malé a tvarově složité díly nebo automatizace vedení paprsku. Záporům je například vysoká počáteční investice nebo nutnost vysoké kvalifikace operátorů. Další výhody a nevýhody jsou uvedeny opět v *Tabulce 2* pro přehledné porovnání [26], [27].

Tabulka 2 - Výhody a nevýhody vybraných typů povrchového kalení [25], [26], [27]. Vlastní.

Kalení	Výhodné	Nevýhodné
Plamenem	Vhodné pro velké výrobky	Malá přesnost
	Nízké náklady	Zpracování vnitřních průměrů
	Konstantní rychlost ohřevu	Deformace vlivem tepelného zpracování
Indukcí	Rychlé	Neflexibilita
	Vhodné pro pásovou výrobu	Deformace vlivem tepelného zpracování
Laserem	Selektivní kalení	Počáteční investice
	Samokalení	Zdravotní rizika - ozáření
	Minimální deformace vlivem tepelného zpracování	Vysoké nároky na kvalifikaci operátorů

2.4. Materiály turbínových lopatek

Turbínové lopatky musí splňovat zvýšené nároky, například na odolnost proti vysokým teplotám, opotřebení, nebo tečení. Tyto nároky se různí dle umístění a způsobu zatěžování konkrétní turbínové lopatky. Statické lopatky, které jsou namáhány tlakem proudícího média musí vykazovat vysokou pevnost v ohybu a krutu a zároveň být velmi odolné proti opotřebení a otěru, neboť se během provozu může měnit pracovní látka, a to jak z hlediska fyzikálních vlastností, tak změnou skupenství, což vede ke změnám tlaku a kavitaci¹⁰. Statické lopatky při kmitavém pohybu musejí velmi dobře odolávat únavě. Právě únavová trhлина je častým problémem těchto součástí, proto je snaha o jejich zlepšování a zvyšování jejich životností různými technologiemi. To platí i pro lopatky oběžné, jinak pracovní, na které jsou kromě vysoké odolnosti proti únavě kladeny i vysoké nároky proti tečení.

Nejčastěji je jako materiál lopatek využívána ocel a její slitiny. Nespornou výhodou těchto materiálů je jejich vysoká pevnost a vysoký rozsah pracovních teplot. Oproti tomu vlastnosti, jako hustota nebo odolnost proti korozi či kyselinám nedosahují optimálních hodnot. Z toho důvodu jsou často dopované malým množstvím legujících prvků nebo jsou chráněny povrchovou úpravou. Mezi časté legující prvky patří Cr, Mo, Si, Mn, V, Ti, a další.

Materiály pro turbínové lopatky, jako je materiál na kterém byl proveden experiment, mají obvykle vyšší žárupevnost¹¹. Oceli na lopatky lze rozdělit do mnoha podskupin, například vysokochromové, které jsou označovány jako korozivzdorné právě díky vysokému obsahu chromu, který je v rozmezí 10 - 18 %. Zároveň mají tyto oceli vysokou hodnotu meze únavy a pro zlepšení žárupevnosti jsou tyto oceli navíc legovány legujícími prvky, například Mo, W, nebo V.

¹⁰ Vznik, případně zánik, podtlakových bublin páry v kapalině v důsledku prudké změny tlaku.

¹¹ Schopnost materiálu přenášet zatížení za vyšších teplot.

Dále se využívají nízkolegované oceli dopované prvky jako jsou Cr, Mo, V, Ni, nebo W. Obvykle mají tyto oceli pouze 0,20 - 0,30 % uhlíku a jejich využití je spíše u velkých a těžkých lopatek s nižšími nároky na žárovečnost, která je přibližně do 550 °C [28], [29].

Tento experiment je proveden na nízkolegované oceli chromem a molybdenem. Přesné označení je 42CrMo4, což je dle materiálového listu konstrukční nízkolegovaná chrom-molybdenová ocel, jejíž chemické složení je popsáno v *Tabulce 3*. Využívá se pro více namáhané strojní díly a po zakalení dosahuje vysoké tvrdosti. Tato ocel je náchylná ke vzniku kalících trhlin a proto se upřednostňuje kalení do méně razantního kalícího prostředí. Po kalení dobře odolává opotřebení a je velmi často využívána k dalšímu zušlechťení. Níže uvedená *Tabulka 4* uvádí mechanické vlastnosti této oceli pro průměr tělesa v rozmezí 40 - 100 mm, tedy pro průměr, který byl použit pro experiment [30].

Tabulka 3 - Chemické složení oceli 42CrMo4 [30]. Vlastní.

Chemické složení hotové oceli	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo
%	0,36-0,47	0,43	0,56-0,94	0,030	0,040	0,85-1,25	0,12-0,33

Tabulka 4 - Mechanické vlastnosti oceli 42CrMo4 [30]. Vlastní

	R _e min. [MPa]	R _m min. [MPa]	A min [%]	Z min [%]	Tvrdost po povrchovém kalení [HRC]
Mechanické vlastnosti pro průměr 40<d≤100 mm	650	900-110	12	50	Min. 53

Tento materiál, stejně jako další, které jsou využívány pro turbínové lopatky, jsou vysoce namáhány a dochází k jejich praskání, pravděpodobně kvůli nízké životnosti. Proto se tato práce věnuje možnému způsobu zvýšení jejich životnosti.

2.5. Zbytkové pnutí

Zbytkové pnutí je důležitá součást integrity povrchu, která má výrazný vliv na únavovou odolnost součásti. V literatuře je vnitřní pnutí rozděleno na vložené, které po odstranění zatížení zanikne a zbytkové, které v materiálu zůstávají. Zbytkové pnutí je složeno z tahového a tlakového pnutí, která jsou v rovnováze. Pokud by došlo k narušení jejich rovnováhy, materiál se bude snažit tuto disbalanci vyrovnat deformací. Způsoby vzniku takového pnutí jsou různé, například při mechanických procesech (kuličkování, LSP), kdy je do materiálu vneseno napětí kvůli plastické deformaci. Při tepelných procesech vyvolávají napětí v materiálu teplotní gradienty. Pnutí může též vzniknout jako následek chemického procesu (oxidace, koroze, aj.).

Pro měření zbytkového pnutí je využíváno nepřímých metod. Měřena je vždy určitá veličina, ze které je pak dopočítána hodnota zbytkového pnutí. Měřenou veličinou může být proud a jeho změna, a poté se jedná o elektrický způsob zjišťování přítomnosti zbytkových pnutí. Při ultrazvukové metodě je zbytkové pnutí vypočítáno ze vztahu napětí a rychlosti ultrazvukových vln. Rovněž je možné využít umělé anizotropie¹², vyvolané mechanickou deformací materiálu, v takovém případě jde o metodu optickou, při které je zkoumaný materiál prozařován polarizovaným světlem a přes polarizační filtr jsou následně patrné charakteristické obrazce z interferenčních proužků, které poskytují informace o rozložení mechanického napětí. Čím hustější jsou tyto proužky, tím je mechanické napětí v tomto místě větší. A konečně metoda rentgenové difrakční analýzy, která bude využita pro měření zbytkového pnutí na vzorcích v této práci, proto je difrakční metodě vyhrazena následující kapitola [31].

2.5.1. Rentgenová difrakční analýza

V této práci je zbytkové pnutí měřeno pomocí rozptylu rentgenových paprsků na krystalech, které díky periodicitě mřížek světlo odráží a následně interferují. Protože zbytkové pnutí nelze měřit přímo je zde využito měření rozdílu vzdáleností atomových mřížkových rovin vyvolaných tímto napětím. Principem je dosažení interferenčního maxima ve směru úhlu Théta (θ ¹³), který získáme pokud bude rozdíl drah vyslaného a odraženého paprsku celočíselným násobkem (n) vlnové délky použitého záření (λ), tedy pokud bude platit Braggova rovnice:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Pokud tedy dráhový rozdíl odražené vlny z místa 1 a odražené vlny z místa 2, která je posunuta o vzdálenost d , bude celočíselným násobkem použité vlnové délky, dojde k pozitivní interferenci a bude možné vypočítat hodnoty zbytkového pnutí díky zjištěným změnám vzdálenosti d a úhlu θ [31].

¹² Závislost veličiny na volbě směru.

¹³ Úhel mezi rovinou mřížky a směrem šíření dopadající vlny. Známý jako Braggův úhel.

2.6. Tribologie

Tribologií se rozumí nauka o tření a opotřebením. Tribologie se zajímá nejen o tření z fyzikálního hlediska (tribofyzika), ale i o struktury a chemické vlastnosti třecích uzlů (tribochemie) a konstrukce, provoz a údržbu konkrétních tribologických soustav (tribotechnika). Pro účely této práce je podstatná zejména tribofyzika, tedy tření, které se projevuje nejen opotřebením. Tření vzniká tam, kde jsou v dynamickém kontaktu dvě tělesa a mezi nimi vzniká odpor proti tomuto pohybu. V tribologickém systému dochází k opotřebením adhezí, abrazí, erozí, vibrací a hlavně únavou, ke které dochází při opakovaném silovém namáhání vysokými lokálními tlaky. Toto opotřebením často vede k dosažení mezního stavu materiálu, a tím ukončení životnosti součásti, a proto je u turbínových lopatek snaha o zajištění vysoké odolnosti proti tomuto namáhání. V jiných případech je možné tření využít, a to například u třecího svařování, kde se mechanická práce přemění na využitě teplo nebo u brždění kol, kde je naopak snaha o zvýšení třecích sil [32].

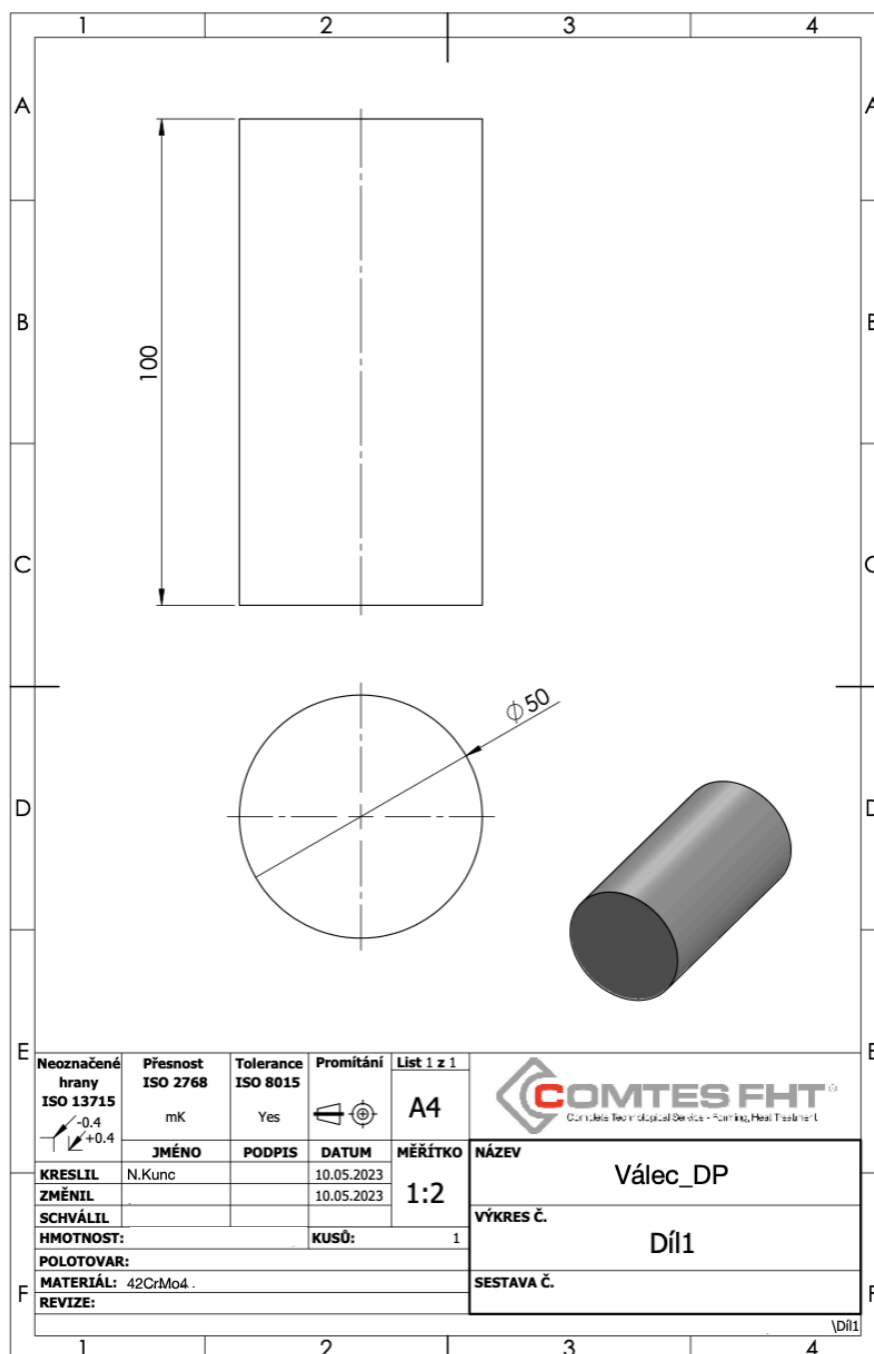
Odolnost proti opotřebením je měřena tribologickými testy, které simulují zatěžování v provozu a sledují chování materiálu. Obvykle se z nich určují hodnoty smykového tření, třecí síly a parametr opotřebením. Zatěžování materiálu se liší dle způsobu pohybu funkční dvojice (například lineární nebo rotační pohyb), jejich tvaru nebo kontaktu (například kontakt bodový nebo plošný). V experimentální části bude proveden tribologický test známý jako “pin on disc”, proto je mu věnována následující podkapitola.

2.6.1. Pin on disc test

Základem této metody je dvojice “Pin” a “Disc”. Pin je tělíčko ve formě válečku nebo kuličky. Toto tělíčko je statické a pohyb vykonává vzorek, který je většinou ve formě disku. V definované vzdálenosti od středu vzorku je pin zatížen předem nastavenou silou a vzorek se při tomto zatížení rotačně pohybuje. Tento pohyb je omezen počtem otáček, který je obvykle předem přesně stanoven. Vzniklá stopa po vnikacím tělesu je potom analyzována z hlediska tvaru a hloubky. Kromě zatěžující síly, styčné plochy pin tělíčka, relativní rychlosti pohybu a počtu cyklů jsou výsledky závislé na teplotě, kvalitě a stavu povrchu vzorku, mazací látce a samozřejmě mechanických a fyzikálních vlastnostech jak tělíčka, tak vzorku [33].

3. Experimentální část

Materiál byl poskytnut společností COMTES FHT, a.s., která dodala šest vzorků ve formě válce o průměru 50 mm a výšce 100 mm, tak jak ukazuje výkres (Obrázek 8). Válečky byly dodány v nezpracovaném stavu (+U), proto prvním krokem bylo zušlechtnění (+QT) vzorků, které bylo dle materiálového listu a požadavků na zachování houževnatosti při dosažení vyšší tvrdosti, provedeno za teploty 830 °C s výdrží 120-ti minut a následným popouštěním při teplotě 580 °C, taktéž po dobu dvou hodin [30], [34].



Obrázek 8 - Výkres vzorku použitý pro experiment. Vlastní.

Při tepelném zpracování došlo k oduhlíčení povrchové vrstvy, proto byla čela válečků odříznuta na metalografické pile Struers Discotom-6, za použití kotouče Struers 56A25. Řezná rychlost byla zvolena na 0,3 mm/s, tak, aby nedošlo k dalšímu tepelnému ovlivnění. Tloušťka odebraného čela byla 5 ± 1 mm. Po oříznutí následoval proces ochrany před korozí, tedy očištění lihem, osušení a zakonzervování vazelínou.

Takto připravené vzorky byly zpracovány vybranými technologiemi tak, jak popisuje následující *Tabulka 5*.

Tabulka 5 - Značení vzorků dle provedené technologie. Vlastní.

Označení vzorku	Technologie zpracování
S	Laser shock peening
L-S	Laserově kalen, následně laser shock peening
L	Laserově kalen
S-L	Laser shock peening, následně laserově kalen
ZM	Základní materiál

3.1. Technologie

Po přípravě vzorků byly vzorky L-S a L zakaleny na Západočeské univerzitě v Plzni. Pro experiment byl využit šestiosý robot značky FANUC s laserovou kalící hlavou TruDisk 4006 od společnosti Trumpf.

Vzorky byly před samotným kalením označeny na laterální straně, odmaštěny a očištěny na obou čelech. Vzhledem k šířce paprsku (20 mm) nebylo možné zakalit vzorek na jedno otočení, proto bylo kalení provedeno ve dvou krocích. První krok bylo zakalení vnitřního kola, druhým krokem bylo kalení vnějšího kola. Tento postup zachycuje *Obrázek 9*, kde je na levé straně možné vidět zakalení vzorku na vnitřním mezikruží, na pravé straně pak zakalená celá plocha.



Obrázek 9 - Postup kalení vzorku. Vlastní.

Výkon pro vnitřní a vnější kalící kruh byl nastaven odlišně, při zachování stejné kalící (obvodové) rychlosti. Tyto hodnoty byly vybrány na základě zkušeností a předchozích zkoušek na testovacích vzorcích a jsou zaznamenány v *Tabulce 6*.

Tabulka 6 - Parametry laserového kalení. Vlastní.

Kalené kolo	Výkon [kW]	Obvodová rychlost [r/min]	Rozměr paprsku [mm]
Vnitřní	2,2	5	20 x 10
Vnější	2,8	5	20 x 10

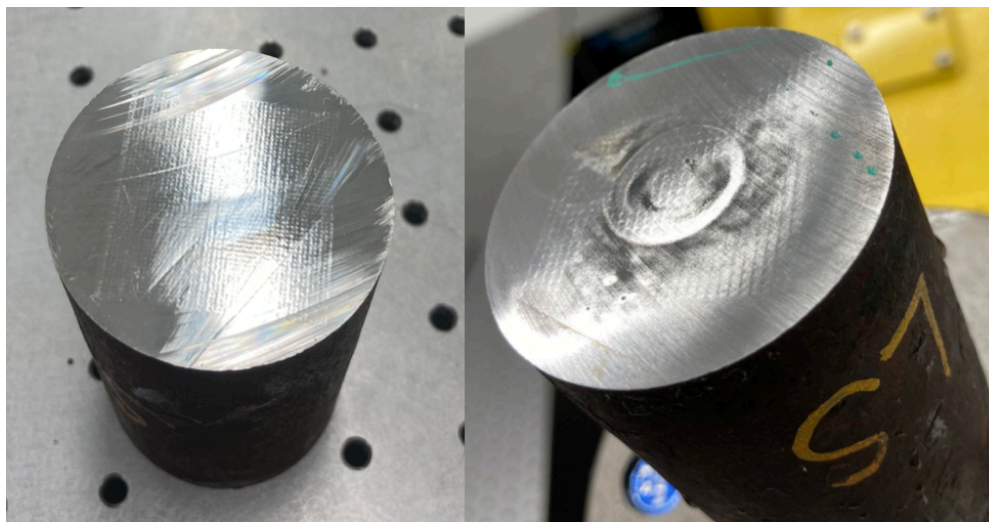
Po zakalení byly vzorky samokaleny na vzduchu a pro vzorky L-S, S a S-L následovala technologie laser shock peening, která byla provedena ve výzkumném centru HiLASE, pomocí robota FANUC M-20iB/35S. Opět byl před samotným provedením materiál očištěn a odmaštěn. Jako absorbní vrstva byla použita černá vinylová páska a pro transparentní překryv byla zvolena voda. Pomocí souřadnicového systému robota byl vzorek nastaven do optimální pozice, tedy tak, aby byl neustále pod proudem vody a ve vzdálenosti tak, aby byl paprsek zaostřený. V *Tabulce 7* jsou zapsány parametry LSP, které byly opět stanoveny na základě zkušeností a provedených zkoušek na zkušebním vzorku.

Tabulka 7 - Parametry provedeného laser shock peeningu. Vlastí.

Vzorek	Energie pulsu [J]	Délka pulsu [ns]	Rozbíhavost paprsku Φ [mm]	Sekvence / vrstva*	Hustota výkonu [GW/cm ²]	Rozměr [mm]	Posuvová rychlost vzorku [mm/s]
S	2,9	17	1,9	4	6,02	32x32	19,0
L-S	2,9	17	1,9	4	6,02	32x32	19,0
S-L	2,9	17	1,9	4	6,02	32x32	19,0

Sloupec s označením “Sekvence/vrstva” označuje sekvenční schéma shock peeningu. Možnosti sekvenčního překrytí jsou popsány v kapitole “2.2.3. Laser shock peening” a v tomto experimentu bylo využito čtyř překryvů. Každé bylo vždy posunuto o poloměr paprsku. Názorně je tento postup vidět na *Obrázku 6* jako způsob (c).

Následující fotografie ukazuje vzorky S (vlevo) a L-S (vpravo). Na vzorku L-S je možné pozorovat “spálení”, černá zoxidovaná místa, která vznikla v místech protržení pásky. K tomu dochází nejčastěji při mikronerovnosti povrchu, kde je koncentrováno napětí nebo při výskytu drobných nečistot, které fungují stejně. K protržení pásky ale může dojít i v případě velmi tvrdých materiálů, které se “brání” tlakové vlně a vzniklá síla poruší soudržnost ochranné vrstvy. Dále je z *Obrázku 10* vidět, že vzorek “S” má výraznější stopy po LSP, oproti vzorku L-S, to je způsobeno zvýšenou tvrdostí předem zakaleného vzorku.



Obrázek 10 - Ukázky povrchu po LSP, vlevo vzorek S, vpravo vzorek LS. Vlastní.

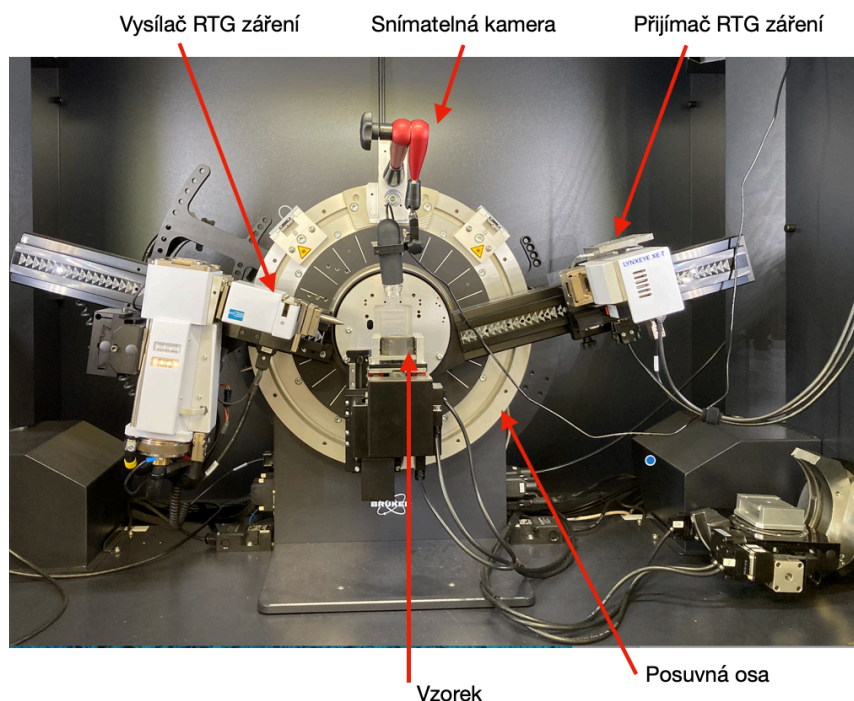
Po provedení laser shock peeningu, byl vzorek S-L laserově zakalen, a to za stejných podmínek jako při předchozím kalení vzorků L-S a L.

3.2. Zkoušky

Po zpracování vzorků vybranými technologiemi následovaly mechanické zkoušky a metalografie. Jedno zpracované čelo bylo využito pro zjištění do jaké míry jednotlivé technologie a jejich kombinace ovlivňují zbytkové pnutí pomocí difrakční analýzy. Dále byla na těchto vzorcích provedena metalografie a měřena tvrdost. Druhé zpracované čelo bylo použito pro tribologickou zkouškou.

3.2.1. Zbytkové pnutí

Měření zbytkového pnutí bylo provedeno ve společnosti COMTES FHT, a.s. na difraktometru Bruker D8 DISCOVER s měděnou rentgenovou lampou a vlnovou délkou 0.154056 nm. Tento stroj je zaznamenán na *Obrázku 11* viz níže.



Obrázek 11 - Difraktometr. Vlastní.

Princip difrakční analýzy je popsán v kapitole “2.5.1. Rentgenová difrakční analýza”. Praktický průběh zkoušky spočíval v odmaštění vzorků a následném vložení do difraktometru, kde po nastavení příslušných rozmezí měření (133° až $142^\circ 2(\theta)$ s krokem $0,1^\circ$) byl vzorek v režimu “iso inclination”, tedy ve statické pozice oskenován posouváním zdroje záření a detektoru v sedmi krocích (-45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° , 45°). Pomocí softwarového programu “Adjust” a “Job” byly získány výsledné hodnoty zbytkového pnutí. Mezi konstanty vstupující do výpočtu patřil Youngův modul (202GPa) a Poissonova konstanta (0,3).

Pro získání hloubkového profilu bylo měření opakováno, a to vždy po úběru materiálu. Vzhledem k tomu, že nebylo přípustné vnést do materiálu jakékoliv napětí, musel být tento úběr bezsilový, proto bylo využito elektrochemické leštičky LectroPol-5. Elektrolyt z ethanolu, destilované vody, kyseliny chloristé a 2-butoxyethanolu, pod obchodním názvem “A2” byl pravidelně chlazen a vyměňován pro zajištění kvalitního odleštění a získání lesklé a hladké povrchové vrstvy. Hodnota napětí odlešťování byla zvolena po proměření závislosti proudu na napětí, podle toho při jakém napětí bylo vykazováno nejvyšší proudové hustoty. Velikost odebrané vrstvy byla vždy proměřena certifikovaným mikrometrickým měřítkem a všechna tato měření jsou zaznamenána v tabulce, která tvoří Přílohu 1 této práce.

Výsledky měření zbytkového pnutí jsou zaznamenány níže v *Kapitole 4* v *Grafu 1*.

3.2.2. Metalografie

Ze vzorku použitých pro měření zbytkového pnutí byly vyříznuty vzorky pro metalografii, opět na pile Discotom-6, za stejných podmínek jako při prvotním obrábění, tedy za použití kotouče 56A25 s řeznou rychlostí 0,3 mm/s. Vzorky byly následně zalisovány na metalografickém lisu Citopres 10 za použití dvaceti ml pryskyřice pod obchodním názvem Polyfast. Zalisování proběhlo při teplotě 180 °C, tlaku 250 bar po dobu 3,5 minut. Ochlazování trvalo 90 sekund. Takto připravené materiály byly přebroušeny na automatické brusce LaboForce-100 pomocí brusných papírů o drsnostech 80, 220, 500 a 1200 a následně leštěny na plátnech MD dur (hrubost 9 μm), MD mol (hrubost 3 μm) a MD nap (hrubost 1 μm) za použití suspenze MOL B3. Veškeré výše popsané stroje a pomůcky byly od značky Struers.

Vzorky byly před samotným vložením do mikroskopu naleptány Nitalem¹⁴ po velmi krátkou dobu, cca 2 vteřiny, opláchnuty vodou a vloženy do kádinky s lihem a vyčištěny pomocí ultrazvukové čističky. Metalografie byla provedena na optickém mikroskopu Observer Zeiss Z1M s motorizovaným stolcem a možností posunu vzorku ve třech osách. Pomocí mikroskopu a obrazové analýzy softwaru AxioVision byly pořízeny následující *Obrázky 12 - 23*, které ukazují povrchovou vrstvu a struktury testovaných vzorků a jsou zaznamenány v *Kapitole 4*.

3.2.3. Tvrdost

Měření tvrdosti bylo provedeno v laboratořích ZČU. Tvrdost byla měřena na příčném řezu po metalografickém výbrusu, a to pomocí metody Vickers s označením HV1, tedy zátěžnou silou 9,807 N po dobu 15-ti sekund. Následně byly přímo na tvrdoměru označeny délky uhlopříček vzniklé po vtisku diamantového čtyřbokého jehlanu do zkoušeného vzorku. Na základě délek uhlopříček tvrdoměr zobrazil hodnotu tvrdosti dle Vickerse podle *Vzorce 2* [35]:

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

Norma dále uvádí maximální přípustnou chybu tvrdoměru vyjádřenou v procentech, výňatek z této tabulky pro účely této práce je uveden v *Tabulce 8*, kde jsou tyto hodnoty uvedeny.

Tabulka 8 - Hodnoty maximální přípustné chyby [35]. Vlastní.

Zkouška tvrdosti "HV1"					
Tvrdost [HV]	300	400	500	600	700
Procentuální chyba	4	4	5	5	5

Samotné měření proběhlo nejprve na základním materiálu, a to ve třech místech. Výsledná průměrná hodnota je zaznamenána v *Grafu 2* v *Kapitole 4*. Stejně tak jsou zaznamenány průběhy tvrdostí všech vzorků u kterých bylo měření provedeno do hloubky 2,4 mm od povrchu po krocích 0,2 mm.

¹⁴ 5-ti % kyselina dusičná, běžně využívané leptadlo pro nelegované a nízkolegované oceli.

3.2.4. Tribologie

Zkouška tribologických vlastností byla provedena pomocí analýzy "Pin on disc" v laboratořích ZČU. Zkouška byla vyhotovena na tribometru Anton Paar TBR3. Jako "Pin" tělísko byla použita kulička o průměru 6 mm z materiálu Al_2O_3 . Kulička zatěžovala vzorek silou deseti Newtonu. Jak bylo výše zmíněno, pro vyhotovení zkoušky je potřeba zadat počet cyklů, zde to bylo 10 000 opakování a rádius zatěžujícího kola byl nastaven na 12,5 mm. Otáčky motoru byly 300 r/min.

Vyhodnocení proběhlo dvěma způsoby. První byla metoda hmotnostního úbytku, kde byl materiál zvážen před provedením a po provedení zkoušky. Důležitou zmínkou je, že byl materiál před každým měřením vložen do ultrazvukové čističky, aby se zaručilo vážení čistého vzorku bez případných nečistot. Vzhledem k vysoké váze vzorků je nebylo možné zvážet na váze s přesností na desetitisíciny gramu, proto bylo využito váhy s přesností setiny gramu. Z tohoto důvodu bylo toto měření jen orientační a nelze se na výsledky spolehlivě odkazovat. Druhou metodou vyhodnocení bylo měření šířky vzniklé drážky (metoda objemu drážky). Jak již bylo uvedeno výše, vzniklé tělísko zanechá ve vzorku drážku ve tvaru mezikruží. Šířka tohoto mezikruží byla proměřena v osmi místech, vzdálených od sebe 45° . Výsledky měření byly následně zprůměrovány a výsledná hodnota je využita pro výpočet odebraného objemu dle *Vzorce 3*:

$$V = \frac{\pi * (d) * (h)}{6 * (D)} \quad [\text{mm}^3] \quad (3)$$

,kde:

D = poloměr kuličky [mm]

d = poloměr drážky [mm]

h = šířka drážky [mm]

Z vypočteného objemu je dále vypočítána míra opotřebení dle *Vzorce 4*:

$$W = \frac{V}{F * L} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{N} * \text{mm}} \right] \quad (4)$$

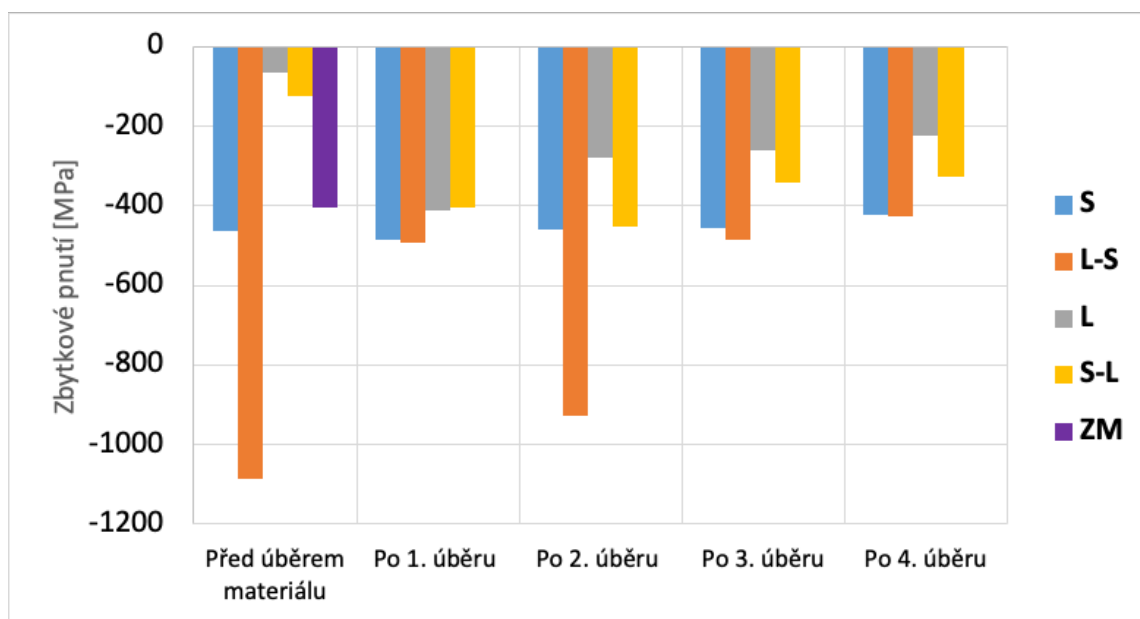
,kde:

F = zátěžná síla [N]

L = dráha [mm]

4. Výsledky a jejich diskuze

Získané hodnoty zbytkového pnutí zaznamenává *Graf 1*. Pro přehlednost je zde uvedeno pouze pořadí měření a naměřené hodnoty. Velikosti úběru materiálu a specifikace elektrochemického leštění využitého pro hloubkové měření jsou uvedené v *Příloze 1* této práce. Z *Grafu 1* vyplývá, že nejvyšších hodnot tlakových pnutí dosahoval vzorek L-S, tedy vzorek, který byl nejdříve laserově zakalen, a pak na něm byl proveden laser shock peening. V povrchové vrstvě bylo tlakové pnutí -1087 Mpa a směrem do středu se toto pnutí snižovalo. V hloubce necelých 700 μm od povrchu byla naměřena hodnota -428 Mpa. Tyto hodnoty poukazují na to, že kombinace laserového kalení a laser shock peeningu mohou opravdu dosahovat synergie, vzhledem k tomu, že vysoce přesáhly hodnoty shock peeningovaného vzorku. Zároveň je možné z naměřených hodnot rozpoznat, že záleží na pořadí aplikace těchto technologií, neboť vzorek, který byl nejprve shock peeningován a následně zakalen vykazuje téměř nejnižší hodnoty. Dle očekávání je tlakové pnutí v zakaleném vzorku nejnižší, neboť kalení nemá pozitivní vliv na tuto vlastnost. Při prvním měření L vzorku v povrchové vrstvě vykazoval velmi nízkou hodnotu zbytkového pnutí, což bylo oproti očekávání, proto bylo měření dvakrát opakováno. V *Grafu 1* je zaznamenána průměrná hodnota těchto tří měření, z čehož vyplývá, že při druhém a třetím měření byla potvrzena prvotně naměřená nízká hodnota. U tohoto vzorku pravděpodobně došlo k oduhličení povrchové vrstvy, na což poukazuje i nižší hodnota tvrdosti oproti vzorkům S-L a L-S. Hodnoty naměřené na S vzorku dosahovaly téměř konstantních hodnot v celé hloubce a byly mírně vyšší než tlakové pnutí vzorku základního materiálu. Stejně jako vzorek L vykazoval i vzorek S-L výrazně nižší hodnoty tlakového zbytkového pnutí v povrchové vrstvě. Vzhledem k výraznému rozdílu oproti zbytkovému pnutí v hloubce bylo měření taktéž dvakrát opakováno, nicméně hodnoty naměřené při druhém a třetím opakování nebyly výrazně jiné. Tyto nižší hodnoty zbytkového pnutí jsou pravděpodobně způsobeny vlivem oduhličení povrchu, neboť při druhém měření po úběru cca 120 μm došlo k výraznému zvýšení množství zbytkového tlakového pnutí. V *Grafu 1* jsou uvedeny průměrné hodnoty těchto tří měření.



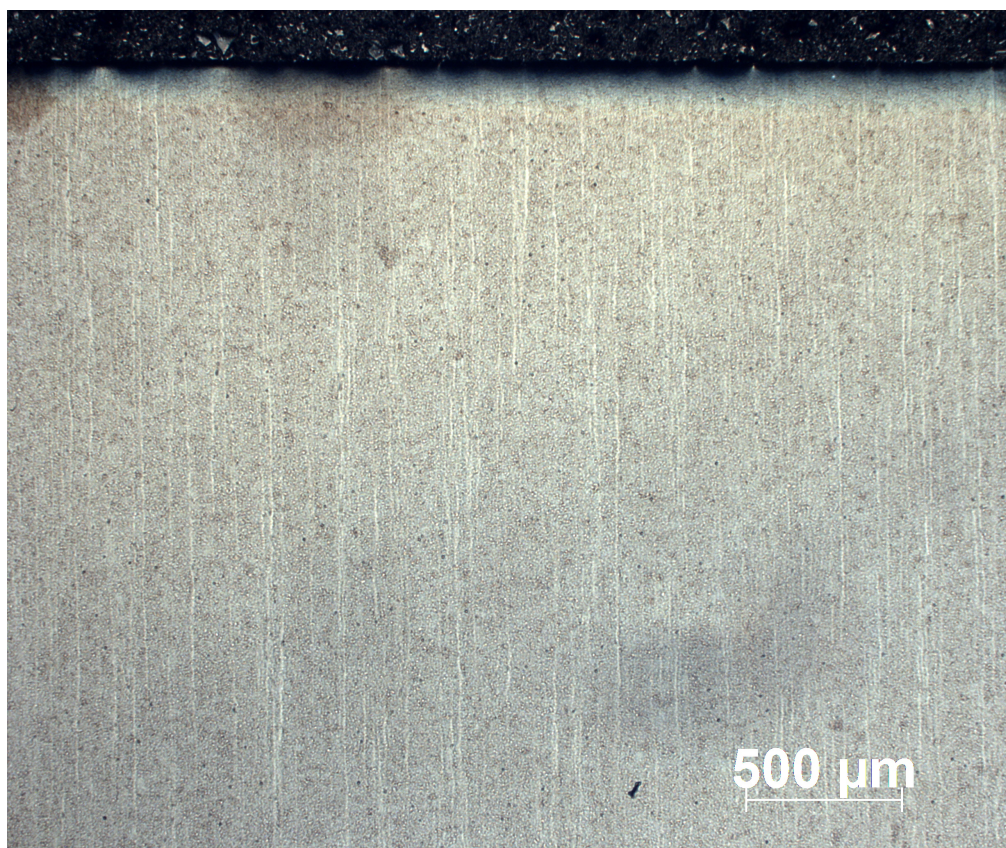
Graf 1 - Hodnoty zbytkového pnutí v povrchové a podpovrchové vrstvě. Vlastní.

Následující *Obrázky 12 - 23* zobrazují strukturu jednotlivých vzorků a hloubky ovlivnění povrchových vrstev. Nejvyšší hloubku ovlivněné vrstvy vykazoval dle očekávání vzorek L, a to 2582,74 μm (viz *Obrázek 18*). Aplikace laser shock peeningu po laserovém kalení nepatrně snížila vliv kalení, neboť hloubka zakalené vrstvy u tohoto vzorku dosahovala mírně nižších hodnot hloubky 2401,24 μm (*Obrázek 15*). Ovšem stále byl vliv kalení výrazně vyšší než u vzorku u kterého byly technologie aplikovány v opačném pořadí, tedy S-L, kde hloubka ovlivněné vrstvy dosáhla hodnoty 2119,6 μm (*Obrázek 21*). U vzorku S nebyla pozorována změna povrchové vrstvy (*Obrázek 12*).

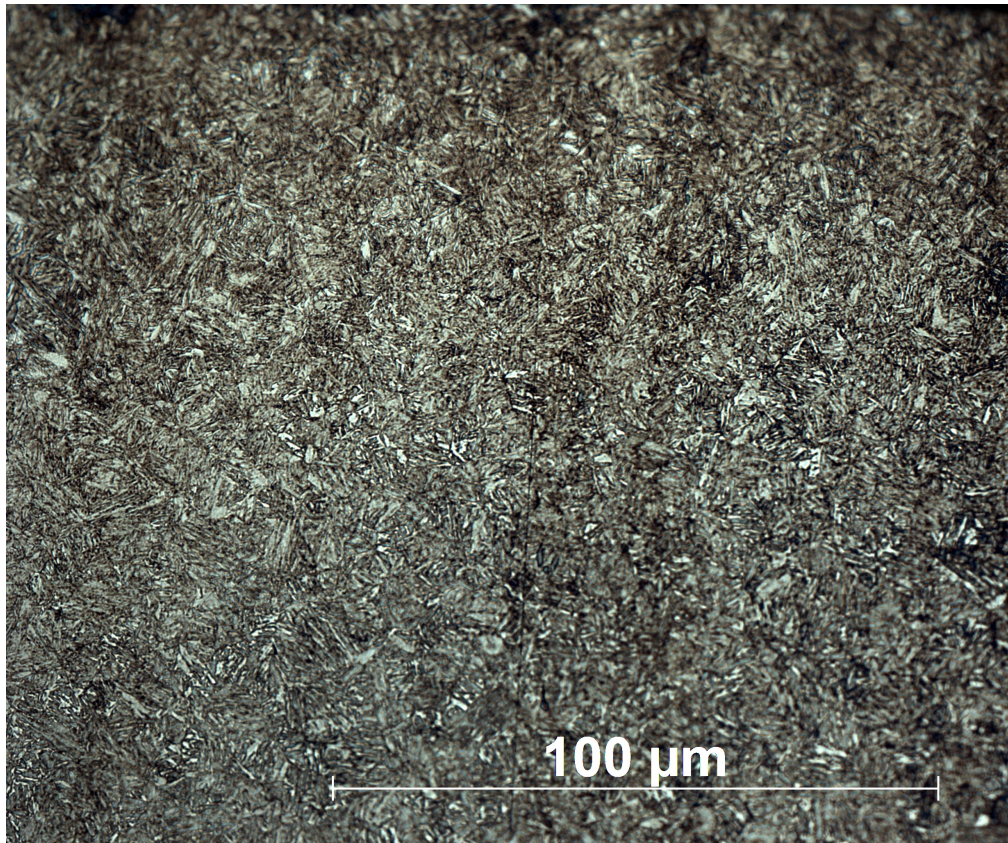
Z obrázků mikrostruktury jde vidět, že strukturou samotného základního materiálu je popuštěný martenzit. Všechny vzorky vykazují výraznou řádkovitost, která vznikla již při výrobě tvářením polotovaru (tyče). Struktura vzorku L, tedy kaleného vzorku, je taktéž martenzitická, ale protože nedošlo k popuštění, nebyla tato řádkovitost odstraněna.

Laser shock peening se projevuje zvýšením hustoty dislokací, což není možné pozorovat na světelném mikroskopu, pouze na transmisním elektronovém mikroskopu, což ovšem nemohlo být z časových a finančních důvodů provedeno. Ze získaných obrázků je možné pouze konstatovat, že se jeho struktura oproti ZM výrazně neliší.

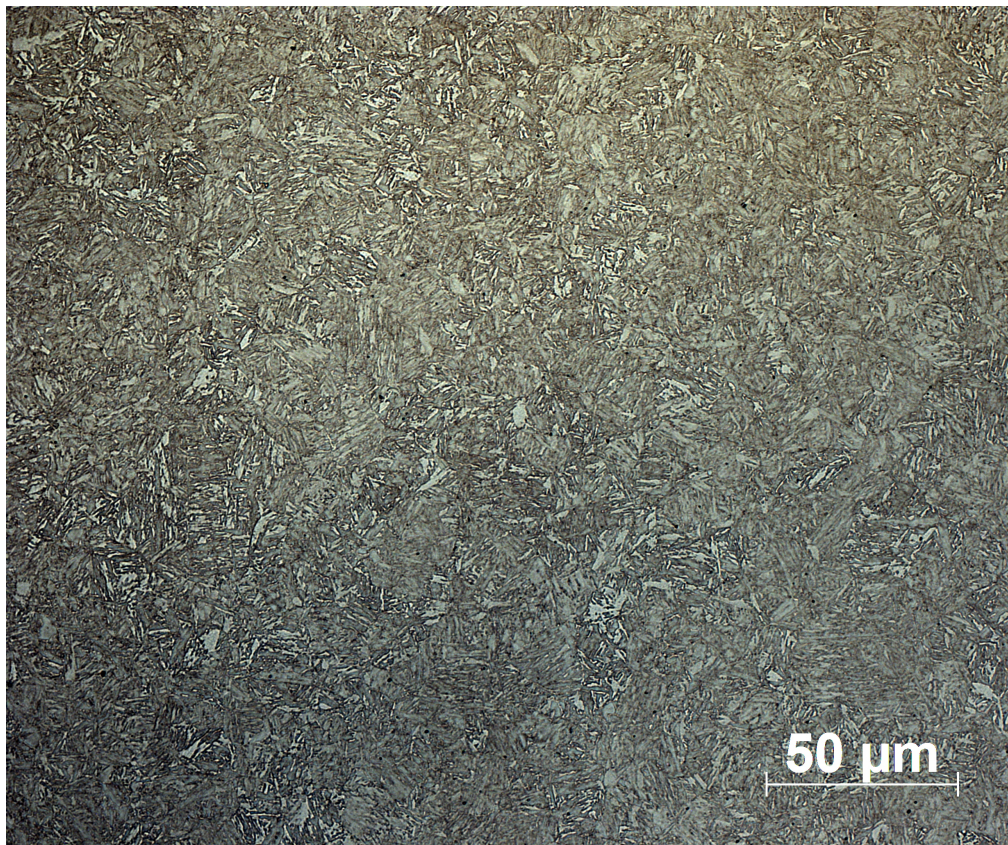
Dále je u povrchových vrstev možné pozorovat hrubší autentické zrno, které se směrem do středu materiálu zjemňovalo, čemu odpovídá vzniklý martenzit.



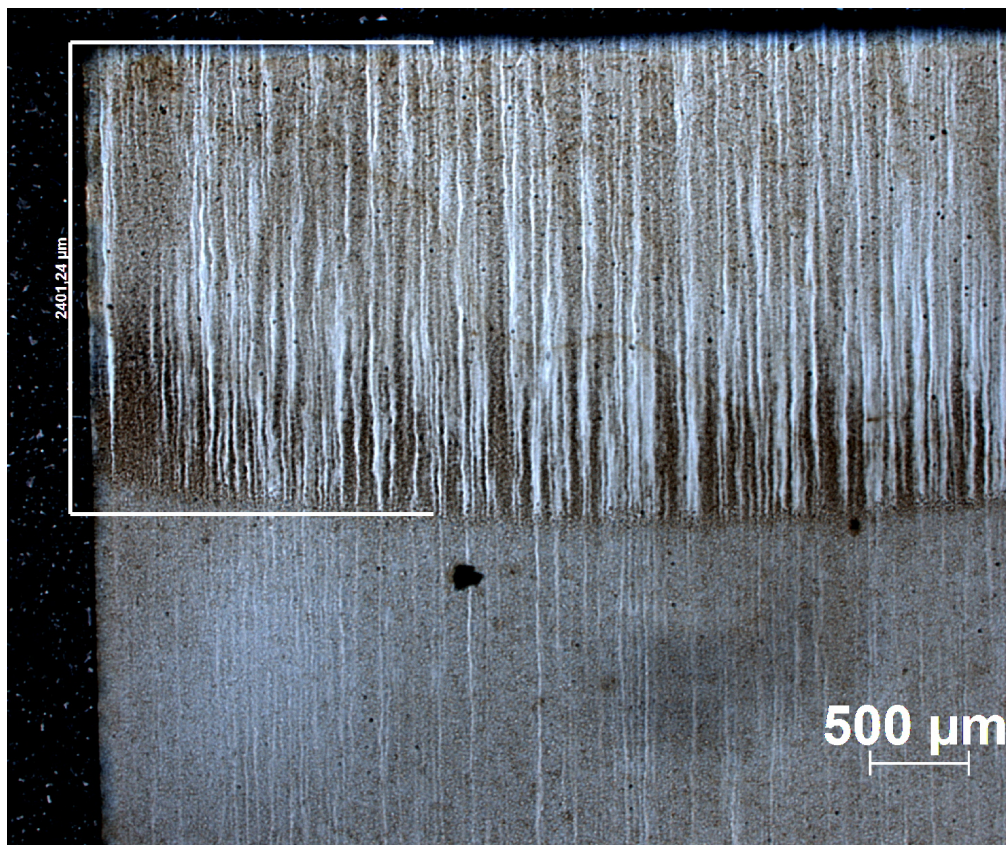
Obrázek 12 - Vzorek S, zvětšení 25x, vrstva. Vlastní.



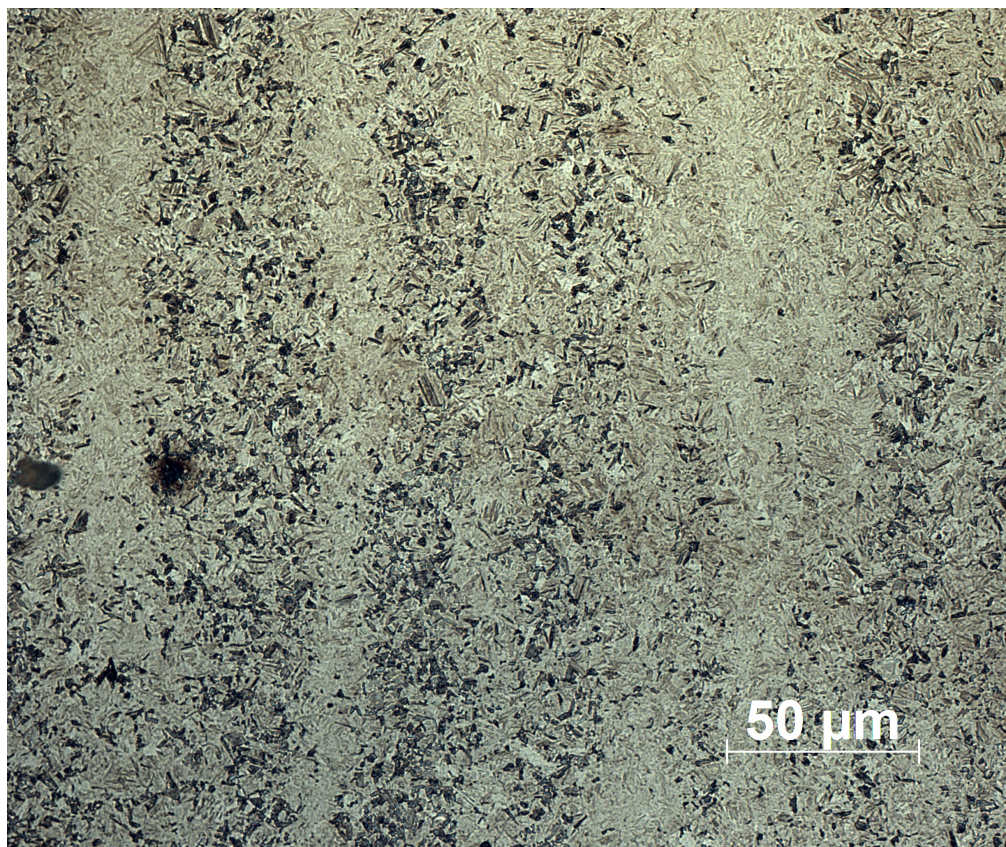
Obrázek 13 - Vzorek S, zvětšení 500x, struktura vrstvy. Vlastní.



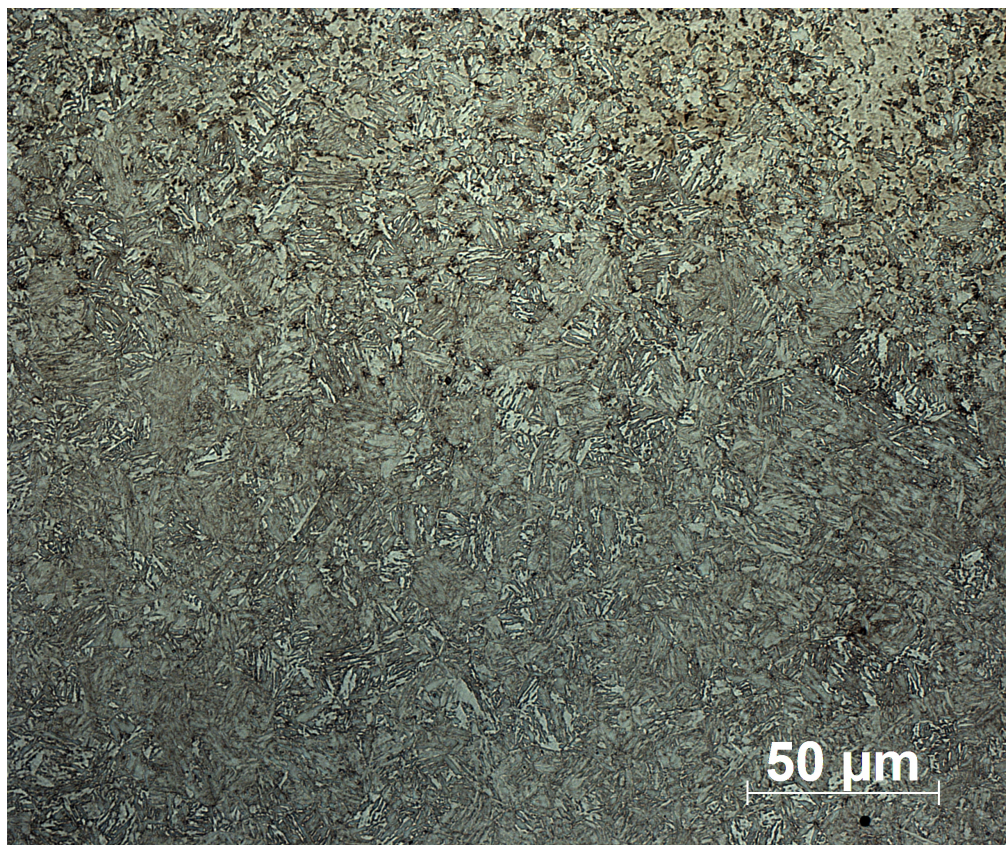
Obrázek 14 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura ve středu vzorku, tzn. struktura ZM. Vlastní.



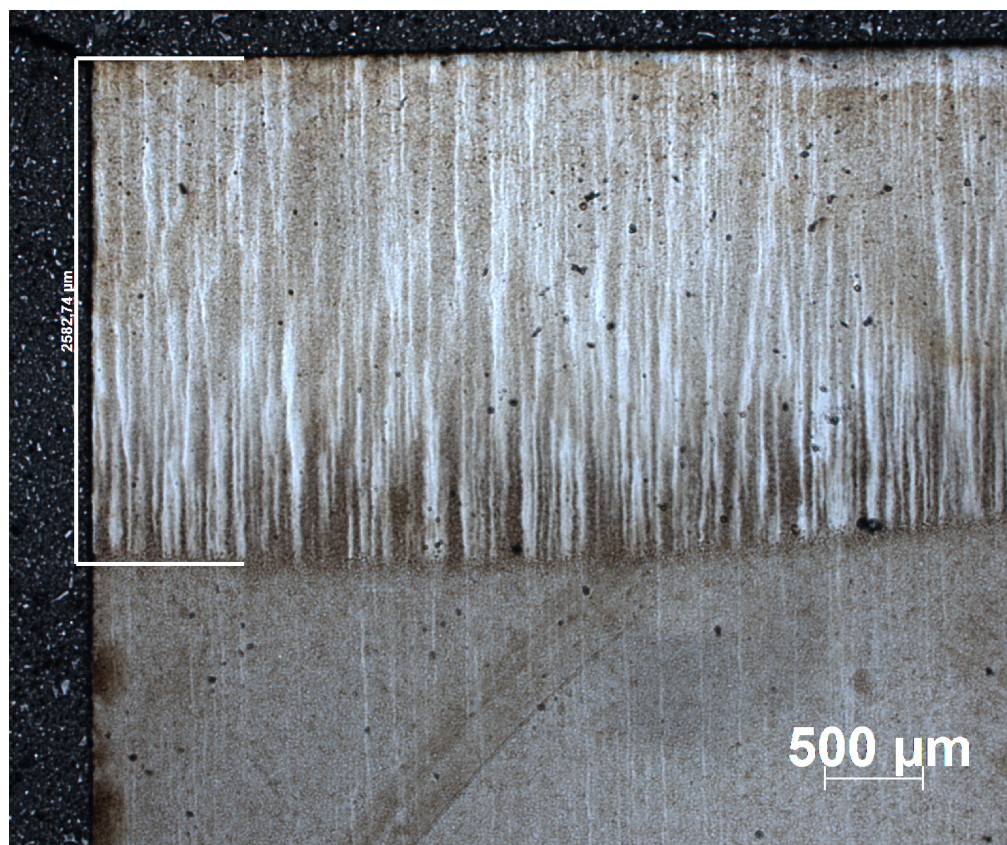
Obrázek 15 - Vzorek L-S, zvětšení 25x, vrstva. Vlastní.



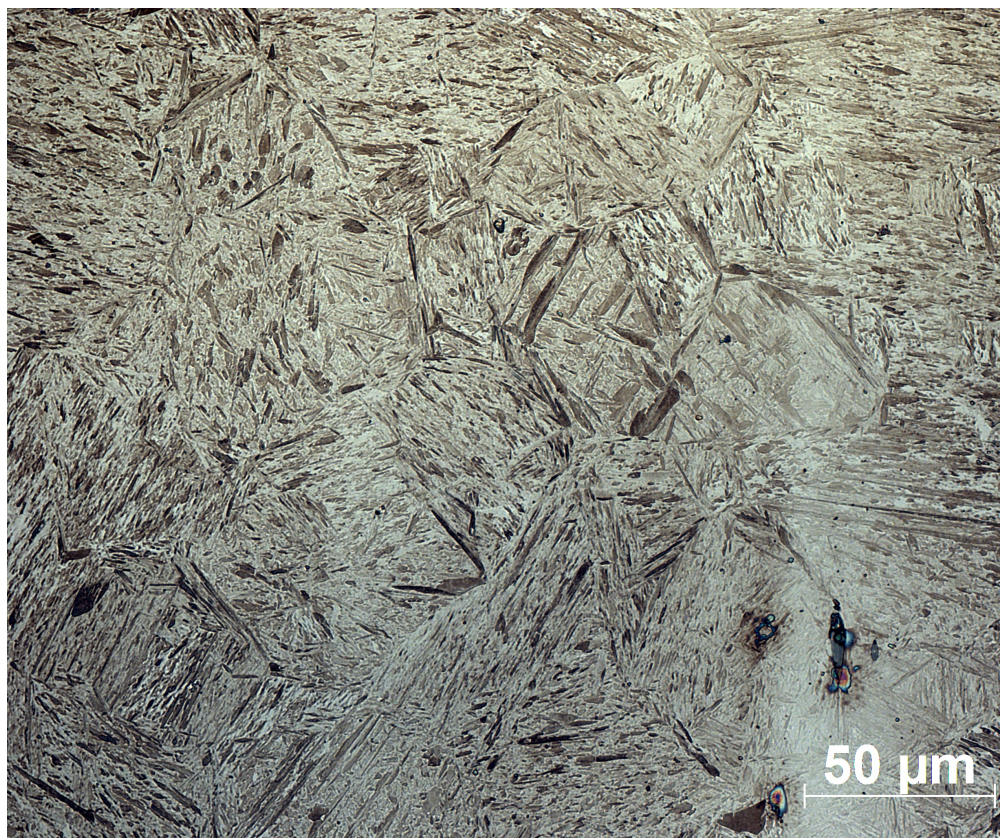
Obrázek 16 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura vrstvy. Vlastní.



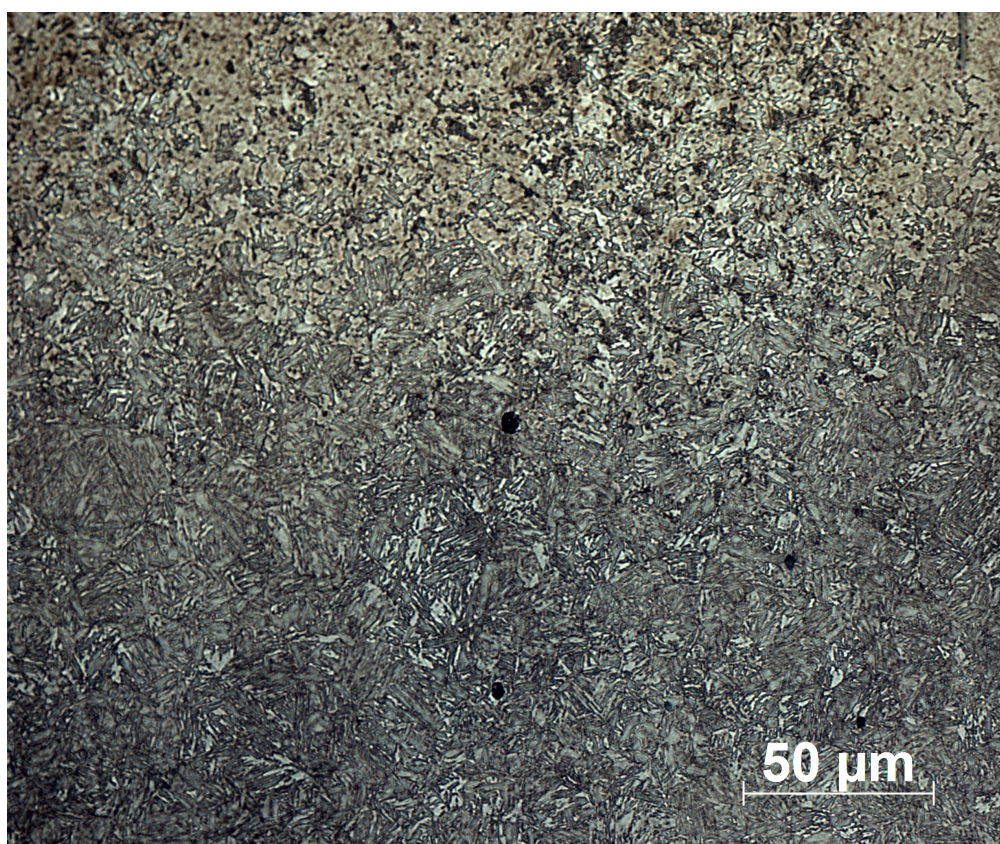
Obrázek 17 - Vzorek L-S, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu. Vlastní.



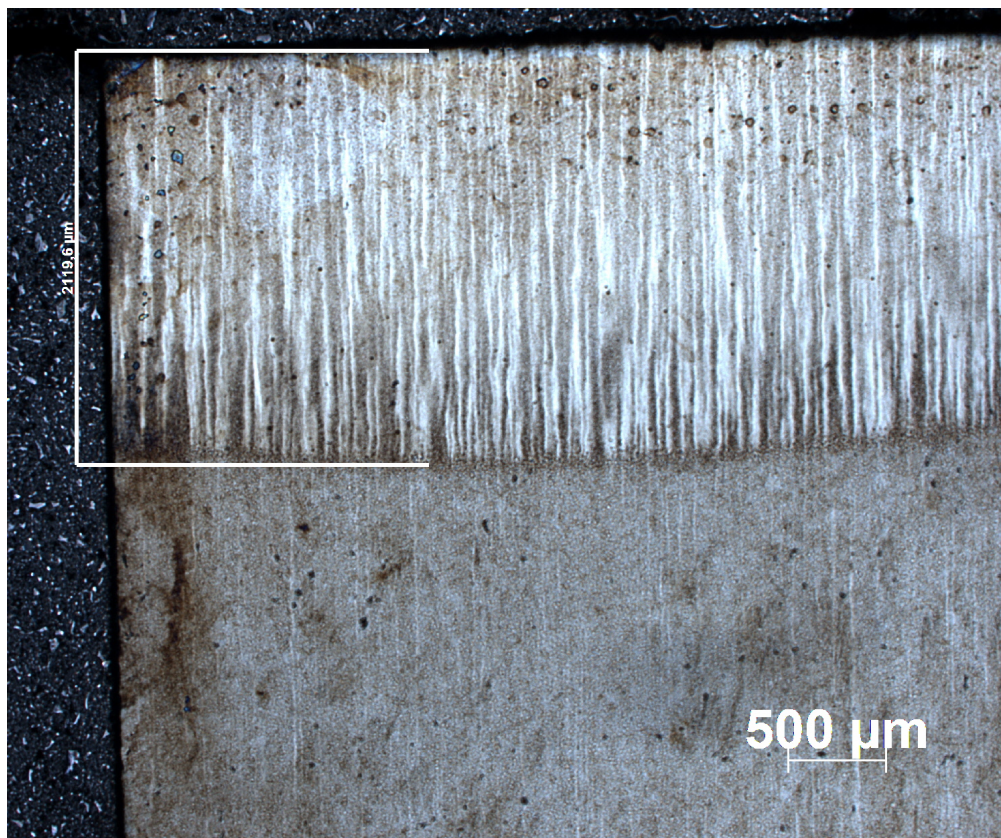
Obrázek 18 - Vzorek L, zvětšení 25x, vrstva. Vlastní.



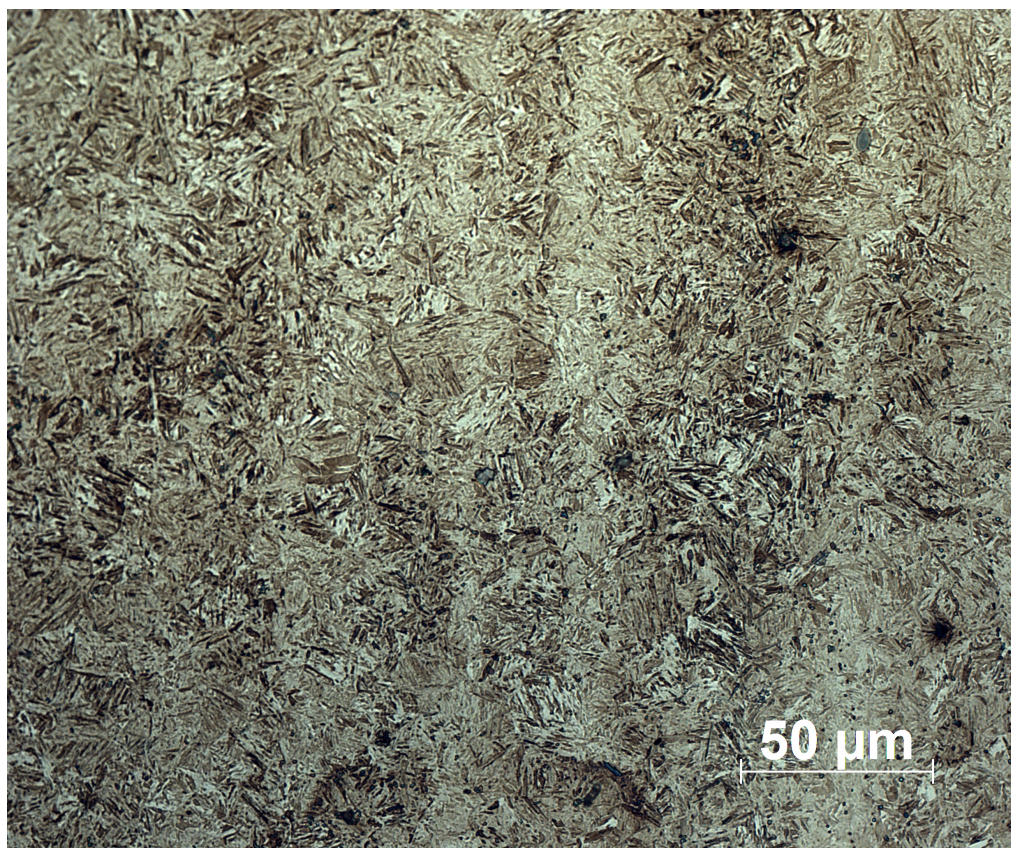
Obrázek 19 - Vzorek L, zvětšení 500x, struktura vrstvy. Vlastní.



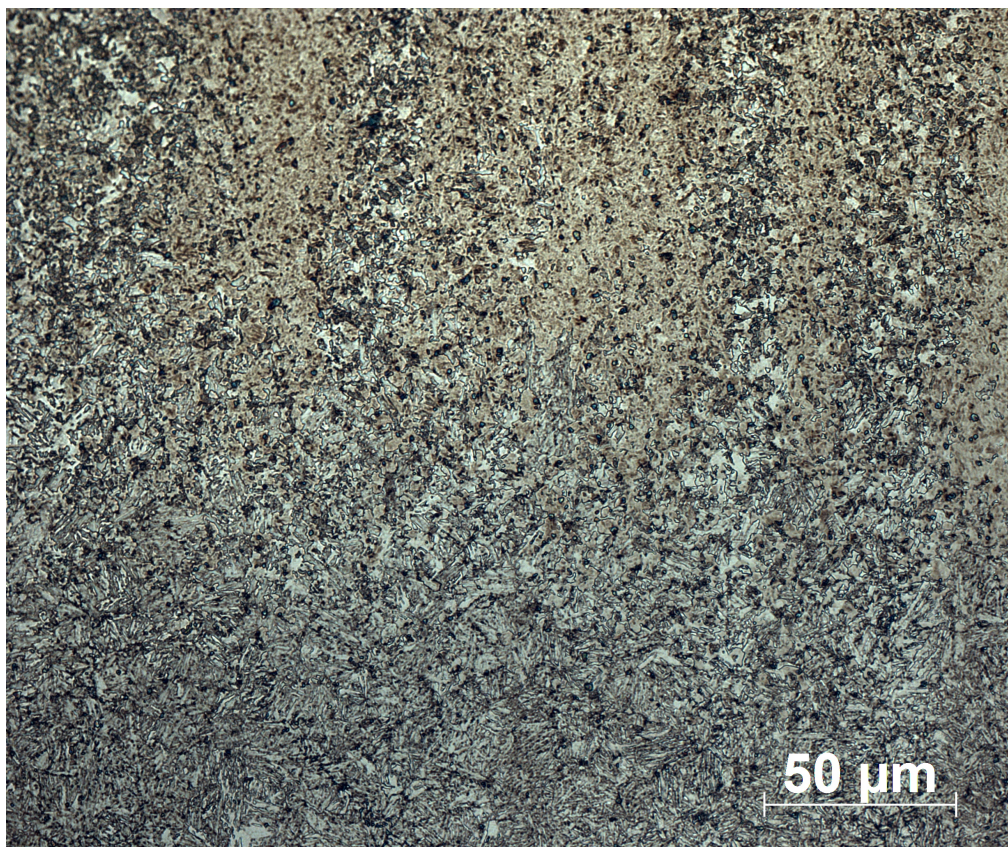
Obrázek 20 - Vzorek L, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu Vlastní.



Obrázek 21 - Vzorek S-L, zvětšení 25x, vrstva. Vlastní.



Obrázek 22 - Vzorek S-L, zvětšení 500x, struktura přechodu vrstvy-středu. Vlastní.

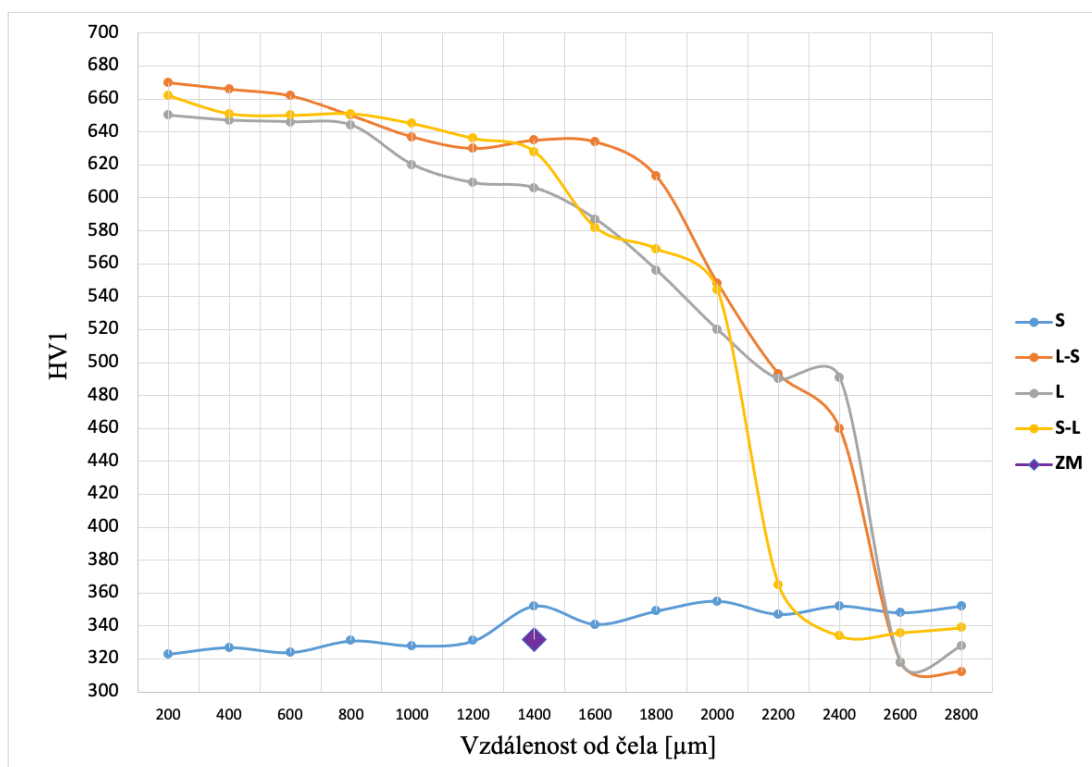


Obrázek 23 - Vzorek SL, zvětšení 500x, struktura vrstvy. Vlastní.

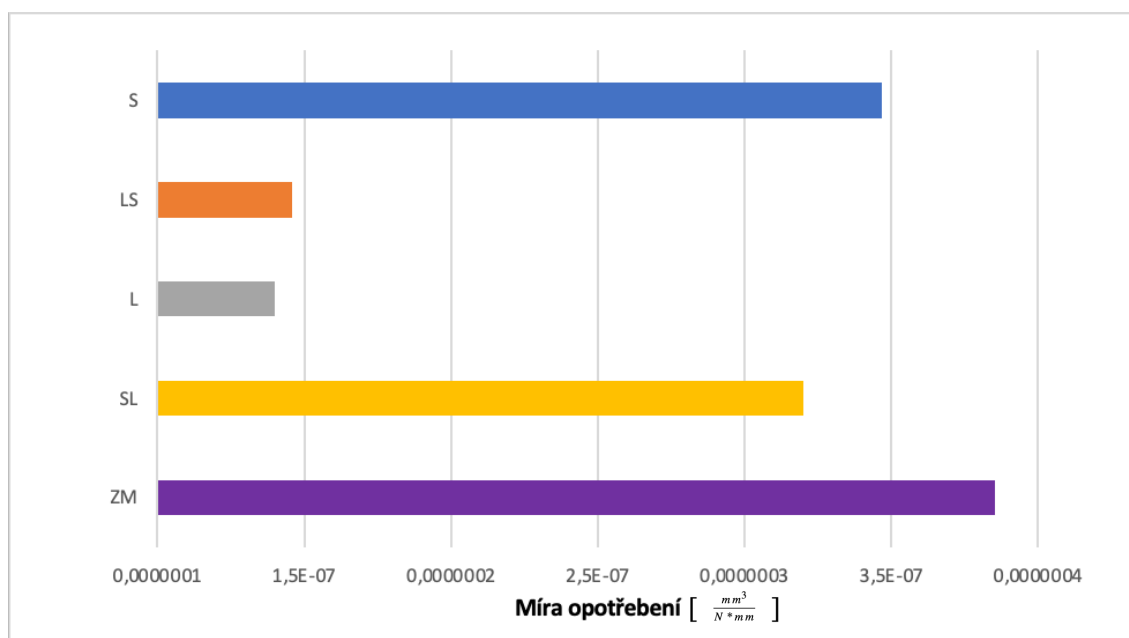
Následující *Graf 2* znázorňuje průběhy tvrdostí na testovaných vzorcích. Hodnota tvrdosti základního materiálu byla stanovena na 332 ± 12 HV1, v *Grafu 2* je tato hodnota znázorněna fialovým bodem. U všech tří kalených vzorků dosahovala tvrdost velmi vysokých hodnot. Překvapivě nejvyšších hodnot dosahoval vzorek L-S. Ve vzdálenosti 0,2 mm od rozhraní povrchu byla hodnota tvrdosti 670 ± 34 HV1. Tento fakt přispívá k předešlé domněnce o možné synergii těchto dvou technologií při jejich použití v této kombinaci. Vzorek S-L dosáhl ve stejné vzdálenosti hodnoty 662 ± 33 HV1. Vzorek L vykazoval u povrchu tvrdost 660 ± 33 HV1. Tyto mírně nižší tvrdosti (oproti vzorku L-S) mohou být způsobeny oduhličenou vrstvou vlivem kalení. Dle očekávání nebyla u vzorku S ovlivněna tvrdost, naopak výsledky poukazují na mírný pokles tvrdosti u povrchu materiálu. Průměrná hodnota naměřená na vzorku S byla 340 ± 14 HV1.

Kompletní naměřené hodnoty tvrdosti tvoří Přílohy 2 - 6 této práce.

Graf 2 - Průběhy tvrdosti. Vlastní.

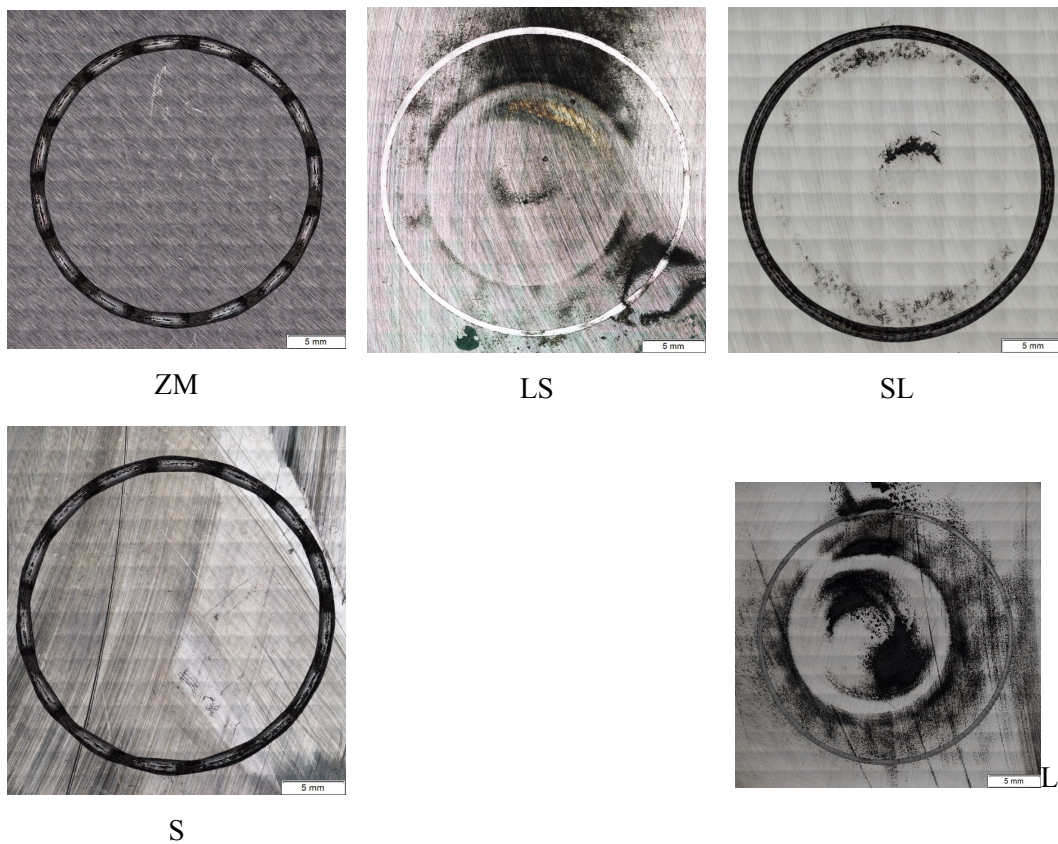


Míra opotřebení byla vyhodnocena metodou objemu drážky popsanou výše. Naměřené hodnoty, které vstupují do výpočtu míry opotřebení tvoří Přílohu 7 této práce. Dle očekávání byla nejvyšší míra opotřebení na základním materiálu. Metoda laser shock peening ovlivnila míru opotřebení dle očekávání jen minimálně. Nepatrně nižší míra opotřebení, oproti vzorku ZM a S, pak vyšla u vzorku S-L. Vzhledem k tomu, že míru opotřebení ovlivňuje hodnota tvrdosti, bylo u tohoto vzorku očekáváno nižší míry opotřebení, ale pravděpodobně vlivem oduhlíčení vrstvy tohoto vzorku a nižším hodnotám tlakového zbytkového pnutí došlo i k poklesu odolnosti proti opotřebení. Vzorky L-S a L vykazují po tribologické zkoušce relativně nízké hodnoty míry opotřebení, tak jak bylo očekáváno. Nejnižší hodnoty dosahuje pouze kalený vzorek ($1,40014 \cdot 10^{-7} \left[\frac{mm^3}{N \cdot mm} \right]$). Vzorek L-S vykázal jen mírně vyšší hodnotu ($1,45632 \cdot 10^{-7} \left[\frac{mm^3}{N \cdot mm} \right]$), což opět napovídá pozitivnímu vlivu této kombinace technologií. Tyto vzorky (L-S a L) vykazují o více jak 50 % lepší odolnost proti opotřebení oproti vzorkům S a S-L, což je pravděpodobně způsobeno vysokou tvrdostí u vzorku L a kombinací tvrdosti a tlakového pnutí u S-L vzorku.



Graf 3 - Míra opotřebení. Vlastní.

Obrázek 24 ukazuje výslednou drážku po tribologické zkoušce.



Obrázek 24 - Stopa na povrchu vzorků po analýze pin on disc. Vlastní.

5. Závěry

1. Nejvyšší hodnoty tlakového zbytkového pnutí dosahoval vzorek, který byl laserově zakalen a následně shock peeningován.
2. Dle očekávání dosahoval nejnižších hodnot tlakového zbytkového pnutí vzorek L.
3. Vzorek S vykazoval konstantních hodnot tlakového zbytkového pnutí v celé měřené hloubce.
4. Zbytkové pnutí v povrchové vrstvě u vzorku S-L a L bylo negativně ovlivněno vlivem oduhličení vrstvy.
5. Z metalografického hlediska tvoří základní materiál popuštěná martenzitická struktura.
6. Laserovým kalením vzniklo v povrchové vrstvě hrubší austenitické zrna.
7. Nejvyšší hloubka ovlivněné vrstvy byla zaznamenána u vzorku L.
8. Vliv laser shock peeningu nebylo možné hodnotit, vzhledem k tomu, že nebyla metalografie provedena na transmisním elektronovém mikroskopu, ale na světelném mikroskopu.
9. Nejvyšších tvrdostí dosahovaly vzorky, které byly zpracovány kombinacemi technologií.
10. LSP neprokázal zásadní vliv na změnu tvrdosti.
11. Vzorky S-L a S vykazovaly vysoké míry opotřebení.
12. Vzorek L vykazoval nejnižší míru opotřebení, podobně jako vzorek L-S.
13. Výsledky poukazují na možnou synergii těchto technologií, za předpokladu použití v pořadí: 1. LSP, 2. laserové kalení.
14. Cíle práce byly splněny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KLEPPNER, Daniel. Rereading Einstein on Radiation. *Physics Today* [online]. 2005, **58**(2), 30-33 [cit. 15.05.2023]. ISSN 0031-9228. Dostupné z: doi:10.1063/1.1897520
- [2] *Statistical Mechanics with Applications to Physics and Chemistry*. *Nature* [online]. 1928, **121**(3048), 492-493 [cit. 15.05.2023]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/121492a0
- [3] TOWNES, C. H. THE LASER — WHAT IT IS AND HOW IT HAPPENED. *International Journal of Modern Physics B* [online]. 2012, **16**(31), 4655-4664 [cit. 15.05.2023]. ISSN 0217-9792. Dostupné z: doi:10.1142/S0217979202014966 -
- [4] BERNARD, Vladan, Laser a jeho aplikace v medicíně. [online] 2017, [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/med/jaro2018/MPPT081/um/laser.pdf>
- [5] Leonardo technology s.r.o., Možné dělení typů a druhů laserů. [online] ©2002. [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
- [6] Leonardo technology s.r.o., Historie vývoje laseru. [online] ©2002 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
- [7] KACHTÍK, Lukáš. Lasery.wz. [online] ©2011 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <http://lasery.wz.cz/soucasti.html>
- [8] HAVRÁNEK, Miroslav. Nejmenší polovodičový laser na světě. [Obrázek] AGA (Aldebaran Group for Astrophysics). [online] 2009, **7**(45), 7. ISSN 1214-1674. [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_45_las.php
- [9] ŠIMEK, Petr. Interferometrie - měření světlem. Institute of Scientific instruments, ACADEMY OF SCIENCES OF THE CZECH REPUBLIC. [online], [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/amp/2004999/>
- [10] SCHAEFFER, Ronald. *Fundamentals of Laser Micromachining*. [online]. CRC Press, 2016 [cit. 15.05.2023]. ISBN 9780429065194. Dostupné z: doi:10.1201/b11881
- [11] NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi [online]. *MM Průmyslové spektrum*. ©2001 [cit. 15.05.2023]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
- [12] MARTÍNEZ-CONDE, Alejandro, Thomas KRENKE, Stephan FRYBORT a Ulrich MÜLLER. [obrázek]. Review: Comparative analysis of CO2 laser and conventional sawing for cutting of lumber and wood-based materials. *Wood Science and Technology* [online]. 2017, **51**(4), 943-966 [cit. 15.05.2023]. ISSN 0043-7719. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-017-0914-9
- [13] Rozdělení laserů. *LASCAM* [online]. 2015 [cit. 16.05.2023]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
- [14] ZRNÍK, Jozef, Libor KRAUS, Tasilo PRNKA, Karel Šperlink. *Evropská strategie výrobních procesů*. Ostrava: Repronis, 2007. ISBN 978-80-7329-153-2.

- [15] MÁDL, Jan. Technologie obrábění. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02-091-6.
- [16] KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [17] ŠINÁGL, Viktor. Návrh trysky pro vysokotlaké tryskání, Praha 2020 [cit. 16.05.2023]. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta strojní. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/89527/F2-BP-2020-Sinagl-Viktor-Sinagl%20BP%20Navrh%20trysky%20pro%20vysokotlake%20tryskani%20vodnim%20paprskem.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [18] HOŠKOVÁ, Eliška. Princip a konstrukce nástrojů pro válečkování, Brno 2012 [cit. 16.05.2023]. Bakalářská práce. VUT, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30292721.pdf>
- [19] BAJER, Jan. Vliv metody laser shock processing na integritu povrchu. Praha 2018 [cit. 16.05.2023]. Disertační práce. ČVUT, Fakulta strojní. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10467/79047>
- [20] 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. 16.05.2023]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma7127925
- [21] MONTROSS, C. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. International Journal of Fatigue [online]. 24(10), 1021-1036 [cit. 16.05.2023]. ISSN 01421123. Dostupné z: doi:10.1016/S0142-1123(02)00022-1
- [22] KAUFMAN, Jan. Influence of Laser Shock Peening on corrosion resistance and stress corrosion cracking, Prague 2022. [cit. 16.05.2023]. Doctoral thesis. ČVUT, Faculty of nuclear sciences and physical engineering. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/106798>
- [23] SKOPEC, Martin. Zpevnování kovových materiálů metodou Laser Shock Peening (LSP). Plzeň 2020 [cit. 17.05.2023]. Diplomová práce. ZČU, Fakulta strojní. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41645/1/Diplomova%20prace_Martin%20Skopec.pdf
- [24] KRAUS, Václav. Tepelné zpracování a slinování. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-582-0.
- [25] KORECKÝ, Jan. Kalení oceli: pomůcka k výcviku kaličů v průmyslu : s přehledem tepelného zpracování 160 československých ocelí. 2. vydání. Praha: Práce, 1951. Technické příručky Práce.
- [26] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. Tepelné zpracování kovových materiálů. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04186-4.
- [27] BABU, P. Dinesh, K.R. BALASUBRAMANIAN a G. BUVANASHEKARAN. Laser surface hardening: a review. International Journal of Surface Science and Engineering [online]. 2011, 5(2/3) [cit. 17.05.2023]. ISSN 1749-785X. Dostupné z: doi:10.1504/IJSURFSE.2011.041398

- [28] ŠKORPÍK, Josef. Geometrie a materiály lopatkových strojů, Transformační technologie [online]. Brno 2009-10 [poslední změna 19.11.2019], [cit. 17.05.2023]. Dostupné z: https://www.transformacni-technologie.cz/15_geometrie-lopatkovych-stroju_1-cast.pdf
- [29] MATOUŠ, Pavel, Obrábění pro energetický průmysl - Komponenty parních turbín. Plzeň 2012 [cit. 17.05.2023]. Bakalářská práce. ZČU, Fakulta strojní. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/2597/1/BP11-12_MATOUS_Obrabeni_pro_energeticky_prumysl.pdf
- [30] Bolzano, Přehled vlastností ocelí 42CrMo4. [online] ©2020 Bohdan Bolzano, s.r.o. [cit. 17.05.2023]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-42crmo4>
- [31] KRAUS, Ivo a Nikolaj GANEV. Technické aplikace difrakční analýzy. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03099-7.
- [32] BEČKA, Jan. Tribologie. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
- [33] KRÍŽ, Antonín. Tribologická analýza PIN-ON-DISC. Metal 2014, 8s. [cit. 18.05.2023]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/38869688-Tribologicka-analyza-pin-on-disc-pin-on-disc-tribological-test-antonin-kriz.html>
- [34] ČSN EN 10027-1. Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli. Účinnost od 1.11.2017. Praha: Český normalizační institut, 2017. 25s. 42 0011
- [35] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. Účinnost od 01. 09. 2018. Praha: Český normalizační institut, 2018. 32s. 42 0374

Přílohy

Příloha 1 - Velikosti úběru materiálu a specifikace elektrochemického leštění vzorků.

Vzorek	Po:	Výška [mm]	[V]/[s]	Napětí [Mpa]	Průměr
S	1. měření	24,727	-	-463.0 ± 27.0	
	1. leštění	24,684	40/60	-484.6 ± 27.2	
	2. leštění	24,368	40/260	-459.9 ± 9.4	
	3. leštění	24,150	40/300	-456.5 ± 13.9	
	4. leštění	23,998	40/540	-421.2 ± 7.9	
LS	1. měření	24,839	-	-1086.6 ± 71.7	
	1. leštění	24,760	40/120	-493.3 ± 45.5	
	2. leštění	24,624	40/540	-925.5 ± 32.8	
	3. leštění	24,326	40/360+20/360+8/60+40/60	-483.9 ± 17.4	
	4. leštění	24,177	40/700	-427.7 ± 40.8	
L	1. měření	24,886	-	-63,3 ± 112,6	-63,33
				-32,6 ± 41,2	
				-94,1 ± 75,1	
	1. leštění	24,673	40/360	-410.8 ± 41.9	
	2. leštění	24,445	40/360	-277.1 ± 61.1	
	3. leštění	24,330	20/480+40/120	-260.4 ± 199.9	
	4. leštění	24,207	40/440	-224.9 ± 110.0	
SL	1. měření	24,962	-	-117.2 ± 194.4	-124,27
				-163 ± 40,1	
				-92,6 ± 79,2	
	1. leštění	24,839	40/360	-403.2 ± 55.7	
	2. leštění	24,661	40/720 + 20/360 + 40/300	-403.2 ± 55.7	
	3. leštění	24,520	8/120 + 31/360 + 29/580	-342.9 ± 46.2	
	4. leštění	24,312	40/700	-326.8 ± 51.4	
ZM	Pouze první měření - na povrchu			-314,0 ± 82,7	-404,8
				-408,2 ± 61,2	
				-418,4 ± 22,8	
				478.6 ± 32.1	

Příloha 2 - Hodnoty tvrdosti základního materiálu.

Měření	HV1	ZM
		Průměr HV1 ($\bar{x} = x_i/n$)
1.	326	332
2.	331	
3.	338	

\bar{x} = aritmetický průměr

X_i = součet hodnot

n = počet hodnot

Příloha 3 - Hodnoty tvrdosti S vzorku.

Vzorek	S	
Měření	Vzdálenost od čela [μm]	HV1
1.	200	323
2.	400	327
3.	600	324
4.	800	331
5.	1000	328
6.	1200	331
7.	1400	352
8.	1600	341
9.	1800	349
10.	2000	355
11.	2200	347
12.	2400	352
13.	2600	348
14.	2800	352

Příloha 4 - Hodnoty tvrdosti L-S vzorku.

Vzorek	L-S	
Měření	Vzdálenost od čela [μm]	HV1
1.	200	670
2.	400	666
3.	600	662
4.	800	650
5.	1000	637
6.	1200	630
7.	1400	635
8.	1600	634
9.	1800	613
10.	2000	548
11.	2200	493
12.	2400	460
13.	2600	318
14.	2800	312

Příloha 5 - Hodnoty tvrdosti L vzorku.

Vzorek	L	
Měření	Vzdálenost od čela [μm]	HV1
1.	200	650
2.	400	647
3.	600	646
4.	800	644
5.	1000	620
6.	1200	609
7.	1400	606
8.	1600	587
9.	1800	556
10.	2000	520
11.	2200	490
12.	2400	491
13.	2600	318
14.	2800	328

Příloha 6 - Hodnoty tvrdosti S-L vzorku.

Vzorek	S-L	
Měření	Vzdálenost od čela [μm]	HV1
1.	200	662
2.	400	651
3.	600	624
4.	800	651
5.	1000	645
6.	1200	636
7.	1400	628
8.	1600	582
9.	1800	569
10.	2000	544
11.	2200	365
12.	2400	334
13.	2600	336
14.	2800	339

Příloha 7 - Naměřené hodnoty metodou objemu drážky.

Úhel měření [°]	Šířka drážky [μm]				
	Vzorek S	Vzorek L-S	Vzorek L	Vzorek S-L	ZM
0	1338,52	495,4	526,36	1217,86	1452,66
45	1225	492,1	512,78	1173,34	1438,65
90	1294,51	526,56	514,56	1128,06	1253,22
135	1352,85	507,67	517,21	1074,97	1349,17
180	1347,62	603,03	523,02	1117,6	1321,23
225	1159,32	585,33	478	1163,06	1450,02
270	1235,99	502,43	464,77	1163,31	1430,69
315	1030,11	481,7	495,71	1174,78	1403
Průměrná šířka drážky [μm]	1247,99	524,2775	504,05125	1151,6225	1387,33
Odebraný objem [mm³]	2,7226918	1,1437961	1,0996692	2,5124506	3,0266845
Míra opotřebení [mm³ / (N*mm)]	3,46663*10 ⁻⁷	1,45632*10 ⁻⁷	1,40014*10 ⁻⁷	3,19894*10 ⁻⁷	3,85369*10 ⁻⁷